

グラウト充てん不足部の主ケーブルの腐食を考慮した既設高速鉄道 PC 桁の構造安全性評価

ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 正会員 ○福田 圭祐
 神戸大学 谷村 拓澄

神戸大学大学院 学生会員 河野 航平
 神戸大学大学院 正会員 森川 英典

1. はじめに: 既設高速鉄道 PC 桁において、PC グラウトの充てん不足部における主ケーブルの腐食が確認されている¹⁾。本稿では、グラウト充てん不足部を有する既設高速鉄道 PC 桁を対象に、グラウト充てん不足部の主ケーブルの腐食劣化および現況の実働列車荷重を考慮したモンテカルロシミュレーションによって算出した信頼性指標に基づき、構造安全性を評価した。検討対象は、ポストテンション方式の単純複線 4 主 PCI 形桁橋とした。対象橋りょうの諸元と設計条件を表-1 に、構造概略図を図-1 に示す。対象橋梁の設計列車荷重の軸配置は、図-2 に示す N 標準活荷重であり、軸重は 190kN である。

2. 断面力の算出: 平面格子モデルに死荷重と列車荷重（衝撃係数を含む）を載荷し、断面力を算出した。列車荷重は、設計列車荷重と現況の実働列車荷重の二種類を考慮することとした。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²⁾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 γ_f (平均値=0.30, 標準偏差=0.03, 対数正規分布) を乗じて算出した。

3. PC 鋼材の腐食劣化モデルと耐荷力の算定方法: 既設高速鉄道 PC 桁の主ケーブルに対する削孔目視調査結果¹⁾を参考に、主ケーブルの曲げ上げ区間（支点から L/4 点付近）にて、全主ケーブルでグラウト充てん不足が生じていると仮定した。また、削孔目視調査における主ケーブルの腐食状態を表-2 に示す腐食度に区分している¹⁾。本検討では、主ケーブルの腐食状況が表-2 に示した各腐食度にあるとし、全主ケーブルの腐食度は全て同じと仮定した。なお、腐食度 0 は腐食による影響はなく、主ケーブルは健全とした。

近藤³⁾による PC 鋼より線の腐食実験結果を参考に、表-2 に示した各腐食度の PC 鋼より線の側線・芯線の残存直径比を表-3 に示す。表-3 に示した残存直径比を用いて、モンテカルロシミュレーションにより、各腐食度における PC 鋼より線の質量減少率を表-4 に示すように設定した。また、PC 鋼より線の質量減少率と最大荷重の関係は、近藤³⁾による腐食 PC 鋼より線に対する引張試験結果を参考に、図-3 に示すように質量減少率の増加に応じて線形関係で最大荷重が低下するとした。PC 桁の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、

表-1 対象橋梁の諸元と設計条件

| 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 ² |
| | 桁間・張出部 | 35N/mm ² |
| | 高欄・ダクト壁 | 24N/mm ² |
| PC鋼材 | 主ケーブル | 12-φ 12.4, SWPR7A(6本/主桁) (引張強度 1720N/mm ²) |
| | 横締め鋼棒 | φ 24, φ 30(SBPR110) |

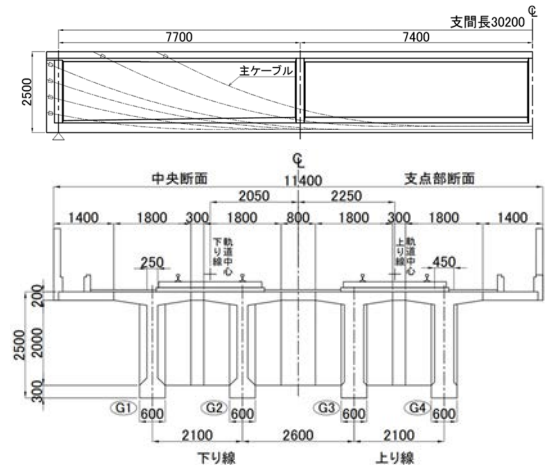


図-1 対象橋梁の構造概略図

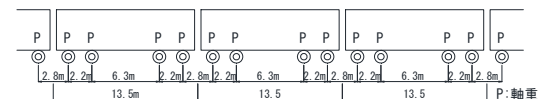


図-2 設計列車荷重 (N 標準活荷重)

表-2 主ケーブルの腐食度基準¹⁾に基づき作成

| 腐食度 | 概要 |
|-----|--|
| 0 | ・表面に錆がほとんど発生していない状況 もしくは点錆程度の錆が生じている状況 |
| I | ・表面全体に錆がほとんど生じているものの、層状の錆は発生しておらず、かつ表面に凹凸が確認されないもの |
| II | ・表面に凹凸が確認できるもの ・層状の腐食生成物が存在するもの |
| III | ・表面に凹凸が確認できるもの ・層状の腐食生成物が表面全体に存在するもの |

表-3 PC 鋼より線の残存直径比³⁾に基づき作成

| 腐食度 | 残存直径比 | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| | 側線 | | 側線 | |
| | 平均値 | 標準偏差 | 平均値 | 標準偏差 |
| 0 | 1.000 | — | 1.000 | — |
| I | 0.995 | 0.001 | 1.000 | 0.000 |
| II | 0.980 | 0.012 | 0.990 | 0.001 |
| III | 0.933 | 0.028 | 0.985 | 0.002 |

キーワード 高速鉄道, PC 桁, PC 鋼より線, 腐食, 信頼性指標, モンテカルロシミュレーション

連絡先 〒532-0011 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) TEL 06-6303-1452

