

プレストレスを導入したコンクリートの塩分浸透特性に関する基礎的研究

(株)高速道路総合技術研究所 工修 ○浅井 貴幸
(株)高速道路総合技術研究所 正会員 工修 青木 圭一

Abstract : In order to verify the effect on steel corrosion in concrete prestressed, the performed accelerated testing using the specimens was varied the amount of introduced prestressing of RC structure, PRC structure, and PC structure, was rated penetration characteristics of chloride ions. As a result, in the promotion conditions in 8 to 24 cycles, introducing stress of the prestress in the PRC specimens 4N/mm^2 above, chloride ion penetration resistance better than RC specimen, and a comparable PC specimen tend to be could be confirmed. By confirming the reproducibility of the actual phenomenon by exposure test, to verify that the prestressed introduced may contribute to the effect of improving the durability of concrete structures in the future.

Key words : Prestressed Reinforced Concrete, test of drying out and soaking alternate, apparent diffusion coefficient of chloride ion

1. はじめに

NEXCOのPC橋においては、比較的低いレベルのプレストレスを導入することにより、ひび割れを制御するプレストレスト鉄筋コンクリート構造（以下、PRC構造という。）を積極的に採用している。引張応力を生じさせないプレストレストコンクリート構造（以下、PC構造という。）と比べると、PRC構造では導入プレストレスを減少させることができるため、コンクリートのクリープによる拘束力も減少し、連続多径間化が可能となる¹⁾。また、鉄筋コンクリート構造（以下、RC構造という。）と比べると、道路橋示方書・同解説²⁾の記載のとおり、クリープ及び乾燥収縮による影響の改善や、鉄筋が密に配置されることによる施工性の低下を改善させることが可能であり、より耐久性の優れた構造物となる。



写真-1 PC桁の局所的な劣化
(排水管からの漏水)

一方で、PC橋の既設構造物の現状は、写真-1に示すような凍結防止剤の散布による塩害が顕著化しており、期待する耐久性を有しない構造物も多数みられる。このため、既往技術を再評価し、既存コンクリート構造物の耐久性の評価、ならびに補修技術の高度化を図ることは、今後、増大する既存ストックに対して、維持管理の合理化が図れると考える。また、PC構造やPRC構造のような持続圧縮応力が生じるコンクリートに対して、外的劣化因子のコンクリート内部への浸透度合いなど、物質移動抵抗性にプレストレス導入が及ぼす影響について検討された事例が少ない^{3) 4)}。

そこで、コンクリートに導入されるプレストレスが鋼材腐食に与える影響を検証するために、RC構造、PRC構造、PC構造のプレストレス導入量を模擬した供試体に対して、高濃度の塩水を用いた乾湿繰返し促進試験を実施し、塩化物イオン浸透特性の評価に関する基礎的研究を行った。

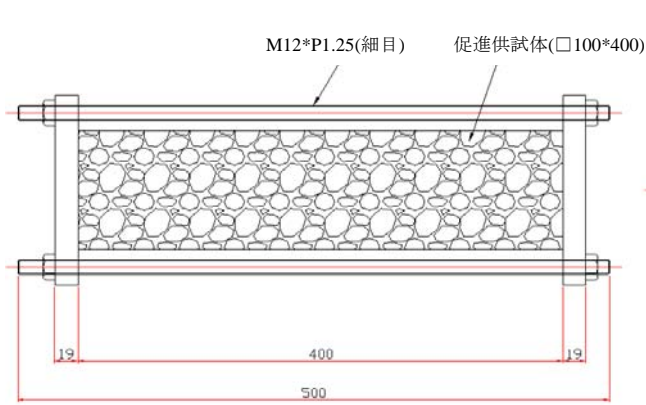


図-1 供試体の形状

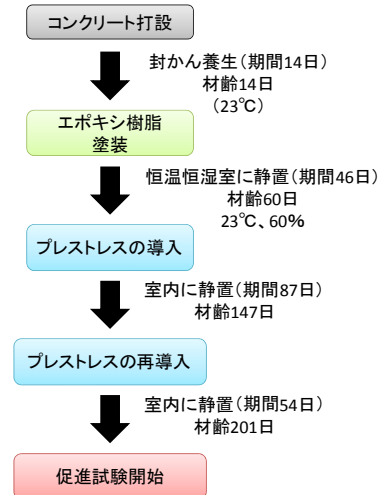


図-2 供試体の作製フロー

2. 試験概要

2.1 PRC 供試体作製

供試体の形状を図-1 に示す。供試体は、両端にプレストレス導入用のプレートを設置し、その四隅には M12 のステンレスボルトを取付けて、導入プレストレスが保持できる構造とした。

