

軟弱地盤上の高規格堤防の盛土施工に伴う 沈下量についての一考察

研究第一部 研究員 石原 吉雄

1. はじめに

高規格堤防は、現在、直轄河川の関東地方4河川、近畿地方2河川で整備が進められているが、整備地区の地盤は沖積層に代表される軟弱地盤が多く、また平均堤防高さも10m前後であることから、盛土施工時に安定・沈下・液状化などの問題が考えられ、堤防上の通常の土地利用に支障をきたすおそれがある。

本研究では、最大20mの沖積層の基礎地盤に最大高さ約15mの試験盛土施工を実施する高規格堤防工事に関する検討事例について報告し、今後の本体施工検討の基礎となる事項について整理した。ここでは主に、実施した沈下に関する検討の概要と試験施工時の動態観測における盛土施工に伴う沈下量について報告し、あわせて今後の課題について整理するものである。

2. 軟弱地盤上の盛土施工における沈下に関する留意点

2.1 沈下に関する留意点

軟弱地盤における土質工学上の問題点としては、一般に安定・沈下・液状化・基礎地盤の透水が考えられるが、特に軟弱な粘性土地盤上の高規格堤防で問題となる事項は以下のものである。

①安定問題……………基礎地盤まで含んだすべり破壊、堤内側の堤防法面のすべり破壊、暫定法面部のすべり破壊の問題。

②沈下問題……………軟弱地盤の沈下。隣接構造物の側方流動。引き込み沈下。

沈下問題は、高規格堤防上の土地利用が通常の土地利用を基本としており、土地利用条件に大きく制約を受けること、軟弱地盤における沈下は場合によっては数m、数十年に及ぶことがあることなどから、事業全体の工期・経済性に与える影響が大きく、検討にあたっては特に詳細な計画・検討が必要と

