

わが国における軟弱地盤改良工の歴史的展開

Historical Development of Soil Improvement Works in Japan

奥村樹郎 Tatsuro OKUMURA (岡山大学環境理工学部)



世界でも有数の軟弱地盤国であるわが国の地盤改良工についてその歴史的経緯をまとめた。古くは置換工法が殆ど唯一の地盤改良法であったが、戦後は圧密理論に裏打ちされたバーチカドレーン工法が導入され、更にバイプロフローテーション工法や動圧密工法がこれに続いた。一方、戦後十数年を経てわが国独自の技術もしだいに開発されるようになり、サンドコンパクションパイル工法、生石灰杭工法、深層混合処理工法などが活用されることとなった。今後の方向としては既存の工法の設計法・施工法の一層の合理化とともに環境に配慮した工法や地盤環境を改善させる工法の開発が望まれる。

キーワード：地盤改良，置換，圧密，締固め，化学的固化 (IGC：A-1, A-2, K-6)

1. まえがき

わが国は世界でも有数の軟弱地盤国である。国土の70%が山岳地帯であり、急峻な山と急勾配の川に降雨量も多いという特質から河口部での堆積速度が大きく、沖

積層が厚くて年代効果をあまり受けていないのが一因と考えられる。また、軟弱地盤が多いというだけでなく、過密な人口が河口の平野部に集中していることから軟弱地盤を避けて構造物を作るという選択ができず、社会資

表－1 軟弱地盤改良工法の分類¹⁾

基本原理	工法名	備考
置換	置換工法	爆破置換・強制置換を含む
排水	プレローディング工法	主として粘性土の排水による圧密効果に期待
	バーチカドレーン工法	
	生石灰杭工法	
	真空圧密工法	
	電気浸透工法	主として砂質土の排水による水位低下に力点がおかれるが、圧密荷重の増大にも利用される
	ウェルポイント工法	
	ディープウェル工法	
圧縮	グラベルドレーン工法	液状化対策
	締固め杭工法	砂質土の密度増大、転圧も含む
	サンドコンパクションパイル工法	
	バイプロフローテーション工法	
	重錘落下締固め工法	
	爆破締固め工法	
化学的固化	電気衝撃工法	路盤材料の改良を含む
	混合処理工法（浅層・深層）	
	噴射攪拌工法	
	注入工法	
	電気化学的固結法（生石灰杭工法）	杭体の固化を期待する場合
熱処理	焼結工法	一時的な固化
	凍結工法	
補強	シート工法、ネット工法	敷そだ、ロープネットなどを含む
	補強土工法	粘性土を対象とする場合
	サンドコンパクションパイル工法	
	深層混合処理工法	噴射攪拌工法を含む

本の投資効率を著しく悪くしているのが実情である。

こうしてわが国は世界で最も軟弱地盤改良工事の多い国となっており、現在では細分すれば数十種類の地盤改良工法が活用されている。

わが国の軟弱地盤改良工法は戦後の十数年間、欧米の先進国から導入されることが多く、新しい工法の発明・開発はほとんど見られなかった。ただ、当時の日本の技術の特徴として施工法の改良や施工機械の大型化は進められた。その後、新しい工法の技術導入ばかりでなく、わが国独自の開発も盛んとなり、現在では独自開発技術が全体でもかなりの部分を占めるようになってきている。

本文では初めにわが国で採用されている軟弱地盤改良工の種類と特徴を概観し、次いで主な工法の歴史とその盛衰についてまとめた。

2. 軟弱地盤改良工の種類と特徴

わが国で採用されている軟弱地盤改良工は細分すれば数十種類にも達する。しかも、一時ほどではないにせよ、日進月歩で改良が加えられ、新しい工法が出現している。また各種の工法を組み合わせることも行われてい

る。このため、すべての工法を整然と分類することは困難であり、また、人により分類の仕方にさまざまな考えがあつて統一的な分類法はない。ここでは極く一般的に知られている代表的な工法を取り上げ、筆者の主観をまじえた分類を表-1に示す¹⁾。

各工法の利用面からみた特徴をこれも筆者の主観をまじえて表-2に示す¹⁾。ここで設計精度の低いものや施工管理の必要性の大きいものは今後の課題や研究の必要性も大きいことになる。

