

# 大断面 PC 桁による蓋掛け構造を有する 関西国際空港 2 期島南側アンダーパス建設工事

坂井 彰\*1・山路 徹\*2・高畑 政行\*3・諸山 勝雄\*4

関西国際空港 2 期島南側アンダーパス構造は航空機荷重に耐える必要がある。本工事では大断面かつ充実断面の PC 桁を用いた蓋掛け構造を採用した。また、対象箇所は地盤沈下が生じる埋立地であるが、この沈下を利用することにより、止水壁等の仮設工事が不要となり、コスト縮減と工期短縮が可能となった。PC 桁には航空機荷重が作用するため大断面かつ充実断面となり、製作時のひび割れが懸念されたが、試験施工を行うことでひび割れの発生しない製造方法を確立した。また、桁を多数並べることで、主桁の荷重分配特性が懸念されたが、航空機載荷試験を行った結果、設計時に想定したものと同様であることが確認された。

キーワード：アンダーパス、航空機荷重、PC 桁、蓋掛け構造、地盤沈下、埋立地

## 1. はじめに

関西国際空港の 1 期島と 2 期島（写真 - 1）を結ぶ連絡誘導路と、これを横切る道路を立体交差させるための 2 期島南側アンダーパスの構造は航空機の大きな荷重に耐える必要がある。当初、国内の空港で多く採用されている RC ボックスによるトンネル構造（図 - 1）が計画されていたが、外国の空港では多く採用されている橋梁形式に変更した。今回採用した PC 蓋掛け構造は、上部工となる PC 桁の厚さが RC ボックスと比べて薄くなることから、比較的浅い位置で施工を行うことができ、アンダーパスの総延長を短縮することができる（図 - 1）。



写真 - 1 関西国際空港全景（上：1 期島，下：2 期島）

よって本工事では、航空機が通る連絡誘導路部とアンダーパス上の GSE（空港地上支援器材:Ground Support Equipment）通路部分のみに PC 桁を蓋掛けし、他の部分は

オープンとする国内の空港で初めての PC 蓋掛け構造を採用した（図 - 1）。これによりアンダーパス内の照明や換気施設も不要となり、また開放感を得るメリットもある。一方、航空機荷重が作用するため、PC 桁断面は大断面かつ充実断面となった。

アンダーパスの施工は、図 - 2 のように止水壁等の仮設工を設けて土を掘削した後に実施することを当初計画していた。一方、本工事対象箇所は厚い粘土層を有する海底地盤上にある埋立地であり、最終的に約 18 m の沈下が見込まれている。この埋立中の沈下を利用し、仮設工を省略することを考えた<sup>1)~3)</sup>。まず地盤表面が地下水位より高い状態でアンダーパス下部工を施工しておき、次に周囲の埋立てを行い、下部工が沈下して地盤が安定するのを待って側壁頭部を必要高さまで嵩上げて PC 桁を架設する。施工中の地盤沈下により所定の高さに躯体を構築することとしたものである（図 - 2）。このように沈下を利用することにより、止水壁等の仮設工の必要性がなくなり、大幅なコスト縮減と工期短縮を図ることができた。

以下、本工事の概要を報告する。

## 2. 構造物および施工方法の概要

2 期島南側アンダーパスは、厚い粘土層を有する海底地盤上に建設されるため、アンダーパス工事着工時から開港 50 年後の期間沈下量は、アンダーパス中央部で約 8.5 ~ 9.0 m、端部で約 7.5 ~ 8.0 m が見込まれている。このように沈下量も多いうえに、沈下は場所によって一様でない。一方、アンダーパスは幹線道路用と GSE 通路用の 2 種類あり、縦断勾配は幹線道路で 5.0 % 以下、GSE 通路で 3.0 % 以下とする必要がある。また、アンダーパス直上に位置する南側連絡誘導路の縦断勾配は 1.5 % 以下と規定されてい

