

## SEP 船接岸時の港湾施設への影響検討について

細井晶弘\*・川村 浩\*\*・遠藤直樹\*\*\*・鈴木貴志\*\*\*\*

\* (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

本論文は、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港湾施設(ケーソン及び基礎マウンド)への影響評価と改良対策の効果を検証するため、FEM 解析による分析手法の検討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

2050年の脱炭素社会の実現のため、洋上風力発電の推進が必要不可欠となっており、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いる。

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おり、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、大型自己昇降式作業台船(以下 SEP 船と言う。)(図-2)が岸壁に停泊し建設資材等の積み出しを行う。

SEP 船は荷役作業時に、波浪による船体の動揺を低減し、大重量の機材を吊上げるため、船体を海面上まで上昇させる。その際にレグ 1 本あたり最大で 55,000kN という大きな荷重が着底した地盤に作用する事になり、この際にレグ先端のスパッドカンが施設の前面地盤に貫入することによる施設への影響が懸念される。

秋田港飯島地区岸壁(-11m)では、スパッドカンが深く貫入する事で発生する岸壁への影響を低減するため、陸側スパッドカンが着底する範囲で岸壁前面の海底地盤を表層から 3.0m 厚で碎石に置換し、現地盤の支持力を確保する対策を実施している。

SEP 船が港湾施設へ与える影響については、対象施設の変位などを現地計測により把握することとなっているが、今後、他港への展開を考慮した場合、適切な推定式(支持力算定式)の抽出と対策の効果について、FEM 解析などを用いた推定手法を確立する必要がある。

本稿は、SEP 船スパッドカンの貫入による港湾施設への影響を推定する手法の確立に資するため、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り考察するものである。



図-1 秋田港飯島地区岸壁位置図



図-2 SEP 船(Zaratan)【写真提供：秋田洋上風力株式会社】

### 2. スパッドカン貫入による港湾施設への影響

スパッドカン貫入による港湾施設への影響は、重力式岸壁を対象とした場合、想定される変状として、前面地盤の凹凸による本体の移動・傾斜、岸壁法線の凹凸が挙げられる。変状イメージを図-3に示す。

想定される変状連鎖は以下のとおりである。

- ① 前面地盤の凹凸
- ② マウンドの崩れ
- ③ ケーソンの移動・傾き (岸壁法線の凹凸)

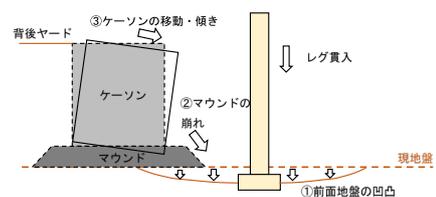


図-3 重力式岸壁において想定される

スパッドカン貫入時の変状連鎖

### 3. 遠心模型実験のFEM 再現解析

#### 3.1 概要

対象施設および SEP 船接岸時の模式断面を図-4 に示す。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で現地断面を対象に実施された遠心模型実験 (図-6) の結果について GeoFem による再現解析を行った。

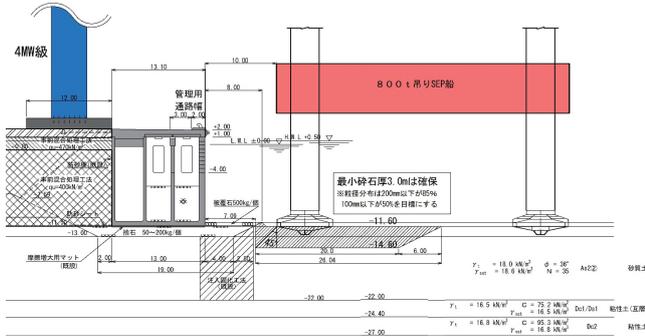


図-4 SEP 船接岸時の対象施設断面図

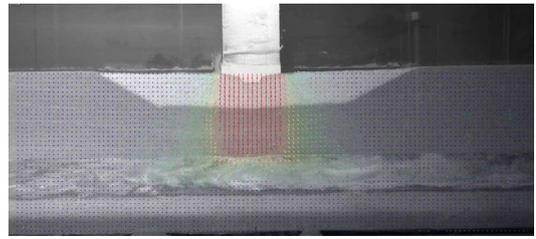


図-6 遠心模型実験実施状況

#### (2) FEM 解析方法

GeoFem による再現解析は、載荷部接点の変位を与えるタイミングにレグ先端のスパッドカン形状を考慮した、変位制御とした (図-7)。実験に用いられたスパッドカンの断面及び寸法を図-8 に示す。なお、遠心模型実験は遠心加速度 50 G にて実施しているため、解析は実験に用いた寸法の 50 倍にて実施した (スパッドカン幅 実験 : 0.0516 m → 解析 : 2.58 m)。



