

10. 軟弱地盤対策

ぜん 功 企

九州大学大学院工学研究科

1. まえがき

近年の軟弱地盤に対する取組みは多種・多様化している。過去の節目における本誌特集号のテーマをみると、30周年の特集では「軟弱地盤処理」¹⁾および「土質安定処理」²⁾、40周年では「地盤改良」³⁾として取り上げられている。今回は「軟弱地盤対策」である。個々の用語の厳密な定義はさておいて、土質安定処理から地盤改良、さらには地盤対策へと、様々な技術開発に対応してその取り扱う範囲は確実に大きくなっている。ここでは、これまでの土質安定処理や地盤改良などを包含した呼び方として「軟弱地盤対策」を用いている。

2. 地盤対策技術の50年

地盤改良技術の進歩については、既に「土と基礎」の土質工学30年の歩みのなかで奥村¹⁾が、また、土質工学40年の歩みのなかで寺師³⁾がみごとにまとめている。また、既に、戦後50年間の地盤改良の変遷についても要約がなされている⁴⁾。地盤対策技術50年の歩みを振り返る場合に、これらは極めて貴重な報告であり大いに参考になる。表—1は寺師³⁾がまとめたものに1990年代の動向を追加したものである。表—1によると、終戦をはさむ1940年代以前の地盤対策技術としては、置換工法、自然圧密による工法、ポンプ排水による工法、敷き粗た・沈床による工法など、種類も少なく現在ではあまり用いられていない工法が多い。1950年代になると戦後の復興期から朝鮮戦争以後にかけて、いわば近代的な地盤対策の試みが始まっている。現在でも幅広く用いられているサンドドレーンによる圧密促進工法やサンドコンパクションパイルによる動的な締固め(砂)杭工法などはこの時代に実用化されている。地盤改良技術が質量ともに著しく進展したのは、1960年代ということができよう。このことは、1960年(昭和35年)閣議決定された「国民所得倍増計画」とは無関係ではなかろう。その後の高度経済成長を迎えるにあたって、産業界の生産増強計画、臨海工業地帯の造成、国土交通網の整備とあいまって、軟弱地盤地域における建設工事、ひいては地盤改良の必要性を大いに助長した。強制置換工法、生石灰杭工法、碎石・砂利杭工法、パイプロフローテーション工法、薬液注入工法、凍結工法、シート・ネット等の工法など、この年代に実用化された地盤改良技術は多い。1970年代は成長の道をまっしぐらに走り続けた日本経済が、相次いで大きな試練に見舞われた年代である。

1971年(昭和46年)のニクソンショックと1973年(昭和48年)と1979年(昭和54年)の2度にわたるオイルショックがそれである。このような情勢のもと、なお、真空圧密工法、グラベルドレーン工法、異形鋼杭による締固め工法、動圧密工法、深層混合処理工法、噴射注入工法、補強土工法、産業副産物等を利用した工法など新たな工法が実用化されている。1980年代に入ってから1970年代のショックが建設分野にも波及したせいかな新たな工法の開発は少ないが、ジオテキスタイル等を用いた補強土工法の開発、普及が進んだ。1990年代は表—1の網掛け部分である。表—1がとりまとめられてから10年経過したが、新たに開発された工法は1960年～1970年代に比較してかなり少ない。あえてあげると、静的締固め(砂)杭工法、事前混合処理工法、流動化処理工法、軽量混合処理土工法、管中混合処理工法などであろうか。このように、新たな工法が実用化された年代という観点からは、過去50年間における地盤改良工法開発の最盛期は高度成長期の1960年代～1970年代であったといえよう。