\*1 Akira SAKAI：関西国際空港用地造成（株）事業推進部

\*2 Toru YAMAJI：関西国際空港（株）建設事務所 技術・設計グループ

\*3 Masayuki TAKAHATA：オリエンタル白石（株）オリエンタル白石 日本ピーエス JV 所長

\*4 Katsuo MOROYAMA：（株）ピーエス三菱 ピーエス三菱 三井住友建設 JV 所長

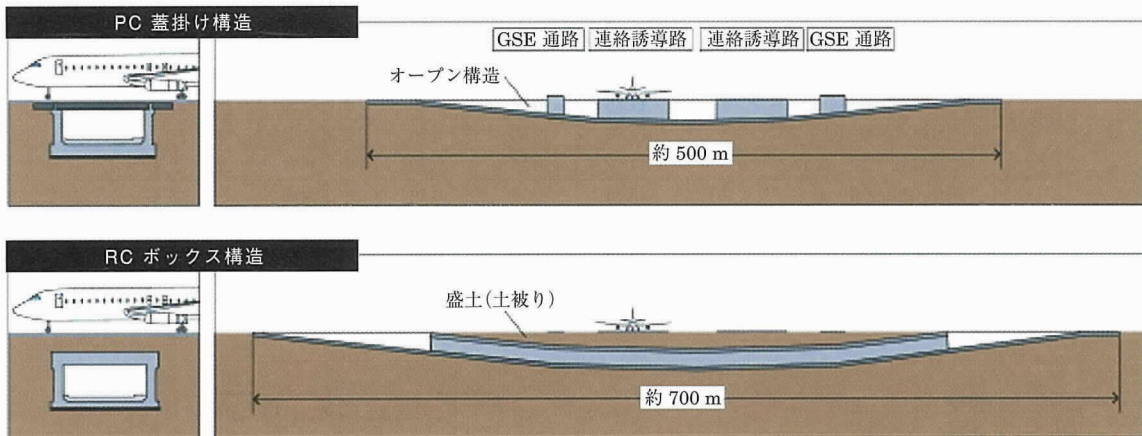


図 - 1 構造断面イメージ図

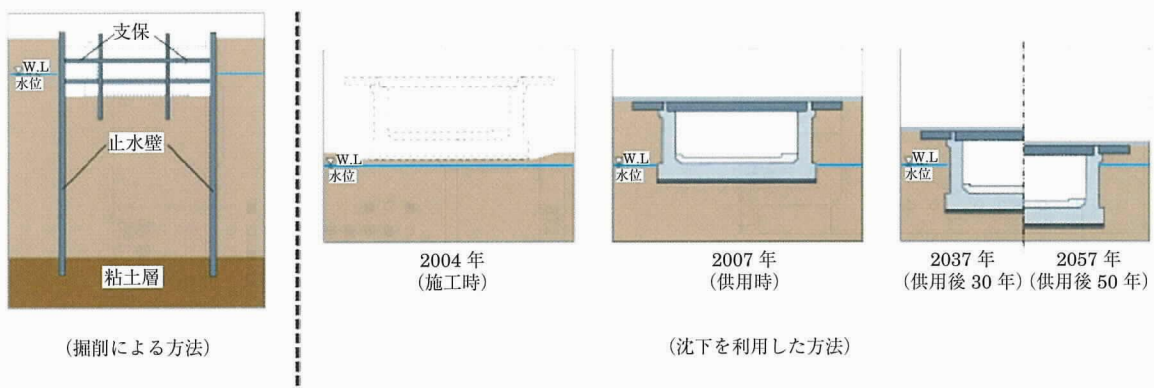


図 - 2 施工方法イメージ図

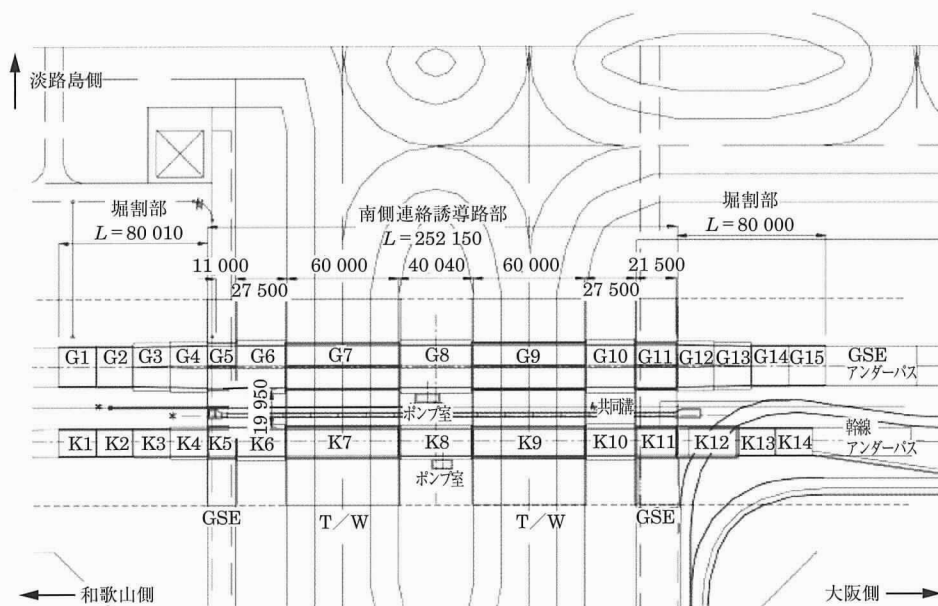


図 - 3 2期島アンダーパス上面図

る。これらの条件を空港検査時から開港後50年間にわたって満たすように、沈下予測と沈下・動態管理を行い、施工時の各高さを上げ越して設定した。

アンダーパスは躯体延長が約400mあり、今後の地盤変

位に対応するために、幹線道路を14ブロックに、GSE通路を15ブロックに分割施工した(図-3)。

工事は2004年4月に構造の基礎部分となる埋立地盤の改良を行い、次に躯体底部の形状に合わせて掘削を行った。

表 - 1 PC 桁一覧表

| 道路名 | 通路名 (ブロック名)          | 桁長 (m) | 桁高 (m) | 桁幅 (m) | 桁断面  | 桁製作本数          |
|-----|----------------------|--------|--------|--------|------|----------------|
| GSE | 南側 GSE 通路 (G5 ブロック)  | 11.86  | 0.55   | 0.70   | 中空断面 | 13 × 2 = 26 本  |
|     | 南側誘導路 (G7 ブロック)      | 11.86  | 0.80   | 0.70   | 充実断面 | 78 × 2 = 156 本 |
|     | 北側誘導路 (G9 ブロック)      | 11.86  | 0.80   | 0.70   | 充実断面 | 78 × 2 = 156 本 |
