

外ケーブル張力モニタリング方式によるPCI形桁の健全度把握手法の開発

西日本旅客鉄道(株)	正会員	工修	○丸山	直樹
西日本旅客鉄道(株)	正会員		村田	一郎
西日本旅客鉄道(株)	正会員	工博	近藤	拓也
神戸大学大学院	正会員	工博	森川	英典

1. はじめに

ポストテンション方式（以下「ポステン」と呼ぶ）のPC桁は、河川・道路・鉄道を交差する橋りょうにおいて多く用いられているが、過去に建設されたものの中には、施工に関する配慮が不足していたことなどから、グラウトの充填が不十分であるものが存在する¹⁾。そのような桁では劣化因子がシース内に侵入しやすく、内ケーブルの腐食・破断の可能性もある。山陽新幹線には約1,200連のポステンPC桁があり、万一内ケーブルの破断が生じた場合、耐荷性・走行安全性・乗り心地などの機能低下が懸念される。しかし、PC桁の内ケーブルの破断やグラウト充填状況を非破壊で検査するのは、現状では困難である。そこで、PCI形桁の側面に外ケーブルを設置し、外ケーブルの張力変動をセンサーでモニタリングすることで内ケーブル破断を検知するとともに、内ケーブル破断時には補強ケーブルとして機能させる外ケーブル張力モニタリング方式の開発に取り組んでいる。本稿ではセンサーの有効性の確認実験、内ケーブル破断時の解析手法、モニタリング方式の有効性について紹介する。

2. モニタリング方式の概要

耐荷性能の低下が懸念されるPC桁に対して、図-1に模式的に示すように、外ケーブルと張力測定用センサーを設置する。内ケーブルが破断した場合、桁のたわみが、破断前と比較して増加する。それに伴う外ケーブルの張力変動を測定することにより内ケーブル破断を検知するものである。

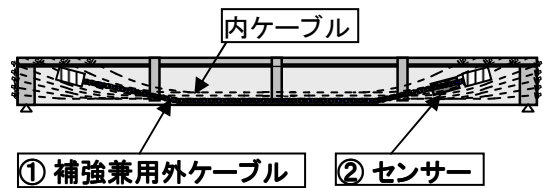


図-1 システムの概念図

内ケーブル破断を検知した場合、詳細な調査を実施し、

外ケーブルの再緊張や、外ケーブルの増設といった補強を行うことにより運行休止することなくPC桁の機能を回復できる。

3. 供試体による実験的検討

3. 1 実験供試体モデル

山陽新幹線の複線ポステンPC4主I形桁（桁長27.72m，桁高2.5m）をモデルとし、図-2に示す縮小供試体を製作した。供試体のプレストレス量は実橋における自重，後死荷重，活荷重による桁下縁の曲げ応力度の比率が1.0 : 1.0 : 1.0であること，および設計荷重作用時コンクリート下縁合成応力度が $0\text{N}/\text{mm}^2$ となることを踏まえて算定した。その結果，載荷荷重を後死荷重相当，活荷重相当ともに

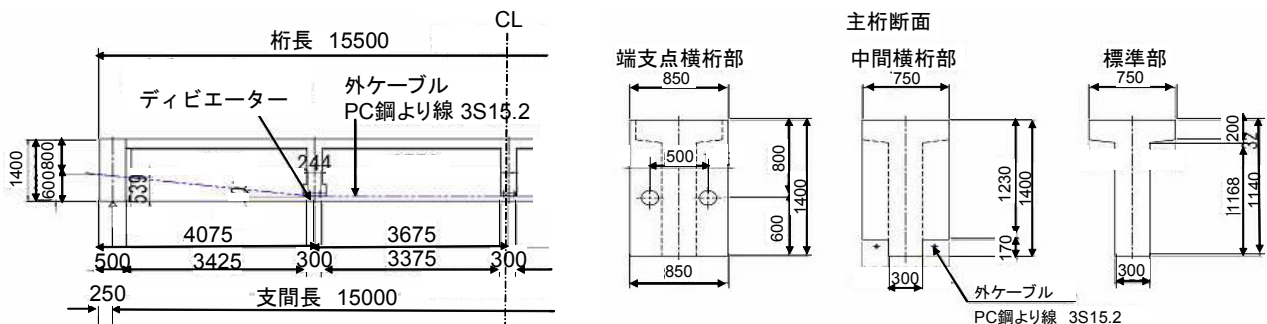


図-2 供試体一般図

105.6kNとしたうえで、内ケーブルにはPC鋼より線1S17.8を図-3に示すように8本配置した。そのうちの3本は、実橋を模擬して上縁定着とした。また、外ケーブルは、2箇所の偏向部と支間中央部にディビエーターを設け桁の両側面に設置した。外ケーブル種別は、3S15.2 (SWPR7B) を用いた。コンクリート強度試験の結果を表-1に示す。

