

SAVE コンポーザー工法

—静的締固め砂杭工法—

東 祥 二・新 川 直 利

わが国において1956年に開発・実用化されたサンドコンパクションパイル工法（以下SCP工法）は、よく締まった砂杭を地盤中に造成する工法で、地盤の締固めや圧密排水等複数の機能を有することから、粘土地盤、緩い砂地盤等あらゆる地盤に適用可能な地盤改良工法として数多くの実績を有している。しかし、SCP工法は施工過程でバイプロハンマーを使用するため、振動や騒音など周辺環境への影響が大きく、市街地や既設構造物近傍での適用が困難であった。これらの課題を克服するために開発されたSAVEコンポーザー工法は、バイプロハンマーを使用しない“静かな締固め”を実現した、周辺環境対応型の地盤改良工法である。

本稿では、SAVEコンポーザー工法の施工機、施工法、施工管理について概説し、改良原理、設計法、周辺地盤への影響、改良効果、最近の知見、適用の拡大等の研究動向、施工実績について述べる。

キーワード：地盤改良、締固め砂杭、低振動・低騒音、液状化対策、環境対応性、環境保全性

1. はじめに

(1) サンドコンパクションパイル工法

わが国では、軟弱地盤対策として数多くの地盤改良工法が用いられている。その中でも1956年に開発・実用化されたわが国独自の工法であるサンドコンパクションパイル工法（以下SCP工法）は最も代表的な工法である。この工法は、よく締まった砂杭を地盤中に造成する工法で、地盤の締固めや圧密排水等複数の機能を有することから、粘土地盤、緩い砂地盤等あらゆる地盤に適用可能な工法として数多くの実績を有している。1960年代には砂質土地盤を対象に、1970年代には粘性土地盤にも適用され、現在では延べ施工延長約40万kmに達している。特に1995年の兵庫県南部地震では、液状化対策として「締固め」が非常に有効であることが改めて確認され¹⁾、巨大地震に対応できる液状化対策工法として注目された。

(2) 地盤工学的課題とニーズの変遷

わが国における地盤工学的課題の変遷は図-1に示すように、「安定問題」→「変形問題」→「耐震問題」→「環境問題」へと重点が変遷してきている。特に近年では「環境問題」への意識の高まりにより、「環境対応性」（市街化地域における地盤改良工事で問題となる振動、騒音、変位などの周辺環境対応）や、「環境保全性」（建設発生土などの資源の有効活用によ

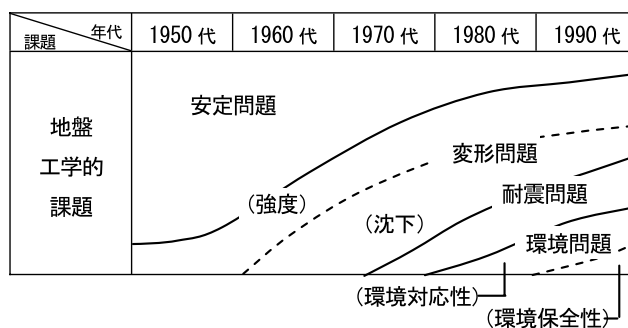


図-1 地盤工学的課題の変遷²⁾に加筆修正

る環境負荷低減)が重要なキーワードとなりつつある。

(3) SAVEコンポーザー工法の開発

SCP工法は、施工過程でバイプロハンマーを使用するため、振動や騒音など周辺環境への影響が避けられない。そのため、市街地や構造物近傍などへの適用には困難な場合が多くなってきた。世の中のニーズとともにこれらの課題を克服すべく開発されたのがSAVEコンポーザー工法（Silent Advanced Vibration Erasing）である。

SAVEコンポーザー工法は、従来では考えられなかったバイプロハンマーを使用しない“静かな締固め”を初めて実現しており（開発・実用化1995年）、写真-1に示すように市街地施工も可能である。振動・騒音などの周辺環境対応性に加えて、最近では再生砕石やコンクリート廃材等のリサイクル材を砂の代替材

