

塩害を受けたコンクリート桁の構造性能評価についての一提案

One proposal about structural performance evaluation of concrete girder under salt attack

株式会社北未来技研 ○正員 朝倉啓仁 (Keiji Asakura)
株式会社長大 正員 井上雅弘 (Masahiro Inoue)

1. はじめに

飛来塩分による塩害環境下のコンクリート桁では、鋼材の腐食が孔食となって進行することから鉄筋や PC 鋼材の機械的性質が大きく低下する。このため、鋼材腐食を発生させない予防保全対策が望まれるものの、海岸線に近接するなど厳しい塩害環境下にある橋梁では、建設後の経過年数の増加に伴い、既に鋼材腐食が発生している状況にある。

こうしたコンクリート桁では、鋼材腐食に伴うさび汁の滲出やひび割れ、浮きが生じており、5年サイクルの橋梁点検の度に「早急な対策が必要」と診断され、事後保全対策として損傷個所の補修が繰返されている。

塩害損傷の場合、部分的な表面保護工による対策では鋼材の腐食の進行を完全に抑制することは困難なことから、メンテナンスサイクルの中においても鋼材の腐食は進行し、構造性能が低下し続けることとなる。

この際、既設コンクリート桁の構造性能の低下を知らせる警告灯としては、「北海道におけるコンクリート構造物の性能保全指針」¹⁾において、曲げひび割れ幅に着目した限界値（出典では閾値）が示されている。

本報では、鋼材腐食が生じていないという意味で健全なコンクリート桁の構造性能の評価方法を紹介し、塩害を受けたコンクリート桁に適用する際の留意点について考察を加え、塩害桁の性能低下の限界値を提案する。

2. 既設コンクリート桁の構造性能の評価について

構造性能とは、設計段階で構造物に要求される性能であるが、維持管理の対象とする構造性能は、文献²⁾より図-1の通りである。

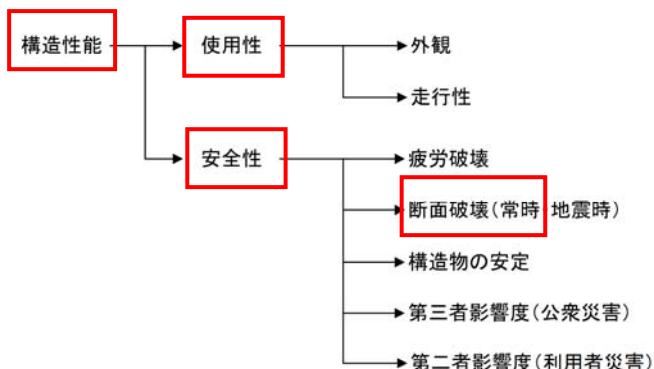


図-1 維持管理の対象とする構造性能

ここで使用性は、コンクリート標準示方書[設計編]³⁾に示す通り外観や走行性等の性能であるが、従来からコンクリートの圧縮応力度や鉄筋の引張応力度を適切な値

に制限することで照査されており、特定の性能に対応する照査ではない。使用性については本報でもこれにならうものとする。また、安全性については常時（活荷重満載時）の断面破壊に着目する。

なお、コンクリート桁の破壊形態は、RC 桁、PC 桁に係わらず、脆性的なせん断破壊やコンクリートの圧壊が曲げ破壊に先行することがないように、曲げひび割れ先行型に設計されていることを前提とする。

2.1 健全 RC 桁の構造性能評価

(1) 健全 RC 桁の変形の進行

引張に弱いコンクリートの弱点を鉄筋で補強した RC 桁は、曲げひび割れの発生を許容しているが、過大な荷重が作用した場合により、図-2 に示す通り、①→②の順に変形が進行し、③にて終局を迎える。

具体的には、①活荷重が満載された状態で、支間中央付近桁下面に橋軸直角方向に曲げひび割れが発生、引張主鉄筋の伸びに応じて橋軸方向に一定の間隔で分散しながら、ひび割れ幅が拡大。②支点付近の桁下縁から斜め上方にせん断ひび割れが発生。③最終的には支間中央付近桁上縁のコンクリートの圧壊である。

