

サンドコンパクションパイル（締固め砂杭）工法の歴史と新技術

History and New Technology of Sand Compaction Pile Method

大 林 淳（おおばやし じゅん）

㈱不動産テトラ 地盤事業本部 技術部長

原 田 健 二（はらだ けんじ）

㈱不動産テトラ 地盤事業本部 技術部 部長

村 上 恵 洋（むらかみ しげひろ）

㈱不動産テトラ 地盤事業本部 設計企画課長

鈴 木 亮 彦（すずき あきひこ）

㈱不動産テトラ 地盤事業本部 技術企画課長

1. はじめに

サンドコンパクションパイル（SCP）工法は、よく締まった砂杭を地中に造成することにより軟弱地盤を改良する工法であり、“締固め”や“排水”などの基本的な改良原理を併せ持つ。このため、我が国では、砂質土地盤や粘性土地盤などのあらゆる地盤に単一の施工機で適用可能な軟弱地盤改良工法として道路、港湾、建築など様々な構造物基礎に採用され、これまでに数多くの施工実績を有している。特に、SCP工法を砂質土地盤に適用する場合の液状化対策として広く用いられ、過去の数々の巨大地震においてもその改良効果が確認されており、我が国において最も信頼性の高い液状化対策工法である。

SCP工法の原理は、粘性土地盤に対しては、図—1 (a)に示すように軟弱な粘性土地盤中に締め固めた砂杭を造成した複合地盤は、せん断強度の大きい砂杭の存在（置換効果、応力集中効果）と、砂杭による周辺粘性土からの脱水機能（排水効果）を併せ持つことによる複合的なものとなる。一方、砂質土地盤に対しては、図—1 (b)に示すように締まった砂杭を圧入することにより、砂杭周辺の砂質土の間隙比を小さくし、密度が大きくなり支持力や液状化強度の高い地盤にすることである。

本文においては、時代のニーズとともに派生してきたSCP工法の歴史と変遷を設計・施工・材料の点から振り返る。さらに、SCP工法の最新技術である砂をポンプ圧送により地中に圧入する工法の概要と幾つかの適用

事例について紹介する。

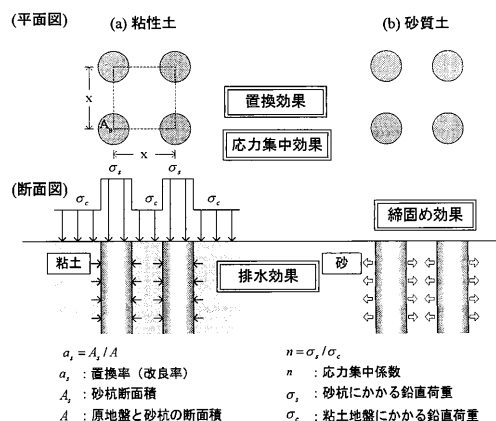
2. SCP工法の歴史

2.1 工法開発の変遷^{1),2)}

SCP工法の歴史は、1956年に陸上の振動式SCP（商標名はコンポーザー）が粘性土地盤を対象とした地盤補強工法として開発されたことに始まる。図—2 (a)の地盤工学的課題の変遷からも分かるように、当時は粘性土の安定や沈下に関する地盤工学的な課題が主たるものであったからである。その後、砂質土地盤では日本住宅公団（当時）の浜甲子園団地で集合住宅の直接基礎地盤の支持力増加と液状化対策として1961年の試験工事に採用され、1964年の新潟地震を契機に液状化対策としても実績を積み重ねていった。1965年には海上においても港湾構造物の基礎改良として適用されるに至っている（商標名はマンモスコンポーザー）。

