

北海道沿岸に建設された PC 橋のコンクリートの劣化調査

Survey of concrete of a deteriorated PC bridge along seashore in Hokkaido

(国研) 土木研究所寒地土木研究所	○正 員	水田真紀 (Maki Mizuta)
(国研) 土木研究所寒地土木研究所	正 員	菊田悦二 (Etsuji Kikuta)
(国研) 土木研究所寒地土木研究所	正 員	島多昭典 (Akinori Shimata)
国土交通省北海道開発局小樽開発建設部	正 員	三原慎弘 (Norihito Mihara)

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC）は、使用されるコンクリートが高強度であること、ひび割れを許容しない構造であることから、もともと耐久性の高い構造である。そのため、重要構造物に採用されることの多い構造形式であるといえる。

一方、厳しい塩害環境下では PC 鋼材の腐食により耐荷性能の低下が懸念される構造物が存在し、PC 橋の劣化の現状に関する報告¹⁾は多い。さらに、補修後の再劣化に関する報告²⁾もあり、PC 橋の適切な維持管理に対する要求は高い。

これまで PC の劣化に関しては、鋼材腐食やクリープに着目した研究が多く、コンクリートの特性について議論されることはほとんどなかった。しかし、鋼材腐食を進行させる塩化物イオンの浸入やクリープは、コンクリートの空隙形成や水分移動に関連する事象である。さらに、本研究対象の北海道の構造物では、凍害の進行もコンクリート内の空隙や水分に左右される。つまり、PC においても、コンクリートは劣化進行程度を反映している可能性がある。

そこで本研究では、北海道沿岸に建設され、40 年以上供用された PC 橋のコンクリートを調査した結果を報告する。試験体数は限られているが、各強度、中性化深さ、超音波伝播速度の測定結果を示し、コンクリート特性の変化や調査箇所によるコンクリート特性の違い等について考察する。

2. 調査対象

2.1 PC 橋の概要

本橋は、日本海側の海岸線から約 60m の位置に、ポストテンショニング方式 PC 単純 T 桁（以下、PC 桁）で昭和 47 年に架設された。上部工は、6 主桁（山側より G1～G6 桁）が横締め鋼材（12-φ5 PC ケーブル）で連結されており、橋長 25m、幅員 11m である。

昭和 61 年に床版補修と桁への表面塗装（1 層目：ガラスクロス入エポキシ樹脂、2 層目：ポリウレタン樹脂塗装）による補修が施され、昭和 62 年には防護柵・高欄取替と主桁下面（G2、G6 桁）に鋼板接着による補強が実施された。そして、平成 27 年に更新のため撤去されることとなった。

撤去までの上部工の劣化状況を図-1（PC 橋の全体図）、図-2（G2 桁の拡大図）に示す。撤去時には主桁

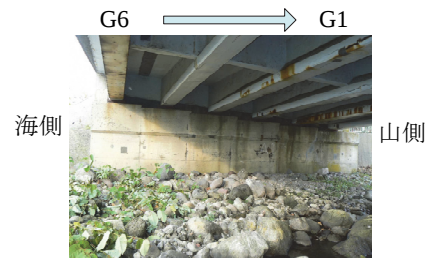


図-1 平成20年点検時の劣化状況



図-2 平成27年時の劣化状況（G2桁）

表-1 34年経過したコンクリートの性質

調査位置		環境	腐食	f'_c	E_c	Cl^-
下 フランジ	G1	海側	IV	47.0	23.3	8.441
	G3		IV	46.1	21.8	9.867
	G6		III	45.8	25.0	8.809
横桁	G1～2	海側	II	36.4	25.8	2.622
	G5～6		II	34.8	26.3	0.920
主桁	G1	海側	II	56.6	29.4	8.073
	G6		III	54.1	26.2	2.254
下 フランジ	G1	下面	III	—	—	6.210
	G4		II	—	—	9.085
	G5		III	—	—	5.589

※圧縮強度 f'_c (N/mm²)、静弾性係数 E_c (kN/mm²)鉄筋位置の塩化物イオン濃度 Cl^- (kg/m³)腐食：鋼材の状態から判断した腐食のグレード³⁾

