

論文 プレストレスの繰り返し作用を受けるコンクリートの見掛けの拡散係数

齊藤 準平*1・立石 一洋*2・佐藤 元紀*2

要旨：プレストレスがコンクリートの塩分浸透特性に及ぼす影響を解明するために、PRC はり下縁領域をモデル化した供試体に対して、実構造物を想定して活荷重作用に伴うプレストレスの損失と再導入の繰り返し作用を施した後、塩水浸せき試験を実施した。その結果、プレストレスが繰り返し作用した場合はプレストレスが無い場合に比べ見掛けの拡散係数は低くなり塩分浸透抵抗性の向上が認められること、プレストレスの増加に伴い見掛けの拡散係数は低下し塩分浸透抵抗性は最大約 30%程度向上することが明らかとなった。

キーワード：プレストレス、繰り返し作用、見掛けの拡散係数、塩水浸せき試験

1. はじめに

PRC 構造は、プレストレストコンクリートの利点を経済的に得られることから、多くの橋梁構造に適用されている。構造機能の持続には鋼材腐食の原因である部材内の塩分浸透特性の評価が極めて重要であるが、PRC はり下縁領域におけるコンクリートの塩分浸透には、プレストレスやひび割れなどの影響が複雑に影響しあっている。著者は継続研究^{例えば 1)~5)}を通じて、単一あるいは複合的にそれら影響因子の条件を設定した実験的検討によって、PRC はり下縁領域におけるコンクリートの塩分浸透特性を定量的に明らかにし、適切に塩分浸透特性を評価できる式の構築を目指している。

現在、各影響因子と塩分浸透特性の関係に関しては、プレストレスの影響、すなわちプレストレスが作用したコンクリートの塩分浸透特性について検討した研究が極めて少ない状況にある。主なものとして、下村ら⁶⁾は、持続圧縮応力が応力強度比で 0.5 以下の場合では、コンクリートの物質移動抵抗性にほとんど負の影響を及ぼさないことを確認している。迫井ら⁷⁾は、付与応力の大きさによって塩分浸透抵抗性に優位に働く場合（圧縮強度比 (f_c 比) =30%) と不利に働く場合 (f_c 比=50%, 80%) の影響が現れることを明らかにしている。また、浅井ら⁸⁾は、プレストレス導入応力が 4N/mm² 以上 (f_c 比=10%) では、塩分浸透抵抗性が向上することを明らかにしている。しかし、PRC はりの塩分浸透特性に関するプレストレスの影響の解明のためには、さらに多くのプレストレスの作用状態や作用条件で定量的にその影響を検討する必要があると考える。

本稿は、プレストレスがコンクリートの塩分浸透特性に及ぼす影響を解明するために、PRC はり下縁領域をモデル化した供試体に対して、実構造物にける活荷重作用の影響を想定してプレストレスを繰り返し作用させた後、

塩水浸せき試験 (JSCE-G572)⁹⁾を行い、塩化物イオン (Cl⁻) 濃度分布とそれを基に算出した見掛けの拡散係数からプレストレスが塩分浸透特性に及ぼす影響を検討したものである。

2. 試験方法

2.1 プレストレスの繰り返し作用

(1) プレストレスの作用状態と作用条件

表-1 にプレストレスの作用状態と作用条件を示す。プレストレスの作用状態は、比較用にプレストレスが非導入の状態 (タイプ N)、実構造物を想定して活荷重作用に伴うプレストレスの損失と再導入の繰り返し後、プレストレスが損失された状態 (タイプ A) およびプレストレスが導入された状態 (タイプ AP) の計 3 状態とする。繰り返し作用回数は、可能な範囲で現実的な多回数のプレストレスを繰り返し与えることや、より顕著な傾向が取得できるという既往研究⁴⁾から判断し 100 万回とした。

プレストレスの作用条件は、プレストレスの損失と再導入の繰り返し (タイプ A)、ならびにその後のプレストレスの導入 (タイプ AP) に用いるプレストレスの大きさとした。その大きさは、それぞれの供試体における圧縮強度に対する導入応力の割合で示すこととし、これを圧縮強度比 (f_c 比) と定義する。プレストレスの大きさの違いの影響を検討するために、標準的に扱われるプレス

