The Japanese Geotechnical Society

論　説

地盤改良工法の変遷と新技術

The Development and New Technologies in the Improvement Methods of Soft Ground

深　田　　久（ふかだ　ひさし）
㈱不動テトラ　地盤事業本部　開発部長

1. はじめに

我が国では沖積平野に人口の大部分が集中し，多くの構造物が軟弱地盤上に建設されている。軟弱地盤上に施設を建設するためには，安定・沈下等の地盤工学的な課題があり，これらを解決するために様々な地盤改良工法や土質安定処理工法が開発・実用化されてきた。これらの技術は「軟弱地盤対策工法」と総称されることもあるが，本文では地盤改良工法と記述する。

地盤改良工法は，我が国の産業の発展や経済成長によって臨海部での港湾・空港・製鉄所・発電所及び化学コンビナート等の建設が進んだことや，名神高速道路・東名高速道路を初めとする高速道路網の建設が進んだ歴史と軌を一にして発達してきた[1),2)]。また，我が国では地震の発生のたびに液状化を初めとする地盤災害が発生しており，地盤改良工法は耐震対策工法としても広く適用されるようになってきている。

地盤改良工法に求められる性能として，改良原理が地盤工学に照らして妥当であること，改良効果に信頼性があること，施工能力（改良深度や作業能率等）が実際のニーズに合っていること，コストが安価であること，施工時の安全性が確保されること，等が挙げられる。これらの要求性能を満足するため，新しい材料・施工法の開発や施工機の能力増大等の取り組みが進められてきた[3)]。こうした取り組みが，結果として地盤改良工法の歴史となっている。ここでは，いくつかの視点から地盤改良工法の変遷について述べていきたい。

2. 地盤改良工法の変遷

2.1 改良目的からみた変遷

地盤改良の目的には，支持力の増大，沈下変形対策，液状化対策，止水対策等がある。我が国の地盤改良の歴史においては，当初は粘性土地盤の安定・沈下の問題が主であったが，その後に砂地盤の耐震性（液状化）の問題が大きな課題となり，現在では環境に関連した問題（施工時の振動・騒音・周辺変位の問題やリサイクル，土壌汚染の対応など）が課題となっており[4)]，それにつれて技術の変遷や多様化が見られる。

2.2 改良原理からみた変遷

地盤改良工法は，その改良原理からバーチカルドレーンに代表される圧密促進工法，サンドコンパクションパイル（SCP）工法に代表される締固め工法，深層混合処理工法に代表される固結工法等に区分されるが，その他にも多くの工法が開発され，実用に供されている。

地盤改良工法の発達と変遷をみるために，既往の成書の力を借りて説明したい。まず，1972年に著された「土質安定工法便覧，松尾新一郎編」[5)]，次に1985年に著された「軟弱地盤対策工法―調査・設計から施工まで―，土質工学会編」[6)]，また，その改訂版に当たる2013年の「地盤改良工法の調査・設計・施工　―戸建て住宅から人工島まで―，地盤工学会編」[7)]を挙げてみる。この3冊の成書に示されている工法一覧を**表―1**に示すが，概ね1960年から2010年までの50年間の代表的工法を見ることができる。

「土質安定工法便覧」には総計35の処理工法が示されており，地盤改良工法の黎明期の工法が取り上げられている。改良原理として粒度の調整，高密度化及び水分の規制といった，地盤の安定化を図るための基本事項が挙げられている。個別の工法として，締固めを目的とした爆破工法や電気衝撃工法，焼結工法及び電気浸透工法等が紹介されている。継続して開発が進んだとは言い難いが，当時，様々なアプローチがなされていたことを示している。一方，プレローディング工法やサンドドレーン工法，サンドコンパクションパイル工法に加え，薬液注入工法等，現在広く普及した工法も紹介されている。

それから約13年後にまとめられた「軟弱地盤対策工法―調査・設計から施工まで―」では，昭和50年代（1975～1984年）に地盤改良工法が大きく発展したことを反映して，改良原理と工法区分がかなり整理された形で示されている。この時期に注目されるのは，深層混合処理工法が開発され，広く適用され始めてきたことである。また，発泡スチロール等の新しい素材が軟弱地盤対策の分野でも使用され始めた。