①の曲げひび割れ幅の最大値が、以下に示す使用性や安全性低下の限界値の範囲内にあるか否かで、構造性能を知ることが出来る。

ただし、点検時活荷重は満載時より小さいと想定されることから、発生応力の減少比率に応じて限界値を低減する必要がある。

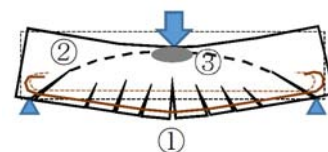


図-2 健全 RC 桁の変形の進行 (①→②→③)

(2) 使用性低下の限界値：曲げひび割れ幅 0.3mm

使用性低下の限界値は、コンクリート標準示方書[設計編]において使用性照査に用いるひび割れ幅の設計限界値⁴⁾を用いて、曲げひび割れ幅 0.3mm と設定する。

(4)に示す計算例では、鉄筋応力 180N/mm²に対応するひび割れ幅である。

(3) 安全性低下の限界値：曲げひび割れ幅 0.4mm

安全性低下の限界値は、鉄筋応力度が降伏点になることを想定し、また簡便のために一定値となるように曲げひび割れ幅 0.4mm^{1),5)}と設定している。(4)に示す計算例では、鉄筋の降伏応力に対応するひび割れ幅である。

(4) 性能低下の限界値を表す曲げひび割れ幅の計算例

RCT 桁の標準設計等を参考に以下の通り断面を仮定した。

<計算条件>

- ・主桁 RCT 断面 (図-3)
- ・主鉄筋 丸鋼 φ32c80mm
2段配置 (SR235)
- ・コンクリート設計基準強度
 $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$
- ・かぶり c =主筋中心 80
-主筋 φ32/2-スターラップ φ22=42mm

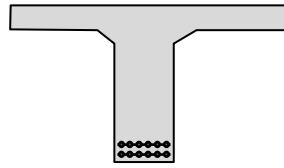


図-3 RCT 桁断面形状

<計算結果>

曲げひび割れ幅 w (mm) はコンクリート標準示方書 [設計編]⁶⁾より次式で示される。

$$w=1.1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot l_c \cdot (\sigma_{se}/E_s + \epsilon'_{csd})$$

使用性低下の限界値は、鉄筋の引張応力度が許容応力度 180N/mm^2 となるひび割れ幅とすると 0.34mm となる。

$$w=1.1 \cdot 1.3 \cdot 1.04 \cdot 0.91 \cdot 201.6 \cdot (180/200000 + 350 \times 10^{-6}) = 0.34\text{mm}$$

安全性低下の限界値は、鉄筋の引張応力度が降伏強度 235N/mm^2 となるひび割れ幅とすると 0.42mm となる。

$$w=1.1 \cdot 1.3 \cdot 1.04 \cdot 0.91 \cdot 201.6 \cdot (235/200000 + 350 \times 10^{-6}) = 0.42\text{mm}$$

ここに、

k_1 : 鋼材表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数

$$k_1=1.3 \text{ 異形鉄筋: } 1.0 \text{ 普通丸鋼: } 1.3$$

k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数

$$k_2=15/(f'_c+20)+0.7=1.04$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm^2), 設計圧縮強度

