

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

| | | |
|----------------|-----------|--------|
| 日本大学 | 正会員 博 (工) | ○齊藤 準平 |
| 日本大学 | | 浅見 公一 |
| (株)ニチレキ | | 手島 敏史 |
| 中央復建コンサルタンツ(株) | | 渡部 拓大 |

Abstract : Although the evaluation of chloride in the PRC member responsible for steel corrosion is crucial for the continuation of the structural function, the chloride permeability of concrete at the lower edge of the PRC member is complicatedly influenced by several factors. In the relationship between each influence factor and chloride permeability resistance, the research which examined the influence of the factor related to prestress is extremely less. Therefore, it is necessary to investigate quantitatively the influence of prestress on chloride permeability resistance by more conditions. The purpose of this study is to clarify the influence of prestress on the resistance to chloride permeability of concrete. This paper is the experimental results and considerations by the tests of submergence in salt water and electrophoretic migration using specimens of prestress conditions that have not been clarified in previous research.

Key words : Chloride permeability, Prestress, Migration method, Submergence test

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濃度の評価が極めて重要であるが、PRC 梁下縁におけるコンクリートの塩分浸透には、(1)プレストレスによる応力の影響、(2)ひび割れの影響、ならびに(3)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影響など、複数の因子が複雑に影響しあっている。各影響因子と塩分浸透抵抗性の関係に関しては、プレストレスに関係する因子の影響、つまり(1)プレストレスによる応力の影響、(3)活荷重作用に伴うプレストレスの繰返し作用の影響について検討した研究が極めて少なく、解明の途上にあるのが現状である。そこで本稿は、コンクリートの塩分浸透抵抗性に及ぼすプレストレスの影響を解明することを目的とし、既往研究で明らかになっていないプレストレスの条件を与えた供試体に対し、塩水浸せき試験と電気泳動試験の2種類の試験を行い、得られた知見を示すものである。

2. 試験概要

2.1 試験条件

試験条件を表-1に示す。本試験では、PRC 構造におけるプレストレス導入の影響が大きい梁下縁部をモデル化して試験を行う。試験時のプレストレスの作用状態は、一つはプレストレスによる効果が最大限に得られると予想される状態として、(1)プレストレスが導入され静的に導入状態が継続される状態(以降、静的導入継続状態と称す)(静的試験)と仮定し設定した。もう一つは、プレストレスによる効果をもっとも得られないあるいは負に働くと予想される状態として、(2)活荷重による引張応力によってプレストレスが損失することと荷重通過後にプレストレスが再導入されることが動的に(繰返し)生じ、さらに活荷重による引張応力によってプレストレスが損失しているタイミングの状態(以降、繰返し作用後損失状態と称す)(動的試験)と仮定し設定した。プレストレスは、圧

表-1 試験条件

| 試験名 | プレストレスに関する試験条件 | | | 塩分浸透試験の種類 | 材料の性質 | | | 配合 | | | | |
|-----|----------------|---------------------------------------|---------|---------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|---------|------------|--------------------------|-------|------|
| | プレストレスの作用状態 | プレストレス (圧縮強度比 (f _c 比)) (%) | 繰返し作用回数 | | 圧縮強度 (f _c) (N/mm ²) | 単位容積質量 (kg/m ³) | ヤング係数 (kN/mm ²) | W/C (%) | S/C (vol%) | 単位量 (kg/m ³) | | |
| | | | | | | | | | | W | C | S |
| 静的A | 静的導入継続状態 | 0,5,10,15,20,25,30 | - | 塩水浸せき試験 (浸せき期間:30日) | 50.16 | 2051 | 22.77 | 55 | 300 | 302.7 | 550.0 | 1387 |
| 静的B | | 0,10,20,30,40,50 | | | - | 電気泳動試験 | 44.14 | | | | | |
| 動的A | 繰返し作用後損失状態 | 0,10,20,30,40 | 100万回 | 塩水浸せき試験 (浸せき期間:30日) | 47.04 | 2100 | 20.96 | | | | | |
| 動的B | | 0,10,20,30 | 100万回 | | 電気泳動試験 | 46.86 | 2017 | | | | | |

