

PC 鋼材の破断に関する調査事例

Investigation example on fracture PC steel

交通事業本部 交通第2部 林 拓也

対象橋梁は、供用後 60 年を超える橋長 622.4m の長大 PC 橋である。過年度の橋梁定期点検において、主桁の PC 鋼材の腐食による破断が報告されたため、詳細調査を行い、損傷状況の把握、原因特定及び健全度の評価を実施した。本論は、詳細調査の手法および結果を取りまとめ、今後の PC 桁への調査の参考となすべく、事例を報告するものである。

1 橋梁諸元

対象橋梁の断面図を図 1.1、側面図を図 1.2 に示す。
橋梁諸元は以下のとおりである。

- ① 竣工 : A1～P11; S32 年 (G1 桁: S60 年 拡張)
: P11～A2; S60 年
- ② 上部構造: PC 単純ポステン T 桁 12 連 + PC4 径間連続箱桁
- ③ 橋 長: L=622.4m
- ④ PC ケーブル: フレシネールチワイヤーシステム, 12 φ 7
- ⑤ ケーブル定着: 端部定着および上縁定着

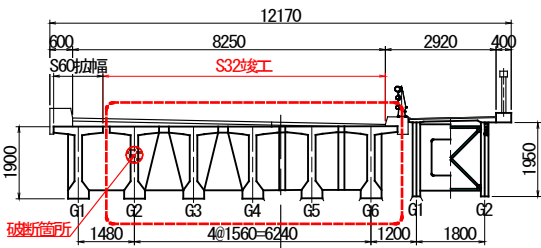


図 1.1 橋梁断面図

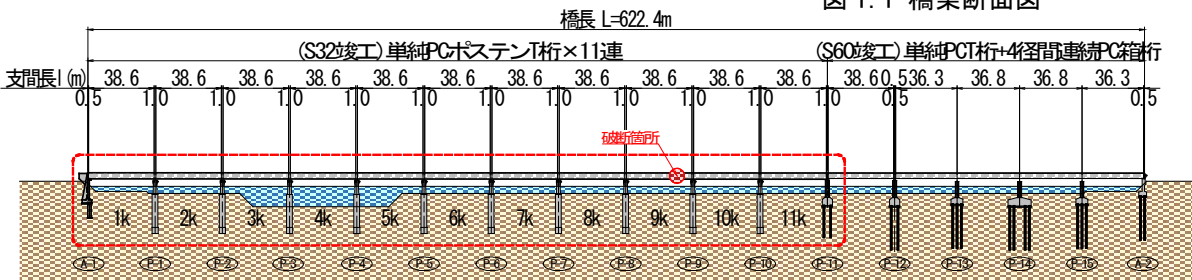


図 1.2 橋梁側面図

2 損傷状況

(1) S32 竣工部 主桁の損傷状況

H23 年度の橋梁定期点検結果(表 2.1)を受け、H26 年度橋梁補修設計時に実施された調査では、9 径間目の G2 および G6 桁に PC 鋼材に沿ったうき及び鉄筋露出が確認された(図 2.1)。

表 2.1 H23 橋梁定期点検結果 (S32 竣工部主桁)

部材名	損傷名	径間										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
主桁	ひびわれ	C	C	—	—	C	C	—	—	C	—	—
	漏水・遊離石灰	—	C	—	—	C	—	—	—	C	—	—
	剥離・鉄筋露出	—	B	B	B	C	B	—	—	B	B	—
	うき	—	—	—	—	C	—	—	—	—	—	—

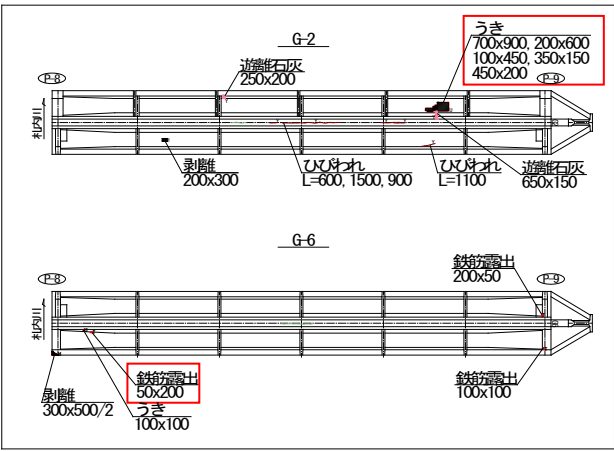


図 2.1 9 径間目の損傷図 (H26 年度補修設計時)

