

鉄道 PCI 形桁のケーブル破断を想定した維持管理 — 外ケーブル張力モニタリング方式の設計・施工・計測 —

村田 一郎*1・及川 雅司*2・大坪 正行*3・森川 英典*4

PC 桁では、PC 鋼材の破断本数が増加すると安全性、使用性が著しく低下することから、健全に供用していくうえでプレストレスの評価は重大な課題といえる。しかし、PC 鋼材の破断の有無を外観調査等によつて的確に把握することは非常に困難である。これに対して、著者らの実施した実験において、PC 桁に設置した外ケーブルの張力変動を、外ケーブルに設置したセンサーでモニタリングすることによって PCI 形桁のプレストレスの変動を把握できることが分かった。さらに、モニタリングの有効性、施工性等の検証を目的として、実橋において試験施工を実施した。本報告では、試験施工に関わる設計・解析手法、施工概要、センサーによる計測状況等について報告する。

キーワード：PC 桁、ケーブル破断、外ケーブル、モニタリング、センサー

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC と表記）桁は、桁長がおおむね 25 m 以上の中長スパンの鉄道橋に多用されている構造形式である。PC 桁を健全に供用していくためには、設計で定められたプレストレスが確保されていることが重要となる。これに対して、PC 桁のシース内にグラウト充填不足があると、雨水の浸入等によって主方向 PC 鋼材（以下、内ケーブルと表記）の腐食や破断が懸念され、プレストレスが低下するおそれがある。しかし、現状においては、内ケーブルの破断を的確に把握することは非常に困難であり、内ケーブルの破断に対する予防保全的な維持管理手法の開発が急務となっている。

そこで著者らは、実橋梁を模擬した 1/2 スケールの大型供試体を製作し、供試体内の内ケーブルの張力を順次解放し、あらかじめ供試体ウェブ側面に配置した補強用 PC 鋼材（以下、外ケーブルと表記）の張力の変化を外ケーブルに設置した張力モニタリング用のセンサー（以下、センサーと表記）でモニタリングする実験を行った。その結果、外ケーブルの張力変動をモニタリングすることによって内ケーブルのプレストレスの変動を把握でき、内ケーブルの

破断の有無が検知可能であることが分かった¹⁾。なお、この外ケーブルは、内ケーブルの破断によって PC 桁の性能が低下した場合、プレストレスを追加導入することで補強用ケーブルとして兼用するものとしている。

さらに、外ケーブルによるモニタリング兼補強工法の実橋での有効性、施工性等の検証を目的として、既設鉄道 PCI 形桁を対象に試験施工を実施したので、これに関わる設計手法、応答値算定のための解析手法、施工概要、センサーによる外ケーブルの張力変動の計測状況等について報告する。

2. 試験施工対象橋梁の概要

試験施工の対象とした橋梁（以下、試験桁と表記）は、昭和 40 年代に施工された PCI 形複線 4 主桁²⁾である。断面図、鋼材配置図を図 - 1 に、設計条件を表 - 1 に示す。試験桁は、1 主桁あたり、上縁定着 2 本、端部定着 4 本の計 6 本の内ケーブルが配置されている。当初設計では、曲線区間（半径 3 500 m）として設計されているが、試験桁は直線区間に設置されている。また、列車荷重は、N-19、P-19 であるが、現時点の列車荷重は H-12（乗車率 100%）であり、これらをスパン中央でのコンクリートの応力度



*1 Ichiro MURATA

西日本旅客鉄道(株)
構造技術室



*2 Masashi OIKAWA

住友電工スチールワイヤ(株) PC技術部



*3 Masayuki OTSUBO

西日本旅客鉄道(株)
構造技術室



*4 Hidenori MORIKAWA

神戸大学大学院
工学研究科

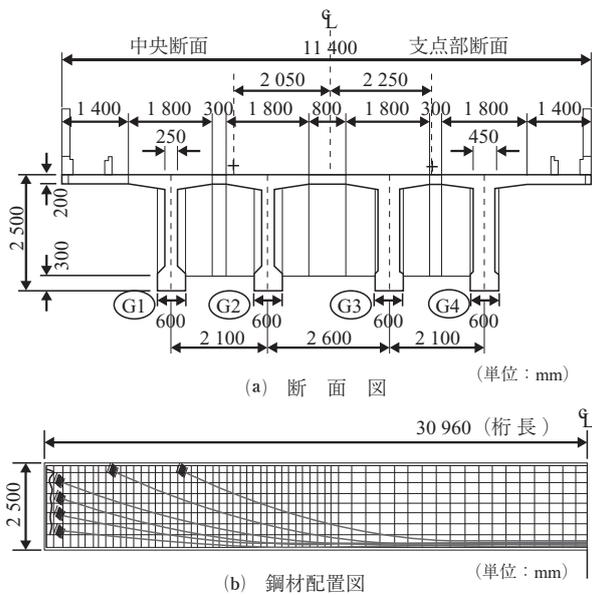


図 - 1 橋梁一般図

表 - 1 設計条件

項目	緒元	
スパン	30.2 m	
曲線半径	3 500 m	
設計活荷重	N-19, P-19	
衝撃係数	0.289	
コンクリート	設計基準強度	400 kgf/cm ²
	プレストレス導入時	350 kgf/cm ²
PC 鋼材	主ケーブル	12-φ 12.4 mm, SWPR7A
	横締め鋼棒	SBPR 95/110, φ 24 mm, φ 30 mm

