

耐震補強としての締固め工法による液状化対策の現状と動向

不動建設株式会社 正会員 原田 健二
 不動建設株式会社 正会員 石田 英毅

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震を契機としてL2地震動のような大規模地震を想定した耐震補強技術への取り組みが盛んに行われてきている。その中で地盤の耐震補強技術としては、サンドコンパクションパイル（SCP）工法を中心とした締固め工法による施工実績が最も多く、過去の巨大地震における効果の実証事例も豊富である。最近では耐震技術と併せて、振動・騒音といった周辺環境への影響やSCPの中詰め材料の枯渇から環境保全性を付加した技術が必要とされている。このような時代のニーズから周辺環境対応性を考慮した無振動・低騒音の静的締固め砂杭工法である“SAVEコンポーザー¹⁾”や建設発生土類を有効活用し環境保全性を考慮した“リソイルコンポーザー²⁾”が新しい液状化対策工法として開発されてきている。

本報においては、これらの耐震補強としての液状化対策工法の概要と締固めによる改良地盤の評価に関わる最近の技術動向について触れ、土木構造物に対する適用事例について紹介している。

2. 耐震技術としての新しい液状化対策工法の開発

2.1 周辺環境に配慮した締固め工法（SAVEコンポーザー）の開発経緯と概要

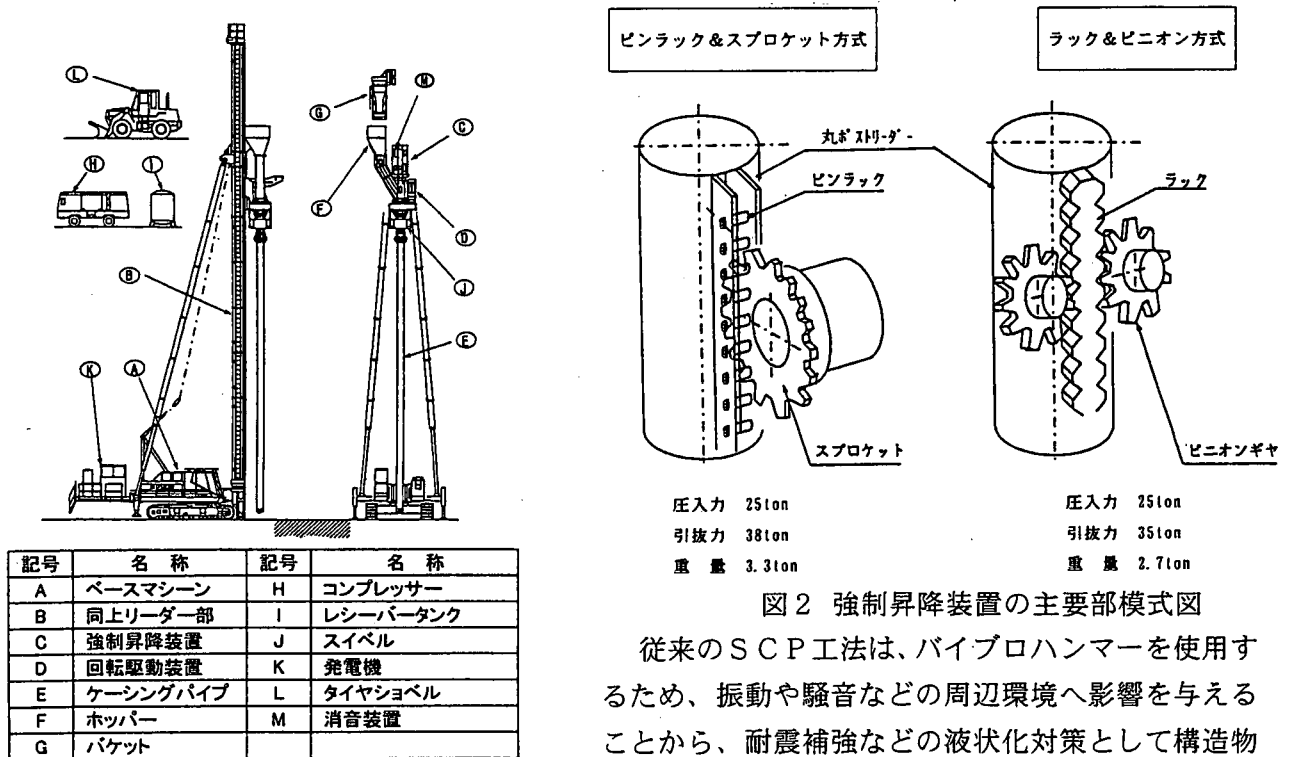


図1 SAVEコンポーザーの施工機械一覧図

大きく適用が困難なことがある。この場合には、無振動・低騒音で施工可能なグラベルドレーン工法や高周波バイプロを使用しケーシングパイプの小径化を図った低振動・低騒音型のSCP工法などにより対応するケースが多かったが、これらの工法はSCP工法に比べて高価なうえに、前者はSCP工法ほど周辺地盤に対する締固め効果を期待できず、後者は振動・騒音に対する完全な解決にならない点などの問題があった。

このような液状化対策工法のニーズの高まりに対し、近接施工におけるコスト縮減を可能とし、周辺環境

キーワード：液状化 締固め 周辺環境 環境保全 設計法

連絡先：〒100-0016 東京都台東区台東1-2-1 TEL03-3837-6034 FAX03-3838-6158

問題へ対応するための振動と騒音問題の解消とSCP工法と同等な効果を期待できる工法であるSAVEコンポーザーが開発された。

SAVEコンポーザーの施工機械の構成とその名称を図1に示す。SCP工法では、ケーシングパイプの貫入はパイロハンマーの起振力により行い、引き抜きはワイヤーの巻き上げで行うのに対してSAVEコンポーザーでは、パイロハンマーを用いず、貫入・引き抜き時ともケーシングパイプを回転させながら図2に示す強制昇降装置によってウェーブ施工を行い無振動化を実現している。

