

斜面安定解析ソフトを用いた海底地盤安定計算の事例紹介

興亜開発株式会社 ○吉澤 光城，高橋 幸伸

1. はじめに

斜面の安定性を評価する場合、「社団法人日本道路協会：道路土工—斜面安定工指針，2009」等に示されている標準勾配と当該地における地盤状況を対比し，安定性を評価する場合が多い。

しかし，現場状況によっては標準勾配と対比できないケースも存在する。今回評価の対象となった箇所は海底地盤で，土質が底質に近いものであり，標準勾配との対比が困難であった。そこで，調査地における地盤定数を推定し，これに基づいて斜面安定解析ソフトを用いて安定性評価を行うこととした。

2. 現場状況

調査地は固定式水上栈橋側面である。この場所では浚渫工事の際に，栈橋張石上部に堆積している土砂が浚渫部に崩落する現象が報告されていた（図-1）。そのため，この土砂の現況の安定度を把握し，今後の荷役船の接岸に支障が発生するかを調査するため，試料サンプリング及び室内土質試験を実施し，斜面の安定計算を行った。

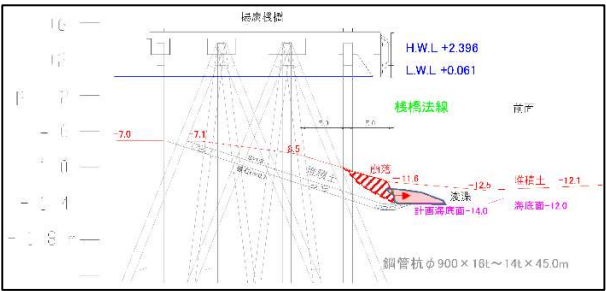


図-1 堆積土の崩落概要図

3. 調査方法

調査する海底面は現在供用中の栈橋直下に位置し，ボーリングによる乱れの少ない試料採取は，栈橋を削孔することとなるため安全の面から不採用となった。そのため，今回はダイバーの人力による，シンウォールサンプラーの押し込みによる乱れの少ない試料採取を採用した。

試料サンプリングは以下の箇所を実施し（図-2），採取深さはGL-0.5m～-1.5mとした。

・浚渫実施エリアである No.27断面：栈橋法線を基準に栈橋下方面に2.5m 部と7.5m 部

・浚渫未実施エリアである No.36断面：栈橋法線を基準に栈橋下方面に2.5m 部

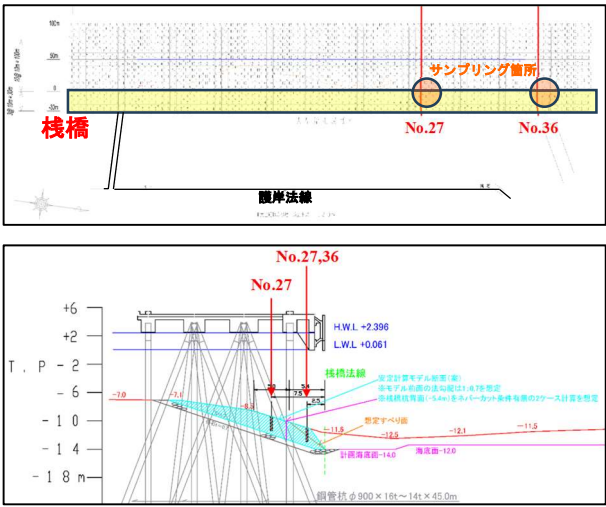


図-2 サンプリング実施箇所

4. 室内土質試験及び地盤定数

(1) 室内土質試験結果

室内土質試験結果より，調査地に堆積する土砂は「砂混じり～砂質粘土」に分類され，自然含水比 w_n > 液性限界 w_L の関係から不安定な土と判定される。

(2) 湿潤密度の推定及びベーンセン断試験

採取された試料は非常に軟質かつ貝殻片を多量に含んでおり，ライナーから取り出した段階で変形してしまう可能性が高かった。そこで，試料を含むシンウォールサンプラー全体の重量・試料長・ライナー重量からの湿潤密度の推定及びベーンセン断試験を実施した。

ベーンセン断試験はサンプリング試料10cm ごとに試験を行い，1.0 cN・m 以上の値を読み取ることができた箇所の値のみを結果として採用した。

湿潤密度推定の計算結果を表-1に，ベーンセン断試験の試験結果を表-2に示す。

表-1 湿潤密度推定の計算表

試料名	TW長さ cm	上部距離 cm	試料長さ cm	全質量 g	TW質量 g	試料質量 g	土体積 cm ³	推定 ρ_t g/cm ³
No.27-2.5m②	99.7	3.4	93.3	8090.0	2801.6	5066.4	4121.868	1.229
No.27-7.5m①	98.7	2.9	92.8	8040.0	2773.5	5044.5	4099.778	1.230
No.27-7.5m②	98.8	3.5	92.3	7850.0	2776.3	4851.7	4077.689	1.190
No.36-2.5m②	99.3	3.0	93.3	8350.0	2790.3	5337.7	4121.868	1.295
							平均	1.236

表-2 ベーンセン断試験結果一覧（採用値）

地点	No.27m-2.5②		No.27m-7.5①		No.36m-2.5②		
	読み取った値 (cN・m)	ベーンセン断強さ (kN/m ²)	読み取った値 (cN・m)	ベーンセン断強さ (kN/m ²)	読み取った値 (cN・m)	ベーンセン断強さ (kN/m ²)	
	1.0	0.81	2.5	2.02	3.5	2.83	
			2.0	1.62	2.5	2.02	
			1.5	1.21	2.5	2.02	
			1.0	0.81	2.0	1.62	
平均値		0.81		1.42		2.12	1.43

(3) 地盤定数

以上の土質試験結果より、調査地における地盤定数を表-3のように設定した。

表-3 地盤定数の設定結果

単位体積重量 $\gamma_t(\text{kN/m}^3)$	せん断強さ	
	粘着力 $c(\text{kN/m}^2)$	せん断抵抗角 $\phi(\text{度})$
12	1.4	0

5. 斜面の安定計算結果

斜面の安定計算には「富士通 Japan 株式会社製 斜面安定計算システム COSTANA」を使用し、「社団法人日本道路協会：道路土工―軟弱地盤対策工指針，1986」に基づき計算を行った。安定計算には、最も危険側と見られる断面を選定した。また、栈橋杭背面（栈橋法線から離隔5.4m）が抑止工の役割を果たしている可能性があったため、その箇所をネバーカットの条件として、無い場合と有る場合の2ケースを想定して安定計算を実施した。

表-4に安定計算の層条件、図-3,4に安定計算のモデルと最小安全率の計算結果を示す。張石についてはすべり出しが起こらないような値を仮に設定した。

表-4 層の設定条件

層番号	飽和重量 (kN/m^3)	湿潤重量 (kN/m^3)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m^2)	粘着力の 一次係数	水平震度	鉛直震度
1	12.00	12.00	0.00	1.40	0.00	0.000	0.000
2	20.00	20.00	45.00	0.00	0.00	0.000	0.000
3	12.00	12.00	0.00	1.40	0.00	0.000	0.000

