

内ケーブル破断位置等の違いによるPC桁の応答解析

ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 正会員 工修 ○京野 光男
 ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 正会員 工博 濱田 譲
 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

Abstract : It has become a major issue that the rupture of internal prestressing steels due to corrosion in the recent years. The monitoring system which can identify the rupture of internal prestressing steels by measuring the tension stress variation of external cables installed in prestressed concrete bridges was developed by authors. This paper describes the results of nonlinear frame analysis that performed to examine the magnitude of the tension stress variation of external cables.

Key words : Monitoring system, Rupture of prestressing steels, External cables, Nonlinear frame analysis

1. はじめに

近年、PC 桁において施工不良や環境作用に起因した PC 鋼材の腐食破断が懸念されているが、内ケーブルの破断状態を合理的に把握する手法は確立されていないと言える。PC 鋼材の破断本数が増加すると、PC 桁の安全性、使用性などが著しく低下するため、PC 鋼材の腐食破断に対し予防保全的な維持管理手法の適用が望まれる。そこで、著者らは PC 桁に外ケーブルを設置し、内ケーブル破断に伴う外ケーブルの張力変化をモニタリングするシステムを提案している¹⁾。このシステムは、内ケーブル破断により PC 桁の性能が低下した場合、外ケーブルによりプレストレスを追加導入できるものである。

このシステムを既設 PC 桁に適用するにあたり、内ケーブルの破断に伴う PC 桁の挙動を精度よく把握しておく必要がある。そこで、このシステムを適用する PC 桁の補強設計では、応答値を算定する際に非線形フレーム解析を用いた。また、これに対応した補強桁の照査手法を提案した。さらに、内ケーブル破断による外ケーブル張力変化をモニタリングする場合、あらかじめ内ケーブル破断に伴う外ケーブル張力の変化を精度良く再現し管理値を定めておく必要がある。そこで、内ケーブルの破断本数や破断長さをパラメータとした応答解析を実施し、内ケーブルが破断した場合の PCI 桁橋の挙動や、外ケーブルの張力の変化量を試算した。

2. 対象橋梁の概要

補強対象とした橋梁は、昭和 40 年代に標準設計²⁾を適用し施工された、4 主桁の PCI 桁橋とした。対象橋梁の設計当初の条件を表-1に示す。また、一般図を図-1および図-2にそれぞれ示す。外ケーブルの配置については後述する。列車荷重は、N-19,P-19であり、対象橋梁の主桁は、上縁定着

表-1 対象橋梁の設計当初の条件

曲線半径	3500m
列車荷重	N-19, P-19
衝撃荷重	0.289
コンクリート	400kgf/cm ²
内ケーブル	SWPR7A φ12.4

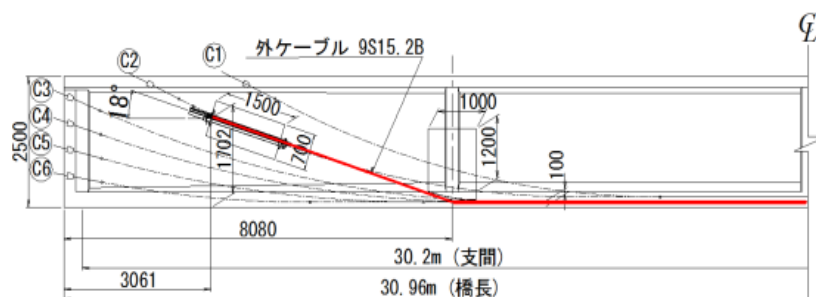


図-1 橋梁一般図 側面図 (mm)

を含む 6 本の内ケーブルが配置されたPC桁である。支間中央断面の内ケーブルの配置は、**図-3**に示すとおりである。

3. 補強桁の解析手法および照査手法

3. 1 解析手法

(1) PC桁のモデル化

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、桁のひび割れに伴う剛性低下を精度よく再現できる解析モデルを適用する必要がある。そこで、主桁には、変位および外ケーブル張力を終局状態まで精度よく評価できることを確認したファイバーモデル¹⁾を適用した。