(荷重の組合せは、死荷重+列車荷重+衝撃荷重+プレストレス力)で比較したものを図-2に示す。図-2より、試験桁は、実走行列車荷重に対して相当余裕を有していることが分かる。

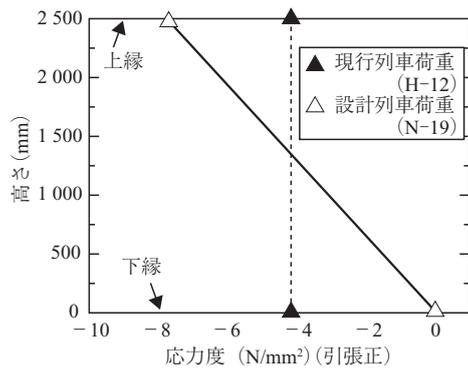


図 - 2 列車荷重による桁上縁・桁下縁の応力度の比較

3. 設 計

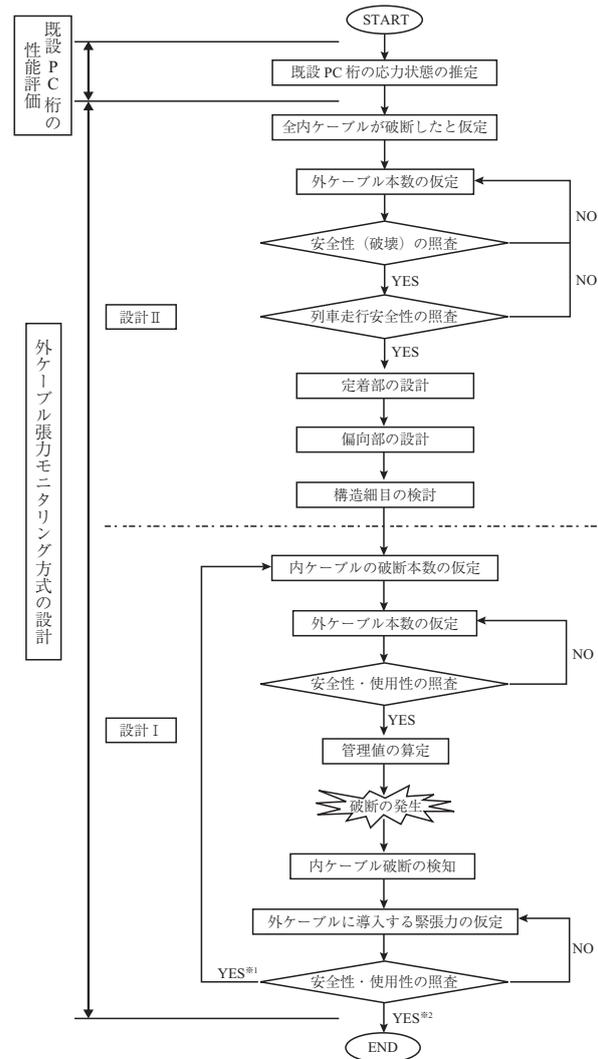
3.1 設計の基本的な考え方

設計は、内ケーブルの破断によって試験桁に曲げひび割れが発生することに対する補強設計(設計I)と内ケーブ

ル全本数が破断した場合の補強設計(設計II)の2段階に区分して行う。これは、当初設置する外ケーブルが、過大補強とならないようにすること、内ケーブルが全数破断した場合でも外ケーブルの必要本数が設置可能となるよう、当初の外ケーブルの設置段階から、定着部や偏向部の構造、設置位置を配慮しておく必要があることによっている。

3.2 設計手順

設計全体の流れを図-3に示す。



※1 他の内ケーブルの破断を想定する必要がある場合
 ※2 他の内ケーブルの破断を想定する必要がない場合

図 - 3 外ケーブル張力モニタリング方式の設計手順

(1) 設 計 I

設計Iでは、列車通過時に曲げひび割れが発生する内ケーブルの破断に対して、安全性の確保、機能回復が可能な配置となるよう、外ケーブル本数、緊張力の照査を行う。想定する内ケーブルの破断本数は、列車荷重載荷時に曲げひび割れが発生する本数とする。内ケーブルの破断位置はスパン中央とし、破断長は1mと仮定してプレストレスの消失長さはこれに定着長相当分を考慮する(4.2参照)。外ケーブルの配置本数は、列車荷重載荷時に曲げひび割れが発生する本数の内ケーブルが破断した場合に安全性、使

○ 特集 / 工事報告 ○

用性を満足し、再緊張することによって列車荷重載荷時に試験桁に曲げひび割れを発生させない本数とする。また、外ケーブルは各主桁の両側面に設置し、設置時の初期緊張力は、オーバーストレスとならない程度とする。

(2) 設計 II

設計 II では、試験桁の内ケーブルが全本数破断した場合においても安全性、使用性の確保が可能な配置となるよう、外ケーブル本数、緊張力の照査を行う。想定する内ケーブルの破断本数は、全主桁の全内ケーブルが破断した場合の本数とする。内ケーブルの破断位置、破断長は、設計 I と同様の考えとする。また、外ケーブルは各主桁の両側面に設置し、安全性の確保が可能な本数とする。

