

防災船着場における維持管理計画

中央開発株式会社 ○竹内 開哉

1. はじめに

河川管理施設である防災船着場において維持管理に関するガイドライン等は整備されておらず、現状は事後対応型の維持管理が中心となっている。本稿では、一級河川の既設防災船着場9施設を対象に、災害時の要求性能の確保を目的とし、「港湾施設の維持管理ガイドライン¹⁾（以下、ガイドラインと言う）」等を参考に定期点検に基づく補修・更新を図る維持管理計画を新規で策定した事例を紹介する。



図-1 防災船着場（浮桟橋）

2. 維持管理計画策定までの方法と手順

(1) 点検要領(案)の策定

ガイドラインを参考に、防災船着場を「重点点検診断施設」として位置付け、日常点検・定期点検・詳細調査の項目・周期を設定(図-2)した。日常点検においては、発注機関が単独で実施可能な点検内容及び手法とした。

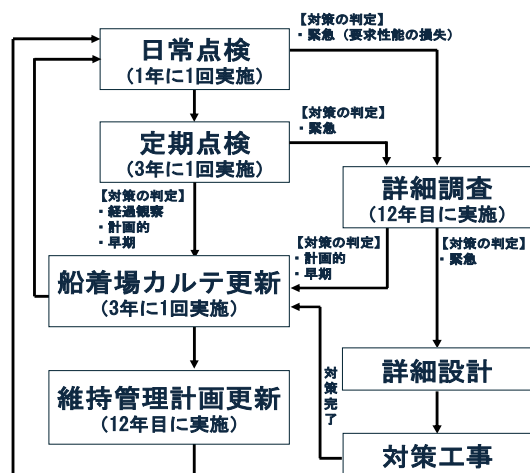


図-2 維持管理方針フロー図

また、点検結果に基づいて対策の緊急性を判断するため、ガイドラインに則り、維持管理レベルおよび性能低下度に応じて「緊急」「早期」「計画的」「経過観察」の4区分による評価方法(表-1)を整理した。あわせて、これらの評価に基づく対応の優先順位や運用方法について体系的に整理を行った。

表-1 対策の評価方法

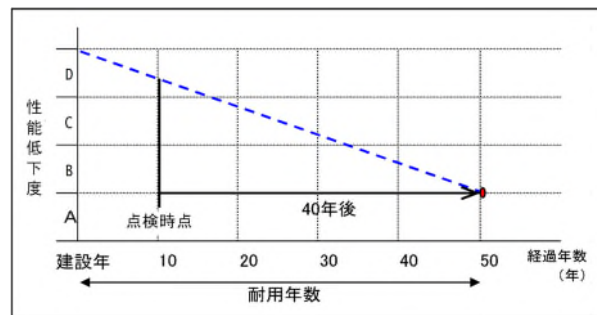
性能低下度	性能低下度の評価基準			
A	施設の性能が相当低下している状態			
B	施設の性能が低下している状態			
C	変状はあるが、施設の性能の低下がほとんど認められない状態			
D	変状は認められず、施設の性能が十分に保持されている状態			

維持管理レベル	対策の緊急性			
	性能低下度			
	A	B	C	D
レベルⅠ (事前保全型)	緊急	早期	計画的	経過観察
レベルⅡ (予防保全型)	早期	計画的	経過観察	経過観察
レベルⅢ (事後保全型)	早期	経過観察	経過観察	経過観察

(2) 劣化予測(耐用年数法)

防災船着場は、災害等の緊急時に重要な役割を担っており、劣化等に伴う損傷を未然に防ぐ予測的な維持管理が重要となる。

しかしながら、各部材の標準耐用年数は実績や事例が少なく設定されていない。そのため初回点検(定期点検と詳細調査)を提案・実施し、その点検結果から残存年数を推定し、劣化予測(耐用年数法)(図-3)を実施した。これにより、計画的な補修・更新の検討に資する基礎情報を得るとともに、対策の検討と概算工事費の算定を行った。

図-3 耐用年数法による老朽化予測²⁾

(3) 船着場カルテ(案)の作成と対策の優先順位

各施設の維持管理に必要な情報を一元的に整理・管理する資料として「船着場カルテ(案)」を作成した。このカルテには、施設の基本情報、評価履歴、劣化の進行状況等を整理しており、今後の維持管理計画の見直し・更新にも資する構成とした。

また、点検結果に基づく機能劣化の程度に加え、災害時の利用を想定した対象施設の社会的役割の重要性を考慮し、社会的影響度に基づく優先順位評価を導入した。評価指標は、①広域緊急道路へのアクセス性、②日常の利用度、③防災拠点からの距離の3項目を設定し、重み付けを行った上で優先順位を決定した。

(4) 維持管理計画(案)の策定

それらの成果を統合し、「維持管理計画(案)」として取りまとめた。特に本計画では発注機関が単独で実施する「日常点検」の継続的な実施を重要事項として位置付けている。発注機関自らが日常点検を行うことにより、委託費の削減効果が得られるとともに、診断方法の水準の向上を目的とした工夫も取り入れた。次章では、日常点検の実施における具体的な工夫について述べる。

3. 日常点検の運用の工夫

(1) 評価方法の工夫

ガイドラインに基づく港湾における浮桟橋の日常点検は、外観目視による変状の有無や進行状況の把握にとどまり、評価方法は定期点検に比して簡易的な手法が用いられる。しかし、本計画では日常点検においても一定の精度と信頼性を確保することを重視し、点検項目および評価方法の見直しを行った。特に発注機関の職員が主体となって点検を実施するため、実施可能な範囲でより詳細な状態把握が可能となるような工夫を加えている。その中でも、付属設備(防舷材、係船柱など)(図-4)については、専門的な知識を必要とする部材(図-5)に比べ、視認による判断が比較的容易であることから、合同点検を実施した上で、定期点検と同様の評価方法を適用した。



図-4 付属設備(例)



図-5 専門的な知識を有する部材(例)

(2) 乾舷高計測の導入

本計画では、日常点検において浮桟橋本体の乾舷高(水面から上甲板までの距離)の定点計測(図-6)を導入した。これはガイドラインに基づく港湾施設点検に見られない運用上の工夫である。乾舷高に関する性能低下の判定基準については、浮桟橋の設置環境や構造仕様、および運用条件により乾舷高の許容範囲が異なるため、現時点で一律の基準は確立されていない。このため本計画では、対象とする9施設の構造的・運用的特性に整合する形で、独自の劣化度判定基準を設定した。なお、参考とした「浮桟橋設計マニュアル³⁾」においては、無載荷時

の乾舷高は「0.3m～0.5m程度」と記載されている。据付精度の許容範囲「計画乾舷高±10%」と各施設の乾舷高の実測値を加味し、許容値を450mmと定め、これを基に劣化度判定基準を設定した。(表-3)



図-6 乾舷高の計測

表-3 乾舷高の判定基準

劣化度	劣化度の判定基準
a	前回測量時の平均値から50mm以上の低下・浮体の傾きがある
b	乾舷高: 300mm未満
c	乾舷高: 300mm以上450mm未満
d	乾舷高: 450mm以上

乾舷高の計測データは、単なる現状把握にとどまらず、内部浸水や浮力材の劣化等の異常兆候を早期発見する手段として活用できる。実際に乾舷高が許容値を下回る施設では、竣工時からの積載物増加や内部浸水(図-7)が確認され、これらの影響による乾舷高低下と判断できる。乾舷高の変動傾向は対策の緊急性を判断する指標としても有効である。乾舷高が急激に低下している場合には、浮力が著しい低下が疑われ、早急な補修や詳細調査が必要となる可能性がある。



