

# 東京国際空港D滑走路の動態検証における光ファイバセンサの活用について

高橋 義典\*・大村 厚夫\*\*・逸見 誓一\*\*\*・佐藤 辰巳\*\*\*\*

\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

\*\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

\*\*\* 国土交通省 関東地方整備局 東京空港整備事務所 保全課 施設評価係長

\*\*\*\* パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通基盤事業本部 インフラマネジメント部

羽田空港D滑走路は埋立構造と栈橋構造を組み合わせた構造であり、埋立構造と栈橋構造の接続部においては、護岸背面の埋立土の施工時・供用時・地震時の地盤の沈下や側方変形を抑制するために、鋼管矢板井筒構造が採用された。また、動態検証では、鋼管杭において十年を超える長期的な計測が実施されている。本稿では、鋼管矢板井筒構造を中心に設置されている光ファイバセンサと同一深度に設置されている電気式歪み計との計測値の対比を行い、光ファイバセンサによる計測への移行方法について検討した。また、滑走路の舗装の劣化状況の変化を検知するために埋設されている、光ファイバセンサにより劣化状況を検証した。

キーワード：動態観測，光ファイバセンサ

## 1. はじめに

東京国際空港（羽田空港）は、日本の国内航空ネットワークのハブ空港となっている。増加する旅客数に対して発着能力が限界に達していることに加え、国際発着枠の拡大に対する要請も強い。そこで、新たな発着能力を創出するために、沖合に4本目の滑走路を新設する羽田空港再拡張事業が2007年3月末に着工され、2010年9月1日に供用開始（竣工検査翌日）した。羽田空港D滑走路の期待供用年数は100年と長く、今後も長期にわたり基盤施設の構造安定性・耐久性の確保及び安定的な運用を確保するために継続的に容易かつ確実に実施できる維持管理が求められている。



図-1 埋立／栈橋接続部 平面図

## 2. 鋼管矢板の歪み計測

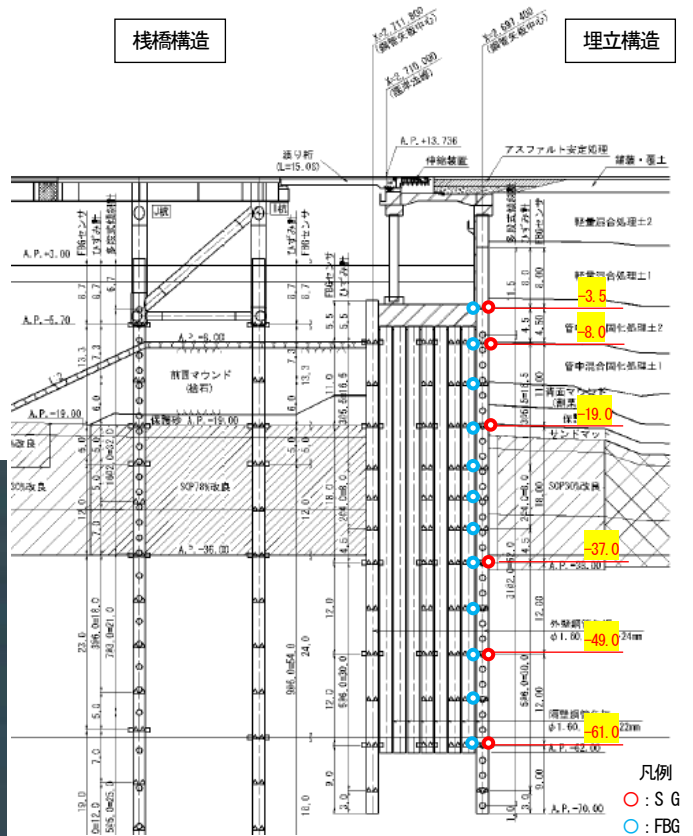


図-2 埋立／栈橋接続部 断面図

### 2.1 設置センサの特徴

鋼管杭の歪み計測には、電気式歪み計SG（以下、SG）、光学式歪み計FBG（以下、FBG）、光学式歪み計BOTDR（以下、BOTDR）、の3種類のセンサが設置されている。図-2に鋼管矢板井筒部の断面およびセンサの配置を示す。

D滑走路におけるモニタリング計画では、鋼管杭において10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。

SGの期待耐用年数は10年程度であり、空港基盤施設の長期間の動態検証においては、期待耐用年数が50年程度と長い光学式歪み計の観測データによる検証が不可欠となっている。

