

液状化対策工の変遷 —工法開発と主要な施工事例—

History of Liquefaction Countermeasure

坪井 英夫 (つばい ひてお)

不動建設㈱シオ エンジニアリング事業本部技術統轄部 部長

野津 光夫 (のづ みつお)

不動建設㈱シオ エンジニアリング事業本部 設計室 室長

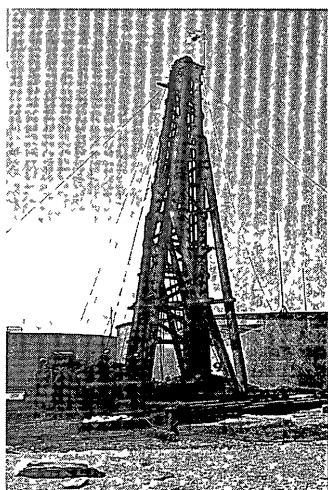
1 はしめに

近年日本列島は各地で地震が頻発し、地震の活動期に入ったとも言われている。これに対し、各所で液状化対策工事が実施されているが、液状化対策工法の歴史は古く、ちょうど最初の工事から数えて、今年で30年目の節目を迎えている。そこでこの機会に、これまで開発されてきた数々の液状化対策工法を振り返り、またときときの特筆すべき液状化対策工事をたどることとしたい¹⁾。本稿では、関連する各出来事を、年代順にまとめた。

2 液状化対策工の黎明の時代 (1956年～1978年)

2.1 サントコンパクションパイル工法の開発と適用

「サントコンパクションパイル (以後 SCP) 工法」は、1956年 (昭和31年) のモンケン木製やぐらによるパーカッション方式 (写真—1) から開発が始まり、1958年にはすでに現在の基本形である“中空管による打ち戻し方式、ハイプロハンマー、エアー使用”の基本特許が申請された。その後1970年代初頭には、サーボ重錘式の砂面計の開発がなされ、同工法の信頼性を向上出来ることとなった。なお、当初はコンポーサー工法という商標名が使われたが、当時の村山朔郎京都大学教授がサントコンパクションパイル (SCP) 工法という名称を1957年 (昭和32年²⁾) に初めて使われ、今や一般名称とな



写真—1 昭和30年代の木製やぐら式 SCP 施工機

っている。

1964年に新潟地震が勃発し、液状化による大きな被害が注目された。この時、振動締め固め工で地盤改良されたタンク基礎の地盤では液状化による被害を受けていないことが報告された³⁾。これを受け、1973年 (昭和48年)、「信濃川大堰地盤改良工事」が建設省北陸地方建設局信濃川工事事務所より発注されたが、この工事かおそらく日本で最初の液状化対策工事であると思われる。当時は、流動化対策工事とも言われていた。「液状化対策検討委員会」が組織され、対策工法として SCP 工法が採用された。河川内に矢板で締め切られた築島の中で、橋梁基礎部分と矢板部の締め固め施工が実施されている。

SCP 工法はその後国内各地で使用され、数多くの地震にも耐えてその改良効果が実証されている。最近では上記施工箇所近隣において、砂杭および杭間の凍結サンプリング調査が実施された⁴⁾。その結果、砂杭間において飽和度が20数年を経過してもなお低下したままであることが確認された。飽和度低下は、砂杭施工時に使用するエアーによる副次的効果と考えられている。

2.2 振動棒工法 クラヘルドレーン工法の開発と適用

その後、SCP 工法以外にも、振動棒工法やクラヘルドレーン工法など新しく開発され実施されてきた。開発にあたり特筆すべき工事としては、「扇島製鉄所液状化対策工事」が挙げられる¹⁾。

(1) 工事概要

本製鉄所埋立地は、千葉県富津市浅間山一帯の山砂を用いて造成された埋立地盤である。埋立層厚は6～20mであり、1971年から4年で埋立てが完了された。地盤特性については、埋立地の分級作用により、平面あるいは深度方向にハツキはあるものの、細粒分は比較的少なく N 値10以下の緩い砂地盤であった。各種検討結果から液状化対策工法が必要とされた。

(2) 振動棒工法の開発

当時、液状化対策として最も信頼性の高い工法としては SCP 工法かすでにあったが、さらに経済的な工法を開発するよう要望されていた。これに応えるべく、鋼管の先端を特殊加工し、先端の振動により砂地盤を締め固める「振動棒工法」が開発された (写真—2)。(なお鋼管の替わりに H 型鋼を使った工法も同時期に開発されている) 実験工事を経て、1975年より重要施設の基礎

論文



写真一 振動棒工法施工機械

地盤について実施された。その施工規模は面積にして30万 m^2 、パイル延長約40万 m に達した。本工法はその後1980年代に入り、神戸港ポートアイランドをはじめとする関西の埋立地で多用されることとなった。こちらもマサ土を中心とする細粒分の比較的小さい地盤であり、本工法の特徴を活かせる地盤で適用されてきている。