(2) H28年度補修工事における主桁PC鋼材状況

9径間G2桁C3鋼材周辺について、H28年度補修工事で、はつりを行った結果、C3鋼材内の全12素線のうち、1本のPC鋼材の破断が確認された(写真2.1, 図2.2)。C3鋼材についてはグラウトの未充填が確認された。

9径間G6桁C9鋼材周辺に小断面の鉄筋露出がみられたが、PC鋼材の破断はみられなかった。また、グラウトの充填は良好な状態であった。

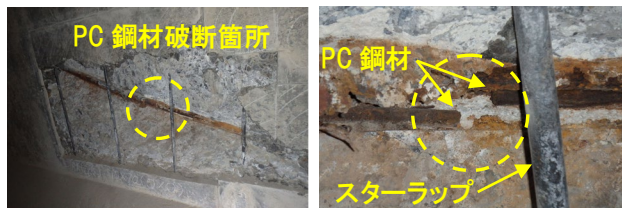


写真 2.1 G2 桁 C3 鋼材写真

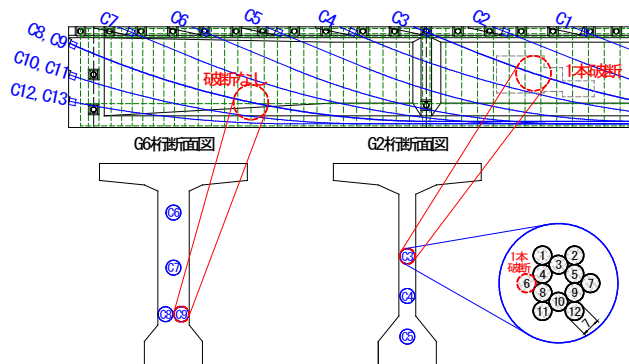


図 2.2 損傷位置及び鋼材配置図

3 調査概要

(1) 調査目的

補修工事において、9径間G2桁C3鋼材で1本の鋼材の破断が確認されているが、それ以外の鋼材の状態は未確認となっている。

本調査では、構造物の現況および長期的な健全度を評価することを目的とし、外観目視調査に加え、プレストレスの残存量、PCグラウトおよびPC鋼材の状態を確認することとした。

(2) 調査内容

本橋で実施した現地調査項目と数量を表 3.1 に示す。

一次調査(外観目視調査、主桁打音調査)の結果を基に、二次(残存プレストレス量調査)および三次調査(グラウト充填確認調査、主桁はつり調査)では、ひびわれの発生状況、鋼材定着位置に着目し5つのグループに分け、ひびわれ幅と長さに着目してグループ内で最も損傷レベルが高い桁、各1箇所を抽出し、全5主桁を調査対象とした(図 3.1)。

表3.1 現地調査項目と数量

調査・試験項目		単位	数量
一次	外観目視調査	橋梁	1
	主桁打音調査	橋梁	1
二次	残存プレストレス量調査	主桁	5
	グラウト充填確認調査	主桁	5
三次	主桁はつり調査	主桁	5

竣工	桁No.	径間										
		1K	2K	3K	4K	5K	6K	7K	8K	9K	10K	11K
S60	G1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	G2	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr3	Gr5	Gr5	Gr5	Gr1	Gr3	Gr5
	G3	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr4	Gr5
S32	G4	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr3	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5
	G5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr4	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5	Gr5
	G6	Gr3	Gr2	Gr5	Gr5	Gr2	Gr5	Gr5	Gr4	Gr5	Gr5	Gr5
～凡例～												
		Gr1 上縁定着ケーブルに鋼材破断あり										
		Gr2 上縁定着ケーブルに沿った、遊離石灰を伴うひび割れがある										
		Gr3 上縁定着ケーブルに沿ったひび割れがある										
		Gr4 端部定着ケーブルに沿ったひび割れがある										
		Gr5 ケーブルに沿ったひび割れなし										
		太字 調査対象として選定した桁										