光学式歪み計は、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歪み量に比例してシフトすることを利用して、歪み計測を行うものである。D滑走路ではFBGとBOTDRの2種類の方式が採用されている。FBGは、SGと同じく、約10mmのセンサ区間における歪みを測定し、計測精度は±3μ程度であり、静的のみならず動的な歪み計測が可能である。一方、BOTDR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歪み分布を測定し、計測精度は±100μ程度であり、静的ひずみ計測が可能である。表-1に電気式歪み計と、光学式歪み計の特徴を示す。

表-1 鋼管矢板への設置センサの特徴

センサーの種類	電気式歪み計 (SG)	光学式歪み計	
		FBG	BOTDR
特徴	鋼管矢板表面にセンサーを直接設置するため、測定精度と信頼性が高い	鋼管矢板表面にセンサーを這わせて設置するため、測定精度は比較的高い	連続した光ファイバを鋼管矢板表面に這わせて設置するため、測定深度ピッチが細かい
計測精度	±1 μ	±3 μ	±100 μ (±20N/mm <sup>2</sup> )
初期値	施工開始時	供用開始時 (2010年9月1日)	
温度補正	温度補償機能あり	温度補償機能なし	
センサ設置側線	埋立側・栈橋側の2測線		
センサ設置深度	@4.0m~6.0m	@12m~18m	連続(@1.0m)
計測頻度	毎偶数時 (12回/日) の頻度	毎3・9・15・21時 (4回/日) の頻度	毎火曜日 (@1時間) の頻度
センサ寿命	10年程度	50年程度	

D滑走路の動態検証は、2018年9月で、2010年9月1日の供用開始 (竣工検査翌日) 以降約8年、施工開始から約11.5年が経過しようとしている。このため、センサ寿命が10年程度と言われているSGによる管理から光学式歪み計 (FBG、BOTDR) による管理に移行が必要である。

## 2.2 光学式歪み計によるモニタリング方法

FBGの計測精度は±3μと、SGと同程度である。

計測点数については、SGは、鋼管全長を測定できるような等間隔 (5m程度) に設置されているのに対して、FBG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。また、FBGの設置個所は、地震時の挙動計測に備えて配置されているため、必ずしも、常時の最大応力度を計測する深度・ピッチにセンサが設置されていないので、「最大応力度発生位置」を推定し難いという欠点がある。

一方、BOTDRは10cm刻みで計測することにより全長にわたり連続した計測ができるが、計測精度は高くない。

い。

よって、BOTDRで分布図を作成し、計測精度の高いFBGの計測値を組み合わせる事によって、SGに代えて、鋼管杭の最大応力度と発生位置の長期モニタリングを行う方法を検討した。図-3にBOTDRのノイズ処理前の計測値にSGとFBG (FB) の計測値をプロットした断面分布図を示す。

A-DXP 【A杭 (栈橋側)】

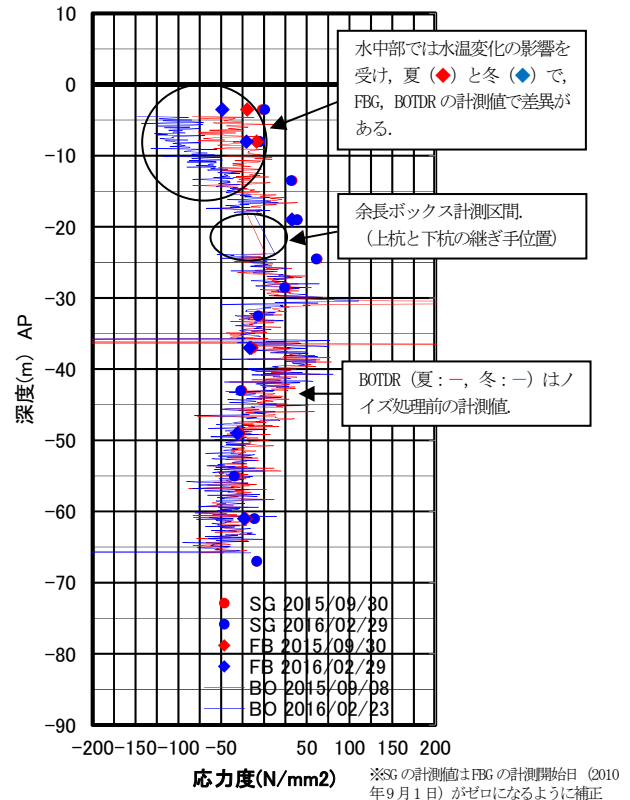


図-3 歪み (SG, FBG, BOTDR) の断面分布図

## 2.3 FBGの補正方法

### (1) 初期値の設定

FBGの計測データは、供用開始以降の応力度増分を示すものであることから、杭材自体の発生応力度を算出するためには、SGで計測している供用開始までの施工時応力度をFBGの計測値に加算する。