一般的に言えることは各工法とも実用が先行し、設計法が必ずしも確立していないことである。設計法は施工法やその精度（改良土の品質や施工位置などのばらつき）によって変わるものであり、現場の改良効果をも勘案する必要がある。ところが改良効果や精度を確認するための調査法が確立していないことが多く、またデータが不十分で設計法の改善にまで至らないことが多い。共通的な今後の課題といえよう。

各種の地盤改良工法がいつの時期から実用化されたかをまとめると表-3のようである。すなわち、戦前は置換工法が殆ど唯一の地盤改良法であり、補助工法として

表-2 地盤改良工法の特徴¹⁾

分類	工 法 の 名 称	摘 要	目 的				対象土質		改良効果	施工工期	工 費	施工実績	設計精度	可能規模	施工管理の性	環境への影響
			強度増加	沈下防止	浮上防止	凍結防止	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
	バーチカルドレン															
	サンドドレン工法		○	○	×	×	○	×	中	中	中	多	優	大	大	小
	プラスチックドレン工法		○	○	×	×	○	×	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	大	小
	生石灰杭工法		○	○	△	×	○	△	中	中	中	多	良	大	中	中
	グラベルドレン工法	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	○	○	○	×	○	○	大	短	中	多	優	大	中	中
	バイプ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
	重錘落下締固め工法		○	△	○	×	×	○	中	短	中	中	良	中	中	大
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	中	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	高	少	良	中	中	小
	薬液注入工法	化学的充填固法	△	×	○	○	×	○	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

表－3 主な軟弱地盤対策工法のわが国における発展過程（CDM研究会マニュアル）

改良原理	工学的的方法	工 法 例	実 用 時 期						
			1930年代	1940年代	1950年代	1960年代	1970年代	1980年代	1990年代
置 換	掘削置換	浚渫置換工法							
	強制置換	強制置換工法				1966			
脱 水	自然圧密	プレローディング工法	1928						
	加圧脱水	サンドドレーン工法			1952				
		袋詰めサンドドレーン工法				1967			
		ボード系ドレーン工法				1963			
	負圧脱水	ディープウェル工法		1944					
		ウェルポイント工法			1953				
		大気圧載荷工法					1971		
	化学的脱水	生石灰バイル工法				1963			
密度増大	脱水・締固め	サンドコンパクションパイル工法			1957				
		砕石砂利グイ工法				1965			
	締固め	振動締固め			1955				
		衝撃締固め					1973		
固 結	攪拌混合	表層混合処理工法					1972		
		深層混合処理工法					1974		
	噴射混合	噴射攪拌工法						1981	
接地圧軽減	荷重分散	敷そだ沈床工法							
		シート・ネット工法				1962			
		サンドマット工法							
		表層固化工法					1970		
	荷重のバランス	押し盛土工法							

そだ沈床や杭基礎が用いられる程度であった。戦後、1950年代に圧密理論に裏打ちされたプレローディング工法、サンドドレーン工法やカードボードドレーン工法が導入され、続いてバイプロフローテーション工法、薬液注入工法、やや遅れて動圧密工法（重錘落下締固め工法）などが導入されて地盤改良メニューが豊富となった。一方、戦後10年を経てわが国独自の技術もしだいに開発されるようになり、サンドコンパクションパイル工法、生石灰杭工法、やや遅れて深層混合処理工法などが実用されることとなった。全体的にみて1950年代から70年代にかけて多くの新しい工法が実用化されていることが判る。

3. 各工法の歴史的展開

3.1 置換工法

置換工法は最も古い地盤改良工である。通常、掘削機あるいは浚渫船により軟弱な粘性土を掘削除去し、良質の砂質土を充填する「掘削置換工法」が近代的な置換工法の主流である。この他に築堤のような上載荷重により滑り破壊を起こさせ、強制的に軟弱粘性土を排除して上載土砂と入れ替える「強制置換工法」がある。また、これを一歩進めて上載土砂に注水したり軟弱地盤に爆薬を仕掛けたりして破壊を助ける「爆破置換工法」も行われる²⁾。

