

D滑走路における埋立部情報化施工（中間）報告

～護岸築造における調査・観測経過～

護岸・埋立(IV)工区 塚谷常廣、高橋充、榊原務

東京空港整備事務所 野口孝俊

キーワード 経時沈下 安定管理 強度増加 Cv 動態観測

1. はじめに

東京国際空港D滑走路建設外工事（以下、本工事）は、軟弱な沖積粘土層、その下の砂層を挟んだ粘土層及び礫層からなる地盤上に建設される。設計・施工上の問題として、地盤の変形を許容した設計及び施工を行う必要があり、地盤の強度、沈下、変形を予測する事は極めて重要な課題となっている。本工事では、定置式の沈下板や傾斜計などによる動態観測と深淺測量による測量及びCPTによるチェックボーリングにより地盤変形把握や安定管理を行っている。

本報告は、埋立部の動態観測結果のうち、護岸部におけるSCP、サンドマット、築堤1、捨石の施工（平成18年3月～平成20年11月）の動態観測結果について報告するものである。

2. 動態観測計画の概要

2-1 動態観測の目的と手法

本工事における動態観測は、10種類の計測計器から得られる計測値とラジオアイソトープを併用した電気式静的コーン貫入試験（以下、RI-CPT）より得られる原地盤情報をもとに、施工中の層厚・沈下・安定管理、最終埋立天端高の設定、維持管理計画の立案を実施していくものである。本工事の埋立構造は、護岸部においては低置換サンドコンパクションパイル、埋立部において未貫通サンドドレーンによる地盤改良を採用し強度増加を期待した経済設計が行われているが、施工中においては圧密放置期間が十分に得られない中、高盛土を急速施工することから、精度良く地盤挙動を把握し確実な沈下・安定管理を実施する必要がある。

図2-1は、動態観測の計測項目とその計測値の活用方法を示したものである。強度、沈下、水平変位、埋

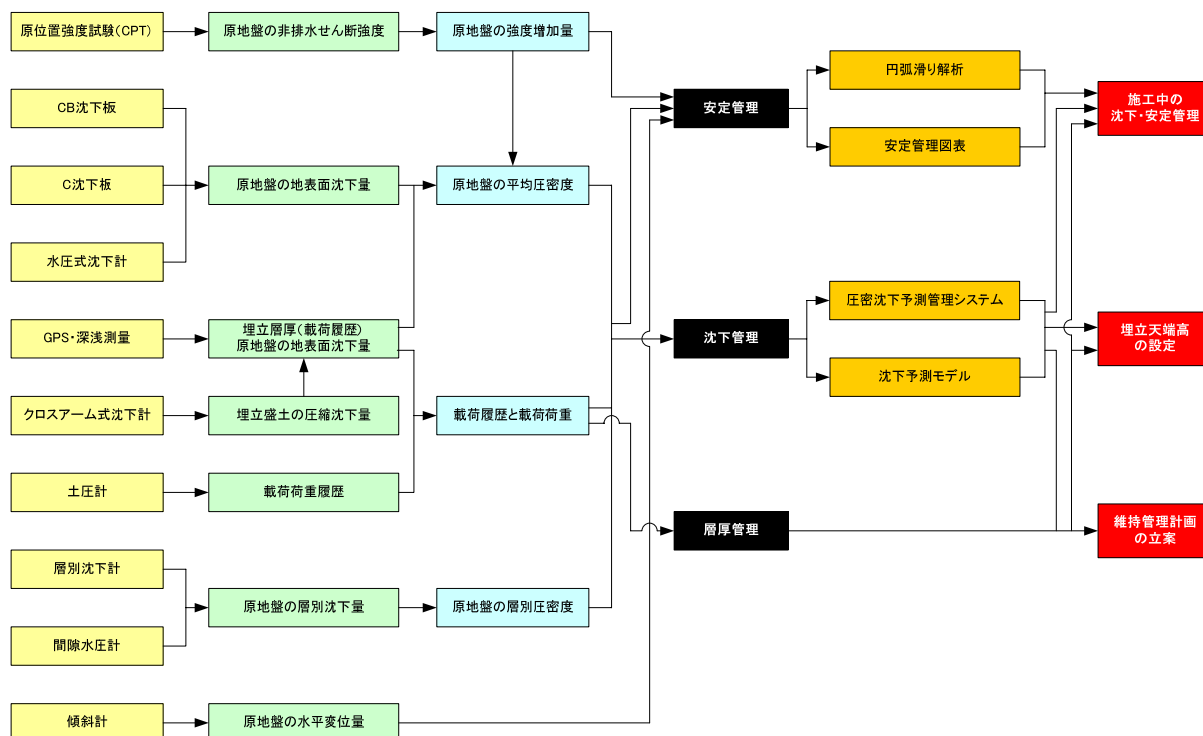


図2-1 計測項目とその活用

立荷重、施工履歴の把握に使用され、これらの情報を有効的に活用し沈下管理・安定管理・層厚管理を実施する。

2-2 動態観測計器配置

動態観測計器の配置は、安定上最も厳しい区域や先行施工区域など、設計条件や施工展開を考慮して 500m ピッチで重点観測区域を設け、それを補間するように 250m ピッチで簡易観測区域を配置している。

図 2-3 及び図 2-4 に動態観測計器平面配置と断面配置を示す。重点観測区域では、CB(C) 沈下板や水圧式沈下計、層別沈下計、傾斜計、間隙水圧計、土圧計、クロスアーム式沈下計を設置し、簡易観測区域では水圧式沈下計を設置している。各計測計器の目的は以下の通りである。

- ① 全沈下量の測定 C 沈下板、CB 沈下板、水圧式沈下計
- ② 層別沈下量（圧密度）の測定 層別沈下計、間隙水圧計
- ③ 埋立荷重の測定 土圧計
- ④ 側方変位量の測定 傾斜計
- ⑤ 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、原地盤粘性土の地盤改良

