

(16) SCP工法による改良地盤の液状化防止設計について

熊本大学工学部 正員 ○松本英敏
 熊本大学工学部 正員 秋吉 卓
 八代工業高等専門学校 正員 淵田邦彦
 熊本大学大学院自然科学研究科 学生員 方 火浪

1. はじめに 砂地盤の液状化対策としてサンドコンパクションパイル (SCP) が数多く打設されているが、その効果を明確にした設計には必ずしもなっていないようである。そこで本研究では、実際と類似した SCP 打設用ケーシングパイプを製作し、現場と同じ打設手順により SCP 模型地盤を作成した。その後、水平加振実験による液状化実験を行い、開発した 2 次元有効応力法に基づく液状化解析プログラム (NUP 2) による結果と比較することにより、その妥当性を検討した。また、SCP に関するパラメータとして、砂杭の締固め加振力、杭間長、改良幅等を変化させ、液状化防止限界値を解析的に求める SCP 設計法を提案した。

2. 液状化解析プログラムの開発 地震時の間隙水圧の発生と消散を考慮する Biot の 2 相混合体理論に基づいて、2 次元有限要素解析プログラム NUP 2 (Nonlinear $u-p$ analysis in 2-dimensions) を開発した。その際、構成式 (応力-歪関係と過剰間隙水圧の発生メカニズム) については井合ら^{1,2)}のモデルを参照し、Newmark の β 法により 0.001 秒ステップで数値解析を行った。

3. 改良地盤の液状化実験概要³⁾ 本実験では、図 1 に示すような可動側板を持つ振動砂槽 (縦 1.0m × 横 1.5m × 高さ 1.0m) 内の位置に、水圧計、加速度計を設置した。その後、表 1 に示すような物性の砂を、高さ 80cm まで水中落下法により投入し、ゆる詰め飽和砂層 (相対密度 $D_r=22\%$) を作成した。次に、実際と類似のケーシングパイプモデル (内径 70mm) を用いて、現場と同様な手順に従って砂杭を 16 本正方形配置した。その際の砂杭の置換率は平均 0.1 である。実験は、締固め加振力、杭間距離を変化させ、表 2 の 5 ケースと未改良の 1 ケースの計 6 ケースについて行なったが、いずれのケースも締固め振動数は 25Hz とした。改良による地盤剛性を評価するため、SCP 施工前後に静的コーン貫入試験を行い、地盤の締固まりの度合を測定した。また、施工後には間隙比から相対密度 $D_r(\%)$ を求めた。その結果は表 3 に示してあるが、SCP 施工後はいずれのケースにおいても D_r は 40% 以上まで達している。このようにして作成した改良砂層全体を振動数 5Hz、入力加速度約 100gal で 20 秒間水平加振した。

4. 解析及び実験結果 室内実験 (：図 1) を解析するため、図 2 の様な SCP 改良地盤を 2 次元有限要素でモデル化した。ここでは SCP は壁体のよ

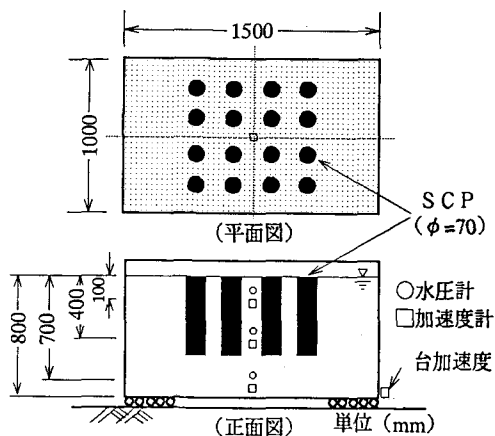


図 1 砂槽および SCP 打設概念図

表 1 試料砂物性値

土粒子密度	2.866t/m ³
最大粒径	2.0mm
最大間隙比	0.985
最小間隙比	0.688
均等係数	2.33
透水係数	1.38×10^{-4} m/s

