

第V部門 主ケーブルの破断を考慮した既設高速鉄道 PC 桁の構造信頼性評価

神戸大学大学院工学研究科 学生会員 ○河野航平  
 神戸大学大学院工学研究科 正会員 美濃智広

神戸大学工学部 谷村拓澄  
 神戸大学大学院工学研究科 正会員 森川英典  
 ジェイ・エル西日本コンサルツ(株) 正会員 福田圭祐

表-1 橋梁の諸元・設計条件

項目	諸元	
支間長	30.2m	
曲線半径	∞ (直線)	
軌道構造	スラブ軌道	
設計列車荷重	N・P標準活荷重(軸重190kN)	
設計衝撃係数	0.289	
コンクリート設計基準強度	主桁	40N/mm <sup>2</sup>
	桁間・張出部	35N/mm <sup>2</sup>
	高欄・ダクト壁	24N/mm <sup>2</sup>
PC鋼材	主ケーブル	12-φ12.4, SWPR7A (引張強度 1720N/mm <sup>2</sup> )
	横締め鋼棒	φ24, φ30(SBPR110)

**1. 研究背景・目的:** 既設高速鉄道 PC 桁において、グラウト充てん不良および充てん不良部における PC 鋼材の腐食が確認されており、構造安全性の低下が懸念されている。そこで本研究では、既設高速鉄道の PC 桁を対象に、モンテカルロシミュレーションにより算出した信頼性指標  $\beta$  を用いて主ケーブルの破断を考慮した構造安全性の評価を行った。

**2. 対象橋梁:** 本研究では、建設後 45 年が経過したポストテンション方式単純複線 4 主 PCI 形桁橋を対象に検討を行った。対象橋梁の概要を表-1 に、構造概略図を図-1 に示す。設計列車荷重は、図-2 に示す N 標準活荷重であり、軸重は 190kN である。

**3. 実働列車荷重を考慮した構造安全性解析**

**3.1 断面力の算出方法:** 平面格子モデルに死荷重と衝撃係数を含む列車荷重を載荷し、断面力を算出した。平面格子解析モデルに与えた死荷重の算出条件を表-2 に示す。列車荷重は、設計列車荷重と実働列車荷重の 2 種類を考慮した。実働列車荷重による断面力は、実橋における列車通過時のたわみ計測結果と設計列車荷重によるたわみ解析結果との比較結果<sup>1)</sup>を参考に、設計列車荷重による断面力に列車荷重低減係数  $\gamma_f$  (平均値=0.30, 標準偏差=0.03) を乗じて算出した。なお、列車荷重は鉄道設計標準の照査例に従い等値等分布荷重に換算して、平面格子モデルに載荷した。

**3.2 耐力の計算方法:** PC 桁の曲げ終局耐力算定にあたり、主ケーブルの破断が生じた場合の曲げ耐力への影響を簡易的に評価するために、主ケーブルが 0 本から 4 本まで破断した場合を仮定した。主ケーブルの破断は、主ケーブルの破断本数に応じた主ケーブル断面積を減少させることにより考慮した。また、破断を考慮しない主ケーブルのグラウトは充填されていると仮定した。この仮定により、主ケーブルと PC 桁は完全付着、

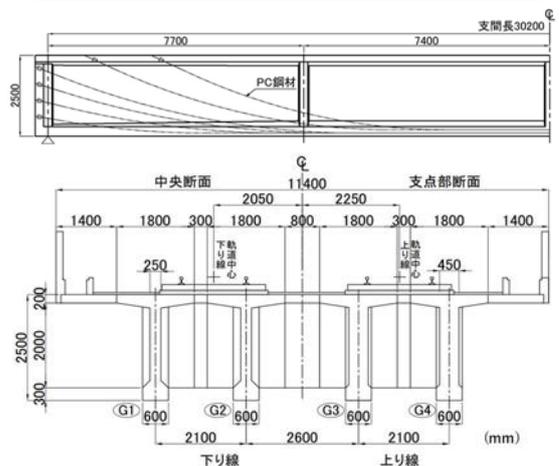


図-1 対象橋梁の構造概略図

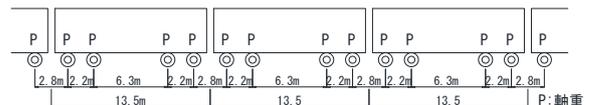


図-2 N 標準活荷重

表-2 死荷重の算出条件

部材	単位重量
主桁, 横桁, 間詰コンクリート 張出スラブ, 路盤コンクリート	24.5kN/m <sup>3</sup>
排水勾配コンクリート	1.15kN/m <sup>2</sup>
軌きょう	7.55kN/m <sup>2</sup>
地覆, 高欄	6.28kN/m
ダクト壁	1.47kN/m
電気ケーブル	1.40kN/m