考えられる。

2.2 沈下に関する検討方法

2.2.1 検討手順

高規格堤防盛土施工の検討手順を図-1に示す。この手順に従って軟弱な粘性土地盤上の盛土による沈下に関する検討（基本条件の整理～試験施工）を実施した。

2.2.2 概略沈下計算

盛土による沈下形態は、即時沈下、圧密沈下（一次圧密沈下・二次圧密沈下）、その他の特異な沈下（盛土の自重沈下・広域地盤沈下）に区分される。

沈下の推定方法を、沈下量については図-2に、沈下時間については図-3にそれぞれ計算手順を示す

2.2.3 基礎地盤処理工の検討

概略沈下計算で求められた沈下量、沈下時間と事業全体の工期、盛土工期の関係から圧密沈下対策の必要性を検討し、基礎地盤処理工の検討を行う。

工期・経済性・周辺環境への影響を十分考慮し、図-4に従って選定する。

2.2.4 試験施工の実施

試験施工は検討した地盤処理工・安定対策工などの妥当性の評価を行い、本施工の際の対策工法の詳細検討のための基礎資料とすることを目的とする。

試験施工では動態観測や調査ボーリングを実施し、基礎地盤の沈下・変形のデータ収集を行い、当初設定した設計数値と実測値との対比検討を行う。

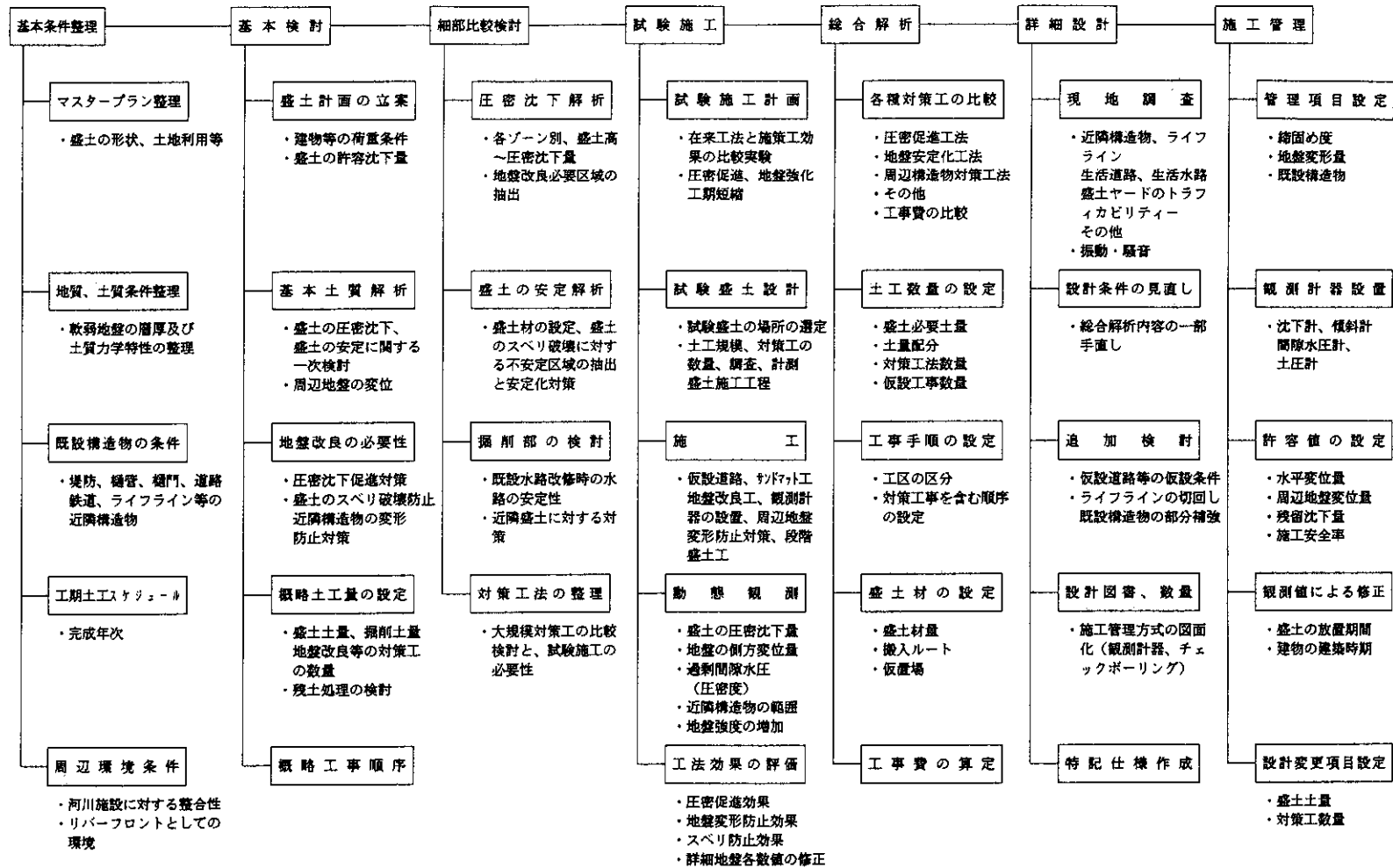


図-1 高規格堤防盛土施工の検討手順

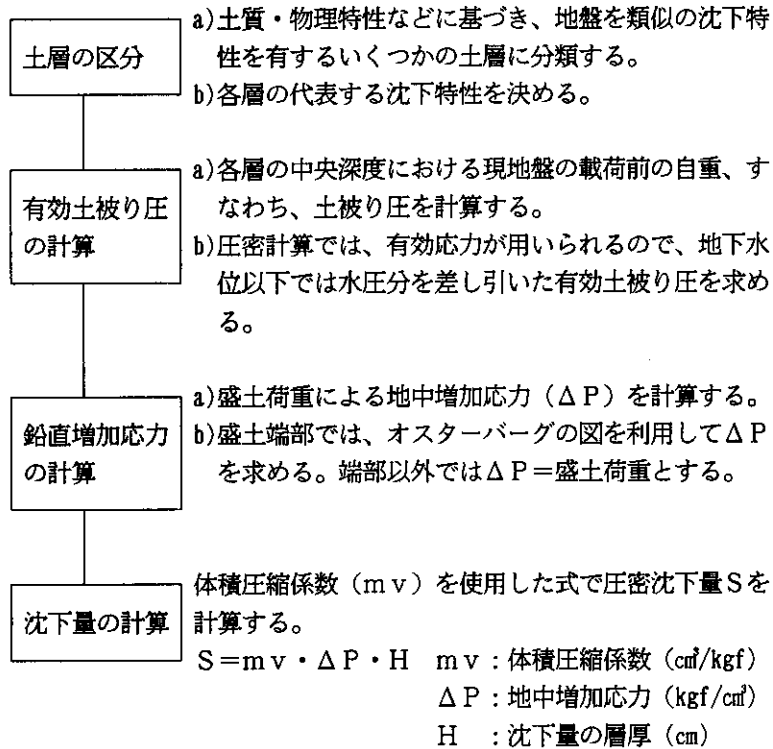


図-2 沈下量の計算手順

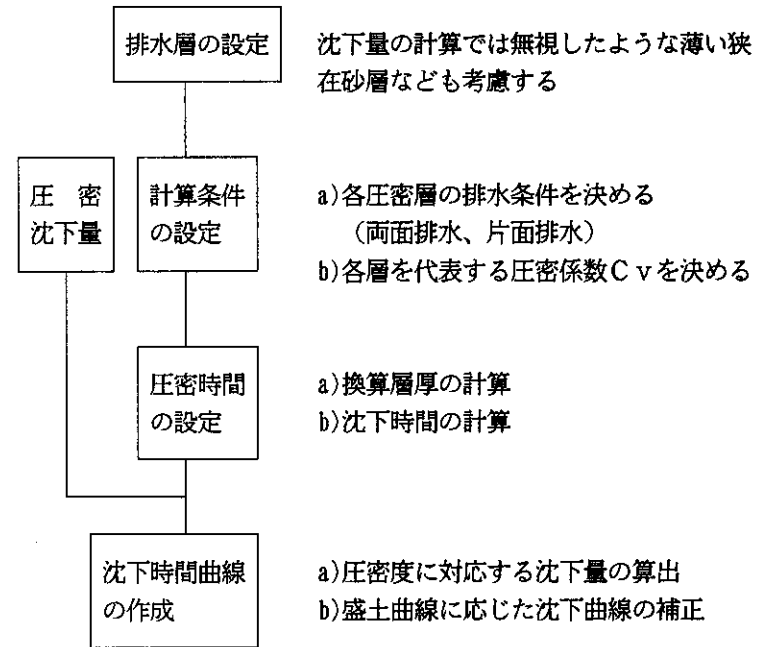
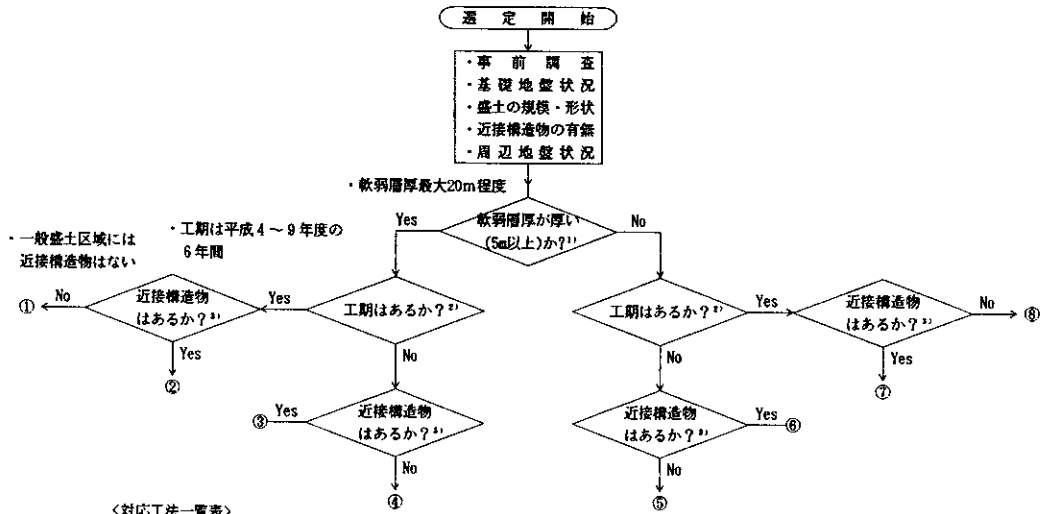