SCP工法の地震に対する改良効果は、1978年の宮城県沖地震で初めて確認され、詳細な学術的な検証がなされた³⁾。その後、1983年の日本海中部地震など多くの地震を経験し、地震後の施工箇所の追跡調査より、その被害はみられず、液状化対策工法として確立された工法となっていた。しかしながら、従来の工法は、パイロハンマーを使用するため振動や騒音などで周辺環境に影響を与えることから、市街地や構造物近傍などへの適用については困難なことがあった。そこで、周辺環境問題へ対応するために、振動や騒音の低減を目的として締固め機構を静的圧入とした静的締固め砂杭工法（商標名はSAVEコンポーザー）が開発され、当工法の海上施工機（商標名はSAVEマリン）も2002年に実用化されている。ちなみに同工法が開発された1995年は兵庫県南部地震が発生した年であった。

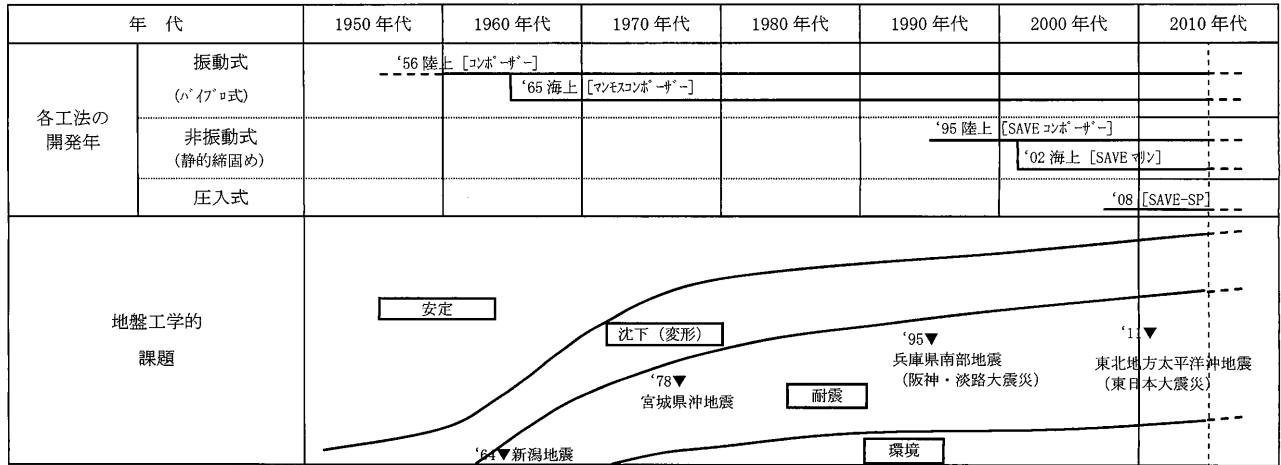
静的締固め砂杭工法の開発により、振動・騒音等が問題となる市街地や近接施工での適用を拡大させてきたが、近年では、大型の施工機を用いる工法では、施工スペースの確保が問題となり適用できない場合が増加している。併せて、従来の小型施工機による対策工法（例えば高圧噴射攪拌工法）と比較し、コスト削減や環境負荷を軽減できる材料（砂）の使用も求められるケースがある。こうした背景の中で、2008年に砂圧入式静的締固め工法（商標名はSAVE-SP工法）が開発、実用化された。



図—1 SCP工法の改良原理

(a) 開発に関する事項

[] は商標名



(b) 設計・施工に関する事項

年 代		1950 年代	1960 年代	1970 年代	1980 年代	1990 年代	2000 年代	2010 年代
設計に関する事項		'57▼ 複合地盤理論	'65▼ 方法 B	'71▼ 方法 A	'87▼ 方法 C	'90▼ 方法 D		
指針 マニュアル ハンドブック	土木構造物		道路土工指針 '77▼ (軟弱地盤対策工指針)	'86▼		'97▼ 河川堤防マニュアル		'12▼
	港湾構造物		港湾構造物設計指針 '70▼	'79▼	'89▼	'93▼ '97▼ (改定)	'07▼	
	建築構造物					地盤改良設計指針案 '06▼		
施工に関する事項		'59▼ エア-導入	'60▼ パイプ導入	'70▼ 砂面計開発	'90▼ 高周波パイプ	'95▼ 強制昇降装置		
累積 施工延長 (千 km)	振動式		12	80	180	330	380	400
	非振動式					1.9	6.8	13.0
	圧入式							0.2