うに扱われ、砂槽中央部の深さ400mmの点（図中 node=68）の間隙水圧について比較検討する。図3は、未改良及びSCPによる改良地盤を、入力加速度100gal（上段図）で加振したときの、node 68における過剰間隙水圧について、実験値（中段図）と解析値（下段図）とを比較したものである。NUP2による解析は、実験値にうまく追従しており、特に未改良地盤の場合の予定外の衝撃入力についても結果は満足いくものになっている。SCP改良地盤の5ケース（Case1～Case5）の実験結果を、SCP締固め加振力と杭間比の2つのパラメータとして図4に示した。ここで過剰間隙水圧比がほぼ1程度のケースを液状化したと見なすと、液状化に対する限界杭間比は分からないが、締固め加振力に関しては図に示すように9.8kgfの場合のみ液状化に達しておらず、限界締固め加振力が8.0～9.8kgfのところ存在していると言える。

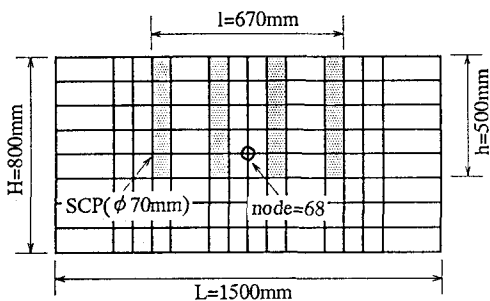


図2 SCP改良地盤のFEMモデル（2次元）

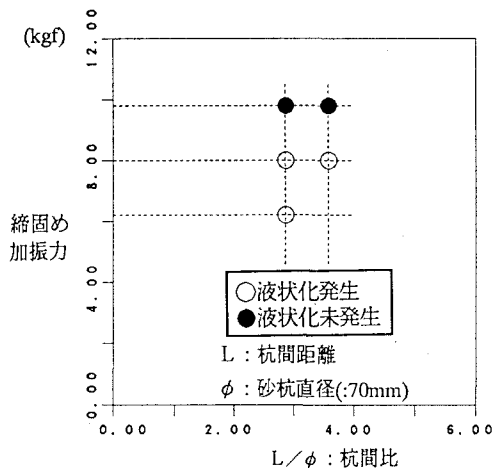


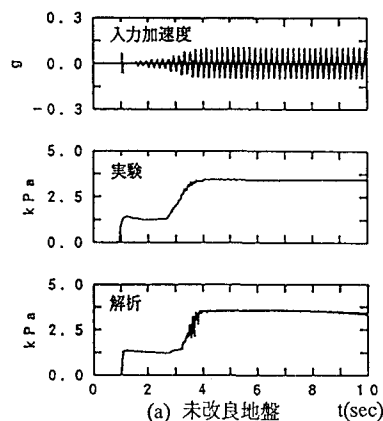
図4 締固め加振力、杭間比と液状化の関係（実験；地表面下100mm）

表2 SCP施工条件の異なるケース

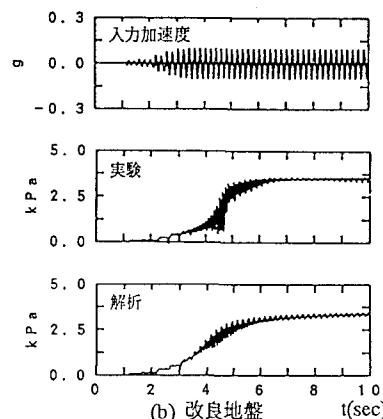
	砂杭間隔(mm)	締固め加振力(kgf)
Case-1	200	6.2
Case-2	200	8.0
Case-3	200	9.8
Case-4	250	8.0
Case-5	250	9.8

表3 改良前後の杭間の砂の相対密度

	改良前 Dr(%)	改良後 Dr(%)
Case-1	ほぼ22	45.4
Case-2		42.7
Case-3		48.8
Case-4		41.3
Case-5		41.6



(a) 未改良地盤



(b) 改良地盤

図3 過剰間隙水圧の時刻歴 (l/h=1.34, h/H=0.625)