最小安全率を求めるための格子設定は、まず格子の分割ピッチを1m 四方と大まかに取って安全率が最小値となる箇所を探し、分割ピッチを0.5m 四方と細かく取って最小安全率を求めた。

栈橋杭の抑止力を無視した場合の最小安全率は0.689となり、抑止力を考慮した場合の最小安全率は1.006となり、 $F_s < 1 \sim F_s \approx 1$ という結果が得られた。以上より、栈橋杭背面によりすべり出しが抑えられている箇所もあるが、全体として「今後もすべり出しが発生する可能性が高い」と評価した。

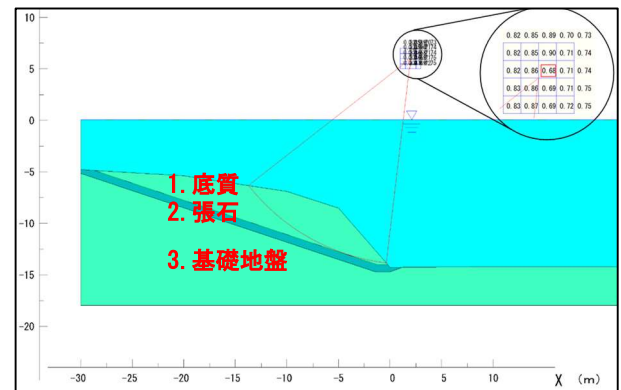
また、参考までに同ソフトを用い、対策工を検討する上で重要となる最大抑止力計算及び必要となるせん断強さ $c \phi$ の算定を必要安全率1.2として逆算により求めた(表-5)。

表-5 層の設定条件

栈橋杭背面	最大抑止力	逆計算	
		$c=1.4$	$\phi=0$
無し	最小安全率と同箇所での16.4kN	$\phi=6.29 \sim 20.49$	$c=2.44$
有り	最小安全率と同箇所での2.0kN	$\phi=-10.61 \sim 20.79$	$c=1.67$

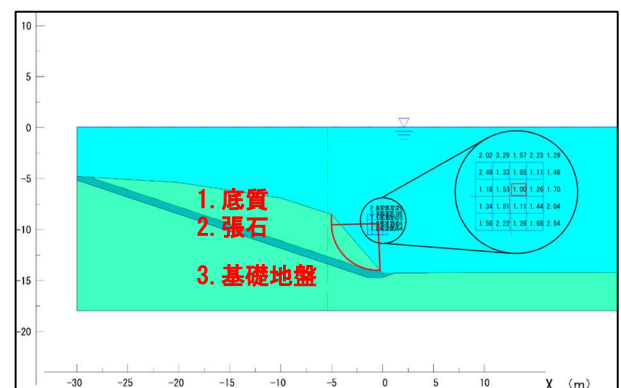
今回の結果では最小安全率を与える断面と最大抑止力を与える断面が一致したが、これが一致しない場合があ

ることに留意する必要がある。



最小安全率	$F_s \text{ MIN} =$	0.689
円弧の中心	X =	2.00 (m)
	Y =	6.00 (m)
半径	R =	20.000 (m)
抵抗モーメント	$M_R =$	440.3 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
起動モーメント	$M_D =$	639.5 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

図-3 安定計算モデルと最小安全率の計算結果
(栈橋杭背面無し)



最小安全率	$F_s \text{ MIN} =$	1.006
円弧の中心	X =	-0.50 (m)
	Y =	-9.50 (m)
半径	R =	4.500 (m)
抵抗モーメント	$M_R =$	46.0 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
起動モーメント	$M_D =$	45.7 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

図-4 安定計算モデルと最小安全率の計算結果
(栈橋杭背面有り)

6. まとめ

現場に応じた地盤定数を設定し、斜面安定解析ソフトを用いることで、すべり出し状況の予測を立てることができた。斜面安定解析ソフトによる計算は数秒で終わるため、適切な地盤定数の設定と正確な図面の作成が重要になると感じた。今後斜面安定解析を行う際はこの2点を重視して取り組みたい。

繰返し荷重をうけるモノパイル基礎の三次元有効応力解析事例

川崎地質株式会社 ○市川 直樹, 吉泉 直樹, 白井 太郎, 小林 優起

1. はじめに

現在、導入拡大が進む洋上風力発電は、風車構造物本体（タワー、ブレード、RNA）を海底地盤に設置した基礎で支える着床式が主流である。その中で主流となっているのが、「モノパイル基礎（MP）」と呼ばれる1本の鋼管杭を海底地盤に打設し、上部構造である風車本体を支える基礎形式である。

本稿では、三次元FEMを取り入れたモノパイル設計法が主流になりつつある背景を踏まえ、日本で開発されたFEMコード「FLIP ROSE 3D¹⁾」を使用した、繰返し水平荷重を受けるモノパイルの解析事例を紹介する。また、小林らが昨年度実施した「LIQCA 3D²³⁾」による解析結果²⁾との比較を行った。

2. 遠心模型実験によるモノパイルの挙動評価

「大村ほか, 2020」³⁾は相対密度80%の飽和豊浦砂の模型地盤上にモノパイル（以降、杭）を設置し、50Gの遠心場で種々条件の繰返し変位を与えその挙動を観察した。その結果、載荷条件によって杭周辺の過剰間隙水圧は繰返し回数の増加とともに上昇し、杭モーメント及び杭反力が低下したケースが報告されている。

3. FLIP 解析モデル及びパラメータ

解析モデルを図-1に示す。パラメータは豊浦砂の土質試験結果を基本とし、液状化強度曲線や応力ひずみ関係、有効応力経路が試験結果を再現するように、パラメトリックスタディにより決定した。

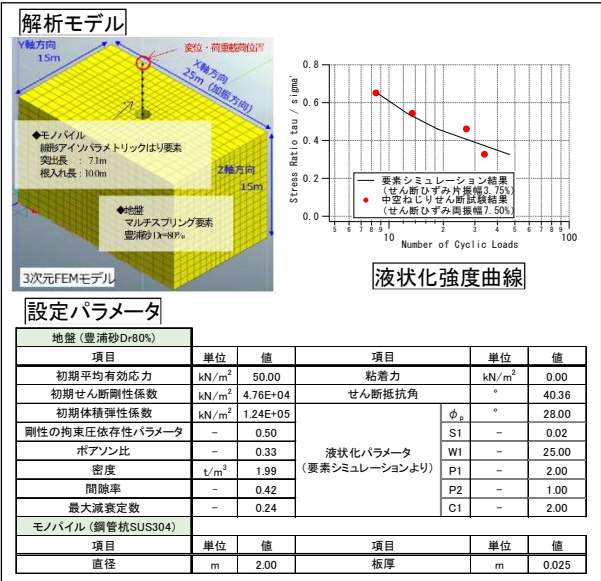


図-1 解析モデルと設定パラメータ

4. 定変位解析 (遠心実験との比較)

