

D滑走路の計測計画と長期モニタリングについて

関東地方整備局 東京空港整備事務所 D滑走路プロジェクト推進室
野口孝俊・鈴木紀慶・上原真司

D滑走路JV 工事管理 Gr 佐伯登志夫・野口哲史

キーワード：D滑走路建設工事、情報化施工、長期モニタリング、光ファイバーセンサ

1. はじめに

東京国際空港(羽田空港)において現在建設中の4本目の滑走路(D滑走路)¹⁾は、現空港の沖合に埋立・栈橋組合せ工法からなる構造形式である。同滑走路は、多摩川河口の軟弱地盤上に最大45mの高盛土を行う埋立部²⁾、多摩川の通水性を確保して河積阻害への対応を図るジャケット構造による栈橋部、埋立部と栈橋部を繋ぐ大規模坑土圧構造物からなる埋立／栈橋接続部、供用中の現空港とを結ぶ連絡誘導路部とその構造が大きく4つに分類され、いずれの構造形式も高度な技術が要求される。そのため、建設中の埋立部の圧密沈下、接続部の鋼管矢板のひずみ、鋼管杭の変位等を確実に把握することが重要なポイントとなっている。本工事においては、従来の測量や目視点検等に併せ、各構造部に計測機器を設置し、施工時及び供用後の挙動を長期的にモニタリング(動態監視)していくことを計画している。本報告では、D滑走路の施工時及び供用後の長期モニタリング計画について報告する。

2. D滑走路における長期モニタリング計画の概要

(1) 計測計画

D滑走路は国内で初めての栈橋空港であり、埋立部と栈橋部との接続を境にして異種構造体としての挙動を示す。軟弱な埋立地盤を改良し、埋立部の圧密沈下による残留沈下量を最小限に抑える設計としているが、接続部との段差については構造的に避けられず、滑走路面の点検診断等は欠かせない。接続部の土留め壁となる鋼管矢板においても、打設直後から背後の埋立土圧を受け前面栈橋側に変形していくが、地震時の残存耐力が確保されているかを判断するためにも、初期からの変位量を荷重履歴と併せて把握しておくことが必要である。このように、本構造体においては、施工中、供用中、供用後における様々な挙動を確実に把握しておくことが重要なポイントである。

供用中における常時の計測はもとより、供用後の地震災害等の被災時においても早期運用の開始または早期復旧に資するため、表-1に示すとおり、施工初期から供用以降10年にわたり蓄積した沈下量・変形量に基づき供用後の構造物の健全度評価を実施することとしている。このため、各構造部の随所に計測機器を設置し、確実かつ安全な工事推進及び供用後の健全度評価のための長期モニタリングを計画している。図-1にD滑走路の動態観測箇所の全体平面図を示す。

		埋立部	接続部	栈橋部・連絡誘導路部
計測計器		水圧式沈下計, 傾斜計, GPS	ひずみ計(電気式, FBG, BOTDR), GPS	ひずみ計(電気式, FBG, BOTDR), GPS
計測時期	H19年度 H20年度 H21年度 } 施工時 D滑走路供用開始	原地盤の沈下監視 原地盤の沈下量 原地盤の水平変位量	矢板護岸, 鋼管杭の変形監視 原地盤の沈下量 杭・矢板の応力変化, 傾斜角	杭・矢板の応力変化, 傾斜角
	H22年度以降 } 供用時(地震時)	残留沈下の監視 原地盤の沈下量 3軸方向の挙動 舗装帯の応力変化	矢板護岸, 鋼管杭の変形監視 原地盤の沈下量 3軸方向の挙動 杭・矢板の応力変化, 傾斜角 舗装帯の応力変化 上部構造の応力変化 PC桁の応力変化	3軸方向の挙動 杭の応力変化, 傾斜角 レグ頭部の応力変化 舗装帯の応力変化 Pca床版の応力変化