使用実績という観点からみた場合はどうであろうか。いくつかの例を見てみよう。置換工法は、最も経済的な地盤改良工法として、1970年(昭和45年)前後に多用された工法である。1965年からの10年間のアンケート調査では、我が国の港湾工事における地盤改良のうち、件数175件の68%、構造物法線に沿う改良総延長5.4万kmの76%を占めていた¹⁾。しかしながら、この工法は、浚渫・掘削土や盛上がり土の捨場所の不足、良質な土砂の入手の困難性、工事に伴う環境問題への社会意識の変化等により近年の港湾工事ではほとんど用いられなくなった。1995年兵庫県南部地震における神戸港の被災は更にこの傾向に拍車をかけている。サンドドレーン工法は、1952年(昭和27年)長崎港中ノ島岸壁の築造工事で我が国で最初に用いられて⁵⁾以来、多くの工事实績を蓄積してきたが、一時期、その効果について論争があり実績も伸び悩みの傾向にあった。しかし、1990年代の関西国際空港での約100万本のドレーン打設実績、羽田空港沖合展開事業における総打設延長7万km(地球1.8周に相当)の適用等で息を吹き返した。サンドコンパクションパイル工法は、1956年の陸上部での施工開始以来、1998年までの延べ打設実績は約30万km(杭径700mm換算、有力1社の統計)以上にも達している。その間、1966年に始まった海上工事を契機に著しい実績の伸びがみられる。1976年横浜港大黒埠頭で実用化された深層混合処理工法は、工事費自体は高価にもかかわらず使用実績が増え、1994年までの累積量はセメントスラリーを安定材とするCDM工法で2565万m³、セメント(または石灰)の粉末を用いるDJM工法で1262万m³となっている⁶⁾。薬液注入工法では、1974年、福岡県新宮町で起きた薬害事故およびそれをきっかけとした建設省事務次官通達「薬液注入工法による建設工事施工に関する暫定指針」により、水ガラス系以外の薬液の使用が禁止された。以後、数年は注入材の注入実績

表一 各種工法の原理と開発の経緯 (参考文献3)に加筆

基本原理	方法/材料	工 法 例	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	備 考		
置 換	掘 削 置 換									実施例減少傾向		
	押出し置換									最近の実施例は少ない		
	爆 破 置 換									日本での事例は少ない		
	強 制 置 換	マンモスコンポーザー, SSP, NTK コンパクション等								置換率70%強, 低置換率増		
排 水 (圧密)	自 然 圧 密	プレロード工法, サーチャージ工法										
	パーチカルドレーンによる 圧 密 促 進	サンドドレーン, バックドレーン等袋詰めドレーン										
		ペーパードレーン, プラスチックドレーン									素材の進歩	
	ポンプ排水	ティープウェル, ウェルポイント									補助的	
		真空圧密									施工例は少ない	
	電 気 浸 透	電気浸透工法									実験段階	
	化学的排水	生石灰杭工法										
逆浸透工法 (MAIS 工法)										実験段階		
排 水 促 進	グラベルドレーン工法, ドレーンパイプ工法									液化化対策工法		
圧 縮	締固め (砂)杭	動的 サンドコンパクションパイル工法 (パイプロコンポーザー, SSP, NTK, OFB 等)										
		砕石, 砂利杭工法										
	静的 SAVE 工法, 静的締固め杭工法, コンパクショングラウチング工法											
	棒状振動機	パイプロフローテーション, SVS 等										
	異形鋼杭	KF コンパクション, ダイレクトパワーコンパクション, パイプロロッド, 十字パイプロ, 串型パイプロ等										
重錐落下	動圧密工法									“よいとまけ” 現代版		
化学的 固 化 (熱処理)	薬液注入	水ガラス系の各種薬液注入工法									恒久性グラウトの開発	
	安定材の 攪拌混合	各種の表層混合処理										
		深層混合処理 (DLM, CMC, CDM, DJM 等)										
		事前混合処理 (プレミックス工法等)										埋立材の前処置
		流動化処理										空洞充填に実績多い
		管中混合処理										混合方法に特徴
	安定材の 噴射注入	CCP, ジェットグラウト, JSP, MM 等									注入材料による置換に近い	
熱 的 処 理	焼結工法										日本での施工例は少ない	
	凍結工法										仮設的な改良	
補 強	曲げ 引張り材料	敷き粗だ, 沈床										
		シート, ネット, ロープネット, パンブーネット等										覆土の補助工法
		各種ジオテキスタイル, ジオグリッドの普及										新しい素材の普及
		補強土工法 (テールアルメ等)										盛土などの補強
圧 縮 材 料	サンドコンパクションパイル, 固化土										複合地盤の形成	
荷重軽減	副 産 物 等	フライアッシュ, 水砕, 大鋸屑, 貝殻等										
	発 泡 スチロール	発泡スチロール塊, 発泡スチロールブロック (EPS 工法)										新しい素材の積極的利用
	軽 量 混 合 土	軽量混合処理土工法 (発泡ビーズ, 気泡)										