### (2) 温度補正

SGは貼り付けられている鋼材 (以下、母材) の温度伸縮に対して温度補償がされているが、光学式歪み計 (FBG、BOTDR) は温度補償がないため、母材の伸縮膨張に対して温度変化の影響を受け、水中部では季節温度により変動する。(図-4, 5 参照)

FBGの初期値が温度補償されているSGと同値になるように、温度補償値 (SG-FBG) を加算する。(図-6 参照)

なお、SGの計測値はFBGの計測開始日 (2010年9月1日) がゼロになるように補正した上で算出して比較している。

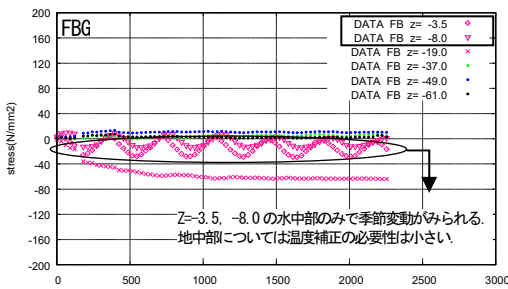


図-4 温度補償図 (FBG)

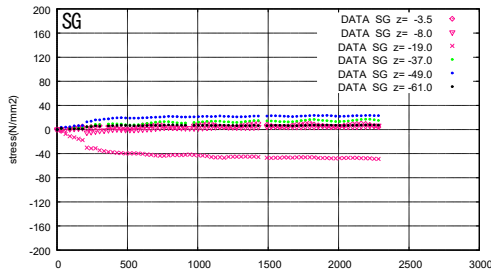


図-5 温度補償図 (SG)

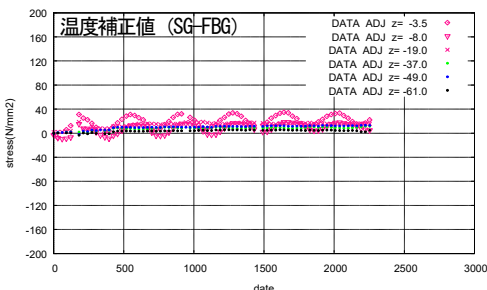


図-6 温度補償図 (SG-FBG)

## 2.4 BOTDR の補正方法

BOTDR の鉛直ひずみ分布は計測装置内の保存されている原データから計測区間を特定し、計測点の位置情報(設置標高)を設定する。BOTDR の計測区間について、ノイズの除去処理後、SG に近似するように、温度補正及び初期値補正(供用開始時の SG の計測値の付加)を加算する。

### (1) ノイズ処理及び計測区間の特定

ノイズ処理は 1m 区間の代表値に中央値を採用した。

上杭と下杭の鋼管矢板の接合部には余長ボックスが設けられている。BOTDR の断面分布図は上杭、下杭の余長ボックスの標高から計測区間を設定し、SG の応力度分布に合うように、上杭及び下杭をそれぞれシフトする。なお、BOTDR は設置時に、圧縮しても弛まないように初期緊張を行い、鋼管矢板に固定している。(写真-1 参照)



(初期緊張, 仮固定) (固定治具取り付け)  
写真-1 BOTDR 初期緊張, 固定状況<sup>2)</sup>

また、余長ボックスの計測区間は弛ませているため、上杭と下杭との計測区間は BOTDR の原データでは、余長ボックスの弛ませ量が表示される。

計測区間の補正では、余長ボックスの計測区間(上杭の下端部、下杭の上端部)を特定する。図-7 に BOTDR の原データに SG と FBG の計測値をプロットし、余長ボックスを特定する為の断面分布図を示す。