表-1 プレストレスの作用状態と作用条件

タイプ	供試体名	プレストレスの作用状態			プレストレスの作用条件 プレストレスの大きさ (圧縮強度比 (f_c 比))
		繰り返し作用	導入	繰り返し作用回数	
N	N	—	—	0 (回)	0 (%)
A	A-10	○	—	100万 (回)	10 (%)
	A-20	○	—	100万 (回)	20 (%)
	A-30	○	—	100万 (回)	30 (%)
AP	AP-10	○	○	100万 (回)	10 (%)
	AP-20	○	○	100万 (回)	20 (%)
	AP-30	○	○	100万 (回)	30 (%)

*1 日本大学 理工学部交通システム工学科准教授 博 (工) (正会員)

*2 日本大学 理工学部交通システム工学科

トレスの上限であり且つ材料の弾性域に相当する f_c 比=30%を上限として、表-1 に示すように f_c 比=10, 20, 30%と設定した。

(2) 供試体

プレストレスの繰返し作用を施す供試体は、図-1(a)に示すように、研究対象とした PRC はり下縁領域のコンクリートをモデル化したものである。本研究における実構造物の想定は、活荷重作用に伴うプレストレスの損失と再導入の繰返しのみとし、PRC はりのモデル化については、はりの下縁部における下縁から上縁方向に数十 cm 程度の領域を対象として、コンクリートをモデル化している。なお、実構造物では曲げを受けるため応力の繰返し作用時の応力変動量が下縁に比べて下縁より上縁方向の位置では小さくなるが、本研究の塩分浸透挙動の対象部分は下縁と下縁から上縁方向に 33mm の位置との間としたため応力変動量の差はほとんど無く、一様な圧縮応力の付与によるモデル化は妥当と判断した。

プレストレス導入直角方向の Cl⁻濃度分布の取得を可能とする供試体形状と寸法にするため、プレストレスを与える断面は1辺 100mm の正方形断面とした。プレストレスの繰返し作用後には両端の繰返し作用面から 25mm~125mm の部分を切り出して、タイプ A とタイプ AP の塩水浸せき試験用供試体とした。塩水浸せき試験用供試体は図-1(b)に示すように、タイプ N, A, AP ともに同一寸法、同一形状とした。塩水浸せき試験時のプレストレス導入のためにタイプ AP には円筒空洞が必要であるが、円筒空洞の有無がタイプ N, A とタイプ AP の塩水浸せき試験の結果に影響しないようにするため、すべての供試体の断面に打設時に予め円筒空洞を設置した。

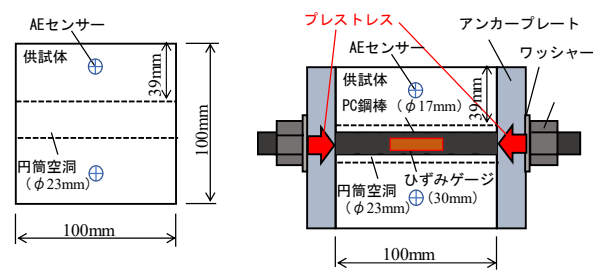
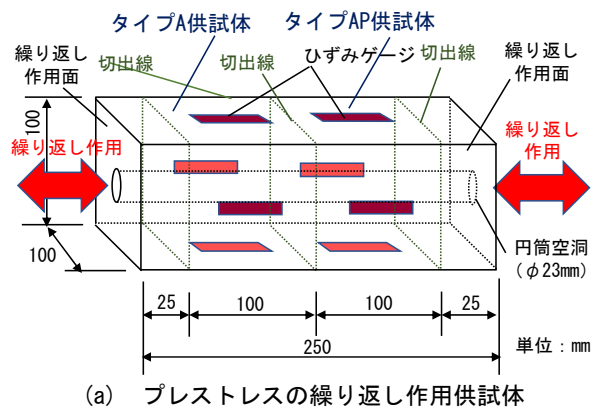
供試体の打設では、曲げ強度試験用供試体成形用型枠 (100mm×100mm×400mm) にアクリルプレートを用いて、供試体が精度良く作製できるように加工を施し、十分に振動締め固めを行った。なお、打設時の型枠底面が供試体下面になり、Cl⁻濃度の分析に用いられる。