図-3 沈下時間の計算手順



<対応工法一覧表>

① 盛土区域	粘性土 … サンドマット工法、載荷重工法、パーチカルドレーン工法の組み合わせ
	腐植土 … サンドマット工法、載荷重工法、サンドコンパクションバイブル工法（押え盛土工法）の組み合わせ ¹⁾
② 盛土区域	… ①の工法と同様
近接区域	… 固結工法、くい工法
③ 盛土区域	… 固結工法
近接区域	… 固結工法、くい工法
④ 盛土区域	… 固結工法
⑤ 盛土区域	… 固結工法、置換工法
⑥ 盛土区域	… 固結工法、置換工法
近接区域	… 矢板工法、固結工法
⑦ 盛土区域	粘性土 … サンドマット工法、載荷重工法（、パーチカルドレーン工法）の組み合わせ ¹⁾
	腐植土 … サンドマット工法、載荷重工法（、サンドコンパクションバイブル工法、押え盛土工法）の組み合わせ ²⁾
近接区域	… 矢板工法、固結工法
⑧ 盛土区域	… ⑦の工法と同様

- 1) 軟弱層厚の判定は5mを目安としたが、5m以下であっても対象地盤の土性によって、その取り扱いが5m以上の地盤と同等となる可能性があるため、注意を要する。
- 2) 高規格堤防の標準的な施工工期は、約3～4年間としている。
- 3) 近接区域の処理工法の選定に際しては、近接構造物の変位の他に、騒音、振動、塵埃、交通障害、地下水汚染についても考えなければならない。
- 4) ここで掲載した工法は、施工工期を約3～4年間として、供用後の残留沈下量を許容値の10cm以内に収めるものである。また、工法の組み合わせにあたっては、経済性についても加味して、最も適切なものを選定しなければならない。
- 5) 一覧表中の（、〇〇工法）は左記の工法で沈下・安定性に問題がある場合に採用する。

図-4 高規格堤防施工に際しての軟弱地盤処理工法選定手順

3. 沖積粘性土を基礎地盤とする高規格堤防の試験施工における沈下検討

3.1 検討内容

対象とした工事箇所は、高規格堤防事業と土地区画整理事業が一体となって整備される予定で、沖積粘土層を主とする軟弱層が約20mと厚く、盛土高さが最大15mであることから、沈下量及び沈下時間、盛土及び基礎地盤の安定について検討する必要がある。また、工事箇所には樋管などの施設が現存しており撤去が必要である。

