

各種構造物の実例にみる地盤改良工法の選定と設計

3. 各種構造物における実例 3.1 建築構造物

鈴木 吉夫 (すずき よしお)

(株)竹中工務店 技術研究所

福井 實 (ふくいみのる)

(株)日建ソイルリサーチ

大杉 文哉 (おおすぎ ふみや)

(株)久米設計 構造設計部

はじめに

建築工事に伴う地盤改良の検討は、建築物の基礎構造の補強、掘削時の地盤の安定性の確保および建設用重機のトラフィカビリティの確保などを目的に実施されるものが多い。基礎構造の補強としては、杭基礎および直接基礎が対象となる。杭基礎の場合、基礎構造に求められている鉛直方向の諸機能は杭によって確保されるので、地盤改良は杭の水平方向の諸機能の補強・増強を対象とする観点から工法選択の検討がなされる事が多い。直接基礎の場合、鉛直方向および水平方向の両方に対する諸機能の補強・増強が対象となるため、杭基礎の場合に比べて地盤改良への要求レベルが高く、地盤改良工法の選択の余地が少ない。掘削による根切り底あるいは根切り周辺の地盤の安定性の確保を対象とした地盤改良についても、敷地のごく近傍に建築物や鉄道などのようにわずかな変位も嫌うような近接構造物の存在する機会が多く、地盤改良工法の検討は慎重に実施することが要求される。また建築工事は市街地で施工されることが多く、近隣に対する騒音・振動・臭気・廃棄物・景観などへの十分な配慮が要求され、地盤改良工法の選択に大きな影響を持っている。

本節では、基礎地盤の諸機能の補強・増強を目的に実施した建築工事における地盤改良工法の三つの検討事例を紹介する。

3.1.1 深層混合処理工法を用いた杭基礎の液状化対策

臨海地域に大型のプラントを収納する建築物が計画された。高架式道路の橋脚や大型共同溝が近接していた。建物の概要を図-3.1.1に示す。敷地は軟弱な粘性土が堆積した旧海底地盤を砂質土で埋め立てた地盤であり(図-3.1.2)、建物の鉛直支持は杭基礎を用いて軟弱粘性土層の下にある礫層を利用した。杭基礎の水平支持力の検討に当たり埋立砂層の液状化対策が必要となり、地盤改良を含めた基礎工法について表-3.1.1のような項目での検討がなされた。杭基礎のみでは液状化した場合には杭基礎の仕様がコストの高いものになるため、何らかの地盤改良を実施して杭基礎の水平抵抗を増強し、杭と地盤改良を併用することになった。地盤改良工法の選

建築面積：約1.2万 m²
階 数：地下2階 地上6階
最高高さ：35 m
煙突最高高さ：140 m
軒 高：34.8 m
最大根切り深さ：21.5 m
地 業：場所打ちコンクリート杭
(拡底アースドリル工法)

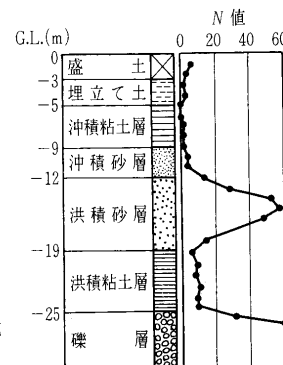


図-3.1.1 建物の概要

図-3.1.2 敷地の土層断面

表-3.1.1 当該施設に適した液状化対策工法の検討

工法	杭のみ	杭+ 締め固め砂	杭+ 砕石のドレーン	杭+ 深層混合処理
項目				
地盤への適性が良い	×	◎	△	○
改良地盤の外周の平面積が小さい	◎	△	△	○
近接構造物への影響が少ない	◎	×	△	○
振動・騒音が少ない	◎	×	△	○
総合評価	○	×	△	◎

択に当たっては、①市街地での工事のため騒音・振動が少ない、②建物の外壁より外側の改良範囲が少ない、③近接構造物への影響が少ないなどの点から、深層混合処理工法が選ばれた。

深層混合処理工法による杭基礎の液状化対策の詳細設計を行うにあたり、設計と施工の両面から工事全体の検討を実施した。検討に当たっては建物のほかに施設内の共同溝の工事や地下階の特殊な施工条件が取り上げられた。図-3.1.3にその検討項目を示す。それらを整理すると、①地下階の面積が大きく根切り底の形状・寸法が複雑である、②地下外壁の外部側の防水工事(外防水)を行うため、オープンカットが必要である、③地下水位が高く、施工時に止水壁が必要である、④工期が短いので施工の工種を減らして施工の効率を上げる必要がある。これらの条件を考慮して図-3.1.4のような3種類の工法について検討した結果、C案が最適であると結論づけられた。