表-1 長期モニタリング計画

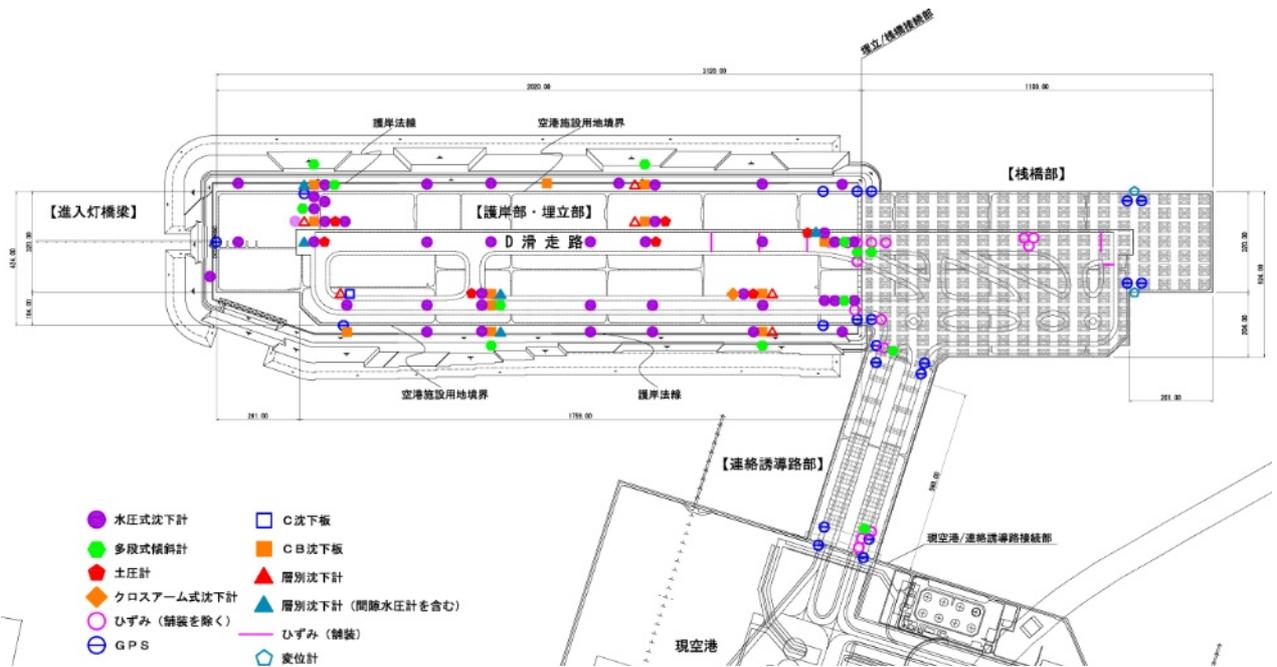


図-1 動態観測箇所全体平面図

(2) 計測システムの概要

地盤や棧橋などの土木構造物は、工場製品とは異なり、自然の諸外力の下で常に変動を余儀なくされ、施工時において設計時の予想を超える挙動も起こり得ることから、図-2 に示すとおり、長期モニタリングシステムを構築するものである。施工時におけるモニタリングでは、施工中の工事管理を主目的として計測する請負者に対し、発注者は、施工中に受けた外力や挙動に関する情報を維持管理（引き渡し時）の初期値が適正な状態であるかの確認などを目的としている。また、供用時においては、完成後の空港施設を良好な状態に維持・保全する上でも重要なデータであることから、空港運用上における判断情報（地震時における迅速な構造物の健全度評価など）をリアルタイムで把握することとしている。

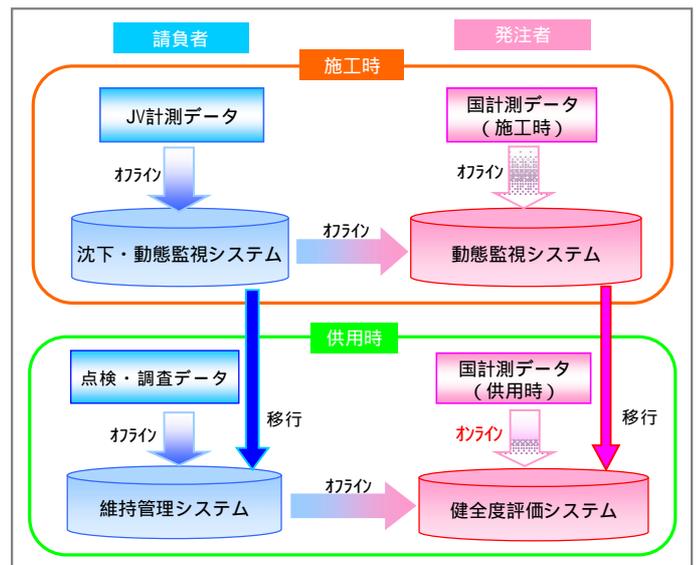


図-2 長期モニタリングシステムイメージ図

3. 各部における長期モニタリング計画

3-1. 護岸・埋立部

(1) 計測目的

護岸・埋立部においては、軟弱地盤上に最大 45m 程度の盛土がなされ、圧密沈下量は最大 8m 程度にも及ぶ。³⁾盛土高さとしては関西国際空港と同程度の高盛土工事であるが、本工事は、急速施工であるとともに前例のない異種構造物との同時施工等による非常に厳しい制約条件下での施工となる。そのため、動態観測により精度よく地盤挙動を把握し、①適切な施工時の沈下・安定管理の実施、埋立天端高の設定、③施工時のデータを活用した最適な維持管理計画の検討を実施する情報化施工が必要となる。

施工時計測機器平面図を図-3 に、断面配置図(重点観測区域)を図-4 に示す。本区域においては、護岸中央部・背後中仕切堤の全沈下量及び水平変位量等を計測するために、沈下板、水圧式沈下計、傾斜計等を設置している。また、圧密沈下に伴う原地盤粘性土の地盤改良層の強度増加量を算出するために、CB 沈下板を利用したチェックボーリング(静的コーン貫入試験)を実施する。

