

SEP 船接岸時の港湾施設への影響推定について

細井晶弘*・川村 浩**・菊池睦***・鈴木貴志****

* 前（一財）沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

**（一財）沿岸技術研究センター 調査役

*** 国土交通省東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所 前任建設管理官

**** 国土交通省東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所 建設管理官

本検討は、秋田港飯島地区岸壁（-11m）における大型自己昇降式作業台船（SEP 船）接岸時のスパッドカン貫入による対象港湾施設（ケーソン及び基礎マウンド）への影響を把握するため、現地実証実験結果を用いた FEM による現地再現解析を行い、SEP 船利用（スパッドカン着底）に伴う構造物（岸壁）への影響度に関する予測解析を行ったものである。

キーワード：洋上風力発電，SEP 船，スパッドカン，FEM 解析

1. はじめに

1.1 背景

洋上風力発電は、大量導入が可能であり、コスト低減による国民負担の低減効果や経済波及効果が大きく、2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーの中でも、特にその導入拡大が期待される電源である。

近年、洋上風力発電設備の積み出しのための基地港湾の整備が急がれており、秋田県沿岸域では発電事業者による洋上風力導入の取り組みが進められている。洋上風力建設ターミナルとして利用されている秋田港飯島地区岸壁（-11m）（図-1）では、SEP 船が岸壁に停泊し設備機材等の積み出しを行うが、大重量の機材を背後ヤードよりクレーンで吊上・積載（荷役作業）するには、作業半径を確保する必要があるため、SEP 船は可能な限り岸壁に近づけて作業を行う。

荷役作業時に、SEP 船はスパッドカンを着底させた後、ジャッキアップを行い、船体を海水面上まで上昇させる。

その際、泊地地盤にはスパッドカンからの大きなプレロードが作用することで、地盤や岸壁等の施設への影響が懸念される。



図-1 秋田港飯島地区岸壁位置図

1.2 これまでの検討

これまで、SEP 船が岸壁前面に係留し作業を行った実績がなかったため、現地断面を対象に実施された遠心模型実験結果と、地盤解析汎用プログラム（GeoFem）による再現解析結果の比較による解析手法の検討を行ってきた。

解析の結果として、極限支持力および荷重変位曲線の傾きに関しては、概ね再現できた（図-2）が、地表面の変位については、GeoFem による軸対象解析モデルが構造物（ケーソン）の配置や、薬液固化土の存在を考慮できなかったため、実験結果よりも再現解析結果の方が大きい結果となった（図-3）。