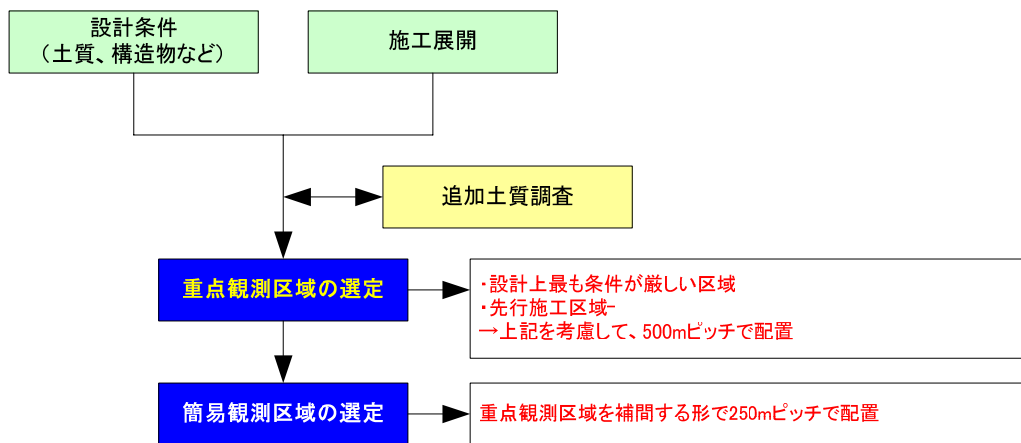


図 2-2 動態観測における重点観測区域と簡易観測区域の選定

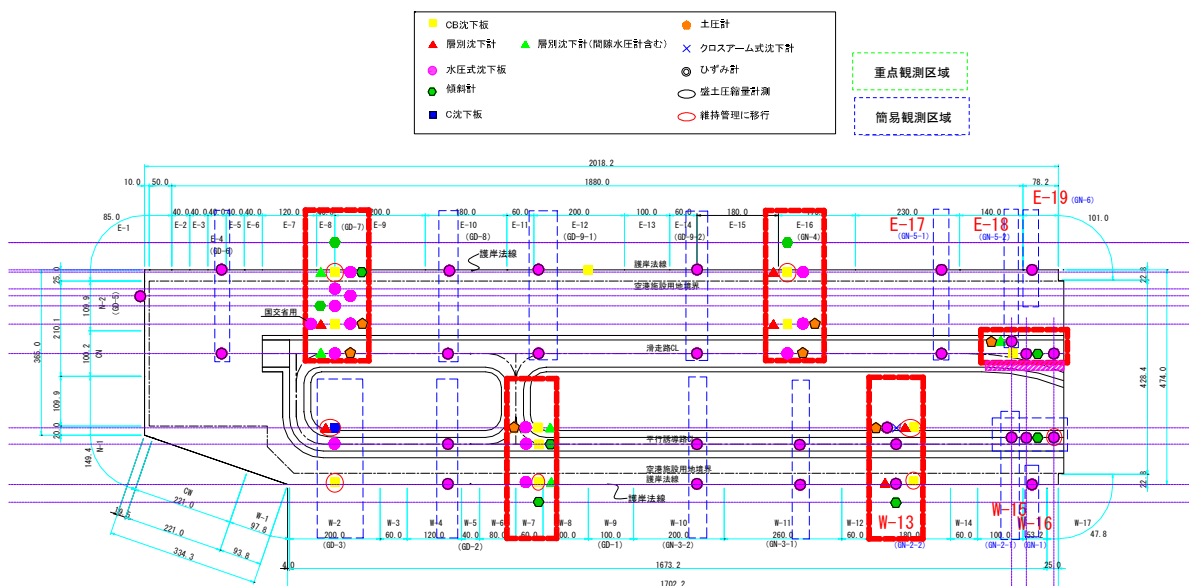


図 2-3 動態観測計器の平面配置

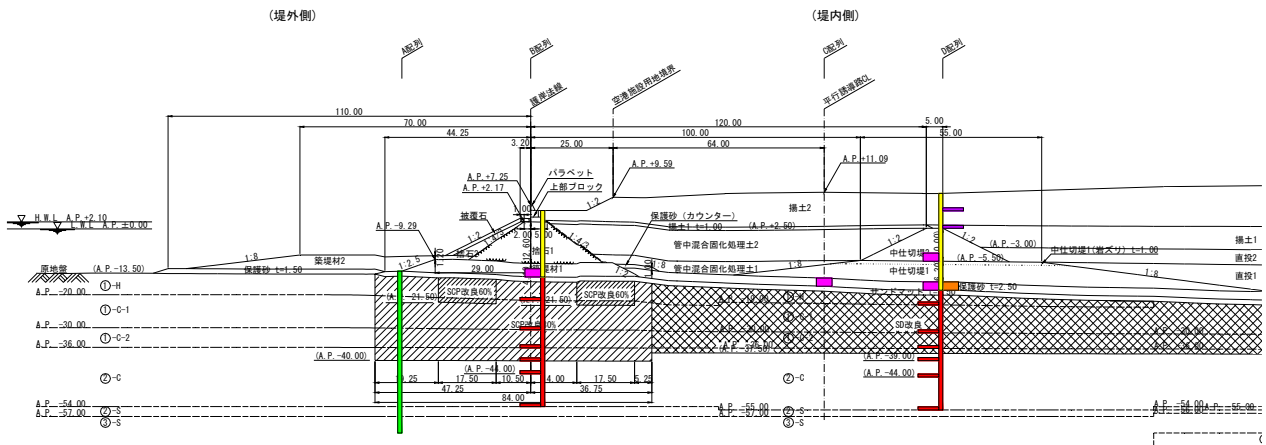


図 2-4 重点観測区域における動態観測計器の断面配置（重点観測区域 W-13）

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重点観測区域に設置した CB 沈下板を利用して原位置強度試験（RI-CPT）を実施する。

2-3 安定管理手法

本工事の安定管理手法は、事前調査により得られた初期地盤強度をもとに各施工段階において原地盤の強度増加を確認し円弧すべり解析結果から次段階施工の可否判断を行う方法と、主に陸上盛土で使用される安定管理図表を用いた方法の 2 手法を用いて施工時の安定管理を実施する。本報告では、前者について報告する。

(1) 原位置試験を用いた地盤強度管理

通常の工事では、サンプリングにより不攪乱試料の採取を行い、室内試験（一軸圧縮試験等）を経て原地盤の強度確認を実施する。本工事においては、大量急速施工、低圧密度での強度確認、不均質な粘性土地盤などの理由から、図 2-5 に示す原位置試験として迅速かつ低コストで連続的に有用な地盤情報（先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧）が得られる電気式静的コーン貫入試験（CPT）と湿潤密度を計測できるラジオアイソトープ（RI）を併用した RI-CPT を採用している。

また、本工事では、施工に先駆けて土質調査を実施しており、図 2-6 に示すように土質調査・設計段階にて CPT の実コーン先端抵抗と一面せん断試験（DST）の相関性を確認した上で、施工管理段階では CPT を用いて地盤強度を管理する地盤管理手法（ACCESS 法）を基本骨格としている。実コーン先端強度と非排水せん断強度はコーン係数 N_{kt} での相関づけられ、施工中においては各施工段階で実施する RI-CPT の実コーン先端強度にコーン係数を除して、施工中の非排水せん断強度を把握し強度増加を確認する。なお、チェックボーリングの対象となる工種は、護岸部では捨石 1 工、床掘工、埋立部では中仕切堤 1 工、中仕切堤 2 工、

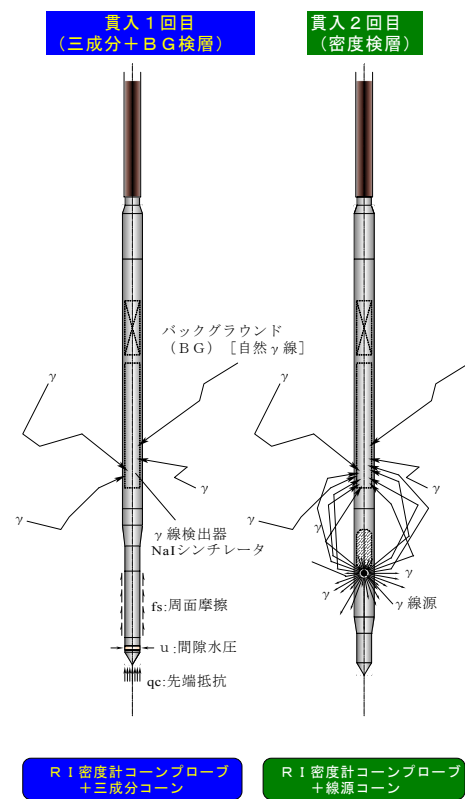


図 2-5 RI-CPT 実施概要

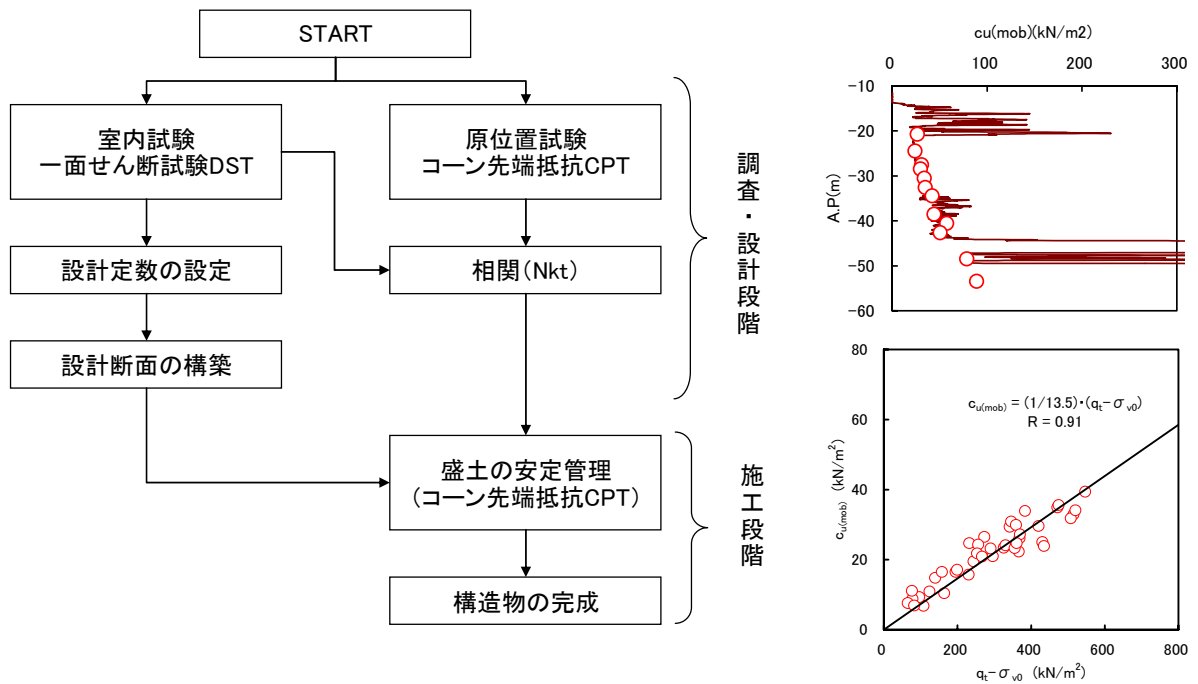
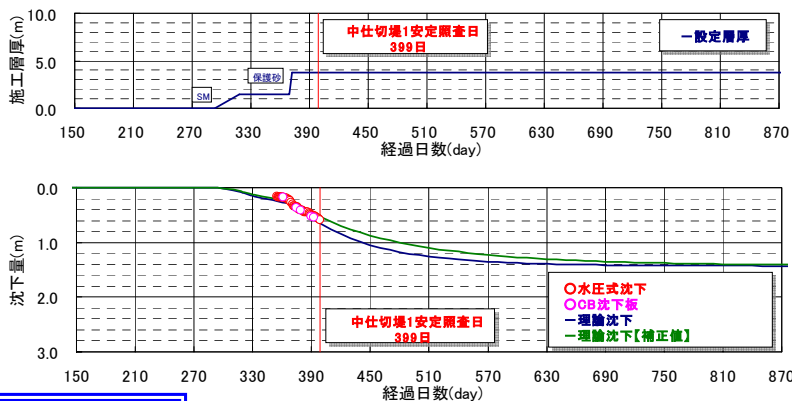
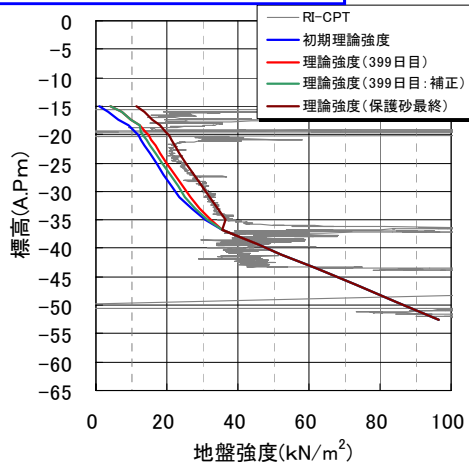