表－4 港湾における地盤改良工事、1965－1975（運輸省港湾局）³⁾

	件数 (%)	改良延長・m (%)
置換	120(68)	41,222(76)
バーチカルドレーン	26(15)	7,459(14)
サンドコンパクションパイル	23(13)	4,106(8)
その他	7(4)	1,355(2)
計	176(100)	54,142(100)

江戸時代、河川堤防の築造に関して「お化け丁場」で難儀した話が伝わっている。これは築堤土砂が一夜のうちに滑り破壊を起こし、軟弱地盤中に没して姿を消したもので、意図せずに強制置換工法が行われ、軟弱地盤が改良されていたものである。現在でも軟弱粘土による埋立地で工事用道路を先行させる場合など、この強制置換工法が施工されているケースは多い。こうして置換工法は軟弱地盤改良工法のうち最も長い歴史を持っている。

強制置換工法は最も安価で省エネルギーの工法であるが、置換断面を規制することができず、軟弱粘土を不規則に残して更なる破壊や不同沈下の原因となることが多い。このため、近年の建設工事では掘削置換工法が主流となっている。高度経済成長が華やかな頃には本工法が最も盛んで、他の工法を圧していた。表-4はその一例で、1970年代の港湾工事では地盤改良の3/4が掘削置換工法であったことを示している³⁾。

しかし、最近では掘削粘土の捨て場所がなくなり、良質砂の確保が困難となり、また、掘削に伴う海の濁りなど環境問題が厳しくなって本工法もすたれてきた。殊に阪神大震災で神戸港の岸壁や防波堤が置換部の液状化によって大変位・変形を起こしたことから、置換工法は液状化に弱いことが判明し、今後は更に採用が控えられることとなろう。

3.2 サンドドレーン工法

1923年、テルツァーゴの圧密理論が公表され、1925年、Erdbaumechanik が出版されるに及んで軟弱粘性土地盤の沈下問題が工学的に計算できることとなった。サンドドレーン工法はこの圧密理論から排水距離が半分になれば圧密時間が1/4になる性質を応用したもので、アメリカのPorterによって提案され⁴⁾、1934年、サンフランシスコ、オークランド橋東詰めの盛土基礎に初めて採用された。1948年にはBarronによって3次元圧密の理論付けがなされている⁵⁾。

わが国には石井靖丸によって技術が導入され、1952年、長崎漁港の岸壁復旧工事に初めて採用された⁶⁾。陸上工事では岡山県の金浦道路が最初である⁷⁾。その後サンドドレーン工法は次第に発展し、1959年の伊勢湾台風による災害の対策事業として建設された名古屋港高潮防波堤では5万本のサンドパイルが打設されている⁸⁾。しかしこの頃、陸上の道路盛土などの経験からサンドドレーン無効論が台頭し、一時は論争が巻き起こったが⁹⁾、少なくとも強度に関しては、また、土質が比較的一様な海上部においては有効であることが結論付けられ、関西国際空港の第一期埋立て工事では100万本が打設されている。サンドドレーンの年次別打設延長例を図-1に示す。

サンドドレーンの施工で最大の問題はサンドパイルの砂切れである。殊に、超軟弱の地盤や側方変位の大きい場合にはその危険性が高い。これを防ぐために砂を袋詰めにするファブリックドレーンが開発導入され、1967年から埋立地などで活用されている¹⁰⁾。東京国際空港の沖合展開においてもこの方式のサンドドレーンが多数打設された。

3.3 その他のバーチカルドレーン工法

サンドドレーンよりやや遅れてカードボードドレーン（ペーパードレーン）が開発され¹¹⁾、欧州で広く使われた。わが国には1963年に導入されている¹²⁾。しかし、カードボードの材質はボール紙で、折れたりカビが生えたりして目詰まりを起こしやすい。代わって合成樹脂製のプラスチックボードドレーンが各種考案され、現在ではカードボードは使われていない。

プラスチックドレーンは当初陸上のみで使われていたが、最近は海上工事にも適用されるようになった。プラスチックドレーンは透水材料としての性能は良いものの環境面からはあまり好ましくないので、椰子の繊維を使うファイバードレーンが最近試みられている。