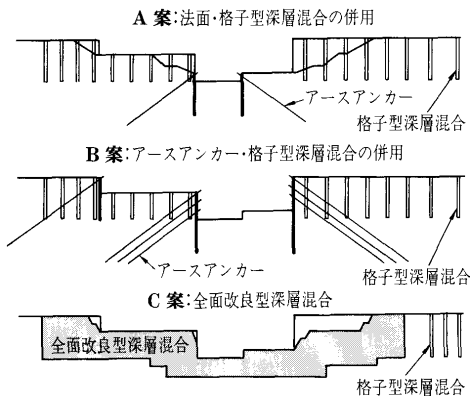
この事例は、地盤改良工法の選択の際には、単に基礎

講 座

地盤条件	特殊条件
1. 埋立地の軟弱地盤 2. 海岸近くの地下水量多大 3. 高速道路、下水処理場に近接した大規模地下工事 4. 複雑な根切り形状 5. 液状化対策が必要	1. 短工期で膨大な施工数量の消化 2. 外防水が必要 3. 近接工事への安全対策

図—3.1.3 当事例の特徴

項 目	(A 案) 法面・格子型 深層混合	(B 案) アースアンカー・ 格子型深層混合	(C 案) 全面改良型 深層混合
液状化対策	◎	○	◎
杭頭拘束	×	×	◎
底盤改良	×	×	◎
止水性	×	○	◎
埋戻し量	×	◎	○
トラフィカビリティ	○	○	◎
地山の安定	×	○	◎
総合評価	×	○	◎



図—3.1.4 当事例での深層混合処理工法による工法の検討

の支持力機能だけでなく、工種の低減など工事の全体を見わたしてその工法を検討する必要がある場合として紹介した。(鈴木 吉夫)

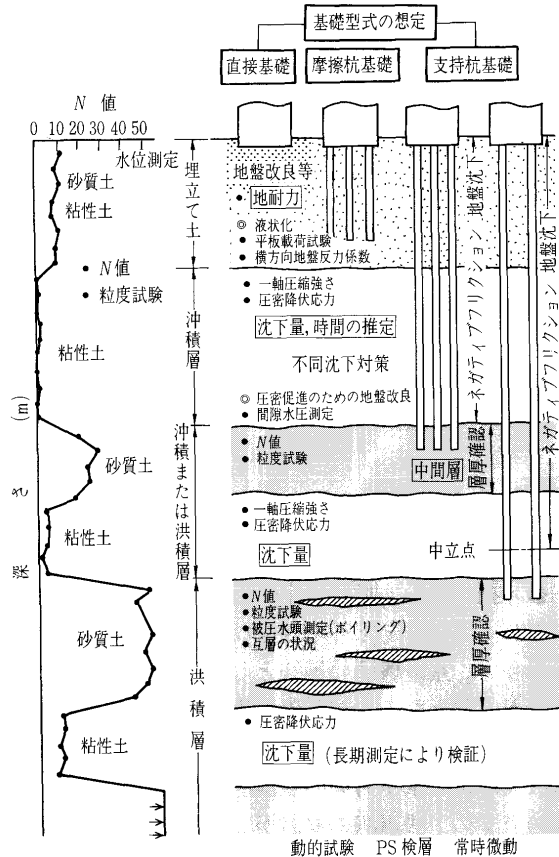
3.1.2 サンドドレーンとプレローディング工法を用いた地盤沈下対策

大阪湾の北部に位置する神戸ポートアイランド、六甲アイランド、大阪南港においても各種建築構造物が建設されているが、問題点の第1は地盤沈下である。これらの埋立地は海底粘土(層厚10~15 m)の上に土砂を投入して造成されているために、この海底粘土が圧密沈下を生じ数 m の沈下量に達するケースもあり、敷地造成完了後の残留沈下量が1~2 m にも予測されるケースがある。本事例では神戸ポートアイランドにおける住宅用地の地盤沈下対策について参考文献1)~6)をもとにまとめ、兵庫県南部地震後の知見を加えたものである。

