

D滑走路 埋立・護岸部の情報化施工 ～軟弱地盤上における急速施工への対応～

埋立()工区 豊田泰晴・梯浩一郎、埋立()工区 相川秀一

埋立()工区 川端利和、埋立()工区 堺谷常廣

キーワード：情報化施工、層厚管理、沈下管理、強度管理、安定管理、最終埋立天端高、情報管理システム

1. プロジェクトの概要と埋立・護岸部情報化施工の必要性

1-1 プロジェクトの概要

首都圏における航空需要拡大に対応すべく、東京国際空港(羽田空港)の能力向上を早急に実現することを目的に、東京国際空港D滑走路建設外工事(以下、本工事)は、現空港沖合南側海上の位置に約150万 m^2 の空港島を構築し、D滑走路(2,500m \times 60m)を新設するものである。D滑走路は、羽田空港で4本目の滑走路となり、現B滑走路と並行する形で整備されるものである。空港島の構造的な特徴として、埋立と栈橋のハイブリット構造が挙げられる。

1-2 埋立・護岸部情報化施工の目的(必要性)

1-2-1 工事の制約条件

(1) 工期の制約による急速施工

本工事の施工期間は従来工事と比較して短く、残留沈下量低減のためのプレロードなど工期に余裕のある工法が選択出来ない。また、十分な放置期間が確保できないため低圧密状態での施工を余儀なくされるなど、極めて厳しい工程での施工となる。

(2) 軟弱地盤上の高盛土

本工事の盛土厚は最大45m程度、圧密沈下量は最大8m程度にも及び。埋立工事としては前例のない高盛土工事を、予め地盤の挙動を予測する試験施工を行わず実施することになる。

(3) 栈橋と埋立のハイブリット工法

本工事では、空港島の多摩川側を栈橋構造とする埋立-栈橋ハイブリット構造を採用している。埋立部と栈橋部の接続部は鋼管矢板井筒護岸となっており、異種構造物の同時施工となるため、施工時計測およびそのデータの共有化による相互作用の把握が重要となる。

図1-1に空港島全体平面図を示す。

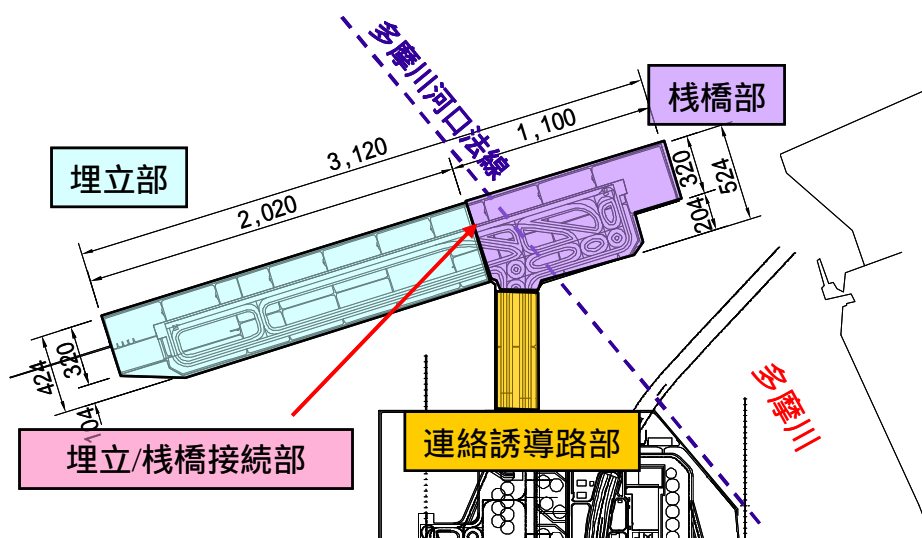


図 1-1 空港島全体平面図

1-2 情報化施工の目的（必要性）

前述のように本工事は、急速施工、前例のない軟弱地盤上の高盛土、異種構造物の同時施工と、厳しい条件下での施工となる。情報化施工を導入する目的は、このような条件下で、 施工中の沈下・安定管理を確実に行うこと、 最終埋立天端高を設定すること、 情報化施工で得られたデータを活用し、最適な維持管理計画を検討することである。本稿では、 と の方法論、およびこれらを達成するために活用する沈下・動態観測システムについて記述する。図 1-2 に工事の施工条件と情報化施工の目的（必要性）、および活用するシステムの関係を示す（赤字部は本稿記載対象部）

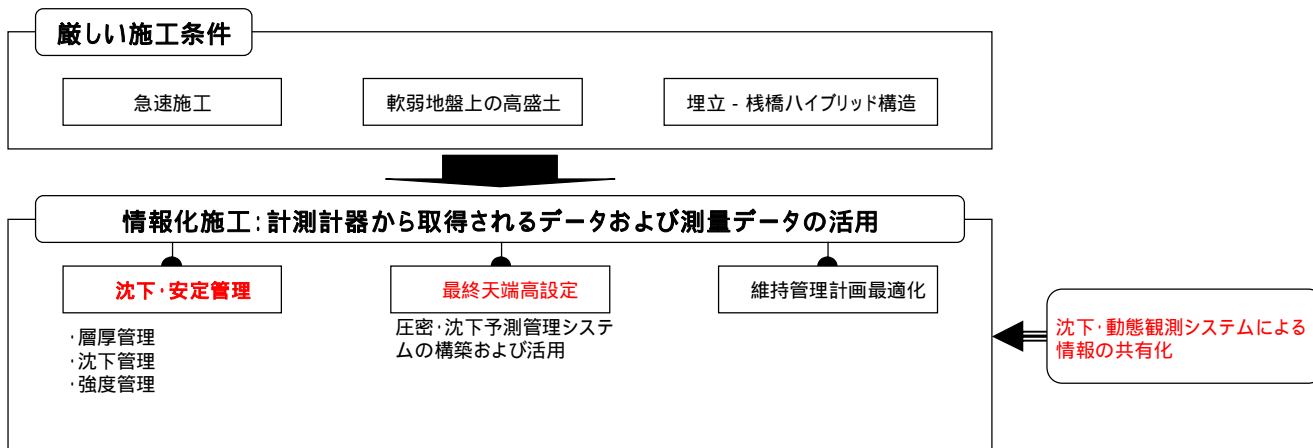


図 1-2 厳しい施工条件と情報化施工の目的（必要性）

2. 埋立・護岸部計測管理計画

2-1 計測項目とその目的

本工事では、施工中の実測沈下量および側方変位量を把握するために、護岸部および埋立部に次に示す計測機器類を設置する。

- 全沈下量の測定 : 沈下板、水圧式沈下計
- 層別沈下量（圧密度）の測定 : 層別沈下計、間隙水圧計
- 埋立荷重の測定 : 土圧計
- 側方変位量の測定 : 傾斜計
- 埋立盛土圧縮量の測定 : クロスアーム式沈下計

また、沈下量と埋立層厚の平面的な管理を行うために GPS・深淺測量を実施し、埋立・護岸部の圧密沈下に伴う原地盤粘性土の地盤改良層、および未改良層の圧密による強度増加量を確認するために、コーン貫入試験（以下、CPT）を実施する。