対象橋梁は、**図-4**に示すように格子フレームでモデル化した。また、外ケーブルを用いた断面には平面保持の仮定が適用できないため、外ケーブルはトラス要素でモデル化した。コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係は、鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物³⁾(以下、RC標準と称す)に基づきモデル化した。コンクリートの引張応力-ひずみに関しては、鉄筋付着が期待できる領域と鉄筋付着が期待できない領域に区分する安ら⁴⁾のモデルを適用した。

(2) 内ケーブル破断のモデル化

内ケーブルが破断した場合、プレストレスは破断位置に向かって連続的に減少する。RC標準では、**図-5**に示すように、プレストレスを 65ϕ (ϕ : PC鋼材の換算直径)の区間で減少させて良いことが規定されている。この規定を出来るだけ忠実に再現できるように、**図中**に示す面積 A および面積 B が同等となる区間の 30ϕ をプレストレスをゼロとし、内ケーブル破断をモデル化した。内ケーブルの破断は、非線形解析ソフト (DIANA)⁵⁾に用意されている非アクティブ機能を用いて再現した。

3. 2 照査方法

本設計における照査指標を表-2に示す。例えば、曲げ破壊安全性を照査する場合、

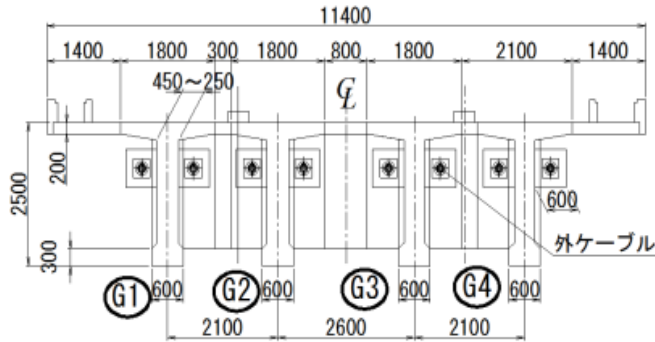


図-2 橋梁一般図 断面図 (mm)

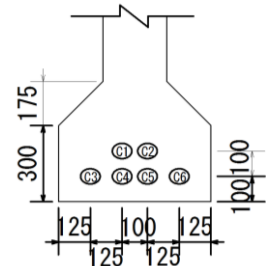


図-3 内ケーブルの配置 (mm)

