第２回

地質リスクマネジメント
事例研究発表会
講演論文集

平成２３年１０月２１日（金）

主催：地質リスク学会　／　(社)全国地質調査業協会連合会
後援：国土交通省国土技術政策総合研究所
協賛：独立行政法人土木研究所、独立行政法人産業技術総合研究所、公益社団法人地盤工学会関東支部

はじめに
地質リスクマネジメント事例研究の決意

第二回の地質リスク事例研究発表会に対して、昨年以上に多くの事例研究が集まり、喜びに堪えません。

投稿・発表して頂く皆さまの勇気とご努力に心から感謝申し上げます。

福島第一原子力発電所の事故発生後、福島県から小さな赤ちゃんを抱きながら、さいたまスーパーアリーナに避難されていた 20 代の女性から、「ここには片道切符で来ました・・・。」との言葉を聴きました。県内に留まれば、子どもが被ばくするリスクを負います。県外に避難すれば、いつ福島に戻ることができるかは分かりません。避難している人々は、極限の状況で判断し行動しています。これまでリスクを小さくする方法を研究してきたつもりでしたが、この方のリスク低減に全く貢献出来ない自分を申し訳ないと思った次第です。

日本の「復旧・復興」では、現状を表す情報を迅速に公開し、民間の最先端技術を適用出来る仕組みを作って問題を緩和することによって、ぎりぎりの判断・行動を余儀なくされている住民を全力で支え合うことが必要であると思います。

これまでの社会資本整備事業において、公共発注者、民間企業者、NPO など多くの関係者が、人々の不安や不満を解消・解決するために大変な努力を重ねてきました。しかし、「くらしの片道切符」を買わざるを得なくなってしまったリスクは、誰にも予想できなかったのではないでしょうか。今後とも私たちの安全・安心を確保するためには、真に効果的な事業を効率的に実施することが、今まで以上に求められています。そのためには、その事業にはどんなリスク要因があるのか、それはどのような影響を及ぼすのかを分析し、各リスク要因にどう対応すべきかを検討して、民間企業は勿論、他の行政組織や住民と共同してリスクをマネジメントしていく必要があると思います。

「地質リスクマネジメント学」は、今後の社会資本整備事業のリスクマネジメントにおいて、極めて重要な役割を果たすことが出来ると確信しています。限られた事業予算の中で、自然と共生しつつ、その脅威から私たちの暮らしを守っていくために、人々の安全確保は勿論、個々の住宅・施設、その地区・地域の安全性向上と資産価値上昇に貢献したいと思います。そのためには、①公共発注者側は、自然や住民の声を聴き合いながら、事業のコスト、工期、品質、安全などの目標を立て、それらを達成できる地質リスクマネジメントの手法を検討・立案し、目標が達成されたか否かを確認し、未達成の場合はその原因を明らかにし、改善するマネジメントサイクルを構築する。これによって、自身の意欲・能力を向上させ、事業目標の達成状況を改善する、②それを自分の組織や業界のみならず、

利用者、住民、国民と共有する。これによって、これらの主体が、完全にはマネジメント出来ない地質リスクが存在することを理解し、出来る範囲でそれを個々に負担する努力をする「公共リスクマネジメント」の仕組みを構築していく必要があるのではないでしょうか。これらの公共リスクマネジメントサイクルは、社会資本整備事業のリスクマネジメントにおける有力なモデルの一つになると思います。

片道切符で避難せざるを得なかった人々が、安心して往復切符を買うことが出来る社会を一刻も早く取り戻したいと思います。この国の「復興」が求められている今、私たちが様々なリスクの中で生きていくためには、まさに、お互いに聴き合い、責任をつくり果たしていく必要があります。地質リスク事例研究は、そのさきがけになることを確信しています。

「失敗」を冷静に見つめ直そうとする事例研究の投稿・発表までには、幾多の困難があったと思います。本学会は、その困難を乗り越えようとする各会員の勇気とご努力を、全ての会員と共有し、前に進んで行きたいと思います。

皆さまの益々のご健勝とご多幸を心よりお祈り申し上げます。

ありがとうございました。

平成２３年１０月２１日
地質リスク学会
会　長　渡　邊　法　美

第２回地質リスクマネジメント事例研究発表会
講演論文集　目次

第Ⅰ部　プログラム ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

第Ⅱ部　事例研究発表会　論文

論文No.1　今村　純　（株）シアテック
盛土による地盤破壊対策のコスト低減策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

論文No.2　宮腰　寧崇　長野県諏訪建設事務所整備課
長野県急傾斜地崩壊対策事業における地質リスクマネジメント事例について ・・・・ 7

論文No.3　原　重守　（株）淞南ダイア
グラウンドアンカー工における確実な定着体造成位置の評価・決定 ・・・・・・・・・ 13
－見えるものは全て見る―

論文No.4　寺井　康文　大地コンサルタント（株）
切土法面の植生工における地質リスクとコスト縮減の試み ・・・・・・・・・・・・・ 19

論文No.5　植松　聡　明治コンサルタント（株）
礫層を主体とした地すべり地における集水井施工時の変状と対策 ・・・・・・・・・・ 25

論文No.6　大竹　雄　岐阜大学
木曽川用水路の液状化対策におけるコスト縮減とリスクマネジメントの試み ・・・・ 30

論文No.7　笠原　健司　(株)朝日土質設計コンサルタント
標準勾配で切土した岩盤法面の崩壊事例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37

論文No.8　福田　光治　熊本地盤情報評価機構
熊本における地盤リスクのポテンシャルとその回避 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 43

論文No.9　吉村　辰朗　復建調査設計（株）九州支社
破砕帯に起因する地質リスクを予測した事例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 50

論文No.10　熱田　真一　大成基礎設計（株）
建設工事における迅速分析法を用いた重金属等の地質リスク管理事例 ・・・・・・・・ 54

論文No.11　西田　宣一　復建調査設計（株）　地盤環境部
軟弱地盤上の大規模土地造成事業における動態観測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 60

論文No.12　岡島　尚司　（株）サンワコン
安価な監視機器を用いた斜面安定管理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 66

論文No.13　高　豪　（株）新協地質
ボ-リングコア再見直しによる設計条件誤りの回避 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72

論文No.14　金沢　淳　川崎地質（株）
断層破砕帯における押し出しリスク低減のための事例分析 ・・・・・・・・・・・・・ 78

論文No.15　安井　成豊　（社）日本建設機械化協会　施工技術総合研究所
一級河川安永川トンネル新設工事(水源工区)におけるCM方式の活用 ・・・・・・・・ 83

論文No.16　稲垣　秀輝　（株）環境地質
法と社会システムから見た地盤リスク ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 89

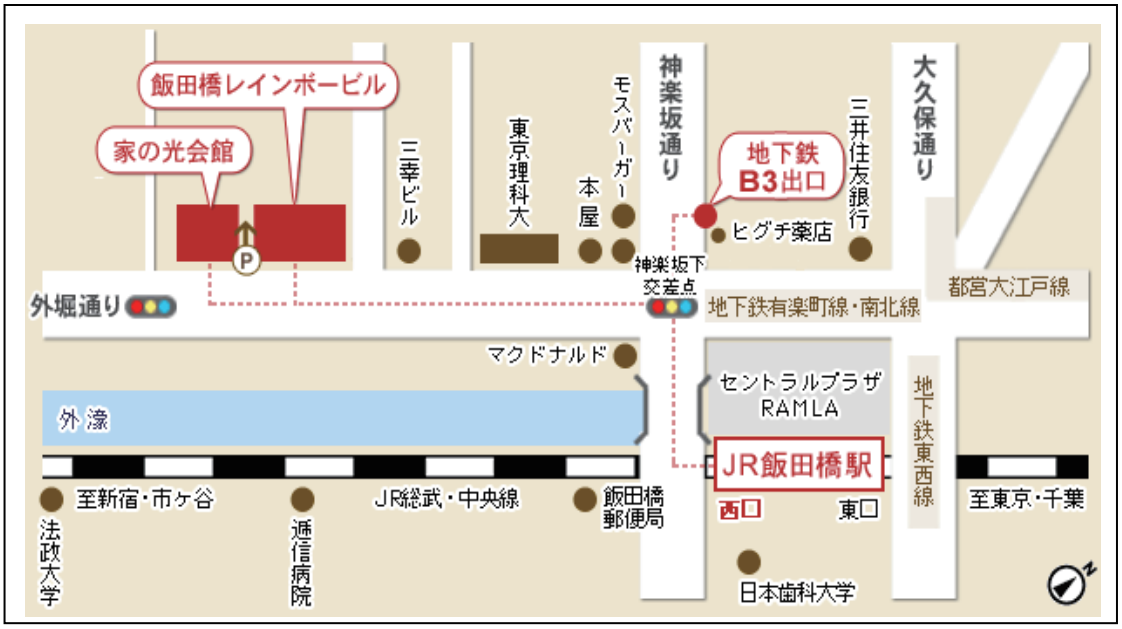
論文 No.17　　尾上　秀司　応用地質（株）福島支店
国道 400 号で発生した落石災害に対する対応について　・・・・・・・・・・・・・・・・ 96
論文 No.18　　今岡　裕作　北陽技建（株）
地すべり初期安全率が有する不確かさの低減策とその効果検証　・・・・・・・・・・・102
－臨界水位特定による過大設計リスクの低減－
論文 No.19　　鴨井 幸彦　(株)興和
道路改良（線形変更）にともなう切土により，休眠していた
大規模地すべりが再活動した事例　・・・・・・・108
論文 No.20　　原　　勝重　新協地水（株）
用水管きょ敷設に伴う水道水源と天然記念物(沼野植物群落)保全事例　・・・・・・・・114
論文 No.21　　正岡　裕之　応用地質（株）
堤体腹付け盛土による近接家屋への影響予測事例　・・・・・・・・・・・・・・・・・120
論文 No.22　　杉山　直起　（株）ダイヤコンサルタント
土研式雨水曝露試験による掘削土のリスク評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・126
論文 No.23　　遠座　　昭　（株）建設技術研究所
高千穂峡の観光地としての管理と地質リスク　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・132
論文 No.24　　荒井　　正　（株）日さく　北信越支社
VOC s による土壌・地下水汚染調査・措置を地質リスクの観点より考察した事例　・・ 138
論文 No.25　　岡﨑　　修　明治コンサルタント（株）
カラム試験を用いた第三紀泥岩に含まれる重金属溶出特性の評価　・・・・・・・・・・144
～予想される重金属溶出量の過大評価を防ぐため～

第Ⅰ部　プログラム

第２回地質リスクマネジメント事例研究発表会

開　催　日：平成２３年１０月２１日（金）
共　　催：地質リスク学会　/　(社)全国地質調査業協会連合会
後　　援：国土交通省国土技術政策総合研究所
協　　賛：独立行政法人土木研究所、独立行政法人産業技術総合研究所、公益社団法人地盤工学会関東支部
開催趣旨：事例研究発表会の主な目的は、建設工事等における地質リスクのマネジメントの実例を紹介し、様々な課題を議論し共有することにあります。

開催場所：飯田橋レインボービル
東京都新宿区市谷船河原町１１番地

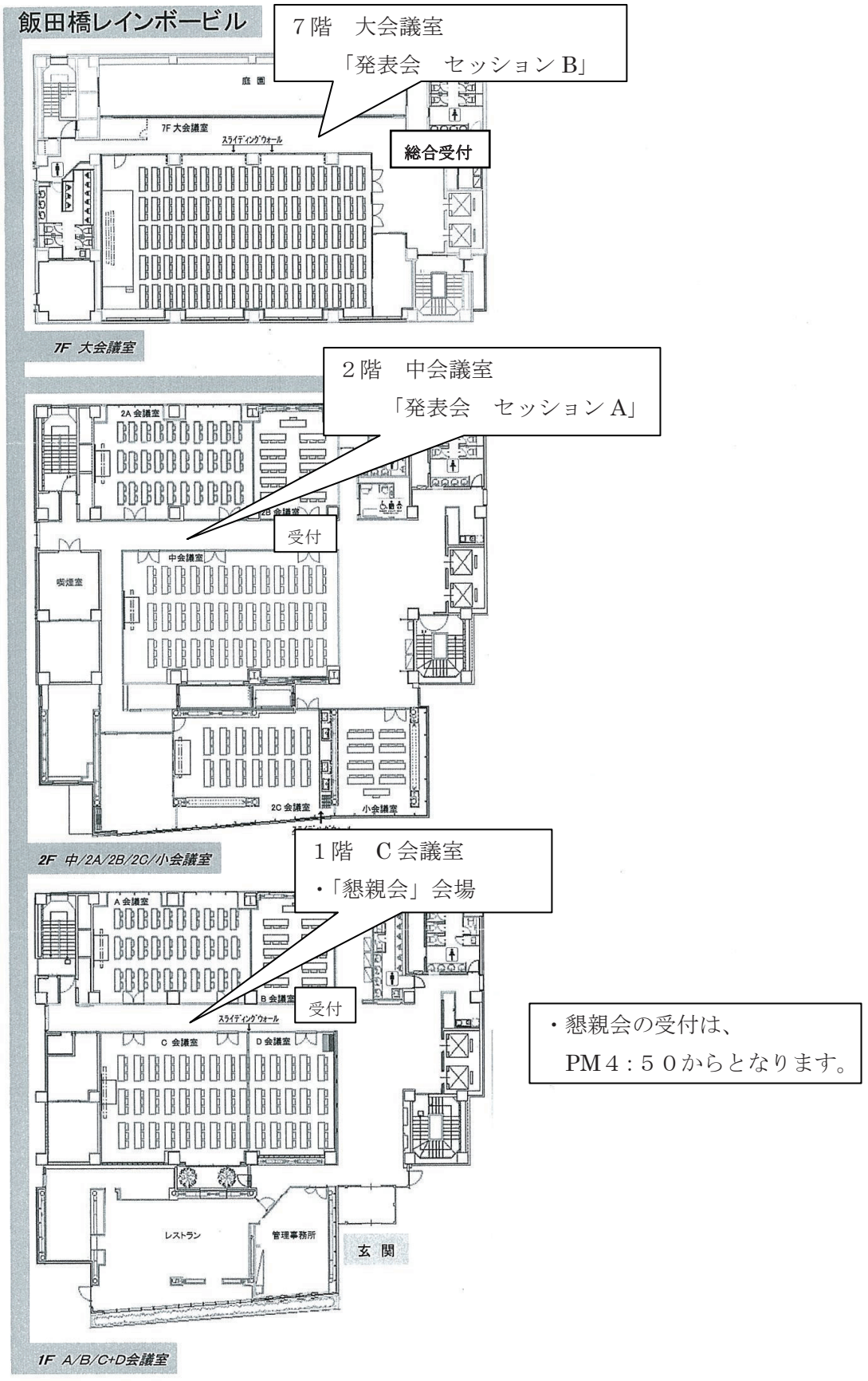


JR 総武線飯田橋駅西口または、
地下鉄有楽町線･南北線･東西線･大江戸線飯田橋駅の神楽坂下 B3 出口より徒歩約 5 分

・事例研究発表会（午後）
第２回地質リスクマネジメント事例研究発表会
13:00～16:50　（２５編）

・懇親会　　17:00～

[配置図]



・懇親会の受付は、
PM４：５０からとなります。

地質リスクマネジメント　事例研究発表内容一覧

セッション区分	論文No	口頭発表者	③所属先	題名	事例種類
	1	今村　　純	（株）シアテック	盛土による地盤破壊対策のコスト低減策	A型
セッションA-1	2	宮腰　寧崇	長野県諏訪建設事務所整備課	長野県急傾斜地崩壊対策事業における地質リスクマネジメント事例について	A型
2F 中会議室	3	原　　重守	（株）淞南ダイア	グラウンドアンカー工における確実な定着体造成位置の評価・決定　ー見えるものは全て見るー	A型
13:00～15:00	4	寺井　康文	大地コンサルタント（株）	土法面の植生工における地質リスクとコスト縮減の試み	A型
（7編）	5	植松　　聡	明治コンサルタント（株）	礫層を主体とした地すべり地における集水井施工時の変状と対策	C型
	6	大竹　　雄	岐阜大学	木曽川用水路の液状化対策におけるコスト縮減とリスクマネジメントの試み	A型
	7	笠原　健司	(株)朝日土質設計コンサルタント	標準勾配で切土した岩盤法面の崩壊事例	C型
	8	福田　光治	熊本地盤情報評価機構	熊本における地盤リスクのポテンシャルとその回避	D型
セッションA-2	9	吉村　辰朗	復建調査設計（株）九州支社	破砕帯に起因する地質リスクを予測した事例	D型
2F 中会議室	10	熱田　真一	大成基礎設計（株）	建設工事における迅速分析法を用いた重金属等の地質リスク管理事例	D型
15:10～16:50	11	西田　宣一	復建調査設計（株）　地盤環境部	軟弱地盤上の大規模土地造成事業における動態観測	A型
（6編）	12	岡島　尚司	（株）サンワコン	安価な監視機器を用いた斜面安定管理	D型
	13	高　　豪	（株）新協地質	ボーリングコア再見直しによる設計条件誤りの回避	A型
	14	金沢　　淳	川崎地質（株）	断層破砕帯における押し出しリスク低減のための事例分析	D型
セッションB-1	15	安井　成豊	（社）日本建設機械化協会 施工技術総合研究所	一級河川安永川トンネル新設工事(水源工区)におけるCM方式の活用	D型
7F　大会議室	16	稲垣　秀輝	（株）環境地質	法と社会システムから見た地盤リスク	D型
13:00～15:00	17	尾上　秀司	応用地質（株）福島支店	国道400号で発生した落石災害に対する対応について	C型
（6編）	18	今岡　裕作	北陽技建（株）	地すべり初期安全率が有する不確かさの低減策とその効果検証　ー臨界水位特定による過大設計リスクの低減ー	D型
	19	鴨井 幸彦	(株)興和	道路改良（線形変更）にともなう切土により，休眠していた大規模地すべりが再活動した事例	B型
	20	原　　勝重	新協地水（株）	用水管きょ敷設に伴う水道水源と天然記念物(沼野植物群落)保全事例	A型
セッションB-2	21	正岡　裕之	応用地質（株）	堤体腹付け盛土による近接家屋への影響予測事例	C型
7F　大会議室	22	杉山　直起	（株）ダイヤコンサルタント	土研式雨水曝露試験による掘削土のリスク評価	D型
15:10～16:50	23	遠座　　昭	（株）建設技術研究所	高千穂峡の観光地としての管理と地質リスク	C型
（6編）	24	荒井　　正	（株）日さく　北信越支社	VOCｓによる土壌・地下水汚染調査・措置を地質リスクの観点より考察した事例	A型
	25	岡崎　　修	明治コンサルタント（株）	カラム試験を用いた第三紀泥岩に含まれる重金属溶出特性の評価 ～予想される重金属溶出量の過大評価を防ぐため～	D型

＊セッション司会者

・セッションＡ　小笠原正継　（地質リスク学会　副会長）

・セッションＢ　渡邊　法美　（地質リスク学会　会長）

＊事例研究発表会の時間配分について

・２会場（A と B）に分かれ、以下の時間帯で実施する。

１３：００～１５：００

１５：１０～１６：５０

・口頭発表時間は、１編当たり１２分とする。

第Ⅱ部　事例研究発表会　論文

［論文 No.1］　　盛土による地盤破壊対策のコスト低減策

㈱シアテック　今村　　純

第1章．事例の概要

本件は，道路改良を目的とした設計・施工を行うための地質調査業務である。道路改良延長は約300m で，谷間に盛土を行って道路改良を行うことが計画されていた。（図-1,2参照）

一般的に盛土を行うと地盤破壊，地盤沈下が懸念される。これらの内,本件においては,地盤破壊が問題となった。そのため,ここでは,地盤破壊対策に関するコスト削減の事例について紹介する。

地盤破壊検討を行う際，盛土が計画されている地盤のせん断強度を，N 値を用いた相関式で算出（以下、N 値法と呼ぶ）すると，その値が低く評価される傾向がある。その結果，地盤破壊等が生じるという結果となり，押え盛土や地盤改良等の費用が発生してしまう。

上記の費用を軽減するために，本件では，トリプルサンプラーを改良し，採取が難しい礫混入土を乱れが少ない状態で採取し，力学試験を行うことで，盛土が計画されている地盤のせん断強度を評価した。（以下、試験値法と呼ぶ）その結果，押え盛土や地盤改良等の費用を削減することができた。その費用対効果は,350万であった。その内訳は下記のとおりである。

N 値法を用いた場合の対策工事費（500万円）－追加調査費（150万）－試験値法を用いた場合の対策工事費（0円）＝350万

こうした取り組みは，工事コストの縮減に加え，地質調査業の市場拡大に繋がると考えられる。

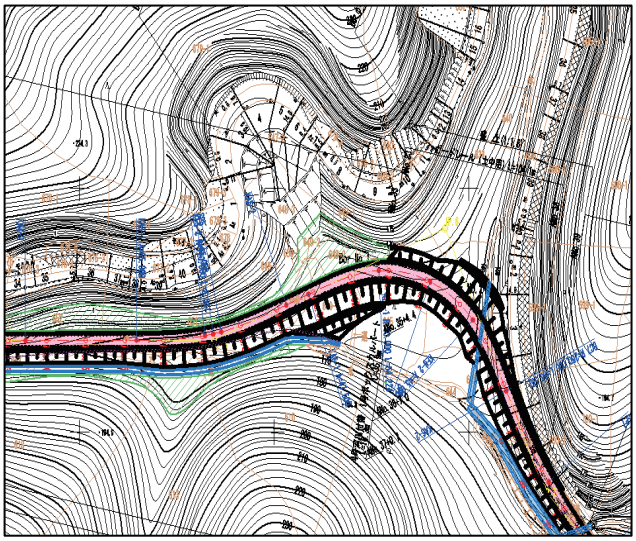


図-1　道路改良計画平面図

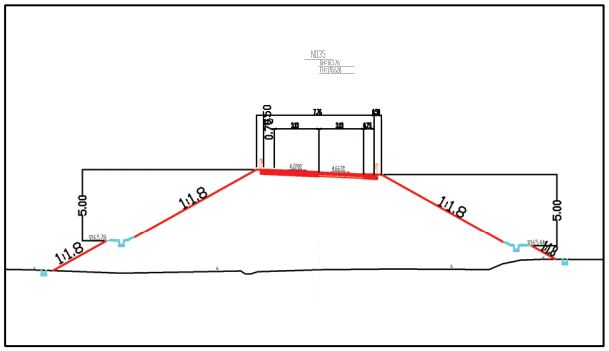


図-2　標準断面

第2章 事例分析のシナリオ

(1)当初調査計画

当該地区の周辺の地質は，図-3の愛媛県地質図に示される四万十帯の砂岩泥岩互層を基盤岩とし，粘土，砂，礫からなる崩積土，河床堆積物がこれを覆っている。

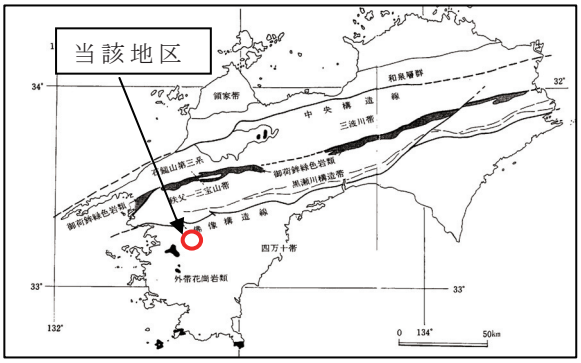


図-3　愛媛県地質図

当該地区は,図-4に示すように,谷の合流地点に位置し,平坦な地形を呈していることから、軟弱な地層が堆積していることが予測されたため,盛土による地盤破壊が懸念された。

当初の調査計画では,上記を踏まえ,ボーリング,標準貫入試験を図-4に示す3箇所で実施し,採取された試料を用いて物理試験を行うことが計画されていた。

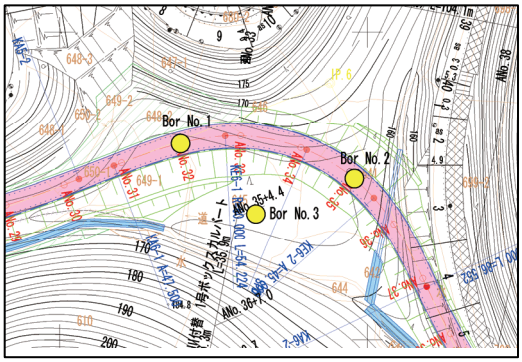


図-4　調査位置図

(2)問題点の抽出

地盤破壊検討において,地盤のせん断強度の評価を行うにあたり,以下の問題があると考えた。

① 地盤のせん断強度を，N 値を用いた相関式（砂質土の場合 $\phi=(15\cdot N)^{0.5}+15$，C=0，粘性土の場合 C=(6～10)・N，$\phi=0$）参考文献1)で算出すると，その値が実際の強度より,低く評価される傾向があり,不経済な設計を行わざる得なくなる。

② 地盤の土質が,礫を含む緩い土（細粒分質砂質礫）であると推測されため，不かく乱試料の採取が困難であることが予測された。

(3)解決策

上記の問題点を解決するために，下記の①～②のように計画を修正した。

①せん断強度の過小評価に関する対策

力学試験を実施することで,地盤のせん断強度を評価し,経済的な設計を行うことを計画した。ただし,調査前に試算を行った結果,N 値が下記の場合,地盤破壊が生じる恐れがないことから,こうした状況であれば,力学試験を実施せず,N 値法で設計を行うこととした。

- 地盤の土質が粘土の場合、N 値＝6以上
- 地盤の土質が砂および粘土の場合、N 値＝25以上

②不かく乱試料採取に関する解決策

別孔でトリプルサンプリングを実施し，不撹乱試料を採取することとした。

対象地盤には礫が混入しているため,不かく乱試料の採取には,以下のことに留意し,乱れの少ない試料を採取するよう努めた。

・通常のトリプルサンプラーは,シュー先行型のため,シューに礫が当った場合,試料が採取できない。そのため,ビット先行型の構造に変えた。

・サンプラーを上記の構造にすると,シューとビットの間から注入される削孔水で試料が流出してしまう。そのため,削孔水が刃先の外側から注入されるサンプラー構造を採用することで採取率を向上させた。

・通常の刃先のチップは四角形であるため,礫を引っ掻いて地盤を乱す恐れがある。そのため,チップを六角形に変えることで,礫で地盤をかき乱すことを軽減した。

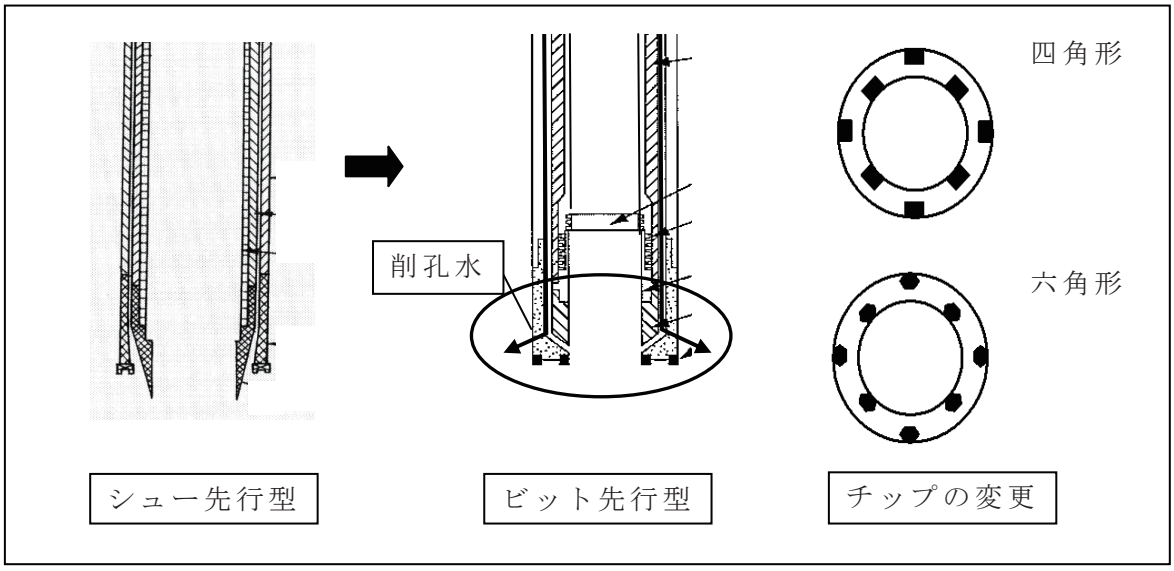


図-5　サンプラー構造及びビット　参考文献3)

第３章 データ収集分析

(1)地質状況

ボーリング調査の結果,当該地区には，図-6の地質断面図に示すように，耕作土層(砂礫混じり粘土)，崩積土層(細粒分質砂質礫)，河床堆積物層(細粒分砂混じり礫),基盤岩層(砂岩及び頁岩)の4層が確認された。この内,未固結層の平均Ｎ値は表-1のようになり,盛土による地盤破壊が懸念された。そのため,不撹乱試料を採取し,力学試験を実施した。

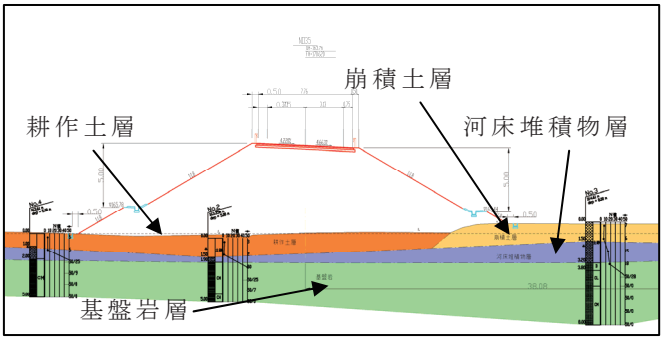


図-6　地質断面図

表-1　各層の平均Ｎ値

地層名	N
耕作土層	2.5
崩積土層	4.6
河床堆積物層	13.0

(2)安定計算結果

①N値を用いた相関式から，せん断定数を求めた場合（N値法）

Ｎ値法から,せん断定数を算出すると表-2のようになる。

表-2　Ｎ値を用いた相関式から算出したせん断定数

地層名	N	C	ϕ	γ
耕作土層	2.5	15	0	14
崩積土層	4.6	0	23	18
河床堆積物層	13.0	0	28	19

N:平均Ｎ値,C:粘着力(kN/m^2),ϕ:内部摩擦角(°),γ:単体積重量(kN/m^3)

上記の定数を用いて，安定計算を行うと，地盤破壊の恐れがあるという結果となった。(FS=1.010≦1.200)

②試験値を用いた場合（試験値法）

試験値から，せん断定数を求めると表-3のようになる。

表-3　試験値から求めたせん断定数

地層名	試験値平均			採用値		
	C	ϕ	γ	C	ϕ	γ
耕作土層	23.4	1.1	18.5	23	0.0	18
崩積土層	3.7	36.2	19.4	0.0	30	19
河床堆積物層	0.0	42.7	20.4	0.0	35	20

C:粘着力(kN/m^2),ϕ:内部摩擦角(°),γ:単体積重量(kN/m^3)

採用値は,ダイレタンシーによって,せん断抵抗角が高くなる傾向があるため,試験値の平均値から5～10°差し引いた値とした。参考文献2)上記の採用値を用いて安定計算を行うと地盤破壊は，発生しないという結果を得た。(FS=1.207≧1.200)

第4章　マネジメント効果

(1)費用対効果

N値法を採用した場合,安全率はFS=1.01となり、地盤破壊対策が必要となる。地盤破壊対策として，経済的な工法であった押え盛土工法および補強盛土工法を行ったとしても，地盤破壊対策費として500万が必要となる。これに対し,試験値法を用いると安全率はFS＝1.207となり,地盤破壊対策が不要となる。その結果，N値法による対策工事費（500万円）－不撹乱試料サンプリング及び試験費（150万）－試験値法による対策工事費（0円）＝350万の費用を削減することができた。

(2)展望と課題

①展望

本件で実施したサンプリング方法を用いて,礫が混入した緩い地盤において,乱れの少ない試料を採取することができれば，盛土の維持管理，自然斜面や法面の安定性評価,地盤改良効果の判定，支持地盤の強度評価等,幅広い分野での活用が期待される。こうした取り組みは，調査コストを上げて事業費を削減することができるため,地質調査業の市場拡大に繋がると考えられる。

②上記の課題

・試料の乱れの判断

本来，トリプルサンプリングは，やや締まりのある土質に適用されるが,今回のような緩い土質において，乱れが少ない状態で試料が採取されているかどうかを判断する方法を考えていかなければならない。

・試験値の評価

力学試験の結果をそのまま安定計算式に入力して，安定性を求めても，現地と計算結果が合致しているとは限らない。そのため，今後，災害事例等を参考に，試験値と実状を照らし合わせ，試験値の低減方法や安定計算式を改良していく必要があると考える。

第5章　データ様式の提案

本件は,N値法と試験値法における地盤破壊対策費を比較し、その費用差をリスクマネジメント効果としている。そのため,データ用式の修正は,行っていないが,データ記入欄に費用の算出条件を付け加えた。

また,データ様式の提案として,Aタイプの場合,リスクマネジメント効果を出すにあたり,工夫した点があると考える。そのような点をデータ様式に記入することで,データ表の利用者が,リスクマネジメント効果を発揮するために,何をすべきかが一目で分かるようになると考える。本件を例にとれば,採取が困難な礫混入土の特殊なサンプリング方法や調査実施前に試算を行い,試験の可否の判断基準を予め定めておいた点が挙げられる。

《引用・参考文献》

1)日本道路協会：道路土工擁壁工指針，pp.18～19，2010.4
2)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準同解説上巻 pp.176，2007.7
3) 地盤工学会編：地質調査法，pp.201～214，2004.6.1

データ様式原案

A. 地質リスクを回避した事例

大項目	小項目		データ
対象工事	発注者		愛媛県
	工事名		北道改第607号測の3 (国)441号　地質調査委託業務
	工種		盛土
	工事概要		道路改良を目的とした盛土
	①当初工事費		500万(N 値法で対策した場合の追加工事費用)
	当初工期		不明
リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		概略設計完了後
	予測されたトラブル		過大な地盤破壊対策
	回避した事象		地盤強度の過小評価
	工事への影響		地盤対策のコストが削減
リスク管理の実際	判断した時期		地質調査業務中
	判断した者		調査業者
	判断の内容		地盤対策の必要性
	判断に必要な情報		地盤のせん断強度
リスク対応の実際	内容	追加調査	不撹乱試料採取,力学試験:7試料
		修正設計	なし
		対策工	地盤対策(押え盛土)を不要とした
	費用	追加調査	150万円
		修正設計	なし
		対策工	なし
		②合計	150万円
変更工事の内容	工事変更の内容		力学試験値を用いた場合、地盤対策が不要
	③変更工事費		0円(力学試験値を用いた場合の追加対策費)
	変更工期		なし
	間接的な影響項目		施工が容易,用地買収範囲を縮小
	受益者		自治体,納税者
リスクマネジメントの効果	費用(①－③－②)		350万円
	工期		変更なし
	その他		今回実施したサンプリング方法を用いることで,自然斜面や法面の安定性評価,支持地盤の強度評価等,幅広い分野での活用が期待でき,さらに大きな費用効果が得られると考える。

[論文 No.2]　長野県急傾斜地崩壊対策事業における地質リスクマネジメント事例について

長野県諏訪建設事務所整備課　○宮腰寧崇
株式会社建設技術研究所　尾園修治郎

1．事例の概要

本事例で取り上げる急傾斜地は諏訪湖西方の天竜川左岸に位置しており、河岸を通過する JR 中央本線、主要地方道下諏訪辰野線と当該斜面とに挟まれた狭隘な段丘面上に約 20 戸の家屋が立地している。

当該斜面では昭和 46 年に崩壊が発生しており、その際に高さ 3m の重力式擁壁が斜面末端に、また斜面上には 3 段のブロック積み擁壁が設置された。

写真 1.1　昭和 46 年に崩壊が発生した当時の状況
（右端の一段低い所が ＪＲ中央本線、写真中央が主要地方道下諏訪辰野線）

しかし近年、この擁壁に多数のクラックが発生し、住民からは新たな崩壊が発生するのではないかとの不安が示されている。すなわち斜面崩壊の再発に対して重力式擁壁が機能喪失しているために抑止効果が発揮されず、家屋が損壊するなどの被害が想定される。このため、平成 19 年度の対策検討において、擁壁のクラックに関わる劣化状況を調査（中性化試験、コアによる圧縮試験等）したうえで、既設重力式擁壁を撤去して再構築する方針となった（図 1.1 中の＊1）。

しかし、家屋と背後斜面との離隔は僅かに 1～2m であり、擁壁を撤去するための作業スペースは極めて限定されている。このため、作業スペースを確保するために急勾配での掘削が必要となり、地山の安定確保のために仮設工事にアンカー工を導入することとし、このことが高コストの原因となっていた。

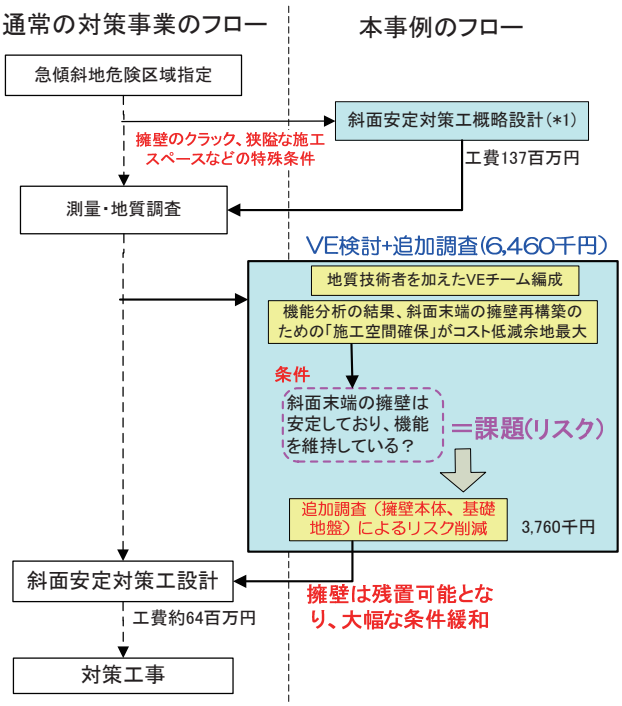


図 1.1　本事例のフロー

本事例はこのような高コスト事業に対して、発注者の判断により、図 1.1 に示すフロー

のように地質技術者を含む VE チームを編成し、重力式擁壁は機能を維持しており再構築は不要とする代替案を検討し、その場合の地質リスクを削減するための地質調査を実施した。その結果、高コストの要因となっている重力式擁壁の再構築を回避した場合の工事費を大幅に削減したものである。

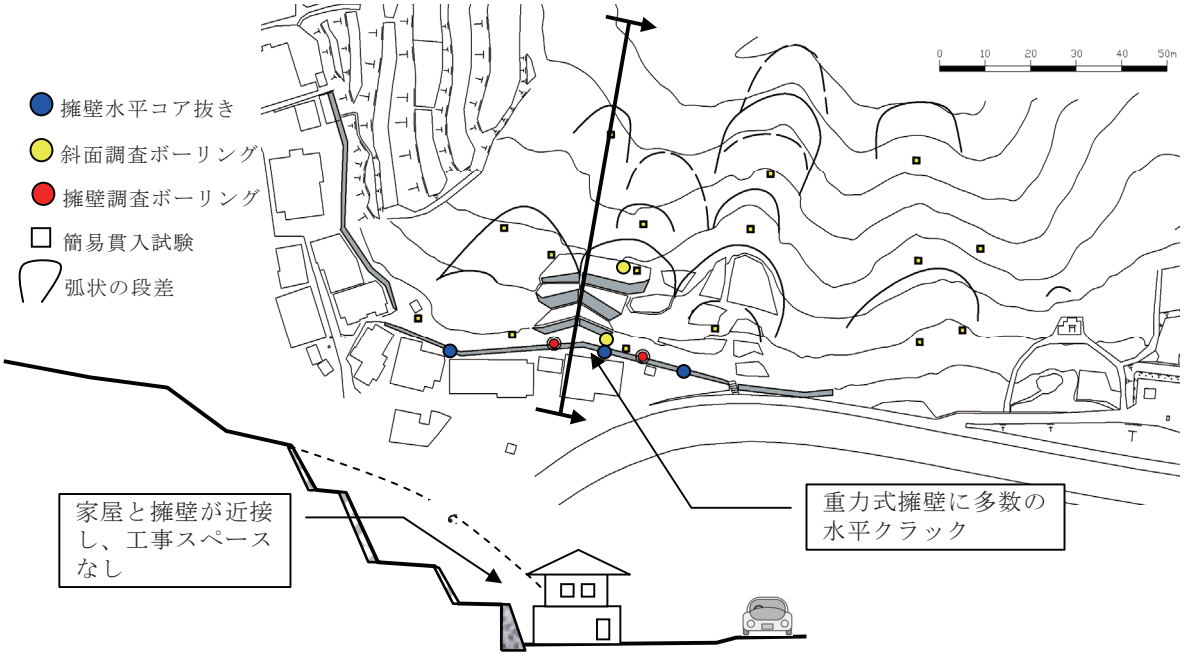


図 1.1　　鮎沢地区の状況と調査内容

2.　事例分析のシナリオ

(1) リスク対応方針

本事例で採用した VE 提案のうち最重要のものは、平成 19 年の対策検討において高コストの最も大きな原因となっている「施工空間確保機能」の見直しである。すなわち、問題の重力式擁壁は、昭和 46 年の斜面崩壊後の翌 47 年には整形とブロック積みと合わせて完成しており現在まで斜面の安定は保持されているので、再構築が不要である可能性が考えられる。

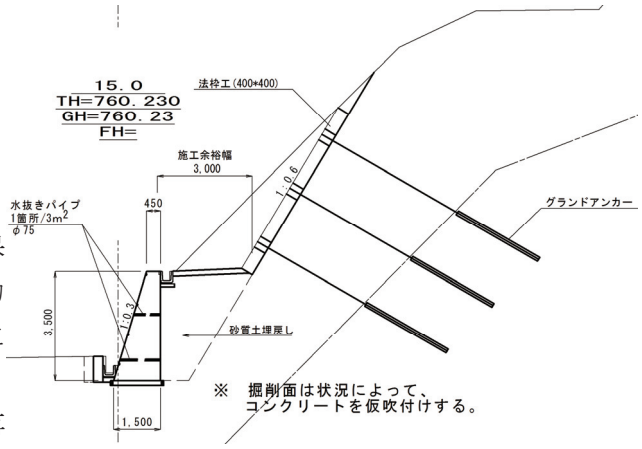


図 2.1　リスク対応方針１（設計原案）の概要図

しかし、現実的にクラックが多数発生している状況において、設計条件や地盤条件は不詳であることから、重力式擁壁が機能を維持していると想定することは、斜面の安定を維持し家屋の安全を確保するために大きな地質リスクとなる。

したがって、本事例におけるリスク対応方針としては以下の二つが考えられる。

リスク対応方針１（最も安全と考えられる方法）・・・図 2.1

擁壁に発生しているクラックは構造性の要因によるものであるという可能性（リスク）を解消するため、擁壁の再構築を中心とする対策工を実施する。そのための作業スペースを確保するため、アンカー付法枠工を仮設土留め的に用いて掘削する。

リスク対応方針２（必要な安全を確保しつつコスト縮減する対応方針）

擁壁のクラックは経時的な劣化に伴うものと考え、擁壁を残置したままで斜面対策を実施する。この場合は、リスクを削減するために擁壁の機能が維持されていることを確認する調査を実施する。この場合の調査結果に応じた対応の考え方を図 2.2 に示す。

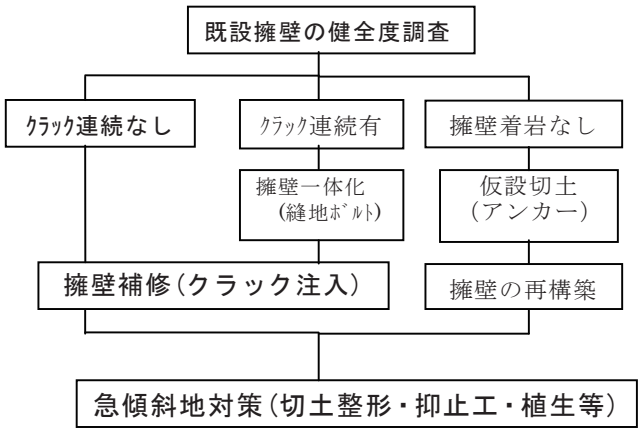


図 2.2　リスク対応方針 2 の場合の検討フロー

本事例では、以下の理由によりリスク対応方針２に沿って検討を進めることとした。

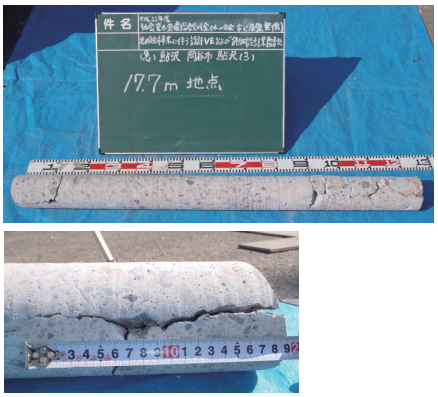
- 斜面が長期にわたって安定しており、擁壁にクラック以外の変状が認められないことから、擁壁に対して過大な土圧等が作用しているとは考えにくい。
- 斜面上に設置されたブロック積み擁壁にも、石灰の浸みだしを除くと変状がなく、当該斜面は安定を保っていると考えられる。
- 既往コア抜き調査により、擁壁本体の劣化(クラックや中性化)は深部に及んでいないことが推察される。

(2) リスク対策

上記**リスク対応方針２**を採用する場合には、擁壁の機能が維持されていないというリスクを削減する必要がある。また、当該斜面において過去に発生した崩壊現象の素因、誘因について明らかにした上でそれらを除去する必要がある。それらに対する対策状況を表 2.1 に示す。

表 2.1　鮎沢斜面対策における地質リスク要因と対応策

地質リスク要因	具体的項目	対応策と結果
過去の崩壊の素因、誘因の不確実性	• 重力式擁壁やブロック積み擁壁からエフロレッセンスの浸みだしが顕著 • 昭和 46 年に崩壊が発生した際の地下水条件や崩壊様式、形状が不詳（＝現状斜面の安定性が不詳）	斜面部でコアボーリングを２孔、簡易貫入試験を 16 か所で実施。その結果以下が判明。 • 斜面の地質に特別なすべり面となりうる不連続面は発達しない • 地山表層部に分布する風化帯の状況等が大略明らかに • 地山の地下水は低く、特に末端部では天竜川レベル。
既往対策工の機能維持	• 重力式擁壁に発生しているクラックの原因が不詳 • 重力式擁壁の形状が不詳	クラックの発生が顕著な箇所で、擁壁を水平に貫通するコア抜きと中性化試験を実施。 • クラックは擁壁を貫通しておらず、擁壁は一体性を保持している。 • 水平方向の厚みから、擁壁は重力式であることを確認。
	• 重力式擁壁の基礎地盤が健全かどうか不詳	擁壁を鉛直方向に貫通し、基礎地盤を十分把握するオールコアボーリングを実施。 • 基礎地盤とは密着しており、崩積土等の乱れた地層も分布しないことを確認。 • 擁壁直下の地盤のＮ値は、２孔のうち１孔で平均Ｎ=4.6 と小さい。



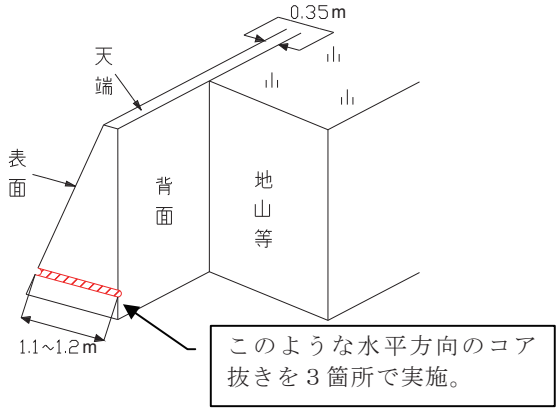


写真 2.1　擁壁の水平コア抜き結果

クラックを追跡するようにコア抜きした結果、クラックは擁壁を貫通していないことが確認された。

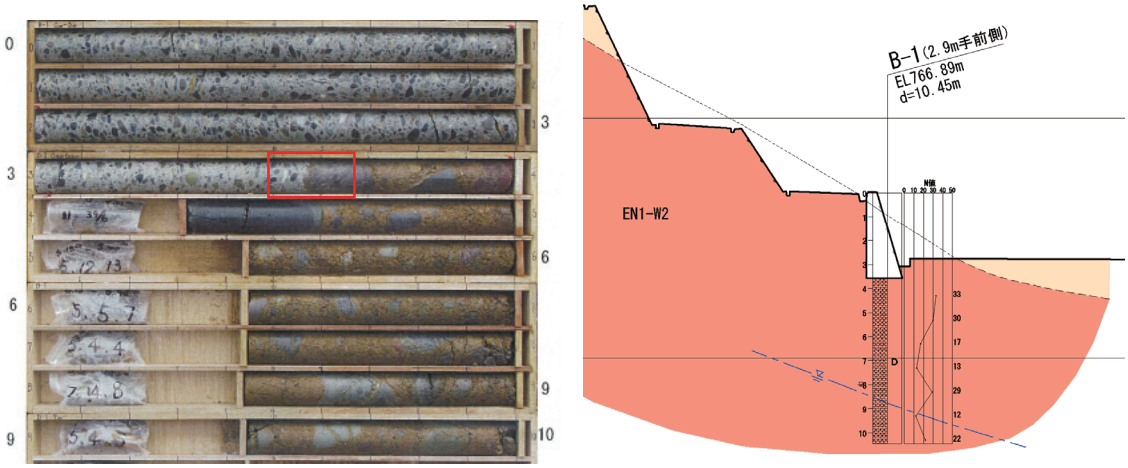


写真 2.2　鉛直ボーリングコア写真（B-1）と実施位置断面図

深度 3.58m、3.53m までは擁壁コンクリートで、弱風化した基盤岩とよく密着している

(2). マネジメント効果の考え方

本事例では、リスク削減のための精査を行った結果、擁壁の機能は保持されていることが明らかになった。したがって、調査を行わずに擁壁を残置してコスト縮減しても、リスク発現（コスト増要因）として「斜面崩壊の発生による家屋損壊、崩壊斜面の修復、大規模対策・・」などは想定できない。よってマネジメント効果の計量は、崩壊発生の有無ではなく、設計工事費の比較によって行う。すなわち、

リスク事象：擁壁基礎地盤の支持力不足、擁壁本体の損傷による抵抗力不足

リスクの発現：（これらリスクを保持し、安全を確保するための過大設計）

具体的には、マネジメントの効果を計量する際の原案として**リスク対応方針１**を取った場合を考える。すなわち、

マネジメント効果＝**リスク対応方針１**（擁壁再構築）による対策工事費

　　－**リスク対応方針２**（擁壁残置）による対策工事費

　　－**リスク対応方針２**（詳細リスク要因対策）のための追加調査解析費

としてマネジメント効果を計量する。

3. データ収集分析

(1) **リスク対応方針１**をとった場合の対策工

以下の基本方針としている。

・既設擁壁を撤去･再構築する。

・背面地山を切土勾配(1:0.6)で掘削。

・法枠＋アンカー工法による抑止。

すなわち、擁壁再構築のための仮設として地山掘削（アンカー）を行うこととなり、課題としてアンカー施工時の近接家屋への影響がある。(施工空間確保と騒音等)

(2) **リスク対応方針２**をとった場合の対策工

概要を表 3.1 に示す。

擁壁の再構築は行わないが、現実にクラックが発生していることから、さらなる劣化の進行を防ぐ目的で、クラックの注入工及び断面補修工を行う。

また斜面に対しては、安定を図るためにアンカー工～ロックボルト工等の抑止工を導入性し、合わせて緑化・排水工を実施する。

表 3.1　詳細設計の概要

補修および対策工法
(1)　既設擁壁 ・ｸﾗｯｸ注入および断面補修工 ・安定性は現状で問題なし。
(2)　急傾斜地 ・起点側：法枠工＋ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ ・終点側：ｱﾝｶｰ工＋鋼製受圧板 全域に緑化工+排水工

4. マネジメント効果

リスク対応方針２をとるための地質リスク削減の追加費用、対策工事のコスト縮減額などを踏まえたマネジメント効果の算定表を表 4.1 に示す。このように、約 7 千万円のコスト縮減効果が得られた。

表 4.1　**リスク対応方針２**によるコスト縮減額算定表(千円、諸経費込み)

リスク対応方針	対策工事内容		概算工事費	合計費用
	工種	数量		
対応方針１（原案）	設計費	1 式	4,650 千円	
	アンカー工+法枠工	L=110m、約 168 本 A=約 605m²	72,000 千円	
	擁壁工+土工	L=130m	56,040 千円	
	仮設工（仮吹き,足場）	L=110m	4,530 千円	137,220 千円
対応方針２（詳細設計）	追加精査費用	ボーリング 2 孔、コア抜き 2 孔、地質解析式	3,760 千円	
	設計 VE・詳細設計費	1 式	7,350 千円	
	擁壁補修工	L=80m	1,620 千円	
	受圧板付きｱﾝｶｰ工	4 本	5,532 千円	
	現場打ち枠+ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ	法枠 661m²、ﾛｯｸﾎﾞﾙﾄ 460 本	36,902 千円	
	地表面排水工	L=179m	9,284 千円	64,448 千円
		マネジメント効果（差額）		72,772 千円

5. 今後の課題

今回報告した事例では、対策工事着手までの期間の中で設計 VE という手法を用いて様々な意見を集約する時間をとることができた。また、地質についての追加精査を実施することにより地質リスクを削減しつつ大幅なコスト縮減を実現することができた。一般的にはこのような時間を確保することは難しいが、所内 VE や合同ミーティング等を行うことによって同様のプロセスを経ることが望ましいと考えられる。

６． データ様式の提案

本事例はＡタイプ事例であるので、学会のデータ様式Ａを用いた。ただし、リスク対応方針１，２の位置付けが分かり易いよう、項目名等に加筆あるいは修正を行った。

A. 地質リスクを回避した事例

大項目	小項目		データ
対象工事	発注者		長野県諏訪建設事務所
	工事名		社会資本整備総合交付金（水の安全・安心基盤整備）急傾斜事業　岡谷市鮎沢
	工種		斜面安定対策工
	当初工事費（リスク対応方針１をとった場合の仮想工事）	概要	重力式擁壁（H=3m）の再構築、切土及び仮設アンカー工、延長 130m
		①工事費	132,570 千円（設計費除く）
	当初工期		－
リスク回避事象	予測したリスク発現時期		詳細設計時
	予測したリスク		既存擁壁の再構築費用と、それに必要な作業スペース確保のための掘削及びアンカー工費用の発生
	回避した事象		同上
	工事への影響		なし
リスク管理の実際	判断した時期		概略設計完了時
	判断した者		発注者
	判断の内容		VE 導入による施工方向再検討によるコスト縮減
	判断に必要な情報		既存擁壁の健全性を確認するための基礎地盤情報や躯体の劣化状況
リスク対応の実際（リスク対応方針２に従った実際の対応）	内容	追加調査	VE 検討、コアボーリング２孔、コア抜き２孔、地質解析
		設計	擁壁安全度照査、法面詳細設計
		対策工	法枠付きアンカー工、ロックボルト工、擁壁補修工、排水工
	費用	追加調査,VE 検討	6,460 千円
		設計	4,650 千円（相殺）
		対策工	53,338 千円
		②合計	59,798 千円（設計費含まず）
変更工事の内容	変更設計の内容		－
	変更設計に伴う追加費用		－
	変更工期		－
	間接的な影響項目		－
	受益者		－
リスクマネジメントの効果	費用（①－②）		72,772 千円
	工期		－
	その他		－

[論文 No.3]グラウンドアンカー工における確実な定着体造成位置の評価・決定
―見えるものは全て見る―

株式会社 淞南ダイア　　原　重守

１．事例の概要

本事例は，グラウンドアンカー工（以下アンカー工）が採用された地すべり工事において，定着層となる基盤岩の不均質性やその出現深度の不確実性により発現する地質リスクを回避した事例である。

地質は，新第三紀の流紋岩を基盤岩とし，軟質な粘性土～やや締まった砂質土，硬質礫を含有する礫質土からなる第四紀の段丘堆積物が被覆している（図２）。この低位段丘堆積物の平坦面端部で発生した地すべりであり，その変状は宅地にまで及ぶ（図１）。

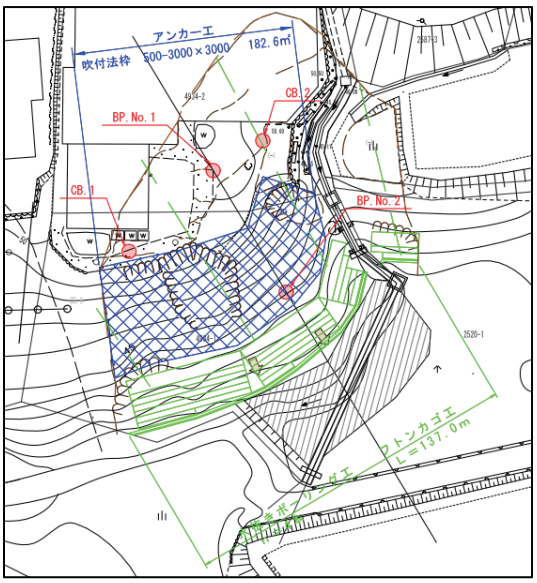


図１　対策工平面図

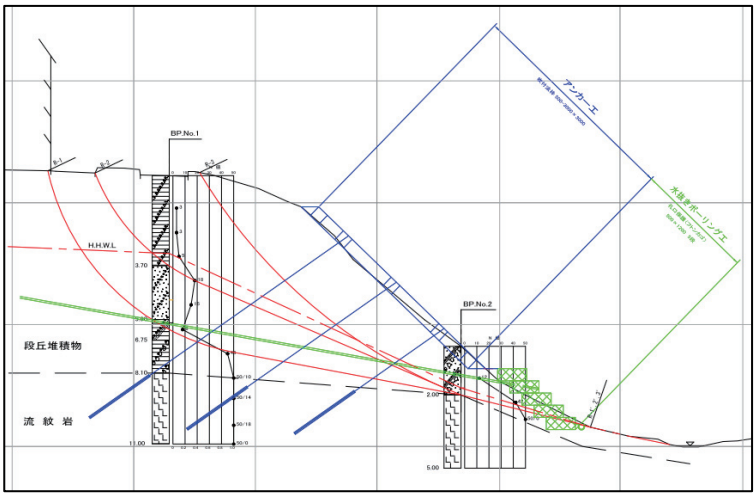


図２　対策工断面図

地すべり対策工事は，抑制工として水抜きボーリング工が前年（緑）に施工済みであり，今回（青）抑止工としてアンカー工を施工している（設計 22 本中 13 本の発注）。

２．事例分析のシナリオ

調査時のボーリング結果より，流紋岩の出現深度は，段丘地形に対して概ね調和的に分布しており，定着層に起伏は想定されていないが，流紋岩には破砕質～硬質塊状な部分が認められており，その岩相にばらつきが認められた（写真.1，2）。

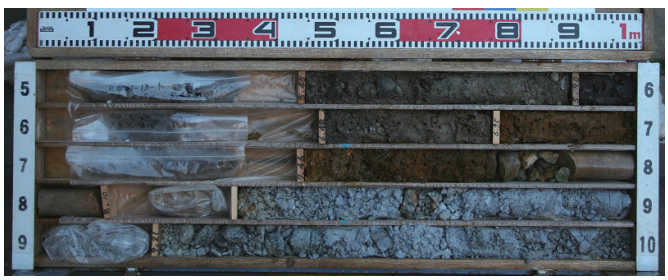


写真１　BP.No.1 コア写真
（段丘堆積物～流紋岩）

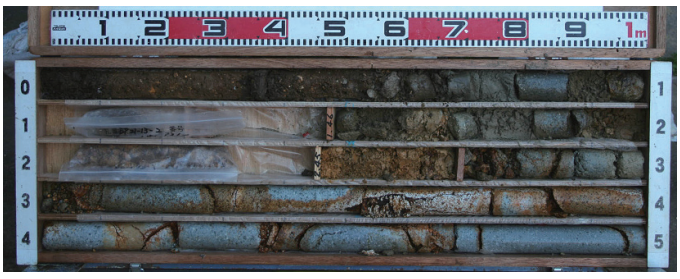


写真２　BP.No.2 コア写真
（同左）

この結果より，アンカー工の適切な施工にあたっては，定着層における強度や亀裂密度の不均質性による**極限周面摩擦抵抗のばらつき**や，**段丘堆積物堆積時の削剥による定着層出現深度のばらつき**を懸念した。また，硬質塊状な流紋岩部分（写真 2）においては亀裂の褐色化が著しく開口気味であり，加えて上位の段丘堆積物の構成粒子は粗粒な礫・玉石からなることから**活発な地下水流動**が懸念された。これらの地質リスクが，定着性能（付着性能）の不足や低下につながる可能性をリスクの構成要素として抽出した。これら定性的に抽出される地質の一般的な不確実性に起因するリスクが発現し，地すべり臨界条件が揃った場合は，アンカー工の機能不全が露呈し，地すべり滑動の再発が各種地すべり対策工の損壊のみならず，宅地の崩壊を引き起こし，最悪，人命を損ないかねない。

３．データ収集分析

(1) チェックボーリング結果

施工時に実施した2孔のチェックボーリングと既存の BP.No.1 における 3 孔の流紋岩出現深度にほとんど起伏は無かったものの（図 3），調査時同様に破砕質な部分が認められた（写真 4）。

この結果より，引抜試験は定着層（流紋岩軟岩部）の中で，極限周面摩擦抵抗が比較的低いと想定される破砕質なコア状況であった BP.No.1 付近（図 4）に計画した。また，試験孔の削孔にあたっては通常ノンコアで行うが，コア採取も行った。