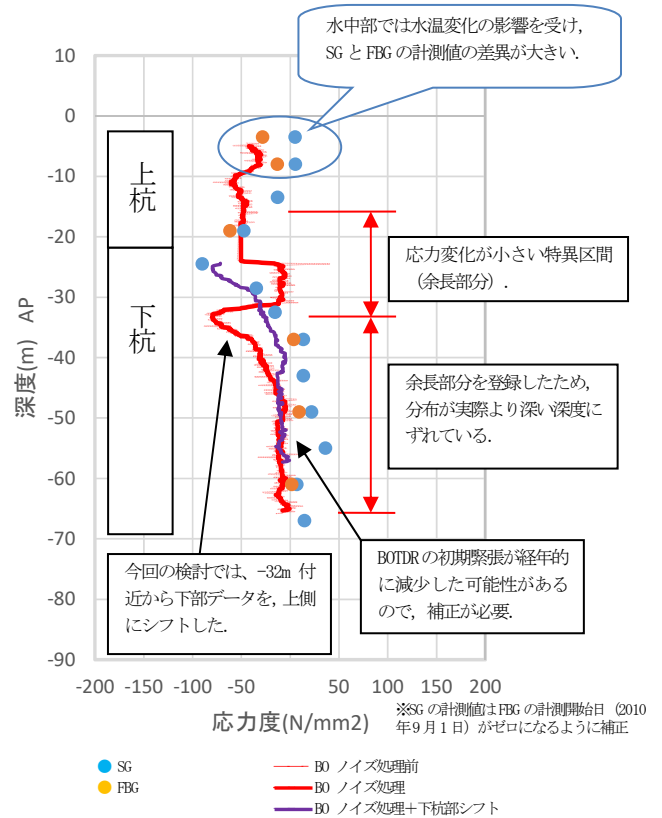


図-7 ノイズ処理及び計測区間の特定図【A 杭(埋立側)】

### (2) 電気式歪み計の計測値による初期値補正

BOTDR の計測データは供用開始以降の応力度増分を示しているものであることから、SG で計測している供用開始までの施工時応力度を初期値として取り扱った。なお、BOTDR は 1m 間隔の計測点であるが、SG は約 5m 間隔の測定であるため、スプライン曲線による補間曲線を設定した。

## 3. D 滑走路・誘導路の舗装歪み計測

### 3.1 舗装歪みのモニタリング方法

D 滑走路では、鋼管杭のほか、舗装の歪み計測にも光学式歪み計を使用し、年に 1~2 回程度の離陸時の航空機載荷試験を行い、長期的にモニタリングを実施している。

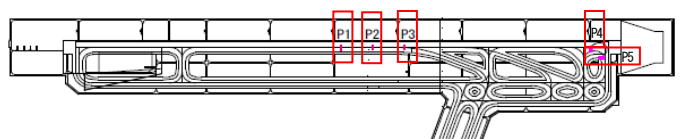


図-8 光学式歪み計埋設位置図

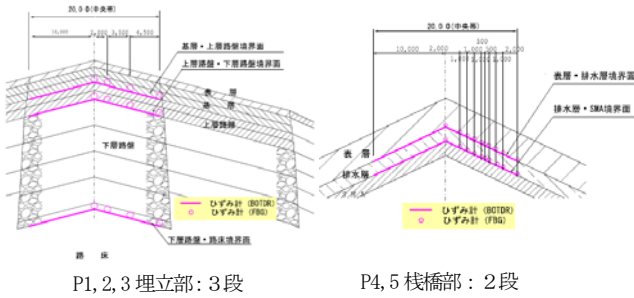


図-9 光学式歪み計埋設断面図

3.2 舗装歪みの計測結果

航空機の通過時に舗装に発生する歪みは、舗装体の温度によって弾性係数が大きく変化するため、毎年同季節に測定された経年変化の傾向を解析した。なお、荷重は3区分し、代表機種として、大型機がB777、中型機がB767、小型機がB737とした。

航空機の輪荷重は、個別機体差、離陸時の揚力の大きさで変化する。また、計測歪みは埋設計器 (FBG) に対する車輪通過位置の影響でも変化する。

2010年9月の供用開始以降の計測値の最大値・最小値・変動値 (最大-最小) に着目して、経年変化傾向の解析を行ったが、供用開始以降の期間において舗装 (基層) 歪みの増加傾向は見られない。