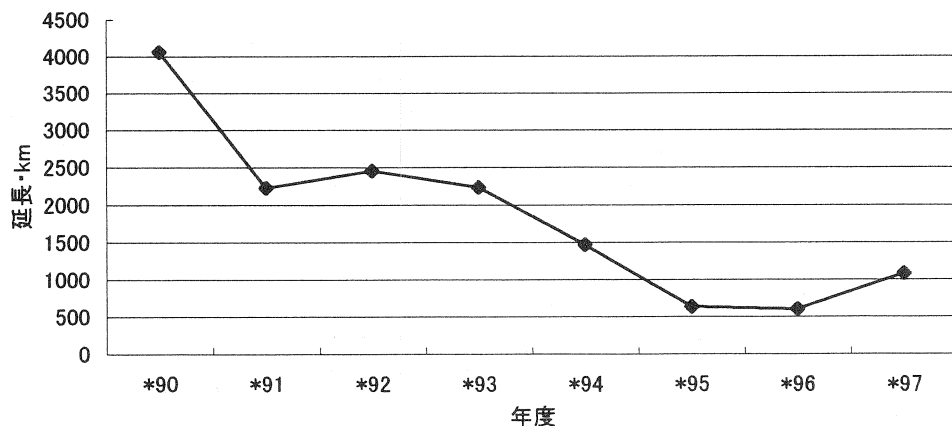


図-1 サンドドレーン打設延長例（日本海工）

3.4 サンドコンパクションパイル工法

サンドコンパクションパイル工法は現在最も多く使われている地盤改良法である。1例として最近の港湾工事に使われた地盤改良工種を表-5に示す。本工法はもともと緩い砂質土地盤を締固めるため、わが国で開発されたもので、1957年から実用化されている¹³⁾。その後、砂質土ばかりでなく、粘性土にも適用されるようになり、現在ではむしろ粘性土の方が多い。もちろん、粘性土を締固めることはできないので、締まった砂杭とそれを取り囲む軟らかい粘性土から成る複合地盤として沈下や安定問題を解決しようとするものである。サンドコンパクションパイルの年次別打設延長を図-2、3に示す。

3.5 パイプフロートション工法

本工法はアメリカで開発され¹⁴⁾、サンドコンパクションパイル工法に先立って1955年にわが国に導入されている¹⁵⁾。しかし、わが国では前者ほど普及せず、粘

性土地盤への適用も行われていない。

3.6 生石灰杭工法

生石灰が水を吸うと発熱反応を起こして消石灰となり、2倍の体積に膨張する。生石灰杭工法は軟弱粘性土中に生石灰の柱を打ち込み、この化学反応を利用して地盤を改良しようとするもので、わが国で開発され、1963年より実用化されている¹⁶⁾。

生石灰が水を吸って消化しようとするポテンシャルは極めて高く、生石灰の柱は周りの土中から水分を奪って容易に消化する。その際、柱の体積が大きくなり、土を水平方向に圧縮するので土の脱水を容易にし、石灰の消化を助けるとともに土の圧密を促し、強度を増加させる。またこの化学変化は発熱反応であるから土を乾燥させる効果も持っている。さらに石灰と土とが接する部分ではボゾラン反応を起こし、また土中の炭酸分が炭酸カルシウムを形成して一層強度が増加する¹⁷⁾。

表-5 最近の港湾工事における地盤改良工事件数（運輸省港湾局）

	95	96	97	計	%
サンドコンパクションパイル	50	38	28	116	76
置換	4	6	4	14	9
深層混合処理	4	5	3	12	8
サンドドレーン	5	2	2	9	6
ロッドコンパクション	-	-	2	2	1
計	63	51	39	153	100