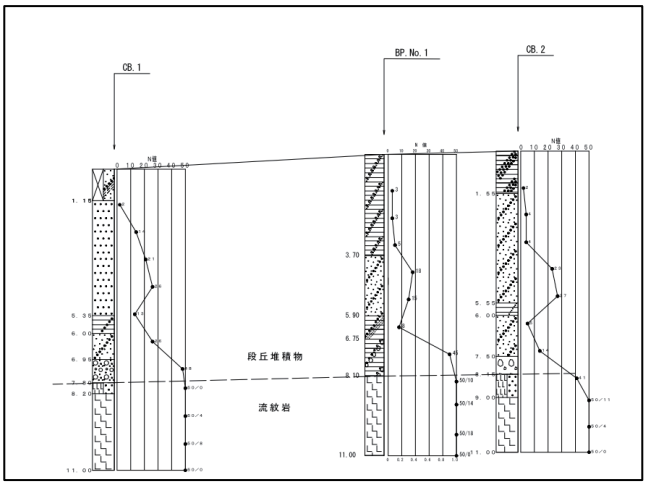


図 3　チェックボーリング断面図

写真 3　CB.1 コア写真
（段丘堆積物～流紋岩）

写真 4　CB.2 コア写真
（同左）

(2) 引抜試験結果

コア採取の結果，流紋岩は想定していた破砕質なものが確認された。また，引抜試験の最大試験荷重から求まる極限周面摩擦抵抗は設計値以上であり，定着体の諸元は変更不要であった。一方で，定着層（軟岩）の出現深度は推定線より 2m深い位置であった（図 4，5）。アンカーの定着体は良質地盤において確実に造成する必要があるため，機械的に推定線を引くのではなく，この窪みの成因について地質的な評価・分析を行った上で定着体位置を決定した。

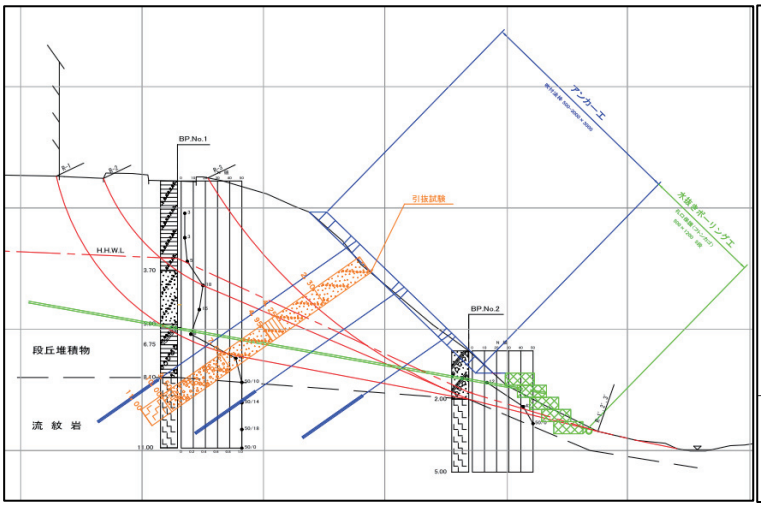


図 4　対策工断面図 2（引抜試験データは投影）

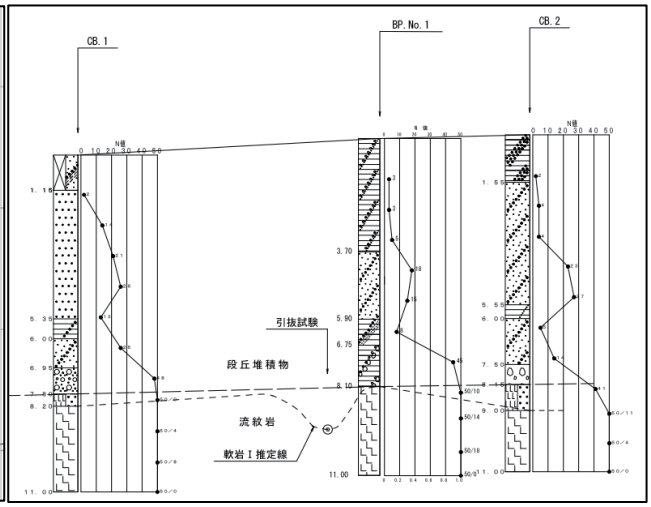


図 5　チェックボーリング断面図 2

①流紋岩の起伏の成因

一般に，地形の形成は，地形場，地形物質，地形営力の因子とその変遷によって決定されることを踏まえ，流紋岩出現深度の起伏の成因を以下のように分析した。

・流紋岩の初生的な強度，亀裂分布や風化程度の不均質性による，削剥に対する耐性のばらつき。（岩盤の強度特性）

・河川の流向・流量・流速の変化による削剥能力のばらつき。（河川形状・河道変遷）

・河川を流下する粗粒物質（礫・玉石）の粒度構成および含有率の多少。（運搬物質）

地形場，地形営力の因子である段丘堆積物は全ボーリング箇所で確認されており、現地形形状からもこの地域に広く分布していると考える必要がある。また，地形物質の因子である流紋岩の強度的ばらつきを平面的に特定することは困難である。よって，引抜試験で確認された様な窪みは、地すべりブロック全域に不規則に分布している可能性が大きい。また，窪み部分は地下水が集中し易く，風化変質の助長や，グラウトの希釈・流出が生じ易いため，この部分での定着は確実に避ける必要がある。

②アンカー自由長の算出

今回のように狭い区間で定着層に起伏がある場合は、図 6 のように鉛直・水平方向の被りが不安定となりやすい。よって，アンカーの機能性を確保し、長期安定性を高めるためにも，引抜試験で確認された流紋岩（軟岩）出現深度を基に確実な定着層出現ラインを決定して，自由長を算出した。

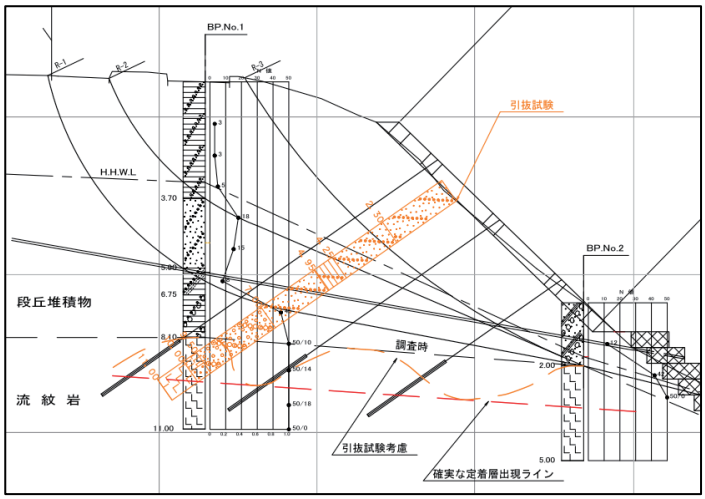


図 6　模式推定断面図

（3）汎用型ボアホールカメラ観察結果（発表時は動画による）

ボーリングコアでは不明瞭な段丘堆積物と流紋岩風化部の境界や，地下水流動性を評価するために，汎用型ボアホールカメラによりチェックボーリングの孔内観察を行った。この観察により段丘堆積物と風化流紋岩の境界が確定された（写真 5）。また，段丘堆積物中の礫間や流紋岩の開口亀裂部分において地下水流動（写真 6）は認められなかったことから，地下水の流動性に起因するリスクの影響度は低いと判断した。

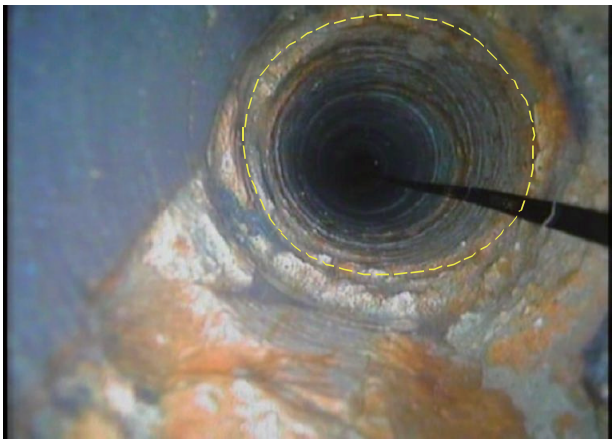


写真 5　段丘堆積物と流紋岩との境界（破線部）

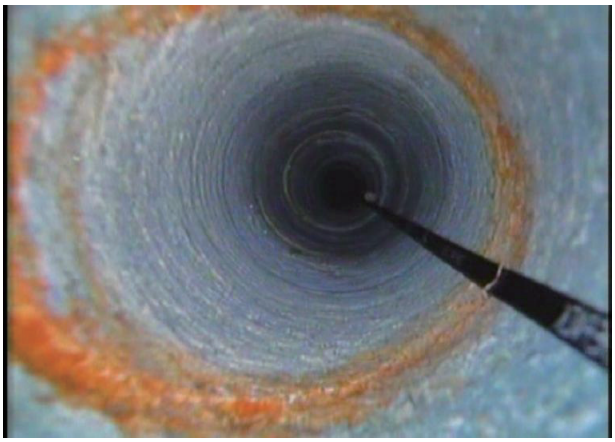


写真 6　開口亀裂部

４．マネジメントの効果

今回の事例では，例え施工業者が盲目的に施工したとしても，アンカー工は不可視領域の構造物が主体となることから，平常時においては特に問題は発生しないであろう。（実際，設計時に設定されている危険水位を算出するための日雨量（254 ㎜）は，気象庁観測データによると過去 30 年間において一度も発生していない。）

しかし，仮に斜面が臨界状態にさらされた際にはアンカー工の機能不全が露呈し，地すべり滑動の再発が各種地すべり対策工の損壊のみならず，宅地の崩壊を引き起こし，最悪，人命を損ないかねない。つまり，本来リスクは回避や除去・低減を行った後に保有するが，そのリスクを適切に処理できないまま，保全対象となるはずの地元住民に保有させていることになる。

今回の事例における「マネジメントの効果」＝「マネジメントを行わなかった場合に生じるコストの損失」であるが，悲観的に想定した場合は，宅地や家屋の修復費用や新規対策工の調査，設計，施工費用にまで及び，人命に至っては算定不可能である。楽観的に想定した場合には，アンカー工の損壊程度として（変更工事費）－（マネジメントによる増額分）17561 千円となる。

今回の事例は，調査時の調査項目やその頻度は地すべり規模や形態に応じた適当な密度で行われており，その結果の解釈やモデル化，設計での取り扱いも概ね適切に処理されたごくありふれた地すべり対策工事の案件と言えよう。しかし，今回はそれでもなお，既存調査結果から予想される懸念材料（地質リスク）を抽出し，施工時に行われるボーリングや試験の全てを駆使してそのリスクの存在を確定し，地質的な評価・分析に基づき定量的に評価し，適切な設計変更を行うことで，地すべりブロックの確実な保全（地質リスクの

回避）が行えたと考える。

リスクマネージメントにおいては，「情報の欠如」が意思決定や決断の拙劣につながるが，地質調査においては，いかに各種調査を駆使して高密度に行っても，地質情報が十分に得られることはない。このことが地質技術者や施工管理技術者が責任を全うすることを難しくしている。この地質情報の不足分を補間できるのは，地質学的な知識と経験に基づきリスクの評価・分析から適切な処理手段を提案し，そのコストや性能，安全性に対する説明責任能力までも備えた地質技術者である。

この地質技術者は，日本という複雑で脆弱な国土における社会資本整備には欠かせないリスクマネージメントの専門家であり，そのリスク感性（リスク識別力やリスク評価適性）を磨き続けることもその責務と考える。

５．データ様式の提案

今回の事例をデータ様式に当てはめると下表のようになり，「リスクマネジメントの効果」＝「リスクマネジメントを行わなかった場合に生じるコストの損失」となるが，悲観的に想定した場合は，宅地や家屋の修復費用や新規対策工の調査，設計，施工費用にまで及び，人命に至っては算定不可能である。楽観的に想定した場合には，アンカー工の損壊程度となるため非常に効果の幅は広い。よって，リスクマネジメントの効果は，それぞれ想定される事象に対して記載した。

データ様式　A. 地質リスクを回避した事例

大項目	小項目	データ
対象工事	**発注者**	自治体
	工事名	地すべり対策工事
	工種	グラウンドアンカー工，吹付法枠工
	工事概要	地すべりブロックにおける対策工事として，前年に抑制工の水抜きボーリング工を施工済み。今回抑止工のグラウンドアンカー工を施工。
	①当初工事費	15120 千円
	当初工期	平成 23 年 3 月
リスク回避事象	**予測されたリスク発現時期**	豪雨など，斜面が臨界状態にさらされた時
	予測されたトラブル	アンカー工の損壊
	回避した事象	アンカー定着体の定着性能の不足
	工事への影響	―
リスク管理の実際	**判断した時期**	引抜試験削孔後
	判断した者	施工者，発注者
	判断の内容	定着層出現深度の評価

	判断に必要な情報		引抜試験箇所のボーリングコア，既存調査・設計資料
リスク対応の実際	**内容**	**追加調査**	引抜試験箇所のボーリングコア採取 汎用型ボアホールカメラによる孔内観察
		修正設計	定着層出現深度の変更によるアンカー自由長の変更
		対策工	アンカー材料および削孔長の増加
	費用	**追加調査**	0
		修正設計	0
		対策工	604 千円
		②合計	604 千円
変更工事の内容	**工事変更の内容**		修正設計によるアンカー長の増加 アンカー本数の増加（発注者指示）
	③変更工事費		18165 千円
	変更工期		平成 24 年 6 月 ※アンカー本数増加による工期延期のためで，修正設計による工期延長は無い。
	間接的な影響項目		特に無し
	受益者		保全対象の住民および周辺地域
リスクマネジメントの効果	**費用（③－②）**		楽観的な想定
			アンカー工の損壊　17561 千円
			悲観的な想定
			宅地や家屋の修復費用，新規対策工の調査，設計，施工費用，人命（算定不能）
	工期		－
	その他		－

【参考文献】

1） 地盤工学会（2002）:「地盤工学会基準　グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説」
2） 気象庁ホームページ　気象統計情報

［論文 No. 4］　　切土法面の植生工における地質リスクとコスト縮減の試み

大地コンサルタント（株）　○寺井　康文，大和田　敦，石井　真治，武田　理香

1. 事例の概要

(1) 切土法面の植生工選定における地質リスク

切土法面の植生工は、法面の形状（勾配、方位）や化学性状（土壌酸度等）のほか、物理性状（地質土質、土壌硬度、亀裂間隔等）をもとに選定される[1)2)]。このため植生工選定において地質調査が果たす役割は大きいが、以下の 2 つの問題があるため、地質調査結果には不確実さが介在しやすい（表 1）。

問題の 1 つは、植生工選定のための地質情報の大部分が推定によって得られていることである。切土の地質調査は主に法高の大きい地点（区間の中央）を対象として実施されるが、区間端部とは地質分布が異なる場合があり、推定される掘削面の地質分布には不確実さが残る。また土壌硬度試験は地質調査段階では実施できないほか、掘削による応力解放や風化進行を考慮した掘削面の性状は、技術者の経験に基づいた評価による部分が大きい。

2 つめの問題は、切土法面の安定における地質の評価と、植生工選定における評価は、相反する場合が多いことである。法面の安定においては、地質を劣化した側で評価することが「安全側」であるが、植生工選定では劣化した地質は規格の低い植生工が適するため、地質リスクは楽観的となりやすい。

植生工は用地や工事費への影響が小さいため、これを対象とした詳細な地質調査は行われず、多くの地質リスクが介在した地質調査結果が設計に引き渡されている。地質リスクが発現した場合も植生工をやり直す程度で対応できる場合が多いため、植生工選定における地質リスクは軽視されやすいが､植生工は施工後数年を経てリスクが発現することも懸念される。地質リスクを管理し合理的な設計施工を行うことは、事業の円滑な遂行だけでなく維持管理コストの縮減にも寄与することが期待される。

表 1　主な植生工選定指標とリスク

植生工選定指標	不確実な情報	リスクの発生原因
法面形状 （勾配・方位）	－	計画段階で明瞭となり不確実さは存在しない。
物理性状	地質分布 （平面図・断面図）	調査は法高最大の地点で実施されることが多い。 とくに尾根を横断する切土では、中央部と端部で土砂や風化帯の厚さが大きく異なる場合がある。
	土性・粒度	礫径や礫率はボーリングコアからの推定が困難。
	土壌硬度	調査段階では掘削面での試験が実施不能。
	岩の硬軟 岩の亀裂	風化や応力解放の影響は推定による。 法面安定性の評価と相反する場合が多い。
	全般	詳細調査が不足している場合が多い。
化学性状 （土壌酸度等）	－	調査段階で試験等が可能な場合が多い。 経年変化（溶出による酸性化など）に要注意。

(2) 事例の概要

本事例では植生工事発注前に、掘削面での事前調査を行い、発注者と設計者、地質調査者

が植生工規格の妥当性を検証する方法で地質リスクを管理し、地質ごとに適切な規格の植生工を選定してコストの縮減を試みた。

対象となる切土は、道路防災事業に伴うもので、落石や岩盤崩壊が懸念される比高約 30m の河岸段丘崖直下に敷設された 160m 区間において、安定勾配の切土により災害要因を除去する計画である。

地質は新第三紀中新世の砂岩を主体とする砂岩礫岩泥岩互層からなる。段丘面には層厚 2m ほどの段丘堆積物と火山灰層が成層し、斜面表層にも所により層厚 2m 程度の崖錐堆積物が分布するが、これらの土砂は掘削面の法肩にわずかに出現するだけで、掘削面の大部分は砂岩礫岩泥岩互層の新鮮岩及び弱風化岩、強風化岩で占められる（図 1）。このうち新鮮岩及び弱風化岩は、硬さや亀裂の少なさから、法面勾配を 1:1.0 とし植生工は有機質系基材 t=5cm、強風化岩は、岩組織を残すもののボーリングコアでは礫状となる部分が多く、掘削面では土砂と同等の性状と推定し、法面勾配は 1:1.2、植生工は土砂系基材 t=3cm が妥当と評価した。

しかし自然斜面の表層を剥ぎ取るような切土で掘削面の地質分布は複雑であるうえ、掘削面における強風化岩の性状は推定によるもので、調査頻度も低く、多くの不確実さが残る。区間によっては強風化岩が法尻から法肩まで分布するため、植生工の規格が十分でない場合は全面的に剥落することも懸念される。本事例では、強風化岩の植生工選定において発生する地質リスクの取り扱いが、工法や工費に大きく影響する。

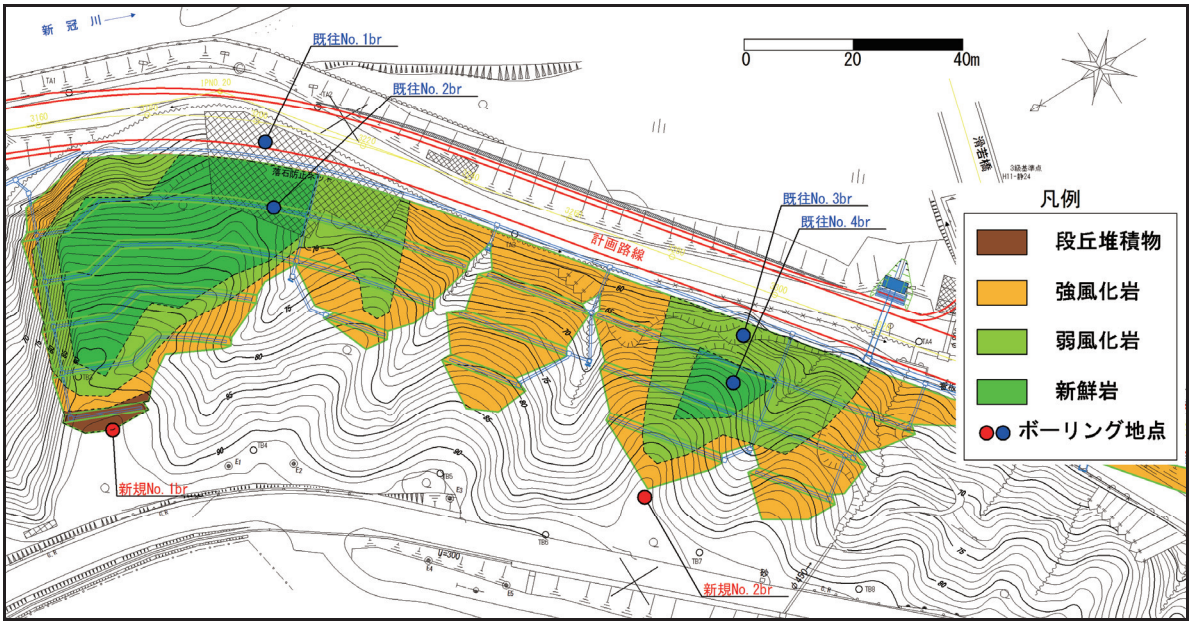


図 1　法面の地質分布

2. 事例分析のシナリオ

本事例では地質リスクが発現していないが、1)設計段階でリスクを回避するシナリオを想定し、2)発注段階で地質リスクを管理したケースとを比較することにより、リスク管理の効果を検証した。

(1) リスクを設計段階で回避（想定）

地質リスクを回避するため、規格の高い植生工を選定する。地質分布及び掘削面での強風化岩の物理性状の不確実性を悲観的に評価し、施工性を考慮すれば、工費が若干大きくなっ

ても全面を規格の高い植生基材（t=5cm）で設計することに妥当性が見出される。

地質調査段階で発生した地質リスクは、設計段階で回避し管理が不要となる。この結果、設計変更や工期変更が発生せずに工事が完了する、という効果がある。

一方で、地質調査結果の評価に基づいた規格の植生工を選定した場合に比べ工費が高くなっており、規格の高い植生工とリスクのある規格の植生工との差額で地質リスクを管理しているとも言える。

(2)リスクを発注段階で管理（本事例）

設計段階ではリスクが介在する地質調査結果に基づいた規格の植生工を選定し、工事発注前に安価な事前調査を行って妥当性を検証したうえで工事発注を行う。

地質調査段階に比べて信頼性の高いデータを、発注者及び設計者、地質調査者が共有し、地質調査結果での推定内容や、植生工選定に用いた指標を検証することで、地質調査段階で発生した地質リスクを管理する。この結果、設計時の選定が妥当であれば計画どおり工事発注を行い、リスク発現が予測される場合には植生工の規格を高いものに変更する。

施工中に地質リスクが予見され回避する場合に比べ、発注後の事業費や工期の変更がなく事業が円滑に遂行できる効果がある。

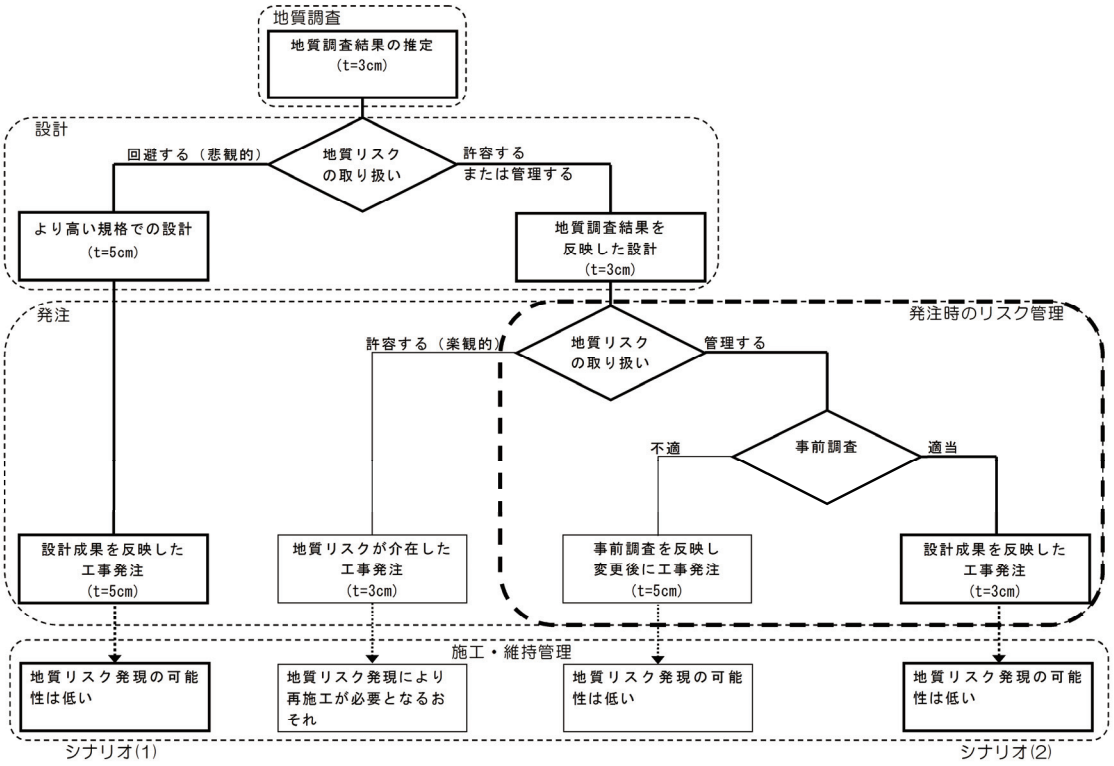


図２　事業段階と地質リスクの流れ

（）内は強風化岩に対して選定された植生基材厚

3.データ収集分析

基礎的な事例であるため、以下のとおりシナリオやマネジメント効果を検証するための十分なデータが得られている。

・地質条件

地質調査段階と事前調査における調査結果から、植生工選定に用いた指標、及び各段階での不確実さが把握される。

地質調査段階ではボーリング調査（コア状況）及び速度検層、室内岩石試験結果から植生工選定の指標を推定した。事前調査ではスケッチ及び土壌硬度試験が行われた。本事例では粒度による評価が不要なため省略しているが、一般的な条件では土の粒度試験等の室内試験も必要となる。

・技術者の判断と想定されるトラブルの内容

地質調査者が地質調査結果における不確実さを、設計者が植生工選定時の地質リスクを、それぞれの成果報告書で指摘しており、地質調査者や設計者の判断によって設計段階までにリスクを回避すると（シナリオ(1)）、地質リスクは発現しないが工費が大きくなる。

・当初設計の変更

工事発注前にリスク管理を行っているため設計変更は発生しない。また本事例では設計時の規格が妥当となったため修正設計も発生していないが､修正設計が必要となったとしても､図面数量の修正のみで軽微なものである。

・その他

マネジメント効果を検証するための事業費は、それぞれの規格の植生工費と面積で簡易に評価できる。事前調査費用は標準的な歩掛り等がないため、トレンチ調査の歩掛り[3)]を参考に作成した。調査内容は標準的なものとして、スケッチ、土壌硬度試験、土の粒度試験（最大粒径 37mm）を行うものとしたが、粒度試験の規格や化学試験の追加など、条件に応じて増減するのが合理的である。

4. マネジメント効果

1)本事例のマネジメント効果

施工単価及び事前調査の費用は以下のとおり設定した。

・植生工基材（有機質系）t=5cm　3,800 円/m^2
・　〃　（土砂系）　t=3cm　2,850 円/m^2
・掘削面調査費　46,400 円/箇所　調査頻度：1 箇所/1,000m^2 程度
（スケッチ,土壌硬度試験,土の粒度試験）
・報告書作成費　78,900 円/業務

各シナリオでの事業費は以下のとおり算出される。

シナリオ(1)：

（t=5cm の単価）×（法面全体の面積）

＝3,800 円/m^2×8,119m^2　＝30,852 千円

シナリオ(2)：

（t=3cm の単価）×（強風化岩の面積）＋（t=5cm の単価）×（強風化岩以外の面積）
＋（掘削面調査）×（強風化岩の面積/1,000m2）＋（報告書作成）

＝2,850 円/m^2×5,660m^2＋3,800 円/m^2×2,459m^2＋46,400 円×6 箇所＋78,900 円

＝25,832 千円

以上のとおり、本事例では 35 万円程度の事前調査を行うことで、規格の低い植生工の施工が可能となり、約 500 万円（直接工事費）のコスト縮減につながった。

また本事例では、地質リスクが指摘された地質調査及び設計報告書を受け、発注者の判断

によって地質リスクを管理する方針となったが、リスク管理を行わないケースも想定可能である。施工中や施工後にリスクが発現して植生工をやり直した場合、当初の工事及び剥落範囲のやり直し工事の合計は4,700万円程度に増加し、本事例の2倍近い事業費となるうえ、道路供用が1カ年単位で遅れる恐れがあった。

2)植生工選定における地質リスク管理の課題

本事例では、1.不確実さを介在する強風化岩が法面に広く分布するため、リスクの取り扱いによって事業費が大幅に変化する、2.掘削工事と植生工事が別時期の発注となり、発注前の事前調査が可能、という条件のもとで、地質リスク管理を行うことで合理的に事業が遂行された。植生工選定における地質リスク管理の効果に汎用性を持たせるため、以下の課題を克服する必要がある。

・現状の把握とリスク管理の可能性

地質調査段階での指標、設計段階での判断、発注内容、施工中及び維持管理段階での植生工剥落の有無等の事例を収集し、地質リスク管理によるコスト縮減やリスク発現の回避が可能か検証する。

・検証シナリオの普遍性の確立

本事例では2つのシナリオを比較したが、図2に示すように地質リスクを管理せずに工事を発注したケース（リスクが発現するケース、リスクが発現しないケース）や、事前調査結果に基づいて設計の修正を行うケースなども発生しうる。汎用性を得るためには各ケースについてデータ集種分析が必要になるものと考える。

・植生工の規格や面積によるコスト縮減効果の定量化

不確実な地質の分布（面積や割合）によって、また選定しうる基材の規格によって、コスト縮減の効果がどのように現れるか定量化する。

・事前調査の手法と費用の定量化

不確実な地質の性状に応じた事前調査の項目や頻度を検討し､事前調査費用を定量化する。掘削工と植生工が同一の工事となる場合に対しても、トレンチ調査等による事前調査が可能と考えられ、調査費用の定量化が望まれる。

5.データ様式

本事例では、地質リスクが発現していないためA表を用いるが、マネジメント効果はリスクを回避した想定シナリオと、リスクを管理した本ケースの比較となるため、(③－①－②)で表現される。

表3　データ様式A表

大項目	小項目	データ
対象工事	発注者	北海道室蘭建設管理部
	工事名	滑若新冠（停）線災害防除工事
	工種	法面保護工（植生工） 前年度に切土工施工済み
	工事概要	植生工 基材吹付（土砂系）　t=3cm 5,660m^2 （有機質系）　t=5cm 2,459m^2
	①当初工事費	25,475千円

	当初工期		2ヶ月
リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		発注時
	予測されたトラブル		過大な規格の植生基材使用によるコスト増大
	回避した事象		
	工事への影響		なし
リスク管理の実際	判断した時期		設計時、工事発注前
	判断した者		発注者、設計者、地質調査者
	判断の内容		植生基材の規格の妥当性
	判断に必要な情報		追加調査による掘削面の地質性状
リスク対応の実際	内容	追加調査	掘削面の観察、土壌硬度試験、土の粒度試験※ ※一般的な条件での試験項目で、本事例では粒度の評価が不要なため省略
		修正設計	なし
		対策工	なし
	費用	追加調査	357千円（一般的な地質条件の場合）
		修正設計	なし
		対策工	なし
		②合計	357千円
変更工事の内容	工事変更の内容		リスク管理を行わずに事業を完了するため、全面を高い規格の植生工で施工するシナリオを想定。
	③変更工事費		30,852千円
	変更工期		なし
	間接的な影響項目		
	受益者		納税者
リスクマネジメントの効果	費用（①－③－②）		③－①－② ＝ 5,020千円
	工期		なし
	その他		結果的には、地質調査結果に基づいて植生工を選定し、地質リスクを管理しなかったとしても、工事は無事に完了していた。しかし地質リスクが発現した場合は事業費はおよそ2倍に増加し、道路供用が1カ年単位で遅れることを考慮すれば、設計時にコスト縮減よりも地質リスク回避の方針を採用した可能性が高い。 本事例は、掘削工と植生工が別時期の工事となったため、植生工発注前に発注者、設計者、地質調査者が協議を行って地質リスクを共有することで、合理的な事業遂行が可能となった。

<参考文献>

1)日本道路協会（2009）：道路土工-切土工斜面安定工指針,P228-229

2)(社)全国特定法面保護協会（2006）：のり面緑化工の手引き,P40-42

3)(社)全国地質調査業協会連合会(2007):全国標準積算資料(土質調査・地質調査),II-44-46

［論文 No. 5］　**礫層を主体とした地すべり地における集水井施工時の変状と対策**

明治コンサルタント株式会社　　○植松　聡、英　弘、菊田　寛
北海道小樽建設管理部　　吉田　耕輔

１．事例の概要

路線の安全確保を目的に地すべり対策工である集水井の施工中に、予期せぬ気象条件（気温の上昇）により集水井の孔壁から湧水が発生し、集水井の一部が変状した。

本報告は、この事象に対し早急な対応で地質リスクを最小限に回避したことにより、問題なく工事が行われた事例である。

当該路線は、主要道道で観光道路としても有名な路線となっている。

路線沿いには、地すべり地が多く分布し現道の安全を確保するための地すべり調査・解析設計および対策工が随時実施されてきた。

これまでの地すべり調査により、地下水位の上昇と地すべり活動が密接に関係していることが判明したため、地下水排除工を主体とした対策工法が施工されてきた。

対策工の効果に伴い、地下水位も低下し地すべり活動も沈静化にむかっていった。

対策工は、リスク回避の面から基本的に低水期に実施してきた。

しかしながら予期せぬ気象条件により低水期に実施したにもかかわらず、施工中に集水井の一部が変形してしまった。

上記事象に対し、極力地質リスクを低減し対策工を施工していく必要があった。

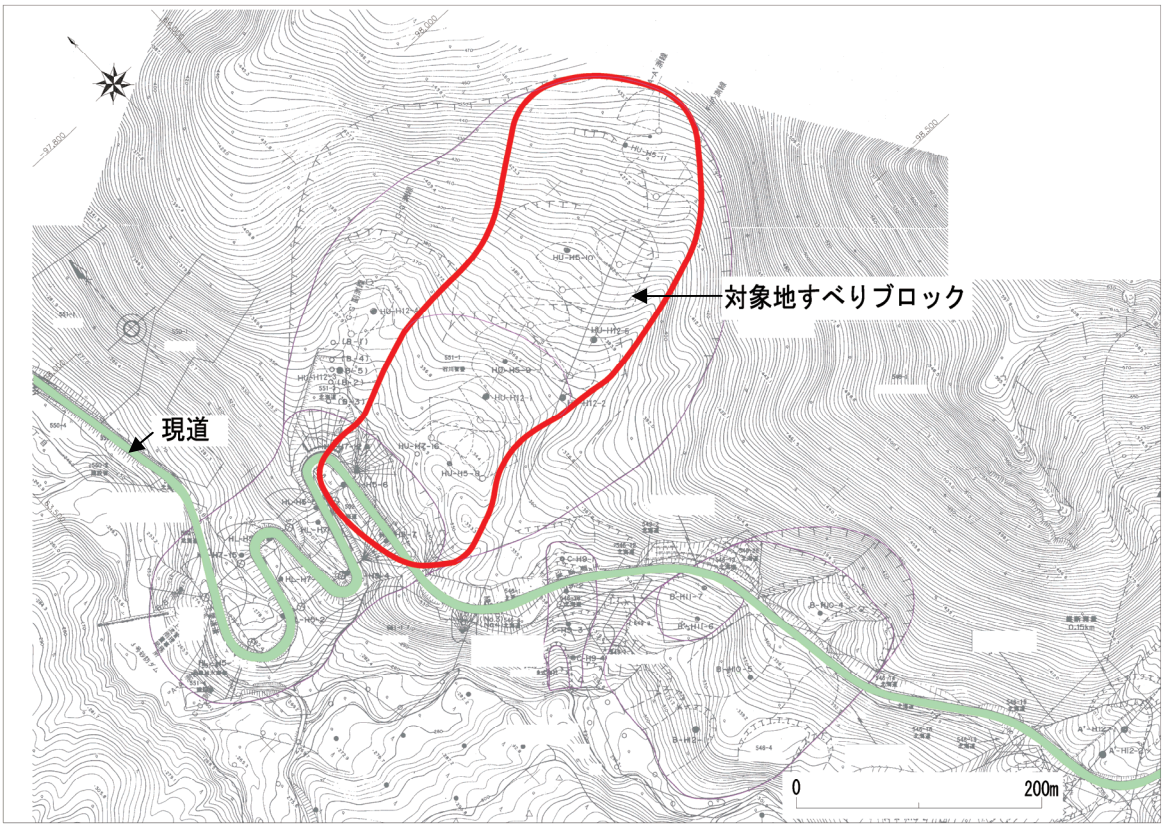


図１　現道と地すべりの関係

２．事例分析のシナリオ

地質リスクを低減し安全に対策工を施工していくにあたり、以下の事項について検討を行った。

【検討事項】

(1)変状状況の把握

地すべり土塊は、ボーリング調査結果から基盤岩の泥岩、凝灰角礫岩を覆う玉石を多く含む礫混じり土であることが判明していた。

計画されていた集水井は、φ3500mm で全長 23.5m である。

施工掘削当初の地質状況は、玉石、礫混じり粘土～砂であった。

地山は自立し、大きな崩壊につながるような兆候も無く、作業は行われた。

しかしながら、GL-14.0m付近掘削段階で、GL-7.0m 付近から湧水が出現し、孔壁の土砂が流出し集水井に変状がみられた。

また、土砂流出により地上部まで影響がおよび、地表部でも陥没等の変状がみられた。

(2)変状区間の予測

集水井の掘削を進めるにあたって、近傍の土質柱状図等を参考に今後の土砂流出箇所の予測を試みた。この結果、土質は近傍のボーリング柱状図を参考にすると「礫混じりシルト～砂」に相当し、変状箇所は、マトリックスを比較的多く含んでいる。標準貫入試験値を見ると礫障害によりＮ値=50 以上を示す箇所とＮ値=10～30 位の低い値を示す箇所が交互に現れ、大きな差異はない。

集水井の変状は、地下水の流入により、礫間のマトリックスが流出したことが原因と考えた。

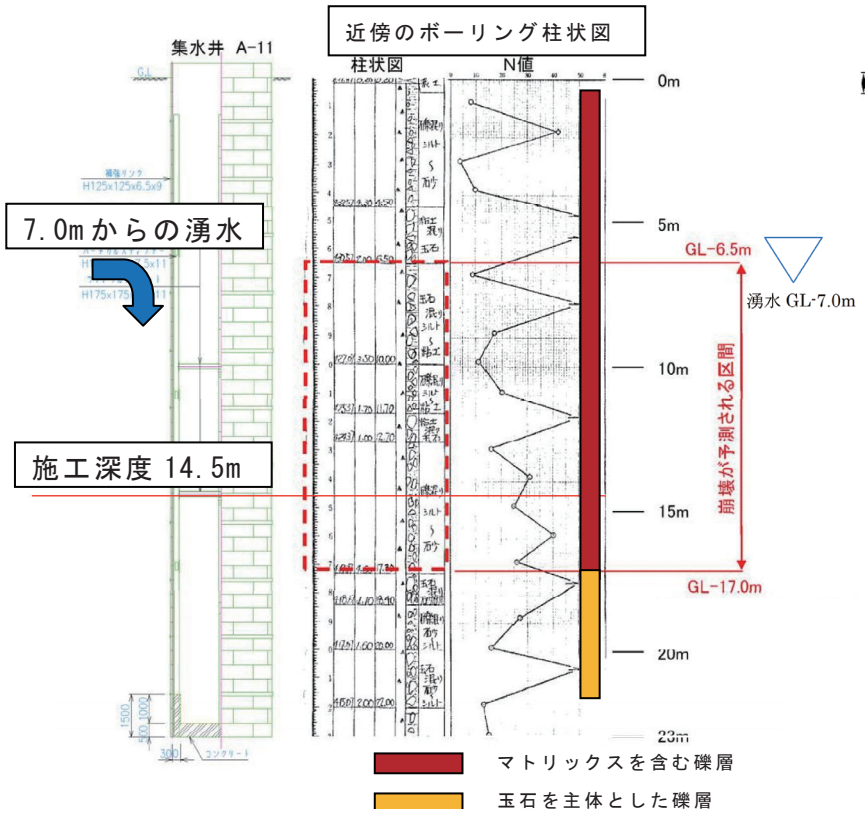
以上のことから土質状況と地下水状況を加味した場合、マトリックス部分の多い深度 6.5m から深度 17.0m 区間が緩み範囲と判断した。

(3)現況の集水井の構造検討

集水井の変状状況を把握し、構造上・機能上に問題があるか検討する必要があった。

偏芯量の測定およびライナープレートの歪・欠損等について調査した結果、偏芯量に関しては､規格値内であった。また集水井の折れ曲がり等局所的な変形はないことからライナープレートの断面欠損もないことが判明した。

以上のことから現在施工されている集水井は使用可能と判断した。



(4)対策工の検討

地盤状況から判断すると、集水井をこのまま掘削することは困難と考えられ、何らかの補助工法が必要と判断した。

対策工選定にあたる条件

①湧水によりライナープレート周辺の地盤は緩んでいる。

②現在施工されている集水井は使用可能である。

③施工は融雪期前に完了させること。

３．データ収集分析

本事例では、突発的な湧水が発生し、施工中に集水井の一部が変状した。

変状したエリアを特定し早急な対応により、施工中の集水井をうまく有効利用することができた。

本事例において、問題なく集水井が施工可能となったポイントは以下のように考える。

(1)集水井変状後の早急な対応

集水井の変状がみられたのは 12 月の渇水期で、変状原因は予見できなかった気温上昇に伴う湧水によるものであった。

3～4 月以降の融雪期までに施工を完了させるため、集水井の変状が進行しているか否かの判断として、偏芯量の測定およびライナープレートの歪・欠損状況の確認を一定期間行った。また、発注者・施工者・設計者による三者検討会を密に実施したことにより安全面、補修工の可否の判断等を早期にすることができた。

(2)的確な対策工の選定

変状した集水井に対する補助工法として、対策工検討で示した条件を考慮するとともに、今回のような予見できない事態にも対応できる工法を選定することができた。

選定した工法は、薬液注入工法である。

本工法は、薬液「水ガラス系無機溶液型」を地山の空隙に充填し地山の改良を図る工法で、注入後の硬化時間が自由に調整できるため注入材が目的範囲外へ漏出することは少ない。

また、一定期間後は硬化した薬液注入材は分解するため集水井の集水効果を阻害することはない。

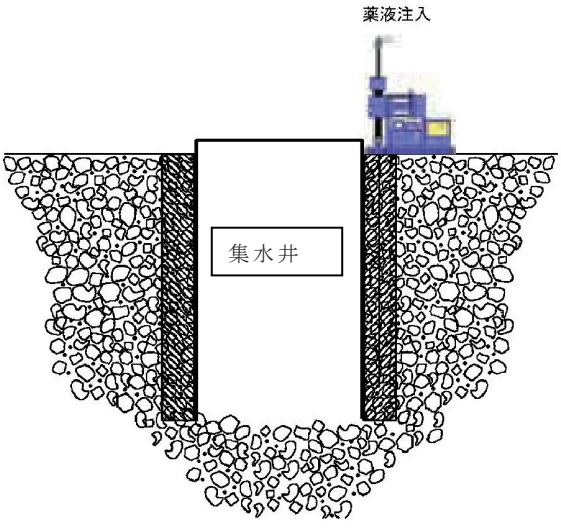


図３　薬液注入工法イメージ図

４．マネジメント効果

本事例に対するマネジメント効果は、以下のとおりである。

マネジメント効果費

リスクを回避しない場合の施工費－（当初施工費＋追加対策工費）

	リスクを回避しなかった場合	リスクを最小限に回避した場合
方針	集水井工のやり直し	補修対策の実施
必要な調査項目	集水井施工位置の再選定 調査ボーリング 集水井工設計	補修対策工検討
対策工事	集水井工	補修工：薬液注入工
費用 調査費＋施工費	145,084 千円	137,084 千円
マネジメント効果費	8,000 千円	

今回実施した補修対策（薬液注入工）に関し、実際に要した本体対策工費、補修対策工費をあわせた総額は、137,084 千円であった。リスクを回避しなかった場合、やり直しに必要な調査費および本体対策工事費をあわせた総額は、145,084 千円と想定される。

以上のことからマネジメント効果費としては約 8,000 千円と算出される。

効果費の他、施工期間の遅れも考慮すれば、リスクを回避しなかった場合の道路利用者に対する影響も大きいと考える。

５．データ様式の提案

検討結果について次頁のＣ表に示した。

本事例は、早急な対応で地質リスクを最小限に回避したことにより、工事も問題なく終了した事例紹介である。

「マネジメント効果」で、リスク発現事象、対応方法、施工費用項目の他、定量的に表現しにくいが“安全面（安全管理手法の提案）”について項目を追加することも地質リスクマネジメントとして重要であると考える。

C. 発現した地質リスクを最小限に回避した事例

大項目		小項目		データ
対象工事		発注者		北海道小樽建設管理部
		工事名		小樽定山渓線交付金改築工事
		工種		地すべり対策工
		工事概要		集水井工 3 基、集水ボーリング工
		①当初工事費		126, 084 千円
		当初工期		平成 22 年 9 月～平成 23 年 3 月
発現したリスク	リスク発現事象	リスク発現時期		集水井施工中　12 月の冬季
		トラブルの内容		集水井の孔壁の土砂流出
		トラブルの原因		予期せぬ気象条件による湧水
		工事への影響		調査・対策のため工事一次中止
	追加工事の内容	追加調査の内容		---
		修正設計内容		---
		対策工事		---
		追加工事		---
		追加費用	追加調査	---
			修正設計	---
			対策工	---
			追加工事	---
			②合計	---
		延長工期		---
		間接的な影響項目		---
		負担者		---
最小限に回避したリスク	リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		工事再開後
		予測されたトラブル		集水井の陥没・閉塞
		回避した事象		工事の長期中断、集水井の変状
		工事への影響		工事の一時中断
	リスク管理の実際	判断した時期		工事中断後
		判断した者		発注者、コンサルタント技術者
		判断の内容		集水井の補修
		判断に必要な情報		集水井の現況状況 既往調査報告書
	リスク対応の実際	内容	追加調査	現地集水井状況確認
			修正設計	薬液注入工法
			対策工	薬液注入
		費用	追加調査	0 千円
			修正設計	0 千円
			対策工	約 11,000 千円
			③合計	約 11,000 千円
	回避しなかった場合	工事変更の内容		集水井のやり直し
		④変更後工事費		約 145,084 千円
		変更後工期		1 年遅れ
		間接的な影響項目		対策事業完了遅れ
		受益者		管理者、利用者
リスクマネジメントの効果		費用④－(①+②+③)		約 8,000 千円
		工期		1 年程度
		その他		

［論文 No. 6］　木曽川用水路の液状化対策におけるコスト縮減とリスクマネジメントの試み

岐阜大学　工学部　社会基盤工学科　○大竹　雄
岐阜大学　工学部　社会基盤工学科　　本城勇介
岐阜大学　工学部　社会基盤工学科　　原　隆史
（独）水資源機構　総合技術センター　　加藤智雄

1.　事例の概要

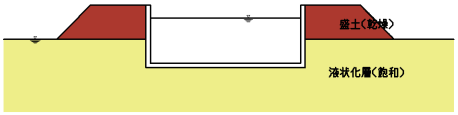
(1)　施設概要

木曽川用水路（海部幹線水路）は，愛知県西部に位置し，木曽川大堰で取水した水を木曽川左岸沿いに流下させ，愛知県および三重県へ農業用水，工業用水および水道用水として送水している．当該水路は，計画最大取水量が毎秒約 42m³，延長が約 32km の長大水路であり，両県の地域産業を支えるとともにライフライン機能も有し，社会経済上欠くことのできない重要な施設となっている．

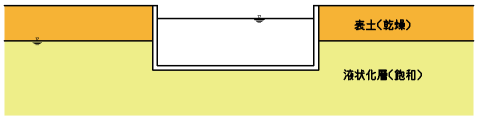
構造形式は RC フルーム形式で，管理用道路の併設により水路近傍に盛土が設置された構造（盛土タイプと呼称）と水平地盤に掘込まれた構造（掘込みタイプと呼称）が存在する．

基礎地盤は，形成過程より大きく 3 区分されるが，本論文では，その中流部に位置する STA30～150 の約 12km 区間（1STA は 100m）を対象とする．その表層部には液状化が懸念される飽和した砂質土層 As が堆積している．層厚は 12m 程度で，比較的均等径の細砂を主体とし，平均 N 値は 15 程度を示す．地盤調査は，水路 12km 区間に 32 箇所（約 300m 間隔）の標準貫入試験が実施されている．

当該地域は，東海地震の震源域から約 150km，東南海地震の震源域から約 50km 離れた位置に設置されている．当該施設は震源域からやや離れているものの，想定される震源規模が大きく，基礎地盤の液状化に伴う施設被災が懸念され，地震発生の切迫性から早期の地震対策が求められる．



(a) 盛土タイプ



(b)堀込タイプ

図-1　水路の構造形式

図-2　液状化履歴図（若松 2011[1] に加筆）

(2)　リスク事象

図-2 には，液状化履歴[1]と水路の位置関係を示している．当該水路は，旧河道を改築して設置されており，1944 年の東南海地震においては，水路に沿って液状化に伴う噴砂等の形跡が確認されている．特に対象区間（STA30 より下流）では，基礎地盤の液状化の発生の可能性が高い環境条件にある．

当該水路の設置目的は，「周辺地域へ自然分水するために必要な水位を確保しつつ必要な流量を下流部へ通水すること」にある．当該水路の水は，都市用水としても利用されることから，地震直後においても周辺地域への分水することが求められる．よって，水路変状により，「水路機能が機能不全になる状態」をリスク事象とした．具体的には，水位の確保という観点から水路躯体の絶対沈下量を，必要な流量の通水

の観点から水路ブロック間の継目部での相対変位量に着目した(図-3).

絶対沈下量については，波浪等に備えた安定的な通水のために常時確保している水路壁の余裕量(フリーボード;δ_1)を地震直後においては一時的に確保しなくても良いものとし，60cm を制限値とした．相対変変位量に関しては，躯体の底版厚以上の相対変位は，漏水を引き起こす可能性があるため，底版の厚さ（δ_2＝60cm）を指標とした．

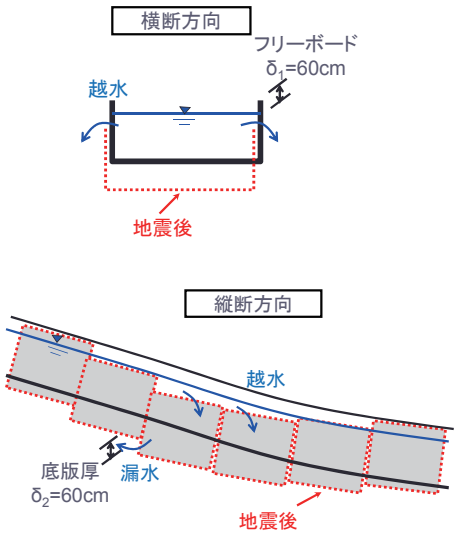
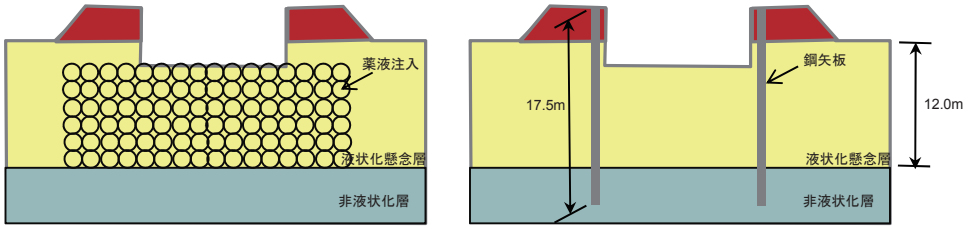


図-3　当該水路のリスク事象（限界状態）

(3)　検討方針

リスクマネジメントを実施する前段検討として，液状化判定や模型実験や有効応力 FEM 解析により，地震時挙動評価を確定論的に検討した[2)3)]．その結果，全区間で対策工実施の必要性があると判断された．

水路のような線状構造物は，その延長の長さから，対策費用が膨大となることが予想される．従って，地点毎に変化するリスクを適切に評価し，優先順位をつけて対策を講じることが重要になる．また，対策工の案は，図-4 に示す液状化抑止対策（薬液注入工）と，液状化抑制工法（鋼矢板による締切り工法）を選定した．前者は，一般に高価であるが液状化を抑止する観点で対策効果の信頼度が高い（不確実性が低い）工法である．一方，後者は，要求性能を満足する範囲で基礎地盤の液状化とそれに伴う水路の変形を許容する対策であり，対策の不確実性が異なる．以上より，直接的な工事費だけでなく，地点毎の地質リスクや対策工の不確実性を定量化して合理的な対応策の選定を試みる．



単位延長あたりの単価：3,000 千円/m　　**単位延長あたりの単価**：8,300 千円/m

図-4　対策工概要図

2.　事例分析のシナリオ

(1)　リスクの定義

本論文では，リスクを損失期待値（事象の生起確率とそれに伴う社会的損失の積）として定義し，リスクに基づいて各対応策のシナリオのリスクを試算する．なお，評価年は 30 年とする．

$$R=\sum_{i=1}^{30}P_i\times D\times\frac{1}{(1+r)^{i-1}}=\sum_{i=1}^{30}P_{ei}\times P_{si}\times D\times\frac{1}{(1+r)^{i-1}} \qquad (1)$$

ここで，R：当該水路のリスク，P_i：i 年目のリスク事象の生起確率，P_{ei}：i 年目における対象地震の生起確率，P_{si}：i 年目のリスク事象の生起確率，D：水路が機能低下に陥った場合の社会的損失，r：社会的割引率（ここでは 0.04 と仮定）

①　生起確率

生起確率は，「対象地震の生起確率」と「各種地質リスク要因や設計モデル誤差の不確実性」を考慮して評価する．　なお，本論文では，外力（地震動強さ）の特性に関する不確実性については考慮していない．

□地震の発生確率(P_{ei})

対象地震を東南海地震とし，今後 30 年間における生起確率を用いる．ここでは，地震調査研究推進本部[4]の推定結果より 50%と設定する．

□リスク事象の生起確率(P_{si})

リスク事象の生起確率の算定方法の詳細は，大竹・本城[5]に譲り，ここでは，着目した不確実性の項目とその概念のみを示す．

・調査・計測誤差

調査や試験に含まれる，いわゆる計測誤差である．ここでは，調査・計測誤差が含まれた N 値を用いてモデル地盤を作成するため，調査・計測誤差は，「空間的バラツキ」に含まれているものとして取り扱う．（事実上分離できない）

・空間的バラツキと統計的推定誤差

空間的バラツキをもつ不均質な地盤材料から，設計計算に用いる地盤パラメータを限られた地盤調査（サンプル）から推定することによる不確実性である．地盤調査の数や地盤調査を実施した位置と設計地点との位置関係（地盤調査を実施した位置から離れるほど誤差は大きくなる）に関連した誤差である．

・設計モデル化誤差

設計計算に採用されたモデルが，現実の現象を再現する精度に係る誤差である．

② 社会的損失(D)

木曽川用水路の事業評価結果[6]より，水路が限界状態による断減水による機能回復に係る経済損失額に基づいて設定する．ここでは，液状化にともなう変状および補修により 7 日間の断減水が生じることを仮定すると社会的損失額は 5,600（百万円）と試算される．

(2) 対応策シナリオの特徴と試算条件

対応策シナリオの特徴を表-1 に示す．対応策 1（液状化抑止対策）は，前段検討より，全区間に対して実施するものとし，地震動が強い下流部から順番に対策を実施するシナリオとする．

対応策 2（液状化抑制対策）は，リスク事象の生起確率（変形量の制限値の超過確率）が高い地点から順番に対策を実施するシナリオとする．なお，生起確率は，有効応力 FEM 解析（LIQCA[7]）により算定される変形量により評価することを基本とした．しかしながら，この手法は，延長 12km の全地点における評価や，不確実性の定量化のための繰返し計算には不向きである．従って，液状化層厚や液状化強度，地震外力を変化させたパラメトリックスタディ解析を行い応答曲面と呼ぶ「水路変形量を推定する近似的な設計式」を導き，この設計式に基づいて評価することとした．すなわち，応答曲面の説明変数（基本変数）の不確実性の定量化（確率分布によるモデル化）し，応答曲面を用いたモンテカルロシミュレーション（MCS）により算定した．

表 1 対応策シナリオ

対応策シナリオ		評価方法	照査指標	備考
対応策 1	液状化抑止対策（薬液注入工法）	液状化判定	安全率	全区間を対策
対応策 2	液状化抑制工法（鋼矢板締切り工法）	近似的な設計式（応答曲面） ※有効応力 FEM 解析によるパラメトリックスタディより導出	変形量	・水路の遠心模型実験を実施 ・追加地盤調査 3 箇所を実施(液状化強度試験)

3. データ収集分析

(1) 水路変形量を推定する近似式（応答曲面）の導出 [5)]

FEM 解析より得られた，様々な条件下における水路変形量を Sn 値 [8)]と液状化懸念層に作用する地震荷重（最大せん断応力度τ）を回帰分析により，関連付けた（(3)式，(4)式）．Sn 値は，表層地盤（20m 以内）の N 値の重み付き平均値であり，液状化懸念層の厚さ，N 値の大きさ，N 値を計測した深度(x)を考慮した表層地盤の軟弱さを表す指標である（(2)式）．

$$S_n = 0.264 \sum_{x=1.0}^{20} exp\left[-0.04N(x) - 0.24x\right] - 0.885 \qquad (2)$$

得られた応答曲面を以下に示す．

$$D_{embk} = \left(\ -220 \cdot S_n - 17.9 \cdot \tau + 144\ \right) \cdot \delta_{FEM} \cdot \delta_{RS} \qquad (3)$$

$$D_{embd} = \left(\ -53.9 \cdot S_n + 3.5 \cdot \tau - 0.6\ \right) \cdot \delta_{FEM} \cdot \delta_{RS} \qquad (4)$$

ここで，D_{embk}；盛土タイプの鉛直変位(cm)　D_{embd}；掘込みタイプの鉛直変位(cm)

τ ；地震外力（液状化懸念層における最大せん断応力度）(kN/m²)

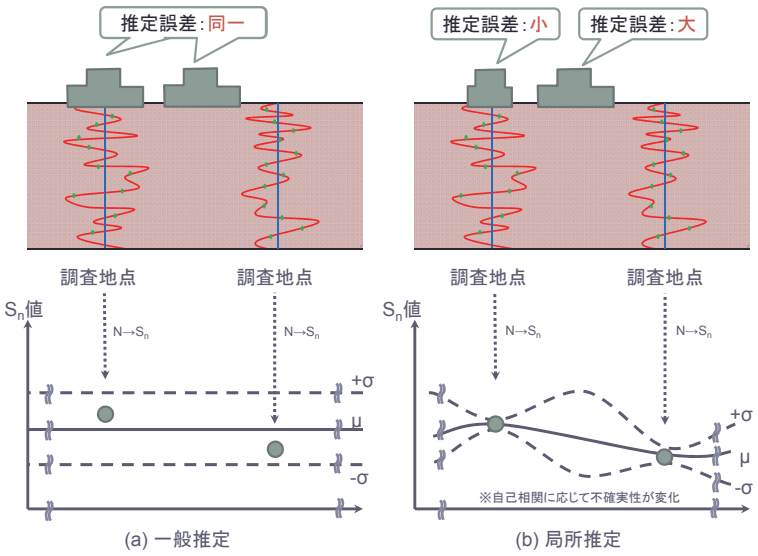
δ_{FEM}；有効応力 FEM 解析のモデル化誤差，δ_{RS}；応答曲面近似誤差

(2) 不確実性分析（定量化）

① 空間的バラツキと統計的推定誤差（地盤パラメータの推定誤差）

標準貫入試験の結果から観測される N 値の空間的なバラツキに基づいて，Sn 値の不確実性を定量化する．ここでは，地盤調査地点と設計地点の位置関係を考慮しない場合（一般推定）とする場合（局所推定）で区別して不確実性を定量化しているのが特徴的な点である．一般推定は，ある 1 点のバラツキは空間全体のバラツキに等しいとの仮定に基づき，全ての地点で同一の確率分布を与える（図-5(a)）．信頼性解析では一般的にこの方法が用いられる場合が多い．一方，局所推定とは，Sn 値の水平方向の自己相関を考慮し，Kriging による内挿（補間）による推定方法である（図-5(b)）．モデル化された確率場の 1 つの実現象として不確実性をとらえるものである．この位置関係に伴う不確実性は，本来設計に考慮されるべきものであり，また，構造物の信頼度に大きな影響を与える可能性がある．

図-6(a)は，32 箇所で実施された標準貫入試験の N 値の深度分布を示している．回帰分析より得られたトレンド関数を併記している．図-6(b)は，トレンド関数の残差（ランダム成分）の深度分布であり，図-6(c)は，そのヒストグラムである．正規分布でモデル化でき，平均値 0.0，標準偏



差 6.65，鉛直方向の自己相関距離 θ_v=0.86m を得た．図-7(a)は，この確率分布に基づいて，MCS により S_n 値の確率分布を推定した結果である．正規分布でモデル化でき，平均値-0.34，標準偏差 0.85 を得た．図-7(b)は，縦断方向任意地点における S_n 値の推定結果を示している．一般推定（General estimate），局所推定（Local estimate）の結果を併記している．なお，S_n 値の水平方向の自己相関距離 θ_h=150m と判断された．この S_n 値の不確実性は，地盤調査や地盤の空間的なバラツキ，推定誤差が含まれたものであり，当該現場の地質リスクを定量化したものである．

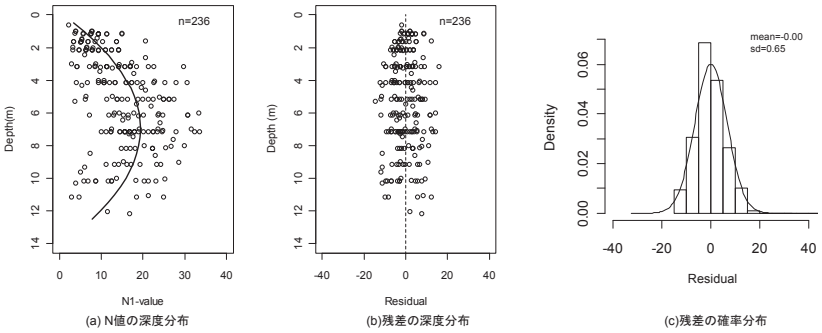


図-6　空間的バラツキのモデル化と S_n 値の推定結果

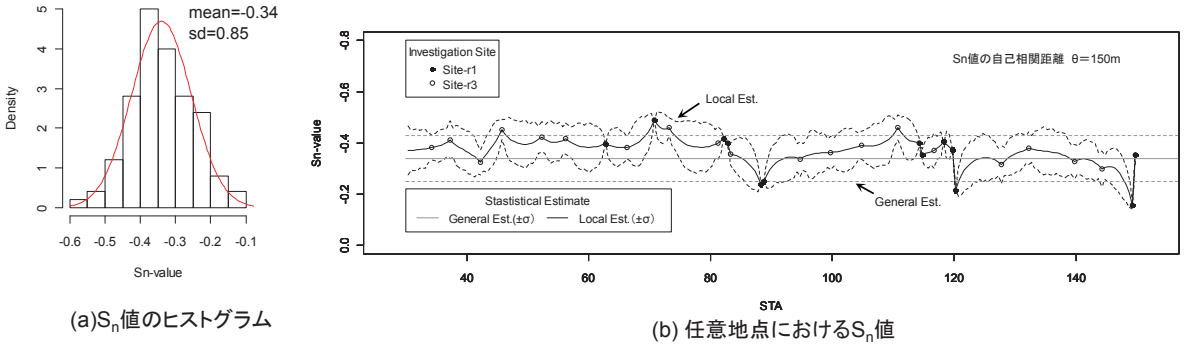


図-7　任意地点の S_n 値不確実性（地質リスク）の定量化結果

②　モデル化誤差

盛土や地中構造物など，類似構造物の模型実験ブラインド解析（実験前解析）事例を収集し，実験の挙動と解析結果の差異からモデル化した．収集整理した事例は合計 17 ケースである．その結果，誤差は正規分布でモデル化でき，平均 1.0，標準偏差 0.24 と仮定した．

また，応答曲面の近似誤差は，応答曲面の回帰分析により得られた残差を分析し，平均 1.0，標準偏差 0.14（盛土タイプ），0.10（堀込みタイプ）の正規分布と仮定した．

(3)　リスク事象の生起確率の算定結果

以上の不確実性分析結果を踏まえて，応答曲面（式(3)，(4)）の MCS を行い，水路の任意地点におけるリスク事象の生起確率 P_f（水路変形量の制限値の超過確率）を算定した（図-8）．全般的に，一般推定がやや大き目の超過確率を示しており安全側に評価する傾向があるが，STA90 付近や STA120 付近等で局所的に過少評価（危険側）している場合もあることがわかる．一般推定は，区間全体のデータを用いて不確実性を評価するため，一般的に安全側の評価をすると考えられているが，場合によっては危険側の評価になる可能性もあり，局所推定の重要性が指摘できる．また，局所推定は STA90 や STA120 など局所的な弱部（P_f が大きい地点）を抽出することができており，対策の優先順位を決定する際に重要な情報になると考えられる．

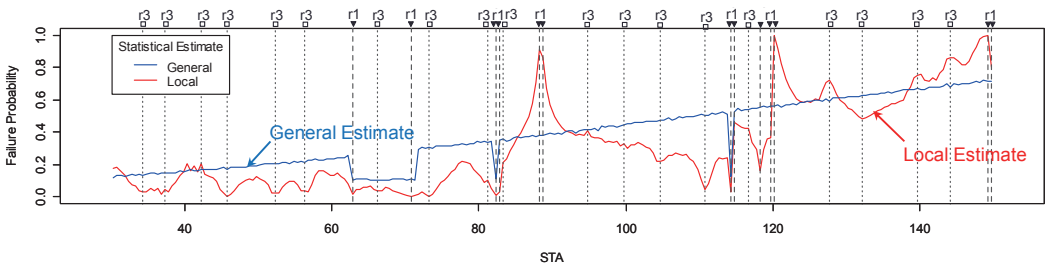


図-8　任意地点におけるリスク事象の発生確率

4.　マネジメント効果

図-9 に，各シナリオにおける対策投資(C ; cost)とリスク低減効果(ΔR＝B，B ; benefit)の関係を示した．対策は，リスク事象の生起確率が大きい地点から順に実施するものとして試算している．

これより，対応策 2（液状化抑制対策）の投資効果が高く，また，不確実性を局所推定により評価して対策優先順位を決定した場合（対応策 2-2）が最も早期に施設のリスクを低減できることが分かる．B=C となる基準線を併記しているが，この基準線は対策効率性の観点で有効な対策の判断基準となる．対策工 2 は対策工 1 に比べて対策効果の不確実性が大きいことが懸念されたが，対応策 2 の残余リスクは保有すべきリスクと判断され，十分有効な対策のひとつと考えられる．

以上より，対策 2-2 の方針が最も有効であることが確認された．なお，コスト縮減効果は，対策 2-2 と B=C ラインの交点を基準として考えると，対応策 1（当初計画）に比べて，37,500（百万円），対策 2-1 に比べて，7,500（百万円）と試算される．

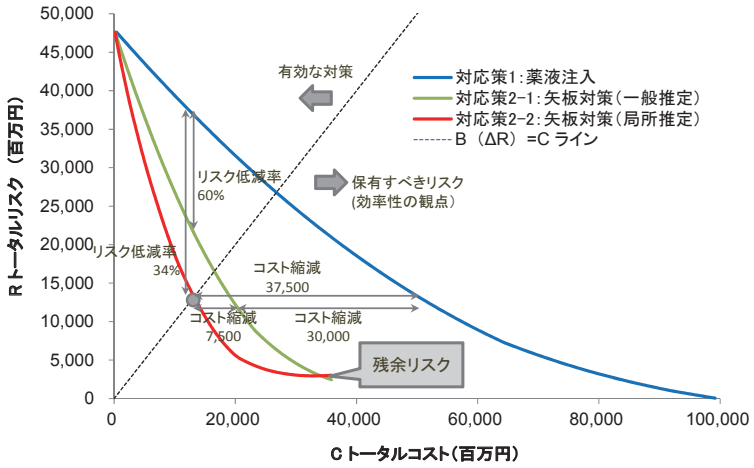


図-9　対策効果と対策投資額の関係

参考文献

1)若松加寿江：日本の液状化履歴マップ 745-2008，2010
2) 乙志和孝，大竹雄，加藤智雄，原隆史，八嶋厚：排水機能付き矢板を用いたフルーム開水路の液状化対策に関する解析的研究，地盤工学ジャーナル，Vol.5，No.4，pp569-587,2010
3) 乙志和孝，加藤智雄，原隆史，八嶋厚，大竹雄：排水機能付き鋼矢板を用いたフルーム開水路の液状化対策に関する実験的研究，地盤工学ジャーナル，Vol.5，No1.1，pp19-33，2010
4)地盤調査研究推進本部 地震調査委員会：南海トラフの地震の長期評価について，2001,9
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01sep_nankai/index.htm＜2011.8.31 アクセス＞
5) 大竹雄，本城勇介：応答曲面を用いた実用的な地盤構造物の信頼性設計法：液状化地盤上水路の耐震設計への適用，土木学会論文集，投稿中
6) 独立行政法人 水資源機構：木曽川右岸施設緊急改築事業の水道事業に係る事業評価，2008.8
7) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ：LIQCA2D07（2007 年公開版）資料, 2007.
8) 後藤尚男,亀田弘行,杉戸真太：地震動の最大地動予測における N 値を用いた地盤条件の評価法について，土木学会論文報告集第 317 号, 1982

A. 地質リスクを回避した事例

大項目	小項目		データ
対象工事	発注者		独立行政法人水資源機構
	工事名		海部幹線水路耐震対策工事
	工種		液状化対策
	工事概要		延長 12km の水路基礎地盤の液状化対策. 当初計画では全区間に薬液注入工を実施することが計画されていた.
	① 初工事費		37,500 百万円
	当初工期		
リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		
	予測されたトラブル		
	回避した事象		
	工事への影響		
リスク管理の実際	判断した時期		
	判断した者		
	判断の内容		
	判断に必要な情報		
リスク対応の実際	内容	追加調査	液状化強度試験の実施(3 箇所)
		修正設計	動的有効応力 FEM 解析による設計
		対策工	矢板による締切り対策
	費用	追加調査	30(百万円)
		修正設計	90(百万円)
		対策工	10,250(百万円)
		② 計	10,370(百万円)
変更工事の内容	工事変更の内容		
	③ 更工事費		
	変更工期		
	間接的な影響項目		
	受益者		
リスクマネジメントの効果	費用(①－③－②)		37,500 - 10,370=27,130 百万円
	工期		
	その他		

※工事未着手(設計時点)の検討結果であり, 定量的に記入できない部分は空欄としています.