2-2 計測計器配置のコンセプト

埋立・護岸部の施工時計測のための計器配置は、図 2-1 に示すフローで設定する。土質条件や構造物などの設計条件および施工展開などを考慮し、土質調査結果を踏まえて、重点観測区域を配置し、簡易観測区域は、この重点観測区域を補間するように 250m ピッチで配置する。なお、これらの配置間隔は、閑空 期工事に於いて 200～300m ピッチで配置した事例を参考にしている。重点観測区域には、CB 沈下板（チェックボーリング用ガイドの役目を兼ねる沈下板）および層別沈下計、傾斜計等を設置し、護岸の沈下と側方変位を計測するとともに、CB 沈下板を利用した原位置強度試験（CPT）を実施することにより、原地盤の圧密強度増加量を直接計測する。簡易観測区域には、原地盤地表面の沈下量計測を目的とした水圧式沈下計を、護岸法線、滑走路中心線、平行誘導路中心線に設置し、先行する重点観測区域の沈下傾向と比較しながら、その計測データの活用を図る。

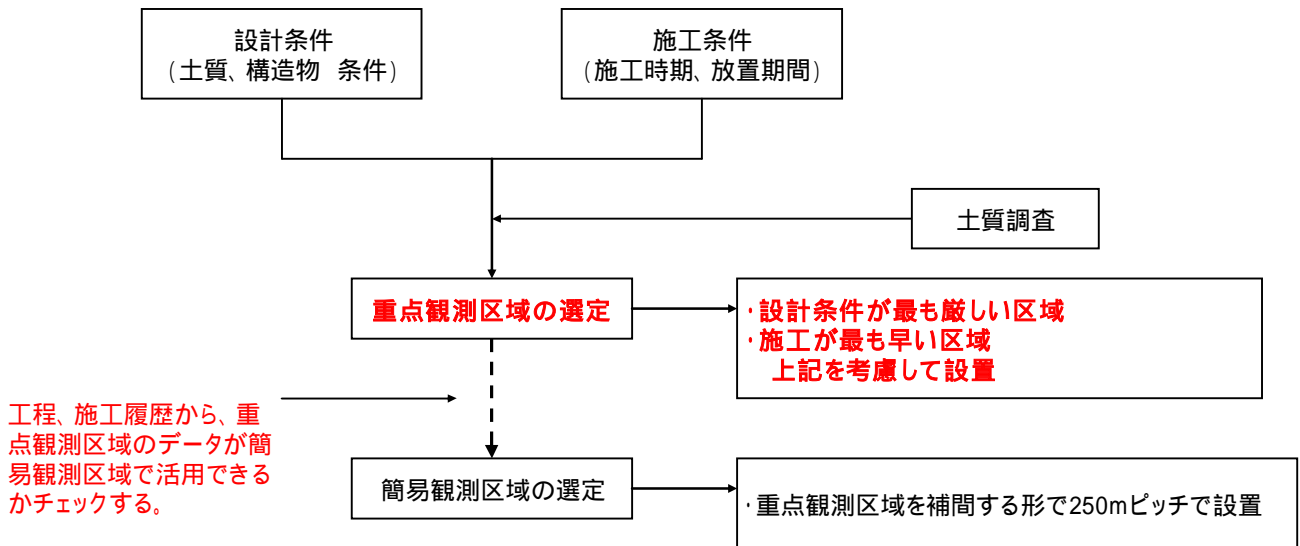


図 2-1 重点観測区域および簡易観測区域の設定

2-3 計測計器配置

施工時計測計器の平面配置図を図 2-2 に、重点観測区域の断面配置図の一例 (E-8 エリア) を図 2-3 に示す。これらは既往の土質調査に基づく計画であり、今後実施される土質調査結果や施工平面展開の変更により再検討を行う可能性もある。

計測計器の設置、メンテナンスおよび計測作業は計器が配置される各工区が行う。取得したデータは適時、沈下・動態観測システム (後述) に登録し、他工区および発注者間で共有する。