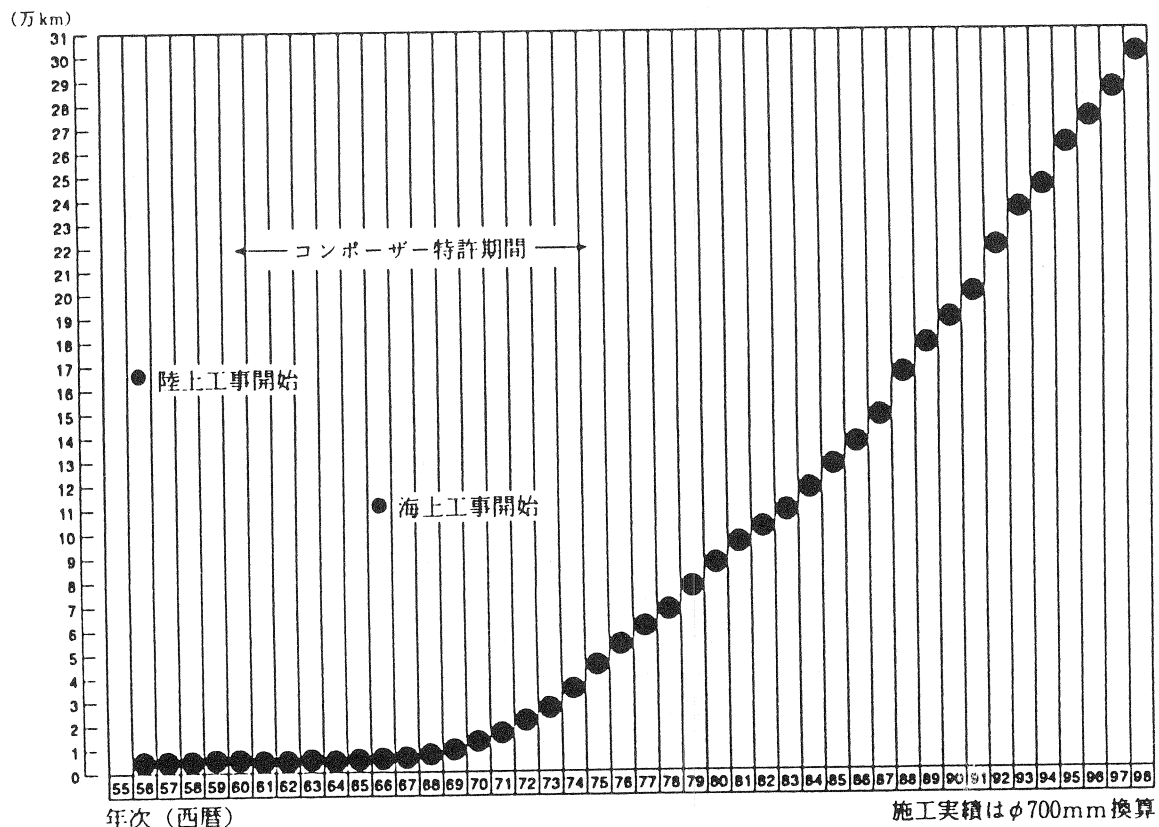


図-2 サンドコンパクションパイル累積打設延長例（不動建設）

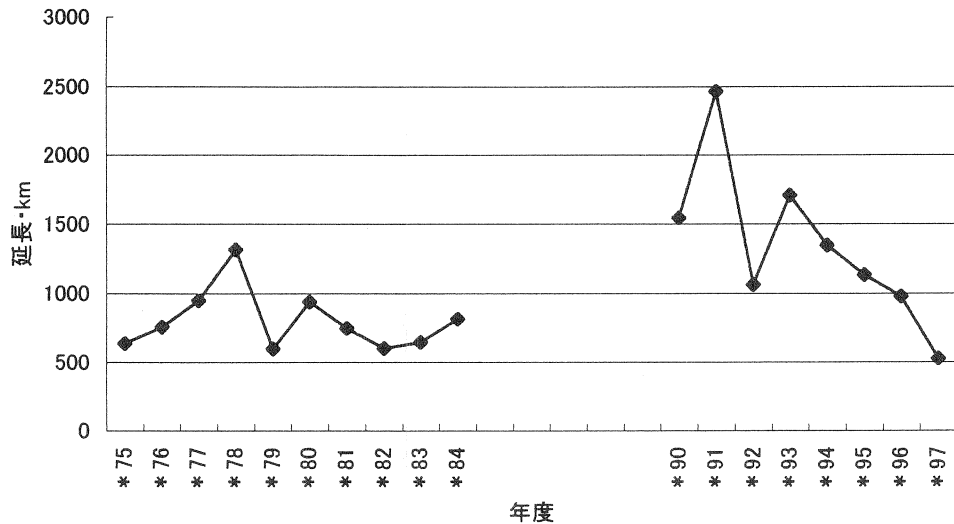


図-3 サンドコンパクションパイル年次別打設延長例（日本海工）

このように生石灰杭工法は脱水効果、圧縮効果、乾燥および化学的固結効果を併せ持つもので、その後も広く用いられている。しかし、本工法は海上工事に適用することができず、その改良効果もそれほど大きくないので、大規模工事にはあまり採用されていない。