施工機械は、SCP杭打ち機をベースマシンとし、ケーシングを回転させる駆動装置および油圧によるギア駆動の強制昇降装置などにより構成されている。強制昇降装置の必要反力は、施工機重量の和で確保し、スプロケット、ピニオンギアの回転は油圧モーターによって行っている。

以下にSAVEコンポーザーの施工手順を示す。(図3参照)

- ①ケーシングパイプを所定の位置に据え一定量の砂をケーシング内に投入する。
- ②ケーシングパイプを回転させながら地中に貫入する。
- ③所定深度まで貫入する。
- ④ケーシングパイプを規定の高さに引き上げながら、ケーシングパイプ内の砂を圧縮空気を使用しながら排出する。
- ⑤ケーシングパイプを打ち戻し、排出した砂と周囲の地盤を締固める。
- ⑥④～⑤を細かく繰り返して拡径するウェーブ施工により、所定の深さまで砂杭を造成する。

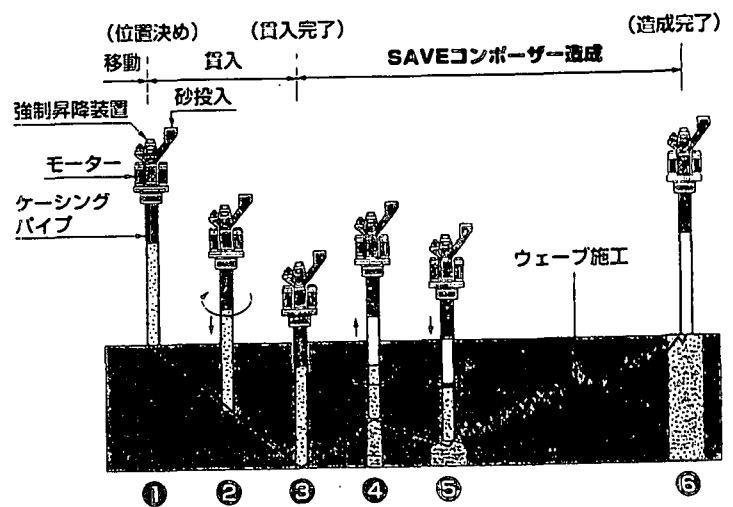


図3 SAVEコンポーザーの施工手順

2.2 環境保全性を考慮した締固め工法(リソイルコンポーザー)の開発経緯と概要

耐震液状化対策としてSCP工法の適用を考えた場合、中詰め材料として一般的には良質の砂材料を用いてきた。しかし、近年では、透水性のよい砂の利用が制限されるようになってきている。将来にわたって良質な砂材料を確保し続けることは、環境上の様々な制約により困難となることが予想され、砂を用いない地盤改良の必要性が高まってきている。リソイルコンポーザーは、SCP工法の中詰め材料として砂を用いる代わりに建設発生土類(建設発生土以外に石炭灰やスラグなどを用いる場合があるためこう呼ぶ)を用いる技術である。使用材料につ

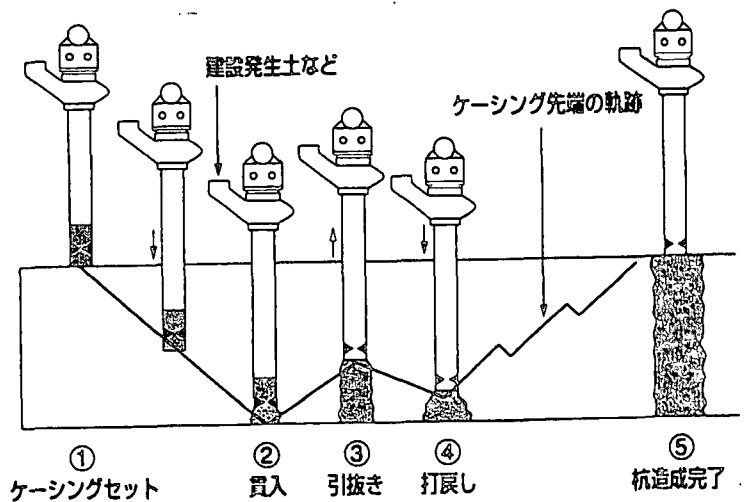


図4 リソイルコンポーザーの施工手順

いては、この基準を細粒分含有率F。(シルト分と粘土分の合計)で規定しており、現在、建設発生土でFcが25%程度以下の土材料(ただし粒度分布によってはこの限りではない)は適用可能となる。また、ハード的には、ホッパーの傾斜角を変えるなど、建設発生土を材料とした場合でも十分施工できるよう改良されている。

以下にリソイルコンポーザーの施工手順について示すが、施工方法は、基本的に従来のSCP工法と変わらない。(図4参照)

- ①ケーシングパイプを所定の位置にセットする。
- ②ケーシングパイプ内に一定量の中詰め材料(ポイント材料)を投入し、所定深度まで貫入する。

③ケーシング引き抜き時に中詰め材料を排出する。

④排出した中詰め材料をケーシングの打ち戻しにより拡径と同時に締固めを行う。

以上を地表面まで繰り返して杭を造成する。

3. 最近の耐震設計の技術動向

3. 1 杭間における締固め地盤の設計法

SCP工法をはじめとしたSAVEコンポーザーおよびリソイルコンポーザーの改良原理は、基本的に貫入したケーシングパイプを引き抜きながら排出した砂を押し広げ締固めると同時に、周辺地盤も締固めることである(図5参照)。したがって、この圧入効果により周辺地盤の密度は増大するので、原地盤の液化化抵抗は大きなものとなる。