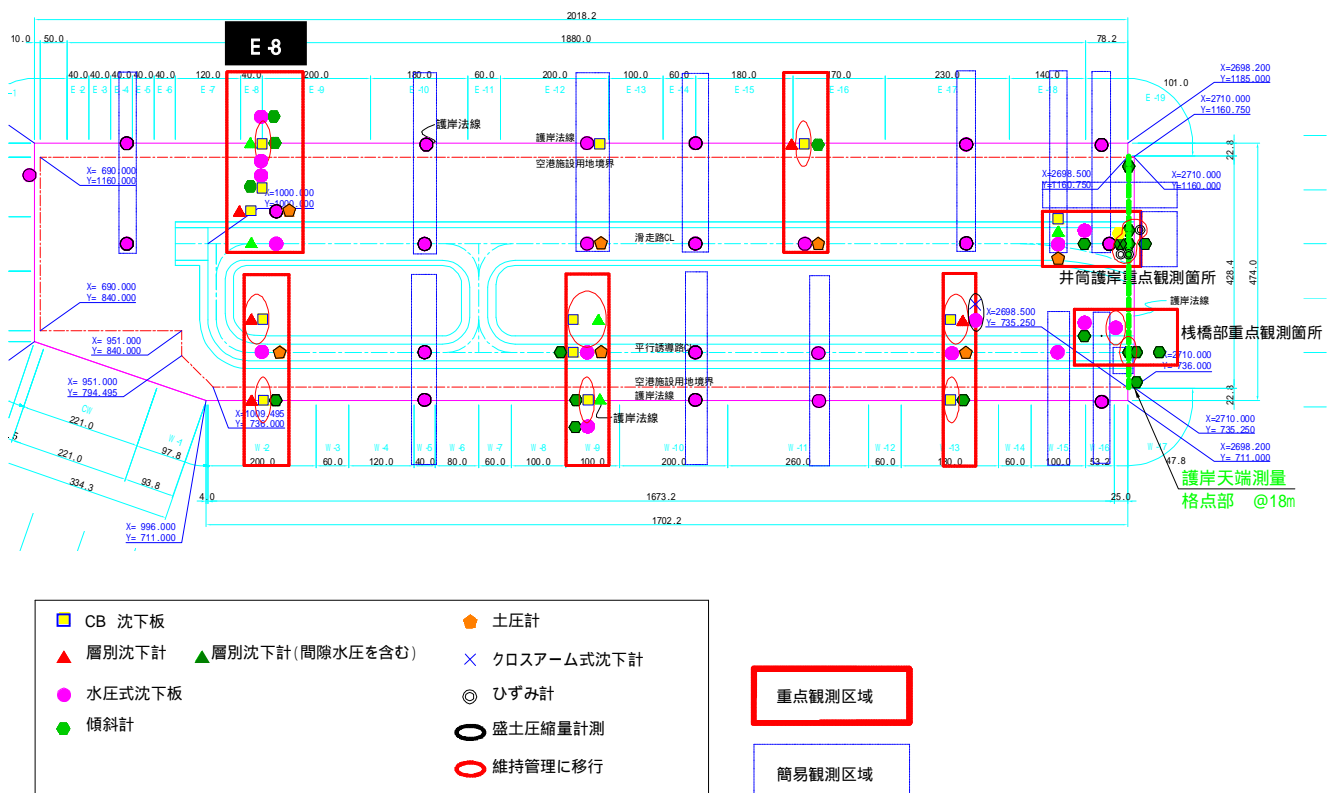


図 2-2 計測計器平面配置図

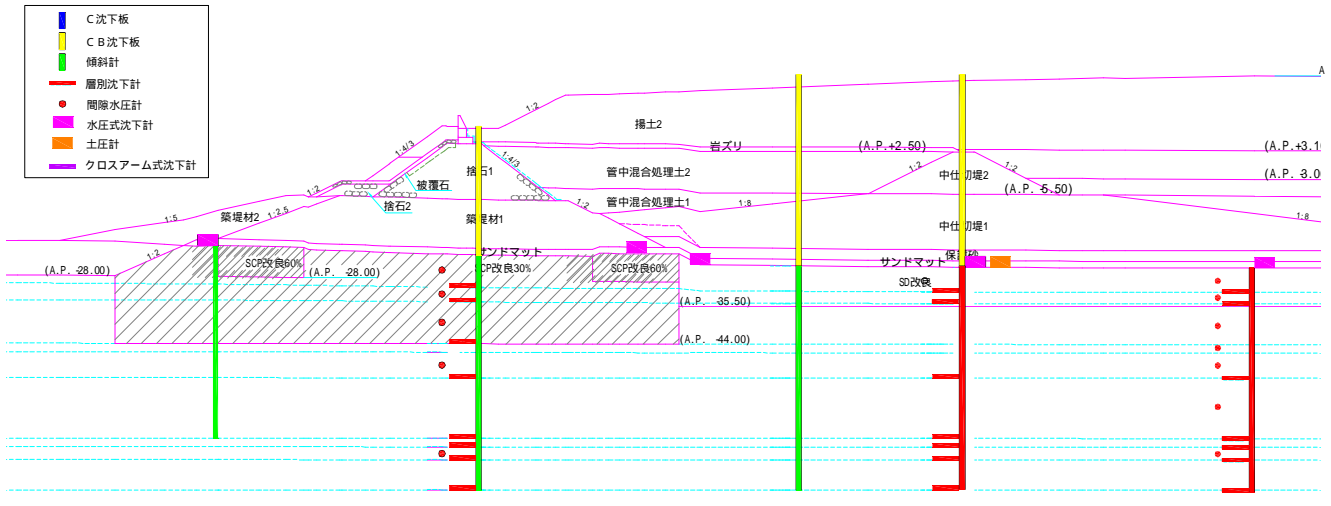
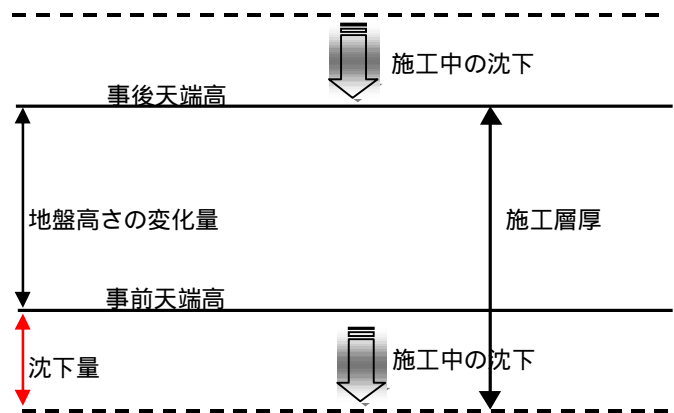


図 2 3 計測計器断面配置図 (重点観測区域 (E-8))

3. 埋立・護岸部の層厚・沈下管理

3-1 層厚・沈下管理の目的

埋立・護岸部の沈下は、重点観測区域及び簡易観測区域を設けて、沈下板、水圧式沈下計、層別沈下計等の埋め込み型の計器、および深浅測量により計測を行う。沈下量の把握は、圧密が設計時の想定どおり進行しているか、その結果、原地盤の強度増加が想定どおり期待できるかを判断することを目的とする。また、層厚管理（施工層厚の把握）に関しても沈下量の把握は重要であり、地盤高さの変化量に沈下量を加えることにより施工層厚が求まる。層厚管理を行うことにより、正確な出来形管理（工種ごとの施工層厚の把握）や、施工履歴を考慮した安定管理（実荷重に基づく安定計算）が可能となる。



$$\text{施工層厚} = \text{地盤高さの変化量} + \text{沈下量}$$

図 3-1 に施工層厚と沈下量の関係を示す。

図 3-1 施工層厚と沈下量の関係

3-2 層厚・沈下管理手法

3-2-1 深浅測量による層厚・沈下管理

本工事では、施工管理測量において従来の単素子方式の測量システムに代わり、大規模急速施工、海底地形の早期把握を目的にナローマルチビーム方式の測量システムを採用する。また、測量船の位置決めには、RTK-GPS位置管理システムを採用し高精度化を図る。図 3-2 に深浅測量のイメージ図を示す。

深浅測量による層厚管理は、施工後の地盤高データと施工前の地盤高データの差（施工による地盤高の増加分）を求めることにより行う。また、沈下管理に関しては、施工後の地盤高データと次施工前の地盤高データの差（放置による地盤高の減少分）を求めることにより行う。ただし欠測が生じた場合は、解析により

沈下量を補間し、それを加味した上で層厚を計算する。その上で残る誤差については、計測計器データを用いて補正する。沈下解析による補間、計測計器データによる補正のフローを図 3-3 に示す。