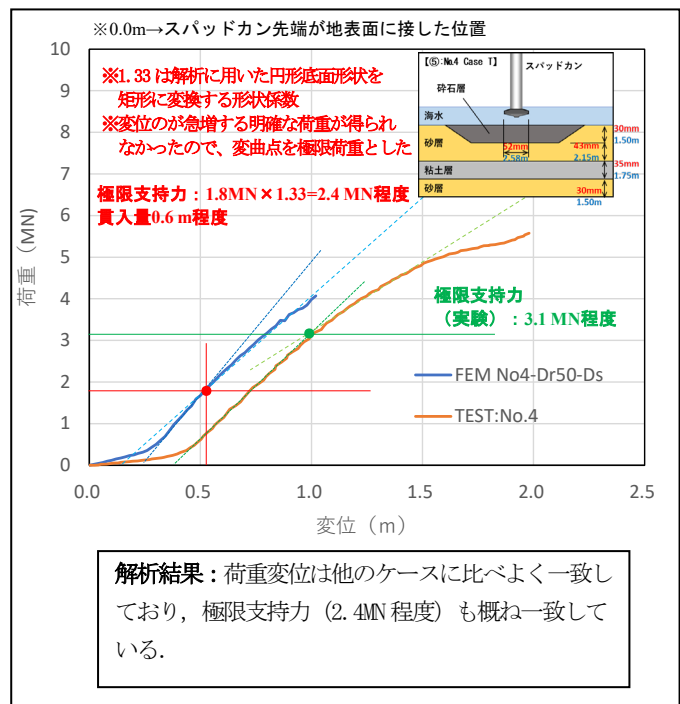


図-2 遠心模型実験と FEM 解析の再現解析結果例（砕石層厚 1.50m 及び中間粘土層）

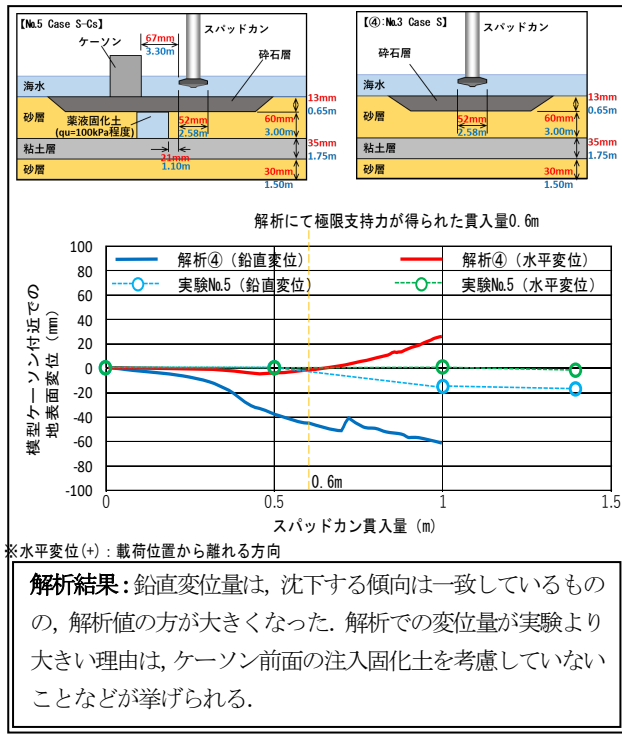


図-3 ケーソン端部での地表面における水平及び鉛直変位の比較

2. 現地実証試験の概要と結果について

2.1 概要

秋田港で行われた現地実証試験は、他港への汎用性を念頭に支持力(貫入量) 推定式の抽出と砕石置換の効果を把握、併せて影響予測モデルを構築することを目的として、SEP 船接岸時の影響を測定したものである。現地実証試験の計測項目は①レグ貫入量、②海底面の表面変状、③海底地盤中の土層変位、④岸壁(ケーソン)の変位であり、砕石置換の実施箇所と砂地盤箇所の両方で測定を行った。測定はSEP 船の作業期間中3回行い、測定結果のデータ提供を受けた。各観測機器の配置を図-4、図-5に示す。

