

既設PC橋のグラウト充填状況がPC鋼材の腐食に与える影響

プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 ○小林 崇
 プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 北野 勇一
 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 花井 拓
 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 木村 嘉富

Abstract : In the existing prestressed concrete bridges, remarkable corrosion and breakage of prestressing steels, which in turn reduces strength of the bridges themselves or may cause protrusion of tendon and injure pedestrian, due to imperfect grout is reported. Clarification of the mechanism of this kind of deterioration regarding grout quality is necessary in order for prestressed concrete technology to contribute to maintenance and development of infrastructure. In this paper, the effect of grout filling condition on corrosion of prestressing steel is studied through dissection research.

Key words : Prestressed concrete, Grout filling, Dissection research

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PCと略す）は、強度の高いコンクリートを用い、しかもプレストレスの導入によりひび割れが制御されるため、耐久性に富む社会基盤構造物を創出することができる。一方、過去に建設されたPC橋の一部において、グラウトの充填が不完全であったことによるPC鋼材の腐食や破断により耐荷性能が損なわれたり、あるいはPC鋼棒の突出により第三者被害が起り得たということが報告されている。今後もPC技術が社会基盤の維持発展に貢献するには、グラウト充填に起因した損傷メカニズムを解明し、グラウト充填調査手法の高度化や未充填部の劣化防止技術の高度化を促す必要がある。

このような現状に際して「撤去橋梁を用いた臨床研究」¹⁾では、研究の一環として撤去されるPC橋を対象としたグラウト充填状況の実態調査からグラウトの充填が不完全となる要因の推定を行うとともに、グラウトの充填状況に起因した損傷メカニズムの検証を行っている。

本論文は、不完全なグラウト充填であってもPC鋼材が健全であったPC橋および塩害環境下でPC鋼材が著しく腐食したPC橋について行った解体調査から、既設PC橋においてグラウト充填状況がPC鋼材の腐食に与える影響について論じるものである。

2. 撤去されたPC橋によるグラウト充填状況の実態調査

表-1は、塩害などによる劣化やその他の理由により撤去されたPC橋により行った実態調査の結果である。これらの橋梁は、1986年にプレストレスト・コンクリート建設業協会編集された「PCグラウト施工マニュアル」が発刊されグラウト注入作業の標準化が図られる以前に建設された橋梁であり、

表-1 撤去PC橋の実態調査結果

橋梁	架設年	橋種	構造形式	最大支間	径間数/ 主桁本数	塩害の 影響度	上縁定着 の有無	グラウト 充填状況	PC鋼材の 状況
A橋	1965	道路橋	ポステン 単純 PCT桁	39.9m	5径間/6主桁	海岸線上	有	未充填 有り	破断有り
B橋	1972	自歩道橋		29.2m	3径間/2主桁	海岸線より60m			
C橋	1967	道路橋		27.3m	5径間/5主桁	海岸線より80m	無	充填が 不完全	
D橋	1972	自転車道橋		23.2m	2径間/2主桁	海岸線より200m			
E橋	1965	道路橋		22.8m	5径間/3主桁	影響無し	有	未充填 有り	破断無し