|     | 北側 GSE 通路 (G11 ブロック) | 11.86  | 0.55   | 0.70   | 中空断面 | 27 × 2 = 54 本  |
| 幹線  | 南側 GSE 通路 (G5 ブロック)  | 15.36  | 0.70   | 0.70   | 中空断面 | 13 本           |
|     | 南側誘導路 (G7 ブロック)      | 15.36  | 1.00   | 0.70   | 充実断面 | 78 本           |
|     | 北側誘導路 (G9 ブロック)      | 15.36  | 1.00   | 0.70   | 充実断面 | 78 本           |
|     | 北側 GSE 通路 (G11 ブロック) | 15.36  | 0.70   | 0.70   | 中空断面 | 27 本           |

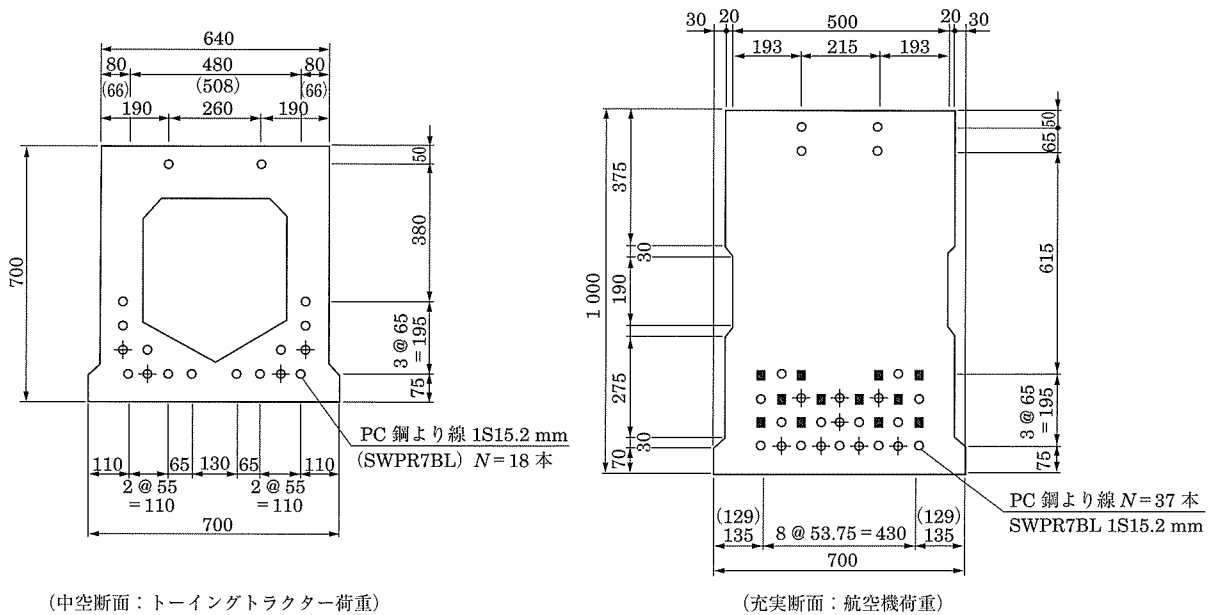


図 - 4 PC 桁断面 (幹線道路部)

底版から側壁へ順次コンクリートを打設し、側壁頭部の橋座部分を残してコンクリート打設を終了したのち、アンダーパス側壁部の埋戻しを 2005 年 8 月に終えた。実測沈下量から PC 桁の架設時の橋座面高さを最終的に決定し、2005 年 12 月に躯体の高上げと PC 桁架設の上部工工事の施工に着手した。

誘導路部の PC 桁は、対象荷重が航空機荷重 (総荷重 6 664 kN, 脚荷重 1 557 kN) であるため、プレテンション桁 (最大 700 × 1 000 mm) の充実断面を採用した。アンダーパス上の GSE 通路部の PC 桁は、対象荷重が航空機を牽引するトローイングトラクター荷重 (50 t) であるため、道路橋においても一般的に使用されている中空断面の桁を採用した。PC 桁の諸元一覧を表 - 1 に、PC 桁断面の例を図 - 4 に示す。断面形状は、型枠の転用可能な JIS 断面を採用した。なお、耐久性から決定される最小かぶりについては、道路橋示方書より 50 mm と設定した。

また、本 PC 桁は大断面かつ充実断面であるため、製作時の温度ひび割れの発生や、PC 鋼材本数が多く、応力集中によるひび割れの発生が懸念された。製作時のひび割れ対策を検討することを目的として、実物大の試験桁による各種実験を行い、PC 桁の製作に反映させた。