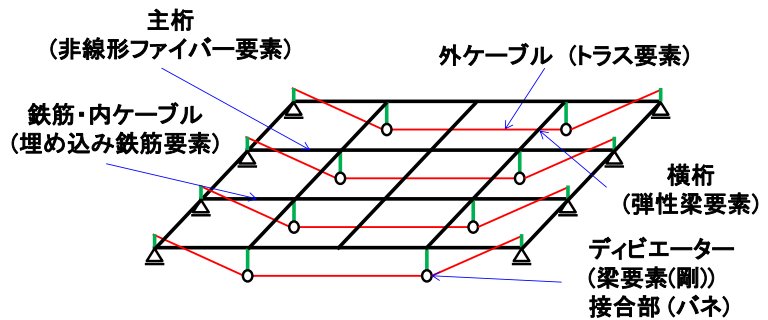


図-4 格子フレームモデルの概要

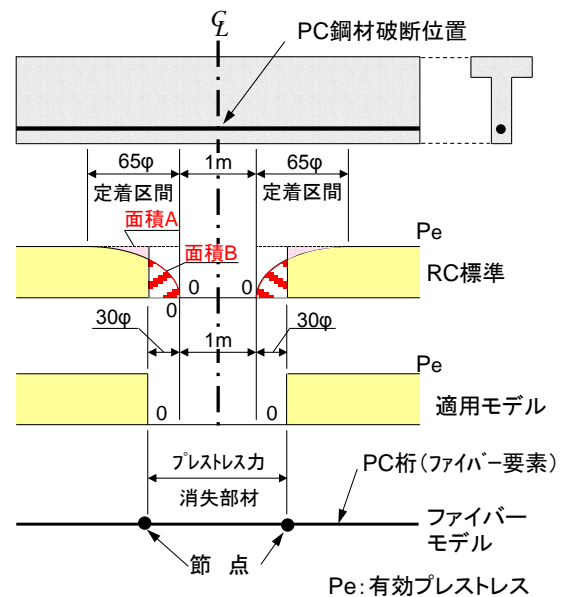


図-5 内ケーブルの破断モデル (破断長さ 1m の場合)

表-2 本設計における照査指標

要求性能	性能項目	設計応答値 Ird	設計限界値 Ild
安全性	破壊(曲げ)	コンクリート圧縮ひずみ ϵ_d	コンクリート終局圧縮ひずみ ϵ'_{cu}
		外ケーブル応力度 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}

一般に曲げモーメントを照査指標とする。しかし、本設計では主桁をファイバーモデルでモデル化しているため、解析結果から直接的に得られるひずみを照査指標とした。一方、ファイバーモデルは、せん断耐力を算定できないため、せん断破壊の照査は、解析の応答値を用いて別途照査した。

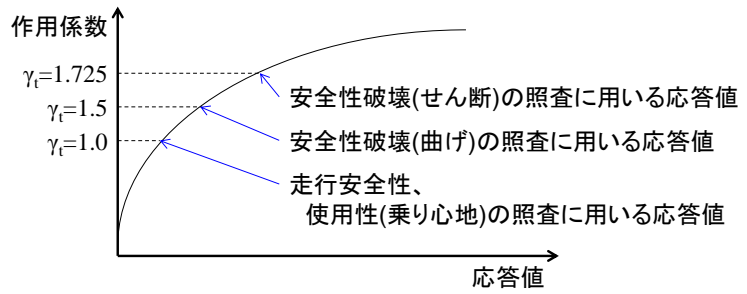


図-6 照査のイメージ図

3. 3 安全係数

本設計の場合、ファイバーモデルにより直接的に照査指標となるひずみを算定するため、従来のように部材係数と構造物係数の影響を分離することは困難である。そこで、RC 標準に示される安全係数の体系に基づき、式(1)により本設計に用いる作用係数 γ_t を設定した。許容応力度設計法が適用された当初設計と同程度の安全性が確保されていることを照査する場合、曲げ破壊限界およびせん断破壊限界に対応する作用係数 γ_t は次式で示される。

$$\gamma_t = \gamma_{f0} \cdot \gamma_{b0} \cdot \gamma_{i0} \tag{1}$$

ここで、 γ_t : 本設計における作用係数、 γ_{f0} : RC 標準における作用係数 (1.1)、 γ_{b0} : RC 標準における部材係数 (曲げ部材では 1.1、せん断部材では 1.3)、 γ_{i0} : RC 標準における構造物係数 (1.2) とする。また、式(1)には示していないが、前述のように精度良く解析できることを確認したモデルを用いるため、解析係数は 1.0 と考えている。ここで、 γ_t は曲げに対して 1.452、せん断に対しては 1.716 となる。本設計では、曲げ破壊の作用係数は 1.5 とし、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 を用いることとした。格子フレーム解析では、図-6 に示すように、作用荷重が各作用係数に達するまでプッシュオーバー解析を行った。これにより、使用限界状態から各終局限界状態まで一連の解析で応答値を算定できる手法とした。