図-7 乾舷高許容値を満たさない施設の異常兆候

4. おわりに

防災船着場の維持管理における実効性向上を目指し、日常点検の精度向上や乾舷高計測の導入等、発注機関による継続的な実施を重視した「維持管理計画」を策定することが出来た。今後の運用を通じて維持管理計画の有効性を検証し、適宜に応じて計画の改定が進められることで、より信頼性の高い維持管理の実現が期待される。

《引用・参考文献》

- 1) 港湾の施設の維持管理計画策定ガイドライン 平成27年4月 令和5年3月一部変更 国土交通省港湾局
- 2) 水産基盤施設ストックマネジメントのためのガイドライン 令和6年4月改訂 水産庁漁港漁場整備部
- 2) プレジャーボート用浮桟橋設計マニュアル 平成23年改訂版 日本マリーナ・ビーチ協会

点検・調査におけるコアドリル掘削の役割と活用結果について

新協地水株式会社 二瓶 光

1. はじめに

既設インフラ施設の長寿命化や維持・補修設計における調査では、狭小空間や仮設困難な場所での高精度なデータ取得が求められている。従来の機械ボーリングを用いた調査手法では、作業環境やコスト面で課題が多いが、コアドリル掘削技術を活用することで、これらの制約を克服しつつ、短期間での効率的な調査が可能となる。

本報告では、コアドリル掘削を用いた具体的な調査事例をもとに、その利点と効果について検証した。

また、コアドリルにより採取したコアとボーリングコアを利用した岩級区分や岩石試験を実施し、比較した結果について報告する。

2. 調査事例

コアドリルを用いた調査の構造物と得られた情報の一覧を表-1に示し、調査事例を以下に示す。

表-1 コアドリルを用いた調査一覧(構造物と情報)

構造物	調査段階	目的	コアドリル掘削	
			方向	深度
既設砂防堰堤	補修補強設計	コンクリートの状態、堰堤直下の地質構造・支持地盤分布の確認。	0°	5～15m
既設吹付モルタル・コンクリートのり面	補修補強設計	吹付法面背面の空洞、土層・地層構成の把握、岩盤の風化状況・亀裂・不連続面の把握。	45～90°	1～5m
既設モルタル吹付トンネル	補修補強設計	吹付トンネル背面の空洞、土層・地層構成の把握、岩盤の風化状況・亀裂・不連続面の把握。	90°	1～5m
既設護岸工	補修補強設計	護岸背面の空洞、土層・地層構成の把握。	60～80°	1m内外
既設擁壁	現況把握	既設擁壁の形状確認、裏込土の状態把握。	0～90°	1～5m
新設構造物	概略～詳細設計	機械ボーリングの補完、地層構成や岩盤線の確認。	0°	3～10m

(1) 既設砂防堰堤の健全度調査

老朽化した既設砂防堰堤の補修補強設計段階の調査にコアドリル掘削を使用した事例である。調査対象となる砂防堰堤は建設年代が古く、砂防堰堤の既存資料（工事台帳等）が残されていない場合があり、堰堤構造（堤高、

堤長、材料等）の正確な情報に乏しい。建設年代の古い堰堤は、工事用道路が消失し、堰堤へのアクセスが困難である場所が多く、人力で施工された石積堰堤もある。設計パラメータは、砂防堰堤の状態（内部構造・堤体高）や基礎地盤の確認であることから大規模な仮設を要せず、資材運搬の容易なコアドリルによる調査により、設計パラメータを満足し、費用の縮減を図った。

(2) モルタル吹付のり面背面調査

既存吹付モルタルのり面の健全度評価の為の調査にコアドリル掘削を使用した事例である。

吹付のり面調査では、熱赤外線調査や打診調査結果を基にコア抜きによる背面地山の検証を行うことが一般的であり、対策が必要な場合は吹付背後の状況を詳細に把握するためにボーリング調査や弾性波調査が行われている。このボーリング調査の代替方法としてコアドリル掘削を実施し、掘削孔径や採取コア径に大きな差異は無く、背面地山の性能把握やコアの観察はボーリング調査と同様に行うことが可能であった。

(3) その他既設構造物調査

モルタル吹付のり面以外にも既設モルタル吹付トンネルや既設護岸工の背面空洞化の状況調査や背面土層・地層の構成把握、岩盤の風化状況、亀裂、不連続面の把握についてもコアドリル掘削を用いて実施し、これらの状態を把握することが可能であった。

また、既設擁壁の形状確認や裏込め土の状態把握等、ボーリングマシンの搬入が困難な住宅等の狭小地における調査も効率的に実施が可能である。

(4) 地質調査における活用

従来の機械ボーリングと併用し、狭小空間でのコア採取を実施することが可能であり、機械ボーリングの補完、地層構成や岩盤線の把握等、作業効率の向上と調査精度の向上が可能であった。

3. コアドリル掘削技術の利点

調査事例からコアドリル掘削技術には以下のような利点がある。

(1) 高精度なデータ取得

機械ボーリングと同等の試料を採取可能である（後述）。

(2) 作業効率の向上

搬入・掘削・撤去が迅速に行えるため、調査時間を大幅に削減できる。

(3) コスト削減

機械ボーリングと比較して仮設コストが抑えられ、経済的な調査が可能である。

(4) 柔軟な適用性

狭小空間や高所など、仮設困難な場所でも調査が可能である。

4. 採取コアおよび岩石試験結果の比較

(1) 採取コアの比較

図-1にコンクリートおよび岩盤部を採取したコア写真を示し、図-2にモルタルおよび土砂部を採取したコア写真を示す。

図内の上部がボーリングにより採取したコアであり、下部がコアドリルにより採取したコアである。

両者の採取コアを比較すると、コアドリルを用いて採取したコアの品質は、コンクリートやモルタル部、岩盤部および土砂部においても、ボーリングマシンを用いて採取したコアと採取率、形状、RQD の傾向等から同程度を確保することが可能である。



図-1 コンクリートおよび岩盤部の採取コア
(上:ボーリング 下:コアドリル)¹⁾

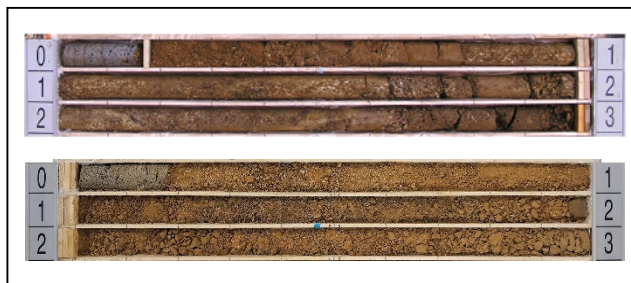


図-2 モルタルおよび土砂部の採取コア
(上:ボーリング 下:コアドリル)

