

鉄筋コンクリート部材と CPC 部材の塩害照査におけるひび割れの評価

辻 幸和*¹・栖原 健太郎*²

Case study's results are reported concerning to crack width estimation in salt attack of reinforced concrete members and chemically pre-stressed concrete members based both on the 2012 stipulation version and the 2007 stipulation version of Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structure of the Japan Society of Civil Engineers. The diffusion coefficient of chloride ions relating influence of crack width D_{cr} was changed from the 2007 stipulation version to the 2012 stipulation version considering that the w_d/w_a value is being to nearly under 1.0 from the flexural crack width verification criteria and the value of w_d/w_a was equal to 1.0 in the D_{cr} calculation equation. A large difference between verification for reinforcing bars corrosion and verification for flexural crack width is observed especially in an severe salt attack condition even if chemical pre-strains are introduced by using an expansive concrete. It is proposed that the diffusion coefficient of chloride ions relating influence of crack width D_{cr} will be adopted as same as the 2007 stipulation version to alleviate the difference between the verification for reinforcing bars corrosion and the verification for flexural crack width.

Key words : verification for reinforcing bars corrosion, ingress of chloride ions, verification for flexural crack width, diffusion coefficient of chloride ions relating influence of crack width, chemical pre-strain

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性の照査が、土木学会のコンクリート標準示方書^{1)~3)}(以下、RC 示方書と称する。)で整備されている。特に塩害環境下における鋼材腐食に対する照査においては、鉄筋コンクリート構造物(以下、RC 構造物と称する。)で不可欠なひび割れを考慮した照査方法が、2007 年制定版から導入され、2012 年制定版での改訂を経たのち、2017 年制定版に踏襲されて現在に至っている。

RC 構造物に膨張コンクリートを用いると、コンクリートには圧縮応力度のケミカルプレストレスを導入して曲げひび割れ発生耐力を向上させるとともに、鉄筋には膨張率のケミカルプレストレスを導入して曲げひび割れ幅を減少できる。その効果は、ひび割れ幅の算定式を規定する RC 示方書にも述べられている。そしてそれらの定量的な効果は、仕事量一定の仮定を用いて簡便に算定できるようになった。

本稿では、RC 構造物の塩害環境下における鋼材腐食に対する照査におけるひび割れの評価を、RC 示方書の 2012 年制定版と 2007 年制定版を用いて、膨張コンクリートの使用による主としてケミカルプレストレスのひび割れ幅の減少効果を考慮してケーススタディを行った結果を報告する。そして、2012 年制定版のひび割れ幅が及ぼす影響を評価する拡散係数の特性値のみに、その影響をより積極的に評価する値として 2007 年制定版の特性値を用いることを提案する。その評価方法により、ケミカルプレストレスの導入によるひび割れ幅の減少効果も考慮でき、厳し

い環境条件における鋼材腐食に対する照査が、このような性能照査型設計法が導入されていなかった昭和 61 年制定版から採用されていた使用限界状態における小さい荷重条件のひび割れ幅に対する照査の結果ともほぼ等しいものになることを提示する。そして、使用限界状態における照査を一部引き継いだ現行のひび割れ幅に対する照査の結果は、厳しい環境条件だけでなく、穏やかな条件における鋼材腐食に対する照査の結果とも大きな相違が無くなることを示す。

2. ケミカルプレストレスの導入によるひび割れ幅の減少効果

膨張コンクリートを鉄筋コンクリートの RC 梁に用いて、コンクリートにケミカルプレストレスを、鉄筋にケミカルプレストレスをそれぞれ導入した CPC (Chemically Pre-stressed Concrete) 梁における曲げ性状の改善について、これまで報告してきた。そして、引張鉄筋に導入されたケミカルプレストレスを視点に、主として曲げひび割れ幅の減少効果についても報告してきた^{4,5)}。図 - 1 は、これらの報告から、RC 梁と対比した CPC 梁の曲げひび割れ幅の分布について提示したものである。この図は、図 - 2 に示す 4 種類の断面形状寸法についての実験結果である。ボックスカルバートの工場製品で用いられている代表的な RC 梁と CPC 梁についての断面の高さと鉄筋の配置方法である。そして、断面の高さに応じてスパン長さを 1 800 mm ~ 3 000 mm として、3 等分載荷をした中央部分の曲げモーメント一定区間のひび割れ幅を、ゲージ長が 100 mm のパイ型変位計で測定した値である。