$$f_{cd} \text{ を用いる } f'_c=24\text{N/mm}^2$$

k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数

$$k_3=5 \cdot (n+2)/(7 \cdot n+8)=5 \cdot (2+2)/(7 \cdot 2+8)=0.91$$

n : 引張鋼材の段数 $n=2$

c : 設計かぶり(mm) $c=42\text{mm}$

cs : 鋼材の中心間隔 $cs=80\text{mm}$

ϕ : 鋼材径(mm) $\phi=32\text{mm}$

l_c : ひび割れ間隔= $4 \cdot c + 0.7 \cdot (cs - \phi) = 201.6\text{mm}$

ϵ'_{csd} : 表-1 より $\epsilon'_{csd}=350 \times 10^{-6}$

σ_{se} : 鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの鉄筋応力度の増加量

$$\sigma_{se}=180\text{N/mm}^2 \text{ (使用性低下限界: SR235)}$$

$$\sigma_{se}=235\text{N/mm}^2 \text{ (安全性低下限界: SR235 降伏強度)}$$

E_s : 鉄筋のヤング係数(N/mm^2) $E_s=200\text{kN/mm}^2$

表-1 収縮およびクリープの影響によるひび割れ幅の増加を考慮する数値

	常時乾燥環境	乾湿繰返環境	常時湿潤環境
自重でひび割れが発生する部材	450×10^{-6}	250×10^{-6}	100×10^{-6}
永続作用時にひび割れが発生する部材	350×10^{-6}	200×10^{-6}	100×10^{-6}
変動作用時にひび割れが発生する部材	300×10^{-6}	150×10^{-6}	100×10^{-6}

計算結果を、図-4 に示す。

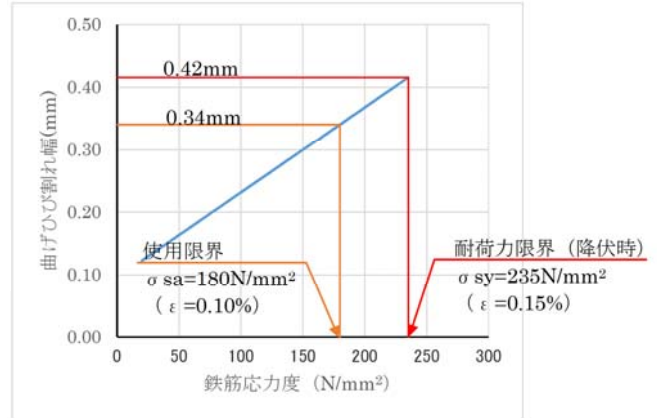


図-4 RC 桁の鉄筋応力度と曲げひび割れ幅との関係

2.2 健全 PC 桁の構造性能評価

(1) 健全 PC 桁の変形の進行

曲げひび割れを許容する RC 梁とは異なり、発生する引張応力に見合う圧縮応力をプレストレスとして計画的に与える PC 桁である。

永久荷重時は引張応力の発生を許容しないフルプレストレス、活荷重時は下縁コンクリートに引張応力の発生を許容するものの、引張応力はひび割れ発生応力以内で曲げひび割れは許容しないパーシャルプレストレスである。

常時の死荷重、活荷重作用時は、図-5 の通り可逆的な弾性挙動を示す。

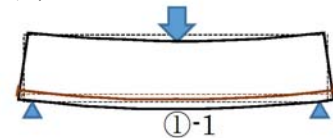


図-5 常時の PC 桁の変形の進行

次に、過大な荷重である終局荷重作用時は、図-6 の通り「①-1」→「①-2」→②の順に変形が進行し、③にて終局を迎えるように設計されている。

具体的には、「①-1」活荷重時に引張応力が発生するものの、曲げひび割れは許容しない。「①-2」過大な荷重載荷により曲げひび割れが発生、曲げひび割れ幅と範囲の拡大。残留ひび割れとなる場合もある。②支点付近の桁下縁から斜め上方にせん断ひび割れが発生。③最終的には支間中央付近桁上縁のコンクリートの圧壊である。