FEM解析寸法に合わせたスパッドカンの形状

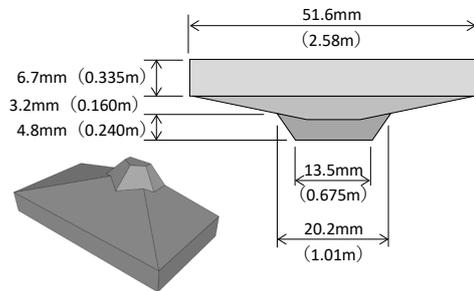
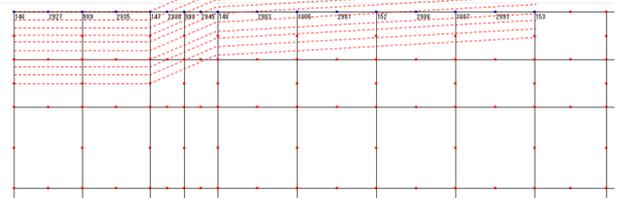


図-8 スパッドカン断面

#### (3) 解析モデル及び解析メッシュ

解析は極座標 (軸対称) モデルにて実施した。解析メッシュの例を図-9 に示す。

メッシュ表層については感度分析の結果と実験結果との比較により、非関連流れ則を適用した。また、構成則は碎石、砂及び粘土層すべてに Mohr-Coulomb の弾塑性モデルを適用した。

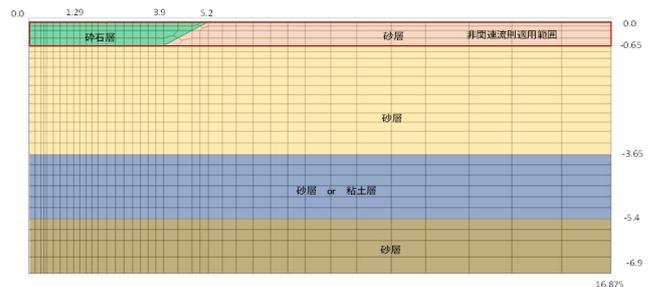


図-9 解析メッシュ (②及び④)

#### 3.2 再現解析モデルの設定

##### (1) 対象ケース

模型実験の FEM 再現解析は、碎石層の有無、碎石層厚及び中間粘土層の有無に着目して、表-1 及び図-5 に示す計 5 ケースを対象に行った。

表-1 再現解析対象ケース

番号	実験番号	ケース名	碎石層	中間粘土層
①	No.6	Case Sd	無し	無し
②	No.8	Case S-Sd	有り (層厚: 0.65 m)	無し
③	No.1	Case T-Sd	有り (層厚: 1.5 m)	無し
④	No.3	Case S	有り (層厚: 0.65 m)	有り
⑤	No.4	Case T	有り (層厚: 1.5 m)	有り