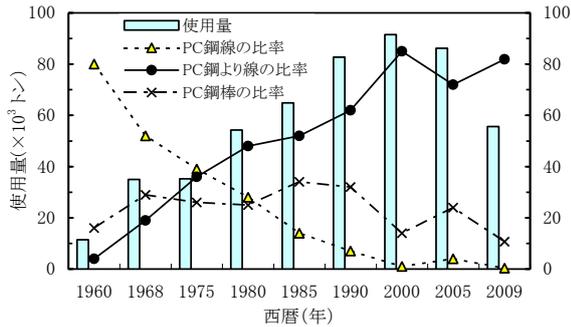


図-1 PC鋼材使用量と使用比率²⁾

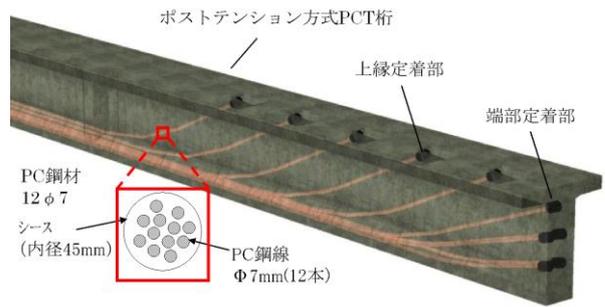


図-2 PCT桁橋のPC鋼材配置の概念図

グラウトの施工は1961年に土木学会に制定された「PCグラウト指針案」(以下、1961年指針案)に従って施工されたと考えられる。1961年以前のPC橋は主に支間30m程度以下の単純桁であった。しかし、1960年代から1970年代にかけて連続桁・張出桁架設へと急速に変貌したわが国のPC技術に対して、1961年指針案8条の記述は“注入はすべての流出口から一様なコンシステンシーのグラウトが十分流出するまで中断しないで行わなければならない”との注意喚起のみで、グラウトの施工技術や品質管理は相対的に劣っていた可能性もある。本調査においても一部で若干の空隙が見られる「充填が不完全」や一部でPC鋼材が露出した「未充填有り」など全橋について多少ともグラウト充填の不良が確認されている。

次に、解体調査の目的に合致するPC橋を表-1より抽出する(グラウトの良否よりも塩害の影響が顕著なA,B橋は除外)。不完全なグラウト充填であってもPC鋼材が健全であったPC橋の調査では、グラウトの充填状況がPC鋼材の腐食・破断に与える影響の把握を目的としており、これに合致するのは塩害の影響を受けなかったE橋のみとなる。また、塩害環境下でPC鋼材が著しく腐食したPC橋の調査では、グラウトの充填が良好である場合に塩害の影響をどの程度まで深刻に受けるか把握することを目的としており、なおかつできるだけ調査数が確保できる5径間5主桁のC橋を選定した。

なお、当時、直径7mmなどのPC鋼線が12本一束となっているもの(12φ7mmなどと表記する)が多用されており(図-1)、容量60トン程度(12φ7mmの場合)と小さいことからすべてのPC鋼材を桁端部に定着できず、桁の上縁にも定着するのが一般的であり、本調査でもC橋を除く4橋で上縁での定着が行われていた(図-2)。

3. 不完全なグラウト充填であってもPC鋼材が健全であったPC橋の解体調査

E橋は1965年に竣工された5径間単純ポストテンション方式PCT桁橋である(写真-1)。各支間長は22.8mで供用から45年が経過していたが、外観目視観察ではひび割れやはく離等の損傷は見られず、比較的健全な状態で維持されていた。調査は撤去に際して任意の位置で切断される1主桁当たり2つの切断面(全30切断面)に配置された342本のPC鋼線についてグラウト充填状況を目視により確認した。ここで、グラウトの充填状況の判定は、表-2に示すように、サンプル写真と対比して行うものとした。



写真-1 E橋の状況(撤去時)

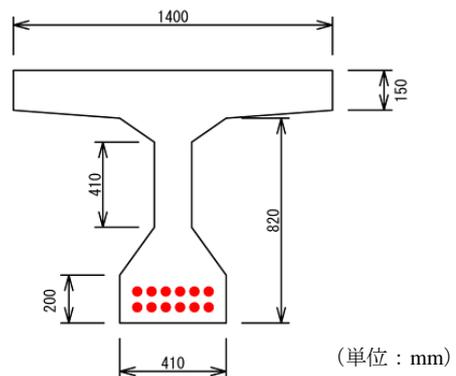


図-3 E橋の主桁形状(標準断面)

表-2 グラウト充填状況の分類

分類	グラウト充填状況	補足
充填度 1	グラウトが完全に充填されている。	PC 鋼材の付着と防食は確保されている。
充填度 2	若干の空隙があるが、PC 鋼材はほぼグラウトに覆われている。	
充填度 3	グラウトの充填が不十分であり、PC 鋼材が露出している。	PC 鋼材の付着と防食は確保されていない。
充填度 4	グラウトが充填されていない。	

表-3 PC 桁標準断面の切断寸法実測値 (E 橋)