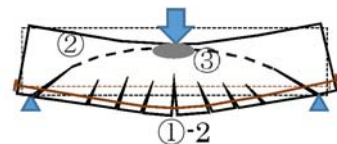


図-6 終局荷重時の PC 桁の変形の進行

(2) 使用性低下の限界値: 曲げひび割れの発生

PC 鋼材が健全な場合、使用性評価は PC 鋼材が弾性域 (許容ひずみ約 0.7%以内, 図-8 参照) にあるものと

し、使用性低下の限界値は活荷重満載時に曲げひび割れが発生、除荷で閉塞するものとする。

(3) 安全性低下の限界値：使用性低下時に別途設定

使用性の低下が認められる場合、すなわち活荷重満載時に曲げひび割れが発生する場合には、曲げひび割れの発生を許容しない当初設計を超過することになる。

原因としては、過大荷重の載荷、変形性能の低下、材料劣化などが考えられるが、原因を究明し原因に応じた安全性低下の限界値を別途定める必要がある。

3. 塩害コンクリート桁の構造性能評価について

3.1 塩害 RC 桁

(1) 孔食鉄筋の機械的性質の低下

塩害による鋼材腐食はマクロセル腐食となり、孔食が進行する。このため、塩害を受けた橋梁から採取した腐食（孔食）鉄筋に着目した引張試験結果⁷⁾を、図-7に示す。

図-7の凡例、腐食減量率（%）は引張試験前に測定した鉄筋試料（350mm）の徐錆後の重量減少率である。図中に SD30、D13 の荷重-ひずみ関係を赤字で示した。これは、試験試料に対応する鉄筋の機械的性質⁸⁾である。

腐食減量率 5%程度では健全な荷重-伸び関係を示しているが、腐食減量率 11%程度では降伏域が明確でなく、降伏点、最大荷重、破断伸び共に本来の機械的性質を下回っていることが分かる。

以上より、塩害による鉄筋の腐食（孔食）が一定程度進行すると、降伏点、伸び等の機械的性質が低下し、求められる規格を満足しないことが分かる。

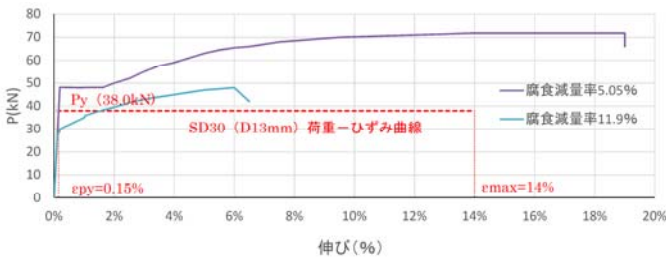


図-7 塩害により腐食した鉄筋（SD30、D13）の引張試験結果

(2) 塩害 RC 桁の構造性能と性能低下の限界値

塩害劣化した RC 桁の破壊試験による残存耐力の確認、および有限要素解析による性能評価した研究成果⁹⁾を抜粋して以下に示す。

- ・塩害によって鉄筋継ぎ手部分のかぶりコンクリートが損傷すると、定着性能が損失し、残存耐力に大きく影響する。

- ・実橋梁のように、鉄筋が複数本配置されて部材では、付着・定着が確保されていて、鉄筋破断が生じない限りは、局部的に鉄筋に大きな欠損があっても他の鉄筋が引張力を負担してくれるので、耐力低下率と平均腐食率はおおむね一致する。

このことから、塩害劣化した丸鋼鉄筋を使用した RC 桁の破壊形態は、鉄筋端部の半円形フックによる定着部

コンクリートに剥離がない場合は、孔食鉄筋の機械的性質の低下はあるものの、耐力低下率と平均腐食率は一致すると考えることができる。

主桁下面に配置された引張主鉄筋の腐食に伴う構造性能の低下は、腐食率に応じて鉄筋の応力度が高くなることから、健全な RC 桁と同様に、鉄筋の応力度を介した曲げひび割れ幅を用いて評価できるものとする。

使用性低下の限界値：曲げひび割れ幅 0.3mm

安全性低下の限界値：曲げひび割れ幅 0.4mm

ただし、丸鋼の半円形フックが確実にコンクリートに定着されていることを確認するものとする。

なお、健全 RC 桁と同じく、点検時活荷重は満載時より小さいと想定されることから、発生応力の減少比率に応じて限界値を低減する必要がある。

また、鉄筋腐食に伴う耐力の低下を解析により評価する場合は、コンクリート、鉄筋、鉄筋とコンクリートとの付着の3つ構成則を実験などから定めることにより、有限要素法（FEM）解析¹⁰⁾を用いて行うことが出来る。