(3) 配合と力学的性質

表-2 に供試体の配合と力学的性質を示す。水セメント比 (W/C) を 55%とし、細骨材のセメントに対する容積比 (S/C) を 300Vol%とするモルタルを材料とした。これは、塩分浸透への骨材の影響を少なくするためである。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は山砂(表乾密度 2.654g/cm³, 2.5mm ふるい通過)を用いた。打設後から 28 日まで封緘養生とした。

(4) プレストレスの損失と再導入の繰返し作用

プレストレスの損失と再導入の繰返し作用は油圧サーボ式疲労試験機を用いて行った。繰返し作用は荷重制御 (正弦波) で与えた。その際、供試体と試験機の接触面での端面摩擦による影響を除去するために減摩パ

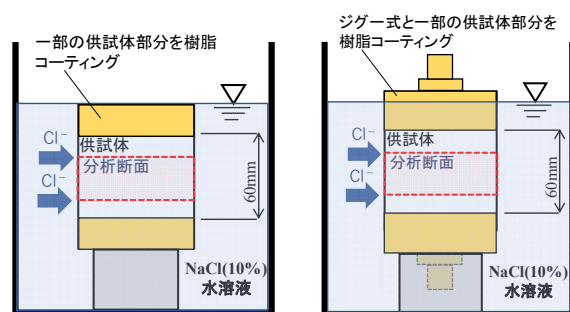


(b) 塩水浸せき試験用供試体
(左：タイプ N, A, 右：タイプ AP)

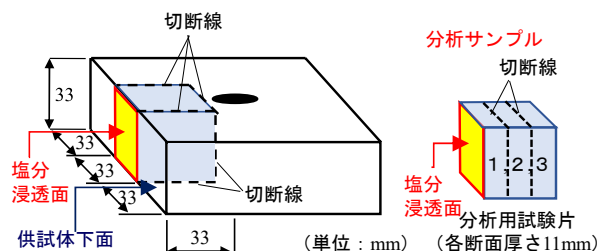
図-1 供試体

表-2 供試体の配合と力学的性質

W/C	S/C	単位量 (kg/m ³)			圧縮強度	単位容積質量
(%)	(Vol%)	水	セメント	細骨材	(N/mm ²)	(kg/m ³)
55	300	302.7	550.0	1387	37.90	1932



(a) 塩水浸せき試験模式図
(左：タイプ N, A, 右：タイプ AP)



(b) Cl⁻濃度分析サンプル (分析断面)

図-2 塩水浸せき試験概要図

ッド（テフロンシート）を施した。上限荷重は供試体と同一断面の供試体の圧縮強度試験結果を基準に設定 f_c 比に相当する荷重とし、下限荷重は上限荷重の 10% の大きさとした。繰り返し作用の速度は、予備試験によって試験機の荷重制御が可能な周波数を検討し、安定した荷重制御ができる 0.9Hz とした。繰り返し作用時の供試体の挙動を確認するために、繰り返し回数 1000 回ごとに図-1(a) に示す 4 つの側面に貼り付けたひずみゲージからひずみの値を取得した。

(5) タイプ AP におけるプレストレスの導入方法

タイプ AP におけるプレストレスの損失と再導入の繰り返し作用後のプレストレスの導入は、図-1(b) に示すように、1 本の PC 鋼棒の緊張によって塩水浸せき試験用供試体の断面と同一寸法のアンカープレートを紹介して、ナットを締めて導入した。プレストレスの大きさの管理は、4 つの側面のプレストレス導入方向に貼り付けたひずみゲージの平均ひずみを用いて行った。プレストレスの繰り返し作用供試体と同時に打設した同一寸法の 3 体の強度試験用供試体への圧縮強度試験から圧縮強度ならびに応力とひずみの関係を取得し、その応力とひずみの関係を基に、作用条件通りのプレストレスに応じたひずみになるようプレストレスを導入した。なお、プレストレス導入後はひずみの変化をモニタリングし、ひずみの変化が安定したことを確認した後に塩水浸せき試験に移行した。また、塩水浸せき試験前にはひずみゲージ周辺を磨いて接着剤やひずみゲージをすべて取り除き、供試体への塩分の浸透に影響のないように処置を施した。