備考) 材料の性質は、塩分浸透試験に用いる供試体と同バッチで作製した、同一形状、同一寸法の供試体による圧縮強度試験から算出した。

縮強度に対するプレストレスの割合を圧縮強度比 (f_c比) と定義し、全試験の共通条件として、プレストレス無しの f_c比=0%から一般に扱われる f_c比=30%までに設定した。さらに、f_c比=30%より大きい場合として、最大で f_c比=50%まで追加設定した。繰返し作用後損失状態の繰返し作用回数は 100 万回とした。上限応力は f_c比とし、下限応力は上限応力の 10%とし、作用周波数は 0.9Hz とした。

塩分浸透抵抗性を図るための試験方法は、(1) 塩水浸せき試験 (JSCE-G572¹⁾) ならびに (2) 電気泳動試験 (JSCE-G571²⁾) の 2 種類とする。試験はプレストレスの作用状態 2 状態と塩分浸透抵抗性を測るための試験方法 2 種類を組み合わせた 4 試験を実施する。

供試体は 4 試験それぞれに作製した。配合は、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%とするモルタルとした。使用材料は普通ポルトランドセメント、山砂 (2.5mm ふるい通過、表乾密度 2.65g/cm³)、蒸留水を用い、打設後 28 日間の封緘養生を行った。材料の性質は、塩分浸透試験に用いる供試体と同バッチで作製した同一形状、同一寸法の供試体を用いて行った圧縮強度試験より求めた。

2.2 静的 A 試験

静的 A 試験の概要を図-1 に示す。試験は、プレストレスの導入、塩水浸せき、Cl⁻濃度分析の順で行う。塩分浸透方向は、プレストレス導入方向の垂直方向とする。供試体は 1 辺 100mm の立方体とし、プレストレスは供試体中心部の円筒空隙に配置した PC 鋼棒の緊張によって導入される。プレストレスの大きさの管理は、塩分浸透面 (4 面) のプレストレス導入方向のひずみゲージを用い、ひずみの変化が安定した後に塩水浸せき試験に移行した。浸せき試験の直前にはプレストレス導入に伴う内部損傷の確認のために衝撃弾性波伝播速度試験 (図-1 (a) 参照) を行った。塩水浸せき試験は濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液中に 30 日間浸せきした。塩水浸せき後、プレストレス導入方向の中央断面から 1 辺 33mm の立方体の分析サンプルを各面 1 個ずつ計 4 体切り出し JIS A 1154³⁾ に準じ Cl⁻濃度を測定した。

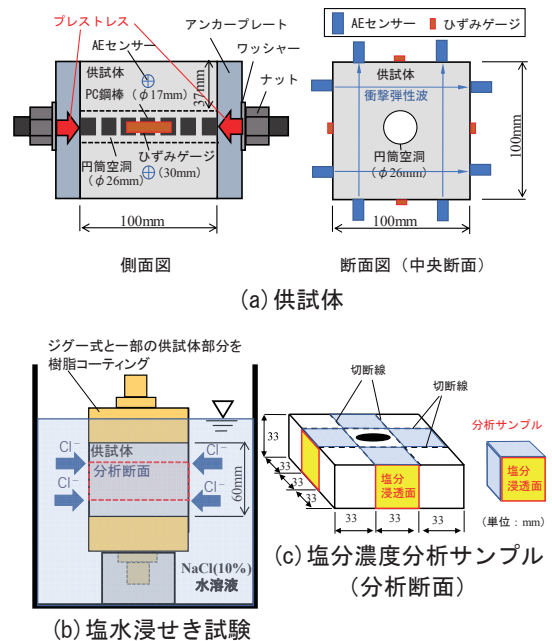


図-1 静的 A 試験概要図

2.3 静的 B 試験

静的 B 試験の概要を図-2 に示す。試験はプレストレス導入した状態で電気泳動試験を行う。塩分浸透方向は、プレストレス導入方向の垂直方向とする。供試体は 1 辺 40mm 立方体とし、プレストレスは、2 本の PC 鋼棒の緊張によって鋼製フレームを介して、ナットを締めて導入する。鋼製フレームと供試体はプレストレスによって固定・接合され、陰極ならびに陽極水槽は水平ロッドを締めることで固定される。陰極側溶液は供試体の打設底面と、陽極側溶液は打設面と接している。プレストレス