2013年に発刊された「地盤改良工法の調査・設計・施工　―戸建て住宅から人工島まで―」で注目されるのは，静的締固め工法という分野の工法が開発されてきたことである。静的締固め工法には，従来のサンドコンパクションパイル工法のように振動機を用いずに，砂杭を造成する静的締固め砂杭工法と，ポンプにて材料を地盤に圧入して周囲を締め固める静的圧入締固め工法がある。いずれも，市街地での施工を可能とした工法である。

2.3 使用材料の変遷

地盤改良に使用される材料の変遷について述べてみる。まず，サンドドレーン工法やサンドコンパクションパイ

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

表―1　既往の書籍における地盤改良工法の一覧

(a)土質安定工法便覧, 1972

原理	工法名
粒度の調整	粒度調整
	パンフロック
	締固め法
高密度化	水締め法
	置換工
	爆破工
	パイプロ・フローテーション
	サンド・コンパクション
	フローティング・ドレーン
	電撃法
	セメント安定
	アスファルト安定法
	石灰安定法
	合成樹脂
	被覆工法
	防塵処理
	プレローディング
	サンド・ドレーン
	ペーパ・ドレーン
	サンドイッチ
水分の規制	半透膜工法
	毛細管乾燥工法
	水位低下法
	電気浸透法
	イオン交換法
	凍結工法
	凍結防止
	焼結工法
	高含水比粘性土乾燥法
その他	薬液注入法
	薬液攪乱法
	噴射注入
	アンカ工法
	補強土工法
	マット工法

(b)軟弱地盤対策工法-調査・設計から施工まで-, 1985

主要な原理		工法名
Ⅰ構造物の形式の変更		押さえ盛土工法
		荷重軽減工法(発泡スチロール等)
		補強土工法
		矢板工法
		各種の基礎工法
Ⅱ除去・置換		置換工法
Ⅲ軟弱地盤の特性の改善	圧密・排水	載荷盛土工法(プレローディング工法)
		サーチャージ工法
		大気圧工法(真空圧密工法)
		地下水位低下工法
		バーチカルドレーン工法(サンドドレーン、袋詰めサンドドレーン、プラスチックボードドレーン)
		生石灰パイル工法
		電気浸透工法・半透膜工法
		砕石パイル工法
		表層排水工法(トレンチ・天日乾燥)
	締固め	サンドコンパクションパイル工法
		ロッドコンパクション工法
		パイプロフローテーション工法
		重錘落下締固め工法(動圧密工法)
		爆破工法／電気衝撃工法
	固結／熱処理	表層混合処理工法
		深層混合処理工法(機械的撹拌式工法、噴射撹拌式工法)
		薬液注入工法
		焼結工法
		凍結工法
Ⅳ補強		覆土工法(サンドマット工法)
		表層被覆工法(シート・ネット等)
		沈床工法
		ルートパイル・ソイルネイリング
		パイルネット工法・パイルキャップ工法
		パイルスラブ工法
		サンドコンパクションパイル工法
		深層混合処理工法

(c)地盤改良工法の調査・設計・施工-戸建て住宅から人工島まで-, 2013

主要な原理		工法名
1. 構造物の形式の変更		押さえ盛土工法
		軽量盛土工法(EPSブロック工法、FCB、HGS)
		補強土工法
2. 除去・置換		置換工法
3. 軟弱地盤の特性の改善	圧密・排水	載荷盛土工法(プレローディング工法、サーチャージ工法)
		真空圧密工法
		地下水位低下工法
		バーチカルドレーン工法(サンドドレーン工法、プラスチックボードドレーン工法、人工材料ドレーン工法)
		石灰パイル工法(生石灰、特殊石灰)
		グラベルドレーン工法
		表層排水工法(トレンチ排水工法・乾燥工法)
		排水機能付き鋼材工法
	締固め	サンドコンパクションパイル工法
		ロッドコンパクション工法、パイプロフローテーション工法
		静的締固め工法(静的締固め砂杭、静的圧入締固め)
		バイブロタンパー工法
		重錘落下締固め工法(動圧密工法)
	固結／熱処理	表層中層混合処理工法
		深層混合処理工法(機械的撹拌式工法、噴射撹拌式工法)
		高圧噴射撹拌工法
		薬液注入工法
		凍結工法
		事前混合処理工法、管中混合固化処理工法、SGM工法
4. 補強		表層排水工法(サンドマット内の排水工法)
		シート・敷網工法(シート、ネット等)
		サンドコンパクションパイル工法
		深層混合処理工法