(1) 建築計画と地盤調査計画

埋立地での技術課題は、大きくは埋立土層の液状化、沖積および洪積粘土層の圧密沈下、支持層の地耐力評価に分けることができる。さらに対象により、動的問題、あるいは掘削などの施工上の技術課題が加わる。

図—3.1.5は各基礎形式ごとに技術課題、調査項目を

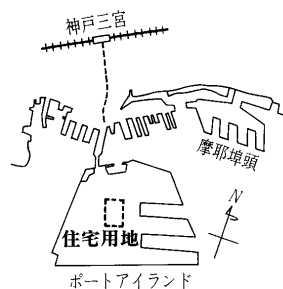


図—3.1.5 基礎形式と地質検査検討項目

まとめたものである。建築計画立案と同時に地盤調査計画を立案するが、基礎形式を想定した地盤調査計画が必要である。直接基礎、摩擦杭基礎のケースでは、埋立層の支持力、沈下量の把握、支持杭基礎のケースでは、支持層以浅の沈下量の予測、ネガティブフリクション発生の有無、支持層およびそれ以深の沈下量の予測など総合的な検討が必要である。1965年頃から地盤沈下の著しい地域の建物に障害が次々と表面化してきたが、これは支持杭に作用する負の摩擦力(ネガティブフリクション)による不同沈下現象と建物の相対的な拔上り現象であった。その後、研究・実験が実施され、杭は先端拡張杭とし、上部にアスファルトコンパウンド塗布する支持杭が採用されている。

(2) 地盤沈下対策と基礎工法

本計画地は、島中央部の380×440 m の大規模住宅用地である(図—3.1.6)。この区域に8階建~14階建の住宅が多数建設されている。建築構造は鉄骨鉄筋コンクリート造で、地盤に対しては12~20 tf/m² の荷重を与えるので、建物を直接埋立地盤上に設置することは適さず、基礎工法として、海底粘土の下部に存在する洪積層を支持層とする支持杭基礎が採用された。支持杭にすると沖積層の圧密沈下により建物と地盤とに段差が生じる。住宅地は高齢者から幼児まで多くの方が生活されるので、建物と地盤とに段差が生じると生活上不便であるばかりでなく、危険が伴うので厳に避けねばならない。この意味から本敷地においては、沖積粘土層の圧密沈下を促進する方法が主要な課題となった。工法として、プレローディングのみによる方法、サンドドレーンとプレローデ



図—3.1.6 付近見取図

ィング併用工法が検討された。検討項目は以下のとおりである。

- i) プレローディングのみで工期内で圧密沈下が終了するか
- ii) 工程上、必要な盛土期間が確保できるか
- iii) 必要な盛土等の土砂が確保できるか
- iv) サンドドレーン打設に際して、近隣に迷惑がからないか
- v) 敷地が広いが、区域別に圧密沈下量が把握できているか

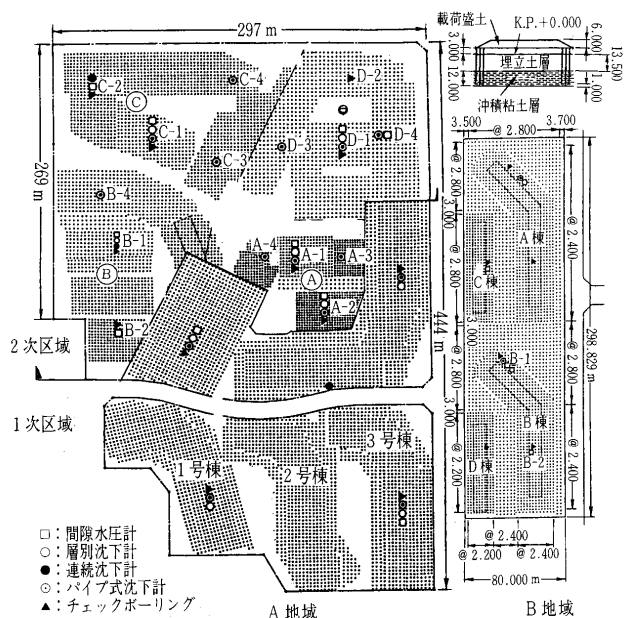
以上の検討の結果、近隣に家が建っていない、盛土は確保できる、プレローディング工法のみでは工期上問題がある等の理由により、残留沈下量の圧密促進が意図どおり可能なサンドドレーンとプレローディング併用工法が採用された。