［論文 No. 7］　　標準勾配で切土した岩盤法面の崩壊事例

株式会社朝日土質設計コンサルタント　○笠原健司
土岐市役所建設部都市計画課　加藤　剛
岐阜大学工学部社会基盤工学科准教授　原　隆史

1.事例の概要

当業務は、標準切土勾配（1:1.2）で切土した岩盤法面の崩壊（崩壊規模：延長約 40m、すべり面長さ約 40m、滑落高約 5m）について、崩壊機構を解明し、排土および切土補強土工による対策を施したものである。

本事例は、工事に伴い崩壊が発生している（すなわちリスクが発現した）ことから、B タイプに属する事例とも言える。しかしながら、ここではその後の対応において潜在するさらなるリスクに着目し、適切な調査と検討からこれを最小限に回避した事例（C タイプ）として報告する。

なおリスクマネジメント効果の検証として、リスク対応の実際の工費と、リスクを回避できなかった場合の想定工費との比較を行った。この結果、約 4,700 万円相当のリスクマネジメント効果を見込むことができた。

2.事業分析のシナリオ

(1)初期崩壊の概要

当該法面は、切土前は遷急線明瞭な凸状をなしており、淡青灰を呈する塊状岩盤が地表に露出していた。このため地質調査を行うことなく、標準法面勾配「1:1.2」にて切土された。

表 1 崩壊の概要

崩壊規模	延長40m すべり面長40m 滑落高5m（図1）		
崩壊形態	滑落崖（図2・3）	くさび崩壊	N15° W85° Wの節理に規制
			N70° E70° Nの節理に規制
	すべり面	平面すべり崩壊	N80° W23° Nの層理に規制
地形	凸型尾根斜面		
	崩壊法面背後には明瞭な鞍部が形成されている。		
地質	凝灰質砂岩		
備考	崩壊法面は軟岩の安定最緩勾配である「1:1.2」で切土された。		
	崩壊は切土完了直後に発生、法面保護工は未施工であった。		
	発生時に震度2の地震があった。		

しかしながら、当該法面は地質構造に崩壊素因を内在しており、かつ、岩盤緩みの兆候が認められる異常地形（凸型斜面・崩壊背後の鞍部など）の端部に位置していたことから、切土による緩みの助長を誘因とした、複合すべり崩壊（くさび崩壊+平面すべり崩壊）が発生した。崩壊規模は、延長約 40m、すべり面長さ約 40m、滑落高約 5m と大規模なものであった（表 1、図 1～図 3）。

崩壊発生時期は切土完了直後である。

図 1　切土法面全景（崩壊直後）

図 2　滑落崖全景

図 3　滑落崖の条痕

(2)崩壊後の潜在リスク

①地盤調査

崩壊発生後、管理者・地質技術者・学識経験者を交え協議し、崩壊機構の解明・対策工方針の決定を目的として、標準断面にてボーリングを 3 箇所（L=43m）、弾性波探査を 2 測線（L=190m）、比抵抗二次元探査を 1 測線（L=90m）実施した（図 4）。

この結果、以下 5 点の調査結果を得た（図 5）。

＜調査結果＞

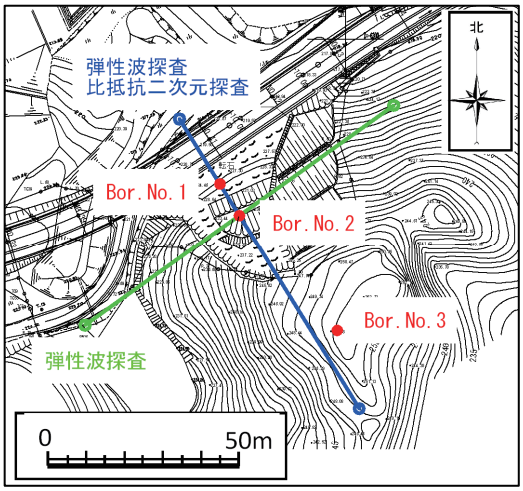


図 4　調査地点位置図

・ボーリング No.1～No.2 より、崩積岩塊層（Dr）と安定した基盤岩（Ms）の境界を確認することができた。

・すべり面は法尻より 20° 程度の角度で直線状に繋がっていることが判明した。なおこの角度は、踏査段階で滑落崖に確認された条痕と一致するものであった。

・上記すべり面は、岩盤緩み面がすべり面へと発展したものと想定された。ボーリング No.3 の結果から、すべり面に発展する可能性のある岩盤緩み面が、崩壊背後斜面にかけて連続していることが確認された。

・弾性波探査により崩壊背後斜面に低速度帯が検出された。比抵抗二次元探査でも、同位

置に高比抵抗帯が検出されており、崩壊背後斜面に、引張亀裂へと発展する可能性のある岩盤の緩みの著しい部分が存在することが確認された。

・すなわち上記の結果より、崩壊背後斜面にも、すべり面や引張亀裂の発生素因が潜んでいることが明らかとなった。

②潜在リスク

調査により崩壊機構を明らかとしないまま対策を施したとすれば、エリアが限定できず対策が法面全域にわたった可能性があると共に、抑止工は選定されず、より緩勾配（1:1.5～2.0）での切土などが施された可能性がある。

この場合対策エリアが拡がることから、相当の工費の増大が見込まれる。また崩壊機構に即した対策工となっていない（すなわち崩壊背後に潜むすべり面や引張亀裂の発生素因に対して無対策となる）ため、背後斜面で再崩壊を生じた可能性が高い。

(3)リスク回避

①対応方針

崩壊機構を踏まえた設計を行い、対策エリアを限定すると共に、緩みの抑止を目的とした最小限の抑止工を計画した。具体的には、崩積岩塊を除去（1:2.0 勾配で切土）したうえで、崩壊法面背後斜面においては、切土（1:1.2 勾配）で法面表層の安定を図るほか、鉄筋挿入工により緩みを抑止することを提案した（図 5）。

＜対策工＞

・崩壊部は、崩積岩塊を除去（1:2.0 勾配で切土）したうえで植生工を施す。
（理由：被災部は緩み領域が全て崩壊しており、これを除去すれば安定した基盤岩が露出するため。）

・崩壊背後斜面は、切土（1:1.2 勾配）と抑止工（鉄筋挿入工）を併用する。
（理由：崩壊背後斜面にも、すべり面や引張亀裂の素因である岩盤の緩みが潜んでいる。背後斜面においては、切土により緩みを助長させないことが望ましいが、切土する場合は、抑止工を併用することを原則とする。）

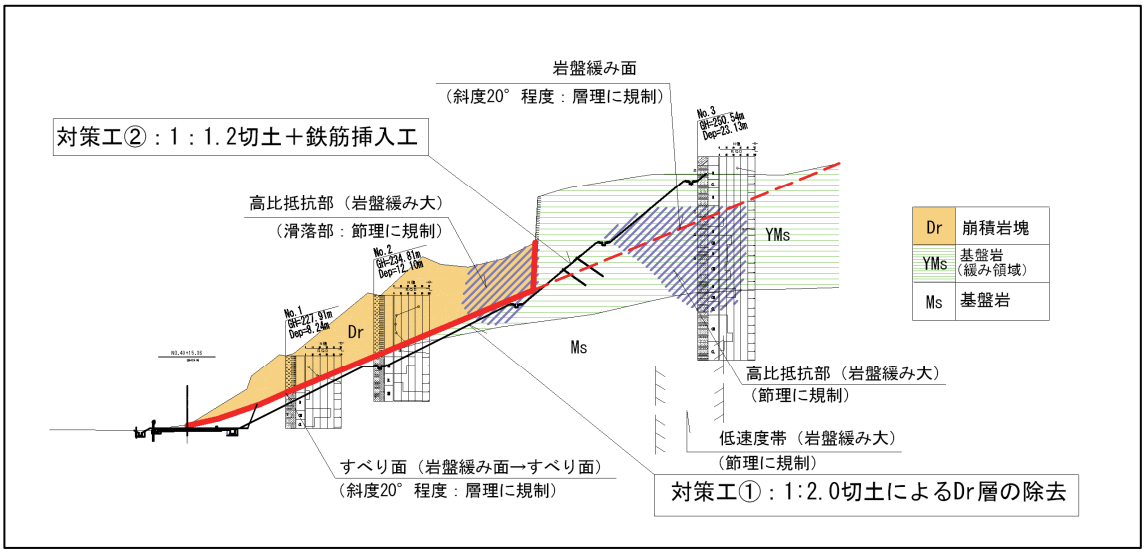


図 5 調査結果と対策工の概要（S=1/800）

②対応結果

本法面は 2010.3 に完成し、現在に至るまで安定を保っている（図 6）。

図 6　法面の比較写真

3.データ収集分析

リスク原因は、前記の地質調査により解明した。

リスク回避に要した費用は、実績値を用いた。

マネジメントによりリスク回避しなかった場合の費用は、崩壊後の法面全域にわたる対策工の工費と、再崩壊に伴う工費、以上 2 段階の工費を経験的な見地より推察し合算した。

4.マネジメント効果

以下式により算出した。

マネジメント効果=リスク回避しなかった場合の費用−リスク回避に要した費用

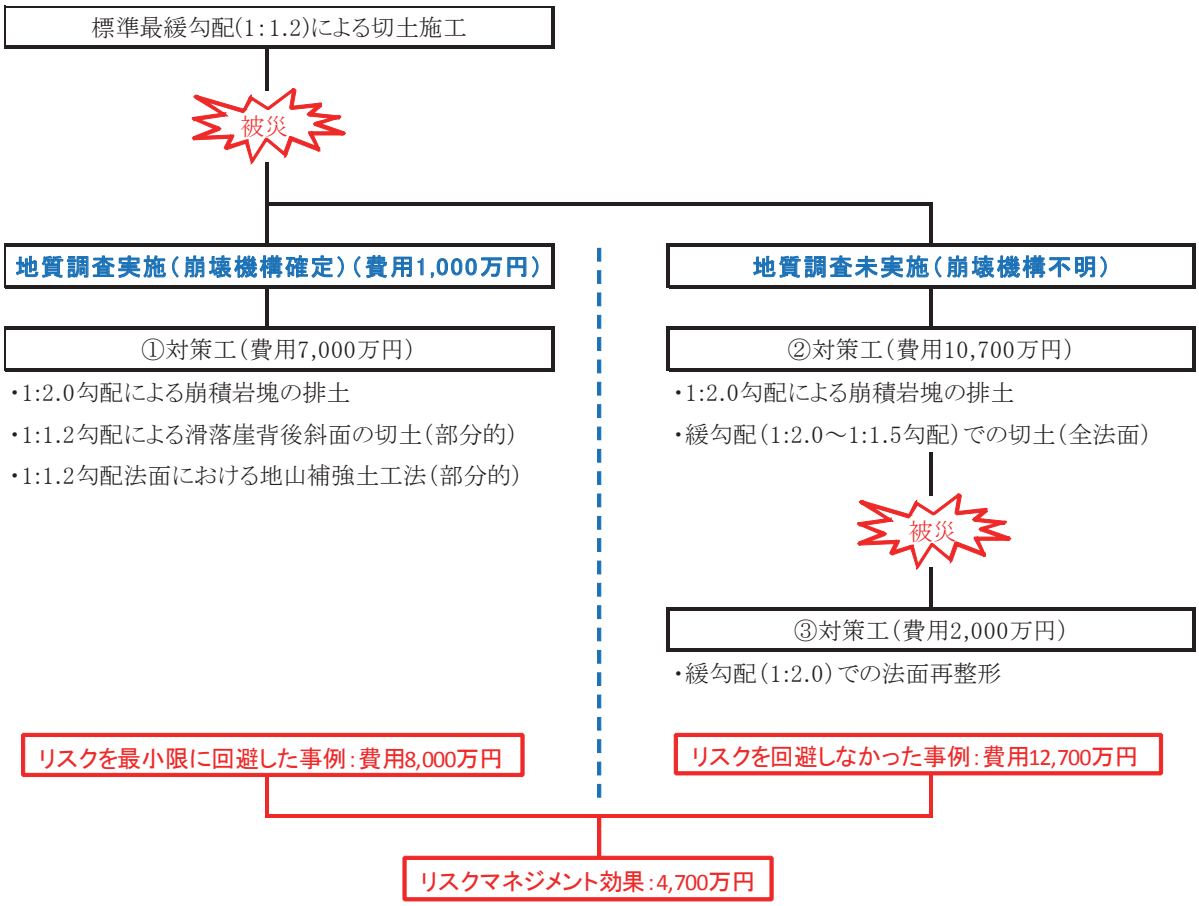
ここでリスク回避に要した費用については実績値（調査・設計費用 1,000 万円+工費 7,000 万円）を用いた。リスク回避しなかった場合の費用については、崩壊後の法面全域にわたる対策工の工費（10,700 万円）と、再崩壊に伴う工費（2,000 万円）、以上 2 段階の工費を経験的な見地より推察し合算した。この結果、**（10700 万円+2000 万円）−（7000 万円+1000 万円）＝4700 万円**のマネジメント効果が得られた。

工費の概要を表 2 に、マネジメントフローを図 7 に添付する。

表 2　工費の概要

地質リスクを回避した事例			地質リスクを回避しなかった事例					
			崩壊後の法面全域にわたる対策工工費			再崩壊に伴う工費		
排土工(1:2.0)+切土補強土工(1:1.2)			排土工(1:2.0)+切土工(1:1.5)			排土工(1:2.0)		
工種	単位	数量	工種	単位	数量	工種	単位	数量
土工	m^3	15,730	土工	m^3	25,800	土工	m^3	2,320
法覆工	m^2	3,250	法覆工	m^2	5,200	法覆工	m^2	2,120
枠工	式	1	枠工	式	−	枠工	式	−
ロックボルト	式	1	ロックボルト	式	−	ロックボルト	式	−
U字側溝	m	240	U字側溝	m	360	U字側溝	m	80
①工費(万円)		7,000	②工費(万円)		10,700	③工費(万円)		2,000

（表中①～③の工費は、図 7 の①～③に対比）



（表中①～③の工費は、表２の①～③に対比）

図７　リスクマネジメントフロー

5.データ様式の提案

本事例においては、マネジメント効果を、リスク回避しなかった場合の費用とリスク回避に要した費用の差額で評価した。

ここでリスク回避をしなかった費用については、崩壊後の法面全域にわたる工費（10,700万円）と、崩壊背後斜面での再崩壊に伴う工費（2,000万円）、以上２段階の工費を合算するものとした。ただし、リスク回避しない場合の事例は経験的見地に基づく推測であり、第三者へ理解されやすい「構成」が必要である。

次頁表３に記すＣ表については原案のまま記載したが、課題は、上記「構成」を理解できるような分かりやすい表の構築にある。この解決策の一例として、図７に示すようなリスクマネジメントフローの併記が考えられる。

表３　Ｃ表原案（修正なし）への記入

大項目		小項目		データ
対象工事		発注者		土岐市役所
		工事名		庚申山神線第3工区
		工種		道路切土工
		工事概要		延長約60m　切土高約30m
		①当初工事費		3,100万
		当初工期		5ヶ月
発現したリスク	リスク発現事象	リスク発現時期		施工中（切土完了直後）
		トラブルの内容		切土法面崩壊（崩壊規模：延長約40m、すべり面長さ約40m、滑落高約5m）
		トラブルの原因		標準切土勾配の過信
		工事への影響		延長10ヶ月（中断2ヶ月・調査設計3ヶ月・施工5ヶ月）
	追加工事の内容	追加調査の内容		－
		修正設計内容		－
		対策工事		－
		追加工事		－
		追加費用	追加調査	－
			修正設計	－
			対策工	－
			追加工事	－
			②合計	－
		延長工期		－
		間接的な影響項目		－
		負担者		－
最小限に回避したリスク	リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		崩壊に伴う切土工の再施工中
		予測されたトラブル		崩壊背後斜面の再崩壊
		回避した事象		過大設計および崩壊背後斜面の再崩壊
		工事への影響		工費の増大および工期延長
	リスク管理の実際	判断した時期		地質調査時
		判断した者		発注者・地質技術者・学識経験者
		判断の内容		対策エリアの限定、抑止工の必要性
		判断に必要な情報		崩壊機構
	リスク対応の実際	内容	追加調査	ボーリング：3箇所43m 弾性波探査：2測線190m 比抵抗二次元探査：1測線90m
			修正設計	法面設計
			対策工	崩積岩塊の排土工、切土工、鉄筋挿入工
		費用	追加調査	1,000万
			修正設計	
			対策工	7,000万
			③合計	8,000万
	回避しなかった場合	工事変更の内容		法面の再整形
		④変更後工事費		崩壊後の法面全域にわたる工費：10,700万 崩壊背後斜面での再崩壊に伴う工費：2,000万 合計：12,700万（①当初工事費は除外）
		変更後工期		延長12ヶ月（中断2ヶ月・施工5ヶ月×2回）
		間接的な影響項目		供用開始の遅れ、再崩壊による社会的信用の失墜、崩壊エリア拡大による用地買収範囲の拡大
		受益者		管理者・利用者・納税者
リスクマネジメントの効果		費用④－（①+②+③）		④12,700万-③8,000万=4,700万 （①当初工事費は除外）
		工期		回避できなかった場合、回避した場合に対して2ヶ月程度の工期延長が見込まれる
		その他		－

[論文 No.8]　　熊本における地盤リスクのポテンシャルとその回避

○福田光治[1)]，宇野誠[2)]，西浦譲二[2)]，西英典[2)]，山崎智寛[2)]
[1)] 熊本地盤情報評価機構，[2)]肥後地質調査

1．　はじめに

本論文では熊本における地盤リスクのポテンシャルを検討する．地質リスク学会は地質リスクの回避（A)，発現（B)，発現と回避（C)，その他（D）に区分した事例研究を求めている．しかしこの分類では地質リスクが個々の技術者の想定外の経験として主張されることになり，地質リスクが個々に示され，個人の認識に矮小化される可能性がある．少なくとも地質リスクは一般的な認識のレベルで評価しなければ地質リスクとして言及することはできないと考える．本論文では熊本地域の地盤を対象に遭遇する地層の特徴を調べ，地質リスクが発生する要因を検討する。この要因を地質リスクのポテンシャルとして定義し，技術者の想定外の推移や結果を地質リスクにする矮小化を避けることが目的である。

現在地質リスクという用語が示されているが[1)~3)]，上記の地盤調査とモデル化を考慮した場合狭い概念である．このため本論文では地質リスクではなく，調査から設計に受け渡す地盤に関わるモデル化の精度を評価するものとして地盤リスクという用語を当てることにする．

2．　熊本地盤における地盤リスクのポテンシャルの素因となる背景

本論文では地層の非整層性や地盤の特殊性から発生するリスクを本来の地盤リスクと呼び，この要因を克服する調査内容や体制を選択しなければならない課題として熊本地盤における発生形態を表１のように整理する。これらの客観的自然要因のほかにプロジェクトにかかわる技術者集団の技術レベルから発生するリスクもあるが，本論文ではこの発生経路は本来の地盤リスクの対象としては把握しない。つまり当初設計に対して工法変更やコスト増大に至る結果の原因すべてを地盤リスクに直結させることはしない。本来の地盤リ

表１　熊本地域の地盤リスクポテンシャルの整理例

地質時代	層序	地盤リスクの素因	主たる理由
完新世	氾濫源堆積物	1)鉛直方向堆積環境の変遷	堆積環境による土質変化
	有明層	2)鬼界アカホヤ層の挟在	土質特性
		3)水平方向分布（沿岸、内陸）	堆積環境による土質変化
		4)断層	水平方向土質特性の連続性
		5)黒ぼく，赤ぼく	火山灰性，鉛直亀裂
更新世	島原海湾層	1)鉛直方向堆積環境の変遷	変化激しい土質特性
		2)水平方向分布	変化激しい土質特性
	保田窪・託麻砂礫層	1)埋没段丘	支持層深度の急激な変化
		2)鉛直方向堆積環境	細粒層挟在、大礫混入
		3)地層上面傾斜	支持層の傾斜
		4)断層	支持層の深度
	Aso-4火砕流堆積物	1)溶結・非溶結の差異	土質特性の極端な差異
		2)鉛直方向溶結状態（N値分布）	風化・溶結状態による土質特性の変化
		3)軽石含有	破砕性粒子を含む土質特性
		4)灰土	風化、低N値
		5)層厚変化	変化
		6)地層上面傾斜・急崖	支持層深度変化
		7)水平方向分布範囲	支持層の有無・深度
		8)下部地層との不整合性	支持層の健全性
		9)柱状節理の発達	鉛直方向異方性透水性
	御幸層・布田層	1)鉛直方向堆積環境の変遷	鉛直方向土質特性
		2)水平方向分布	不透水層の信頼性
		3)海成・湖成層堆積環境	土質特性の変化
	Aso-3火砕流堆積物		
	砥川溶岩	1)水平方向分布範囲	支持層の有無
		2)層厚変化	支持層の健全性
		3)地層上面傾斜	支持層の健全性
		4)深度方向存在形態（多孔質性、板状節理）	帯水層の信頼性
		5)断層	地層の連続性
	Aso-2/1間堆積物		
	Aso-1火砕流堆積物		
	水前寺層		
更新世前期～鮮新世	金峰山火山岩類	1)水平方向分布範囲	支持層の有無
		2)層厚変化	支持層の健全性
		3)地層上面傾斜	支持層深度
		4)空洞	支持層の健全性
	大岳火山岩類		

＊熊本県地質調査業協会地盤図編纂委員会編「熊本市周辺地盤図」、p.37、2003.参照・加筆
＊有明層は有明粘土～砂層を含む沖積層として使用

スクのポテンシャルが地域的に認識されており，そのリスクを克服する調査内容や体制が対置される。技術者集団の技術レベルは体制の問題に含まれる。地盤リスクとして認識されるためには,対象とする地域の技術者に課題として共通の認識になって居る必要があり，この広範な認識として地盤リスクのポテンシャルとして確立している必要がある。地域の地盤リスクのポテンシャルが明確になって初めて地盤リスクの克服の課題が出され，調査内容や体制を選択するうえで適切なレベルを考えることができる。先に示したように地盤リスクのポテンシャルが不明確な地域では，関与する関係技術者の技術レベルを考慮することなく工法変更やコスト増大の原因を一方的に地盤リスクに求めることはできない。地域の地盤リスクのポテンシャルを明確に定義して初めて地盤リスク問題，地質リスク学会の課題である A~D の項目に対応させることができる。従って地質リスク学会の課題を論じるためには技術者の技術レベルを配慮した客観的な地域の地盤リスクポテンシャルの定義が基礎になる。

一般的には地層構成物の均質性，地層分布の整層性が期待される．本論文ではこの物差しを基準に整理している。熊本の地盤は火砕流や溶岩が半島状に被覆し，湖成層が盆地状に分布し，中生代・古生代の褶曲した地層が付加し，さらにいたるところで火山が丘状に貫入しており複雑である．また熊本の低地は新生代第四紀の地層が堆積しているが，穏やかな堆積環境が期待できない複雑さが含まれている [4),5)]．従って熊本の地質を考慮したときの地盤リスクとして顕在化してくる素因として中生代･古生代の褶曲構造や破砕性構造の発達，火砕流・溶岩の分布と起伏，貫入火山と堆積層の接触構造，新生代地層の堆積環境，沖積低地の古河川跡水理構造[6)]，耐震基盤面の起伏や地盤構造などがある．

３．　熊本市街地における地盤リスクと調査密度

本論文では建築を対象にした狭い範囲での調査で遭遇する地盤リスクを検討する．最近建築におけるコストパフォーマンスが極端に追及され，目に見えない地盤調査にしわ寄せが来ているようである．しかし、20～30m のボーリング間隔で実施される狭い建築物の地盤調査であっても，熊本地方では期待されるような整合性のある地層条件に遭遇するチャンスは少ない．むしろ，熊本地方の地層条件は非常に複雑であり，調査密度や調査内容を制約するとそれだけ地盤リスクが増大する．

熊本での建築関係地盤調査はボーリングと *N*値を主体にしており，以下の項目が着目される．１）局所性と広域性，２）地層の連続性と層厚の水平方向分布特性，３）*N*値のパターンと統計量の水平方向分布特性，４）支持層あるいは工学的な地震基盤面伏在深度と水平方向分布．なお１）に示した局所性は、建築に伴う調査でボーリング間隔 20～30m 規模を想定した.広域性は熊本市域規模での地盤リスクの潜在的な可能性がある箇所を指し，熊本県地質調査業協会　地盤図編纂委員会「熊本市周辺地盤図」で示された地層断面図 [4)] などから抽出することができる．

１）　非溶結阿蘇 4 火砕流の分布と地盤リスクポテンシャルの克服

水平方向に層厚と地盤特性が異なる．地層の同定は熟練した技術者の観察で実施されるが，水平方向の土性の評価には地盤工学的な判断が必要である．水平方向のばらつきの説明性とそれを考慮した地層断面の評価方法が課題になる表 2はボーリング間隔約 30m によ

表 2　非溶結阿蘇 4 火砕流の上面標高高低差と水平方向強度のばらつき

対象地層:Aso4　　ボーリング間隔:約30m

項目	方向	特徴	N値	No.1	No.2	No.3
層厚	水平方向	15～20m以上	特徴	深度方向漸増＋階段状増加	深度方向漸増	深度方向漸増
地層上面標高	水平方向	約6m高低差	平均N値	31.6	20.9	17.0
N値	深度方向	漸増	標準偏差	9.4	8.2	5.4
	水平方向	平均的に約10のばらつき	変動係数	0.3	0.4	0.3

る調査例を示したものである. 約 30m 間で非溶結阿蘇 4 火砕流上面標高は約 6m の高低差（勾配約 20/1000）があり，かつ N 値の水平方向の分布は平均値で約 10 のばらつきがある．一般的に住宅基礎の不具合が顕在化する建物勾配(3～6)/1000 を基準にすると大きな勾配である. 深度方向には変動係数 0.3～0.4 であり，統計的には類似した分布パターンであり，またいずれのボーリングでも深度方向に漸増する傾向が見られる．N 値の深度方向分布を形態的に分類すると深度方向に漸増するパターンと階段状の変化を含むパターンに 2 区分される. 地質構造では非溶結阿蘇 4 火砕流上面は低 N 値の灰土が被覆している. 従って，建物基礎あるいは工学的な地震基盤面としては非溶結阿蘇 4 火砕流が支持層の第 1 候補になる．このため非溶結阿蘇 4 火砕流のばらつきから派生する地盤リスクを低減するためには支持層の深さ，強度分布を適切に把握するように適切に配置した複数のボーリングが求められる. 従ってたとえ平行層にみえても同定された地層内の N 値の深度方向分布特性は異なり，基礎設計に影響する. この場合地盤リスクは非溶結阿蘇 4 火砕流の N 値の代表的なモデル化において発生することになる.

2）　灰土の構造と調査方法

灰土は非溶結阿蘇 4 火砕流の風化層として把握することができる [6), 7)]．しかしその構成粒子には粗粒から細粒まであり，また層厚は下位の非溶結阿蘇 4 火砕流の上面標高にも影響され，水平方向層厚分布が異なることもある．灰土自体は建物の良好な支持層としてよりも，地盤改良の対象として取り扱われる場合が多いと考えられる．表 3 に例として示した．この場合ボーリング間隔は 8m～25m である.

表 3　灰土の地層特性

対象地層:灰土　　ボーリング間隔:約8～25m

項目	方向	特徴	N値	No.1	No.2
層厚	水平方向	7～16m	特徴	深度方向に減少	深度方向に減少
地層上面標高	水平方向	ほぼ水平	平均N値	1.9	3.4
N値	深度方向	深度方向にほぼ一定	標準偏差	1.4	1.3
	水平方向	上下2層に分かれ、下位に自沈層あり	変動係数	0.7	0.4

両ボーリングの灰土の N 値は深度方向にやや減少する傾向があるが, 形態的には上下 2 層に区分できる．No.1 ボーリングでは，非溶結阿蘇 4 火砕流に自沈層が連なっており，No.2 に比べて平均 N 値を小さくしている．この自沈層を下部層とすれば，その上の上部層の N 値に関しては，両ボーリングは類似している．これらの形態を反映して平均 N 値は約 1 異なるが，変動係数は 0.7 と 0.4 でやや異なる．従って灰土の地盤リスクは地盤改良の深さ，あるいは改良度に関わることになる.

3）　砥川溶岩の分布と層厚

砥川溶岩は鉛直方向柱状亀裂が卓越し，また局所的には破砕しており地下水の良好な帯水層とされる[6]．しかしこの分布や伏在深度および層厚は場所にとって大きく異なっている．表 4 はボーリング間隔約 35m の調査結果を比較したものである．この個所では阿蘇 3 が支持層になるが，層厚及び N 値の深度方向分布にやや形態変化がある．このため，支持層としての設計モデルの決め方が問題になる．そして地層条件を明確にする上で，砥川溶岩の上面を確認する調査が行われた．砥川溶岩の上面標高は両ボーリングで約 10m の高低差（勾配約 280/1000）がある．N 値は表 4 のような特徴から平均 N 値は 50 であり，標準偏差、変動係数はゼロになる．

表 4　砥川溶岩の地層分布特性

対象地層:砥川溶岩　　ボーリング間隔:約35m

項目	方向	特徴	N値	No.1	No.2
層厚	水平方向	5m以上	特徴	深度方向に一定	深度方向に一定
地層上面標高	水平方向	高低差約10m	平均N値	50.0	50.0
N値	深度方向	深度方向にほぼ一定	標準偏差	0.0	0.0
	水平方向	ほぼ類似	変動係数	0.0	0.0

4）　古白川・古緑川沿いの沖積平野における調査

古白川は熊本沖積平野で大きく蛇行していた．また熊本周辺の坪井川や緑川の河川改修も江戸時代から行われており，現地形の地下には河床堆積物が埋没している．表 5 はボーリング間隔約 20m の調査結果である．

表 5　白川沿いの託麻砂礫層の層厚

対象地層:託麻砂礫層　　ボーリング間隔:約20m

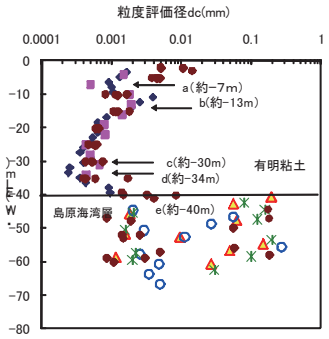
項目	方向	特徴	N値	No.1	No.2	No.3	No.4
層厚	水平方向	2～7m	特徴	深度方向に一定	深度方向に一定	深度方向に一定	深度方向に一定
地層上面標高	水平方向	高低差約1m	平均N値	50.0	50.0	50.0	42.5
N値	深度方向	深度方向にほぼ一定	標準偏差	0.0	0.0	0.0	15.0
	水平方向	ほぼ類似	変動係数	0.0	0.0	0.0	0.4

熊本沖積平野では建築物の基礎地盤は託麻砂礫層が選定の対象になる．託麻砂礫層の連続性は明瞭であり，上面標高高低差はボーリング間で約 1m，勾配約 50/1000 であるが層厚変化が大きい．金峰山火山岩類の上の砥川溶岩が薄くなる箇所では託麻砂礫層は約 3 m の層厚しかなく，支持層とするには薄い．この場所では託麻砂礫層の下位に支持層を求めなければならない場合も予想されるが，下位の非溶結阿蘇 4 火砕流，阿蘇 3 の N 値のばらつきが大きく，さらにその下の砥川溶岩や金峰山火山岩類に支持層を求めなければならないケースもある

表 6　有明粘性土層の分布特性

対象地層:有明粘性土　　ボーリング間隔:約85m

項目	方向	特徴
層厚	水平方向	約36m
地層上面標高	水平方向	高低差約0.1m



と考えられる．この場合の地盤リスクは託麻砂礫層の層厚，阿蘇 3，4 の強度変化，及び砥川溶岩と金峰山火山岩類の伏在深度が支持層の地盤モデルの作成に大きく影響する．

5）　完新世有明層の堆積構造とサンプリング

熊本の海成沖積層は有明粘土と呼ばれ，表 6 に示すようにほぼ平行な地層条件にある．しかし構成物質を分析すると図 1 に示すように均質ではなく，堆積環境の変遷の強い影響が見られる．従って単一の地層，あるいは粘性土と砂層に分割されるにしても，堆積構造を考慮した試験をしなければ地層の地盤特性を把握することはできない．図 1 は有明粘土の深度方向粒度分布特性で，特異点 a～e が存在する[8]．軟弱地盤ではよく深度方向に等間隔でサンプリングと試験を行われることが多い．しかし，サンプリング密度が粗い場合堆積構造を反映できないことになり，堆積構造と地盤リスクを考えた調査とする必要がある．

6）　阿蘇山カルデラ内湖成層支持層の調査

阿蘇山カルデラ内湖成層表層部分で連続性を追及することは困難である[9]．ボーリング間隔約 50m による阿蘇谷湖成層の調査結果を整理したものが表 7 である．表層の Ac1，下

表 7　阿蘇山カルデラ内湖成層砂層の分布特性

対象地層：阿蘇湖成層As2　ボーリング間隔：約50m

項目	方向	特徴	N値	No.1	No.2	No.3
層厚	水平方向	約5m	特徴	深度方向に増加	深度方向に減少	深度方向に増加
地層上面標高	水平方向	高低差約1m	平均N値	7.8	15.6	22.6
N値	深度方向	深度方向にほぼ増加	標準偏差	3.6	8.0	8.2
	水平方向	樽状分布で類似	変動係数	0.5	0.5	0.4

部の Ac2 の N値は自沈あるいは 1 であり，これらの層に挟まれた Ac/s、As2 層の N値に期待したい地盤構造である．しかしこれらの層は水平方向に連続しているが，N値の水平方向連続性は乏しい．例えば As2 層の上面地層勾配は 20/1000 で概略的には水平層であるが，平均 N値は No.1 で約 8，No.2 で約 16，No.3 は約 23 でボーリングごとに変化している．変動係数は約 0.5 で類似したパターンであるが，N値の大きさは相当異なる．しかし鉛直方向には図 2 に示すように表層約 20m で標高約 460m は土質変化が激しいが，標高約 460m 以深は比較的均質な土質である．阿蘇谷表層部は非常に厚い軟弱層が堆積しているが，標高約 460m 以深は湖成層という堆積環境のため比較的整層的である．この地質構造からすれば建物の基礎地盤として表層約 20m の活用と，ここで示した調査深度以深に基礎地盤を求める必要がある．したがって表層約 20m を積極的に活用することが求められるが，支持力には限度があり，ここに地盤リスクが発生する．また標高 460m 以深は厚い粘性土が堆積しているが火山灰などの混入により強度・変形特性は一般的なマニュアルから把握することはできない．

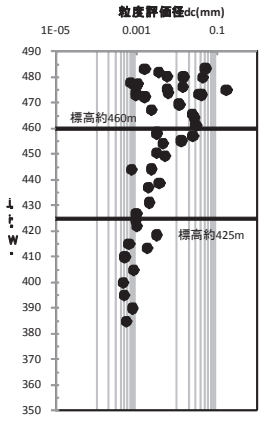


図 2　阿蘇谷湖成層の堆積構造

4．　地盤リスク最小化対応手法の検討

上記に整層性に着目して熊本地盤で遭遇する地盤リスク例を示した．こうした地盤リ

スクを低減するためには以下の試みが求められる.

1） 熊本の地盤構造は非常に複雑で，地層の整層性や地層内の均質性の期待は成り立たない．このためこれまで蓄積された地盤調査結果などを蓄積し，データベース化しておくことが必要である．そして過去のデータと古地形を念頭にいれて調査規模、調査箇所の密度を計画する必要がある.

2） データベースは個別的に実施するのではなく，熊本県内の関係業者が協力して積極的に作成することにより，地質調査の信頼性を向上させることが望まれる.

3） 特に砥川溶岩の上面標高，託麻砂礫層の上面標高と層厚分布の精度をあげる必要がある.

4） 物理試験の頻度を上げて詳細な堆積構造を把握した上で現位置試験あるいは室内試験結果の解釈を行う.

5） また褶曲構造や地層傾斜が卓越する箇所では破砕性地盤に対応したボーリング技術と斜めボーリングによる調査が必要である.

6） さらに技術者の技術力向上と設計との密接な相互関係の醸成が求められる.

7） 施工段階でも地盤や構造物のモニターによりリスクへの発展あるいは拡大を防ぐことができる.

8） 熊本の地盤は埋没段丘を数多く含んでいる．また砥川溶岩の伏在深度も地域的に特徴があり，こうした基盤の勾配を考慮し，許容高低差などを基準に調査間隔を決める必要がある.

5． おわりに

本論文では地盤リスクの定義とその構造を示した。そして熊本の地質条件を対象に地盤リスクから見た場合の調査課題について検討した結果を示した.

（参考文献）

1） 中嶋秀嗣：リスク工学と地盤工学 3．リスクマネジメント、地盤工学会、平成19年度 リスク工学と地盤工学 講演資料、p.11-18、2007.

2） 橘木俊詔、長谷部恭男、今田高俊、益永茂樹責任編集：リスク学入門 1 リスク学とは何か、岩波書店、pp.58-59、2007.

3） 木原重光・富士彰夫：リスク評価によるメンテナンス RBI/RBM入門、日本プラントメンテナンス協会、pp.24-34、2002.

4） 熊本県地質調査業協会 地盤図編纂委員会編：熊本市周辺地盤図、2003.

5） 熊本県地質図編纂委員会：熊本県地質図（１０万分の１）（県北版・県南版・説明書)，熊本県地質調査業協会，pp.7-18，2008.

6） 福田光治，西浦譲二，西英典，山崎智寛，川元雄一郎，松迫暁子，北園芳人：ポワズイユ則と熊本表層地盤の透水性地盤リスク，地盤工学会第8回環境地盤工学シンポジウム，pp.7-14，2009.

7） 福田光治，西浦譲二，西英典，山崎智寛，有働仁志，北園芳人：N値から推定した非溶結阿蘇火砕流のS波速度と地盤リスク，土木学会第63回年次学術講演会講演概要

集，pp.903-904，2009.
8）　福田光治：地盤屋がみた有明粘土の堆積構造，熊本地学会 No.150，pp.9-10，2009.
9）　福田光治，西浦譲二，山崎智寛，北園芳人：熊本地方の特殊土と地盤特性値の信頼性の確認方法，地盤工学会，地盤工学会誌，Vol.58,No.7,Ser.No.630，pp.22-25,2010.

D. その他のタイトルと概要

大項目	小項目		データ
リスクマネジメントの分析項目	タイトル		地盤リスクポテンシャルの定義と回避
	概要		地盤リスクポテンシャルを地域で定義し，技術者の一般的な認識内容にすることにより，計画時点で発注者と受注者の間における最低限の調査内容の合意形成に役立てる
	工種概要		建築基礎
リスク回避	予測されるリスク発現時期		施工時
	予測されるトラブル		不同沈下，耐震基盤の深度
	回避する事象		地層の傾斜の卓越性 マニュアルに依存した地盤パラメータ選定
	工事への影響		施工段階における施工変更によるコスト増加と工期延長
リスク管理の実際	判断した時期		調査計画
	判断した者		地盤調査計画者
	判断の内容		地域の地盤ポテンシャルの定義とデータベースによる認識
	判断に必要な情報		データベース，地盤リスクポテンシャルの定義に関する研究
リスク対応の実際	内容	追加調査	
		対策	地質調査会社と発注者側のいずれにおいても熟練した技術顧問制度の充実化 地域における地盤リスクポテンシャルの整理
変更工事の内容	工事変更の内容		
	受益者		
リスクマネジメントの効果	費用（①－③－②）		
	工期		
	その他		

［論文 No. 9］　　破砕帯に起因する地質リスクを予測した事例

復建調査設計（株）○吉村辰朗　吉野晃　福田直三

１．はじめに

国土の 75%を占める山地においては，破砕帯に起因する地質リスクが生じる場合が多い。この地質リスクを事前に予測することは，安全・安心対策や経済損失を回避することに大きく貢献すると思われる。今回は，簡便に断層（破砕帯）を精査する物理探査手法（γ線測定）を用いて，破砕帯に起因する地質リスクを予測した事例を紹介する。

２．磁性を考慮した放射能探査（γ線測定）の原理

物質の磁気的性質は，主に鉱物の粒度・熱によって変化する。熱に関しては，キュリーの法則（帯磁率は絶対温度に反比例する）が知られている。帯磁率に占める割合が大きいマグネタイト（磁鉄鉱）に関しては，図 1に示す粒径と帯磁率の関係が示されている[1)]。この図の上には粒径による土質区分を加筆した。この図より，砂領域では細粒化すると帯磁率は高くなり，シルト・粘土領域では細粒化すると逆に帯磁率は低くなる。より細粒化すると再び帯磁率は高くなる。γ線は物質との相互作用によって減弱し，帯磁率を指標としたγ線の減弱実験では，帯磁率が高いほどγ線吸収量が多くなる（γ線強度が低くなる）[2)]（図 2）。これまでの調査から断層での帯磁率・γ線強度は，高帯磁率・低γ線の関係が認められる。この事象は，断層運動に伴う破砕によって磁性鉱物の粒径が細かくなることで，断層が高帯磁率になった結果と考えられる。 また，シルト・粘土層内での地すべり面を対象にして帯磁率・γ線測定を実施した場合，断層とは逆に低帯磁率・高γ線となり[3)]，シルト・粘土領域の細粒化によって低帯磁率化した可能性が高い。以上の事象より，地盤の破砕（断層・地すべり面）によって磁性鉱物の粒径が細かくなることで帯磁率が変化し，それに対応して高γ線あるいは低γ線が検出される機構が考えられる。γ線の測定方法は全計数法であり，シンチレーションサーベイメータ（アロカ社製 TCS-151 型）を用いて測定した。放射線の単位は Sv/h である。γ線測定結果図は縦軸にγ線強度，横軸に測定点の位置で整理する。

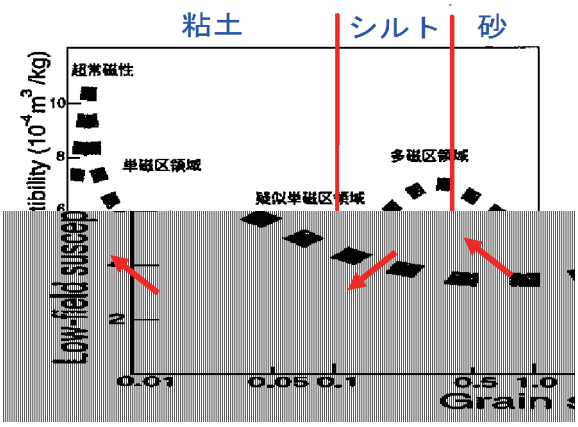


図 1　純粋なマグネタイトの単位質量当り初帯磁率（縦軸）と粒径（横軸）との関係[1)]

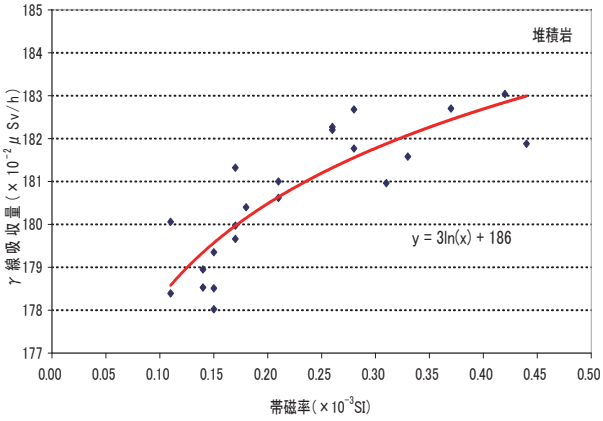


図 2　帯磁率を指標としたγ線減弱実験結果

３．破砕帯に起因する地質リスクを予測した事例

(1)　破砕帯と併走するトンネル調査の事例

トンネルルートは、現地の条件から尾根鞍部付近を通過する計画が決定されていた（図 3)。トンネル坑口付近には破砕帯の露頭が確認され，空中写真判読から計画ルート付近に N50° E 方向のリニアメントが数条認められたため，計画ルートに沿った破砕帯の出現が予測された。このように断層がルートと併走する場合は，破砕帯の走向と規模によって工事費に大きく影響するため，断層の詳細な分布・性状を把握する必要がある。トンネルの調査では，弾性波探査を計画ルート沿いに縦断測線（A 測線），坑口部の横断測線で行なわれることが一般的であるが，今回の調査では，まず低コストで簡易に行えるγ線測定をリニアメント付近で実施し，破砕帯の走向（N50° E）と規模を把握した。その結果を踏まえて，当トンネルでは断層が併走するとの予測からトンネル中央部の尾根において，計画ルートと直交する方向に副測線 B（測線長 200m）及び C（100m）を計画した。

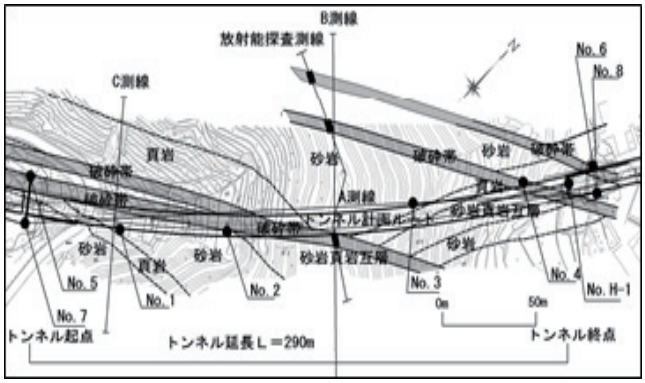


図 3　地質平面図（破砕帯分布図）

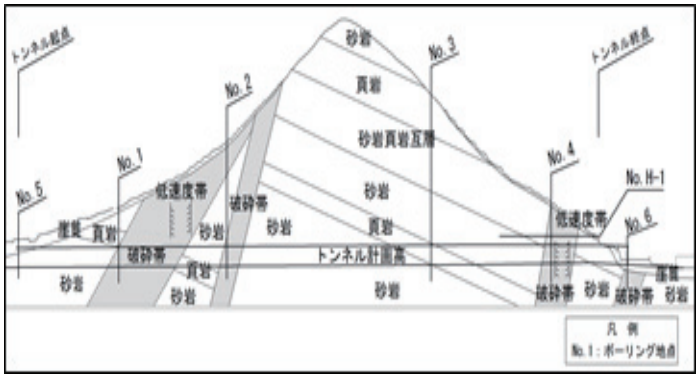


図 4　トンネル地質縦断図

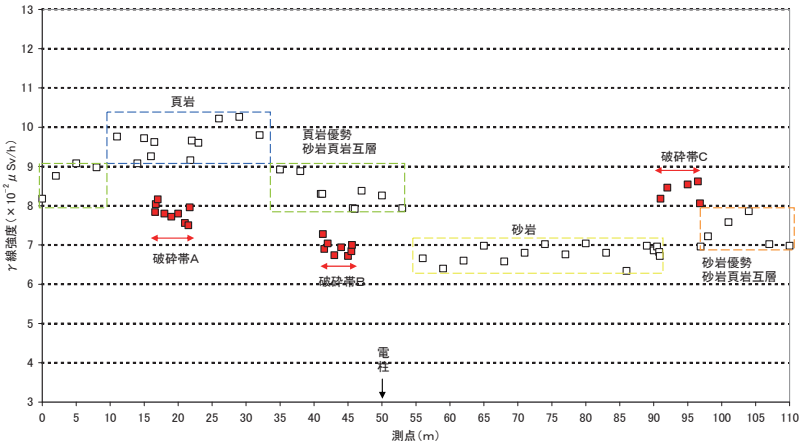


図 5　γ線測定結果図（A 測線）

γ線測定結果（図 5）および弾性波探査結果によって破砕帯分布と破砕幅を確認した後に，健全部と破砕帯部の性状を確認出来るボーリング地点を選定した（図 4）。破砕帯で実施したコアは，亀裂は発達しているが岩自体は硬質であったため，当地の破砕帯は亀裂密集帯であると判断した。破砕幅は 5m 程度で大規模ではないが，計画ルートと併走するために破砕帯の影響区間が約 130m と長区間(全体の 45%)にわたる場合があり，破砕帯の走向および規模（破砕幅）・性状を予測することは，トンネル施工時の地質リスクを最小限に抑えるのに役立つと考える。

(2)　砂防ダム建設に伴う代替え水源の選定

調査地の地質は秩父累帯（泥岩・砂岩）で，地下水は鉄分が多い。砂防ダム建設計画に伴なって代替え水源が必要となり井戸を掘削したが，必要な水量・水質が得られなかった。山岳地帯で水を得るには，破砕帯に伴う湧水を探すのが良策と考えた。調査地付近には，ENE 方向のリニアメント（地質的弱線）が推定されため，破砕帯の有無と分布（走向）・規模（破砕幅）を把握する目的で，γ線測定を尾根部で実施した（測線長：330m）。γ線測定の結果，表 1 に示す 5 条の破砕帯を検出した（図 6）。

表 1　B 測線の異常値区間（破砕帯）

破砕帯名	異常値区間	破砕幅
破砕帯①	18.3m～27.4m	8.9m
破砕帯②	139.9m～144.5m	4.5m
破砕帯③	203.4m～208.2m	4.8m
破砕帯④	302.8m～309.7m	6.9m
破砕帯⑤	315.3m～328.6m	13.3m

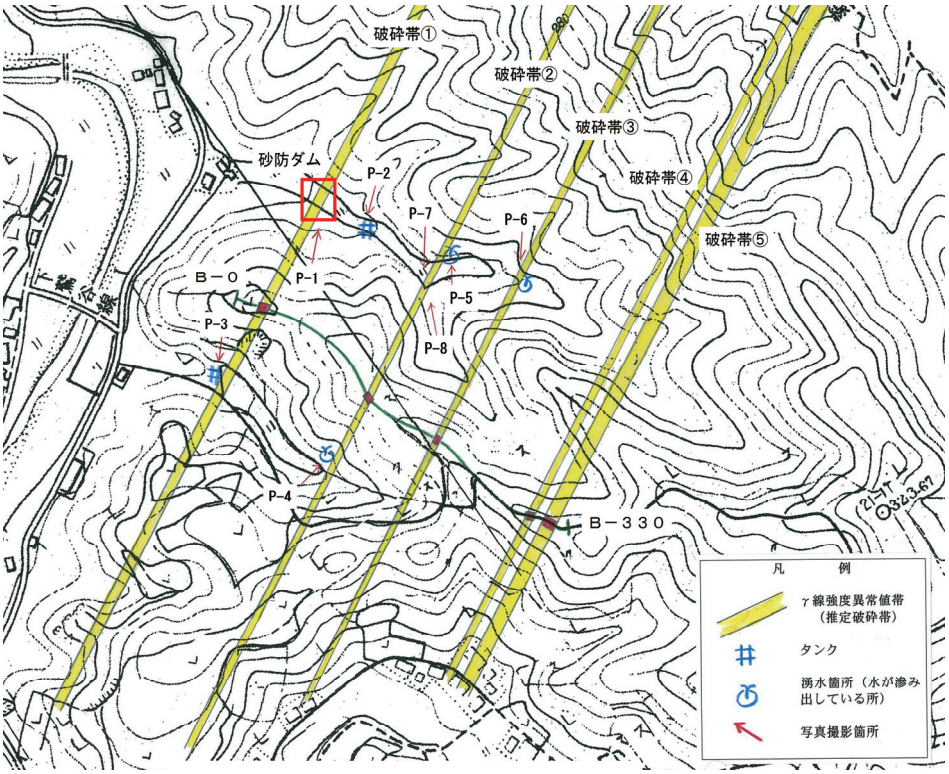


図 6　破砕帯分布と湧水地点の対応

写真 1　砂防ダム軸で出現した破砕帯

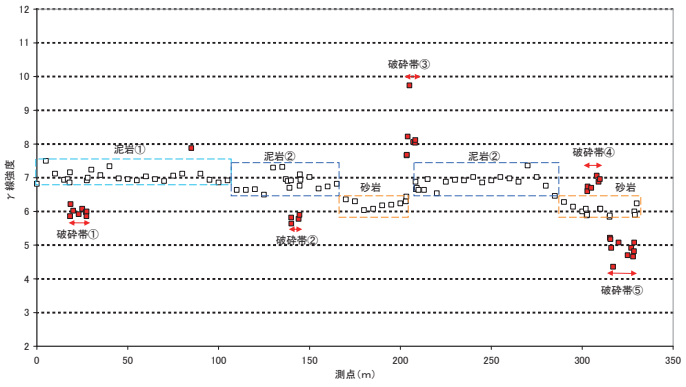


図 7　γ線測定結果図（B 測線）

破砕帯の分布に留意し精査を実施した結果，破砕帯と湧水には下記の関係があることが判明した。

① 破砕帯の端部では，湧水が見られる。

② 破砕帯の端部付近には，集水のためのタンクが設けられているところがある。

よって，新たな水源候補地は，①破砕帯端部付近，②集水面積が広い箇所の 2 点に留意し選定した。γ線測定の結果からダム軸付近に破砕帯が推定されたため，基礎掘削中のダム軸部を観察したところ破砕帯が出現していた（写真 1 参照）。施工者に聞いたところ，基礎地盤が悪かったために当初計画を変更したとのことで，調査時に破砕帯を予測していれば時間的・経済的損失は少なかったと考える。

(3)　斜面崩壊を予測した事例

2009 年 7 月の豪雨で表層崩壊が発生した。崩壊地付近には NNE 方向のリニアメントが多く認められたため，2010 年 4 月に 30m 南側の尾根においてγ線測定を行なった。NNE 方向のリニアメント付近に C 測線（測線長：60m）を設け，測点間隔は 3m とした（図 8）。測定結果を図 9 と表 2 に示す。花崗岩の平均値は 6.99 で，破砕帯は相対的に低いγ線強度である。この結果を基に地質調査計画を立てたが，

調査中の 2010 年 8 月に崩壊が生ずると予測した場所（表層崩壊の隣接地，破砕帯 C の背後）で中規模崩壊が起きた（写真 2)。斜面崩壊に破砕帯が影響したと判断される。

表 2　C 測線の異常値区間（破砕帯）

破砕帯名	異常値区間	破砕帯の走向（方向）	破砕幅
破砕帯 C	20.5～31.9m	N28° E	10.3m
破砕帯 D	40.8～42.0m	N50° E	1.2m
破砕帯 E	50.1～54.0m	N28° E	3.5m

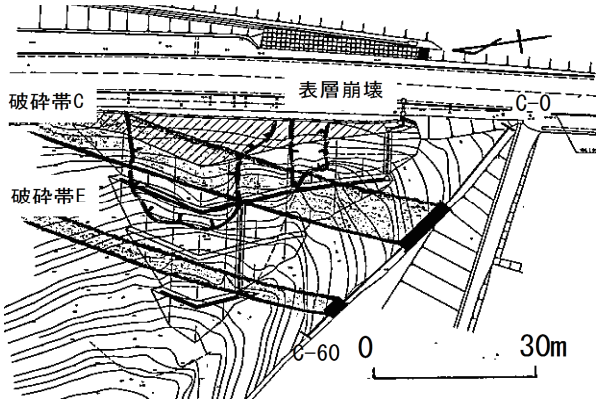


図 8　調査位置図（C 測線）

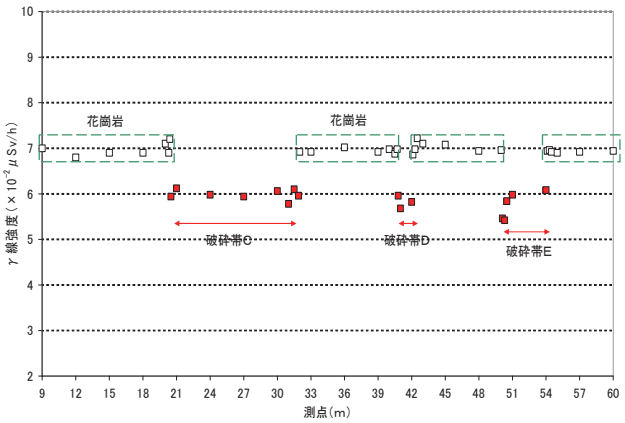


図 9　γ線測定結果図（C 測線）

写真 2　2010 年 8 月に発生した中規模崩壊（左側には 2009 年に発生した表層崩壊跡が見られる）

参考文献

1) 鳥居雅之：環境磁気学-レビュー，地学雑誌，114，284-295，2005.
2) 吉村辰朗：断層における高帯磁率と低γ線強度の対応，物理探査学会第 124 回学術講演会論文集，219-222，2011.
3) 吉村辰朗・間野道子：ボーリングコアのγ線強度・帯磁率測定によるすべり面検出，地すべり，42，3，12-18，2005.