供試体に使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。供試体は、プレストレスの導入に伴う影響を検証することを目的に、RC 供試体も比較対象となるため、全て表-1 に示す同一配合のコンクリートとした。圧縮強度に関しては、試験結果より標準養生供試体の材齢 7 日で 31.1 N/mm²、材齢 28 日で 40.5 N/mm²であった。

図-2 に供試体の作製フローを示す。乾湿繰返しの促進試験によるコンクリートの塩分浸透状況を検証するために、供試体の 1 面から塩化物イオンを浸透させ、残りの面はエポキシ樹脂によるコーティングを施している。

プレストレスの導入は、油圧ジャッキを用いて所定の荷重を負荷し、固定ボルトによって導入プレストレス量を保持する方法とした(写真-2)。プレストレスの導入量は、固定ボルトに貼付したひずみゲージによって計測した。プレストレス導入後、クリープや乾燥による供試体の収縮量をコンタクトストレインゲージによって計測し、その収束状況を観察した。その後、ひずみが安定した時点で、ロス分のプレストレスを再度導入した。

導入するプレストレス量を表-2 に示す。PC 構造および PRC 構造の模擬供試体に導入するプレストレス量は、実際の橋梁で採用されている実績を参考に設定した。本試験では、使用したコンクリートの圧縮強度が 40N/mm²であることを考慮し、PC 供試体で 8N/mm²、PRC 構造では 2 種類 (2 N/mm², 4 N/mm²) のプレストレスを導入した。なお、比較用の RC 供試体は、導入応力を 0N/mm²とした。

表-1 コンクリートの配合 (f'_{ck}=40N/mm², 普通コン)

W/C	s/a	Air	W	C	S	G	Ad
%	%	%	kg/m ³				
48.6	48.2	4.5	161	331	873	957	5.26
C: 普通ポルトランドセメント (住友大阪セメント)				Ad: ポゾリス No.70			
S: 砕砂 (富士宮市上稲子産)			G: 砕石 (富士宮市上稲子産)				

表-2 供試体の本数と導入プレストレス量

種別	プレストレス導入応力	供試体本数	応力比率
RC 供試体	0 N/mm ²	5 本	0.00 f' _{ck}
PRC 供試体①	2 N/mm ²	5 本	0.05 f' _{ck}
PRC 供試体②	4 N/mm ²	5 本	0.10 f' _{ck}
PC 供試体	8 N/mm ²	5 本	0.20 f' _{ck}



写真-2 プレストレス導入

2.2 促進試験方法

高速道路の塩害は、主に凍結防止剤を散布する環境下において生じることが多い。また、塩化物イオンをコンクリートへ浸透させる促進方法として、最も厳しい条件は乾湿繰返しの環境である。本検討では、これらの条件や方法を考慮し、促進環境条件を表-3のとおり設定した。

促進試験のサイクルは、図-3 に示すとおり表-3 の条件を1サイクルとしており、1週間で2サイクルとなる。本試験では、40サイクルまで促進試験を実施している。

乾湿繰返し試験の状況を写真-3 に示す。本試験装置は3つの槽からなり、塩水を上流槽に入れ、供試体を下流側の2槽に入れる構造である。浸せき中の温度調整は上流槽で行い、それを常時循環させることで浸せき状態を維持している。また、乾燥状態では送風機により風を送ることで、強制的に乾燥させる仕組みとしている。

2.3 試験項目

本試験では、促進試験によるコンクリート中の塩化物イオン濃度に着目し、以下の項目について試験を行った。

(1) 塩化物イオン含有量

JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」の塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法により、供試体の各深さの塩化物イオン含有量を測定した。図-4 に試料の採取位置を示す。測定に用いる試料は、供試体の側面より浸透する塩化物イオンの影響を可能な限り排除するため、供試体から中央の横 50mm×長さ 200mm×各深さの範囲を乾式カッターで切断することで採取している。

塩化物イオン含有量の測定は、8サイクルごとの間隔で、8, 16, 24, 32, 40サイクルの合計5回の計測を実施した。

(2) 表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数

前述の塩化物イオン含有量より得られる各供試体の塩化物イオン浸透分布から、フィックの第2法則の拡散方程式を用いて回帰分析を行うことで、浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数と、表面塩化物イオン濃度とを算出した(図-5)。算出式は、式-1のとおりである。