(3) 地盤改良の設計と沈下計測

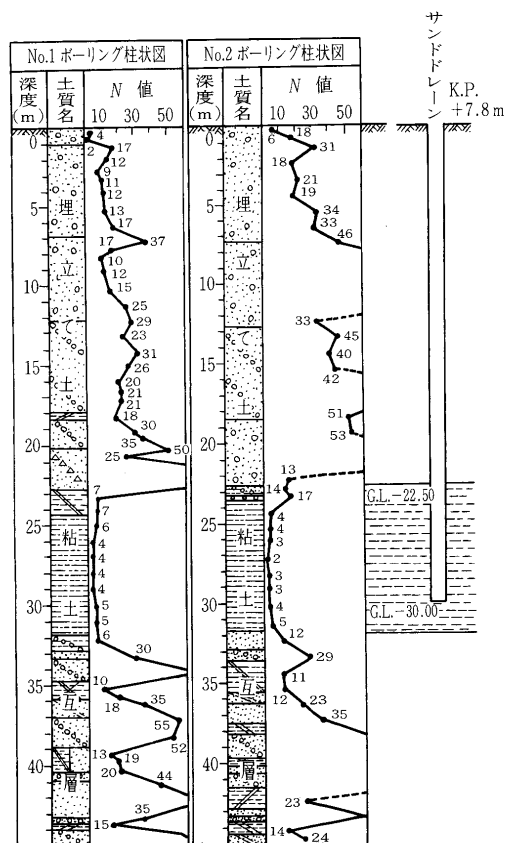
地盤改良の目的は埋立土層の下にある旧海底粘土層の圧密促進である。図—3.1.7に実例として紹介する敷地のサンドドレーン配置図を、図—3.1.8に土質柱状図の1例を示す。土質調査に基づいて沖積粘土層の圧密沈下量を一次元圧密理論式を用いて計算すると、図—3.1.7の左側A地域では約60 cm、B地域では47 cmであった。サンドドレーン径は50 cm、埋込み深度はG.L.-30 mとした。サンドドレーンの間隔とプレロードの高さおよび盛土期間は建物棟ごとに緻密に設計した結果、サンドドレーンの配置は2.0×2.0～3.2×3.2 m、盛土高さは5.5～10 m、盛土期間は200～360日であった。図—3.1.7中に1次2次区域とあるのは工事が2期に分かれて実施されたものである。1977年当時このような長尺のサンドドレーンの実績は少なく、総本数約14 500本が慎重に施工された。今回の実施例では、建物配置が既に設定されていたので、サンドドレーン工事は陸上施工となった。盛土を撤去する時点では必ずチェックボーリングを行い、土質定数（間隙比、含水比、圧密降伏応力、一軸圧縮強さ）を求め、予測値に達しているかを確認し、地盤沈下計測結果とあわせ検討のうえ盛土撤去時期の判断を行った。図—3.1.7中に観測計画の配置を示したが、現場管理は重要なポイントである。図—3.1.9にB地域におけるA棟域、B棟域の沖積粘土沈下量を示す。

(4) 兵庫県南部地震後の地盤の挙動

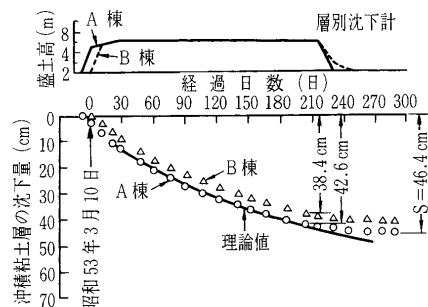
本事例は圧密沈下防止対策としての例であるが、施工後約17年経過した1995年1月17日、阪神・淡路大震災



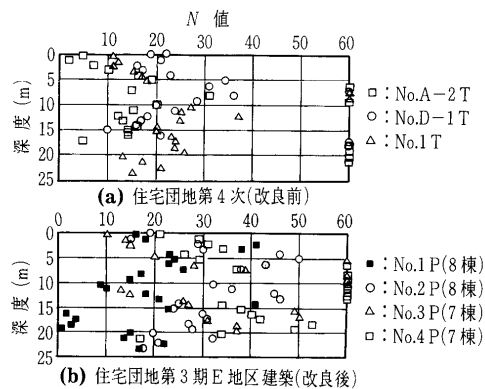
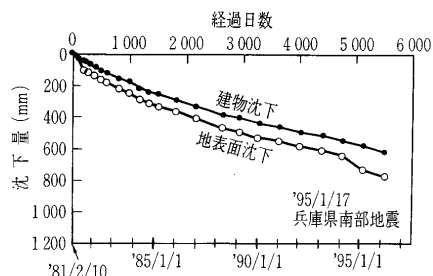
図—3.1.7 サンドドレーン配置図