(3) グラヘルトレーン工法の開発

扇島東護岸の液状化対策には、既設構造物（護岸）に振動による悪影響を及ぼす懸念から、振動棒工法を採用することには問題があった。そこで、護岸に影響を与えない液状化対策工法が必要となり、この要望に応える工法として提案されたのか、「クラヘルトレーン工法（以後GD工法と呼ぶ。当時は碎石パイル工法と呼んだ）」である。砂の代わりに透水係数の大きな粒度調整碎石を用い、液状化時の過剰間隙水圧を速やかに消散させるもので、スパイラル付きのケーシングパイプを用いて排土施工を行い、周辺への影響を抑えている。設計検討は1976年に石原研而東京大学教授のご指導のもとで開始された。当時地震時の過剰間隙水圧消散を目的としたGD工法の採用はほとんどなく、その理論的解析も行われていない状況であった（HB Seedによる設計法に関する論文⁵⁾はこれよりさらに後のこととなる）。

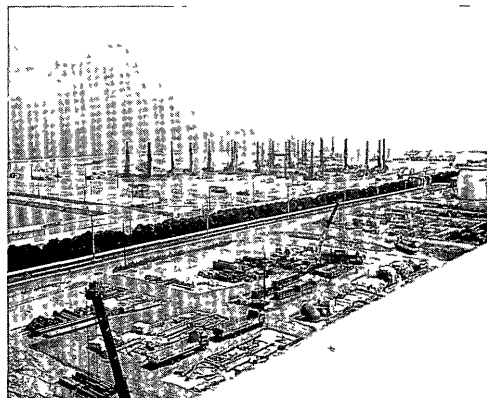
当時の安定検討は次の手順によっている。①護岸背面の対策はGD工法と振動棒工法による、②GD工法の有効性の確認は現地における強制振動試験と強制揚水試験で確認する⁶⁾、③GD工法の理論解析（改良仕様決定方法）は井戸の原理を用いた水理解析によって行う、④護岸全体の安定は有効応力を用いた円弧すべり法により行う、⑤地震時の地盤内の過剰間隙水圧を算定するには専用の解析プログラムを用いる。

実際のGD工法の施工は1977年から開始され、その後全国各地で徐々に採用されていくこととなる。

3 大規模施工と多様な工法開発の時代（1979年～1990年）

3.1 大規模施工事例

昭和50年代はしめ、発電燃料が石油からLNGへと転換していくにつれ、全国各地でLNG基地整備が行われた。SCPによる地盤改良工事も各所で計画され、施工



写真一 施工状況（日本海 LNG での SCP 施工状況）



写真一 幕張新都心の施工状況

機不足に陥るほどであった。1979年（昭和54年）、新島臨海工業地帯に日本海 LNG 基地建設が計画され、地上式 LNG タンク基礎（杭基礎）の液状化対策として SCP 工法が採用された（写真一 3）。このときは事前に試験工事を行って改良仕様を決定し、改良目標 N 値は平均値から標準偏差を引いた値が20以上であればよいとされた。またこのとき N 値のスプリット試料はすべてフルイ分け試験を行い、杭間土の細粒分含有率と N 値の関係についても評価がなされた。この後、細粒分が多いと N 値増加が抑制されることを考慮した設計方法⁷⁾が考案され、現在もその知見が活かされている⁸⁾。

時代は進み、1980年代後半には全国の埋立地上で構造物建設が盛んに行われた（幕張新都心、臨海副都心等）。千葉県内では、1985年の「幕張新都心施設基本計画」策定および翌年の JR 京葉線千葉みなと～西船橋間開業（海浜幕張駅開設）以来、幕張新都心でホテルや主要企業の社屋建設が開始された。ここでは、高層ビル等の液状化対策として、1990年までに SCP 62万 m 、GD 23 000 m などが実施されている。1987年12月17日には、「千葉県東方沖地震」が発生し、SCP 施工現場周辺の無処理地盤において噴砂現象が現れた。その結果、この地域での SCP 工法が多用されることになった。また、基礎地盤設計段階で、高層建築評定取得に際し多くの技術的努力が払われ、その後の建築基礎構造への SCP による液状化対策工事の先駆けとなった。最近では、液状化対策も兼ねた砂杭直接基礎の採用事例も出てきている⁹⁾。

3.2 多様な液状化対策工の開発

1970年代から開発されてきた深層混合処理工法を用いた液状化対策工法として、「耐液状化格子状深層混合

処理（TOFT）工法」がある。工法の原理は、液状化地盤を格子状に固化改良することにより、格子内部の砂地盤の地震時せん断変形を抑制し、過剰間隙水圧の発生を抑制するというものである。研究は、1985年から旧建設省土木研究所と民間の共同研究によって進められた。遠心模型実験の結果が設計方法に取り込まれ、年間約30万 m³の実績を有する工法として今日に至っている。