(2) 岩石試験結果の比較

機械ボーリングにより採取したコアとコアドリルで採取したコアについて岩石試験を実施した結果について比較した。

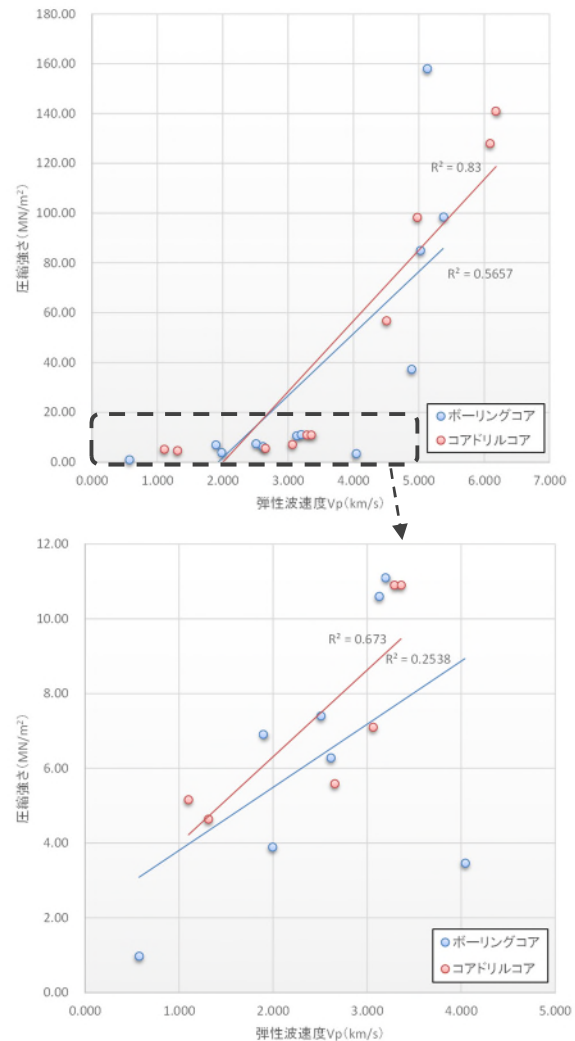


図-3 岩石の弾性波速度と圧縮強さの関係

弾性波速度と圧縮強さの関係も弾性波速度が大きくなると圧縮強さも大きくなる傾向が見られる(図-3)。

これは機械ボーリングにより採取したコアとコアドリルで採取したコアで同様な傾向を示し、採取コアを使用した岩石試験は岩級区分をする上で、有効な結果を示している。

4. まとめ

コアドリル掘削技術は、既設インフラ施設の維持管理や補修に向けた調査の精度向上に寄与することが確認された。特に、従来の機械ボーリングと比較して遜色ない岩級区分や岩石試験が可能であり、効率的かつ柔軟な調査を実現できる。今後のインフラ長寿命化のための調査手法として、コアドリル掘削技術のさらなる発展が期待される。

《引用・参考文献》

- 1) 二瓶 光, 山家 雄太, 高橋 友啓 (2022): コアドリルを用いた堰堤調査事例, 全地連技術フォーラム 2022論文集, 論文 No. 35.

INSEM-ダブルウォール工法における配合試験の事例紹介

東邦地水株式会社 小倉康史

1. はじめに

世界的な取り組みである持続可能な開発目標（SDGs）では、2030年までに達成すべきターゲットとして「廃棄物の発生防止、削減、再生利用及び再利用により、廃棄物の発生を大幅に削減する」ことが挙げられている。

また、建設分野においても建設副産物のリサイクルや適性処理等を推進するための建設リサイクル推進計画2020が制定された。「建設リサイクル推進計画2020」では、循環型社会形成へのさらなる貢献が主要課題としてあげられ、建設副産物の再資源化や建設発生土の有効利用が推進されている。

砂防関係事業においては近年、建設発生土を有効に利用できる砂防ソイルセメント工法が採用されることが多い。本工法は現地発生土砂とセメントまたはセメントミルク等を攪拌混合し、砂防堰堤などの施設に用いる工法であり、建設発生土を大幅に削減することが可能である。

今回の発表では、砂防堰堤の中詰材に現地発生土砂とセメントの混合材を用いた「INSEM-ダブルウォール工法」において、細粒分含有率(Fc)と固化材添加量の相関について検討を行った事例を紹介する。

2. INSEM-ダブルウォール工法

(1) INSEM-ダブルウォール工法※1

ダブルウォールは、中詰土を外側からの壁面材とタイ材で締め付けることで補強する外部拘束タイプの補強土工法である。INSEM-ダブルウォール工法は、ダブルウォールの中詰材にINSEM材を使用する堰堤構造である。

(2) INSEM

INSEM(IN-situ Stabilized Excavated Material)工法は、砂防ソイルセメント工法の一つである。現地発生土砂とセメントを混合し、振動ローラーで締固めて構造物を構築する。施工現場から掘削土砂等の現地発生土砂を搬出しないという基本理念によって開発された工法※2であり、環境負荷軽減への寄与など資源循環型社会への貢献度が高い工法である。

3. 紹介事例について

INSEM-ダブルウォール工法に用いるINSEM材製造のながれを図-1に示す。図に示すように、「Ⅰ. 母材に対する試験」実施後、「Ⅱ.INSEM材の配合試験」を実施する。

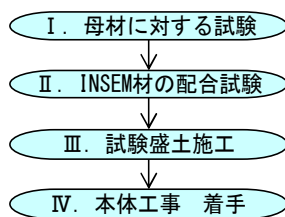


図-1 配合試験によるINSEM材製造のながれ※1

INSEM 材に用いる母材の土質に適用範囲はないものの、表-1より、細粒分含有率(Fc)に着目すると、Fc=20%が単位セメント量 200kg 以下で対応可能な土砂の目安となっている。したがって、Fc=20%を超える母材の場合、200kg/m³以上のセメント添加量となる可能性がある。

表-1 転圧タイプ(=INSEM)で実施されている一般的な材料試験項目のデータ※3

試験項目	基準	単位セメント量200kg以下で対応可能な土砂の平均的なデータ※	目的
ふるい分け試験	JIS A 1204	細粒分：20%	材料の物理特性値の把握
密度・吸水率試験	JIS A 1110	細骨材吸水率：10% 粗骨材吸水率：5%	
含水率(比)試験	JIS A 1203	自然含水比：15%	
締固め試験	JIS A 1210	最大乾燥密度：1.75g/cm ³ 最適含水比：12%	単位体積重量および最適含水比の把握

※1. データは平均的なデータであるため、活用可能な土砂の閾値ではない。
※2. 有機成分の混入が懸念される場合はこのかぎりではない。

(1) 試験試料

今回、Fc=10.5～25.7%の5試料を用いた配合試験事例について紹介する。

試験は「INSEM-ダブルウォール(DW)工法 設計施工マニュアル」に準じて実施した。試料の材料試験結果を表-2に示す。なお、各試料は三波川結晶片岩類が原岩の河床土砂であり、採取年は異なるが同一地域で採取されている。

表-2 各試料の材料試験結果

試 料 名		A	B	C	D	E	
土粒子の密度		ρ_s (g/cm ³)	2.770	2.744	2.767	2.765	2.791
自然含水比		W_n (%)	4.5	12.1	3.4	10.3	20.9
礫 分		(%)	78.4	63.4	63.1	56.9	57.1
砂 分		(%)	11.1	22.5	19.0	22.8	17.2
シルト分		(%)	5.9	8.9	13.6	13.4	13.0
粘土分		(%)	4.6	5.2	4.3	6.9	12.7
最大粒径		(mm)	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5
均等係数		U_c	263	295.5	586.1	949.8	1880
細粒分含有率		F_c (%)	10.5	14.1	17.9	20.3	25.7
地 盤 材 料 の 分 類 名		細粒分 砂まじり礫	細粒分 まじり 砂質礫	細粒分質 砂質礫	細粒分質 砂質礫	細粒分質 砂質礫	
分 類 記 号		(G-FS)	(CS-F)	(GFS)	(CFS)	(GFS)	
試験方法		B-c	B-b	B-b	B-b	B-c	
最大乾燥密度		ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.949	1.893	2.030	1.966	1.780
最適含水比		W_{opt} (%)	12.7	12.8	9.7	12.1	16.7
pH		7.2	6.1	6.5	6.2	5.5	
強熱減量		Li (%)	4.8	5.9	4.3	5.4	6.6

