

地盤改良工法による表層地盤の地震応答抑制効果

秋吉 卓¹・尻無濱昭三²・湊田邦彦³

¹ 正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860 熊本市黒髪 2-39-1)

² 正会員 工修 鉄建建設(株) エンジニアリング本部技術研究所 (〒286 成田市新泉 9-1)

³ 正会員 工博 八代工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒866 八代市平山新町 2627)

軟弱な地盤では、振動締固めによる地盤改良によって表層の増幅度が、改良前に比べて低下することが期待される。また液状化時の地盤変状によって、地上の構造物が沈下、傾斜あるいは地盤の大変形の影響を受けるのに対して、地盤改良後はこのような地震時の地盤変状に伴う外力を免れることになる。本研究は、地盤改良が表層地盤中あるいは地上の構造物の、液状化に対する挙動も含めた動特性に与える効果を明らかにすることを目的とし、ここでは、著者らが開発した地盤改良の動的評価手法を用いて、地盤改良による表層地盤の地震応答抑制効果について検討するものである。

Key Words: *ground improvements, seismic responses, effective stress analysis, amplification, liquefaction, surface layer, sand compaction piles, gravel drain piles*

1. はじめに

都市域の拡大につれて臨海部における埋立て地盤や人工島の開発が数多く進められてきているが、阪神・淡路大震災では臨海部の広い地域で液状化など多数の地盤災害が生じたことから、都市の臨海部における地震防災の問題が改めて重要な課題となっている。また、これまで液状化対策工法の効果が確認されることは少なかったが、この震災に対する地震後の調査では、地盤改良によって液状化などの被害が減少したことが明らかとなり、液状化に対する改良効果が確認されている¹⁾。このため実務的には対策工法の適切な評価手法を確立することも重要な課題といえよう。

ところで、構造物に対する免震・制震の問題は、地震外力から如何に構造物の応答量を軽減するかということが基本と考えられるが、構造物の応答量を評価する際には、それへの入力の基本量として、構造物周辺地盤の地震応答量を適切に評価することが重要であることはいままでもない。表層地盤の地震応答量の評価に関する問題は、本来の免震・制震の

対象となる問題とはややかけ離れた面もあると思われる。しかしながら、臨海部の軟弱地盤に対しては何らかの地盤改良が必要である場合が多く、そのような地盤改良によって表層地盤の地震応答が抑制されるならば、このような場合も一種の免震と見なすことができよう。

そこで本論文では、臨海部における表層地盤の地震応答を評価することにより、地盤改良が表層地盤の地震応答に及ぼす効果に関して、これを広義の免震ととらえて、その得失について評価を試みるものである。ここでは著者らが開発した振動締固め工法のシミュレーションプログラム²⁾及び2次元FEMによる有効応力解析プログラム^{3), 4)}を用いて、地盤改良を施した表層地盤モデルの地震応答に関する数値解析により、地盤改良工法の免震効果の得失について評価する。特に、臨海部の表層地盤を対象として液状化時の特性を含めた地震応答より検討を加える。

2. 表層地盤の地震応答解析手法

(1) 2次元有効応力解析

一般に臨海部の埋め立て地盤においては地下水位が高く、表層地盤は地表付近まで飽和した地盤の場合が多い。そのような表層地盤の地震応答を解析する際は、地盤を固体（あるいは弾性体）として解析するだけでは不十分であり、これを飽和した多孔質媒体として取り扱うべきであろう。ここでは、飽和した多孔質媒体の微小ひずみに対する運動方程式としてBiotらの2相混合体理論に基づく方程式を利用することとする⁵⁾。すなわち、多孔質媒体は固体相と間隙水相からなる混相体とし、また間隙水の加速度は固相のそれに比して小さいとして質量連成の効果は無視する。このとき固体-液体混相体の動的釣り合い方程式と間隙水の動的釣り合いによる一般化されたDarcy法則は次式のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} L^T \sigma + \rho b &= \rho \ddot{u} + \rho_f \ddot{w} \\ -\nabla p + \rho_f b &= \rho_f \ddot{u} + \frac{\rho_f}{n} \ddot{w} + \frac{\rho_f g}{k} \dot{w} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、上辺のドットは時間微分で、ベクトル・マトリックス・テンソルは通常の表記法に従っている；

$$\left. \begin{aligned} \sigma^T &= (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \\ u^T &= (u_x, u_y, u_z), \quad w^T = (w_x, w_y, w_z) \\ b^T &= (b_x, b_y, b_z) \\ \nabla^T &= (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z) \\ L^T &= \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial x & \partial/\partial z & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 u と w はそれぞれ固相の変位と間隙水の相対変位で、間隙水の変位 U との関係は $w=n(u-U)$ 、 σ は全応力、 b は体積力、 p は間隙水圧、 n は空隙率、 ρ と ρ_f はそれぞれ固液混相体と間隙水の密度で、 $\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_f$ 、 ρ_s は固体粒子の密度、 k は等方透水係数である。式(1)の解法についてはここでは省略し、詳細については文献3)、4)に譲る。