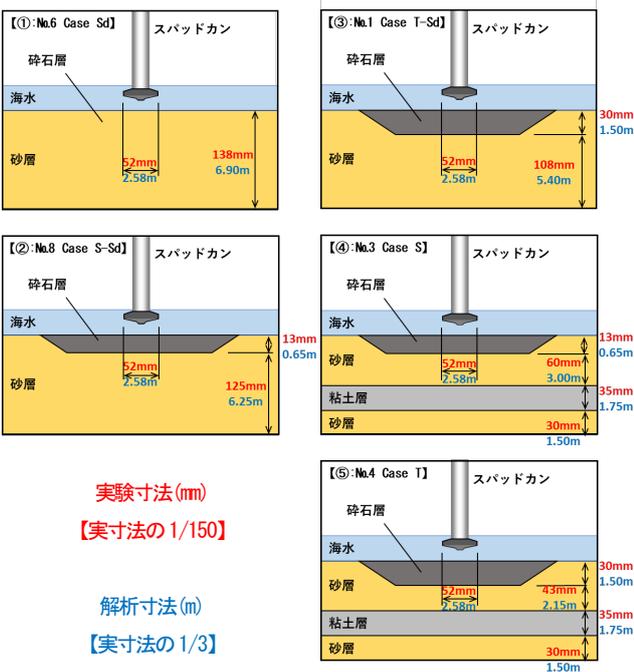


図-5 再現解析対象ケース

### 3.3 極限支持力の算出

模型実験及びFEM解析では明確な極限支持力(変位が増大しても荷重が変わらない)が確認されなかったため、極限支持力は荷重変位曲線の屈曲点(2つの接線の交点)と定義した(図-10)。

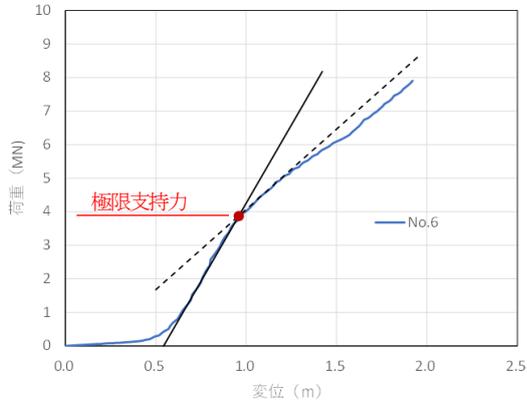


図-10 極限支持力の定義(模型実験の結果(①)より)

また、FEM解析でのスパッドカン形状は極座標モデルであるため円形であり、実験でのスパッドカン(正方形)と異なるため、得られた支持力に対して形状補正(0.4/0.3=1.33倍)を行った(図-11)。

基礎底面の形状	形状係数			
	連続	正方形	長方形	円形
$\alpha$	1.0	1.3	$1.0 + 0.3 \frac{B}{L}$	1.3
$\beta$	0.5	0.4	$0.5 - 0.1 \frac{B}{L}$	0.3

(注) B:長方形の短辺長さ, L:長方形の長辺長さ

図-11 形状補正について

### 3.4 遠心模型実験結果と再現解析結果との比較

#### (1) 加重と変位(貫入量)による比較

遠心模型実験とFEM解析の各5ケースを荷重-変位について比較した結果について、以下に示す。

#### ① No.6 (砂一様)

載荷初期段階以降の傾きは概ね一致しており、極限支持力(4.5 MN程度)は概ね一致している(図-12)。

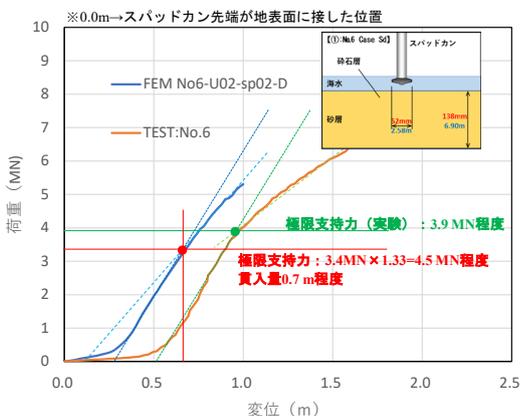


図-12 荷重-変位の比較(①No.6 砂一様)

#### ② No.8 (碎石層厚 0.65m)

載荷初期段階以降の傾きは概ね一致しており、極限支持力(4.2 MN程度)は若干小さいものの概ね一致している(図-13)。

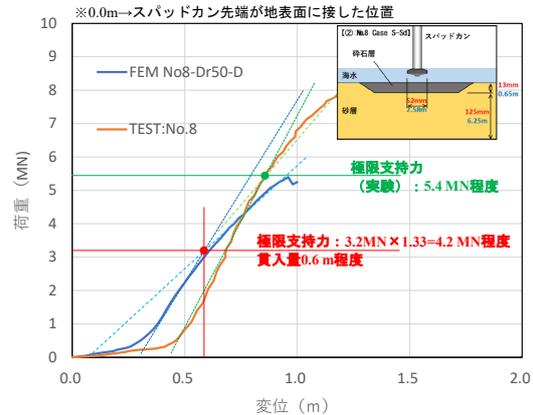


図-13 荷重-変位の比較(②碎石層厚 0.65m)