(2) 配合試験の仕様

今回の事例における目標強度、配合強度、養生日数は以下のとおりである。

- ・目標強度：0.50N/mm²
- ・配合強度：0.75N/mm²(目標強度×1.5(割増係数))
- ・養生日数：7日

4. 配合試験結果

(1) 添加量の決定

配合試験の添加量は、試料 A～D が「50, 100, 150kg/m³」の3水準、試料 E が「50, 100, 150, 200, 250kg/m³」の5水準で実施した。各添加量における一軸圧縮試験結果は図-2 に示すとおりである。これより各試料の添加量は、試料 A～D で 68～99kg/m³、試料 E で 181kg/m³ と決定した。各試料の添加量を表-3 に示す。

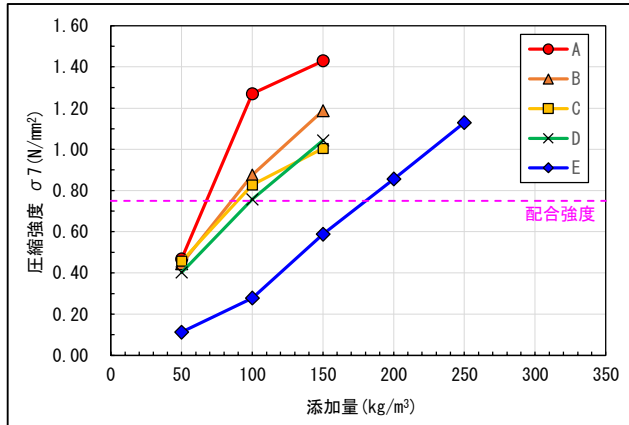


図-2 各試料の一軸圧縮試験結果

表-3 各試料の添加量

試料名	A	B	C	D	E
添加量 (kg/m ³)	68	86	90	99	181

(2) 締固め試験と一軸圧縮試験

各試料において、表-3 に示す添加量による締固め試験を実施し、最大乾燥密度の 90%以上 (ρ_{dmax90}) が得られる含水比の範囲を求めた。試験結果より、全含水比で最大乾燥密度の 90%以上となった。

次に、表-3 に示す添加量で含水比を変化させた一軸圧縮試験を実施し、目標強度以上となる母材の含水比範囲を求めた。各試料の母材含水比と一軸圧縮試験結果を図-3 に示す。これより、試料 C, E は全ての含水比で目標強度以上となった。一方、試料 A, B, D は目標強度以下となる含水比が見られたため、目標強度以上となる含水比の範囲をグラフから求めた。締固め試験と一軸圧縮試験により得られた含水比範囲の一覧を表-4 に示す。

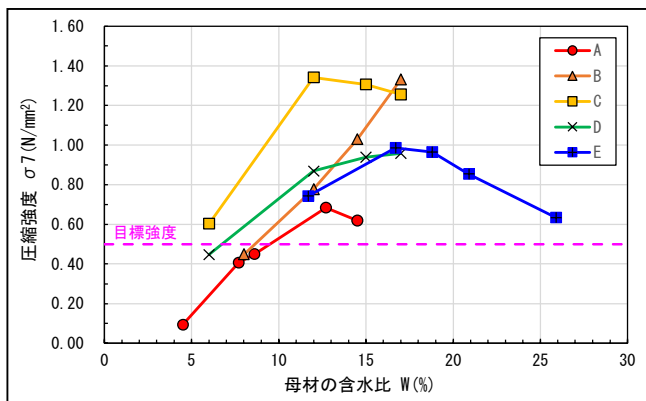


図-3 母材含水比と一軸圧縮試験結果

表-4 目標強度以上となる含水比の範囲

試料名	Fc (%)	添加量 (kg/m ³)	含水比範囲	
			締固め試験	一軸圧縮試験
A	10.5	68	4.5 ～ 14.5	9.5 ～ 14.5
B	14.1	86	5.8 ～ 17.2	8.5 ～ 17.2
C	17.9	90	6.0 ～ 17.0	6.0 ～ 17.0
D	20.3	99	6.0 ～ 17.0	6.8 ～ 17.0
E	25.7	181	11.7 ～ 25.9	11.7 ～ 25.9

赤文字：グラフ読取

(3) 施工含水比の決定

締固め試験および一軸圧縮試験結果より、 ρ_{dmax90} 以上、かつ目標強度以上となる施工含水比は、一軸圧縮試験の含水比範囲と決定した。（表-4 内 青枠部）

(4) 試験結果について

以上の試験結果より、Fc が 20.3% 以下の場合の添加量は 68～99kg/m³、Fc が 25.7% の場合の添加量は 181kg/m³ であり、全試料で単位セメント量は 200kg 以下となった。また、Fc が大きくなれば含水比範囲が広がる傾向が認められた。

さらに、表-4 によれば Fc が 20.3% を超え、25% に近づくほど、目標強度 0.5N/mm² を満足する添加量が大きく増加する傾向も認められた。また、試料 E では試料 A～D と比較すると 1.8～2.6 倍の固化材が必要となる結果が得られた。

5. まとめ

今回、同一地域の河床土砂を対象とした INSEM 材の配合試験事例を紹介した。

母材の Fc が 25% の場合でも単位セメント量が 200kg 以下で対応可能であることが判明した。さらに、Fc が 20% より高いケースでは、Fc が高いほど添加量も増加する結果が得られた。今回の検討では、5,000m³ 程度の砂防堰堤を構築する場合、添加量が 2 倍になると、材料費は 1,000 万円程度増大することとなる。また、材料運搬車両から発生する CO₂ など、環境への負荷も増大する懸念がある。

よって、Fc が 20% を超える土砂においては、粒度調整等により添加量を低減させるなど環境へ配慮した施工方法の検討が望まれる。

今後さらに、Fc が 20% を超える試料を用いた配合試験を実施してデータを蓄積し、知見を深めることで、「同工法の発展」や「建設リサイクルの推進」に寄与していきたいと考える。

《引用・参考文献》

- 共生機構株式会社：INSEM-ダブルウォール(DW)工法 設計・施工マニュアル, p1, 2015.2.
- (一社)砂防・地すべり技術センター：建設技術審査証明事業(砂防技術)概要書 INSEM-ダブルウォール(DW) 工法, 2020.2
- 共生機構株式会社：INSEM-ダブルウォール(DW)工法 設計・施工マニュアル, p23, 2015.2.

将来の井戸能力変化を予測するプログラムの開発

株式会社日さく ○澤井 清人, ヴォー フィーソン

1. はじめに

井戸は使用し続けると、スクリーン部やその周辺の充填砂利に地層の微細粒子や地下水のスケール成分による目詰まりが発生することで、揚水能力が低下する。揚水能力が低下すると、水中モータポンプが揚水水位より上に出ないように揚水量を減らして対応するか、何処かのタイミングで、揚水量が減りすぎないように、改修工事を行う必要がある（図-1 参照）。

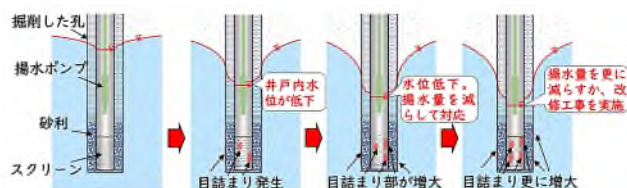


図-1 井戸の目詰りと井戸内水位の変化の概念図

改修工事の時期や頻度の設定は、現在は技術者の経験則に基づいており、最適な維持管理計画を立案することが重要な課題であった。一方、提案をしても改修工事が実施されず、揚水障害などの異常が発生して初めて改修が行われるケースや、不適切な改修間隔による井戸の損傷事例も発生している。以上のことから、事後対応ではなく（適切な）予防保全型の改修を実現するため、将来の揚水能力を予測するツールが必要であると考えた。