締固めによる改良地盤を設計・管理する場合、通常、図6に示すように事前のボーリングによるN値データに基づいて目標N値または液化化安全率 $F_L \geq 1.0$ を満足するように改良率を設定し、施工後に砂杭と砂杭の対角線交点上(杭間と呼ばれる)の点でチェックボーリングによる管理が行われている。つまり、締固め工法の設計法とは、いかに精度良く改良後のN値を予測するかということである。従来からのSCP工法の設計法は、実績に基づく簡易図表設計法やN値～相対密度 D_r ～間隙比 e の関係をを用いた設計法、さらにN値～相対密度 D_r ～間隙比 e の關係に細粒分含有率を考慮した設計法の3つがある³⁾。このうち、N値～相対密度 D_r ～間隙比 e に細粒分含有率を考慮した設計法は、細粒分含有率が20%以上の地盤でも適用できるため、最も一般的な方法として使用されている。

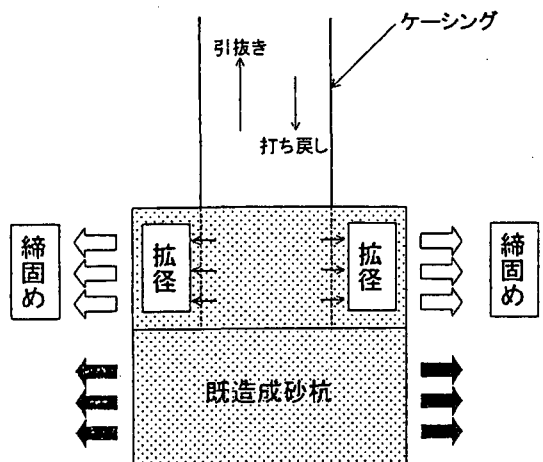


図5 締固め工法の改良原理

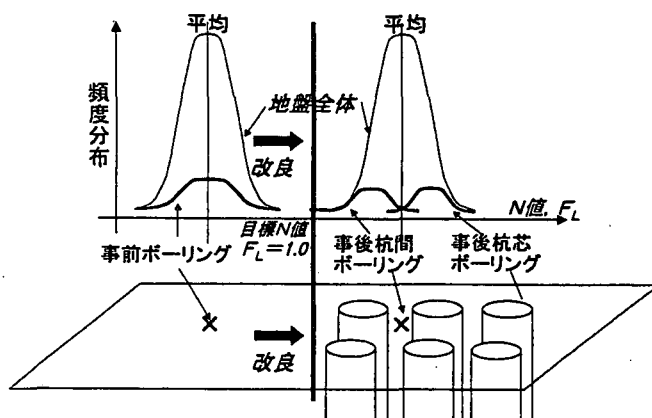
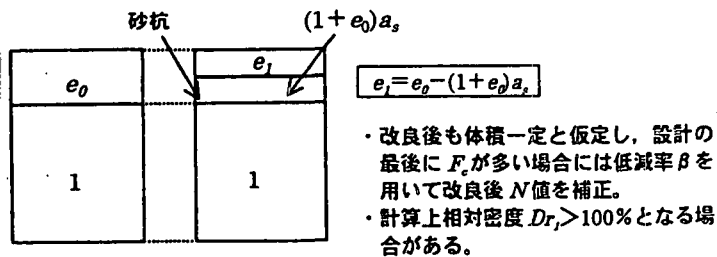


図6 事前・事後ボーリング位置図

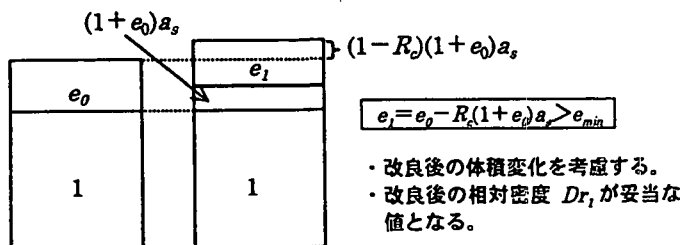
この設計法をさらに発展させた方法として、砂地盤の締固めを体積圧縮ととらえた新しい設計法⁴⁾が提案されている。この設計法の大きな特徴は、図7(a)に示す従来のSCPの設計における考え方に対し、砂杭打設時の周辺地盤の変形(沈下や盛り上がり)の実現象を“有効締固め係数 R_c ”を導入することにより説明可能としている点である(図7(b))。さらに、相対密度 D_r の算定には、細粒分を考慮した時松・吉見の式⁵⁾を用いており、妥当な改良後の相対密度を与えるとしている。 R_c を導入した設計は図8に示すフローにしたがって実施され、原地盤のN値 N_0 、細粒分含有率 F_c を使い、上記の R_c と D_r を介して目標N値 N_1 に必要な置換率 a_s が求まることになる。ここで、 R_c は F_c に最も依存し、 $R_c=1.05-0.46 \log F_c$ で近似される。コンポーザーの施工現場でのデータを使った R_c と F_c の関係を図9に示している。また、図10は、図9の設計フローにしたがって求めた改良後推定N値と改良後実測N値の関係を示しており、当設計法の良好な精度を裏付けている。

3. 2 締固め地盤の評価法(複合地盤効果と K_0 効果)

兵庫県南部地震以後、「L1地震動(中規模地震動)に対しては液化化を防ぎ、L2地震動(大規模地震動)に対しては、一部液化化したとしても土木構造物としての機能を保持する」とする観点から、締固め改良地