(1) 載荷変位

定変位解析は、遠心実験のトレースとして、杭上部に140mm（実験スケールでは2.8mm）の変位を繰返し載荷するケースについて行った。なお、繰返し回数は20回とした。

(2) 定変位解析結果

実験及び解析における載荷点（杭上部）の荷重－変位関係を図-2に示す。なお、解析結果の荷重は、荷重相当としてせん断力（加振方向）を示したものである。実験では2サイクル目で荷重の大きな低減がみられ、以降ほぼ一定の荷重となる。実験の荷重－変位関係は、一般的にみられるようなスリッ形状を示し、解析でも同様の傾向が確認された。

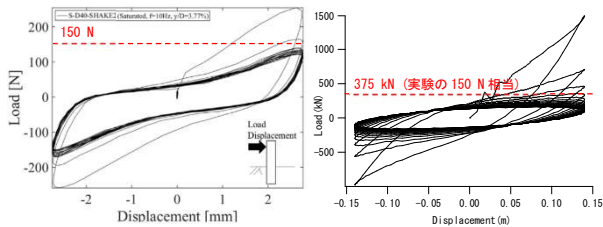


図-2 荷重-変位関係 (左: 実験、右 FLIP 解析)

図-3に示すモーメント分布図では、地盤の液状化と共に曲げモーメントの低下が見られる。5サイクル目では実験と両解析共に曲げモーメントが概ね一致する。FLIP 解析のモーメントの分布は、実験・LIQCA 解析と比較してピークがより深部になる傾向がみられる。

ただし、実験では5サイクル目以降徐々にモーメントが増加する傾向を示したが、解析では5サイクル目付近まで曲げモーメントが急激に低下した後、増加する傾向はみられなかった。

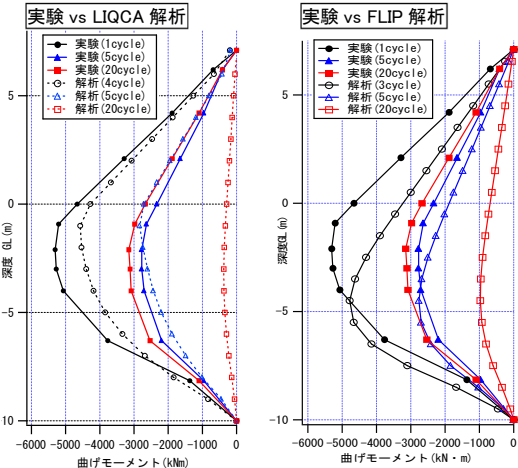


図-3 杭の曲げモーメント分布 (左: LIQCA、右 FLIP)

5. 定荷重解析

(1) 載荷荷重

定荷重解析は、杭上部に載荷する荷重を変化させ、表-1に示す3ケースについて行った。

表-1 解析ケース(定荷重解析)

CASE	上部載荷荷重(kN) (繰返し載荷)	振動数(Hz)	繰返し回数 (サイクル数)
1	1750	0.2	20
2	1250	0.2	20
3	650	0.2	20

(2) 定荷重解析結果

図-4に示す杭根入れ中間深度地盤の過剰間隙水圧比は、繰返し回数の増加に伴い徐々に上昇し、荷重値が大きく杭に近いほど上昇しやすくなっている。

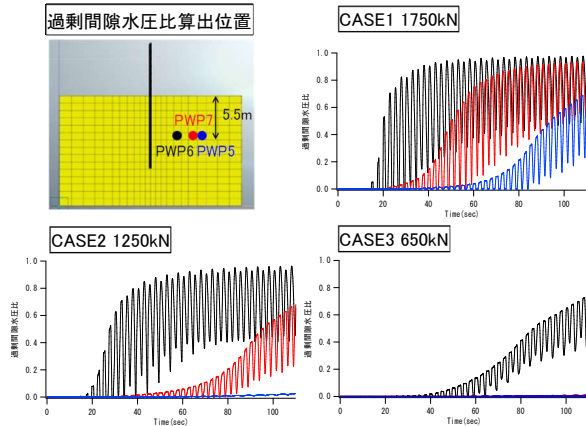


図-4 過剰間隙水圧比の時刻歴(荷重別)

杭に発生する曲げモーメントは、繰返し回数の増加に伴い低下する傾向があるが、いずれの荷重条件においても8サイクル目以降はモーメントの低下がみられず、ほぼ一定となる(図-6 CASE3 三次元)。

6. 二次元解析との比較

二次元解析は、定荷重解析 CASE3の条件で実施した。地盤要素の奥行幅は、モノパイル径の2倍、2.5倍、3倍の3ケースについて行った(表-2)。

表-2 解析ケース(定荷重解析:二次元モデル)

CASE	上部載荷荷重(kN) (繰返し載荷)	地盤の解析 奥行幅(m)	杭に対する 地盤要素の 奥行幅
4	650	4	2倍
5	650	5	2.5倍
6	650	6	3倍