表-3 促進環境条件

浸せき水の塩分濃度	NaCl 20%溶液
浸せき水温度	60±5℃
浸せき時間	24時間
乾燥温度	室温 (本試験では3℃~20℃)
乾燥時間	60時間

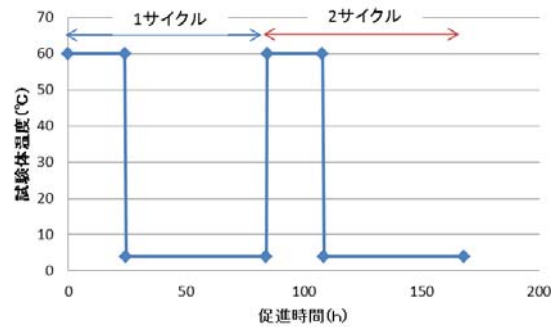


図-3 促進試験条件 (時間と温度の関係)



写真-3 乾湿繰返し試験 (試験装置の外観)

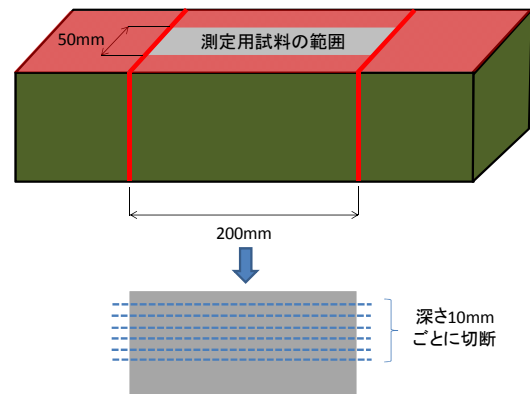


図-4 塩化物イオンの試料の採取位置

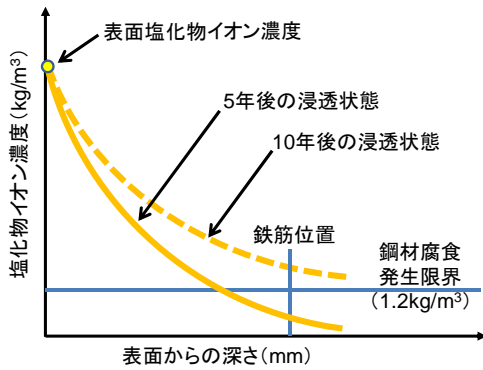


図-5 塩化物イオン拡散予測の概念図

$$C(x,t) = C_{a0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \quad (\text{式-1})$$

x : 暴露面から全塩化物イオンを測定した箇所までの距離 (cm)

t : 浸せき期間 (年)

C(x,t) : 距離 x (cm) , 浸せき期間 t (年) において測定されたコンクリート単位質量あたりの全塩化物イオン濃度 (kg/m³)

C_{a0} : 浸せき試験によるコンクリート表面の全塩化物イオン濃度 (kg/m³)

D_{ap} : 浸せき試験による見掛けの拡散係数 (cm²/年)

erf : 誤差関数

3. 試験結果

3.1 塩化物イオンの浸透分布

各供試体の塩化物イオン浸透分布を図-6に示す。図-6の横軸はコンクリート表面からの深さを表し、縦軸は試験により浸透した塩化物イオンの含有量を示している。

RC供試体に着目すると、サイクル数の増加と浸透分布とに相関性が確認できない傾向であった。この要因の一つとして、本試験では各サイクルで1本の供試体より塩化物イオン含有量を測定しているため、測定結果に誤差が生じやすいことが考えられる。