著者らは以上の解析に、土粒子と間隙水の混相体に関する構成式として、井合らによるひずみ空間における多重せん断機構モデル^{6),7)}を採用し、逐次積分法により地震応答を求める、2次元有効応力解析プログラムNUW2 (Non-linear $u-w$ Analysis in 2-Dimensions)を開発している⁴⁾。

(2) 地盤改良工法のシミュレーション

本研究では、臨海部埋め立て地盤の改良工法として、軟弱地盤の改良のみならず液状化の対策工法としても国内で施工実績の高い振動締め固め工法のサンドコンパクションパイル工法と、排水工法による液状化対策工法として代表的なグラベルドレーン工法を取り上げる。以下には、サンドコンパクションパイル工法の締め固め過程の解析法に関して簡単に記述する。この解析では、サンドコンパクションパイル工法の締め固め過程を、ケーシングの静的圧入過程と動的締め固め過程から成るものとする²⁾。この静的圧入過程および動的締め固め過程における、土の間隙比の変化量(減少量)およびせん断弾性係数の増加量をそれぞれ $\Delta e_1, \Delta e_2$ および $\Delta G_1, \Delta G_2$ とすると、

$$e_1 = e_0 - \Delta e_1, \quad G_1 = G_0 + \Delta G_1 \quad (3)$$

$$e = e_1 - \Delta e_2, \quad G = G_1 + \Delta G_2 \quad (4)$$

ここに、 e_0, e_1, e :それぞれ初期、静的圧入後および動的締め固め後の間隙比、 G_0, G_1, G :それぞれ初期、静的圧入後および動的締め固め後のせん断弾性係数。

図1のように、動的締め固め過程をケーシングの先端から放射される直ひずみ伝播波を累積することによる

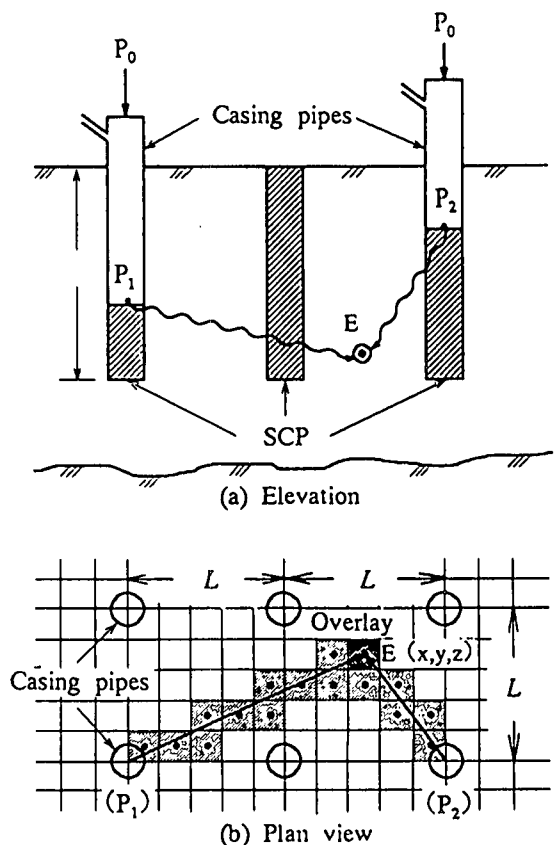


図1 振動締め固めによる波動伝播の概要図

ってシミュレートするものとし、式(4)における間隙比の減少 Δe_2 を加振回数 N_n および体積ひずみ ε で次式のように表す。

$$e = (e_0 - e_{\min})e^{-z} + e_{\min} \quad (5)$$

ここに、 $z = a\varepsilon^b N_n$ 、 e_0, e_{\min} : それぞれ加振前の初期間隙比及び最小間隙比、 a, b は回帰係数であり、式(5)の関係が飽和砂の室内加振実験結果に合うように決定している⁸⁾。関係式は以下ようになる。

$$a = 10^{-1.126} (F_c / 100 / \sigma_v')^{-0.698} \quad (6)$$

ここに、 $F_c(\%)$: 細粒分含有率、 $\alpha(\text{kgf/cm}^2)$: 鉛直方向有効応力、また $b=0.75$ としている。せん断弾性係数 G は微小ひずみに対する次式より算定する⁹⁾。

$$G = 900 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma_v')^{0.38} \quad (7)$$