として使用するケースも増えてきており、環境保全性への対応可能な工法である。



写真一 市街地での施工状況

本稿では、SAVE コンポーザー工法の施工機、施工法、施工管理について概説し、改良原理、設計法、周辺地盤への影響、改良効果、最近の知見、適用の拡大等の研究動向、施工実績について述べる。

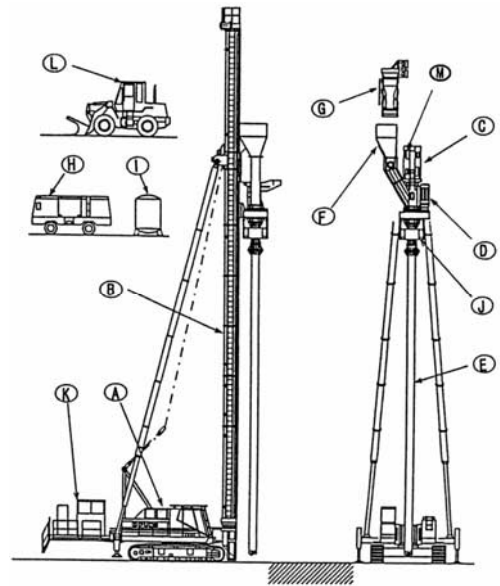
2. 施工機械と施工方法

(1) 施工機械

SAVE コンポーザー工法の施工機械の構成を図一 2 に示す。施工機械は従来の SCP 施工機と同様のベースマシン、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（写真一 2）などにより構成されている。貫入・造成のための主な機構である強制昇降装置は、図一 3 に示すように 2 方式を採用している。いずれの方式も、強制昇降装置の必要反力を施工機重量で確保し、スプロケットもしくはピニオンギアを油圧モーターで駆動することで、ケーシングパイプを昇降させる。

(2) 施工方法

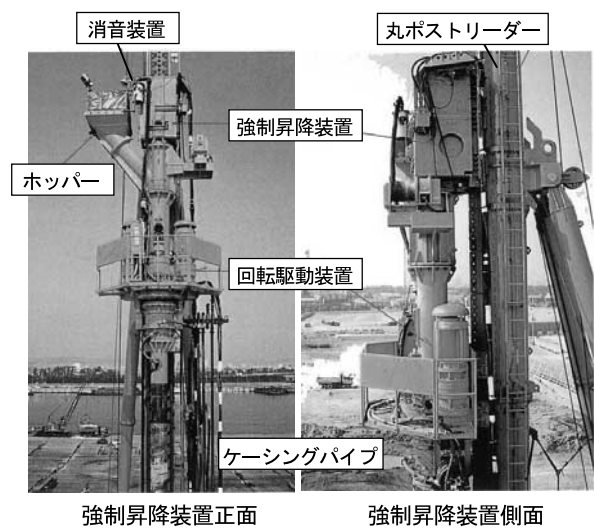
SAVE コンポーザー工法の施工手順を図一 4 に示す。貫入・造成時とも $\phi 400 \sim 500$ mm のケーシングパイプを回転させながら強制昇降装置によって施工する。同図の過程④～⑤の引抜きと打戻し（ウェーブ施工）を行い、 $\phi 700$ mm の良く締まった砂杭を造成し周辺地盤を締め固めるという改良原理は、従来の振動式 SCP 工法と同じである（図一 5）。図一 6 は、SAVE コンポーザー工法の施工管理システム CONOS :



施工機械の仕様例

記号	名称	仕様
A	ベースマシン	50 t 吊クローラクレーン, 155 PS
B	同上リーダー部	丸ポスト, 3 点支持, 最長 33 m (改良仕様による)
C	強制昇降装置	ピンラック&スプロケット方式 ラック&ピニオン方式
D	回転駆動装置	45 kw×2 台
E	ケーシングパイプ	$\phi 406.4 \times t 16$
F	ホッパー	容量 1.2 m ³
G	バケット	容量 1.0 m ³
H	コンプレッサー	7 kgf/cm ² ×19 m ³ /min
I	レシーバータンク	容量 3 m ³
J	スイベル	耐圧 20 kgf/cm ²
K	発電機	350 KVA
L	タイヤショベル	容量 1.2 m ³
M	消音装置	SAVE 専用