ル工法の材料として良質な砂が使用されてきた。しかしながら，海砂や山砂の採取に伴う環境への影響が問題となり，良質な自然砂を採取することはかなり困難となってきている。そのため，サンドドレーンに代わりプラスチックボードドレーンの適用が増加している。プラスチックボードドレーンは開発当初は透水性等の課題が指摘されたが，技術の進歩により通水性能が向上している[8]。サンドコンパクションパイル工法では，砂に代わって砕石やスラグが用いられるようになってきている。最近は再生砕石の使用も増加している。

次に，深層混合処理工法で用いられる固化材に着目する。開発当初は石灰を用いた工法もあったが，安全性及び改良効果の面から，現在では石灰を用いる事例はかなり少ないと考えられる。セメント材料について言えば，普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種に加えて，有機質土に対応できるセメント系固化材が多数開発されてきた[9]。固結工法の中で，薬液注入工法は長い歴史を持つが，その材料は大きく懸濁液型と溶液型に区分される。従来，溶液型の材料は長期的な耐久性に欠けると考えられていたが，近年では恒久性あるいは耐久性をうたった溶液型薬剤が提案され，データの収集や普及活動が活発に行われている。

また，近年ではリサイクルに着目した技術開発が進められてきている。事前混合処理土や護岸背面等での軽量化を目的とした軽量混合処理工法（SGM）などが開発されてきた[10]。また，人工島の埋め立てを対象に，浚渫土を大量に固化処理する管中混合処理工法が開発された[11]。管中混合処理工法は従来のミキサーを用いずに空気圧送により，浚渫土と固化材を圧送管の中で混合するもので，これによって浚渫土のリサイクルと大量施工が可能となった。

2.4　代表的な事例[1)～3),12),13)]

表―2に代表的な地盤改良工法とその事例を示す。

(1)　臨海埋立地及び人工島の造成

1960～1970年代の経済成長期には，臨海埋立地の造成が進み，製鉄所・発電所等のエネルギー施設や化学コンビナートのタンク等が数多く建設された。また，1980年代～2000年代には沖合人工島の造成と空港の建設が進んだ。これらの建設において，護岸の築造では安定沈下対策として置換工法，海上SCP工法，海上SD工法及び深層混合処理工法が大規模に適用されている。その後の埋立てにおいては，埋立てに用いる材料（浚渫土・山砂・岩砕等）によって，適用される地盤改良工法が異なる。浚渫粘性土の埋立て直後は，人や重機の走行が困難なことから，まず表層処理工法やシート・敷網工法が適用され，その後に沈下対策としてバーチカルドレーン工法が適用されることが多い。

山砂で埋立てられた場合は，相対的にゆるい状態で堆積することが多いため，締固め工法（SCP工法，バイブロロッド等）が適用される。なお，埋立土の締固めと沖積粘性土の沈下促進を組み合わせた複合砂杭工法（埋立土でSCP工法，下部の沖積粘性土にSD工法を適用）が適用される事例もある。岩砕で埋立てられた地盤では，重錘落下締固め工法やSCP工法，バイブロタンパー工

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

表―2　地盤改良工法の適用施設と代表的な施工事例

施設		工法の概要	1950年代	1960年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代	2010年代
臨海埋め立て地および人工島	港湾施設・物流施設・ニュータウン	護岸の安定 置換・SCP・SD 深層混合 トラフィカビリティ対策 表層処理 シート・ネット 沈下対策 SD プラスチックボードドレーン 深層混合処理 締固め対策 SCP・重錘落下締固め バイブロロッド バイブロタンパー	扇島	臨海副都心・幕張地区・みなとみらい地区 名古屋港金城ふ頭 大阪南港・北港地区 神戸ポートアイランド・六甲アイランド 広島臨海地区 博多地区					
	製鉄所		君津 扇島	水島 福山	千葉 大分				
	エネルギー施設(火力発電所・LNG基地)		富津火力 知内火力 能代火力 四日市LNG・碧南火力・川越火力 南港火力 柳井火力 松浦火力						
	石油備蓄基地		苫小牧・福井・上五島・志布志						
	空港		羽田空港沖合展開 関西国際空港Ⅰ期・Ⅱ期 神戸空港・中部空港					羽田D滑走路	
高速道路		プレロード・SD・SCP・深層混合処理・真空圧密	名神・東名高速道路		道央自動車道 北陸・東北・常磐・秋田自動車道		東京湾横断道路	東京外環・圏央道	
河川堤防		SCP・静的締固め 砂杭・深層混合処理					荒川・利根川・庄内川・木曽三川・淀川		