の鋼材に沿った大きなひび割れが発生しており、表面から鋼材の腐食状況まで確認することができた（図-2）。このような外観変状は、海側よりも山側の方が著しい傾向が見られた。

なお、平成 18 年の塩害対策調査では、塩害による劣化加速期後期（コンクリート標準示方書³⁾の状態 II-2

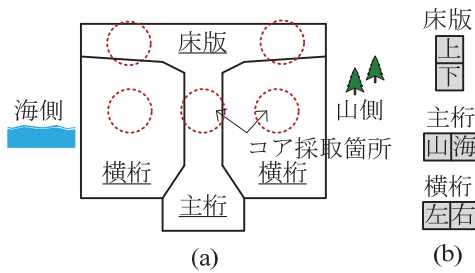


図-3 コア採取の位置

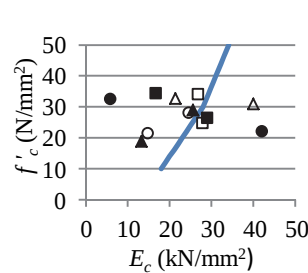
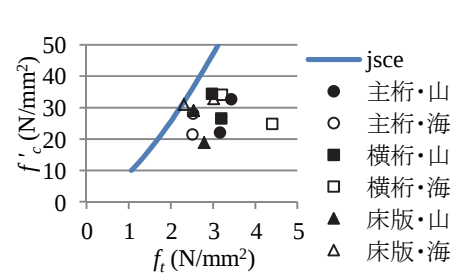
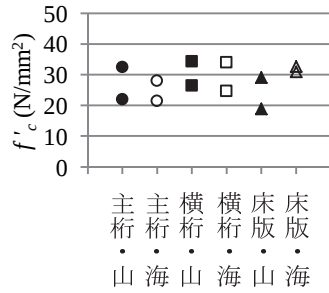
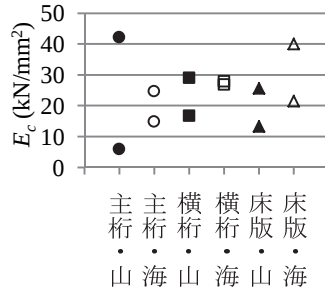
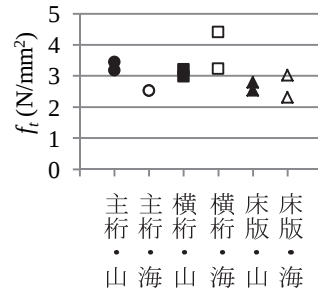

図-5 f'_c - E_c 関係

図-6 f'_c - f_i 関係

(a) 圧縮強度 f'_c

(b) 静弾性係数 E_c

(c) 引張強度 f_i

図-4 各力学特性

に対応)と判定され、更新を含めた対策が検討されている。そして、平成27年に架け替えられるまでの期間は、定期的な点検により構造上の安全性が確認されていた。

2.2 過去の調査結果

平成18年塩害対策調査における上部工のコンクリートと鋼材の結果を表-1に示す。この時点で、ほぼすべての上部工の調査箇所において、鉄筋位置での塩化物イオン濃度は鉄筋の腐食発錆限界 1.2kg/m^3 (コンクリート標準示方書⁴⁾ 参照) を大きく上回っていた。なお、下フランジの海側の中性化深さは 0mm であり、その他の箇所の測定データはない。また、強度試験に用いられたコンクリートコアの径は 75mm 、コンクリートの設計基準強度は以下のとおりである(ただし、設計当時の単位系で表示)。

- ・主桁: 400kgf/cm^2
- ・床版、横桁: 300kgf/cm^2

3. 調査方法

連結された6体のPC桁のうち、山側から2番目に位置するG2桁(劣化状況は図-2参照)を調査対象とした。このPC桁では、主桁の下フランジに接着した鋼板と共にコンクリートが剥離し、表面塗装した樹脂の浮きも観察された。

図-3(a)にコアを採取した位置を示す。各箇所から2本、主桁のみ4本の径 50mm のコアを、部材を貫通させるように採取した。そして、各コアから2つの試料(図-3(b))を取り出し、採取箇所が一方に偏らないように圧縮試験と割裂引張試験の試料とした。また、主桁と横桁(山側)については、径 50mm コアの採取箇所付近から径 100mm のコアを1本ずつ採取した。