検討は、図-1の検討フローに従って試験施工仕様を決め、試験施工結果より施工仕様の妥当性を評価し、本施工検討の基礎とするものである。

3.2 基本条件の整理

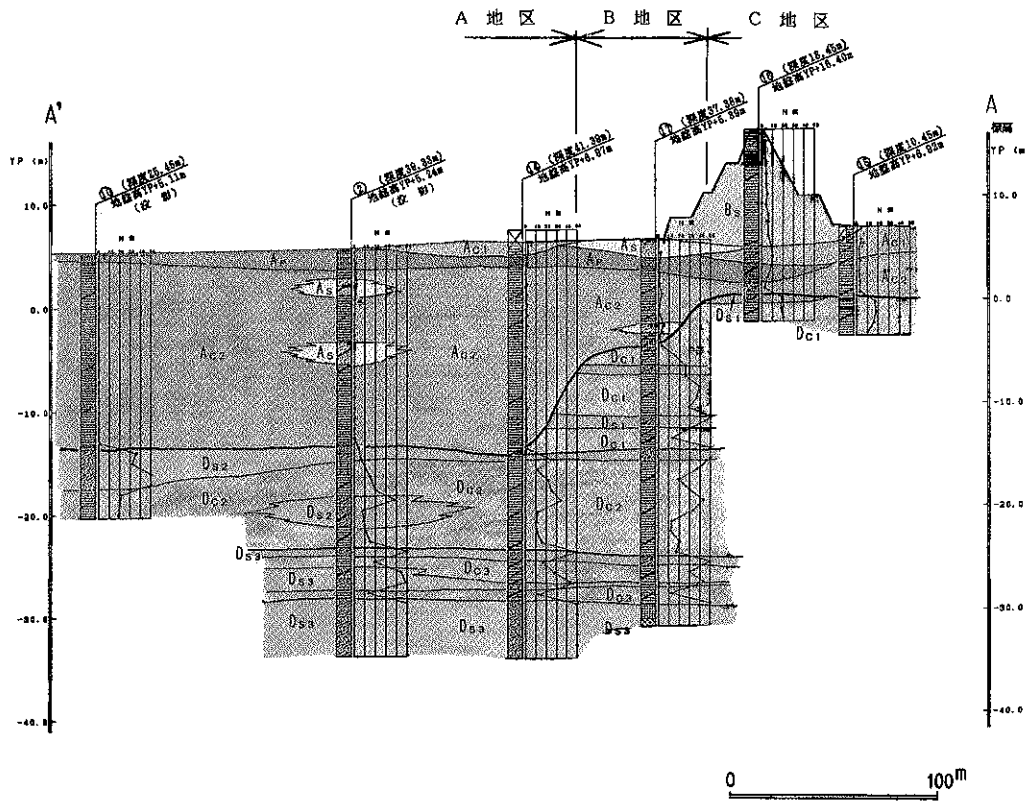
3.2.1 地質条件

高規格堤防予定地の地質断面図を図-5に示した。大半が軟弱な粘土層で構成される沖積層が約5～20m分布しており、その層厚から以下の3ゾーンに区分した。沖積層の下位には、粘性土～砂質土の互層からなる洪積層が分布するが、一般構造物の支持基盤となるような比較的良好な岩盤である。

- ・ Aゾーン（沖積層の基底面がY.P. -10m～-15mに分布：
沖積層厚15～20m）
- ・ Bゾーン（沖積層の基底面がY.P. 0m～-10mに分布：
沖積層厚5～15m）
- ・ Cゾーン（沖積層の基底面がY.P. 0m以浅に分布：
沖積層厚5m以下）

3.2.2 盛立工期

工事箇所は土地区画整理事業により宅地として使用される計画であり、さらに軟弱地盤上の盛土施工であることから、盛立工期が重要な検討条件となる。試験施工期間、本体施工期間を各々3年として検討した。



地質凡例

地質 構成	地層名	地質 構成	地質 記号	特 徴
沖 積 層	沖 積 土	堆積土	B ₁	江戸川の堤防堆積土であり、N値5前後の粗礫ロー層粘土、シルトから構成される。層厚は最大10.7mを有する。
		埋土	B ₂	産生形の埋立土であり、茶灰色の関東ローム質の粘土層から構成される。N値は3回程度を有する。
	第一粘性土層	A ₁	角礫物を混入する粘性土から構成され、砂質シルト～砂質シルトから構成され、埋積層下ではN値8～9。その多は2～3を示す。	
	粉 質 土 層	A ₂	A ₁ 層の下位に分布し、茶褐色を示し含水比の多い腐植土層であり、未分解植物遺物を混入する。N値は1を示す。	
	砂 質 土 層	A ₃	暗青灰色の細砂層であり、所々でシルト分を多く混入する。N値4程度を示し細かい砂質土層である。	
	第二粘性土層	A ₄	角礫物を混入する砂質シルト及びシルト質粘土層であり、N値0～3と軟弱である。谷中心部で層厚10mを有する。	
洪 積 層	第一粘性土層	D ₁	砂質シルト～砂質シルトから構成され、谷縁部との境界部でN値10～15を示し、下部ではN値30～40を示す。	
		D ₂	粒径の不均質な粗砂から構成され、シルト分を多く混入する。N値は10～50と変化に富む。層厚もかなり変化に富む。	
	第二砂質土層	D ₃	全体に礫石な砂質土層であり、N値は50を示す。D ₁ 層と互層状を呈しかなり層厚変化をする。	
	第二粘性土層	D ₄	暗灰色のシルト質粘土～砂質シルトで構成され、N値は10～40と変化する。所々で礫状を有する。	
	第三粘性土層	D ₅	D ₄ 層中に存在する粘性土層であり、中、粗砂から構成される。N値は10～30を示し硬質である。	
	第三砂質土層	D ₆	中、粗砂から構成され、N値50の緻密な砂層である。	

図-5 高規格堤防予定地の地質断面図

3.3 基本検討・詳細検討

3.3.1 設計条件

- ① 上 載 荷 重 土地利用が一般低層住宅を予定しており、高規格堤防設計・施工法指針（案）*1より、『 $q = 2 \text{ tf/m}^2$ 』とした。
- ② 許容残留沈下量 設計上の許容残留沈下量の目標値は、高規格堤防設計・施工法指針（案）では、10cmとしているが、地元関係者との協議により5cmとした。

3.3.2 概略沈下計算

(1) 計算方法

沈下計算は、沖積層厚で区分した3ゾーン（A、B、C）のそれぞれについて、図-2、図-3に従って行い、沈下量、沈下時間を算出した。

(2) 計算条件

全沈下量は、即時沈下量、圧密沈下量（一次圧密沈下・二次圧密沈下）、その他の特異な沈下量（盛土の自重沈下・広域地盤沈下）などの合計量であるが、ここで対象とする沈下形態は圧密沈下のみとした。

