

鉄道P C I 形桁のケーブル破断を想定した維持管理手法

ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社	○岡本	早夏
西日本旅客鉄道株式会社	正会員	村田 一郎
西日本旅客鉄道株式会社	正会員	大坪 正行
西日本旅客鉄道株式会社	正会員	湯浅 康二
ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社	正会員	濱田 謙

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC）桁は、桁長がおおむね 25m 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。一方、1970 年代後半の高度経済成長期に建設されたポストテンション方式の PC 桁では、グラウトの充填不良によって PC 鋼材の破断が懸念されており、特に、PC 鋼材の破断本数が増加してプレストレスが著しく低下すると、耐力や剛性といった力学性能が急激に低下する危険性がある。したがって、プレストレスの評価は重大な課題といえるが、PC 鋼材の破断の有無を的確に把握することは非常に困難である。そこで、既存の PCI 形桁の主桁に補強用鋼材（以下、外ケーブル）を設置し、外ケーブル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（以下、センサ）でモニタリングすることによって、内ケーブルの張力変動をモニタリングするシステム（以下、外ケーブル張力モニタリング方式）を考案した。¹⁾

本報告では、外ケーブル張力モニタリング方式の概要および実現性を確認する実験的検討、実橋梁への適用を想定した設計手法の提案について報告する。

PC 鋼材の破断が進むと、有効プレストレスが低下、桁の耐力・剛性が著しく低下するが、耐力低下を確認してから何らかの対策を施す場合、数ヶ月の期間を要する。しかし、外ケーブル張力モニタリング方式では、補強用の外ケーブルが設置されていることから、有効プレストレスの低下を確認後、外ケーブルを緊張するだけですぐに補強効果を得ることが可能である。



写真-1 外ケーブルの設置状況

2. 実験的検討

PC 桁には内ケーブルが複数本配置されており、ケーブル 1 本が破断したことによるたわみの変化が小さく、センサで検知できない可能性がある。また、多主桁のうち 1 主桁のみ剛性が低下した場合、荷重再分配によりたわみが小さくなる。そのため、たわみの変化が小さい場合でもセンサで検知できるか、実験により確認する必要があった。そこで、既存橋梁を模擬した実物の 1/2 スケールの供試体を製作し、外ケーブルにセンサを設置、内ケーブル破断を模擬しながら載荷試験を行い、張力変動をセンサとロードセルでモニタリングすることで、センサの検知精度を確認した。

実験供試体の概要を図-1～3、計測機器の配置を図-4、センサの概要を表-1 に示す。実験では、磁歪法のセンサ 2 種類と光ファイバーセンサの計 3 種類のセンサで検知精度を確認した。内ケーブル破断は、緊張力を

表-1 外ケーブルひずみ・張力計測用センサ

種別	計測原理	計測対象	感度※1	誤差※2
S I	光ファイバー	ひずみ	50 μ	—
S II	磁歪法	張力	—	±3%
S III			1kN	±5%

※1 感度（分解能）：最小計測単位

※2 誤差：真値に対するばらつき範囲

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

連絡先〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島 5-4-20 中央ビル 8F ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 土木設計本部 TEL06-6303-1453