図 2-6 地盤強度管理手法 (ACCESS 法)

①沈下量のフィッティング



②強度のフィッティング



③安定計算の実施

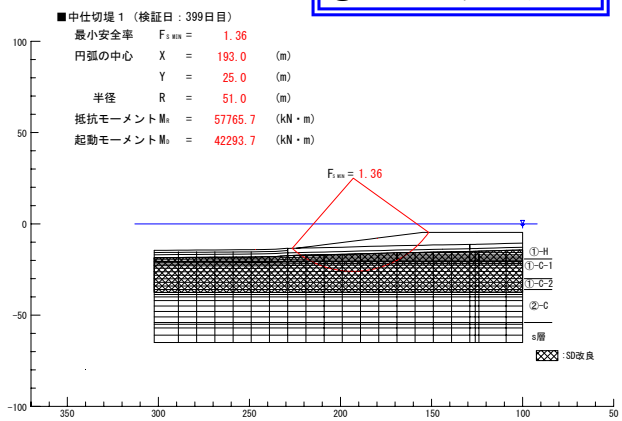


図 2-7 地盤強度管理による安定管理の流れ (イメージ)

全体では揚土1工、揚土2工であり、施工着手前にRI-CPTを実施する。

(2) 安定管理手法

本安定管理の一連を示したものが図2-7である。調査結果より得られた非排水せん断強度は施工履歴、施工層厚を再現した理論強度と比較する。この際、動態観測の沈下計測結果についても実測沈下量と理論沈下量の整合性を確認する。本工事の安定管理では、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ため、沈下傾向比較法、多成分法、沈下予測モデル活用法を複合的に使用し、現地盤強度の予測を実施する。これにより、現埋立荷重、施工履歴に対する理論強度・理論沈下量の発現状況が実測値と相違がないことを確認し、各護岸断面にて円弧すべり解析を実施し次段階施工の可否判断を行う。

3. 護岸部における沈下動態

本章では、2008年10月末までの護岸部での沈下動態観測結果を報告するものである。

3-1 経時沈下量

図3-1に水圧式沈下計及びCB沈下板の設置位置を示す。ここでは、代表例として埋立IV工区内の時間-沈下曲線について報告する。図3-2-1～図3-2-6は護岸部に設置されている水圧式沈下計及びCB沈下計の施工履歴と時間-沈下曲線を示している。護岸部の施工は10月末時点で捨石1の施工が完了している。水深条件、土層構成、施工層厚等の影響により若干の差異はあるものの、おおよそ1.5～2.0m程度の沈下が生じている。

護岸部③、④、⑤地点では、理論値に対して実測値が小さめに出ているが、理論値は当該エリアに存在する覆砂を考慮していない値であり、覆砂を考慮した理論値と概ね一致している。

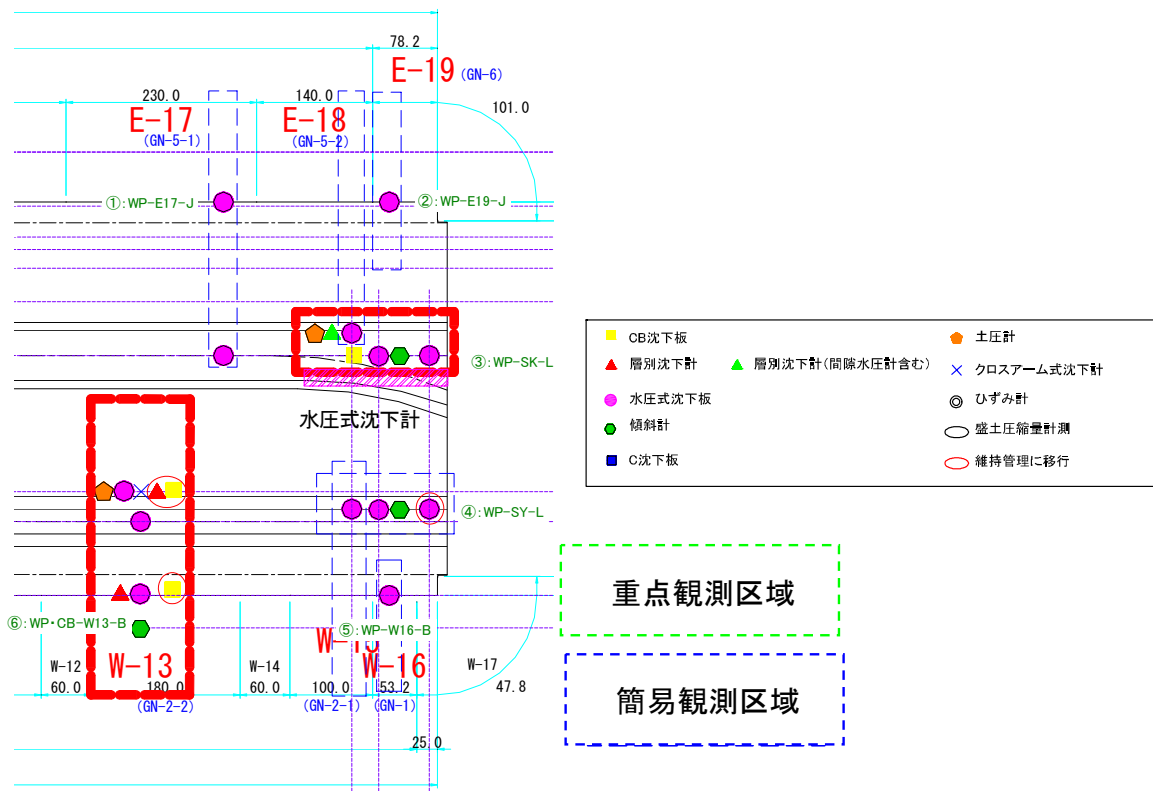


図3-1 水圧式沈下計及びCB沈下板の設置位置

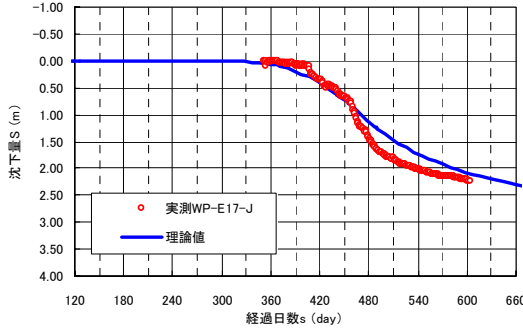
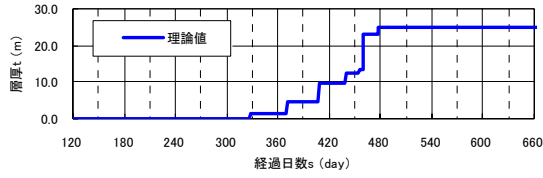