また、誘導路部については、上記の PC 桁を 78 本並べ、

その間をコンクリートで充てんし、PC ケーブルで横締めする構造を採用している。横桁部の概略を図 - 5 に示す。今回のように多数の主桁を並べることにより広幅となり、主桁の荷重分配効果が懸念された。この荷重分配が設計時の想定状況と同様であることを確認するため、航空機による載荷試験を行った<sup>4)</sup>。

工場で製造した PC 桁をトレーラーや台船により現場搬入し、側壁頭部の嵩上げにより高さ調整したコンクリート上に架設を行った。

横組工を施工した橋体工の上面にウレタン系防水材料を塗装し、2006 年 6 月初旬に躯体工事は完成した。アンダーパ

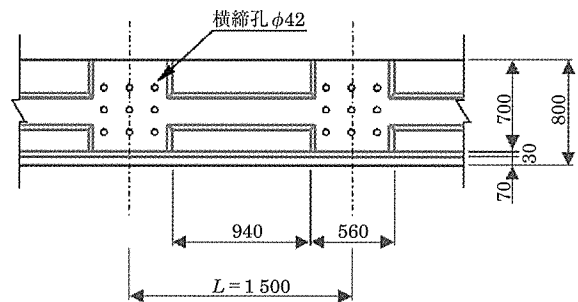


図 - 5 横桁部概略



ス床面の舗装工を10月中旬に着手し、必要内空高さおよび雨水流出量から、舗装構成と排水断面を決定し、側溝の設置と舗装を施工して、2007年4月末に工事は竣工した。

上記のように、施工場所付近は沈下などの地盤挙動が複雑であるが、埋立ての施工履歴管理や精度の高い沈下予測を行い、沈下を利用した躯体の上げ越し施工により躯体を構築し、2007年8月2日に第2滑走路は供用が開始された。

### 3. 各工程の概要

#### 3.1 地盤改良工・掘削工

アンダーパス施工基面以下の地盤は、揚土船により直接陸地化した地盤であり、状態は緩く、強度は不均一な状態にある。地盤強度のばらつきに起因する不同沈下を抑制して地盤の均一性を確保するとともに、施工機械のトラフカビリティを確保するために地盤改良を実施した。改良深度が5 m以深の範囲はSCP（サンドコンパクションパイル）工法を、5 m以浅の範囲についてはMVT（マンモスバイブロタンパー）工法とした。

SCPの施工は、2004年4月に開始し6台の打設機（ケーシングパイプ $\phi = 406.4$  mm,  $L = 15$  m, バイブロハンマ180 kW）により、2.5 m  $\times$  2.5 m ピッチ,  $\phi = 700$  mm,  $L = 5.0$  mの砂杭を2.5ヵ月間で3654本打設した。

MVTの施工は、アンダーパス両端部の8130 m<sup>2</sup>の範囲であり、大型タンパー機（9 m<sup>2</sup>タイプ、バイブロハンマ180 kW）1台により60秒 $\times$ 2回転圧を行った。

掘削工は、地盤改良施工後に6 m<sup>3</sup>級バックホウと46 t積重ダンプにより1~2ブロックごとに仕上げながら行った。床付面より50 cm付近以下では、床付基面をいためないように0.7 m<sup>3</sup>バックホウと8 t級ブルドーザの併用で施工し、18 t級振動ローラーにて2回転圧し基面整正を行った。

#### 3.2 基礎砕石工・均しコンクリート工

床付完了後、下部構造物の基礎となる基礎砕石工（RC-40,  $t = 20$  cm）の施工に先立ち、各ブロックの継手部に段差防止のH型鋼を基礎砕石内部に設置した。基礎砕石工は再生砕石を8 t級ブルドーザで敷均し、35 t振動ローラーにて4回転圧を行った。

均しコンクリート打設の際は、その施工面高さの精度と平坦性がそれ以降の躯体構築の精度を左右するだけでなく、構築高さの基準となるため、上げ越し量を日々算定し、天端高さを設定した。

#### 3.3 可とう継手工

地盤沈下・変動による躯体コンクリートのひび割れや、ブロック間目地の収縮等による損傷を防ぎ、かつ止水性を向上させることを目的とし、補強繊維とゴムを一体構造とした可とう継手を各ブロック間に設置した（写真-2）。

本アンダーパス挙動の特徴として、トンネル軸方向に沿った地盤の変位があり、この地盤の変位によって躯体もアンダーパス中心に向かって縮む傾向にある。この変位量は、沈下時挙動と地震時挙動を合わせた全変位量の4~5割の数値であり、継手遊間および性能を決定するうえで大きな要因になっている。このため、通常よりも大きな継手遊間



写真-2 可とうゴム取付け

を設定し、アンダーパス両端部で10 cm、中央部では30~40 cmの遊間を確保している。

工事は躯体コンクリート打設リフトに添って、底板枠体取付け、壁枠体取付け、可とうゴム取付けの3段階に分けて行った。可とう継手枠体は受架台に溶接固定し、可とうゴム取付けまでの期間は連結金具で枠体を仮固定しておく。コンクリート養生初期は連結金具で固定しておき、後続ブロックのコンクリート打設後5日目に連結金具固定ボルトを緩めて収縮に追従させるようにした。