図-5に同荷重条件の三次元解析(CASE3)を含めた荷重載荷点(杭上部)における荷重-水平変位関係を示す。

繰り返しの載荷に伴い徐々に変位が増加するが、二次元解析の場合は奥行幅が大きいほど地盤の剛性は大きく評価されるため、杭上部はより小さい変形となっている。

CASE3の三次元解析は20サイクル目で0.85m程度の水平変位となり、二次元解析ではCASE4で0.70m程度と三次元に近い挙動となっている。

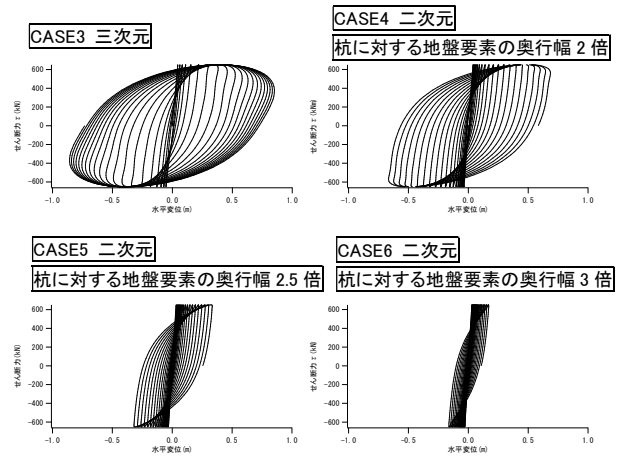


図-5 杭上部の荷重-水平変位関係

二次元解析の曲げモーメントは、三次元解析と比較していずれの奥行幅であってもほぼ同程度である(図-6)。

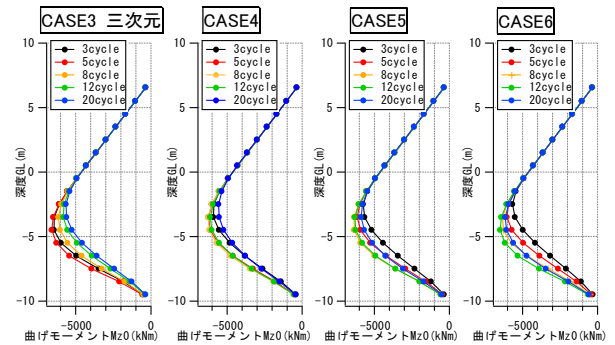


図-6 杭の曲げモーメント分布図

7. まとめ

- ①定変位条件では、両解析コードで過剰間隙水圧の上昇は遅れるが、変位載荷による過剰間隙水圧の上昇とそれによる曲げモーメントの低下は実験を概ね再現できた。
- ②定荷重条件では、荷重が大きく杭近傍ほど過剰間隙水圧比が上昇しやすい傾向がある。曲げモーメントは繰返し回数の増加に伴い低下する傾向があるが、8サイクル目以降はほぼ一定となる。
- ③二次元解析との比較では、変位量・モーメント分布は解析幅杭径2倍ケースが三次元解析と近い結果となる。

今後は、実際の設計手法を想定し、三次元解析結果を杭-地盤相互作用モデルに反映させる手法や要素間の排水の影響についても検討していきたい。

《引用・参考文献》

- 1) 一般社団法人 FLIP コンソーシアム (2023): FLIP ROSE 3D (Ver. 1.8) 取扱説明書。
- 2) 小林優起, 吉泉直樹, 白井太郎, 市川直樹 (2024): 繰返し荷重をうけるモノパイル基礎の三次元 FEM 解析事例, 全地連技術フォーラム2024, 論文 No. C099。
- 3) 大村直哉, 高橋章浩, 内藤歩, 小林孝彰, 蒲田幸徳 (2020): モノパイルの繰返し水平載荷条件と周辺砂地盤の剛性に関する遠心模型実験, 第 55 回地盤工学研究発表会。

海水練りに適した高粘性高ゲルベントナイト系泥水材料

クニミネ工業株式会社 ○諸留 章二、 諏訪 浩史

1. はじめに

ベントナイトは水と混合することで粘性等を有する泥水材料となり、土木建築基礎分野においてボーリングなどの掘削安定液として長年にわたり利用されてきた¹⁾。

ベントナイトは海水等の高伝導率の水中ではモンモリロナイトの層間剥離が進まずその粘性が弱まるが、海上での安定液の作液時に、清水の用意が困難な際には海水で作液される場合がある。海水練りの安定液作液技術として、清水で事前膨潤させる方法や特殊な調泥剤による性能改善が検討されている^{1,2,3)}が、実際にはベントナイトやポリマーを通常より多く添加して作液されることもある。その際、添加量を増やす事で安定液の粘性を高める事は可能であるが、降伏値を高める事や浮き水の分離を抑える事は容易ではない。しかし、掘削ブリの保持回収を行いたい場合には、高粘性でかつ高降伏値（高ゲル強度）の安定液が必要となる。

沿岸や海上ボーリングなどによる安定液の利用は今後も増えることが見込まれるため、海水練りに対応できる一材のベントナイト系材料が求められると考えられる。

そのため本検討では、ベントナイトにポリマー等の添加剤を事前配合した海水練りに適応可能かつ高粘性高ゲルベントナイト系材料の開発を目的として、適切なベントナイトやポリマー等の添加剤の探索及び配合を検討し、得られた最適配合の材料についてその評価を行った。

2. 材料選定及び配合検討

ベントナイト、HPMC ポリマー、炭酸 Na、消泡剤の種類と配合を固定し、9 種類のポリマーをそれぞれ加えて一材のベントナイト組成物を 9 種作製した（表-1）。

表-1 ベントナイト組成物の構成材料

試料名
Na 型ベントナイト-1
HPMC
炭酸 Na
消泡剤
各種ポリマー(9 種類)

人工海水 1L に対して、これらのベントナイト組成物を外割 10wt%で投入し 10 分間攪拌し泥水を作製した。この泥水のファンネル粘性（FV、秒）及び、回転粘度計から降伏値（YV、kg/m²）と初期ゲル強度（GS、kg/m²）を測定した結果を表-2 に示す。

その結果、微生物発酵多糖類-1 のポリマーを用いた場合に、ファンネル粘性、降伏値、初期ゲル強度が高い泥

水が得られることがわかった。

表-2 各種ポリマーを用いた泥水性状

No.	ポリマー種	FV	YV	GS
1	微生物発酵多糖類-1	113.8	1.61	1.02
2	同上-2	42.3	0.78	0.24
3	多糖類-1	26.7	0.24	0.05
4	CMC-1	39.5	0.88	0.05
5	CMC-2	31.3	0.29	0.02
6	HEC	32.3	0.63	0.05
7	HPMC(表-1 内と同じ)	31.6	0.24	0.02
8	ポリアクリル酸 Na-1	20.7	0.05	0.05
9	ポリアクリル酸 Na-2	20.6	0	0.05

次に、表 1 の配合でベントナイトの種類を変えて同様の試験を行った。表 1 内の各種ポリマーとしては微生物発酵多糖類-1 を用いた。

その結果、いずれのベントナイトを使用しても大きな差はなく、粘性、降伏値、ゲル強度が優れた泥水が得られることがわかった。

表-3 各種ベントナイトを用いた泥水性状

No.	ベントナイト種	FV	YV	GS
1	Na 型ベントナイト-2	65.9	2.05	1.22
2	活性化ベントナイト	85.9	2.00	1.22
3	Ca 型ベントナイト	80.8	1.90	1.27

3. 最適材料の配合と性状

これまでの結果から、ベントナイトは Na 型ベントナイト-1、主ポリマーは微生物発酵多糖類-1 を選択したが、材料の特性及びコスト面も再度考慮して最終的に下表-4 を最適構成材料として配合調整を行った。

表-4 ベントナイト組成物の最適構成材料

試料名
Na 型ベントナイト-1
微生物発酵多糖類-1
CMC-1(表-2 内 No.4)
炭酸 Na
消泡剤

この最適材料について、ファンネル粘性、降伏値、ゲル強度、脱水量を各濃度別で測定した。結果、粘性、降伏値、ゲル強度が高く、脱水量が低く抑えられた優れた泥水材料であることがわかった（図-1、図-2）。この粘性性状は数日間変化しない事も確認した。さらに、掘削ブリの保持性評価のため、3 水準の濃度で作液直後の泥水

液面に直径 10mm 程度の小石を 10 個浮かべ様子を 10 分間確認した（写真-1）。結果、濃度 6wt%では小石は全て沈んだが、8wt%、10wt%では小石を液面に保持しており、掘削ブリの保持性能が高い安定液と考えられた。