そこで図4における杭径70mm、杭間距離200mmのSCPによる改良地盤で地表面下100mmでの液状化に対する限界加振力を定めるため、SCPによる地盤改良効果を評価する波動累積プログラムWAP3⁴⁾を用いて締固め加振力を8.0~9.8kgfの間のいくつかの改良地盤を数値的に作成し、これらについて液状化判定をNUP2で行ったものが図5である。この図より液状化に対するSCPの限界締固め力は約9kgfと推定できる。また、実験では行なえなかった液状化に対する限界杭間距離について数値解析を行った。締固め加振力を8.0kgfとし杭間距離を変化させていくつかの改良地盤をWAP3により作成し、NUP2により液状化判定を行った。その結果を杭間距離(ここでは杭間比)を横軸に示したのが図6である。これより液状化に対する限界杭間比は約2.5で、杭間距離にすると約175mmであると推測される。次に改良された地盤モデル内(図2)の過剰間隙水圧比の等圧線を示したのが、図7であり、(a)は4秒後、(b)は10秒後の状態である。4秒後では、未改良部(図中点線より外側の区域)では過剰間隙水圧比が0.4にも達し液状化寸前であるのに対し、改良区域(図中点線より内側区域)ではまだ変化はない。しかし、10秒後では未改良部からの影響のため改良部の過剰間隙水圧比の上昇が始まり、液状化限界を仮に過剰間隙水圧比=0.5とするならば、図中のBC限界線となり、角ABCは約35°となっている。この結果は井合らの一様締固めの実験結果⁵⁾にも対応するものと思われる。この改良部上端部の液状化を防ぐには、例えばパイプロタンパーで非常に大きな効果が挙げられることが報告されている⁶⁾。

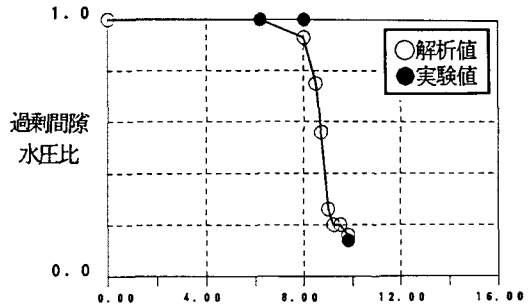


図5 過剰間隙水圧比と締固め加振力との関係 (砂杭間 200mm, 地表面下 100mm)

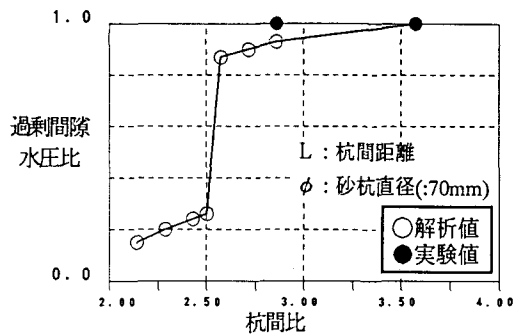
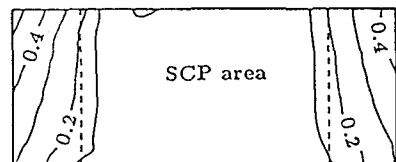
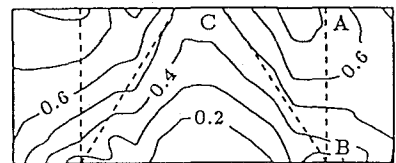


図6 過剰間隙水圧比と杭間比L/φの関係 (締固め加振力 8.0kgf, 地表面下 100mm)



(a) t=4sec



(b) t=10sec

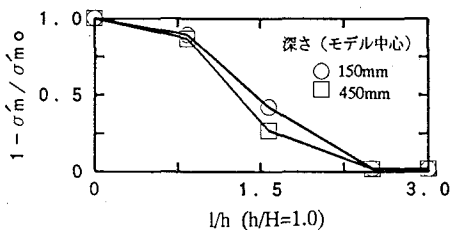


図8 最大過剰間隙水圧比

図7 過剰間隙水圧比の分布 (l/h=1.6, h/H=1.0)