*¹ Yukikazu TSUJI : NPO法人 持続可能な社会基盤研究会 理事長, 群馬大学・前橋工科大学名誉教授

*² Kentaro SUHARA : デンカ(株) インフラソリューション開発研究所

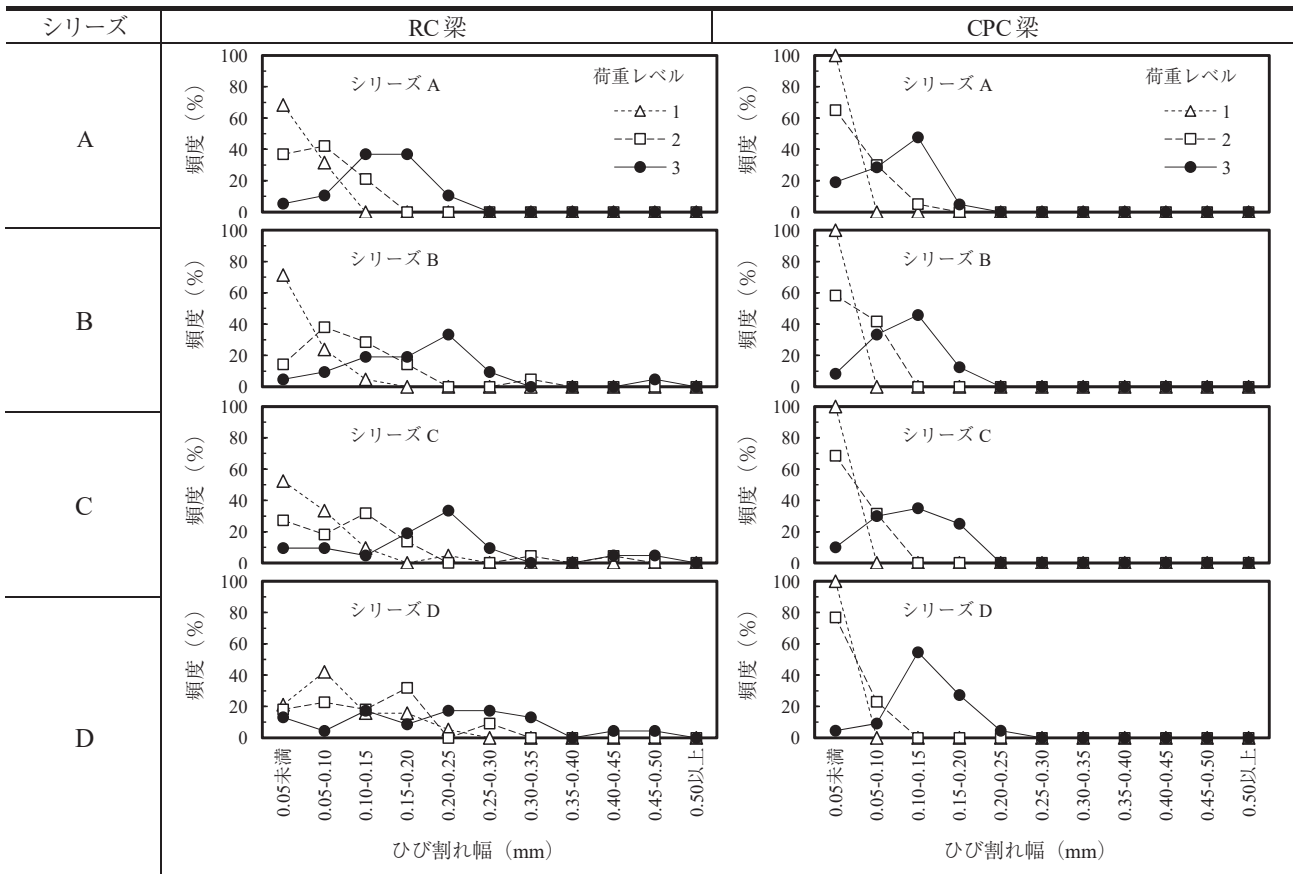


図 - 1 曲げひび割れ幅の分布

RC 梁と CPC 梁は、それぞれ同時に作製した 3 体の結果であり、曲げひび割れ幅の大きさごとに、その頻度を 3 体まとめて分布化したものである。コンクリートの引張力を無視した RC 梁の引張鉄筋のひずみが、 500×10^{-6} 、 1000×10^{-6} 、 1500×10^{-6} にそれぞれ達したときの荷重ごとに示している。凡例は、それぞれ荷重レベル 1, 2, 3 と表記した。

なお膨張コンクリートは、耐塩害性も考慮して工場製品に使用されている設計基準強度が 40 N/mm^2 、水結合材比 $W/(C+E)$ が 45%、単位水量 W が 168 kg/m^3 、単位結合材量 $(C+E)$ が 373 kg/m^3 、単位膨張材量 E が 60 kg/m^3 で、JIS A 6202 附属書 B (参考) に規定されている A 法による一軸拘束膨張率が $600 \sim 650 \times 10^{-6}$ のものを用いた。この膨張コンクリートの使用により、図 - 2 に示した 4 断面形状寸法と鉄筋の配置方法において、後述する下段の引張鉄筋にはケミカルプレストレイン ε_{sp} の膨張率として、シリーズ A とシリーズ B で 400×10^{-6} 、シリーズ C で 500×10^{-6} 、シリーズ D で 600×10^{-6} の値がそれぞれ生じていた。

図 - 1 より、同一の荷重レベルにおいて、CPC 梁のひび割れ幅は、RC 梁に比べて小さくなる。そして、荷重レベル 1 の RC 梁の引張鉄筋ひずみが 500×10^{-6} の荷重段階における CPC 梁では、各断面においてすべての曲げひび割れ幅が 0.05 mm 未満である。膨張材を使用した CPC 梁では、コンクリートには圧縮応力のケミカルプレストレスが導入されてひび割れの発生耐力が大きくなり、また引張鉄筋の

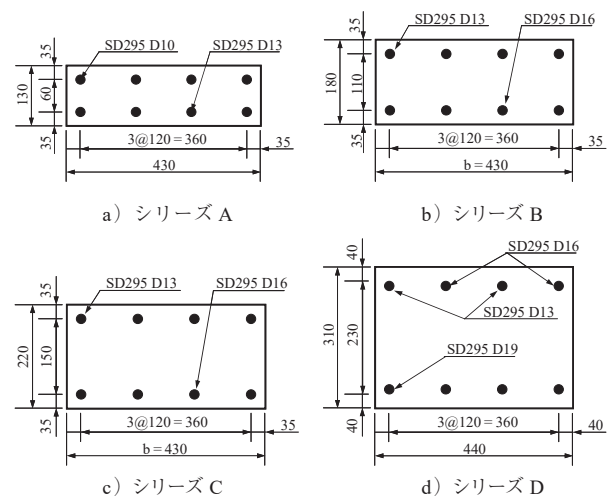


図 - 2 RC 梁と CPC 梁供試体の断面形状寸法 (単位 : mm)

ひずみの増加分が鉄筋に導入された膨張率であるケミカルプレストレインの分だけ小さくなって、ひび割れ幅を小さく制御することができる^{4~9)}。

また、ひび割れ幅が正規分布のように分布するのは、荷重が大きくなってから明瞭となる。そして荷重レベル 2 および荷重レベル 3 において、RC 梁のひび割れは、ひび割れ幅が小さいものから 0.5 mm を示すものまで広範囲に分布しているのに対して、CPC 梁では分布域も限定的となるのが特徴である。

表 - 1 RC 示方書の塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査の対比^{10, 11)}