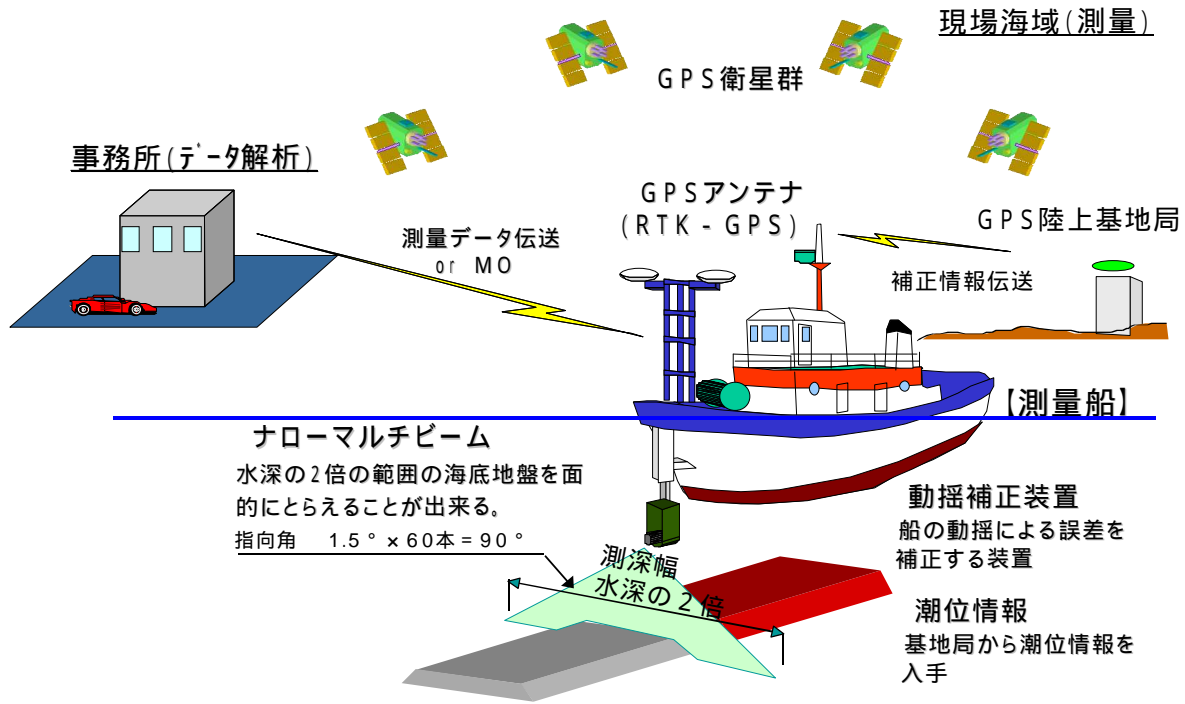


図 3-2 深浅測量のイメージ図

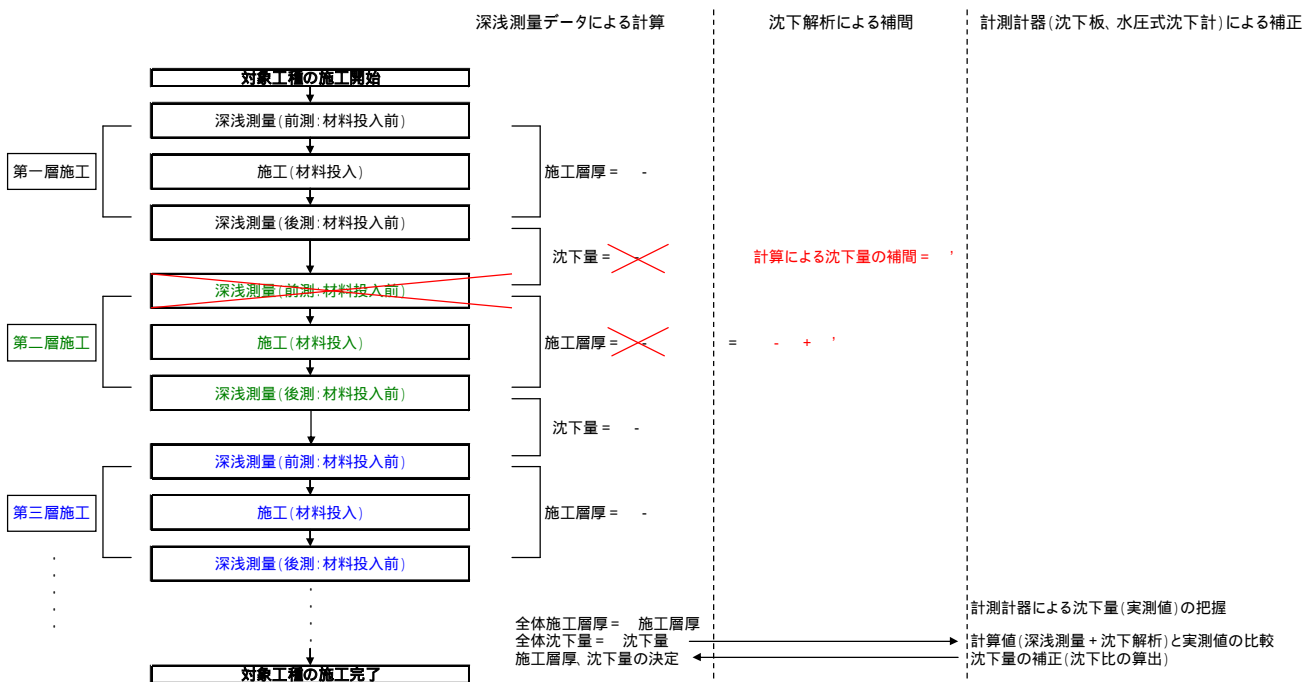


図 3-3 沈下量の補間・補正のフロー

3-2-2 沈下解析による層厚・沈下量の補間

深浅測量が実施できなかったときの、沈下解析による補間のイメージを図 3-4 に示す。深浅測量ができなかった場合、施工層厚および時間をパラメータとする沈下解析を行い、その結果を用いて沈下量を補間する。

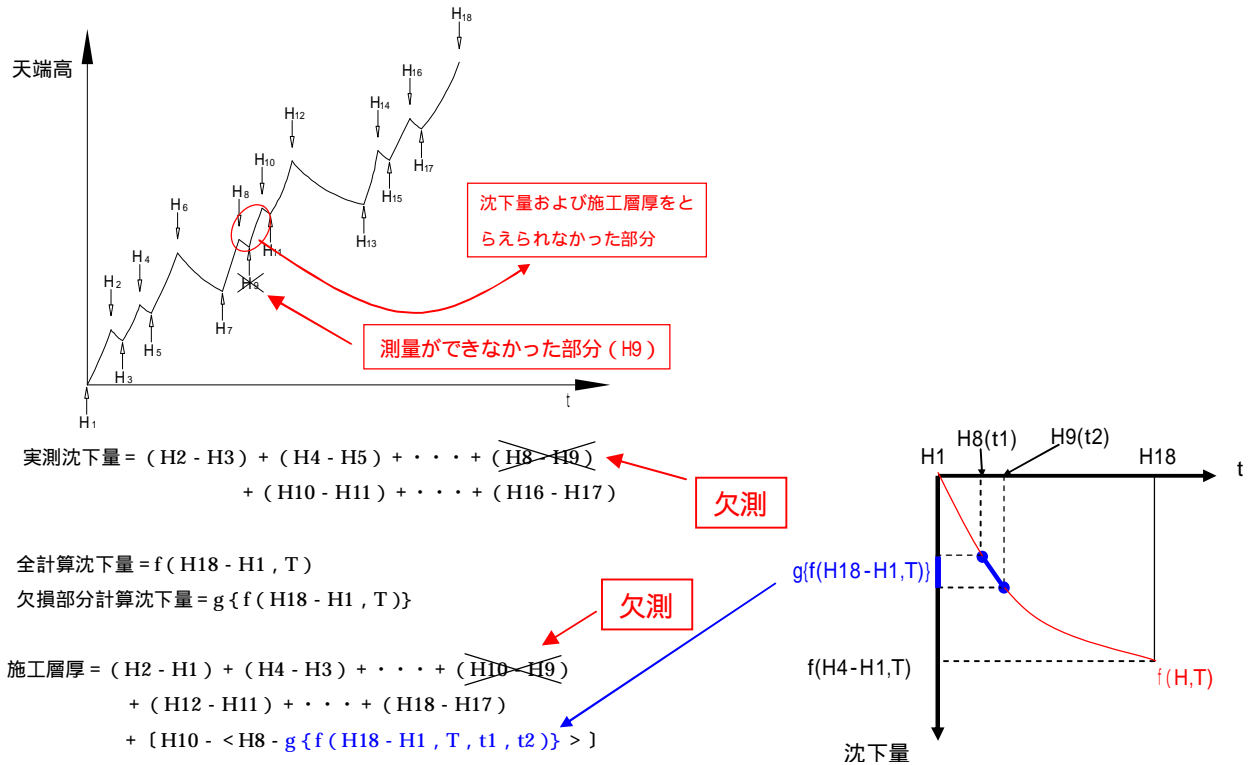


図 3 4 深浅測量データの補間

3 2 3 計測計器データによる沈下量の補正

本手法では、層厚・沈下管理を土砂投入前測量と投入後測量の差と補間解析で行うこととしている。しかし、その計算過程では土砂投入時における即時沈下を無視した（即時沈下量 0）手法であることから、実際の沈下量と深浅測量（+補間解析）による沈下量にズレが生じる可能性がある。

そこで、沈下計測のための各種計測機器（沈下板、水圧式沈下計など）で得られた沈下計測データと、同位置にて得られた補間後のデータ（深浅測量データを解析値で補間したデータ）を用いてキャリブレーションを定期的（工種ごと）に実施し、そのズレを補正する。具体的には実測沈下量と計測沈下量の比を沈下比として求め、沈下比を乗じることにより補正を行う。図 3 5 に計測計器データを用いた沈下量の補正のイメージを示す。実線が計算（深浅測量+補間解析）沈下量、点線が計測計器データから求めた沈下比を乗じた補正後の沈下量である。