の大きさは、各 PC 鋼棒に設置したワッシャー型ロードセルにて管理する。本電気泳動装置は、実効拡散係数試験方法を参考に、矩形断面に適用できるように独自の加工を施して製作したものである。

2.4 動的 A 試験

動的 A 試験の概要を図-3に示す。試験は、プレストレスの繰返し導入（以降、繰返し導入と称す）、塩水浸せき、Cl濃度分析の順で行う。プレストレスの繰返し導入は疲労試験機を用い、荷重制御で行った。繰返し導入後の供試体は、導入方向の中央部から厚さ 33mm の断面の塩水浸せき用供試体を 2 個切り出し、プレストレスが除かれた状態で塩水に浸せきする。塩分浸透方向は、プレストレスの導入方向とその垂直方向の 2 方向とする。塩分浸透面以外の面は塩分の侵入を遮断するためエポキシ樹脂を塗布した。Cl濃度分析は、塩分浸透方向が導入方向の場合は A~E、垂直方向の場合は A~D の 1 辺 33mm の立方体を切り出し、分析用サンプルとする。塩水浸せき試験と Cl濃度分析は静的 A 試験と同様に行った。繰返し導入時にはひずみゲージを貼り、繰返し導入終了後の残留ひずみを取得した。繰返し導入後には衝撃弾性波伝播速度試験を導入方向 (Z 方向) (1 方向) と垂直方向 (X, Y 方向) (2 方向) の 3 方向に対して行い、内部損傷を確認した。なお、繰返し導入時に f_c 比=30%の条件に 2 つの導入面間を結ぶ完全なひび割れが導入方向と平行に 1 本発生したため、予備供試体にて再度同条件の繰返し導入を実施した。このひび割れ供試体はひび割れを有する条件として損傷条件に追加した。ひび割れ供試体のひび割れ幅はマイクロスコブ (2000 倍) にて計測し、0.013~0.019mm の超微小ひび割れであることが確認された (図-4)。

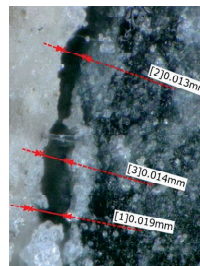


図-4 ひび割れ (f_c 比=30%)

2.5 動的 B 試験

動的 B 試験の概要を図-5に示す。動的 A 試験と同様に疲労試験機による繰返し導入後にプレストレスが完全に除かれた状態で静的 B 試験と同様 (図-2 (a) 参照) に電気泳動試験を行う。繰返し導入に用いた供試体は、断面 40mm×40mm で長さ 160mm の直方体とし、繰返し導入後は残留ひずみを取得した。電気泳動試験には中央部から 1 辺 40mm の立方体を 2 個切り出し、プレストレス導入方向とその垂直方向の 2 方向を塩分浸透方向とした。

3. 試験結果および考察

3.1 静的 A 試験

図-6に Cl濃度とプレストレスの関係を示す。図には各プレストレスにおけるサンプル 4 体の最大値、最小値および平均値を示し、全データの近似直線を併記している。図より、プレストレスを導入した場合の Cl濃度は、与えない場合と比べ同じか大きくなること、プレストレスの増加に伴