図—3.1.8 土質柱状図



図—3.1.9 A棟域・B棟域の沖積粘土沈下量

図—3.1.10 改良前後の N 値の比較

図—3.1.11 A 地域における建物と地表面沈下量

が発生した。神戸ポートアイランドほかの埋立地に液状化が発生したことが報じられたが、神戸市の報告書⁷⁾によると、地盤改良を実施した場所は液状化は認められなかったことが報告されている。筆者は改めて現場を調査したところ、液状化現象は認められなかった。結果をトビックスとして紹介する事にした。図—3.1.7のA地域の標準貫入試験の結果を再整理し、図—3.1.10に示すような改良前後の N 値の変化を知ることができた。埋立土の改良前の N 値はほぼ10～25の範囲にあったものが、改良後の N 値は10～40近くまで大きくなった。この原因として旧海底に鈹滓層が一部存在していたこと、建設残土等が混入しておりこれらを打ち抜いてサンドドレーン貫入したため、結果として砂層への振動効果が増えられ N 値が増大したことが挙げられる。図—3.1.11はA地域の建物と地表面の14年間に及ぶ沈下測定結果である。地震後において建物に不同沈下は認められず、地表面が数 cm 沈下したものの、建物と地盤との段差は生じなかった。写真—3.1.1、写真—3.1.2にB地域の建物と周辺の地盤状況を示す。(福井 實)

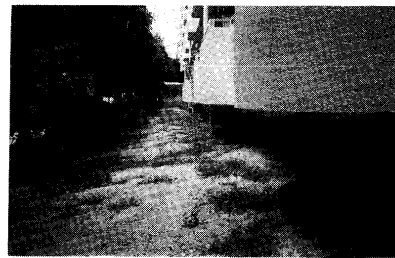
3.1.3 深層混合処理工法を用いた腐植土地盤対策

(1) はじめに

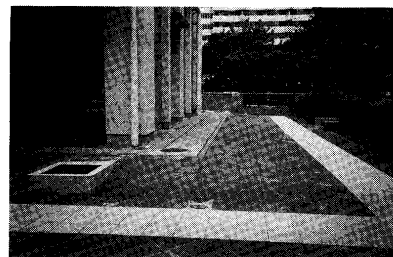
福島県相馬市において、市の総合福祉センターが企画された。構造規模は鉄筋コンクリート造2階建、延べ面積はおおよそ4300 m^2 である。

選定された敷地は平均標高5.74 mの農耕地であり、地盤調査結果によると孔内水位は平均でG.L. -0.62 mと高い。

3本のボーリング・標準貫入試験結果から地盤構成は表層より農耕土、シルト、 N 値0.1の腐植土、 N 値0の



写真—3.1.1 B 地域における建物周辺地盤の状況



写真—3.1.2 B 地域における建物入口付近の状況

有機質～砂質シルト、 N 値5のシルト質細砂、 N 値10.5の砂礫、そして N 値50以上のシルト岩となっている(図—3.1.12)。

なお室内土質試験結果からは腐植土において一軸圧縮強さ $q_u = 0.24 \text{ kgf/cm}^2$ 、粘着力 $c = 0.12 \text{ kgf/cm}^2$ が得られている(表—3.1.2)。

造成敷地の計画標高は8.3 mで、2.5 mの盛土が計画されている。造成計画検討計算書によると、厚さ2.5 mの盛土による腐植土の圧密沈下は2年間で1.0 m以上であり、サンドドレーンやペーパードレーンなどの圧密促進工法を用いた場合には半年後の残留沈下量が20 cmと報告されている。

結果として敷地造成は圧密促進工法を用いずに行われ、このような条件の下で建築計画が始まった。

主な工法選定のフローは以下である。

圧密促進工法……………市土木の財政事情により不採用
上部構造軽量化……………建築物用途により不採用
杭基礎による支持……………選定の可能性を検討
地盤改良による支持……………選定の可能性を検討