(a)従来設計における仮定



$R_c = 0$: $e_0 - e_1$ 改良効果なし
 $0 < R_c < 1$: 改良後、体積増加
 $R_c = 1$: 改良後も体積一定、(a)と同じ
 $1 < R_c$: 改良後、体積減少

改良効果大 ↓

(b)新設計法→有効締固め係数 R_c の導入

図7 締固め砂杭の設計の考え方

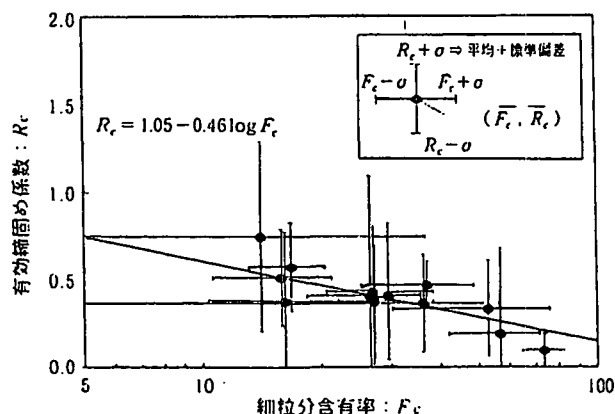


図9 SCP工法の R_c と F_c の関係

盤に対する液状化判定は、実務的には中規模地震動と大規模地震動を想定する場合で設計法や管理法を変えていく必要がある。そこで、L2地震動に対する杭間のN値データを使った確率・統計的な試みもされている⁶⁾。

ここでは、兵庫県南部地震における締固めによる改良地盤の挙動について、締固め改良地盤特有の複合地盤(杭間・杭芯)的な効果や杭間における静止土圧係数 K_0 増加などの要因に着目して、これまで得られている現地のデータを示し、これらのデータを基に構築した締固め改良地盤の設計法(液状化判定法)について考察してみる。

(1) 複合地盤効果に関する知見

液状化対策として砂杭系締固め工法を設計する場合は、図6に示すように、砂杭間のN値を用いた評価となるため剛性の高い砂杭を無視した形で実施されている。したがって図11に示す改良地盤を複合地盤として評価する方法としては、杭間と杭芯N値を式(3.1)に示すように面積平均化したN値を用いる方法が考えられる。

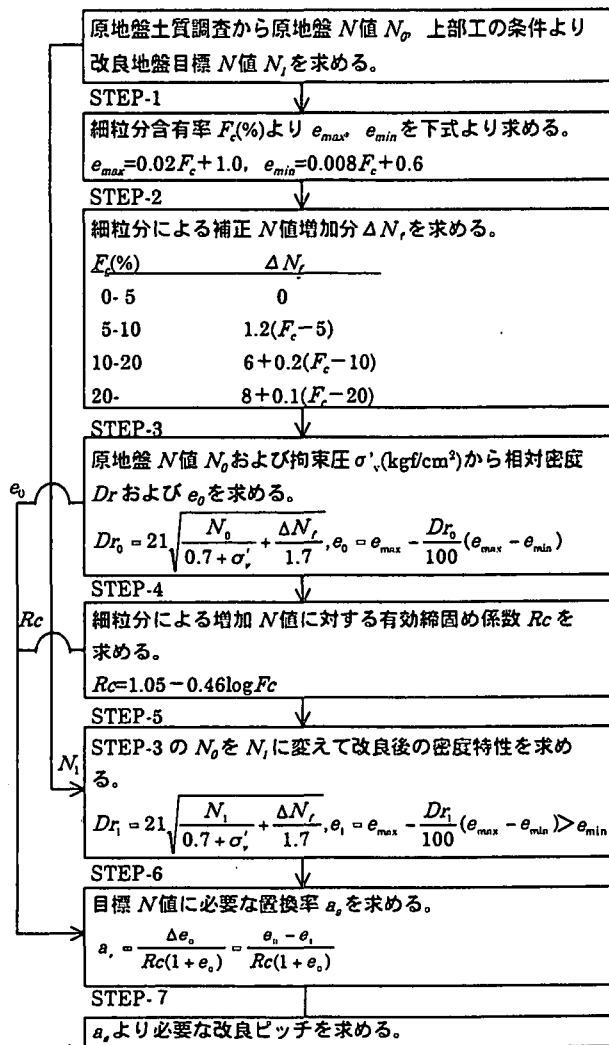


図8 R_c を導入した設計フロー

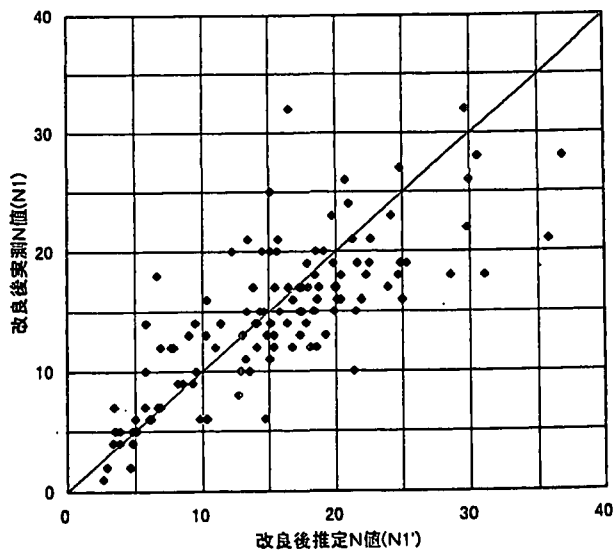


図10 改良後実測N値と改良後推定N値の関係

$$\bar{N}_{1.0} = a_s \cdot N_{p1.0} + (1-a_s) \cdot N_{g1.0} \quad (3.1)$$

しかし、液状化強度RはN値とFcの関数であるので、これをRに換算し、平均液状化強度Rを考へて

$$\bar{R} = a_s \cdot R_p(N_{p1.0}, F_{cp}) + (1-a_s) \cdot R_g(N_{g1.0}, F_{cg}) \quad (3.2)$$