プレストレスを導入した供試体では、8サイクル以降において0~10mmの塩化物イオンの濃度が比

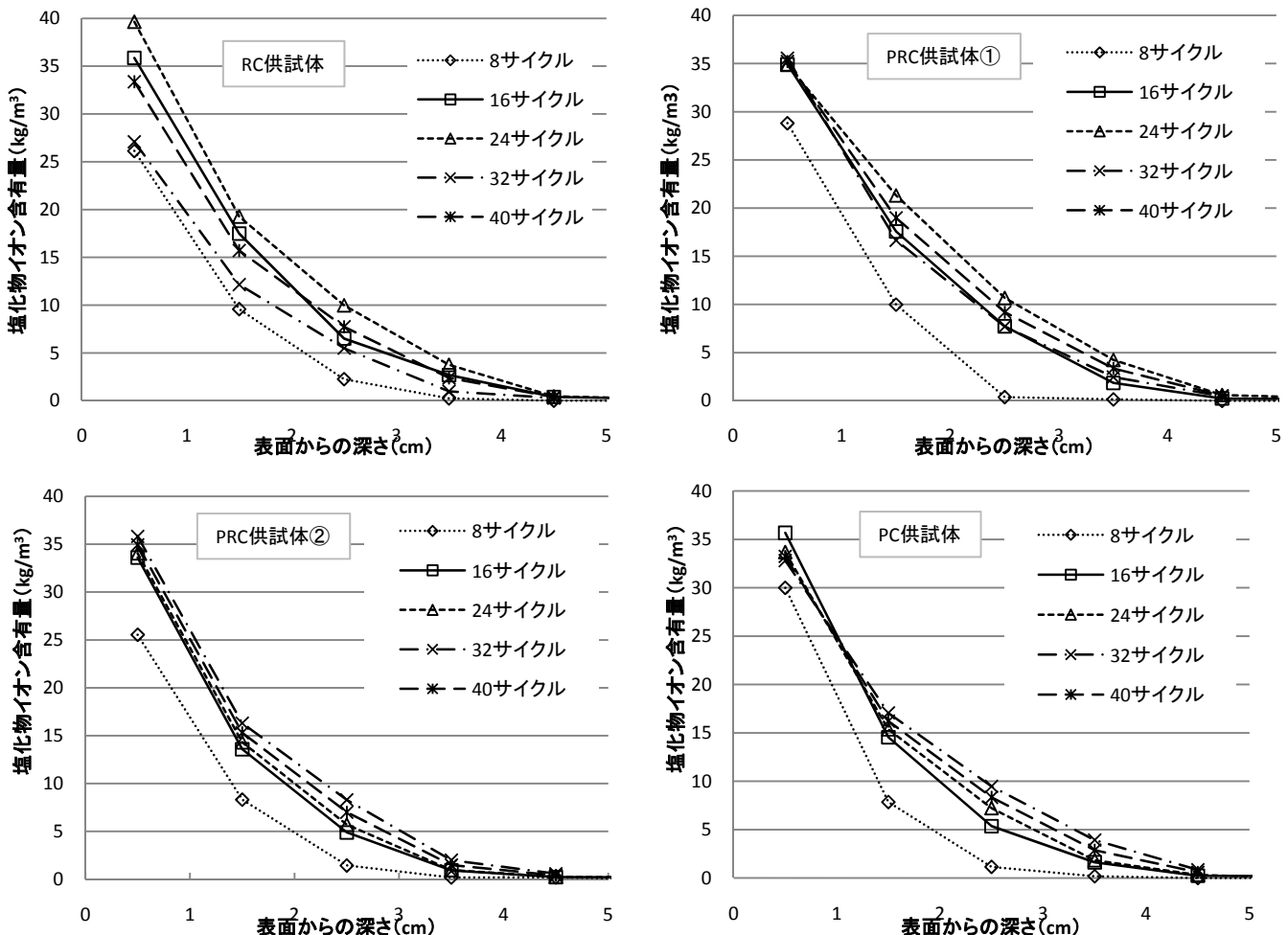


図-6 各供試体の塩化物イオン浸透分布

較的安定しており、サイクル数の増加に従って、徐々にではあるがコンクリート内部に塩化物イオンが浸透、拡散する傾向でなった。この要因としては、プレストレスの導入によってコンクリートより緻密な状態になった可能性が考えられる。しかし、前述のとおり塩化物イオンを測定した供試体の母数が1つであることによる測定誤差や、セメントの種別により異なる結果となる可能性が考えられるため、更なる要素試験による検証と、データの蓄積が必要であると考えられる。

ただし、各供試体ともサイクル数が増加しても、表面からの深さが40~50mmでは、塩化物イオンの濃度に大きな変化がなく、これより深いコンクリートの領域において塩化物イオンの浸透が停滞している結果となった。これは、16サイクル以降の塩化物イオン濃度に着目すると、表面からの深さが0~10mmにおいて、塩化物イオン含有量が $30\text{kg/m}^3 \sim 35\text{kg/m}^3$ と非常に多く存在していることが起因していると考えられる。本試験方法は、非常に短期間でコンクリート中に塩化物イオンを浸透させることができるため、促進方法としては優れているが、塩分供給量に対して時間をかけて徐々に内部に拡散する塩化物イオン拡散予測の理論に対しては、促進負荷が非常に過酷であったと推測される。このため、試験結果の塩化物イオン浸透分布においても、8~16サイクルまでにコンクリート内部に多くの塩化物イオンが浸透し、24サイクルまでは徐々に浸透するが、32、40サイクルでは浸透し難い状態（飽和状態）であったと考える。しかしながら、測定間隔を長くすることや、塩分供給量を小さくするなど、塩化物イオンの供給速度を低減させる促進条件を設定することで、これらの問題は解決することが可能であると考えられる。

