

グラウト未充てん区間を有するPC桁の性能項目の照査に関する感度分析

(公財)鉄道総合技術研究所 ○堀 慎一
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 博士(学術) 渡辺 健
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 博士(工学) 谷村 幸裕

1. はじめに

ポストテンション式PC桁(以下、PC桁)は、その特徴から河川や道路との交差部などのスパンの長い橋梁に多く用いられており、鉄道では10,000連以上が建設されている。供用開始から長期間経過したPC桁の一部は、主にグラウトの品質および施工不良に起因する充てん不良が生じている場合がある¹⁾。グラウト充てん不良は、将来的にPC鋼材が腐食、破断する可能性があり、破断した事例も報告されている。このようなPC桁の健全度を判定する場合、過去の経験や変状事例に基づき、目視により行われている場合が多いが、将来の劣化予測に対して健全度を判定する場合には、より定量的な評価が求められている。そこで本研究では、グラウト未充てん区間を有する既設鉄道PC桁を対象に、PC桁の劣化状況が、健全度の判定に用いる性能項目の照査結果におよぼす影響を明らかにすることを目的に、鉄道構造物等維持管理標準²⁾に基づいた試算を行い、照査結果に関する感度分析を行った。

2. 検討概要

2.1 対象構造物

本研究で対象とした構造物は、既設鉄道構造物にみられる単線用PC単純2主T形桁の主桁とした。対象構造物の断面図を図-1に、側面概略図を図-2に示す。桁長(L)は22.96m、支間長(l)は22.20m、軌道構造はスラブ軌道、線路線形は直線である。使用材料の諸元を表-1に示す。試算のパラメータは、グラウトの未充てん区間(図-3)とPC鋼材破断本数とし、表-2に示すとおり、未充てん区間ケース(区間①②③)ごとに、PC鋼材を上からおよび下から1本ずつ破断させた条件で計算を行った。

2.2 検討の方法

性能項目の照査に用いる設計基準は、現行の維持管理および設計の基準である「鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編 コンクリート構造物)平成19年1月」(以下、維持管理標準)および「鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)平成16年4月」³⁾(以下、コンクリート標準)とした。