4. 外ケーブル補強量と照査結果

4. 1 外ケーブル補強量の決定

外ケーブルの補強量は、列車荷重時において、外ケーブルを設置しない PC 桁にひび割れが生じる内ケーブル破断本数を特定し、その内ケーブルが破断してもひび割れが生じないように決定した。列車荷重は、線区で最大となる 350% 乗車を想定した H-12 を用いた。また、内ケーブルの破断位置は、曲げ耐力に大きく影響を及ぼすスパン中央とし、既往の調査結果から破断長さを 1m と仮定した。対象橋梁の場合、列車荷重時に G4 桁の内ケーブルを桁断面の下段 (C6) より順次破断した結果、内ケーブルが 4 本破断したときひび割れが生じた。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、0.3Pu (Pu : 引張強度の規格値) の緊張力を導入した。外ケーブルの配置を図-1 および図-2 の図中にそれぞれ示す。

4. 2 補強桁の照査結果

前項までに示す方法で補強桁の性能照査を行った結果、曲げ破壊限界時の桁上縁コンクリートの圧縮ひずみは 427μ で、終局ひずみの限界値 (3500μ) 以下であったことから、曲げ破壊に対し安全であることが分かった。また、せん断破壊限界の照査は、いずれの断面でも照査を満足する結果となった。

表-3 解析ケース

解析 ケース	破断 長さ	破断 位置	内ケーブル 破断本数(本)			
			G1	G2	G3	G4
CASE0	0m	—	0	0	0	0
CASE1	1m	L/2	0	0	0	x
CASE2	1m	L/2	0	0	2	x
CASE3	3m	L/2	0	0	2	x
CASE4	1m	L/4	0	0	2	x

L/2:桁中央位置, L/4 : 桁の1/4

x : 4本→6本の破断

5. 内ケーブル破断に伴う応答解析

5. 1 解析条件

応答解析では、外ケーブル設置した解析モデルに、実際に走行する列車の荷重を想定し、H 荷重の軸重を 106kN とした列車荷重を作用させて解析を行った。解析ケースを表-3 に示す。解析ケースは、健全な状態を想定した CASE0 に加え、G4 桁の内ケーブルの破断本数、破断長さおよび破断位置をパラメータとした。破断長さは 1m および 3m とし、破断位置は支間中央および 1/4 点とした。本検討では G4 桁の挙動に着目することとし、G4 桁の PC 鋼材を、ひび割れが生じない 4 本破断から 6 本破断までの解析を実施した。また、CASE2, CASE3 および CASE4 では、予め G3 桁の内ケーブルを 2 本破断させた状態で、G4 桁の内ケーブルを 4 本破断から 6 本破断までの解析を実施した。

5. 2 ひび割れ発生判定の結果

各ケースの死荷重時（内ケーブル破断時）および列車荷重時のひび割れ判定の結果を表-4 に示す。ひび割れが発生するひずみは、RC 標準に示される曲げひび割れ強度を弾性係数で除した値と定義した。ひび割れ発生の判定は、ひび割れが発生するひずみと応答値との比較により行った。CASE1 は 5 本破断までは列車荷重時でもひび割れが生じていないことが判った。

(1) 破断長さの影響

表-4 に示すように、CASE2 では死荷重時の内ケーブルが 6 本破断した状態で G4 桁にひび割れが生じたが、CASE3 ではひび割れが生じていなかった。死荷重時の内ケーブルが 6 本破断した状態における、G4 桁下縁のひずみ分布を図-7 に示す。CASE2 では、支間中央付近の内ケーブル破断区間において、引張ひずみが曲げひび割れが発生する時のひずみ (39.4 μ) に達しているが、CASE3 ではひび割れ発生ひずみに達していないことが分かる。そこで、図-8 には、内ケーブル破断による両ケースの曲げモーメントの分布を比較し検

表-4 ひび割れ発生判定の結果

解析ケース	G4破断本数(本)	死荷重時 (内ケーブル破断時)				列車荷重時			
		G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4
CASE1	4	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	○	○	○	○	○	○	○	○
	6	○	○	○	○	○	○	○	×
CASE2	4	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	○	○	○	○	○	○	○	×
	6	○	○	○	×	○	○	○	×
CASE3	4	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	○	○	○	○	○	○	○	○
	6	○	○	○	○	○	○	○	×
CASE4	4	○	○	○	○	○	○	○	○
	5	○	○	○	○	○	○	○	○
	6	○	○	○	×	○	○	○	×