図 3.1 調査グループ分け

(3) 外観目視調査および打音調査

外観目視調査の結果、図 3.1 に示す通り 10 本の桁(着色部)でシーに沿ったひびわれが確認されたが、ひびわれ周辺の打音調査でうきは確認されなかった。また、曲げひびわれや、異常なたわみは確認されなかったことから、応力超過等による構造的なひびわれではないと判断した。

(4) 残存プレストレス量調査の概要

残存プレストレス量を推定する手法には、応力解放法が一般に用いられ、鉄筋切断法、スロットストレス法の2つの手法を用いる事例が多いが、今回は最も既設構造物への影響が少ないコア切込み法を採用した。コア切込み法は、コンクリート表面に2方向のひずみゲージを貼り、φ50のコアドリルで18mmの浅い切込みを入れ、これによる解放ひずみの測定値から有効応力を推定するものである(図3.2)。

計測される解放ひずみの要因としては、プレストレス、自重による応力(主桁、支点反力、その他調査時の状態による)およびクリープ、乾燥収縮にともなう鉄筋拘束応力があり、これらを適切に考慮することで残存する有効応力を精度よく推定することができる。

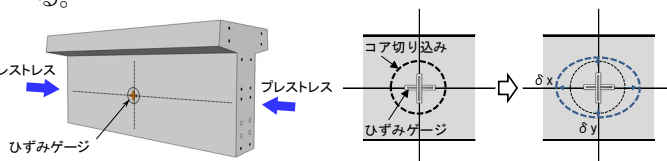


図3.2 コア切込み法の概要図

本手法で計測されるのは、応力解放されたいひずみのため、有効応力に換算する際、コンクリートのヤング係数を把握する必要がある。このため、コア切り込みによるひずみ計測終了後、φ75×160mmのコアを採取して、ヤング係数の測定を行うことで応力推定に適用した。

コンクリート強度は設計値を大きく上回り、静弾性係数についても良好な結果が得られた(表3.2)。

表3.2 コア試験結果

劣化グループ	径間	主桁	圧縮強度	静弾性係数
Gr5	5	G5	90.9 N/mm ²	45.1 kN/mm ²
Gr4	6	G5	78.5 N/mm ²	39.9 kN/mm ²
Gr5	7	G3	63.4 N/mm ²	37.2 kN/mm ²
平均値			77.6 N/mm ²	40.7 kN/mm ²

設計基準強度：40N/mm²

(5) 残存プレストレス量調査の結果

残存プレストレス量推定結果を表3.3に示す。

今回計測した解放ひずみから求めた推定有効プレストレスは、設計値に対して90～105%であった。

表3.3 残存プレストレス量推定結果

劣化 Gr	計算ひずみ $\Delta \varepsilon_{x,0}$ ($\times 10^{-6}$)	応力度 (N/mm ²)							
		死荷重+ブレ		死荷重		プレストレス (PS)		PSの評価	
		設計	推定	設計	推定	設計	推定	差分	比率
Gr1	-99	5.8	4.0	-15.9	21.6	19.9	-1.8	92%	
Gr2	-145	7.6	5.9	-13.1	20.7	19.0	-1.7	92%	
Gr3	-107	6.6	4.4	-14.7	21.2	19.0	-2.2	90%	
Gr4	-134	6.5	5.5	-15.6	22.1	21.1	-1.0	96%	
Gr5	-179	6.3	7.3	-15.2	21.4	22.4	1.0	105%	
平均値	-133	6.5	5.4	-14.9	21.4	20.3	-1.1	95%	

PC鋼材1本破断があった劣化Gr1の結果より、劣化Gr3の方がプレストレスの低下が大きい結果となった。これは、劣化Gr3の測定箇所では微細なひび割れが全体に発生していたため、直角方向に解放されるべき乾燥収縮ひずみが周囲の微細なひび割れによって調査前に幾らか解放されたことで、推定されるプレストレスの量が小さく算出されたものと考えられる。

(6) グラウト充填確認調査およびはつり調査の概要

PC鋼材のグラウト充填状況を非破壊で確認する手法には、放射線透過法、打音振動法、インパクトエコー法の3つの手法を用いる事例が多いが、今回は最もグラウト充填確認の精度が高い広帯域超音波法を採用した。