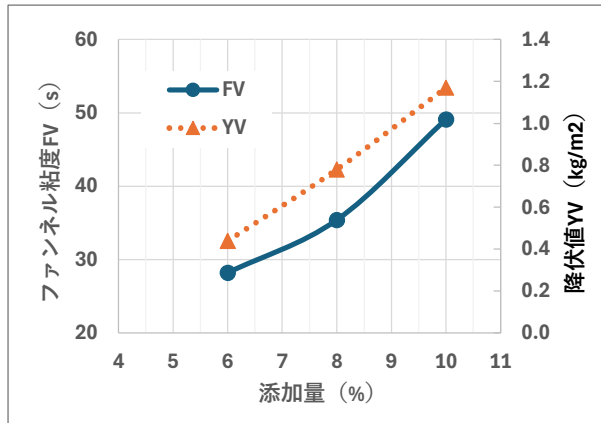


図-1 最適材料の泥水性状(1)

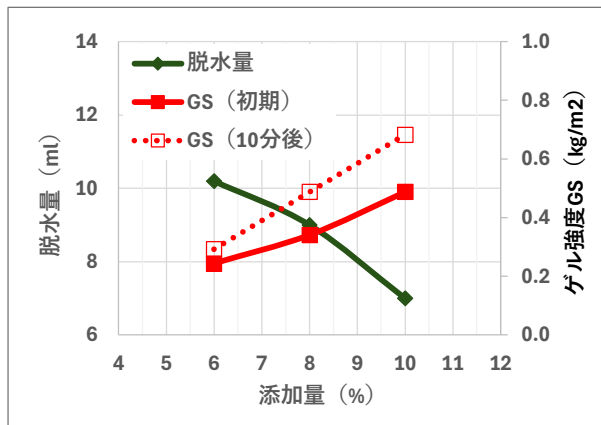


図-2 最適材料の泥水性状(2)

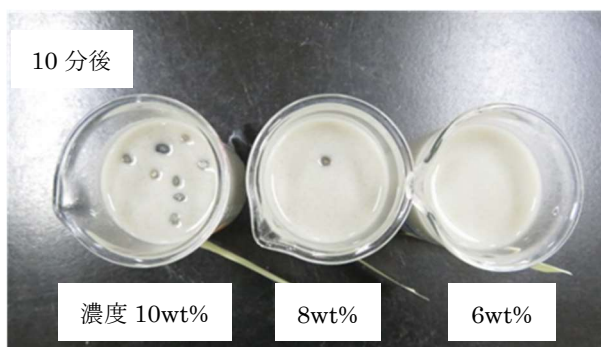


写真-1 ゲル性状の確認

また、作液後の浮き水分離評価のため、最適材料の泥水（濃度 8wt%）と既存製品の Na 型ベントナイト（製品名クニゲル V1）の泥水（濃度 20wt %）を、メスシリンダーに投入し、10 分後の浮き水を確認した。その結果、Na 型ベントナイトはすぐに分離が始まるが、最適材料の泥水は泡立ちもなく全く分離しておらず、一夜後でも分離はほとんど起きない事を確認した。

4. 現場への適応例

この最適材料（製品名クニフォース PX）を、これまでに 5 件の現場へ適応した（写真-2）。各現場それぞれ 200 kg から 5 トン程度使用した。聞き取り調査では、使用感として概ね良好であり、これまで既存製品の Na 型ベントナイトと添加剤を用いて海水練りを実施していたがこの最適材料は分離も少なくブりがよくあがる、一夜掘り置き後のスライム沈殿量が激減した、トータルコストはこれまでより削減が見込まれる、などの高評価が得られた。その内一現場で、夏場一週間現場がストップした際に泥水が腐敗し粘度低下や悪臭が発生したため、本材料に事前に防腐剤を添加するなど更なる改良の余地が見られた。また、粘土層掘削時に比重上昇等のトラブルが発生するケースもあったが、砂礫層ではブりの運搬、逸泥・崩壊防止に十分な効果を発揮しており、特に砂礫層掘削時に適した材料であると考えられた。



写真-2 現場での作泥の様子

5. まとめ

海水練りに適した、高粘性、高降伏値、高ゲル強度のベントナイト系泥水材料を開発するために、海水に適したポリマー及びベントナイトを調査し、最適材料選定と配合の検討を行った。その結果、得られた最適材料は、従来よりも少ない添加量で、優れた特性を有することがわかった。また、現場への適応を実施し使用可能であることを確認した。

《引用・参考文献》

- 1) 沖野文吉（1981）：ボーリング用泥水，p. 201，技報堂出版。
- 2) 高野晴男（1990）：海水利用のポリマー泥水に関する研究，p. 966，Ⅲ-465．土木学会第45回年次学術講演会。
- 3) 森仁司ほか（1987）：泥水式シールド用海水練り泥水に関する研究，p. 578，Ⅲ-277．土木学会第42回年次学術講演会。

DTH-SPT の N 値評価と課題の解決策

川崎地質(株) ○稲吉 隆太郎, 井上 駿, 三上 啓太, 竹内 翔, 柴田 好晴

1. はじめに

近年、洋上風力発電事業における大深度でのボーリング調査が急増している。大深度で標準貫入試験 (SPT) を実施する際、ケーシングとロッド等の摩擦の影響により、打撃エネルギーが減衰し、N 値が過大評価される可能性がある¹⁾。我々はエネルギー減衰が N 値に及ぼす影響について研究を進めており、その一環として、孔底打撃型である Down The Hole-SPT (以下、DTH-SPT)²⁾ を試験の運用してきた。

今回、JIS 規格の SPT ((JIS A 1219-2013) Standard Penetration test, SPT) と DTH-SPT の両方から得られた N 値の比較を行った結果と DTH-SPT 運用上の課題と解決策についてまとめる。

2. DTH-SPT とは

DTH-SPT は孔底打撃型のツールであるため、トッププッシュ型である JIS 規格の SPT に比べ、エネルギー減衰が少ないと考えられ、大深度での N 値は小さくなる。

DTH-SPT の内部構造は、図-1 にあるように、大きく SPT ユニットと SPT サンプラーに分けられる。SPT ユニットは完全防水であり、ハンマーが内蔵されている。ハンマーはワイヤーとつながっているプッシュロッドに接続されており、ワイヤーを引き上げることで打撃を可能としている。