3.2 表面塩化物イオンの濃度変化

前述の塩化物イオンの浸透分布の結果より、これ以降については8、16、24サイクルの試験結果について考察する。塩化物イオンの浸透分布より算出した表面塩化物イオン濃度を図-7に示す。図の横軸は、プレストレス導入量を応力で示している。各供試体の8サイクルの表面塩化物イオン濃度は $37 \sim 46\text{kg/m}^3$ と差が大きいが、16サイクルでは $44.7\text{kg/m}^3 \sim 47.9\text{kg/m}^3$ と誤差が少なくなった。一般的に、浸せき溶液や浸せき時間が同じであれば、各供試体に供給される塩化物イオンも同一であるため、表面塩化物イオン濃度もほぼ同等の値となる。試験結果より、乾湿繰返しの負荷が少ない8サイクルでは誤差が大きいが、16、24サイクルではバラツキが減少し、安定した傾向を示した。

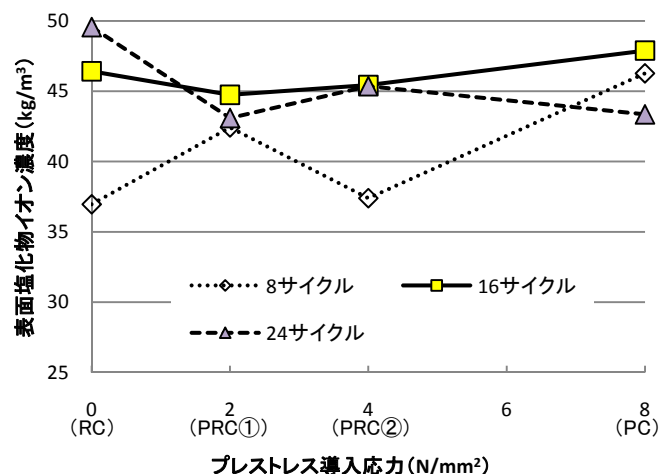


図-7 各供試体の表面塩化物イオン濃度 (算出値)

試験結果より、乾湿繰返しの負荷が少ない8サイクルでは誤差が大きいが、16、24サイクルではバラツキが減少し、安定した傾向を示した。

3.3 見掛けの拡散係数の変化

図-8は16、24サイクル時における各供試体の塩化物イオン浸透分布を示す。試験結果より、他の供試体と比較してプレストレスの導入量大きいPRC供試体②とPC供試体とでは、塩化物イオンの浸透が抑制され、コンクリート内部に拡散し難い傾向であった。なお、促進負荷が24サイクル時では、その抑制効果がより明確な結果であった。

図-9に8~16サイクル時に算出したコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を示す。本試験における見かけの拡散係数は、試験結果である塩化物イオン浸透分布の測定誤差や、回帰分析を用いることによる算出誤差を含むため、定量的な評価ではなく定性的な評価を行っている。図-9の結果より、応力比が小さいRC供試体およびPRC供試体①では、見掛けの拡散係数の平均が約 $10\text{cm}^2/\text{年}$ となるのに対して、プレストレス導入応力が 4N/mm^2 以上であるPRC供試体②およびPC供試体の場合は、その平均が約 $7\text{cm}^2/\text{年}$ であった。両者には約 $3\text{cm}^2/\text{年}$ の差が生じる傾向が確認できることから、