2.2 衝撃弾性波試験

プレストレスによる内部損傷の影響を把握するため、塩水浸せき試験の直前に衝撃弾性波試験を行った。弾性波速度はコンクリート中の伝播速度から内部の損傷の有無を把握するものである。試験は図-1(b) に示すようにプレストレス導入直角方向に対し実施した。AE センサー近傍に打診棒によって衝撃を与え、AE センサー、プリアンプ、オシロスコープを用いて取得したセンサー 2 点間の衝撃弾性波の到達時間差と 2 点間の距離から弾性波速度を算出した。

2.3 塩水浸せき試験

(1) 供試体

図-2(a) に塩水浸せき試験模式図を示す。試験は JSCE G 572⁹⁾ に準じ、濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液中に塩水浸せき試験用供試体を 30 日間浸せきさせ、プレストレス導入直角方向の 4 面に塩分を浸透させた。塩水浸せき時は、タイプ AP 供試体には、プレストレス導入のためのアンカープレート、ワッシャー、PC 鋼棒（ネジ切り加工）およびナット等の金属の防錆のために、それら金属と塩分浸透面の一部（片側 20mm 程度）にエポキシ樹脂を被覆した。また、タイプ N, A には端面ならびにタイプ AP と同一部分に塩分浸透するように塩分浸透面の一部にエポキシ樹脂を被覆した。なお、全供試体の円筒空洞の内面にはエポキシ樹脂を被覆し、円筒空洞内からの Cl⁻ の浸透を防止する処置を施した。

脂を被覆した。また、タイプ N, A には端面ならびにタイプ AP と同一部分に塩分浸透するように塩分浸透面の一部にエポキシ樹脂を被覆した。なお、全供試体の円筒空洞の内面にはエポキシ樹脂を被覆し、円筒空洞内からの Cl⁻ の浸透を防止する処置を施した。

(2) Cl⁻ 濃度の分析

図-2(b) に Cl⁻ 濃度分析サンプルを示す。塩水への浸せき終了後は、図のように供試体下面となる 1 面から分析用サンプル 33mm×33mm の面積で奥行き 33mm の部分を乾式ダイヤモンドカッターで切り出した。Cl⁻ 濃度の分析（電位差滴定法）は JIS A 1154¹⁰⁾ に準じて行い、分析用サンプルを用いて塩分浸透方向の表層部から内部にかけての各断面の Cl⁻ 濃度を取得した。さらに、フィックの第 2 法則に基づいた拡散方程式の解を用いて回帰分析し、塩分浸透面の表面 Cl⁻ 濃度 C_0 ならびに見掛けの拡散係数 D_c を算出した。

3. 試験結果および考察

3.1 弾性波速度

図-3 に、塩水浸せき試験直前のコンクリート中のプレストレス導入直角方向の弾性波速度の平均値を示す。図によると、プレストレスを作用させたタイプ A, AP は、多少のばらつきはあるものの、タイプ N と比較して概ね同等で大きく低下する様相が見られず、また普通コンクリートの一般的な弾性波速度と比較してもその範囲内にあるため、内部損傷の発生が無かったものと判断される。

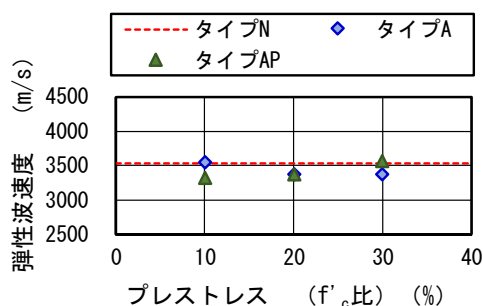


図-3 弾性波速度

3.2 Cl⁻ 濃度とプレストレスとの関係

(1) 平均 Cl⁻ 濃度

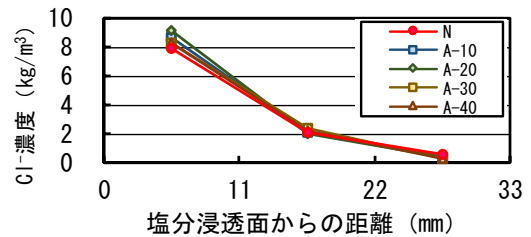
図-4(a) に、分析用試験片の断面 1, 2, 3 の平均 Cl⁻ 濃度とプレストレスの関係を示す。プレストレスの大きさは、分析サンプルの塩分浸透面のひずみの値を基に、強度試験で得られた応力とひずみの関係から f_c 比に換算した。タイプ A は繰り返し作用の最終計測回（約 100 万回時）の上限荷重時のひずみを用い、タイプ AP は浸せき試験直前のひずみを用いた。なお、以降の図表に示されるプレストレスはこのひずみから換算した f_c 比を用