ただし、 σ_v' : 平均有効応力。

以上のような静的圧入と動的締め固め過程に関してサンドコンパクションパイル工法の全過程をシミュレートする波動累積プログラムWAP3 (Wave accumulation process in 3-dimensions) を開発している^{2), 8)}。一方、グラベルドレーン工法による地盤改良は前記の2次元有効応力解析プログラムNUW2において透水係数を変化することで解析を行った。

3. 地震応答解析結果と考察

(1) 単層地盤モデルの液状化時応答

地盤の応答と液状化の関係を知るため、図2のような地盤剛性の異なる4種類の単純な地盤モデルを想定した。表1はモデル地盤の諸元である。地盤-1はN値が5の軟弱地盤であり、地盤-4はN値30の堅い地盤であり、地盤-2、-3は両者の中間の堅さのものである。入力加速度はEl Centro NS成分を最大値120galに調整して用いた。

図3は加速度、過剰間隙水圧比、変位の時刻歴を示したものである。地盤-1は、GL-16mで過剰間隙水圧比が0.5を越えており液状化が生じている。地表面における加速度は液状化のために小さくなっているが、変位波形は逆に増幅されている。地盤-2は地盤-1よりN値が大きく10m以深では液状化は発生していないが、それより浅い層では水圧の上昇と変

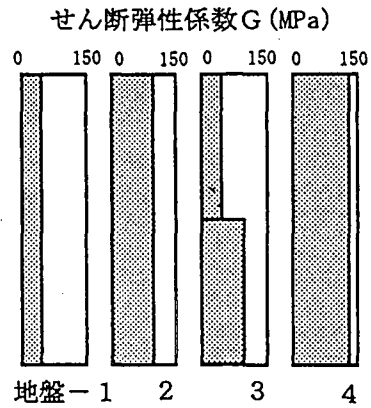


図2 地盤モデルの剛性分布

表1 地盤モデルの諸元

モデル	層構成	N値
地盤-1	1層	5
地盤-2	1層	15
地盤-3	2層	上層5, 下層15
地盤-4	1層	30
均一な飽和砂		
単位体積重量 19.208kN/m ³		
細粒分含有率 $F_c=10\%$		

位の増大が見られる。地盤-3では堅い下部層が非液状化地盤となり上部層は液状化が生じているが液状化する層の厚さは小さいため地盤-1よりも短周期の応答の傾向を示している。地盤-4は間隙水圧も上昇せず非液状化地盤となり、地表面の加速度応答は大きくなるものの変位振幅は地盤-1よりも小さくなっている。

以上の結果より、地盤剛性の軟弱な地盤-1を無対策地盤、地盤剛性の大きな地盤-4を十分に地盤改良のなされた地盤、また地盤-2、-3は地盤-4より改良が不十分な場合と考えると、地盤-4のように改良された場合には、地盤剛性が高いために地表面における加速度応答は増幅されるものの、液状化が生じなければ変位応答は小さく抑えることができ、無対策地盤に相当する地盤-1の液状化発生と変位応答の増大に対して効果的と考えられる。地盤-2、-3のように不十分な地盤改良では、液状化発生を完全に抑えることができず、変位応答の抑制効果も小さいといえる。