［論文 No.10］　建設工事における迅速分析法を用いた重金属等の地質リスク管理事例

大成基礎設計株式会社　○熱田 真一
大成基礎設計株式会社　　糸永 眞吾

1. はじめに

建設工事において、建設発生土中に重金属等の土壌汚染が判明することで工期遅延が生じるなど、施工リスクが顕在化したケースが近年報告されつつある[1)]。

一方、土壌汚染調査・対策の低コスト化の推進を目的として、土壌汚染調査に簡易で迅速な分析技術の開発と導入等の取り組みが行われている[1),2),3),4)]。筆者らは、これまで重金属等の第２種特定有害物質をターゲットとして、ストリッピングボルタンメトリー法、蛍光Ｘ線分析法、吸光光度法など簡易迅速分析技術の開発を行い、自然由来や人為由来などの基準値超過土の迅速な判定に取り組んできた[5),6),7)]。

本論文では、建設発生土の重金属等の地質リスク管理を目的として、近年分析精度の著しい向上が見られる簡易迅速分析を用いて、区画整備事業の施工時に簡易迅速分析を導入することによる有効性とその活用法を述べる。

2. 事例の概要

対象地域周辺の地形・地質は、北部に南北 5～15km の幅で島状に発達する洪積台地が分布し、この台地縁辺部に低地があり、低地には縄文海進時に堆積した海成層が広く分布している地域である。地盤的特徴としては、①表層から 10m以浅に分布するＮ値 10 回以下の緩い砂質土が存在し、地震時に液状化する可能性が高い、②軟弱な厚いシルト層は、杭基礎を採用した場合､ネガティブフリクションが作用するのでその安全性の検討を要する、③強度特性を示すＮ値は、粘性土でＮ＝0～5 回、砂質土でＮ＝5～20 回程度、④基底に礫混じり砂から成る基底礫が存在する、など構造物の支持地盤として適さない場所が多い。

対象地域は、Ａ河川流域に広く分布する標高の低い平坦面であり、約 10 年前から区画整備事業対象エリア（地区面積 約 80 ha）となっている。地下水位は高く、軟弱な粘土やシルトが厚く分布しているため､長期的な沈下（圧密沈下）が問題になっている場所が多い。

高度経済成長期には、低湿地帯で、当時田圃として利用されていた当該地に、周辺の都市部から廃棄物が持ち込まれた。そのため、埋土（Ｆ層）には、大小様々な廃棄物（コンクリートガラ、家庭ごみ、ガラス片、布片、および焼却灰）が埋設物として認められる。自然地山である沖積層（Ａｃ層、Ａｓ層）は､海成粘土～砂を主体とし、GL-1.5～2.0m 以深から分布する(図 1)。

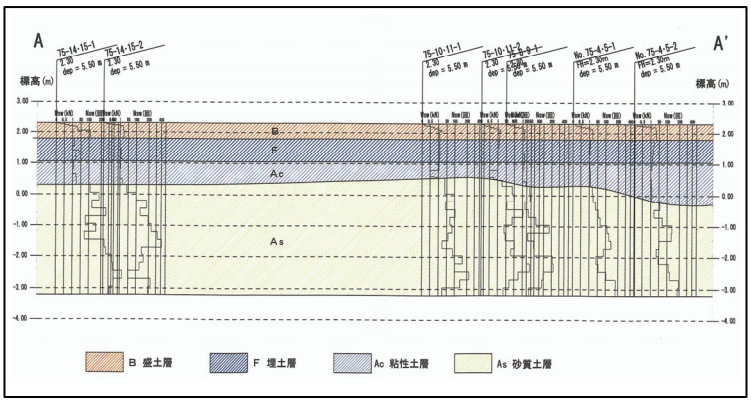


図 1　地質断面図

3. 事例分析のシナリオ

（1）埋設物処理対応フロー

当該地の重金属等の汚染は、人為由来と自然由来の双方が存在する。人為由来としては、廃棄物（コンクリートガラ、家庭ごみ、ガラス片、布片、および焼却灰）由来の「鉛およびその化合物」の含有量基準値超過（環境省告示 19 号試験：以下、鉛含有量）および、少量ではあるが、「ダイオキシン類」（ダイオキシン類対策特別措置法）の含有が確認される。

一方、沖積層（Ａｃ層、Ａｓ層）からは、自然由来の砒素（砒素およびその化合物）の溶出量（環境省告示 18 号試験：以下、砒素溶出量）の基準値超過が認められる。GL-1.5～2.0m 以深の地層下位に存在する沖積層（Ａｃ層、Ａｓ層）は、当該工事では、残地することとしているため、沖積層（Ａｃ層、Ａｓ層）を乱すことなく、埋土層中の廃棄物を掘削除去する必要がある。埋設物処理の対応としては、事前の土壌汚染調査と公定法分析によって焼却灰混入割合とダイオキシン類濃度及び鉛含有量との間に相関が高いことが判明しており（図 2）、土壌への焼却灰の混入状況が目視では判断困難な場合が多いことから、掘削除去後の底面・側面の鉛含有量を分析することで混入割合の高い焼却灰混り土の除去が完了できたか判断することとした（図 3）。鉛含有量の管理基準値は、図 2 から閾値を土壌汚染対策法と同じ 150mg/kg とした。施工を実施しない下位の沖積層（Ａｃ層、Ａｓ層）の確認は目視観察と共に、自然由来の基準値超過の判別を砒素溶出量試験（管理基準値：0.01mg/L）で行った。

なお、焼却灰の搬出にあたっては、産業廃棄物であるため許可事業者に委託するとともに、処分業の許可をもった業者（セメント工場も含む）に委託した。

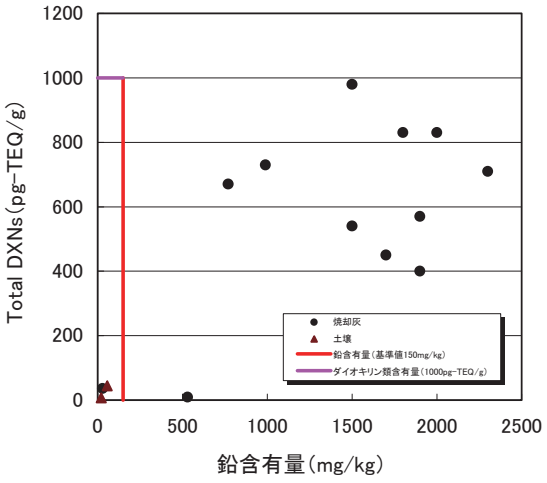


図 2　ダイオキシン類濃度及び鉛含有量との相関性

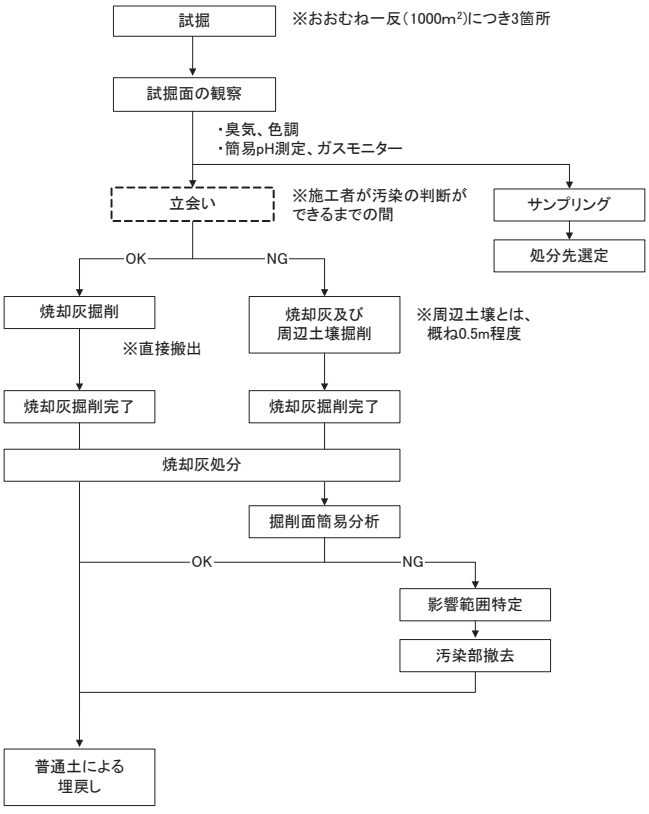


図 3　掘削に掛かる全体のフロー

（2）迅速分析法による地質リスク評価手法

簡易迅速分析の一つであるストリッピング・ボルタンメトリー法（SV 法）は、電気化学分析法であり、装置の小型化が容易でかつ高感度で分析できる [3),5),6)]。当該判定に用い

た装置は、電極に水銀を使用しない北斗電工株式会社の水銀フリー・ボルタンメトリー分析計（FIELDER HOE-100/FT-801）である（図 4)。ボルタンメトリー分析計の測定原理は、重金属イオンの還元濃縮と酸化溶出を利用するアノーディック・ストリッピング・ボルタンメトリー（ASV）法に基づいている。本分析法では、ASV 法で一般的に使用されている水銀電極に替えて、銅電極により鉛の分析を行う。銅電極は測定前に電極表面を溶解させてクリーニング(電解研磨)を行うことにより、電極表面を一定の状態に保ち、測定感度及び再現性を高めている。その後、試料水中の重金属イオンを電極上に一定時間還元濃縮させる。正電位方向に電位を掃引して濃縮した重金属イオンを酸化溶出させる。酸化溶出する電位は物質固有のものであり電位から定性分析を、流れた電流値（ピーク電流値またはピーク面積）から定量分析を行う。なお、分析精度は ICP－MS に匹敵するほど非常に高感度な分析手法である。測定時間は、鉛含有量試験の場合、前処理も含め 2 時間半で判定結果を出すことが可能である（図 5)。公定法との相関図を図 6 に示す。

図 4　重金属簡易迅速分析装置
（ボルタンメトリー分析装置）

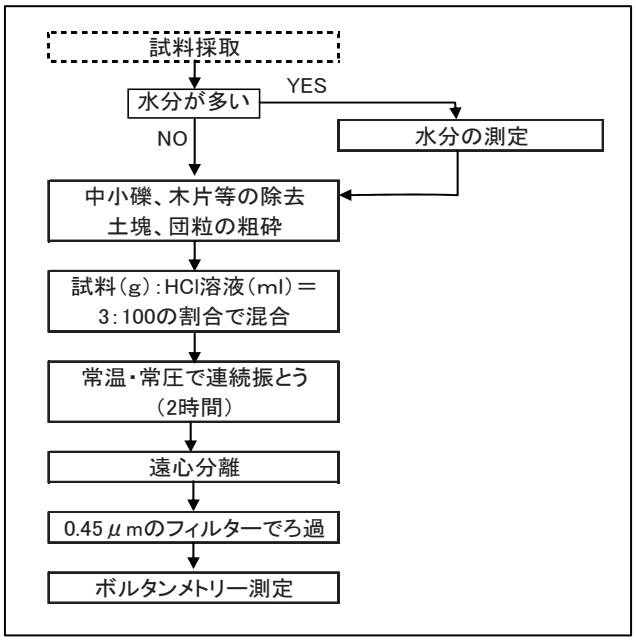


図 5　前処理・分析手順

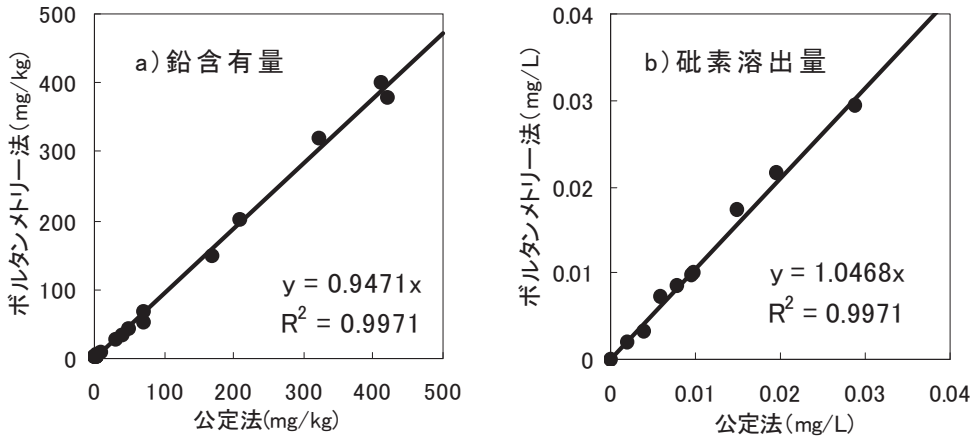


図 6　ボルタンメトリー法と公定法との相関例
［a)鉛含有量、b）砒素溶出量］

4. マネジメントの効果

（1）コスト面

焼却灰の混入状況は、ダイオキシン類含有量分析（分析期間 1 ヶ月）や公定法による鉛含有量分析（分析期間 1 週間～10 日）により判断することも考えられたが、ボルタンメトリー法による迅速分析法を採用することにより、焼却灰掘削除去後の掘削底面、側面管理が短時間で実施できることとなり、施工の短縮が行われた。これにより掘削除去ブロック 1 箇所当たり、分析～影響範囲特定までを 1 日程度で行い、掘削除去終了の判定ができるようになった。分析判定期間の短縮は、掘削除去工事の工期短縮に大きく寄与した。

また、分析コストに関しては、ダイオキシン類の分析費用（12 万円：建設物価 2011 年 8 月）に対し、簡易迅速分析のボルタンメトリー法による鉛含有量分析（5,500 円：前処理を含む単価）である。これらから、低コストで分析が実施できた点、工期の遅延が回避できた点から、総合的にコスト縮減に繋がった。

（2）将来的な展望

簡易迅速分析法の利点は、公定法より低コストでかつ迅速に精度よく地質リスクを把握出来る点が上げられる。平成 22 年 4 月に施行された「土壌汚染対策法の一部を改正する法律案（改正土対法）」では、汚染の有無の判断に簡易分析を使用することは認められていない。但し、土壌汚染対策法の成立時の国会による附帯決議（平成 14 年 5 月 22 日）により、土壌汚染調査及び汚染の除去等の措置については、簡易で低コストな手法について技術開発の促進を図ることとされており、今後、さらなる精度の向上により、活躍する場が増えてくるものと思われる。品質の確保に関しては、土木研究所によるマニュアル[1)]および東京都環境局[3), 4)]により、①公定法に比べ±20%以内に収まること、基準値の 1/2 以下まで測定可能なこと、②公定法に比べて簡便で短時間で測定できること、③人体および環境に有害な物質は使用しないこと、という基準でリスク管理が行える。

将来的な展望は、簡易迅速分析の特徴である抽出～測定迄、公定法と比較して消費電力（CO_2 発生量）が非常に少なく、廃液量も少ないなど、環境負荷が低い技術であるといった分析におけるコスト縮減の側面と、施工短縮という側面により、有効であると言える次項のデータ様式の提案では、「D．地質リスク管理事例のまとめ」としてまとめた。

建設工事における重金属等の地質リスクの把握に、簡易迅速分析を導入した事例を報告した。簡易迅速分析を導入することで、建設発生土の基準値超過状況を把握し、掘削除去に至るまでの施工の中での工事遅延リスクが軽減できることで、地質リスクのマネジメントに貢献することが期待できる。

5. データ様式の提案

本事例は、発現が予想された地質リスクに対して、事前データを基に、施工時に迅速に対応することにより、地質リスクマネジメントを行ったことについて定量化を試みたものである。なお、本事例はＤ型であるがＣ型事例を基にしてまとめており、工期の短縮の効果について定性的なものとし、分析コストを中心に定量化するにとどめた。

D. 地質リスク管理事例のまとめ

大項目		小項目		データ
対象工事		発注者		—
		工事名		A地区区画整備および道路整備他工事
		工種		造成基盤調査他
		工事概要		土地区画整備事業
		①当初工事費		—
		当初工期		平成 9 年度～30 年度
発現したリスク	リスク発現事象	リスク発現時期		事業期間中（平成 13 年頃）
		トラブルの内容		廃棄物から鉛の環境基準値超過（人為由来）、地山から砒素の環境基準値超過（自然由来）
		トラブルの原因		高度経済成長期に周辺の都市部から廃棄物が持ち込まれたことによる土壌・地下水汚染問題
		工事への影響		工事遅延
	追加工事の内容	追加調査の内容		土地整備の際、試掘調査の実施
		修正設計内容		—
		対策工事		廃棄物調査（焼却灰）
		追加工事		廃棄物の掘削除去+掘削面の底面側面管理
		追加費用	追加調査	
			修正設計	
			対策工	
			追加工事	
			②合計	
		延長工期		
		間接的な影響項目		
		負担者		発注者
最小限に回避したリスク	リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		事業期間中
		予測されたトラブル		広大な区画整備エリア内で廃棄物の埋設範囲の正確な把握が困難なため、施工中に廃棄物層に遭遇することで施工計画が変更することによる工事遅延
		回避した事象		廃棄物の掘削除去施工に際し、掘削底面側面の汚染状況の迅速な把握とその後の埋戻し施工
		工事への影響		工事遅延なく、最小限に抑えられた
	リスク管理の実際	判断した時期		事業期間中（平成 19 年より実施）
		判断した者		発注者+有識者
		判断の内容		公定法に代わって用いる迅速分析法による判定法の導入
		判断に必要な情報		迅速分析法の分析精度の確認
	リスク対応の実際	内容	追加調査	鉛含有量の簡易迅速分析(+砒素溶出量試験)
			修正設計	5000m^{3}に 1 回の迅速法による分析頻度
			対策工	—
		費用	追加調査	迅速分析費 ・鉛含有量試験 5,500 円/1 回 ・(+砒素溶出量試験 8,900 円/1 回)

			修正設計	掘削除去実施日に埋戻し施工が実施できる
			対策工	—
			③合計	—
	回避しなかった場合	工事変更の内容		公定法による分析 ・ダイオキシン類試験 120,000 円/1 検体 ・鉛含有量試験 4,000 円/1 回 ・(+砒素溶出量試験 8,000 円/1 回) ＋分析結果が出るまで(1 週間～10 日)の重機と作業員の待機費用
		④変更後工事費		—
		変更後工期		掘削除去実施日から 1 週間～10 日後に埋戻し施工の実施
		間接的な影響項目		重機の移動費用
		受益者		施工者
リスクマネジメントの効果		費用④－(①+②+③)		—
		工期		—
		その他		—

引用文献

1) 建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版），pp. 90，平成 22 年 3 月（2010 年）

2) 環境省：低コスト・低負荷型土壌汚染調査対策技術検討調査
[http://www.env.go.jp/water/dojo/gijyutsu/index.html]

3) 東京都：都が選出する土壌汚染調査（重金属等）の簡易で迅速な分析技術の詳細について
[http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/chemical/soil/information/analysis/heavy_metals.html]

4) 志村公久：土壌汚染簡易分析技術の評価と普及，月刊ビジネスアイエネコ 6 月号，113－114，2010

5) 糸永眞吾：迅速分析手法による自然由来重金属等の評価，特集 土壌・地下水汚染の対策技術，基礎工，p42－44，2009

6) 稲垣静枝，熱田真一，糸永眞吾，斯波裕之，福泉敦尚，村山盛行，清水継之介：水銀フリー・ボルタンメトリー分析計による重金属の迅速分析，環境浄化技術，3 月号，46－49，2008

7) 熱田真一，稲垣静枝，三原洋一，山田理映子，糸永眞吾：迅速分析法による自然由来の重金属分析事例，第 16 回地下水・土壌汚染とその防止に関する研究集会，pp585－586，2010

［論文 No. 11］　　軟弱地盤上の大規模土地造成事業における動態観測

広島県広島港湾振興事務所　　佐藤　吉之
復建調査設計株式会社　地盤環境部　○西田　宣一
復建調査設計株式会社　地盤環境部　　松本　敏明

1. 事例の概要

広島県広島市佐伯区吉見園地先に位置する国際拠点港湾広島港五日市地区では、昭和 62 年より総埋立面積 154ha の港湾整備事業が進められている（図 1）。

本事例は、この港湾整備事業用地の内、企業移転用地、港湾関連用地として定義されている埋立面積約 24ha（320m×750m）の処理区(2)東側域（図 1 赤範囲）で実施した沈下動態観測を対象とする。

当地区は、図 2 に示すように海底面より厚さ 15m 程度で分布する軟弱な沖積粘土層上に県内で発生した浚渫土（主に粘性土）を厚さ 10m 程度投入して埋め立てた。その後、サンドマット（厚さ 0.5m）および一次盛土（厚さ 2.5m）を施工し、プレファブリケィティッドバーチカルドレーン（以下 PVD と称す）を打設した後二次盛土を行い、所定の圧密放置後、計画高で盛土を撤去した。

PVD の改良仕様は、圧密放置 2 年で圧密度 90%以上とし、ドレーンピッチ 1.6m の正方形配置とした。二次盛土は、この PVD 改良仕様を前提とし、所定の圧密放置後に計画高で盛土撤去した時点で一次圧密残留沈下量を 10cm 以下とする厚さとした。

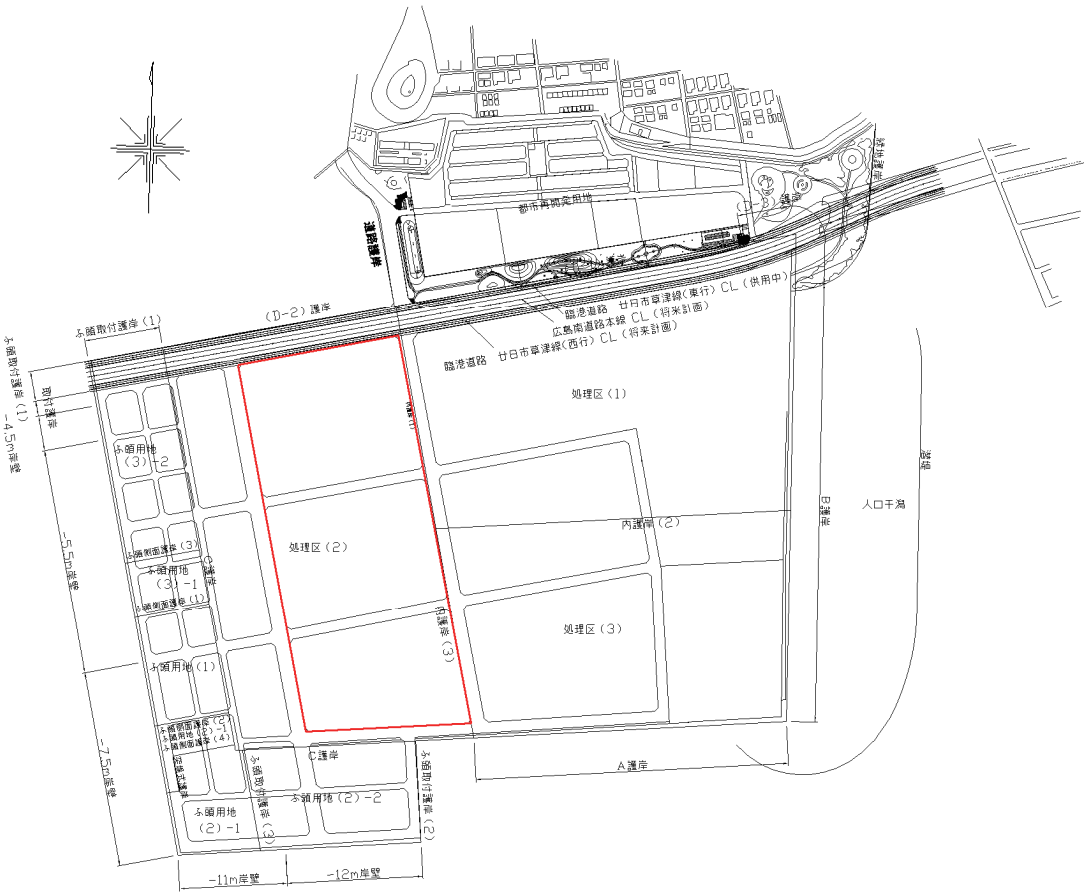


図 1　五日市地区全体平面図と事例対象地

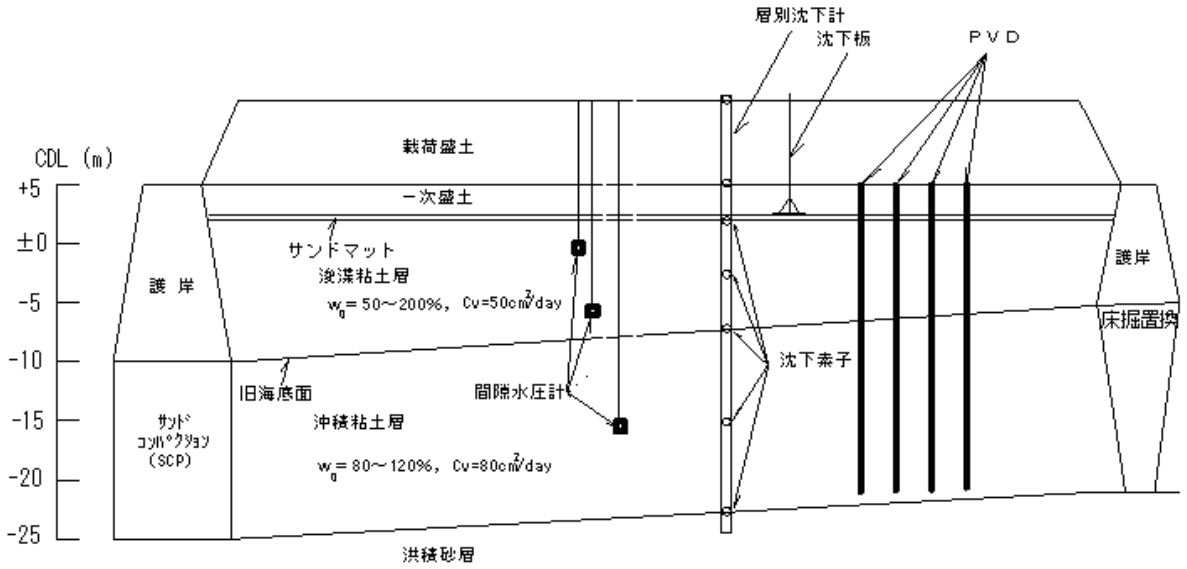


図 2　地盤概要図

設計時点で想定されたリスク事象は以下のとおりである。

1)浚渫土は、粘性土を主体とするものの砂質土が平面的・深度的に不規則に介在することから、現地の沈下量が予測沈下量と異なることが予想される。現地の沈下量が大きい場合は、盛土撤去量が不足し目標残留沈下量を満足できなくなる。逆に、小さい場合は、目標残留沈下量を満足できるものの盛土撤去土量が増加し土工費が増大する。

2)ドレーンが長尺となりドレーン材の目詰まりや沈下に伴う曲がりなどによるウェルレジスタンスの影響を受けた圧密遅れが発生する。この場合、圧密放置期間の延長や追加盛土の方策が必要となり、事業工程や事業費に影響する。

2.事例分析のシナリオ

(1) リスク回避に至るプロセス

設計時点で設定した地層モデルは、設計に供されたボーリング調査で把握された地層構成、地盤定数を基本とした。すなわち、浚渫土中には砂質土が介在するものとしてモデル化し、所定の目標残留沈下量を満足する二次盛土厚(6.7m)を設計し施工した。これに対して、浚渫土中に砂質土が介在しない部分（粘性土のみ）もあることを想定した安全側の設計とした場合には、二次盛土厚 8.1m が必要となることを予想していた。この場合、実施工では二次盛土厚が不足し追加盛土、圧密放置期間延長が必要となるリスクがある。

リスク回避手段として、埋立地内の沈下動態観測ならびにその観測結果に基づいた沈下解析を行い、想定どおりに沈下が進行しているかを確認しながら盛土施工を行うこととした。沈下動態観測は、埋立地全体の沈下を把握する目的で沈下板（約 80m 間隔）を、さらに、層別の沈下挙動を把握する目的で集中管理区（層別沈下計、間隙水圧計、水位計）を 2 箇所配置した。沈下解析は、不測の事態に備え圧密放置 1 年時点の中間解析と最終的に盛土撤去可能かを判断する圧密放置完了時点の最終解析の 2 時期で実施した。沈下解析の項目とそのフローを図 3 に示す。

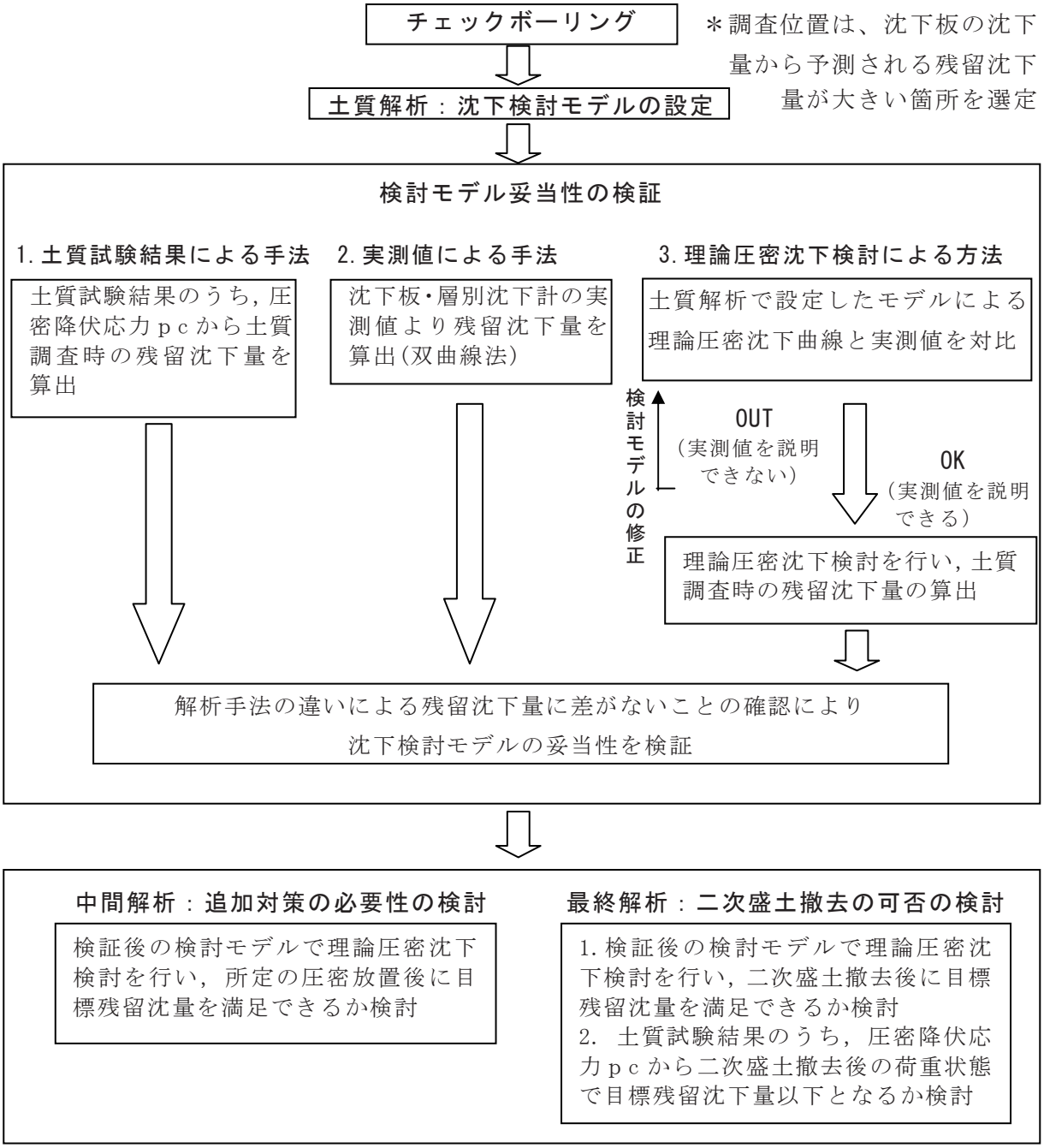


図 3　沈下解析項目と検討フロー

（2）分析のシナリオ

実際の現場では、当初設計どおりの圧密放置期間 2 年で追加盛土の施工を行うこともなく所定の目標残留沈下量を満足する地盤造成が可能であった。リスクマネジメント効果を評価するシナリオとして、

方針 1：実施工（二次盛土施工厚さ 6.7m）

方針 2：浚渫土が全て粘性土として計算した二次盛土施工（厚さ 8.1m）→安全設計

それぞれの撤去土量の違いによる施工費を比較することで評価する。

なお、盛土施工範囲の外周は SCP 改良されていることからこの境界付近の沈下量は設計計算より小さく高止まりし、盛土範囲の撤去前形状はすり鉢状を呈したが、この部分の撤

去土量増大は考慮せず、場内一般部の撤去土量で比較評価することとした。

3. データ収集分析

（1）収集したデータ

収集したデータは以下のとおりである。

・地盤改良設計報告書

・動態観測結果ならびに沈下解析報告書

（2）データ分析

設計時点に想定された二つのリスク事象に対し、沈下解析報告書他より以下の結論が得られている。

・設計二次盛土厚 6.7m で施工し、所定の圧密放置期間 2 年で目標残留沈下量 10cm 以下の地盤造成ができた。沈下解析の代表例として、理論沈下計算と実測沈下の対比状況を図 4 に示す。

・ウェルレジスタンスの影響を受けた圧密遅れは、当初設計時点でドレーン長、ドレーン材の透水係数等により評価しており、現地の実測沈下から逆算されたその透水係数は設計で想定していたものと同等であり、設計以上の圧密遅れはなかった。

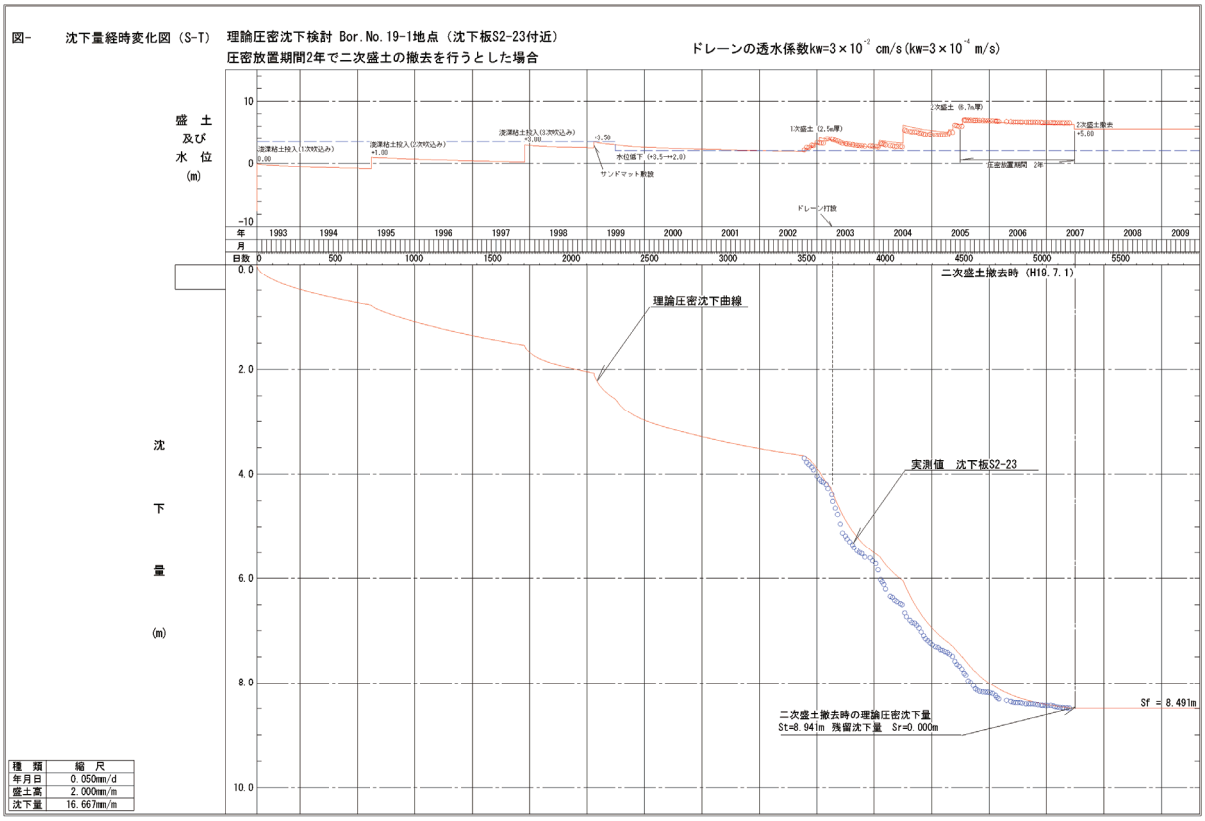


図 4　理論沈下計算と実測沈下の対比状況例

一方、設計の二次盛土厚さとその撤去厚は表 1 のとおりである。

表 1　設計二次盛土厚さと撤去厚

	二次盛土厚さ	放置後の撤去厚
方針 1：採用設計 （浚渫土中の砂質土の介在を土質調査結果に基づき考慮する）	6.7m	1.0m
方針 2：安全側設計 （浚渫土は全て粘性土と仮定）	8.1m	1.5m

4. マネジメントの効果

リスクマネジメント効果は、2 節で前述した方針 1、2 についてその撤去土量の違いによる経済比較を行うことにより評価した。

実際の現地沈下状況下において、方針 2 の二次盛土厚 8.1m で施工していた場合、その撤去厚は表 1 下段に示した 1.5m より厚くなるがこの時の撤去厚さ増分は､具体的に求められていない。ここでは、二次盛土厚の増分 1.4m（8.1m-6.7m）に対し沈下量増を考慮しやや小さく見積もり 1.0m を撤去厚の増分（撤去厚 1.0+1.0=2.0m）とする。

また、経済比較にあたり用いた検討項目は、リスク回避に必要な動態観測ならびに沈下解析費、盛土土工費として普通 21t ブルドーザによる敷均し締固め費、山積み 1.4m3 バックホウによる掘削積込費を計上した。当地区では、盛土材として公共残土を受け入れ、撤去盛土は隣接する処理区(3)の一次盛土として転用されているため、盛土材料費、捨土代は計上しない。さらに、方針 2 においても現実的には動態観測ならびに沈下解析は行われていたと想定されるが、ここでは計上しない。

以上の条件において算出したマネジメント効果を表 2 に示す。

表 2　方針 1 によるリスクマネジメント効果

	工種	数量	概算事業費	合計
方針 1	動態観測・沈下解析	2 ヵ年	2,000 万円	14,000 万円
	敷均し締固め	24 万 m^3	6,000 万円	
	掘削積込	24 万 m^3 （24ha×1m）	6,000 万円	
方針 2	敷均し締固め	48 万 m^3	12,000 万円	24,000 万円
	掘削積込	48 万 m^3 （24ha×2m）	12,000 万円	
マネジメント効果（差額）				10,000 万円

5. データ様式の提案

本事例は、「A 型：地質リスクを回避した事例」であり、A 表原案を基本とした。なお、原案によるリスクマネジメントの効果は、①当初工事費用-③変更後工事費用-②リスク対応費用で表されていることから、①当初工事を方針 2（安全側設計）、②リスク対応を方針 1（動態観測による対応）としてわかりやすく一部加筆、修正して同表を作成した。

A. 地質リスクを回避した事例

大項目	小項目		データ
対象工事	発注者		広島県広島港湾振興事務所
	事業名		国際拠点港湾広島港五日市地区 港湾整備事業
	工種		盛土工、バーチカルドレーン工
	工事概要		盛土撤去 2m 分の敷均し締固め、掘削積込
	①当初工事費(方針 2 の場合)		24,000 万円
	当初工期		圧密放置期間 2 年
リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		圧密放置 1 年後の中間解析時点
	予測されたトラブル		圧密沈下量増・圧密遅れに伴い追加盛土が必要となり土工費が増える。もしくは圧密放置期間の延長。
	回避した事象		追加盛土、圧密放置期間の延長
	事業への影響		最悪の場合、事業遅延に伴い用地売却が進まず投資費用の回収が困難となる。
リスク管理の実際	判断した時期		圧密放置 1 年後、2 年後
	判断した者		発注者
	判断の内容		追加盛土・放置期間延長の必要性の有無
	判断に必要な情報		地層構成、土性、動態観測結果
リスク対応の実際 方針 1 による対応	内容	追加調査	動態観測、沈下解析
		設計	-
		工事	盛土撤去 1m 分の敷均し締固め、掘削積込
	費用	追加調査	2,000 万円
		設計	-
		工事	12,000 万円
		②合計	14,000 万円
変更工事の内容	工事変更の内容		-
	③変更工事費		-
	変更工期		-
	間接的な影響項目		-
	受益者		-
リスクマネジメントの効果	費用（①－③－②）		10,000 万円
	工期		変更なし
	その他		用地売却の遅延なし

[論文 No. 12]　　安価な監視機器を用いた斜面安定管理

株式会社サンワコン　○岡島　尚司
〃　　森川　和典
福井大学　荒井　克彦

1. はじめに

地質リスクマネジメントを推進するためには，調査手法や計測・監視手法の簡略化および低価格化が重要なポイントになる。構造が単純で電力を必要とせず，斜面に登ることなく，斜面上部での①傾斜変位を監視する機器，②地下水位の上昇（飽和帯の形成）監視する機器，③遠隔観測で切土斜面表面の弾性波速度分布を推定して安定性や岩盤分類の妥当性をチェックする方法を開発した。これらの概要と利用事例を報告する。

2. 傾斜変位を監視する簡易な機器

(1) 概要

斜面の変位状況を監視するさまざまな機器が開発されている。しかし，電源確保やメンテナンス，コストなどの問題で，監視機器の設置を断念するケースも少なくない。電源を必要とせず，仕組みが簡単で，誰でもメンテナンスでき，できるだけ安価な傾斜検知器を開発した[1)2)3)4)]。できるだけ多くの危険箇所に機器を設置し，予防対策の必要性を判断する一助となることを目的とする。

(2) 仕組みと構造

傾くと玉が転がり落ちる仕組みの簡易型傾斜検知器を，監視対象の岩盤などに設置する（図-1）。路上から確認できる位置に「警報表示器」を設置する。「傾斜検知器」と「警報表示器」を「連絡管」で接続する。玉が連絡管の中を転がり落ちて，警報を表示する。

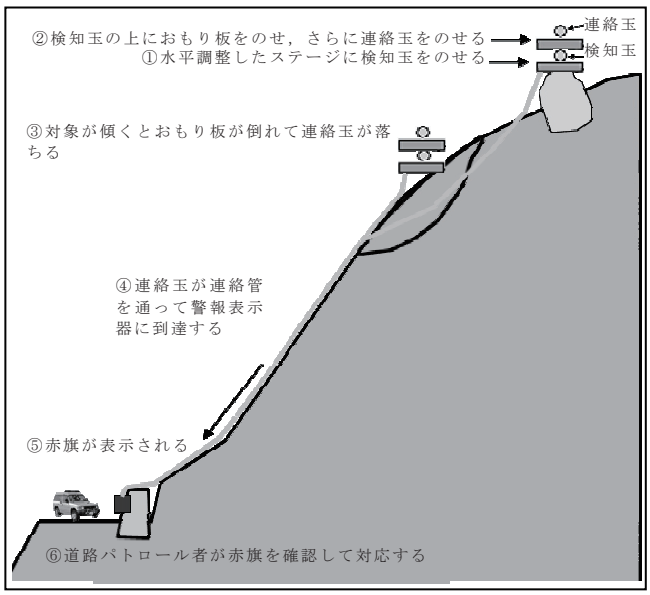


図-1　簡易型傾斜検知器の設置の概要

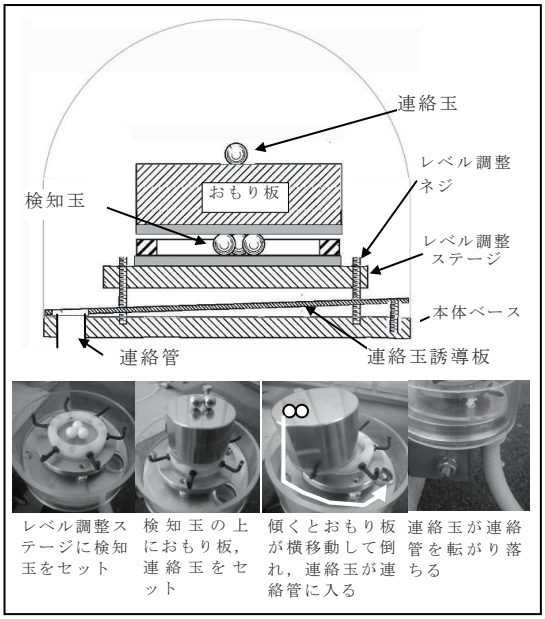


図-2　簡易型傾斜検知器の構造

①本機器のレベル調整ステージを水平調整して，検知玉をのせる（図-2）。②検知玉の上におもり板をのせ，その上に連絡玉をのせる。③検知対象が傾くと検知玉が転がり，おもり板が移動して倒れ，連絡玉が落ちる（0.01～0.05° 傾くと作動する）。④連絡玉は連絡管を通って警報表示器に到達する。⑤警報表示器の赤旗が表示される。⑥道路パトロール者は赤旗表示を確認して，上部斜面の変状の可能性を報告する（普段は赤旗の有無の確認のみ）。⑦作動した際にも，①のように

再セットすれば監視を継続できる。

(3)誤作動の可能性

本機器では構造的な特性から，地震や暴風雨による誤作動が懸念される。室内実験および現場テストにより以下のことを把握している。

① 地震動の周期が0.2秒程度であれば，震度3程度の地震でも誤作動しない(周期が長いと小さい震度でも作動する)。実際の現場でも，震度 2,3 の地震で誤作動しなかった実績がある。

② 対象が基岩と分離しているような場合は，振動が増幅されるため震度3以下でも作動する(震度3以下でも誤作動する場合は，傾斜変位がなくとも不安定な状態であると判断する)。

③ 高圧洗浄機で暴風雨を再現したテストをしたが，誤作動しなかった。雨風による誤作動はないといえる。

(4) 利用事例

重力式擁壁の変状を監視した。図 3 に示すように重力式擁壁が打ち継ぎ目を境界にして変位しており，対策が必要とされていた。対策までの安全性を確保するために傾斜検知器を設置した。傾斜検知器が作動した時に変位量を確認するためのクラックゲージも設置した。原則的に道路パトロール者が車窓から赤旗表示の有無を確認している。

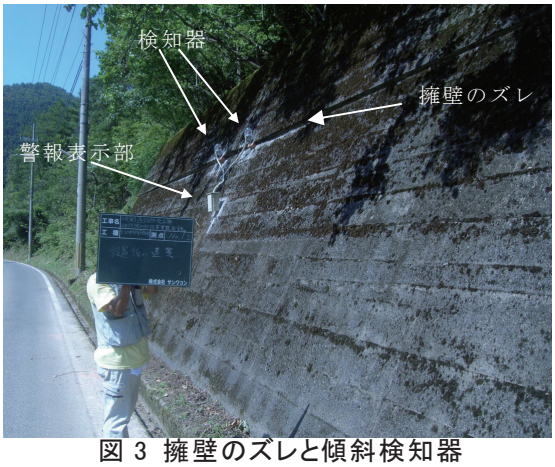


図 3 擁壁のズレと傾斜検知器

設置して約半年で豪雨時に2回作動した。作動時に確認したクラックゲージの変位は極めて小さく，かつ，累積変位はない(1回目は 0.07mm 開き，2回目は 0.06mm 縮む変位)。この状況から，緊急に擁壁の対策を行う必要はなく，当面は本機器での監視を継続すればよいと判断している。

図 4 傾斜検知器設置部の拡大

(5) 利用効果

地質リスク学会が定めたマネジメント効果の趣旨からは若干外れるが，A 型のマネジメント効果の一種として算定すると以下のようになる。

①当初工事費 = 200 万円(アンカー工)

②リスク対応費用 = 約 40 万円(傾斜検知器+設置費+作動時の確認費用)

③変更後工事費 = 0 円

以上より，マネジメント効果は①－②－③＝160 万円となる。

今後も監視を継続するため，監視に多大の費用がかかれば，マネジメント効果は薄れてしまう。しかし，本機器は電気代などメンテナンス費用はほとんどかからないため，監視が長期に及んでもマネジメント効果が維持できると考える。

3. 地下水位の上昇(飽和帯の形成)を監視する機器

(1)概要

斜面崩壊には地下水が関係する場合が多い。地下水位の把握は対策工費にも影響する。地下水位の上昇(飽和帯の形成)状況を把握することは，適切な対策を検討する上で重要である。地下水位の観測孔はボーリング孔を利用する場合が多く，観測孔の設置コストが大きい。さらに，水位の上昇や飽和帯の形成を見逃さないためにはデータロガーなど電気式の機器が必要となる。機器や観測孔の設置コスト，メンテナンス費用がハードルとなって，地下水位の計測を断念するケースは少なくない。そこで，電気を必要とせず，仕組みが簡単で誰でもメンテナンスでき，水位の上昇や飽和帯が形成されたことを見逃さない地下水位の監視方法を開発した[1)]。

(2) 仕組みと構造

簡易貫入試験後の孔を利用して，径の細い塩ビパイプを挿入した地下水観測孔を設置する。ボーリング不要で設置コストが安くなる。地下水位が達すると導通する簡易センサーを監視深度に設置する。導線を道路際まで配線して，道路パトロール者が斜面に登らずにセンサーの導通の有無をテスターで確認する(図 5)。

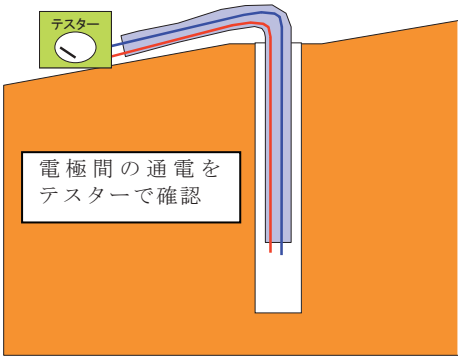


図 5 地下水検知の概要

センサー部は導線の先端を電極としたもので，電極間に水分があると導通する単純な構造とする(図 5)。通常の接点式の地下水位計測との違いは「電極部に到達した水分がそこに貯留される構造」を持つことである。この構造により，上昇した地下水位が低下した後にチェックしても，監視水位以上に地下水位が上昇したことを見逃さない。監視水位以上に水位が達したことを確認した場合は，センサーを引き上げて，センサーより上方に数 cm 間隔でセットした水分記録紙を確認して，どこまで水位が上昇したか確認することも可能である。

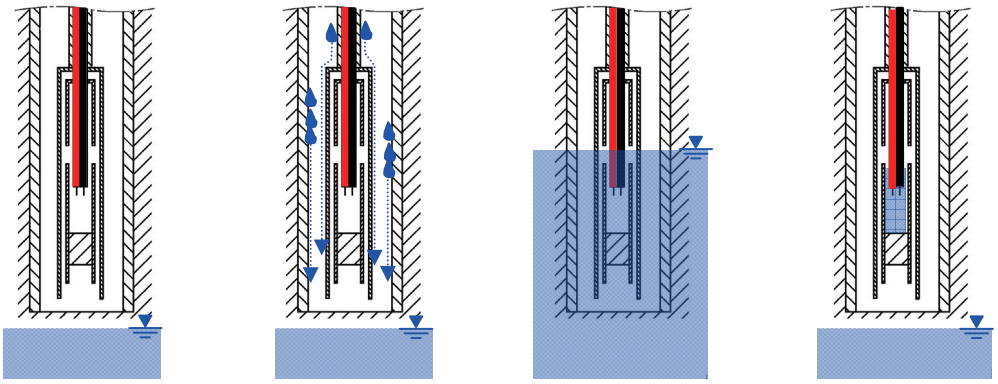


図 6 センサーの構造

(ア)(イ)は地下水位がセンサーに達していない。(イ)は観測孔壁についた水分がセンサー内に進入して誤検知しない状況。(ウ)は地下水位が上昇して，センサーが検知している状況。(エ)は地下水位が下がった後にもセンサー部に水分が残留してセンサーの検知が続いている状況。すなわち，地下水位が到達したことを記憶している。

(3) 利用事例

対象とした斜面では表層崩壊跡と思われる微地形が認められた。高さ約 40m，勾配約 45° で木材チップとセメントを配合した吹付工が施工されている(図7)。木材チップの吹付工に表層崩壊の

抑止機能は期待できないので，鉄筋挿入工など対策検討が必要とされていた。地下水（飽和帯の形成）状況の確認のため本機器を設置した。

地形状況から崩壊面の深さを 1.0m～1.5m 程度と想定し，地下水検知器の深度を 1.5m にした。吹付部の上方の自然斜面に1箇所，吹付工内に3箇所の合計4箇所設置した（図 7，8）。斜面下までケーブルを配線し斜面に登らずに導通確認を行った（図 9）。

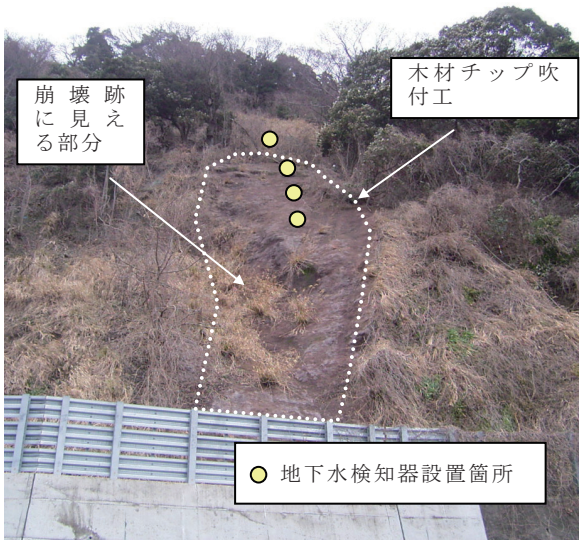


図 7 対象斜面の外観

観測開始から約4ヶ月経過した。この間，表1に示すように，ある程度まとまった降雨もあったが，地下水検知器による監視では，飽和帯が全く形成されていないと判断された。この結果は，当該斜面の地山が著しく破砕された亀裂の多い緑色岩であり，飽和帯の形成に寄与する透水性の明瞭な境界がなく，飽和帯が形成されにくいことと整合する。表層崩壊跡は飽和帯の形成によるものではなく，地表水の侵食によるものと考えられる。侵食に対しては，木材チップの吹付工がある程度機能すると考えられるため，現段階では表層崩壊対策は実施しないこととした。ただし，さらに激しい豪雨時に飽和帯が形成される可能性は否定できないため，この機器を用いた地下水の監視は継続する。

(4) 利用効果

本事例も，地質リスク学会が定めたマネジメント効果の趣旨からは若干外れるが，A 型のマネジメント効果の一種として算定すると以下のようになる。

①当初工事費 = 2,600 万円（ロックボルト工 500 ㎡）

②リスク対応費用 = 約 40 万円（地下水検知器+設置費+作動時の確認の費用）

③変更後工事費 = 0 円

以上より，マネジメント効果：①－②－③＝2,560 万円となる。

監視を継続する場合，監視に多大の費用がかかればマネジメント効果は薄れてしまうが，本機器も電気代などメンテナンス費用はほとんどかからないため，監視が長期に及んでもマネジメント効果が維持できると考えられる。

図 9 通電確認状況

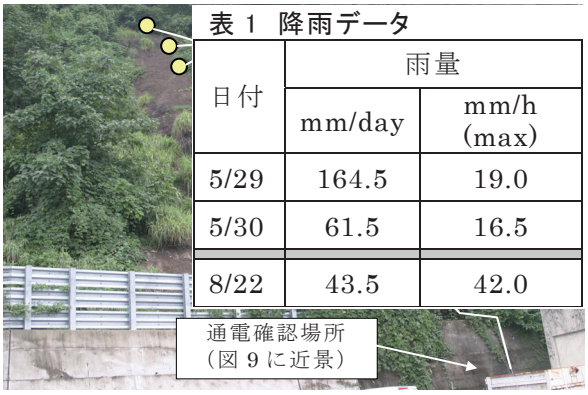


図 8 地下水検知器の設置状況

表 1 降雨データ

日付	雨量	
	mm/day	mm/h (max)
5/29	164.5	19.0
5/30	61.5	16.5
8/22	43.5	42.0

4. 遠隔観測で弾性波速度分布を推定し，安定性や岩盤分類の妥当性をチェックする方法

(1)概要

切土斜面の設計段階では，地質リスクを勘案したうえで必要最小限の調査を実施することが重要である。斜面全体の状況は捉えられないのが当然であり，施工中に，設計段階で想定した地山条件との差異をチェックすることが重要である。施工中のチェックは，目視観察で実施するのが主であるため，評価の客観性が十分には担保されていない。よって，過大なのり面工が施工されてコスト削減の機会を逃したり，逆に，供用後に崩壊して，多大な対策費がかかる場合がある。

(2) 方法の概要

図 10 に示すように，本手法では岩が露出した斜面の「黄色さの度合い」と温度の「上がりやすさ」を観測する [5)6)7)8)]。一般的な岩石は風化に伴い黄色味を帯び，岩片は脆くなる。岩斜面表面の「黄色さの度合い」は「岩片の硬さ」の情報を持つ。一方，岩盤のき裂には水分が貯留されやすい。き裂が多いほど水分を多く貯留し，温度が上がりにくい。斜面表面の「温度の上がりやすさ」は「き裂の程度」の情報を持つ。一般に利用されている弾性波速度は，主に「岩片の硬さ」と「き裂の程度」を反映している。遠隔観測で得るデータと弾性波速度はともに「岩片の硬さ」，「き裂の程度」の情報を持つので，両者の相関式を作成して遠隔観測データから弾性波速度を推定する。

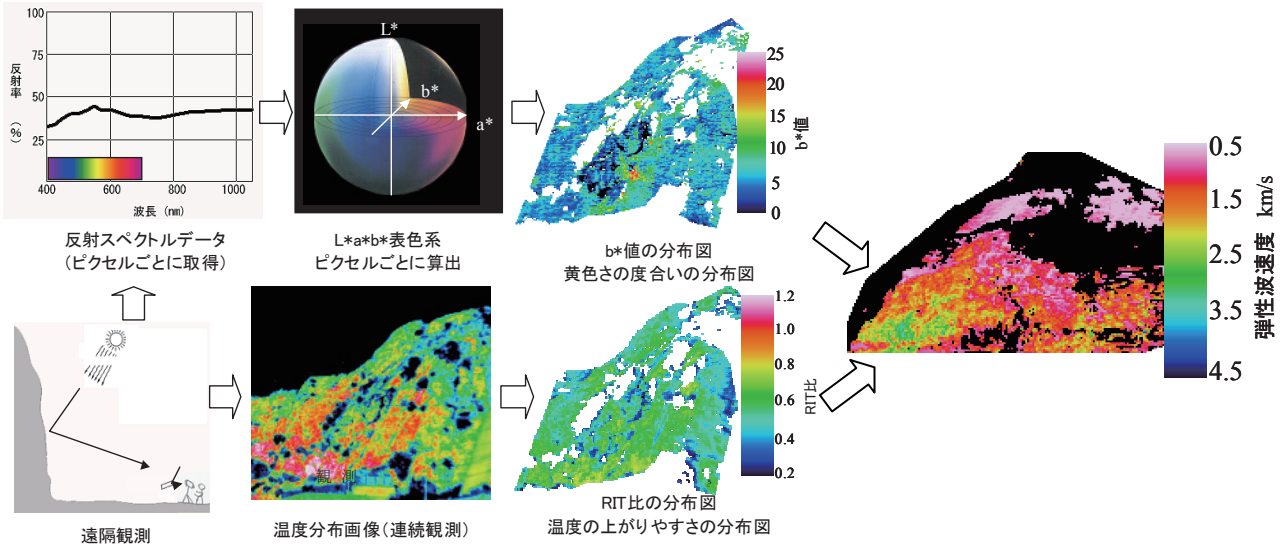


図 10 遠隔観測から弾性波速度推定の流れ

①地山表面の「反射スペクトル」と「表面温度分布の時間的な変化」を遠隔観測する。②反射スペクトルが持つ色情報を L*a*b*表色値に変換する。③黄色さの度合いを表す b*値の分布図を作成する。④表面温度分布の時間的な変化を元に温度の上がりやすさを表す RIT 比の分布図を作成する。⑤あらかじめ作成した b*値と RIT 比から弾性波速度を推定する式を使って推定弾性波速度の分布図を作成する。