表-1 コンクリートの強度試験結果

圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 [N/mm ²]	備考
53	4.23	33767	材齢：93日

3. 2 実験方法

載荷実験はステップ1~3に区分し、実験を通して1体の供試体を用いて実施した。ステップ1は外ケーブル未設置状態で内ケーブル破断が生じた場合、ステップ2は外ケーブル設置状態で内ケーブル破断が生じた場合を模擬している。ステップ3は内ケーブルが破断し外ケーブルを用いて補強している状態で、使用限界を超える荷重が載荷された場合のセンサーの検知性能の確認を目的として実施した。内ケーブルの定着部を緩めて緊張力を解放することにより破断を模擬するために、内ケーブルにはグラウトを充填していないものがある。表-2に各ステップにおける内ケーブルのグラウト充填状況と外ケーブルの設置の有無を示す。以下、ステップ3について述べる。

表-2 グラウト状況と外ケーブル設置

	内ケーブルグラウト	外ケーブル設置
ステップ1	全数なし	なし
ステップ2	全数なし	あり (緊張力: 0.1σ _{pu})
ステップ3	C1~C4: あり, C5~C8: なし	あり (緊張力: 0.47σ _{pu})

※σ_{pu}: 外ケーブルの引張強度

ステップ3は、4本の内ケーブル (C5~C8) が破断した場合にたわみが列車走行安全性の限界値²⁾を上回るため、これを模擬してC5~C8の緊張力を解放したうえで、C5~C8のプレストレスに相当する0.47σ_{pu}の緊張力を外ケーブルに導入し、桁の耐力を解放前と同等として実施した。

3. 3 センサー

外ケーブルは強磁性体であるため、張力の変動に伴いその周囲の磁界強さが変化する。本稿で述べるセンサー (写真-1) は磁界強さの変化を計測する³⁾ものである。設置位置は外ケーブルの支間中央部および桁端から1/8点とした。

3. 4 測定項目

桁のたわみ、外ケーブル張力、コンクリートおよび鉄筋のひずみを計測した。なお、外ケーブル張力はセンサーとロードセルで計測した。

3. 5 実験結果

載荷に伴う外ケーブルの張力変動について、ロードセルによる計測値と外ケーブルに設置したセンサーによる計測値の比較を図-4に示す。いずれもよく一致しており、センサーの検知機能は問題のないことが確認できた。

4. 解析手法の妥当性の確認

4. 1 解析の概要

外ケーブル張力モニタリング手法の設計では平面保持の仮定が成り立たないこと、多主桁のPC桁では内ケーブルの破断位置、破断本数などを検討する必要があり解析ケースが多くなること、内ケーブルの付着を考慮した部分的なPC鋼材破断を想定する必要があることなどを考慮し、モデル化が容易で、かつ、解析速度が速いと考えられる、図-5に示すようなファイバ