(2) 単層地盤モデルの応答特性と地盤改良

地盤改良工法として、国内での施工実績の高いサンドコンパクションパイル工法(SCP)と液状化

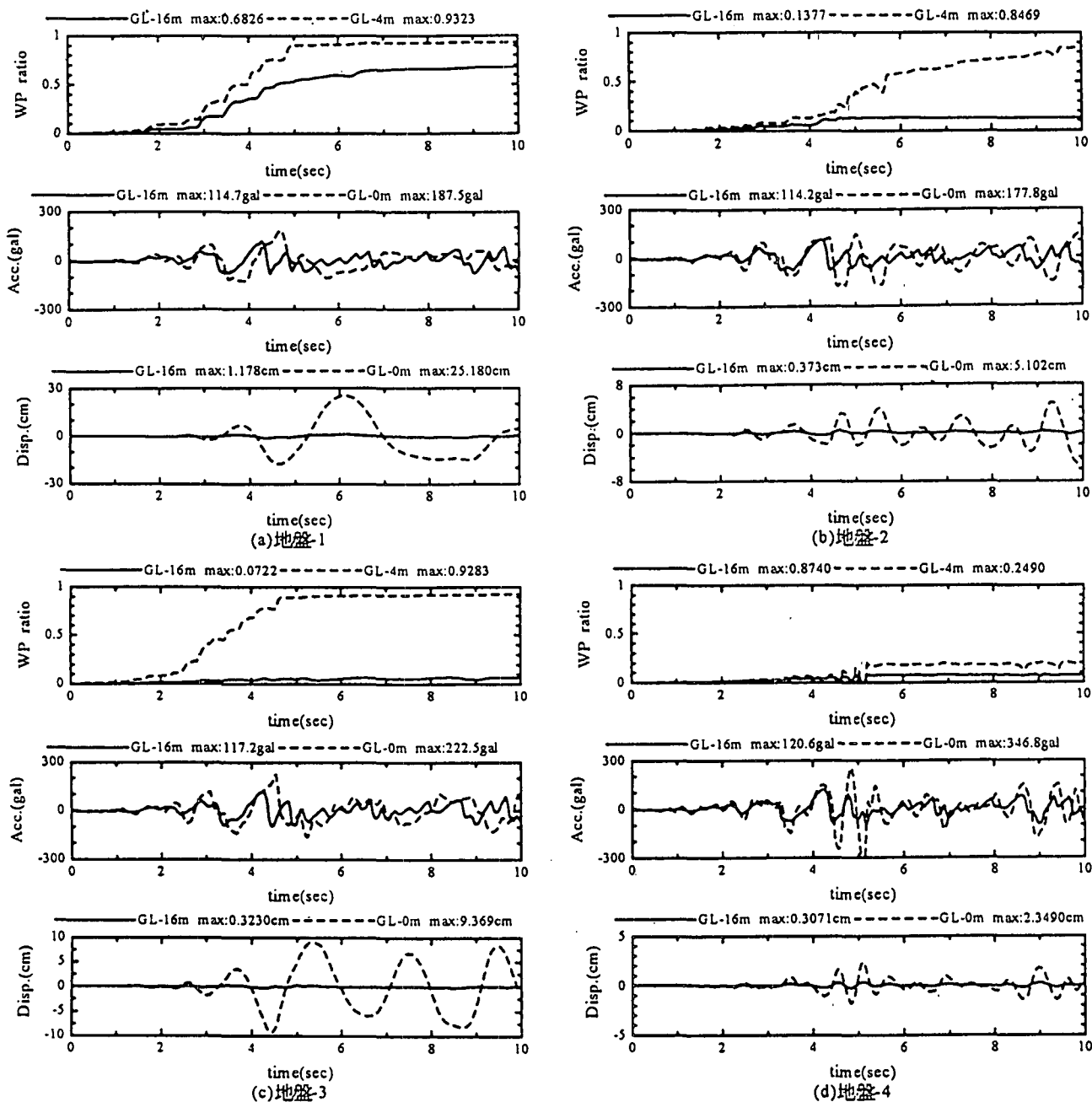


図3 地盤モデルの地震応答の時刻歴

対策工法として多用されているグラベルドレーン工法 (GDP) の2つを取り上げ、前節の表1の地盤モデルの内、地盤-1の単層地盤をモデルとして、上記の2つの改良工法をシミュレートする。解析ケースは表2に示すように、SCP地盤改良を2ケースとGDPによる改良1ケースの3ケースについて行った。このときの両改良工法の施工条件を表3に示す。

以上のような条件で改良した地盤において地震応答解析を行った結果の内、加速度及び過剰間隙水圧

表2 地盤モデルと改良内容

モデル	改良条件
地盤-1	無対策 (全層 N=5)
地盤-5	SCP (全層改良)
地盤-6	SCP改良 (深さ 10m まで)
地盤-7	GDP (全層改良)

表3 地盤改良の施工条件

SCP	GDP
杭径 0.7m	杭径 0.7m
杭間隔 2m	杭間隔 2m
締固め加振力 499kN	透水係数 $7.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$
締固め振動数 9.3Hz	