3. 7 深層混合処理工法

深層混合処理工法は 1967 年から運輸省港湾技術研究所で開発が進められ、1974 年から実用が始まっている。工法の発想は生石灰杭工法の効果をより高め、ポゾラン反応をフルに活用すれば攪拌混合にエネルギーを消費しても効果あたりの費用は小さくなると考えたものである¹⁷⁾。同じ頃、スウェーデンでも同様の開発が進められ、その後ヨーロッパで広く使われている¹⁹⁾。

当初、安定材として塊状の生石灰から始まった深層混

合処理工法（DLM）は施工のむずかしさや品質のばらつきから間もなくセメントスラリー（CDM）に変わり、これが現在でも主流となっている。一方、スウェーデンの方式にならったセメント粉末（DJM）が 1980 年から陸上で用いられており、両者の施工実績は図-4、5 のようになっている。現在では両者とも設計・施工マニュアルができており^{20),21)}、歴史の浅い割には確立された工法といえよう。

3. 8 重錘落下締固め工法

重錘落下締固め工法は重錘をクレーンで高い所から繰り返し落下させ、その衝撃力で地盤の深部まで締固める比較的単純な地盤改良法である。この工法は 1960 年代後半、フランスのルイ・メナールによって開発され、わが国には 1973 年に導入された²²⁾。適用地盤は砂礫質ば