#### 3.4 鉄筋工・型枠工

使用した鉄筋（異形棒鋼）は、D13~38で継手は重ね継手とした。底板が厚く鉄筋が太径であるため、底板下筋組立て完了後、上鉄筋重量を支持するために鉄筋架台を形鋼にて設置し、また、壁主鉄筋が長尺であるため建込み時の壁筋支持足場（浮足場）を設置した。型枠は木製型枠を使用した。底板および側壁のせん断キー（図-6）は、高精度に造作する必要があったので工場製作した鋼製型枠を現場に搬入し組み立てた。

コンクリートの温度応力、乾燥収縮等により発生するひび割れに対応するために、構造性能を阻害しない箇所に断面欠損を設け、ひび割れ誘発目地を設置した。

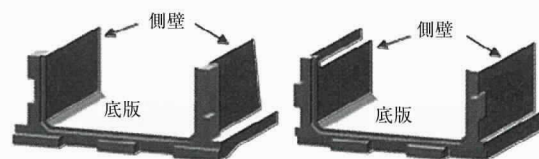


図-6 アンダーパス底板および側壁におけるせん断キー模式図

#### 3.5 コンクリート工

底板コンクリートの打設（最大ブロック2733 m<sup>3</sup>/日）は、コンクリートプラント船の製造能力160 m<sup>3</sup>/時間を基本に、必要打設時間、アジテータ車数等を決定した。施工する底板の最大厚さは1.8 m、側壁最大厚さ1.4 mのマスコンクリートであるため、アイス混入によるプレクーリングを実施した。

コンクリート打設時期の違いによる不同沈下や、荷重の偏りを避けるため、底版コンクリートは奇数ブロックの中央部から両端部に向けて打設し、側壁コンクリートはすべての底版コンクリート打設後に施工した。側壁の打設は、凹せん断キーのある偶数ブロックを先行し、基本的に先行ブロックは2回打設、後行ブロックは1回打設とした。躯体コンクリートの施工は、2004年10月から開始し2005年4月までに34,250 m<sup>3</sup>を打設した。なお、誘導路部60 mスパンの底版コンクリートは、面積、体積ともに数量が多く中央部に施工継手を設けて2分割施工した。打設状況を図-7に示す。



図-7 コンクリート打設状況 (↓は打設箇所)

### 3.6 PC 桁製作工およびひび割れ対策検証実験

本PC桁は、プレテンション桁製品のJIS認定工場で作成した。型枠脱枠時におけるPC桁の急激な温度変化によるひび割れの発生を防ぐため、コンクリートの養生は保温養生方法または長期養生方法のいずれかの方法で行った。保温養生方法では、圧縮強度35 N/mm<sup>2</sup>以上確認した後にあらかじめ保温テント内の温度を25℃以上に保持した状態で型枠脱枠・プレストレスを導入し、断熱シートで覆い外気を遮断して2日間養生した(図-8)。長期養生方法では、型枠脱枠・プレストレス導入時期を40時間に延長し、主桁コンクリートの温度低下を待ち、外気との温度差を低減させた。

また、桁端部の温度ひび割れおよび応力ひび割れ対策としては、以下の3つの対策を行った。1) 最下段以外のPC鋼材は、コンクリート端面から10 cmの付着解除を行う。2) 主桁端部は引張応力に対する補強鉄筋を配置する。3) 主桁端部の断熱材(保温養生)および型枠の脱型(長期養生)は、コンクリート表面と外気の温度差が15℃以下となった時点で実施する(桁中間部では30℃以下で実施)。

以上の検証実験を基に、製作管理基準を策定した。結果としてひび割れない桁を製作することが可能となった。

### 3.7 側壁頭部コンクリート(嵩上げ部)工

躯体の施工高さについては、施工済み躯体の沈下・動態を把握するとともに、沈下傾向を予測し、沈下分を考慮して新設躯体の施工高さを決定した。決定後の上部工断面を図-9に示す。