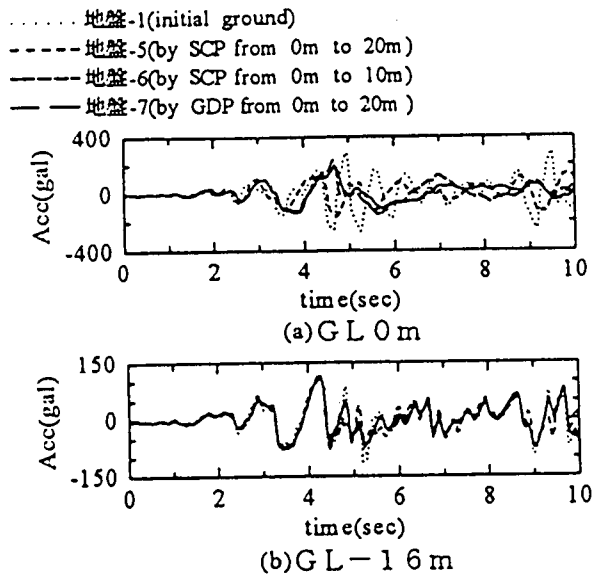


図4 地盤モデルの加速度応答の時刻歴

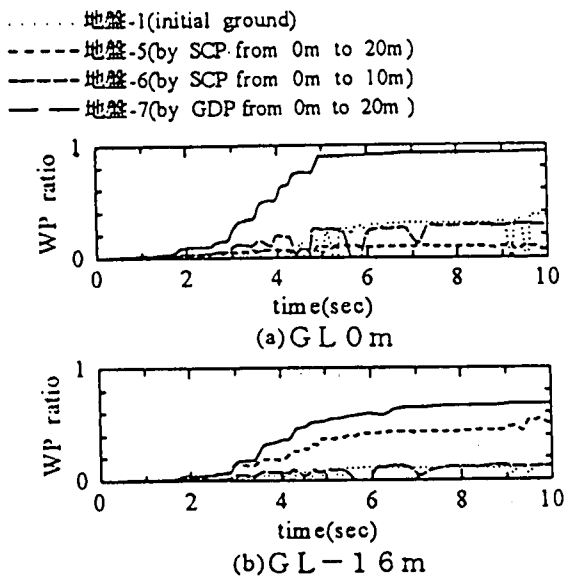


図5 地盤モデルの過剰間隙水圧応答の時刻歴

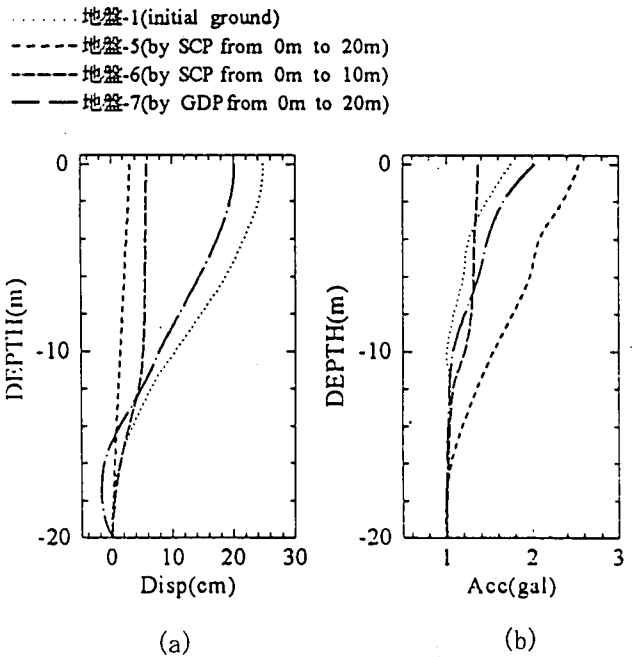


図6 地盤モデルの地震応答の鉛直分布

此の時刻歴をまとめたものが、それぞれ図4及び図5である。無対策地盤では、液状化発生により加速度の増幅が小さく長周期成分が卓越することがわかる。SCP及びGDPで全層(20m)にわたって改良された地盤(それぞれ地盤-5および地盤-7に相当)では、過剰間隙水圧の発生は見られず、また下層の挙動は上層へと伝達され、地表面での加速度応答は増幅されており、これが改良による効果と考えられる。

次に図6は変位及び加速度応答の最大値の鉛直分布を示したものである。図6(a)の変位応答より、SCPにより全層改良した場合は変位応答は十分に小さな値となり、地表面より10m改良した場合でも変位を小さく抑制する効果が表わされている。一方、GDPでは、過剰間隙水圧を消散することができるが、地盤剛性自体の増大はないため変位抑制の効果はさほど期待できないといえる。図6(b)の加速度応答の場合は、SCPで全面改良した場合には、地表面加速度は大きく増幅されるが、GDP工法のように過剰間隙水圧を抑制して液状化を防止する場合でも、加速度応答はある程度増幅される効果があるといえる。

(3) SCP地盤改良と実地盤モデルの地震応答

次に、実際の地盤構造よりモデル化した実地盤モデルにおいて、SCP地盤改良を行った場合の地震応答特性について検討する。

図7は解析に用いた実地盤モデルのN値分布であり、●印が改良前の無対策地盤を、○印は前節と同様の条件でSCP地盤改良を行った場合をそれぞれ示している。図より地盤改良によってN値は改良前の5程度以下から改良後は20程度にまで増加しており、地盤剛性は表層のほぼ全域で改善されている。ただし、深さ13、14m付近の層では細粒分含有率な