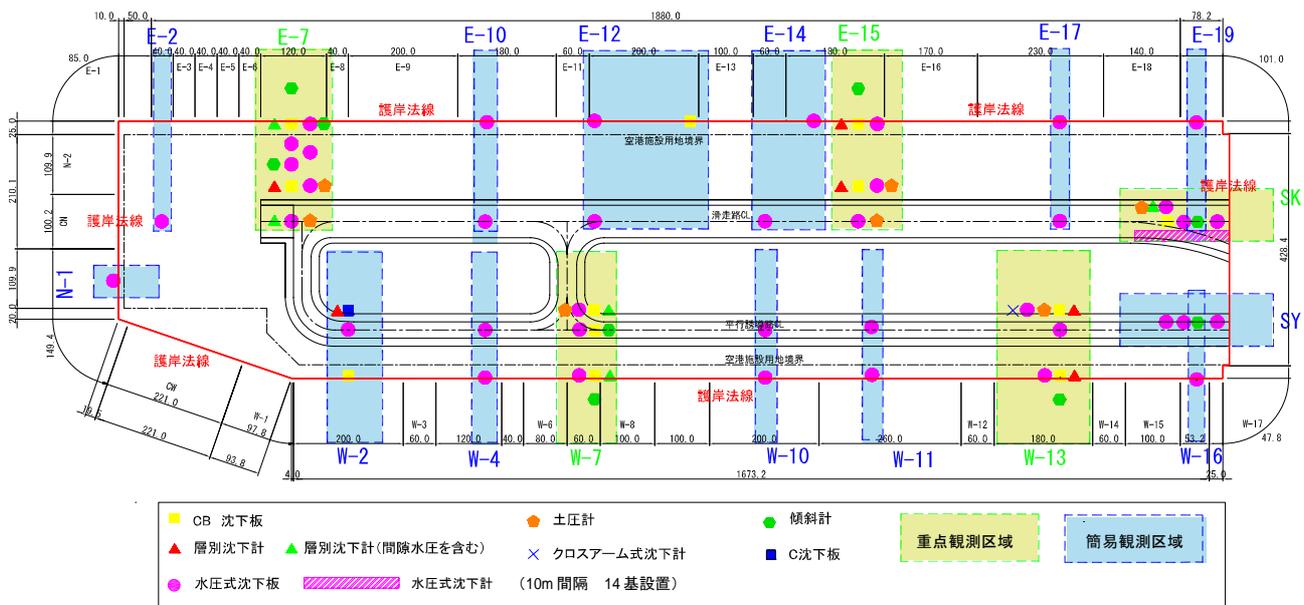


図-3 施工時計測機器平面図

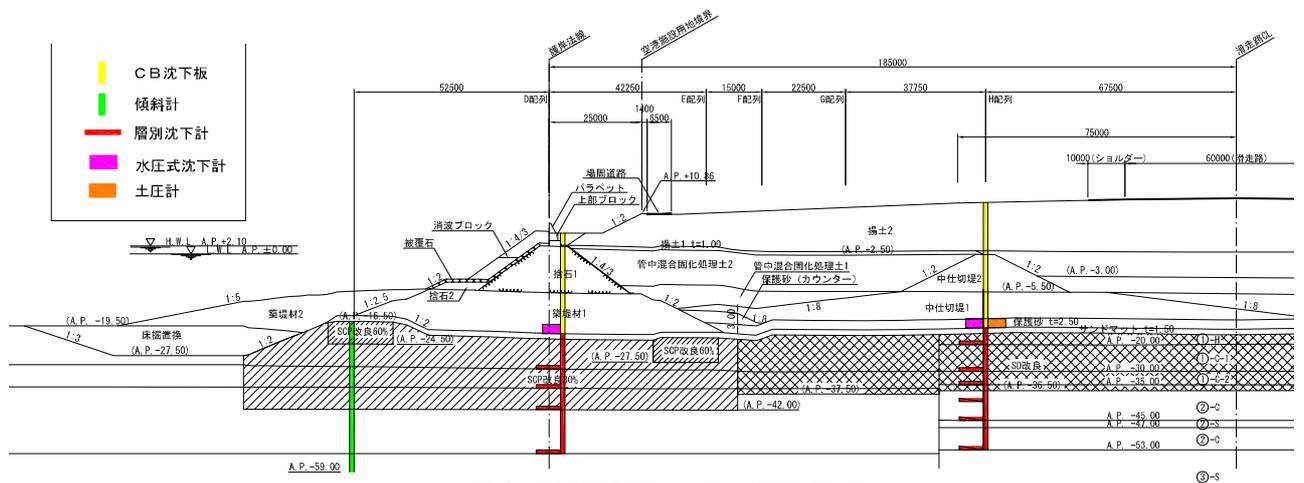


図-4 計測機器断面配置図(重点観測区域 E-15)