注) 網かけ部分を加筆

(使用量)は40万 kl/年弱であったが、その後着実な伸びをみせ、1980年代~1990年代に入り70~120万 kl/年の間で推移している。兵庫県南部地震による都市部施設の復旧工法として、設備が簡便で近接施工が容易な本工法は広く採用されている⁷⁾。比較的新しい工法のうち、EPS 工法は、我が国での使用が始まった1985年から着実な伸びがみられ、1996年6月までで総使用量が112万 m³ となっている⁸⁾。EPS 工法に比較しやや経済的な気

泡混合処理土工法も同様な傾向にある。1992年東京湾横断道路木更津人工島の埋立工事で実用化された事前混合処理工法⁹⁾は、その後、兵庫県南部地震で被災した神戸港の岸壁の復旧に用いられるなど現在までに約130万 m³ の実績がある¹⁰⁾。1990年代に実用化された流動化処理工法¹¹⁾は、主に発生土の埋戻しや空洞の充填などに用いられ、これまでの適用事例¹²⁾からその数量を拾うと約4万 m³ となっている。1 工事当たりの処理土量は

表一 2 地盤改良工法の特徴 (参考文献6)に加筆)

分類	工法の名称	概要	目的					対象土質		改良効果	施工工期	施工費	施工実績	設計精度	可能規模	施工管理の必要性	環境への影響		
			強度増加	沈下防止	液状化防止	透水性低減	土圧低減	リサイクル	粘性土									砂質土	
置換工法		機械的な掘削置換	○	○	△	×	×	×	○	×	中	短	安	多	優	大	小	大	
排水	自然圧密工法	圧密による強度増加や沈下防止を期待する工法	○	○	×	×			○	×	中	長	安	多	優	大	中	小	
	バーチカルドレーン																		
	サンドドレーン工法		○	○	×	×	×	×	○	×	中	中	中	多	優	大	大	小	
	プラスチックドレーン工法		○	○	×	×	×	×	○	×	中	中	中	多	優	大	大	小	
	水位低下	排水による圧力低下を利用する工法																	
	ウェルポイント工法		△	△	×	×	×	×	△	○	小	中	中	多	優	中	中	中	
	真空圧密工法		○	○	×	×	×	×	○	×	中	中	中	中	良	中	中	小	
	生石灰杭工法	化学的脱水を利用	○	○	△	×	×	×	○	△	中	中	中	多	良	大	中	中	
	グラベルドレーン工法		砂質土の排水により液状化防止	×	×	○	×	×	×	×	○	中	短	中	中	良	大	小	小
	ドレーンパイプ工法			×	×	○	×	×	×	×	○	中	短	中	中	良	中	小	小
圧縮	サンドコンパクションパイル工法	砂の締固め 動的締固め	○	○	○	×	×	×	○	○	大	短	中	多	優	大	中	中	
	パイロフローテーション工法		○	△	○	×	×	×	×	○	大	短	中	中	良	中	中	中	
	ロッドコンパクション工法		○	△	○	×	×	×	×	○	中	短	中	中	良	大	中	中	
	重錐落下締固め工法		○	△	○	×	×	×	×	○	中	短	中	中	良	中	中	大	
	静的締固め杭工法	静的締固め	○	○	○	×	×	○	○	○	中	短	中	少	良	中	中	小	
化学的 固化	深層混合処理工法	化学的固結作用を利用	○	△	○	△	×	×	○	△	大	短	中	多	優	大	大	小	
	浅層混合処理工法		○	△	△	△	×	×	○	×	大	短	中	多	優	中	中	小	
	事前混合処理工法		○	△	○	△	○	△	×	○	中	短	中	少	良	中	中	小	
	流動化処理工法		○	△	○	○	○	○	○	△	大	短	中	少	良	中	中	小	
	管中混合処理工法		○	△	○	○	○	○	○	×	中	短	中	少	良	中	中	小	
	薬液注入工法	化学的充填固化法	△	×	○	○	○	×	×	○	中	短	高	多	良	中	大	中	
	噴射攪拌工法		○	△	○	○	○	×	○	○	大	短	高	中	良	中	大	中	
凍結工法	間隙水を一時凍結	○	×	×	○	○	×	○	○	大	中	中	多	優	中	中	中		
補強	シート・ネット工法	土の引張り強度を補強	○	×	×	×	×	×	○	×	中	短	安	多	良	中	小	小	
	補強土工法		○	×	×	×	○	×	△	○	中	短	中	多	良	中	小	小	
軽減	軽量材	荷重を軽減	△	○	×	×	○	○	○	○	小	短	中	中	優	中	小	小	
	軽量混合土		○	○	△	△	○	○	○	○	中	短	高	少	良	小	小	小	