(3) 外ケーブル張力の管理値の算定

内ケーブルが破断したことを検知するためには、あらかじめ外ケーブルの張力変動量に対する管理値を設定しておく、センサーの測定値が管理値を超えた場合には、詳細な調査を実施したうえで外ケーブルを再緊張する等の措置をとる必要がある。管理値は、死荷重載荷状態における外ケーブルの張力から列車荷重載荷によって増加する外ケーブルの張力変動量とする (4.3(3) 参照)。なお、管理値算定のための列車荷重は、荷重の変動が測定結果に与える影響を少なくするよう現地を走行する実列車荷重とし、センサーによる計測では、測定を行う列車をあらかじめ特定しておくこととする。

3.3 照査方法

設計における照査指標を表 - 2 に示す。一般的に桁の曲げ破壊の照査は、作用断面力と曲げ耐力との比較を行うが、本設計では、応答値をファイバーモデル (4.1 参照) を用いた非線形解析によって算出していることから、曲げ破壊の照査指標は、解析結果から得られる圧縮ひずみとした。走行安全性、使用性 (乗り心地) に関する設計限界値は、鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限³⁾に基づき、本試験桁では、走行安全性は $L_b/1500$ (L_b : スパン長)、使用性 (乗り心地) は $L_b/2000$ とした。

表 - 2 照査指標

要求性能	性能項目	設計応答値 I_{rd}	設計限界値 I_{ld}
安全性	破壊 (曲げ)	コンクリートの圧縮ひずみ ε_d	コンクリートの終局圧縮ひずみ ε'_{cu}
		外ケーブルの引張応力度 f_d	外ケーブルの引張強度 $f_{pu0} \times 0.84$
	破壊 (せん断)	設計せん断力 V_d	設計せん断耐力 V_{sd}
使用性	走行安全性	変位・変形量 δ_d	変位・変形量 δ_{ls}
	乗り心地	変位・変形量 δ_d	変位・変形量 δ_{lc}

3.4 設計条件

(1) 安全係数

非線形解析では、作用させる荷重に応じた応答値が算定される。そこで、鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物⁴⁾ (以下、鉄道 RC 標準と表記) に示されている各安全係数を式 (1) によって作用係数に集約し、この作用係数を照査用の荷重に考慮させることとした。

$$\gamma_f = \gamma_{f0} \cdot \gamma_{a0} \cdot \gamma_{b0} \cdot \gamma_{j0} \quad (1)$$

ここで、 γ_f : 本設計における作用係数、 γ_{f0} : 鉄道 RC 標準における作用係数で 1.1 とする。 γ_{a0} : 鉄道 RC 標準における構造解析係数で 1.0 とする。 γ_{b0} : 鉄道 RC 標準における部材係数で、曲げ部材では 1.1、せん断部材では 1.3 とする。 γ_{j0} : 鉄道 RC 標準における構造物係数で 1.2 とする。

なお、材料係数は、解析の入力値に考慮することから式 (1) では考慮していない。式 (1) より、 γ_f は曲げに対しては 1.452、せん断に対しては 1.716 となり、本設計では、曲げ破壊の作用係数を 1.5、せん断破壊の作用係数は曲げ破壊作用係数の 1.15 倍の 1.725 とした。

(2) 設計作用の組合せ

設計作用の組合せを表 - 3 に示す。列車荷重は、H-12 を用いた。設計 I では、内ケーブルが破断すると想定される主桁側の単線載荷とし、設計 II では、上下線複線載荷とした。なお、管理値算出に用いる列車荷重は、実列車荷重の単線載荷とした。

表 - 3 設計作用の組合せ

性能	性能項目	設計作用の組合せ	
安全性	破壊 (曲げ)	$1.5D_1 + 1.5D_2 + P_s + 1.5(L + I + C)$	破壊荷重作用時
	破壊 (せん断)	$1.725D_1 + 1.725D_2 + P_s + 1.725(L + I + C)$	せん断破壊荷重作用時
	走行安全性	$L + I + C$	列車荷重によるたわみ
使用性	乗り心地	$L + I + C$	列車荷重によるたわみ

[凡例] D_1 : 固定死荷重、 D_2 : 付加死荷重、 P_s : プレストレス力、 L : 列車荷重、 I : 衝撃荷重、 C : 遠心荷重

4. 解析

4.1 解析モデル

内ケーブル破断に伴う外ケーブルの張力変化を把握する場合、非線形性を精度よくモデル化する必要がある。主桁のひび割れに伴う剛性低下については、主桁にファイバー要素を適用することで、コンクリートの材料非線形を考慮した⁵⁾。また、外ケーブルは、主桁との平面保持が成り立たないことから、主桁とは独立したトラス要素でモデル化することで幾何学的非線形を考慮した。ファイバー要素による 3 次元非線形フレーム解析 (以下、ファイバーモデルと表記) の概要を図 - 4 に示す。なお、鉄筋および内ケーブルについては、埋込み鉄筋要素を用いており、解析には、汎用非線形構造解析システム DIANA⁶⁾ を使用した。材料モデルについては、コンクリートの圧縮応力 - ひずみ関係および鉄筋、PC 鋼材の応力 - ひずみ関係は、鉄道 RC 標準に基づくモデルを用いた。また、コンクリートの引張応力 - ひずみ関係については、テンションステイフニングが期待できる領域と期待できない領域に区分する安らのモデル⁷⁾ を適用した。