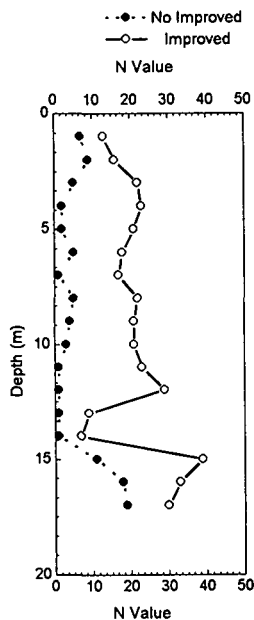


図7 実地盤モデルのN値分布

どの影響で改良効果が小さくなっている。この実地盤モデルに対して、前節までと同じ入力地震波を用いて地震応答解析を行った。ただし、加速度最大値を 2 m/s^2 として用いた。

図8、9及び10はそれぞれ加速度、変位及び過剰間隙水圧比の時刻歴応答の例を図示したもので、各図とも、実線が地盤改良後の応答を、点線が改良前の無対策の場合の応答を示している。また図8及び9の、(a)、(b)、(c)はそれぞれ地表面、深さ5m、10mにおける応答であり、図10の(a)、(b)は深さ5m、10mにおける応答である。これらの図より、無対策地盤では、液状化が発生して、表層では加速度が上層へ伝わりにくくなり、加速度応答が小さくなっているが、変位応答は地盤の軟化に伴い増幅されている。これに対して、地盤改良された場合は、地盤の剛性の改善によって液状化は発生せず、加速度応答振幅は無対策地盤のそれより2倍程度となっている。逆に変位応答は無対策地盤のそれの半分程度にまで抑えられており、地盤改良は特に液状化に伴う変位応答の抑制にその効果が期待される。

図11(a)、(b)は、それぞれ図8及び図9の地表面における加速度、変位応答のフーリエスペクトルを図示したものであり、実線が地盤改良の場合を、点線が無対策の場合である。無対策地盤では液状化に

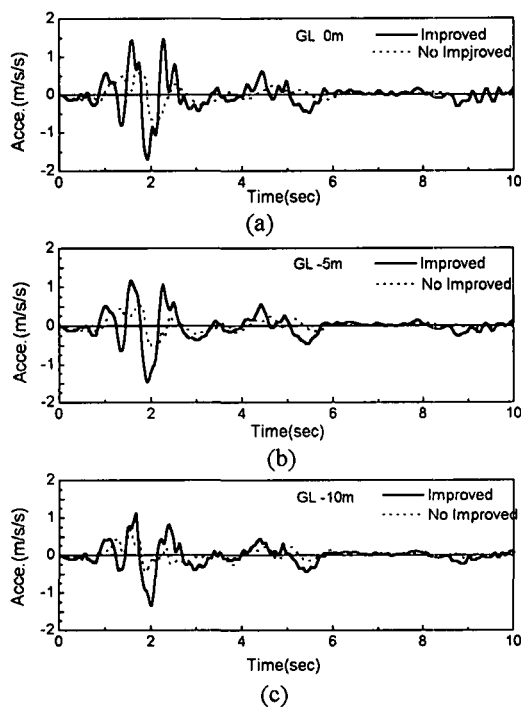


図8 実地盤モデルの加速度応答の時刻歴

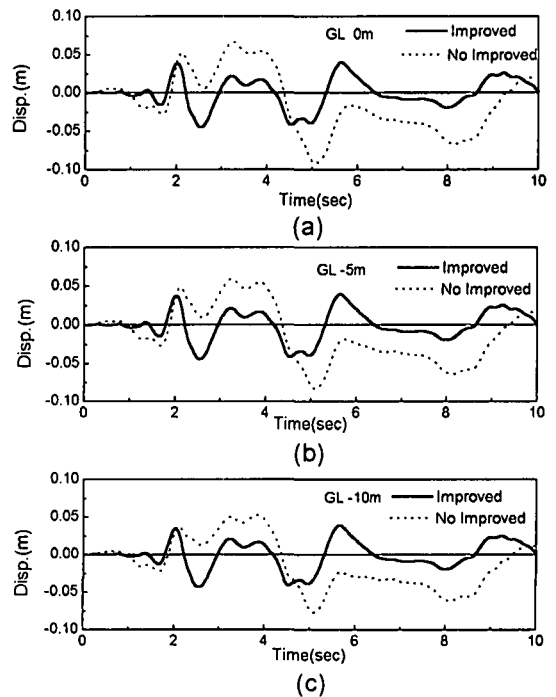


図9 実地盤モデルの変位応答の時刻歴

よって加速度、変位応答ともに長周期化しているのに対して、改良地盤では両応答とも無対策地盤より短周期側へと変化している。この図でも、図9と同様、地盤改良によって変位応答が抑制されることが示されている。