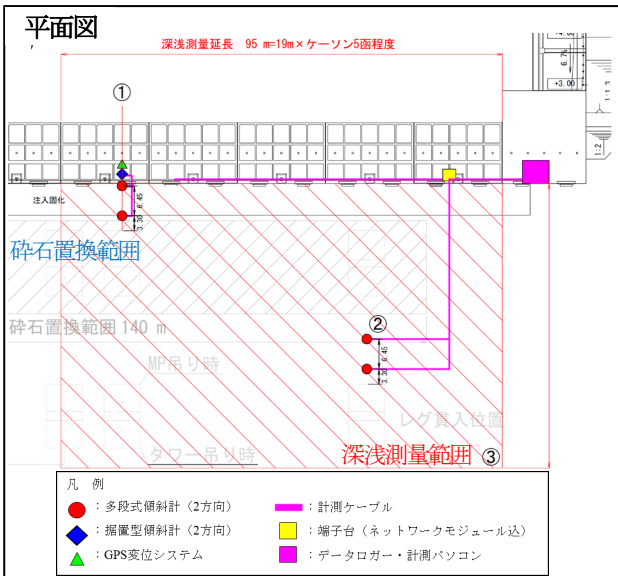


図-4 現地実証試験 観測機器配置平面図

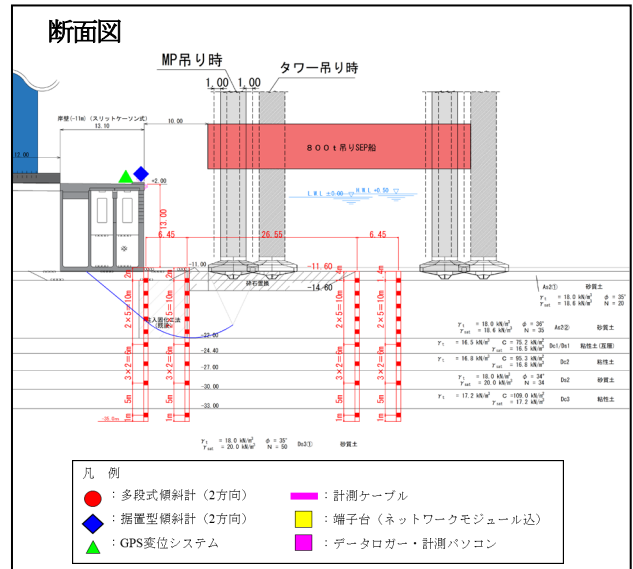


図-5 現地実証試験 観測機器配置断面図

2.2 現地実証試験結果

現地実証試験の結果は、表-1 のとおりであった。この結果を基に、FEM 再現解析を行い検証した。

表-1 現地実証試験結果

計測項目	砕石置換	変位量		
		初回	2回目	14回目
①レグ貫入量	有	0.6m	0.2m	0.05m
	無	0.5m	0.3m	0.05m
②海底面の表面変状	有	0.6m	0.8m	0.9m
	無	0.5m	0.8m	0.9m
③海底地盤中の土層変位	有	水平変位-12.8mm (DL-16mの位置)		
	無	水平変位-26.2mm (DL-16mの位置)		
④岸壁(ケーソン)の運動変位	-	据置型傾斜計: 観測値は若干の変動があったが、誤差の範囲と判断		
	-	GNSS変位計(高さ方向Z値): 0		

レグ貫入量は、スパッドカン底面が全て接地する位置を0mとした(図-6)。

土質条件については、現地実証試験に使用する多段式傾斜計を設置する際に行ったボーリング試験及び、過去のボーリング試験データより設定した。

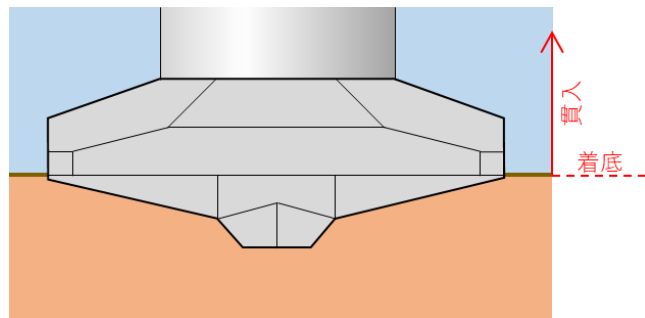


図-6 レグ貫入の定義

3. FEM解析を用いたレグ貫入による港湾施設への影響推定（現地再現解析）

3.1 検討目的

実証試験結果を用いて SEP 船利用（スパッドカン着底）に伴う構造物（岸壁）への影響を定量的に把握するために FEM 解析をおこなった。検討にあたっては、シミュレーションソフト（GeoFem（2次元モデル）及び3次元モデル2ソフト）を用い、各モデルの比較検証を行ったうえで、シミュレーション手法の妥当性を検証した。

3.2 使用解析プログラム

FEM 解析に用いるソフトは表-2 に示す3つである。選定理由として、①GeoFemはこれまでの検討で解析実績があるため、引き続き選定した。②PLAXIS 及び③MIDAS については、港湾分野での利用実績を踏まえて選定した。

表-2 使用解析プログラム

番号	FEMソフト	モデル	開発
①	GeoFem	2次元（軸対称）	運輸省 港湾技術研究所 （現：国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所）
②	PLAXIS	2次元（軸対称） 3次元	Bentley Systems
③	MIDAS GTS NX	2次元（軸対称） 3次元	MIDAS IT

3.3 現地再現解析

現地実証試験を基に、FEM 解析にて現地再現解析を行った。

(1) 解析断面

解析に用いる現地断面、スパッドカン着底位置及び多段式傾斜計位置は図-7 のとおりである。

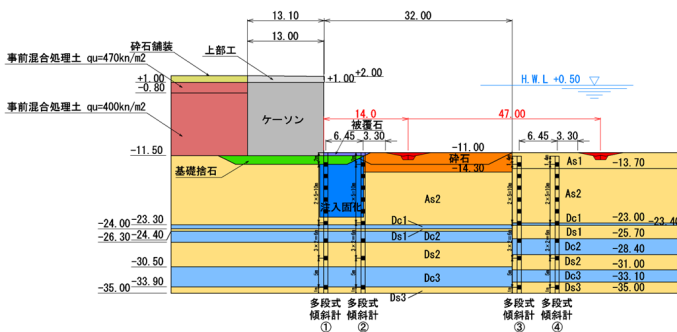


図-7 現地断面

(2) 入力定数

対象施設周辺の土質調査データ、過年度設計報告書及び既往文献の収集・整理を行い、入力定数を設定した（表-3, 表-4）。

以下に設定した条件について示す。

1) 地盤物性値

(a) 石材（砕石層、被覆石・基礎マウンド及び砕石舗装）

・ ϕ 及び c は支持力の照査（Bishop 法）での設定と同様に $\phi=35^\circ$ 、 $c=20 \text{ kN/m}^2$ に設定した。