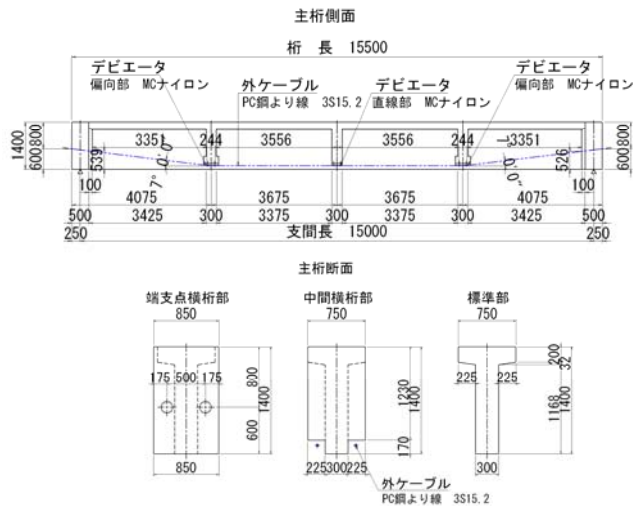


図-1 供試体一般図

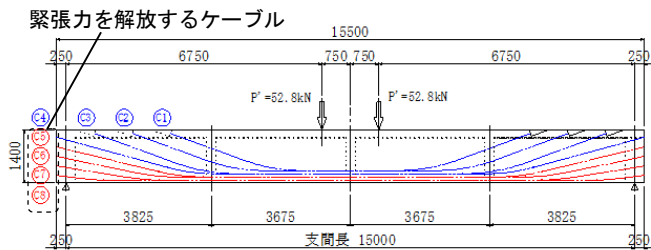


図-2 内ケーブル配置図

解放することで有効プレストレスの低下を模擬した。また、事前に DIANA を用いた非線形 FEM 解析を行い、実験結果と比較し、解析の有効性を確認した。

センサで測定した外ケーブルの張力（以下、「センサ張力」とロードセルで測定した外ケーブル張力（以下、「ロードセル張力」という）を図-5 に示す。各張力がほぼ一致していることから、SⅠ、SⅡ、SⅢのいずれのセンサも検知機能は十分あるといえる。なお、SⅢについては、センサ張力の変化に変動がみられるが、温度補正を1℃単位としていたため実験中の温度変化に追従できなかったものと推測され、以後 SⅢの温度補正は0.1℃単位に見直している。

3. 外ケーブル張力モニタリング方式の設計

3. 1 設計の基本的な考え方

外ケーブル張力モニタリング方式の設計は、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る。各設計段階における補強部材の設置イメージを図-6、設計全体の流れを図-7 に示す。

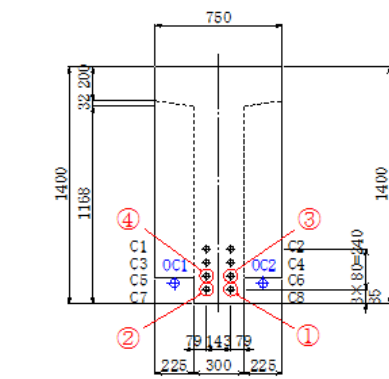


図-3 内ケーブル緊張力解放順序

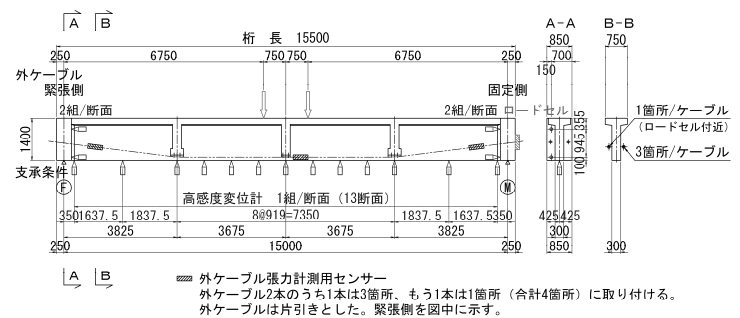


図-4 計測機器の配置

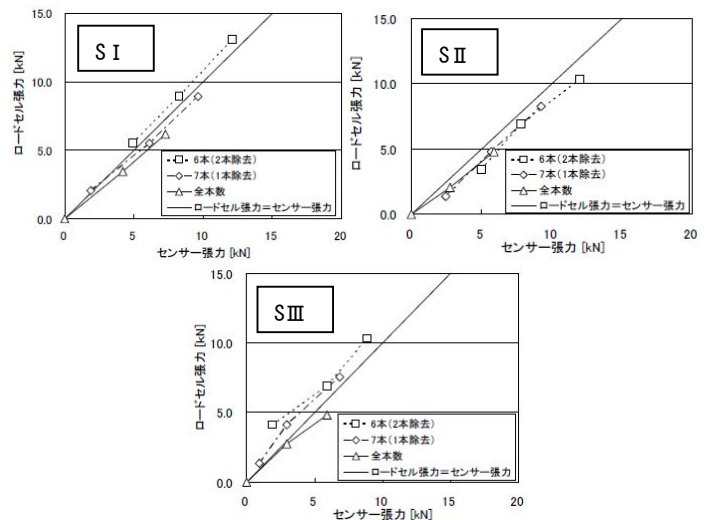


図-5 ロードセル張力との比較

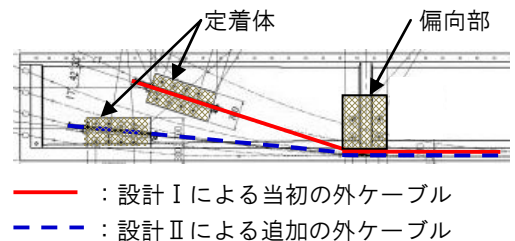


図-6 外ケーブル，定着体，偏向部の配置

3. 2 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。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

