現場管理値に適応した耐津波防波堤直下の SCP 改良地盤物性に関する基礎的検討

国土交通省　四国地方整備局　高松港湾空港技術調査事務所　正会員　○竹田　晃　冨本　正　上邨　知輝
八千代エンジニヤリング(株)　国生　隼人　小山　萌弥　渡辺　健二

1．はじめに

サンドコンパクションパイル工法(以下，SCP)は，多くの施工実績を有する代表的な地盤改良工法である．港湾の防波堤は，軟弱粘性土地盤上に設置する場合が多く，基礎地盤の支持力及び圧密沈下対策として SCP 工法がよく利用されている．また近年，四国地方沿岸域において，逼迫する東南海・南海地震等の地震に伴う津波に備え，耐津波防波堤の整備を進めている．この耐津波防波堤については，津波に先行する地震(偶発作用)による沈下量について，兵庫県南部地震時の港湾施設の被災と整合性が高い二次元有効応力解析(以下，FLIP)を用いて推定し，沈下後の天端高や堤体安定性が所要の性能を満たすか確認することとしている．その際，SCP で改良された防波堤の基礎地盤の砂杭部(以下，杭芯)のせん断剛性は，佐藤ら[1)]の検討事例等より等価 N 値を N_{65}=20 として設定される場合が多い．しかし，比較的改良深度が大きくなると等価 N 値から換算する現地の N 値が大きくなり，その N 値を用いた現場管理は，現実的に難しいことがある．本稿では，耐津波防波堤における SCP 改良地盤の FLIP 解析用物性値の沈下量に与える影響の感度分析事例を紹介するとともに，現場管理値に適応した杭心 N 値ついて提案する．

2．SCP 工法の工事仕様(現場管理値)と現行の実務設計の課題

1）SCP 工法の工事仕様

四国，近畿，中国地方管内における SCP の工事仕様例を**表-1** に示す．例えば，改良率 70～50%に関する現場管理値は，平均 N 値 15 以上とする仕様が多く，施工実績が杭芯 N 値 10～30 の間であったことを勘案したものと考える．

表-1 港湾工事 SCP 仕様の例

改良率	平均N値	φs	応力分担比
70%	15	35°	1
50%	15	35°	2
25%	10	30°	3

2）現行の実務設計の概要

実務設計では，防波堤直下の SCP の改良範囲，改良率については，永続状態における円弧すべり計算により照査される．計算に用いる杭芯のせん断抵抗角 φs や応力分担比は，神田ら[2)]による既往事例を感度分析することで得られた値を勘案したものと考える(**表-1**)．杭間の軟弱地盤も考慮した複合地盤のせん断強度は**式 1** で設定される．また，耐津波防波堤については，津波に先行する地震に対する照査として，FLIP 解析を実施することとなるが，その際の杭芯のせん断剛性 G は，前述のとおり等価 N 値を N_{65}=20 とし，$G=14100\times N^{0.68}$ より設定されることが多い．

$$\tau=(1-a_s)(C_0+kz)+(\gamma_m z+\sigma_z)\mu_s a_s\tan\phi_s\cos^2\theta \quad \cdots式1$$

ここに，a_s：砂置換率，C_0+kz：原地盤の粘着力
γ_m：改良地盤の換算単位体積重量
μ_s：応力集中係数
θ：すべり面が水平面となす角度

$$N_{65}=\frac{N-0.019(\sigma_v'-65)}{0.0041(\sigma_v'-65)+1.0} \quad \cdots式2$$

$$\phi_s=25+3.2\sqrt{\frac{100N}{70+\sigma_v'}} \quad \cdots式3$$

ここに，σ_v'：有効上載圧

3）SCP 改良地盤の現場管理値の課題

等価 N 値(**式 2**)と換算する N 値の関係を**図-1** に示す．軟弱地盤が厚く堆積している場合円弧すべり計算の安定性照査において，堤体直下の支持力確保のために比較的改良深度が大きくなることも多い．例えば，改良深度 30m 程度の場合，N_{65}=20 の改良体中央深度で見ても有効上載圧が約 150kN/m2 と大きいために換算する N 値も約 28 と大きくなり，現場管理値として適用することが難しくなることも考えられる．一方，円弧すべりに用いるせん断抵抗角 φs=35° に対し