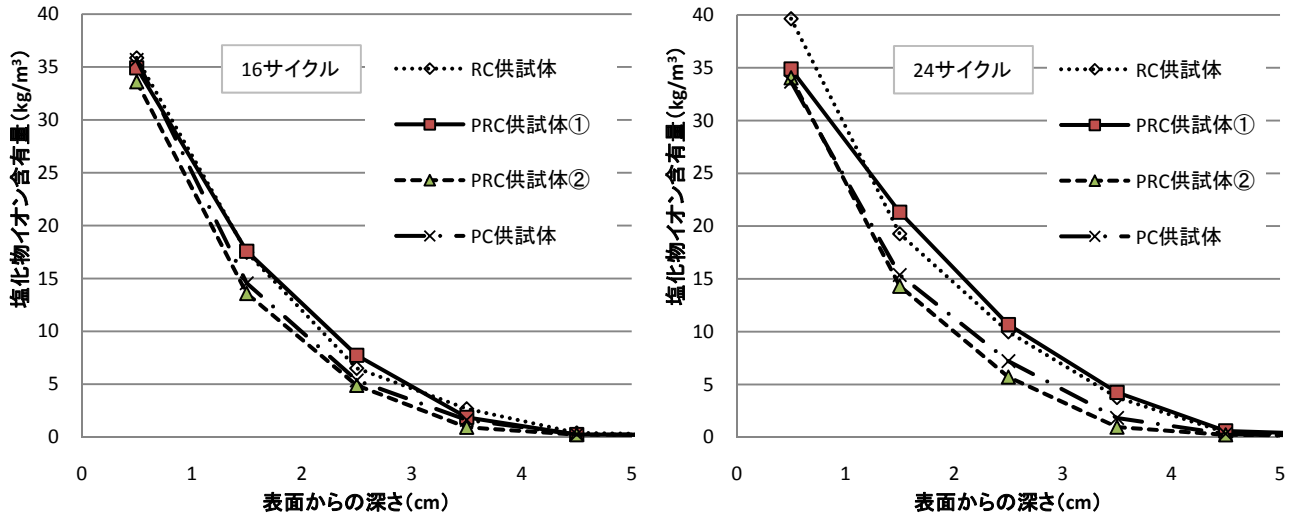


図-8 各供試体の塩化物イオン浸透分布 (16, 24 サイクル)

プレストレス導入量が 4N/mm^2 以上においては、コンクリート中の塩化物イオンの浸透抵抗性が向上し、コンクリート部材としての耐久性も向上していると推測される。

4. まとめ

本検討では、プレストレスの導入がコンクリートの鋼材腐食に与える影響を検証するために、導入プレストレスが異なる供試体で促進試験を実施し、塩化物イオン浸透特性の評価を試みた。

本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本試験での塩化物イオン供給速度では、24 サイクル目以降において促進負荷を増加させても、コンクリート内部の塩化物イオン含有量に大きな変化はなく、塩化物イオンの拡散が停滞する傾向であった。
- (2) 促進負荷が 8~24 サイクルにおいて、プレストレス導入応力が 4N/mm^2 以上の PRC 供試体では、RC 供試体よりも塩化物イオンの浸透抵抗性が向上し、PC 供試体と同程度となる傾向が確認できた。

今後は、暴露試験による実現現象の再現性や、促進負荷における塩化物イオンの供給速度を再度検証する要素試験等を実施し、プレストレス導入がコンクリート構造物の耐久性向上に及ぼす影響を定性的に評価する予定である。

参考文献

- 1) 例えば、水口和之：道路橋における PRC 構造について、プレストレストコンクリート, Vol. 34, No. 6, 1992. 11
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, pp232, 2013. 3
- 3) 杉山隆文, T. W. Bremner, T. A. Holm, 辻幸和：圧縮荷重下におけるコンクリートの透気性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, 1995
- 4) 迫井裕樹, 岡田賢司, 堀口敬：静的圧縮荷重下における繊維補強コンクリートの塩分浸透性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, 2005

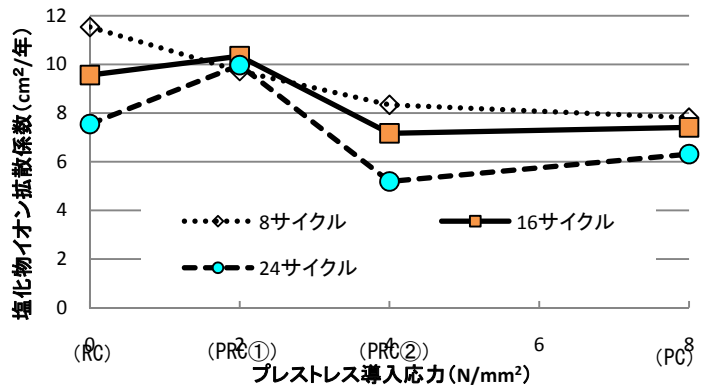


図-9 各供試体の見掛けの拡散係数 (8~24 サイクル)