3.2 塩害 PC 桁

(1) 孔食 PC 鋼材の機械的性質

PC 鋼材の塩害腐食も鉄筋と同様に、孔食として進行する。孔食を模した PC 鋼材を製作して機械的性質を研究した文献¹¹⁾より、代表的な引張試験結果を図-8に示す。図中、赤字は PC 鋼材の機械的性質⁸⁾である。

健全な PC 鋼線（図-8、「基準」：孔食なし）では、伸び約 0.7%までが弾性域、伸び 1.5%までが弾塑性域、その後最大荷重域、伸び 4%以上を経て荷重降下域となる。弾性域の最大荷重は 0.84 σ_{pu} 、弾塑性域の最大荷重は 0.93 σ_{pu} である。

欠損長 15mm の「孔食 1」では、弾性域および弾塑性域の最大荷重が低下すると共に、最大荷重域が現れることなく荷重降下域に移行、伸び能力の低下が大きい。

また、欠損率は同じで欠損長が 4mm と短い「孔食 2」では、弾性域および弾塑性域の最大荷重は孔食 1 と同等であるが、弾塑性域の半ばで荷重降下域を伴わず、脆性的な破壊に到っている。これは欠損長が短いため応力集中が大きくなり、延性的に伸びることなく脆性的な破断となったものである。

以上より、PC 鋼材（素線）の腐食（孔食）が開始すると、降伏点、伸び等の機械的性質が低下し、求められる規格を満足しないことが分かる。

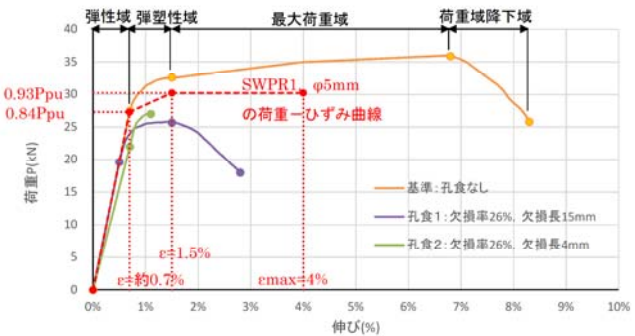


図-8 塩害による腐食を模擬した PC 鋼線（SWPR1、 ϕ 5mm）の引張試験結果

(2) 塩害 PC 桁の構造性能

PC 鋼材には予めプレストレスが導入されていることから腐食（孔食）の発生と同時に、機械的性質の低下の影響を受けて、PC 鋼材が破断する可能性がある。

孔食 PC 鋼材を有する塩害 PC 桁の変形進行過程を図-9 に示す。

具体的には、①活荷重のたわみにより支間中央付近において、PC 鋼材の腐食（孔食）に伴い PC 鋼材の破断が発生。②PC 鋼材の破断に伴い近傍の PC 鋼材の張力が増加し、次の孔食箇所が破断。③PC 鋼材の張力の増加が最初の PC 鋼材破断箇所集中することから、ひび割れが分散することなく鉄筋量ゼロの RC 梁の如く桁が折れ、破壊に到る。

このような PC 桁の脆性的な破壊は、載荷試験結果¹²⁾でも確認出来る。

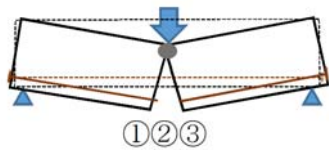


図-9 塩害 PC 桁の変形の進行 (PC 鋼材腐食)

(3) 塩害 PC 桁の性能低下の限界値

健全であれば曲げひび割れの発生を許容していないものの、PC 鋼材の腐食や破断に伴うプレストレスの減少がある場合には、活荷重満載時に曲げひび割れが発生している可能性がある。しかしながら、点検時活荷重は満載時より小さいと想定されることから、点検時に曲げひび割れの発生を確認した場合には、既に PC 鋼材の腐食の開始に加えて、PC 鋼材の破断に伴い有効プレストレスが低下している可能性が高いといえる。