推定した弾性波速度分布図を基に，設計段階で推定した岩盤分類の妥当性を検証したり，斜面の安定性などを検討する。

(3) 利用事例

施工中の切土斜面ではなく，融雪時に表層が剥離崩壊した切土斜面で本手法を利用した(図 11)。のり面の高さは 20m で，勾配は約 60° である。小段部で実施した簡易貫入試験結果により，表層の 1.5m 程度が土砂化していることを確認した。目視観察では，のり面全体としての地山条件には差がないことから，表層の土砂化した部分が今後も剥離崩壊すると想定し，のり枠工による対策が必要と考えた。目視観察の結果を補強，客観化するために本方法を活用して，のり面全体の地山状況を確認した。

本方法による評価で，簡易貫入試験を実施した小段部より下方は，弾性波速度が若干大きい部分が認められ(図 12)，下部では土砂の厚みが薄い可能性が見出された。そこで，図 13 に示す位置で，土砂層の厚さをドリル削孔で確認した。層厚確認調査の結果，斜面下部では土砂厚が 0.2～0.3m と薄いことが確認できた。今後も，小段付近での局所的な小崩壊(小剥離)程度しか発生しないと判断し，のり枠工の施工は不要と判断した。

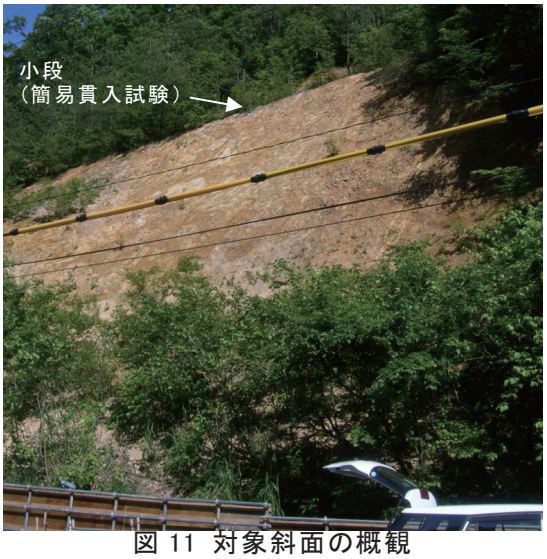


図 11 対象斜面の概観

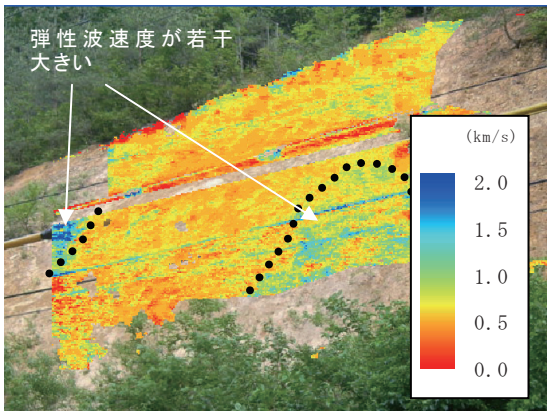


図 12 推定弾性波速度の分布図

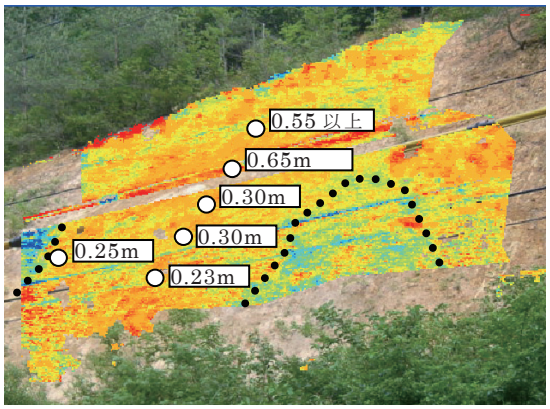


図 13 ドリル削孔による緩み厚さ計測結果

(4) 利用効果

本事例も，地質リスク学会が定めたマネジメント効果の趣旨からは若干外れるが，A 型のマネジメント効果の一種として算定すると以下のようになる。

①当初工事費=720 万円(のり枠工 200 ㎡)

②リスク対応費用 = 約 50 万円

③変更後工事費 =0 万円

以上より，マネジメント効果:①－②－③＝670 万円となる。

5. まとめ

本報告では，「要対策」と考えた斜面に対して対策不要という判断をした事例を示した。地質リスク学会で収集している事例とは趣旨が合わないかもしれないが，発注者側の立場で，対策の必要性そのものに言及していくことも，地質リスクマネジメントの一種として重要と考えられる。なるべく費用をかけずに対策の必要性を判断する方法の一つとして，本報告の方法が貢献することを期待したい。今後も，事例・実績を増やしていく予定である。

参考文献

1) 斜面防災のための新しい管理方法に関する研究会グループ 2：簡易な監視機器を用いた斜面点検・監視の強化マニュアル（案）産学官共同研究報告書～球座式傾斜検知および簡易型地下水監視～，（財）福井県建設技術公社,2010
2) 岡島ほか：道路パトロール強化のための簡易な傾斜検知器の開発,第 44 回地盤工学研究発表会発表講演集,地盤工学会,2009
3) 岡島ほか：簡易型傾斜検知器を用いた道路斜面パトロールの強化,近畿地方整備局,2009
4) 岡島ほか：簡易型傾斜監視装置を用いた道路斜面パトロールの強化,地盤工学会関西支部計測技術シンポ,2010
5) 産学官共同研究支援事業研究開発グループ：地上リモートセンシングによる岩斜面の安定性評価マニュアル（案）産学官共同研究報告書,（財）福井県建設技術公社,2005
6) 岡島ほか：地上リモートセンシングによる岩盤斜面調査方法開発のための基礎的研究，日本リモートセンシング学会誌，23(3)，pp.224-238，2003.
7) 岡島ほか：地上リモートセンシングによる岩盤斜面の安定性評価の可能性，日本リモートセンシング学会誌，24(1)，pp.39-52，2004
8) 岡島ほか：地上リモートセンシングによる岩盤斜面安定性評価の多数の実斜面への適用，日本リモートセンシング学会誌，25(1)，pp.72-82，2005

［論文 No.13］　ボ-リングコア再見直しによる設計条件誤りの回避(A タイプ)

株式会社新協地質　高　　豪

(1)　事例の概要

本事例は、鉄筋コンクリ-ト造 4 階建ての建築物基礎として杭基礎を計画したときに必要となる設計条件の誤りをボ-リングコアの見直しによって回避したものである。

建築物基礎として杭基礎を設置する場合、杭の極限支持力は、ボ-リング柱状図によるＮ 値と砂質土・粘性土の区分が重要となる。このため、とくに中間土と言える砂質シルトとシルト質細砂に着目した砂質土と粘性土の区分を見直した結果、杭長と杭径による経済比較の精度が向上した。また、杭数の減につながった。ボ-リング調査における砂質シルトとシルト質細砂の観察区分は、これまでの経験を積み重ねた結果として個人的主観や個人的先入観により、やや、支配的となるのが現状である。この観察区分の判断によって砂質シルトは、粘性土処理、シルト質細砂は、砂質土処理となる。このように砂質土と粘性土の区分による設計条件については、杭基礎の支持力計算における周面摩擦力に直接反映されるため、杭長が長ければ長いほどに支持力の大きさに影響し、杭本数の増減に伴う経済性にも影響が生じていくことになる。

そこで本事例対象の建築物基礎となる杭基礎設計条件へ適用される砂質シルトとシルト質細砂に着目したボ-リングコアの見直しによる砂質土と粘性土の区分は、自然地盤に対する精度を高めるとともに杭径、杭本数等の規模に反映されることになるため、

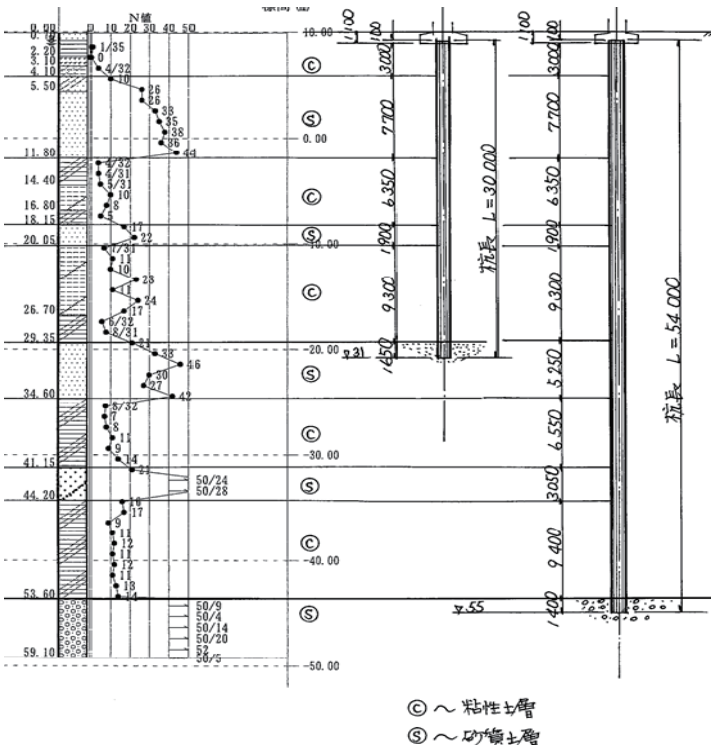


図 1　建築物基礎の杭基礎設置と土質区分

設計条件の設定に対して重要である。また、このことは、ボ-リング柱状図作成についても地質調査の成果の精度が高まり、信頼度が高められることになる。

(2) 事例分析のシナリオ

建築物基礎となる杭の支持力計算に対しては、杭の先端支持力と杭の周面摩擦力に必要な土質定数の設定が必要となる。この土質定数の設定については、室内土質試験結果や標準貫入試験のN値からの経験推定式によるところが多い。ただし、このことは、ボ-リング作業での観察土質判断が重要で、室内土質試験用のサンプリング範囲と適用させる経験推定式に影響をおよぼすことになる。ここでボ-リング作業での観察土質の判断とは、土質区分のことであり、砂質土層と粘性土層の明確な区分が杭の支持力算出における設計条件に大きく反映される。

ボ-リング作業における砂質土層と粘性土層の土質区分は、ボ-リングコアや標準貫入試験試料を主にした主観的な観察より実施されている。とくに砂質シルトとシルト質細砂に着目した砂質土層と粘性土層への土質区分は、主観的な観察による判断が困難となる場合が多い。そして、この困難に伴う土質区分の判断の誤りは、そのまま杭基礎で代表される根入れの深い基礎規模決定に大きく関係してくることになる。

したがって、砂質土層と粘性土層の区分判断については、技術部担当者会議で協議した結果、明らかな腐植土や粘土、そして砂礫・粗砂の範囲を除き、細粒土分を含む砂等のような砂質土層と粘性土層との中間土に対して客観的な判断基準を独自に設定してボ-リングコアや標準貫入試験試料観察に反映させることにした。

ここで独自の判断基準設定とは、土に触れた感覚について3人以上の意見を評価するために中間土の明確な区分として着目する共通項目を作成し、適用したものである。

(3) デ-タ収集分析

細粒土分を含む砂等のような中間土に対する判断基準は、客観的な判断を必要とするため、ボ-リングコアや標準貫入試験試料に触れた感覚について3人の意見を評価して実施した。この評価方法は、細粒土分を含む中間土の明確な土質区分判断に着目した共通項目の結果より集計した。この意見の評価は、共通項目に沿っているため、主観的な意見が含まれないようにしている。このため集計は、比較的簡易で、短時間に処理ができた。そして、集計結果による評価は、早急にボ-リング柱状図の作成段階に提供させることができた。ただし、特殊な中間土等については、集計判断の決め手として粒度・含水比・土粒子密度・液性限界・組成限界等の物理的性質試験の結果も含めて判断することもあった。

本事例においては、3人以上の意見評価として3人で実施したもので、地質調査の経験年数を少なくとも5年以上を対象とし、最低限の知識と土の見かたができる各年代者を選任した。

表 1　土質区分判断用の共通項目

共通項目	A 評価者	B 評価者	C 評価者
① コアの触感でざらつく			
② コアを指圧でつぶすと団子状になる。			
③ コアの粘り気が少ない			
④ コアの含水量が少ない。			
⑤ コアを指圧で押すと粘性が感じられる。			
⑥ コア断面に崩壊性がある。			

＊　評価は、○か×で判断

(4)　マネジメントの効果

マネジメントの効果としては、評価方法において主観的が主になると経験年数の高い評価者の意見が強調されやすくなるため、これを排除した共通項目による単純化が有効的であったと考えられる。このことは、着目する評価項目が極端な話として砂か粘土かを判断する内容であるため、手触りや粘り気の程度による感覚的な意見に集中させることが重要と考えられた。

結果としては、3 人でボ-リングコアや標準貫入試験試料に触れた感覚について意見を評価したことによる砂質土層と粘性土層の区分が杭基礎の支持力計算における周面摩擦力に直接影響されるため、杭の径や本数に対する経済考慮もできたものと考えられる。

表 2～表 5 には、土質区分の見直しに伴う杭 1 本当たりの極限支持力の差について対比する。この対比結果から明らかなように極限支持力 Ru は、粘性土層と砂質土層の厚さに比例して差が大きくなるため、細粒土分を含む砂等のような中間土に対する区分判断が重要になるものと考えられる。

表２　杭基礎の計算結果

杭長 (m)	杭径 (mm)	**土質区分**	N	Ap (m2)	Nsi・Lsi (kN/m)	Cui・Lci (kN/m)	φ (m)	**Ru (kN/本)**
54	700	**当　初**	50	0.385	614.35	2692.50	2.199	**11944.65**
		見直し	50	0.385	511.50	3548.75	2.199	**12904.93**

表３　杭の周面摩擦力諸元（当初の土質区分）

層厚 (m)	土質	Nsi (kN/m2)	Cui (kN/m2)	Lsi (m)	Lci (m)	Nsi・Lsi (kN/m)	Cui・Lci (kN/m)
2.00	粘性土	－	25	－	2.00	－	50.00
8.70	砂質土	28	－	8.70	－	243.60	－
6.35	粘性土	－	50	－	6.35	－	317.50
8.55	砂質土	15	－	8.55	－	128.25	－
2.65	粘性土	－	125	－	2.65	－	331.25
5.25	砂質土	25	－	5.25	－	131.25	－
6.55	粘性土	－	125	－	6.55	－	818.75
3.05	砂質土	25	－	3.05	－	76.25	－
9.40	粘性土	－	125	－	9.40	－	1175.0
1.40	砂質土	25	－	1.40	－	35.00	－
計				26.95	26.95	614.35	2692.50

表４　杭の周面摩擦力諸元（見直しによる土質区分）

層厚 (m)	土質	Nsi (kN/m2)	Cui (kN/m2)	Lsi (m)	Lci (m)	Nsi・Lsi (kN/m)	Cui・Lci (kN/m)
3.00	粘性土	－	25	－	3.00	－	75.00
7.70	砂質土	30	－	7.70	－	231.0	－
6.35	粘性土	－	50	－	6.35	－	317.50
1.90	砂質土	20	－	1.90	－	38.00	－
9.30	粘性土	－	125	－	9.30	－	1162.50
5.25	砂質土	25	－	5.25	－	131.25	－
6.55	粘性土	－	125	－	6.55	－	818.75
3.05	砂質土	25	－	3.05	－	76.25	－
9.40	粘性土	－	125	－	9.40	－	1175.00
1.40	砂質土	25	－	1.40	－	35.00	－
計				19.30	34.60	511.50	3548.75

(5) データ様式の提案

本事例の検討データについては、「A.地質リスクを回避した事例」としてデータ様式原案に記入し、様式の妥当性を確認した。データ様式原案は、リスクマネジメントの効果を費用と工期に着目しているが、ここに効果内容をまとめ最終的な事例の総括を加えることが必要と考えられる。これによって、リスクの回避事象による効果についての流れが把握できる。

表5　A. 回避した事例のデータ様式の提案

大項目	小項目		データ
対象工事	発注者		民間(G株式会社)
	工事名		小学校改築に係る建築基礎工事
	工種		杭基礎工事
	工事概要		杭基礎工事として採用された 埋め込み杭の工事
	①当初工事費		
	当初工期		平成23年7月～平成23年8月
リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		地質調査の報告書作成中
	予測されたトラブル		土質区分の差による根入れの深い基礎の支持力変化
	回避した事象		ボーリングコア再見直しによる杭基礎への設計条件の訂正
	工事への影響		杭径と杭数の変化
リスク管理の実際	判断した時期		建築基礎設計の着手前
	判断した者		地質調査会社の技術者
	判断の内容		土に触れた感覚について3人以上の意見を評価するために中間土の明確な区分として着目する共通項目を作成し、適用したものである。
	判断に必要な情報		客観的な共通事項によるボーリングコア再見直しによる評価の集計
リスク対応の実際	内容	追加調査	なし
		修正設計	なし
		対策工	なし
	費用	追加調査	なし

		修正設計	なし
		対策工	なし
		②合計	-
変更工事の内容	工事変更の内容		なし
	③変更工事費		なし
	変更工期		なし
	間接的な影響項目		なし
	受益者		民間(G株式会社)への発注者
リスクマネジメントの効果	費用（①－③－②）		
	工期		変更なし
	効果内容		**ボーリングコアや標準貫入試験試料を3人の評価者で再見直し、触れた感覚について客観的な意見の評価が砂質土層と粘性土層の区分に反映され、杭基礎の支持力計算における周面摩擦力算出項に直接影響して杭の径や本数に対する経済比較ができた。**

［論文 No. 14］　断層破砕帯における押し出しリスク低減のための事例分析

川崎地質株式会社　○金沢　淳
土木研究所　倉橋　稔幸
土木研究所　佐々木靖人

１．事例分析の概要

本研究では，山岳トンネル工事における地質リスクとして，断層破砕帯における押し出しリスクをとりあげ，文献調査に基づく事例分析を実施した。現状での断層破砕帯における押し出しリスクの低減対策としては，事前調査や本坑掘削までの施工中調査によって断層の位置情報を取得し，本坑施工時において重い支保パターンの採用等が行われている。しかしながら，そのような事前対策を実施しても管理基準値を上回る坑内変位量に達することがある。そこで，断層の位置情報を事前に取得したが坑内変位量が大きくなる事例における地質学的素因の分析を実施した。また，リスクの計量化として，押し出しによる坑内変位量が著しく増大した結果，縫い返しが発生した場合の掘削コスト増加分の試算を行った。

２．事例分析のシナリオ

山岳トンネル工事中に断層破砕帯における押し出しリスクのあった事例について文献調査に基づく事例分析のシナリオを以下に示す。

(1) 断層破砕帯における内空変位量の頻度分析

山岳トンネル工事中に地山の押し出しリスクのあった事例について文献調査を行い 231 事例抽出した。このうち，地質学的素因が断層破砕帯にあった事例は 60 事例であった。ただし，押し出し量を示す指標の一つである内空変位量の測定データが示されていたのは 34 事例の 43 箇所の断層であった。そこで，これらの断層を対象に，断層の位置情報を取得した 30 箇所と断層の位置情報を取得しなかった 13 箇所について内空変位量の頻度の比較を行った。

(2) 断層破砕帯における坑内変位量と地質学的素因との関係の分析

断層の位置情報を取得した 31 箇所の断層を対象として，(a)断層破砕帯直上の土被り量，(b)断層破砕帯の区間長，(c)トンネル方向と断層の走向との交差角度と坑内変位量との関係から，(a)～(c)について坑内変位量が 150mm を超えた割合の高い範囲を明らかにした。また，これらの素因が重複する場合としない場合については集合分布図により示した。

(3) 断層破砕帯における押し出しリスクの計量化

断層破砕帯における押し出しリスクが発現した場合のコスト損失としては，より重い支保パターンでの縫い返しが必要となった場合が最大と考えられる。例えば，地芳トンネルでは，先進ボーリングにより断層の位置情報を取得し，断層直上の土被り量が大きいことから断層破砕帯を特殊支保パターンの DⅣパターンで掘削したが，押し出しによる内空変位量が増大したために，二重支保パターンの E パターンで縫い返した場合があった[1),2),3)]。このことから，リスクの計量化として，より重い支保パターン

での縫い返しが発生した場合の掘削コスト増加分の試算を行った。

ただし，今回収集した文献においては，断層破砕帯における設計時と施工時の掘削コストの比較に関する記載はなかった。そのため，より重い支保パターンでの縫い返しとして，(a)標準支保パターンの DⅡを選択したが，特殊支保パターンの DⅣでの縫い返しが発生したケース，(b)特殊支保パターンの DⅣを選択したが，二重支保パターンの E での縫い返しが発生したケースの二つのケースについて標準的な 1m 当たりの掘削単価(表１)[4),5)]の比較を行うことにした。

特殊支保パターンである DⅣパターンと二重支保パターンである E パターンの掘削単価は，以下のように近似した。DⅣパターンの掘削単価は，標準支保パターンの DⅢパターンに AGF 工法の単価を追加した。E パターンの掘削単価は，DⅢパターンの単価を 2 倍した上で AGF 工法の単価を追加した。ただし，縫い返しが発生した際には，追加掘削のコストに加えて，変形した支保の撤去に係るコストや内空断面の整形作業に係るコストが加わることになるが，単価が不明なために計上しなかった。

表１　参考とした掘削単価

	掘削単価 (円/m)	引用文献 (No.)
DⅡ (機械掘削工法：80m^2)	1,248,300	4)
坑口工 DⅢ (機械掘削工法：80m^2)	1,333,300	4)
AGF 工法	1,400,000	5)

３．収集データ分析結果

(1) 断層破砕帯における内空変位量の頻度分析結果

内空変位量が測定された 43 箇所の断層を対象とした内空変位量の頻度分布図を図１に示す。その結果，本坑掘削前に断層の位置情報を取得した 30 箇所の内空変位量はその 70%にあたる 21 箇所が 150mm 以下に分布する一方，本坑掘削前に断層の位置情報を取得しなかった 13 箇所の内空変位量は 50～600mm の範囲に分散する傾向となった。これにより，断層破砕帯における押し出しリスクは，事前および施工中における地質調査により位置情報を取得することで低減している傾向が明らかとなった。

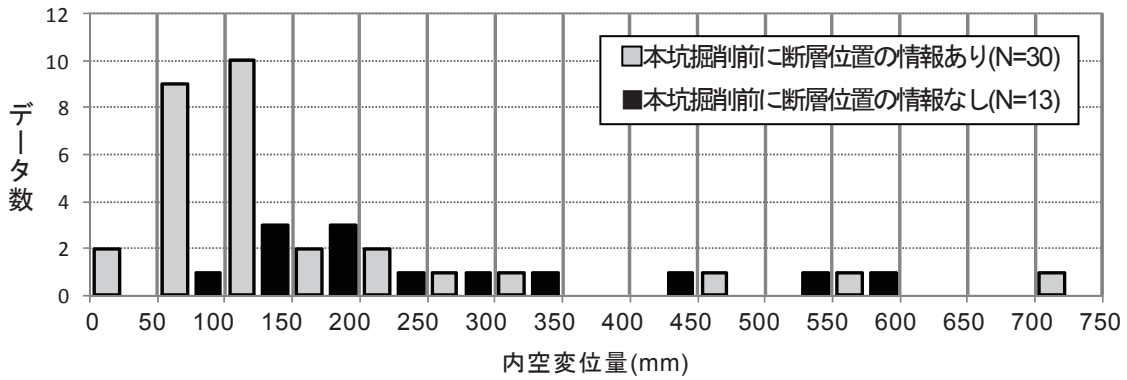


図１　断層破砕帯における内空変位量頻度分布図

(2) 断層破砕帯における坑内変位量と地質学的素因との関係の分析結果

(1)での分析では，断層の位置情報を取得した事例の 30%にあたる 9 箇所では内空変位量が 150mm を超えた結果となった。ただし，内空変位量が 150mm を超えたことは確実であるが，内空変位量の値が不明なために図 1 に含めることができなかった事例(1 箇所)や内空変位量は 150mm を下回ったが沈下量が 150mm を超えた事例(1 箇所)があった。これにより，以下の分析ではその 2 箇所を加えた内空変位量あるいは沈下量(以下，坑内変位量とする)が 150mm を超えた 11 箇所の断層破砕帯と内空変位量が 150mm 以下であった 20 箇所の断層破砕帯を対象に，(a)断層破砕帯直上の土被り量，(b)断層破砕帯の区間長の頻度を分析した(図２，図３)。

その結果，断層直上の土被り量が 200m を超えると，坑内変位量が 150mm を超えた箇所の割合が 54%となり土被り量 200m 以下の 22%に比べて約 2.5 倍高くなる傾向となった(図２)。また，断層破砕帯の区間長が 100m を超えると，坑内変位量が 150mm を超えた箇所の割合が 50%となり 150mm 以下の 28%に比べて約 2 倍高くなる傾向となった(図３)。ただし，坑内変位量の大きさの比率の変化の度合いは土被り量の場合に比べて緩やかであった(図３)。

また，断層破砕帯のトンネル切羽に出現する区間長が大きくなる要因の一つとして，トンネル方向と断層の走向との交差角度が小さいことが考えられる。そのため，トンネル方向と断層の走向との交差角度との関係を分析した(図４)。図４では，交差角度を 30 度毎に 3 つに分け，各角度の範囲内の箇所数の頻度を区間長 100m 以下と区間長が 100m を超えたものの 2 つに分けて表示した。その結果，区間長 100m を超えた箇所数の頻度は，30 度以下が 3 箇所，30～60 度が 2 箇所，60 度を超えたのが 3 箇所であった。この結果からは，トンネル方向と断層の走向との交差角度が小さいことと断層破砕帯の区間長が長いことが素因として重複することは少ないものと考えられる。

図４では，坑内変位量が 150mm を超えた箇所の割合は，交差角度 30 度以下において 57%となり，30 度を超えた箇所の 13%に比べて約 4 倍高くなる傾向となった。これにより，押し出しリスクを評価する観点では，トンネル方向と断層の走向との交差角度が小さいことは変形を受けやすい素因として含めるべきと考えられる。変形を受けやすい理

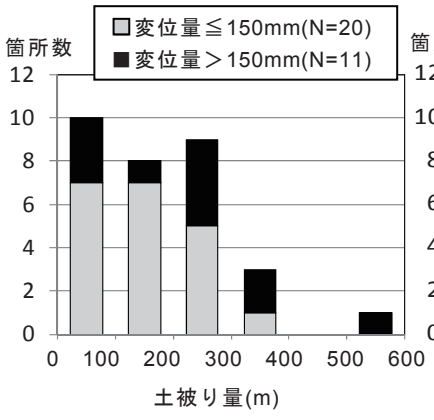


図２　土被り量の頻度分布

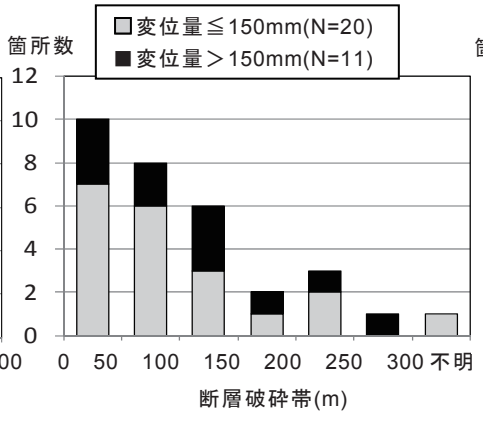


図３　断層破砕帯の区間長の頻度分布

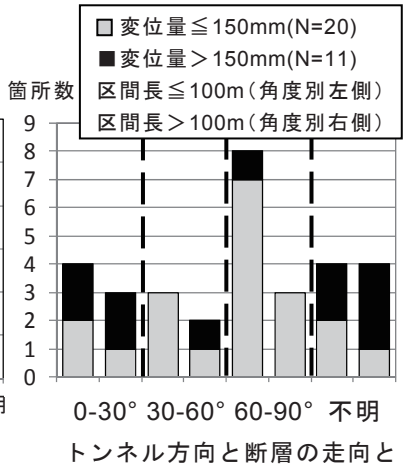


図４　トンネル方向と断層の走向との交差角度の頻度分布

由の一つとして，断層破砕帯は層状構造を有するため破砕面に直交する方向に応力解放による変形が加わることが考えられるが，今後詳細に検討する必要がある。

次に，(a)～(c)の地質学的素因が重複する場合としない場合とに分けた集合分布図を図５に示した。図５では，素因の(a)と(b)が重複する範囲のうち(c)も重複する範囲を除く 8 箇所の方が，(a)が単独である 3 箇所に比べてリスクの発現の割合が低い結果となった。その理由としては，素因の(a)と(b)が重複することにより，脆弱化した地山に土被りによる地圧が大きく作用する区間が長いことが施工時に考慮された事例が多いことが推定される。

しかしながら，そのうちの 3 箇所では坑内変位量が 150mm を超えた結果となった。これは，当初の支保構造で変位が発生した場合は，施工中の変位速度の観測結果に基づき追加対策を行う計画であったが，初期変位速度が速いために管理基準値を超えた結果となったものと考えられる (ただし，支保の破壊等を防ぐためにある程度の変位を許容する設計とした飛騨トンネル[6] を除く)。それに対し，当初は変位が発生しない支保構造とし，初期変位速度の観測結果に基づき徐々に支保を軽くすることでコスト対策を実施する工法[7]もあることから，今後は，断層破砕帯の変形特性に合わせた工法を適切に選択すべきである。

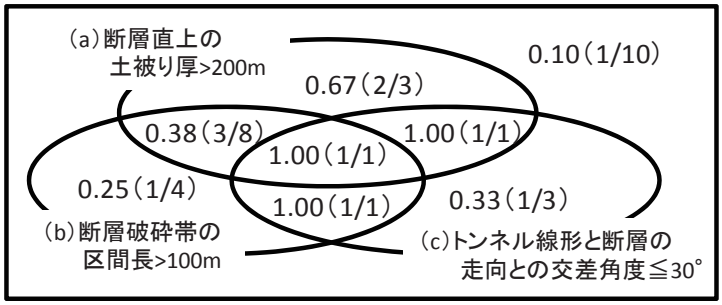


図５　地質学的素因の集合分布図

４．断層破砕帯における押し出しリスクの計量化

断層破砕帯における押し出しリスクが発現した場合のコスト損失としては，より重い支保パターンでの縫い返しが必要となった場合が最大と考えられるため，掘削前の想定コストからの増加分の試算を行った(表 2)。

(a) DⅡパターンを選択したが DⅣパターンでの縫い返しが発生したケース

・DⅡパターンでの掘削範囲が使用不可となるコスト損失	1,248,300(円/m)
・DⅣパターンによる縫い返しに係る掘削コスト	2,733,300(円/m)
計	3,981,600(円/m)

(b) DⅣパターンを選択したが E パターンでの縫い返しが発生したケース

・DⅣパターンでの掘削範囲が使用不可となるコスト損失	2,733,300(円/m)
・E パターンによる縫い返しに係る掘削コスト	4,066,600(円/m)
計	6,799,900 (円/m)

表２　縫い返しが発生した場合の掘削コスト増加分の試算

	支保パターン	掘削単価 (円/m)	縫い返し掘削単価(円/m)	計 (円/m)
(a)	DⅡ⇒DⅣ	1,248,300	2,733,300	3,981,600
(b)	DⅣ ⇒E(二重支保+AGF)	2,733,300	4,066,600	6,799,900

５．まとめ

本報告では，断層破砕帯における押し出しリスクに対する事前調査・対策の効果について公開文献に基づき分析した。その結果，本坑掘削前に断層の位置情報を得ることは押し出しリスクを低減させる効果は大きいことが判明し，事前および施工中における地質調査の重要性を明らかにした。

その一方で，断層の位置情報を得ていたにもかかわらず押し出しリスクの低減効果が小さかった事例の原因を分析した。その結果，(a)断層破砕帯直上の土被り量が 200m を超えること，(b)断層破砕帯の区間長が 100m を超えること，(c)トンネル方向と断層の走向との交差角度が 30 度以下であることなどが挙げられる。また，重い支保パターンにおいて縫い返しが発生した場合の掘削コストの増加は，1m 当たり 3,900～6,800 千円に達することが判明した。

今後，これらの素因を有する断層破砕帯における押し出しリスクを低減させるには，地質情報を重視して慎重かつ合理的な支保構造の選択を行うことが必要である。そのためには，切羽前方探査における調査項目や数量を増やすこと及び D 級岩盤の細区分を行うことや数値解析を用いた支保構造の検討を行うことが有効と考えられる。

引用文献

1) ジェオフロンテ研究会(2005):付加体地質とトンネル施工, ジェオフロンテ研究会, 236p.
2) 大喜多孝雄・宮下保之・宮脇工・北川幸夫(2003)：四国カルスト直下の付加体メランジェを貫く－一般国道 440 号 地芳トンネル－，トンネルと地下，Vol.34，No.4，pp.27-36.
3) 国土交通省四国地方整備局 中村河川国道事務所・清水・熊谷特定建設工事 共同企業体(2004)：一般国道 440 号 地芳トンネル第 2 工事 工事誌, 423p.
4) NATM 積算研究会(2009)：新・NATM の施工と積算，(財)経済調査会，687p.
5) 金田一毅・蛭田健次・吉田良勝(2009)：東北中央自動車道杉ノ平トンネル工事における補助工法，平成 21 年度国土交通省東北地方整備局管内技術発表会
6) 寺田光太郎・川北真嗣・小林伸次・松原利之(2004)：不良地山・高圧大量湧水との闘い(不良地山編)－東海北陸自動車道　飛騨トンネル－，トンネルと地下，Vol.35，No.8，pp.17-25.
7) 田島基彦・宮本健太郎(2003)：押出し性蛇紋岩における二重支保（地芳トンネル第 2 工事），第 25 回日本道路会議，講演番号 08021.

［論文 No. 15］　一級河川安永川トンネル新設工事(水源工区)における CM 方式の活用

施工技術総合研究所　○安井成豊
豊田市役所　須藤友章

1. 事例の概要

本事例は、地方公共団体の愛知県豊田市が計画発注された特殊な施工条件下のトンネル工事に対して、施工に関する技術支援を中心とした CM 方式を活用して実施した施工例である。

一級河川安永川トンネル新設工事は、既設安永川の排水能力の向上、浸水被害の解消を目的とし、都市基盤河川改修事業として延長約 2km の水路トンネルを施工するものである(図 1 参照)。本工事では、全線に渡って土被り 30m以下(10～15mが中心)の施工となること、施工対象地質が花崗岩主体の硬岩区間と土砂・軟弱層区間が混在すること、地上部に民家や病院等を有し、施工時の周辺環境への影響が懸念されることが大きな課題とされた。本事例では、本工事の中で先行して発注された吐出側約 200m のトンネル工事(図 1 中赤色部。以後、「水源工区」と呼ぶ)に対して実施した施工技術支援中心の CM 方式について報告する。

CM 方式については、その実施内容が明確に定義されていないと認識している。本事例では、発注者の方が得意とされる部分は任せ、経験がほとんどなく、得意としない部分(トンネル施工に関する部分)のみをサポートする非常駐での対応方式とした。工事請負者を含めた 3 者の関係を図 2 に示すが、全ての最終判断(決定権)は発注者が担うものとし、工事請負者から提出される資料および現場施工データを CMR が逐次入手・分析・照査するとともに、工事請負者を交えた 3 者協議等を踏まえて、3 者間の相互理解を図りつつ、発注者が最終判断を容易とするための技術的な支援を行ったものである。

図1　安永川トンネル概略位置図

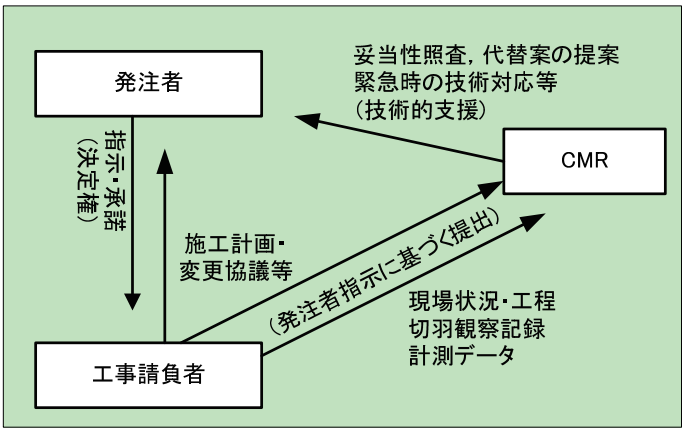


図2　CMRとの関係

2. 事例分析のシナリオ

(1)想定された地盤リスクと対応結果

水源工区は、河川吐出口側に位置する工事計画延長約 200mのトンネル区間である。トンネルは、坑口付近が盛土で構成された２m程度の土被りから始まり、次第に土被りが大きくはなっていくが、最大でも 12m程度の小土被り区間となる(図３参照)。

設計時の想定地山は、盛土・河床堆積物とマサ土が主体とされ、施工後半の下半・インバート部においてのみ硬質の花崗岩が想定されていた。そのため、設計では全線に渡ってＤⅢａ の坑口特殊区間として高剛性の支保工および覆工が解析結果に基づいて設計されるとともに、掘削方法は自由断面掘削機を用いた機械掘削を主体に設計された。

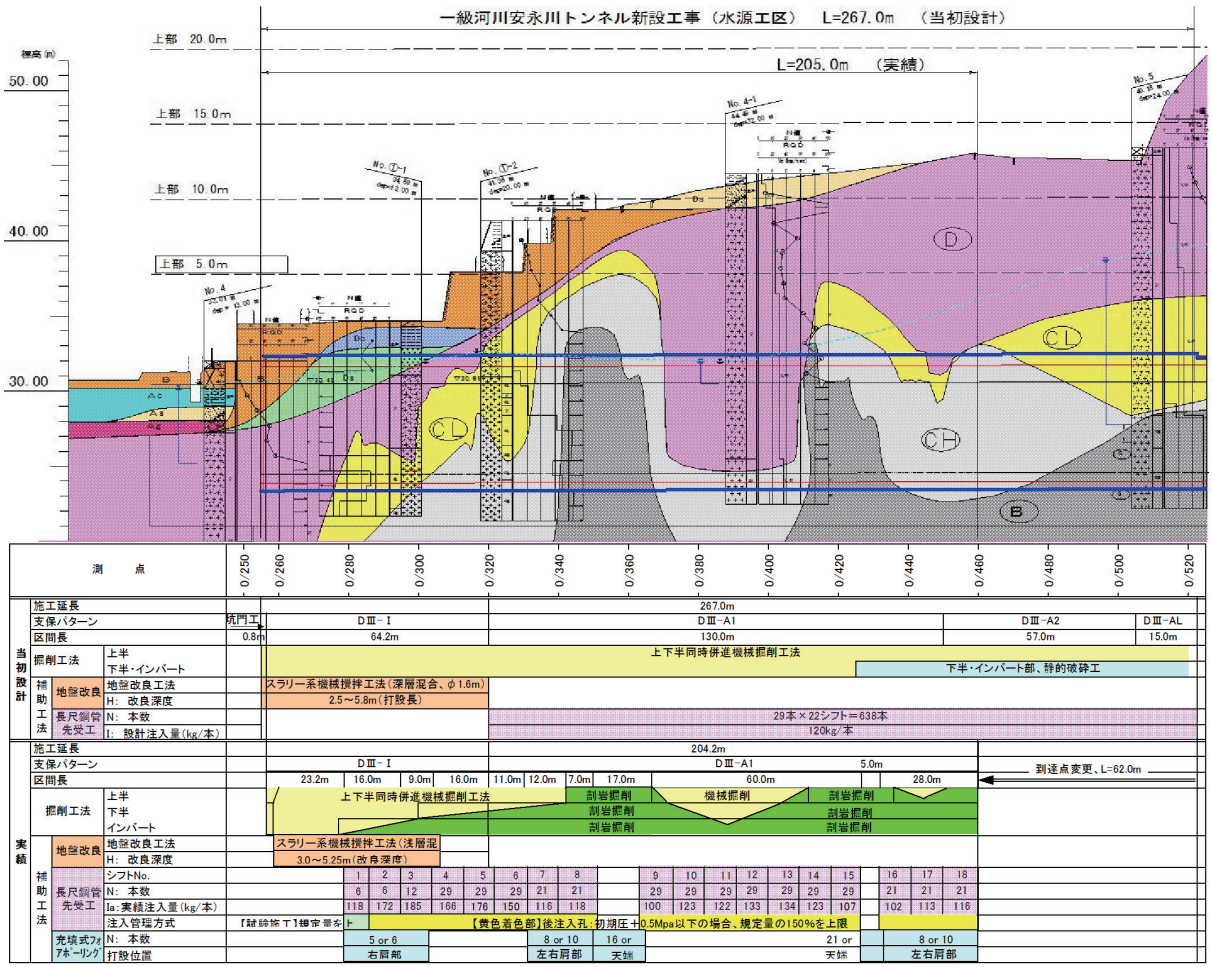


図3 最終確認された地山分布と設計時および施工時の施工内容

また、トンネル坑口付近の土被り 7m 以下の区間は用地買収がなされているが、それ以外の区間は市道直下となり､その両脇に民家等の建物を有する施工条件である｡そのため、トンネル直上の道路や周辺家屋の沈下影響をできる限り抑制することが要求され、坑口付近の小土被り区間については、トンネル掘削前に地上から地盤改良を行い、それ以奥については補助工法として長尺鋼管先受け工が全線計画されていた。

当該区間は施工延長が比較的短く、当初想定した通りにマサ土中心の地山であれば、設計通りの施工にて大きな問題は生じないトンネルとなる。しかし、豊田市周辺にて施工さ

れたマサ土想定のトンネルにおいて、風化残留核の存在やボーリングコアにて確認される状態と切羽にて確認される地山との乖離が報告される事例もあったこと、当該区域が古くから宅地化が進んだ地域であり、地形改変がなされた区域である。そのため、施工後半に下半以下に出現すると想定した硬岩がどのような分布状況となるのかが不明であった。

したがって、施工開始前に想定した地盤リスク(不確定要素)として、以下の点が挙げられた。

①土砂(マサ土)と硬岩の分布状況の違いに伴う工費・工期への影響

②トンネル直上の道路(地下埋設物)および周辺家屋等への影響(沈下)

③トンネル施工時の周辺環境への影響(騒音・振動)

そのため、CM 業務全般において、トンネル施工中に確認される地山状況と各種計測データ(坑内及び坑外計測)を確認しながら、工期・工費・周辺影響を考慮して最適な施工方法とすべく、迅速に合意形成するための発注者技術支援を実施し、適宜施工方法や各種仕様を変更して施工を行った次第である。

最終的に、追加地質調査や坑内切羽観察記録等を通じて確認された地質縦断図と設計時と実績にて適用した補助工法仕様を含む施工法等を図３に示す。当初設計と異なり、硬岩分布領域が拡がり、一部区間では当初はマサ土と想定した箇所で硬岩が全面に出現する結果となり、掘削方法の大幅な変更(割岩工法の適用)と補助工法の見直しを適宜実施した。

以下に、多くの変更を行ってきた中の代表的な例として、施工前半の地山脆弱区間と後半の硬岩混在区間について変更判断してきた内容を紹介する。

(2)地山脆弱区間

坑口から延長約 65mの区間については、地山が盛土と河床堆積物にて構成されていること、土被りが３m以下であることから、当初設計において地盤改良が計画されていた。改良範囲は、N 値 30 以下となるマサ土以浅とされ、N 値 30 までの施工が対象とされたことと、改良深度が最大７m近くなることから、設計では大型施工機械を用いた深層混合処理工法が計画されていた。

①施工時の課題

地上部に残る移設家屋等の基礎撤去時に、基礎杭が確認されたこと、盛土内にコンクリート塊等が多く確認された。残存杭は撤去する方針としたが、盛土内の残骸物の存在やマサ土内の風化残留核が地盤改良時の課題とされた。さらに、施工対象周辺が住居地域であり、大型施工機械を用いた施工が周辺住民から承諾されにくいと判断された。

②対応内容と結果

施工法の見直し検討に先立ち、N 値 30 以下となる地層深度を詳細に把握する目的でオートマチック・ラム・サウンディング試験を既設ボーリング箇所と一部ラップさせながら複数箇所に計画実施し、改良対象の把握を行った。その結果を受けて、中層および浅層混合処理工法の施工機械を比較検討し、マサ土中に存在する風化残留核と盛土内に埋められたコンクリート塊等の存在リスク(施工の確実性に影響)、経済性、周辺環境への影響(小型の施工機械の適用)等を考慮して、「バックホウを用いた浅層混合処理工法による施工」に変更実施した。なお、浅層混合処理工法の適用可能深度は３mであるが、一次的に施工盤を下げて改良を実施し、その上に改良土を盛土する、あるいは、盛土後に改良することで

最大５ｍまでの改良に対応可能(図４参照)とし、改良対象深度がそれ以上となる箇所については、トンネル坑内からの対策を別途検討する方針とした。

実施工において、盛土内にコンクリート塊のみでなく、鉄筋屑等も多数確認され、改良しながら適宜撤去可能となったこと、0.45m³ 級のバックホウを用いた施工であり、周辺住民に対して転倒等の恐怖感を与えることなく、施工を完了することが可能となった。

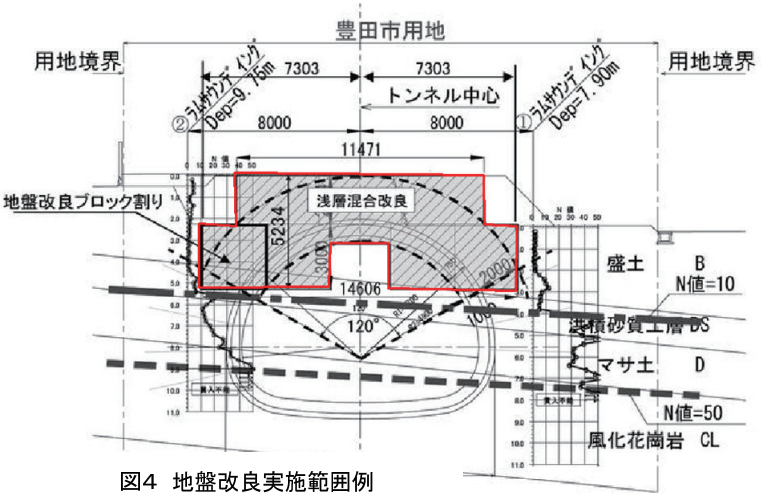


図4 地盤改良実施範囲例

ただし、図５に示すように、**地上の条件と地盤改良の対応可能深度との関係で改良範囲が限定された区間が施工後半部において存在**した。その区間に対しては、**トンネル掘削時に確認された切羽地山の性状(自立安定性)、地表面沈下計測データ、地下埋設物件の管理値を考慮して、坑内からの対策工となる「長尺鋼管先受け工」,「注入式 FP」,「充填式 FP」を配置する方針**とした。なお、地盤改良箇所下に残る未改良部に対しては、トンネル掘削影響範囲内に民家が存在することから高い改良効果と高剛性が期待される「長尺鋼管先受け工」の適用が工事請負者から提案された。しかし、地上から３ｍ以上にて地盤改良による版が構築されていること、未改良部の地山が細粒分を含み多少の自立性が期待できるものであったことから、トンネルの坑口区間対策工で適用され、最も経済的となる「充填式 FP」を採用し、掘削時における未改良部性状および計測データによって追加対策工を用意する方針とした。

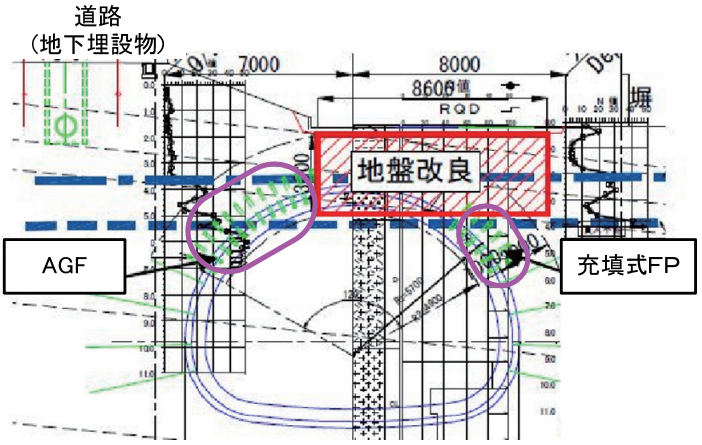


図5 変則的な地盤改良実施例

最終的には、一部箇所にて未改良部の抜け落ちが生じたが、改良部にて留まり、地表面計測データも大きな変化が確認されないため、追加対策なしで施工を完了した(地表面沈下量は最大 25 ㎜程度)。

(3)硬岩混在区間

設計では、上半切羽は全て土砂化したマサ土を想定し、土被りも 10m 程度しかない供用中の市道下であること、トンネル掘削影響範囲内に鉄筋コンクリート建ての宿泊施設とその擁壁が存在することから､｢長尺鋼管先受け工｣が地盤改良以降の全線で計画されていた。

①施工時の課題

前掲図３に示すように 0/345 付近にてＢ級地山となる花崗岩が切羽前面に出現し、その

前から部分的に硬岩が混在してきたことから、割岩工法を用いた施工法に変更してきた。施工後半においても、当初設計では最後の方で下半・インバート部で硬岩施工を想定していたが、実施工時には、中硬岩の地山と弱風化岩が切羽の上下左右にて混在する地質状況となった。

さらに、数本のボーリング調査とサウンディング調査を実施し、N 値 30 以下となる地層深さと範囲を確認した結果、**硬岩線が起伏に富むことと、N 値 20 以下の盛土および土砂部がトンネル天端数 m 付近に存在する可能性があることが把握**された(図 6 参照)。安全側の施工とした場合には、当初設計通りに天端補強工を実施するのが妥当となるが、割岩工法の採用により、工費・工期への影響が大きくなったことから、安全性を確保しつつ、経済性を求めることが必要とされた。

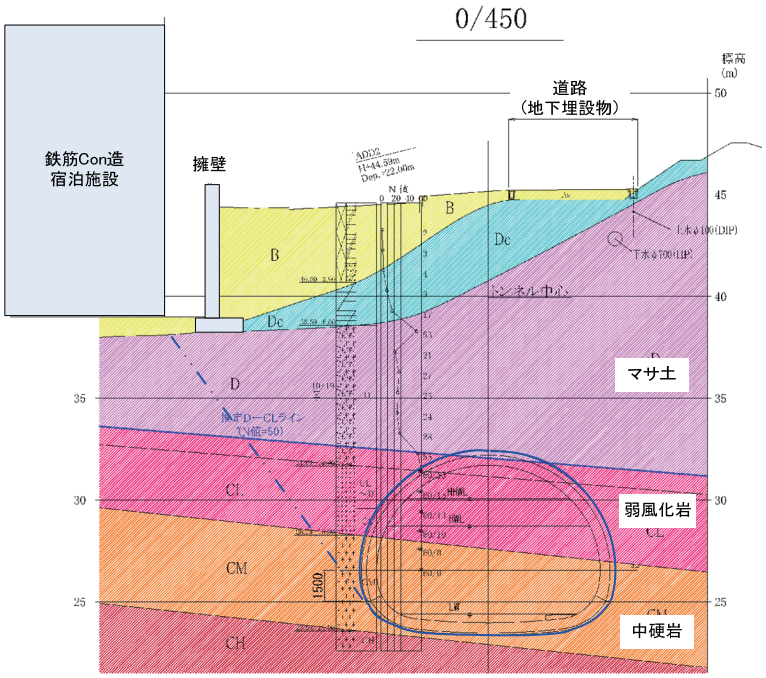


図6 硬岩混在区間の横断面図例

②対応内容と結果

施工時に、天端両肩部にて斜め上前方に向けて探り削孔を実施し、削孔時の削孔速度等から前方天端部の地山性状を確認することを実施した。そして、**前方天端上の地山が良好と判断した場合には、設計の「長尺鋼管先受け工(打設範囲 120 度)」から「充填式 FP(打設範囲 120 度)」に変更するものとし、土砂化した部分があると判断した場合には「長尺鋼管先受け工(打設範囲 90 度)＋充填式 FP」を採用する方針**とした。

最終的には、図 7 に示すように当該箇所(施工後半部)の地表面沈下量は最大 10 ㎜以内であり、地下埋設物および周辺建物等への影響を生じることなく、安全性と経済性

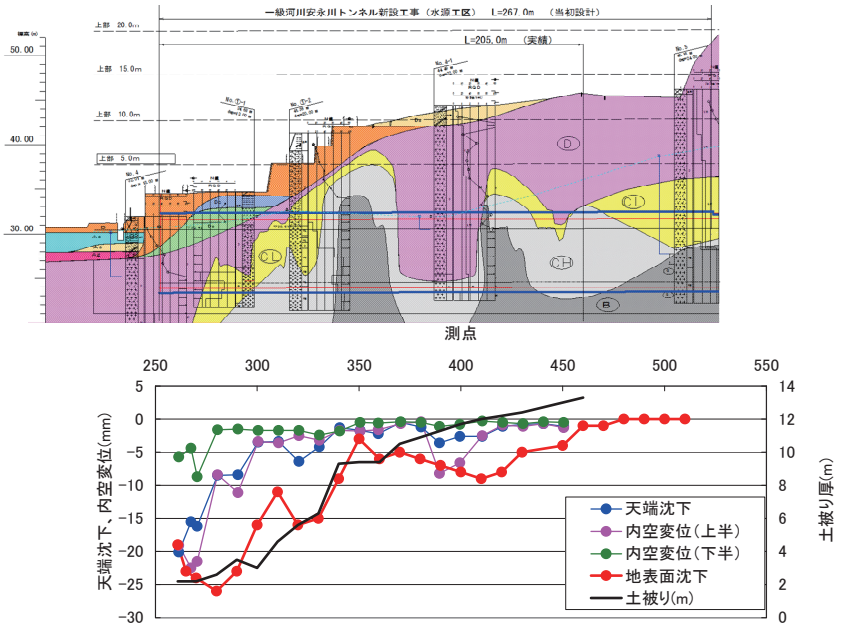


図7 水源工区における地表面沈下・坑内変位

を求めた施工を完了した。

4. マネジメントの効果(リスクの計量化)

今回実施したトンネル施工に対する技術的な支援に絞った CM を通じて、実施してきた内容と効果の抜粋を表１に示す。一部の内容については、コスト低減効果について発注者の方から数値を示していただけたものもあるが、効果として挙げられる「品質向上」や「工程管理」等に対するコストへの計量化は難しい状況にある。

表1　今回の CM 業務によって実施した主な内容と効果

	項　目	コメント	効　果
トンネル施工前	施工計画書の照査	施工業者から提出された計画書を専門家の目から不備な点の細かい指摘により、施工開始前に修正を実施。	・品質確保，向上
	地盤改良工の変更検討	地盤改良工の仕様を、現地に即して、深層混合処理工法から浅層混合処理工法への変更と詳細な仕様に対する技術的アドバイスによって、より経済的かつ確実な施工を可能とした。	・コスト縮減：△1200万円 ・品質確保・向上
	トンネル坑口部施工方法に関する照査	施工業者から提案された坑口補強の簡素化に対して、長期安定性の点からの問題点の指摘により、必要な施工の見直しを実施した。	・品質確保，向上
	計測計画に関する照査	施工業者から提案された多数の計測項目に対して、不要な計測項目と計測箇所の指摘により、必要かつ十分な計測項目の選定を可能とした。	・コスト縮減：△400万円 ・管理基準の妥当性
トンネル施工時	天端補強工(長尺鋼管先受け工)における注入量設定	地山状況に応じた注入量の設定に対する技術的アドバイスにより、施工業者から提案される注入量増大の防止となった。	・品質確保，向上 ・コスト縮減：△200万円
	地盤改良工施工区間における天端補強工の仕様設定	施工業者から提案された二重の補強工に対して、施工状況に応じた追加対策仕様の提案により、最終的には簡易な対策工のみで施工可能となった。	・品質確保，向上 ・コスト縮減：△50万円
	地山状況変化(硬岩出現)時における天端補強工の仕様設定	硬岩出現による掘削費用増に対して、天端補強工の簡素化の提案により、最終的に工費の高い天端補強工無しで施工が可能となった。	・品質確保，向上 ・コスト縮減：△800万円
	硬岩に対する施工方法検討	予想よりも早く出現した硬岩に対する施工法について施工業者を交えた協議により、早期に施工法の見直しを実施できた。	・工程遅延に対する対応

本工事の場合、施工途中から、掘削方法が割岩工法という高コストで施工速度が大きく低下する施工法に変更しなければならなくなったため、補助工法等多くのコスト縮減対応を実施しても最終的には工費・工期は増大する結果となった。ただし、同じ地山条件であっても、周辺に民家がなく、発破が適用可能となる施工条件であれば、小土被りであっても制御発破を含めた異なる対応が可能となり、工費・工期も大きく変わったものと考える。

本工事のように、周辺住民に対する影響(騒音，振動等)について十分配慮しなければならない工事においては､その対応によって工事が円滑に進むか否かを左右する場合があり、リスクマネジメントにおいても、技術的な判断だけではなく、行政的な判断が重視される場面が多くなる。本事例の CM 方式では、発注者に対する技術アドバイザーとして想定される地盤リスクとそれに対する対応案等について技術的な内容の明確化を図り、その内容を踏まえた上で発注者において行政的な判断も考慮して最終決定を行ってきたものであり、両者が有効に機能した事例の一つであると考えている。

［論文 No. 16］

法と社会システムから見た地盤リスク

（株）環境地質　○稲垣秀輝
（独）労働安全衛生総合研究所　伊藤和也

１．はじめに

地質調査は，技術の分野だけなく社会システムの中で実施される．技術者の我々は，えてしてそのことをわすれがちである．その意味で，地盤リスクや地盤リスクマネージメントは法や社会・経済システムの視点からの検討も必要である．本論では，社会・経済システムの中で特に重要な役割を果たしている法体系や訴訟事例，保険制度，補償制度などを取り上げて地盤技術者の視点からいろいろな資料を集め解説を加える．

特に，裁判から見た地盤リスクの傾向を調べ，その後，代表的な個別の裁判例を説明する．さらに，地質リスクや地盤リスクは，建築瑕疵とは別個独立の高度の専門的知見が必要であり，この分野に関して裁判所と保障機関に地質や地盤技術者の専門家が支援する必要性についても述べる．

２．地盤リスクと法制度

法を法制度と裁判に分けて考えると法に不案内な地盤技術者にも理解しやすい．法制度は大きな地盤災害・事故をきっかけに制定されたものが多い．つまり，法制度の存在によって今後発生するであろう地盤リスクを軽減するという予防の考え方ができる．その反面，裁判は実際に地盤事故が発生したときの法的な解決手段であり，個別案件ごとに多様な法制度がかかわってくる．したがって，地盤リスクに係わる裁判事例は地盤技術者にとって大変参考になるし，地盤リスクをあぶりだすよい方法でもある．

表１　法律の背景

立法の契機		立法の推移	
		1950	建築基準法（中規模の地震対応）
1957	集中豪雨による地すべり災害	1958	地すべり等防止法
1961	集中豪雨で宅地造成地の崖崩れ災害	1961	宅地造成等規制法
	乱開発・スプロール化	1968	都市計画法（開発許可制）
1967	集中豪雨で自然斜面の崖崩れ災害	1969	急傾斜地法
	ゴルフ場開発などで森林の乱開発	1969	森林法改正（林地開発許可制）
	海浜等の埋立による環境破壊	1969	公有水面埋立法改正（環境保全・災害防止条項）
1968	イタイイタイ病の原因をカドミウムであると厚生省認め，カドミウム米を巡る社会不安	1970	農用地土壌汚染法
1978	宮城県沖地震	1981	建築基準法改正（最大規模の地震対応）・新耐震設計法施行
1975	六価クロム汚染	2002	土壌汚染対策法
1997	東芝工場地下水汚染		
1998	USJ 土壌汚染		
2004	新潟県中越地震	2006	宅地造成等規制法・都市計画法の改正（造成宅地の規制強化）
2005	福岡県西方沖地震では造成宅地に地盤災害		
2005	構造計算書偽装問題の発覚	2006	建築基準法改正（構造計算適合性判定制度の導入等）
		2007	住宅瑕疵担保履行法

地盤リスクは，地盤の変容が経済的社会的に重大な影響を受けるおそれがあるもので，地すべり，斜面崩壊，地盤沈下といった地盤の物理的な変容と土壌汚染などの２つの類型を区分することができる．地盤災害の頻発に伴い地盤リスクに対処する必要性は，ますます高まる一方，財産権の制限に関わることから，当該規制は法令で定める必要がある．法制度としては，①もっぱら地盤リスク対応する法制度と，②さまざまな利用便益の提供等を目的とする法制度の中に地盤リスク対応の制度