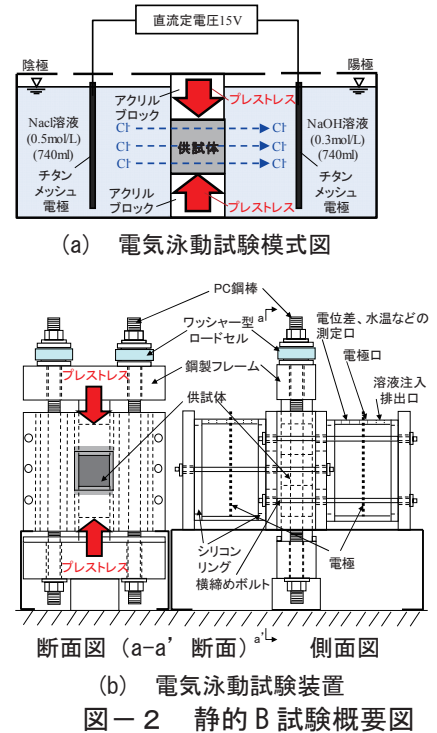


図-2 静的 B 試験概要図

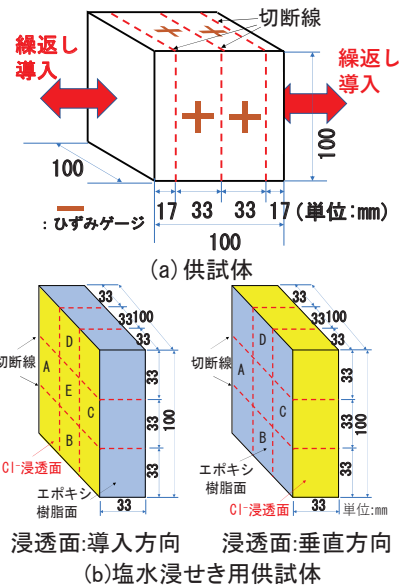


図-3 動的 A 試験概要図

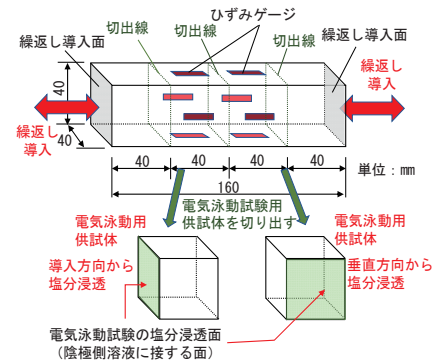


図-5 動的 B 試験概要

い CI濃度が増加する傾向となった。この傾向は、**図-7**に示す衝撃弾性波伝播速度試験結果において弾性波速度が一定であることから内部損傷の影響とは考えられないこと、内部の空隙量が少なくなると拡散係数が小さくなり塩分浸透性が低下すること⁴⁾を考慮すると矛盾した結果と考えられる。そこで、浅井らの既往研究結果⁵⁾と本研究結果を併せて考察する。**図-8**は、浅井らの結果における各断面の CI濃度とプレストレスの関係を塩分浸透面からの距離ごとに再グラフ化したものである。図によると、もっとも表面に近い断面(断面1)の CI濃度は本研究結果の挙動と同様にプレストレスの増加に伴い大きくなっており、逆に表面から離れた断面はプレストレスの増加に伴い小さくなっていることが分かる。本研究では、表面部から内部にかけての全断面を一括で分析し平均濃度としているため各断面の CI濃度の浸透分布は推測になるが、本研究においてもプレストレスの導入によって表層付近の断面の濃度が高くなり、その表層部の濃度の大きさに引っ張られるかたちで全断面の CIの平均濃度が高くなった可能性が否定できない。さらに併せて、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の関係に関する試験結果⁴⁾を考慮すると、プレストレスが増加した場合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る、すなわち表面付近は濃度が高くて内部は塩分が浸透しにくい現象が生じていることが想像される。

とはいえ、これらの考察は推測の域を脱しておらず、今後の課題として、CI濃度を全断面平均化ではなく各断面の濃度分布や拡散係数で検討することによりプレストレスと塩分浸透抵抗性の関係の詳細な解明をすることが必要と考える。