本レポートでは、水位等の将来予測ツール（Python によるプログラミング）開発の試みを報告する。

2. 井戸の将来予測ツールの開発

水位等の将来予測には、PyCaret と Prophet の2つの機械学習用の外部ライブラリを用いた。PyCaret は、20 種類以上の予測モデルから最適な予測モデルを選定して将来予測ができる特徴を持つ。一方、Prophet は周期的な変化予測が得意であり、特異日を考慮した将来予測ができる特徴を持つ。今回使用したデータでは、Prophet の方が良好な結果であったため、本レポートでは『Prophet による水位の将来予測』に限定して報告する。

開発のために使用したサンプルデータは、温泉井戸の毎時計測データである（図-2 参照）。揚湯量は概ね一定に設定されており、温泉水位の変動は安定しているが、所々極端な上下動が発生している。また、2016 年 10 月上旬に水中ポンプが揚湯水位より上に出そうになったため、揚湯量を減らしており、揚湯量を減らしたことで水位が一気に上昇した。その後水位は徐々に低下傾向にある。

このデータから、揚湯水位が一定の閾値を下回りそうになる時期を改修時期として将来予測を行った。

将来予測を行うための重要事項は、①計測データを将

来予測に使えるように加工すること（前処理）、②使用する外部ライブラリのパラメータを設定することである。



図-2 サンプルデータ(温泉揚湯水位の経時変化)

(1) データの前処理

前処理では、データの日変動の緩和または除去する方法を行った。候補の手法は、『①日最大値』、『②日最小値』、『③日中央値』である（図-3 参照）。これらを比較すると、『③日中央値』は大きな突出が発生しないことが分かる。したがって、サンプルデータでは『③日中央値』を使って将来予測を行うこととした。

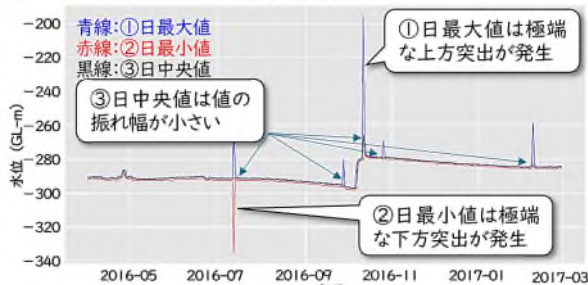


図-3 前処理のトライアル

(2) 将来予測ツール本体の作成

前処理によりデータが平滑化されたため、パラメータ設定は最低限の①機械学習期間は全期間、②トレーニングデータは全データの 80%、③検証用データは 20%、④年・週・日単位の周期性は考慮しない、という設定でプログラミングした。

水位予測結果は、細かく振動している右下がりの直線状となった（図-4 参照）。同じ揚湯量で汲み上げ続けると、2018 年 2 月 15 日付近で最低水位となり、この日を目安に改修工事を計画するという結果である。



図-4 サンプルデータを使った将来予測

3. 将来予測ツールの検証及び改良

次に、変動の複雑なデータを使って将来予測ツールの検証と改良を試みた。試用したサンプルデータは、熊本市内の地中熱用井戸の地下水位と地下水温のデータ（毎時計測、稼働期間5年分）である（図-5 参照）。

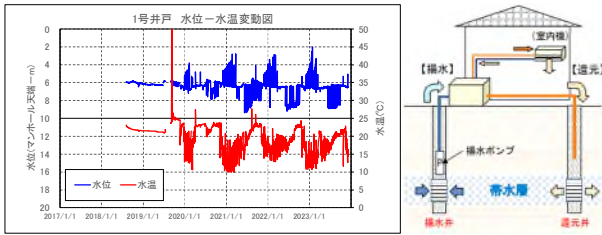


図-5 今回対象とした地下水位・地下水温の原データ

データは、①冬は冷水を地下注入するために水位は上昇し、水温は低下する、②夏は地下水を揚水するために水位は低下する、③井戸は数十分ごとに頻繁に稼働・停止を繰り返している、といった特徴を有している。

予測ツールの改良は、データの前処理手法の設定と外部ライブラリのパラメータ設定に重点を置いた。パラメータの最適値の探索方法は、5年分のデータのうち4年分で予測を行い、直近1年分の前処理データと予測結果を比較して残差二乗和が最小となるパラメータを探索する方法を採用した。将来予測は、水温と水位について実施したが、ここでは水位予測のみ発表する。

(1) データの前処理

今回の前処理方法は、データ変動を滑らかにするため移動平均を採用した。移動平均の変数は窓値（平均を行う期間）であり、1～720日の間で変化させた。窓値の最適値とパラメータの最適値は関係することから、全てを変化させトライアル比較した結果、残差二乗和が最小値となった移動平均は、窓値=30日であった。

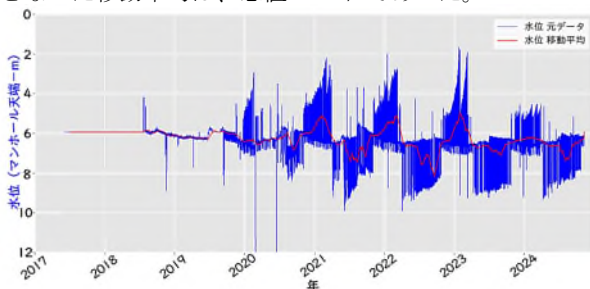


図-6 平滑化された地下水位データ(窓値=30日)

(2) Prophet のパラメータ設定

考慮したパラメータは、①予測データに対するトレーニングデータの割合(changepoint_range)、②変化傾向に対する敏感度(changepoint_prior_scale)である。

ほぼ総当たりで検討した結果、将来予測と残差二乗和最小となったのは、①トレーニングデータの割合は80% (0.8)、②変化傾向に対する敏感度はかなり鈍感(0.001)であった(図-7 参照)。

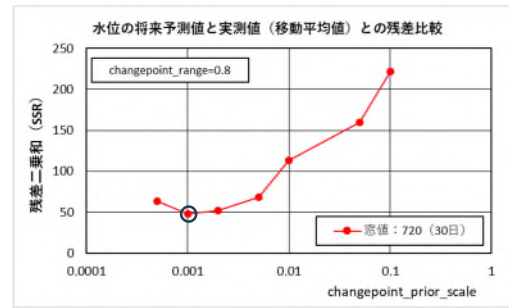


図-7 残差二乗和最小の検討結果

(3) 将来予測ツールの検証結果

以上、決定した前処理及び、外部ライブラリのパラメータ結果を適用して将来予測を行った結果を図-8に示す。その結果、水位が徐々に低下する傾向となった。

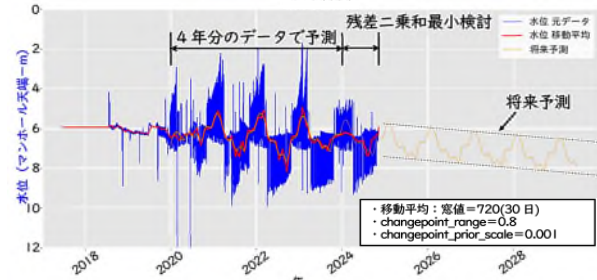


図-8 水位の将来予測(最適値)

4. 今後の課題と将来の目標

将来予測ツールを開発して、支障となるのは、ポンプ稼働が一定ではないことや揚水・還元等の複雑な運用していることで、計測データの変化が複雑になっていることである。こういった運用をしている井戸に対して、『適切なデータ前処理方法と外部ライブラリのパラメータ設定方法』を構築することが重要であると考えている。なるべく早い時期に将来予測ツールを完成させ、適切な井戸メンテナンス間隔を提案できるシステムを構築できるようにしていく所存である（図-9 参照）。