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⁴⁾．これらを参考に，曲げ耐力の計算値に対する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曲げ耐力補正係数 γ_r を，平均値 1.07⁴⁾，変動係数 6.8%⁴⁾として評価した．また，施工誤差として，主ケーブルの配置誤差を考慮するために，設計値を平均値とし，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 $\pm 5\text{mm}$ とした．また，グラウト充填てん不足による曲げ耐荷性能の低下を考慮するために，コンクリート標準示方書 設計編を参考に，グラウトが充填されており，主ケーブルと PC 桁が完全付着と仮定し，算出した曲げ耐力を 30%減じた．

4. 信頼性指標による構造安全性評価：本検討においては，式(1)および式(2)を用いて信頼性指標 β を算出することにより構造安全性を評価した．

$$\beta = \mu_M / \sigma_M \quad (1) \quad M = R - S \quad (2)$$

ここで， β ：信頼性指標 μ ：平均値 σ ：標準偏差

M ：安全余裕 R ：耐力 S ：断面力

式(2)に代入する断面力および耐力の算出条件を表-4 に示す．

表-4 に示した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 β を算出した．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，構造安全性を評価した．

全主桁の中で最も発生曲げモーメントが大きかった G4 桁の L/4 点および L/8 点における主ケーブルの腐食度と信頼性指標 β の関係を図-4 に示す．主ケーブルの腐食度 0, I の場合，L/4 点および L/8 点ともに目標信頼性指標 $\beta=4.3$ を大きく上回っており，大きな安全余裕を有している．腐食度 II になると，信頼性指標 β が低下し始めるものの，腐食度 III の場合でも L/4 点および L/8 点ともに目標信頼性指標 $\beta=4.3$ を上回っている．また，実働列車荷重を用いた場合の信頼性指標 β は，設計列車荷重を用いた場合に比べて，大きくなっている．

5. まとめ：グラウト充てん不足部の主ケーブルの腐食劣化および現況の実働列車荷重を考慮して，既設高速鉄道 PC 桁の信頼性指標に基づく構造安全性評価を行った．その結果，主ケーブルが腐食度 III になった場合でも，L/4 点および L/8 点ともに目標信頼性指標を上回った．

参考文献：1)湯浅康史，近藤拓也，松田好史：開業 40 周年を迎えた山陽新幹線 PC 桁の維持管理，プレストレスコンクリート，Vol.58，No.1，pp.11-16，2016.1，2)福田圭祐，栗林賢一，濱田謙，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.2，2021.7，3)近藤拓也，ポストテンション方式 PC 鉄道構造物の腐食に着目した維持管理方法に関する研究，京都大学学位論文，2012 4)土木学会：構造物の安全性・信頼性，1976

表-4 PC 鋼より線の質量減少率

| 腐食度 | 質量減少率(%) | |
|-----|----------|------|
| | 平均値 | 標準偏差 |
| 0 | 0.00 | 0.00 |
| I | 0.78 | 0.07 |
| II | 4.20 | 0.81 |
| III | 11.3 | 1.87 |

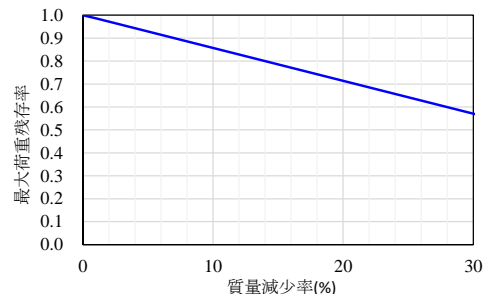


図-3 質量減少率と最大荷重残存率の関係

表-4 信頼性評価条件

| 評価内容 | 評価項目 | データ変動条件 |
|------------------|--|--|
| 応答値 (断面力) | 設計列車荷重(N標準活荷重) | — |
| | 実働列車荷重 (設計列車荷重による断面力 ×列車荷重低減係数 γ_r) | 列車荷重低減係数 γ_r 平均値 μ ：0.30 標準偏差 σ ：0.03 (対数正規分布) |
| 限界値 (耐荷力) | 主ケーブルの腐食 | 主ケーブルの腐食度 I～III に応じて質量減少率のばらつきを考慮 表-4 参照 |
| | 主ケーブルの力学的性能低下 | 図-3に示す質量減少率と最大荷重残存率の関係より評価 — |
| | グラウトの充填不足 | グラウトが充填されていないアンボンドPC桁の曲げ耐荷性能の低下を考慮 — |
| | 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 μ ：設計値 $\pm 1.645\sigma$ ： $\pm 5\text{mm}$ |
| 材料強度・強度解析上の不確定要因 | 曲げ耐力計算値に対する材料強度のばらつきと強度解析上の不確定要因を曲げ耐力補正係数 γ_r により考慮 曲げ耐力補正係数 γ_r 平均値 μ ：1.07 変動係数 V ：6.8% | |

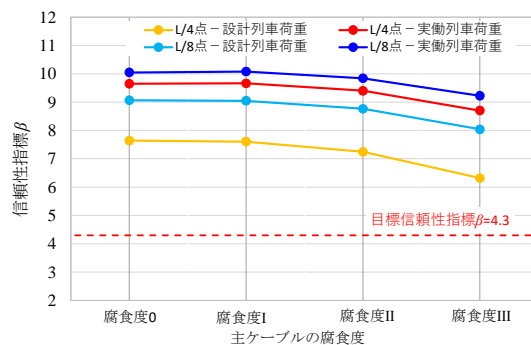


図-4 主ケーブルの腐食度と信頼性指標の関係