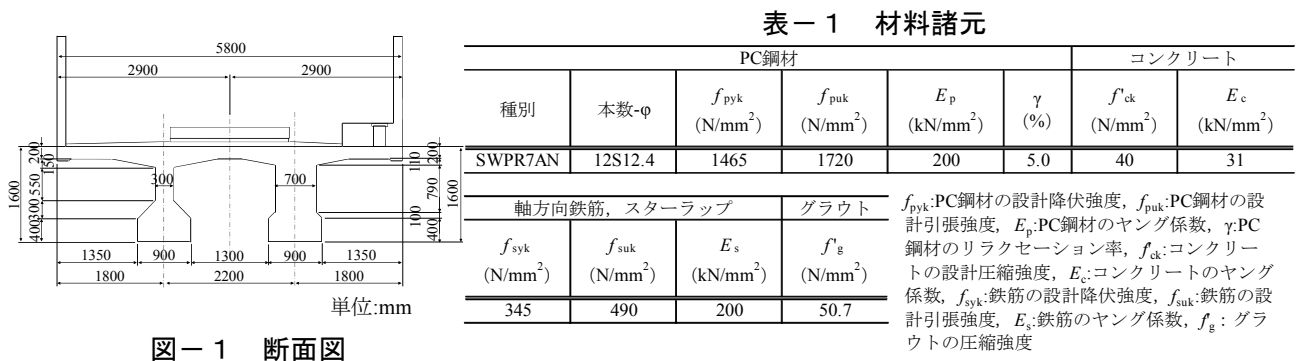


図-1 断面図

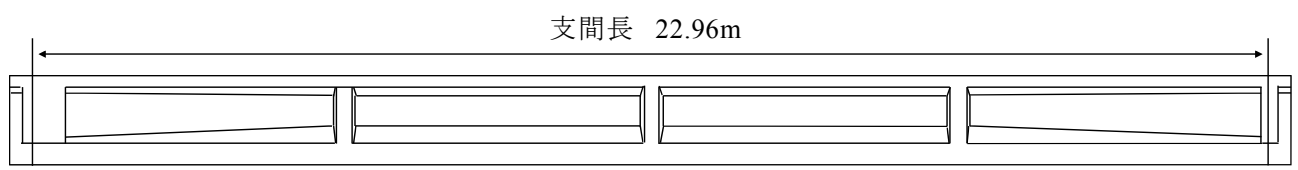


図-2 側面概略図

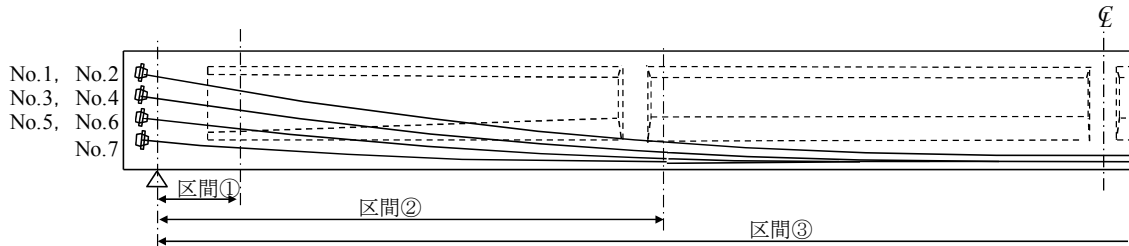


図-3 グラウト未充てん区間

表-2 検討ケース

検討ケース	PC鋼材破断条件
破断無し	全て健全
端部未充てん 【区間①】	No.1から(上から) No.7から(下から)
曲げ上げ部未充てん 【区間②】	No.1から(上から) No.7から(下から)
全区間未充てん 【区間③】	No.1から(上から) No.7から(下から)

1本~7本
まで破断

表-6 有効プレストレス

PC主鋼材 No.	有効プレストレス $\sigma_{pe}(N/mm^2)$	備考
1	756.3	破断無し, スパン中央 の値を示す
2	756.3	
3	749.2	
4	749.2	
5	743.1	
6	743.1	
7	739.8	

表-3 要求性能と照査指標

要求性能	性能項目	照査指標	
		設計応答値	設計限界値
安全性	破壊	設計曲げモーメント M_d 設計せん断力 V_d	設計曲げ耐力 M_{ud} 設計せん断耐力 V_{yd}

表-4 本研究では省略した
要求性能と性能項目

要求性能	性能項目	照査指標
安全性	疲労破壊	応力度
	走行安全性	変位・変形
	公衆安全性	中性化深さ, 塩化物イオン濃度
使用性	乗り心地	変位・変形
	外観	ひび割れ, 応力度
復旧性	損傷	力

表-5 安全係数

要求性能	性能項目	作用係数 γ_f	構造解析係数 γ_a	材料係数 γ_m		部材係数 γ_b	構造物係数 γ_i
				γ_c	γ_s		
安全性	破壊	1.0~1.2	1.0	1.3	1.0	1.1 1.3 ^{※1}	1.2

※1: コンクリートの強度により定まるせん断耐力に適用する。

本研究における要求性能と性能項目および照査指標を表-3に示す。また、対象構造物はPC構造として設計されているため、コンクリートの下縁応力度も確認することとした。なお、一般には表-4に示す要求性能も設定するが、本研究では省略した。走行安全性、乗り心地、公衆安全性は実構造物では日常管理の中で健全度判定することが多いためである。ひび割れは応力度の照査により発生の有無を確認することとして省略した。疲労破壊については、照査が厳しくなるのはひび割れが発生して以降と考えられるため、変動応力度が大きい場合は、維持管理標準に示す累積損傷度等の照査指標により検討する必要がある。復旧性に関しては、PC鋼材降伏時の曲げモーメントを損傷レベル1の限界値³⁾として照査を実施するが、本研究では省略した。本研究で用いた安全係数を表-5に示す。