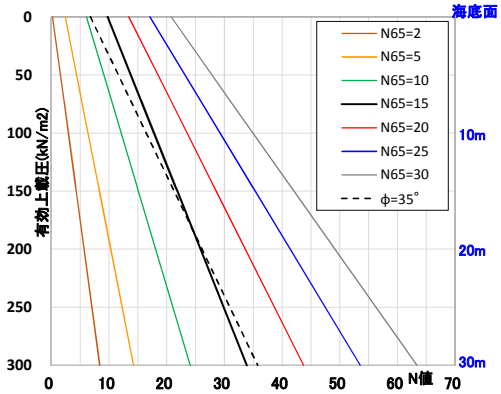

図-1 等価 N 値と N 値の関係

キーワード　防波堤，耐津波防波堤，SCP 工法，FLIP
連絡先　〒760-0017　高松市番町一丁目 6 番 1 号（住友生命高松ビル 2 階）国土交通省　四国地方整備局　高松港湾空港技術調査事務所　TEL087-811-5662

て，**式 3** を用い換算した N 値も**図-1** に重ねて示す．等価 N 値 N_{65}=15 の線と比較的合うように見える．

3．杭心 N 値の地震時沈下量への影響の感度分析

1）解析ケースと感度分析結果

徳島県小松島港の防波堤(消波ブロック被覆堤)を対象に，杭芯の等価 N 値を変化(**表-2**)させ，津波に先行する地震(**図-2**)による沈下量の感度分析を行った．ケーソン直下の SCP 諸元は，層厚 3.5m の捨石を挟んで，SCP(50%改良)の杭径 φ 1.7m，杭配置は正方形で 1 辺の長さ 4.2m，改良深さは 14.5m とした．また，消波ブロック直下は，SCP(25%改良)の杭径 φ 1.7m，杭配置はひし形で対角線の長さ 8.4m，改良深さは 9.5m とした．なお，改良に伴う隆起地盤は安定性確保のため撤去する．

パラペット天端と捨石下端の沈下量に着目した結果を**図-3** に示す．何れも等価 N 値の増加とともに沈下量は小さくなり，その傾向は概ね線形関係にあると考えられる．また，パラペット天端に着目すると，N_{65}=25 と N_{65}=15 では僅か 5cm 程度の差である．なお，FLIP 解析条件は，大矢ら[3]より構成則及び非線形反復計算法を従来法とした．また，杭間粘土の剛性も考慮した複合地盤物性値を設定し，液状化パラメータは設定していない．

2）現場管理値に適応した FLIP 解析用の杭心 N 値の提案

感度分析の結果，杭心の等価 N 値の違いが防波堤の地震時沈下量に与える影響は小さかった．なお，当該防波堤の地震後の必要天端高から換算した許容沈下量は約 132cm であり，永続状態だけでなく，偶発作用に対しても N_{65}=15 程度で対応できることが分かる．以上は一事例であるが，防波堤等の基礎地盤を SCP 工法で改良する場合の杭心の N 値は，円弧すべり計算に用いる杭芯のせん断抵抗角 φ=35° に相当する N_{65}=15 程度を初期値として，FLIP 解析を実施することが現場管理値との適応性を図る観点から有用と考えられる．

表-2 感度分析検討ケースと改良地盤 FLIP 用物性値

検討ケース			FLIP解析用物性値							
Case No.		杭芯等価N値	飽和単位体積重量 γsat (kN/m³)	基準有効拘束圧 σma (kN/m²)	基準せん断弾性係数 Gma (kN/m²)	基準体積弾性係数 Kma (kN/m²)	ポアソン比 ν	せん断抵抗角 φ (°)	最大減衰 hmax	間隙率 n
1	25%改良部	5	18.05	44.27	43,176	112,597	0.33	33.0	0.21	0.53
	50%改良部		18.70	69.12	47,462	123,773	0.33	35.4	0.22	0.50
2	25%改良部	10	18.05	44.27	50,336	131,269	0.33	31.3	0.21	0.53
	50%改良部		18.70	69.12	61,782	161,117	0.33	36.0	0.22	0.50
3	25%改良部	15	18.05	44.27	56,486	147,306	0.33	33.7	0.21	0.53
	50%改良部		18.70	69.12	74,081	193,192	0.33	36.6	0.22	0.50
4	25%改良部	20	18.05	44.27	62,039	161,788	0.33	34.0	0.21	0.53
	50%改良部		18.70	69.12	85,187	222,154	0.33	37.1	0.22	0.50
5	25%改良部	25	18.05	44.27	67,180	175,195	0.33	34.3	0.21	0.53
	50%改良部		18.70	69.12	95,469	248,968	0.33	37.7	0.22	0.50