3.2 静的B試験

図-9に実効拡散係数 D_e とプレストレスの関係を示し、全データの近似線を併記する。図によると、プレストレスの増加に伴い、 D_e が低下する傾向、すなわちプレストレスの導入によって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。これは、プレストレスによる内部空隙率の減少に伴う浸透抵抗性の向上⁴⁾に伴うものと考えられる。また、図によると、プレストレスが f_c 比=40%の場合をピークにそれ以上では塩分浸透抵抗性が減少することが確認できる。プレストレスが f_c 比=30%と 50%の間に塩分浸透抵抗性へのプレストレスによる優位な影響の変換点があることが推測されるが、これはプレストレスが骨材とモルタルの界面部のボンドクラックやマトリックスクラックなど内部構造に微細ひび割れを発生⁶⁾させ、物質の移動経路が短絡化⁷⁾されたものと考えられる。

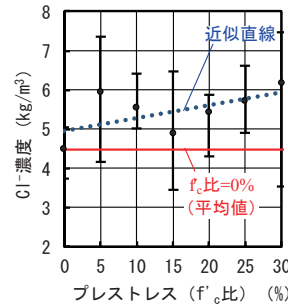


図-6 CI濃度とプレストレスの関係

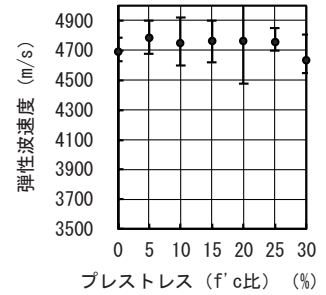
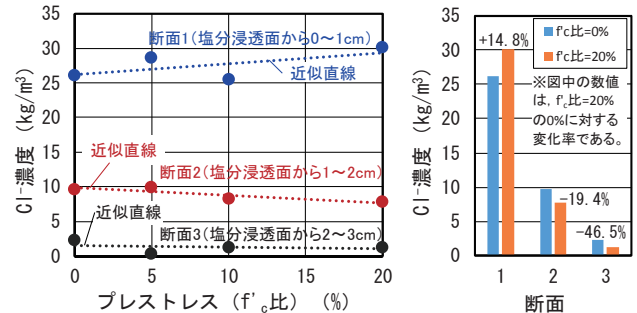