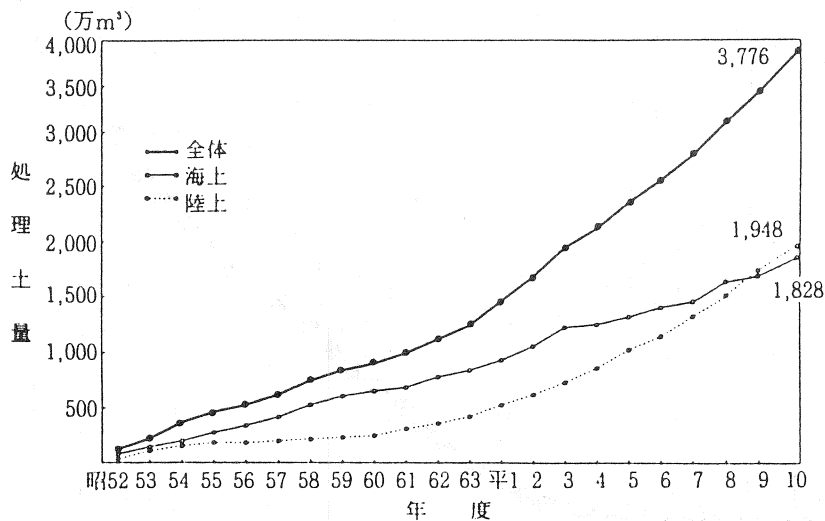


図-4 深層混合処理（CDM）累積処理土量（CDM 研究会）

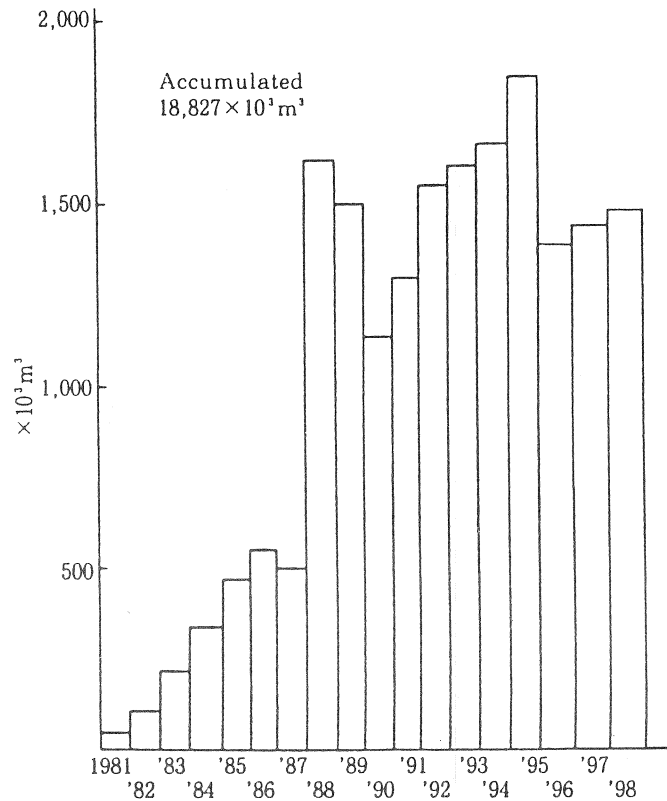


図-5 深層混合処理 (DJM) 年次別処理土量 (DJM 研究会)

かりでなく、粘性土地盤にも有効とされ、動圧密工法と呼ばれてきたが、わが国での試験施工から粘性土地盤にはあまり効果のないことが判った。むしろ、廃棄物埋立て地盤のようにケーシングやロッドが入りにくい所でその特質を発揮させることができ、施工例も増えている。

3. 9 グラベルドレーン工法

地震による液状化を防止する対策として締固めるのではなく、排水によって過剰間隙水圧を消散させる方法の代表的なものである。1965 年から実用化されている。締固めでは変状が大きくなって不都合な擁壁や岸壁の背

後などに適用される。砕石柱の代わりに人工のパイプを地盤中に挿入して排水路を確保する各種のドレーンパイプが考案されており、グラベルドレーン工法よりやや遅れて実用化されている²³⁾。

3. 10 真空圧密工法

スウェーデンの Kjellman によって提案された工法²⁴⁾で、わが国では 1971 年から実用されている¹²⁾。原理的には海底の軟弱地盤で大気圧と水圧とを合わせて利用するのが効果的であるが、海上では試験工事しか行われていない。陸上でも工事の規模は比較的小さいものが多い。

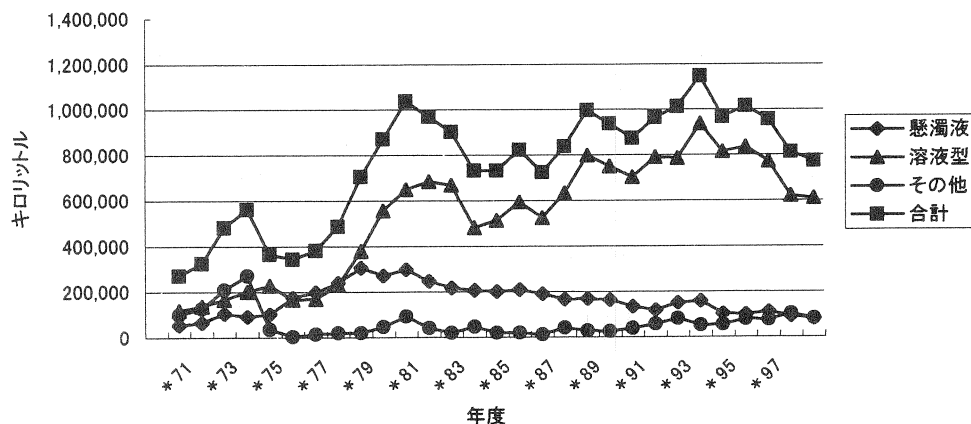


図-6 薬液注入年度別実績 (日本薬液注入協会)

3. 1.1 注入工法

セメントミルクや水ガラス溶液を砂質土地盤に注入して透水性を低減させたり強度を上げたりする注入工法は比較的早く、1950 年頃から実用されている。アクリルアミドなど合成樹脂製の薬液をシルト質の地盤にまで適用した 1973 年頃は本工法の最も華やかな時代であったが、これによる地下水汚染が明らかになり、薬液が水ガラスに限定されて、一時は火の消えたようになった（図－6 参照）。その後、技術開発が進み、現在では都市土木などに広く用いられている。ただし、一般に工費が高いため、小規模の適用が多い。