測定	実測値	標-13	標-19
PC ケーブル	12 本	9 本	5 本
シース径	平均 ϕ 34.4	ϕ 35	ϕ 45
シース純かぶり (水平方向)	平均 59.6mm MAX85mm, MIN35mm	—	—
シース純かぶり (鉛直方向)	平均 60.4mm MAX74mm, MIN45mm	—	—
PC 鋼線	12 ϕ 5.4	12 ϕ 5	12 ϕ 7
鉄筋径	ϕ 9	ϕ 9	ϕ 9
鉄筋かぶり	平均 44.6mm MAX70mm, MIN30mm	—	—

※1966年(昭和41年)に橋梁編纂委員会が発行した道路橋設計資料から同規模程度の標準設計を参考とした。標-13は桁長21m、標-19は桁長23mの仕様である。

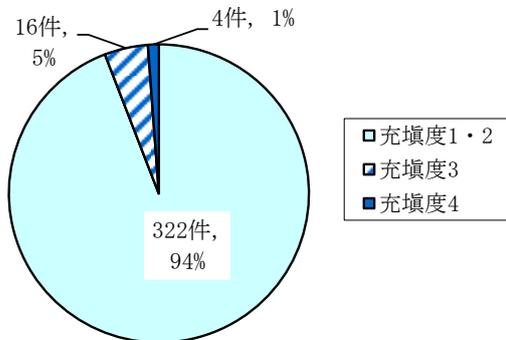


図-4 グラウト充填度の調査結果 (E 橋)

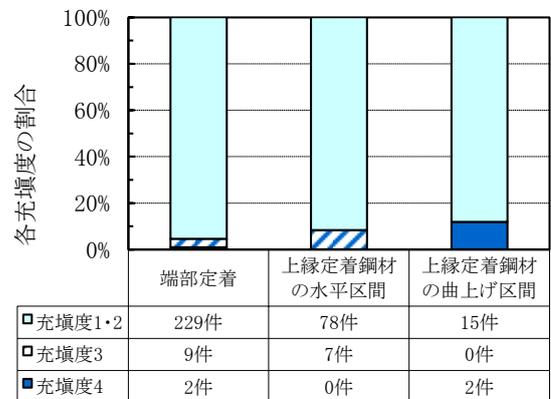


図-5 位置別のグラウト充填度 (E 橋)

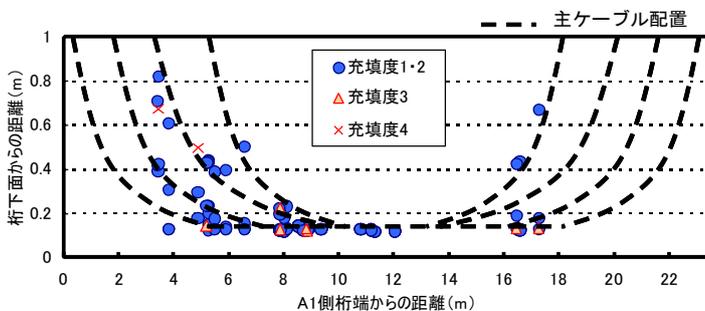


図-6 E 橋上縁定着ケーブルのグラウト充填状況



写真-2 E 橋充填度4の状況

主桁寸法：主桁形状を図-3、切断面の実測値を表-3に示す。主ケーブルはJIS規格に示されていない12 ϕ 5.4mmであり、同年代の標準設計との比較では桁長が同等である道路橋設計資料「標-19」に類似したものではなく、同資料「標-13」に近く、桁長の違いで主ケーブルの径・本数を変化させたものと推察される。ちなみに、この道路橋設計資料はE橋架設後の1966年に発刊されたものであり、建設省制定の標準設計は1969年まで待たなければならない。

グラウト充填状況：グラウト充填状況を確認した結果を図-4および図-5に示す。調査342件のうち、充填度1・2が322件(94%)、充填度3・4が20件(6%)であった。充填度3・4は上縁定着ケーブル(特に、曲上げ区間)に発生する割合が高いものの、端部定着ケーブルにも発生している。また、上縁定着ケーブルに着目した場合のグラウト充填状況を図-6に示す。これによると、充填度4は上縁から最大50cm下がり位置し、シース壁面にグラウトがへばりつきながら、さらに空洞が奥まで続いている状態であった(写真-2)。一方、反対側の曲上げ区間にはグラウトが充填されており、このよ