図-2 SCP 工法の変遷

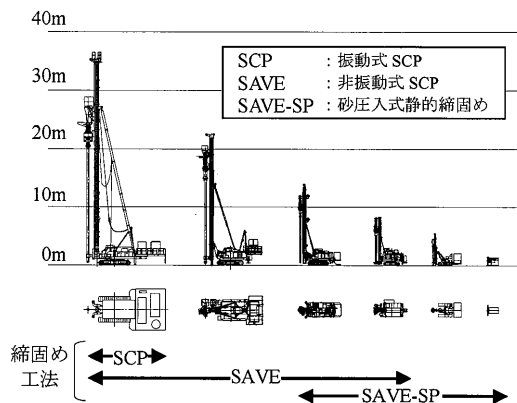


図-3 陸工施工機の規模

2.2 設計・施工・材料の変遷

図-2 (b)に SCP 工法の設計・施工に関する歴史を示しており、材料に関するものも含めて以下に概説する。

(1) 設計法と評価法

粘性土地盤に対する SCP 工法の原理は、1957年の村山博士による研究論文⁴⁾に基づいており、図-1 (a)で示した複合地盤の概念がその基本である。サンドコンパクションパイル工法の呼名も同博士によって命名され、後に学術名となった。この概念を基に、複合地盤形成による安定性の増大、圧密沈下量低減、水平抵抗の増大などの改良効果を予測する慣用計算式が構築されており、実用的には既に確立されている。

一方、砂地盤に対して最初に実用設計法を提案したのは、1965年の小川・石堂による論文⁵⁾においてである。

これまでに5つの設計法(方法A~D, κ 法)が提案されてきているが、方法A⁶⁾, B⁷⁾では砂を対象としているため実用的には土の細粒分を考慮した方法C⁸⁾(β 法と呼ばれる), D⁹⁾(Rc法と呼ばれる)や κ 法¹⁰⁾が使われる。

砂質土に対する SCP 工法の改良効果については、1995年兵庫県南部地震時に締固めによる改良地盤が想定以上の外力を受けても被害が少なかった事例に対する要因や、その有効性に関する評価についての研究¹¹⁾などがこれまでに多くなされている。これらの研究成果に基づいて、2006年に日本建築学会より刊行された“建築基礎のための地盤改良設計指針案¹²⁾”では、通常評価される杭間の N 値から求まる液状化強度に対し、締固め改良地盤全体の液状化強度は、割増しして評価できるとしている。

(2) 施工法

1956年にモンケン木製やぐらによるパーカッション方式から開発が始まり、1958年には現在の振動式 SCP 工法の基本形である“中空管による打ち戻し方式、パイプロハンマー、エアーの使用”の基本特許が申請され、1960年には工法として確立した。①パイプロハンマーの使用による効率化(1960年)、②エアー圧によるケーシングパイプからの砂の速やかな排出(1959年)、③砂面計(ケーシング内部の砂の動きを通电によって把握)の開発による高精度の施工管理(1970年)により高効率で高品質な施工が可能となった。その後、パイプロハンマーによる振動・騒音の弊害を低減するために1990

報 告

年には高周波のバイブロハンマーを使った高周波小口径SCP工法¹³⁾が開発されたが、この問題をほぼ解消したのは1995年の静的締固め砂杭工法に装備された強制昇降装置によってである。

(3) 使用材料

SCP工法の使用材料は砂や礫が一般的であるが、リサイクル性などの環境的な配慮からこれまで製鋼スラグ、高炉スラグ、造粒石灰灰、再生碎石、貝殻混じり砂などが使用されてきている。中でも施工的・設計的改善を加え建設発生土を有効活用する技術もリソイル工法¹⁴⁾(商標名)として1997年に開発されている。ここでいう設計的改善とは、SCP打設のみでもその圧密効果により杭間粘土が原地盤以上に増加するという現象を設計に取り込んで評価したものである。また、鉄鋼スラグを原料として、粒度・膨張率・水硬性などの品質が管理されたスラグコンパクション材料(商標名はエコガイアストン¹⁵⁾)の使用実績も高まっている。