いている。また、換算した f'_e 比が設定 f'_e 比より異なる理由は、クリープ、リラクセーション、プレストレスの繰返し作用や導入時の断面応力のばらつきなどが要因と考えられる。

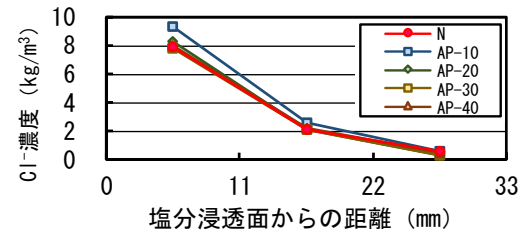
図より、プレストレスの影響を受けているタイプ A、AP の平均 Cl^- 濃度はタイプ N よりも高い値となる結果が示された。この結果は、プレストレスが塩分浸透抵抗性に負の影響を及ぼす、すなわちプレストレスが作用すると塩分が浸透しやすくなると評価しがちであるが、後述の見掛けの拡散係数 (3.3(2) 見掛けの拡散係数) による検討結果を踏まえると、この平均 Cl^- 濃度の結果のみによってそのように考えるのは危険といえる。また、図において、平均 Cl^- 濃度とプレストレスの大きさとの関係には相関がみられないことが認められた。これは、図-4(b) に示すタイプ N に対する各平均 Cl^- 濃度の割合とプレストレスの関係に併記した著者の既往研究²⁾のプレストレスの導入を継続させた結果 (タイプ P) から同様に確認でき、平均 Cl^- 濃度からプレストレスの塩分浸透特性への影響を捉えることは難しいことが示唆された。

(2) Cl^- 濃度

図-5 に Cl^- 濃度分布を、図-6 に分析用試験片の断面別の Cl^- 濃度とプレストレスの関係を示す。図-5、6 よ

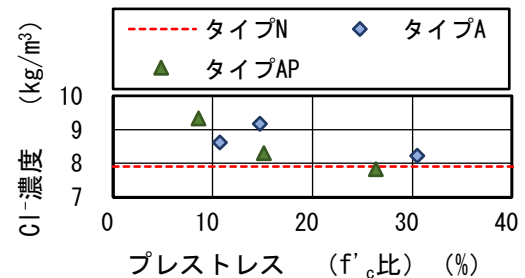


(a) タイプ N とタイプ A

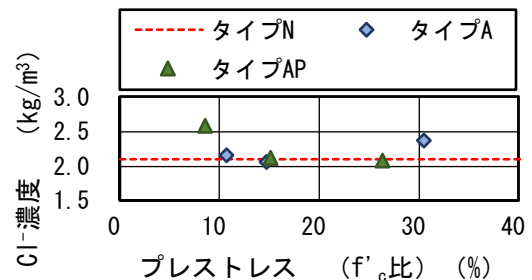


(b) タイプ N とタイプ AP

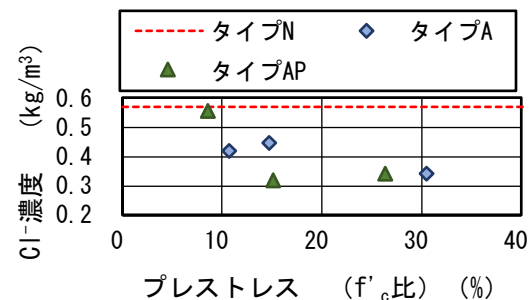
図-5 Cl^- 濃度分布



(a) 分析用試験片 断面 1
(塩分浸透面から 0~11mm)