・ E は既往の試験実績（港研技術資料No. 0699）より 10 MN/m^2 とした。

・ポアソン比 ν は土の一般値 0.33 で設定した。

(b) 砂質土層（As 及びDs）

・ γ' 及び ϕ は土質試験結果を基に平均値で設定した。

・ E は鉄道構造物等設計標準にて示されている N 値との関係式 ($E=700N$) より設定した。

・ポアソン比 ν は土の一般値 0.33 で設定した。

(c) 粘土層（Dc）及び注入固化

・ γ' 及び c は土質試験結果を基に平均値で設定した。

・ E は一軸圧縮試験結果の E_{50} の平均値で設定した。

・ポアソン比 ν について、粘土層は載荷時間から非排水条件と考えられるため 0.495 で設定した。

・注入固化については、原地盤だった As2 に変更して解析を行った。

(d) 事前混合処理土

・ C は $q_u/2$ で設定した。

・ E は $2(1+\nu)G$ ($G=340C$) より設定した。

・ポアソン比 ν は土の一般値 0.33 で設定した。

(e) ケーソン・上部工

・ γ' はケーソン及び上部工の平均値にて設定した。

・ E はコンクリートのヤング係数で設定した。

・ポアソン比 ν はコンクリートの一般値 0.2 で設定した。

2) 材料モデル

・原地盤以下はモール・クーロンを適用し、原地盤以上の構造物は線形弾性とした。

表-3 入力定数（陸側）

材料	弾性係数	ポアソン比	単位体積重量	内部摩擦角	ダイレタンシー角	粘着力	材料モデル
	E (MN/m^2)	ν (-)	γ' (kN/m^3)	ϕ ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	c (kN/m^2)	
砕石(関連)	10	0.333	10	35	35	20	モール・クーロン
砕石(非関連)	10	0.333	10	35	0	20	モール・クーロン
As2	23.1	0.333	8.5	38	38	0	モール・クーロン
Dc1	6.8	0.495	7	0	0	85.8	モール・クーロン
Ds1	13.3	0.333	10	33	33	0	モール・クーロン
Dc2	8.5	0.495	6.8	0	0	79.5	モール・クーロン
Ds2	26.6	0.333	10	38	38	0	モール・クーロン
Dc3	8.3	0.495	6.8	0	0	93.8	モール・クーロン
Ds3	34.3	0.333	10	39	39	0	モール・クーロン
以下、3次元モデルのみの材料							
注入固化 As2に変換	8.2	0.495	9.9	0	0	50.5	モール・クーロン
被覆石・基礎マウンド	10	0.333	10	35	35	20	モール・クーロン
砕石舗装	10	0.333	10	35	35	20	モール・クーロン
事前混合 $q_u=470\text{kN/m}^2$	23.8	0.333	10	0	0	235	線形弾性
事前混合 $q_u=400\text{kN/m}^2$	20.3	0.333	10	0	0	200	線形弾性
ケーソン・上部工	$2.00\text{E}+05$	0.2	18.5	-	-	-	線形弾性

表-4 入力定数（海側）

材料	弾性係数	ポアソン比	単位体積重量	内部摩擦角	ダイレタンシー角	粘着力	材料モデル
	E (MN/m^2)	ν (-)	γ' (kN/m^3)	ϕ ($^\circ$)	ψ ($^\circ$)	c (kN/m^2)	
As1(関連)	7	0.333	8.1	36	36	0	モール・クーロン
As1(非関連)	7	0.333	8.1	36	0	0	モール・クーロン
As2	25.2	0.333	8.5	40	40	0	モール・クーロン
Dc1	9	0.495	7	0	0	112.1	モール・クーロン
Ds1	13.3	0.333	10	33	33	0	モール・クーロン
Dc2	10.3	0.495	6.8	0	0	83	モール・クーロン
Ds2	17.5	0.333	10	35	35	0	モール・クーロン
Dc3	10.1	0.495	6.8	0	0	138.5	モール・クーロン
Ds3	35	0.333	10	39	39	0	モール・クーロン