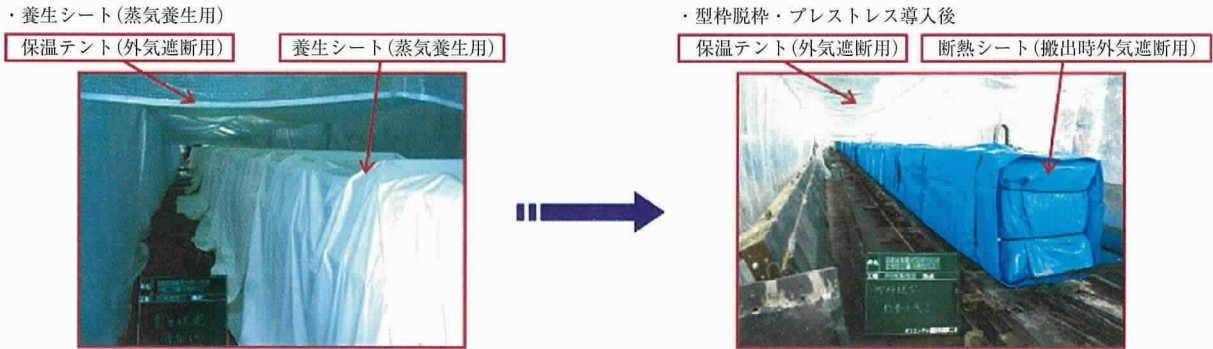


図-8 保温養生状況

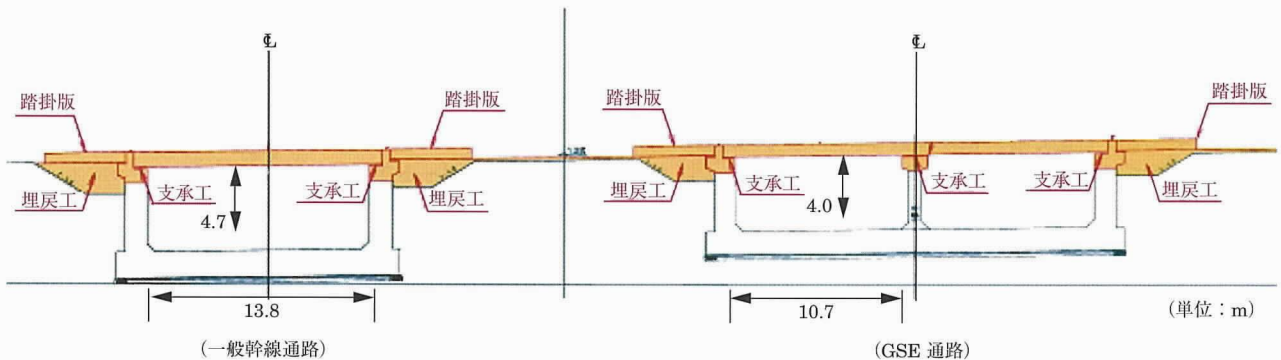


図-9 上部工施工範囲断面図



新旧コンクリート打継部の新設打設側のひび割れ防止対策として、補強鉄筋を配置し施工を行った。誘導路部の支承構造は、航空機荷重による膨大な反力に対して、ひずみの少ない単独ゴムパッドを使用し、可動側については、すべり沓の構造として上部工の移動のほか、躯体の変形等にも対応できる構造とした。GSE 通路部の支承構造は、通常のプレテンホロー桁の道路橋と同様な帯状ゴム支承を使用した。

### 3.8 PC 桁架設工

工場より順次運搬された PC 桁は架設箇所近傍に仮置きし、150 t 吊クローラクレーンを使用して集中架設した。架設された桁の間に間詰コンクリートを打設し、横締め PC 鋼材にて緊張することで、1 径間の桁全数と桁間コンクリートを一体の版とする横組工を施工し、引き続いて張出し床版工、地覆工、伸縮継手工の施工を行った。写真 - 3 に横締めケーブル挿入時の状況を示す。



写真 - 3 横締めケーブル挿入状況

### 3.9 埋戻し工・踏掛版工

躯体面防水工の完了後、構造物より 2 m の範囲は碎石 (C - 40) により埋戻し、4 t ローラーで 8 回転圧した。山砂の埋戻しは 1 層 60 cm 以下で 35 t 級振動ローラーにより 8 回転圧を繰り返して締固めた。

埋戻し工完了後、誘導路部の踏掛版を施工した (図 - 9)。通常、踏掛版は橋台と土工部の境界に生じる沈下に対して走行性を確保するために設置するが、今回は非常に大きな航空機荷重による側壁への土圧を低減させることを主目的として設置した。

躯体の踏掛版受台上にゴム支承およびアンカーバーを据付けた。踏掛版基礎部の碎石と均しコンクリート施工後、70 cm 厚さのコンクリートを打設し、踏掛版同士の目地にはスリッパーを、踏掛版と誘導路中央 30 m 幅のバリットスラブの目地にはタイバーを設置した。

### 3.10 床面舗装工

GSE 通路の下層路盤材には、水硬性粒度調整スラグ (HMS - 25) を、基層には粗粒度アスファルト、表層には密粒度アスファルトを施工した。幹線道路の下層路盤材には鉄鋼スラグ (CS - 30) を使用し、上層路盤にはアスファルト安定処理を、基層、表層にはそれぞれに粗粒度アスファルト、密粒度アスファルトを施工した。