本検討では、当初設計上、許容沈下量を二次圧密沈下成分の許容沈下量（5cm）とし、一次圧密沈下成分を0cmと設定した。

以下の計算は一次圧密成分について行い、二次圧密成分については別途計算によって、許容沈下量（5cm）以内に収まることを確認した。

(3) 計算結果

無対策の場合の沈下量及び、沈下時間計算結果を表-1に示す。沈下量の最大値は4m以上、最も軟弱層の厚いA地区の圧密度80%になる圧密沈下時間は6.3年となった。

表-1 沈下量及び圧密沈下時間

地 区	盛土施工厚 D (m)	一次圧密沈下量 S (cm)	圧 密 沈 下 時 間		
			圧密度 U=80%	圧密度 U=90%	
A	低地部	14.40	425	2312日	3457日
	堤防法尻	13.20	280	6.3年	9.5年
B	低地部	12.80	245	565日	845日
	堤防法尻	11.80	145	1.5年	2.3年
C	低地部	11.60	125	109日	164日
	堤防法尻	11.50	110	0.3年	0.45年

3.3.3 基礎地盤処理工の検討

(1) 工法概略選定

図-4より右を選定した。→ 載荷重工法・サンドマット工法・
バーチカルドレーン工法

(2) 圧密期間の決定

工事箇所は軟弱地盤上での盛土となるため、安定管理上の限界盛土高さを検討した。円弧すべり法(常時)により安定解析を行い、限界盛土高さを算出した。

計算した限界盛土高さと施工工期の制約から、一段当たりの盛土高さについて検討し、押さえ盛土工法を採用することで対処し、圧密期間を決定した。盛立期間と圧密期間の関係を図-6に示した。

(3) バーチカルドレーン工法の比較検討

概略選定した工法のうちバーチカルドレーン工法は、対象となる軟弱層の層厚の違いにより、信頼性や経済性が大きく異なる場合があり、代表的な工法について比較検討を実施した。決定した対策工概略図を図-7に示した。

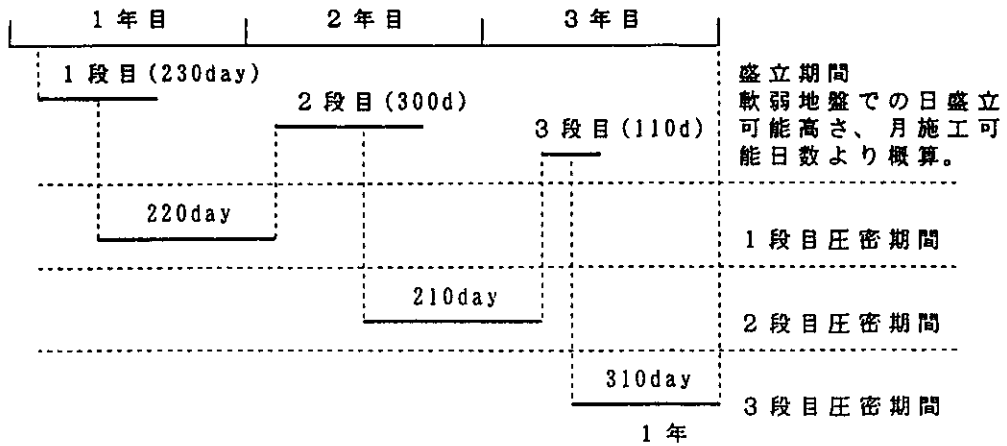


図-6 盛立期間と圧密期間

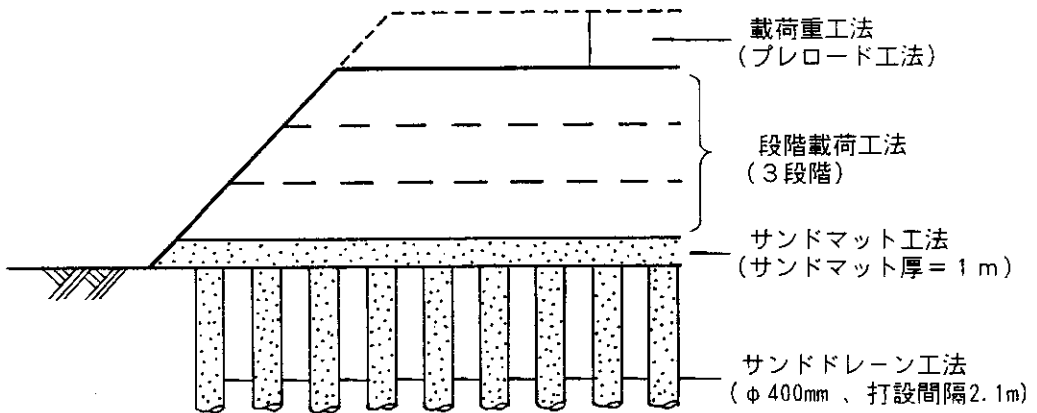


図-7 対策工概要図

3.4 試験盛土施工

3.4.1 概要

試験施工の目的は本体盛土施工の際の対策工法の詳細検討のための基礎とすることである。概要を以下に示す。

【施 工 工 期】3年（基礎地盤処理工～盛土工）

【基礎地盤処理工】サンドドレーン工法（径40cm、ドレーン間隔2.1m）
ドレーン打設総延長（約143,000m）

【盛 土 工】平面範囲(180×260cm) 盛土量(約300,000)