○：ひび割れ無，×：ひび割れ有

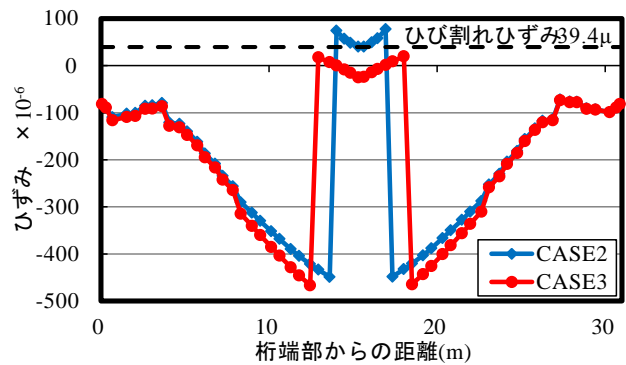
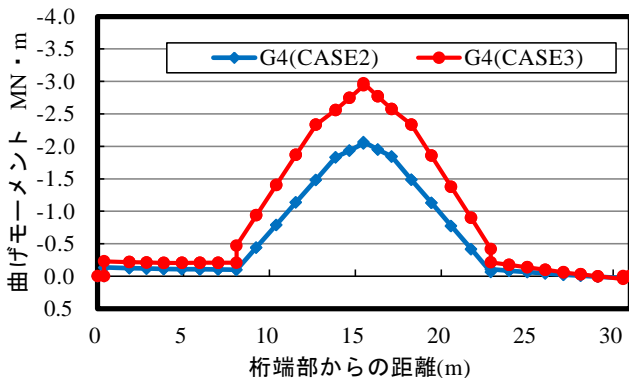
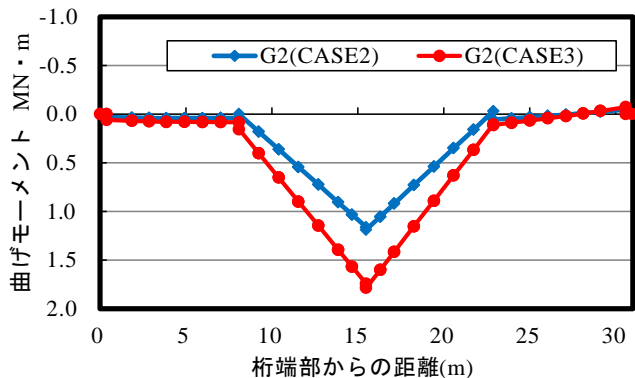


図-7 G4 桁下縁のひずみ分布 (死荷重時)



(a) G4 桁の 2 次曲げモーメント分布



(b) G2 桁の 2 次曲げモーメント分布

図-8 内ケーブル破断による曲げモーメント分布 (6 本破断時)