(2) 上部構造種別の選定

多様な用途を満足するためのエントランス・アトリウム、多目的ホール、中庭などの吹抜けにより建築面積は延べ面積の2/3のおおよそ2900 m^2 となった。

このため階数は平均的に1.5階となり、地盤条件があまり良くないことから構造種別を鉄骨造として軽量化を計ることも考えられた。

しかし用途的に水廻りが多いこと、軽量化を計っても腐植土の圧密沈下を考慮するとフローティング基礎は無理であることなどにより、主体を鉄筋コンクリート造とし、大スパン梁を鉄骨造、その周辺の柱を鉄骨鉄筋コンクリート造とすることが選定された。

(3) 基礎選定のための検討条件

腐植土の圧密沈下を考慮して1階床を土間コンクリートとせず構造スラブとすることから、単位建築面積当たりの重量は平均的に6.0 t/m^2 前後となる。

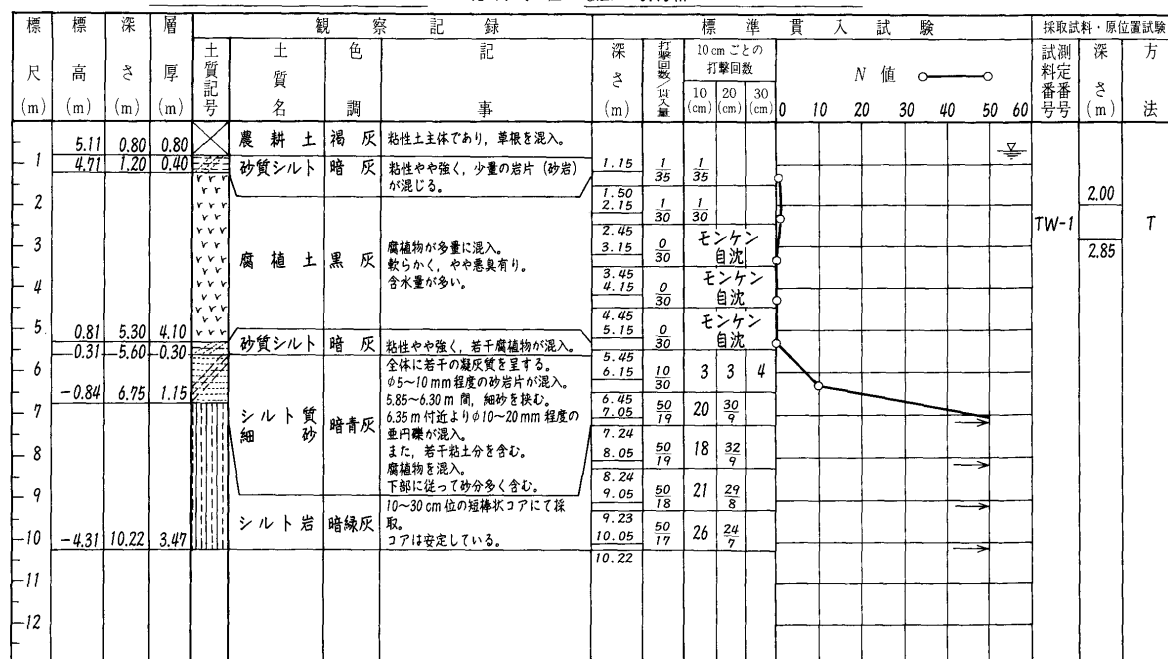
調査位置： 相馬市小泉字高池 地内

地点番号： No.B-2

標 高： 5.91 m

総掘進長： 10.22 m

孔内水位： G.L. -0.70 m



図—3.1.12 土質柱状図

表—3.1.2 土質試験結果一覧表

試 料 番 号			No. B-2
湿 潤	密 度	ρ_t (g/cm ³)	1.284
乾 燥	密 度	ρ_d (g/cm ³)	0.509
土 粒	子 密 度	ρ_s (g/cm ³)	2.305
自 然	含 水 比	w_n (%)	152.14
間 隙	比	e	3.528
飽 和	度	S_r (%)	99.4
粒 度	礫 分	75~2 mm (%)	0.0
	砂 分	2 mm~75 μ m (%)	1.4
	シルト分	75~5 μ m (%)	37.4
	粘土分	5 μ m 未満 (%)	61.2
コテ特 ン性 シス	液 性 限 界	w_L (%)	130.5
	塑 性 限 界	w_p (%)	50.4
	塑 性 指 数	I_p	80.2
分 類	分 類 名	有機質粘土 (OH)	
	分 類 記 号		
三 軸	試 験 条 件	[UU]	
	粘 着 力	c (kgf/cm ²)	0.12
	内 部 摩 擦 角	ϕ (°)	0.2
圧 密	圧 縮 指 数	C_c	2.12
	圧 密 降 伏 応 力	p_c (kgf/cm ²)	0.23