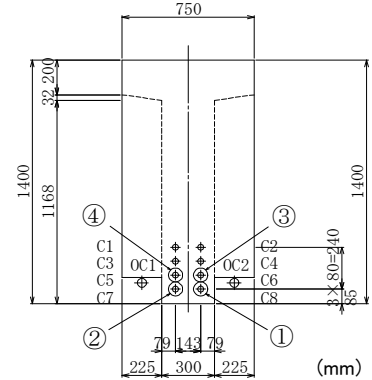


図-3 内ケーブル配置

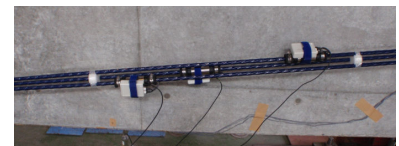


写真-1 外ケーブルに設置したセンサー

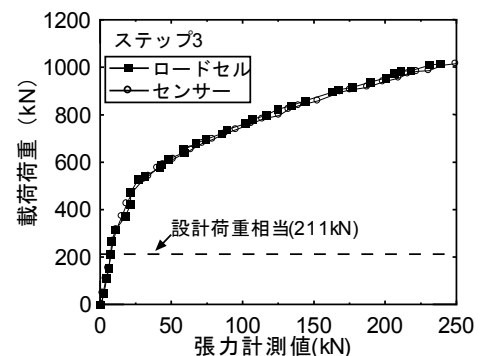


図-4 ロードセルとセンサーでの張力比較

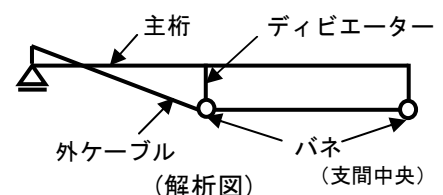


図-5 ファイバーモデル

一要素を用いたはりモデル (以下「ファイバーモデル」と呼ぶ) による3次元非線形FEM解析の適用を検討した。

4. 2 妥当性の確認方法

ファイバーモデルによる解析の妥当性については、図-6に示すソリッド要素を用いたはりモデル (以下「ソリッドモデル」と呼ぶ) による解析結果と実験結果とを比較することで検討した。各モデルの設定を表-3に示す。

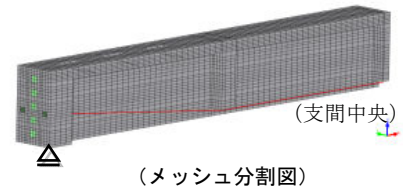


図-6 ソリッドモデル

表-3 各モデルの設定

	ファイバーモデル	ソリッドモデル
要素分割	橋軸方向 750mmピッチ	橋軸方向 125mmピッチ 鉛直方向 軸方向鉄筋配置に合わせる
鉄筋	軸方向鉄筋は埋め込み鉄筋要素として考慮, せん断補強鉄筋は考慮できない	軸方向鉄筋・せん断補強鉄筋を配置

4. 3 材料モデル

解析で用いるコンクリートの引張強度には、部材寸法・乾燥・水和熱の影響を考慮したコンクリートの曲げひび割れ強度の特性値⁴⁾を用いた。なお、算出には、表-1に示す引張強度の試験結果を用いた。

コンクリートの圧縮側の応力-ひずみ関係は、文献4)に基づくモデルを、また、引張側の応力-ひずみ関係は安⁵⁾らによるモデルを適用した。コンクリートの引張側の応力-ひずみ関係を図-7に示す。鉄筋およびPC鋼材の応力-ひずみ関係は、いずれも文献4)によるバイリニア曲線、トリリニア曲線を用いた。

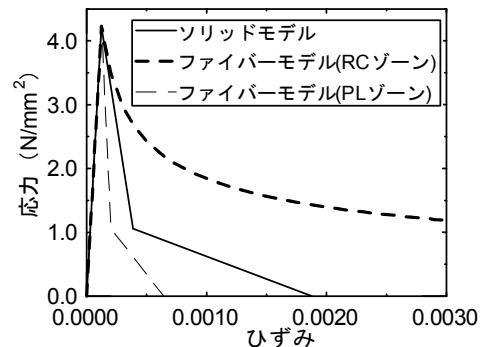


図-7 コンクリートの引張応力-ひずみ関係

4. 4 解析手順

解析手法は荷重を増分载荷する漸増载荷解析法を用い、実験のステップ3と同様、内ケーブル8本のうち、図-3の①～④ (C5～C8) の4本のプレストレスを解放したケースについて解析した。外ケーブルについては、実験と同様にあらかじめ0.47 σ_{pu} の緊張力を導入した。

4. 5 解析結果および検証

载荷荷重の増分に伴うたわみの変動量について、ソリッドモデル、ファイバーモデルによる解析値と実験値 (ステップ3) の比較を図-8に示す。両解析で比較すると、载荷荷重が600kN以上で若干の乖離が見られるが、モニタリングで使用する荷重レベルは設計荷重(211kN)近傍までであるため、実用上は十分妥当性のある手法であることが分かった。なお、両解析値と実験値には乖離が見られるが、実験ではステップ1から3まで1体の供試体を用いたため、ステップ3開始時にひび割れが入っていたことによる影響が考えられる。

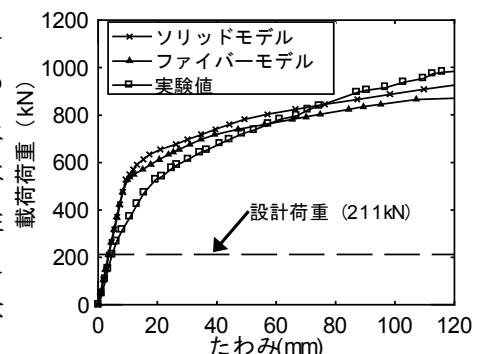


図-8 解析結果 (荷重-変位曲線)