図 3-2-1 護岸部 ①:WP-E17-J

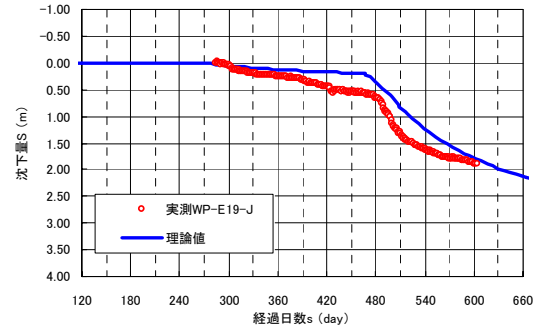
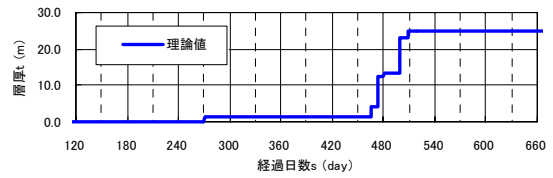


図 3-2-2 護岸部 ②:WP-E19-J

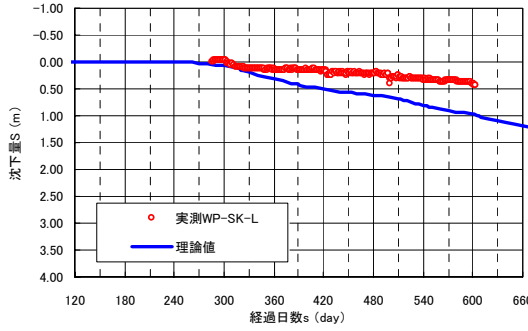
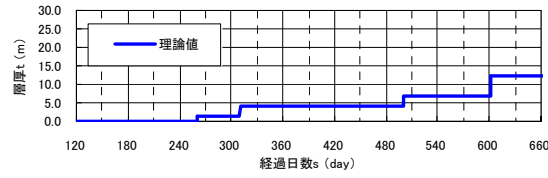


図 3-2-3 護岸部 ③:WP-SK-L

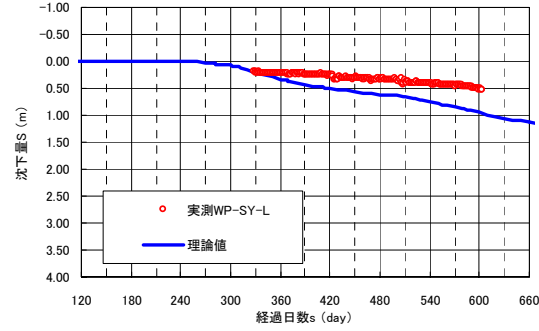
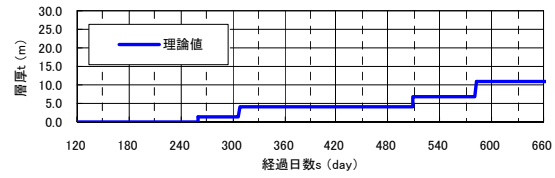


図 3-2-4 護岸部 ④:WP-SY-L

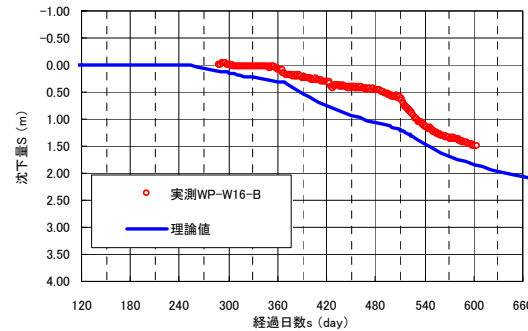
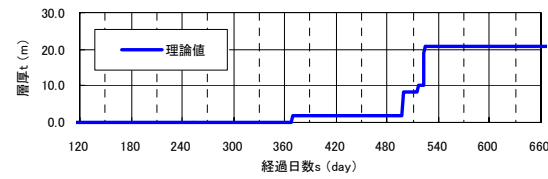


図 3-2-5 護岸部 ⑤:WP-W16-B

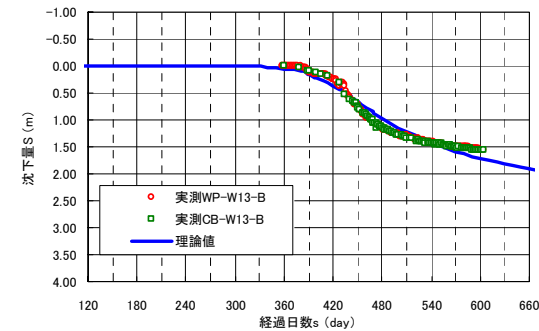
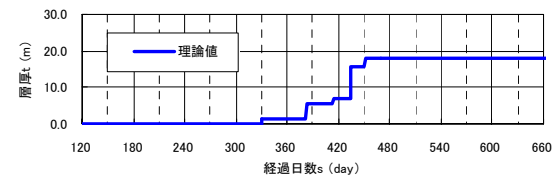


図 3-2-6 護岸部 ⑥:WP-CB-W13-B

4. 圧密による強度増加の確認

4-1 CPT による強度確認

本工事では、軟弱な沖積粘土層上に高盛土を急速施工する上、圧密による強度増加を考慮した経済設計がなされており、各施工段階においては原地盤の強度を確認し安定管理を実施する。原地盤強度の確認方法としては、CPT による原位置試験を実施し工種間の強度を確認するとともに RI を併用することにより物性値を把握する。CPT は先端抵抗、間隙水圧、周面摩擦の三成分を測定するタイプが標準的に使用されている。このうち先端抵抗及び間隙水圧の測定について、地盤工学会で基準化されている。本調査においても地盤工学会基準の電気式コーン貫入試験方法に即して実施しており、先端角 60° 、底面積 1000mm^2 のコーンを使用している。

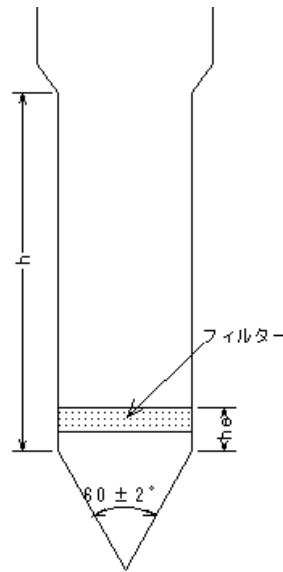


図 4-1 コーンの形状



図 4-2 コーンプローブの一例

(1) コーン係数 N_{kt}

図 4-3 は本施工に先駆けて行われた追加土質調査結果より実コーン先端抵抗 (=先端抵抗-全土被り圧) と一面せん断試験の非排水せん断強度の相関性を示したものである。これらの試験値は良い相関を示している。施工時のチェックボーリングでは、上部有楽町層については $N_{kt}=13.5$ を、下部有楽町層と七号地層については $N_{kt}=14.0$ を採用し、先端抵抗から非排水せん断強度を算定する。

(2) チェックボーリング実施工程

図 4-4 にチェックボーリング実施フローを示す。10 月末時点において護岸部では捨石 1 施工まで、埋立部においては中仕切堤 1 施工まで完了している。チェックボーリングの対象工種は、水深差による原地盤強度の違いや施工層厚の違い、また傾斜堤の急速施工等の施工条件により、断面設計時において安全率 $F_s=1.2\sim 1.3$ 程度を示す工種を対象に実施計画がなされている。

(3) チェックボーリング実施位置

図 4-5 にチェックボーリング実施位置を示す。チェックボーリングは基本的に重点観測区域に設置された CB 沈下板位置で行っており、面的に均等配置された調査位置においてチェックボーリングを実施している。

4-2 チェックボーリング結果

図 4-6-1～図 4-6-6 に護岸部において実施されたチェックボーリング結果を示す。なお、添え字に 0 が記述されているものは各パラメータの初期値である (間隙水圧の場合は静水圧)。