注) 網かけ部分を加筆

多くはないが適用事例は増加しつつある。その他の工法については割愛するが、多かれ少なかれ各工法の使用状況は社会情勢・経済状況等の影響を受け時代と共に変化していると考えられる。

3. 1990年代の地盤対策技術の特徴

表一 2 は、奥村⁶⁾がとりまとめた表にごく最近のものを追加したものである(網かけ部分)。目的の欄には、最近の動向を考慮して土圧低減とリサイクルの項を追加した。1990年代に実用化された工法および既存工法の改善における技術の特徴を簡潔に表すと、環境への配慮、液状化対策、土圧低減、リサイクル、新地盤材料の開発、近接施工への対応など、目的および適用の拡大であろう。

3.1 環境に配慮した工法

環境への配慮項目には、いわゆる典型7公害、騒音、振動、地盤沈下、大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、悪臭などがある。特に施工中に問題となる騒音・振動は動的

な締固め工法にはつきものであるが、従来の動的な締固め工法における低騒音・低振動タイプの施工機械の開発のほかに、最近、静的に砂等の杭を形成して地盤を締め固める静的締固め(砂)杭工法^{13),14)}や、砂利を混合したスランプ値の小さなグラウトを圧入して、地盤を静的に締め固めるコンパクショングラウティング工法¹⁵⁾などが開発されている。なお、これらの新しい工法については締固めのメカニズムやより合理的な設計法の確立等今後の研究が期待される。

3.2 液状化対策工法

1964年新潟地震以来、液状化に関する調査・設計・施工法について精力的な研究が進められてきた。パイロフローテーション工法、サンドコンパクションパイル工法、振動棒工法、動圧密工法などの地盤を締め固める工法は、新潟地震をはじめ、その後1995年兵庫県南部地震までの地震の洗礼を受け、効果が確かめられている^{16)~18)}。3.1で述べた静的締固め(砂)杭工法も液状

化対策として徐々に適用が広がっている。ウォーターフロントにおける岸壁や護岸直背後など、変位・変形に制約がある場合にグラベルドレーン工法やドレーンパイプ工法などの排水効果を期待した各種の工法が開発されている。これらは、コスト等の観点から締固め工法などとの組合せにより適用されることが多い。化学的固化の原理に基づく工法として、事前混合処理工法が開発され前述のように施工実績も増えている。深層混合処理工法も液状化対策として緩い砂質地盤に適用が広がられている¹⁹⁾。

3.3 土圧低減工法

土圧低減を目的とした構造物背後の地盤対策として、特に、裏込め・裏埋めに固化処理土や軽量土を用いる試みがなされている²⁰⁾。具体的には、深層混合処理工法、事前混合処理工法、軽量混合処理土工法、流動化処理工法などがある。このほか、自重の小さな水砕スラグ等を用いる方法もある。今後適用が増えると期待されるが、地震時土圧の合理的算定法の確立が課題であろう。

3.4 リサイクル工法

建設発生土、浚渫土砂等を土捨場に処分するかわりに有効に利用しようという試みが活発になり、上述の固化処理に基づく工法のほか、牡蠣殻やスラグ等を用いたサンドコンパクションパイル工法が実用化されている。また、椰子の実繊維を用いたファイバードレーン工法も環境配慮とともにリサイクル関連工法としてあげられよう。鉄鋼スラグ（水砕スラグ、製鋼スラグ等）、石炭灰等の産業副産物の特徴を生かした新地盤材料としての有効活用も広義には地盤対策として考えられる。リサイクルは社会的に重要なキーワードの一つであり、今後ともこの分野の工法の開発が進むであろう。

3.5 近接施工および既設構造物直下地盤の対策工法

近年の地盤対策工事における近接施工では、周辺地盤の変位が重要な問題となる場合が多々ある。サンドドレーン、サンドコンパクションパイル、深層混合処理、薬液注入工法など、工事に伴う地盤変位は多くの不確定な要因に支配されるためその予測は容易ではないが、既存の施工機械の改良や施工方法の工夫について検討が行われている²¹⁾。既設構造物直下の地盤対策としてはまず薬液注入工法が考えられるが、最近、恒久性のグラウトを砂質地盤に浸透注入させ地盤を固化する浸透固化処理工法が開発されている²²⁾。