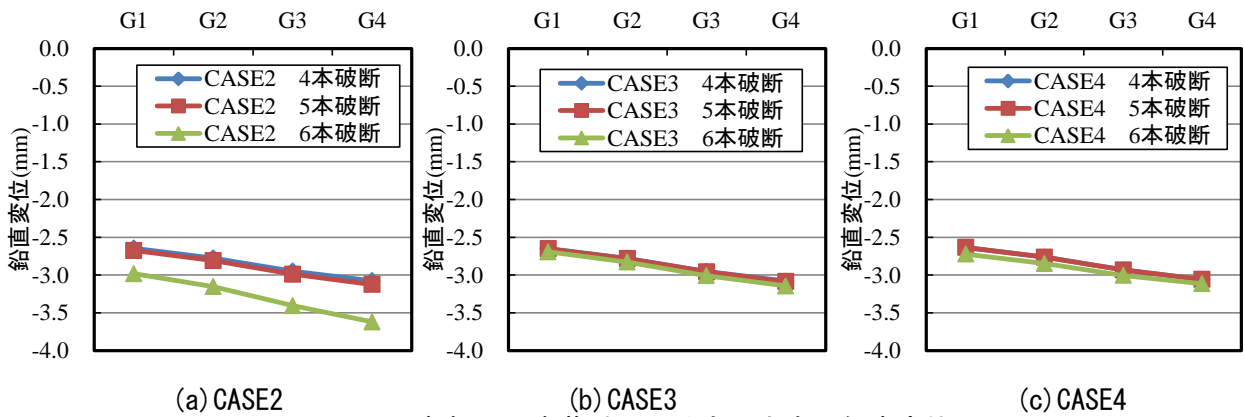


図-9 各桁の列車荷重による支間中央の鉛直変位

討を行った。なお、図には、内ケーブル破断に伴う2次曲げモーメントの分布を示しており、桁下縁が引張となる曲げモーメントを正曲げとした。G4桁においてCASE2とCASE3を比較すると(図-8(a)参照)、CASE3の2次曲げモーメントは、CASE2より支間中央で1MN・m程度負曲げが増加している。その結果、死荷重時に作用する全正曲げモーメントが小さくなり、CASE3では曲げひび割れが発生しなかったと考えられる。一方、G2桁においてCASE2とCASE3を比較すると(図-8(b)参照)、CASE3の2次曲げモーメントは、CASE2より支間中央で0.5MN・m程度正曲げが増加しており、G3桁およびG4桁における内ケーブルの破断の影響を受けていることが確認できた。これらの結果より、内ケーブルの破断に伴う2次力の影響を適切に評価することが重要であると考えられる。

(2) 破断位置の影響

表-4に示すように、CASE2とCASE4の死荷重時に内ケーブルが6本破断した状態でG4桁にひび割れが生じた。CASE2は、列車荷重時に内ケーブルが5本破断した状態でひび割れが生じており、破断位置の影響が認められた。

5.3 桁の変位

CASE2, CASE3およびCASE4の列車荷重による変位を図-9に示す。CASE2の内ケーブル6本破断を除いて、いずれのケースも、G1桁およびG4桁の変位はそれぞれ2.6mmおよび3.2mm程度であり、顕著な差は認められなかった。また、CASE2の6本破断時においてG4桁では3.7mmの変位が生じているが、性能照査に用いた列車荷重のH-12の軸重120kNは、応答解析で用いた列車荷重の軸重の106kNと比較し1.13倍であることを勘案しても、RC標準に示される使用性(乗り心地)の限界値(15.1mm)に対しては十分な余裕がある結果となった。

5.4 外ケーブル張力変化量

(1) 破断長さの影響

内ケーブル破断本数とG4桁の外ケーブルの張力変化の関係を図-10に示す。ここでは、死荷重時と列車荷重時の張力変化量の差分(図中の α)を列車荷重による張力変化量とする。図-10(a)に示すように、5本破断時までの列車荷重による張力変化量は、CASE2およびCASE3ともに約 6.2N/mm^2 であり、同程