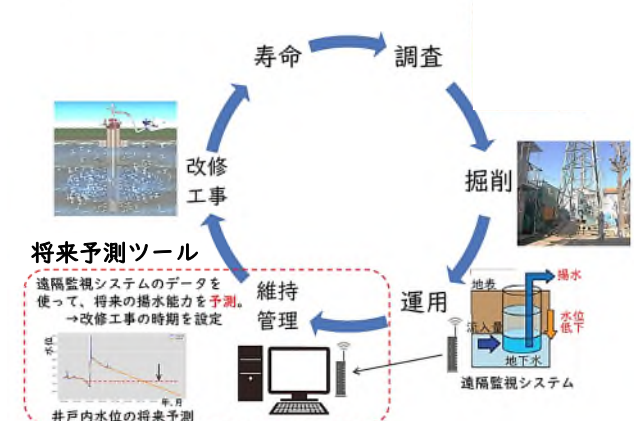


図-9 井戸維持管理システムの概要

5. 謝辞

将来予測ツールを開発するにあたり、さいたま市産業創造財団及び、平松 薫氏(埼玉大学 理工学研究科 教授)に多くの助言をいただきました。ここに謝意を表します。

陸域 CO₂ 固定技術の開発～その 1 休廃止鉱山 CCUS～

地圏総合コンサルタント ○山本英樹, 橋本綾佳, 高橋拓也

応用地質 小野藍生

大成建設 松井秀岳

建設技術研究所 高野徹

1. はじめに

休廃止鉱山の主に廃坑道 CCUS 活用を目的とした、CO₂ 固定能力を有する坑道充填材の開発、及び坑道内への充填施工と計画に関わる検討を行う。年間 100 億円とも試算される坑廃水処理費用の低減、中和殿物の有効利用といった坑廃水処理事業者の抱える課題を、社会的要請であるネガティブエミッションとしての CO₂ 固定技術により解決し、脱炭素社会への貢献を図る。これらにより休廃止鉱山鉱害防止事業内における地質関連市場の創出も期待できる。

2. 社会的背景

(1) 国内 CCS 事業

世界的な化石エネルギー依存脱却が進む中、国内では火力発電所は即停止せず、段階的閉鎖とする方針である。その間の CO₂ 対策として、CCS (Carbon dioxide Capture and Storage, 二酸化炭素回収・貯留) を有効手段としており、エネルギー供給構造高度化法においても、CCS 付き火力発電の法律上の定義はゼロエミッションとされる。具体的には、CO₂ を地下 1000m 超まで圧入、超臨界により気体から半液体化し地層に貯留する (図-1)。2016 年～2019 年に実施した、苫小牧実証 CCS 実証試験では、約 3 年間/30 万 t_{CO2} 圧入を目標として成功。その後、経産省では、中間目標の 2030 年まで 600～1200 万 t_{CO2}/年、最終目標の 2050 年には 1 億 t_{CO2}/年以上の CCS サイト設置目標を掲げており、目標達成のための先進的 CCS 事業として、国内 9 サイトが選定されている。

昨年には、CCS 事業法も成立し、国内における同事業の本格的な推進が見込まれている。

(2) CCS 事業の課題

選定された先進的 CCS 事業サイトは、苫小牧実証試験と同様、海域で計画されている。各サイトの貯留ポテンシャルは年/140 万 t_{CO2}～300 万 t_{CO2}と試算されており、2030 年中間目標は達成圏内と言える。一方で、2050 年目標を全て海域で達成しようとした場合、年/約 1000 万 t_{CO2}、CO₂ 圧入井は年/約 10 孔のペースで増やすと想定されているが、これには下記のような様々な課題がある。

- ・高コスト
- ・海洋汚染法や海洋基本法との整合性
- ・住民理解や合意形成
- ・活断層

一方で、既存の先進的 CCS 事業に陸域は含まれていない。これは、海域より貯留ポテンシャルが小さいと想定し、中間目標を急務とする方針に合致しなかったと思われるが、CO₂ 回収から圧入までの輸送コスト、インフラ利便性、モニタリングの容易性等、陸域での CCS のメリットも無視はできない。更には CCS 付き火力発電以外にも、製鉄所など、CO₂ 排出源の多くは陸上にある事を考慮すると、小規模でも安価な陸域での CO₂ 固定は有効であり、これを社会的要請と考え、独自技術を開発する取り組みも増えている。

3. 三笠市 CO₂ 固定 (CCUS) 実証試験²⁾

炭素固定ネガティブエミッションとして、CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) 二酸化炭素回収利用) がある。かつて炭鉱で栄えた北海道三笠市では、未採掘の石炭を地下で燃焼し、発生ガスを地上プラントにて CO₂ と水素に分離する水素製造事業と、発生した CO₂ を廃坑道への圧入する CO₂ 固定事業に取り組んでいる。2022 年度には、実際の廃坑道を使った CO₂ 固定実証試験を実施した。地下 430m まで掘削し貫通した炭層へ、地上プラントで水に CO₂ を溶解したファインバブル水を坑内へ圧入し³⁾、その後フライアッシュをベースに石灰と CO₂ の化学反応により鉱物化 (炭酸カルシウム) するスラリーを製作し圧入した。この試験は、ファインバブルを利用した CCS 的な要素と、充填後に固化したスラリーが、落盤リスクを軽減する事から CCUS の

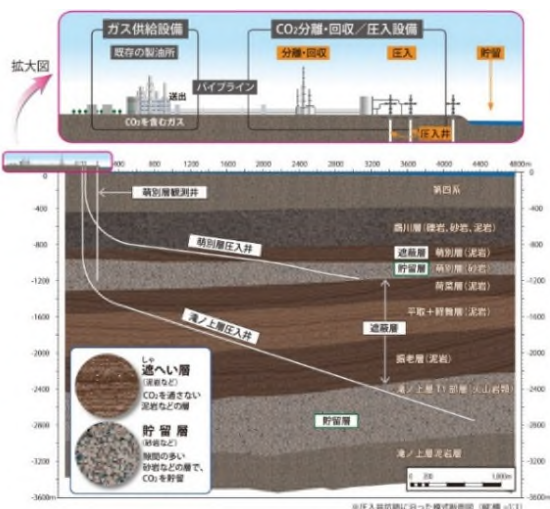


図-1 CCS 実証試験全体図¹⁾

要素も併せ持つユニークな方法であり、特に CCUS に関しては、陸域で超臨界に至らない深度の地下空間における CO₂ 固定の可能性を示した。尚、実証試験は三笠市が発注し、室蘭工大板倉教授ご指導の元、コンソーシアム（NPO 法人、応用地質、岩田地崎建設、ファルコン、地圏総合コンサルタント）が委託先として実施した。

4. 非鉄金属休廃止鉱山 CCUS 活用の検討

(1) ニーズと市場

このような陸域 CO₂ 固定技術の社会的意義を踏まえて、当社では非鉄金属系休廃止鉱山 CCUS 活用を検討開始した。非鉄金属鉱山では、採掘に伴い発生した鉱滓と、雨水等の酸性水による化学反応で、排出基準を超過する有害物質を含む大量の坑廃水が発生する。地上への湧水や地下水への混入リスクを常態的に抱えており、グリーンレメディエーション研究会によると、その対策費用は官民合わせて、年間約 100 億円規模と試算される。国内約 740 箇所を対象とする坑廃水処理事業の内、この 50 年で約 670 箇所へ対策を講じたが、直近 20 年では 6 箇所減に止まっており、残り約 70 箇所が未解決とされている。更には経産省による「特定施設に係る鉱害防止事業の実施に関する 基本方針（第 6 次）」では、CN、脱炭素、SDGs への取組も求められており、これらの課題解決を図る技術革新は社会的ニーズと言える。

(2) 坑道内充填試験の事例

過去、平成 20 年～26 年に経産省では、モデル鉱山地表近くの坑内空洞の一部に、中和殿物セメントの混合剤を充填剤として充填し、廃坑道内への雨水の浸透を減らし処理水を低減するとともに、坑廃水の処理過程で発生する中和殿物を、充填材として再資源化する事を目的とした研究を実施した。経産省「坑廃水水質改善技術開発事業評価用資料」によると、研究成果の活用先として国内 20 鉱山への適用性を示している。