図12(a)、(b)及び(c)はそれぞれ加速度、変位及び過剰間隙水圧比の最大応答値の鉛直分布を示したものであり、実線が地盤改良の場合、点線が無対策の場合である。(c)のように地盤改良で液状化発生を防ぐことによって(b)の表層地盤の変位応答は無対策

地盤の半分程度に抑制されている。この解析例では深さ15m付近の層の液状化が防止できていないため、この深さにおける変位振幅が増大しているが、地盤改良を十分に行うことによって地表付近の変位応答をさらに抑制することも可能と考えられる。

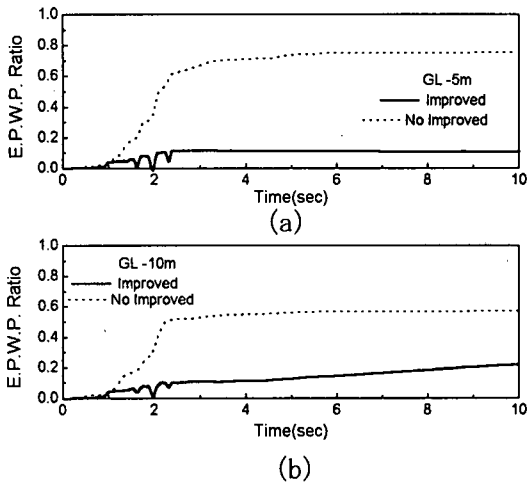


図10 実地盤モデルの過剰間隙水圧応答の時刻歴

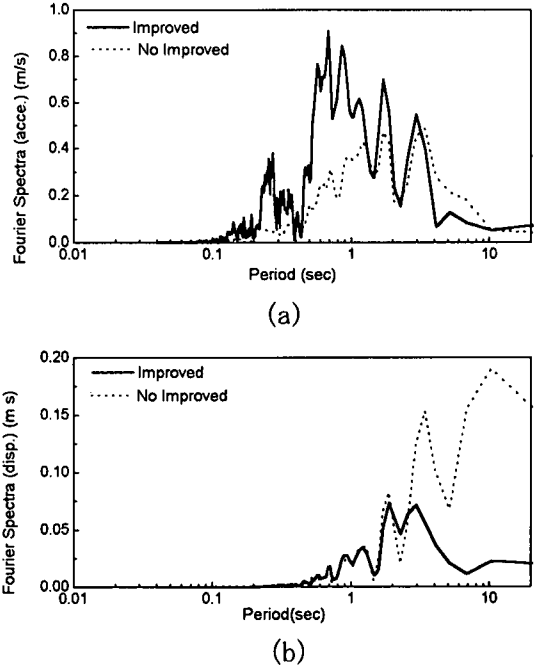


図11 実地盤モデル地表面における地震応答のフーリエスペクトル

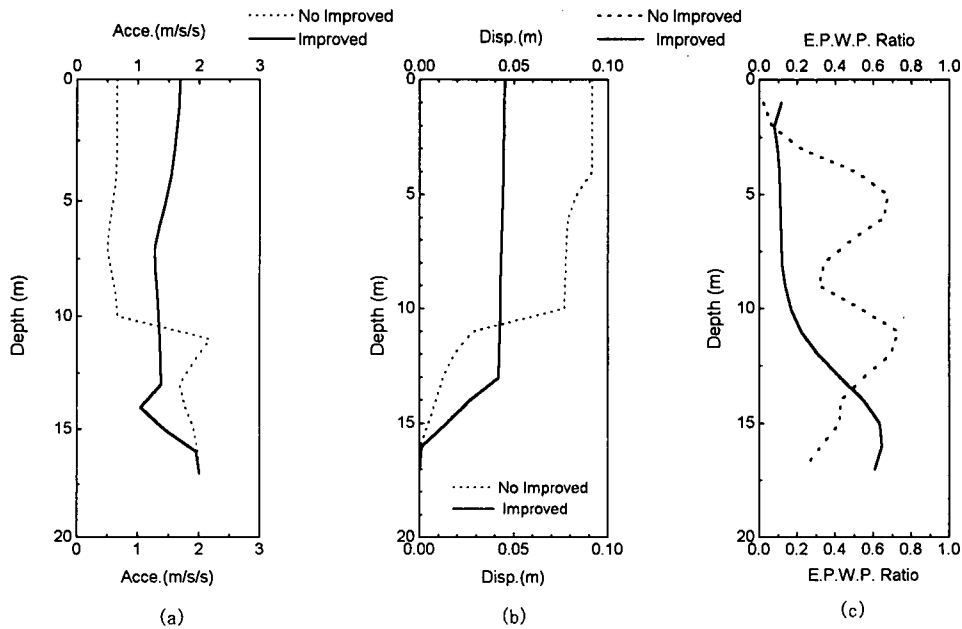


図12 実地盤モデルの応答最大値の鉛直分布

4. まとめ

本研究は、軟弱な表層地盤の地震応答に及ぼす地盤改良の効果に関して、これを広義の免震ととらえて、その得失について検討したものである。ここでは著者らが開発した振動締め固め工法のシミュレーションプログラム及び2次元FEMによる有効応力解析プログラムを用いて、地盤改良を施した表層地盤モデルの地震応答に関する数値解析により、地盤改良工法の免震効果の得失について評価を試みた。その結果、臨海部によく見られる液状化しやすい軟弱地盤では、地震によって地表面における変位応答が増大するのに対して、振動締め固めによる地盤改良を行うと、加速度応答は増大するものの液状化発生を防止するとともに変位応答を十分抑制できる可能性があることが明らかとなった。

ただし、本研究で解析の対象とした地盤は比較的単純な構造のものであり、用いた地震波も1波でかつ水平なせん断振動のみを扱ったもので、より複雑な地盤構造の場合や表面波など種類の異なる波動による表層の増幅特性の問題などは検討されていない。臨海部における表層地盤の地震応答評価を、構造物に対する免震の問題として捉えるには、なお多くの観点から検討を加える必要があり、また地盤のみならず構造物を含めた地震応答を同時に評価することが重要であり、今後の課題である。

参考文献

1) Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shinkawa, N. :

Effect of soil improvement on ground subsidence due to liquefaction, Special Issue of Soils and Foundations, JGS, pp.99 - 107, 1996.

- 2) Akiyoshi, T., Fuchida, K., Matsumoto, H., Hyodo, T. and Ueda, T. : Simulation of sand compaction pile method, Proc. of 9th Japan Earthq. Eng. Symp., pp.949 - 954, 1994.
- 3) Akiyoshi, T., Fuchida, K., Matsumoto, H., Hyodo, T. and Fang, H.L. : Liquefaction analysis of sandy ground improved by sand compaction piles, Int. J. Soil Dyn. and Earthq. Eng. , Vol.12, No.5, pp.299 - 307, 1993.
- 4) Akiyoshi, T., Fuchida, K., Fang, H.L., Tamaki, T. and Kato, M. : Anti-liquefaction effect of improved grounds by SCP, Proc. of 9th Japan Earthq. Eng. Symp., pp.955 - 960, 1994.