図-7 弾性波速度とプレストレスの関係



(a) CI濃度分布 (b) f'_c 比=0%と20%の比較

図-8 各断面のプレストレスとCI濃度分布の関係

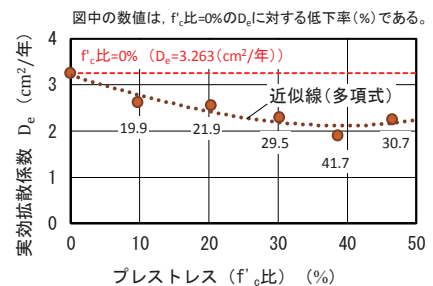


図-9 実効拡散係数とプレストレスの関係

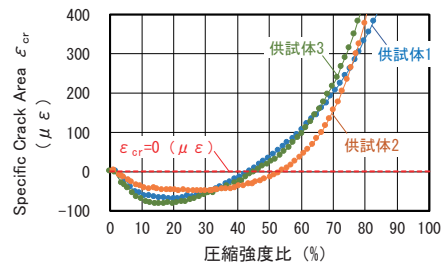


図-10 内部ひび割れの評価

図-10 に、Specific Crack Area ϵ_{cr} と圧縮強度比の関係を示す。 ϵ_{cr} は、Loo⁸⁾の提案した静的圧縮応力が導入された際のコンクリート中の損傷の程度を評価する方法で、 $\epsilon_{cr}=2(\epsilon_x-\mu\epsilon_y)$ より算出される。 ϵ_{cr} の算出は、電気泳動試験供試体と同時に打設した同一形状の3体の供試体の圧縮破壊にいたるまでの側面(4面)中心部の縦ひずみ(ϵ_y)、横ひずみ(ϵ_x)と、1/3圧縮強度時のポアソン比($\mu=\epsilon_x/\epsilon_y$)を用いた。図によると、 ϵ_{cr} はプレストレスの増加に伴い f'_c 比=20~30%程度までは低下傾向を示し、それ以降は増加することが確認された。また、 ϵ_{cr} が $0\mu\epsilon$ よりも大きくなる、すなわち内部損傷の増加が開始するのはプレストレスが f'_c 比=40~50%付近であることが認められた。この結果から、 f'_c 比=30%~50%の間に生じたプレストレスによる塩分浸透抵抗性への優位な影響の反転は、この内部損傷が一因にあったものと考えられる。

3.3 動的A試験

図-11 に、浸透方向別に繰返し導入されたプレストレスと Cl^- 濃度の関係ならびに弾性波速度との関係を示す。弾性波速度は、塩分浸透方向に対する垂直2方向の平均値を用いた。図によると、静的A試験と同様に Cl^- 浸透方向の違いに関わらず繰返し導入されたプレストレスの増加に伴い Cl^- 濃度が増加する傾向があることが認められた。しかし、弾性波速度はプレストレスの増加に伴い低下しているものの健全なレベルの速度であることから、静的A試験で考察した、表面付近は濃度が高くても内部は塩分が浸透しにくい現象が生じている可能性は否定できず、本実験結果のみで繰返し導入による内部損傷の影響とは断定し難い。今後は当該挙動においても、拡散係数による検討が必要と考えられる。なお、ひび割れ供試体は同方向における f'_c 比=0%の Cl^- 濃度の約1.8倍、同 f'_c 比でも約1.3倍と高い濃度であり、約0.02mm程度の超微小ひび割れでも塩分浸透抵抗性を低下させることが示唆された。

図-12 に、ひび割れ供試体を除く Cl^- 濃度と残留ひずみの関係を示し、残留ひずみと Cl^- 濃度の近似直線を併記した。図によると、残留ひずみの増加により Cl^- 濃度が高くなる傾向があることが確認された。ただし、 f'_c 比=40%では残留ひずみが約300 μ で Cl^- 濃度も高かったが、 f'_c 比=30%以下では150 μ 程度以下と小さく Cl^- 濃度の顕著な増加は確認できなかった。

3.4 動的B試験

図-13 に、実効拡散係数と繰返し導入されたプレストレスの関係を示す。図より実効拡散係数は塩分浸透方向の違いに関わらず、 f'_c 比が大きいほど低下することが確認された。繰返しプレストレスを導入することによりプレストレスによる内部空隙率の減少に伴う浸透抵抗性の向上⁴⁾に起因する供試体内部の緻密化の影響で塩分浸透抵抗性に優位に働いたと推測できるが、動的A試験の結果と異なる傾向を示したことから、塩分浸透抵抗性への繰返し導入の影響については、再度動的A試験を実施して拡散係数を求め、動的B試験結果と総合的に検討する必要があると考えられる。