調査項目は、圧縮試験による圧縮強度と静弾性係数、割裂引張試験による引張強度とした。さらに、圧縮試験

の試料で中性化深さを測り、径 100mm コアで、断面直角方向の透過法による超音波伝播速度を測定した。なお、力学特性に与えるプレストレスの影響を排除するため、JIS A 1107:2012に準じて、 $20\pm 2^\circ\text{C}$ の水中に40時間以上静置した後、圧縮試験と引張試験を実施した。

4. 調査結果

4.1 力学特性

図-4(a)から(c)に、コア採取箇所毎の圧縮強度 f'_c 、静弾性係数 E_c 、引張強度 f_i の測定結果を示す。

図-4(a)より、主桁のすべての f'_c が設計基準強度 f'_{cd} を下回り、 f'_{cd} の $50\sim 80\%$ 程度であった。また、横桁や床版では、測定値にばらつきはあるものの、設計基準強度と同程度か、小さくなった。よって、調査したPC桁では、圧縮強度が低下し、特に主桁の強度低下が大きい傾向が見られた。

次に、海側と山側の違いに着目して図-4(a)から(c)を比較すると、主桁を除けば、山側よりも海側の方が大きくなる傾向があった。2章で述べたように、本橋の連結された6本のPC桁の外観変状は海側から山側に向かうほど著しくなっていたが、1体の桁(幅 1500mm)内でも、環境条件の違いが材料特性の変化に反映されている様子がうかがえた。

図-5に圧縮強度 f'_c と静弾性係数 E_c の関係を示す。図には、標準的なコンクリート特性を推定する参考値として、コンクリート標準示方書の関係⁵⁾ も示した。 f'_c に対して E_c のばらつきは大きいものの、 f'_c は低下していると考えられることから、示方書の関係と同程度に E_c も低下していると考えられる。

図-6に圧縮強度 f'_c と引張強度 f_i の関係を示す。ここでも参考のため、コンクリート標準示方書の関係⁶⁾ を示した。すべての測定値が示方書の関係の右側にある

ことから、 f'_c に対して f_t が大きいことがわかる。本調査のデータ数は少なく十分ではないが、 f_t よりも f'_c の低下の方が大きい可能性がある。

4. 2 中性化深さ

図-7 にコア採取箇所毎の中性化深さを示す。ただし、床版は下面(図-3(b)参照)から測定した結果である。図より、横桁の中性化が最も進行しており、主桁や床版の中性化深さは非常に小さかった。また、海側よりも山側の中性化深さの方が大きくなり、4.1 節の力学特性の傾向と一致していた。以上より、1 体の桁の中でも中性化に対する環境が異なることが示された。ただし、最大 20mm 程度であり、鋼材には達していなかった。

4. 3 超音波伝播速度

主桁については山と海両側から、横桁(山側)については一面から、深さ 70mm まで 20mm 間隔で超音波伝播速度を測定した。結果を図-8 に示す。コンクリートの品質を判断する場合の目安として示された表-2⁶⁾を参照し、図にも品質の範囲を示した。

初期値がわからないため「良」の中央値 4150m/s を初期の健全な状態と仮定すると、「やや良」となる 3700m/s は相対動弾性係数 80%に相当する。よって、超音波伝播速度の測定値からは、コンクリートの性質が変化しつつある状況であると推測される。

4. 4 コンクリートの劣化状況

4 章の調査結果から得た知見をまとめ、以下に示す。

- (1) 圧縮強度が低下している可能性がある。特に、主桁の圧縮強度は設計基準強度より小さく、低下の程度は相当大きいと推測される。
- (2) 圧縮強度が低下していると推測されることから、コンクリート標準示方書⁵⁾に示される程度の静弾性係数の低下が見込まれる。
- (3) 圧縮強度に比べ、引張強度の低下は小さいと考えられる。
- (4) 主桁、床版より、横桁の方が中性化の進行が速い。
- (5) 超音波伝播速度の測定結果から、コンクリートの性質は変化しつつあると推測される。
- (6) 1 体の構造部材(PC 桁)の中でも、海側と山側の環境の違いが、コンクリートの材料特性の変化に反映される可能性がある。