うな状況から、ブリーディングの影響は考えにくく、先流れの生じるグラウト注入側下り勾配で未充填部が残された（流動性の高いグラウトを急速に注入したことによる）ものと推察される。

なお、本橋の主ケーブルは調査した全342件ともほぼ腐食していないことが確認されており、グラウト未充填が確認された上縁定着ケーブルのシース中には水の浸入の痕跡も確認されなかった。

4. 塩害環境下でPC鋼材が著しく腐食したPC橋の解体調査

C橋は1967年に供用された5径間単純ポストテンション方式PCT桁橋である（写真-3）。主ケーブルには24φ7mmが用いられ、当時主流であった12φ7mmの約2倍の容量を有することから、1主桁当りケーブル4本を桁端部のみで定着させていた。架橋地点が日本海沿岸の海岸線に近接し、厳しい塩害環境に長く曝され鋼材の腐食によるひび割れやはく離などの劣化が顕著となったため、架替えを前提として2010年9月（橋齢43年）に供用が停止された。本橋の撤去は、間詰め床版を切断後、各桁を6または7分割して行われている。グラウト充填調査は、主桁切断面について行った。また、鋼材腐食調査は、図-7に示すように、損傷が最も著しい第1径間に着目し、G1桁（過去の調査でPC鋼材の半数程度の減肉が確認された部位）、G3桁（過去の調査でC3ケーブルPC鋼材の全数の減肉と一部に破断が確認された部位）、G4桁（過去に損傷・補修履歴がなく、橋齢40年以後に損傷が発生した部位）と、次に損傷の著しい第4径間のG4桁について実施することにした。

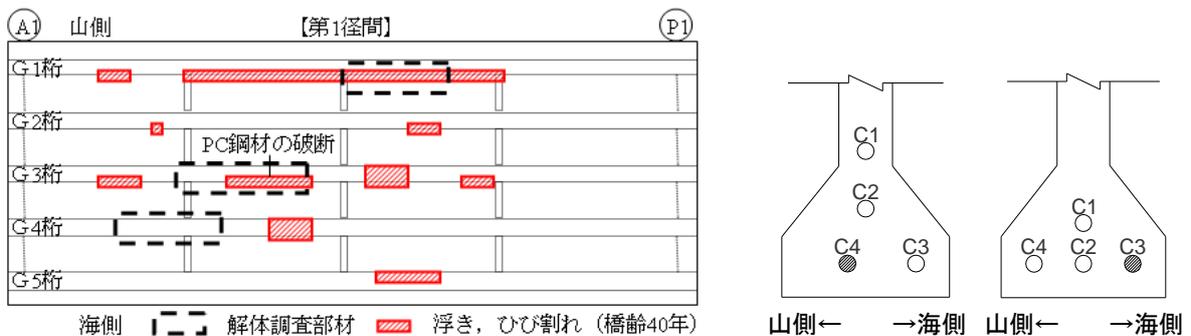
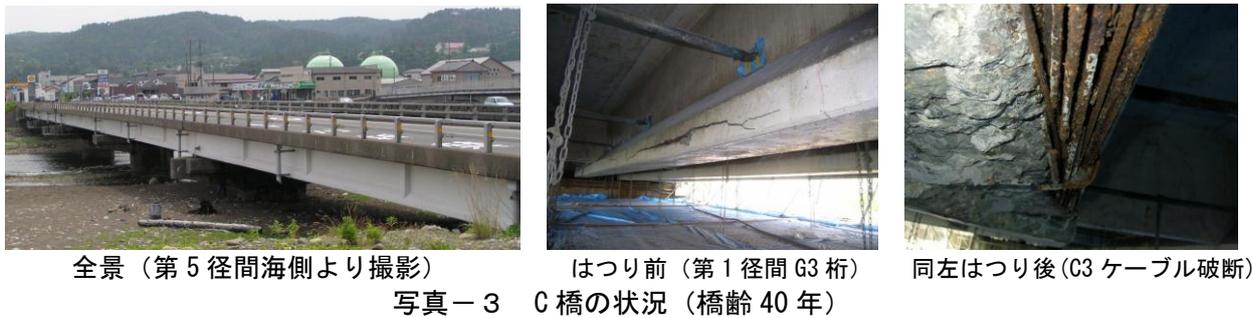