が組み込まれたもの，③両者の中間的な制度に大きく分けられる．そして，これらの法は，重大な災害発生を契機に成立ないし改正されており，災害の類型に応じた法制度といえよう（表 1 参照）．たとえば，地すべり等防止法は，昭和 32 年に集中豪雨で熊本県，長崎県，新潟県等で相次いで発生した地すべり災害を契機として翌 33 年策定された．宅地造成等規制法は，昭和 36 年に集中豪雨で神奈川県，兵庫県等の宅地造成地において相次いで発生した「がけ崩れ」災害を契機として同年策定された．最近では，平成 16 年の新潟県中越地震，平成 17 年の福岡県西方沖地震などにおいて，造成宅地を中心に多くの地盤災害が生じ，大規模地震による造成された宅地等の安全性の確保を図るため，平成 18 年に宅地造成等規制法が一部改正された．また，今回発生した東北地方太平洋沖地震を契機に新しい法制度が成立する可能性がある．

地盤リスクに対応する法制度の代表的なものを表 2 に示した．一般に，これらの法制度は，地盤リスクの危険のある地域について，個別に地域指定をして，一定の行為を禁止等制限するものである．これらの制限行為をするには，管理者の許可等を必要として，その審査の中で地盤リスクの回避・軽減が図られている．この許可基準ないしは工事の技術基準については，法律では抽象的に定められているものの，近時は政令で数値を含んだ詳細な規定が置かれている．ただ，地盤リスクの審査基準は，高度な専門技術性や，あるいは地域的な個別性があったりすること，技術の進歩や経験則の進展などがあるため，詳細に法令に規定することができないことから，地盤技術者に馴染みの多い技術指針や個別的な解決にゆだねられることも少なくない．ここで，地盤技術者の技術力と法制度の理解力が問われ，最終的には地盤リスクマネージメントのあり方が問われることになる．

表 2　地盤リスクに関連する法令と構造

法令（制定年）	類型	目的	地域指定	許可等と制限行為	許可等基準	技術基準
砂防法(1897)	①災害形態	〈規定無し〉	砂防指定地(2 条)	知事が指定する行為（4 条）	〈規定無し〉	〈規定無し〉
地すべり等防止法(1958)		地すべり等の防止(1 条)	地すべり防止区域(3 条)	地下水排除阻害等の行為(18 条)	〈規定無し〉	地すべり防止施設(12 条)
宅地造成等規制法(1961)		宅地造成災害の防止(1 条)	宅地造成工事規制区域(3 条)	宅地造成工事（8 条）	〈規定無し〉	工事の技術基準(9 条、令 4～15 条)
急傾斜地災害防止法(1969)		急傾斜地の崩壊防止(1 条)	急傾斜地崩壊危険区域(3 条)	地下水浸透助長等の行為（7 条）	〈規定無し〉	防止工事の施工基準（令 3 条）
土砂災害防止法(2000)		土砂災害の防止(1 条)	土砂災害特別警戒区域(6 条)	特定開発行為（9 条）	〈規定有り〉(11 条)	対策工事等の計画の技術的基準(令 7 条)
公有水面埋立法(1921)	②土地利用	〈規定無し〉	〈規定無し〉	知事免許＜公有水面の埋立（2 条）	〈規定有り〉(4 条，則 5，6 条)	〈規定無し〉
森林法(1951)		森林の保続培養と森林生産力の増進(1 条)	地域森林計画対象地(5 条)	開発行為（10 条の 2）	〈規定有り〉(10 条の 2 第 2 項，34 条 3～5 項)	〈規定無し〉
都市計画法(1968)		都市の健全な発展等(1 条)	都市計画区域(5 条)	開発行為（29 条）	〈規定有り〉（33 条，34 条、令 28 条）	〈規定無し〉
海岸法(1956)	③治水	津波，地盤変動等からの海岸防護(1 条)	海岸保全区域(3 条)	土砂採取等(8 条)	〈規定無し〉	海岸保全施設の技術上の基準(14 条)
河川法(1964)		洪水，高潮等による災害発生の防止(1 条)	河川区域(6 条)	工作物の新築等（24 条～29 条）	〈規定無し〉	河川管理施設等の構造基準（13 条）
建築基準法(1950)	④施設	建築物の敷地・構造の最低基準(1 条)	〈規定無し〉	建築確認＜建築物の建築等（6 条）	〈規定有り〉	敷地の安全(19 条)、建築物の構造耐性(20 条)、条例(40 条)
廃棄物処分法(1970)		廃棄物の排出抑制等と生活環境保全等(1 条)	〈規定無し〉	一廃処理施設等(8 条)・産廃処理施設(15 条）の設置	一廃（8 条の 2)、産廃（15 条の 2)	一廃(厚生省令・4 条 1 号)、産廃（同 12 条 1 号、12 条の 2)、共同命令 1、2 条
環境評価法(1997)	その他	事業に係わる環境保全の適正な配慮等(1 条)	〈規定無し〉	環境影響評価＜対象事業＋都市計画事業等	〈規定無し〉	環境影響評価技術指針（地盤沈下、地形・地質等）
土壌汚染対策法(2002)		土壌汚染対策の実施(1 条)	形質変更時要届出区域(11 条)等	〈規定無し〉	運搬基準(17 条)	〈規定無し〉

３．地盤リスクと保険制度と補償制度

リスクをマネージメントする方法として，①リスク事象の生起確率そのものを減少させる技術（リスクコントロール），②リスク事象により生じた被害を社会全体に分散させる技術（リスクファイナンス）がある．今回の東北地方太平洋沖地震においても多くの保険・補償制度が機能したように，リスクを分散させる代表的な手法の一つとして保険・補償制度がある．

（１）保険制度

保険は第一義的には債務不履行や過失・過誤による法律上の賠償責任を補填するものであるが，一方では，成果品の品質・技術力向上へのインセンティブともなる．

賠償責任が発生するのは民法上，不法行為と債務不履行である．契約に基づき，企業活動としての地盤調査や構造物の設計業務の遂行上，法律上の賠償責任が発生することがある．大別すると第三者に対する賠償責任と，契約者間の賠償責任（債務不履行責任，瑕疵担保責任，不法行為責任）とがある．地盤調査を含む建設関連業務の契約書類作成時には，通常，公共土木設計業務等標準契約約款が参考とされる．設計業務委託契約書の中には「瑕疵担保条項」を設け，成果物に瑕疵がある時は，設計を請負った建設コンサルタントに修補請求，損害賠償請求ができることが規定されている．

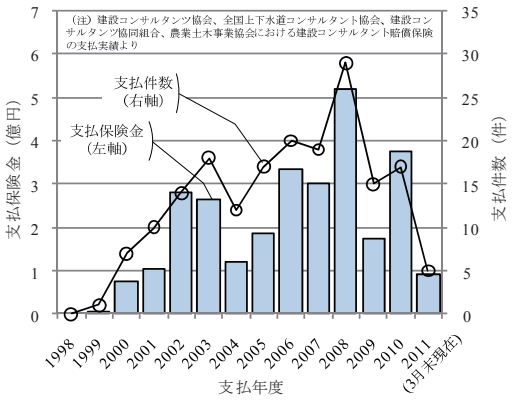


図１　最近の保険金支払い額

1998 年から 2011 年 3 月末までの建設コンサルタント賠償保険の保険金支払い状況を示したのが図１である．保険金支払いは増減を繰り返して推移しているが平均 3 億円程度の支払いであることが理解される．

（２）補償制度

建設工事の施工に起因して周辺地盤に隆起・沈下・側方移動などの変状が生じ，建物の損傷などの損害が発生する場合がある．これら建設工事による第三者損害の補償についての特別な法制度は無いため，通常の民法に基づく不法行為による損害賠償として扱われることとなり，民間工事においては，被害者が損害の発生や因果関係を立証する必要があり，被害者が補償を受けるには困難な問題が多くある．

このため，公共工事においてはこれらを“事業損失”と呼び，損害を填補するための費用負担の制度を設けている．事業損失の法的根拠については，土地収用法に基づく損失補償基準では，これら事業損失を損失補償として認めていないが，実務上の対処が必要なため，一種の行政措置として費用負担しているものである．事業損失には地盤変動以外にも，電波障害や日照阻害，水枯渇，水汚濁などがあり，事業損失の地盤リスクに関係するものには，地盤変動・水枯渇・工事振動があり，建物被害などの物的被害が生じる地盤変動と工

事振動が多く，全体の 6 割を超える．全国におけるこれら建設工事よる地盤変動等に関わる損害額や補償金額の規模については統計がないので不明であり，実態が把握されていないのが実状である．

４．裁判例からみた地盤リスク

裁判の手続き上の分類であるが，表３のとおり，民事訴訟と行政訴訟があり，裁判を行う時期によりさらに細分類できる．すなわち問題が生じる前に起こす差し止め請求や執行停止請求などと，問題発生後に起こす原状回復請求や損害賠償請求などが存在する．

地盤工学的判断が判決に与える影響を把握するために，近年の地盤リスクに関連した裁判例の収集を行った．裁判例収集には，判例タイムズ DVD を使用し，抽出された裁判例数は 90 件である．

表３　民事・行政訴訟の種類

時期／手続き	問題発生前	問題発生後
民事訴訟	・差し止め ・予防　等	・原状回復 ・損害賠償　等
行政訴訟	・差し止め ・執行停止　等	・処分取り消し ・損害賠償　等

（１）事件区分

図 2 は，地盤リスクに関連する事件区分の割合示したものである．区分としては民事事件が 65%（59 件）を占めており，内訳として通常訴訟事件，控訴事件の割合が高い．最高・高等・地方裁判所での平成 21 年度の一般的な裁判での事件区分と比較すると，全体では 1%に満たない行政事件が地盤リスクに関係する事例では 28%と多いことが分かる．また，民事事件では全体の控訴事件が 1.7%で，地盤リスク事例の 16%は高い値である．

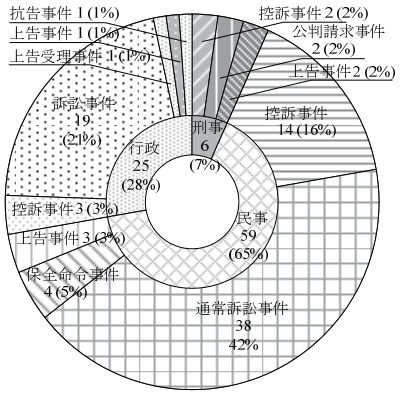


図 2　訴訟事件区分

（２）審理期間

地盤リスクに関連した裁判の平均審理期間は第一審で 78.7 月であり民事第一審訴訟の 8.1 月の約 10 倍と顕著に長い．また，高度な専門的知見を要する民事訴訟事件（医事関係訴訟，建築関係訴訟等）と比べても約 3 倍の審理期間を要している．裁判に要する日数や費用を鑑みれば，長期化しやすい地盤リスク関連の訴訟は，むしろ，工学的判断を重視して和解や訴えの取り下げなどの解決方法を取り入れることが，原告・被告両者にとって利益になることもある．

（３）原告・被告

地盤リスクに関連した裁判では，原告は市民（集団）・市民（個人）が合わせて 89%とそのほとんどを占めている．これは，地盤に関係するリスクが市民に直結していることを示している．一方，被告は，その半分以上を行政機関（国，地方自治体）が占めた．また，開発業者のような民間会社も 3 割程度ある．これらのことから，地盤リスクに関連する裁判例では，市民が近隣地域の土地開発に関して行政機関や開発業者を訴えるようなケースが多い．

（4）認容率（原告側の勝訴率）

判決総数に対して，訴えが一部でも認められた件数の割合を法律用語で「認容率」と言う．地盤リスクに関連した裁判例での認容率は 39%であった．ここで，地裁民事第一審訴訟の認容率は，平成 17～21 年で 83.7%であり，地盤リスクに関連した裁判例の認容率が通常の訴訟の半分程度の認容率しか無い．これは，医事関係訴訟事件の認容率が平成 17～21 年で 32.5%であり，共に極めて専門性の高い科学的判断が必要とされるためであろう．

（5）リスクの種類

リスクの種類を重複抽出した結果は，隣地の崖が崩れる等の生活安全リスクが最も多く 45 件である．次いで地盤リスク（39 件），環境リスク（34 件），事業リスク（34 件）の順となっている．生活安全リスクが裁判になりやすいことを示す．

（6）裁判の対象となる施設等

裁判の対象となった施設等の傾向について，最も多かったのが宅地（21 件）であり，次いで河川・渓流・水路（17 件），公共施設（11 件）の順となる．

5．裁判例にみる地盤リスクの判断

裁判例の中で明らかになった地盤リスクの傾向を踏まえて，ここでは，生活安全リスクの 1 つである斜面崩壊に的を縛って説明する．斜面崩壊に関する裁判では，様々な争点について審理がされるが，①原告適格性（原告側に訴える権利があるのか），②崩壊斜面が誰の所有でその管理者は誰か，③崩壊の原因が予測可能であったか（異常な豪雨，強い地震など予測が出来ない自然現象の場合，斜面管理者などの責任は問われないことが多い），④地盤崩壊の原因（地質・地下水・崩壊メカニズムなど），⑤地盤工学的対応策の適正（調査・設計・施工・維持管理の仕方）などを争点とする場合が多い．

(1)　市街地での斜面崩壊事例

土砂災害が多い呉の市街地で，古い石積み擁壁が豪雨時に崩壊し，崖下の住民が崖上の住民を損害賠償で訴えた（図 3）．訴状内容は，家屋半壊の賠償金＋慰謝料と土砂の撤去，コンクリート擁壁の新設などである．ここで，被告側の地盤技術者による意見書を参考にして，裁判所は賠償金の大幅に減額で決着した．その要点は，事件は同時に多数の崩壊が起こった豪雨で発生したもので，過去の事例からも自然災害につながる豪雨であり，斜面崩壊は予見不可能と判断された．しかも，集水地形・公共排水溝からの雨水の集中が斜面崩壊の原因であり，擁壁等の工作物に瑕疵はなく，被告に責任がないということである．

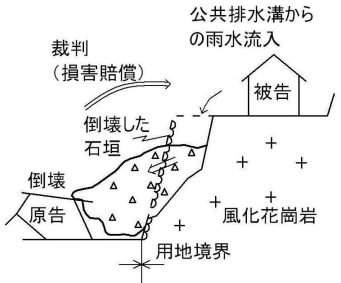


図 3　市街地での斜面崩壊訴訟

(2)　和解や訴えの取り下げの裁判例

民事訴訟では，判決以外に和解や取り下げによって終局（裁判が終了）する場合もある．民事第一審訴訟では判決で終局したものは約半数で，残りは和解や取り下げによって終局

している．

横須賀市で発生した崖の崩壊裁判例では，崖所有者が周辺の住民に損害賠償を訴えられた．しかし，被告側の地盤技術者の意見書により崖の崩壊が，単なる斜面崩壊でなく崖周辺の原告の土地を含む広域な地すべりによることが明らかになり，地すべりの原因が被告・原告ともにあることがわかった．そこで，両者の間で和解が成立し，両者が費用を分担しあうことで決着した．

また，千葉の段丘崖からの土砂流出をめぐる裁判例では，崖下の原告住民が崖上の被告土地所有者に土砂流出防止の対策と土砂除去の損害賠償を訴えた．ここでも，被告側の地盤技術者が崖からの土砂流出は崖からの湧水が原因で，崖所有者の原告自身に土砂流出の責務があるとした意見書が裁判所に提出された時点で地盤工学上不利を感じた原告が訴えを取り下げた．

このように，民事訴訟では判決に至る前に関係者間で和解や調停が行われたり，地盤工学上不利を感じた原告が訴えを取り下げることがある．斜面崩壊による裁判に地盤技術者の判断がいかに重要かを示す一例であろう．

６．おわりに

わが国の法と社会システムから見た地盤リスクについてまとめた．地盤工学分野の中で，まだまだ，法や裁判などの社会システムに関する本格的な取り組みが遅れているように思う． 地盤リスクにかかわる裁判では地盤という一般市民にとって不慣れなものを対象とするため，審理期間が長期化し，認容率が低下する傾向を示した．また，地盤リスクといってもその取り扱う分野は地盤災害・地盤事故・地盤環境などと多岐に渡り，地盤技術者の意見や鑑定が必要となることが多く，地盤技術者の活躍の場がある．我々，地盤技術者が建設事業の中の地盤リスクについて適確に対処するのみならず，狭い専門分野にとどまることなく，広く市民に向かって貢献していくことも求められている．

最後に、本論文を作成するに当たって、（社）地盤工学会関東支部：地盤工学におけるリスクマネジメントに関する研究委員会の資料を使わせていただいた。特に、保険・補償の項目については、同委員会の兒島剛士委員の資料を利用した。ここに記して感謝します。

参考文献

1）日下部治・兒島剛士・伊奈潔・薦田哲・大久保拓郎・稲垣秀輝：講座　地盤工学におけるリスクマネジメント　5.地盤リスクマネージメントと社会・経済システム，地盤工学会誌，（印刷中）

2）稲垣秀輝・薦田哲・伊藤和也・大久保拓郎・小嶋茂人・伊奈潔：講座　地盤工学におけるリスクマネジメント　6.裁判例から見た地盤リスク，地盤工学会誌，（印刷中）

3）稲垣秀輝：裁判例から見た土砂災害，平成 23 年度日本地すべり学会第 50 回研究発表会論文集（印刷中）

4）社団法人建設コンサルタンツ協会：平成 18 年度建設コンサルタンツ協会　年次報告，p 64，2007.

C. 発現した地質リスクを最小限に回避した事例（市街地の裁判事例の場合）

大項目		小項目		データ
対象工事		発注者		保険会社
		工事名		市街地地盤事故意見書
		工種		地盤調査
		工事概要		地盤調査・意見書作成
		①当初工事費		150 万
		当初工期		3 ヶ月
発現したリスク	リスク発現事象	リスク発現時期		1993.7
		トラブルの内容		崖崩れ
		トラブルの原因		豪雨
		工事への影響		家の倒壊
	追加工事の内容	追加調査の内容		ボーリング調査
		修正設計内容		特になし
		対策工事		特になし
		追加工事		特になし
		追加費用	追加調査	ボーリング調査
			修正設計	特になし
			対策工	特になし
			追加工事	特になし
			②合計	150 万
		延長工期		1 ヶ月
		間接的な影響項目		特になし
		負担者		保険会社
最小限に回避したリスク	リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		裁判敗訴
		予測されたトラブル		保険金の支払い
		回避した事象		保険金の減額
		工事への影響		特になし
	リスク管理の実際	判断した時期		裁判中
		判断した者		保険会社
		判断の内容		地盤技術者の選定
		判断に必要な情報		優秀かどうか
	リスク対応の実際	内容	追加調査	特になし
			修正設計	特になし
			対策工	特になし
		費用	追加調査	特になし
			修正設計	特になし
			対策工	特になし
			③合計	支払額 140 万
	回避しなかった場合	工事変更の内容		特になし
		④変更後工事費		2800 万
		変更後工期		特になし
		間接的な影響項目		裁判費用は別
		受益者		保険会社
リスクマネジメントの効果		費用④－（①+②+③）		2360 万
		工期		特になし
		その他		保険金支払いの減額（95%減額）

［論文 No. 17］　　国道 400 号で発生した落石災害に対する対応について

応用地質株式会社　○尾上秀司
〃　　中居英樹

1.事例の概要

福島県大沼郡金山町において、2009 年 5 月 24 日に発生した落石を伴う斜面崩壊により、国道 400 号玉梨スノーシェッドの屋根材が一部破損した。斜面から不安定岩塊の崩落が懸念され、二次災害のリスクが高いため、この路線は全面通行止めとなった。この路線は南北の町を繋ぐ重要度の高い路線であり、通行止めにより、迂回に 1 時間以上余分に時間を要した。また、迂回路は冬季通行止めの路線であるため、積雪前の交通解放が必要であった。

斜面には多数の不安定岩塊が残存していたため、モニタリングと応急対策工を提案し、施工中の安全を図りながら、早期交通開放を実現した。

本事例は、崩壊地に残存する不安定岩塊の崩落を地質リスク事象とする例で、調査結果を踏まえて、各施工段階に応じた対応を行いながら、リスクを最小限にした事例(タイプ C)である。

2.事例分析のシナリオ

(1)災害の概要

落石発生源は、シェッドの天端から約 120m の高さに位置する、傾斜 40～45 度の緩んだ岩盤斜面である(図 1)。落石発生源の崩壊地は、幅約 20m・高さ約 5m の急崖を形成しており、最大径 3m 以上の緩んだ岩塊が多数残存している。また、崩壊地の背後斜面も幅約 27m にわたって著しい緩みが認められる。岩盤の緩みは尾根にまで及んでいる。

落石の走路は傾斜約 40 度の急斜面であり、多数の不安定な転石が散在している。崩壊地から落下した岩塊群は、沢底で沢方向に流路を変更した。落石は、3 本の沢に分散して再び収束した後、スノーシェッド上に飛散した。沢部には、倒木によって停止した巨礫(最大径 5m 程度)の背後に転石群などの不安定岩塊が、数ヶ所にまとまって堆積している。

シェッド上下の落石は 51 個(最大径 1.9m)で、その飛散範囲は道路延長方向に 55m、シェッドの川側から約 21m に達している。

図 1 被災状況の概要図

(2)応急対策工の方針

通行止となった国道 400 号は、迂回に時間の掛かる路線であり、迂回路は冬季間に通行止となり、昭和村が孤立する可能性があるため、早期の通行止め解消が求められた。そのため、早急な応急対策が必要であったが、斜面上に不安定岩塊が散在する状況で、施工作業者の安全を確保する必要もあった。そこで、斜面上部から安全を確保しながら段階的に応急対策工を施工し、段階毎に順次交通解放を行う方針とした。対策工は大きく STEP1～STEP3 に分けた(図 2)。

① STEP1：交通機能の復旧

斜面部の応急対策工を施工し、施工時および国道通行時の退避時間を確保する。動態観測による監視体制を維持した状態で、シェッド上の作業および通行止め解除を行う。

対策工：上部、中間部不安定岩塊に対する斜面対策
(モルタル吹付工、ロープ掛工、立木ネット工)

動態観測：インターネットを用いた警報発令が可能なシステム構築
(地表面伸縮計・ワイヤー張力計・監視カメラ・雨量計)

② STEP2：被災施設の復旧（スノーシェッドの復旧)

シェッドの機能回復により、冬季における安全性を確保する。監視体制を維持した状態での通行を行う。

・対策工：冬季交通解放(通年通行)に向けた、シェッドの機能回復
(スノーシェッドの構造補強、スノーシェッド上のサンドクッション敷設)

・動態観測：積雪時に観測可能なシステムへの変更(磁歪センサー・地表面傾斜計)

③ STEP3：恒久対策工（現在施工中)

恒久対策工を施工し、路線の安全性を確保する。

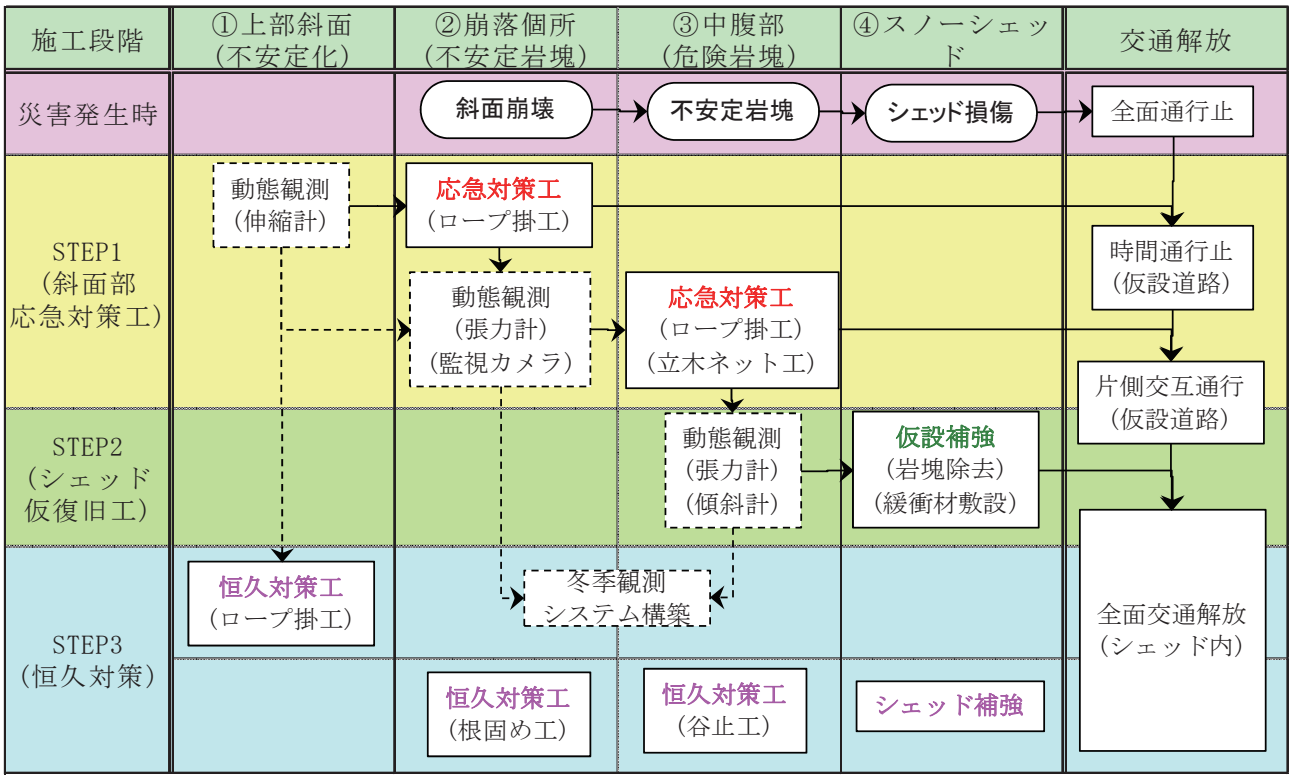


図 2 交通解放までの対策工の流れ

(3) 地質によるリスク

落石発生源に分布する地質は、新第三紀の流紋岩質の弱溶結凝灰岩である。斜面に対して流れ盤の地質構造であり、高角度の割れ目も発達しているため、斜面が不安定化しやすい(図 3)。崩壊地は、全面が露岩しており、緩みが著しく不安定であった。また、崩壊地背後の斜面も、崩壊地同様に割れ目が開いており、空洞が認められる(図 3)。

落石の発生原因および落石が道路に達した原因を推定した(表 1)。この原因から、崩壊地から新たな落石が発生する可能性があった。

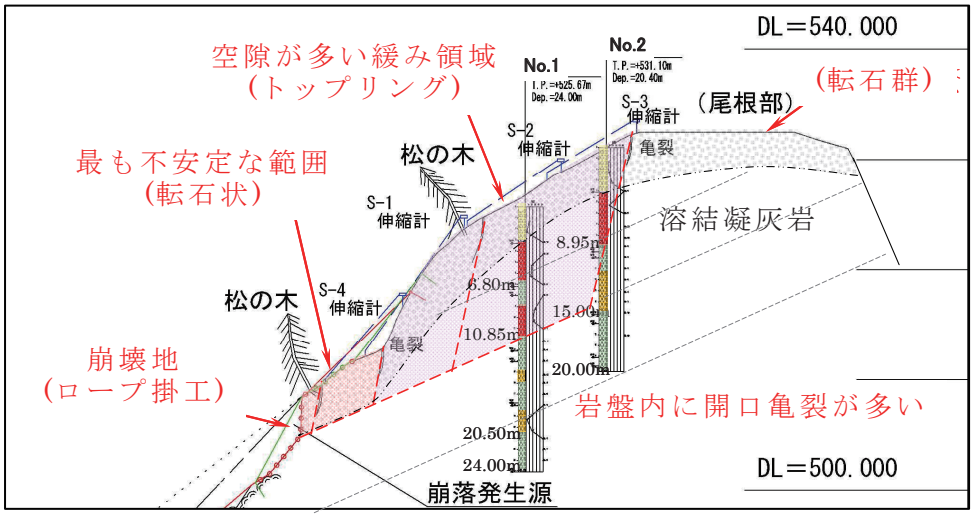


図 3 崩壊個所背後斜面の断面

表 1 崩壊の原因(推定)

素因	誘因
・流れ盤の割れ目が発達している ・分離面となる高角度の割れ目が発達する ・斜面全体が緩み、割れ目が開いている ・凍結融解を起こす気象環境である	・凍結融解による緩みの進行 ・降雨による亀裂内の細粒分の吸出しによる摩擦力の低減 ・樹木の揺れによるバランスの崩れ

3.データ収集分析

(1) 事例収集

斜面からの落石による道路災害の復旧工事に伴う、モニタリングの事例を収集し、計器の選定や閾値の設定の参考にした。事例は、公表文献や書籍の他、青森県異国間地区の事例を参考にした。

(2) 応急対策工

応急対策工は、不安定な岩塊にワイヤーロープを掛けることで、落石の発生を抑えることを目的としている(図 4)。また、施工中の安全のため、立木ネット工を設置してワイヤーロープ工で対象とする岩塊より小さな落石の対策をした。ロープ掛工の施工前には、斜面の伐採・浮石除去・モルタル吹付を行い、作業員の安全を確保した。

また、全面交通開放に先立ち、スノーシェッドの構造補強を行なった後、スノーシェッド上にサンドクッションを設置して、落石による構造物の破損を防止した。

なお、スノーシェッド川側の落石が及ばない範囲に施工された工事用道路を利用して、全面交通開放までの期間、片側交互通行により一般車両の通行を確保した。

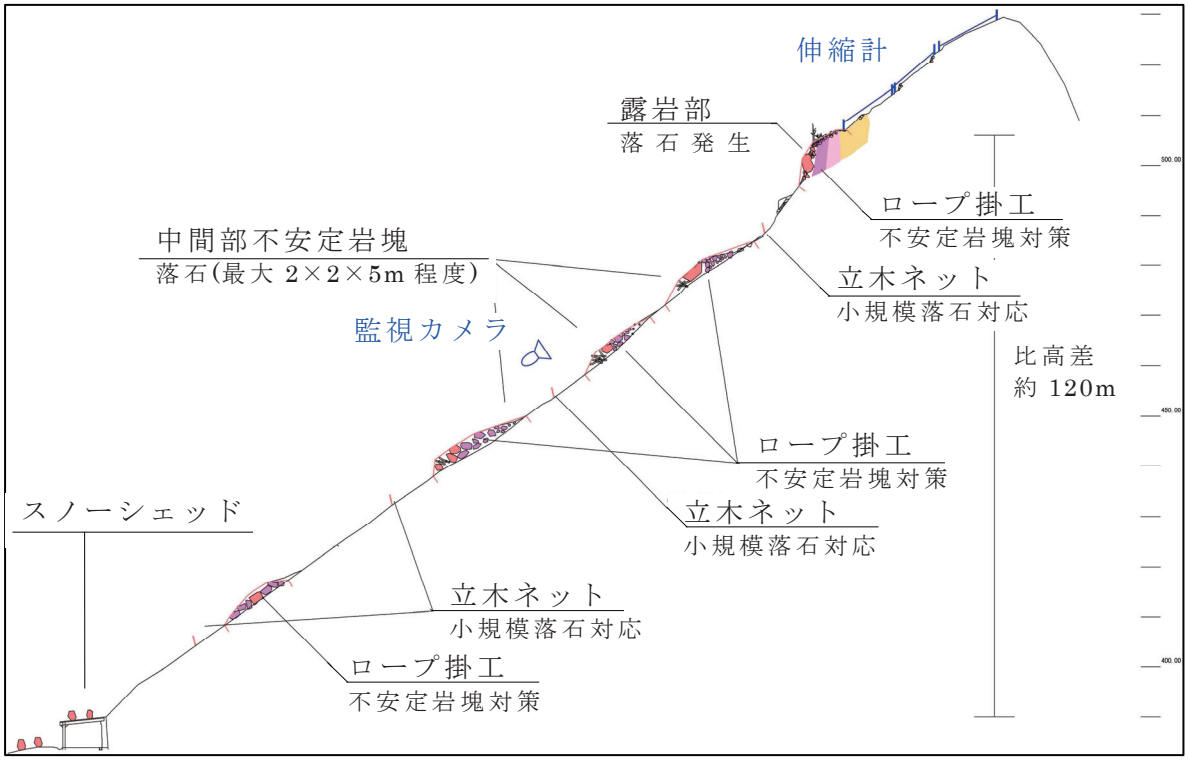


図 4 応急対策工(ロープ掛工・立木ネット：斜面上部から順に施工)

(3) 動態観測(警報システム)

動態観測は、以下の個所で実施した(図 5)。

① 崩壊個所の背後斜面に存在するクラック：伸縮計、磁歪センサー(冬季)

② 最大径 2m 以上の不安定岩塊のうち、背後に岩塊群が存在するもの：ワイヤー張力計、地表面傾斜計、監視カメラ(冬季は撤去)

③ 雨量計(冬季は撤去)

④ 計測機器は Web 上でデータを閲覧することができ、異常発生時には登録した携帯電話にメールが届くシステムを採用した。

なお、動態観測の閾値は、観測を実施しながら現地の安定性と変位速度を比較し、最適となるように、工期中に変更を行っている。

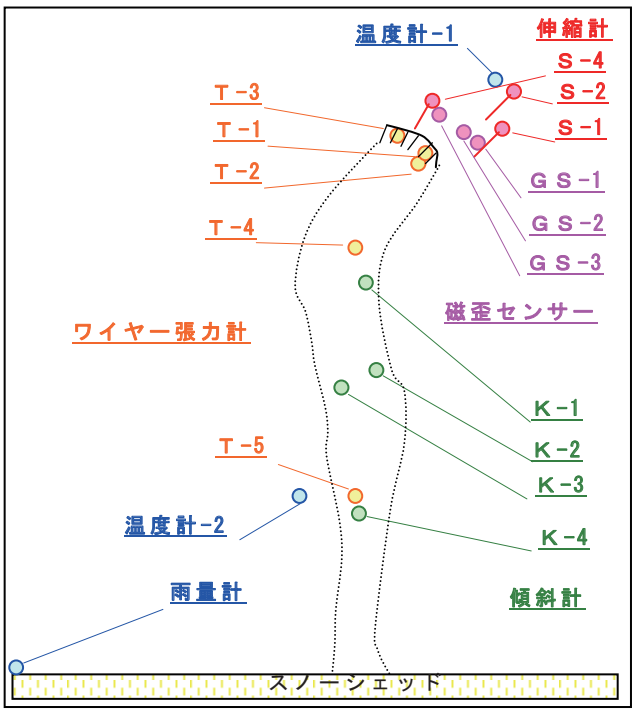


図 5 観測計器位置図

4.マネジメント効果

施工に際しては、以下の検討を行い、早期交通解放を実現した。

動態観測を行いながら、変位量や降水量と現地状況から安全を確認し、協議によって閾値を変更しながら運用した(表 2)。このことにより、当初に設定した閾値で運用した場合に比べ、施工を中断する日数を減らすことができた。

また、落石が到達する可能性のある範囲を検討し、斜面上部の応急対策工が終了した段階で、落石が到達しない位置に工事用道路を施工した。この道路を利用することにより、早期交通解放を実現した(図 6)。

早期交通解放により、路線バスの再開を含む、経済効果が発現できた。

表 2 閾値の変遷

計器の種類	交通状況		運用開始		全面通行止		通行規制中		全面開放				備考
	施工段階		準備中		STEP1		STEP2		―		STEP3		
	計測値	単位	警戒	避難	警戒	避難	警戒	避難	警戒	避難	警戒	避難	
伸縮計	時間変位	mm	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	―	―	1.0	2.0	―
	日変位	mm	0.5	2.0	2.0	3.0	3.0	10.0	―	―	2.0	3.0	
磁歪センサー	時間変位	mm	―	―	―	―	―	―	1.0	2.0	1.0	2.0	―
	日変位	mm	―	―	―	―	―	―	2.0	3.0	2.0	3.0	
ワイヤー張力計	時間変位	kN	―	―	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	T-5は3倍に設定
	日変位	kN	―	―			―	―	3.0	4.5	―	―	
地表傾斜計	時間変化	角度	―	―	―	―	―	―	2.0	3.0	2.0	3.0	―
雨量計	時間雨量	mm	10	15	10	15	10	15	―	―	―	―	3時間0mmでリセット
	累積雨量	mm	30	45	30	45	30	45	―	―	―	50	
備考			―		伸縮計変更		―		積雪時		―		―

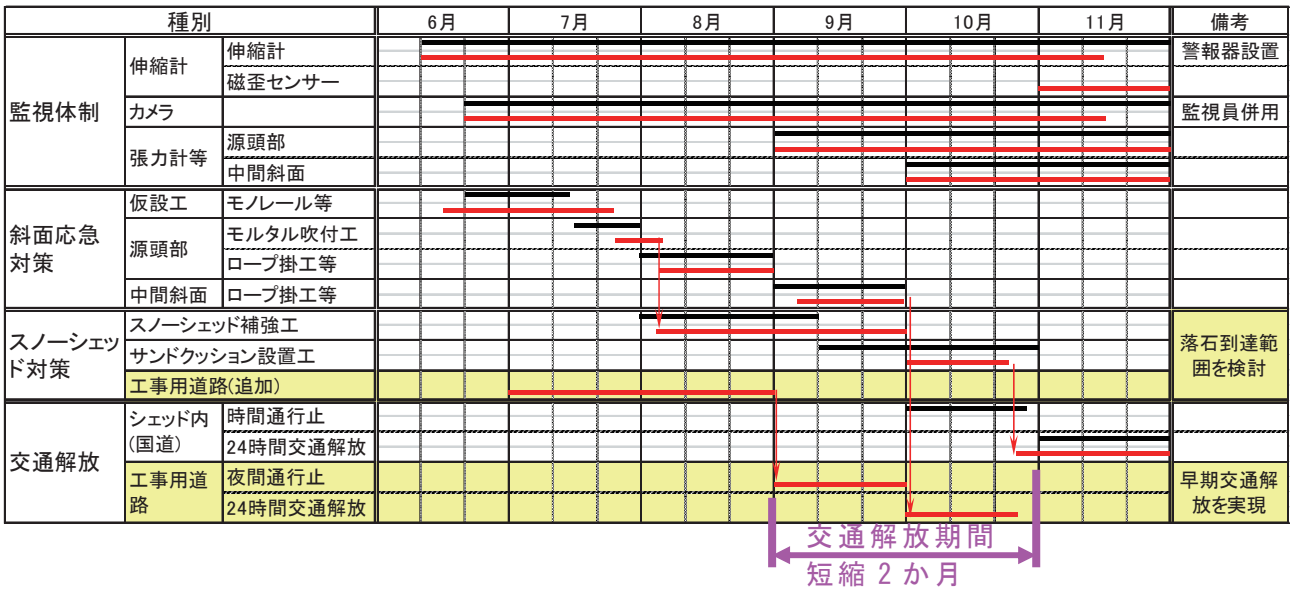


図 6 実施工程表(黒線：計画、赤線：実施)

5.データ様式の提案

本事例は、工事費の削減を目的とするものではなく、早期交通解放により、経済損失の低減を図ったものである。施工中に、新たな落石が発生した場合、調査によって連続して落石が発生する可能性が低いことを確認し、工事中断期間を最短にすることを目的としたものである。この観点から、事例分析結果を様式にとりまとめた(表 3)。

表 3 発現した地質リスクを最小限に回避した事例

大項目		小項目		データ
対象工事		発注者		福島県宮下土木事務所
		工事名		国道400号 玉梨スノーシェッド
		工種		ー
		工事概要		ー
		①当初工事費		災害により発現したため、設定なし
		当初工期		災害により発現したため、設定なし
発現したリスク	リスク発現事象	リスク発現時期		2010年5月24日早朝
		トラブルの内容		不安定岩塊の崩落によるスノーシェッド破損。斜面に残存する不安定岩塊が再崩落する可能性があった。
		トラブルの原因		比高約 120m から不安定岩塊が崩落。
		工事への影響		一般国道の全面通行止。
	追加工事の内容	追加調査の内容		現地踏査・動態観測・調査ボーリング
		修正設計内容		応急対策工
		対策工事		ワイヤーロープ掛工、立木ロープ掛工
		追加工事		モルタル吹付工、工事用道路
		追加費用	追加調査	約3,000万円 （動態観測、ボーリング等）
			修正設計	約300万円 （斜面応急対策工、スノーシェッド補強工）
			対策工	約7,700万円 （斜面応急対策工、スノーシェッド補強工）
			追加工事	約2,900万円 （工事用道路）
			②合計	約13,900万円
		延長工期		ー
		間接的な影響項目		交通解放による、経済損失の原因解消
		負担者		福島県宮下土木事務所
最小限に回避したリスク	リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		2010年7月6日、9月24日、12月17日など
		予測されたトラブル		変位の加速、新たな落石の発生
		回避した事象		工事中断による交通解放時期の延期
		工事への影響		現地確認を行った結果を踏まえ、速やかに工事を再開し、工事中断期間を最小限とした
	リスク管理の実際	判断した時期		落石が発生した当日および翌日
		判断した者		調査会社(応用地質株式会社)
		判断の内容		落石発生個所の周囲は、現況で安定している。変位速度と現地の安定性を比較し、閾値を高くし、警報発令頻度を減少させた。
		判断に必要な情報		モニタリングデータ、現地確認結果
	リスク対応の実際	内容	追加調査	工事再開のための現地確認踏査
			修正設計	なし
			対策工	なし
		費用	追加調査	約5万円/回×5回
			修正設計	ー
			対策工	ー
			③合計	約25万円
	回避しなかった場合	工事変更の内容		ー
		④変更後工事費		工事費への影響は少ない
		変更後工期		2010年9月20日(時間通行止)
		間接的な影響項目		路線バスの通行、観光客の通行
		受益者		福島県大沼郡昭和村、金山町
リスクマネジメントの効果		費用④－(①+②+③)		工事費の削減はない
		工期		2011年3月10日
		その他		早期交通解放による、経済損失の低減

［論文 No. 18］　地すべり初期安全率が有する不確かさの低減策とその効果検証
－臨界水位特定による過大設計リスクの低減－

北陽技建株式会社
今岡 裕作

1．事例の概要

(1) 工事（業務）概要

河川改修事業に伴う切土のり面工事中に豪雨が重なり地すべり滑動が発生したため、地すべり滑動に対する応急対策を緊急施工し、そののち中長期対策を計画した。

＜応急対策内容＞

常時滑動状態を沈静化するため、応急押え盛土工＋側方からの横ボーリング工＋仮設排水路工を施工、続いて地下調査と地表変位のリアルタイム観測体制構築。

＜中長期対策内容＞

・臨界水位 CWL 時 Fs＝1.00，φ＝5.0° 固定でC逆算，目標安全率…P. Fs＝1.20
・横ボーリング工２段＋押え盛土工（道路嵩上げ）＋アンカー工（逆巻き）

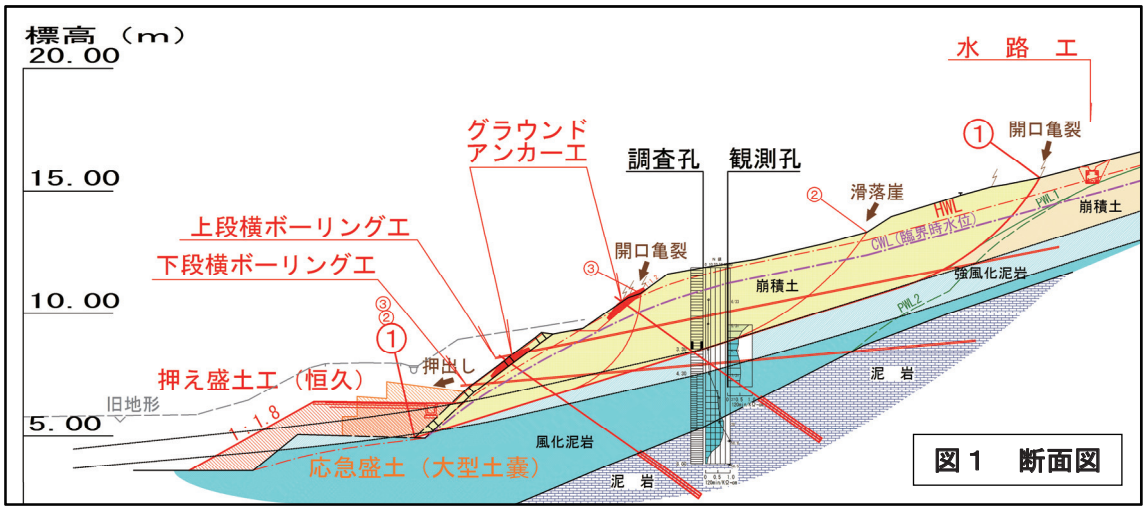
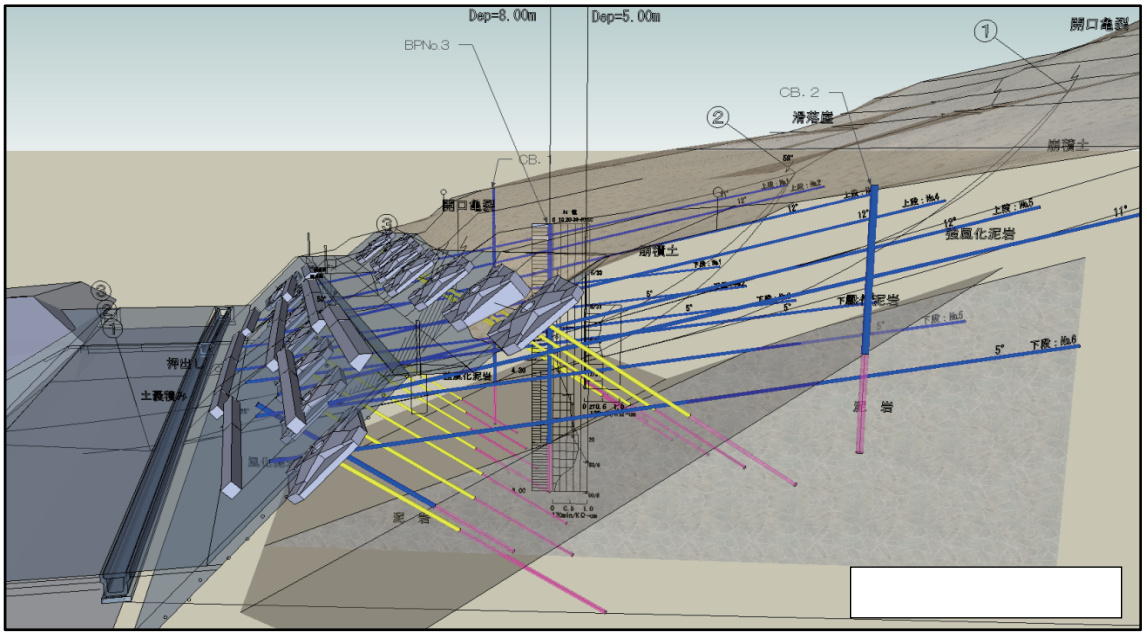


図１　断面図



本事例の特徴は、調査ボーリング孔内水位をセンサーにより連続観測しつつ地表の変位を伸縮計によりリアルタイムで観測し、両者を同期させることによって短期間で「臨界状態水位 CWL」を確定したことである。

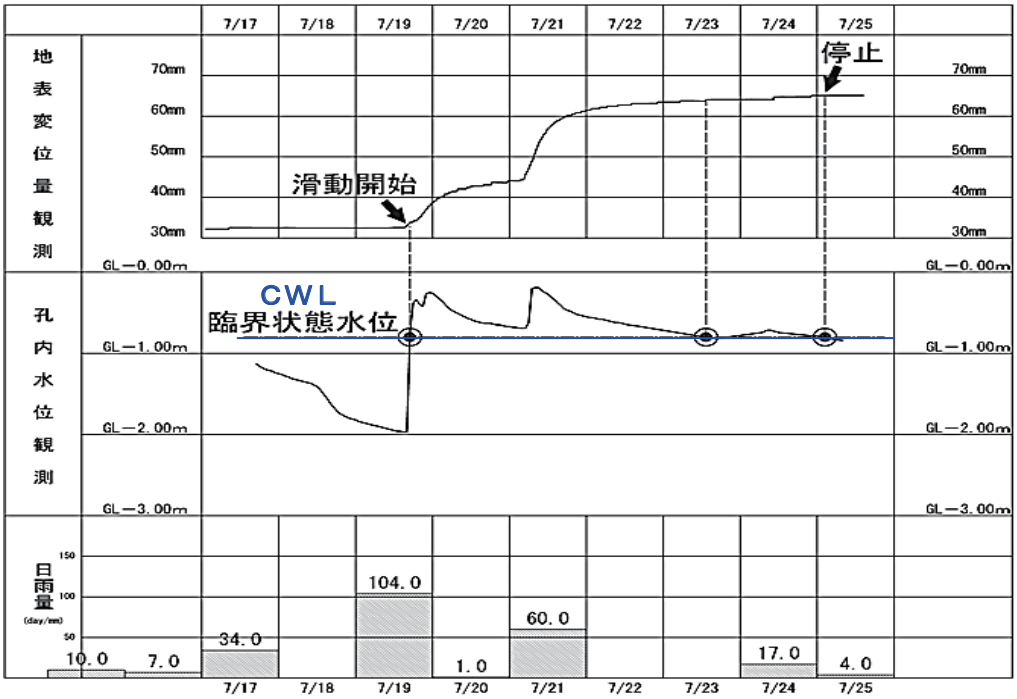


図３　モニタリングによる臨界状態の特定

(2) リスク事象の特定

地すべり斜面の安定度は、「安全率 Fs」という数値で定量化されるが、この安全率は地下水状態や地形の変化，対策の実施などにより刻々と変動する。

こうした中で地すべり安全率を評価する際、特に実務で多用される「土質定数を**逆算法**により設定する」ケースでは、まず解析の出発点（起点）となる「初期安全率」を決めねばならず、この初期安全率の決定が**解析上のコントロールポイント**と言える極めて重要な局面となる。にもかかわらず、滑動中の地すべり災害での初期安全率は、切迫する時間や費用的制約のなかで、**地質情報の少ない解析初期段階に技術者のエンジニアリングジャッジを加味した経験的手法によって、“想定”**されているのが実状である。従ってこの局面には**不確実性に起因した人的損失や事業損失の可能性が内在しており、リスク事象**になりうると考えた。

初期安全率を決定する最も確からしい手段としては、本事例のように「臨界状態」が特定でき、その状態を Fs＝1.00 に定め、これをベンチマークにすることである。

しかし、全ての地すべり地において観測期間中に臨界状態が確認できるわけではない。むしろ従来の標準的な観測手法（例としては、調査ボーリング孔内の手測りによる断続的水位観測 ＋ パイプひずみ計，簡易変位板測定）では臨界状態特定は不可能であり、臨界水位が不明のまま初期安全率を想定し、解析，設計へ進むことも十分ありうる。そしてその場合には本事例よりも高い不確実性が内在しているため、対策事業規模の**過不足**が生じうる。

２．事例分析のシナリオ

(1) リスク発現のプロセスとその原因

当分析において著者は「**過大設計による**事業コスト損失」をリスク事象ととらえ、その原因は「適正な地質情報が得られない場合における、技術者の不安に根差した**過度に安全側へ偏重した技術判断**」にあると考える。

すなわち今回検証するのは、地質の不確実性に関わる楽観的判断が原因で重大な損失（施工中の事故，手戻り，設計変更など）が発現した場合ではなく、逆に過度な悲観的判断に起因する過大設計という“見えない損失”に着目する。

過大設計による事業コスト損失は、次のプロセスによって起こる。まず、地質技術者は、万が一判断を誤った場合に生ずる損失や責任が重大であればあるほど、**不確実性に対して慎重にならざるを得ない**。だから判断材料となる地質情報に乏しい状態で技術判断を迫られた場合、その結論は**「安全側」へ引き寄せられる**。安全側の判断はコストがかかる。それでも慎重で安全な選択は、国民の安全第一を旨とする我々技術者にとって当然の心理であるし、過大であるがゆえに目立った損失事象も発現せず、一見すると事なきを得た形のため責められることは無い。つまり、**見えない**。

しかし、よくよく考えると本来必要とする以上の対策費を投じる判断は、確実に事業費の無駄使いであり、こうした安全側の判断が累積，多重化すると一層大きな事業コスト損失に至る。筆者はこの過大設計発生プロセスには普遍性があると考える。

(2) マネジメント効果を分析するシナリオ

本事例のような地下水位の変動と同期したリアルタイムかつ連続的な動態観測が、すべての地すべり箇所に導入されるわけではない。むしろ、このような手法を発注者へ提案した際の第一印象は「贅沢」と受け止められ拒まれるケースが未だ多い。

そこで前述した本事例に対する仮想ケースとして「標準的調査手法を採用し、その結果として臨界状態が把握できなかった場合」の解析をシミュレーションし比較する。臨界状態が不確実なまま解析を余儀なくされた場合の技術者は、現状の安定度をなるべく低く評価するように、初期安全率を現実的に考え得る範囲内で最も悲観的な値に設定する可能性が高い。具体には実務上、次の２ケースが想定される。

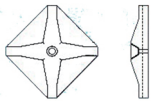
（仮想ケース１）観測中**最高水位（HWL）**時の初期安全率を **Fs =0.95** と決定

（仮想ケース２）地下水位が**地表面**の場合の初期安全率を **Fs =0.90** と決定

これらの２ケースは、本事例（高精度の観測手法を活用し臨界状態を特定）と比べ、いずれも対策上の計画安全率 P.Fs=1.20 とした場合の必要抑止力が増加するとみられ、これに連動して抑止工（アンカー工）の規模と工費が肥大する。その肥大した差額が本来は不要な過大設計の損失であって、これと標準よりも高精度な観測に要した費用を差し引くことでマネジメント効果を評価できる、というシナリオが成立する。

３．データ収集分析

過大設計によるコスト損失を数値化するために、検証はアンカー工の施工費用に着目した。上記した本事例を含めた３ケースについて、初期安全率の決定から解析を経てアンカー仕様，施工金額の決定に至るまでのプロセスを下表に概括する。

検 討 要 素		単位	本 事 例	仮想ケース1	仮想ケース2
初期安全率のコントロールポイント	着目する地下水位		CWL（実測）	HWL（実測）	地表面（想定）
	決定時の滑動状況		臨界状態	連続的滑動状態	活発な滑動を予想
	初期安全率		1.00	0.95	0.90
土質定数	内部摩擦角φ	°	5.00	5.00	5.00
	粘着力C	kN/m^2	10.31	10.04	9.77
	単位体積重量γ	kN/m^3	18.00	18.00	18.00
安 全 率	CWL時安全率		1.000	0.979	0.957
	HWL時安全率		0.971	0.950	0.928
	満水時安全率		0.943	0.922	0.900
	抑制工施工後安全率		1.043	1.022	1.001
	計画安全率		1.20	1.20	1.20
必要抑止力		kN/m	55.0	62.1	69.5
アンカー工	配 置		2段×7本	2段×8本	2段×9本
	本 数	本	14	16	18
	設計アンカー力	kN/本	171.8	169.7	162.8
	定着長	m	3.00	3.00	3.00
受圧盤	地盤の支持力	kN/m^2	50.0	50.0	50.0
	必要受圧面積	㎡	3.436	3.394	3.256
	受圧盤タイプ		PC受圧盤　セミスクエアタイプ 		
	受圧面積	㎡	3.520	3.520	3.520
施工コスト（直接費）	アンカー工の初期コスト	円	2,471,000	2,824,000	3,177,000
	受圧盤の初期コスト	円	3,010,000	3,440,000	3,870,000
	小　計	**円**	**5,481,000**	**6,264,000**	**7,047,000**
観測コスト（直接費）	変位計測	円	伸縮計リアルタイム遠隔監視1箇月	丁張板設置・観測・撤去 1箇所×30日×2回	
			450,000	143,000	143,000
	地下水位観測	円	センサー購入，設置	触診式水位計手測り　1孔×30日×2回	
			120,000	100,000	100,000
	小　計	**円**	**570,000**	**243,000**	**243,000**
合　計		円	6,051,000	6,507,000	7,290,000

・仮想ケース２が最も安全側（悲観的）初期安全率の設定であり、安全率は本事例よりも仮想ケース１が約 2%，仮想ケース２が 4%低めに算出された。
・本事例に対する必要抑止力の増加率は仮想ケース１が 13%、仮想ケース２が 26%。
・必要抑止力の増加分はアンカー本数を増加せねばならなかった（※アンカー孔口付近の地盤支持力が低いうえに地形的条件から受圧面積の拡大が不可能のため、アンカー1 本あたりの設計アンカー力を増加できなかった）。

４．マネジメントの効果

本事例のマネジメント効果を、下式によって定量化する。

マネジメント効果　＝（仮想ケース２の工費　－　本事例の工費）－ 観測費用の増分
＝（¥7,047,000　－　¥5,481,000　）　－　（¥450,000－143,000）
＝　¥1,566,000　　－　　¥307,000
＝　¥1,259,000

すなわち仮想ケース２のアンカー工費と本事例の工費の差額（¥1,566,000）こそが、いわば過大設計によるコスト増分であり、今回の事例ではこのコスト増を未然に防いだと見なせる。

そして今回防いだ過大設計コスト額は、本事例にて高精度のモニタリングに要した費用（¥307,000）を差し引いても余りある額（¥1,259,000）であり、これをマネジメント効果（の一側面）と解釈する。マネジメント効果を示す金額が正の値をとることから、この検証は下記の論を支持する一つの事例と言える。

信頼性の高い地質情報を取得することは、技術者が過剰に安全側の判断に頼る必要を無くし、過大設計による事業コスト損失を抑制する。

ただしここに特筆すべき留意事項がある。本来のマネジメント効果は、銭勘定だけで帰結するものではない。工事規模の抑制（適正化）がもたらす影響は、単に事業費の縮減のみならず、施工期間の短縮をはじめ、周辺地域への環境影響や近隣集落への心理的負荷の軽減など、数値化が困難であるか、そもそも銭に換算すること自体がそぐわないプラス要素も包含している。今後のマネジメント効果の評価に際しては、これらの定量化の困難なプラス要素をも含めた多面的分析が欠かせないと考える。

５．データ様式の提案

本事例を既往のデータ様式に強いて当てはめるとすると､「好ましくない事態を未然に防いだ」という意味では、様式Ａに近い。しかし現時点で「過大設計」が明確な損失として認知，受容されていないことを鑑み、あえてその他の様式Ｄとして分類した。提案する様式はＡタイプをベースにアレンジしたものを次頁に示す（※アレンジ箇所は網掛けした）。

今後、過大設計が地質リスクに関わる重大なコスト損失事象のひとつとして認知され、事例研究が進むことを期待する。

そして「過大設計の原因の一端が地質情報の不足にある」というロジックに信憑性と普遍性が確立できれば、地質調査の重要性と存在意義を社会へアウトリーチする強力な論拠となるだろう。

最後に、データ様式内において「リスク回避」,「リスクマネジメント」といったリスク工学の用語を安易に使うことは避けるよう強く提案する。我々の収集する事例の多くは、厳密にはリスクをマネジメントするレベルには達していないからである。

D. 地質リスク低減により過大設計を抑制した事例

大項目	小項目		データ
対象工事	発注者		島根県出雲県土整備事務所
	工事名		平田船川 広域河川改修工事 法面検討業務委託
	工種		地すべり解析、対策工法検討
	工事概要		グラウンドアンカー工 横ボーリング工 押え盛土工　水路工
	仮想事例の概要		標準的観測手法で臨界状態を確認できず初期安全率を安全側に設定。
	①仮想事例の工事費		¥7,047,000
	仮想事例の工期		ー
~~リスク回避事象~~ リスク想定事象 （想定される過大設計のシナリオ）	リスク発現時期		安定解析の初期安全率設定時
	過大設計の内容		初期安全率を安全側に設定して必要抑止力が増大し、工事量が肥大化
	過大設計の原因		地すべり挙動データの不足
	工事への影響		アンカー工の過剰設置
リスク管理の実際	判断した時期		応急対策工完了時
	判断した者		地質コンサルタント
	判断の内容		高精度の動態観測体制整備
	判断に必要な情報		地すべりの挙動、保全対象
リスク対応の実際	内容	追加調査	高精度 動態観測体制
		修正設計	ー
		対策工	ー
	費用	追加調査	¥307,000
		修正設計	ー
		対策工	ー
		②合計	¥307,000
変更工事の内容	工事変更の内容		アンカー設置本数の低減（最適化）
	③変更工事費		¥5,481,000
	変更工期		変更なし
	間接的な影響項目		環境負荷低減、通行止め早期解放
	受益者		島根県
~~リスクマネジメント~~ リスク対応の効果	費用（①－③－②）		¥1,259,000
	工期		３日短縮
	その他		瀬戸際の意志決定に自信をもって臨める。説明責任も果たせる。

－以　上－

［論文No. 19］　　道路改良（線形変更）にともなう切土により，休眠していた
大規模地すべりが再活動した事例

（株）興和　鴨井幸彦

1．事例の概要

本事例は，丘陵部から海岸部に向かって下る途中にある「狭くてきついヘアピンカーブ」（図1）を解消し，大型観光バスが無理なく通行できるようにと，大きなループを画く形で改修計画された県道において，開削工事にともなって地すべりが発生し，開通が大幅に遅れると同時に多額の地すべり対策費を要したというものである。

工事は平成元年度に着手され，開削により斜面を切り込む形で，山側から海側に向かって進められた。当初の変状は，流れ盤型の地質構造を有する海側に傾斜した切土のり面内にとどまっていた（受盤型の地質構造を有する山側に傾斜した切土のり面は不変）が，開削工事が斜面全体の末端部に当たる部分に及んだ段階（平成3年9月）で，地すべりが発生した（第1段階）。

この地すべりに対して，集水井工と杭工を施工し，沈静化させた後，さらに掘削工事（路面の切り下げ）を進めたところ，のり面内に崩壊が発生すると同時に（図2），切り下げとともにすべり面も深化するという現象が現れ，掘削と新たな変状とがイタチごっこをくり返し，工事は難航した＊。これに対して，のり面をゆるく切り直したり，土留工や水抜きボーリング工を施工するなど対症療法で応じながら，なおも工事（掘削）を進めていったところ，平成4年5月になって，山側の斜面に約150 mにわたって亀裂が走り，地すべりが大きく拡大する兆候が現れるに至った（第2段階）。