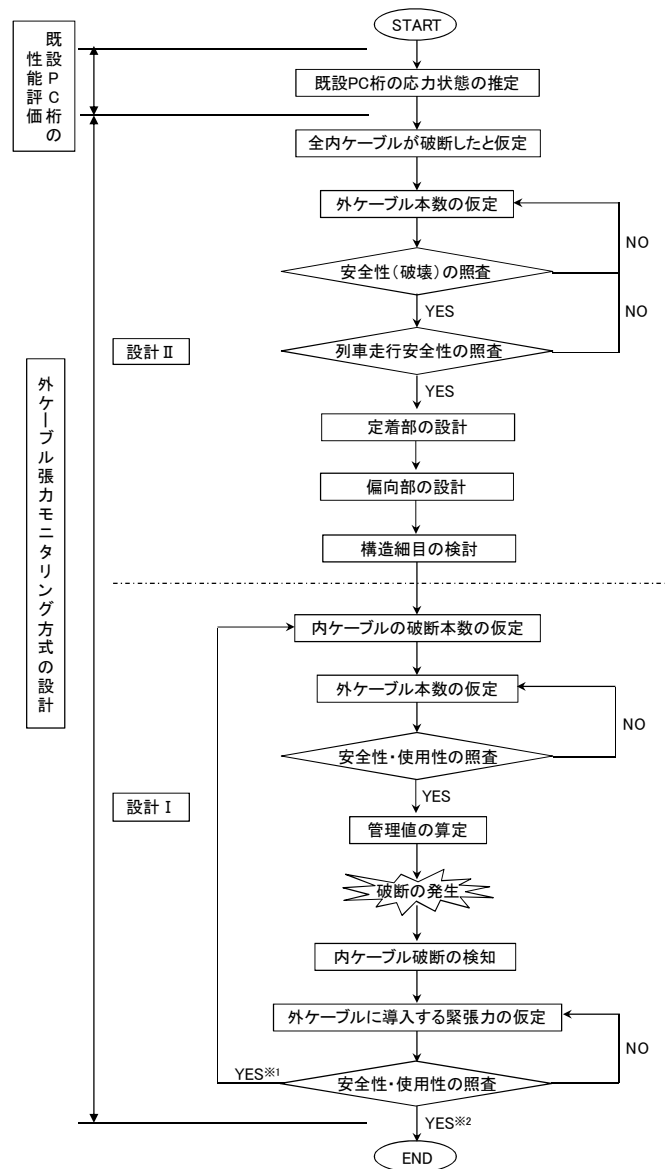
設計Ⅱでは、試験桁の内ケーブルが全本数破断した場合においても安全性、使用性の確保が可能な配置となるよう、外ケーブル本数、緊張力の照査を行う。想定する内ケーブルの破断本数は、全主桁の全内ケーブルが破断した場合の本数とする。内ケーブルの破断位置、破断長は、設計Ⅰと同様の考えとする。また、外ケーブルは各主桁の両側面に設置し、安全性の確保が可能な本数とする。

(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き、センサ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。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を用いた非線形解析によって算出しており、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。



※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-7 外ケーブル張力モニタリング方式の設計

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 $f_{pu} \times 0.84$
	破壊(せん断)	設計せん断力 V_d	設計せん断耐力 V_{yd}
	走行安全性	変位・変形量 δ_d	変位・変形量 δ_{ls}
使用性	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（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。

$$\gamma_f = \gamma_{f0} \cdot \gamma_{a0} \cdot \gamma_{b0} \cdot \gamma_{i0} \quad (1)$$

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_{i0} ：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。列車荷重は線区によるが、試験施工の橋梁では列車荷重として H-12 を用いた。また、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、設計Ⅱでは、上下線複線載荷、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。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-8 に示す。なお、鉄筋および内ケーブルについては、埋め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 DIANA) 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-9 に示すモデルを用いた。これは、プレストレスを 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