3-2. 埋立/棧橋接続部

(1) 構造の概要

埋立/棧橋接続部においては、埋立部と棧橋部の異種構造物を接続させる坑土圧構造物であり、滑走路直角方向に打設される2列の鋼管矢板(外壁部)と滑走路平行方向に打設される鋼管矢板(隔壁部)を組み合わせた24個の連続した矩形セルから形成される鋼管矢板井筒構造を採用している。また、隔壁部鋼管矢板の継手部には高耐力型の継手構造を採用しており、従来の鋼管矢板井筒構造に比べて、変形量の抑制を図るとともに、断面のスリム化も図っている。

(2) 計測目的

設計法としては、構造形式・規模・継手構造など実績の少ない構造であるとともに、地盤変形の影響を受けるという特有な条件を考慮して、①立体骨組みモデルによる設計(静的設計)、②施工中・供用期間中の地盤変形に対する弾・粘塑性解析による照査、③地震時の地盤変形に対する動的解析(FIIP)による照査により断面を決定している。護岸天端における常時の変位量は、鋼管矢板打設から供用開始までに約43cm、供用開始後100年間で約5cm、地震時には約200cmの残留変位を想定している。そのため、異種構造物間の相対変位を安全に吸収できる構造、供用期間中及び地震時の沈下や変形を極力抑制させる護岸及び構造物基礎としての性能の確保、100年間の耐久性を確保し、維持管理が可能な構造等の性能を有しなければならない。

また、鋼管矢板井筒護岸は、D滑走路の中間部に位置し、接続構造は伸縮装置により連結している重要な構造部である。前述のとおり、その護岸は、極力変位が生じない構造形式を採用しているが、短期間にその変位を完全に抑えることは不可能であるため、変位を許容した設計としている。よって、施工中の安全管理はもとより、地震時の早期運用再開、早期復旧に資するため、その挙動の計測は非常に重要である。計測機器平面配置図を図-5 に、滑走路部の断面配置図を図-6 に示す。本区域においては、施工時における背面埋立部の圧密沈下に伴う地盤の側方変位の影響を把握するために水圧式沈下計を、地震時における鋼管矢板及び栈橋部の鋼管杭の変位等を把握するため電気式ひずみゲージ、光ファイバセンサ⁴⁾及び傾斜計をそれぞれ設置している。

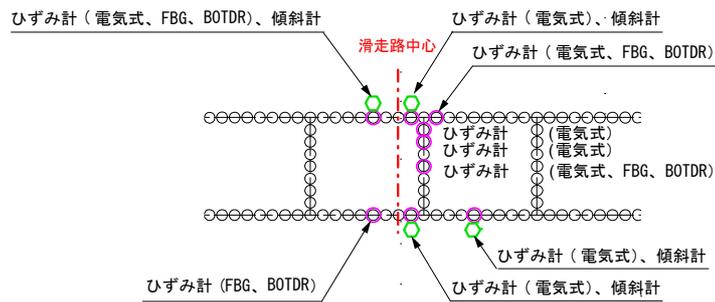
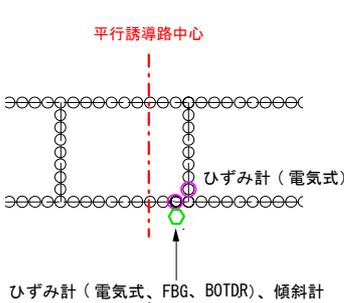
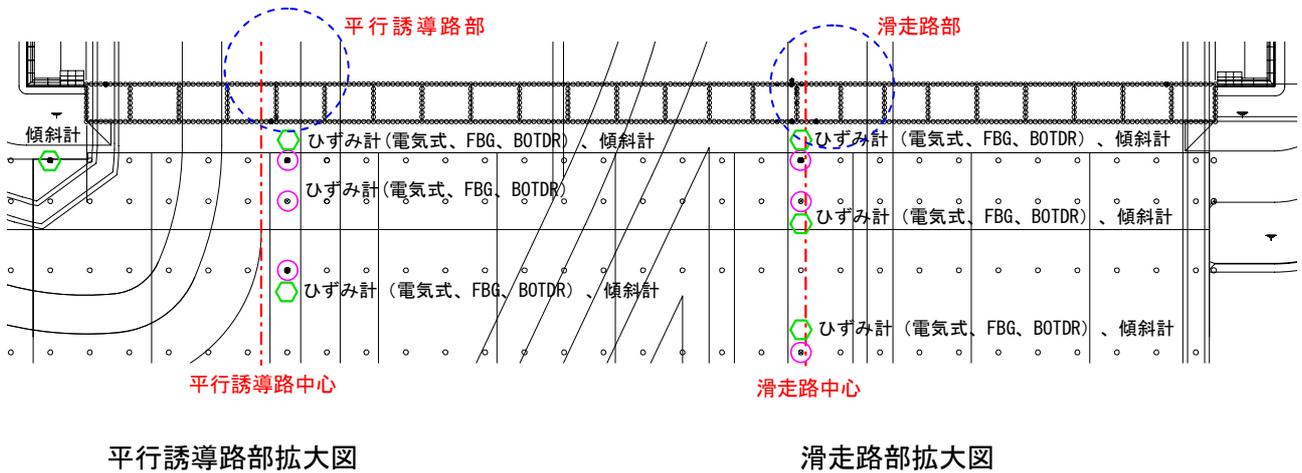