2007 年制定版 ¹⁾	2012 年 (2017 年) 制定版 ^{2, 3)}
<p>(1) コンクリートのひび割れが設計拡散係数 D_d に及ぼす影響</p> $D_d = \gamma_c \cdot D_k + \left(\frac{w}{l}\right) \left(\frac{w}{w_a}\right)^2 \cdot D_0 \quad \text{式(1)}$ $\left(\frac{w}{l}\right) = 3 \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} - \varepsilon_{sp}\right) \quad \text{式(2)}$ <p>ここに、γ_c: コンクリートの材料係数、w: ひび割れ幅、w_a: ひび割れ幅の設計限界値、w/l: ひび割れ幅とひび割れ間隔の比、σ_{se}: 鉄筋の応力度の増加量、E_s: 鉄筋のヤング係数、ε'_{csd}: コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値、ε_{sp}: 膨張コンクリートを用いて引張鉄筋に導入された膨張率のケミカルプレストレイン、$D_0 = 200 \text{ cm}^2/\text{年}$</p> <p>① ひび割れが発生している面のかぶりコンクリートの塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d をコンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k とひび割れを考慮した拡散係数の特性値の和で規定している。そして、ひび割れを考慮した拡散係数の特性値は、w/l とひび割れによる局所的な影響を $(w/w_a)^2$ で表現している。</p> <p>② 既往の研究成果より、ひび割れ幅 w の最大値は平均値の 1.5 倍程度、ひび割れ間隔 l の最小値は平均値の 0.5 倍程度を、それぞれ見込んでいる。したがって w/l において、w および l は、いずれに対しても平均値を考えた場合の 3 (=1.5/0.5) 倍を採用している。</p> <p>(2) 結合材の種類ごとの見かけの拡散係数 D_k (水結合材比 W/B の二次関数)</p> $N: \log_{10} D_k = -3.9 (W/B)^2 + 7.2 (W/B) - 2.5$ $BB: \log_{10} D_k = -3.0 (W/B)^2 + 5.4 (W/B) - 2.2$ <p>ここに、N: 普通ポルトランドセメント BB: 高炉セメント</p> <p>(3) 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d</p> $C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.1 C_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}}\right)\right) \quad \text{式(3)}$ <p>ここに、γ_{cl}: 塩化物イオン濃度の安全係数、C_0: コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度、c_d: かぶりの設計値、t: 耐用年数</p> <p>(4) 鋼材の腐食発生塩化物イオン濃度 C_{lim} 安全側で 1.2 kg/m^3 ($1.2 \sim 2.4 \text{ kg/m}^3$)</p>	<p>(1) コンクリートのひび割れが設計拡散係数 D_d に及ぼす影響</p> $D_d = \gamma_c \cdot D_k + \lambda \cdot \left(\frac{w}{l}\right) \cdot D_0 \quad \text{式(4)}$ $\left(\frac{w}{l}\right) = \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} - \varepsilon_{sp}\right) \quad \text{式(5)}$ <p>ここに、γ_c, w, w/l, σ_{se}, E_s, ε'_{csd}, ε_{sp}, は、2007 年制定版と同じだが、$D_0 = 400 \text{ cm}^2/\text{年}$, $\lambda = 1.5$</p> <p>① w の及ぼす影響と D_0 の値が、2007 年制定版とは異なる。 ② 使用性の照査で鉄筋量などを決定しているため、$(w/w_a)^2$ は 1.0 に近くなり、$(w/w_a)^2 = 1.0$ とした改訂をしている。 ③ D_0 は、水中における拡散係数の概算値として $400 \text{ cm}^2/\text{年}$ を用いており、2007 年制定版の $200 \text{ cm}^2/\text{年}$ を変えている。 ④ その結果、w/l の算定式に乗じていた 3 と、D_0 の変更に伴い計算結果が 0.5 倍となることをまとめて、係数 $\lambda = 1.5$ (3×0.5) を導入している。</p> <p>(2) 結合材の種類ごとの見かけの拡散係数 D_k (水結合材比 W/B の一次関数)</p> $N: \log_{10} D_k = 3.0 (W/B) - 1.8$ $L: \log_{10} D_k = 3.5 (W/B) - 1.8$ $BB: \log_{10} D_k = 3.2 (W/B) - 2.4$ $FB: \log_{10} D_k = 3.0 (W/B) - 1.9$ <p>ここに、N: 普通ポルトランドセメント、L: 低熱ポルトランドセメント、BB: 高炉セメント B 種、FB: フライアッシュセメント B 種</p> <p>(3) 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d</p> $C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.1 C_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}}\right)\right) + C_i \quad \text{式(6)}$ <p>ここに、γ_{cl}, C_0, C_d, t は、2007 年制定版と同じだが、C_i: 初期塩化物イオン濃度</p> <p>(4) 鋼材の腐食発生塩化物イオン濃度 C_{lim} セメントの種類ごとで定式化 N: $C_{lim} = -3.0 (W/B) + 3.4$ BB または FB: $C_{lim} = -2.6 (W/B) + 3.1$ L: $C_{lim} = -2.2 (W/B) + 2.6$ シリカフェューム: $C_{lim} = 1.2$</p>

3. ケーススタディの要因と水準

ケーススタディには、構造物がボックスカルバートのように土中にある場合を採る。そして、表 - 1 には、RC 示方書の塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査についての 2007 年制定版と 2012 年制定版の要旨を対比して示す。なお、現行の 2017 年制定版は、2012 年制定版と同じ内容である。

塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査では、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d の鋼材の

腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることについては、両制定年版で同じ規定である。

RC 示方書による塩害環境下における鋼材腐食に対する照査において、いずれの制定年版もひび割れを考慮したコンクリートの塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d が、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k とひび割れを考慮した拡散係数の特性値の和で規定されていることは、同じである。しかしながら、その規定内容は RC 示方書の制定年版によって、以下に述べるように

表 - 2 ケーススタディ

		Case 1 2012 年制定版に準拠	Case 2 2007 年制定版に準拠	Case 3 混成
見かけの 拡散係数	D_{cr}	2012 年制定版に準拠	2007 年制定版に準拠	2007 年制定版に準拠
	D_k	2012 年制定版に準拠	2007 年制定版に準拠	2012 年制定版に準拠
C_{lim}		2012 年制定版に準拠	2007 年制定版に準拠	2012 年制定版に準拠
C_i		0.3 kg/m ³ (2012 年制定版)	0.0 kg/m ³ (考慮しない)	0.3 kg/m ³ (2012 年制定版)

改訂されている。

すなわち、ひび割れを考慮した拡散係数の特性値が、2012 年制定版では 2007 年制定版から大きく改訂されており、表 - 1 には、その内容を 2007 年制定版では ① と ② に、2012 年制定版では ① から ④ に、改訂資料など^{10, 11)}に基づいて注記として示している。

そして、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k は、水結合材比 W/B により 2007 年制定版では二次関数で、2012 年制定版では一次関数でそれぞれ規定されている。

RC 構造物中の塩化物イオンの移動を、Fick の拡散方程式で算定する方法については、両制定年版で同じである。しかしながら、2012 年制定版では 2007 年制定版には無い、初期塩化物イオン濃度 C_i を一般に 0.30 kg/m³ とし、鋼材位置における塩化物イオンの設計値 C_d を算定する際に加味する方法を採っている。

また塩化物イオンの鋼材の腐食発生限界濃度 C_{lim} は、2007 年制定版は一定値の 1.2 kg/m³ であるが、2012 年制定版はセメントの種類ごとに水結合材比 W/B で規定されている。

ケーススタディのケースを表 - 2 に示す。Case1 が 2012 年制定版に、Case2 が 2007 年制定版にそれぞれ準拠している。Case3 は、両ケースの混成であり、本文で提案するものである。2012 年制定版に準拠していた Case1 から、ひび割れを考慮した拡散係数の特性値を D_{cr} と表し、 D_{cr} のみに 2007 年制定版の特性値を採用したものである。

前記の各ケースの共通条件と試算水準を表 - 3 に示す。共通条件は、コンクリートの設計基準強度、高炉セメント B 種を用いた水セメント比、鉄筋の配置中心間隔、鉄筋の径とした。そして、ひび割れ幅の設計限界値 w_a は 0.005 c とし、設計耐用年数は 50 年とした。なお、環境が厳しい場合のひび割れ幅の設計限界値 w_a は、2007 年制定版と 2012 年制定版ではかぶり c の 0.0035 倍が明示されていたが、2017 年制定版ではその値が示されていないため、本文では 0.005 倍のみを用いている。

また本ケーススタディでは、高炉セメント B 種を用いて水セメント比が 34.5 % のコンクリートであるため、表 - 1 で示した鋼材の腐食発生塩化物イオン濃度 C_{lim} は 2012 年制定版では 2.2 kg/m³ となる。この値は、2007 年制定版での一定値の 1.2 kg/m³ とは大幅に緩い値となっている。