(3) 非鉄金属鉱山廃坑道 CCUS 活用の検討

非鉄金属鉱山は、石炭鉱山より比較的浅い位置に廃坑道が存在する。ここに CO₂ 固定材料を充填する事で、超臨界や 1000m 級のボーリングを必要とせず、CO₂ 固定が可能となる。材料には上述の経産省事業と同様に、中和殿物の活用を検討している（図-2）。また、事業では事前調査（ボーリング、物理探査、試験分析等）、解析（坑道モデル化、水収支、モデリング、移流分散等）、材料評価、モニタリング、施工技術が重要となる。こうした複合技術の結集を前提とした、独自技術の開発と導入により、坑廃水処理事業における新たなニーズ創出を図るべく、一昨年から各機関と協議を開始した。現在、北海道大学富山真吾（客員教授）をアドバイザーとして招聘し、大成建設（材料開発、施工）、応用地質（坑道図、地質図モデル化）、建設技術研究所（水理モデル、移流分散解析）とスキームを構築し、本格的に開発を開始した（図-3）。

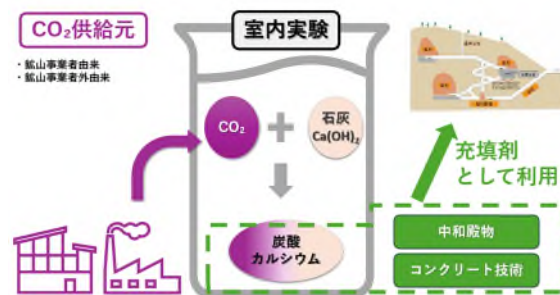


図-2 CO₂固定型充填材の開発

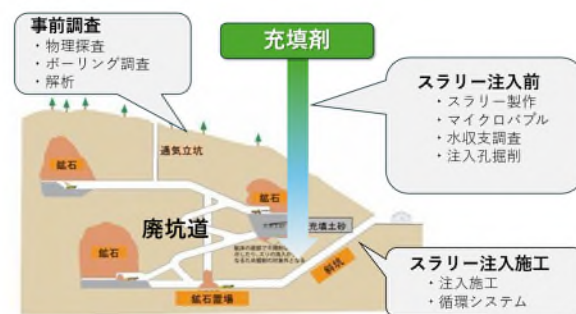


図-3 調査・解析・施工技術の開発

今年 3 月には、富山氏の推薦によりグリーンレメディエーション研究会にてプレゼンを行い、経産省、JOGMEC、日本鉱業協会、鉱山事業者からの大きな反響があった。

5. まとめ

本研究では、休廃止鉱山における廃坑道を活用した CO₂ 固定技術の開発に向けて、その社会的背景、技術的課題、および実証試験事例を踏まえた検討を行った。北海道三笠市における CCUS 実証では、地表近傍の廃坑道にファインバブル水および炭酸カルシウムスラリーを圧入する手法により、低深度域での CO₂ 固定の可能性が示され、陸域における CCUS 技術の新たな展開が期待される結果となった。また、非鉄金属鉱山への応用においては、坑廃水処理の高度化や処理副生成物の有効利用といった多面的効果が見込まれ、ネガティブエミッション技術としての社会的意義も大きい。今後は、地質・解析・材料・施工・モニタリング等の複合的技術の結集及び実証を通じて、実装可能な陸域 CO₂ 固定技術の確立を目指す。

《引用・参考文献》

- 1) 日本 CCS 調査株式会社：CCS 実証試験全体図
<https://www.japanccs.com/business/demonstration/whole.php>
- 2) 三笠市：「石炭地下ガス化×脱炭素」への挑戦
<https://www.city.mikasa.hokkaido.jp/hotnews/detail/00014328.html#indexccs>
- 3) 小野藍生、他（全地連「技術フォーラム 2023」横浜）：未利用エネルギー活用事業における二酸化炭素固定方法の検討

陸域 CO₂固定技術の開発: その 2 充填材料の CO₂ 固定寿命評価

(株)地圏総合コンサルタント ○橋本綾佳, 山本英樹, 高橋拓也

応用地質(株) 小野藍生

大成建設(株) 松井秀岳

(株)建設技術研究所 高野徹

1. はじめに

経済産業省は、海域における 9 件の先進的 CCS 事業により、2030 年までに年間貯留量 600～1,200 万 t-CO₂ の確保に目途をつけるという目標を掲げている。しかし、2023 年度の我が国の部門別 GHG 排出削減量を見ると、削減に最も貢献したのが、家庭部門で基準年比 6.8%減、最大の排出源であるエネルギー転換部門(発電所等)では同 5.4%減にとどまっている。したがって、海域だけに限らない大規模な事業ベースでの CO₂ 排出削減が、喫緊の課題となっている。本研究では、陸域の CO₂ 固定を包括的に解釈し、比較的浅い深度への低炭素型材料を用いた未利用地下空間への CO₂ 固定事業化に向けた取組を紹介するとともに、既存技術を応用した CO₂ 固定寿命評価技術の開発の構想について報告する。

2. 重金属等対策技術の応用¹⁾²⁾

著者は、CO₂ 固定寿命評価技術を開発するにあたり、自然由来重金属等の対策技術から着想を得た。この既往技術の中で CO₂ 固定寿命の評価に関係する重要な点は、資材主成分の枯渇を「寿命」という概念、資材の化学成分(鉱物)の変化及び溶解平衡、地化学計算コードの活用の3つであり、それに関して後述する。

2-1. 人工資材の寿命という考え方

重金属等を溶出する掘削土に対して、吸着層工法や不溶化工法で使用される人工資材には、重金属等の移動性を下げるために、炭酸カルシウム(CaCO₃)を含む Ca 系・Mg 系のアルカリ塩が用いられる場合がある。この人工資材を用いた処理土は、利用先の構造物の用途にもよるが、浸透水や地下水の通水機能を阻害しないために、ある一定以上の透水係数を保つ必要がある。しかし、施工後に吸着層あるいは不溶化層の状態が飽和と不飽和状態を繰り返すことで、資材の化学的な溶脱、物理的な流出が起こると考えられる。資材主成分の溶脱量の評価は、重金属等の収着効果の発現とその継続期間に直接関係するという観点において、重要である。しかし、これまでの研究は、重金属等が収着後に持つ結合の強固さや、ある一定期間の重金属等の破過の有無を確認するものが多く、資材そのものの化学主成分の溶脱に着目した研究事例は認められていない。著者は、添加した人工資材が全量枯渇することを「寿命」と定義し、反応する地下水の pH によって、資材主成分(鉱物相)の溶解量を地化学計算コード(PHREEQC)によって計算する方法を提案した。

2-2. 地化学計算コード計算値と実験値との比較¹⁾²⁾

重金属等の対策に利用する資材として、酸化マグネシウム(MgO)を主成分とした Mg 系資材と CaCO₃ を主成分とした Ca 系資材とを対象とし、pH 変化(地下水の pH を想定)と人工資材溶解量の関係を、pH を調整したバッチ溶出試験と PHREEQC を用いた再現計算で評価した。Mg 系資材と Ca 系資材中の MgO に対する pH 変化にともなう Mg 濃度の実験結果(プロット)と PHREEQC による解析結果(実線もしくは破線)を図-1に示す。Mg 系資材は brucite(Mg(OH)₂)の準安定相鉱物の溶解度に液相中の Mg 濃度が支配された。Ca 系資材中の CaCO₃ に対する pH 変化にともなう Ca 濃度の実験結果(プロット)と PHREEQC による解析結果(実線もしくは破線)を図-2に示す。Ca 系資材は calcite(CaCO₃)の溶解度に概ね従うことがわかった。しかし、Ca リッチな系に Mg が共存する場合、特定