(3) 解析モデル (軸対称)

軸対称モデルにおける解析メッシュの例を図-8、図-9に示す。非関連流動則は砕石についてスパッドカン直下+0.5B (B はスパッドカン幅) にて適用した。また、スパッドカンの先端形状は平面載荷とした。

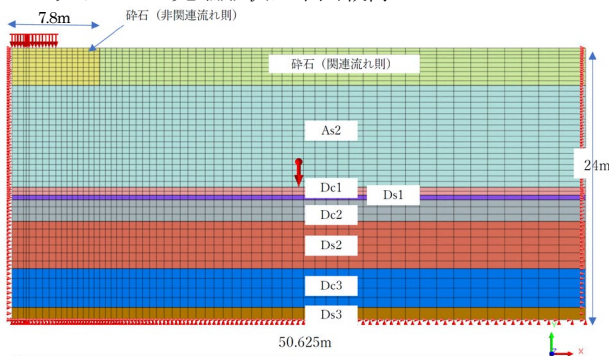


図-8 解析モデル (軸対称) (陸側) (MIDAS)

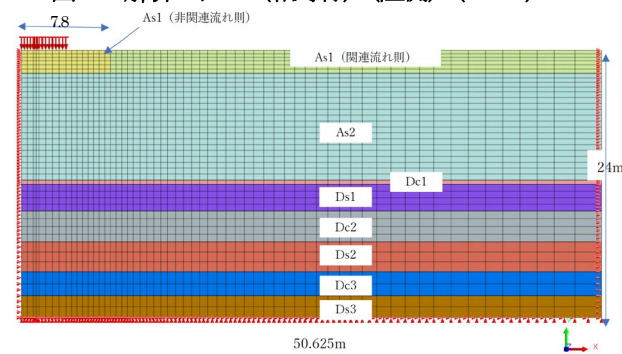


図-9 解析モデル (軸対称) (海側) (MIDAS)

(4) 解析モデル (3次元)

3次元モデルにおける解析メッシュの例を図-10に示す。非関連流動則の適用範囲およびスパッドカン先端形状については、軸対象モデルと同様とした。

また、荷重は対角線上のスパッドカンを同時に実施した。

土層については、以下の理由より海側と陸側で不連続な土層にてモデルを作成した。

- ・現地実証試験における多段式傾斜計位置及び深度での水平変位量は mm 単位であったことから、レグから他のレグ位置までの地盤変形の影響はほとんど無いと判断。
- ・秋田港は砂層と粘土層の互層が確認されており、層ごとの上端及び下端標高がボーリング位置にて全く異なっており補間が困難。

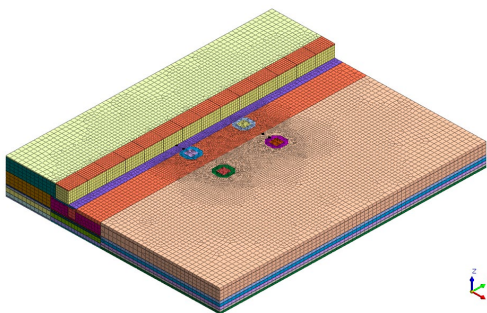


図-10 解析モデル (3次元) (MIDAS)

(5) 現地データ

スパッドカンの最大荷重及び最大貫入量は以下のとおりであった。

- ・陸側 (砕石あり) : 約 0.6 m
- ・海側 (砕石なし) : 約 0.4 m

3.4 解析結果

(1) 荷重変位曲線

陸側及び海側における荷重変位曲線を図-11に示す。

【陸側 (砕石あり)】

3次元モデルでの荷重変位は計測結果より荷重が大きく算出された。理由として、現地の砕石は投入直後のため締められてないのに対し、FEM モデルだと貫入に対してすぐ反力が生じるため一致しなかったと推察される。また解析結果に着目すると、軸対称モデルにおけるソフトごとの解析結果はよく一致している。