試算水準は、かぶり c とコンクリートの表面の想定塩化物イオン濃度 C_0 をそれぞれ 3 水準とし、表 - 1 にも示したひび割れ幅に大きな影響を及ぼす鉄筋の応力度の増加量 σ_{se} を 7 水準に、膨張コンクリートを用いて引張鉄筋に導

表 - 3 共通条件と試算水準

共通条件	
コンクリートの設計基準強度 f'_c	40 N/mm ²
水セメント比 W/C (高炉セメント B 種)	34.5 %
鉄筋の配置中心間隔 c_s	100 mm
鉄筋の径 ϕ	16 mm
ひび割れ幅の設計限界値 w_a	0.005 c
ϵ'_{csd}	100 × 10 ⁻⁶
設計耐用年数	50 年
試算水準	
鉄筋の応力度の増加量 σ_{se} (N/mm ²)	80, 100, 120, 140, 160, 180, 200
ケミカルプレストレイン (膨張率) ϵ_{sp} (× 10 ⁻⁶)	-200, -100, 0, 100, 200, 250, 300, 400, 500, 600
かぶり c (mm)	70, 55, 35
表面の想定塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m ³)	13.0, 4.5, 2.0

入された膨張率のケミカルプレストレイン ϵ_{sp} を 10 水準にそれぞれ変化させた。なお ϵ_{sp} が負の値を入力することは、膨張率とは反対に収縮している場合を示している。また土中の条件では、かぶり c として 35 mm を用いることはないが、一般の使用条件についても加味して設定した。

なお、コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値である ϵ'_{csd} は、構造物がボックスカルバートのように土中にあることから共通条件として 100 × 10⁻⁶ と一定に置いている。ひび割れ幅の算定式を示す表 - 1 の式 (2) または式 (5) における σ_{se} は、鉄筋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である。したがって、膨張コンクリートを用いてケミカルプレストレイン ϵ_{sp} を導入した CPC 部材における σ_{se} は、厳密には引張鉄筋位置には圧縮応力度のケミカルプレストレスが導入されているため、その応力度が 0 の状態になるまで幾分か荷重の作用があり、引張鉄筋の応力度もそれに相当する分の増加がある。しかしながら、その増加分は一般に小さく、計算の簡便化のため、安全側に無視して、 ϵ_{sp} に対応する σ_{se} のみを使ってひび割れ幅を計算している^{5, 8)}。そのため、今回の試算では、 ϵ'_{csd} を構造物が土中にあることから共通条件として 100 × 10⁻⁶ に置いているが、 ϵ_{sp} と合算して、 ϵ_{sp} が -100 × 10⁻⁶ は、 ϵ'_{csd} として -200 × 10⁻⁶ の収縮が生じた膨張コンクリートを用いない RC 部材の場合に相当する。

4. 塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d

コンクリートの塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d を、図 - 3 および図 - 4 に示す。

図 - 3 に示す 2012 年制定版の設計拡散係数 D_d は、かぶり c には影響されず、鉄筋の応力度の増加量 σ_{se} が大きくなるほど大きくなり、またケミカルプレストレイン ε_{sp} が大きくなるほど直線的に小さくなる。そして、 σ_{se} が 80 N/mm² の場合には、 ε_{sp} が 500×10^{-6} から 600×10^{-6} に増加しても設計拡散係数 D_d の値が $0.051 \text{ cm}^2/\text{年}$ から減少しないのは、 ε_{sp} が 500×10^{-6} でひび割れが閉じてひび割れの影響が無くなり、 D_k のみが設計拡散係数 D_d に影響する状態になったことを示している。

2007 年制定版の設計拡散係数 D_d は、図 - 4 に示しているが、かぶりの影響も受け、かぶり c が 35 mm から 70 mm へ大きくなると、 D_d は小さくなる。そして、そのかぶり c が大きくなると D_d は小さくなる程度は、鉄筋の応力度の増加量 σ_{se} が大きいほど著しくなっている。式 (1) のひび割れ幅が拡散係数に及ぼす $(w/w_a)^2$ がかぶり c によって異なり、設計拡散係数 D_d に及ぼす影響が顕著になるためである。そして、 σ_{se} および ε_{sp} を変化させたときの設計拡散係数 D_d の範囲は、2012 年制定版に比べて 2007 年制定版のほうが広がっていることも確かめられる。

また、ひび割れを考慮した拡散係数の特性値が 0 となる図 - 3 および図 - 4 の中で " $D_d \geq D_k$ " で示したコンクリートの拡散係数の特性値 D_k は、2012 制定版が $0.051 \text{ cm}^2/\text{年}$ となり、2007 年制定版の $0.202 \text{ cm}^2/\text{年}$ に比べて約 1/4 と小さくなっていることも明瞭である。

5. 照査結果

塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査は、3. でも述べたように、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d の鋼材の腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比 C_d/C_{lim} に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0 以下であることを確かめることである。構造物係数 γ_i を 1.0 として、 C_d/C_{lim} を示したのが、図 - 5 である。飛沫帯の厳しい環境条件のコンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 C_0 が $13 \text{ kg}/\text{m}^3$ の場合には、かぶり c が 70, 55, 35 mm の 3 水準を、 C_0 が $4.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ の場合には、かぶりが 55 mm を例示した。

2012 年制定版では、想定塩化物イオン濃度 C_0 が $13 \text{ kg}/\text{m}^3$ の厳しい環境条件において、ケミカルプレストレイン ε_{sp} が 0 の RC 部材では、かぶり c が大きい 70 mm で、鉄筋の応力度の増加量 σ_{se} が $80 \text{ N}/\text{mm}^2$ の小さい荷重条件の場合でも、 C_d/C_{lim} が 2.4 を超え、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査を大幅に満足しないのである。この $80 \text{ N}/\text{mm}^2$ は、RC 示方書 [設計編：標準]³⁾ の 2 編 3 章で規定されている表 3.1.1 のひび割れ幅の検討を省略できる部材における永続作用による鉄筋応力度の制限値 σ_{st1} より小さい値である。

そしてかぶり c が 70 mm であっても、 C_d/C_{lim} が 1.0 以下を満足するには、 σ_{se} が $80 \text{ N}/\text{mm}^2$ の場合には ε_{sp} が 315×10^{-6} 以上、 σ_{se} が $100 \text{ N}/\text{mm}^2$ の場合には ε_{sp} が $415 \times$