法等が用いられる。前述したように，近年では埋立材として固化処理土が用いられることもある。

(2)　内陸での高速自動車道の建設

高速道路網は1960年代から現在に至るまで各地で建設されている。内陸部では腐植土・泥炭といった高含水比で圧縮性の大きい有機質土が堆積していることが多く，盛土を行う場合に地盤改良工法が適用される。具体的な工法としてSD工法，SCP工法，深層混合処理工法等がある。近年は，真空圧密工法の適用も増加している。

(3)　液状化対策の適用(港湾・河川から建築施設まで)

自然災害に目を向けると，新潟地震にて液状化現象が広く認識されて以後，日本海中部地震や兵庫県南部地震，東日本大震災にて液状化の被害が数多く見受けられるようになった。具体的には，河川堤防の沈下やすべり破壊の被害，港湾施設での岸壁等の被害が数多く発生している。そのため，各地で河川堤防や港湾施設を初めとする既設構造物の液状化対策が実施されるようになった。

東日本大震災においては，東京の湾岸地区の住宅地でも液状化の被害が発生した。近年では病院施設や高層住宅をはじめとして建築物の液状化対策も増加しているが，東京湾岸地区の事例にみられるように，戸建て住宅の液状化対策についても検討が進もうとしている。

3.　設計法の変化

地盤改良工法において改良効果の信頼性を保つには，その設計方法が重要な意味を持つ。地盤改良の設計では改良原理によって用いる理論も異なることが多く，独特な面がある。寺師[14]は，地盤改良の設計を地盤設計とプロセス設計とに区別して説明している。地盤設計とは，沈下や安定等の性能を満足するために必要な改良体の性能を意味し，プロセス設計とは，個別の工法においてその改良仕様を満足するために必要な手順のことを言う。

地盤設計についてみれば，従来は円弧すべりや支持力の安全率が用いられていたが，現在は性能設計の考え方が導入され，レベル1地震動やレベル2地震動に対して限界状態が設定されている。また，動的変形解析による照査が実施されている。こうした流れの中で，改良された地盤の性能を正しく評価することができるかは，今後の課題といえる。地盤改良を行う対象が小規模建築物まで広がってきた現在，改良効果の信頼性に関してさまざまなリスクが存在すると言えるが，そのリスクの存在についての議論を進める必要があると考えられる。

次に，改良原理ごとに設計法の変化について述べる。バーチカルドレーン工法では，沈下量と沈下速度が問題となるが，ばらつきのある地盤において精度よく沈下量を推定するために，動態観測に基づく沈下管理手法の利用が進んだ。プロセス設計について言えば，バーチカルドレーンの連続性やウェルレジスタンスの考慮が重要である。また，グラベルドレーン工法等の排水工法は，その改良原理からレベル2地震動での適用性が議論されており，今後の課題といえる。

SCP工法では，粘性土地盤の陸上施工で置換率の低い場合は複合地盤としての設計法が用いられる。海上施工では高置換率の設計法が用いられていたが，その後，低置換率の設計法も確立された。液状化対策としては方法Aから方法Dまでの設計法が提案されてきた。現在，締固めの設計法として，その他の方法も提案されている[15]。

固結工法の設計では，改良体を杭状に打設して複合地盤と考える方法と，ブロック状に全面改良して構造物

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

（ケーソンのように地中に埋設されたもの）として考える方法の二つがある。その他に，格子状改良によりせん断変形を抑制する液状化対策（TOFT 工法）や，低改良率の杭状改良による沈下抑制工法（ALiCC 工法）などが開発され，改良形式の多様化が進んでいる[16]。また，基礎杭の周囲を固化改良して地盤の水平抵抗を考慮する設計法（複合地盤杭工法）が提案され，地盤反力係数の評価手法についても検討が行われている。