図-5 計測機器平面配置図

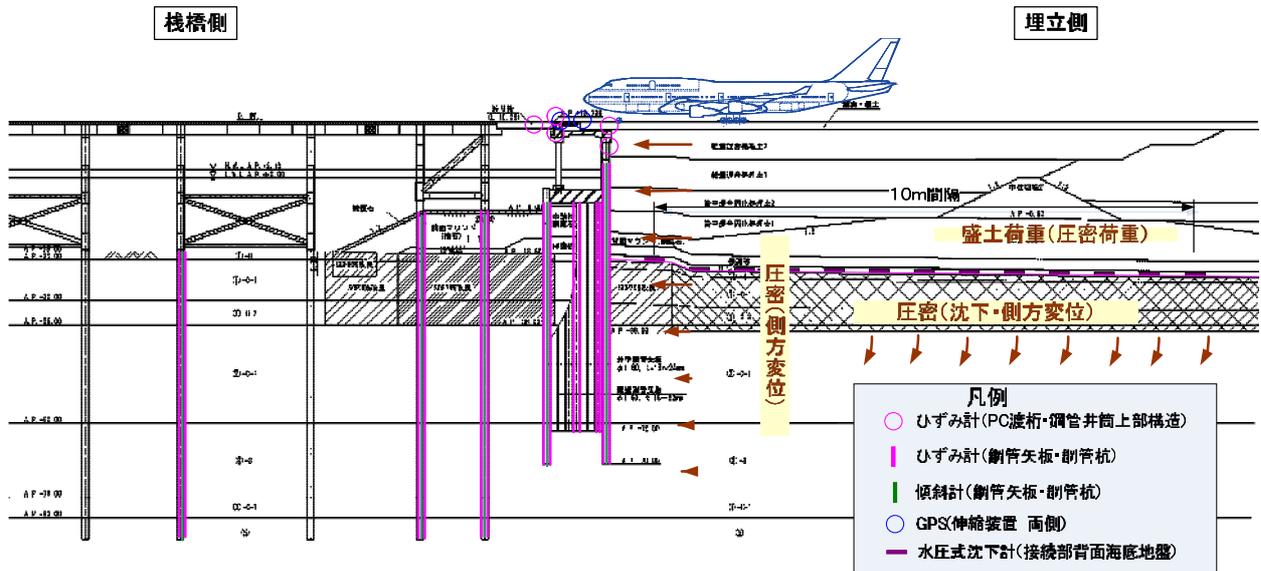


図-6 計測機器断面配置図(滑走路部)

3-3. 舗装部

(1) 計測目的

供用後の舗装部の維持管理への対応については、表層及び基層の切削オーバーレイを主としている。また、航空機荷重が載荷された舗装の耐久性については、実験による検証は行われているものの、これまで舗装内において直接歪みを計測した事例はない。ここでは、光ファイバセンサを舗装帯内に設置することにより、境界面のひずみの変化や疲労によるひずみの増加を計測する計画としており、滑走路舗装設計の実証に有意な情報をもたらすと共に、アスコン層、路盤、路床の変化を直接把握することによる舗装構造の健全度を評価することとしている。図-7 に示すとおり、埋立部においてわだちぼれが起き易い高速脱出誘導路付近においては、路盤・路床の健全度を把握することを目的とし、上層路盤の境界及び下層路盤と路床の境界のひずみを計測する。また、図-8 に示すとおり、棧橋部においては、離陸時に航空機が待機することにより最大荷重が作用する滑走路端部においては、排水層・SMA層の健全度を把握することを目的とし、基層と排水層の境界及び排水層とSMAの境界のひずみを計測する。