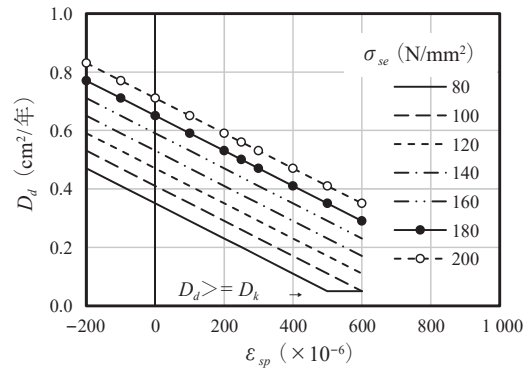
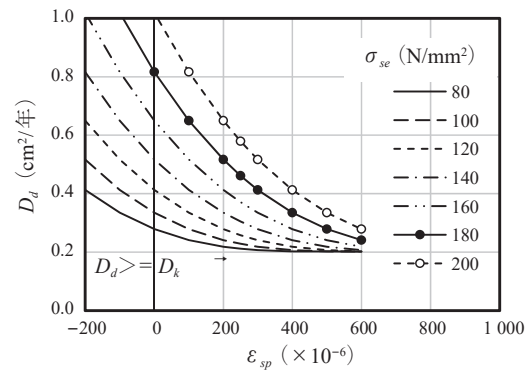
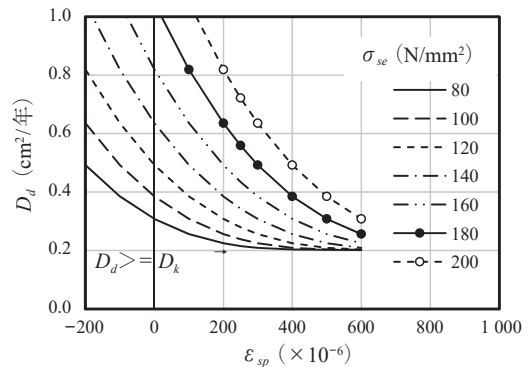


図 - 3 設計拡散係数 (2012 年制定版)



a) かぶり $c = 70 \text{ mm}$



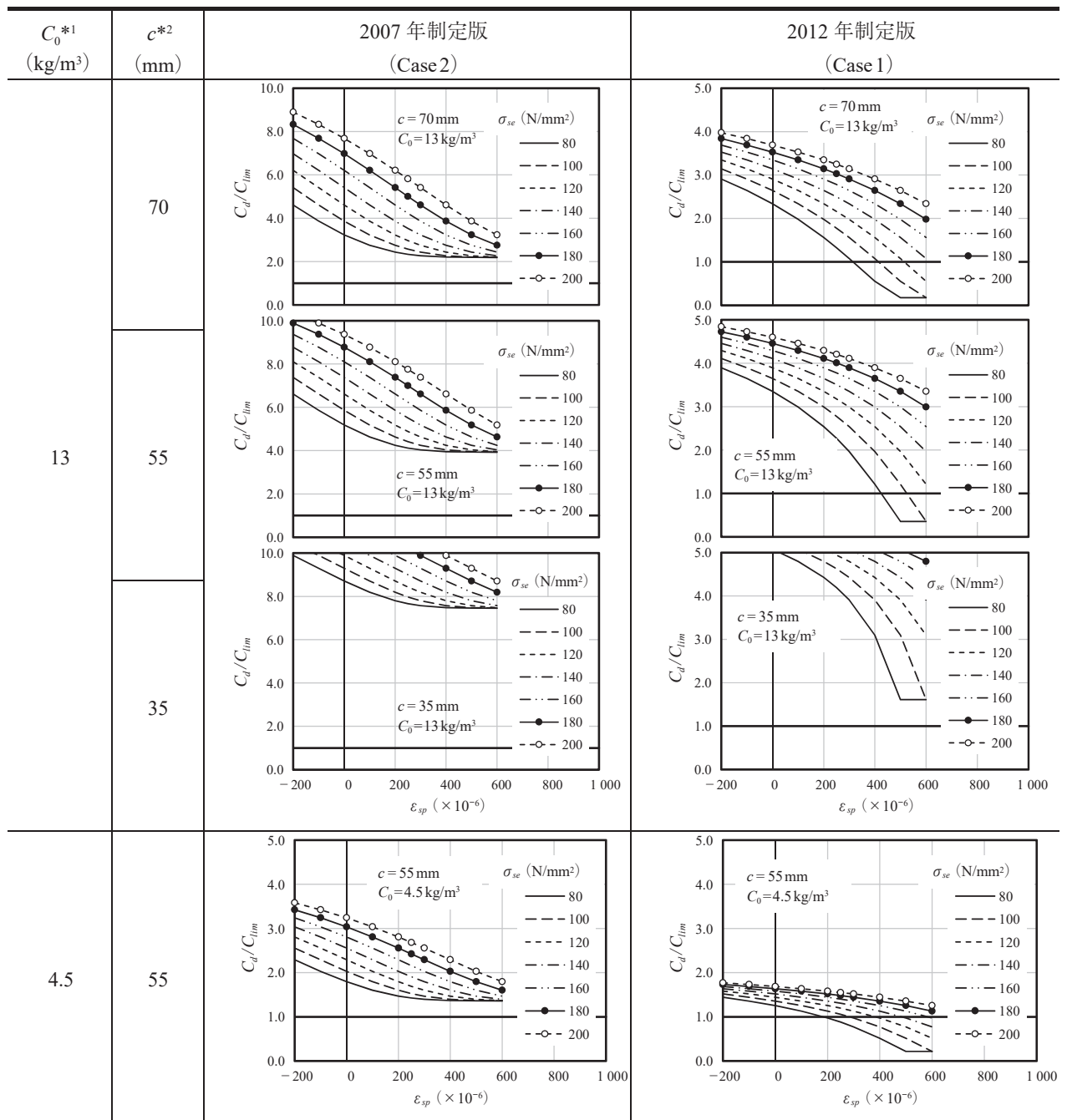
b) かぶり $c = 35 \text{ mm}$

図 - 4 設計拡散係数 (2007 年制定版)

10^{-6} 以上、そして σ_{se} が $120 \text{ N}/\text{mm}^2$ の場合には ε_{sp} が 515×10^{-6} 以上、それぞれ導入された場合のみであり、厳しい照査結果である。

かぶり c が 55 mm ではより厳しく、 σ_{se} が $80 \text{ N}/\text{mm}^2$ の場合に ε_{sp} が 425×10^{-6} 以上、 σ_{se} が $100 \text{ N}/\text{mm}^2$ の場合に ε_{sp} が 525×10^{-6} 以上それぞれ導入された場合のみ、鋼材腐食に対する照査を満足するのである。そしてかぶり c が 35 mm では、採用した水準の中で C_d/C_{lim} が 1.0 以下を満足する組合せが無いこととなっている。

2007 年制定版では、コンクリートの表面の想定塩化物イオン濃度 C_0 が $13 \text{ kg}/\text{m}^3$ の厳しい環境条件では、 C_d/C_{lim} の値を 2 倍にして、図 - 5 に表示している。かぶり c が 70 mm と大きい場合でも、採用した水準の中での C_d/C_{lim} の最小値が 2.0 を超える結果となっている。かぶり c が



*1 コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度, *2 かぶり

図 - 5 C_d/C_{lim} の照査の一例 (Case1 と Case2)

55 mm, 35 mm と小さくなると、鋼材腐食に対する照査結果がさらに厳しくなり、採用した水準の中での C_d/C_{lim} の最小値が、それぞれ4.0, 7.0以上と著しく大きくなっている。