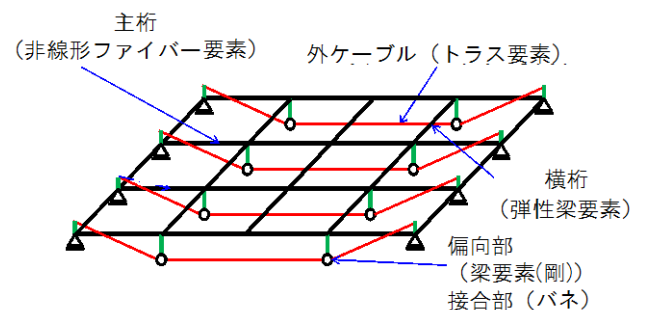


図-8 格子フレームモデルの概要

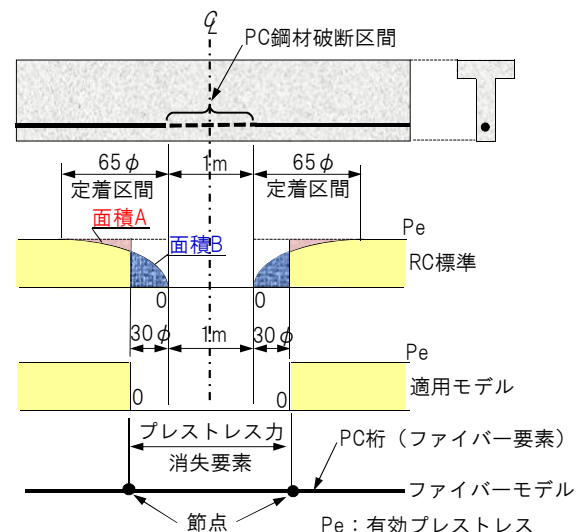


図-9 内ケーブルの破断モデル

図-9 に示す面積 A および面積 B が同等となる区間 30 ϕ 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。

5. 実橋梁への適用（試験施工）

5. 1 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 主桁である。断面図、鋼材配置図を図-10 に、設計条件を表-4 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 3500m）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（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）と比較したものを図-11 に示す。

5. 2 試設計の結果

(1) 設計 I

図-10 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、6 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 $0.1P_u$ (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。

安全性（曲げ破壊）、使用性（乗り心地）の検討結果を図-12、図-13 に示す。設計応答値は、コンクリートの圧縮ひずみ $\varepsilon_d=201\sim 231\mu$ 、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 $\varepsilon'_{cu}=3500\mu$ 、外ケーブルの引張強度 $f_{pud}\times 0.84=1582\text{N/mm}^2$ 、鉛直変位量 $\delta_{lc}=15.1\text{mm}$ ）に対して十分安全な結果である。また、せん断破壊についてもいずれの断面も照査を満足していることを確認した。

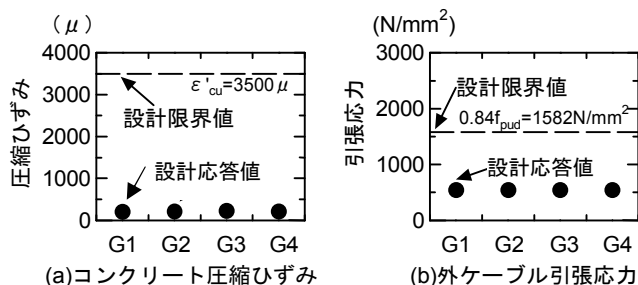


図-12 設計 I による曲げ破壊の照査

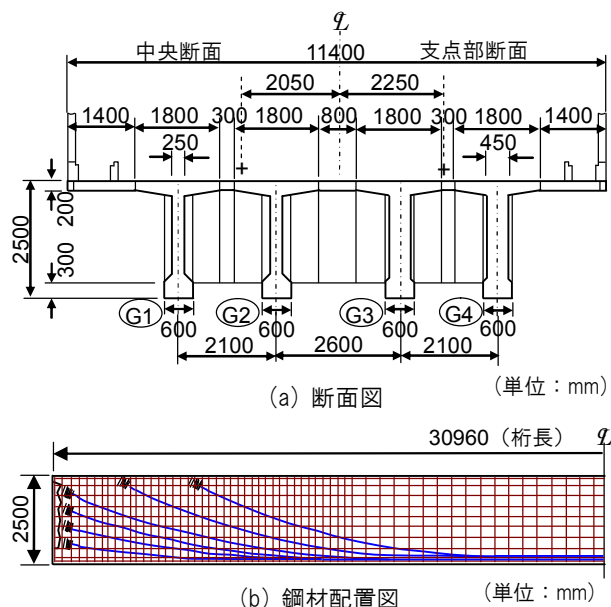


図-10 橋梁一般図

表-4 設計条件

項目	緒元
スパン	30.2m
曲線半径	3500m
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
	400kgf/cm ²
PC鋼材	プレストレス導入時
	350kgf/cm ²
PC鋼材	主ケーブル
	12- ϕ 12.4mm, SWPR7A
PC鋼材	横締め鋼棒
	SBPR95/110, ϕ 24mm, ϕ 30mm