2. 3 設計作用

設計作用は永久作用(死荷重)および変動作用(列車荷重, 衝撃荷重, 車両横荷重, プレストレス力)とした。プレストレス力は、対象構造物の建設当時の導入緊張力を仮定することにより算出した(表-6)。また、破断が部分的である区間①および区間②の残存する有効プレストレス(以下、残存プレストレス)は、「3. 2」に示す、残存プレストレスの検討によって決定した。

3. 検討結果

3. 1 設計応答値

設計応答値の算定は主梁, 床スラブおよび横桁からなる格子構造とした格子計算により行った。なお、断面力はPC主鋼材の破断によって変化しないものと仮定した。

3. 2 残存プレストレス

区間①および区間②の残存プレストレスは、グラウト未充てん区間と充てん区間の境界から充てん区間側に、式(1)により算出するプレストレス減少区間長で、直線的に変化するものとした。式(1)に示すPC主鋼材とグラウトの付着強度は、既往の研究結果⁴⁾から算出した。

$$x_b = P / (\tau \cdot L) \quad (1)$$

ここに、 x_b : プレストレス減少区間(mm), P : PC鋼材の引張力(N)(安全性の照査時 : $0.93f_{pu} \times$ PC主鋼材の断面積, 使用性の照査・応力度算定時 : $\sigma_{pe} \times$ PC主鋼材の断面積), f_{pu} : PC主鋼材の引張強度 (N/mm^2), σ_{pe} : PC主鋼材の有効プレストレス (N/mm^2), τ : PC主鋼材とグラウトの付着強度 (N/mm^2)(複数より線の場合 : $\tau = 0.30\sqrt{f_g} / \gamma_c$), f_g : グラウトの圧縮強度 (N/mm^2), γ_c : 材料係数 (=1.3), L : PC鋼材の周長(mm), とする。

3. 3 安全性の照査

安全性の照査に用いる曲げ耐力およびせん断耐力の算定は、既往の研究の手法⁵⁾により行った。各検討ケースの、照査が最も厳しい断面(以下、決定断面)の曲げ耐力(M_{ud})と設計

曲げモーメント(M_d)の算定結果を図-4~6に、せん断耐力(V_{ud})と設計せん断力(V_d)の算定結果を図-7に示す。曲げ耐力の決定断面は区間①②はグラウト未充てん区間と充てん区間の境界、区間③はスパン中央となった。せん断耐力の決定断面はすべて、支点から断面高さ h の1/2の位置となった。照査結果について、曲げ耐力は下(No.7)から破断した場合、区間①では6本、区間②③では4本破断により、上(No.1)から破断した場合、区間①では7本、区間②では5本、区間③では4本破断により照査を満足しなくなった。せん断耐力は、下からでは5本、上からでは4本破断により照査を満足しなくなった。

3. 4 下縁応力度の算定結果

PC鋼材が下から破断した場合の、曲げ耐力の決定断面におけるPC桁の下縁のコンクリート応力度を図-8~10に示す。図に示す限界値は、コンクリート標準に示す応力度の制限値である。永久作用時の引張応力は、区間①②は4本、区間③は3本破断によって発生する。また、変動作用時の応力度が曲げひび割れ強度に達するのは、区間①は5本、区間②は3本、区間③は2本破断時となった。

3. 5 グラウト未充てん区間の違いの影響

照査結果の一覧を表-7に示す。区間①②③ともに、変動作用時の応力度が曲げひび割れ強度に達したのちに、曲げ耐力の照査を満足しなくなった。また、変動作用によるひび割れは、区間②③では永久作用によるひび割れに先立って発生した。この結果から、区間②③のような劣化状況では安全性の照査を満足しなくなる段階に先立って、変動作用によるひび割れが発生すると考えられる。つまり、曲げひび割れの検知が、PC桁の劣化状況を比較的早期に判断できる指標になる可能性がある。また、区間①ではせん断耐力が曲げ耐力よりも先に照査を満足しなくなったが、区間②③では、下からでは曲げ耐力が先に、上からでは曲げとせん断は同じ破断本数で照査を満足しなくなった。

