

繰返し圧縮応力付与に伴うコンクリートのひずみ分布と塩分濃度分布

日本大学 正会員 博(工) ○齊藤 準平

Abstract : In order to properly diagnose corrosion in steel for PRC beams, it is necessary to define the relationship between the cyclic compressive stress applied to the area of the crack and the mechanism of chloride ion penetration, and create an appropriate diagnostic equation. The following results were obtained by applying cyclic compressive stress to a specimen, and examining the relationship between the strain distribution and chloride ion concentration (Cl⁻ concentration) distribution therein. (1) The cause of Cl⁻ concentration in the surface on which stress was applied being low in the near area region and high in the remote area region was the size of the strain. (2) The distribution of Cl⁻ concentration was not uniform, but somewhat resembled a tensile strain distribution or a splitting stress distribution. (3) There is a peak in Cl⁻ concentration relatively near the surface on which stress was applied. (4) The area near the surface on which stress was applied had a much lower Cl⁻ concentration due to the compression zone.

Key words : Cyclic compressive stress, Chloride ion concentration distribution, Strain distribution

1. はじめに

PRC 梁の下縁では、プレストレスの作用と荷重の作用によって、ひび割れの開閉が繰返し生じる。その開閉のたびにひび割れ近傍のコンクリートはプレストレスとして導入された圧縮応力の減少と再導入が繰り返される。PRC 梁の鋼材腐食診断を適切に行うためには、その繰返しによって、梁下縁のコンクリートから内部に向かって塩分がどの程度の速度で浸透するか、梁下縁ひび割れ部に侵入後の塩分がひび割れ直角方向のコンクリートにどの程度の速度で浸透するか、といったひび割れ周辺における繰返し応力付与と塩分浸透機構の関係を明確にし、適切な診断式を構築する必要がある。

著者は実験を通じて、PRC 梁の下縁におけるひび割れ周辺のコンクリートへの下縁からの塩分浸透特性ならびにひび割れ内部からその直角方向のコンクリートへの塩分浸透特性を明確にすることを目的としている。実験は、当該領域をモデル化した立方体または直方体コンクリート供試体に対し、その端部に繰返し圧縮応力を付与することをひび割れ面の開閉時におけるコンクリートに作用する応力の変化に見立て、付与応力や付与回数などの応力付与条件を変化させた繰返し応力付与とその後の塩水浸せき試験を行うものである。著者は実験^{1),2)}を通じていくつかの知見を得たが、ひび割れ直角方向(応力付与方向)への塩分浸透においては未だいくつかの現象の解明ができていない。

本稿では、ひび割れ直角方向(応力付与方向)への塩分浸透におけるその未解明な現象の中で、応力付与面近傍域と遠隔域で塩分浸透速度が異なること、ならびに近傍域の塩分浸透速度は応力付与しない場合よりも低いことに関する要因を解明することを目的として、当該領域をモデル化した供試体への繰返し圧縮応力付与によるひずみ分布とその後の応力付与方向の塩分浸透のための塩水浸せき試験による塩化物イオン(Cl⁻)濃度分布の関係を検討し、得られた知見を示すものである。

2. 既往研究結果による検討

2.1 実験方法および検討に用いた実験条件

(1) 実験方法

実験概要(詳細は文献 2)を参照)を図-1に示す。実験は、PRC 梁下縁のひび割れ周辺における

塩分浸透特性に対する繰返し圧縮応力付与の影響を検討するものである。具体的には、PRCモデル供試体(タイプ PRC)に対して繰返し圧縮応力を付与した後、塩水浸せき試験用供試体への加工を経て、塩水浸せき試験とその分析を行う。また、圧縮応力付与の有無の比較用として、応力付与のない供試体(塩分濃度基準供試体)(タイプ N)を用意する。供試体はタイプ PRC, タイプ Nともに条件ごとに各1体とする。なお、図-1の塩水浸せき試験には、応力付与直角方向のような本稿にて検討する応力付与方向以外の塩分浸透方向の実験条件も記している。

配合と使用材料およびその力学的性質を表-1に示す。繰返し応力付与は、図-1に示す PRCモデル供試体に対し左面に加圧板を右面に耐圧板を設け、左の端面より繰返し載荷を行った。載荷は荷重制御とし、付与面の摩擦の影響を除くためにテフロンシートを供試体と加圧板ならびに耐圧板の間に挿入した。応力付与時には塩水浸せき試験用供試体として後に分割される当該範囲(応力付与方向に垂直となる4面)にひずみゲージを貼りひずみデータを取得し、付与終了後は残留ひずみを取得した。

塩水浸せき試験には応力付与方向に3等分し

(断面 A, B, C), さらにその各断面を応力付与方向((a)方向)からの塩分浸透のための塩水浸せき試験用供試体1体と、応力付与直角方向((b), (c), (d), (e)方向)からの塩分浸透のための塩水浸せき試験用供試体4体を切り出し用いている。応力付与方向からの塩分浸透((a)方向)の場合は、ひび割れに関する幅や深さなどのすべてのひび割れ条件を設けず、ひび割れ直角方向の塩分浸透面は開放する。塩水浸せき試験は、JSCE G 572³⁾に準じて、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(1辺約33mmの立方体)を91日間浸せきした。塩分浸透面は1面とし、それ以外の5面にはエポキシ樹脂を塗布し塩分浸透を遮断した。Cl⁻濃度の分析は、JIS A 1154⁴⁾に準じて行った。