図一 2 SAVE コンポーザーの施工機械構成



写真一 2 強制昇降装置

(Compozer Numerical Operation Supporting System) の構成を示している。ケーシングパイプの深度を示す深度計とケーシング内の砂面の深度を示す

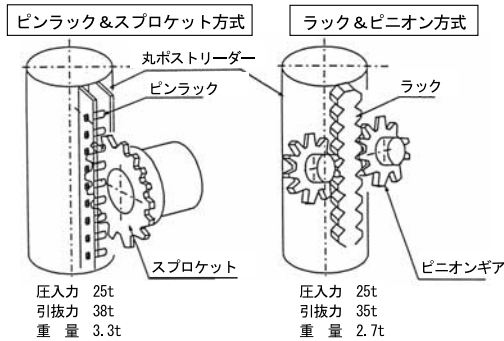


図-3 強制昇降装置の主要部模式図

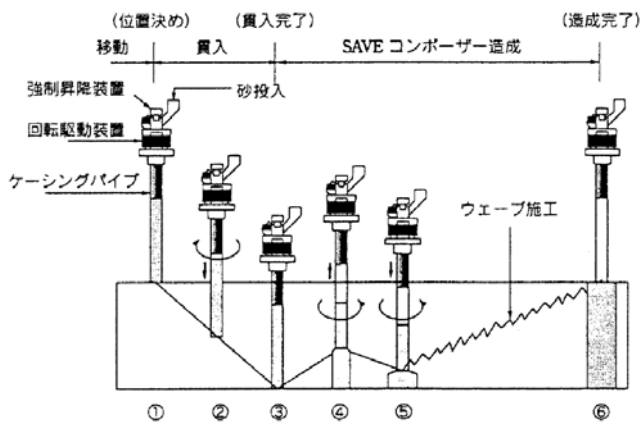


図-4 施工手順

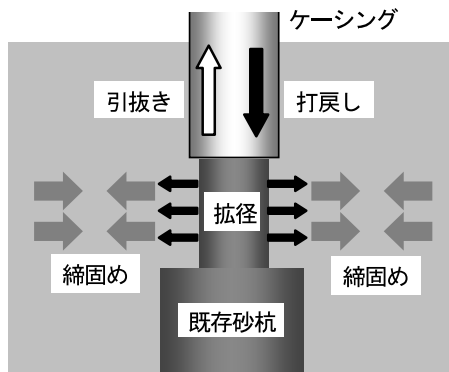


図-5 改良原理

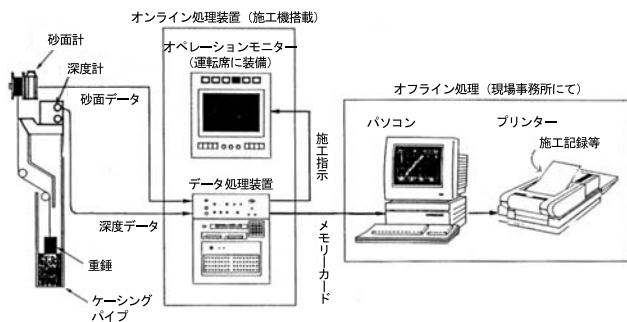


図-6 施工管理システム CONOS の構成

砂面計による検出値をもとに、設計杭径を満足する使用砂量と打戻し量の制御が全自動で行われる。これは、

施工中の振動が発生しないことで搭載可能になったマイクロコンピュータにより実現されている。一日の施工データは、作業終了後、現場事務所で出力・管理するオフラインシステムを採用している。

3. 改良原理と設計方法

(1) 改良原理

SAVE コンポーザー工法の締固めによる改良原理は、図-5に示すように、ケーシングパイプを引き抜きながら排出した砂を、打ち戻しにより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。当工法は全く振動を用いないため、当初は多くの技術者から締固めメカニズムに疑問が提示された。