【動 態 観 測 工】地中傾斜計、地表面変位計、表層沈下計、層別沈下計、間隙水圧計

【検 討 項 目】① 盛土後の土質特性及び動態観測結果の把握。

② 圧密理論解析に基づく圧密沈下量及び強度増加度合と実測値の比較検討。

③ 盛土後の挙動(圧密沈下状況・周辺地盤への影響・本堤への影響)の把握。

3.5 試験盛土施工結果と考察

試験盛土施工後のチェックボーリング結果、動態観測結果より、盛土後の土質特性値の変化・沈下状況・間隙水圧の状況を把握し、最終沈下量・圧密度・粘着力の強度増加について、実測値と事前調査で設定した土質定数をもとに行った理論解析結果が一致しているかを調べた。動態観測及びチェックボーリング地点位置平面図を図-8に示した。

3.5.1 チェックボーリング結果

盛土後の地盤の土質特性値の変化を調べるため、既存調査地点とほぼ同じ地点においてチェックボーリングを実施した。チェックボーリングは、1段目盛土(4.3m)+2段目盛土(1.3m)の時点で実施した。

既存データとチェックボーリング結果を比較した結果を表-2にまとめた。

← 江戸川

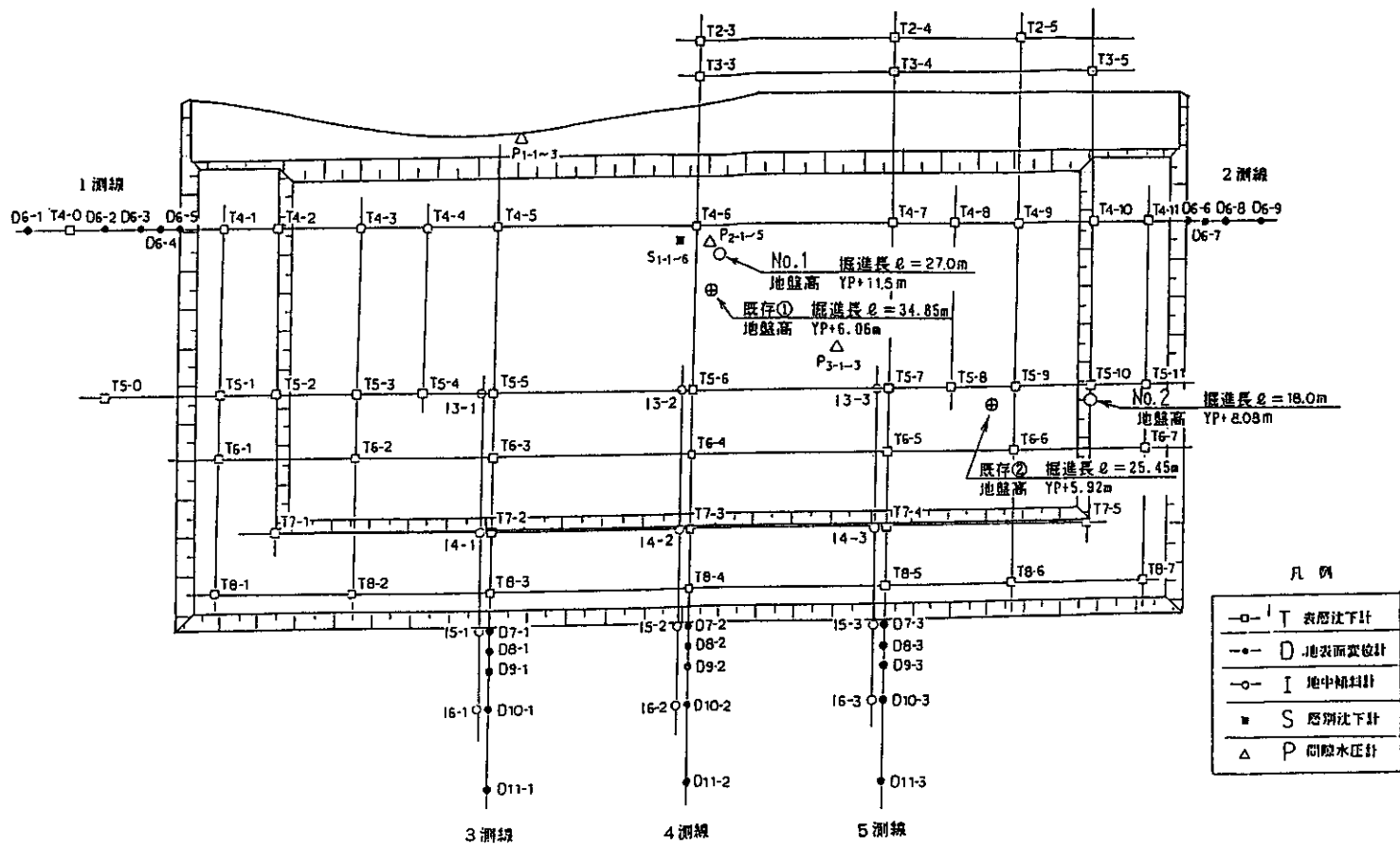


図-8 動態観測及びチェックボーリング地点位置平面図

表-2 既存データとチェックボーリング結果の比較表

項目	比較結果	考察
土粒子の密度	ほぼ既存データと一致。	チェックボーリングの妥当性を示す。
液性限界		
塑性限界		
塑性指数		
自然含水比	既存データより低い値を示す。	盛土後の圧密による間隙水の減少を示す。
湿润密度	既存データより高い値を示す。	盛土後の圧密による密度・強度の上昇を示す。
一軸圧縮強度		
圧密降状応力		