#### ③ No.1 (碎石層厚 1.50m)

載荷初期段階以降の傾きは②ケース No. 8(碎石 0.65 m)と同様であり、支持力(3.9 MN程度)は若干小さいものの概ね一致している。支持力はケース No. 8(碎石 0.65 m)と同程度であり、実験結果の傾向(碎石厚は支持力に大きく影響しない)と同様であった(図-14)。

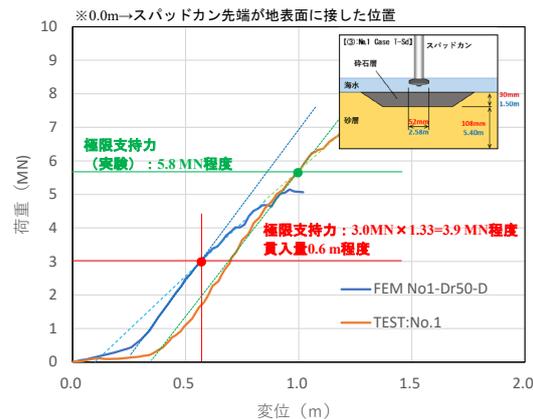


図-14 荷重-変位の比較(③碎石層厚 1.50m)

#### ④ No.3 (碎石層厚 0.65m 及び中間粘土層)

荷重-変位は他のケースに比べよく一致しており、極限支持力(2.8MN程度)も概ね一致している(図-15)。

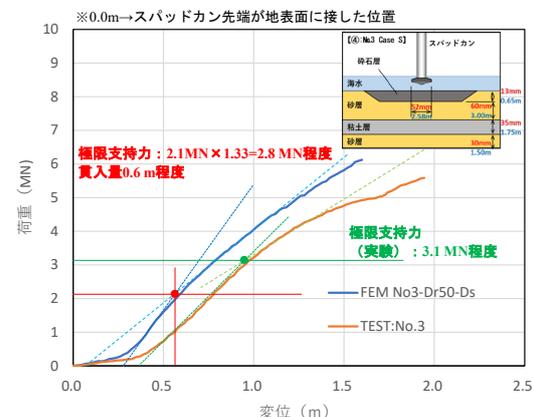


図-15 荷重-変位の比較(④碎石層厚 0.65m 及び中間粘土層)

⑤ No4 (碎石層厚 1.50m 及び中間粘土層)

荷重変位は他のケースに比べよく一致しており、極限支持力 (2.4MN 程度) も概ね一致している (図-16)。

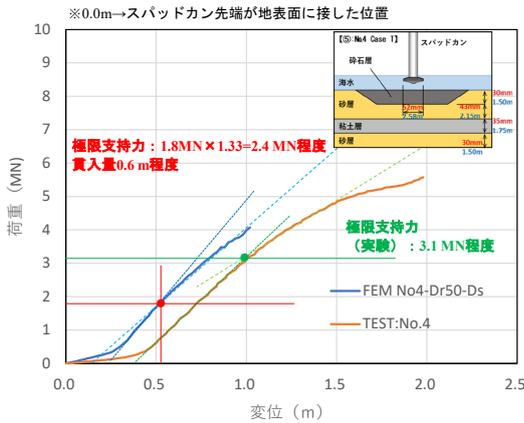


図-16 荷重-変位の比較 (⑤碎石層厚 1.50m 及び中間粘土層)

(2) 対象施設の変位 (地表面の変位量)

ケーソン端部での変位について、FEM 解析より得られたケーソン端部に接する地表面の変位量を実験結果 (⑥ No5) と比較した。FEM 解析は極座標モデルであり、片方にケーソン薬液固化土がある状態 (⑥No5) を再現できない。そのため、碎石層と中間粘土層の層厚条件に近い、④でのケーソン端部に接する地表面の変位量を算出して比較した (図-17)。