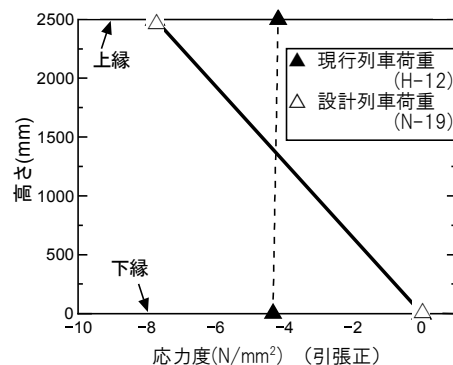


図-11 列車荷重による桁上縁・桁下縁の応力度の比較

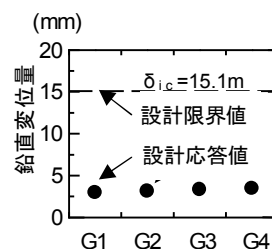


図-13 設計 I による使用性（乗り心地）の照査

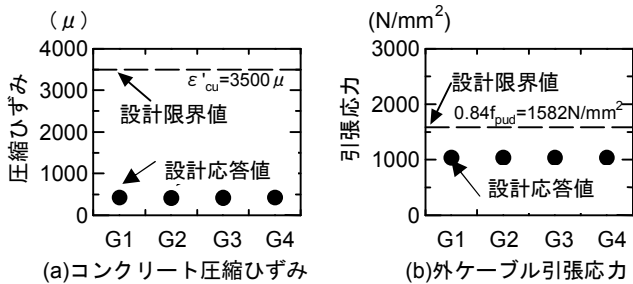


図-14 設計Ⅱによる曲げ破壊の照査

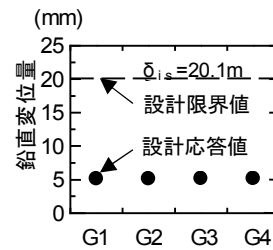


図-15 設計Ⅱによる走行安全性の照査結果

(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 $0.55P_u$ とした。安全性 (曲げ破壊)、走行安全性の検討結果を図-14、図-15 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 $\delta_s=20.1\text{mm}$) に

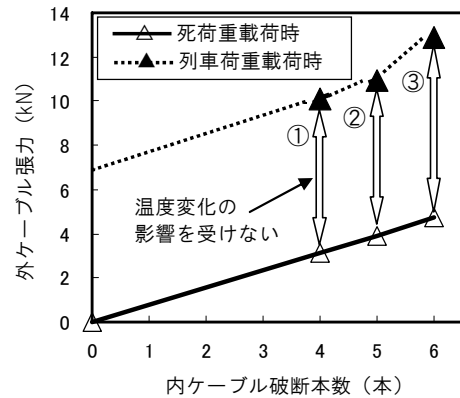


図-16 内ケーブル破断による外ケーブルの張力

(3) 管理値の算定

今回使用したケーブル (SWPR7B, $\phi 15.2\text{mm}$) でのセンサの検出可能な最小値は 0.2kN 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 1.8kN (9 本 $\times 0.2\text{kN}$) 以上となった場合にセンサで検知することが可能となる。つまり、死荷重載荷状態において内ケーブルが破断した場合、外ケーブルの張力変動量が 1.8kN 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、死荷重載荷状態で外ケーブルの張力変動量が 1.8kN 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。実橋において、死荷重載荷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-16 に示す温度変化の影響を受けない死荷重載荷状態から列車荷重載荷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。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を用いて解析を行い、列車荷重による曲げひび割れ発生前後で列車荷重による張力変動量が一定 (図-16 の①, ②, 7.0kN) から大きく変動する張力変動量 (図-16 の③, 8.1kN) を閾値とし、センサが 0.7kN ($7.0\text{kN}/9$ 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。

8. おわりに

鉄道 PCI 形桁の内ケーブル破断を想定し、あらかじめ設置する外ケーブルにセンサを設置し、張力変動をモニタリングするシステムを提案し、実験的検討により実現性を確認した。実橋梁への適用を想定した設計手法を提案し、試験施工・モニタリングを行っている。本報告での提案に基づき外ケーブル張力モニタリングシステムを実橋梁で試験施工しており、システムの有効性をより確実なものとするため試験施工で得られた計測データを分析し、改良を行っていく予定である。

参考文献 1) 村田一郎, 及川雅司, 大坪正行, 森川英典: 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, プレストレストコンクリート, Vol.55, No.6, 2013.11