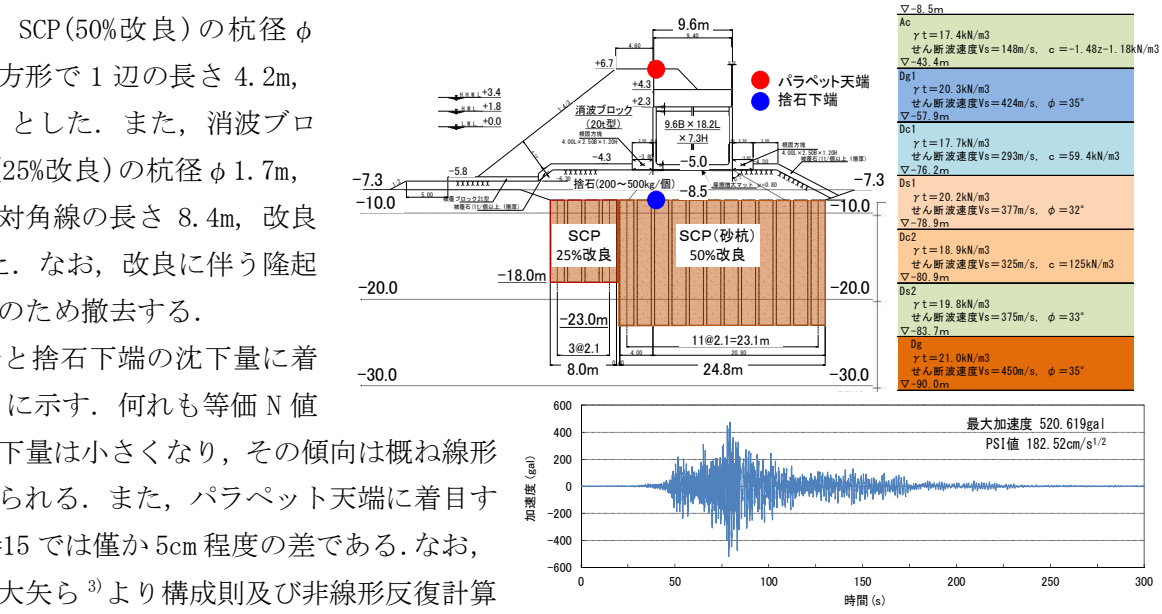

図-2 検討対象断面図，地盤条件，入力地震動

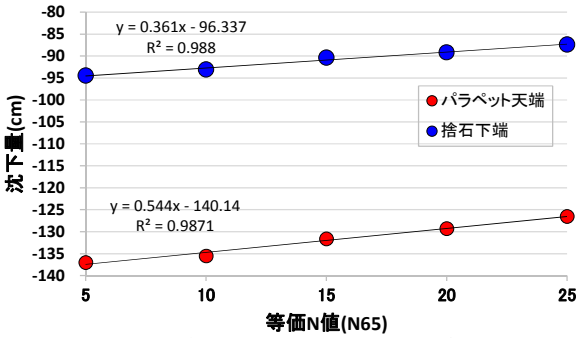

図-3 FLIP 解析結果沈下量の感度分析結果

4．おわりに

徳島県小松島港の防波堤をモデルケースとして感度分析を行った結果，杭芯のせん断剛性(等価 N 値)が FLIP 解析結果の防波堤沈下量に与える影響は比較的小さいことが分かった．したがって，実務設計において，円弧すべり計算に用いる杭芯のせん断抵抗角 φ=35° と近似する N_{65}=15 程度を初期値として FLIP 解析を実施することで，現場管理値との適応が図り易くなる場合もあると考える．ただし，地盤改良後の杭芯 N 値は，砂杭の材料や原地盤強度，施工条件(砂杭造成過程の縦方向の圧縮比，置換率，締固めエネルギー)などによって変化することを知られていることから，設計段階において慎重な検討が必要であると考える．

参考文献　1)佐藤ら：SCP で改良された粘性土地盤上の重力式岸壁の地震時有効応力解析(その 2:ケーススタディー)，第 35 回地盤工学研究発表会，pp.2057-2058，2000. 2)神田ら:粘性土地盤を対象とする SCP 工法の実用設計法-感度分析と実態調査-，港湾技術研究資料，No.669，Mar.1990. 3)大矢ら：防波堤基礎地盤の地震時変形特性に関する 1g 場模型振動実験と有効応力解析，港湾空港技術研究所資料，No.1227，March2011.