5. 内ケーブルの破断に対するモニタリングシステムの有効性

5. 1 概要

ファイバーモデルを用いて、内ケーブルが破断した場合に外ケーブルの張力変動をセンサーで検知可能かを検証した。

5. 2 解析モデル

解析モデルについては基本的に4章で述べたものと同様であるが、内ケーブルの破断による部

分的なプレストレス消失長さのモデル化を行った点が異なる。内ケーブルのプレストレス消失長さについては、文献4)に示されているプレテンション方式におけるPC鋼材の定着の考え方を参考として定め、消失長さ内ではプレストレスの値を0とし、それ以外の範囲ではプレストレスが有効に残留しているものとした。

5. 3 解析手順

解析方法は荷重を増分载荷する漸増载荷解析法を用いた。内ケーブルの破断本数は、4本 (C5~C8) , または5本 (同図のC4~C8) とし、内ケーブルの破断位置は、桁端部からL/4点 (L: 桁長) , または支間中央のL/2点として、これらを組み合わせた4ケースについて解析を行った。内ケーブル4本をL/4点またはL/2点で破断させた場合の解析手順を図-9に示す。

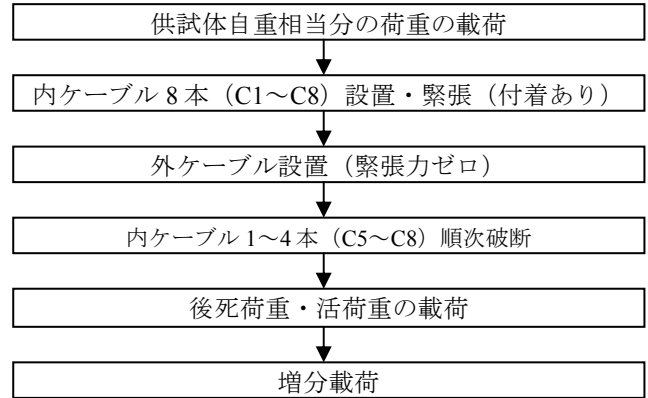


図-9 解析手順 (内ケーブル4本破断の場合)

5. 4 解析結果及び検証

内ケーブル4本あるいは5本が、L/2点またはL/4点で破断した場合の载荷荷重と外ケーブル張力の関係を図-10に示す。L/2点・L/4点のいずれにおいても5本破断と4本破断での外ケーブル張力の差が、センサーの測定精度 (2.1kN) 以上となる载荷荷重はL/2点では132kN, L/4点では211kNであった。この値はいずれも設計荷重 (211kN) 以内であり、活荷重作用時の外ケーブル張力の経時変化をセンサで測定することにより内ケーブルの破断を検知することができることが分かった。

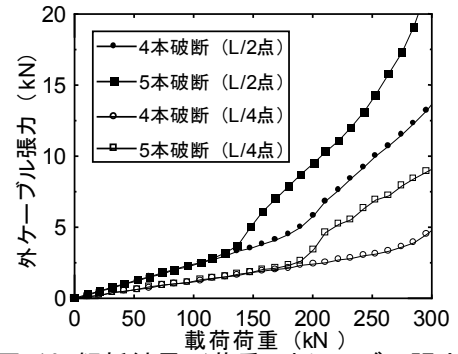


図-10 解析結果 (荷重-外ケーブル張力)

6. まとめ

本研究における主な結論は以下の通りである。

- (1) 供試体を用いて外ケーブル張力モニタリング方式の適用性を確認した結果、磁歪式センサーで計測した張力は、ロードセルで計測した張力と概ね同程度であり、センサーで張力変動の測定が十分可能である。
- (2) ファイバーモデルは、材料構成則を適切に選定することにより、本工法を適用した単純はりの挙動を十分な精度で表現できる。
- (3) 内ケーブルの破断をファイバーモデルで解析することにより、活荷重作用時の内ケーブル破断を検知できることが分かり、外ケーブル張力モニタリング方式の有効性を確認できた。

参考文献

1) たとえば 睦好宏史: PCグラウトの現状と問題点, プレストレストコンクリート, Vol. 48, No. 2, 2006. 3
 2) (財)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, 2006. 2 3) 木戸俊郎ほか: 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 4) (財)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, 2004. 4 5) X. AN et al.: 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 6) 村田一郎ほか: PCI型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. 10 7) 村田一郎ほか: PCI型桁の有効プレストレス変動のモニタリング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. 10