4.2 内ケーブル破断のモデル化

内ケーブルの破断のモデル化には、鉄道 RC 標準で規定されている図 - 5 に示すモデルを用いた。これは、プレ

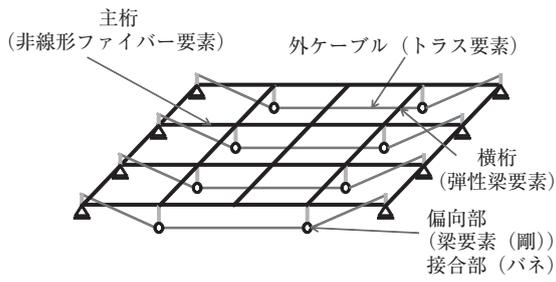


図 - 4 格子フレームモデルの概要

ストレスを 65ϕ (ϕ : PC 鋼材の換算直径) の区間で 2 次放物線を与えて減少させるもので、ファイバーモデルへの適用にあたり、図 - 5 に示す面積 A および面積 B が同等となる区間 30ϕ をプレストレスをゼロとし、その両端に節点を設定した。なお、内ケーブルの破断は、DIANA に用意されている非アクティブ機能 (一部の要素を欠落させる機能) を用いて再現した。

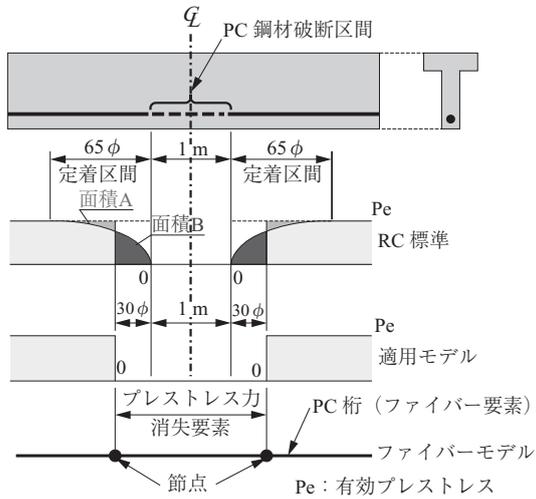


図 - 5 内ケーブルの破断モデル

4.3 解析結果

(1) 設計 I

図 - 1 に示す G4 桁の内ケーブルが、スパン中央において順次破断すると仮定した場合、4 本の内ケーブルが破断すると列車荷重載荷時に G4 桁に曲げひび割れが発生した。この状態でひび割れが生じないように、各主桁の左右に 9S15.2B の外ケーブルをそれぞれ 1 本配置し、緩み防止のために $0.1 P_u$ (P_u : PC 鋼材の引張強度の規格値) の初期緊張力を導入した。外ケーブルの配置を図 - 6 に示す。

安全性 (曲げ破壊)、使用性 (乗り心地) の検討結果を図 - 7, 8 に示す。設計応答値は、コンクリートの圧縮ひずみ $\epsilon_d = 201 \sim 231 \mu$ 、外ケーブルの引張応力 $f_d = 545 \text{ N/mm}^2$ 、鉛直変位 $\delta_d = 2.98 \sim 3.46 \text{ mm}$ であり、いずれも設計限界値 (コンクリートの終局圧縮ひずみ $\epsilon'_{cu} = 3500 \mu$ 、外ケーブルの引張強度 $f_{pu} \times 0.84 = 1582 \text{ N/mm}^2$ 、鉛直変位量 $\delta_{lc} = 15.1 \text{ mm}$) に対して十分安全な結果となっている。また、せん断破壊についても、いずれの断面においても照査を満足していることを確認した。

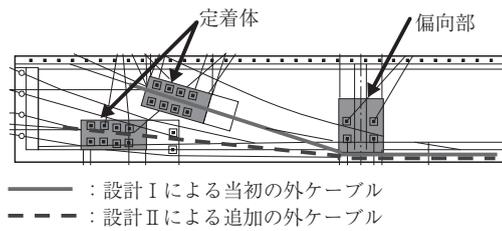


図 - 6 外ケーブル、定着体、偏向部の配置

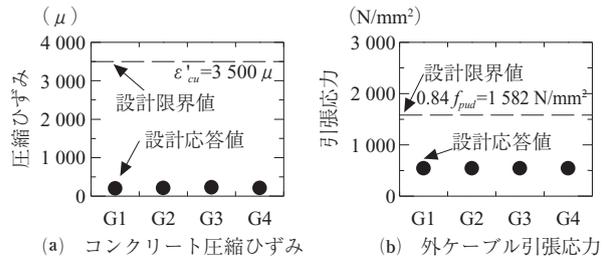


図 - 7 設計 I による曲げ破壊の照査結果

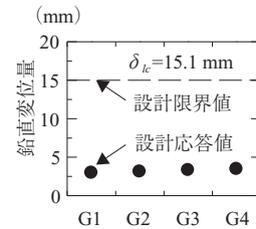


図 - 8 設計 I による使用性 (乗り心地) の照査結果

(2) 設計 II

内ケーブルが全本数破断した場合には、図 - 6 に示すように各主桁の左右に外ケーブル 2 本 (9S15.2B) を配置することで対応可能であることが分かった。なお、外ケーブルの導入緊張力は $0.55 P_u$ とした。