図-7 C橋主桁下フランジ損傷状況と部材採取位置 (左) およびケーブル配置 (右)

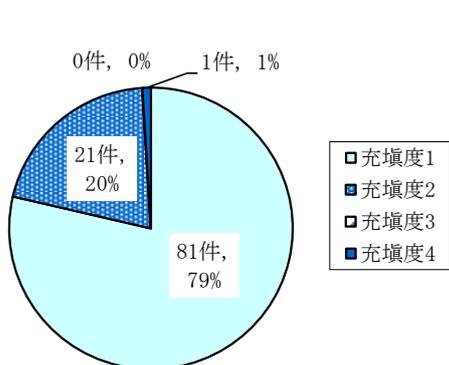


図-8 グラウト充填度の調査結果 (C橋・第1径間)

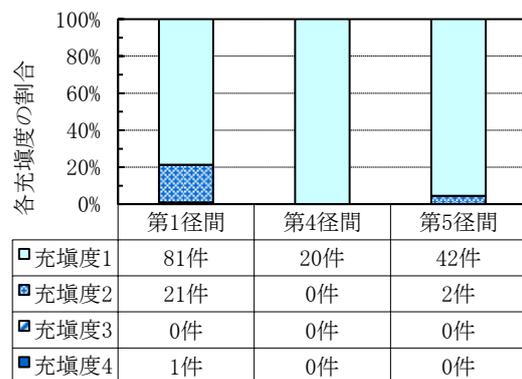


図-9 位置別のグラウト充填度 (C橋)



写真-4 C橋第1径間G3桁C4ケーブルの解体調査

グラウト充填状況：図-8に第1径間におけるグラウト充填調査結果を、図-9に位置別のグラウト充填度として第1, 4, 5径間のグラウト充填度の割合を示す。第1径間における調査は各主桁切断面に配置される103本のケーブルを対象としており、充填度1・2が102件(99%)、充填度3が0件、充填度4が1件(1%)であった。充填度1・2に着目すると、第1径間には局所的な空隙が多く見られたが、大多数の箇所ではグラウトの充填が良好であった。唯一、グラウトの未充填が確認されたのはPC鋼材の破断が確認された第1径間G3桁C3ケーブル付近であった。

鋼材腐食調査：第1径間G3桁よりシース管状態で採取、解体したC4ケーブルのシース、グラウト及びPC鋼線の状態を写真-4に示す。シースは一部に軽度の腐食が見られる程度である。グラウトの充填状況は断面に若干の隙間が見られる充填度2であり、主ケーブルはグラウトに覆われている状態であった。ただし、上部側のグラウトは脆く、シース取り外しの際に一部が粉碎、気泡や沈降跡も確認されている。本ケーブルの採取箇所は、本橋で最も著しい損傷が見られた箇所の近傍(同位置C3ケーブルで破断が確認されている)であるが、PC鋼線の腐食は僅かであることが確認された。即ち、著しい塩害環境下にあっても、グラウトが概ね充填されていれば、PC鋼材の腐食を抑制できると判断される。

なお、シース内面が外面より腐食しているのは、主ケーブル底面部数本の素線のみ腐食している状況から、施工段階でシース内の滞水(グラウト注入前に行う通水の残留等)があったと判断された。

質量減少率：第1径間G3桁切断・撤去時の同一部材内から採取したC1~C4ケーブルの質量減少率を図-10に示す。ここで、質量減少率は、鋼線の公称直径での基本単位長さ当り重量とクエン酸二アンモニウム10%溶液への浸漬などにより除錆した鋼線の単位長さ当り重量(=0.302g/mm)の差を基本重量で除して算出している(写真-5)。これより、C3ケーブルの質量減少率は35%を超え、13本の鋼線で