4. あとがき

1990年代の新たな地盤対策工法は、これまでの技術の高度化、複合化、自動化、ソフト化といった切り口で新たな社会的ニーズに対応しているように思われる。今後の地盤対策技術を考える上のキーワードとして、(1)建設コスト縮減・費用対便益効果：工法の選定・適用・開発にあたってトータルコストと便益の分析の重要性、(2)基準化・規格化への対応：工法の明確な理論的裏付けと国際的な基準の確立、(3)総合的・複合的地盤対策：地盤

と構造物の両方の観点から総合的な地盤対策の必要性、原理の異なる地盤対策の適用、(4)環境対策・環境創造、(5)リサイクル・省資源、(6)補修・更新時の対策、(7)改良効果の予測と評価の高精度化などをあげ、あとがきとした。

参考文献

- 1) 奥村樹郎：土質工学30年の歩み—軟弱地盤処理，土と基礎，Vol. 27, No. 13, pp. 90~93, 1979.
- 2) 近藤 正：土質工学30年の歩み—土質安定処理，土と基礎，Vol. 27, No. 13, pp. 94~97, 1979.
- 3) 寺師昌明：土質工学40年の歩み—地盤改良，土と基礎，Vol. 37, No. 12, pp. 74~77, 1989.
- 4) 地盤工学ハンドブック編集委員会編：地盤工学ハンドブック，地盤工学会，pp. 1197~1262, 1999.
- 5) 日本港湾史編集委員会編：日本港湾史，日本港湾協会，845p., 1978.
- 6) 奥村樹郎：総説 地盤改良技術—最近の傾向と課題，基礎工，第24巻，第7号，pp. 2~5, 1996.
- 7) 塚田幸広：各論 薬液注入工法—地下水汚染からの転機，基礎工，第25巻，第1号，pp. 96~100, 1997.
- 8) 三木五三郎：各論 軽量盛土工法とEPS工法，基礎工，第25巻，第1号，pp. 107~111, 1997.
- 9) 善 功企・石山 范・千田宏三・蛭川友司・森 國夫：埋立地の液状化対策としての事前混合処理工法の開発，土木学会論文集，No. 522/Ⅴ-28, pp. 19~22, 1995.
- 10) 事前混合処理工法技術検討委員会編：事前混合処理工法マニュアル，沿岸開発技術研究センター，1999.
- 11) 久野悟郎編著：土の流動化処理工法，技報堂出版，1997.
- 12) 建設省土木研究所：流動化処理土利用技術マニュアル，建設省土木研究所，1997.
- 13) 大塚 誠・山田 隆・中野健二：SAVE コンポーザー—静的締固め砂杭工法—，基礎工，第26巻，第12号，pp. 74~77, 1998.
- 14) 山崎浩之・中里高密：建設発生土を活用した静的締固め杭工法による地盤改良工事例，基礎工，第27巻，第3号，pp. 21~23, 1999.
- 15) 大沢一実・新坂孝志・渡辺将実：コンパクショングラウチングの適用例—液状化対策例他，土木学会第51回年次学術講演会，pp. 552~553, 1996.
- 16) 石原研而・川瀬泰裕・中島三春：Liquefaction Characteristics of Sand Deposits at Oil Tank Site during the 1978 Miyagiken-Oki Earthquake，土質工学会論文報告集，Vol. 20, No. 2, pp. 97~111, 1980.
- 17) 谷川君平・村主周治・大倉卓実・菊地慎二：阪神・淡路大震災における重錘落下締固め工法による改良効果，土と基礎，Vol. 44, No. 3, pp. 43~46, 1996.
- 18) 及川 研・奥田 健：神戸港におけるケーソン岸壁の被災と復旧工法，基礎工，第24巻，第10号，pp. 2~5, 1996.
- 19) 鈴木吉夫・齊藤 聡・鬼丸貞友・木村 玄：深層混合処理工法を用いた格子状地盤改良による液状化対策工，土と基礎，Vol. 44, No. 3, pp. 46~48, 1996.
- 20) 及川 研ほか：岸壁背後土圧低減のための各種セメント処理土の特性，セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp. 103~110, 1996.
- 21) 平出 亜：地盤改良工法における周辺変位対策，基礎工，第27巻，第3号，pp. 12~15, 1999.
- 22) 林健太郎・山崎浩之：既設構造物直下の液状化対策工法—浸透固化処理工法—，基礎工，第27巻，第3号，pp. 27~29, 1999.

(原稿受理 1999.8.3)