3. SCP工法の新技術

3.1 砂圧入式静的締固め工法の概要¹⁶⁾

砂圧入式静的締固め工法は、流動性を付与した砂(流動化砂)をポンプで圧送し、小型施工機のロッドを通じて地盤内に圧入することで、緩い砂地盤の締固めを行う地盤改良工法である。小型の施工機の使用により盛土法面上に設けた仮設足場や、海上仮設栈台上などの狭隘地での施工や橋梁や高圧電線下部等の空頭制限下での施工が可能になった。材料の圧入はロッドを通して行うため、コンクリート構造物や玉石などの硬質障害物層を貫いてその下部を改良することが可能である。また、斜め施工にも対応し、既設構造物直下の改良も可能となっている。改良の原理は密度増大による締固めであり、従来のSCP工法と同様である。設計に関しても従来の設計法⁹⁾をそのまま適用することができる。従来工法と異なるのは、地盤中に圧入する材料の状態である。圧入材料は規定の粒度の砂を、専用プラントにおいて高分子からなる流動化剤と混練し、土粒子間の摩擦を低下させることによりポンプよりホース、ロッドを通して地中への圧入を可能とした(図-4参照)。圧入した砂は、周辺地盤を押し広げながら拡大していき、同時にその圧力で水分が絞られて密な配置に変化する。更に時間経過とともに混練時に添加された遅効性塑性化剤の作用で流動性が中和され、摩擦力の回復した状態の砂となる。

3.2 適用事例

以下に狭隘な施工環境下における当工法の4つの適用事例を示す。

(1) 建築物直下への適用事例

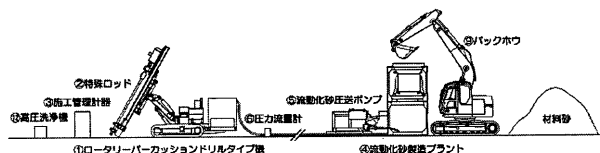


図-4 砂圧入式静的締固め工法の施工設備

本工事は既存地内での建築物の建て替え工事において、既設建築物の半分を解体しながらⅠ期工事、Ⅱ期工事と分割して新設建築物を建築する工事である。一般部は既設建築物の解体を行った後に大型機である静的締固め砂杭工法による液状化対策を行うが、Ⅰ期工事とⅡ期工事の境界部分はどうしても既設建築物の直下に施工ができない領域が生じることとなった。このため、図-5に示すように、砂圧入式静的締固め工法による斜め施工を適用することで未改良域を残すことなく液状化対策を実施した。

(2) 岸壁直下への適用事例

本工事は、漁港施設の岸壁の耐震化に対して、液状化対策を行ったものである。基礎捨石下部に液状化対象層が存在するが、基礎捨石を貫いて対策を行う必要があり、岸壁背面には荷捌き施設があるため、作業スペースは数メートルしか確保できない状態であった。このような条件に対し、岸壁上に片持ちで簡易な仮設足場を構築することで僅かな施工スペースを確保した。この仮設足場上で図-6に示すように、ロータリーパーカッションドリル施工機を用いてロッドにより基礎捨石の打貫き、斜め施工を行うことで必要改良幅を満足させた。

(3) 河川堤防耐震化(法面上施工)への適用事例¹⁷⁾

本工事は、河川堤防の耐震化として、基礎地盤の液状化対策を行ったものである。堤外側は河川敷のスペースを利用して、大型機である静的締固め砂杭工法による液状化対策を行うが、堤内側は大型機による施工ヤードを確保することが困難であった。このため、図-7に示すように、堤防法面上に施工ヤードを仮設造成し、砂圧入