このことから直接基礎は無理であり、地盤構成から設計 G.L. -9.5 m 以深のシルト岩が支持地盤と判断される。基礎選定のための検討条件を列記する。

- ① 上部構造の鉛直荷重を支持地盤であるシルト岩に伝達する基礎部材 (構造安定性の検討)
- ② 腐植土の水平方向地盤反力係数 k_h が $k_h = 7 N$ (N : 標準貫入試験による N 値) $= 1.0 \text{ kgf/cm}^3$ と小さいこと、さらに流動化の可能性もあることから、上部構造の地震時水平荷重をシルト岩に伝達可能な基礎部材 (耐震安全性の検討)
- ③ 腐植土の鉛直支持力に対する盛土 (厚さ 2.5 m ×

1.6 tf/m³ = 4.0 tf/m²) と施工重機の荷重 (施工安全性の検討)

- ④ 周辺環境を考慮した低騒音低振動工法 (環境面の検討)
- ⑤ 施工工期および施工費用 (経済性の検討)

(4) 基礎工法の抽出

上記の検討条件を考慮して、可能性のある基礎工法をいくつか列挙する。

- ① 場所打ちコンクリート杭 / オールケーシング工法
- ② 既製鋼管巻きコンクリート杭 / セメントミルク工法
- ③ 手掘り深礎工法
- ④ 場所打ちコンクリート杭 / BH 工法
- ⑤ 既製コンクリート杭 / 小径自動埋込み工法
- ⑥ 地盤改良 / 二軸タイプ深層混合処理工法
- ⑦ 地盤改良 / 一軸タイプ深層混合処理工法

(5) 基礎工法の比較

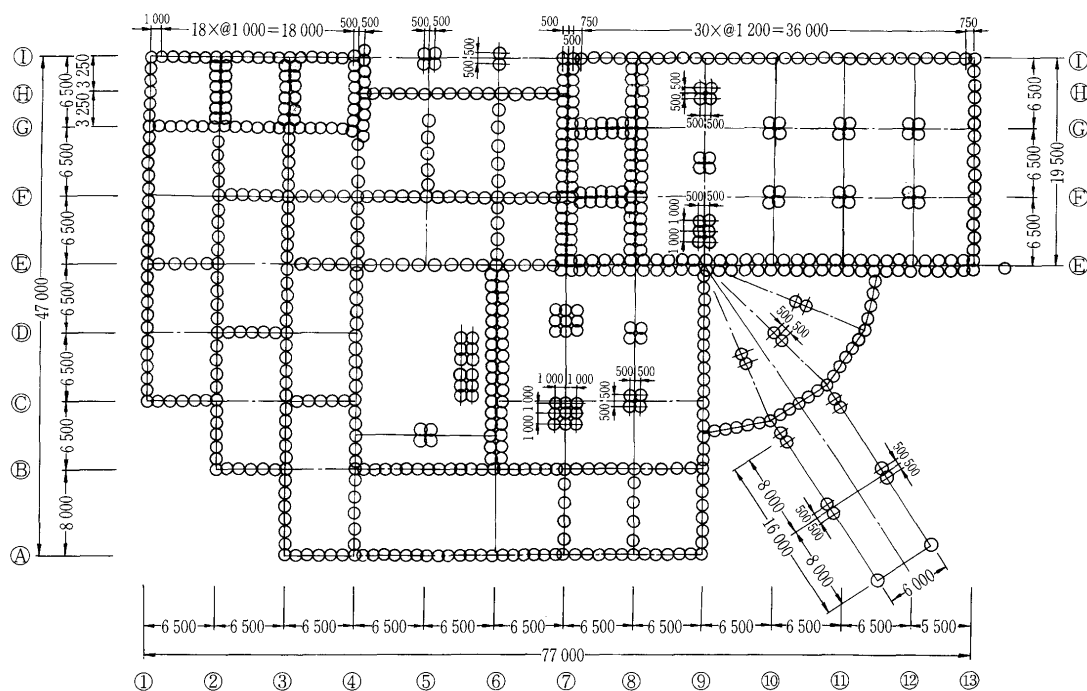
以上の基礎工法における、基礎選定のための検討条件に対する評価を表—3.1.3に示す。