＊ここで見られた「のり先のせり出し，先端の盛り上がり」に関しては，盤ぶくれあるいは座屈の可能性も残される。

これは，斜面末端部の掘削により，永く休眠していた旧期大規模地すべりが動き始めたものと見られ，工事は中断を強いられた。そこで，既設の集水井からの集水ボーリング工を追加するとともに，最終的には「路面を計画より上げて，押さえ盛土する形」に変更することで，翌平成5年5月にようやく供用開始にこぎつけた。拡大の兆候を示したこの大規模地すべりに対しては，平成9年度から11年度にかけて，頭部排土工と3基の集水井による立体排水工が施工され，現在は静止している。

本事例は，計画法線が古い大きな地すべりの末端を排土する形になっていたことに起因したものと考えられるが，結果論的に見れば，古い地すべり地形の存在に計画時点（あるいは調査の初期段階）で気づいていれば，回避できた可能性があったと言える例かも知れない。

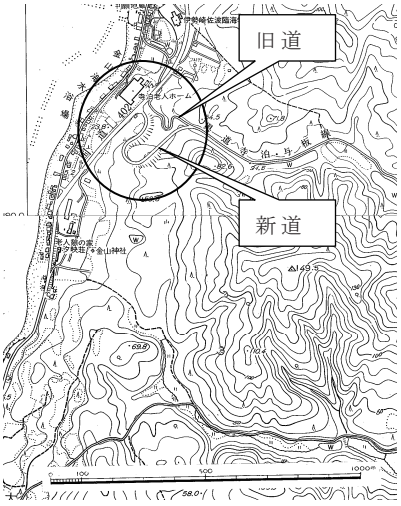


図1 調査地周辺の地形（複数の地すべり様地形が確認できる）

図2 斜面末端部でもっとも切土量が大きい部分における，切土のり面の変形状況（右上に見える列状の細い棒は杭の施工位置を示す）

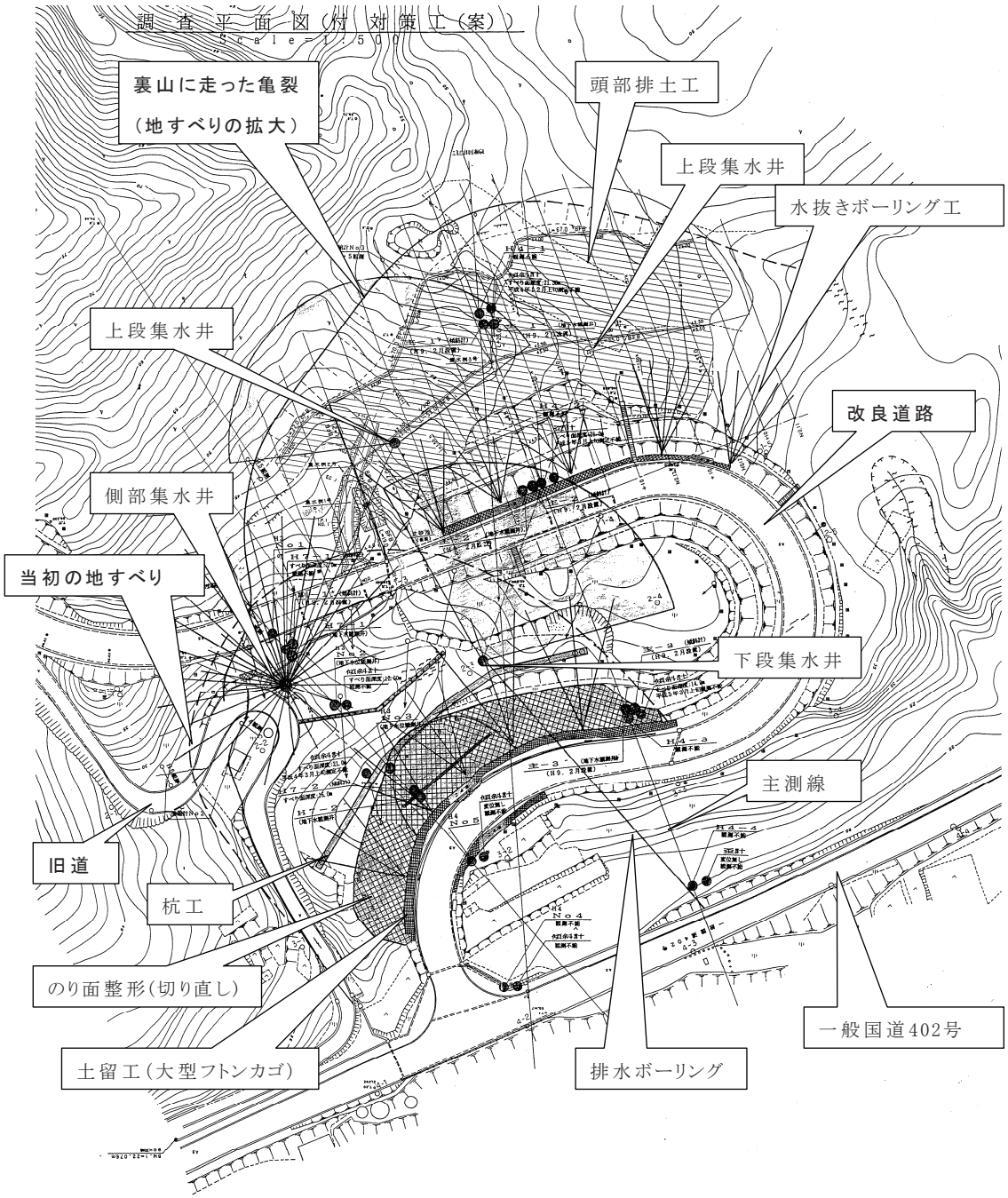


図3 改修範囲平面図(旧道と新道の関係および地すべり対策工の実施状況を示す)

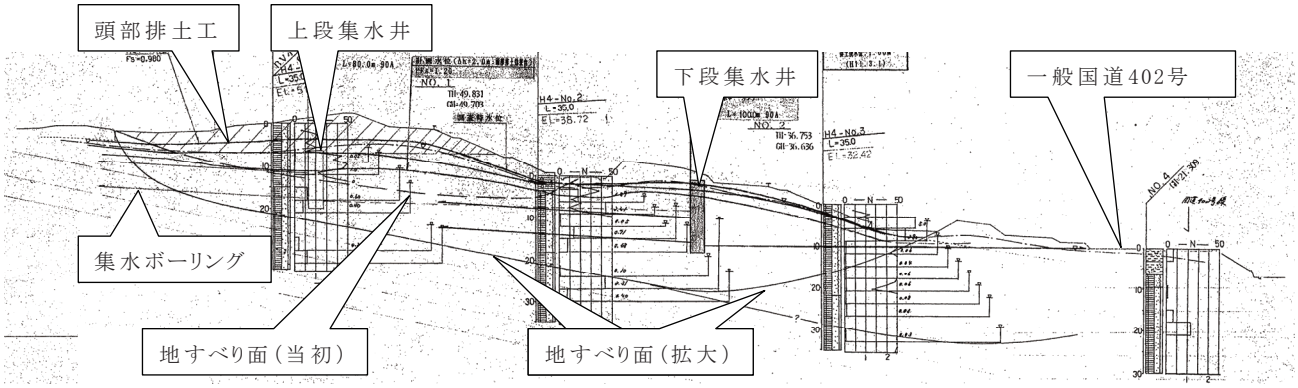


図4 地質断面図(主測線)

2. 事例分析のシナリオ

本事例が大変な難工事に陥った最大の理由は，斜面の末端部を大きく切土したことにある。つまり，そこが①地すべり様の地形を呈していた（旧期大規模地すべりの存在）ということが重要で，さらに，②基盤岩の地質構造が地すべり方向に対して流れ盤であったこと，③基盤岩自身が風化作用を受けて脆弱化しやすいとされる新第三紀層の砂岩泥岩互層（いわゆる堆積軟岩）から構成されていたことがマイナス要因として働いたものと考えられる。そして，これらの諸点こそがまさに地質リスクそのものであった。

したがって，仮に改修ルートの計画段階において，そこが地すべり性の斜面であることが認識されていれば，その後の展開は実際とは異なったものになった可能性がある。つまり，地質リスクマネジメントとしてもっとも都合の良いストーリーは，「事前に実施された地質調査結果に基づき，現状とは別のルートが選択されたことにより，工事は順調に進み，地すべり対策として実施された一連の地すべり防止工事がそっくり不要になる」というものである。

そこで，ここでは，（あくまでも仮定の上でのことではあるが）

①道路改修の計画段階での地質調査の実施（地質技術者の関与）
↓
②土工による潜在地すべり誘発の可能性の指摘（地質リスクの特定）
↓
③斜面の不安定化を回避できるルートの選定（地質リスクの回避）
↓
④手戻りのない計画通りの工事の進捗（マネジメント効果の発揮）

という「理想的なシナリオ」を描き，マネジメント効果について検討することとする。

3. データ収集分析

ここでは，現状の計画に対してあらかじめ地質リスクを特定し，そのリスクを回避するためにルートを変更した結果，何事もなく（地すべり等の斜面変状が発生することなく）開通にいたったという想定のもと，地すべり対策に要した地質調査費，防止対策工事費をそっくりリスクマネジメント効果として計上することとする。

したがって，その金額は，地すべりが発生した平成3年9月以降，平成5年5月に供用開始されるまでの間に，実際に支出された地質調査（ボーリング調査および諸観測施設の設置と観測業務）と地すべり対策費，およびその後（平成5年から8年にかけて）に実施された地すべり観測費（以上第一期分）と，拡大の兆候を見せた幅約200 m，延長約250 mにおよぶ大規模地すべりに対して平成9年度から平成11年度にかけて実施された地すべり防止対策および諸観測費（以上第二期分）を合計したものとなる。

なお，道路改修には，土工（切土掘削および土砂の搬出，のり面の整形）とのり面保護工（植生工），およびのり押さえとしての土留工（大型フトンカゴ），さらには側溝や舗装費用なども含まれる。しかし，これらは，ルート変更が行われた場合でも当然実施されるべき本体工事であり，その際の延長もさほど大きくは変わらないものと推定される。そこで，これらはリスクマネジメントの前後で変わらない要素と考え，本体工事費については共通とした（データ様式では，￥A と表示した）。

4. マネジメントの効果

県道の改修工事にあたり，法線の計画段階において綿密な地質調査がなされ，それをもとに斜面の安定を損なわないような形での改修ルートが決定されたものと仮定すれば，実際に充てられた地すべり対策費をそっくりマネジメントの効果と見なすことができる。いささか極端かつ強引な観はあるものの，その効果は ￥257,062,000 と試算される(表1)。

5. データ様式の提案

発現した地すべり現象を解明するための地質調査，およびそれに基づいた地すべり対策工事費を一つ一つ拾い上げ，積み上げて作成したのが表1である。地すべり対策は，最初に発生時した地すべりに対するもの(第1期：平成3年～4年)と，その後に拡大した大規模地すべりに対するもの(第2期：発現は平成4年だが，対策工の実施は平成9年～11年)との2つの時期に分けて実施された。表1では，それぞれ1)，2)として区別した。

表1　データ様式への記入(B型：リスクが発現した事例)

大項目	小項目	データ
対象工事	発注者	新潟県土木部与板土木事務所
	工事名	一般県道寺泊・与板線道路改良工事
	工種	土工
	工事概要	開削による新道建設(L=500 m)
	①当初工事費	土工事については不明のため￥Aとする(ここにはのり面保護のため実施された植生工も含まれる)。
	当初工期(改良期間)	平成元年度～平成3年度
リスク発現事象	リスク発現時期	1) 1回目：平成3年9月25日， 2) 2回目：平成4年5月26日
	トラブルの内容	1) 地すべりの発生(路面に亀裂・段差が現れ，通行に支障が生じた)， 2) 背後の斜面に亀裂が走り，地すべりが大きく拡大する傾向を見せた。
	トラブルの原因	1) 切土による斜面末端部の排土， 2) 計画路面までの切り下げにともなう排土量の一層の増加とすべり面の深化。
	工事への影響	地すべり対策のため，そのつど工事(土工)を中断し，地質調査，設計，対策工事を実施。これが開通の大幅な遅れにつながった。
	追加調査の内容	1) 平成3年度に5孔，4年度に10孔，計15孔のボーリング調査を実施。水位観測実施。 2) 平成7年度に7孔に孔内傾斜計，パイプ歪計，水位観測孔を設置。水位と孔内傾斜計・パイプ歪計の観測を実施。以降，平成11年度まで継続。平成9年度に頭部排土工の設計。

追加工事の内容	修正設計内容		海岸沿いに走る国道への取り付け部分については法線を変更し，縦断を上げることで斜面への影響を抑えた(一旦切り下げた部分を一部埋めもどし，押さえ盛土とした)。
	対策工事		・平成3年度……集水井1基(H=8.0m)，集水ボーリング1,100m，杭工 φ318.5m/m，58本 ・平成4年度……集水ボーリング930m
	追加工事		・平成9年度……集水井1基(H=17.0m)，集水ボーリング1,000m) ・平成10年度……集水井1基(H=14.0m)，頭部排土工3 0,000㎥ ・平成11年度……集水井1基(H=14.0m)，集水ボーリング2,000m，集水ボーリングの洗浄工事37本，排水ボーリングの堀直し63m
	追加費用(地すべり調査および対策工事)	追加調査	1) ￥26,175,000 2) ￥16,587,000
		修正設計	―
		対策工	・平成3年度 ……￥60,000,000 ・平成4年度 ……￥12,000,000
		追加工事	・平成9年度 ……￥38,000,000 ・平成10年度……￥73,000,000 ・平成11年度……￥43,300,000
		②合計	￥269,062,000
	延長工期		開通が約2年遅れた。
	間接的な影響項目		約1年間にわたって大型車の通行が止められた。
	負担者		道路管理者(新潟県)
リスク管理の理想像	対応(すべき)時期		改修ルートの計画段階
	対応(すべき)者		道路管理者もしくは道路法線を計画した設計コンサルタント会社
	対応(すべき)内容		工事の周辺に与える影響(とくに斜面の安定性)
	判断に必要な情報		既存資料調査，地表踏査，(ボーリング調査)
	対応費用	調査	地表地質調査，ボーリング調査(5孔程度)
		対策工	￥0 (周辺にマイナスの影響を与えないルートが選択されたとすれば不要となる)
		③合計	￥12,000,000
	想定工事	工事概要	開削による新道建設(L=500 m)※ ※道路改修のための土工事については，仮にルート変更がなされても，大幅な延長の増減はないと考え，マネジメントの前後で大きく変わらないものとし，共通とした。

		④工事費	￥A
		工期	平成元年度～平成3年度
リスクマネジメントの効果	費用 ((①A+②)－（③+④A))		(￥A＋￥269,062,000)－(￥12,000,000＋￥A)＝ ￥257,062,000
	工期		当初予定通り平成3年度中の開通を実現
	その他		

＜補遺＞

ここで，本事例において，なぜリスクの発現を回避できなかったのか，その原因について少し考察してみたい。

リスクの発現を回避するチャンスは，実は3回あった。1回目は，道路法線の計画段階であるが，地山を開削していく，という認識があったせいか，地表地質調査については提案されなかった。

2回目は，道路の詳細設計に先立ち，昭和56年度に計画ルート沿いの2箇所で，切土のり面の勾配を決める目的でボーリング調査が実施された際である。このときは，目的限定のスポット的なボーリングであり，現道（旧道）にしっかりした砂岩泥岩互層の露頭があって，しかもボーリング結果も浅い深度から高い*N*値を示したため，1:1.0勾配を提案して終わっている。

3回目は，平成元年に最初に掘削工事が開始された直後，流れ盤型の地質構造を呈する海側に傾斜した切土のり面が1:1.0勾配で自立しないため，のり勾配について再検討する目的でボーリング調査がなされた時である。この際も，のり面の安定の問題にのみ関心が集中し，新道の開削工事が斜面全体の安定性についてどう影響するか，までには考察がおよばなかった。その後，比較的順調に工事が進み，終盤近くになって切土量が大きくなったところで地すべりが発生したが，その時はもう後戻りできない状況となっていた。

このように，通常の業務では，地質リスクが発現した後になって初めてそれと気づくことが多く，事前に予見することはなかなか難しい。目に見えない地下を対象にしているというだけでなく，地質現象はそもそも多様性，地域性に富んでいるからである。また，リスクを想定してあらかじめ地質調査を実施したからといって，必ずしもリスクが回避できるとは限らない。この点は，非常に微妙なところで，その成否は一に担当地質技術者の力量に負うところが大きいように思われる。地質リスクは，一面，地質技術者リスクでもあるという指摘もあり，地質リスクマネジメントは両刃の剣という側面を持っている。われわれ地質技術者は，地質リスク問題に関して相当の覚悟をもって臨まなければならない，ということを強く感じる。

本事例は，計画の初期段階での地質技術者が関与することの重要性を示すとともに，とかく多忙な日常の業務の中にあっても，当面の課題だけではなく，視点を変えて広く眺めて見ることの必要性を示す意味で参考になると考え，そしりを覚悟であえて紹介した次第である。

謝辞

本報告をまとめるにあたり，新潟県長岡地域振興局地域整備部与板維持管理事務所からは，発表の趣旨をご理解いただいた上で，当時の工事および地質資料をご提供いただいた。ご配慮に対し，深く感謝申し上げます。

［論文 No.20］　用水管きょ敷設に伴う水道水源と天然記念物（沼野植物群落）保全事例

新協地水株式会社　技術部　○原　勝重，倉持　典幸※1

１．事例の概要

本事例は，水道水源を回避するために谷地湿原(昭和 3 年に天然記念物に指定された沼野植物群落)に用水管きょを敷設する用水路工事に際し，地盤調査・室内土質試験・地下水調査などを提案し，高有機質土の軟弱地盤対策や水道水源に与える影響の有無および谷地湿原への環境影響を出来る限り少なくすることを事前に検討するとともに，施工中の監視も行って，基盤整備促進事業を完成させたものである。

２．事例分析のシナリオ

(1)初期調査における概略検討(H20)

調査は，当初，マンホール箇所の地耐力を確認することから始まったものである。

まず，現地の確認を行った段階において，谷地湿原には高有機質土が分布し，φ600mm の管きょを地表面に設置するためには，沈下対策が必要であると判断した。このため，機械ボーリングによる地盤状況の把握と標準貫入試験による地層の硬軟や締め固まり具合の把握の他に高有機質土の工学的性質を把握することが必要であることを提案して実施した。その結果から①用水管きょの敷設には高有機質土の盛土による沈下と管きょ敷設のための基礎構造の検討，②工事中の水道水源への汚濁の懸念および③谷地湿原に与える環境影響の有無などの３つの問題が浮上した(**図１**に示す断面図参照)。

これらを解決するための調査・試験を提案した。また，この段階においてリスクを回避するための調査・解析・設計・施工の全体フローを作成した(**図２**)。

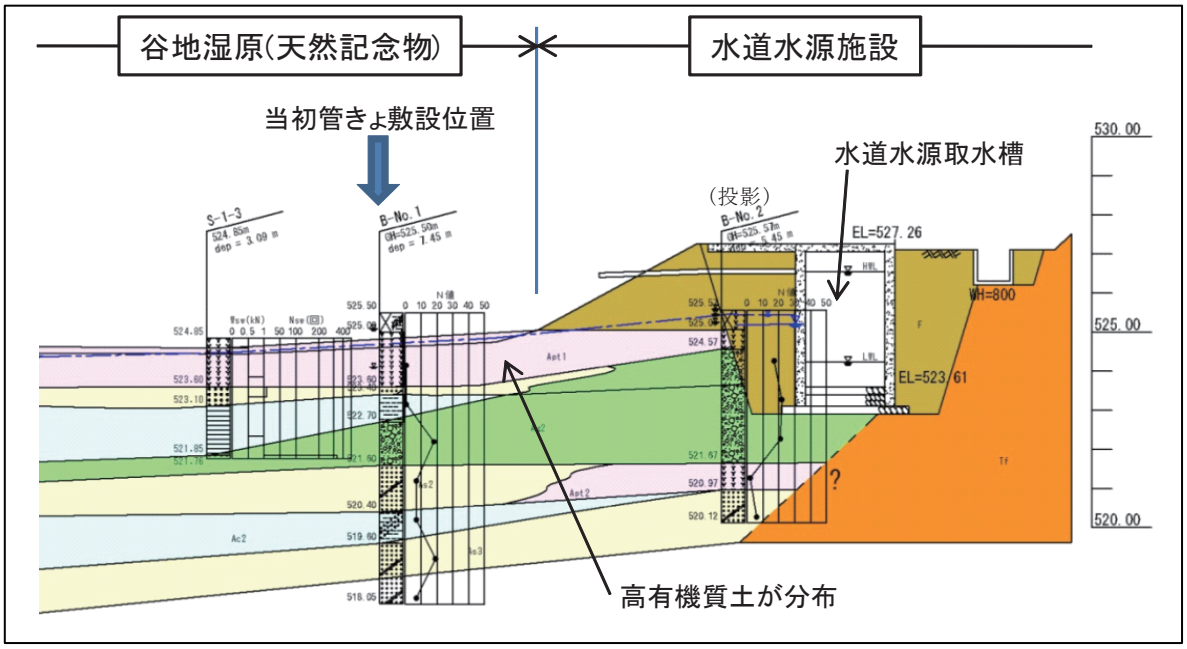


図１　谷地湿原と水道水源施設の断面図

※1　(現)株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング　長野道路事務所　土木保全計画課

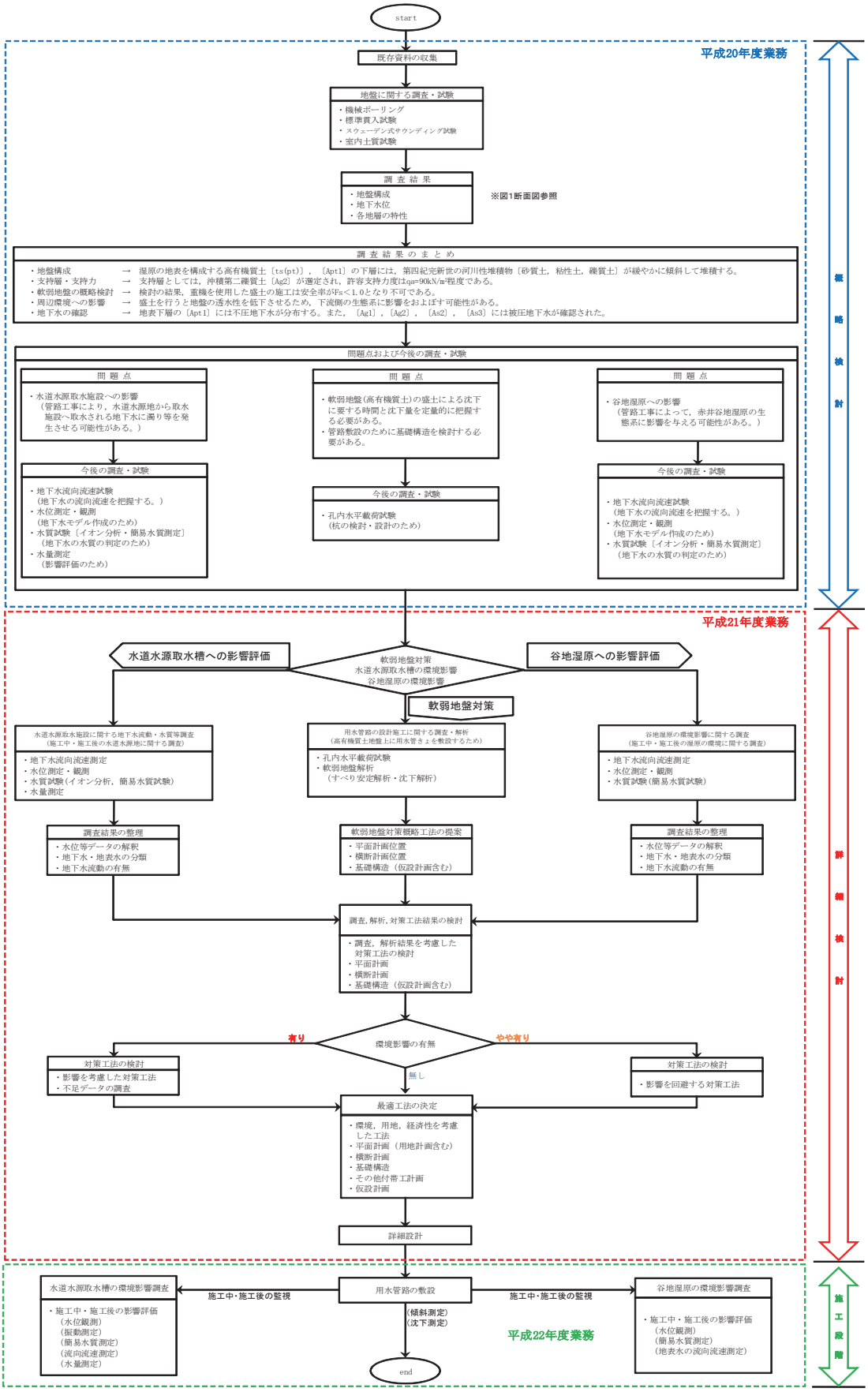


図２　業務実施方針を組み入れた用水管きょの調査・解析・設計・施工の全体フロー

(2)詳細検討(H21)

用水管きょの調査・設計に際しては,

①用水管きょ敷設計画区間に高有機質土が分布するため軟弱地盤対策が必要なこと

②水道水源水への水質の影響が無いこと

③谷地湿原への環境影響を最小限とすること

を最優先条件とし，自然環境の保全を考慮した設計および施工方法とすることを実施方針とした。このため,詳細検討時には自記水位計による地下水位の観測,流向流速測定,水質試験（イオン分析，EC，pH など）および孔内水平載荷試験等を行い，これらの結果を基にすべり安定解析，沈下解析などの軟弱地盤解析を行った。

(3)施工中の監視(H22)

用水管きょ敷設工事に際しては，水道水源の取水施設近傍における工事のため，施工中に水道水源の水質汚濁や水位低下が懸念される。このため，取水槽の水質保全を工事前と工事後に水道法に基づく**水質測定**，**濁度計**による汚濁の監視および**水位観測**を行い，工事の影響評価を行う。汚濁は，建設機械の振動や杭の圧入によっても励起されることが考えられることから，取水施設基礎コンクリート面において加速度計による**振動測定**も行う。

谷地湿原の保全には,地下水の水位,流れおよび水質を把握する必要があることから,これまで連続的に実施してきた**地下水位の測定**を継続し，水道水源取水槽の水質に汚濁が認められた場合には**簡易水質試験**(Ec：電気伝導度,pH：水素イオン濃度指数)や**イオン分析**を行う。

用水管きょ敷設時には，掘削と盛土が実施される。このため，水源取水施設の変状監視として**地表傾斜計**を設置して，掘削時・盛土時の変状を監視する。

また，用水管きょに衣土を覆工する場合には，農道のり尻や取水施設のり尻に盛土が行われる。この盛土により，軟弱な高有機質土が圧密沈下を生じるため，**沈下板**を設置し，沈下量と沈下時間の関係を計測し，沈下変状を監視する。

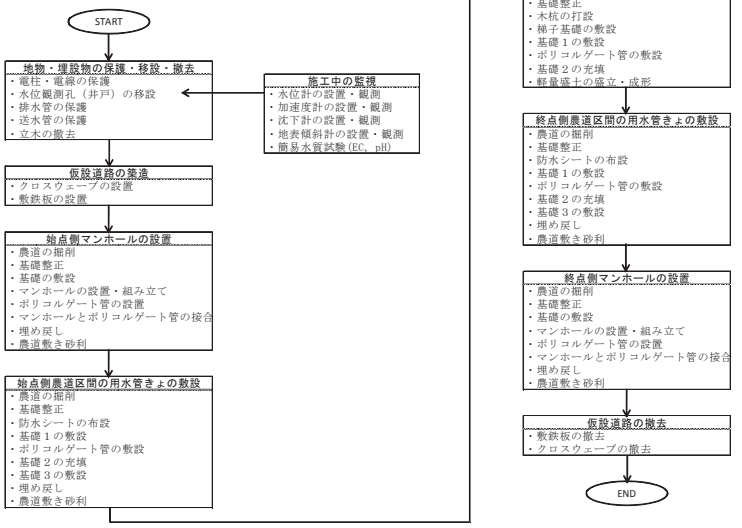


図３　施工フローの中における施工中の監視

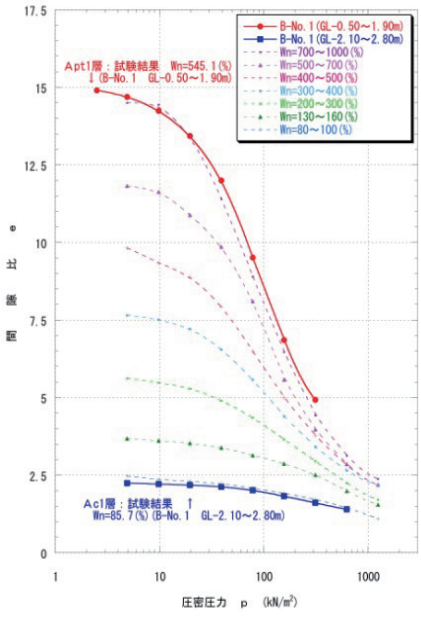


図４　ｅ～ｌｏｇｐ曲線群

３．データ収集分析

地盤状況：図１に示すように谷地湿原側の表層には高有機質土(Apt)が約2mの層厚で分布している。その間隙比はe=14.041，含水比はｗ=545.1%である。また，この高有機質土のｅ～logｐ曲線を**図４**に示す。

地下水調査結果：谷地湿原の地下水には鉄(Fe)とマンガン(Mn)を多く含んでいるが，水道水源の水にはこれらが含まれていないことから，谷地湿原の地下水と水道水源の水は，異なる水質であると判断した。

地下水の流動方向：谷地湿原の地下水の流動は，明確な流動方向は得られなかったものの，谷地湿原側から水道水源方向に向かう地下水流動は見られなかった。

地下水位の変動：水道水源の取水槽の水位変動は，約1.5mである。谷地湿原の地下水位変動は，降水後に水位が0.03～0.13m程度上昇するがすぐに戻り，水源取水槽の水位変動に連動した水位変動は見られない。

これらのデータをもとに，谷地湿原(市文化課・文化庁)および水道水源(市水道局)と３者協議を数回に亘り行い，**図５**の緑線に示すような管きょ敷設ルートを決定した。

解析結果：決定した敷設ルートに対して調査結果を基に，すべり安定解析，沈下解析等を行い，管きょ敷設基礎構造を決定した。

最終管きょ敷設ルート（取水施設のり尻までシフト）

- 盛土の安定解析結果：最小安全率Fs=1.18
- 盛土による圧密沈下量：0.16m～0.17m

対策工として鳥居基礎＋軽量盛土を提案

- 盛土の安定解析結果：最小安全率Fs=1.24
- 盛土による圧密沈下量：0.09m～0.14m

沈下対策として木杭を提案

表１に協議結果および検討結果の最終結論を示す。

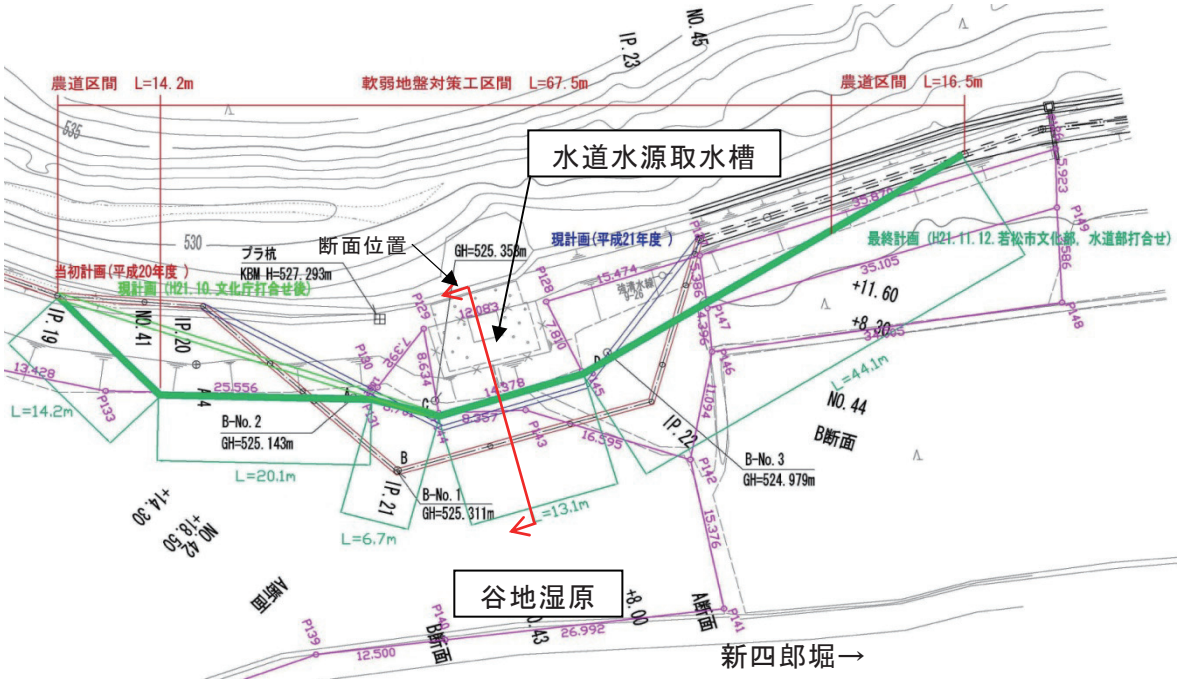


図５　管きょ敷設ルートの変遷

表１　協議結果・検討結果の最終結論

	内　　容
軟弱地盤対策	・沈下防止，地下水流動阻害防止対策：鳥居基礎(地場の松材・松杭を使用) ・積雪時の偏荷重による横方向の土圧に対策：松杭を管きょの谷地湿原側へ設置
水道水源地に関する項目	・水道水源になるべく遠いところで谷地湿原側に迂回させる。 ・迂回するための農道掘削時には，水源地山側からの地下水が谷地湿原側に流出しないように遮水シートを設ける。 ・豪雨時の表流水の排水は，水源山側と農道の間の水路で縦断的に流下させ，水源地から約100m先で農道を横断排水させる。 ・施工時の水質汚濁が無いような施工方法に留意し，種々の計測監視を行う。
谷地湿原に関する項目	・用水管きょの敷設位置は，極力谷地湿原側に入らないルートとする。 ・谷地湿原内にはコンクリート構造物・製品は用いない(マンホールは不可)。 ・谷地湿原内の管きょは，盛土により保護を行い，盛土材には，近隣の山砂あるいは環境に配慮した軽量盛土材を用いる。 ・植生は，時間がかかっても地場の植生が生えるのを待つこととする。 ・施工時の仮設道路は，谷地湿原側へ荷重分散型の軽量仮設材で構築する。

４．マネジメントの効果

(1)用水管きょの敷設工事

工事費は，リスクを回避するための調査費，施工費とも多くなり，当初予算の￥7,600千円から総額で約 3.5 倍の¥26,800 千円と大幅な増額となった。

(2)水道水源水への影響

施工方法の見直し,施工中の監視から水道水源水への汚濁等の影響は見られなかった。

(3)谷地湿原への環境影響

ルート変更，仮設方法の見直しから直接的な環境影響は見られなかった。また，８月末現在，谷地湿原の植生も回復し，盛土のり面にも在来種の植生が見られている。

以上のように，本事例においては，事業の最終段階において水道資源を回避するために天然記念物である谷地湿原への用水管きょ設置することを余儀なくされたことから発生するリスクを予測し，これらのリスクに対応した調査・設計・施工計画を行った結果，大幅に工事費が増とはなったものの水道水源水の汚濁は無く，また，谷地湿原への環境影響を最小限に抑える施工を行うことが出来た。

５．データ様式の提案

Ａ．地質リスクを回避した事例

大項目	小項目	データ
対象工事	発注者	湊土地改良区
	工事名	基盤整備促進事業
	工種	水路工事
	工事概要	用水管きょの敷設工事
	①当初工事費	¥7,600 千円　(施工延長 108.5m)
	当初工期	H23.3
リスク回避事象	予測されたリスク発現時期	H20 調査受注時～H20 調査竣工時

	予測されたトラブル		高有機質土の沈下 水道水源水の汚濁・涸渇 谷地湿原生態系への環境影響
	回避した事象		沈下，汚濁，環境影響
	工事への影響		工事中の振動等を計測監視
リスク管理の実際	判断した時期		当初調査開始時(H21.1)
	判断した者		コンサルタント技術者，発注者
	判断の内容		軟弱地盤対策が必要なこと，工事中の水道水源水の汚濁・涸渇および谷地湿原生態系への環境影響を最小限とすること
	判断に必要な情報		谷地湿原の地盤状況及び工学的性質，地下水の流れ，地下水の水質等
リスク対応の実際	内容	追加調査	機械ボーリング 3 孔 標準貫入試験 室内土質試験(物理，圧密，三軸) 地下水流向流速試験 水質試験(Ec，ｐH，イオン分析等) 地下水位の観測(水源，谷地等)
		修正設計	ルート変更　(施工延長 98.2m)
		対策工	ルート変更に伴う谷地湿原側の仮設道路 施工中の汚濁監視等
	費用	追加調査	1,000 千円(H20)，5,500 千円(H21)
		修正設計	(H21 地質調査に含まれる)
		対策工	仮設道路¥3,200 千円 汚濁監視等¥2,300 千円
		②合計	¥12,000 千円
変更工事の内容	工事変更の内容		鳥居基礎工＋木杭工
	③変更工事費		¥14,800 千円　(施工延長 98.2m)
	変更工期		H23.4　(東北地方太平洋沖地震により遅延)
	間接的な影響項目		―
	受益者		強清水地区約 40ha
リスクマネジメントの効果	費用 (①－③－②)		-¥19,200 千円
	工期		H23.4
	その他		受益者保護，水道水源保および谷地湿原の環境保全

［論文 No. 21］　　堤体腹付け盛土による近接家屋への影響予測事例

茨城県道路公社　　石川　昭
茨城県道路公社　　永井　啓
応用地質株式会社　○正岡　裕之

1. 事例の概要

本事例は、道路橋新設に伴う取り付け道路と河川堤防の交差部付近において、堤体腹付け盛土に伴う近接新築家屋（以下、家屋）への影響が懸念されたため、工事前に調査・解析および対策工の検討を行い、対策工を施すことで地盤リスクを回避した事例である。

当該地では、道路本線で調査ボーリングが実施され、道路本体盛土による家屋への影響は検討されていたものの、堤体の腹付け盛土に伴う家屋への影響検討は行われていなかった。このため、工事では、堤防横断方向（解析断面：図 2）の地盤構成および地盤物性を把握することを目的として、調査ボーリングを行うとともに、FEM 解析による盛土に伴う家屋への影響予測を行い、対策工を施工した。施工前後および施工中は、定点観測を行いながら慎重に工事を行うことによって、家屋へ影響をおよぼすことなく地盤リスクを最小限に回避することができた。

図 1　橋梁新設箇所図

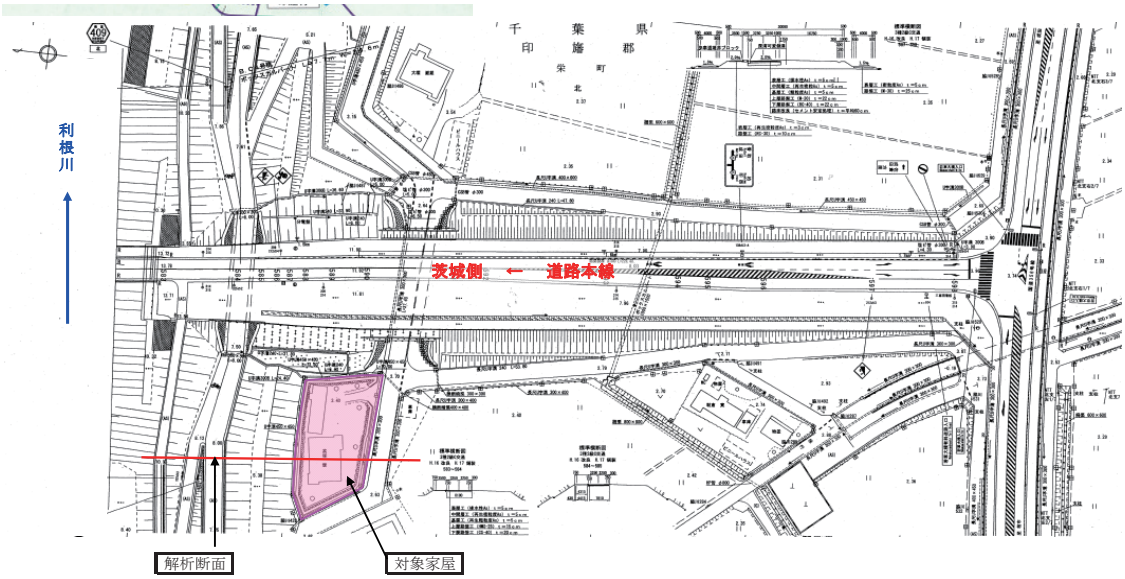


図 2　対象地概要図（対象家屋および解析断面位置）

2. 事例分析のシナリオ

(1) リスク回避に至るプロセス

本線における既往調査ボーリングの結果から、当該地に分布する地質は、深度 58.0m（標 Y.P.-55.5m）以深に分布する N≧50 の砂層を支持層とし、深度 6m 付近までは粘性土を主体とする盛土と緩い砂が分布し、深度 38m付近までは N=0～1 の非常に軟質な沖積粘性土が分布することが明らかとなっていた。このため、本線盛土に伴う家屋への影響検討は行われており、万全な対策がとられていた。

一方、堤体の腹付け盛土に対しては、盛土のり尻部が官民境界まで施工される計画であり、官民境界と家屋までの離れが 5mと非常に近接しているにも関わらず、調査・解析および対策工の検討は一切行われていなかった（図 4 参照）。

このため、図 3 に示す検討箇所においては、追加調査を実施し、対策工の検討を行うこととした。腹付け盛土が家屋におよぼす影響には、盛土による基礎地盤のすべり破壊と引き込み沈下が想定されるため、解析手法は、すべり破壊に対しては円弧すべり計算、地盤変位は FEM 変形解析（粘弾塑性解析）で実施する方針とした。

(2) 想定されるリスクマネジメント

追加調査実施前および解析条件設定時には以下の課題があった。

①解析断面上での地盤構成および地盤物性等が明らかになっていない。

②堤体部地盤の土質定数が明らかになっていない。

③腹付け盛土の材料は決定しておらず、物性も明らかになっていない。

④家屋は新築物件であり、宅地は高さ 2m の盛土が施工されている。このため、将来的には宅地盛土自体による地盤沈下や変形が生じる可能性があり、家屋の変状が施工によるものか否かの判断が困難になることが予想される。

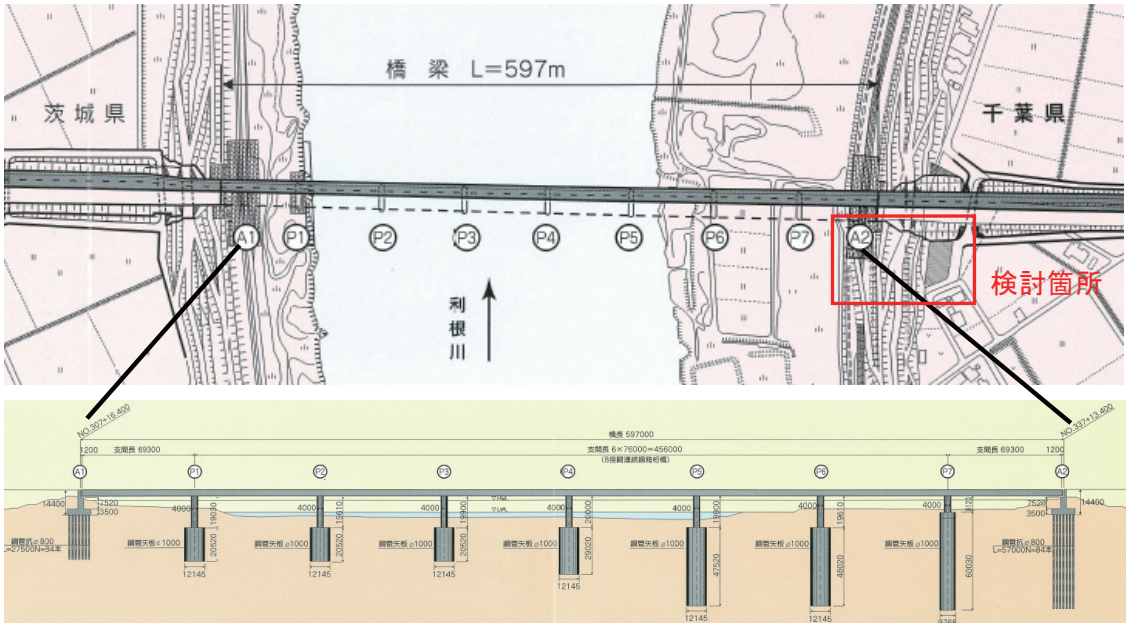


図 3　橋梁部平面・側面図

このため、追加調査実施時および解析時においては、前述の①～④について、以下のとおり対応した。

①については調査ボーリングおよび室内試験を追加実施した。

②の堤体部地盤の土質定数については、本線の既往調査結果から設定した。

③の腹付け盛土の材料については本線盛土と同等の材料であると仮定した。

④については、例え宅地盛土の影響であるにせよ、家屋へ変状がでた場合には、保障の問題になる。宅地の基礎条件や地盤構成等については、不明な部分が多いため、宅地盛土による変形を含む盛土直後および経過後の家屋の傾斜角について解析し、施工による影響が軽微となる対策工を選定することとした。

なお、設計目標値として、すべり破壊に対する最小安全率 F_S は F_S=1.25（日本道路協会）とし、家屋の許容傾斜角は建物両端部の傾斜角（(家屋両端の鉛直変位差）/家屋延長)）として 4/1000 に設定した。

また、追加調査の結果から、変形に最も影響をおよぼすであろう沖積粘性土においては、物性値の違いから、深度 20m（Y.P.-17.5m）を境に上部の汽水性堆積層と下部の浅海性の堆積層に 2 分し、さらに下部層では、堆積後の海退による塩分の溶脱により塑性限界が低下して鋭敏な粘性土になっているものと想定されたため、沖積粘性土の定数を細区分して地盤解析を行った。

本事例における地盤解析モデルと改良断面図は図 4 に示すとおりである。

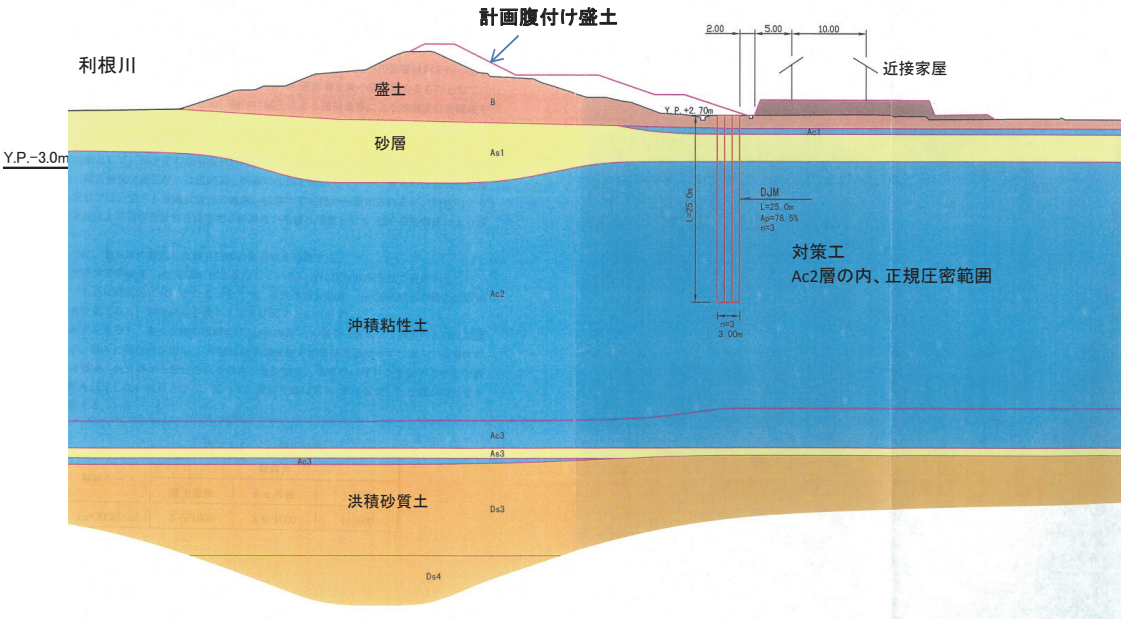


図 4　地盤解析モデルと改良断面図

3. データ収集分析

(1) データ収集

本事例では、追加調査および工事資料について発注者から情報提供頂いた。

出来形管理報告書等、貴重な資料を入手することができたが、施工年が古いため、記録図書の一部は保存期間が過ぎ破棄されたものもあり、工事費に関する十分な資料は得ることができなかった。

(2) データ分析

本事例の場合、道路本線における既往調査資料があるほか、解析断面上で地盤構成および地盤性状を把握するための追加調査を実施することができた。

しかしながら､予算や管理区域等の制約から堤体部地盤の地盤状況が把握できなかった。

また、解析時点では盛土材料が決定しておらず、材料特性が不明なまま、解析のための定数を設定する必要があった。

このため、解析に用いた定数については、道路本線で行われていた動態観測結果との対比を行うことによって、その妥当性を検証する必要があった。

結果的には、堤体材料が道路本線盛土と同等の材料が使用されたことや、地盤定数についても道路本線の動態観測結果と対比することによって、その妥当性の検証が行えたことにより、家屋に影響なく施工ができたものと考える。

これまでの経験から、一般に、調査・解析段階で、盛土材料が決定している場合は少なく、解析を行う上でさまざまな不確定要素を抱えたまま検討される場合が多いが、調査・解析段階において、検討の諸条件がある程度明確になっていれば、よりコストを縮減した対策工事の検討ができるのではないかと考える。

4. マネジメント効果

(1) リスク（低減）の計量化

本報告では詳細に触れていないが、対策工事を施工する場合の家屋への影響リスクとして、施工機械が大型であることや、トラフィカビリディーを確保するためのサンドマットを敷設する必要があることから、施工時における家屋への影響が懸念された。このため、腹付け盛土による家屋への影響のほかに、エアー回収孔や変位吸収溝などの設置、改良体の打設手順等に配慮が必要であったが、これらに掛かった費用の資料はないため、本事例で計量化することは難しい。

(2) リスクマネジメントの方法

本事例では、施工前段階で、施工計画および地盤構成および地盤性状の把握した上で、測量・土木および土質技術者が堤体盛土に伴う家屋への影響を予測・評価し、対策工の選定および最適工法の決定を行うとともに、家屋調査を行い、対策工を施工する必要があった。また、施工中は、工事施工者が家屋調査で設定した定点の観測を行いながら、家屋の変位を監視して工事を進める必要があった。さらに、施工後の段階では、施工による家屋への影響はなかったことを確認するため、再度家屋調査を実施した。このように、地盤に

関わるリスクも、その時々で変化し、対応する技術者も変わるため、今後はこれら一連の過程を監理できる技術者を育成することが望まれる。

(3) マネジメントの効果

地盤リスクについてマネジメントすることは、問題を早期に解決できたり、事前に対策を施すことによって事象を回避できることになるため、コスト縮減につながるものと考える。また、工事中に発現した事象でも、発生の誘因や原因の究明を行って対策工事を施すことによって、工事費を最小限に抑えることができるものと考える。

ただし、工事中に発現した事象に対する対策工事費を確保するよりも、初期段階で予算を確保しておくことの方が予算は確保しやすいと考えられるため、できる限り初期段階において、想定される地盤リスクを回避するためにも、必要な調査・解析および設計を実施しておくことが望まれる。

(4) 地質調査妥当投資額

地質調査投資額として、どの程度が妥当であるかは対象地の地盤リスクの度合いによって変わるため、一概には決められないが、本事例の場合は、初期工事費の約 4%程度であったものと想定される。なお、ここでの初期工事費とは、地盤改良工事費および家屋全損保障額を合わせた想定の金額とした。

(5) 求められる技術顧問の能力

地質リスクを予見するには、対象地の地質や土質に対する判断が必要であるとともに、設計に関する基礎知識や事例を多数経験してきた熟練技術者が必要である。

しかしながら、このような熟練技術者は数少ないため、若手技術者が事例集などを通して、多数の事例を経験できるように、整理しておくことが非常に重要であると考える。

事例の蓄積は、リスクが発現した時の判断を早めるだけでなく、最悪のシナリオを回避してコスト縮減に寄与することになるものと考える。

5. データ様式の提案

本事例のデータは、A 表（地質リスクを回避した事例）に記入した。

本事例は、事前に地盤リスクを予見し回避した事例であるため、A 表作成には時間がかからなかったが、工事費に関する資料が一切なかったため、初期工事費としてどの程度の予算を組んでいたのか、工事費に実際どの程度かかったのかは予想で記入するしかなかった。

記入して感じたことは、工事費やリスク対応の実際にかかる費用等は、実施年により異なるため、今後データを蓄積していく上で、リスク回避年・月および記入年・月（新規・更新）の記入は必要であるのではないかと感じた。

A表（地質リスクを回避した事例）

記入年・月(2011年8月)/新規

対象工事	発注者		茨城県道路公社
	工事名		腹付け盛土地盤改良工事
	工種		地盤改良工事
	①初期工事費		150,000,000
	当初工期		道路供用開始　平成18年4月
リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		道路改良工事中
	予測されたトラブル		近接家屋の変状
	回避した事象		地盤改良工事による地盤変位の抑制
	工事への影響		近隣家屋が変状した場合には補償等の問題で、供用開始が延期になる可能性もあった。
リスク管理の実際	判断(した) 時期		道路改良工事中
	判断した者		発注者
	判断の内容		堤体腹付け盛土に伴う地盤変形による近接家屋への影響が懸念されたため、地盤解析・設計を行い、対策工事を実施した。
	判断に必要な情報		地盤構成、地盤の物理的性状、地盤の強度・圧密特性
リスク対応の実際	内容	追加調査	ボーリング、サウンディング、室内試験、配合試験、六価クロム溶出試験
		設計	対策工法の検討、最適工法の決定、地盤改良工の設計
		対策工	地盤改良工(改良長25m,改良本数140本,施工延長3,500m)
	費用	実施年・月	平成16年2月
		追加調査	5,000,000
		設計	1,000,000
		対策工	30,000,000
		②　合計	36,000,000
変更後工事の内容	工事変更の内容		－
	③変更後工事費		－
	変更後工期		－
	間接的な影響項目		施工前後の家屋調査および施工中の定点観測
	受益者		－
リスクマネジメントの効果	費用(①－③－②)		114,000,000
	工期		変更なし
	その他		対策工を施工したことにより、近接家屋への影響はなく、工期の変更もなかった。

参考文献

1) 渡邊法美：(財) 日本建設情報総合センター研究助成事業「地質リスク分析のためのデータ収集様式の研究」報告書、平成 20 年 8 月

2) 渡邊法美：「地質リスク分析のためのデータ収集様式の研究」、平成 20 年 11 月 11 日

3) 地質リスク学会：「第 1 回地質リスクマネジメント事例研究発表会講演論文集」、平成 22 年 9 月 24 日

4) 茨城県道路公社：道路パンフレット

5) 茨城県道路公社：「軟弱地盤解析業務委託」報告書、平成 15 年 9 月

6) 茨城県道路公社：「道路工事管理」報告書、平成 16 年 2 月

[論文 No.22]　土研式雨水曝露試験による掘削土のリスク評価

○杉山直起・魚住誠司（株式会社ダイヤコンサルタント）

1. まえがき

日本には、自然由来の重金属等を含む有害な土壌や岩石が分布している。そのため、建設発生土から有害物質の拡散を防止するための適切な対応が求められている。

今回、第三紀堆積岩試料（ボーリングコア）を用いて、土研式雨水曝露試験（以下、曝露試験）を実施する機会を得た。曝露試験の目的は、

ⅰ）短期溶出試験または酸性化可能性試験といった促進試験で「要対策ズリ」と評価した掘削ズリを曝露試験の結果と比較して、最終的な評価をすること。

ⅱ）「要対策ズリ」と評価した試料の対策工法を検討するための基礎資料を収集すること。

である。以下にその結果を紹介する。

2. 室内岩石試験（短期溶出試験、酸性化可能性試験）

土壌汚染対策法（以下、土対法）では、トンネルや切土ズリといった岩石からの溶出量についての規定がない。そこで、建設発生土については、平成 22 年 3 月に『建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）』がとりまとめられている（以下、対応マニュアル）。

全含有量試験の結果、調査地の岩石はスクリーニング基準値を超過する重金属等を含んでいるため、それらの溶出する可能性がある。そこで、短期溶出試験、酸性化可能性試験で重金属等の溶出リスクを評価した。その結果、短期溶出試験では 102 試料中 7 試料で土壌溶出量基準をわずかに超過し、酸性化可能性試験では、101 試料中 64 試料で pH(H_2O_2)≦3.5 となった。

目視観察と溶出試験の対比結果を図 1 に示す。詳細観察で、黄鉄鉱の含有量が中量または多量の場合、酸性水発生リスクのあることがわかった。また、蛍光 X 線分析結果では、硫黄含有量（S wt%）と硫黄/カルシウムモル比（S/Ca モル比）で、S(wt%)≧0.07 かつ（S/Ca モル比）≧0.40 の場合、酸性水発生リスクのあることもわかった（図 2）。

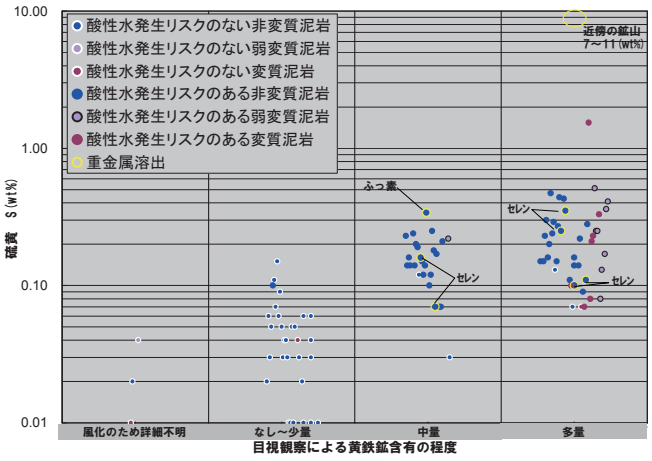


図 1　目視観察による黄鉄鉱含有の程度と S/Ca モル比関係図

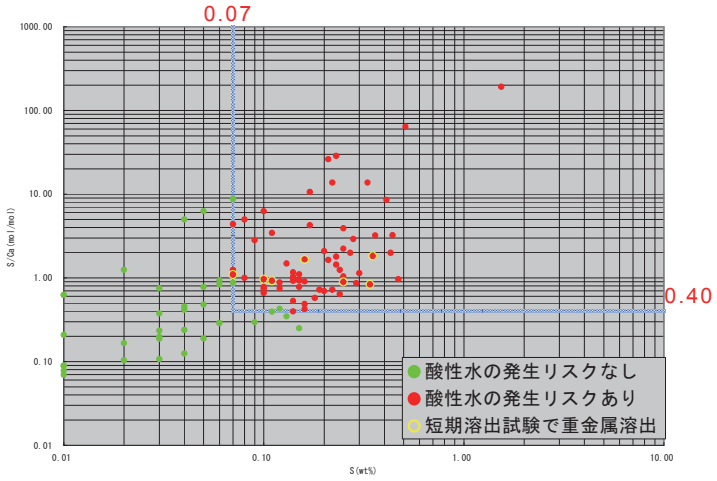


図 2　蛍光 X 線の硫黄含有量（S）と蛍光 X 線の硫黄含有量の関係図

対応マニュアルにおける短期溶出リスク評価は、試料を 2mm 以下に粉砕することから、比表面積が増加するために溶出量を多く見積もる可能性がある。そこで、実現象再現溶出試験と比較して最終的に掘削ズリを評価することが提案されている。そのため、曝露試験を実施して、掘削ズリを評価することとした。

3. 曝露試験

(1) 試料の選定

曝露試験の試料は、黄鉄鉱の産状および含有量に着目したボーリングコアの詳細観察を延べ 2,900m 実施し、

ⅰ) ボーリングコア観察で、黄鉄鉱の含有量を中量または多量と判断したもの。

ⅱ) 約 100 試料実施した短期溶出試験の結果、土壌溶出量が土壌溶出量基準を超過したもの。

ⅲ) 調査区域を代表する泥岩。

の条件を満たすものから 11 試料を選択した。

(2) 試料調整

曝露試験は、岩石試料（前述の条件を満たすボーリングコア）をφ1～4cm に調整し、ワグネルポット（1/2000a=500cm²）へ深さ 20cm 程度（重量約 13kg、コア長約 4m）を投入して実施した（写真 1、2）。

写真 1 曝露試験装置の設置状況

写真 2 試験中試料の状態

(3) 試料採取と分析

試料は 20L ポリタンクに貯留し、28 日ごとに回収、分析をおこなった。なお、1 サイクル期間中にポリタンクの容量を超える雨が予想される場合は、事前にタンクを交換して容器から溢れることがないようにした。試料採取時は、採水とともに岩石試料の状態を撮影した。また、採水試料の色も観察した。

試料の分析項目は、土対法にある重金属等 8 項目、鉄、マンガン、カルシウム、硫酸イオン、電気伝導率および水素イオン濃度である。溶出量の基準値は、重金属等 8 項目は土対法の土壌溶出量基準、鉄、マンガンおよび水素イオン濃度は水道水の水質基準に従った。

(4) 試験結果

① 酸性水の発生

曝露試験における水素イオン濃度と短期溶出試験の水素イオン濃度の関係を図 3 に示す。

ⅰ） 短期溶出試験において pH＜5.8 の試料は、試験当初から酸性水を発生し、試験終了時まで発生し続けた。

ⅱ） 短期溶出試験において pH≧5.8 の試料は、112～140 日後までは酸性水を発生しなかったが、その後は酸性水が発生し、試験終了時まで発生し続けた。

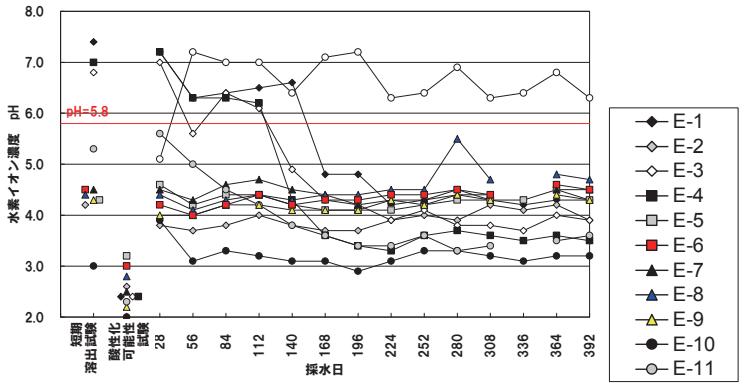


図 3　曝露試験における水素イオン濃度と短期溶出試験の水素イオン濃度の関係

②　セレンの溶出

曝露試験の結果、当初は土対法で定める基準値（0.01mg/L 以下）の数倍の濃度が溶出していた試料もあったが、3 ヶ月を経過すると、その溶出量はほぼ土対法で定める基準値内に収まった（図 4）。

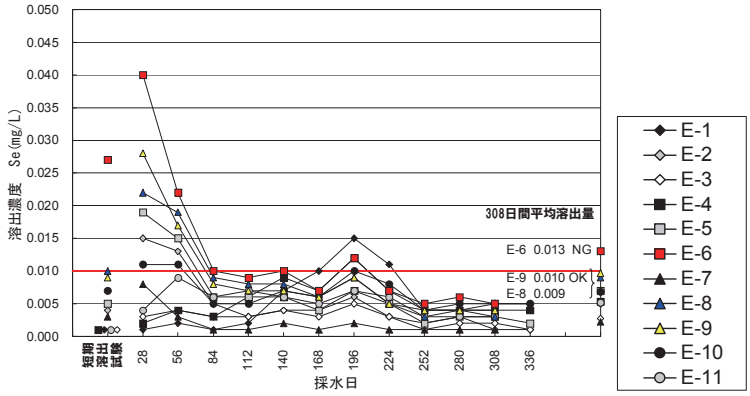


図 4　曝露試験におけるセレンの溶出濃度

③　岩石試料の風化状態

試験開始から半年を経過すると、ほとんどの試料で風化が認められるようになった（写真 3）。当初の風化の状態は、

ⅰ） キレツにより岩石試料が細片化するもの。

ⅱ） 当初は暗灰色であったが褐色を呈するようになったもの。

の 2 種類である。この試料の変化が現れた時期に、溶出量が増加し、一部の試料は土壌溶出量基準を超過した（図 4）。

試験開始時　　196 日後　　392 日後

写真 3　キレツにより細片化した試験試料の変化記録

4. 曝露試験の評価と対策工案

(1)　長期的な重金属等の溶出リスク

掘削ズリからの重金属等の溶出量評価は、総溶出水量と積算溶出水量の関係で評価することとした（図 5）。

試験試料は酸性化可能性試験の結果、長期的には酸性化し、重金属等が溶出する可能性が推定されていた。しかし、曝露試験の結果、長期的に酸性水は発生するが、重金属等の溶出リスクは低いと判断した。その理由は、試験開始直後は、11 試料のうち 6 試料の積算溶出量が許容溶出量を超過していたが､280 日(約 9 ヶ月)を経過すると、積算溶出量が許容溶出量を超過するものは 1 試料だけとなり、この傾向が続けば、現在基準を超過している 1 試料も、試験開始から 1 年半から 2 年後には許容溶出量以下になると推定されるためである。

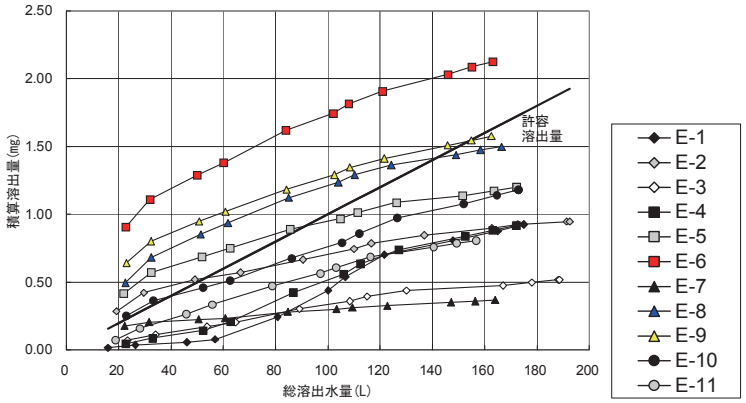


図 5　曝露試験におけるセレンの総溶出水量と積算溶出量の関係図

(2)　掘削ズリの対策工案

掘削ズリの 40%は､長期的に酸性水は発生するが、重金属等の溶出リスクは低く、その溶出量も土壌溶出量基準をわずかに超えるだけである。そのため、対策工は土対法に従えば、土壌溶出量を超過する汚染水が発生する場合､二重の遮水構造(遮水シート、粘性土、アスファルト等の組み合せ）による封じ込めを実施しなければならないが、計画路線では、盛土上面および側面に透水性の低い遮水層を設けて、盛土上部からの水の浸透をなくすことにより、酸性水の発生や重金属等の溶出を防止できると評価する。

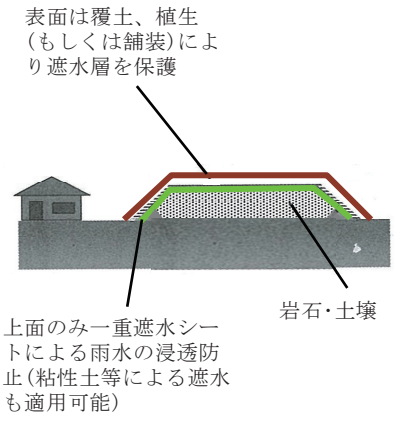


図 6　対策工概念図

遮水層材料は、施工性、経済性、確実性を考慮すれば、ベントナイト系遮水シート、樹脂系遮水シートが有効と考える（図 6）。

引用文献

建設工事における自然由来重金属等含有土砂の対応マニュアル検討委員会（2010）：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）、90p.