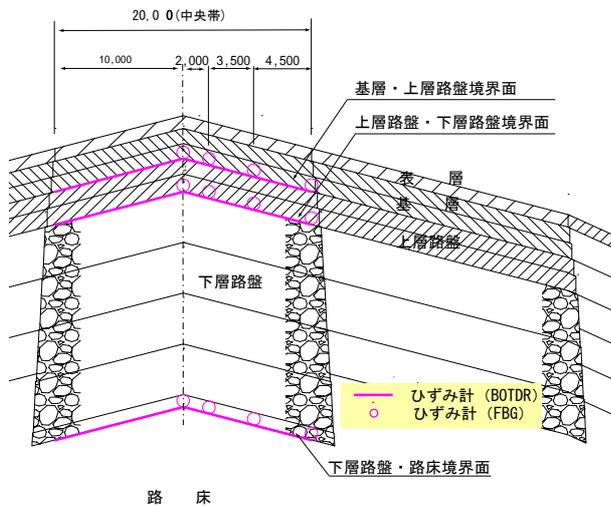


図-7 埋立部滑走路断面の計測位置

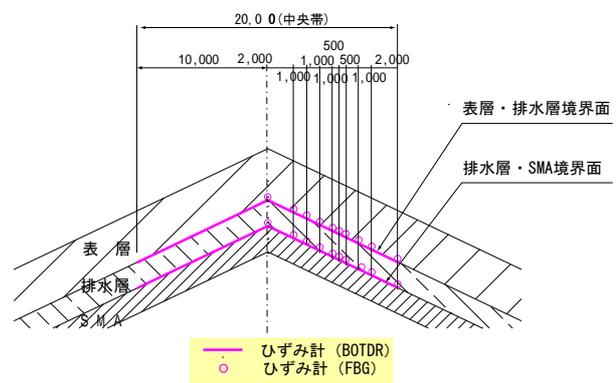


図-8 棧橋部滑走路断面の計測位置

4. 新たな計測手法(光ファイバセンサ)の適用

(1) 光ファイバセンサの適用性

D滑走路における構造物モニタリング計画では、鋼管杭において十年を超える長期的な計測が計画されていることから、長期間の使用に耐えうるセンサが要求されている。

土木計測用のセンサには、ひずみゲージ式や差動トランス式・サーボ式など種々の方式があり、土留めやトンネル、盛土、基礎工等の工事現場で、安全管理や施工管理に広く用いられている。特に、電気式センサを用いて長期間の計測を実現するためには、センサの堅牢性はもとより、絶縁不良や落雷に対する対処等が必要となる。一方、光ファイバ自体をセンサとして用いるモニタリングが種々の現場で適用・実用化され、長期間の計測が可能と期待されているが、地中や水中といった特殊環境下に設置される鋼管杭に適用する技術は確立されていない。本工事では、その実用性を確認しながら新しい計測手法の適用を目指す計画としている。

(2) 埋立／接続部における計測対象部位

計測対象については、部材の断面照査は滑走路方向の設計断面力で設計されており、頂版の剛性効果、外壁における隔壁の影響、隔壁部の高耐力継ぎ手のせん断剛性等を確認するため、滑走路の中心に位置する図-5 に示す鋼管矢板とした。鋼管矢板に設置する計測機器は、鋼管の応力状態を計測するためにひずみゲージ、傾斜角を計測するために多段式傾斜計を設置した。ひずみ計測については、電気式のひずみゲージと、それに比べ長い耐用年数が期待できる光ファイバセンサの導入を新たに試みた。図-9 に鋼管矢板の計器取付図を示す。