安全性 (曲げ破壊)、走行安全性の検討結果を図 - 9, 10 に示す。設計応答値は、コンクリートの圧縮ひずみ $\epsilon_d = 420 \sim 427 \mu$ 、外ケーブルの引張応力 $f_d = 1040 \text{ N/mm}^2$ 、鉛直変位 $\delta_d = 5.11 \sim 5.15 \text{ mm}$ であり、いずれも設計限界値 (コンクリートの終局圧縮ひずみ、外ケーブルの引張強度は設計 I と同様の値、鉛直変位量 $\delta_{ls} = 20.1 \text{ mm}$) に対して十分安全な結果となっている。また、せん断破壊についても、いずれの断面においても照査を満足していることを確認した。

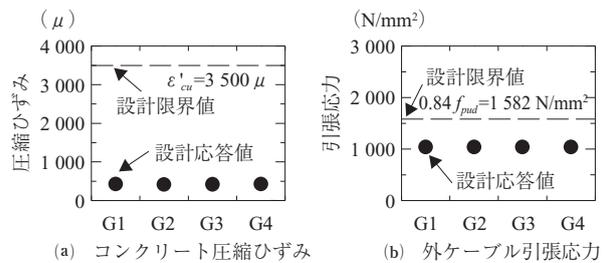


図 - 9 設計 II による曲げ破壊の照査結果

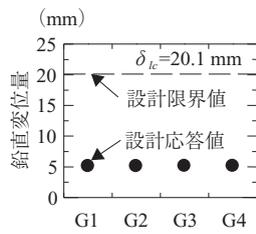


図 - 10 設計 II による走行安全性の照査結果

(3) 管理値の算定

今回使用したケーブル (SWPR7B, φ 15.2 mm) でのセンサーの検出可能な最小値は 0.2 kN である。したがって、試験桁に用いた外ケーブル (9S15.2B) では、張力の変動量が 1.8 kN (9 本 × 0.2 kN) 以上となった場合にセンサーで検知することが可能となる。これより、死荷重状態において内ケーブルが破断した場合に、外ケーブルの張力変動量が 1.8 kN 以上となれば、死荷重のみの作用によって内ケーブル破断の検知が可能となる。解析では、死荷重状態を外ケーブルの張力変動量が 1.8 kN 以上となるのは、G4 桁の内ケーブルが 2 本破断した場合であることから、曲げひび割れが発生する前に内ケーブルの破断を検知することが可能である。しかし、外ケーブルの張力は、温度変化に起因する試験桁の伸縮等によっても変動することから、実橋において、死荷重状態の外ケーブルの張力を管理値として用いるためには、温度変化による外ケーブルの張力変動をあらかじめ把握し、これを除外して管理値を設定する必要がある。現時点では、この温度変化の影響による外ケーブルの張力変動量を考慮して管理値を設定することは困難であることから、図 - 11 に示す温度変化の影響を受けない死荷重状態から列車荷重状態によって増加する外ケーブルの張力を管理値として用いることとした。

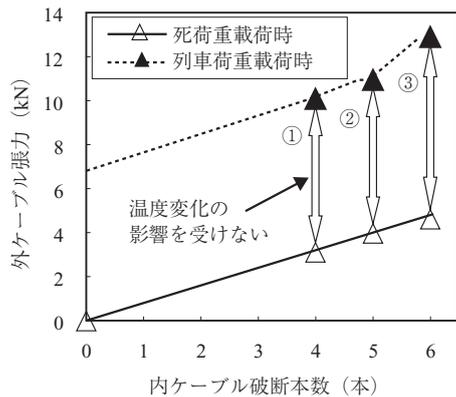


図 - 11 内ケーブル破断による外ケーブルの張力変動

具体的には、試験桁での計測対象となる実走行列車の荷重から H 荷重の軸重を 106 kN として解析を行った結果、内ケーブルの破断が 4 本または 5 本の場合には、列車荷重による外ケーブルの張力変動量はおおむね 7.6 kN であり、曲げひび割れ発生前ではほぼ一定値となる (図 - 11 の ①, ②)。これに対して、列車荷重状態によって

曲げひび割れが発生する内ケーブル 6 本破断時には、列車荷重状態による外ケーブルの張力変動量は 8.1 kN となる (図 - 11 の ③)。これは、試験桁に曲げひび割れが発生すると剛性が低下し、列車荷重状態による外ケーブルの張力変動量は曲げひび割れ発生前よりも大きくなるためである。これより、列車荷重状態時の外ケーブルの張力変動量として 7.0 kN を閾値とし、センサーが 0.7 kN (7.0 kN/9 本) を超える値を計測した場合には、何らかの異常が生じているものとして取り扱うこととした。

5. 施 工

5.1 試験桁の変状状況

(1) 外観変状

試験桁には、下フランジ下面の L/4 点から 3L/4 点 (L : スパン長) の間に幅 0.2 mm 以上の橋軸方向のひび割れが多く発生している。また、主桁側面にもシースに沿ったひび割れが見られた。ただし、ひび割れからの錆汁は確認されていない。なお、ひび割れには、外ケーブル設置前にセメント系ひび割れ注入材による注入工を実施した。