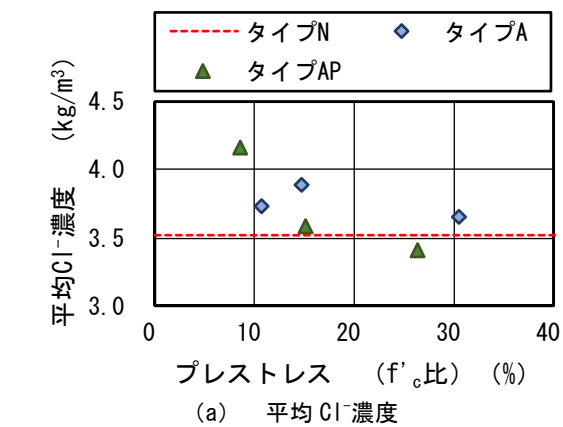


(b) 分析用試験片 断面 2
(塩分浸透面から 11~22mm)

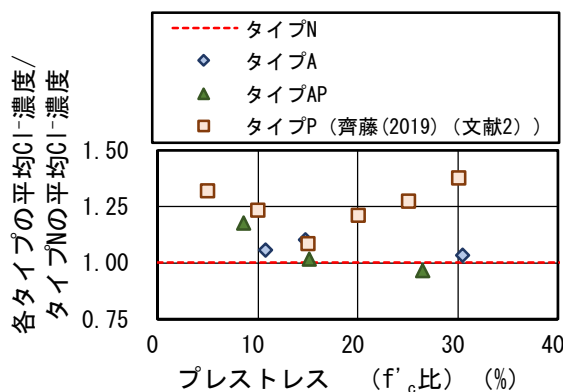


(c) 分析用試験片 断面 3
(塩分浸透面から 22~33mm)

図-6 プレストレスと Cl^- 濃度の関係
(分析用試験片の断面別)



(a) 平均 Cl^- 濃度

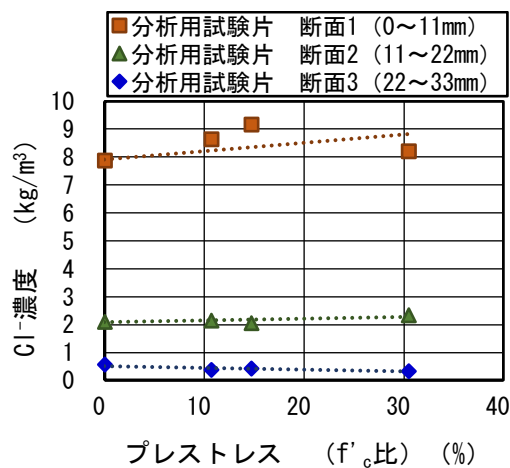


(b) 各タイプの平均 Cl^- 濃度/
タイプ N の平均 Cl^- 濃度

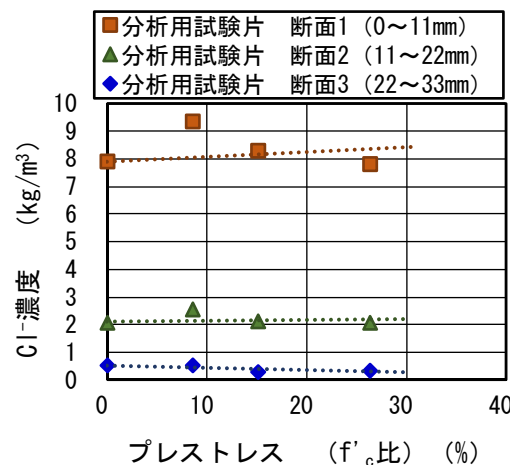
図-4 平均 Cl^- 濃度

り、各作用状態の違いにかかわらずプレストレスが作用した場合は、表面に近い断面（断面1、2）のCl⁻濃度はタイプNより高い傾向があり、それより内部の断面3ではその挙動は逆転しタイプNより低い傾向があることが確認できる。

図-7にプレストレスの作用状態別のCl⁻濃度とプレストレスの関係を示す。図には分析用試験片の断面ごとにタイプNのCl⁻濃度を切片とする近似線を併記した。図より、Cl⁻濃度とプレストレスとの関係には各作用状態の違いにかかわらず、分析用試験片の断面ごとにその傾向は異なり、断面1、2ではプレストレスの増加に伴いCl⁻濃度が増加し、断面3ではプレストレスの増加に伴いCl⁻濃度が減少する傾向が認められた。