5. 考察

5. 1 コンクリート劣化とプレストレスの関係

4 章でのコンクリートの劣化調査結果を受け、コンクリートの圧縮強度 f'_c 、静弾性係数 E_c の低下が、PC 構造に与える影響について検討した。

コンクリートと PC 鋼材の応力-ひずみ関係の概念図を図-9 に示す。コンクリートは、劣化により f'_c と E_c が低下したことから、図-9(a)に示すように、圧縮応力-ひずみ関係が A から B に変化したと考えることにする。ここで、劣化しても、コンクリートに導入されるプレストレスは変わらないと考えると、

$$E_{c2} = \alpha \cdot E_{c1} \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (1)$$

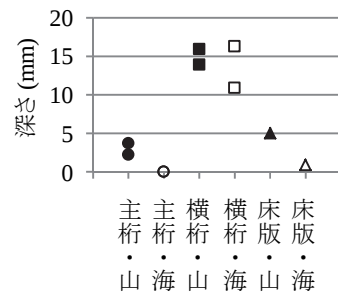


図-7 中性化深さ

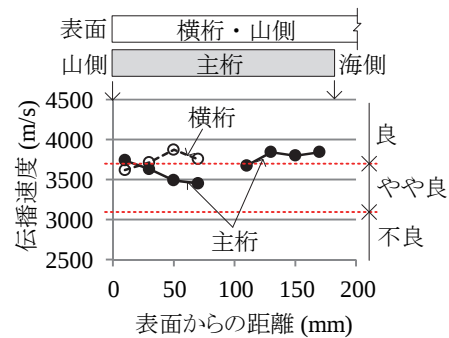


図-8 超音波伝播速度

表-2 コンクリートの品質⁷⁾

超音波伝播速度(m/s)	品質
4500～	優
3700～4600	良
3100～3700	やや良
2100～3100	不良
2100 以下	不可

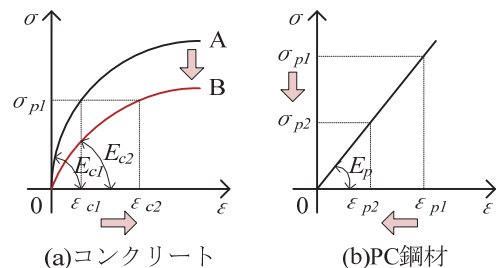


図-9 応力 σ -ひずみ ϵ 関係の概念図

$$\epsilon_{c2} = \frac{\sigma_{c1}}{E_{c2}} = \frac{1}{\alpha} \cdot \epsilon_{c1} \quad (2)$$

となり、ひずみは $1/\alpha$ 倍に増加する。すると、図-8(b)のように、PC 鋼材のひずみは減少し、プレストレスも低下するため、コンクリートに導入されるプレストレスは減少する。つまり、コンクリートの圧縮強度 f'_c と静弾性係数 E_c の低下は、プレストレス損失につながる現象であると考えられる。

5. 2 コンクリートの劣化要因の推定

前節のコンクリートの劣化要因として、本橋の環境要因と構造上の要因の 2 つの可能性が考えられる。各要因について以下で検討する。

まず、環境要因については、本橋の設置場所から、塩害と凍害の影響が疑われる。道路橋示方書⁸⁾を参照すると、本橋の架設場所は塩害の影響地域 B、対策区分 S の激しい影響を受ける場所に相当する。そして、図-1 に示す鋼材腐食の状況、2. 2 節の過去の調査結果から、本橋は塩害の影響を強く受けてきたことがわかる。凍結防止剤の浸透がモルタルの力学特性に与える影響について指摘した研究⁹⁾もあるが、現状では、塩害環境下にあるコンクリートの強度低下が考慮されることはあまりない。

さらに、北海道は積雪寒冷地であることから、凍害の影響についても検討してみる。例えば、文献¹⁰⁾の凍害危険度マップを参照すると、本橋の架設場所は 6 段階：0 (なし) ～5 (極めて大きい) の 2 (軽微) にあたり、少なからず凍害を受ける環境にあることがわかる。また、既往研究¹¹⁾において、凍害を受けたコンクリートの圧縮強度と静弾性係数が低下することを確認していることから、凍害を劣化要因の一つとして検討すべきであると考ええる。なお、中性化については、最大 20mm 程度、鉄筋まで達しない表面のみの進行であったことから、ここでは検討しないことにした。