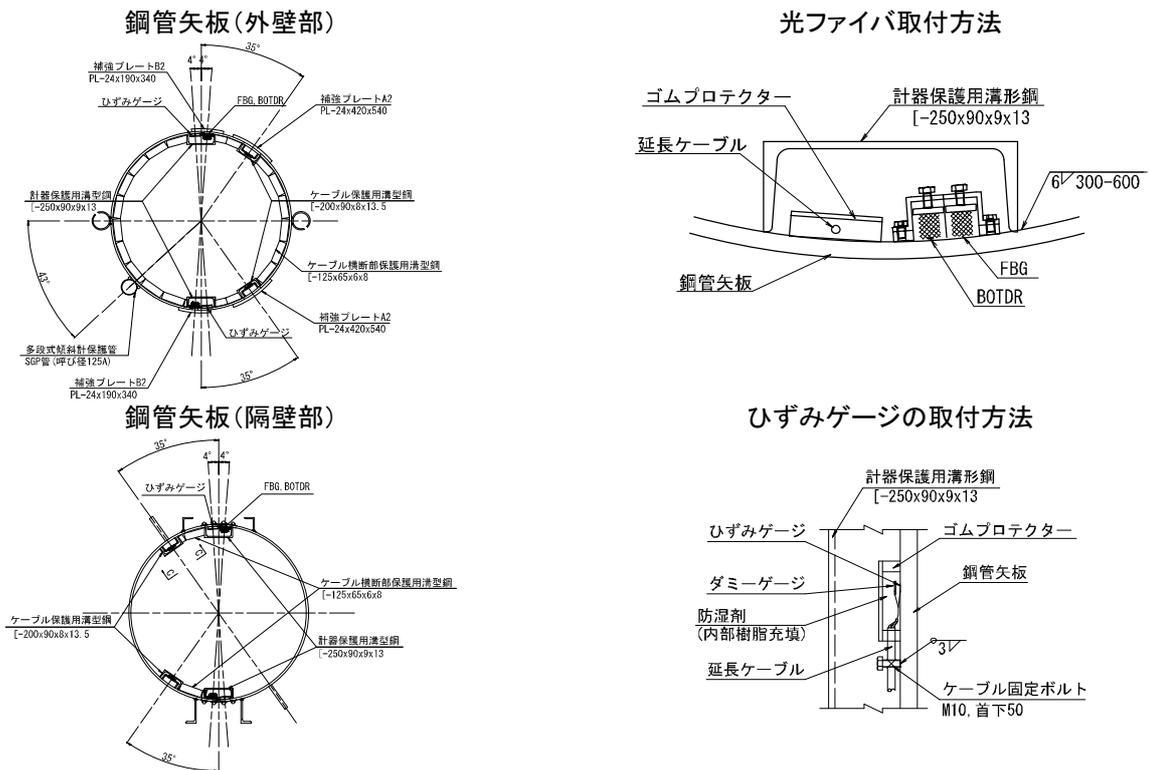


図-9 鋼管矢板の計器取付図

(3) 光ファイバセンサ(FBG、BOTDR)の計測

光ファイバセンサは、光ファイバに入射した光のパルスの反射波の波長や周波数がひずみ量に比例してシフトすることを利用して、ひずみ計測を行うもので、今回は FBG と BOTDR の 2 種類の方式を採用した。

FBG センサは、電気式のひずみゲージと同じく、約 10mm のセンサ区間におけるひずみを測定し、計測精度は ±1 μ 程度であり、静的のみならず動的なひずみ計測が可能である。一方、BOTDR センサは、光ファイバ全長がセンサとなり、1m のセンサ区間を 10cm 刻みで連続して移動させることでひずみ分布を測定し、計測精度は ±100 μ 程度であり、静的ひずみ計測のみが可能である。なお、電気式ひずみゲージの計測データも併用して、光ファイバセンサのデータ検証を行う予定である。

(4) 光ファイバセンサの設置位置

鋼管矢板井筒護岸におけるレベル2地震動で想定される動的解析のひずみ分布(最大値—最小値)を図-10 に示す。ひずみのピークは、頂版接合部、地盤改良境界部、地層境界部に表れている。FBG センサは、計測可能な波長帯が限られているため、1 本の光ファイバに連装できる数が限定される。よって、FBG センサは、波長帯の割付を行い、ひずみ分布の変化点が表れる箇所(5~6 箇所)に設置することとした。図-11 に FBG センサの波長帯の割付の検討結果の一例を示す。FBG の波長帯の割付は、ひずみが増大した際に、隣り合うひずみ計の波長と重ならないように十分な離隔を確保することを確認する。本計測計画では、大きな地震動に遭遇した際にもひずみ計測が可能のように、レベル2地震動想定下の動的解析のひずみ変動を波長変動に換算して、各センサの中心波長を決定した。BOTDR センサは鋼管全長に、電気式のひずみゲージ及び傾斜計は、鋼管全長を測定できるよう等間隔(5m程度)に設置した。

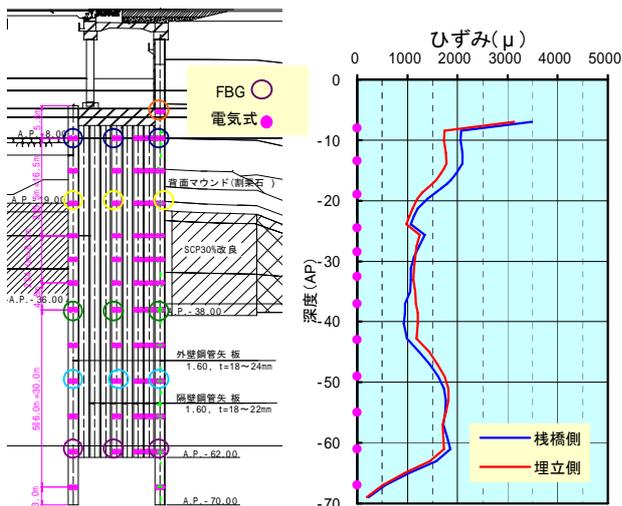


図-10 動的解析のひずみ分布

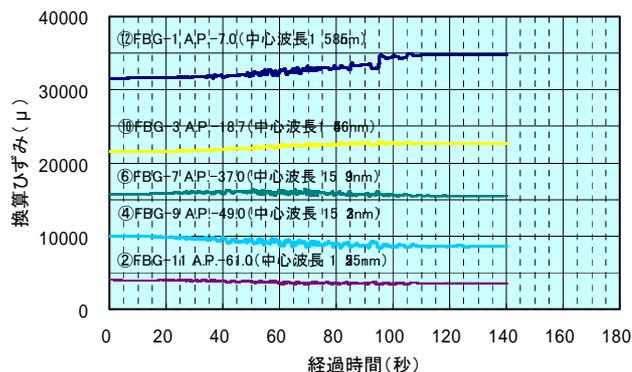


図-11 FBG 検討結果

(5) 光ファイバの取付方法

光ファイバセンサの取付にあたっては、はじめに計器取付位置の位置出し、ケレン処理を行った後、初期緊張(BOTDRのみ)を行い、仮固定する。その後、鋼管矢板と光ファイバを二液混合タイプ瞬間接着剤により全線を接着固定し、接着固定後に約40年間の推定耐用年数を有するエポキシ樹脂被覆材料を2mm厚で塗布し、硬化後に固定器具にて固定する。最後に、耐熱テープを貼付し、導通確認を行った後、防護鋼材を被せ溶接固定する。(写真-1~6)