(a) タイプNとタイプA



(b) タイプNとタイプAP

図-7 プレストレスとCl⁻濃度の関係
(プレストレスの作用状態別)

3.3 見掛けの拡散係数

(1) 表面Cl⁻濃度

図-8に、表面Cl⁻濃度 C_0 とプレストレスの関係を示

す。図より、プレストレスが作用した場合の表面Cl⁻濃度 C_0 はタイプNよりも高い値を示す傾向があることがわかる。図-5、6、7、8の傾向と、内部の空隙量が少なくなると拡散係数が小さくなるという拡散係数と空隙構造

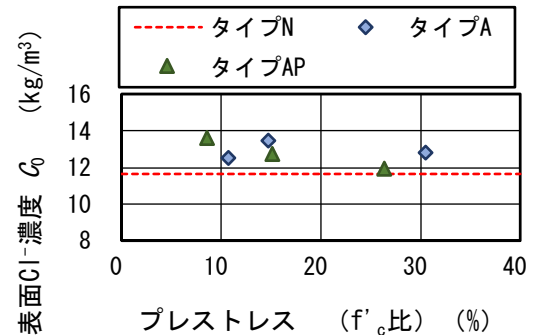
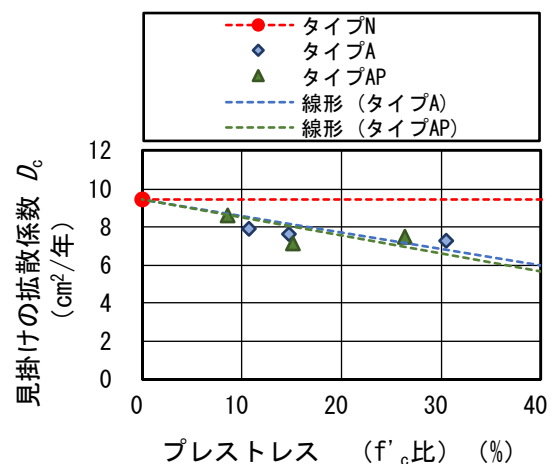
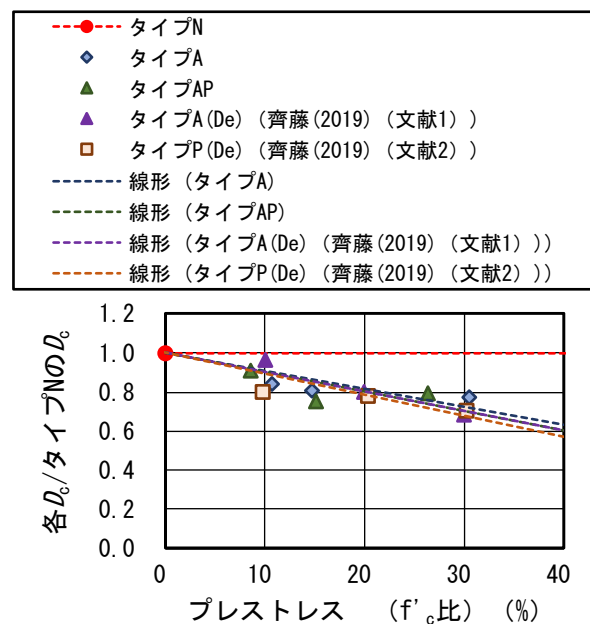


図-8 表面Cl⁻濃度 C_0



(a) 見掛けの拡散係数 D_0



(b) 各 D_0 /タイプNの D_0

図-9 見掛けの拡散係数

の関係に関する試験結果¹¹⁾から、プレストレスが作用した時の内部 Cl の浸透挙動について検討すると、プレストレスが作用するとコンクリート内部の空隙が小さくなり内部に浸透する塩分を比較的表面に近いコンクリート部分に留め、逆に内部には塩分を浸透させにくくさせている現象が生じていること推測される。なお、その傾向はプレストレスが増加するとより顕著になると考えられる。