次に、PC 特有の構造上の要因としては、プレストレスによるクリープひずみの増加も考えられる。クリープ試験後のコンクリートの圧縮強度と静弾性係数については、材齢 2 年であれば、試験前と同等以上であったとの報告¹²⁾がある。一方、空隙の水分挙動のモデル化により PC 橋の長期たわみをシミュレーションした研究¹³⁾では、実橋で見られる加速的なたわみ増加を解析で明らかにしている。つまり、PC 構造では、短期的にはコンクリート特性に変化がなくても、クリープは長期的に継続する現象であるため、クリープもコンクリートの力学特性に影響を及ぼす一因として考慮すべきであろう。もちろん、コンクリートの配合、施工、環境条件等により、その程度は異なるだろうが、クリープはたわみの増大、プレストレスの減少をもたらすため、PC のクリープによるコンクリート特性の変化についても検討が必要であると考ええる。

以上より、PC のコンクリートを劣化させる要因として、凍害とプレストレス導入によるクリープの可能性があることを示した。

6. まとめ

北海道で約 40 年間供用された PC 橋の調査から、圧縮強度や静弾性係数の低下を伴うコンクリートの劣化が生じていることがわかり、その要因として凍害とクリープの可能性があることを示した。このようなコンクリートの劣化は、プレストレス減少、さらにはたわみの増加につながるため、程度が大きくなれば設計荷重作用時でもコンクリートにひび割れを発生させる恐れがある現象である。本来 PC は、コンクリートにプレストレス（圧縮応力）を導入することによりひび割れを許容しない高耐久な構造であるが、コンクリートにひび割れが生じれば、塩害に対する耐久性は著しく低下することになる。

今回の調査だけでは、コンクリートの劣化を表す指標、データ数ともに十分ではなく、劣化要因としての可能性を指摘した凍害やクリープの影響程度や相関性を明確にすることはできない。しかし、本調査で、長期の供用を経て、コンクリートの力学特性が変化することが示されたことから、その原因を追究するために、時系列で空隙構造等のミクロな材料特性の変化を把握していく必要があるだろう。さらに、PC の構造および材料（コンクリートと鋼材）特性の経時的な変化とそれらの関係を調べ、PC の構造性能あるいは耐久性能を低下させる劣化状態、クリティカルな条件を示していきたい。

参考文献

- 1) 例えば、岩城一郎、上原子晶久、子田康弘、内藤英樹、皆川 浩、鈴木基行：著しい塩害を受けた道路橋 PC 桁内部のコンクリートおよび鋼材の物性評価、土木学会論文集 E、Vol.66、No.4、pp.413-432、2010。
- 2) 松田芳範、石橋忠良、豊岡昭博、天木儀一：塩害により損傷を受けた PC 橋の補修効果に関する考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.2、pp.1015-1020、1999。
- 3) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕、p.109、2007。
- 4) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕、p.115、2007。
- 5) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕、p.39、2012。
- 6) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕、p.35、2012。
- 7) 日本材料学会：建設材料実験、p.235、2011。
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編および IV 下部工編「耐久性の検討」、2012.3
- 9) 橋本勝文、横田 弘、佐藤靖彦、杉山隆文：凍害および凍結防止剤散布に伴う水和生成相および引張特性の変化、セメント・コンクリート論文集、No.65、pp.400-405、2011。
- 10) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案、セメント技術年報、XXIX、pp.248-253、1975。
- 11) 水田真紀、野々村佳哲、島多昭典、太田哲司：コンクリートの力学特性に与える凍結融解作用の影響、第 69 回セメント技術大会、No.3306、2015。
- 12) 後藤和正、小室 努、陣内 浩、川端一三：高強度コンクリートの圧縮クリープ性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.2、pp.625-630、2000。
- 13) 千々和伸浩、石田哲也、前川宏一：コンクリートの微細空隙中の水分と PC 橋の長期変位、橋梁と基礎、pp.38-41、2011.1