と評価する方がより合理的であるといえる。

この問題に対し、SAVEコンポーザーによる現場実験により地盤全体の体積ひずみを図12のように算定した⁷⁾。つまり、図中の水平変位は、傾斜計により測定したデータを、盛り上がりについては地表面レベル測量により測定し、改良率 $a_s=12\%$ に対し9%程度の体積ひずみが杭間で平均的に生じている結果を得た。この値は密度検層で得られた杭間の平均体積ひずみ6~7%に対して明らかに大きいため、砂杭の近傍ほど体積ひずみが大きいと考え、これを砂杭周辺で実施した現場コーン試験により実証した。図13は、この時の増加コーン抵抗値の試験結果であり、きれいな砂地盤での砂杭周辺の強度分布を裏付けたものとなっている。

(2) K_0 増加効果に関する知見

K_0 増加効果に関しては、異方圧密中空ねじり試験により、同じ相対密度であっても静止土圧係数 K_0 の増加に伴い液状化強度が増加することが確認されている⁸⁾。SCP工法の K_0 の維持については木村ら⁹⁾により、SAVEコンポーザーについては原田ら¹⁰⁾により2年後の K_0 の維持が確認されており、このような締固め砂杭系工法の拡径による側圧増加とその持続は保証されているといえる。

これまで計測された事前・事後 K_0 と改良率 a_s との関係を図14に示す。同図より、 K_0 の増加は、改良率にある程度依存していることがわかる。

また、杭芯における K_0 測定も実施されており、杭間 K_0 も杭芯 K_0 も0.8程度(事前 K_0 は0.4程度)でほぼ一致していることが確認されている¹¹⁾。

さらに今まで示した現場データにより、 K_0 増加効果と複合地盤効果の両効果を考慮した強度曲線はどのように定式化することができるかを考えていくことにする。複合地盤効果については、平均液状化強度 \bar{R} で表わし、 K_0 増加効果を併せて考慮すると、地盤全体の液状化強度は(3.3)のように表わすことができる。

$$\bar{R} = \alpha \left\{ a_s R_p(N_{p1.0}, F_{cp}) + (1-a_s) \cdot R_g(N_{g1.0}, F_{cg}) \right\}$$

$$\alpha = \frac{\left(\frac{1+2K_0}{3} \right)_{K_0=0.8-1.5}}{\left(\frac{1+2K_0}{3} \right)_{K_0=0.5}} \quad (3.3)$$

ここに、 α ： K_0 増加による液状化強度の割増係数

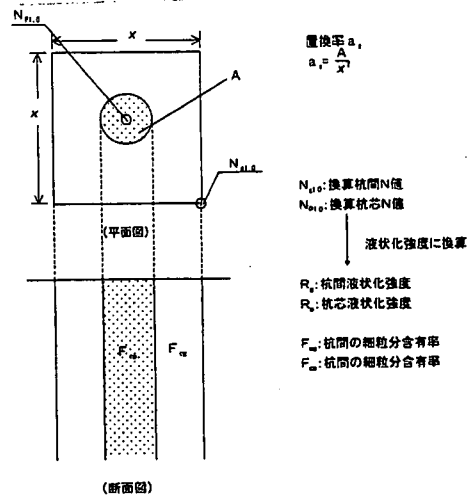


図11 複合地盤の考え方

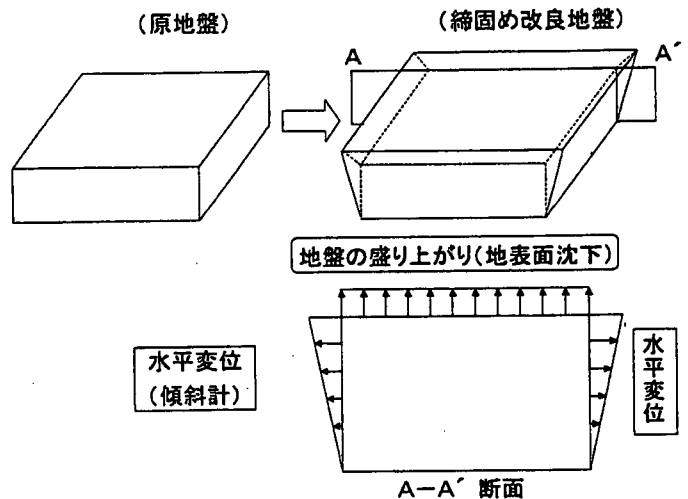


図12 地盤全体の堆積ひずみの算定(模式図)