(2) 見掛けの拡散係数

図-9(a)に見掛けの拡散係数 D_e とプレストレスの関係を示し、図-9(b)にタイプ N に対する各 D_e の割合とプレストレスの関係を示す。なお、図にはタイプ N の値を切片とする近似線を併記した。また、図-9(b)には著者の既往研究^{1), 2)}の実効拡散係数 D_e から算出した値を併記した。この既往研究結果は、プレストレスの繰り返し作用後にプレストレスを導入しない結果(タイプ A)ならびにプレストレスの繰り返し作用を与えずにプレストレス導入のみを継続させた結果(タイプ P)である。

図より、プレストレスが作用した場合のすべての値が、タイプ N よりも低い値となったことが認められた。これは、プレストレスの作用がコンクリートへの塩分浸透抵抗性に優位に働いたものと考えられる。また、プレストレスの増加に伴い、見掛けの拡散係数 D_e が低下する傾向、すなわち塩分浸透抵抗性が向上する傾向があることが確認された。なお、プレストレスの作用が無い場合に比べてプレストレスが作用する場合の効果の程度は、通常の PRC 構造のプレストレスの上限が f_c 比=30%程度であることを考えると、本試験結果からは、PRC 構造は RC 構造より塩分浸透抵抗性が最大約 30%程度向上することが示唆された。さらに、本試験のようにプレストレスが繰り返し作用した後にプレストレスが導入されない場合でも、プレストレスが導入された場合と同程度のプレストレスの優位性が得られることが認められた。

4. まとめ

本試験の範囲内で、プレストレスの繰り返し作用がコンクリート下縁からの塩分浸透抵抗性に及ぼす影響を検討し、以下のことが明らかになった。

- (1) プレストレスが繰り返し作用した場合は、プレストレスが無い場合に比べ見掛けの拡散係数は低くなり、塩分浸透抵抗性の向上が認められる。
- (2) プレストレスの増加に伴い見掛けの拡散係数は低下し、塩分浸透抵抗性は最大約 30%程度向上する。
- (3) プレストレスが繰り返し作用した後にプレストレスが導入されない場合でも、プレストレスを導入した場合と同程度のプレストレスの優位性が得られる。

謝辞

本研究は、日本学術振興会(科学研究費補助金基盤研究(C) JP17K06539, 研究代表者: 日本大学 齊藤準平)の助成を受けたものです。ここに付記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 齊藤 準平, 浅見 公一, 手島 敏史, 渡部 拓大: 静的および動的にプレストレスが作用したコンクリートの塩分浸透抵抗性, 第 28 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.163-168, 2019.11
- 2) 齊藤 準平, 浅見 公一, 手島 敏史, 加藤 凌也: コンクリートの塩分浸透抵抗性に及ぼすプレストレス導入の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, pp.713-718, 2019.7
- 3) 齊藤 準平: PRC はり下縁におけるプレストレスと荷重作用による応力付与の繰り返しがコンクリートの塩分浸透特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, pp.705-710, 2018.7
- 4) 齊藤 準平, 下邊 悟: 繰り返し荷重下におけるコンクリートの塩分浸透特性, 第 26 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.93-98, 2017.10
- 5) 齊藤 準平, 下邊 悟: 電気泳動法を用いた PRC はりのひび割れ領域部における塩分浸透特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, pp.679-684, 2017.7
- 6) 下村 匠, 川島 徹: 持続圧縮応力を受けるコンクリートの物質移動抵抗性に関する検討, 第 15 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.163-166, 2006.10
- 7) 迫井 裕樹, 川北 昌宏, 堀口 敬: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの塩分浸透性に及ぼす圧縮応力の影響, コンクリート工学論文集, 第 18 巻, 第 3 号, pp.1-7, 2007.9
- 8) 浅井 貴幸, 青木 圭一: 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, 第 22 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.235-240, 2013.10
- 9) 土木学会: 2013 制定 コンクリート標準示方書[標準編] 土木学会規準および関連規準, JSCE-G 572-2013, pp.372-376, 2013
- 10) 日本工業規格 JIS A 1154: 2012 「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」, 2012
- 11) 港湾空港技術研究所: 港湾空港技術研究所資料 (No.1141) 「港湾 RC 構造物における塩化物イオン拡散係数調査結果および簡易推定手法に関する検討」, p.11, 2006.9