広帯域超音波法は、コンクリート内に高強度で広帯域の周波数を有する超音波を入力し、反射波をすべて収録し、特定したシースからの反射波特性を分析することでグラウト充填状況を判定するものである。充填不良のシースは、充填されたシースに比べ反射波の強度が大きくなる性質があり、この特性を利用してグラウト充填状況を推定している(図3.3)。

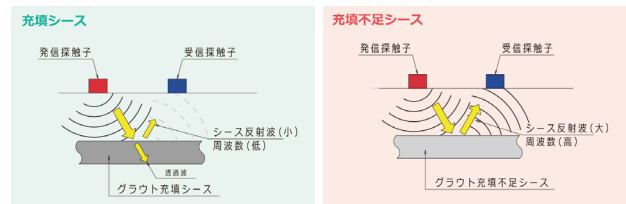
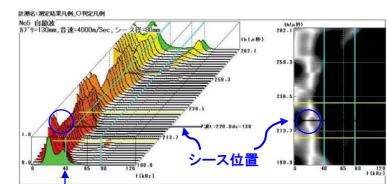
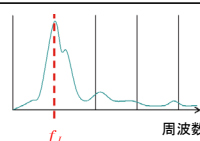


図3.3 広帯域超音波法の概念図

シース反射波のスペクトルパターンの模式図および解析結果例を図3.4に示す。図3.4の右図は、計測した4つの周波数データを合成したグラフであり、X軸は周波数、Y軸は周波数のスペクトル、Z軸は主桁の部材厚方向の分布を示している。また、図中の黒線位置がシースの位置を示している。

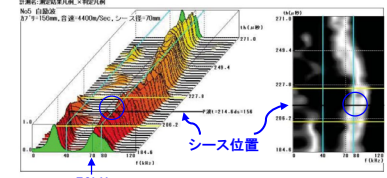
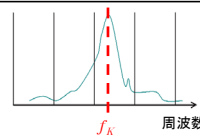
シースの位置(黒線)の周辺領域(黄色線間領域)において、周波数のピーク位置が40kHz以下であればグラウト充填が良好【○】と判断し、70kHz付近にピーク位置があればグラウト充填不良【×】と判断する。また、周波数のピーク位置が40～70kHzに分散している場合はグラウト充填不良の可能性有り【△】と判断し、コア削孔によりシース内の充填状況をファイバースコープにて確認し、再判定を行う。

充填良好 シース卓越スペクトル



(a) グラウト充填が良好の判定例

充填不良 シース卓越スペクトル



(b) グラウト充填が不良の判定例

図3.4 解析結果(例)

超音波測定用の探触子は、横締ケーブル定着部やフランジ等平坦性が確保できない箇所及び鉄筋の干渉する位置においては計測できない。

そのため計測は、桁端部で1m程度確保できる箇所である、C1～C9の9鋼材を対象とし、9鋼材×2(両端)×5主桁=90箇所を調査対象とした(図3.5)。

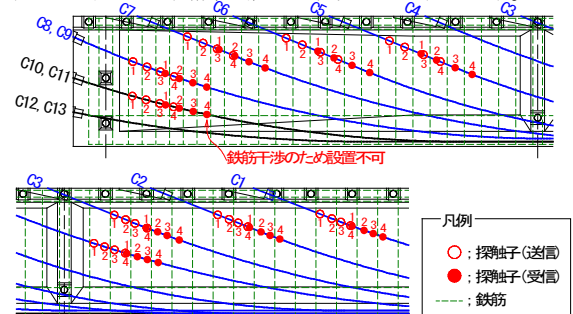


図3.5 調査位置図

(7) グラウト充填確認調査およびはつり調査の結果

PC鋼材グラウト充填確認調査にて異常が認められたグループの結果一覧を表3.4に示す。主桁削孔により目視観察を行った結果、グラウト未充填が確認された箇所があったが、鋼材の腐食、漏水は見られず健全な状況であった。グラウト未充填は、Gr1(9径間 G-2)に集中しており、H28工事でC3は鋼材が破断、C9は腐食していた鋼材である。

表3.4 グラウト充填確認調査結果

1) グループ1(9径間 G-2桁)