3.5.2 動態観測結果

動態観測結果の検討は、図-8に示した観測地点のうち最も軟弱層が厚い(約22m)3地点(T4-6, T5-9, T6-6)について行った。データはチェックボーリング実施時期までを取り扱った。

(1) 沈下状況

選定した3地点の試験盛土開始以降の総沈下量は、約140cm前後である。全体的には盛土高さ6.6mで100~150cm、盛土高さ2.8mで40~90cmである。

また、4.3m盛土による圧密度を実測値より求めた(表-3に表示)。これより圧密度は、ほぼ当初の設計どおり、約80%であることが分かった。

(2) 間隙水圧の消散状況

間隙水圧計測定結果よりP2地点の地盤内の間隙水圧の消散状況を確認した。

また圧密度が層全体として、約80%であることが分かった。

(3) 圧密理論解析に基づく圧密沈下及び強度の把握

事前の調査結果で設定した土質定数をもとに実施した理論解析結果を表-3に示す。検討項目は、最終沈下量・圧密度・粘着力の強度増加とした。

表-3 実測値と理論解析値との比較

地点	最終沈下量		圧密度		粘着力の強度増加		
	実測値(cm) (双曲線法による)	理論計算値(cm) (圧密沈下解析による)	実測値 U(%) (双曲線法による)	理論計算値 U(%) (圧密沈下解析による)	地点	実測値 Δc (kgf/cm ²)	理論値 Δc (kgf/cm ²)
T4-6	151.3	162.1	78.9	81.5	No.1 Ac1	0.161	0.175
T5-9	161.2	166.3	77.7	83.5	Ac2	0.157	0.210
T6-6	158.4	162.1	77.3	83.5	No.2 Ac1	0.153	0.080
					Ac2	0.106	0.090

(4) 考察

上記で算出した最終沈下量、圧密度、粘着力の強度増加に関する、試験盛土後の実測値と理論解析結果を表-3にまとめた。また、沈下量の実測値と解析値の経時変化を図-9に示した。

これらより、試験盛土後の実測値が事前の調査結果で設定した土質定数をもとに実施した理論解析結果にほぼ一致することが確認された。

また、試験施工では周辺地盤に帯する影響、本堤への影響についても検討した。

周辺地盤に対する影響は、側方移動・引込み沈下が考えられたが、地表変位杭や地中傾斜計の測定結果より、変位置は0.5~1.0cmと少ないことから、現時点では特に影響はないことが確認された。

本堤への影響は、地中傾斜計の測定結果より、盛土による側方移動は盛土初期に認められた最大で1cm程度であること、引込み沈下に起因する水平変位は天端付近で2cmであることから、現時点では特に問題がないと考えられた。