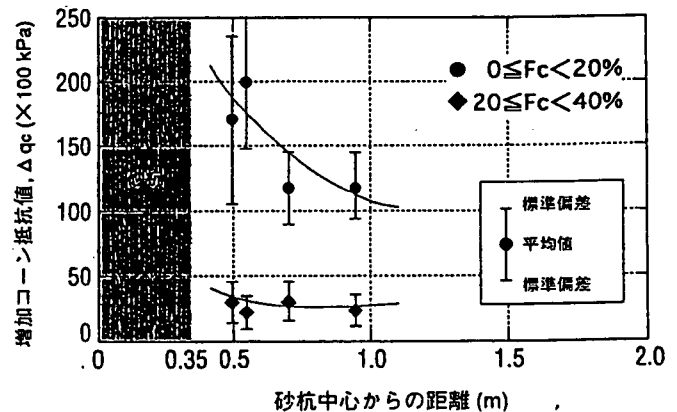


図13 砂杭中心からの距離と増加コーン抵抗値の関係

上式において、液状化強度への換算は、N値で行なうため、図15に示すようにN値の増加には密度増加によるもの (ΔN_1) 以外に K_0 の増加 (ΔN_2) が含まれるというダブルカウントの問題がある。この問題に関して、 K_0 をパラメータとした室内標準貫入土層実験と繰返しせん断試験を実施し、図16に示すN値、相対密度、液状化強度の関係を得ている¹²⁾。ただし、室内標準貫入土層実験では、任意の K_0 状態を再現できるように工夫してある土層を用いて貫入試験を実施し、繰返しせん断試験では、中空ねじり試験装置による非排水繰返し載荷を等方圧密 ($K_0=1.0$)・異方圧密 ($K_0=0.5, 1.5$) 状態で実施している。

これらの結果から以下のことが言える。なお、実験では R_L が 0.5 以上は確認されていないためこれ以上の値は外挿した値として灰色で示し、近似曲線も破線で示している。

- ① N値と液状化強度 R_L は相対密度 D_r が 90% 程度の大ききところで急増する。
- ② N値増加に影響を及ぼす密度増加と K_0 増加による成分割合は、相対密度 D_r が大きくなるに伴い前者が卓越する。すなわち、 K_0 増加がN値の増加に及ぼす影響は相対密度 D_r が大きいところでは小さい。
- ③ 液状化強度 R_L についても同様に相対密度 D_r の大きいところでは K_0 増加が液状化強度 R_L に及ぼす影響は小さくなる。

また、図16から液状化強度 R_L とN値の関係について抽出すると図17に示す通りとなる。同図によると自然地盤の静止土圧係数は $K_0=0.5$ 程度であることが知られており、SCP工法の締固めによる改良後の杭間の K_0 は、図14に示すように $K_0=0.5$ 以上に評価されるため、締固め地盤の方が液状化強度 R_L は大きいと判断される。以上より締固め改良地盤の杭間におけるN値での評価は、液状化強度から言えば過小に評価されており、杭芯の締固め効果についても考慮することができると考えられる。

4. 耐震補強施工事例

4.1 海岸堤防への耐震補強工事

ここでは耐震補強技術として海岸堤防の液状化対策として施工されたSAVEコンポーザーの適用事例 ($\phi 700\text{mm}$, 正方形 1.6m : 改良率 15%) につい

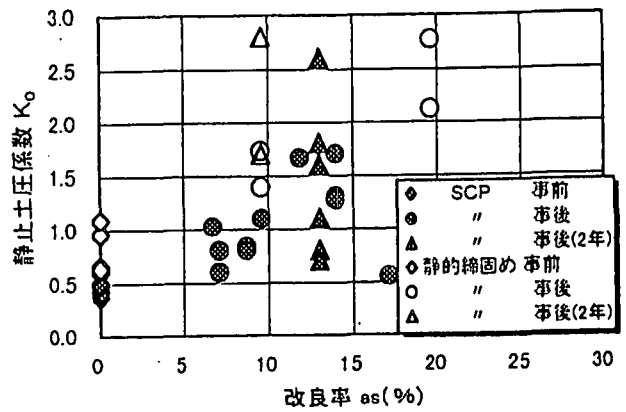


図14 改良率と事前・事後 K_0 の関係

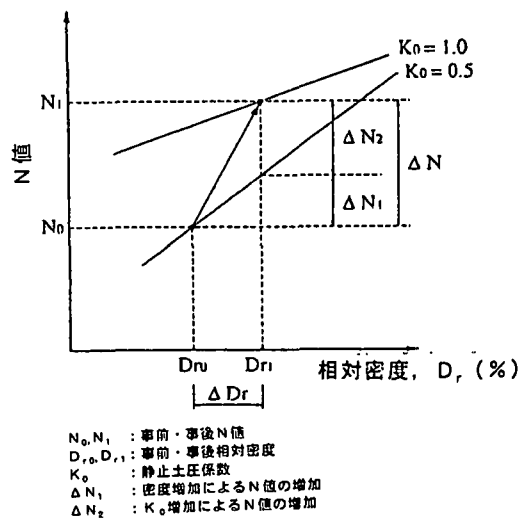


図15 N値のダブルカウントの概要図

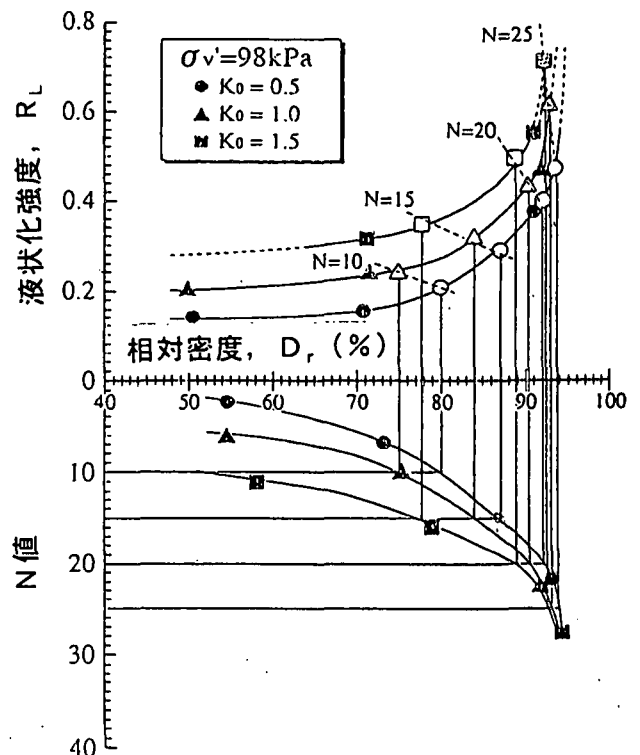


図16 液状化強度 R_L , 相対密度 D_r , N値の関係

て示す¹³⁾。当施工現場においては、既設護岸の撤去後に新設される護岸の液状化対策を図るためにSCP工法による締固め工法が採用されていたが、図18に示すように施工エリアから80~100m付近に近接する建屋に対する振動の問題が懸念されたため当工法が選定された。