SCP の従来使用されていたケーシングパイプ径を小型化し、高周波のハイプロハンマーを使用して振動を抑える「小口径高周波締固め砂杭工法」や、「地下水低下工法」、「ハイプロタンパーによる表層締固め工法」などの多様な工法が実用化したのも同じ時期である。

4 静的締固め砂杭工法開発と実用化の時代 (1991年～2004年)

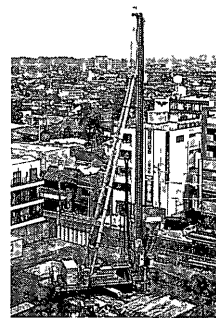
液状化対策に対する関心の高まりに従って、市街地あるいは既設構造物の近接施工を余儀なくされるケースが増え、SCP 工法では、振動 騒音などによる周辺環境への影響が懸念されていた。これに対する無振動 無騒音型施工機の開発は、1979年（昭和54年）まで遡る。当時、広島県において魚河岸壁背面部の改良工事にオーカートレーン施工機を改造し、スパイラル付きケーシングにより正転、逆転を繰返す SCP 工法が初めて施工された。しかし当時は総重量が軽いためスパイラルの反力効果もなく、成果としては芳しいものとは言えなかった。

その後、無振動 低騒音タイプの締固め併用クラヘルトレーン工法の開発が進み、1994年に従来のスパイラル付きケーシング技術から、新しい機械技術であるラック ピニオン式昇降装置を適用することで、過去の技術の欠点を補って余りある施工方式「*N* 値増加型（NUP）クラヘルトレーン工法」が開発された。この技術を応用し、翌年1995年には、砂を使用した「静的締固め砂杭工法¹⁰⁾」が開発され、現在では液状化対策としての SCP 工法と言えは、この方式が主流の座を占めている。

さて静的締固め砂杭工法の改良効果であるが、振動効果を期待できないことより、当初は多くの技術者から疑念が示された。そこで、まず室内で豊浦砂にカオリン粘土を混合し細粒分含有率を種々に変えて三軸排水せん断試験¹¹⁾を実施し、細粒分が20%程度のときにダイレイ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。試験工事での杭間 *N* 値の増加報告を受け、国内の通常の埋立地（細粒分を10～30%程度含む）では、十分な締固め効果を有することか実証された。また浅岡顕名古屋大学教授らにより¹²⁾、砂杭拡径によりその周辺砂質地盤で80%を越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か、解析的にも示されている。

5 おわりに

液状化対策工の変遷を綴るという、極めて重い課題を



写真—5 市街地での静的締固め砂杭工法の施工状況

与えられたか、ちょうど社内史かまとまった時期でもあり大変参考となった。多くの技術者と工事関係者の努力により、地震から地盤を守る技術の開発と実用化が進められて来たことに、改めて敬意を表したい。なお、過去の事実をひも解く作業の中で、どうしても社内の内容が中心となり、我田引水的な記述もあるかもしれない。ご容赦いただければ幸いてある。

参 考 文 献

- 1) ふとうの地盤改良史—コンポーザーとともに—（昭和22年～平成12年）、不動産建設部内資料、2000
- 2) 村山朔郎 Sand Compaction Pile による軟弱地盤改良（コンポーザー工法）、大阪建設業協会講演会資料、1957
- 3) 新島地震震害調査記録、不動産建設研究会編、1964
- 4) 岡村未対 石原雅規 田村敬一 SCP で改良された砂質土地盤の液状化強度と飽和度、第38回地盤工学研究発表会、pp 2025～2026, 2003
- 5) Seed, H B and Booker, J R Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains, ASCE, Vol 103, No GT7, pp 757～768, 1977
- 6) 石原研而 斎藤 彰 有馬 宏 護岸液状化対策としての砕石パイルの適用例、土と基礎、Vol 28, No 4, pp 9～15, 1980
- 7) 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トコンパクションパイル工法の設計法、土と基礎、Vol 35, No 5, pp 21～26, 1987
- 8) 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, pp 17～20, 2000
- 9) 吉成 裕 梅野 岳 吉富宏紀 大西智春 静的締固め砂杭工法による改良地盤における直接基礎建物の鉛直支持力と沈下挙動、日本建築学会講演梗概集、pp 389～392, 2004
- 10) 山田 野津 非振動式締固め砂杭工法による砂地盤の締固め効果、第31回地盤工学研究発表会、pp 49～50, 1996
- 11) Nozu, M, Matsunaga, Y and Ohbayashi, J Application of the static sand compaction pile method to loose sandy soil, IS-TOHOKU, 1998
- 12) 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、Vol 48, No 2, pp 49～54, 1999

(原稿受理 2004 10 18)