そこで、図2の地盤モデルについて、SCPを基盤まで打設して ($h/H=1.0$)、改良幅と杭長との比 $1/h$ に対する最大過剰間隙水圧比(モデル中心部)の関係を示したのが、図8であるが、この場合のSCPによる改良地盤の設計は、WAP3を用いて行っている。このモデル、深さにはあまり関係なく、ほぼ $1/h > 0.5$ 、すなわち改良幅が砂杭長の1.5倍以上となるような設計をすれば良いことになる。

〔SCP施工例に対する検討〕 図9の粒度組成で、SCPによる改良前後のN値分布が図10である実施例について、最大加速度を200galとするE1 Centro地震波を入力し、NUP2により液状化解析を行った。図11には、時間経過ごとの過剰間隙水圧分布を、改良前及び改良後の地盤について示している。SCPで改良しない場合は、深さ10mの地点で液状化が発生しそうであるが、SCPによる改良後では大幅な改良効果が現れており、SCPの実設計が相当な安全性を保持しているといえる。

5. おわりに 液状化解析プログラムNUP2が室内実験に十分対応することが分かったが、これよりSCPによる液状化限界パラメータの推定が精度良く行えるようになった。また、SCPにより改良された地盤の剛性分布の評価プログラムWAP3とNUP2を組み合わせればSCPによる液状化防止設計がより容易に行えることも確認された。

参考文献

- 1) S.Iai, Y.Matsunaga, and T.Kameoka, Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, JSSMFE, 1992.6, pp.1-15.
- 2) S.Iai, Y.Matsunaga, and T.Kameoka, Analysis of Undrained Cyclic Behavior of under Anisotropic Consolidation, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, JSSMFE, 1992.6, pp.16-20.
- 3) 秋吉・他：SCP改良地盤の液状化防止効果について、平成4年度土木学会西部支部講演発表会講演概要集, 1993.3, pp.122-123.
- 4) 秋吉・他：サンドコンパクション工法による地盤剛性改良の動的評価について、土木構造・材料論文集, 第8号, 1992.11, pp.51-60.
- 5) 井合・小泉・倉田：液状化対策としての地盤の締め固め範囲に関する基礎的検討, 港湾技研資料, No.590, 1987.6, pp.3-16.
- 6) 秋吉・他：パイプロタンパーによる浅層締め固め効果について、平成4年度土木学会西部支部講演発表会講演概要集, 1993.3, pp.512-513.

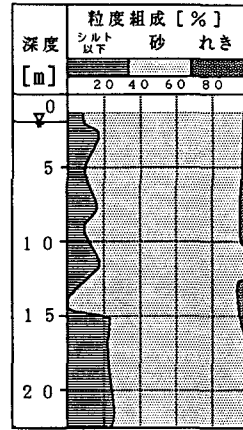


図9 モデル地盤の粒度組成

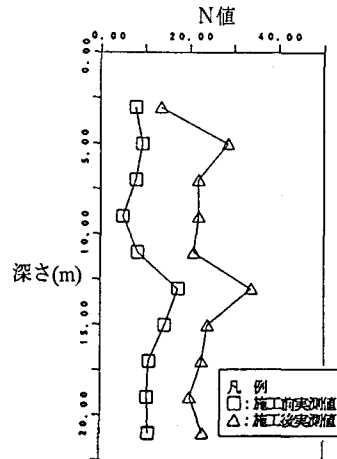


図10 モデル地盤N値分布

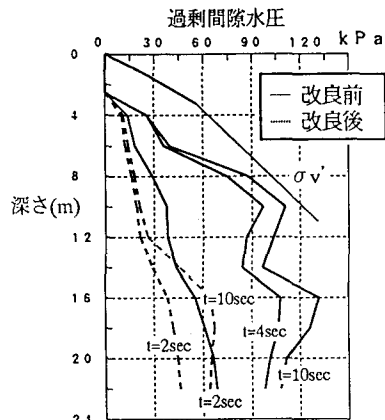


図11 改良前・後の過剰間隙水圧の比較