地盤改良後、改良の効果を確認するために実施した杭間の標準貫入試験のN値と事前N値について、細粒分含有率との関係を示すと図19に示す通りとなり、細粒分含有率の増加とともに事前と事後N値は相対的に小さくなるが、N値増加による改良効果のみをとれる。

4.2 貯炭場への耐震補強工事¹⁴⁾

H火力発電所の増設工事に伴い新設される貯炭場は、発電所内の埋立地に位置し、事前調査により緩い埋立砂層が堆積しており、一部に地震時の液状化の可能性が高いことが確認されている。この埋立砂層の耐震液状化対策として図20に示すように対策工としてSCP工法が採用された。そこで、発生土の有効利用の一環として現地掘削部（半地下部分）に存在する良質土をSCPの中詰め材料として用いるリソイル工法（前出のリソイルコンポーザー）が適用された。現地掘削土利用の概念を図21に示している。

中詰め材として用いる現地土は、 $F_c=13\sim 26\%$ 、含水比 $w=5\sim 20\%$ 程度であり、現地から採取後スケルトンバケットを着けたバックホウにてふるい分けを行ってから使用した。

今回の工事では改良効果の確認として、標準貫入試験による杭間調査を行った。事前に標準貫入試験を行った付近で「リソイルコンポーザー」とSCP工法のそれぞれについて杭間の標準貫入試験を行った。結果の一例を図22に示すが、リソイルコンポーザーとSCP工法の改良後のN値に大きな違いがなく、ほぼ同等の効果が得られていることが確認できた。また、改良後のN値による液状化判定においても、すべての地点において液状化安全率は $F_L > 1.0$ となっており、液状化の発生しない地盤に改良されたことも確認されている。