このため、使用性低下の限界値は、安全側の評価となるように PC 鋼材の腐食（孔食）の開始とする。この際、PC 鋼材の腐食の開始は外観から判別できないことから、塩害特定点検¹³⁾の手法に準じて、採取コアの塩化物イオン濃度の分析結果を用いて腐食開始時期を推定する必要がある。

また、ポストテンション方式の PC 桁では、塩害とは異なるグラウト不良や上縁定着部からの水の侵入などに起因した PC 鋼材の破断が報告されている。しかしながら、1955 年当時の初期の PCT 桁はシースかぶりが 30mm と小さいことから、塩害による PC 鋼材の腐食についても留意する必要がある。

次に、使用性低下の限界値を超えて PC 鋼材の腐食（孔食）が進行する場合、PC 鋼材の破断に伴い有効プレストレスが減少する。健全 PC 桁とは異なり、活荷重満載より小さい荷重で曲げひび割れが発生することになる。このため、安全性の限界値は、PC 鋼材の腐食破断率を載荷試験等で把握し、有効プレストレスの減少を補うことが可能な補強量から、別途設定する必要がある。

4. おわりに

構造物の管理者や点検者が、コンクリート桁の構造性能の低下を容易に判定出来る限界値が求められており、

本報では、塩害桁に対して表-2 の通り提案をした。

本報が、構造性能の低下に関する研究の一助となり、塩害橋の適切な維持管理に貢献できれば幸いである。

表-2 常時における塩害桁の構造性能評価 (案)

		健全桁 ¹⁾	塩害桁
RC 桁	使用性低下限界	曲げひび割れ幅 0.3mm	
	安全性低下限界	曲げひび割れ幅 0.4mm	
PC 桁	使用性低下限界	曲げひび割れの発生	PC 鋼材の腐食開始
	安全性低下限界	使用性低下の原因に応じて別途設定	PC 鋼材破断を補う補強量から別途設定

参考文献

- 1) 北海道土木技術会コンクリート研究委員会：北海道におけるコンクリート構造物の性能保全技術指針[構造物編]，p102-103，2013.12
- 2) (一社)札幌建設業協会，橋梁の点検・補修に係わる研究会：構造性能評価に立脚したコンクリート橋梁の合理的な点検診断法，2014.3
- 3) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編：本編]，p87，2018.3
- 4) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編：標準]，p237，2018.3
- 5) 北海道土木技術会コンクリート研究委員会：「北海道におけるコンクリート構造物の性能保全技術指針（平成 25 年 11 月）」に関する Q&A 集，p5，2015.12
- 6) 4) p231
- 7) 岩城一郎，鶴田浩章ほか：報告 青森県日本海沿岸において著しい塩害を受けたコンクリート橋の劣化調査，橋梁と基礎，2007.10
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書（I 共通編）・同解説，2002.3（H14）および 1978.1（S53）
- 9) 田中泰司，山口貴幸，下村匠：塩害劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート橋桁の耐荷試験と数値解析による評価，土木学会論文集 E，Vol.66，No.4，pp466-482，2010.11
- 10) 日本コンクリート工学会：既存コンクリート構造物の性能評価指針 2014，p426，2014.11
- 11) 木村哲士，河野広隆，田中良樹：塩害により腐食した PC 鋼線の腐食性状と機械的性質，コンクリート工学年次論文集，vol.23，No.2，2001
- 12) 武田健太，田中泰司，下村匠，山口貴幸，陸賢，井林康，村上裕貴：塩害劣化したプレテンション式 PC 桁の載荷試験と解析による耐荷力評価手法の検討，土木学会論文集 E2，vol.71，No.4，pp303-322，2015.10
- 13) 国土交通省 道路局 国道・防災課：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案)，2004.3

(以上)