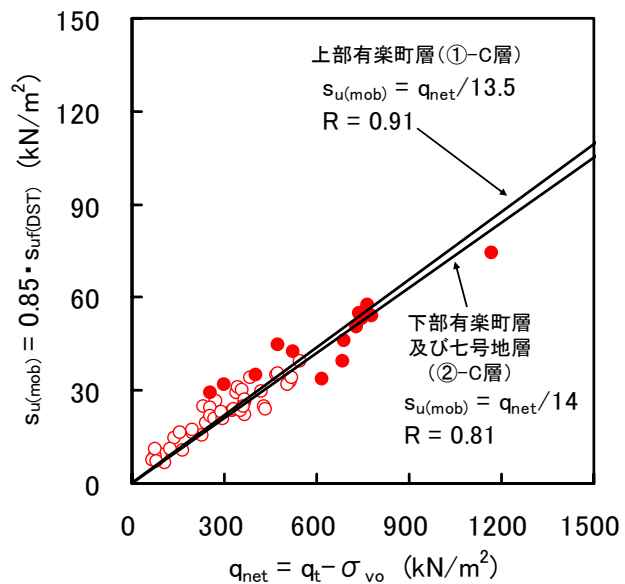
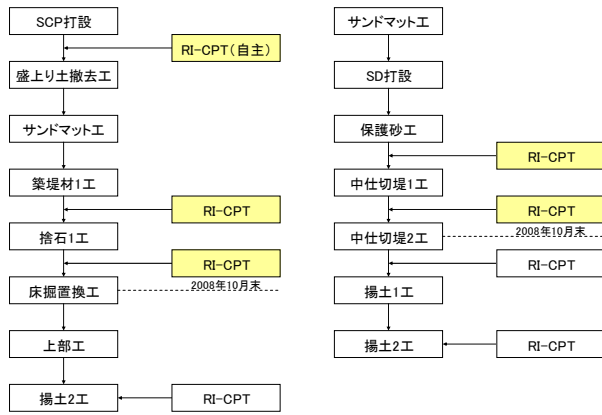


図 4-3 実コーン先端抵抗と非排水せん断強度の関係



護岸部 埋立部
 図4-4 チェックボーリング実施フロー

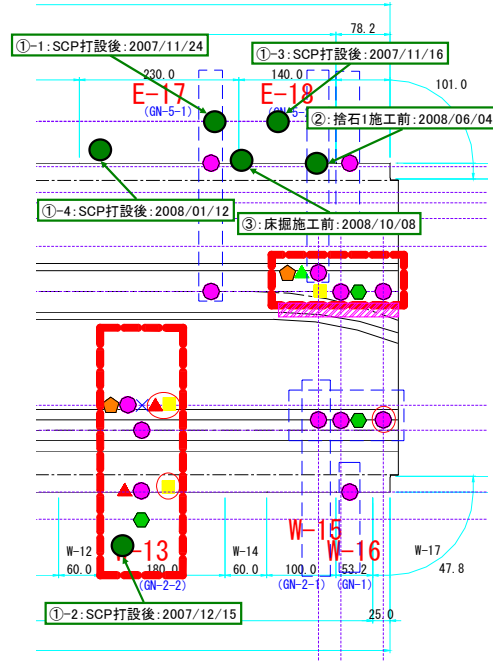


図4-5 チェックボーリング実施位置

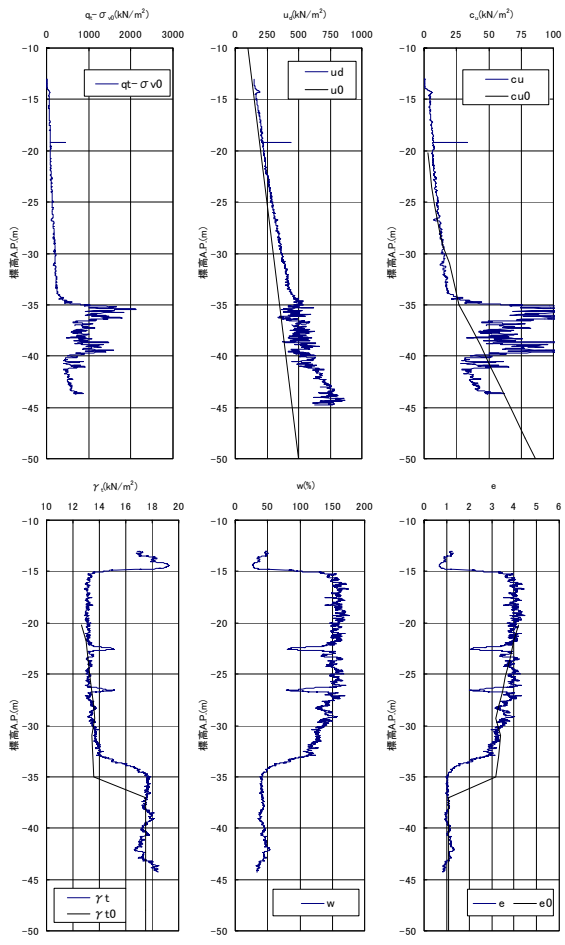


図4-6-1 ①-1: SCP 打設後 (打設後 36 日目)

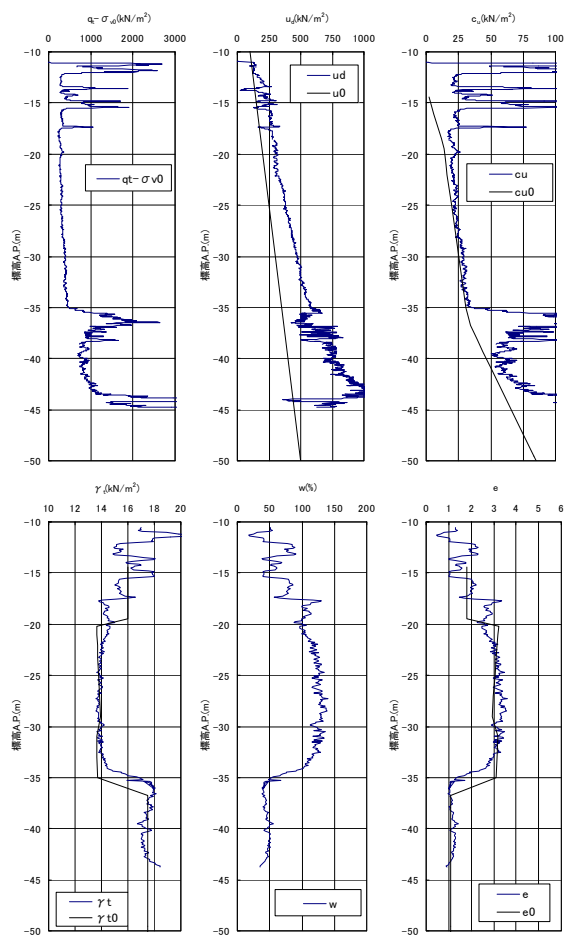


図4-6-2 ①-2: SCP 打設後 (打設後 108 日目)

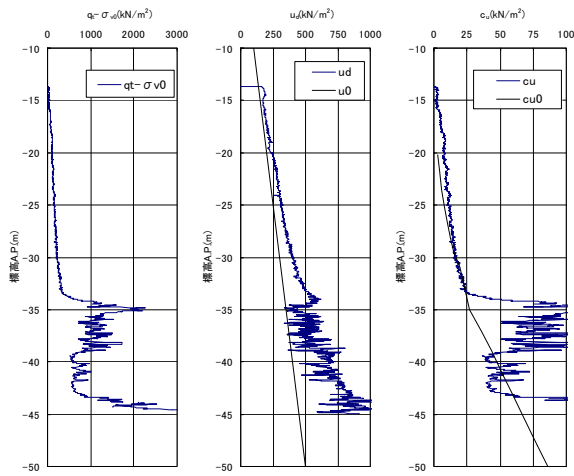


図 4-6-3 ①-3 : SCP 打設後 (打設後 83 日目)

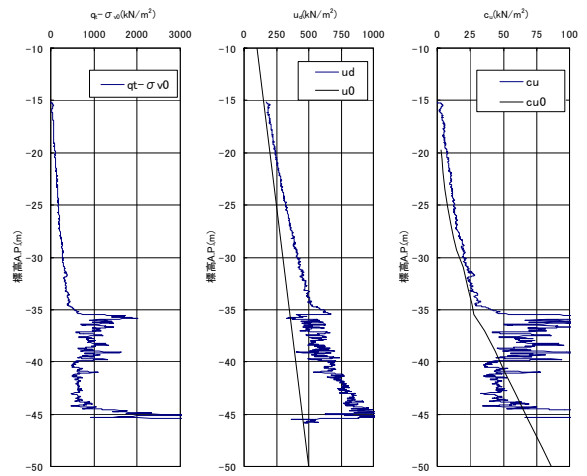


図 4-6-4 ①-4 : SCP 打設後 (打設後 66 日目)