C. 発現した地質リスクを最小限に回避した事例

大項目		小項目		データ
対象工事		発注者		まだ公表できません
		工事名		〃
		工種		〃
		工事概要		道路
		①当初工事費		着手していないため未定
		当初工期		〃
発現したリスク	リスク発現事象	リスク発現時期		平成 18 年頃
		トラブルの内容		酸性水・自然由来重金属等
		トラブルの原因		主に第三紀海成泥岩
		工事への影響		あり
	追加工事の内容	追加調査の内容		—
		修正設計内容		—
		対策工事		着手していないため未定
		追加工事		〃
		追加費用	追加調査	〃
			修正設計	〃
			対策工	〃
			追加工事	〃
			②合計	〃
		延長工期		〃
		間接的な影響項目		〃
		負担者		〃
最小限に回避したリスク	リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		平成 18 年頃
		予測されたトラブル		酸性水・自然由来重金属等
		回避した事象		—
		工事への影響		あり
	リスク管理の実際	判断した時期		平成 20～22 年度
		判断した者		受注者提案・発注者了解（土木研究所には判断方法を相談）
		判断の内容		酸性水・自然由来重金属等の溶出
		判断に必要な情報		観察・蛍光 X 線分析
	リスク対応の実際	内容	追加調査	着手していないため未定
			修正設計	〃
			対策工	〃
		費用	追加調査	〃
			修正設計	〃
			対策工	〃
			③合計	〃
	回避しなかった場合	工事変更の内容		〃
		④変更後工事費		〃
		変更後工期		〃
		間接的な影響項目		〃
		受益者		〃
リスクマネジメントの効果		費用④－（①+②+③）		〃
		工期		〃
		その他		〃

［論文 No. 23］　　高千穂峡の観光地としての管理と地質リスク

宮崎県高千穂町役場建設課　佐藤　雄二
宮崎県高千穂町役場建設課　佐藤　峰史
株式会社建設技術研究所　○遠座　　昭
フェニックスコンサルタント株式会社　田邉　憲祐

１．事例の概要

宮崎県北部に位置する高千穂峡は、天孫降臨伝説で知られ年間 150 万人の観光客を集める宮崎県下屈指の観光地である。高千穂峡は、阿蘇火砕流の溶結凝灰岩からなる垂直の崖が連続し、溶結凝灰岩に特有の柱状節理や日本滝百選の真名井の滝などの景観が神話とともに観光の目玉となっている。

高千穂峡には遊歩道が設置され、峡谷内は手漕ぎボートで遊覧でき、観光スポットとなっている。

図-1　高千穂峡の状況（真名井の滝）

高千穂峡内への観光客のアクセスは町道高千穂峡線であり、峡谷内を横断している。高千穂峡では阿蘇火砕流からなる峡谷美が観光資源となっており、景観を満喫するために、溶結凝灰岩からなる急崖に観光客が接近することになる。このため、管理者としては急崖斜面の崩落や落石などの災害から観光客を守ることが必要となる。このような中、平成 20 年６月には遊歩道に近接する急崖が柱状節理の節理面に沿って崩壊し、高千穂峡へのアクセスである町道御塩井～下押方線が被災するとともに、崩落した岩石が遊歩道を埋め尽くす災害が発生している。

図-2　遊歩道脇の崩壊箇所対策後の状況

本事例報告は、今後の町道改修、峡谷部の観光地としての維持管理に際し、出現した地質リスクを回避した事例である。

なお、高千穂峡の急崖は、①遊歩道から上位、日形をはじめ峡谷の重要な景観を占めている高さ 70m以上の直壁部と②町道より下位、五ヶ瀬川河床に面する高さ約 20m の急崖部に区分できる。

このうち①では、景観を考慮した対策工として接着工、除去工を行うことが考えられるが、地形的に困難であり、道路改修計画において線形を谷側に移動し転石のリスクを減らすこと、駐車スペースなどを設けないことにより急崖直下への観光客の滞留を少なくすることによる対応としている。②の急崖部ではボート客への影響を考慮した対策を行っている。本稿では②の御橋部分の峡谷部について述べる。また、これ以外に高千穂峡上流部の

町道～遊歩道間では、豪雨時の路肩の崩壊に対し、崩壊面の岩盤スケッチを行い、緩み部分の除去、エアモルタルでの路肩の修復、表流水の崩壊箇所への流入防止などの応急対策を実施している。ここでは、恒久対策として町道崩壊箇所の路面より下位の急崖部を対象に、別途、宮崎県環境森林部による浮石の除去と、景観に配慮したロックボルト工、岩盤接着工が行われている(図-２)。

２．事例分析のシナリオ

(1) リスクの出現過程

本事例の課題は、観光客に近接する箇所で、岩盤の崩落など観光客の安全に対するリスクが存在することであり、当地を訪れるボート客をはじめ観光客が安全で楽しめるように対策を講じることが必要である。さらには、観光客の安全と観光資源としての景観確保を両立させ、しかもコストに配慮した対応が求められる。

当該地区での地質リスクの出現は、これまでも急崖斜面の崩壊、落石などの形で現れており、道路等の災害は道路管理者である高千穂町建設課が対応し、峡谷内に関しては高千穂観光協会によって定期的に浮き石の防除が行われている。

町道改修の測量設計業務の一環として御橋橋台付近で開口性亀裂が橋台基礎に与える影響を調査し、橋台に関しては問題ないことを明らかにした。また、この過程で、昭和 25 年竣工の御橋は橋台基礎工事の際に開口亀裂の一部をコンクリートで置き換えていることが確認され、橋梁竣工当時すでに開口亀裂が存在し、その後割れ目の開口がほとんど進行していないことを明らかにした（図-3～図-5)。

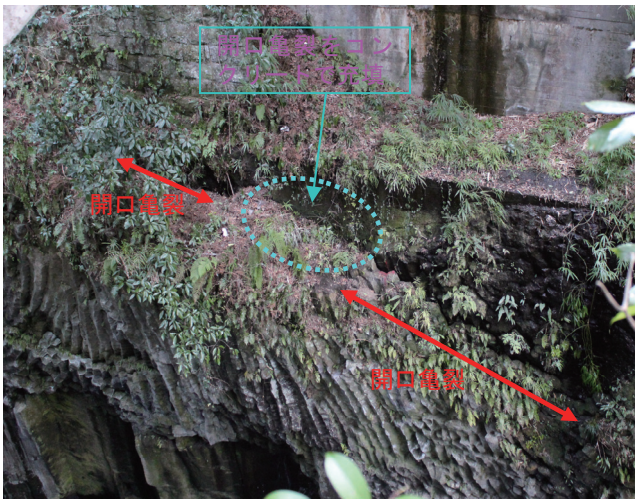


図-3　御橋橋台付近の開口亀裂

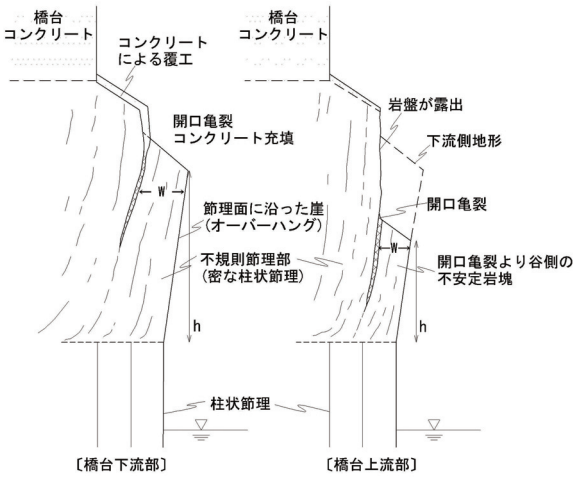


図-4　御橋橋台の模式地質断面

(2) リスクへの対応

①これまでの対応

高千穂町では、これまで急崖部の崩壊から町道および観光客、観光施設を保護するため、道路管理を行うとともに、高千穂峡のボート遊覧箇所では観光協会により急崖斜面の浮石の除去と開口割れ目の目視観察を行っている。

②今後の対応

・今回、開口亀裂の連続性と安定度を地質的な観点から現地調査するとともに、定点での

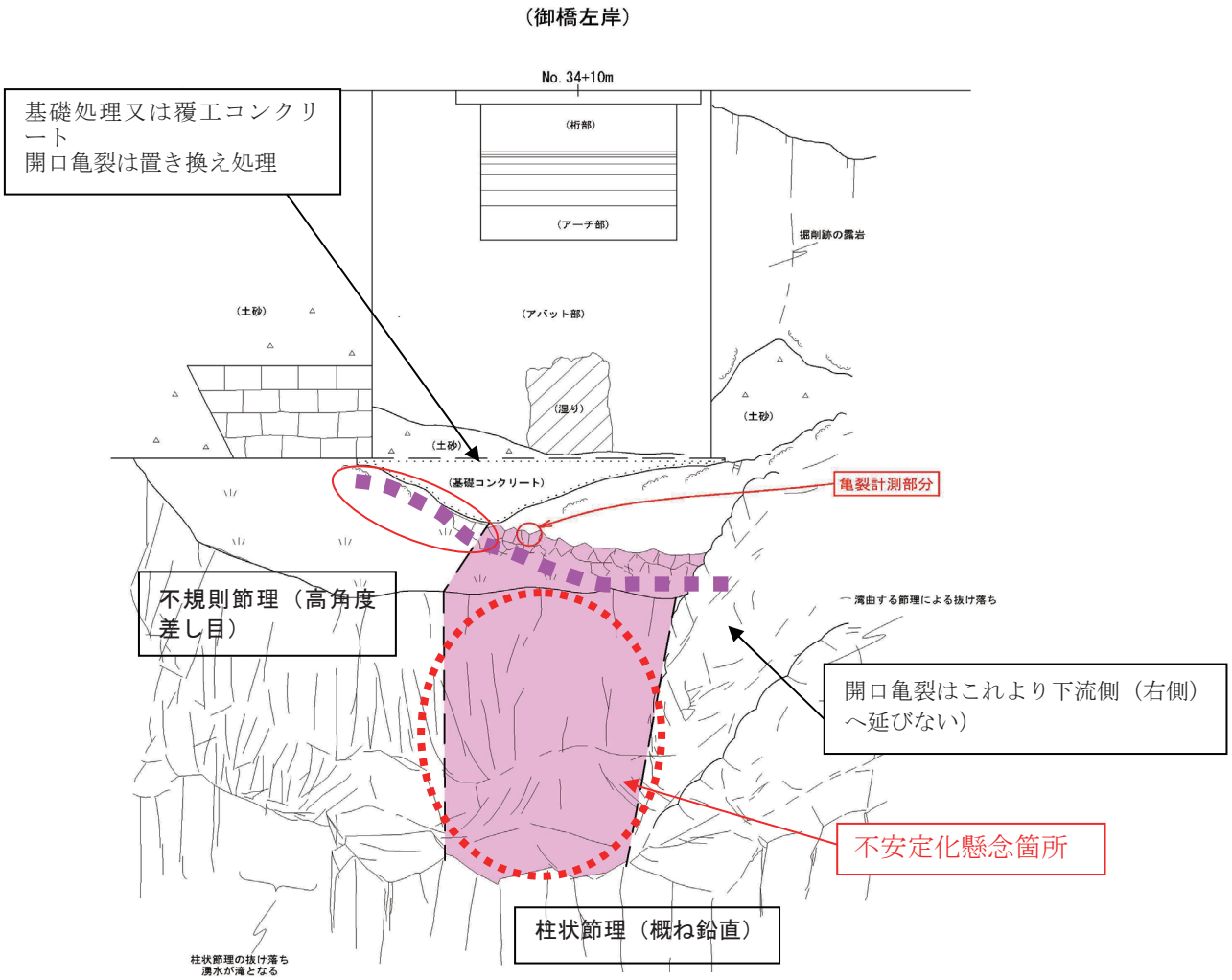


図-5　御橋左岸側の急崖部の状況（正面図）

割れ目計測と景観に配慮した斜面安定対策を計画している。

今後の対応としては、開口部割れ目の充填（岩盤接合補強）と鉄筋挿入工が考えられる。しかし、急崖の安定性確保と観光資源としての景観の確保を考えた場合、ボート客が近接する峡谷内での鉄筋挿入工は景観の面から望ましくない。

・町道直上の高さ約 70mの急崖対応として、現地での転石の平面的な分布を調査し、転石の範囲を確認。また、急崖部の開口亀裂発達の状況を確認。斜面の安定化を図るには斜面の掘削、対策工（アンカー、ネットなど）が必要である。ただし、観光地としての景観やコストを考慮するとこれらの対策工は現実的ではない。町道の改良計画では、急崖下に駐車スペースを設けない、遊歩道での観光客のメインルートを迂回させるなどの対策を講じている。

３．データ収集分析

本事例で収集したデータとしては、高千穂町観光協会の保全対策資料、高千穂町が町道の崩壊箇所で応急復旧を行った事例である。

本業務は町道の改修に伴う測量･設計業務の一環として行っており、この段階で横断測量

を実施しているが、地質調査は、急崖部の現地踏査を除きボーリング調査など実施していない。なお、平成 20 年6月の町道御塩井～下押方線被災箇所斜面では、後に宮崎県環境森林部によって景観に配慮した恒久対策が実施されており、現地で施工後状況を確認した。

マネジメントを実施しなかった場合の工事費は、今回の現地調査の情報を基に概算を算出した。

4．マネジメント効果

(1)リスクの計量化

観光客の安全を図るという点では、コスト比較だけで論じられない側面がある。

マネジメントを行わない場合の損失は、『岩盤の崩落に伴う遊覧ボートの営業中止に伴う営業収入の減少』のほか、『事故報道などによるイメージ低下・観光客の減少』、『対策工事に伴うコストの発生』などがあげられるが、ここでは、定量化しやすい『岩盤の崩落に伴う遊覧ボートの営業中止に伴う営業収入の減少』のみを考慮し、マネジメント効果を想定した。

観光収入を年間 127,300 千円(ボート貸し出し実績 95,500 千円およびボート客が利用する駐車場代 31,800 千円) と想定するとし、事故が発生し 3 ヶ月間営業を中止した場合の損失は、おおよそ 31,8000 千円程度と見積もられる。

開口亀裂に対する対策工としては、岩盤接合補強工法（特殊モルタルによる接着）もしくは岩盤接合補強工法と鉄筋挿入工法の併用が考えられる。工事費と設計費は合わせて、それぞれ 7,800 千円と 10,300 千円程度が見込まれる。併用案の方が確実性は高いが、併用案は鉄筋挿入箇所が峡谷内のボート客にきわめて近接する箇所であり、ボートからの峡谷の景観を損ない、観光価値を低下させることが考えられる。このため、リスクマネジメント効果は、岩盤接合補強工法単独の場合と比較を行っている。

表-1　マネジメント効果の算定

ケース	内容	工事費	備考
①リスク回避なし（現状:想定）	工事費	0	
	事故による損失(想定)*1	31,800 千円/3 ヶ月	3 ヶ月営業中止と想定
②リスク回避の場合（想定）	工事費＋設計費*2	7,800 千円	
	事故による損失（想定）	0	
リスクマネジメント効果（①－②）	半年間営業中止の場合	24,000 千円	

*1　2009 年ボート貸し出し実績（30 分 1,500 円）95,500 千円より、ボート客の駐車場利用(500 円/日)を含めて想定

*1　事故による損失としてイメージ低下によるボート利用客の減少が想定されるが、ここには含まない

*1　事故による復旧工事がこれに追加で発生することになるが、事故後の対策工事費は含まない

*2　対策工実施時のボート営業収入減を含まない

(3)技術顧問の重要性

高千穂峡は、溶結凝灰岩からなる峡谷美をボートから間近で見ることができ、人気を集

めている。このことは同時に、岩盤の崩落や落石など特有の地形・地質に起因する事故の可能性をはらんでいることになる。

高千穂町は、年間平均降水量約 2,300㎜と多雨地域にある。また、高千穂峡がある五ヶ瀬川流域では、豪雨に伴いたびたび阿蘇溶結凝灰岩からなる急崖斜面の崩壊が発生している。観光客の安全性を確保することが観光地としての最重要課題であり、学識経験者、地質技術者などの地質リスク対応への参加し、安全な観光地であること重要である。

５．データ様式の提案

本事例は、岩盤崩壊事故発生の可能性はかなり低いと考えられるが、発生した場合、観光地としてのイメージ、観光収入の減少等の影響が大きいことから、リスクを回避した場合の検討を行っている。このため C 表を用いて記入した。本来対策工を想定していなかったところで地質リスクが出現し、これに要する費用と岩盤崩落事故が発生した場合の損失との比較を行っている。

表-2　発現した地質リスクを最小限に回避した事例(C)

大項目		小項目		データ
対象工事		発注者		宮崎県高千穂町建設課
		工事名		平成 22 年度　道整備交付金事業 高千穂峡線　測量・設計委託業務
		工種		道路設計、法面調査
		工事概要		道路設計（延長 0.4km）、法面調査（2 箇所）
		①当初工事費		0
		当初工期		―
発現したリスク	リスク発現事象	リスク発現時期		業務発注前
		トラブルの内容		溶結凝灰岩からなる崖の転倒崩壊 最大６ｍ×７ｍ×２ｍ程度
		トラブルの原因		溶結凝灰岩の開口亀裂
		工事への影響		対策工の追加、工事費の増大。 景観対策
	追加工事の内容	追加調査の内容		測量、踏査、岩盤スケッチ
		修正設計内容		―
		対策工事		―
		追加工事		―
		追加費用	追加調査	―
			修正設計	―
			対策工	―
			追加工事	―
			②合計	―
		延長工期		―
		間接的な影響項目		―
		負担者		―

最小限に回避したリスク	リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		対策工検討前。
		予測されたトラブル		割れ目沿いの斜面崩落、転石による観光客への災害
		回避した事象		割れ目沿いの斜面崩落、転石による観光客への災害、景観の悪化(観光価値低下)
		工事への影響		ー
	リスク管理の実際	判断した時期		業務実施時
		判断した者		地質調査業者
		判断の内容		現地確認調査により当初懸念された橋台部の安定性より、岩盤の転倒崩壊により観光客への影響が懸念される。
		判断に必要な情報		地質情報（地質構成、割れ目の状況） 地形情報（オーバーハング状況）
	リスク対応の実際	内容	追加調査	横断測量 地表踏査、岩盤スケッチ
			修正設計	ー
			対策工	割れ目充填(今後予定) 開口割れ目計測（継続）
		費用	追加調査	ー
			修正設計	1,500 千円
			対策工	6,300 千円
			③合計	7,800 千円
	回避しなかった場合	工事変更の内容		継続：浮石除去
		④変更後工事費		工事費０、観光営業収入の減少：3 ヶ月間で 31,800 千円程度想定
		変更後工期		ー
		間接的な影響項目		観光資源としての価値の低下
		受益者		管理者、利用者（観光客）
リスクマネジメントの効果		費用④－(①+②+③)		24,000 千円（ボート利用客を想定）
		工期		ー
		その他		ー

[論文 No. 24]VOCｓによる土壌・地下水汚染調査・措置を地質リスクの観点より考察した事例

株式会社日さく北信越支社　○荒井　　正
株式会社日さく東日本支社　　渡辺　　寛
株式会社日さく東日本支社　　堀　　信雄

１．事例の概要

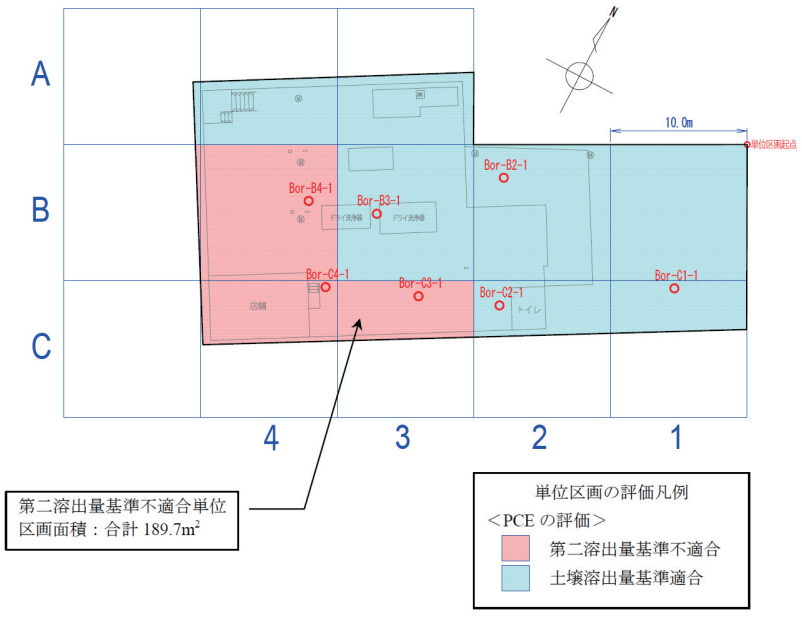
廃業したクリーニング工場の敷地内で確認された、第一種特定有害物質（VOCs：揮発性有機化合物）による土壌・地下水汚染の浄化対策工事において、法律（土壌汚染対策法）に定められた土壌汚染状況調査に加えて、詳細な追加調査を実施することによって汚染源となっている場所を特定し、実質的に浄化期間を短縮するとともに、浄化に関するトータルコストを大幅に縮減することができた事例（A タイプ）である。

当該地では、約 30m×20mの敷地の全面がクリーニング工場となっており、そのほぼ中央部に２台のドライ洗浄器が設置されて、昭和 63 年以降約 20 年間にわたって洗濯業が営まれてきた。このドライ洗浄器で洗浄剤（溶剤）としてテトラクロロエチレン（PCE）が使用され、地中に漏洩して土壌・地下水汚染が発生したものである。

地層状況は、深度 4.0m～5.5m に凝灰質粘土層（難透水層）が分布し、その上位のローム層と下位の砂質土層とを区分している（図２参照）。PCE は凝灰質粘土層を通過して下位の砂質土層に達していた。

土壌汚染対策法では対象敷地を 10m×10m のメッシュ（単位区画という）に区分し、この区画を最小単位として調査・対策を実施する。この土壌汚染状況調査の結果では、10 区画中 3 区画が土壌汚染された（第二溶出量不適合）区画と判断された（図１参照）。しかし、土壌汚染の汚染源となると考えられるドライ洗浄器周辺で土壌ガス濃度が低かったことから、追加調査を提案して 1m 間隔で土壌ガス調査を実施した結果、非常に高濃度の PCE が検出され、分布範囲を確定した。この高濃度区画には PCE の原液が残留しており、本地区の土壌・地下水汚染の汚染源となっているものと想定された。

ど対策工事では、当初必要がないと考えていた汚染土壌の掘削除去を高濃度区画で計画・実施した結果、短期間での浄化完了（2 年間）を達成することができた。汚染源を見つけることができないままに、比較的低濃度の汚染と考えて浄化工事を計画・実施（バイオレメディエーション工法）していた場合には、初期工費は安くなるが、浄化が進展しないために再調査を行って浄化計画をたて直すことで、浄化期間が長引き、間接的な費用を含めて全体の費用が高騰した可能性が高い。



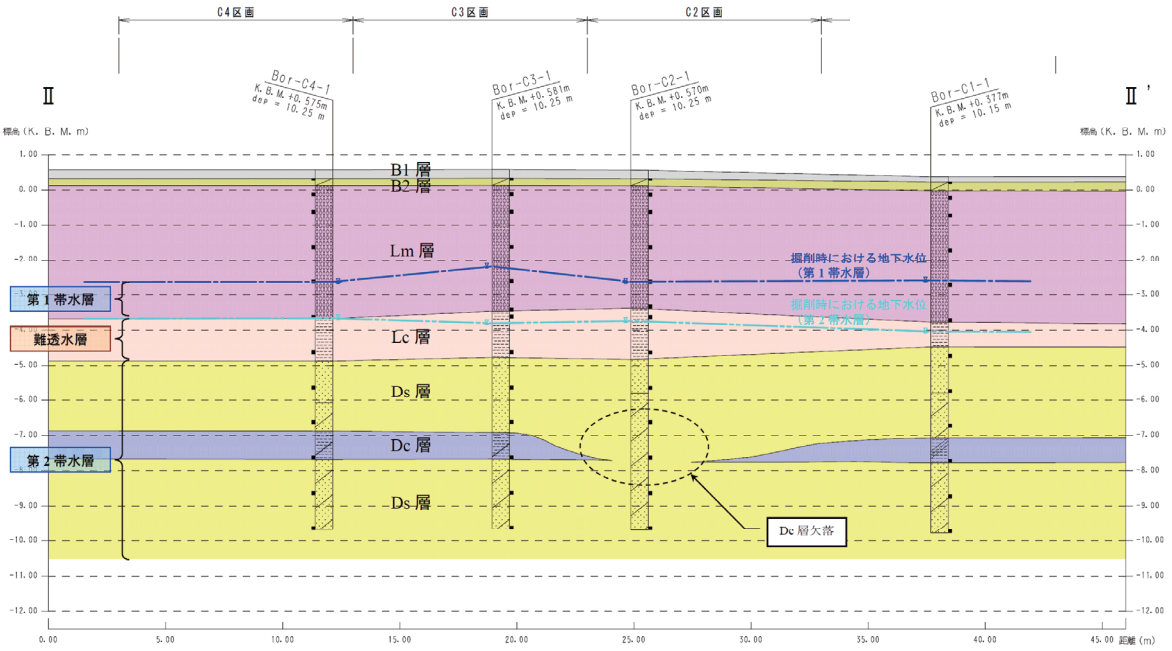


図２　当該地の地質断面図

２．事例分析のシナリオ

PCE は油の洗浄力が非常に強く、安定で難燃性であるという優れた性質を持つことから、ドライクリーニングの洗浄剤として常用されている。しかし発がん性が確認され、環境基準が定められて環境中への排出量が規制されている。

比重が水より大きく非常に浸透性が強いために、地表にこぼれた PCE は地中に鉛直に浸透し、地下水面に達しても更に地下深く浸透して粘土層のような難透水層の上部に貯まる。地下水には難溶性であるが極わずかに溶け、地下水の流動にしたがって水平方向に広がる（図３参照）。

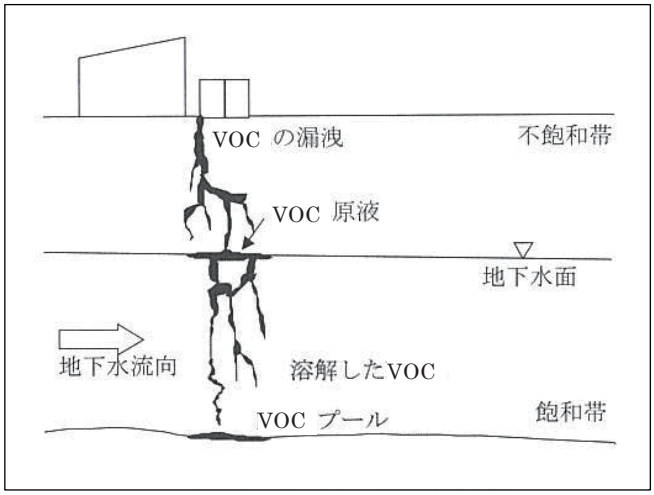


図３　VOC の浸透挙動模式図

（地盤工学会：続土壌・地下水汚染の調査・予測。対策より引用）

以上のような PCE の性質と地下での挙動が要因となり、高濃度の PCE が分布する範囲（汚染源）は非常に狭く、数 m 離れただけでも検出される濃度は大きく異なることから、汚染源を見逃してしまう場合がある。PCE の原液が地中に残存した場合、小量でも長期間にわたって地下水中に PCE を供給し続けることから、浄化の効果がなかなか現れないことになる。したがって、土壌汚染、特に第一種特定有害物質による汚染では汚染源を発見・特定して対策を行うことが重要となる。

土壌汚染対策法で定められた土壌汚染状況調査は、土壌汚染の有無を最小限の調査で評価することを目的としていることから、対策工事、特に浄化を目的とした工事を行う場合には、対象物質の性質を熟知して詳細な調査を計画・実施することが求められる。クリーニング工場の

場合には、洗浄器周辺が汚染源となっていることが多く、次いでダクトの出口、排水路沿い、PCE 保管庫、ウェスなどが捨てられるゴミ捨場に注意が必要である。

VOCs は揮発性であることから、地中のガス成分を採取して成分を分析する土壌ガス調査によって汚染の範囲をスクリーニングし、相対的に濃度が高い部分（目玉と呼ぶ）でボーリング調査を実施して、鉛直方向の土壌・地下水汚染の状況を評価する。したがって、詳細調査においては経験豊かな熟練技術者が土壌ガス調査地点を選定することで、汚染源の見落としを防止することができる。

３．データ収集分析

詳細調査では土壌ガス調査とボーリング調査を追加した。表１にその内容・数量を当初調査と比較して示す。

表１　追加調査数量

調査項目	当初調査（土壌汚染状況調査）		追加詳細調査	
土壌ガス調査	10 地点	10m ピッチ	60 地点	1m ピッチ
ボーリング調査	1 次調査：3 孔	30m	6 孔	60m
	土壌・地下水分析	42 試料	土壌・地下水分析	84 試料
	2 次調査：4 孔	40m		
	土壌・地下水分析	56 試料		

(1)　詳細土壌ガス調査結果

2 基のドライ洗浄器設置地点周辺で、1m 間隔で 60 地点の追加土壌ガス調査を実施した結果、当初調査のボーリング地点から南に 1.5m 離れた地点で、300volppm の高濃度の PCE が検出され、更に東側の洗浄器に近接して 73volppm の濃度が検出された（図４参照）。

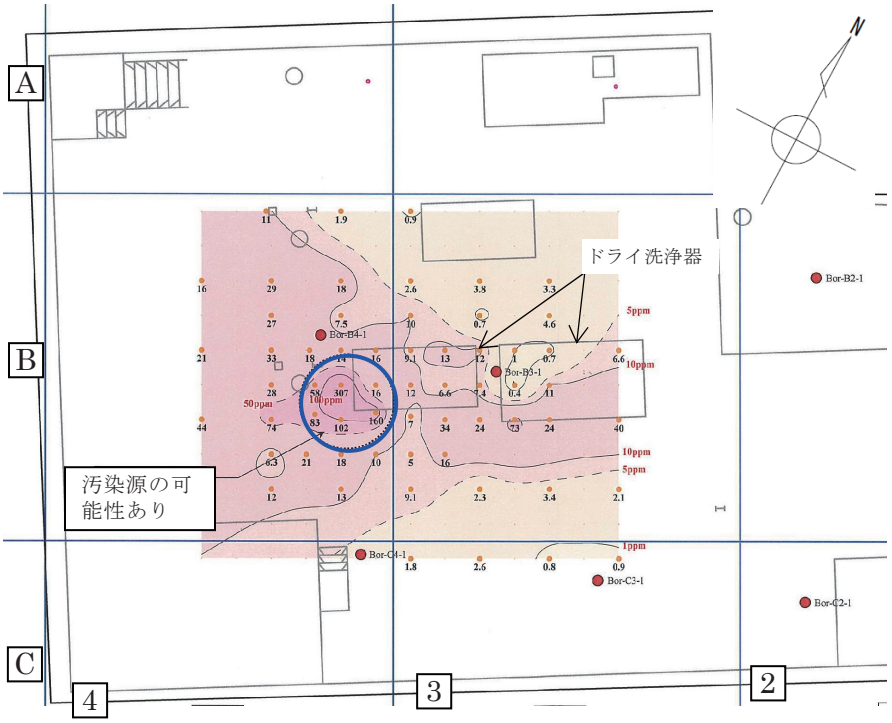


図４　詳細調査の土壌ガス調査結果（PCE 濃度分布図）

(2)　ボーリング調査結果

上述の高濃度区画でボーリング調査を実施した結果、上位のロー

ム層と凝灰質粘土層の境界部の土壌から 720mg/L の非常に高濃度の PCE が検出され、PCE の漏洩箇所（汚染源）であるものと評価した。表 2 に地層ごとの最大 PCE 濃度を示す。

なお、PCE の溶出量基準（環境基準）は 0.01mg/L である。

また、高濃度の汚染土壌が分布する範囲を確定するために、高濃度地点を囲むようにボーリングを配置して調査を行った結果、分布範囲は概ね 3m×3m、深さ 5m の狭い範囲にとどまっていることが判明した。

表２　ボーリング調査結果比較表

地層	下面深度(m)	当初調査	追加調査
表土	0.5m	0.004 mg/L	0.010 mg/L
ローム	4.0m	ND	720mg/L
凝灰質粘土	5.5m	0.026mg/L	250mg/L
砂質土	10m 以上	0.81mg/L	3.2mg/L
土壌ガス		2.3ppm	300ppm
地下水		1.3mg/L	5.0mg/L

４．マネジメントの効果

VOCs による土壌・地下水汚染の浄化工事（修復工事）の工法は多岐に渡っているが、次の 3 種類に大別できる。

●土壌掘削除去工法：汚染土壌を掘削除去し清浄土で埋め戻す工法

●原位置抽出工法：地中に存在する VOCs を地中ガスや地下水と一緒に吸引・揚水し、処理する工法

●原位置分解工法：地中に存在する VOCs を化学反応や微生物の力で分解する工法

これらの工法は、浄化能力・施工性・浄化期間・経済性などの点でそれぞれ一長一短があり、浄化計画においてはそれぞれの特徴を評価して、個々のサイトに最も適合した工法を、単独あるいは併用して採用することになる。

以下に、それぞれの調査時点で判明した結果に基づいて計画された工法について説明し、その調査・浄化工事の費用を比較して、マネジメントの効果を評価する。

(1)　土壌汚染状況調査時（当初調査時）

汚染範囲は敷地南東側の 3 区画に限定され、深度 5.5m 以下に分布する飽和帯の砂質土層が浄化対象で、最大濃度も 0.81mg/L と比較的低濃度であることから、バイオレメディエーション（微生物分解）工法を計画した。

(2)　追加詳細調査時

詳細調査によって、浅層部のローム層中で最大 720mg/L の非常に高い濃度を示す区画が確認され、ここが汚染源となっていることが想定された。また、地下水も比較的高い濃度に汚染されている区画が存在することが予想された。このため、バイオレメディエーションだけでは完全浄化は困難と判断し、汚染源に相当する部分の土壌を掘削除去したうえで地下水の揚水ばっ気処理とバイオの工法を併用する計画とした。

(3)　マネジメント効果

浄化工事費用自体の比較では、追加調査後に計画実施した工法のほうが 7,000 千円ほど安いが、汚染源を確認できないまま低濃度汚染として浄化工事を実施した場合には、浄化は完了できなかったと予想され、再調査と追加の浄化対策で同等の規模の費用が発生したと考えられる。この点を考慮すると、浄化工事費用だけでも 19,000 千円の費用が削減できたと考えられる。

さらに、本案権では 1 ヶ月に 90 万円の借地料が発生していることから、実際の浄化期間 2 年と浄化完了確認期間 2 年、合わせて 4 年分と無駄に終わったであろう 2 年間（想定）の借地料を加算すると、40,000 千円が削減されたと評価できる（表 3 参照）。

表 3　土壌・地下水汚染調査、浄化対策に関する各種工費の比較

項　目		土壌汚染状況調査時		想定詳細調査時		追加詳細調査時	
		内訳	費用(千円)	内訳	費用(千円)	内訳	費用(千円)
調査・試験費	土壌ガス調査	10 地点 10m 間隔	400	60 地点 1m 間隔	1,500	60 地点 1m 間隔	1,500
	ボーリング調査	7 孔:70m	2,590	6 孔:60m	2,220	6 孔:60m	2,220
	土壌溶出量分析	84 資料	3,659	72 資料	3,136	72 資料	3,136
	地下水分析	14 資料	610	12 試料	523	12 試料	523
	小計		7,259		7,379		7,379
		14,638					7,379
浄化工事費	微生物分解	200m²	17,000	200m²	10,000	200m²	10,000
	揚水ばっ気	－	－	3 井(10m)	9,422	3 井(10m)	9,422
	土壌掘削除去	－	－	50m³	4,626	50m³	4,626
	モニタリング(1)	2 年	2,000	2 年	2,000	2 年	2,000
	モニタリング(2)	2 年	1,000	－		2 年	1,000
	小計		20,000		26,048		27,048
		46,048					27,048
間接的費用	借地料(900 千円/月)	48 ヶ月	43,200	24 ヶ月	21,600	48 ヶ月	43,200
	利用損失		?		?		?
	小計		43,200		21,600		43,200
		64,800					43,200
合計			70,459		55,027		77,627
		125,486					77,627

5．データ様式の提案

本案件では、実際には浄化工事のやり直しは回避されているので、やり直しとなるはずの工事内容を想定してその費用を算定する必要がある。また、敷地が借地であることから、月々の借地料が発生し、また浄化期間が延長されると、本来はその利用損失も算定する必要があるが、ここでは見送っている。

表４　地質リスクを回避した事例（A 表）

対象工事	発注者		某県 A クリーニング工場
	工事名		A クリーニング工場 VOCs 対策工事
	工種		土壌汚染浄化工事
	工事概要		土壌掘削除去、地下水揚水ばっ気、微生物分解
	①浄化やり直し時の仮想の工事費		60,686 千円　　（調査費含む）
	当初工期		平成 18 年～平成 22 年（浄化完了確認期間含む）
リスク回避事象	予測されたリスク発現時期		浄化の進展が確認できなくなった時期
	予測されたトラブル		
	回避した事象		浄化工事のやり直し
	工事への影響		当初の予定通りに完了
リスク管理の実際	判断した時期		当初調査（土壌汚染状況調査）完了直後
	判断した者		調査会社の技術者
	判断の内容		存在するはずの汚染源（高濃度区域）が確認できていない（調査の実施密度が粗い）
	判断に必要な情報		土壌ガス調査による詳細な汚染分布状況
リスク対応の実際	内容	追加調査	土壌ガス調査 60 点、ボーリング調査 6 孔
		修正設計	浄化工法を再検討
		対策工	土壌掘削除去、揚水ばっ気
	費用	追加調査	7,379 千円
		修正設計	計上せず
		対策工	27,048 千円
		②合計	34,427 千円
変更工事の内容	工事変更の内容		実際には変更なし
	変更後工事費		－
	変更工期		－
	③間接的な影響項目		借地料 2 年分の増（想定）21,600 千円
	受益者		発注者
リスクマネジメントの効果	費用（①－②）＋③		47,859 千円
	工期		－
	その他		土地の利用損失の評価

引用文献

・（社）地盤工学会：続土壌・地下水汚染の調査・予測・対策、p42

・A クリーニング工場土壌・地下水汚染調査報告書

［論文 No. 25］ カラム試験を用いた第三紀泥岩に含まれる重金属溶出特性の評価
～予想される重金属溶出量の過大評価を防ぐため～

○岡崎 修・重野聖之・鶴見昌法・平本弘（明治コンサルタント(株)）

１．事例の概要

事業箇所は北海道第三紀泥岩主体の堆積岩からなり，土壌汚染対策法（以下，土対法）に基づく土壌溶出試験（環境省告示第 18 号）および土壌含有量試験（環境省告示第 19 号）の結果，砒素とセレンが溶出量基準値を超過したことから，対象となる岩盤掘削ずりについては土対法に準拠した適切な対応が求められた．本事例は北海道第三紀泥岩主体の堆積岩を掘削する際に発生する溶出量基準値を超過する重金属を含む岩盤掘削ずりの合理的な対策工設計を検討するため，カラム試験を用いて実際の盛土環境に近い形で盛土から地下水への重金属溶出過程を評価し，必要最小限の対策工によって安全に重金属対策を提案した事例である．

２．事例分析のシナリオ

重金属を含む岩石・土壌における対策工検討は土壌溶出試験（以下，公定法：環境省告示第18号），土壌含有量試験（環境省告示第19号）により対策工を検討するのが一般的である．しかし，自然的原因による重金属を含む岩石・土壌の場合，重金属は鉱物に取り込まれているなど化学的に結合しているため，公定法による評価ではリスクを過小・過大評価する可能性がある．本調査では溶出量試験の短期溶出試験である公定法と長期溶出量試験であるカラム試験を実施し，現地条件を考慮した重金属の溶出特性を室内試験で把握し，対策工検討に必要な重金属溶出特性の評価について報告する．

(1) カラム試験方法

①試料

事業箇所において実施した水平ボーリングコアを用いた公定法による溶出量試験および含有量試験の結果，含有量基準値を超過するものはなく，砒素とセレンが溶出量基準を超過した．カラム試験には砒素およびセレンが溶出量基準を超過した区間の試料（表 1）を用いた．

表１　溶出量・含有量試験結果

溶出量試験	分析項目	砒素 (mg/L)	鉛 (mg/L)	フッ素 (mg/L)	ホウ素 (mg/L)	総水銀 (mg/L)	カドニウム (mg/L)	セレン (mg/L)	六価クロム (mg/L)
	分析値	0.012～0.023	<0.005	<0.1～0.1	0.20～0.33	<0.0005	<0.001	0.012～0.025	<0.005
	溶出量基準値	0.01	0.01	0.8	1.0	0.0005	0.01	0.01	0.05
含有量試験	分析項目	砒素 (mg/kg)	鉛 (mg/kg)	フッ素 (mg/kg)	ホウ素 (mg/kg)	総水銀 (mg/kg)	カドニウム (mg/kg)	セレン (mg/kg)	六価クロム (mg/kg)
	分析値	1～3	<10	44～72	<40	<0.5	<0.5	<1	<1
	溶出量基準値	150	150	4000	4000.0	15	150	150	250

②試験方法

カラム（円柱状の筒）は径 50mm，高さ 50cm のアクリル製である．カラム試験は掘削ずりのみ（ブランク）をカラムに入れ，現場盛土形状(図 1)を 145 分の 1 スケールでカラムに再現した（図 2）．また現在，対策工法の比較検討として，掘削ずり＋吸着層（待ち受け形式），掘削ずり＋不溶化材混合（固化・不溶化形式）のカラム試験（図 2）を実施

中である. 試料の粒径について, カラム試験は現場条件を反映させる必要があることから, 充填する試料の粒径は近隣において岩盤掘削ずりにより盛土を行った既設盛土と同じ粒径 60cm 以下を想定し，カラム試験に投入する試料は盛土掘削ずりの最大粒径 60cm の 145 分の 1 スケールである最大粒径 40mm とした.

試料量は盛土高さ 2.91m の 145 分の 1 スケールであるカラムで仕上がり厚さ 20cm（締固度 85%）になるよう，619g 投入した．通水は下降流で添加水を流した．添加水は事業箇所の雨水・雪の pH データを参考とし， 硫酸添加により pH を 4.3～4.6 と設定した．通水量は事業箇所の年間平均雨が 1023.4 ㎜、20 年間のうちの日雨最大は 187 ㎜であることから，カラムに通水する量は 187 ㎜/1 回とし、2 年間総雨量に相当する 187 ㎜×12 回を通水した．通水時間は通水量を 1 日（24 時間）の降水量としたことから，通水してから 24 時間後に回収する．また盛土の乾湿繰り返しによるスレーキング等効果の再現のため, 3 回目および 6 回目は 24 時間のインターバルをおいた.

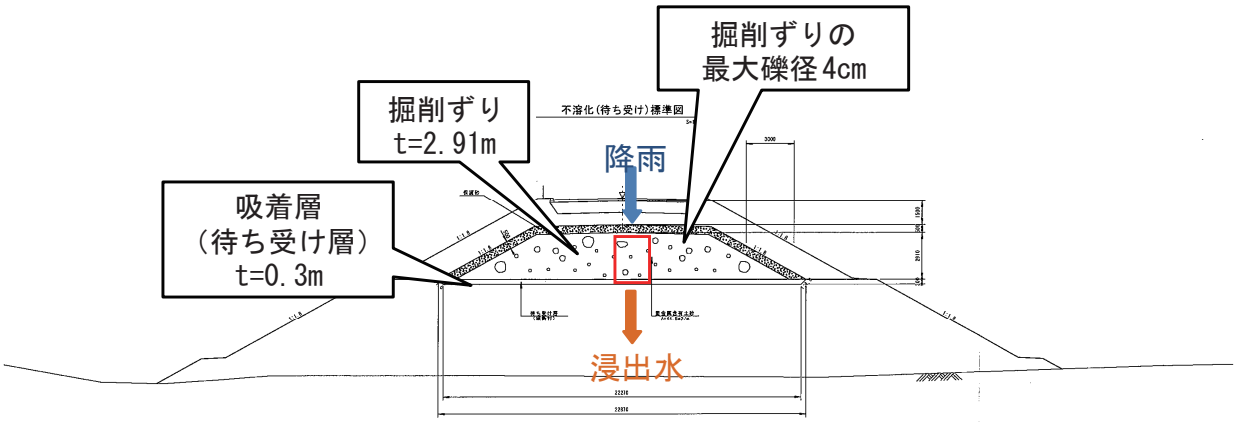


図 1　盛土模式図（吸着層の場合）

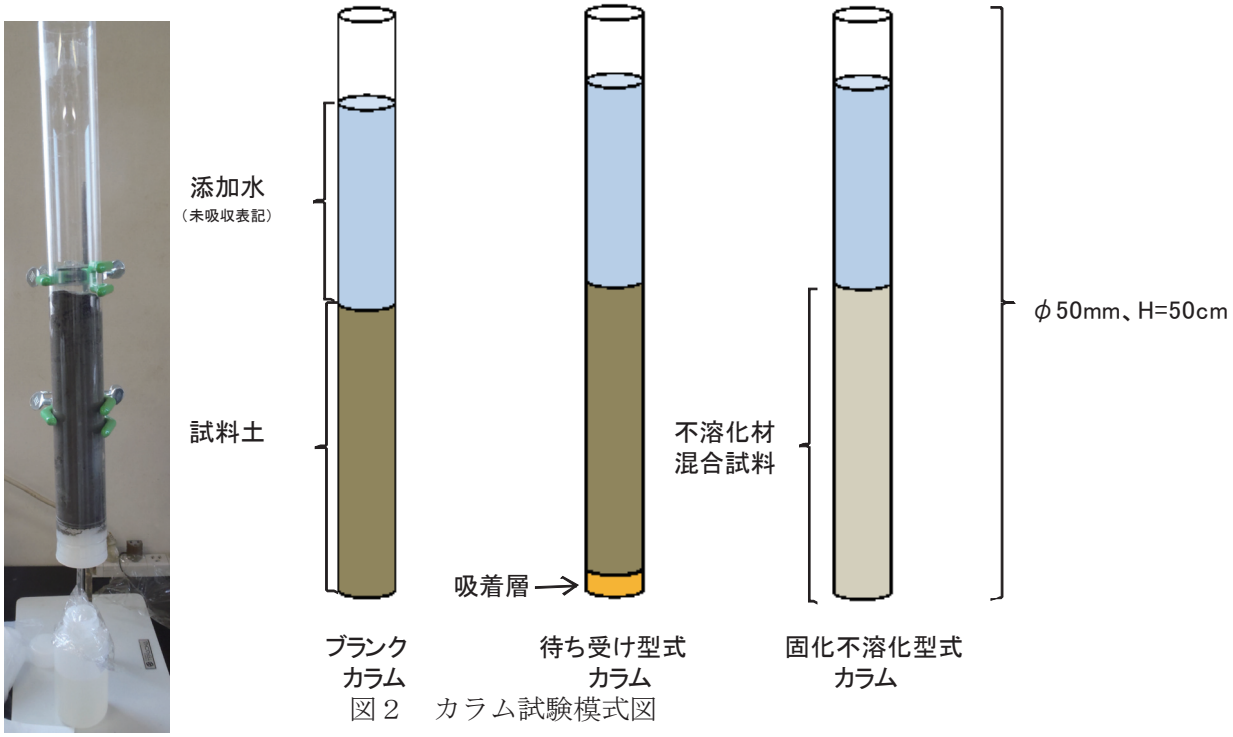


図 2　カラム試験模式図

(2) ブランクカラム試験結果

試験は分析結果のクロスチェックを行うため，濃度に係わる計量証明事業の登録を受けた 2 試験機関で実施した．

①砒素溶出量

各通水回のカラム浸出水と砒素溶出量の関係を図 3 に示す． A 試験機関では通水 2 回目で一度増加し，回数の経過とともに減少傾向にある．B 試験機関では通水 4～6 回で一度増加し，回数の経過とともに減少傾向にある．2 試験機関とも砒素は溶出量基準値を超過しない結果となった．

②セレン溶出量

各通水回のカラム浸出水とセレン溶出量の関係を図 4 に示す． A 試験機関および B 試験機関ともに通水開始時が一番高く，通水回数経過とともにほぼ一様に減少する．2 試験機関ともセレンは溶出量基準値を超過する結果となった．

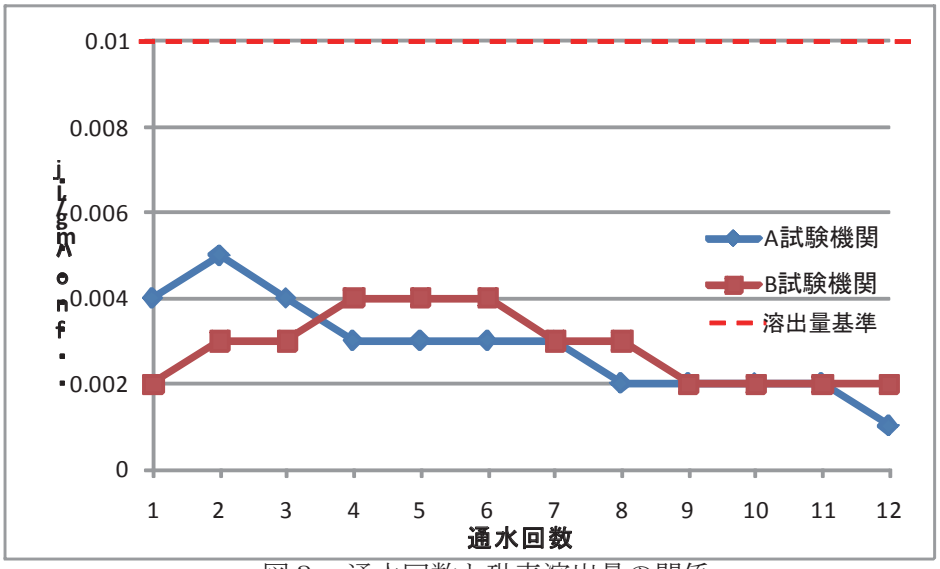


図 3　通水回数と砒素溶出量の関係

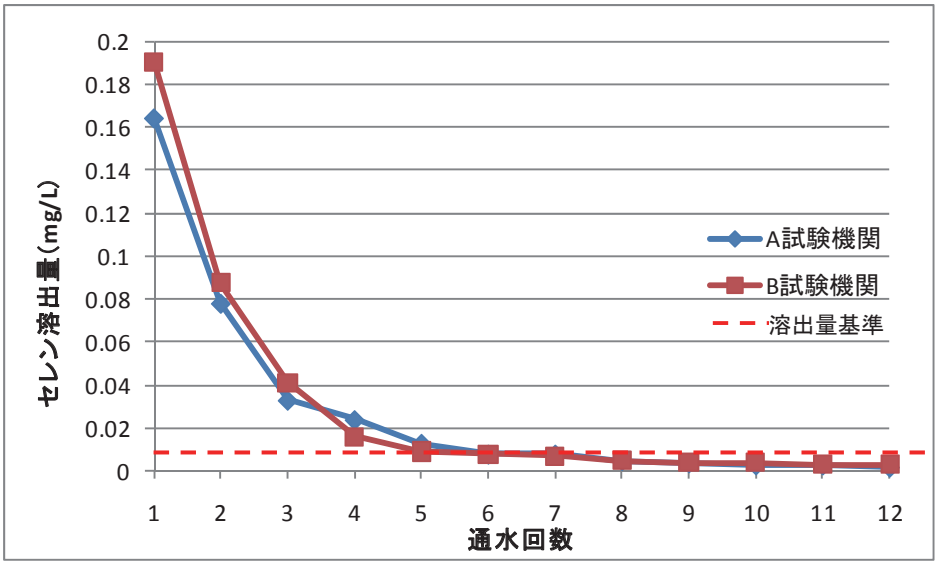


図 4　通水回数とセレン溶出量の関係

(3) 短期溶出試験（公定法）と長期溶出試験（カラム試験）の比較評価

短期溶出試験と実際の盛土環境に近い浸出水を再現した長期溶出試験との比較より，岩盤掘削ずりが盛土として利用された場合の溶出を適正に把握するための方法を検討した.

①砒素溶出量

砒素は短期溶出試験では最大0.012mg/Lと溶出量基準値を超過するのに対し，長期溶出試験では最大0.005mg/Lと溶出量基準値未満であった. これは試験に供する試料粒度が短期溶出試験では2mm以下に対し，カラム試験では40mm以下であったため，最大粒径が大きいカラム試験では添加水に接触する表面積が小さくなった結果，砒素の溶出量は減少したと考えられる.

よって，砒素は短期溶出試験により，人への健康被害の観点から対策が必要と当初考えられたが，現地状況を再現した長期溶出試験より，短期的および長期的に溶出量基準値を超過する砒素が溶出する可能性は低い結果となり，砒素に対する重金属対策は行わない判断となった.

②セレン溶出量

セレンは短期溶出試験では最大0.025mg/Lと溶出量基準値を超過するのに対し，長期溶出試験では最大0.190mg/Lと長期溶出試験の方が7.6倍程度の高い溶出量を示す．これは長期溶出試験の1回通水あたりの接触時間が24時間に対し，短期溶出試験は6時間と短いこと，固液比が長期溶出試験（カラム試験）は1:0.6に対して，短期溶出試験（公定法）は1:10であることから，セレンの溶出量が高いと考えられる．長期溶出試験と短期溶出試験結果を比較すると，短期溶出利用試験の固液比が1:10であることから，長期溶出試験を短期溶出試験と同じ固液比で比較すると，長期溶出試験の最大セレン溶出量は0.011mg/Lとなり溶出量基準値を超過する結果となった.

よって，セレンは短期溶出試験により，人への健康被害の観点から対策が必要と考えられ，現地状況を再現した長期溶出試験においても溶出量基準値を超過したことから，セレンに対する重金属対策は行う判断となった.

３．マネジメントの効果

短期リスクを評価する短期溶出試験（公定法）と長期リスクを評価する実際の盛土環境に近い浸出水状況を再現した長期溶出試験を実施した結果，対策工の費用の比較を表2に示す.

対策工費用は岩盤掘削ずり10,000m^{3}に対し，吸着層工法を実施した場合を想定し，吸着材の吸着容量は砒素およびセレンとも0.75g/kg,薬品単価は515円/kgと仮定し，対策に必要な材料費（吸着材）について，短期溶出試験のみ実施した場合と長期溶出試験により対策費用を検討した場合を比較した.

表２　マネジメント効果

試験方法	対策工検討	
	短期溶出量試験結果	長期溶出量試験結果
砒素溶出量	**要**	不要
セレン溶出量	**要**	**要**
掘削ずり処理に必要な材料費	５,８００,０００円	２,４００,０００円

本事例では短期溶出量試験結果より，砒素とセレンについて対策が必要と考えられていたが，実際の盛土環境に近い浸出水を再現した長期溶出試験の結果，砒素は溶出量基準値未満であった．このことより，盛土環境下では砒素は溶出量基準値を超過する可能性は低いと判定し，セレンのみ対策を行った結果，コスト削減につながった．

今後，吸着材および不溶化材等の各メーカーの材料配合量については，地質性状や有害物質の特性・pH等により添加濃度や薬品が変わるため、待ち受け形式および固化・不溶化形式のカラム試験（図2）を用いた適用性評価試験（トリータビリティ試験）を行い、薬品の種類の選定と最適添加量を確認し，岩盤掘削ずり処理に必要な対策費用を算出する予定である．

地質リスク学会　事務局

NPO 地質情報整備活用機構　事務局内

〒101-0047　東京都千代田区内神田１－５－１３　内神田ＴＫビル３Ｆ　３０１号室

(社)全国地質調査業協会連合会　事務局

〒101-0047　東京都千代田区内神田１－５－１３　内神田ＴＫビル３Ｆ　３０２号室

電話：０３－３５１８－８８７３　FAX：０３－３５１８－８８７６