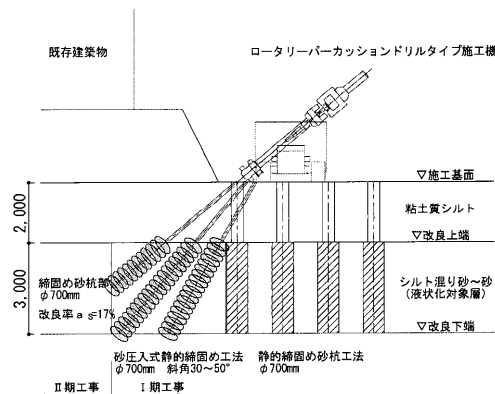


図-5 建築物直下での施工断面図

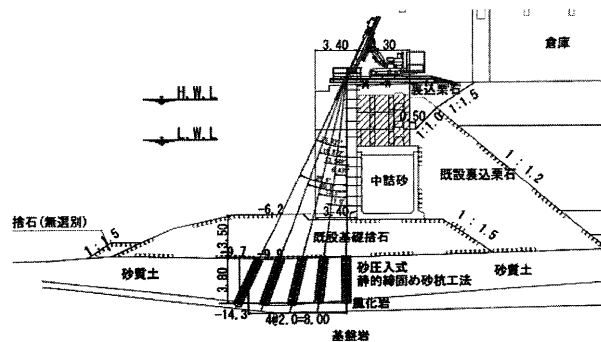


図-6 岸壁直下での施工断面図

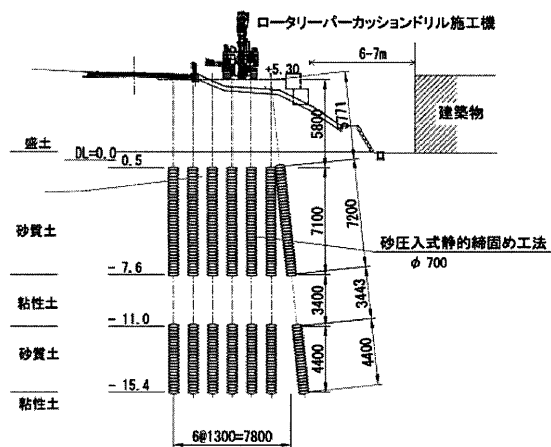


図-7 堤防法面での施工断面図

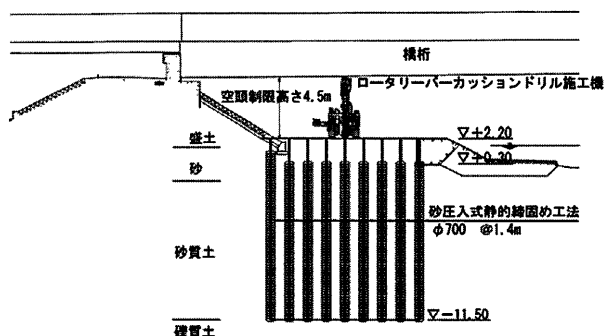


図-8 橋梁下部での施工断面図

式静的締固め工法を適用して液状化対策を実施した。

(4) 河川堤防耐震化（橋梁下部）への適用事例

本工事でも河川堤防基礎地盤の液状化対策である。堤外側を大型機である静的締固め砂杭工法による液状化対策を行うが、図-8に示すように、橋梁下部の空頭制限下において砂圧入式静的締固め工法を適用した事例である。

4. おわりに

本文においては、時代のニーズに応じて派生してきたSCP工法の設計、施工、材料の半世紀以上に渡る歴史を述べた。また、SCP工法の進化した技術である砂圧入式静的締固め工法の適用事例を紹介した。

SCP工法により改良された地盤がL2地震動である1995年兵庫県南部地震で有効に機能したことが報告され¹⁸⁾、長時間地震動継続時間を有する4年前の東北地方太平洋沖地震についてもその改良効果の実証¹⁹⁾と検証¹⁹⁾がなされている。SCP工法は地盤中に材料を圧入する際の貫入・造成過程で発生する繰返しせん断ひずみを付与することによって地盤の高密度化が図られており²¹⁾、今後は改良効果と併せて定量的な把握と分析が必要となろう。

参 考 文 献

- 1) 不動建設㈱：ふどうの地盤改良史—コンポーザーとともに—（昭和22年～平成12年），2000。
- 2) 坪井英夫・東 祥二・野津光夫：締固め砂杭（サンドコンパクションパイル）工法の変遷，地盤工学会誌，Vol.