(2) グラウト充填状況

試験桁では、昭和 58 年に主桁側面からの削孔によるグラウト充填状況調査が実施されている。削孔は、ケーブルごとに起点側、終点側それぞれ 1 箇所ずつ、計 2 箇所で行われている。全 48 箇所 (4 主桁 × 内ケーブル 6 本 / 主桁 × 2 箇所 / 本) における調査のうち、グラウトの充填が不適切な箇所が 11 箇所発見された。これらの箇所は、調査後に再充填が実施されており、グラウトの再充填量は 109.5 l であった。また、シースからの漏水はいずれの箇所からもなく、内ケーブルの腐食が 8 箇所で確認されている。

5.2 外ケーブルの定着および緊張

外ケーブルの設置状況を写真 - 1 に示す。外ケーブルにはポリエチレン被覆した内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼材を用いた。



写真 - 1 外ケーブルの設置状況

定着体は起点側をくさび式、終点側をねじ式とした。これは、センサーによる計測値が管理値を超過した場合に、外ケーブルを再緊張することでプレストレスを回復させる必要があることから、再緊張が可能なねじ式定着方式を採用したものである。ねじ式定着体、定着体の設置状況を写真 - 2 に示す。



(a) ねじ式定着体



(b) 定着体全景

写真 - 2 定着体設置状況

外ケーブルに緊張力を導入するに際して、外ケーブルに設置したセンサーのキャリブレーションのために、一旦、外ケーブルに $0.9P_y$ (P_y : PC 鋼材の引張降伏強度の規格値) まで緊張力を付加した。その後、外ケーブルの有効緊張力が $0.1P_u$ (4.3(1) 参照) となるよう、リラクゼーション、弾性短縮を考慮し、緊張力を導入した。緊張力の導入方法は、2 台のシングルジャッキを終点側に配置し、片引きで桁の両側面に設置した外ケーブルを同時並行で緊張作業を行った。設計計算では、 $0.1P_u$ の緊張力で 2 mm 程度試験桁が反り上がる結果が得られていたが、現地での測定では 1 mm 程度の反り上がりであり、軌道管理における基準値を満足していた。なお、外ケーブルの緊張作業は、軌道変位を計測しながら実施する必要があることから、列車の運行が終了した夜間での施工とし、緊張作業は 4 晩で完了した。

5.3 偏向部

偏向部では、再緊張時に外ケーブル 9 本の PC 鋼材が相互に接触することで摩擦が生じ、再緊張が困難となることが想定された。このため、図 - 12 に示すポリエチレン製のスペーサーを偏向部に設けることで、PC 鋼材の接触を避けることとした。偏向部の設置状況を写真 - 3 に示す。

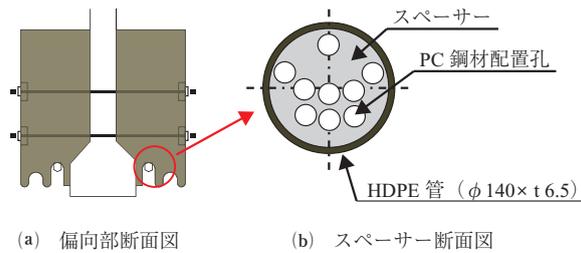


図 - 12 偏向部

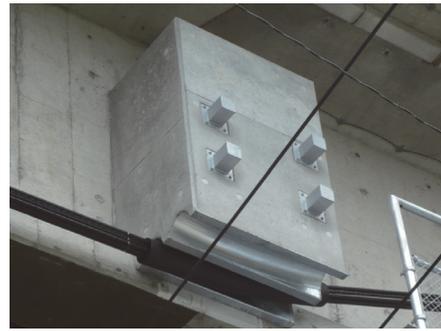


写真 - 3 偏向部設置状況

5.4 計測機器類の設置

計測機器類として、センサーに加え、内ケーブルの破断が検知された場合にひび割れ発生箇所の特目を目視で行うためのひび割れ検知用の多軸繊維シート (以下、ひび割れ検知シートと記載) の設置、死荷重載荷状態での外ケーブルの張力変動を検知することで内ケーブルの破断を把握する手法を検討するための温度計の設置を行った。

(1) 張力モニタリングセンサー

外ケーブルの張力変動を検知するためのセンサーの設置状況を写真 - 4 に示す。このセンサーは、計測対象の強磁性体の応力が増加すると、強磁性体内の磁束が減少するという応力磁気効果を基本原理としている。これは、永久磁石による一定磁界において発生する PC 鋼材内の磁束は、張力によって変化し、この磁束の変化を図 - 13 に示す PC 鋼材の周囲に配置した磁界計測 IC で計測することによって張力を算定するというものである⁸⁾。センサーは図 - 14 に示す 13 箇所に設置した。このようにセンサーを密に設置したのは、同一主桁の左右での外ケーブル張力値の違いや同一外ケーブル上での張力値の違いの有無を確認し、実用段階での設置箇所を見極めることを目的としているためである。