### 3.11 沈下・動態観測管理

施工中の埋立て地盤に構造物を構築するため、アンダーパスおよびその周辺の沈下観測、動態観測を行って日々の挙動を確認し、今後の動向を予測しながら施工した。

2006 年 12 月の空港検査時の設計高さに対して、施工時に設定した高さが計算どおり沈下しているか否かの躯体高

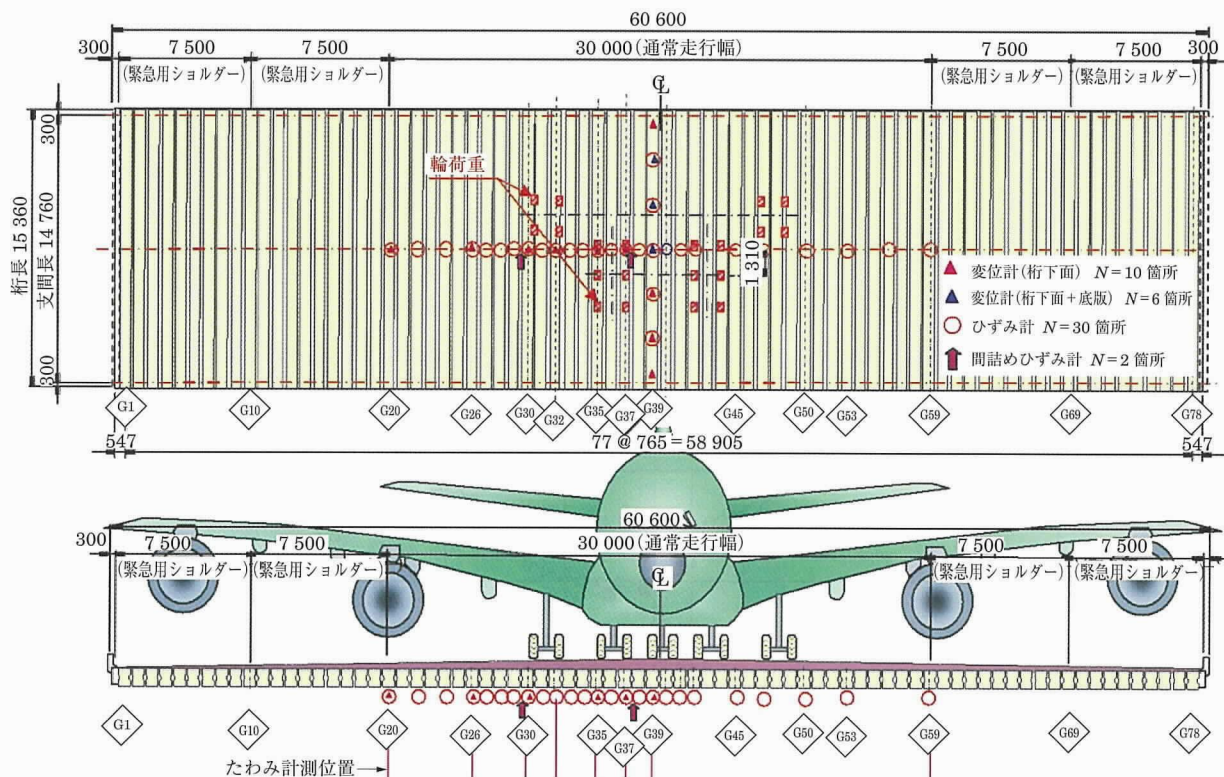


図 - 10 航空機載荷試験における計測器の設置位置

さの確認（計算沈下量と実測沈下量の整合性）、およびアンダーパス周辺地盤の沈下状況を把握するため、進捗に併せて以下の計測・調査を実施した。

- 1) 掘削工事に伴うリバウンド現象等による床付け版の動態計測
- 2) 構造物構築および埋戻しに伴う実測沈下量と計算沈下量の比較・検証
- 3) 継手遊間の変位量把握（アンダーパス本体変位の確認が主目的）
- 4) アンダーパス周辺地盤の沈下把握

これまでの計測結果より、GSE 通路の中央部における沈下の傾向は、工事着工（2004 年 4 月）前までに、沖積粘土層の沈下が約 8 m 進んでおり、空港検査時（2006 年 12 月）では洪積粘土層の沈下量も合わせて約 10 m 沈下が進行している。工事着工から 2008 年 1 月時点の縦断方向の沈下傾向は、GSE 通路中央部での和歌山側は 1.70 m、大阪側では 1.83 m である。同じく幹線道路中央部での和歌山側は 1.48 m、大阪側では 1.72 m 沈下している。傾向としては、大阪側と淡路島側に沈下は進行しており、実測値が計算沈下量より若干下回っている傾向が経年的に見受けられる。

また、アンダーパス本体に特異な応力が作用していないかを確認するため、土圧計（底面・側面）、鉄筋計、水圧計（底面）、光ファイバー計（本体のひずみ）を設置し、計測を行った。

### 3.12 航空機载荷試験

供用開始後、航空機による载荷試験を行い、PC 桁に生じたたわみとひずみを計測した<sup>4)</sup>。この主目的は、2.で触れたように、誘導路部における主桁の荷重分配の確認である。図 - 10 に計測器の設置位置を示す。計測時の航空機荷重は 4 500 kN であった。図 - 11 はたわみの測定結果を示す。設計値（凡例：設計（格子解析））と実測値は同程度の結果となっている。よって、主桁の荷重分配は設計時に想定したものと同様になされていると判断された。

## 4. おわりに

関西国際空港 2 期島南側アンダーパスは 2007 年 4 月末にすべての工事を完了し、2007 年 8 月 2 日には第 2 滑走路ならびに 1 期空港島と 2 期空港島を結ぶ南側連絡誘導路の供用を開始した（写真 - 4, 5）。これにより国内で初めて 24 時間完全供用の空港として運用できることとなった。

