

塩害損傷を受けた PC 橋の構造性能評価手法の提案

株式会社北未来技研 ○正 員 朝倉啓仁 (Keiji Asakura)

寺澤岳真 (Takema Terasawa)

1. はじめに

構造性能を評価した現役の PC 橋は、飛来塩分環境下にあり、調査時点で 62 年が経過する道路橋であり、便宜的に S 橋と称する。塩害により生じた剥離・鉄筋露出等の損傷に対して、部分的な断面修復を過年度に行った個所に、ひび割れ等の再劣化が生じていた。はつりによる鋼材腐食調査を行った結果、主桁下フランジに配置の PC ケーブル (φ38mm シース内 12φ5mm) 内に PC 鋼線素線数本の腐食による破断が確認された。

本来、鋼材は腐食しない設計思想であり、供用中に鋼材腐食により PC 鋼材の破断が生じた場合、構造性能を把握する手法が確立していない。

このため、PC 鋼材破断率を導入した構造性能の評価手法を提案すると共に、PC 鋼材破断率を実橋載荷試験により特定することで、S 橋の構造性能の現状を評価した。以下に、その概要を紹介する。

2. PC 鋼材破断率を導入し構造性能を評価

2.1 曲げ作用に対する設計

一般に PC 橋の断面形状は、せん断破壊や圧壊に対して PC 鋼材の降伏が先行する。塩害により PC 鋼材が破断してもこの破壊形態は維持されるため、曲げ作用に対する設計に着目した。

構造性能を低下させる塩害損傷を代表して、PC 鋼材破断率 hr (%) を導入する。ここで、PC 鋼材破断率は桁毎に破断ケーブル数をケーブル総数で除したものとする。

コンクリートの応力度照査は式(1)の通りであり、有効プレストレス Pe 、偏心量 ep は PC 鋼材破断率 hr を用いて式(2)(3)の通りとなる。

$$M/Z + Pe/Ac + Pe \cdot ep/Z \leq \sigma_{ca} \quad \dots (1)$$

ここに、

M/Z : 荷重による応力度 (N/mm²)

M : 荷重による曲げモーメント (N・mm)

Z : 主桁断面係数 (mm³)

Pe : 有効プレストレス (N)

$$Pe = Pe \times (1 - hr/100) \quad \dots (2)$$

hr : PC 鋼材破断率 (%)

ep : 主桁中立軸と PC 鋼材図心の偏心量 (mm)

$$ep = ep - Hp/2 \times hr/100 \quad \dots (3)$$

Hp : 配置 PC 鋼材の上下縁間距離 (mm)

Ac : 主桁断面積 (mm²)

σ_{ca} : コンクリートの許容曲げ圧縮応力度 (N/mm²)

次に、PC 鋼材の応力度照査は式(4)の通りであり、PC 鋼材の有効引張応力度 σ_{pe} は式(5)となる。

$$n \times (\Sigma \sigma_{dg} + \sigma_{lg}) + \sigma_{pe} \leq \sigma_{pa} \quad \dots (4)$$

ここに、

n : ヤング係数比 (ー) ($n = E_p/E_c = 6.45$)

σ_{pe} : PC 鋼材の有効引張応力度 (N/mm²)

$$\sigma_{pe} = \sigma_{pe} / (1 - hr/100) \quad \dots (5)$$

$\Sigma \sigma_{dg}$: 考えている PC 鋼材図心位置における主桁自重以外の死荷重曲げ応力度 (N/mm²)

σ_{lg} : 考えている PC 鋼材図心位置における活荷重による曲げ応力度 (N/mm²)

σ_{pa} : PC 鋼材の許容引張応力度 (設計荷重時)

$$\sigma_{pa} = 0.6 \sigma_{pu} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad \sigma_{pu} : \text{引張強度}$$

2.2 構造性能の低下限界の提案

(1) 性能低下限界と PC 鋼材破断率との関係

低下限界 1 : PC 鋼材の腐食発生，例えば鋼材位置の塩化物イオン濃度が発錆限界となる時点を低下限界 1 とし、PC 鋼材破断率 $hr_1 = 0\%$ とする。

低下限界 2 : PC 鋼材破断率が上昇し、活荷重作用時に桁下縁コンクリートが許容曲げ引張応力度に達する際の PC 鋼材破断率 hr_2 を低下限界 2 とする。

低下限界 3 : PC 鋼材破断率が上昇し、活荷重作用時に桁下縁 PC 鋼材が許容引張応力度 (設計荷重時、 $\sigma_{pa} = 0.6 \sigma_{pu}$) に達する際の PC 鋼材破断率 hr_3 を低下限界 3 とする。

低下限界 4 : PC 鋼材破断率が上昇し、活荷重作用時に桁下縁コンクリートに曲げひび割れが発生 ($\sigma_{bt} = -0.23 \times \sigma_{ck}^{2/3}$) する際の PC 鋼材破断率 hr_4 を低下限界 4 とする。桁の使用状態では曲げひび割れの発生を許容していないことから使用性低下の上限、安全性低下の下限とする。

キーワード 塩害, PC 橋, PC 鋼材破断率, 構造性能関係図,

実橋載荷試験

連絡先 〒060-0004 北海道札幌市中央区北 4 条西 16 丁目 1-

1 テルエル札幌第 1 ビル (株)北未来技研 TEL011-676-7381

低下限界 5 : PC 鋼材破断率が上昇し、活荷重作用時に桁下縁 PC 鋼材が降伏 ($\sigma_{py1}=0.84 \sigma_{pu}$) する際の PC 鋼材破断率 hr_5 を低下限界 5 とする。PC 鋼材の降伏により桁は弾性挙動から弾塑性挙動へ移行すると考えられることから、安全性低下領域の中で供用制限の開始とする。