コンクリート表面の想定塩化物イオン濃度 C_0 が 4.5 kg/m³ で、かぶりが 55 mm の場合でも、 C_d/C_{lim} が 1.0 以下の鋼材腐食に対する照査を満足する組合せは、コンクリートの表面の想定塩化物イオン濃度 C_0 が 13 kg/m³ の場合と同様に、採用した水準の中では無い結果となっている。ひび割れを制御しても、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k そのものが、2012年制定版よりも約4倍と大きいため、必要なかぶり c が大きくなっていたこ

とを示している。

曲げひび割れ幅に対する照査結果を、図 - 6 に示す。かぶりが 55 mm における w_d/w_a と ϵ_{sp} の関係を、 σ_{se} をパラメータにして示している。 w_d/w_a の照査は、2007年制定版と2012年制定版の両制定年版で同じ関係を示す。なお、表 - 3 の共通条件で述べた環境が厳しい場合のひび割れ幅の設計限界値 w_a としては、前述したように2007年制定版と2012年制定版ではかぶり c の 0.0035 倍が明示されていた。しかしながら、2017年制定版ではその値が無くなっているため、本文では 0.005 倍を用いている。

この図より、 w_d/w_a が 1.0 以下となる曲げひび割れ幅に

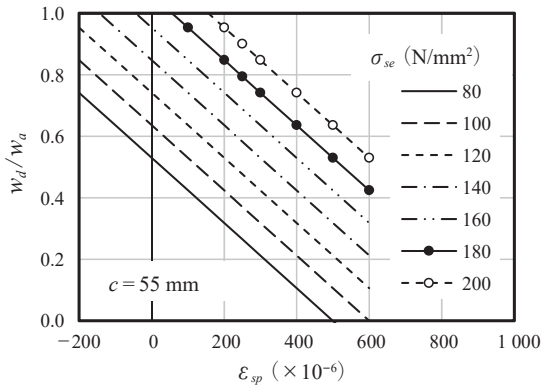


図 - 6 曲げひび割れ幅の w_d/w_a の照査 ($c = 55$ mm)

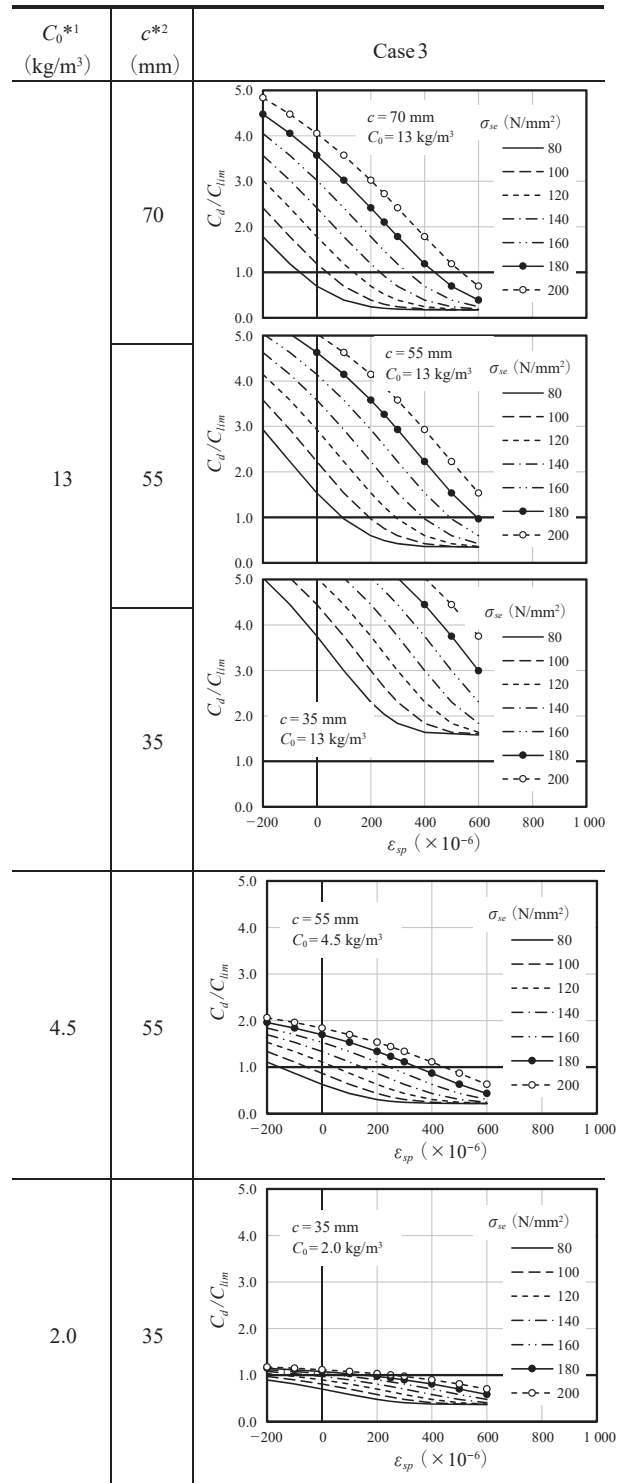
対する照査を満足する σ_{se} と ε_{sp} の組合せは、 C_d/C_{lim} が 1.0 以下を満足する鋼材腐食に対する照査に比べて多くなっている。そして、 ε_{sp} が 0 の RC 部材においては、 σ_{se} が 170 N/mm² を超えなければ、 w_d/w_a が 1.0 以下となり、ケミカルプレストレイン ε_{sp} を導入しなくても、曲げひび割れ幅に対する照査を満足しているのである。

すなわち、 w_d/w_a が 1.0 以下となる曲げひび割れ幅に対する照査を満足しても、 C_d/C_{lim} が 1.0 以下となる鋼材腐食に対する 2012 年制定版によるかぶり c が 55 mm の照査は、コンクリートの表面の想定塩化物イオン濃度 C_0 が 13 kg/m³ の厳しい環境条件では、鉄筋の応力度の増加量 σ_{se} が 80 N/mm² の小さい荷重条件でも RC 部材では満足しなく、ケミカルプレストレイン ε_{sp} を 425×10^{-6} 程度導入した CPC 部材においてはじめて満足するのである。この 80 N/mm² は、前述したように、RC 示方書で規定されているひび割れ幅の検討を省略できる部材における永続作用による鉄筋応力度の制限値 σ_{sl} より小さい値である。そしてかぶりを 70 mm に増加した照査は、鉄筋の応力度の増加量 σ_{se} が 80 N/mm² の小さい荷重条件でも、 ε_{sp} を 315×10^{-6} 程度導入した CPC 部材においてはじめて満足するのである。

また C_0 が 4.5 kg/m³ の環境条件でも、2012 年制定版によるかぶり c が 55 mm の照査は、 σ_{se} が 80 N/mm² の小さい荷重条件でも、RC 部材では満足しない。そして CPC 部材では、 σ_{se} が 80 N/mm² で、 ε_{sp} を 190×10^{-6} 程度導入してはじめて満足するのである。