【海側 (砕石なし)】

3次元モデルでの荷重変位は、計測結果と概ね一致もしくは荷重が小さめに算出されていた。解析結果に着目すると、陸側 (砕石あり) と比べ、軸対称と3次元モデルでの差 (平面形状の違い) はほとんど確認されなかった。また、ソフトごとの解析結果は陸側に比べ、解の安定性や極限状態に遷移する貫入量がバラついていた。

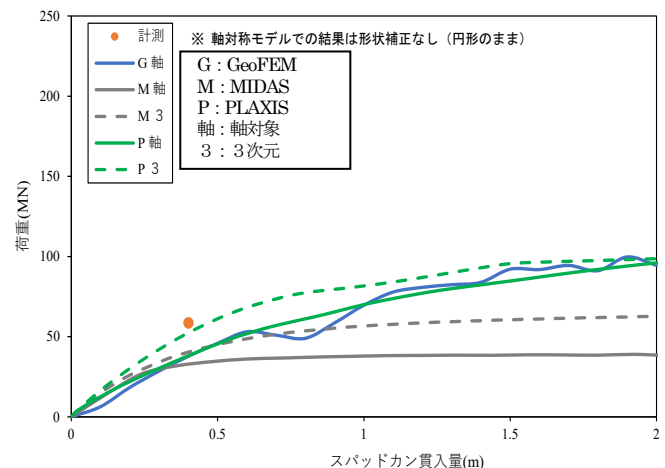
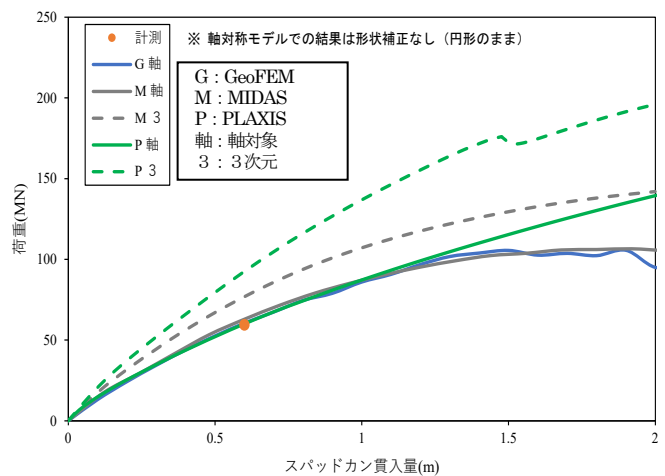


図-11 現地再現解析より得られた荷重変位曲線 (上段: 陸側砕石あり, 下段: 海側砕石なし)

(2) 地盤変位

各多段式傾斜計における計測結果及び解析結果を図-12、図-13に示す。

① 陸側；砕石あり

No.1 について、計測結果では深度 20 m 付近まで微小な変位量であったものの、解析では地盤全体で何倍もの変位が生じていた。理由として、スパッドカン着底位置から傾斜計位置までの土層は必ずしも水平成層ではないことと、深度方向の地盤強度の増加及び注入固化土の強度を反映できていないことが考えられる。一方で解析結果に着目すると、軸対称モデルに比べ 3 次元モデルでの表層の変位量は小さい（図中赤丸）。これはケーソン等の上載物により、地盤の変位が抑えられているためと推察される。

No.2 について、計測結果では砕石層全体で変位が生じており、それより下の現地盤はほとんど変位が生じていないのに対して、解析では No.1 と同様に地盤全体

が変位する結果が得られた。ただし、砕石層の変位はスパッドカンに近いため、No.1 に比べて大きい。

砕石層の変位が一致しなかった理由としては、荷重変位曲線と同様に、現地の砕石は締め固まっていないためと推察した。

② 海側：砕石なし

No.3 について、計測結果では深度 20 m 付近まで微小な変位量であったものの、解析では地盤全体で何倍もの変位が生じていた。理由としては No.1 と同様であると推察される。ただし、表層での変位量は、方向が逆になるケースもあるものの、計測結果とほぼ同等の量であった。

No.4 について、計測結果では表層から As2 層の下端まで変位が生じており、それより下の現地盤はほとんど変位が生じていないのに対して、解析では No.3 と同様に地盤全体が変位する結果が得られた。ただし、解析結果において、表層の変位が大きく発生する傾向については、計測結果と概ね一致している。