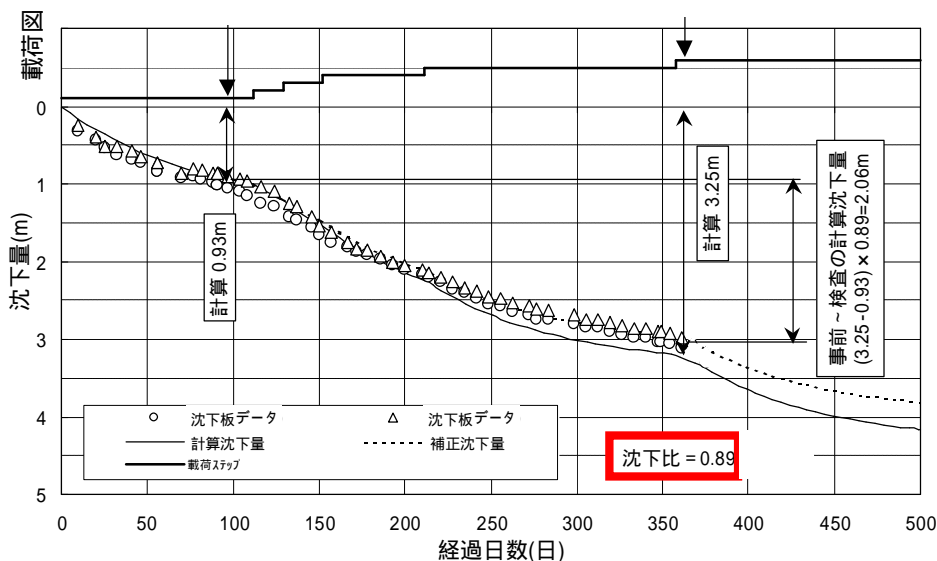


図 3 5 沈下量の補正

4. 埋立・護岸部の沈下・安定管理

4-1 沈下・安定管理の目的

沈下安定管理は、埋立に伴う原地盤の圧密沈下、および圧密沈下に伴う強度増加を適切に把握し、各施工段階における安定性を適切に評価するために行う。

4-2 沈下・安定管理手法

4-2-1 安定計算（円弧滑り解析）

安定計算（円弧滑り解析）は、実施工の载荷履歴データ（層厚管理の蓄積データ）に基づき行う。計算には、原地盤の圧密による強度増加量を適切に把握する必要があるが、重点観測区域において現地盤の沈下傾向とチェックボーリングにより得られる強度の関係を把握し、簡易観測区域に適応する方法や、圧密定数など原地盤の土質定数をフィッティングし、それを活用する方法等、複数の方法により実施する予定としている。実施工では各手法の適応性を適時判断して使用することを考えている。安定管理の判断基準は安定計算結果の安全率とし、安定管理図表は参考指標として使用する。図 4-1 に重点観測区域の沈下・安定管理手法のフローを示す。

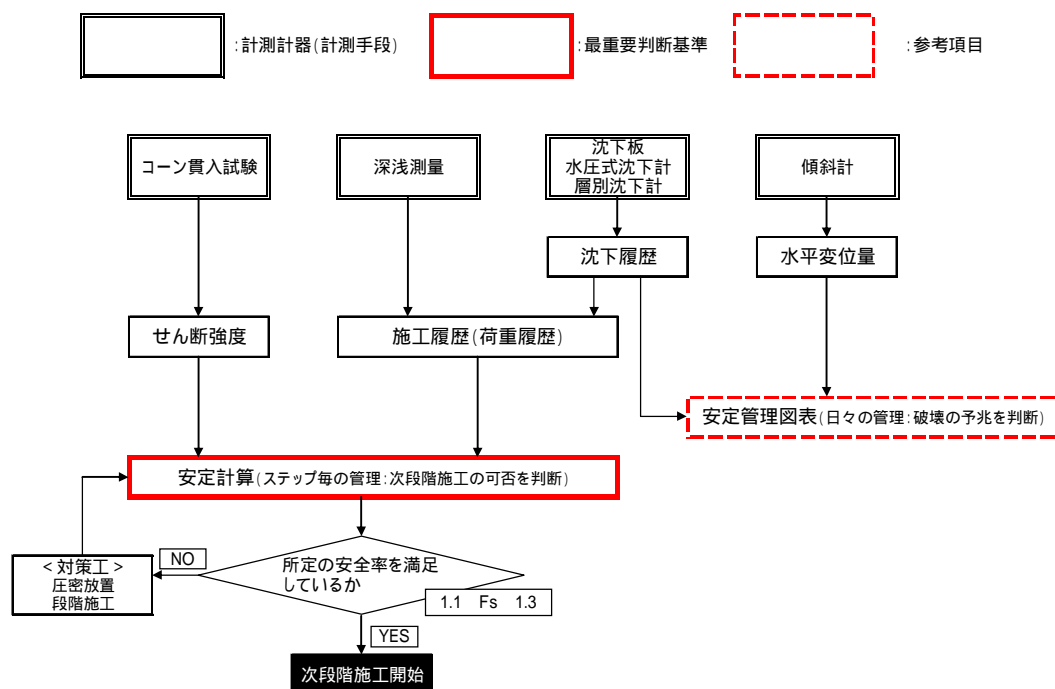


図 4-1 重点観測区域の沈下・安定管理手法

本工事における安定計算の必要安全率は、設計断面決定時の安全率を引き継いでおり、円弧の形状別に表 4-1 に示す。ただし、安全率に関しては、要求水準書に「安全率 1.1 $F_s < 1.3$ の場合は、施工中に地盤の変位及び応力を観測する計測施工を実施する。」と記述されており、「施工時計測により、土質のばらつきのリスクを回避できるような計測データを確認したときは、安全率 F_s 1.1 が次段階施工可否の判断基準の最低条件」となる。

表 4-1 安定計算の必要安全率

最もクリティカルな円弧の形状	使用安全率
円弧の大部分が砂層を切る場合	F_s 1.1
円弧の大部分が複合地盤 (砂層と粘性度層の互層) の場合	F_s 1.2
円弧の大部分が粘性土層を切る場合	F_s 1.3

図 4-2 に安全率 1.2 以上で管理する円弧の形状（円弧の大部分が複合地盤） 図 4-3 に安全率 1.3 以上で管理する円弧の形状（円弧の大部分が粘性土を切る場合）の例を示す。