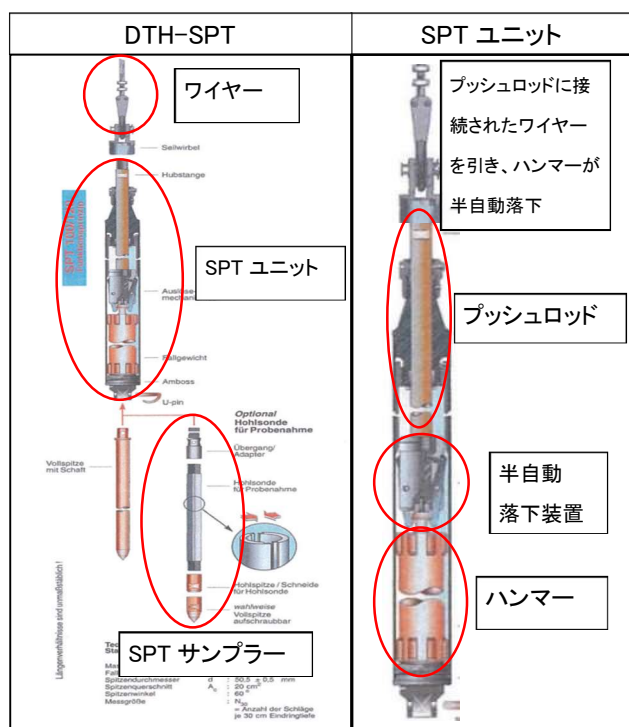


図-1 DTH-SPT の内部構造

3. 試験概要

(1) 試験条件

JIS 規格の SPT と、DTH-SPT を、GL-10.00m から 1m 毎に SPT を実施した。

(2) 試験方法

DTH-SPT の試験実施方法について、ロータリー式のボーリングマシンを使用してオールケーシングで掘進した。掘進後、ワイヤーラインにて 1m ごとに貫入試験を実施した。

4. 結果

調査地の土質としては、所々で粗砂を混入するシルト質微細砂が層厚 10m ほどあり、その下層には粘性が小さい粘土が層厚 1m ほど存在する。それ以深は細砂となっている。

図-2 に本調査で得られた N 値の深度分布図を示す。なお、GL-20.00m 以深は、DTH-SPT の N 値が非常に大きくなり、SPT サンプラーを点検したところ、接続部に変形がみられたため、調査を中止し、GL-20.00m 以深は異常値と判断した。

JIS 規格の SPT と DTH-SPT を比較すると、GL-16.00m 以浅の N 値と GL-19.00m の N 値は比較的類似した結果となり、GL-16.00m までの平均値は JIS 規格の SPT が 27 回/30cm、DTH-SPT が 28 回/30cm であった。GL-19.00m の N 値は JIS 規格の SPT が 29 回/30cm、DTH-SPT が 37 回/30cm であった。

GL-17.00m と GL-18.00m の N 値は乖離した結果となり、平均値は JIS 規格の SPT が 24 回/30cm、DTH-SPT が 66 回/30cm であった。

図-3 に JIS 規格の SPT の N 値と DTH-SPT の N 値の相関図を示す。類似した N 値の相関式は $y=1.06x$ となっており、類似した N 値の相関性は高いことが伺える。乖離した N 値の相関式は $y=2.70x$ となっており、乖離した N 値の相関性は低いことがはっきりと分かった。

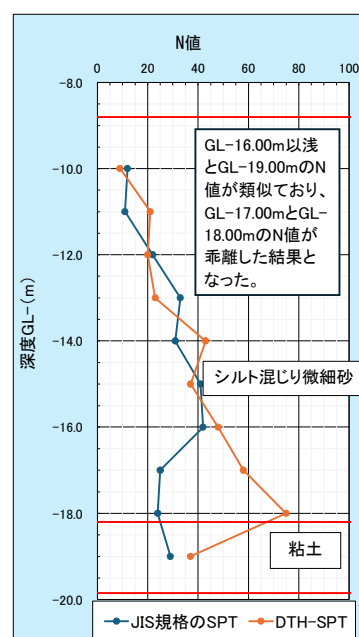


図-2 本孔と別孔の N 値深度分布図

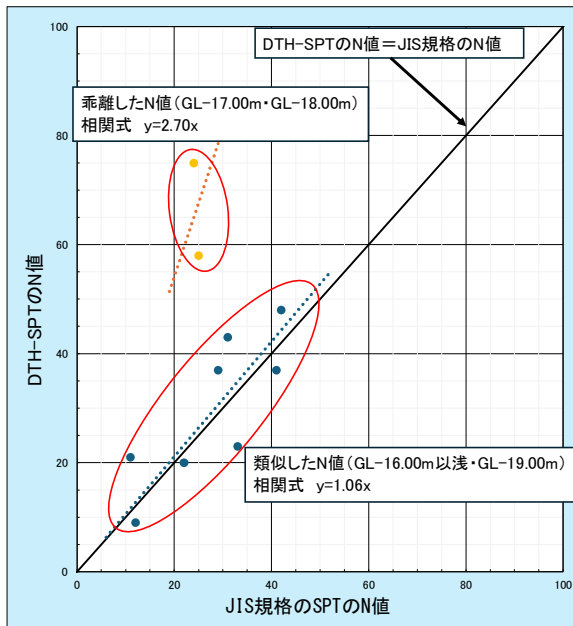


図-3 JIS 規格の SPT の N 値と
DTH-SPT の N 値の相関図

5. 考察

(1) 類似した N 値の考察

本来、DTH-SPT は JIS 規格の SPT よりも N 値が小さくなるはずだが、今回は浅層の GL-19.00m までの調査であるため、JIS 規格の SPT でもエネルギー減衰はなく、類似した結果となったと考えられる。このことから、DTH-SPT の GL-16.00m までの N 値と GL-19.00m の N 値は正常値であると判断する。

(2) 乖離した N 値の考察

JIS 規格の SPT と DTH-SPT 乖離した結果となった深度について、シルト混じり微細砂層の中で、急激に乖離していることから、N 値の乖離は土層の問題ではなく、DTH-SPT の運用に原因があると考察する。以下に考えられる原因を3点挙げる。

- ①孔曲がりによる DTH-SPT と孔壁の接触
- ②DTH-SPT が斜めに設置されたことによる孔壁との接触
- ③サンプラー接続部の変形

この3点の中で、①と③が原因であるとするならば、一部の N 値が乖離するのではなく、継続的に N 値が乖離すると考えられるため、GL-17.00m と GL-18.00m のみで、②の現象が起こり、N 値が乖離したと考える。

6. DTH-SPT の改良案

②の問題を解決すべく、DTH-SPT を孔内に垂直に設置できるようにするため以下の改良を施す必要がある。

図-4に改良案のイメージ図を示す。

(1) ラッチさせる機構の作成

SPT ユニット上部に DTH-SPT をラッチできるように「ハネ」を取り付け、さらに専用のケーシングパイプを作成することで設置後、DTH-SPT が孔底直前で、静止できるようになる。