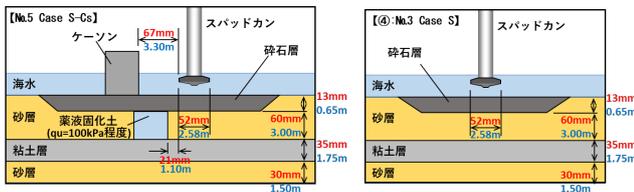


図-17 比較する実験ケース(右のケースにて比較)

実験及び解析にて得られた変位量を図-18 に示す。

水平変位量は、実験でほとんど変位は確認されなかったが、解析では極限支持力が得られた貫入量 (0.6 m 程度) を超えると、変位が大きくなる傾向にあった。

鉛直変位量は、沈下する傾向は一致しているものの、解析では貫入量 0.6 m 程度での変位量が約 4 cm と実験より大きい。

解析での水平及び鉛直変位量が実験より大きい理由としては、ケーソン前面の注入固化土を考慮していないことなどが挙げられる。

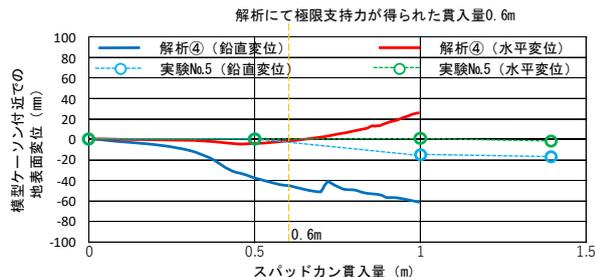


図-18 ケーソン端部での地表面における水平及び鉛直変位の比較

4. まとめ

実験と FEM 解析の比較結果及び考察について、表-2 に示す。極限支持力と荷重-変位曲線の傾きは概ね一致している。また、地表面の変位を見ると、FEM の変位量は実験より大きい結果となったことから、FEM 解析は安全側の評価となるといえる。ただし、極限支持力 (2つの接線の交点) 及びその際の貫入量の評価については、今後の課題である。

表-2 実験と FEM 解析結果の比較及び考察

項目	解析結果	考察
極限支持力	全ケースにて実験と概ね一致	→解析は実験にて得られた極限支持力を概ね再現
荷重変位曲線の傾き	全ケースにて実験と概ね一致	→解析は実験にて得られた荷重変位曲線の傾き(荷重と変位の増大関係)を概ね再現
貫入量	全ケースにて実験より小さい(浅い)	実験と解析では載荷初期段階が一致しないため →現時点でのモデルでは再現が難しい
地表面の変位	実験より大きい	軸対称モデルのため注入固化土の存在を考慮できないため →解析は実験より安全側の評価

貫入量が載荷初期段階で一致しないのは、実験 (実現象) では、地表面は均等ではないので、ある程度貫入させないと反力 (荷重) が得られないのに対し、解析ではスパッドカンの形状にて地盤を变形させているため、載荷初期から反力 (荷重) が生じ、荷重の増加が実験と比べ早いためと考えられる (図-19)。

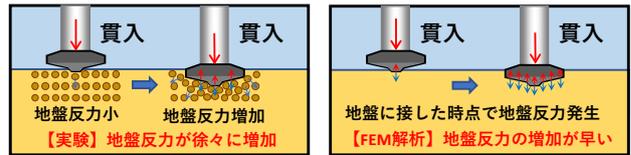


図-19 実験と解析における載荷初期段階の違い

5. おわりに

本検討の目標は、FEM 解析により、SEP 船スパッドカンの貫入による港湾施設への影響を推定し、改良対策の効果を検証することである。

本検討の手法で現地断面における FEM 解析を行った結果、レグ貫入による岸壁への影響は軽微であると推定された。ただし、使用した FEM モデルにも課題があるため、モデルのさらなるキャリブレーション実施と今後は、現地での変位計測結果と比較検証することが望ましい。

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。

検討にあたっては、SEP 船接岸時の港湾施設への影響に関する検討会の各委員、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 2 年度 管内技術課題に関する技術支援業務 報告書, 2015