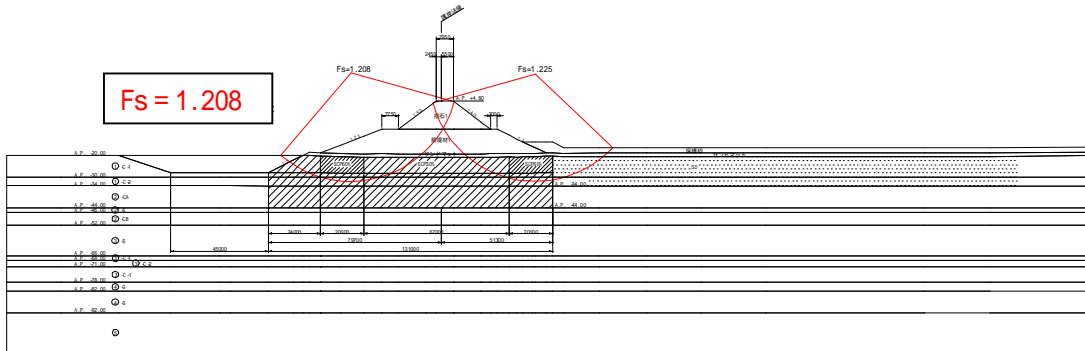


図 4-2 安全率 1.2 以上で管理する円弧の形状

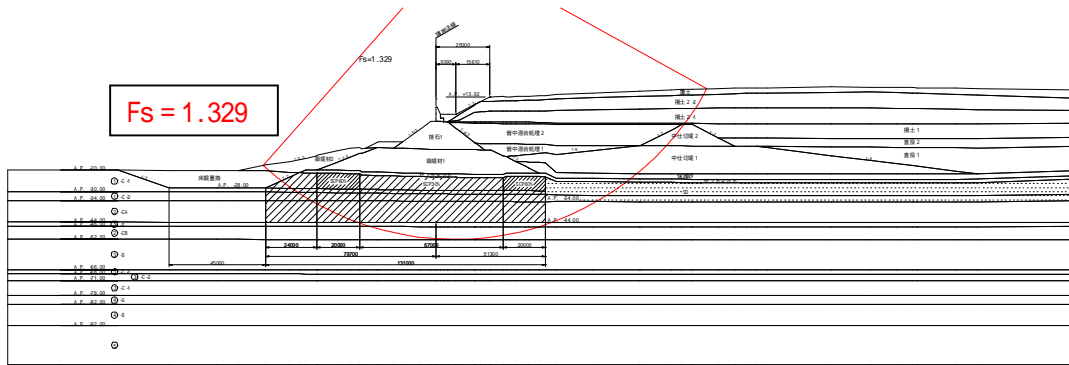


図 4-3 安全率 1.3 以上で管理する円弧の形状

4-2-2 強度管理手法

施工時の安定においては、施工中の地盤強度の確認が重要であり、重点観測区域では地盤の強度を直接計測し、所定の強度を確認後施工を行う。本工事では、地盤強度の管理手法として、コーン貫入試験と一面せん断試験を用いた手法を用いる。施工前に実施する土質調査にて、コーン貫入抵抗と強度との関係を決定し（図 4-4 の直線の決定） 施工中にはその関係を用いて、コーン貫入試験により求まるコーン貫入抵抗から強度確認を行う。この手法はサウンディング調査であるため、軟弱な粘性土地盤においてはサンプリングによる乱れの影響がないことや、本工事のように、工期の制約が厳しいプロジェクトにおいては、必要時間の短縮効果が期待できるという点で有効な手段である。

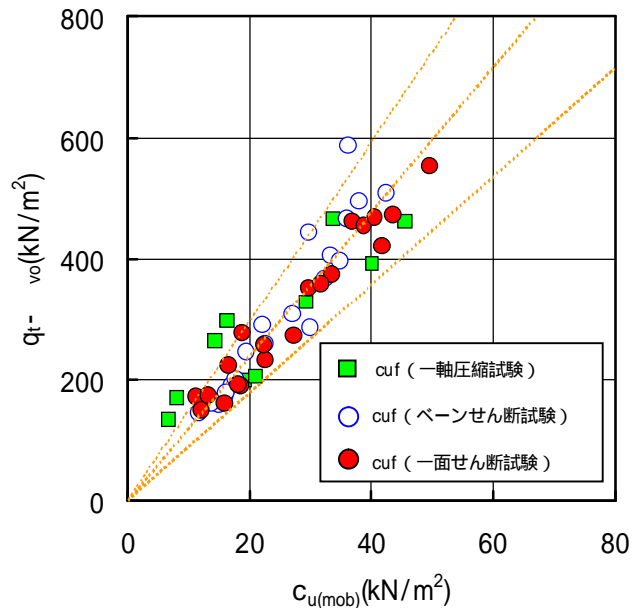


図 4-4 コーン貫入抵抗とせん断強度の関係

4-2-3 安定管理図表の活用

沈下・安定管理として、各施工段階において安定計算を実施し、次段階施工の可否を判断する方法のほかに、安定管理図表を用い、日々の計測データから破壊の予兆を判断する方法（主に水平変位量と沈下量の関係を用いる方法）を併用する。主の判断基準は安定計算の安全率となるが、安定管理図表による日々の管理もあわせて総合的に判断する。安定管理図表の例を図4-4、図4-5に示す。松尾・川村の方法は沈下量と水平変位量の比を、持永・栗原の方法は水平変位速度を、それぞれ判断基準とする方法である。

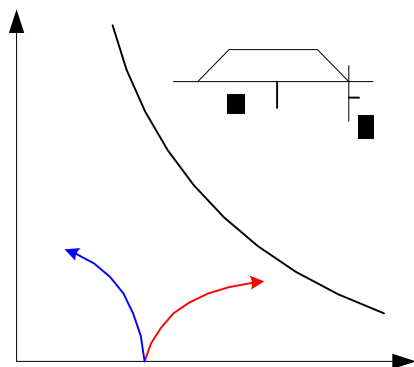


図 4-5 松尾・川村の方法

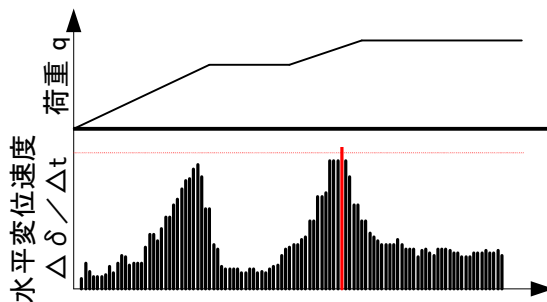


図 4-6 持永・栗原の方法

5. 最終埋立天端高さの設定について

空港島の要求水準を、供用開始後 100 年間にわたって維持管理していくためには、供用開始後の圧密沈下量や盛土材圧縮量を精度良く予測し、その結果に基づいて適切な余盛り量を設定する必要がある。このような目的に対応するために、空港島(埋立部)全体の圧密沈下予測を管理する圧密沈下予測・管理システム（HASP : Haneda Airport Settlement predict Program）を開発、使用する。HASP は、空港島建設の全施工履歴を載荷荷重データベースとして管理し、平面的な施工履歴差と 3 次元的な荷重分散を考慮することができる。図 5-1 に HASP の運用計画（案）を示す。

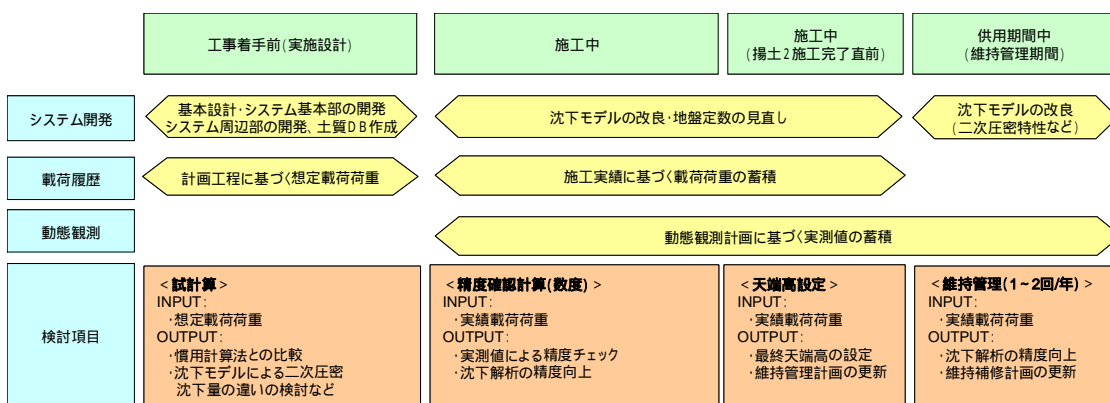


図 5-1 HASP の運用計画（案）

5-1 最終埋立天端高さ設定の時期と手法

システムの導入に当たっては、施工時計測で得られる実測沈下量や間隙水圧値と解析値の整合性の

チェックを繰り返し行い、必要に応じて土質定数の見直しを実施していくことになる。このように、試験結果や施工時計測結果を反映させながらシステムの改良（モデルの改良、パラメータのフィッティング等）を継続して行うことによって、より精度の高い最終埋立天端高さの設定を検討する。最終埋立天端高さの決定工種は揚土2とする。図 5-2 に最終天端高設定の概念図を示す。