写真 - 4 張力モニタリングセンサー設置状況

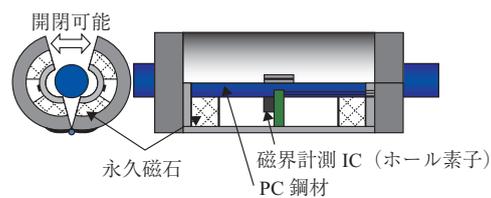


図 - 13 張力モニタリングセンサー模式図

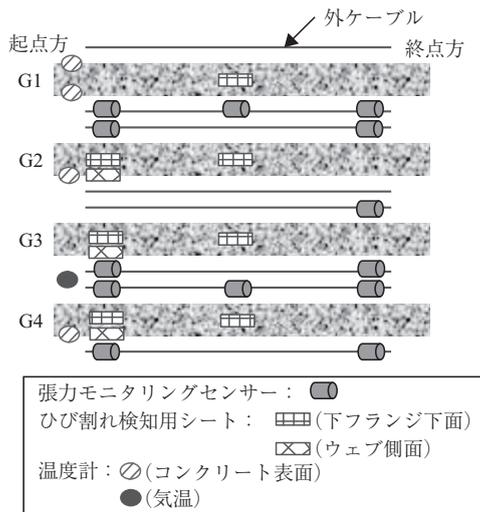


図 - 14 計測機器類設置箇所

(2) ひび割れ検知シート

内ケーブルの破断が進行し、列車荷重載荷により試験桁に曲げひび割れが発生した場合でも、死荷重載荷状態になれば曲げひび割れが閉じる可能性が高く、目視によってひび割れを把握することが困難となる。このため、試験桁のコンクリート表面に、あらかじめ写真 - 5 に示すひび割れ検知シートを図 - 14 に示す 10 箇所に着着した。このシートは、ひび割れが発生するとひび割れ箇所が白色に変化するというもので、荷重変化によってひび割れが閉じても、ひび割れ発生箇所が白色したまま残ることから、死荷重載荷状態で目視によってひび割れ箇所の検知が可能となる。



写真 - 5 ひび割れ検知シート設置状況

(3) 温度計

4.3(3) に示したように、管理値は、曲げひび割れ発生前における列車荷重載荷による外ケーブルの張力変動量としている。しかし、試験桁に作用する温度変化による外ケーブルの張力変動量をあらかじめ把握できれば、死荷重載荷状態の外ケーブルの張力変動量を管理値として設定できると考えられる。これより、図 - 14 に示す試験桁表面でのコンクリートの温度を測定し、温度と外ケーブルの張力の傾向を調べて今後の管理値の検討に利用することとした。

6. 計測システム

6.1 計測対象

外ケーブルの張力変動をモニタリングすることで内ケーブルの破断を検知できるようにすることが計測システム開発の目的である。当初の管理値は、図 - 11 に示すように温度変化の影響を受けない列車荷重載荷時の外ケーブルの張力変動量としていることから、計測についてもこの外ケーブルの張力変動量を測定対象とした。

6.2 計測システムの構成

高速で移動する列車荷重載荷時の外ケーブルの張力変動を把握するためには、センサーから出力されるアナログデータを高速サンプリングする必要がある。一般的な桁のたわみの計測結果から想定される外ケーブルの張力変動の波形は、図 - 15 のような形状となり、この波形をデジタルデータとして取得するために要求される性能と主な設定を表 - 4 に、計測システムの装置構成を図 - 16 に、設置状況を写真 - 6 に示す。

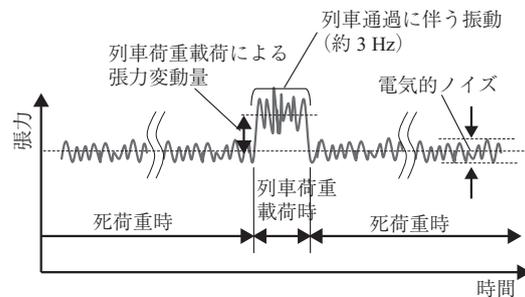


図 - 15 外ケーブル張力変動の波形イメージ

表 - 4 要求性能に対するシステム設定

システムに対する要求性能	システムの設定
列車荷重載荷時の外ケーブルの張力変動波形をデジタルデータとして再現するために、張力変動周期よりも十分高速なサンプリングレートでデータを収集する	• 車両通過に伴う振動約 3 Hz に対しサンプリングレートを 60 Hz (16.7 msec/点) に設定 (ノイズ低減のために 167 μ sec/点でサンプリングしたデータを 100 点平均して 16.7 msec/点として出力)
通信ケーブルや電源から重畳する電氣的ノイズを張力変動によるセンサーの出力信号より小さくする	• 外ケーブルの張力変動量が解析結果よりも小さく、センサーの出力信号が電氣的ノイズに埋もれてしまうことからノイズフィルタを設置
タイマーによる 5 分間分のデータ (18 000 点) から、列車荷重載荷時の波形 (5 秒分の 300 点) を特定する	• 桁の振動を計測する振動センサーを設置し、データ上の列車通過を明確化 • 将来は桁の振動をトリガーとして計測し、データ量の圧縮を検討