(6) 基礎の選定

基礎選定のための検討条件に対する評価から、総合的に判断して比較的軽量の二軸タイプの攪拌機械を用いた深層混合処理工法による地盤改良を選定する。

本計画に対する地盤改良の配置を図—3.1.13に示す。改良コラム径は 1 200 mm であり、掘削長 9.50 m で改良長 6.60~8.15 m のもの 763 本を、柱状、接円形式の壁状、ラップ形式の壁状およびブロック状に配置した。壁状改良を多用することで地盤の流動化を防ぎつつ水平せん断耐力を増加させることを意図している。

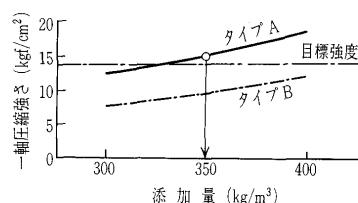
鉛直荷重を支持地盤に伝達する基礎部材としての設計



図—3.1.13 ソイルセメントコラム伏図

表—3.1.3 基礎工法の評価

基礎工法	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
構造安定性	○	○	○	○	○	○	○
耐震安全性	○	○	○	△	△	◎	◎
施工安全性	×	×	△	○	○	×	○
環境面	○	○	○	○	○	○	○
経済性	△	△	×	△	×	○	○
総合評価	×	×	△	○	△	×	◎


図—3.1.14 固化材添加量と一軸圧縮強さの関係
(材齢 7 日)

から、ソイルセメントコラムの設計基準強度を7.0 kgf/cm²、設定現場平均強度を14.0 kgf/cm²とした。

(7) 現場施工および確認

材齢28日の現場配合強度は、材齢7日の室内配合強度試験結果に基づき推定する。材齢28日の現場配合強度が設定現場平均強度14.0 kgf/cm²を上回るためには、14.6 kgf/cm²以上の7日材齢室内配合強度が必要である。

室内配合強度試験結果による、固化材タイプAおよびタイプBの添加量と7日材齢一軸圧縮強さの関係を図—3.1.14に示す。この結果から現場配合は固化材タイプBの添加量350 kg/m³で施工した。

実際に施工したソイルセメントコラム763本の中から8本を抽出し、1本当たり3個の供試体を採取した。このテストピースに対して、材齢28日で一軸圧縮強度試験を行った結果は、1本のソイルセメントコラムから採

取した3個の供試体の平均が10.6～75.9 kgf/cm²といずれも設計基準強度7.0 kgf/cm²を上回っており、全供試体の平均が54.1 kgf/cm²と設計基準強度の2倍を上回っているため、施工されたソイルセメントコラムは設計基準強度を満足しているものと判断する。

(8) おわりに

今回のように流動化のある場合には、杭により鉛直荷重を支持しても水平荷重の支持が難しい。深い軟弱地盤の場合には、支持杭または摩擦杭+地盤改良という方法が有力である。浅い軟弱地盤の場合には杭を用いず、壁状の地盤改良に鉛直支持と水平支持の両方を期待することが経済的である。(大杉文哉)

参 考 文 献

- 1) 福井 實・小堀隆治：神戸ポートアイランドにおける杭実験について（その1 予備実験），日本建築学会近畿支部研究報告集，pp. 409～412, 1979.
- 2) 小堀隆治・福井 實：神戸ポートアイランドにおける杭実験について（その2 本実験の概要），日本建築学会近畿支部研究報告集，pp. 413～416, 1979.
- 3) 小堀隆治・玉置 亨・福井 實：神戸ポートアイランドにおける杭実験（その3 地盤改良工事について），日本建築学会近畿支部研究報告集，pp. 369～372, 1980.
- 4) 小堀隆治・福井 實：神戸ポートアイランドにおける杭実験について（その4 杭に作用する負の摩擦力，杭沈下の測定），日本建築学会近畿支部研究報告集，pp. 373～376, 1980.
- 5) 本田周二・福井 實・谷本喜一：臨海埋立地における地盤と構造物の沈下について，基礎工，Vol. 20, No. 12, pp. 99～105, 1992.
- 6) 伊藤雄三・伝田雅明・福井 實・小林武夫：神戸ポートアイランドにおけるサンドドレーン効果について（神戸市港島住宅地盤改良工事），日本建築学会近畿支部研究報告集，pp. 25～28, 1981.
- 7) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査（ポートアイランド，六甲アイランド）報告書，pp. 77, 1995.