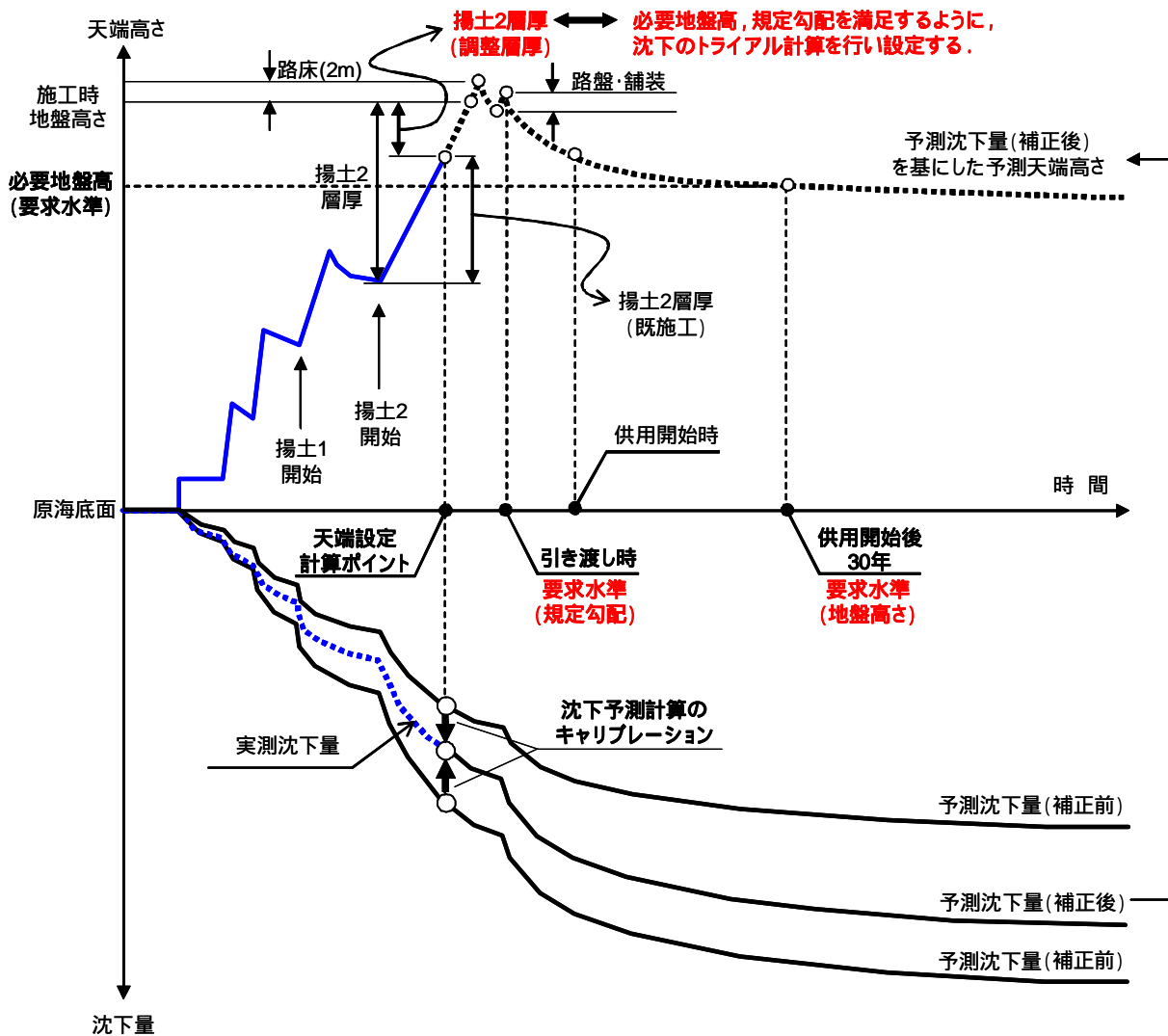


図 5-2 最終天端高さ設定の概念図

5-2 埋立最終天端高さ設定のイメージ

最終天端高は揚土2で調整する。上げ越し量は30年後にも基本計画高を下回らないことを目標にHASPの計算結果を用いて設定する。

滑走路勾配については、工事完了時に滑らかな形状で引き渡すものとする。HASPで計算された残留沈下量を、そのまま基本計画地盤高に上乘せすると滑走路勾配は不連続となる（次項図 青点線）ため、最終天端高さの決定は以下の方法で行う。