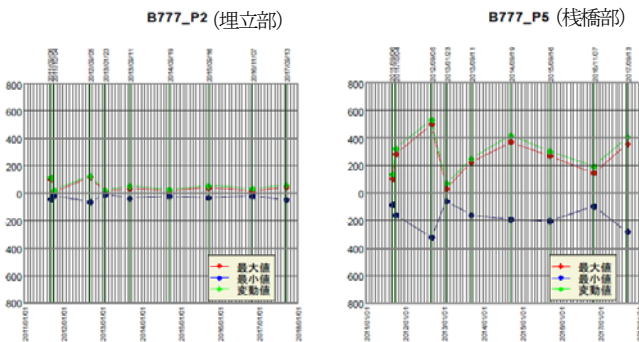


図-10 舗装歪みの経年変化図

3.3 舗装の健全度

(1) 埋立部の舗装歪み

埋立部舗装の計測歪みについて、供用開始以降の計測日 (全9回) 毎の最大値を整理し、多層弾性理論から算出した設計値と比較した。歪みは概略100~200μであり、航空機 (大・中・小型機) の差異は小さく、舗装温度40°Cでは計測値<設計値 (多層弾性理論の解析値) であり、基層部分に特段の劣化は見られない。

表-2 多層弾性理論による設計値の推定結果 (大型機)

層番号	舗装温度 (°C)				
	10	20	30	40	
弾性係数 (MPa)	改質密粒アスコン	13000	6000	4000	1000
	大粒径アスコン	13900	5500	3200	900
	アスファルト安定処理	14700	8900	5000	1200
	C-40	400	400	400	400
	岩ズリ	300	300	300	300
最大ひずみ (μ)	基層下面 (U)	17.19	8.10	22.21	156.88
	上層路盤下面 (M)	103.51	145.80	200.88	380.80
	下層路盤下面 (L)	96.93	104.31	106.85	105.24

表-3 計測値と設計値の推定結果との比較 (埋立部)

	埋立部 (P1~P3 測点)						
		滑走路				誘導路	
		P1 測点	P2 測点	P2 測点	P3 測点	P3 測点	P3 測点
大型機	計測値	119.1	40°C	125.1	30°C	201.4	40°C
	解析値	156.88	岩ズリ	22.21	岩ズリ	156.88	岩ズリ
	計測値/解析値	0.76		5.63		1.28	
中型機	計測値	54.2	40°C	129.7	40°C	129.1	40°C
	解析値	157.19	岩ズリ	157.19	岩ズリ	157.19	岩ズリ
	計測値/解析値	0.34		0.83		0.82	
小型機	計測値	59.3	40°C	139.2	30°C	138.8	40°C
	解析値	155.03	岩ズリ	28.63	岩ズリ	155.03	岩ズリ
	計測値/解析値	0.38		4.86		0.90	

(2) 栈橋部の舗装歪み

栈橋部舗装の計測歪みについて、供用開始以降の計測日 (全9回) 毎の最大値を整理し、設計値と比較した。

P4 測点の計測値は設計値 (解析値) と同程度、P5 測点の計測値は設計値 (解析値) 以下であり、栈橋部舗装の劣化の兆候はないと判断された。

表-4 計測値と設計値の推定結果との比較 (栈橋部)

	栈橋部 (P4~P5 測点)				
		滑走路		誘導路	
		P4 測点	P4 測点	P5 測点	P5 測点
大型機	計測値	501.6	40°C	474.1	40°C
	解析値	630		1224.9	
	計測値/解析値	0.80		0.39	
中型機	計測値	652.1	40°C	549	40°C
	解析値	630		1224.9	
	計測値/解析値	1.04		0.45	
小型機	計測値	452.7	40°C	549	40°C
	解析値	630		1224.9	
	計測値/解析値	0.72		0.45	

※栈橋部 (P4, P5) の解析値は車輪通過速度とPC床板の方向性を考慮し、FEM解析にて算出

4. おわりに

SGによる鋼管杭のモニタリングにおいては、施工開始後11.5年が経過し、SGの耐用年数が迫っている。今後2~3年を光学式歪み計での長期モニタリング体制への移行期間とし、新たなデータを追加し、より精度の高い整合調整を行うものである。

5. 謝辞

本稿は、国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所発注による「東京国際空港D滑走路基盤施設動態検証業務」での成果の一部をまとめたものである。検討に際し、整備局関係者には、貴重なご意見・ご指導をいただいた。ここに、記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所: 東京国際空港D滑走路基盤施設動態検証業務 報告書 (平成28年3月, 平成29年3月)。
- 2) D滑走路の計測計画と長期モニタリングについて, 東京国際空港建設技術報告会 (第五回)。