ケーブル番号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
充填調査	超音波	○	○	×	○	△	○	○	×
目視	○	○	×	○	×	○	○	○	×
判定	○	○	×	○	×	○	○	○	×
内部観察	腐食	○	○	○	○	○	○	○	○
滞水	○	○	○	○	○	○	○	○	○
判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○

2) グループ2(5径間 G-6桁)

ケーブル番号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
充填調査	超音波	×	○	○	○	○	○	△	○
目視	○	○	○	○	○	○	○	○	○
判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○
内部観察	腐食	○	○	○	○	○	○	○	○
滞水	○	○	○	○	○	○	○	○	○
判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○

3) グループ3(6径間 G-4桁)

ケーブル番号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
充填調査	超音波	×	×	○	○	○	○	○	○
目視	×	○	○	○	○	○	○	○	○
判定	×	○	○	○	○	○	○	○	○
内部観察	腐食	○	○	○	○	○	○	○	○
滞水	○	○	○	○	○	○	○	○	○
判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○

4) グループ4(6径間 G-5桁)

ケーブル番号	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
充填調査	超音波	○	○	△	○	○	○	○	○
目視	○	○	○	○	○	○	○	○	○
判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○
内部観察	腐食	○	○	○	○	○	○	○	○
滞水	○	○	○	○	○	○	○	○	○
判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○

広帯域超音波法の解析結果の一例として、Gr1(9径間 G2桁)のC3の結果を図3.6に示す。シース付近に80kHz程度の連続したスペクトルピークがみられるため、充填不良と判断する。

同箇所を削孔しファイバースコープで確認した結果、グラウトの未充填が確認されたが、鋼材の破断、腐食及び滞水は確認されず健全な状態であった(写真3.1)。なお、ファイバースコープ観察ではグラウト痕が確認されていることから、注入時に一度はシース内をPCグラウトが通過したと考えられる。

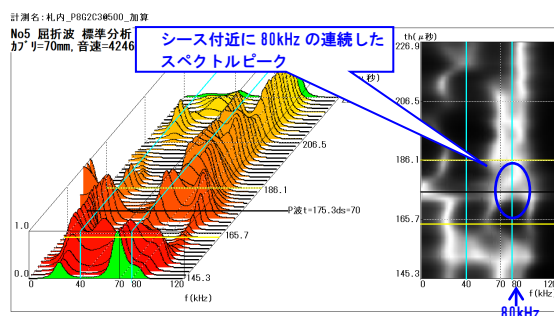


図3.6 グループ1(9径間 G2桁 C3(起点))の解析結果



写真3.1 グループ1(9径間 G2桁 C3(起点))の削孔状況

4 損傷原因の推定および健全度評価

(1) 主桁のひびわれ、PC鋼材の破断の損傷原因

本橋はH28年防水層の設置以前には、防水層の履歴がないことから、橋面水が主桁へ浸透していたと考えられ、シースと主桁コンクリート界面で凍害が生じひびわれに至ったと推定される。

鋼材の破断については、本調査でシース内のグラウト未充填が確認されたため、橋面水がシース内へ浸透し、PC鋼材が腐食し破断したと考えられる。

(2) 健全度評価

既往の研究¹⁾では、残存プレストレス量が70%程度あれば設計荷重作用時に許容ひびわれ幅以下のコンクリート応力状態にあるとされている。今回計測した解放ひずみから求めた推定有効プレストレスは、設計値に対して90～105%であったため、十分な有効プレストレス状態を維持しているものと判断した。

グラウト未充填の対策については、グラウト再注入も考えられるが、H28年補修工事にて、防水層の設置、伸縮装置の交換を行っているため、水の供給が遮断されている。そのため、PC鋼材が破断にいたった損傷誘因は除去されており、経過観察が妥当と判断した。

5 おわりに

本論文では、PC鋼材の破断が確認された橋梁について、現橋耐力の評価、グラウトの充填確認に関する非破壊調査(コア切込み、コアサンプル採取、削孔の調査含む)結果を報告した。

今後も建設後50年以上経過する橋梁が、加速的に増加し、適切なメンテナンスの重要性がますます高まることから、本報告がPC橋の健全度評価の一助となれば幸いである。

[参考文献]

- 1) PC道路橋の健全度評価の高度化に関する共同研究:国土技術政策総合研究所(H22.10)