低下限界 6 : PC 鋼材破断率が上昇し、活荷重作用時に桁下縁 PC 鋼材が塑性域 ($\sigma_{py2}=0.93 \sigma_{pu}$) に入る際の PC 鋼材破断率 hr_6 を低下限界 6 とする。

低下限界 7 : PC 鋼材破断率が上昇し、死荷重時に桁下縁コンクリートにひび割れが発生 (σ_{bt}) する際の PC 鋼材破断率 hr_7 を低下限界 7 とする。この段階では、活荷重載荷時に発生したひび割れが、除荷後の死荷重時にも残留する。

(2) S 橋の低下限界毎の PC 鋼材破断率の計算

PC 鋼材破断率が高い G2 桁に着目して、低下限界に対応した PC 鋼材破断率を表-1 に示す。

表-1 低下限界の PC 鋼材破断率 (S 橋 G2 桁)

低下限界	低下限界の詳細	PC 鋼材破断率 $hr(\%)$
1	鋼材位置 $Clim=1.2kg/m^3$ 超過	$hr_1= 0.0$
2	$\sigma_{ca}'=-1.5N/mm^2$ (for $\sigma_{ck}=40N/mm^2$) (許容値は現行設計値とした)	$hr_2=11.9$
3	$\sigma_{pa}=990N/mm^2$ for SWPR1A	$hr_3=12.3$
4	$\sigma_{bt}=-2.9N/mm^2$ for $\sigma_{ck}=45N/mm^2$	$hr_4=18.6$
5	$\sigma_{py1}=1600\times0.84=1344N/m^2$	$hr_5=39.2$
6	$\sigma_{py2}=1600\times0.93=1488N/m^2$	$hr_6=43.0$
7	死荷重時 $\sigma_{bt}=-2.9N/mm^2$	$hr_7=51.6$

2.3 構造性能関係図により構造性能を可視化

(1) 構造性能低下率の提案

PC 鋼材破断率を横軸にとり、構造性能低下率を表-2 に示す通り定義し、縦軸とした。これは、構造性能関係の可視化を、実橋載荷による破壊試験の荷重 P (縦軸) -たわみ δ (横軸) のトリリニア関係¹⁾ を模して定めたものである。

(2) PC 鋼材破断率と構造性能低下率の計算

表-1 の PC 鋼材破断率から求めた構造性能低下率を、表-2 に構造性能関係として示す。

3. S 橋の構造性能の評価

3.1 実橋載荷試験による PC 鋼材破断率の推定

設計荷重 (L-20) による発生曲げモーメントの 96% を再現した荷重を載荷しても、曲げひび割れが発生しなかった。このため、PC 鋼材破断率は設

表-2 構造性能関係 (S 橋 G2 桁)

構造性能	低下限界	PC 鋼材破断率 $hr(\%)$	構造性能低下率 $hri/hr_5\times(1+hr_5/100)(\%)$
使用性	1	$hr_1= 0.0$	$hr_1/hr_5\times(1+hr_5/100)= 0$
低下程度	2	$hr_2=11.9$	$hr_2/hr_5\times(1+hr_5/100)=42$
	3	$hr_3=12.3$	$hr_3/hr_5\times(1+hr_5/100)=44$
安全性	4	$hr_4=18.6$	$hr_4/hr_5\times(1+hr_5/100)=66$
	$hr(\text{載荷試験})=18.7$		比例配分=66
	5	$hr_5=39.2$	max 100
	6	$hr_6=43.0$	max 100
低下程度	7	$hr_7=51.6$	max 100

計荷重時に曲げひび割れが発生するものと仮定し、PC 鋼材破断率は 18.7%²⁾ と推定し、構造性能低下率は比例配分により 66% とした。

3.2 構造性能の評価と対策の要否

表-2 の構造性能関係を図-1 の関係図に示す。載荷試験により求めた破断率 18.7% は、安全性の低下領域に入った段階にあり、桁は弾性挙動範囲内である。PC 鋼材破断の進行が予測されたため、低下限界 5 までの時間を把握するため PC 鋼材破断率のモニタリングが必要な段階である。(以上)

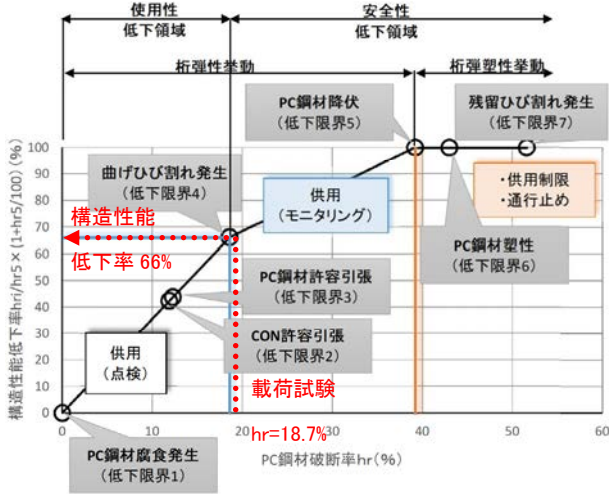


図-1 構造性能関係図 (S 橋 G2 桁)

参考文献

1) 徳田, 塩野, 睦好, 横田: 破断した PC 鋼材を有する PC 梁の曲げ性状に関する研究,土木学会第 71 回年次学術講演会,2016.9
2) 朝倉, 寺澤: 塩害により PC 鋼材の一部が破断した PCT 桁の構造性能評価の紹介,令和 2 年度土木学会北海道支部 年次技術研究発表会,2021.1