計器 NO. T5-9

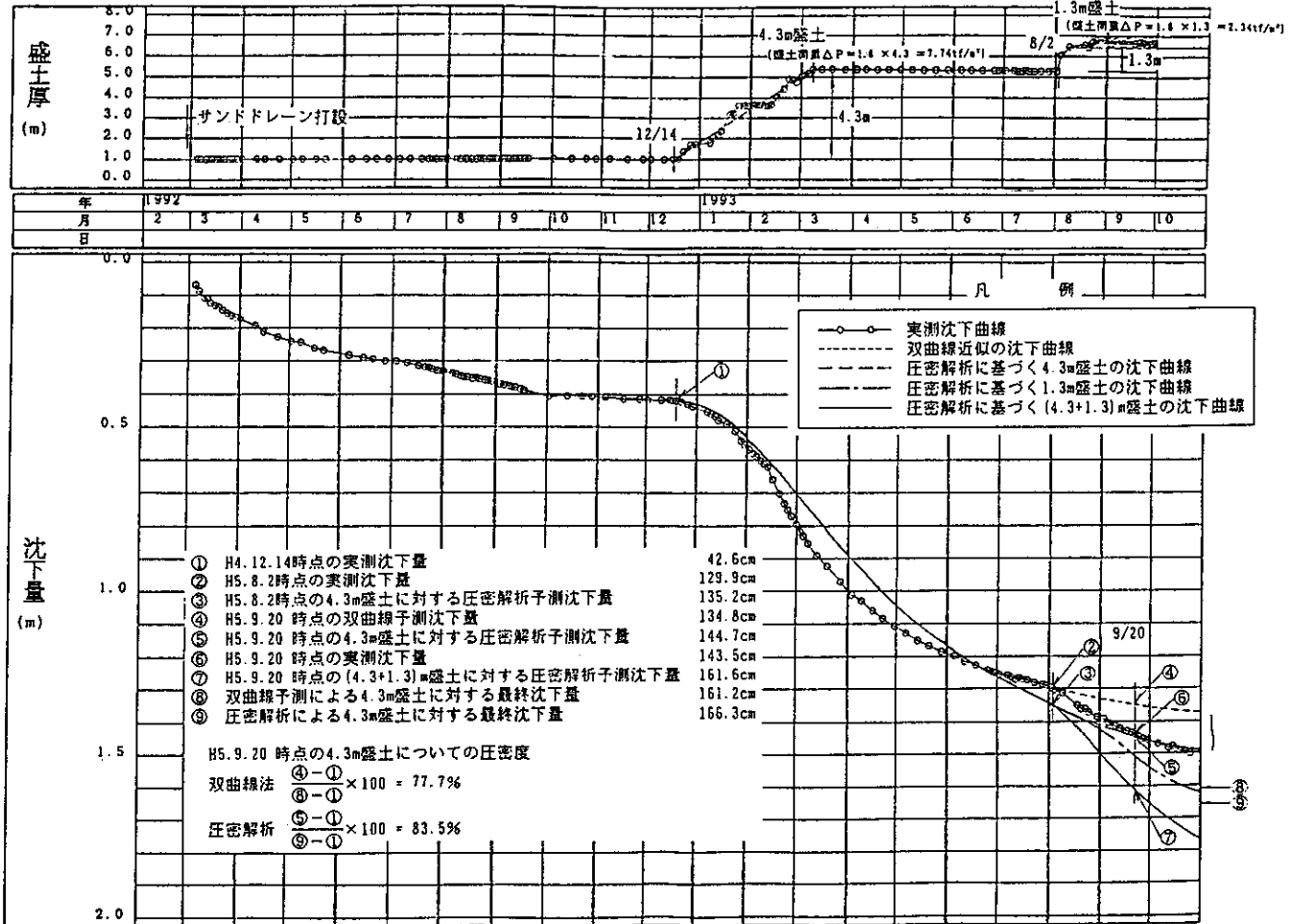


図-9 圧密解析結果と実測値の比較 (T5-9)

3.6 検討のまとめ

動態観測結果（最終沈下量・圧密度・粘着力の強度増加）より、試験盛土後の実測値が事前の調査結果で設定した土質定数を基に実施した理論解析値にほぼ一致したことから、沈下対策工が良好に機能したと考えられる。

これより、策定した試験施工仕様が沈下対策としてほぼ妥当なものであり、今後施工される本体施工の基礎として十分参考となることが確認できた。

また、上述した一連の沈下検討により、対象としたような沖積粘土層を基礎地盤とする高規格堤防盛土施工の沈下検討が実施できることが分かった。

4. 高規格堤防における沈下検討に関する今後の課題

4.1 圧密沈下時間

高規格堤防は、堤防上の利用が一般の宅地などの場合が多く、事業期間の短縮が重要な課題である。

関東地方で現在工事中の20地区*2) の概略沈下検討における圧密沈下時間計算結果（無対策の場合）をまとめたものを図-10に示した。これより、圧密沈下時間が現在調査中または不明なものを除くと、5年以上の地区が最も多いことが分かる。圧密沈下時間は全体施工工期の中で占める割合が大きいことから（図-6参照）、全体工期短縮のためにはこれを短縮する必要があることがわかる。

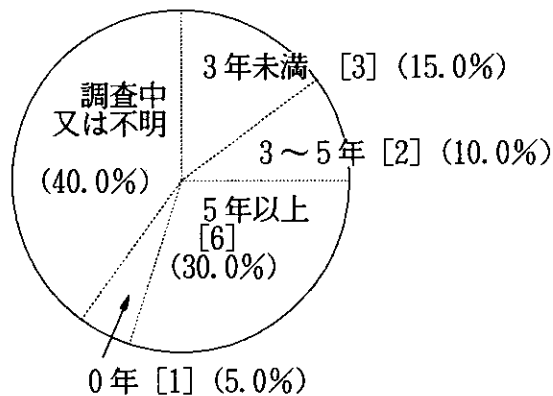


図-10 圧密沈下時間

4.2 圧密沈下時間と工期、コストの関係について

高規格堤防盛土施工では、上述したように基礎地盤が軟弱地盤でしかも平均10mの堤防高さを有したものが多いことから、全体工事費に占める基礎地盤処理費の割合は大きく、圧密沈下対策費が重要な要素と考えられる。

圧密沈下時間と工期、コストの関係は図-11のような関係があると考えられ、今後さらに詳細な検討が必要と考えられる。

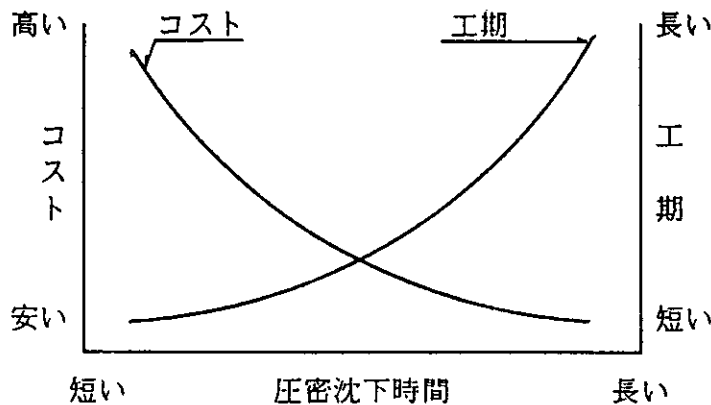


図-11 圧密沈下時間と工期・コストの関係

5. おわりに

本研究では、最大20mの沖積層の基礎地盤に最大高さ約15mの盛土施工を実施する高規格堤防工事に関する検討事例について報告し、今後の本体施工検討の基礎となる事項について整理した。

今後の高規格堤防盛土施工においては、軟弱地盤における沈下対策はひとつの重要な課題であり、施工工期の短縮、コストダウンのためには、地盤処理工にその大きなヒントが有ると考えられる。まり、より効果的な観測工システムなどの動態観測工も検討される必要があるだろう。

[引用文献]

- *1) 高規格堤防設計・施工指針(案) (財)リバーフロント整備センター
- *2) 河川ハンドブック(1993) 社団法人 日本河川協会