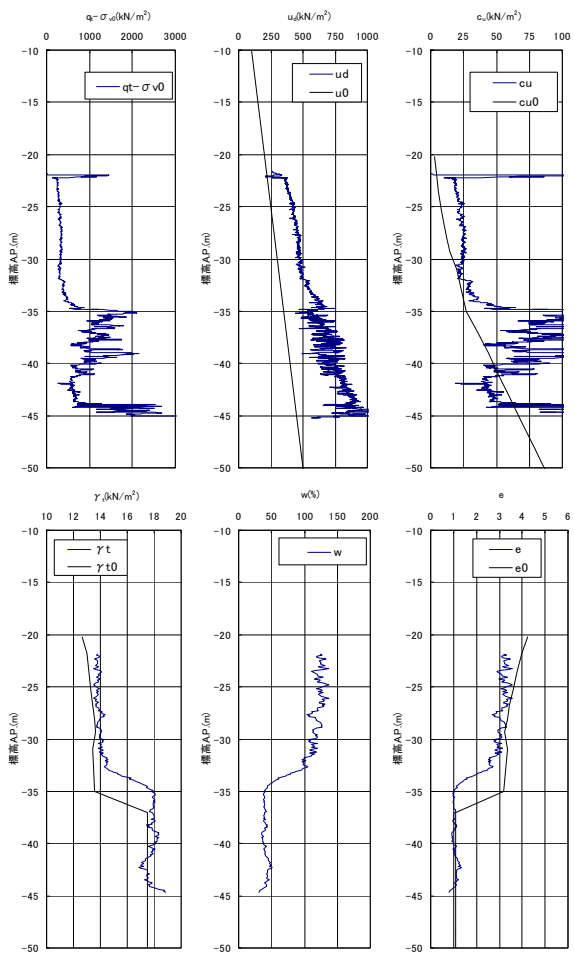


図 4-6-5 ② : 捨石 1 施工前

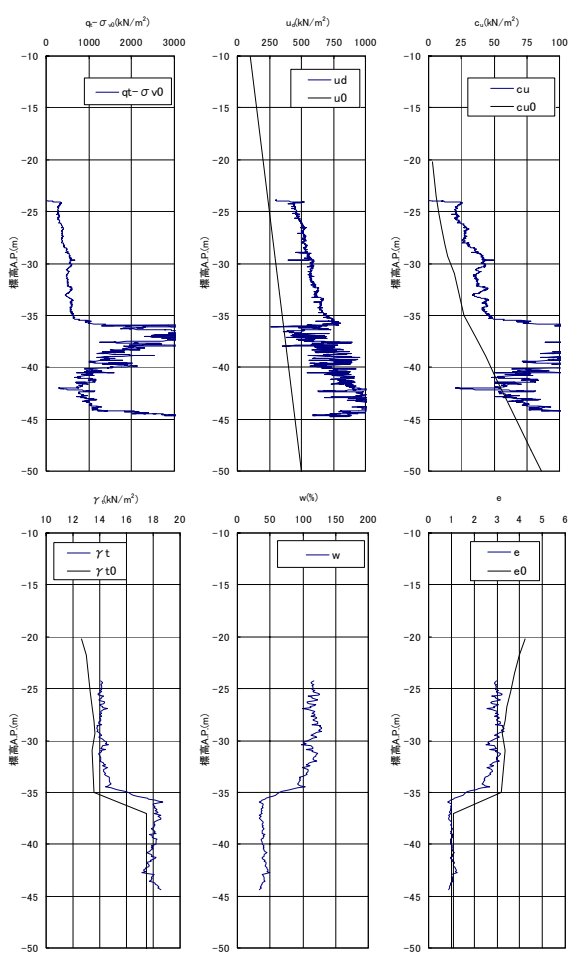


図 4-6-6 ③ : 床掘施工前

4-2 SCP 打設後の強度回復について

沖側護岸部における SCP 打設後の地盤の強度回復について、図 4-6-1 及び図 4-6-3、図 4-6-4 の結果より考察する。図 4-7 はこれらの調査結果を原地盤強度との強度差で整理して示したものである。

A. P. -30m 以浅に位置する①-C-1 層（有楽町層上部）では概ね 1~2 ヶ月、A. P. -30m~35m に位置する①-C-2 層（有楽町層上部）では 2~3 ヶ月経過後に概ね原地盤強度まで強度回復することがわかる。一方、A. P. -40m~45m に位置する②-C 層（比較的均質な粘性土部：有楽町層下部・七号層）では、時間経過とともに強度回復する傾向は伺えるが、3~4 ヶ月の時間経過を経ても、未だ原地盤強度まで回復するには至っていない。②-C 層は、もともと洪積層であり、原地盤の OCR が大きく ($OCR_{設計}=2.5$)、SCP 打設による強度低下量が原地盤強度に対して大きかったため、原地盤強度まで回復するのに多くの時間を有するか、もしくは、SCP 打設後時点の土被り圧のまま放置しても原地盤強度まで回復しない可能性があるものと推測される。

(4) 現空港側護岸部 SCP 打設後の強度について

図 4-6-2 は現空港側護岸 SCP 打設後の調査結果である。現空港側についてはいずれの深度においても初期地盤強度を満足する結果である。これは SCP 打設後 108 日経過しており一度低下した強度が回復したものと考えられる。②-C 層においては沖側と現空港側で SCP 改良深度が異なり、沖側が A. P. -42m に対して現空港側が A. P. -40m であるため、現空港側では SCP 打設による乱れの影響が少なかったものと推察される。

護岸部においては、SCP 打設による乱れの影響を懸念し、初期地盤強度に対して施工時の護岸の安定性を確保する設計断面となっているため、現空港側護岸部では捨石 1 施工まで可能であることが本調査により示された。

(5) 沖側護岸部の施工時の強度について

図 4-6-5、図 4-6-6 は捨石 1 施工前、床掘施工前の調査結果である。SCP 打設後の調査結果も含めて各施工段階の強度をプロットしたものが図 4-8 である。これを見ると施工が進捗することで強度増加していく傾向がわかる。特に床掘施工前の調査結果については②-C 層においても強度回復が見受けられ、

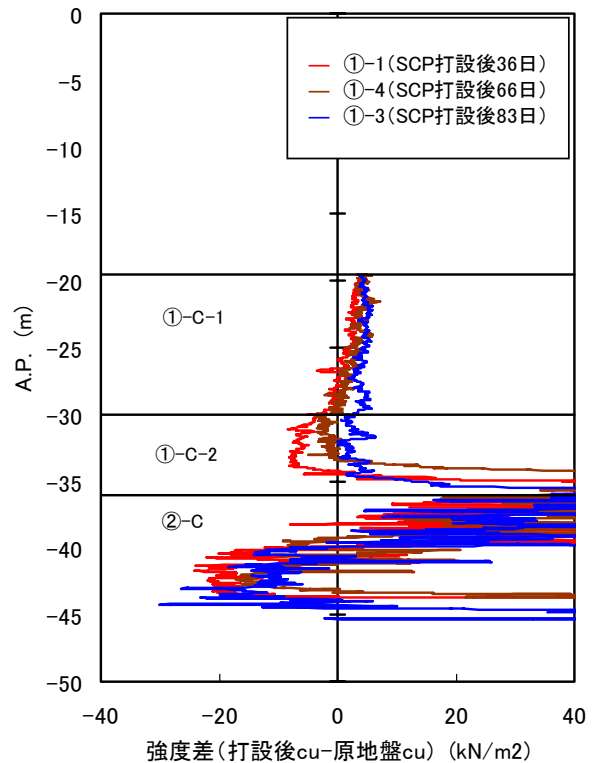


図 4-7 沖側護岸部 SCP 打設後の強度回復傾向

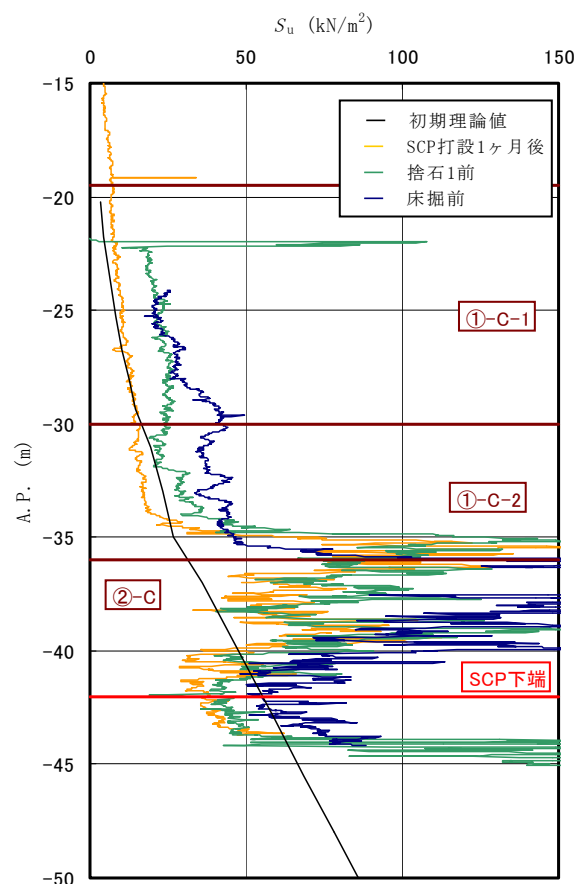


図 4-8 沖側護岸部の強度増加

現空港側と同様に全深度で初期地盤強度を上回る結果となっている。これらの試験結果をもとに各施工前において安定計算を実施し、護岸の安定管理を実施している。

5. RI コーンによる沈下管理手法

RI コーンは、先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧、湿潤密度、水分量が求められる。今回使用した RI コーンでは、飽和土であるため、水分計を用いなくても飽和度 $S_r=100\%$ として水分量の計算が可能であるため、水分計は使用していない。これらの計測項目より、設計用せん断力 S_u 、間隙水圧 u 、間隙比 e が算出される。また、1cm 事の計測が可能のため、サンプリングと比較して莫大な数のデータが取得可能である。