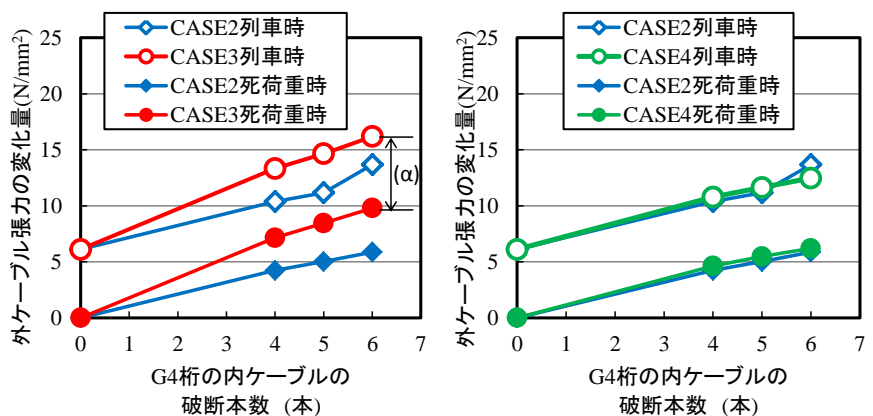


図-10 内ケーブル破断本数と外ケーブル張力変化量の関係

度であった。これは、図-9 (a) および (b) に示すように、列車荷重による変位が各ケースで同程度であったためであると考えられる。一方、CASE2 は、内ケーブルが 5 本破断から 6 本破断となった状態で、列車荷重による張力変化量が 6.2N/mm^2 から 7.8N/mm^2 となっており、列車荷重による張力変化量が増加した。これは、死荷重時にひび割れが生じた影響により、図-9 (a) に示すように、内ケーブルが 6 本破断した状態で G4 桁の列車荷重による変位が 3.7mm に増加したためである。

(2) 破断位置の影響

図-10 (b) に示すように、CASE2 および CASE4 の内ケーブル破断に伴う張力増加の割合はほぼ同程度であり、本解析の範囲では外ケーブルの張力変化に及ぼす破断位置の影響はみとめられない。

(3) 内ケーブル破断の検知

本システムでは、磁歪法によるセンサーを用いる予定である。その張力測定精度の目標値は、応力で 1.4N/mm^2 (ひずみで 7μ) 程度である。本解析の範囲では、仮に PC 桁の内ケーブルが破断していない状態 (CASE0) で本システムを適用できればすべての解析ケースの死荷重時において、内ケーブル破断を検知できる。なぜなら、たとえば図-10 (a) に示す CASE2 では内ケーブルが 4 本破断すると 4.2N/mm^2 の張力変化を生じている。さらに、内ケーブルの詳細な破断状況が不明な場合でも、列車荷重による張力変化量が測定精度以上であれば、内ケーブル破断を検知することができる。たとえば、図-10 (a) に示す CASE2 の 5 本破断から 6 本破断にかけて、列車荷重による張力変化量が約 1.6N/mm^2 増加しているため、内ケーブルの破断が検知できる。

6. まとめ

(1) 外ケーブルの張力モニタリングシステムにおける、PC 桁補強設計の照査手法を提案した。主桁は、ひび割れによる剛性低下を精度良く再現できるファイバーモデルを用いた。ファイバーモデルは、直接的にひずみの応答値を算定できるため、曲げ破壊に関してはひずみを照査指標とした。この場合、従来のように部材係数と構造物係数の影響を分離することは困難であるため、解析値に用いる作用係数 γ_t の算定方法を示した。

(2) 応答解析の結果より、このシステムを適用する PC 桁の補強設計を行う場合、内ケーブルの破断に伴う 2 次力の影響を適切に評価することが重要であると考えられる。

(3) 本解析の範囲では、仮に PC 桁の内ケーブルが破断していない状態で本システムを適用できれば、すべての解析ケースの死荷重時において、内ケーブル破断を検知できる。さらに、内ケーブルの詳細な破断状況が不明な場合でも、列車荷重による張力変化量が測定精度以上であれば、内ケーブル破断を検知することができる。

参考文献

- 1) 村田ら:PCI 形桁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, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集, vol.11, pp.177-184, 2011.10
- 2) 橘田ら: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, 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 コンクリート構造物, 丸善, 2004.4
- 4) Xuehui AN ら, Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.297-316, 1997.5
- 5) TNO DIANA : DIANA Finite Element Analysis User's Manual Release 9.4.3, 2011

謝辞

本論文をまとめるにあたり、「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, 西日本旅客鉄道(株))の委員各位より多数のご助言を賜りました。深く感謝の意を表します。