写真-1 仮固定完了



写真-2 ゲージ接着固定完了



写真-3 エポキシ樹脂塗布完了

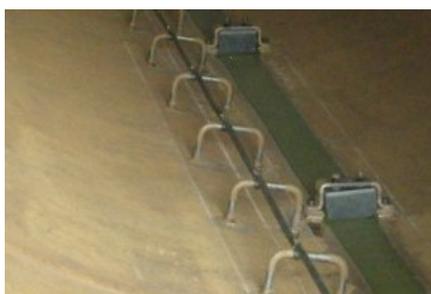


写真-4 固定器具取付完了



写真-5 耐熱テープ貼付状況



写真-6 保護カバー設置状況

(6) 導通試験測定

FBG 及び BOTDR の導通試験測定は、計器取付後(ヤード)・打設前・打設後の各ステップ毎に行う。OTDR 測定器を用いて、光ファイバ芯線延長(距離)を計測し、所定の延長(配線用光ケーブル長+接続長+杭長)を確保できているかの確認を行う。図-12に打設前のBOTDR計測結果を示す。同図の縦軸は、後方散乱光の光強度であり、横軸はOTDR計測機器からの距離である。

また、図-13には、FBG計測機器を用いて、指定波長が得られた測定結果を示す。

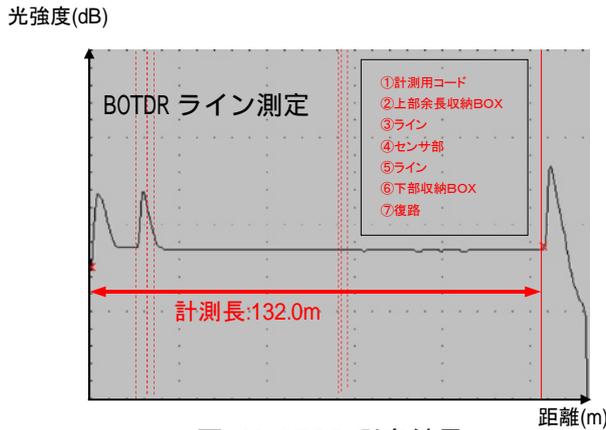


図-12 OTDR 測定結果

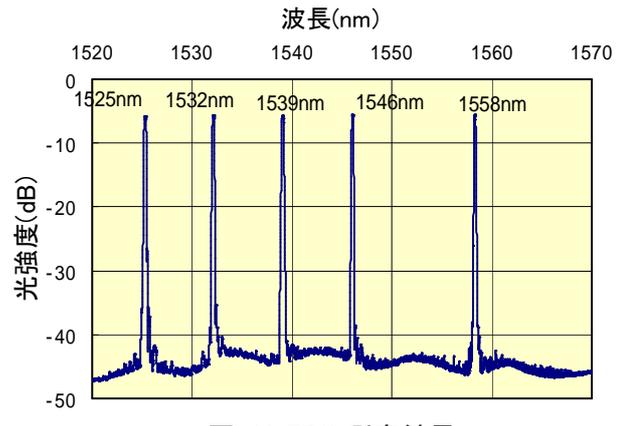


図-13 FBG 測定結果

5. おわりに

現在、施工段階における埋立部の計測データを取得し、理論沈下量との比較を行いながら鋭意施工中である。今後は、鋼管矢板などに設置する電気式ひずみ計と光ファイバセンサから取得されたデータを比較し、鋼管部材における光ファイバ計測の有効性を確認し、報告する予定である。

羽田空港再拡張事業は、国民の期待が非常に高い事業であることから、本事業を一日も早く完成させ、我が国の経済や国際競争力の向上に寄与できるよう、関係者とともに最大限努力していきたいと考えている。

なお、本報告で紹介した技術的検討事項については、国土技術政策総合研究所及び港湾空港技術研究所の多大な支援・協力を頂いた。末筆ではあるが、ここに深謝の意を表す。

参考文献

- 1)東京空港整備事務所ホームページ (<http://www.pa.ktr.mlit.go.jp/haneda>)
- 2)野口ら：羽田再拡張事業D滑走路建設における地盤工学的課題、第43回地盤工学研究発表会(投稿中)
- 3)仁井ら：原地盤のばらつきを考慮した沖合人工島の圧密沈下の解析的検討、第42回地盤工学研究発表会
- 4)野口ら：羽田空港再拡張事業D滑走路における大規模抗土圧構造物のモニタリング計画：第43回地盤工学研究発表会(投稿中)
- 1)渡邊ら地盤変形の影響を考慮した鋼管矢板井筒護岸の設計(その3)、第42回地盤工学研究発表会。