4. あとがき

わが国における軟弱地盤改良工についてその歴史的経緯を眺めてきたが、今後の建設事業がそれほど拡大するとは思われず、従って地盤改良工事も量的にはそれほど増加しないであろう。しかし、21 世紀の高齢化社会を迎え、地盤改良工においても一層の合理化と低価格化が求められている。そのためには従来工法の一層の合理化はもちろんであるが、一方では土の引張強度の不足を補う補強材を併用した複合的な地盤改良、いわゆる地盤改良のハイブリッド化の一層の発展などが必要となろう。また、地盤環境の改善のために各種の浄化対策、たとえばバイオレメディエーションの発展が要請されよう²⁵⁾。

参考文献

- 奥村樹郎：深層の地盤改良、基礎工、Vol. 14, No. 7, pp. 106-112, 1986
- 浅田秋江、森芳信：軟弱地盤における爆破置換工法が周辺に及ぼす振動について、第 3 回土質工学研究発表会講演集、pp. 35-38, 1968
- 運輸省港湾技術研究所土質部：最近の土質・基礎工法に関する諸問題、5. 最近の地盤改良工法、第 26 回直轄港湾技術研究会報告資料、No. 9、pp. 44-55, 1975
- Porter, O.J.: Studies of fill construction over mud flats including a description of experimental construction using vertical sand drains to hasten stabilization, Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng. Vol. 1, p. 229, 1936
- 土木学会編：日本土木史—1966-1990—、pp. 1158-1159, 1995
- 石井靖丸、矢内保夫：サンドドレーン工法、土と基礎、Vol. 1, No. 3, pp. 16-22, 1953
- 青柳晴一、山根孟、竹下春見：金浦道路におけるサンドパイル工法について、土と基礎、Vol. 1, No. 1, pp. 17-21, 1953
- 奥村樹郎：軟弱地盤における工事実施例、第 4 章、港湾一名古屋港高潮防波堤一、pp. 115-137、土質工学会、1966
- 木庭宏美、野村健司、小林正樹：サンドドレーン工法の効果、第 15 回土質工学シンポジウム論文集、pp. 29-34, 1970
- 岡林郁夫：パックドレーン工法、施工技術、Vol. 5, No. 6, pp. 57-62, 1972
- Kjellman, W.: Accelerating consolidation of fine-grained soils by means of card-board wicks, Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mech. & Found. Eng., Vol. 2, pp. 302-305, 1948
- 五洋建設技術研究所編：ペーパードレーン工法と大気圧工法、理工図書、215p., 1968
- 庄野勝、小川充郎：コンポーザー工法の実施例について—サンド・コンパクション・パイル工法による土質安定工法—、土と基礎、特集号、No. 4, pp. 42-46, 1961
- D'Appolonia, E.: Loose Sands—Their Compaction by Vibroflotation, ASTM, STP 156, pp. 138-154, 1953
- 福田秀夫、佐川嘉胤：パイプロフローテーション工事実績、鹿島建設技術研究所年報、No. 9, p. 93, 1960
- 伊藤範雄編：生石灰による地盤改良、150p., 日刊工業新聞社、1969
- 奥村樹郎：生石灰杭工法の設計法について、第 11 回土質工学研究発表会講演集、pp. 1097-1100, 1976
- 奥村樹郎、他：石灰による深層混合処理工法（第 1 報）、港湾技術研究所報告、Vol. 11, No. 1, pp. 67-106, 1972
- Rathmayer, H.: Deep Mixing Method for soft subsoil improvement in Nordic Countries, Proc. 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geo-systems, Vol. 2, pp. 869-877, 1997
- 沿岸開発技術研究センター：海上工事における深層混合処理工法技術マニュアル、226 p., 1999
- 土木研究センター：陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル、326 p., 1999
- 山田正俊：動圧密工法、土と基礎、Vol. 29, No. 5, pp. 21-28, 1981
- 吉見吉昭：砂地盤の液状化、技報堂出版、159 p., 1980
- Kjellman, W.: Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure, Proc. Conf. Soil Stabilization, M.I.T., 1952
- 西垣誠：土壌・地下水汚染と対策、土と基礎、Vol. 47, No. 10, pp. 1-4, 1999