メカニズム解明のため、室内で豊浦砂にカオリン粘土を混合し、種々の細粒分含有率で三軸排水せん断試験を実施したところ、細粒分含有率が20%程度のときにダイラタンシーによる体積圧縮が最も大きくなることを見出した³⁾。さらに、試験工事で杭間N値が増加することが判明し、国内の通常の埋立地(細粒分含有率20~30%)では振動効果によらずとも十分な締固め効果を有することを実証した。また、有限要素法による応力変形解析では、砂杭拡径時に周辺の砂質地盤で80%を超えるせん断ひずみが発生し、塑性体積圧縮が進行することが確認され、理論的にも改良効果、すなわち施工に伴う応力状態の変化が説明されている⁴⁾。

(2) 設計方法

SCP工法の設計法は、従来から方法A、B、Cの3種類⁵⁾が用いられている。方法Aは実績に基づく簡易図表を用いるもの、方法BはN値~相対密度Dr~間隙比e関係を用いたもの、方法Cは細粒分含有率を考慮した方法であり、方法Cが現在では最も一般的である。

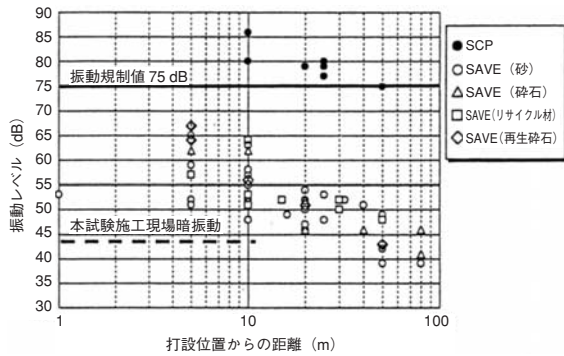
この方法Cをさらに発展させた設計法としてSAVE コンポーザーにも適用できる方法Dが提案されている⁵⁾。方法Dは、砂杭打設時の周辺地盤の沈下や盛り上がりといった変形現象を、“有効締固め係数Rc”を導入することにより合理的に考慮する設計法となっている。

4. 効果の確認

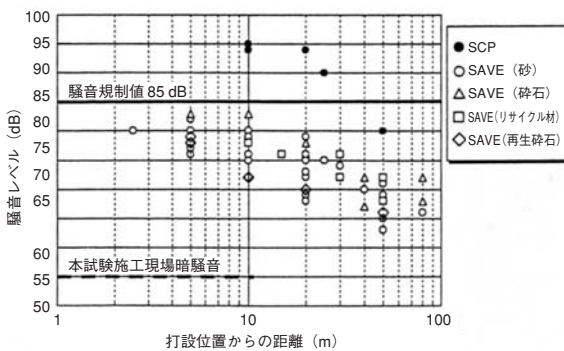
(1) 振動・騒音の低減

SAVE コンポーザー工法15現場での施工中の振動・騒音測定結果⁶⁾を、振動式SCP工法の結果と併

せて図—7, 8に示す。なお図には従来の中詰め材である砂のほかに、再生材料を使用した現場の値も含んでいる。両図からわかるように、振動式 SCP 工法に比べ、振動で 25 ~ 30 dB, 騒音で 10 ~ 15 dB 低減が見られる。また打設地点から 5 m の離隔で、振動・騒音の規制値以下であることも確認している。なお計測は JIS Z 8735 (振動レベル測定方法), JIS Z 8731 (騒音レベル測定方法) に準じて行っている。



図—7 振動の距離減衰⁶⁾



図—8 騒音の距離減衰⁶⁾

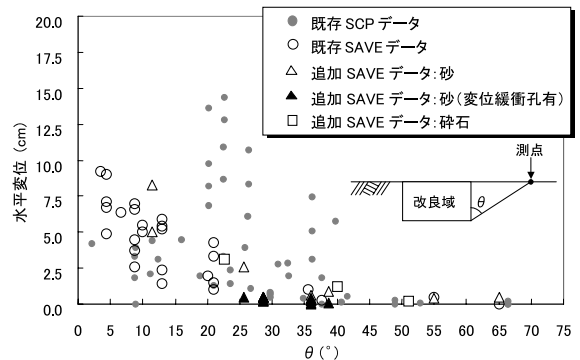
(2) 周辺地盤変位

図—9に SAVE コンポーザー工法の改良域外で計測された地表面変位⁶⁾を示す。変位量は改良率, 地盤条件によって異なるが, おおよそ改良域下端から 45°の範囲までが変位影響範囲と言える。この図から, SAVE コンポーザーによる変位は振動式に比べ小さくなる傾向が見られる。