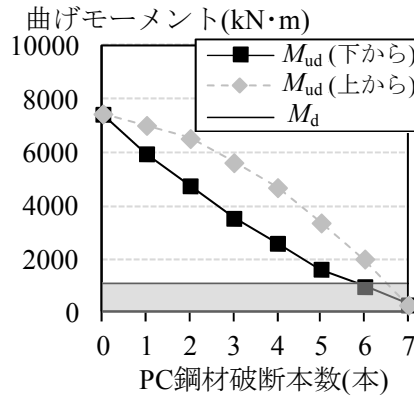


図-4 区間①のPC鋼材破断本数と曲げ耐力

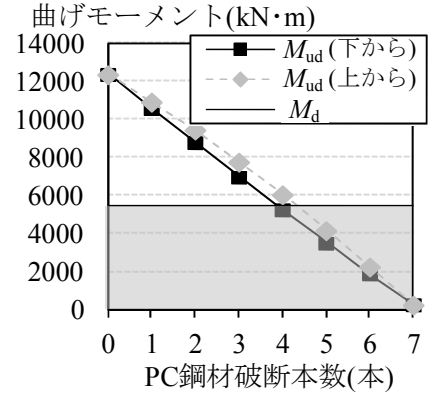


図-5 区間②のPC鋼材破断本数と曲げ耐力

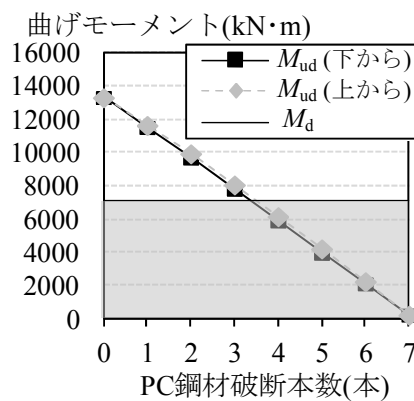


図-6 区間③のPC鋼材破断本数と曲げ耐力

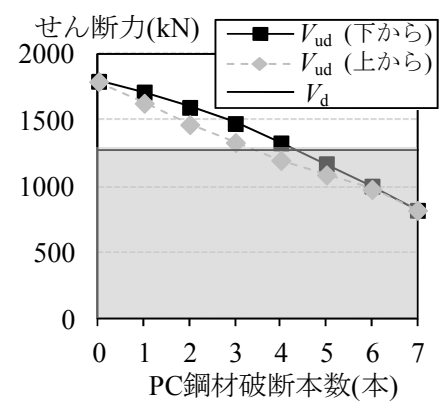


図-7 PC鋼材破断本数とせん断耐力

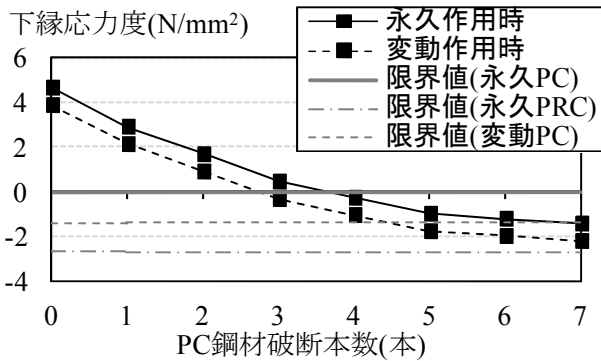


図-8 区間①のPC鋼材破断本数と下縁応力度

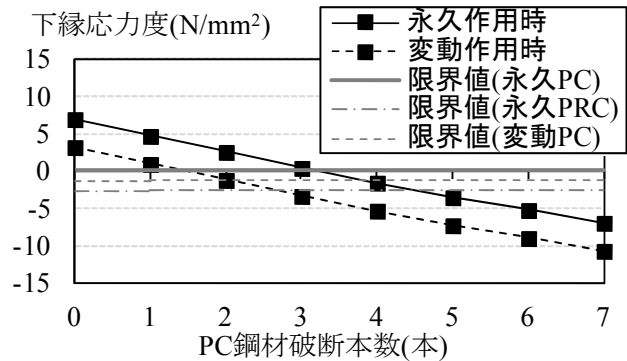


図-9 区間②のPC鋼材破断本数と下縁応力度

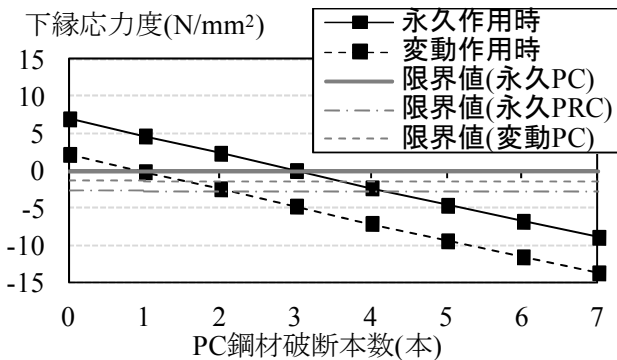


図-10 区間③のPC鋼材破断本数と下縁応力度

表-7 照査結果一覧

	PC鋼材 破断本数	応力度		安全性(破壊)			
		下から		曲げ		せん断	
		永久 (PC)	変動 (PC)	下から	上から	下から	上から
破断無し	0	○	○	○	○	○	○
	1	○	○	○	○	○	○
	2	○	○	○	○	○	○
	3	○	○	○	○	○	○
	4	×	○	○	○	○	×
	5	×	×	○	○	×	×
	6	×	×	×	○	×	×
端部 未充てん 【区間①】	7	×	×	×	×	×	×
	1	○	○	○	○	○	○
	2	○	○	○	○	○	○
	3	○	×	○	○	○	○
	4	×	×	×	×	○	×
	5	×	×	×	×	×	×
	6	×	×	×	×	×	×
曲げ上げ部 未充てん 【区間②】	7	×	×	×	×	×	×
	1	○	○	○	○	○	○
	2	○	×	○	○	○	○
	3	×	×	○	○	○	○
	4	×	×	×	×	○	×
	5	×	×	×	×	×	×
	6	×	×	×	×	×	×
全区間 未充てん 【区間③】	7	×	×	×	×	×	×

4 まとめ