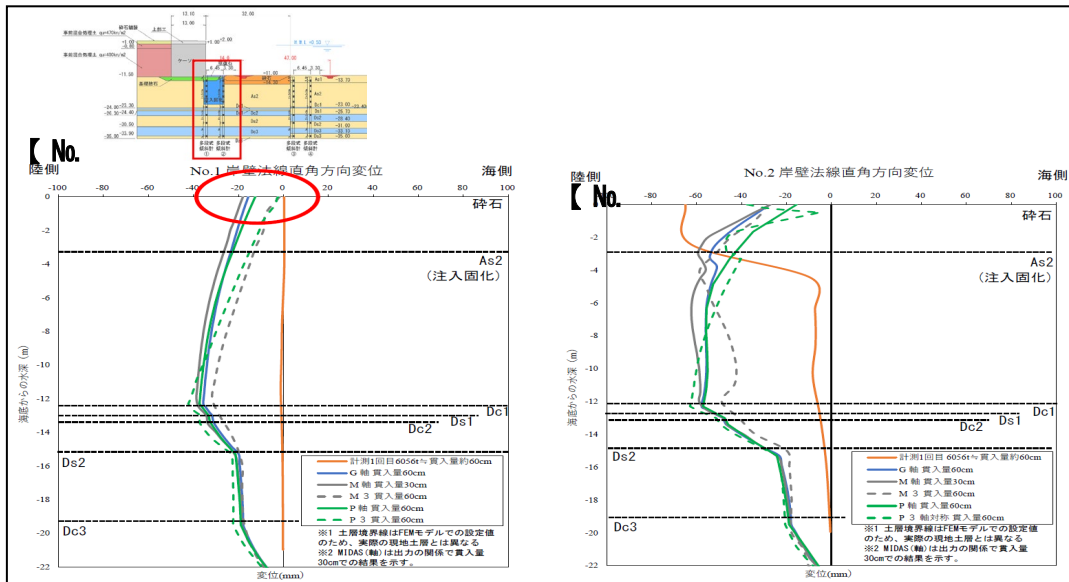


図-12 多段式傾斜計位置（陸側）における計測及び解析結果

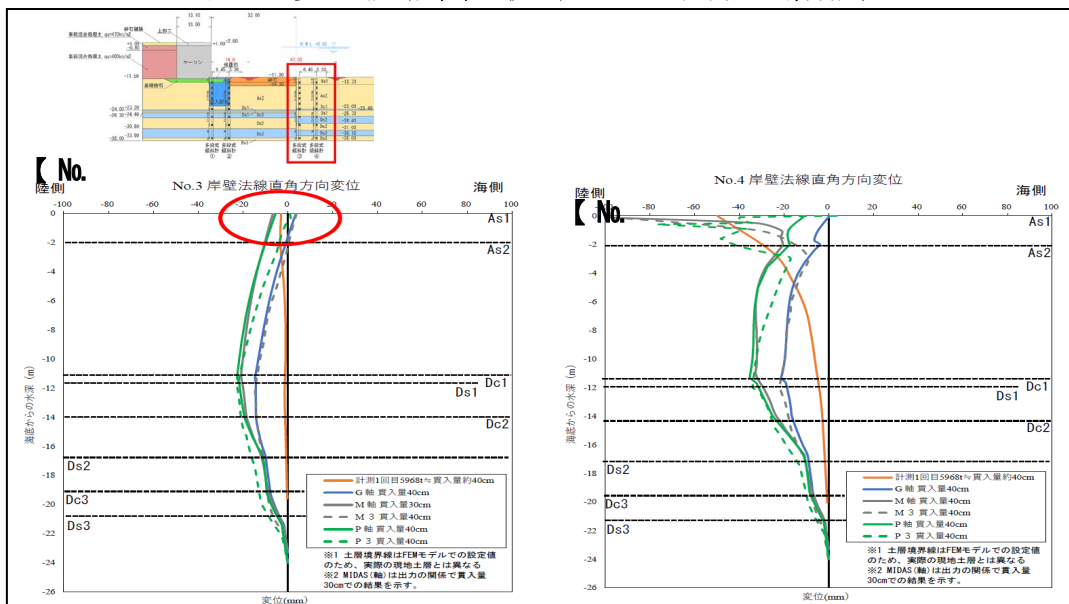


図-13 多段式傾斜計位置（海側）における計測及び解析結果

3.5 まとめ

影響度予測手法としてFEM解析の評価を行った。

評価にあたっては、①荷重変位曲線（貫入量）及び②地盤変位に着目し現地計測結果との比較を行った。

(1) 荷重変位曲線

砕石置換地盤での解析は一致しなかったものの、在来地盤での貫入量は概ね再現できている。したがって、貫入量の予測にあたっては、FEM解析は有効である。なお、今後の実務での貫入量予測にあたっては、予測にあたっては物性値などのパラメータを安全側に設定して評価する必要がある。