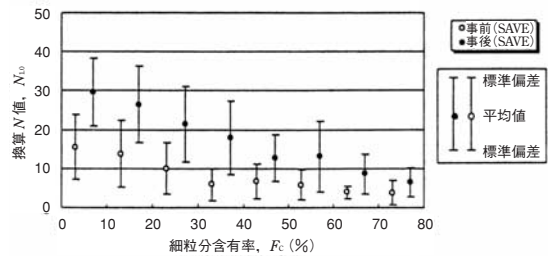
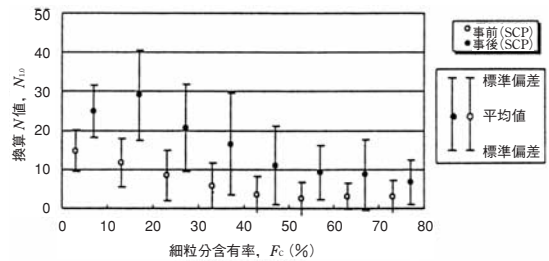
(3) 改良効果 (締固め効果)

図—10は, 隣接して振動式 SCP 工法と SAVE コンポーザー工法が施工された工事での施工前後の N 値である⁷⁾。横軸は細粒分による影響がわかるように細粒分含有率 F_c とし, 縦軸は拘束圧の影響を除いた換算 N 値 ($= 1.7N / (\sigma_v / 98 + 0.7)$) ※ σ_v : 有効土被り圧 kN/m^2) である。 N 値は改良率 5 ~ 25 % 程度の範囲で

20 ~ 30 件の現場から採取したデータである。同図より, 振動式 SCP 工法と同等の N 値増加が得られており, 両工法が同等の改良効果を発揮することを裏付けている。



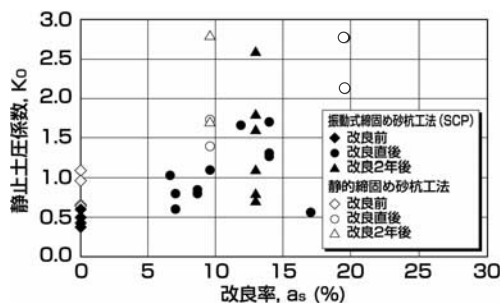
図—9 周辺地盤変位⁶⁾



図—10 改良前後の N 値⁷⁾

5. 最近の知見

締固めによる地盤改良効果は, 1995 年の兵庫県南部地震のようなレベル 2 地震動においても確認されている。この地震では, N 値の増加のみでは説明できない変形抑制効果が報告されており¹⁾, その要因について研究が進められている。その要因の一つとして, 締固めによる地盤の静止土圧係数 K_0 の増加が影響していると考えられる。 K_0 の増加効果について, 石原ら⁸⁾は, 異方中空ねじり試験により, 相対密度が同じでも K_0 の増加に伴い, せん断応力比 (τ_d / σ_v') は $(1 + 2K_0) / 3$ に比例して増加することを確認している。SAVE コンポーザー施工現場における K_0 の測定事例⁹⁾を図—11に示すが, 改良率の増加に応じて K_0 が増加することや, その持続性についても施工 2 年後の調査により確認されている。



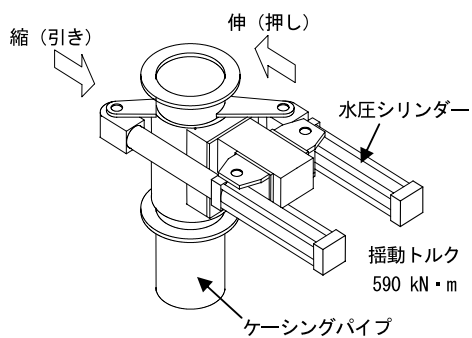
図一 11 改良率と事前・事後 K_0 の関係⁹⁾

6. 適用の拡大

(1) SAVE マリン工法

海上で行う SCP 工法は振動式バイプロを装備した専用施工船を用いるため、護岸直近に工場・民家等がある場合など、適用不可になることが多々あった。このため陸上施工で多くの実績を有する SAVE コンポーザー工法を基に海上工事用の静的締固め砂杭工法を開発した。