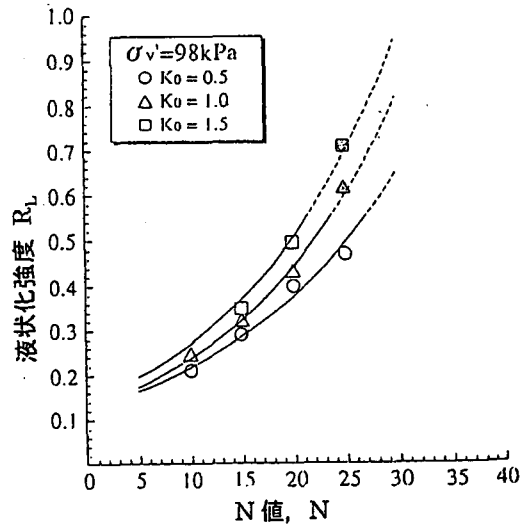


図17 液状化強度 R_L とN値の関係

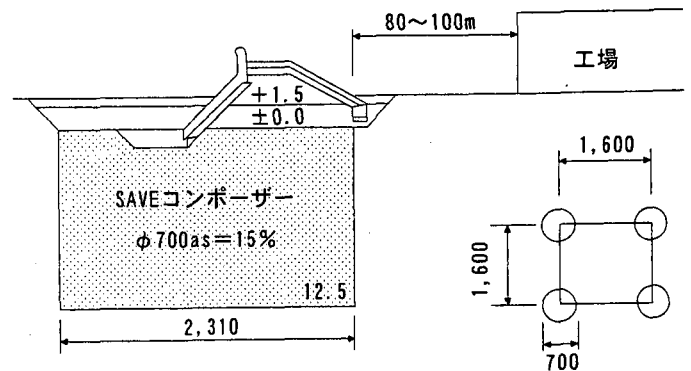


図18 標準断面図と改良仕様

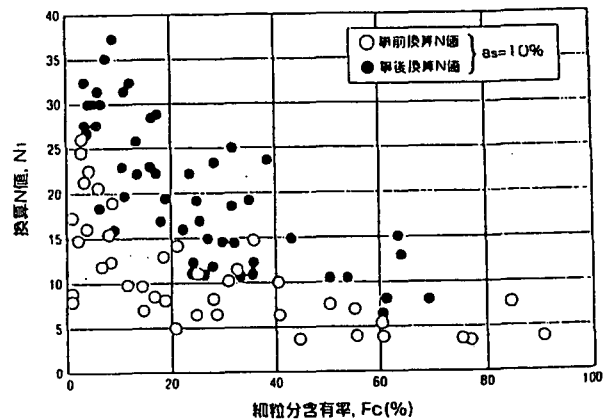


図19 事前・事後N値と細粒分含有率の関係

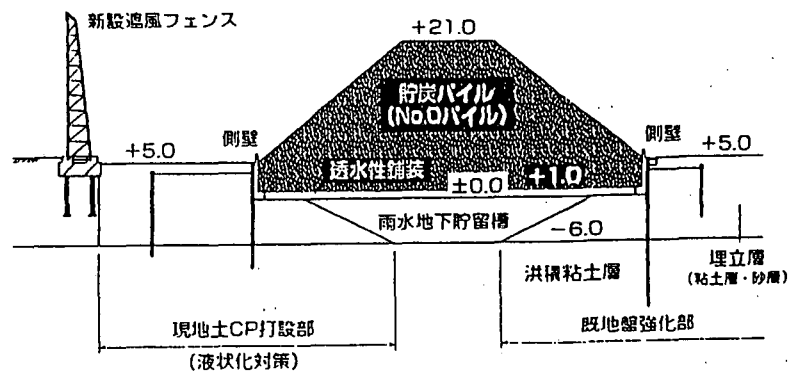


図20 耐震液状化対策概要

5. まとめ

本報においては、耐震補強技術として砂地盤の液状化対策としての締固め工法の概要や施工方法について取り挙げた。また、締固め工法の施工時における盛上りを考慮した設計方法や兵庫県南部地震以後のL2に対応した複合地盤的な評価と、 K_0 を考慮した設計方法について、最近の技術動向に触れ、実際の現場における適用事例を報告した。特に振動・騒音といった周辺環境や建設発生土の有効利用による環境保全に配慮した新工法・新技術は、今後も注目されることから、これらの技術開発を一層進めていく必要がある。また、砂地盤の締固めにおける耐震設計法については、複合地盤的な評価方法の解明および K_0 増加に関する現場データを蓄積していく必要がある。

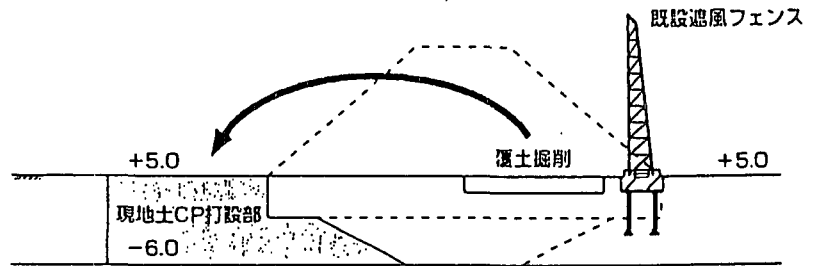


図 21 現地掘削土利用の概念

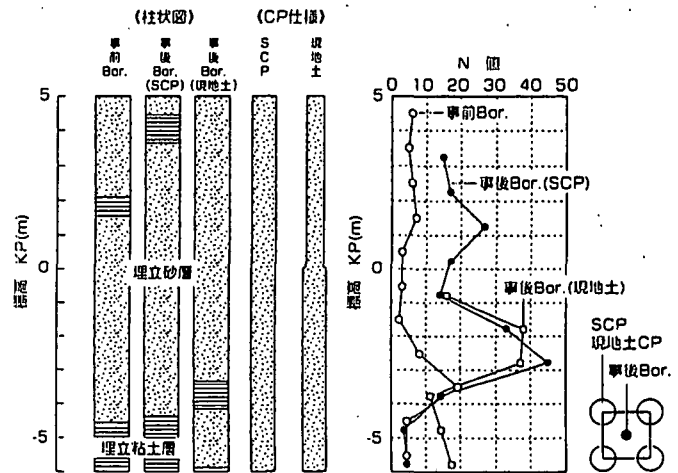


図 22 事前・事後標準貫入試験結果

参考文献

- 1) 一般土木工法・技術審査証明 報告書：SAVEコンポーザーによる静的締固め砂杭工法，(財)国土開発技術研究センター1997，6
- 2) 一般土木工法・技術審査証明 報告書：リソイル工法（建設発生土を利用した地盤改良工法，(財)国土開発技術研究センター1999，5
- 3) 土質工学会：液状化対策に調査・設計から施工まで，第1章 密度増大工法，pp.187-193，平成5年
- 4) 高橋嘉樹，野津光夫，萩島達也，尾形 太：締固め砂杭工法を用いた緩い砂質地盤の液状化対策の新しい設計方法，第34回地盤工学研究発表会，pp.1995-1996，1999.
- 5) 時松孝次，吉見吉昭：細粒分含有率とN値を用いた液状化判定方法と液状化対策，建築技術，No.432，pp.109-114，1986.8.
- 6) 松尾修，安田進，山本実，原田健二，橋本隆：レベル2地震動における改良地盤の評価に関する実証的研究，第24回地震工学研究発表会講演概要集，pp.273-276，1997
- 7) 島 宏信，原田健二，櫛原信二：静的締固め砂杭工法による改良地盤の密度増加指標に関する考察，第34回地盤工学研究発表会，pp.1997-1998，1999.
- 8) Ishihara, K., Iwamoto, A., Yasuda, S. and Takatsu, H.: Liquefaction of Anisotropically Consolidated Sand, Proc. of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.11-15, 1997.
- 9) 木村保，奥村一郎，三沢久詩，川鍋修：コンパクションパイル打設地盤の K_0 値について，土質工学研究発表会，pp.1863-1866，1986.
- 10) 原田健二，山本実，大林淳：静的締固め砂杭打設地盤の K_0 増加に関する一考察，第53回土木学会学術講演会概要集，pp.540-541，1998.
- 11) 橋本則之，加茂真一，大林淳，山本実，原田健二：サンドコンパクションパイル工法による締固め改良地盤の静止土圧について，第34回地盤工学研究発表会
- 12) Harada, K., Yasuda, S., Yamamoto, M.: Influence of earth pressure coefficient on spt N-value and liquefaction of the ground improved by compaction methods, GeoEng'2000(to be submitted)
- 13) 菅沼史典，深田久，中井則之：静的締固め砂杭工法の施工事例報告，土木学会第52回年次学術講演会，pp.412-413，1997.
- 14) 西尾良治，西牧孝洋，野津光夫，仁田尾 洋：建設発生土を中詰め材料に利用した地盤改良工法の適用，土木学会第16回「施工体験発表会」講演概要，pp.51-58，1999