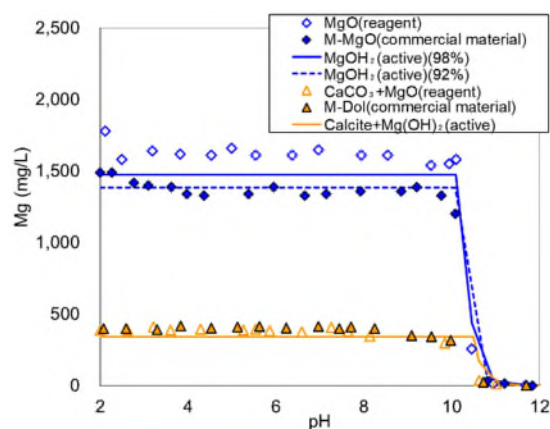


図-1 pH 調整溶出試験および解析による Mg 濃度変化

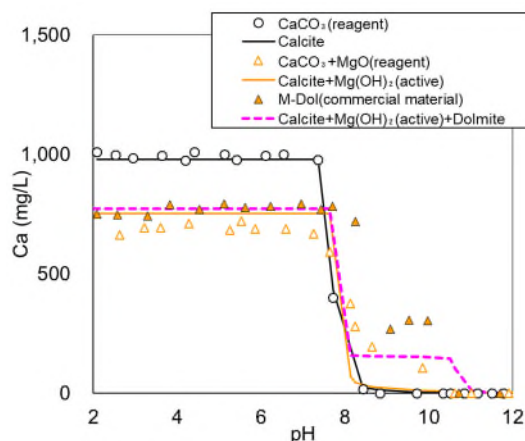


図-2 pH 調整溶出試験および解析による Ca 濃度変化

の pH 付近で実験値が calcite の溶解度だけでは説明できない変化を示した。このことから、calcite の溶解・沈殿反応に対して、Mg 共存下で二次鉱物として微量の dolomite($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)が形成され、溶液中の Ca 濃度を制限する固相として機能することが示唆された。これは PHREEQC による解析結果や固相の XRD 分析結果とも調和的であった。以上の結果から、資材と水のみの単純系では、pH 変化にともなう資材主成分濃度の変化は、PHREEQC で解析可能であることがわかった。

2-3. 鉱物相の変化¹⁾²⁾

人工資材は、Si 分の多い岩石や土壌と混合し、地下水と触れることによって二次鉱物を生成する場合がある。また岩石や土壌の pH が長期的に酸性化する場合、資材の鉱物相が変化する場合がある。本研究では、岩石試料と混合した際の二次鉱物の変化を確認し、ある特定の pH で鉱物の主成分濃度を制限する固相を溶解度制限固相とし、その溶解平衡から主成分濃度を予測する方法を提案した。岩石の短期的・長期的溶出を考慮した場合の各 pH における溶解度制限固相を表-1のように決定した。資材としては、MgO を主成分とする Mg 系資材、 CaCO_3 を主成分として、MgO を微量含む Ca/Mg 系資材、 CaCO_3 を主成分とする3種類を使用した。

表-1 pH に対応した溶解度制限固相

pH	8.0	8.5	8.5	9.0	9.5	9.5	10.0	10.3	10.3	10.5	11.0	11.5	12.0
Mg系資材 溶解度制限固相	Dolomite		Magnesite			Brucite					Mg(OH) ₂ (active)		
Ca/Mg系資材 溶解度制限固相													
Ca系資材 溶解度制限固相													

3. 休廃止鉱山への展開

陸域 CO_2 固定の空間利用箇所として考えられるのが、国内外の休廃止鉱山の廃坑道である。とりわけ国内では坑廃水処理を必要としている鉱山は74箇所に上り、坑廃水処理の補助金だけで年間20億円以上が支出されている。そこで経済産業省では、「第6次特定施設に係る公害防止事業の実施に関する基本方針」³⁾において、特にカーボンニュートラル等への貢献を新たに検討すること、坑廃水処理の終了、コスト削減の加速化、中和殿物の減容化への対応を明記している。休廃止鉱山における、中和殿物をベース材料とする低炭素型材料の開発・坑道充填は、坑廃水処理費用の削減、中和殿物の減容化、カーボンニュートラル等への貢献に資することが可能である。

前述した重金属等の不溶化技術の応用として、図-3に示すように重金属等の不溶化資材を低炭素型材料(アルカリ塩の供給元)、掘削土を中和殿物と置き換えることで、資材主成分寿命予測の技術を CO_2 固定寿命の評価技術へと転換することができる。

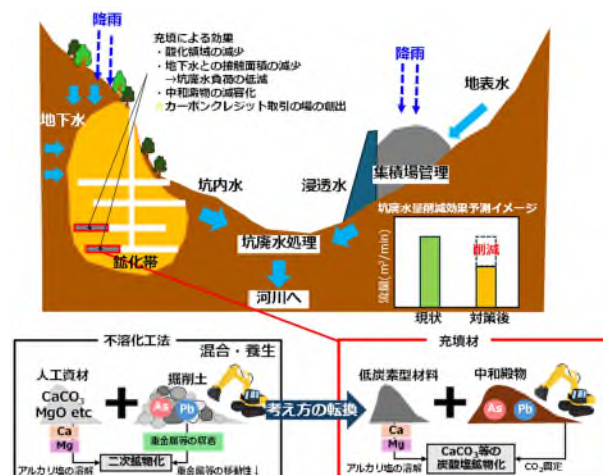


図-3 坑道充填による効果と充填材料への不溶化技術の応用

4. まとめ

重金属等の不溶化技術として利用されてきた Ca 系・Mg 系資材を構成する鉱物相(=溶解度制限固相)の溶解度を地化学計算コードによってモデリングすることで、資材主成分の寿命を予測できることがわかった。この技術を休廃止鉱山の廃坑道充填事業に応用する際には、坑廃水の水質、低炭素型材料と混合することによる中和殿物に含まれる重金属等の可溶性の変化、 CO_2 を固定化した炭酸塩鉱物の安定性、坑廃水充填材の接触割合等の項目を文献や現地調査、室内試験、分析等によって明らかにする。上述の分析により得られたパラメータを地化学計算コードに入力することによって、事前に CO_2 固定の理論寿命の算出が可能である。さらに、これに利用された先の構造物の要求性能あるいは CCUS の U(Utilization)の付加価値基準等を照らし合わせることで、その現場毎の CO_2 固定寿命の決定が可能である。例えば、休廃止鉱山に適用する場合は、充填による坑廃水負荷の低減率等が基準に利用できると考えられる。

《引用・参考文献》

- 橋本綾佳, 長谷川翔, 田村俊孝, 尾花誠一, 有馬孝彦, 五十嵐敏文: 重金属等含有掘削土に対するカルシウム系・マグネシウム系人工資材を用いた不溶化対策の寿命評価法の提案, 地盤工学ジャーナル, Vol. 18, No. 2, pp. 169-179, 2023.
- 橋本 綾佳, 山崎 秀策, 中嶋 啓太, 田村 俊孝, 尾花 誠一, 五十嵐 敏文, 有馬 孝彦: 不溶化処理後のカルシウム系・マグネシウム系資材の固相観察および元素マッピング分析による溶解度制限固相の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.19, No. 3, pp. 273-284, 2024.
- 経済産業省産業保安グループ鉱山・火薬類監理官付: 特定施設に係る鉱害防止事業の実施に関する基本方針(令和5年度~令和14年度) 概要, 2023.