海上 SCP の大径ケーシングを回転させるには大型のスイベルが必要であるが、装備の重量・大きさの点から実装が困難であった。そこで SAVE マリン工法ではケーシングの回転に代えて、2 本の水圧シリンダーでケーシングを揺動させる方式がとられている (図一 12)。なお、陸上と同じ機構の強制昇降装置を用いた方法も可能である。



図一 12 揺動装置

7. 施工実績

1996 年に SAVE コンポーザー工法最初の工事を行ってから 2007 年 3 月までの施工実績は約 500 件、延べ施工延長約 4200 km に達している。SAVE コンポーザー工法は、その環境対応性の長所により、河川・海岸堤防の液状化対策や、建築構造物の支持力・液状化対策に多く用いられ、振動式 SCP に代わりわが国を代表する地盤改良工法になりつつある。

8. おわりに

従来の振動式 SCP 工法は、長きにわたりわが国において密度増加工法の代表的な工法である。日本ばかりでなく、オランダ、シンガポール、イラク、マレーシア、中国、韓国にも広く適用され、最近では米国でも適用された。一方で環境保全の問題とともに、わが国で初めて SAVE コンポーザー工法が開発された。

SAVE コンポーザー工法はバイプロハンマーを用いず、強制昇降装置により施工を行うことにより振動・騒音を低減させ、しかも従来の SCP 工法と同等の改良効果を有する工法である。

産業や人口の大部分が平野部に集中するわが国においては、地盤改良は必然的に市街地での需要が高く、環境対応性・環境保全性を有した SAVE コンポーザー工法が将来的に担う役割は大きいと考えられる。

JICMA

《参考文献》

- 1) S. Yasuda, K. Ishihara, K. Harada and N. Shinkawa : Effect of Soil Improvement on Ground Subsidence due to Liquefaction, Soils and Foundations, Special Issue, pp.99-107 (1996)
- 2) 末松直幹・坪井英夫：人工島の建設技術 4. 海底地盤の改良技術，土と基礎，**39** [4]，pp.77-86 (1991)
- 3) M. Nozu, Y. Matsunaga and J. Ohbayashi : Application of the static sand compaction pile method to loose sandy soil, IS-TOHOKU, (1998)
- 4) 浅岡顕・高稲敏浩・野津光夫：各種構造物の実例にみる地盤改良工法の選定と設計—地盤改良と土質力学 (その 2)，土と基礎，**48** [2]，pp.49-54 (1999)
- 5) 地盤工学会：液状化対策工法，第 1 章 密度増大工法，1.3 サンドコンパクションパイル工法，pp.233-242 (2004)
- 6) 財国土技術研究センター：SAVE コンポーザー (低振動・低騒音) の静的締固め工法，建設技術審査証明事業 (一般土木工法) 報告書，(2002.5)
- 7) 原田健二：締固め改良地盤における改良効果の N 値による評価，基礎工 特集 N 値の活用と留意点，pp.87-89 (2003)
- 8) K. Ishihara, A. Iwamoto, S. Yasuda and H. Takatsu : Liquefaction of Anisotropically Consolidated Sand, Proc. of 9th ICSMFE, pp.11-15 (1997)
- 9) 原田健二・山本実・大林淳：静的締固め砂打設地盤の K_0 増加に関する一考察，第 53 回土木学会年次学術講演会，第 III 部 (B)，pp.540-541 (1998)

【筆者紹介】



東 祥二 (ひがし しょうじ)
 (株)不動テトラ
 建設本部 技術統轄部
 地盤技術部 部長



新川 直利 (しんかわ なおとし)
 (株)不動テトラ
 建設本部 技術統轄部
 地盤技術部 設計課 課長