(2) SPT サンプラーを SPT ユニットに内蔵

ユニット内部にサンプラーを内蔵し、打撃を加えるとサンプラーのみが動く構造にすることで、ラッチさせながら試験を行うことが可能となる。

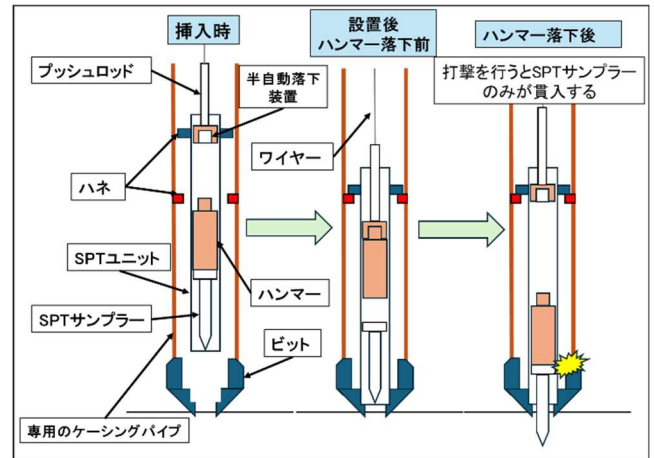


図-4 改良後のイメージ図

7. 今後の課題

現在日本では SPT で得られた N 値が重要視されており、大深度ボーリング調査でエネルギー減衰の懸念がなく N 値を採取できる手法として DTH-SPT を提案するためには、大深度において DTH-SPT の有効性を示す必要がある。

有効性を示すために、まずは DTH-SPT を運用する上で、前述した改良案を施し、常に DTH-SPT が正常に作動させることができるようにすることが先決である。現状、データ数が少ないため、改良を施した DTH-SPT を運用して多くのデータを採取し、得られたデータから DTH-SPT のキャリブレーションを行い、JIS 規格の SPT との比較を継続していく。

DTH-SPT で多くのデータを採取する上で、JIS 規格の SPT ではエネルギーが減衰しやすい大深度で試験的に運用を行わなければならない。また大深度での試験にて JIS 規格の SPT でエネルギーの減衰があると考えられた場合、JIS 規格の SPT の試験時にエネルギー減衰を測定し、N 値の補正を行い、同地点で採取された DTH-SPT の N 値と比較も試みる。

今後、ドリルシップ等の洋上での運用を行っていきたいが、現状弊社のみでは限界があるので、共同研究や発注者に提案を行い、洋上での運用を目指す。

《引用・参考文献》

- 1) 一社 関東地質調査業協会：我が国における標準貫入試験の利用実態と留意点, pp1-11, 2021
- 2) DTH-Down The Nordmeyer, (最終閲覧日 2025.5.19)

[SPT english.pdf \(nordmeyer.nl\)](#)

セシウム磁力計センサを用いた海上磁気探査の取り組み 2

日本物理探査株式会社 ○天野 量稀, 佐々木 正徳, 愛甲 崇信, 吉川 秀人, 河野 秀紀, 鈴木 匠

1. はじめに

当社は、危険物等の埋没鉄類を対象とした磁気探査業務に従事しており、近年は海上磁気探査におけるセシウム磁力計による埋没鉄類探査の実用化に取り組んでいる。本発表では、昨年度の発表に引き続き、台船が及ぼす全磁力データへの影響について実施した実験を紹介する。

2. 実験場所

実験は福岡県北九州市門司区田野浦海岸前の海域(関門航路近傍)で実施した。実験海域を図-1に示す。

図-1 実験海域¹⁾

3. 実験方法

(1) 測定方法

測定は台船曳航方式により、台船から吊り下げたセンサ枠を曳航して測定した(図-2参照)。センサ枠の深度(以下、枠深度)は、水圧計で水深を監視し、ウインチ操作により制御した。

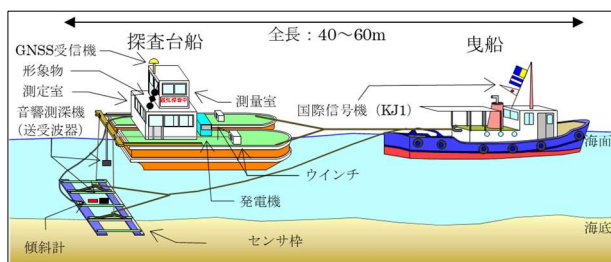


図-2 探査方法概念図

(2) 測定機器

測定は、船位、磁気傾度、全磁力、枠深度、センサ枠の高度(以下、枠高度)、及びセンサ枠の傾斜角(以下、傾斜角)の6種類のデータを取得した。測定機器を表-1、センサ枠の概念図を図-3に示す。

表-1 測定機器一覧表

測定機器	役割・測定
GNSS (CLAS)	誘導, 航跡測定
両コイル型磁気傾度計	磁気傾度測定
セシウム磁力計	全磁力測定
水圧計	枠深度の測定
音響測深機 (送受波器: 台船 1, 枠 1)	センサ枠, 海底の監視. 枠高度の測定.
傾斜計	センサ枠の監視, 傾斜角の測定.

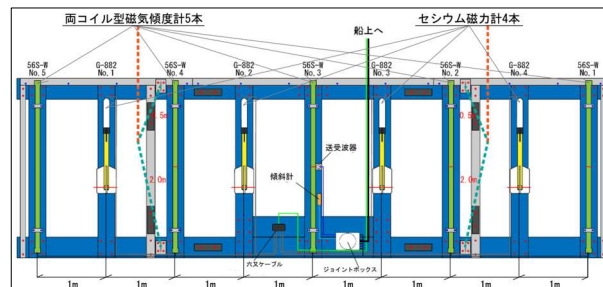


図-3 センサ枠概念図

(3) 想定される台船の影響と測定

実験で使用した台船はFRP製であり、台船自体は非磁性だが、発電機・ウインチ・資機材等による磁気異常が生じる。磁性には誘導磁気と残留磁気があるため、台船の向きにより生じる磁気異常も変化すると考えられる。このため、表-2に示す2種類の測定を行った。なお、操船の都合上、実際には8の字ではなく円状に測定を行った(図-4参照)。各測定の概念図を図-5、図-6に示す。

表-2 測定名の目的と方法

測定名	目的	方法
8の字測定	枠深度毎に方位と台船の磁気異常の関係を求める	枠深度を3mから11mに変えて右回り左回りの円状に測定
階段測定	往路・復路方向での枠深度と台船の磁気異常の関係を求める	直線(往路・復路)で枠深度を3mから11mに変えて階段状に測定