4.　新技術の開発

現在は，新たな臨海埋立地や人工島の造成の計画は少なく，地方の高速道路網の建設も完成に近づいてきている状況である。むしろ，これまでに構築されたインフラの維持管理に重点が移ろうとしている。また，東日本大震災の被害を鑑みると，国土の強靭化が必要とされ，将来発生が予想される地震に対して構造物や地盤の性能が確保できるような対策が必要とされている。そのため，既設構造物の耐震対策工法の開発が熱心に進められている。

最近10年に開発が進んだ技術として，薬液注入工法，高圧噴射撹拌工法，静的圧入締固め工法が挙げられる。いずれも既設構造物の近傍や直下での施工が可能な液状化対策工法である。これらの工法では，大型の機械を用いずに，小型施工機を用いる傾向が進んでいる。そのため，コストの増加が課題といえる。

薬液注入工法の分野では，特殊な薬液を地盤中に注入する浸透固化処理工法が開発され，既設構造物直下の液状化対策としての適用が増加している。高圧噴射工法の分野では，機械撹拌式の深層混合処理工法と同様に径の拡大を求める動きが近年の動向である。さらに，近年では円形の改良体だけでなく，扇形や長方形等の様々な形状の改良体の造成も実施されている。

本稿ではほとんど触れていないが，土壌汚染対策の分野でも地盤改良工法が適用されている。2003年の土壌汚染対策法の施行により，工場跡地などでの対策が実施されるようになっている。

5.　おわりに

地盤改良工法は，当初は小規模なものであったが，大規模な建設工事に対応すべく，機械の大型化や作業船の建設が進められ，建設需要に対応してきた。近年では新たな埋立工事は減少し，代わって市街地等での液状化対策として既設構造物の近傍や直下の改良が必要とされている。これらに対応できる施工技術が求められており，新たな小型化の波が始まっている。地盤改良工法の設計・施工においては改良効果や周辺影響等のリスクが存在するが，多様なニーズに対応すべく，技術の進歩とともに改良工法も変化していくものと考えられる。

本稿をまとめるに当たり，直接・間接に多くの方々の力をお借りしました。ここに感謝の意を表します。

参　考　文　献

1）土質工学会編：土質工学ケースヒストリー集第１集，1983.
2）建設産業調査会：土木・建設技術者のための最新軟弱地盤ハンドブック，1984.
3）土木学会編：日本土木史（昭和41年～平成２年，1966～1990），1995.
4）北詰昌樹：地盤改良工法の最近の技術と今後の展望，地盤工学会誌，Vol. 60, No. 6, pp. 1～3, 2012.
5）松尾新一郎編：土質安定工法便覧，日刊工業新聞社，1972.
6）土質工学会：軟弱地盤対策工法―調査・設計から施工まで―，1988.
7）地盤工学会：地盤改良工法の調査・設計と施工―戸建住宅から人工島まで―，2013.
8）プラスチックドレーン工法研究会編：プラスチックドレーン工法その理論と実際，鹿島出版会，2009.
9）㈳セメント協会編：セメント系固化材による地盤改良マニュアル（第４版），技報堂出版，2012.
10）御手洗義夫・大谷　順・安原一哉・菊池喜昭：新しい機能を有するリサイクル材を用いた固化処理技術，土と基礎，Vol. 54, No. 7, pp. 22～24, 2006.
11）北詰昌樹・佐藤恒夫：管中混合固化処理工法，基礎工，Vol. 30, No. 10, pp. 57～59, 2002.
12）㈳日本電力建設業協会：電力土木における地盤改良工法と施工事例昭和63年平成元年事業年度技術部会報告書，1990.
13）㈳日本電力建設業協会：液状化対策工法と施工事例平成４年平成５年事業年度技術部会報告書，1993.
14）寺師昌明：機械式撹拌工法の技術的課題と展望，基礎工，Vol. 37, No. 5, pp. 2～7, 2009.
15）地盤工学会編：「4.4静的締固め工法」，打戻し施工によるサンドコンパクションパイル工法設計・施工マニュアル，2009.
16）深田　久：軟弱地盤対策工法の最近10年の動向，地盤工学会誌，Vol. 58, No. 1, pp. 30～31, 2010.

（原稿受理　2015.4.27）

NII-Electronic Library Service