このように、2012 年制定版による鋼材腐食に対する照査においては、曲げひび割れ幅に対する照査に比較して著しく相違する場合がある。そして、コンクリートの表面の想定塩化物イオン濃度 C_0 が 13 kg/m³ だけでなく、4.5 kg/m³ の鋼材の腐食環境条件においてもあることが示される。

また、2007 年制定版の鋼材腐食に対する照査結果は、2012 年制定版以上に曲げひび割れ幅に対する照査と著しく相違している。図 - 3 および図 - 4 で示したように、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k が、2012 制定版の 0.051 cm²/年に対して、2007 年制定版は 0.202 cm²/年と約 4 倍と大きくなっていることが主原因である。設計拡散係数 D_d に及ぼす曲げひび割れ幅を減少させることを積極的に評価している D_{cr} の値は、 D_k の値



*1 コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度、*2 かぶり

図 - 7 C_d/C_{lim} の照査の一例 (Case3)

の相違ほどではないことによる。

6. 曲げひび割れ幅に対する照査と鋼材腐食に対する照査の著しい相違を小さくする方法

性能照査型設計方法が導入されている現行の RC 示方書では、照査の目的が異なるため、曲げひび割れ幅に対する照査に合格しても鋼材腐食に対する照査を満足できない場

合が生じる。しかしながら、5. で報告したケーススタディの結果から、コンクリートの表面の想定塩化物イオン濃度 C_0 が 13 kg/m^3 だけでなく 4.5 kg/m^3 の鋼材の腐食環境条件においては、かぶり c を大きくとって、鉄筋の応力度の増加量 σ_{se} が RC 示方書 [設計編：標準]³⁾ の 2 編 3 章で規定されている表 3.1.1 のひび割れ幅の検討を省略できる部材における永続作用による鉄筋応力度の制限値 σ_{s11} より低い 80 N/mm^2 の小さい荷重条件でも、鋼材腐食に対する照査を満足できない場合があることを報告した。

このひび割れ幅の検討を省略できる鉄筋応力度の制限値 σ_{s11} は、昭和 61 年制定版から導入された耐久性を確保することも含めた使用限界状態に対する検討において、使用限界状態の検討を省略できる鉄筋応力度の増加量の制限値^{12, 13)} に対応するものであると考えられる。この鉄筋応力度の増加量の制限値は、それまでの耐久性の優れたコンクリート構造物の実績^{14~16)}などを参考にして規定されたものである。なお使用限界状態は、終局限界状態と疲労限界状態とともに、限界状態設計法を構成していたのである。

小さい荷重条件において、鋼材腐食に対する照査と曲げひび割れ幅に対する照査の両照査方法による結果に著しい相違があることは、これまでの耐久性に優れたコンクリート構造物の実績を照査方法に反映させていないことになる。このような著しい相違を減少させるために、鋼材腐食に対する照査において、ひび割れを考慮した拡散係数の特性値 D_{cr} に、ひび割れ幅を小さくすることによる効果を積極的に評価する方法を用いることが考えられる。ひび割れ幅 w が塩化物イオンの拡散に及ぼす影響が、2012 年制定版では 1 次式で示されているのに対し、高次の式で示すことにより、微小なひび割れを介しての拡散で規定している塩化物イオンの移動が大きく制限されるのである。そして、微小なひび割れであるほど、コンクリートの自己治癒効果も大きくなって、塩化物イオンの移動が小さくなることも期待できるのである。

ひび割れを考慮した拡散係数の特性値 D_{cr} におけるひび割れ幅の影響に言及した報告は、2012 制定版の RC 示方書の改訂資料¹⁰⁾を除き皆無である。拡散係数ではないが、設計ひび割れに関する耐久性ポイントは、コンクリート構造物の耐久設計指針 (試案)¹⁷⁾、同指針 (案)¹⁸⁾において、(永久荷重による曲げひび割れ幅/許容値)の 2 乗の式で評価している。そして、表 - 1 に示したように、2007 年制定版の RC 示方書では、(ひび割れ幅/ひび割れ間隔)の (w/l) に、(ひび割れ幅/ひび割れ幅の設計限界値)の 2 乗の $(w/w_a)^2$ を乗じた式で評価していた。2012 年制定版では、使用性の照査で鉄筋量などを決定しているため、 $(w/w_a)^2$ は 1.0 に近くなり、 $(w/w_a)^2 = 1.0$ に改訂している^{2, 10)}。この改訂は、ひび割れ幅に対する照査を含めた使用性の照査は、鋼材腐食に対する照査を含めた耐久性の照査の前提ではあるが、 $(w/w_a)^2 = 1.0$ としたことにより、2007 年制定版で意図していた鋼材腐食に対する照査に対しては (w/w_a) を 1.0 より小さくして適応させること^{1, 19)}を妨げていると考えられるのである。

以上のような考えにより、2012 年制定版において、 D_{cr} の

みを 2007 年制定版の値を用いて、表 - 2 に示した Case3 を検討する。すなわち、照査方法は、前述したように 2012 年制定版に準拠するものの、ひび割れを考慮した拡散係数の特性値 D_{cr} のみに 2007 年制定版のひび割れ幅 w が拡散係数 D_{cr} に及ぼす影響に $(w/w_a)^2$ も考慮した値を採用する。そして、コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k は 2012 年制定版を用い、 D_k と D_{cr} の和を、ひび割れを考慮したコンクリートの塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d として用いている。その結果を図 - 7 に示す。

飛沫帯の厳しい環境条件のコンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 C_0 が 13 kg/m^3 の場合では、かぶり c が 35 mm では鋼材腐食に対する照査を満足できないものの、かぶり c を 55 mm 、 70 mm と増加させると、 C_d/C_{lim} が 1.0 以下の鋼材腐食に対する照査を満足する σ_{se} と ε_{sp} の組合せが多くできているのである。たとえばかぶり c が 70 mm の場合は、 σ_{se} が 80 N/mm^2 の荷重作用が小さいとケミカルプレストレインを導入しない RC 部材でも満足している。そして σ_{se} が増加して 120 N/mm^2 の荷重作用では、 ε_{sp} を 150×10^{-6} 以上導入すれば、鋼材腐食に対する照査を満足することになる。

そして、コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 C_0 が 4.5 kg/m^3 の場合で、かぶりが 55 mm における C_d/C_{lim} は、 σ_{se} が 110 N/mm^2 を超えなければ、RC 部材でも、1.0 以下を満足するのである。 σ_{se} が 110 N/mm^2 を超える場合は、適宜ケミカルプレストレインを導入し、例えば σ_{se} が 180 N/mm^2 の場合で、 ε_{sp} を 300×10^{-6} 以上導入すれば、鋼材腐食に対する照査を満足することになる。