本研究で用いた既設鉄道PC桁において、PC桁の劣化状況をパラメータとして維持管理標準に基づいた試算を行い、性能項目の照査に関する感度分析を行った結果、以下のことを明らかとした。

- 1) グラウトの未充てん区間が一部の場合、PC鋼材の破断の進行による計算上の曲げひび割れ発生位置および曲げ破壊断面は未充てん区間と充てん区間の境界となった。ただし、PC鋼材とグラウトの付着強度によって異なる場合がある。
- 2) PC鋼材が断面内で高さ方向に分散して配置されている場合、破断するPC鋼材の高さによって曲げ耐力とせん断耐力の照査結果が異なる。
- 3) 全区間や曲げ上げ部が未充てんの場合、7本中4本のPC鋼材の破断により曲げ耐力の照査を満足しなくなった。また、端部の破断でも、7本中6本の破断により曲げ耐力の照査を満足しなくなった。
- 4) PC鋼材の破断が進展すると、変動荷重により下縁応力度が曲げひび割れ発生応力度に達したのちに、曲げ耐力の照査を満足しなくなったため、曲げひび割れの検知が、比較的早期にPC桁の劣化状況を判断する指標になる可能性がある。

なお、本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 石橋忠良：PC鉄道構造物の劣化事例と対策，プレストレストコンクリート，Vol.45，No.1，pp.72-75，2003.1
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，2007.1
- 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），2004.4
- 4) 田所敏弥，谷村幸裕，渡辺 健，徳永光宏：グラウトとPC鋼材の付着特性に着目した鋼材破断後のプレストレスの評価，第19回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，pp.209-212，2010.10
- 5) 前田友章，轟俊太朗，谷村幸裕，岡山準也：PC鋼材破断後のPC梁の耐荷特性，第19回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，pp.43-48，2010.10