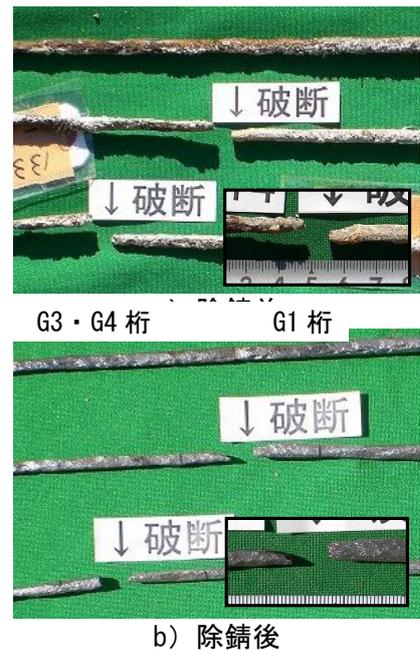


写真-5 質量(断面)減少状況

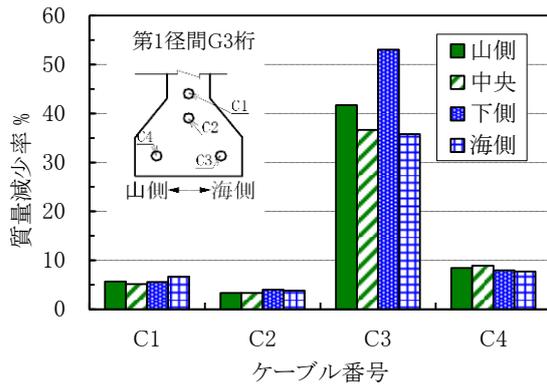


図-10 ケーブル位置と腐食量の関係 (C橋同一部材内における比較)

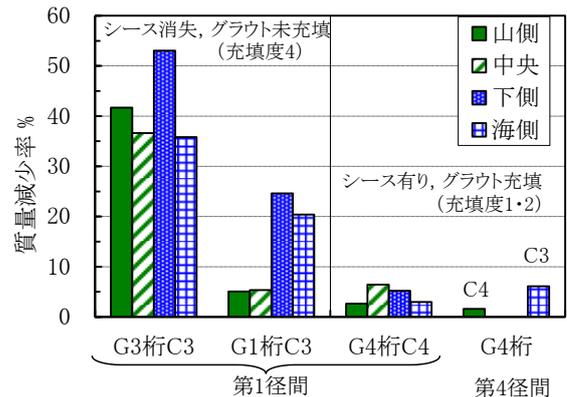


図-11 損傷状況とケーブル腐食量の関係 (C橋同一かぶりによる比較)



第1径間 G4 桁 C4 ケーブル付近



第4径間 G4 桁のはつり前状況



同左はつり後(上から C4, C2, C3 ケーブル)

写真-6 グラウトが充填されている部位での損傷状況 (C橋)

破断が確認されたものの、他のケーブルは10%以下であり破断も確認されていない。また、第1径間のG3桁C3ケーブル(最も著しい損傷)と同かぶりのG1桁C3ケーブル(2番目に著しい損傷)、G4桁C4ケーブル(過去に健全な箇所新たに損傷)と、第4径間のG4桁C3・C4ケーブル(第1径間以外で最も損傷)の質量減少率を図-11に示す。今回シースの消失とグラウトの未充填(あるいはシース消失時に脱落)部で前掲写真-3のようにコンクリートを分断するような著しいひび割れが生じた箇所では質量減少率が10%を超えていたが、写真-5に示したような下フランジ下面の軸方向ひび割れ程度の箇所では質量減少率は10%以下、平均的には4%程度であった。

5. まとめ

橋齢40年を超え、撤去されるPC橋を対象にグラウト充填状況の実態及びグラウトの充填度がPC鋼材の腐食に与える影響の調査を行った結果、次のことが確認された。

- (1) グラウト充填が良好な場合、過酷な塩害を受けるとPC鋼材が腐食することもあったが、最外縁の質量減少率で平均4%(内側を含めると平均2%)以下であり、相当の防食効果が発揮されていた。
- (2) グラウト充填が不完全な場合でも、水が浸入しない状況ではPC鋼材の腐食は認められなかった。一方、過酷な塩害を受ける状況では、グラウト充填が不完全な箇所で、PC鋼材の著しい腐食(質量減少率で10%を超える)と素線破断が確認された。

【参考文献】

- 1) 花井拓：撤去橋梁(PC橋)を用いた臨床研究に関する協力協定を締結，土木技術資料，第52巻，pp.44，2010.8
- 2) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PRESTRESSED CONCRETE YEAR BOOK，1960.，1968.，1975.，1980.，1985.，1990.，2000.，2005.，2009.