本報告では、RI コーンを用いて、載荷ケース（原地盤、保護砂、中仕切堤 1）事の結果を比較し、R コーンによる沈下管理手法について報告を行うものである。CPT のより求めた強度を有効応力に換算し、室内試験の e -logP 曲線と同様の関係が得られ、原位置における沈下予測が可能推測される。

5-1 消散試験結果

原位置における有効応力を求めるのは、原位置における載荷荷重及び過剰間隙水圧の測定が必要である。羽田 D 滑走路工事の埋立部では、毎日の層厚を深淺測量により把握している。また、チェックボーリングでは W-13、E-17、19 及び SK-N で消散試験を行っており、この地点では、比較的精度の高い有効応力の把握が可能である。消散試験結果を図 5-1 に SK-N 保護砂完了時のチェックボーリングによる消散試験の例を示す。試験標高は AP-28m で 1-C 層の中間での測定である。

図 5-2 は、同様に SK-N 中仕切堤 1 完了後のチェックボーリングである。試験標高は、AP-28m である。図中に双曲線法による近似曲線（図中の水色の線）を記入している。消散試験結果から静水圧を引いたものが過剰間隙水圧である。過剰間隙水圧が全て有効応力に転化された場合、消散試験結果と静水圧は等しくなる。深淺測量により、累計層厚が分かっているので、全土圧より有効応力の推定が可能であり、これによりその時点における有効上載圧を算定する。

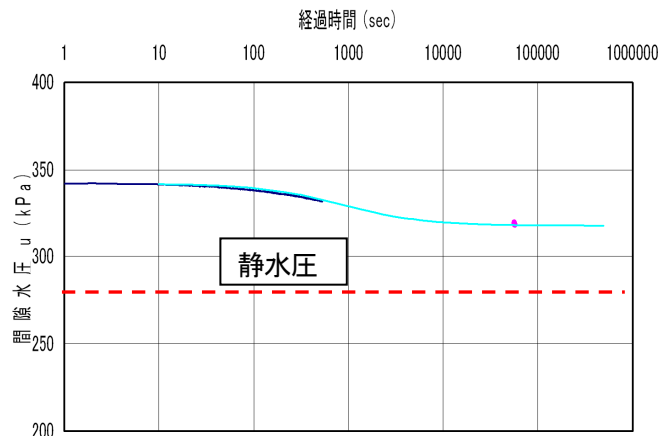


図 5-1 SK-N 保護砂後消散試験結果

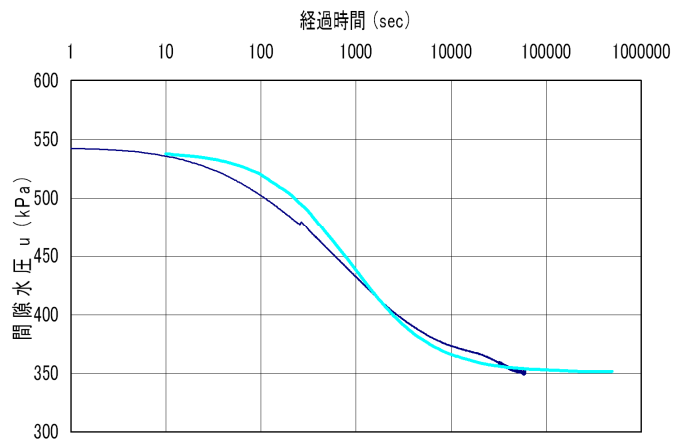


図 5-2 SK-N 中仕切堤 1 後消散試験結果

5-2 強度増加率の検証

消散試験結果から、有効上載圧を求める事ができる。このことから、チェックボーリング時の有効上載圧とせん断強度の関係が正確に求める事ができるため、強度増加率 Cu/p の推定が可能である。図 5-3 は接続部 SK-N での中仕切堤 1 施工後に行ったチェックボーリング結果である。消散試験結果から過剰間隙水圧を求め、これが全て有効応力に転化された場合のせん断力を図中の赤丸 (AP-28m、AP-42m) で示している。この赤丸と理論強度がほぼ一致した値となっている。したがって、このチェックボーリング孔では、 Cu/p が設計用定数 $Cu/p=0.3$ 及び 0.25 に等しいものと推測される。これは、 Cu/p を用いて、せん断力 Su から有効上載圧 σ_v' を推定できることを示唆している。(4.13) が算定式である。

$$\sigma_v' + (u_0 + \Delta u) = \sum \gamma_i' H_i \quad \cdot \cdot (4.13)$$

$$Su = \sigma_v' \cdot Cu/p$$

$$Cu/p = Su / ((\sum \gamma_i' H_i) - (u_0 + \Delta u))$$

σ_v' . 有効上載圧、

Δu 、過剰間隙水圧、

u_0 、静水圧

$\sum \gamma_i' H_i$ 、全土被圧、

Su 、せん断強度

Cu/p 、強度増加率

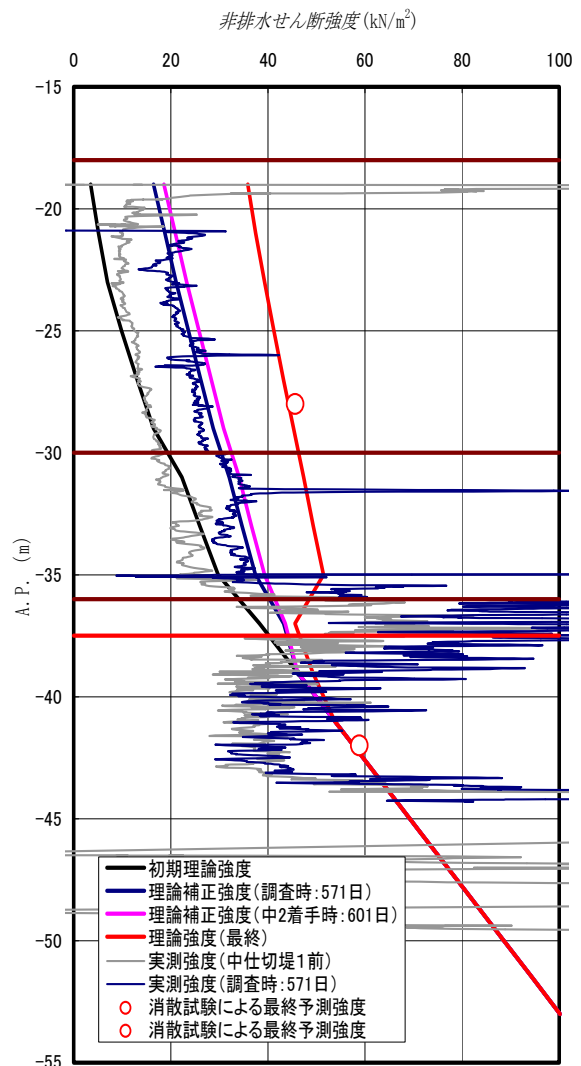


図 5-3 消散試験とせん断強度の深度分布

5-3 せん断強度と間隙比による圧縮曲線の推定

CPT から求めたせん断強度と湿潤密度から応力と間隙比が推定する。有効応力は、強度増加率 Cu/p でせん断強度を割り戻した値を採用している。間隙比は $Sr=100\%$ 、土粒子比重 ρ_s は既知としている。有効応力と間隙比の関係は、室内試験における $e-\log P$ 曲線に相当する値となる。ただ、一回の測定結果 (例えば原位置での測定のみ) では明確な値を示すものではない。これは、載荷荷重と比較して原位置での有効土かぶり小さいためである。そのため、載荷事のチェックボーリング結果を重ね合わせる事により、載荷と沈下 (間隙比) の関係に明確な関係を見いだす事ができる。図 5-4~図 5-6 に SK-N の計算結果について 1-C 層全層、GL-5m、GL-5~10m、GL10m~の 3 つの層の分けたものを示す。図 5-7 から図 5-9 に W-13D の結果を同様に記載する。これに、公告資料の設計用 $e-\log P$ 曲線を重ね合わせた。結果、 P_c はほぼ同じである事がわかる。ただし、初期間隙比 e_0 と C_c に差異が生じている。 C_c は公告資料のそれと比較して大きな値となっている。