さらに、2 期島では南アンダーパスでの知見や経験をもとに、中央アンダーパス・北側アンダーパスの建設も無事終えることができた。



写真 - 4 南アンダーパス完成後（一般幹線道路部）

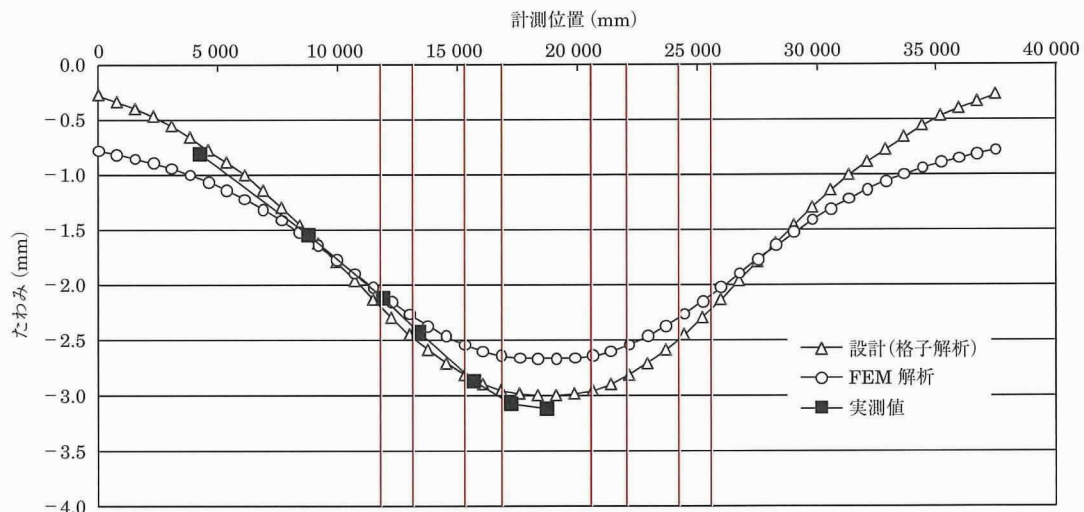


図 - 11 横桁方向のたわみ分布の比較



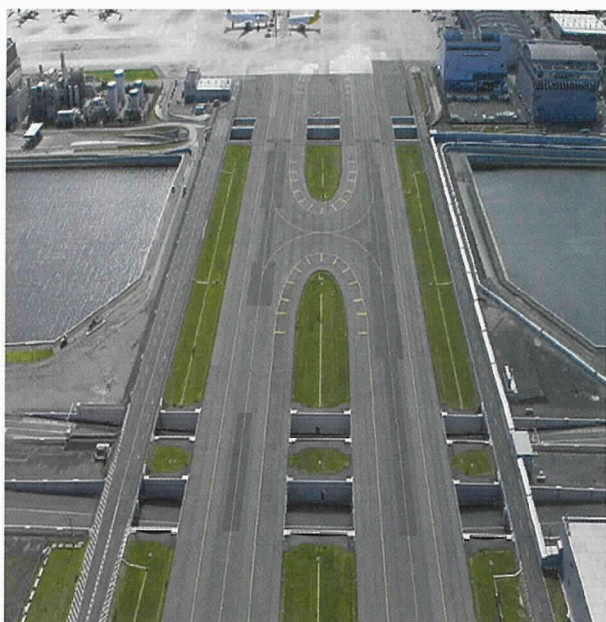


写真 - 5 南アンダーパス (写真下側)

## 謝 辞

本報告の作成にあたっては、関西国際空港 2 期島南アンダーパスにかかる各 JV 作成の工事報告書を参考とした。関係各位にこの場を借りてお礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) 藤本勝, 中川誠, 美島和生: 変形性地盤に埋め込む大規模コンクリート構造物の設計 — 関西国際空港 2 期アンダーパスの設計 —, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 6 - 232, pp.463 - 464, 2005.9
- 2) 藤本勝, 尾崎靖, 坂本守: 沈下を利用した大規模コンクリート構造物の施工 — 関西国際空港 2 期アンダーパス工事 —, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 6 - 070, pp.139 - 140, 2005.9
- 3) 藤本勝, 雨宮康良, 加藤卓彦: 埋地地盤の不同沈下に伴う水平方向の地盤変形挙動の予測 — 大規模コンクリート構造物を変形性地盤に埋め込む関西国際空港 2 期アンダーパス —, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 3 - 445, pp.887 - 888, 2005.9
- 4) 中道正人, 清宮理, 田端竹千穂, 神田尚樹, 木村誠: PC 蓋掛版に係る航空機載荷試験での計測及び解析結果について, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 5 - 575, pp.1149 - 1150, 2008.9

【2009 年 11 月 17 日受付】



刊行物案内

## 高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準

平成 20 年 10 月

定 価 6,000 円 / 送料 600 円

会員 特 価 5,000 円 / 送料 600 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会