平面保持の仮定に従うものとし、コンクリートの圧縮応力度は矩形応力分布と仮定した。曲げ終局耐力を評価す

るうえでの不確定要因として、材料強度のばらつき、施工誤差、強度解析上の不確定要因が考えられる。PC 梁の実験より、曲げ終局耐力の計算値に対する実測値の比は、概ね 1.0 以上の範囲でばらつくことが確認されている<sup>2)</sup>。これらを参考に、材料強度のばらつきと強度解析上の不確定要因を考慮するために、曲げ終局耐力の計算値に対する実曲げ終局耐力の比として、平均値 1.07、変動係数 6.8%の正規分布に従うものとして評価した<sup>2)</sup>。なお、曲げ終局耐力の算出に用いるコンクリート圧縮強度および主ケーブルの引張強度は表-1 に示した各設計特性値をそれぞれ用いた。また、施工誤差として、PC 鋼材の配置誤差を正規分布に従うものとして考慮した。設計図における位置を平均値とし、コンクリート標準示方書施工編を参考に、配置誤差の 95%上下限值 ( $\pm 1.645\sigma$ ) を  $\pm 5\text{mm}$  として評価した。

**3.3 安全性評価手法**：本検討においては、式 (1) および式 (2) を用いて信頼性指標  $\beta$  を算出することにより構造安全性を評価した。式 (2) に代入する断面力および耐力の算出条件を表-2 に示す。表-2 に示す条件にてモンテカルロシミュレーションにより信頼性指標  $\beta$  を算出した。

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \dots \dots (1), \quad M = R - S \dots \dots (2)$$

ここで、 $\beta$  : 信頼性指標       $\mu$  : 平均値  
 $\sigma$  : 標準偏差             $M$  : 安全余裕  
 $R$  : 耐力                       $S$  : 断面力

ISO13822 に示される目標信頼性指標として、構造物崩壊の社会的影響が大きい場合は  $\beta=4.3$  が規定されており、本検討では、目標信頼性指標  $\beta=4.3$  と設定して、構造安全性を評価した。モンテカルロシミュレーションの試行回数を 100 から 30000 まで変化させて信頼性指標の収束性を確認し、試行回数 15000 回で収束が確認されたため、モンテカルロシミュレーションの試行回数は 15000 回とした。

**3.4 構造安全性の評価**：設計列車荷重載荷時に発生曲げモーメントが最大である G4 桁の支間中央を評価断面として抽出した。G4 の支間中央における信頼性指標を図-3 に示す。健全時（主ケーブル破断本数 0 本）の場合、設計列車荷重を用いた場合でも、目標信頼性指標  $\beta=4.3$  を大きく上回っており、健全時には大きな

表-3 信頼性指標の評価条件

	評価内容	評価項目	データ変動条件
発生断面力	列車荷重	設計列車荷重	—
		実働列車荷重 (設計列車荷重 $\times$ 列車荷重低減係数 $\gamma_T$ )	列車荷重低減係数 $\gamma_T$ 平均値 $\mu$ : 0.30 標準偏差 $\sigma$ : 0.03 (対数正規分布)
耐力	主ケーブル配置	主桁下縁から主ケーブルまでの距離	平均値 $\mu$ : 設計値 $\pm 1.645\sigma$ : $\pm 5\text{mm}$
	曲げ終局耐力の計算値に対する実曲げ終局耐力のばらつき	曲げ終局耐力の計算値に対する実曲げ終局耐力の比	平均値 $\mu$ : 1.07 変動係数 $V$ : 6.8%
	主ケーブルの破断	主ケーブル破断本数 0~4 本 (破断本数に応じてケーブル断面積の総和を低減)	—

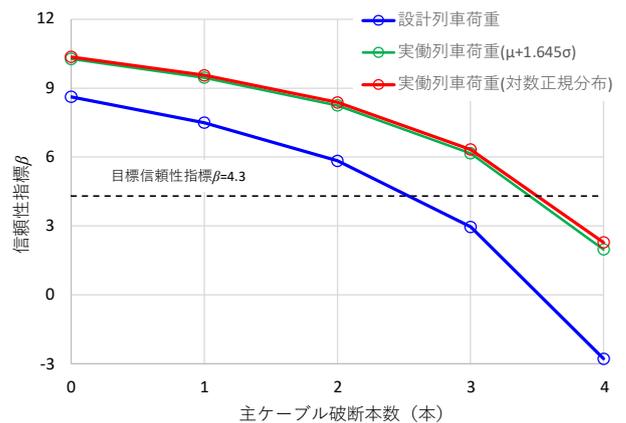


図-3 G4 桁支間中央の信頼性指標

安全余裕を有していることが確認された。信頼性指標  $\beta$  は、設計列車荷重を用いた場合に比べて実働列車荷重を用いた場合の方が大きくなっている。また、目標信頼性指標  $\beta=4.3$  を下回る主ケーブルの破断本数は設計列車荷重を用いた場合は 3 本以上、実働列車荷重を用いた場合の方が 4 本以上となり、実働列車荷重を用いた場合の方が 1 本多くなっている。

**まとめ**：既設高速鉄道 PC 桁を対象に、設計列車荷重・実働列車荷重を考慮した構造安全性解析を行った。その結果、信頼性指標  $\beta$  は、設計列車荷重を用いた場合に比べて、実働列車荷重を用いた場合の方が大きく、目標信頼性指標  $\beta=4.3$  を下回る主ケーブルの破断本数は、設計列車荷重を用いた場合に比べて、実働列車荷重を用いた場合の方が 1 本多くなった。

**参考文献**

- 1) 福田圭祐, 栗林賢一, 濱田譲, 森川英典：高速鉄道の既設 PC 桁のたわみ計測による列車荷重に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, pp. 895-900, 2021
- 2) 土木学会：構造物の安全性・信頼性, pp.202, 1976