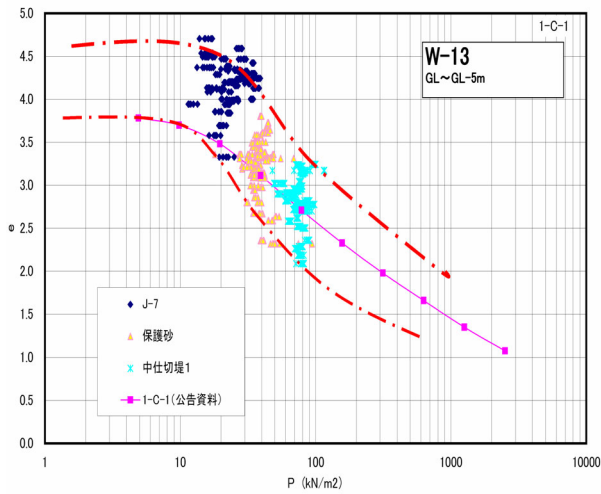


図 5-4 w-13B 1-C-1 有効上載圧～間隙比

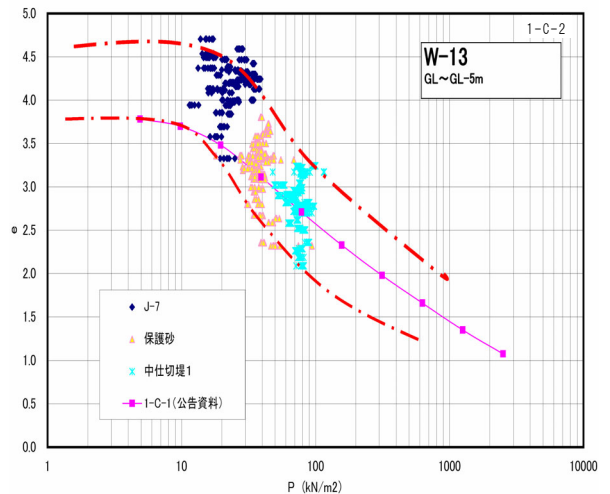


図 5-5 w-13B 1-C-2 有効上載圧～間隙比

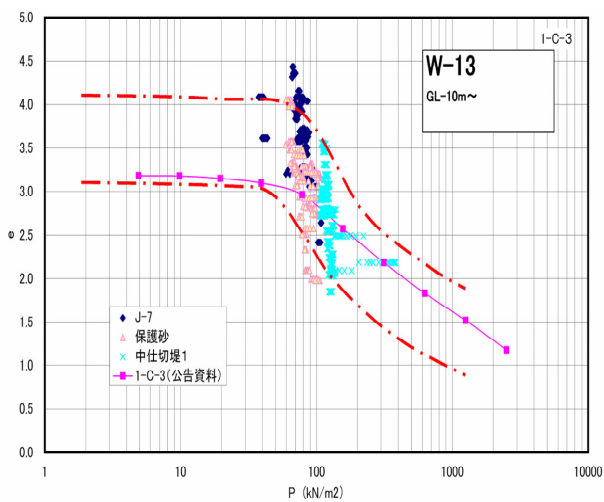


図 5-6 w-13B 1-C-3 有効上載圧～間隙比

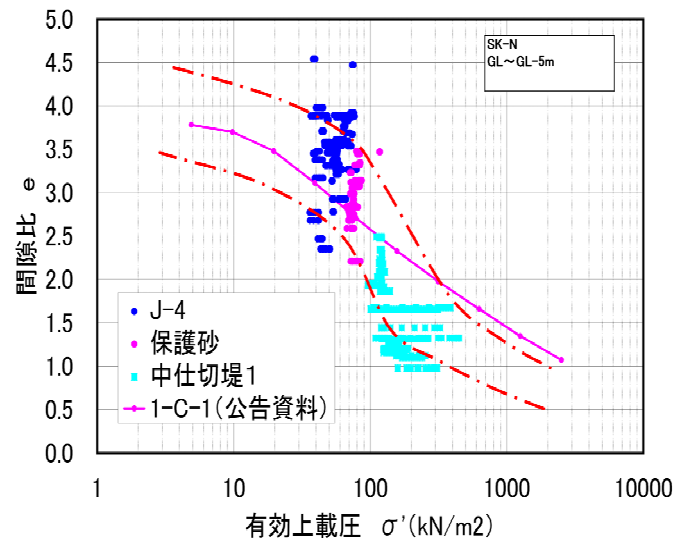


図 5-7 SK-N 1-C-1 有効上載圧～間隙比

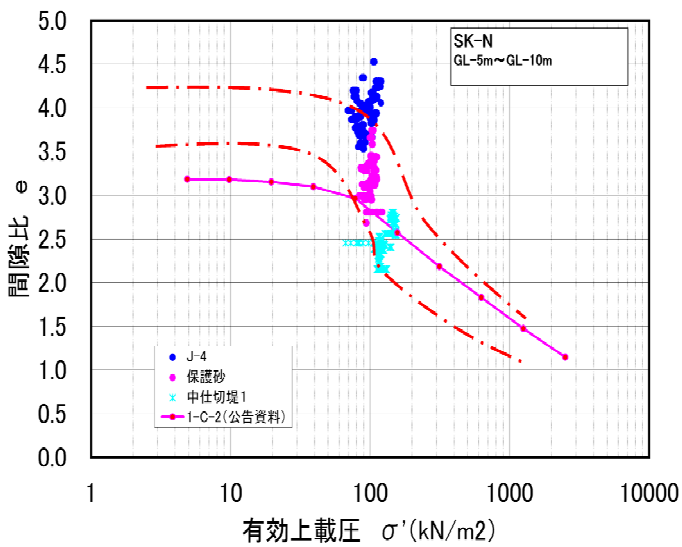


図 5-8 SK-N 1-C-2 有効上載圧～間隙比

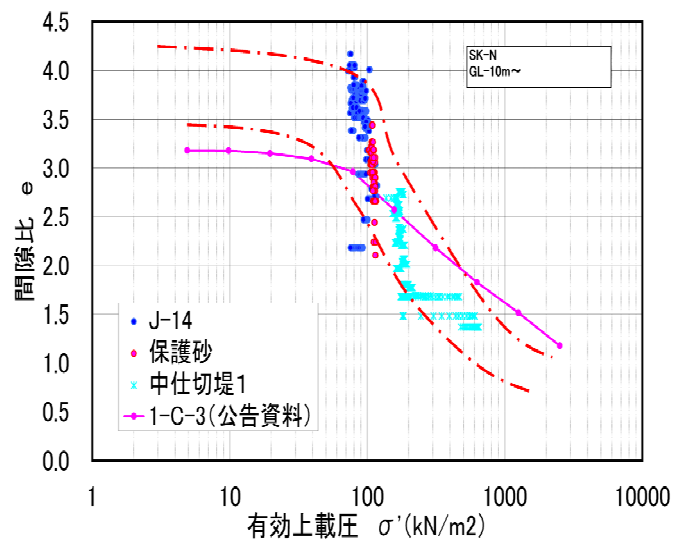


図 5-9 SK-N 1-C-3 有効上載圧～間隙比

6. まとめ

動態観測結果より、土質定数の同定を行った結果、SD の C_h は $100\text{cm}^2/\text{day}$ 程度、SCP の C_h もほぼ同じオーダーとなる事と推測される。これは設計値とほぼ同じオーダーとなっている。これは、沈下量の経時変化予測からも検証されている。 C_h 及び C_v の推測については、二次圧密やドレーン長による圧密遅れの影響等を考慮するように改良を施し、精度を高めていきたい。

また、RI コーンによる沈下管理方法は、妥当性の検証ができたと考えられる。RI コーンは、多成分の測定が可能であるため多くの土質定数を一度に測定可能である。そのため、強度管理だけでなく、沈下計算のための諸定数が測定可能である。原位置での e-LogP 曲線を得ることができるため、沈下予測の精度を大幅に向上させる事ができることがわかった。ただし、今後の考察が必要な事項として、埋立中に発生している二次圧密がどの程度か把握する必要があると強く感じている。室内試験とひずみ速度が異なるため、施工中にも二次圧密が発生しており、これが現場 e-LogP 曲線に影響を与えている可能性は否定できない。室内試験結果との乖離はそのため起きた可能性がある。

本報告の内容は、チェックボーリングで消散試験を行った範囲でのまとめであるため、空港島全体の解析結果ではないことに留意された。