(2) 地盤変位

地盤全体の変位は大きめに算出されたものの、スパッドカン近くでは表層の変位が大きいことと、スパッドカンから離れると表層の変位はあまり発生しない傾向については概ね再現できている。したがって、表層変位の予測にあたっては、傾向を把握するならFEM解析は有効である。

軸対称と3次元モデルの解析結果について、構造物近くの表層の変位は解析モデル同士で一致しなかったものの、それ以外は概ね一致していた。変位の予測にあたっては、軸対称モデルと3次元モデルの差はほとんどないと言える。

(3) 結論

以上の結果より

- ①GeoFemで模型実験及び秋田港での現地実験を概ね再現することができた。
- ②参考に行ったPLAXIS及びMIDASもほぼ同様の解析結果であった。
- ③秋田港の岸壁ではSEP船接岸時の港湾施設への影響予測手法としてGeoFemの利用が可能であるといえる。

4. 課題

(1) 繰り返し貫入について

FEM解析ではスパッドカン繰り返し貫入を考慮できない。現地で何回も貫入を繰り返すと総貫入量はFEM解析値より大きくなると想定される。ただし、砕石地盤は投入後より締め固めが生じると想定されるため、貫入量に比べ、周辺への影響は小さくなると推察される。砂地盤については、地盤の弾性状態を超える荷重が働くと塑性するため、貫入量は増加していくことから周辺への影響は大きくなると想定される。

(2) 現地での砕石の変形係数 E について

現地での砕石の変形係数 E は既往の試験実績（港研技術資料No.0699）より10 MN/m²にて設定しているが、現地再現解析や予測解析での結果を踏まえると、FEM解析結果は現地での貫入量より小さめに算出されていることから、砕石が締め固まっている状態での値と推察される。

現地での1回目のスパッドカン着底では砕石が締め固まっていないことから、変形係数10 MN/m²以下にて設定することで現地計測結果に近づき、かつ、貫入量が大きめに算出されるため安全側になると想定される。

(3) 見かけの粘着力を考慮した平面形状による

支持力の違いについて

今回検討した平面形状による支持力の違いについて、粘着力 $C=0$ とし支持力係数 N_{γ} に関連する形状係数 β の感度分析を実施しているが、現地でもスパッドカン着手は砕石置換地盤上であり、砕石は見かけの粘着力が加わるので、支持力係数 N_c （それに関連する形状係数 α ）も支持力に関わってくる。

よって、粘着力を考慮した場合の平面形状による支持力の違いについて検討する必要がある。

(4) 粘性土地盤への適用について

粘性土地盤については実験ケース数が少なく、FEM解析も中間粘土層の場合での解析しか行っていないことから、適切な構成則の設定など知見が得られていない。

そのため、粘性土層が表層にある場所や厚く堆積する地盤に貫入する場合は、別途検討が必要である。

5. おわりに

今回の検討は、洋上風力建設ターミナルにおけるSEP船接岸時の港湾施設への影響評価と泊地改良対策の効果を検証するため、検証に必要な分析手法の検討を有識者による委員会を開催し、そこでの意見を踏まえながら取りまとめ、秋田港現地条件でのFEM解析の有効性は概ね確認できた。

今後、他港への適用に向けた検討を行うこととしている。

謝辞

本稿は、国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所発注の管内技術課題に関する技術支援業務の成果の一部をまとめたものである。

検討にあたり、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所より洋上風車基地港SEP船レグ貫入対策法の検討に関する研究成果（遠心模型実験結果）のご提供のほか、SEP船接岸時の港湾施設への影響に関する検討会委員および関係各位から、貴重なご意見・ご指導をいただきました。ここに、厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所：令和3年度 管内技術課題に関する技術支援業務 報告書
- 2) 国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所：令和2年度 秋田港飯島地区土質調査業務 報告書