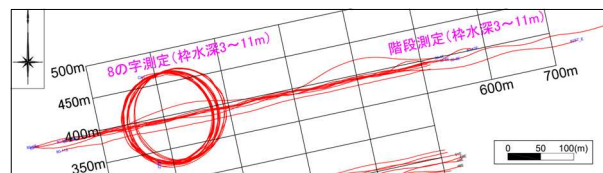


図-4 航跡図

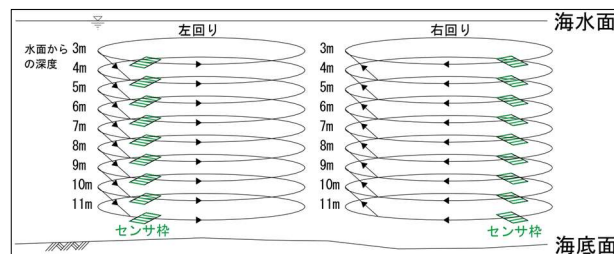


図-5 8の字測定概念図

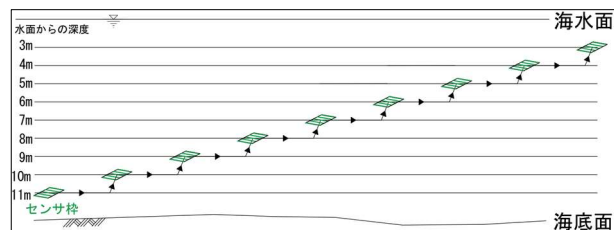


図-6 階段測定概念図

4. 台船による磁気異常

(1) 8の字測定

8の字測定のデータに日変化補正、ノイズ除去等の処理による台船の磁気異常を顕在化し、枰深度毎の方位と台船による磁気異常の関係を求めた(図-7参照)。

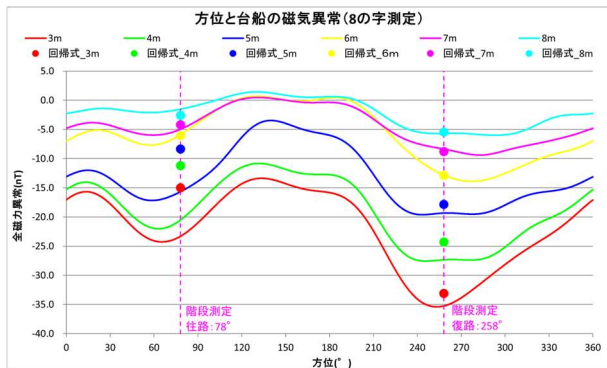


図-7 枰深度毎の方位と台船の磁気異常の関係

(2) 階段測定

階段測定のデータに日変化補正、トレンド除去等の処理を行い台船の磁気異常を検出し、往路(N78° E)と復路(N258° E)の枰深度と台船による磁気異常の関係を求めた。図-8に枰深度と台船の磁気異常の関係、図-9に台船による磁気異常の回帰式を示す。

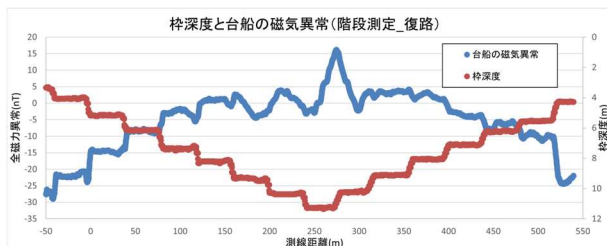


図-8 枰深度と台船の磁気異常の関係(復路)

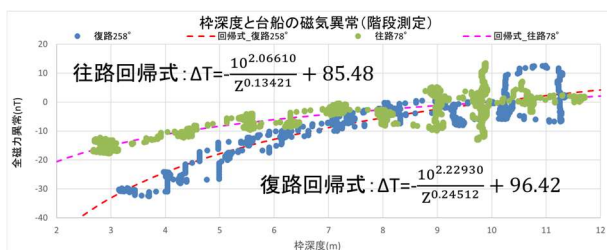


図-9 台船による磁気異常の回帰式

(3) 8の字測定と階段測定の結果の比較

各測定の結果、台船は負の磁気異常を生じ、枰深度が浅いほど台船の影響が大きい。深度3m の場合、往路で-30nT 程度、復路で-20nT 程度の磁気異常を生じる点で整合しており、8の字測定の結果が妥当な値であると判断される。

5. 航跡の蛇行による台船の影響

台船による磁気異常は、方位・深度が変わらなければ一定値であるため、埋没鉄類の探査には影響しない。実際には、船は蛇行しながら航行するため、台船の蛇行により生じる磁気異常を、図-7 の関係を用いて計算・検

討した。

航跡の蛇行により生じる磁気異常が大きくなる方位は、台船による磁気異常のピークの方位(250° , 60° 付近)ではなく、変動が大きい方位である。今回は変動が最も大きい 215° 付近に着目し、実験で得られた航跡の平均方位を 215° にしたときに生じる磁気異常を計算し、トレンドを除去するためのハイパスフィルタ処理後のデータから磁気異常の全振幅を読み取った。図-10 に枰深度3m, 方位 215° での磁気異常の計算値、表-3 に深度毎の航跡の蛇行により生じる磁気異常を示す。計算の結果、仮に測定時のノイズ許容値を 5nT とした場合、枰深度を 5m 以深にする必要がある。

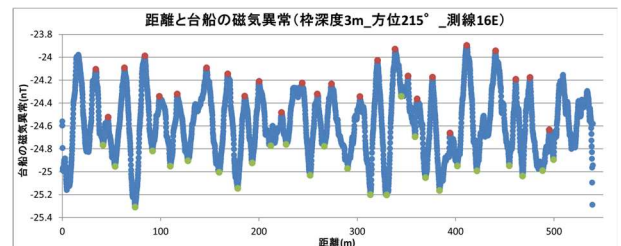


図-10 蛇行による台船の磁気異常例(フィルタ処理後)

表-3 蛇行による台船の磁気異常の読取値

枰深度	データ数	台船による磁気異常(nT)		
		最大	平均	標準偏差
3m	2046	5.9	1.1	0.7
4m	2044	5.4	1.0	0.7
5m	2038	4.8	0.9	0.6
6m	2048	3.4	0.6	0.4
7m	2048	2.4	0.4	0.3
8m	2051	2.2	0.4	0.3

6. まとめ

本実験は、台船による磁気異常を検討するために 8 の字測定、階段測定を実施した。各測定で取得したデータから深度毎の方位と磁気異常の関係を求め、本実験の条件・使用機材における台船は負の磁気異常を示し、方位 60° 及び 250° 付近で極小となり、最小となる 250° 付近では枰深度 3m で-35nT 程度になることが判明した。この結果から、方位と台船の磁気異常の関係をを用いて航跡の蛇行により生じる磁気異常を計算し、枰深度が 5m 以深であれば、概ね航跡の蛇行により生じる台船の磁気異常は、探査の支障にはならないと考えられる。

今後も継続して実験等を行い、実用化に向けて取り組んでいく。

《引用・参考文献》

- 海上保安庁刊行海図 W1262(を複製・加筆)。
- 鈴木匠, 佐々木正徳, 愛甲崇信, 吉川秀人, 河野秀紀, 天野量稀(2024) : セシウム磁力計センサを用いた海上磁気探査の取り組み, 全地連技術フォーラム 2024論文集, 論文No.C053.