- 5) Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T., Dynamic behavior of saturated porous media: The generalized Biot formulation and its numerical solution, Int. J. Numerical and Analytical Method in Geomechanics, Vol.8, pp.71 - 96, 1984.
- 6) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.32, No.2, pp.1 - 15, 1992.
- 7) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Analysis of undrained cyclic behavior of sand under unisotropic consolidations, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.32, No.2, pp.16 - 20, 1992.
- 8) 秋吉 卓, 湊田邦彦, 松本英敏, 兵頭武志, 方 火浪 : 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, pp.51 - 60, 1992.
- 9) 岩崎敏男, 龍岡文夫 : 地盤の動的変形特性に関する実験的研究(1) - 微小ひずみ領域における砂の動的変形特性, 建設省土木研究所報告, 第148号, pp.1 - 44, 1977.

(1996. 9. 14 受付)

EFFECTS OF GROUND IMPROVEMENTS ON SEISMIC RESPONSES OF SURFACE GROUND LAYER

Takashi AKIYOSHI, Shozo SHIRINASHIHAMA and Kunihiko FUCHIDA

Seismic response behaviors of surface ground layer during liquefaction are analyzed to investigate the effects of ground improvements, because responses of improved ground may be reduced compared with that of initial one and structures on or in improved ground could avoid damages such as subsidence or tilting. For this purpose the computer programs for simulating sand compaction piles method and 2D FE effective stress analysis are used. Numerical computations are performed for seismic responses of 2D FE column models both for improving and unimproving cases. Numerical results show the efficiency of anti-liquefaction improvement for the surface ground layer on reducing displacement responses of it.