HASPの残留沈下量により23側滑走路端部と滑走路中心部の最終天端高さを決定し、その間は滑らかに補間する。

案により要求水準を満たさない場合には、残留沈下量の大きい地点に合わせて全体をかさ上げる。（23側滑走路端部および滑走路中心部は高止まりする。）

案が非常に非経済的な計画になる場合（残留沈下量のばらつきが非常に大きい場合）には、勾配変化点の追加が可能であるかを検討する。

案が実現不可能な場合は、供用開始後の補修工事に対応する。
埋立最終天端高の設定方法について図 5-3 に示す。

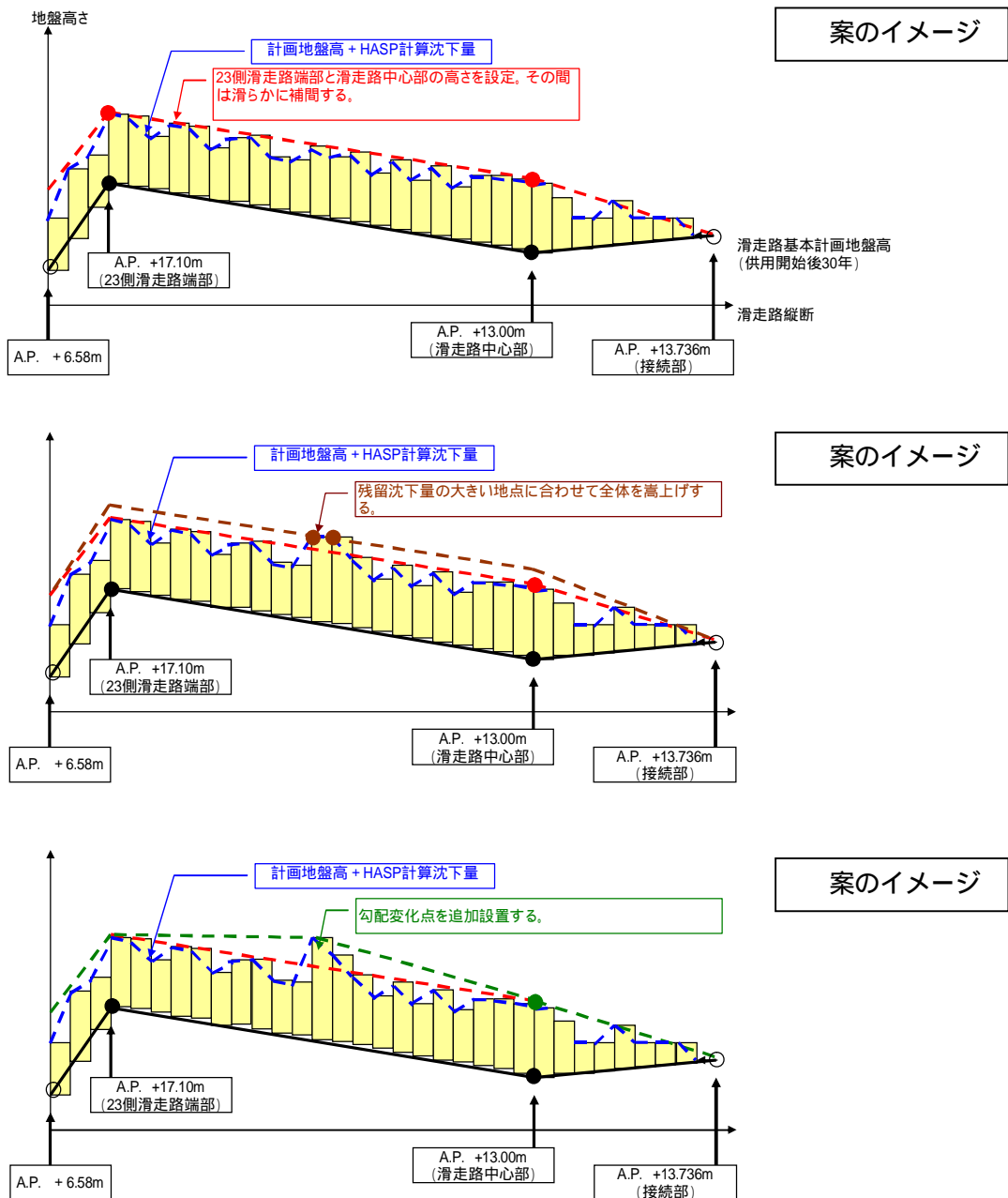


図 5-3 埋立最終天端高の設定方法（案）

6. 沈下・動態観測システムの構築

ここまで、情報化施工の2つの目的、 施工中の沈下・安定管理、 最終埋立天端高の設定、 について述べてきたが、 これらを可能とするデータの収集は、 計器が配置される各工区が行う。しかし、本工事は、重点観測区域から簡易観測区域へのデータの引渡しがあるように、工区間のデータの共有が施工管理上非常に重要となる。そこで、各工区の計測データの一元管理、情報の共有化を目的として、沈下・動態観測システムを構築する。本システムは、各工区に設置された計測計器データを入力データとし、経時変化図、深度分布図、安定管理図の作成、表示を行う（各工区のデータ入力頻度に関しては、計器ごとにJV共通のルールを設定した）。計測データは全工区で閲覧することができ、後行エリアは先行エリアの挙動を確認し施工することができる。

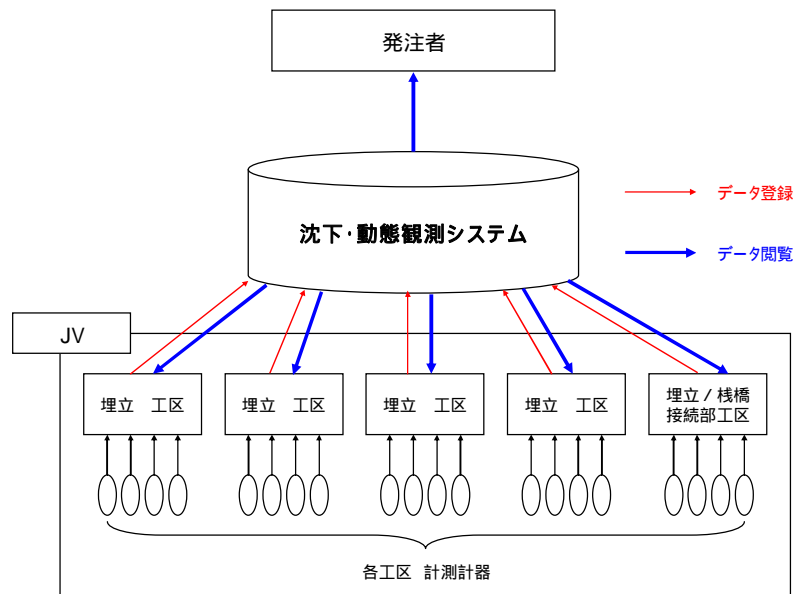


図 6-1 計測データ共有化のイメージ

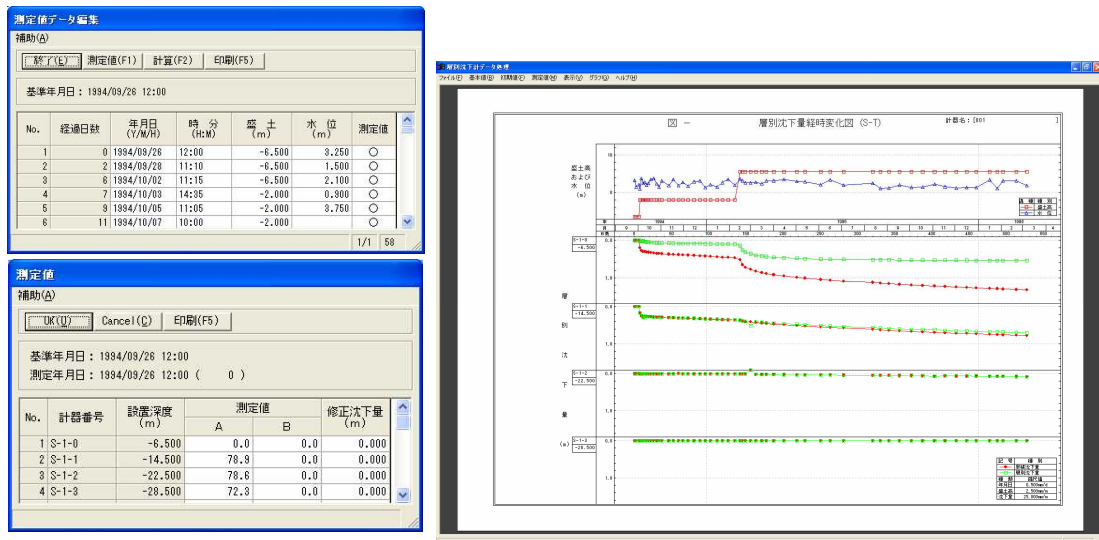


図 6-2 計測データ表示画面例

7. あとがき

本工事に情報化施工を導入した最大の目的は、厳しい施工条件のなか、施工時計測データを有効に活用することにより安定管理を確実に行うことである。この目的を達成するためには、事前の計測計画を十分に検討することはもちろん、施工中に取得する実データをいかに評価・分析するかが極めて重要である。過去に例のない急速施工、高盛土という施工条件に加え、異種構造物の相互作用までも考慮する必要あるが、計測データの慎重な評価・分析を行うことにより、本工事を安全に完成させることに尽力したい。

【参考文献】

- 1) 地盤工学会編：軟弱地盤対策工法 - 調査・設計から施工まで、pp.379-383.
- 2) 半沢秀郎ら：粘土のノーマライズされた非排水せん断強度、土と基礎、第39巻、第8号、pp.97~102.
- 3) 田中洋行ら：我が国の正規圧密された海成粘性土の静的コーン貫入試験から得られる特性、港湾技術研究所報告、第31巻、第4号、pp61~92.