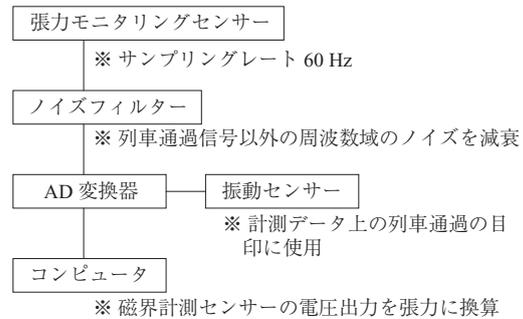


図 - 16 システム構成の概要



写真 - 6 計測システム設置状況

現在は、さらなる電氣的ノイズの低減や無線伝送化のためのデータ量の圧縮など、計測システムの最適化を図るべく計測データを蓄積中である。

6.3 計測結果

列車荷重載荷時の外ケーブルの張力変動量は、解析値の0.8 kN に対して計測値の最大は0.5 kN であった。計測値が解析値の60%程度となっているのは、解析では、高欄やケーブルダクト等の試験桁に付帯している構造物の剛性を考慮していないことによるものと考えられる。なお、同一の荷重条件であれば、たわみと剛性の積は一定となることから、計測結果より試験桁の剛性は、解析値の1.6倍程度となる。過去に実施した実験においても、既設の鉄道PCI形桁に保守用車両(軸重128 kN)を静的載荷して得られたたわみ値と格子フレームモデルによる解析値とを比較し、既設PCI形桁の剛性は、解析値の1.7~1.8倍程度であったとの結果が得られている⁹⁾。これより、管理値の設定では、対象となる実PC桁の剛性を適切に評価して設定すべきといえる。

7. 今後の計画

7.1 計測データの分析

今後、2年間にわたって計測データを収集、分析し、列車荷重載荷時での外ケーブルの張力変動による内ケーブル破断の検知手法と死荷重載荷状態での検知手法の両者の有用性について検討することとしている。

列車荷重載荷による外ケーブルの張力の測定値には乗客数や衝撃係数の違い、測定精度による計測値のばらつきが考えられることから、より確実に内ケーブル破断を検知するためには、計測値のばらつきを考慮したうえで内ケーブル破断時の張力の変化点をとらえる必要があり、統計的な処理が必要になると考えている。計測値に解析的検討で得た内ケーブル破断時の外ケーブル張力の増加量を加える等の方法でシミュレーションを行い、計測値のばらつきの影響について検討を行う予定である。

また、死荷重載荷状態による内ケーブル破断の検知では、温度変化に伴う桁の伸縮等による外ケーブルの張力変化の影響を把握する必要がある。これより、外ケーブルの張力変化から温度による張力変化の影響を除外し、死荷重載荷

状態のみの影響による外ケーブルの張力変化量の把握が可能かを計測データによって検討を行う予定である。

7.2 計測値の管理

計測データをネットワークを介して設備管理部門に伝送することを検討中である。伝送された計測データをパソコン内で管理値と比較し、内ケーブルの破断の有無について判定するシステムとする予定である。

7.3 内ケーブル破断検知後の対応

内ケーブルが破断したと判定された場合には、直ちに内ケーブルの破断本数、破断位置等を特定するための調査を行い、外ケーブルの再緊張力を計算する必要がある。さらに、外ケーブルを再緊張し、PC桁の耐力を速やかに回復させることで、鉄道輸送への影響を最小限とすることとしている。

8. おわりに

4年間にわたり技術開発を進めてきた外ケーブル張力モニタリングシステムを実橋に試験施工するに至ったが、システムの有効性をより確実なものとするためには本試験施工で得られた計測データを分析し、改良を行っていく必要があると考えている。

最後に、本システムの開発にあたり、京都大学大学院工学研究科宮川豊章教授および「コンクリート構造物の保守管理に関する調査・検討委員会」(公社)日本材料学会の委員各位より多数のご助言を賜りました。末筆ながら深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村田一郎, 大坪正行, 近藤拓也, 森川英典: PCI形桁の有効プレストレス変動のモニタリングに関する実験的研究, 日本材料学会コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, vol.10, pp.273-280, 2010.11
- 2) 橋田敏之, 大石辰雄: 山陽新幹線におけるPC橋梁(I) - 岡山・博多間 -, 構造物設計資料No.29, pp.26-30, 1972.3
- 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限, 丸善出版(株), 2006.2
- 4) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善出版(株), 2004.4
- 5) 村田一郎, 大坪正行, 近藤拓也, 田中克弘, 森川英典: PCI形の有効プレストレス変動に対する外ケーブルモニタリングシステムの有効性に関する解析的研究, 日本材料学会コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, vol.11, pp.177-184, 2011.11
- 6) TNO DIANA: DIANA Finite Element Analysis User's Manual Release 9.4.3, 2011
- 7) Xuehui AN, Koichi Maekawa and Hajime Okamura: Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, J. Materials Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.564/V-35, pp.297-316, 1997.5
- 8) 木戸俊郎, 及川雅司, 塚田和彦: 応力磁気効果を利用したPC鋼材の緊張力測定装置の開発, 資源・素材学会資源・素材2008(仙台), pp207-208, 2008.10
- 9) 丸山直樹, 村田一郎, 岸村信: 静的載荷によるPC桁の実剛性の評価, 土木学会第67回年次学術講演会, V-059, pp.117-118, 2012.9

[2013年9月4日受付]