この設計耐用年数が 50 年で、かぶり c が 55 mm の鋼材腐食に対する照査に対比して、図 - 6 から w_d/w_a が 1.0 以下となる曲げひび割れ幅に対する照査は、 σ_{se} が 180 N/mm^2 の場合で、 ε_{sp} を 20×10^{-6} 以上とすれば満足することが示される。鋼材腐食に対する照査のほうがまだ厳しいものの、曲げひび割れ幅に対する照査を満足する条件との相違が小さくなっていることが示されるのである。

コンクリート表面の想定塩化物イオン濃度 C_0 が 2.0 kg/m^3 の場合のかぶり c が 35 mm における C_d/C_{lim} についても、図 - 7 に併記する。このような緩やかな環境条件下では、 σ_{se} が 140 N/mm^2 を超えなければ、ケミカルプレストレインを導入しない RC 部材でも、 C_d/C_{lim} は 1.0 以下を満足す

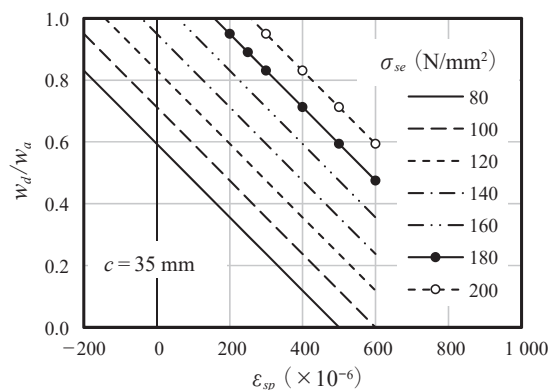


図 - 8 曲げひび割れ幅の w_d/w_a の照査 ($c = 35 \text{ mm}$)

るのである。この場合は、 w_d/w_a が1.0以下となる曲げひび割れ幅に対する照査についても、図-8に示すように、 σ_{se} が150 N/mm²を超えなければ、ケミカルプレストレインを導入しないRC部材でも満足し、鋼材腐食に対する照査と曲げひび割れ幅に対する照査の相違がほぼ無くなっている。

7. おわりに

RC示方書の2012年制定版と2007年制定版を用いたRC構造物の鋼材腐食に対する照査におけるひび割れの評価について、ケーススタディした結果を報告した。その際に、現行の2017年制定版は、2012年制定版を踏襲しており、2012年制定版においてひび割れを考慮したコンクリートの塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d について、2007年制定版から改訂している点を注視した。すなわち、表-1の2012年制定版の(1)に示したように、使用性の照査におけるひび割れ幅に対する照査では w_d/w_a を1.0以下とすることにより、ひび割れ幅が拡散係数に及ぼす $(w/w_a)^2$ の項を1.0とした改訂を2012年制定版で行っていることについて、主として検討した。そして、小さい荷重条件においても、ひび割れ幅に対する照査を満足するものの、鋼材腐食に対する照査には大幅に満足できないといった両照査結果の著しい相違を示すケースが多く出てくることを報告した。この相違を小さくする方法として、ひび割れ幅を小さくする効果を $(w/w_a)^2$ として鉄筋コンクリート部材の拡散係数に反映させている2007年制定版の拡散係数の特性値 D_{cr} を用いることを提案し、以下の知見が得られた。

- (1) 厳しい環境条件下における鋼材の腐食に対する照査を行う際に、2007年制定版のようにひび割れ幅が拡散係数に及ぼす影響に $(w/w_a)^2$ のようなひび割れ幅を積極的に評価した拡散係数の特性値 D_{cr} を用い、また2012年制定版のコンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 D_k を採用することにより、照査を満足するケースが多くなる。
- (2) 2007年制定版のひび割れを考慮した拡散係数の特性値 D_{cr} を、2012年制定版の特性値に代えて採用して、コンクリートの塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d を用いると、ひび割れ幅に対する照査結果と鋼材腐食に対する照査結果の大きな相違が、RC示方書で規定されているひび割れ幅の検討を省略できる部材における永続作用による鉄筋応力度の制限値 σ_{sl} 以下の小さい荷重条件において小さくなる。そして、2012年制定版におけるひび割れ幅に対する照査と鋼材腐食に対する照査の大きい相違を、いずれの荷重条件に付いても小さくできる。

謝 辞

鋼材腐食に対する照査について、ゼニス羽田株式会社の横塚泰弘氏には、ひび割れ幅に対する照査と大きな相違があることを教示していただいた。また、株式会社中研コンサルタントの鈴木康範氏には、鋼材腐食に対する照査とひび割れ幅に対する照査の関連につき有益な知見をいただいた。付記して厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2008.3
- 2) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013.3
- 3) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2018.3
- 4) 栖原健太郎，辻 幸和，芦田公伸：膨張コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりのひび割れ幅の低減効果，セメント・コンクリート論文集，No.63，pp.483-490，2010.2
- 5) 栖原健太郎，辻 幸和，吉野亮悦，岡村雄樹：矩形断面RC梁の曲げひび割れ幅に及ぼすプレストレインの影響評価，コンクリート工学，Vol.53，No.2，pp.181-189，2015.2
- 6) 岡村 甫，辻 幸和：ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性，土木学会論文報告集，第225号，pp.101-108，1974.5
- 7) 辻 幸和：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究，土木学会論文報告集，第235号，pp.111-124，1975.3
- 8) 栖原健太郎，辻 幸和，芦田公伸：高強度異形鉄筋を用いたCPC梁の曲げひび割れ制御方法，コンクリート工学年次論文集，第32巻，No.2，pp.187-192，2010.7
- 9) 谷村 充，佐藤良一：高強度コンクリートの収縮低減によるRC部材の使用時曲げ性能の改善，セメント・コンクリート No.708，pp.26-32，Feb.2006
- 10) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 改訂資料 基本原則編・設計編・施工編，コンクリートライブラリー 138，2013.3
- 11) 丸屋 剛，上東 泰：耐久性照査入門② 耐久性照査の手法，コンクリート工学，Vol.49，No.7，pp.50-57，2011.7
- 12) 土木学会：昭和61年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，1986.10
- 13) 土木学会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定）改訂資料，コンクリートライブラリー 61，pp.196-228，1986.10
- 14) 谷内田昌照，石橋忠良，小林明夫：耐久性の優れたコンクリート構造物－鉄道構造物－，土木学会論文集 第360号/V-3，pp.11-26，1985.8
- 15) 大即信明，鈴木慎也：耐久性の優れたコンクリート構造物－港湾構造物－，土木学会論文集 第372号/V-5，pp.29-39，1986.8
- 16) 小林茂敏，河野広隆，丹野 弘：耐久性の優れたコンクリート構造物－道路構造物－，土木学会論文集 第378号/V-6，pp.35-46，1987.2
- 17) 土木学会：コンクリート構造物の耐久設計指針（試案），コンクリートライブラリー 65，1989.8
- 18) 土木学会：コンクリート構造物の耐久設計指針（案），コンクリートライブラリー 82，1995.11
- 19) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書 改訂資料，コンクリートライブラリー 129，2008.3

【2018年9月5日受付】