図-14 に、実効拡散係数と残留ひずみの関係を示す。残留ひずみは各断面の平均値である。図より、

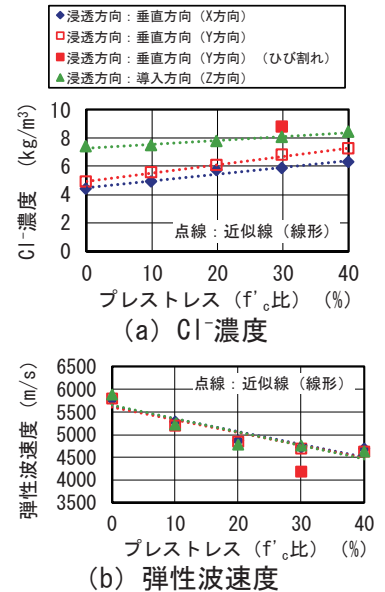


図-11 プレストレスと Cl^- 濃度および弾性波速度の関係

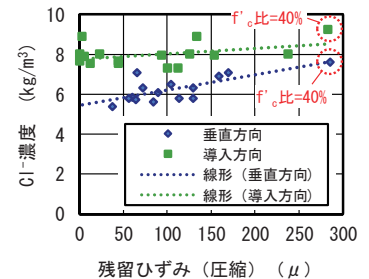


図-12 Cl^- 濃度と残留ひずみの関係

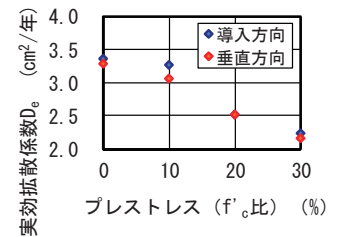


図-13 実効拡散係数とプレストレスの関係

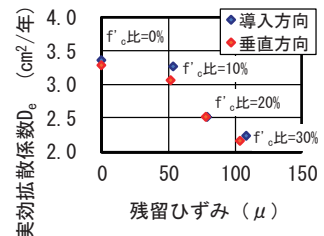


図-14 実効拡散係数と残留ひずみの関係

残留ひずみは 100μ 程度と、図-12 における f_c 比=30%以下の残留ひずみと同程度の値を示した。また、残留ひずみの増加に伴い実効拡散係数が減少する傾向が見られた。なお、一般に圧縮方向の直角方向には引張が作用することからその方向の違いが浸透挙動に異なる影響を及ぼすものと考えられるが、本結果についてはその影響は認められなかった。今後は内部空隙状況の可視化などによってその挙動を検討する必要がある。

4. まとめ

4.1 静的導入継続状態に対する塩分浸透抵抗性

- (1) 塩水浸せき試験から、プレストレスの増加に伴い Cl⁻濃度が大きくなる傾向を示した。既往研究結果と踏まえると、表面付近は濃度が高く内部は浸透しにくい現象があることが想像される。
- (2) 電気泳動試験から、プレストレスの増加に伴い実効拡散係数が低下し塩分浸透抵抗性が向上したことがわかった。また、圧縮強度比 40%程度の導入で最大となることがわかった。

4.2 繰返し作用後損失状態に対する塩分浸透抵抗性

- (1) 塩水浸せき試験から、プレストレスの増加に伴い Cl⁻濃度が大きくなる傾向を示した。
- (2) 電気泳動試験から、プレストレスの増加に伴い実効拡散係数が低下する傾向が認められた。

4.3 今後の課題

塩分浸透抵抗性に対するプレストレスの及ぼす影響に関して、塩水浸せき試験による Cl⁻濃度と電気泳動試験による実効拡散係数で異なる傾向が示された。塩水浸せき試験において、複雑な濃度分布を全断面平均化した Cl⁻濃度では捉えることができなかったためと考える。今後は、各断面濃度分布あるいはそれを基に算出した拡散係数からプレストレスによる塩分浸透抵抗性の検討を行う予定である。また、プレストレス作用による内部損傷や空隙容積の変化などの視覚的情報の取得が必要と考える。

謝辞

本研究は、日本学術振興会（基盤研究（C）JP17K06539，研究代表者：齊藤準平）および公益財団法人大林財団（2017年度研究助成金）の助成を受けたものです。ここに付記し、謝意を表します。

引用・参考文献

- 1) 土木学会：2013 制定 コンクリート標準示方書〔規準編〕土木学会規準および関連規準，JSCE-G 572-2013，pp.372-376，2013
- 2) 土木学会：2013 制定 コンクリート標準示方書〔規準編〕土木学会規準および関連規準，JSCE-G 571-2013，pp.363-369，2013
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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 回プレストレスト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
- 6) 岩波 光保，大即 信明，二羽淳一郎，鎌田 敏郎，長瀧重義：コンクリート中における弾性波伝播挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集 No.627/V-44，pp.223-238，1999.8
- 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) Y.H.Loo：A new method for microcrack evaluation in concrete under compression，Materials and Structures，Vol.25，pp.573-578，1992