54, No. 7, 2006.

- 3) Ishihara, K. Kawase, Y. and Nakajima, M.: Liquefaction Characteristics of Sand Deposits at an Oil Tank Site During The 1978 Miyagiken-Oki Earthquake, Soils and Foundation, 20 (2), pp. 97~112.
- 4) 村山朔郎：Sand compaction pile による軟弱地盤の改良（コンポーザー工法），大阪建設業協会講演会資料，pp. 1~11, 1957.
- 5) 小川充郎・石堂 稔：砂質土に対するパイロコンポーザー工法の適用について—砂の内部締固め設計施工の考察—，土と基礎，Vol. 13, No. 2, pp. 77~82, 1965.
- 6) 不動建設㈱：コンポーザーシステムデザインマニュアル，昭和46年
- 7) Gibbs, H. J. and Holtz, W. G.: Research on determining the density of sand by spoon penetration test, Proc. of 4th ICSMFE, London, Vol. 35, No. 5, pp. 21~26, 1987.
- 8) 水野恭男・末松直幹・奥山一典：細粒分を含む砂質地盤におけるサンドコンパクションパイル工法の設計法，土と基礎，Vol. 35, No. 5, 1987.
- 9) 山本 実・原田健二・野津光夫：締固め工法を用いた緩い砂質地盤の液状化対策の新しい設計法，土と基礎，Vol. 48, No. 11, 2000.
- 10) 山崎浩之・森川嘉之・小池二三勝：締固め砂杭工法杭間締固め効果に及ぼす細粒分と排水性の影響，土木学会論文集，No. 722, III-61, pp. 303~314, 2002.
- 11) 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論文集，pp. 273~276, 1997.
- 12) 日本建築学会：建築基礎のための地盤改良設計指針案，pp. 320~324, 2006.
- 13) 佐藤修治・渡辺克也・奥山一典・萩野芳章：高周波型サンドコンパクションパイル工法の砂質地盤への適用性，第25回土質工学研究発表会講演集，pp. 1887~1888, 1990.
- 14) 松尾 稔・木村 稔・西尾良治・安藤 裕：建設発生土類を活用した軟弱地盤改良工法の開発に関する基礎研究，土木学会論文集，No. 547/VI-35, pp. 237~248, 1997.
- 15) 沿岸技術研究センター：水硬性スラグコンパクションパイル材料「エコアガイアストン」，港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書 第06001号，平成18年（平成22年に内容変更 第10001号）
- 16) 今井優輝・大林 淳・福島信吾・伊藤竹史：砂圧入式静的締固め工法（SAVE-SP 工法）の改良効果と適用事例，第54回地盤工学シンポジウム，pp. 579~584, 2009.
- 17) 久保陽太郎・鶴野雅明・中出雄也・深田 久・竹内秀克：庄内川堤防耐震補強工事における砂圧入式静的締固め工法の適用事例，第22回調査・設計・施工技術報告会，2013.
- 18) 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, pp. 99~107., 1996.
- 19) Yasuda, S. Harada, K. Ishikawa, K. and Kanemaru, Y.: Characteristics of the Liquefaction in Tokyo Bay Area by the 2011 Great East Japan Earthquake, Soils and Foundations, 52 (5), pp. 793~810., 2012.
- 20) Harada, K., Ohbayashi, J. and Taguchi, Y.: Verification of the improvement effectiveness by compaction methods during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, The 6th Japan-Taiwan Joint Workshop on Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls (to be published)
- 21) 原田健二・大林 淳・矢部浩史：締固め工法の密度増加のメカニズムと改良効果に関する考察，第14回日本地震工学シンポジウム，pp. 2403~2412, 2014.

（原稿受理 2015.4.23）