(2) 検討に用いた実験条件

応力付与方向((a)方向(図-1参照))における応力付与によるひずみ分布と Cl⁻濃度分布の関係の検討に用いた実験条件は、付与した圧縮応力(圧縮強度比(f_c 比))にはプレストレスの標準的な大きさとしてコンクリートの圧縮強度に対する許容応力度の目安とされる30%を、応力付与の繰返し回数には、主に挙動の傾向がより明らかに示された100万回の結果を用い、回数の違いを比較するために一部に100回の結果も用いた。

2.2 結果および考察

図-2に、繰返し回数100回と100万回の Cl⁻濃度分布を示す。1.はじめに述べたように、100万回の繰返し応力付与後の Cl⁻濃度分布は、応力付与面の近傍域(断面 A)がもっとも低く、断面 Bより

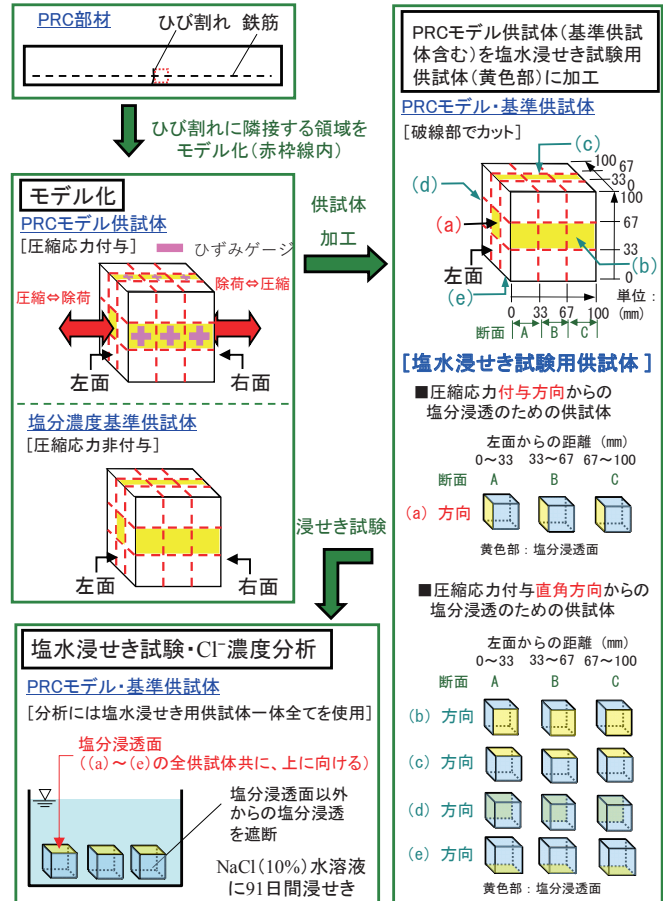


図-1 実験概要

表-1 モルタルの配合と力学的性質

W/C	S/C	単位量 (kg/m ³)			単位容積質量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
		W	C	S			
55	400	257.9	469.0	1576	2120	25.4	24.6

36.5%低下した。遠隔域(断面 B, C)は近傍域に比べ高く、近傍域と遠隔域で塩分浸透特性が異なる傾向があることが分かる。また、近傍域の Cl^- 濃度はタイプ N より低くなることが確認できる。さらに、遠隔域にも違いがみられ、比較的近傍域に近い断面 B は Cl^- 濃度が高く、断面 C はそれに比べやや低くなる傾向を示した。ここで、既往研究¹⁾と同様の傾向が再現されたことは、本結果の定性的傾向としての妥当性があると考えられる。また、応力付与の繰返し回数の違いが Cl^- 濃度に及ぼす影響では、繰返し回数が100回のおきはタイプ N に近く、100万回応力付与後のように回数が増加すると近傍域はより低く遠隔域はより高くなり、付与回数の増加に伴いその特性が顕著となることが分かる。

Cl^- 濃度が近傍域では低く遠隔域では高いことについて、ひずみの大きさの推移から検討するために、図-3に応力付与方向のひずみと付与回数の関係を示す。図より、遠隔域(断面 B, C)に比べ近傍域(断面 A)のひずみが小さいことが分かる。また、100万回時のひずみが大きい順に図-2に示す100万回応力付与後の Cl^- 濃度が高いことが確認できる。さらに、回数の増加に伴いひずみが大きくなることも分かる。とくに1万回以降の増加はそれまでより顕著な増加傾向を示している。この傾向をより理解するために、図-4に応力付与方向のひずみ分布を示す。図には、1, 2000, 10000, 100000, 1000000回のおきのひずみと1000000回応力付与後の残留ひずみを示している。まず、もっとも重要な知見は、図-4の100万回時のひずみや残留ひずみの分布と図-2の Cl^- 濃度分布を比較すると、各断面のひずみの大きさと Cl^- 濃度には相似の傾向があることである。図-4に示すひずみ分布から、図-2の Cl^- 濃度分布が示すような、近傍域が小さいこと、遠隔域では断面 B が大きく断面 C はやや小さくなる傾向などの特徴がしっかりと認められる。

ひずみ分布の推移(図-4)から、付与回数が少ない10000回まではほぼ直線を示していたが、付与回数が多くなるにつれてひずみが大きくなり断面ごとの違いが顕著になっていることが分かる。これを断面 A および断面 C に対する最終的にひずみが大きくなる断面 B の割合(図-5)で表すと、10000回まではその割合はほぼ一定に推移するが、それを超えると急激に大きくなることが分かる。つまり、断面 B は断面 A, C より繰返し応力を付与し続けることで顕著な挙動を示すといえる。

3. 応力付与面近傍域の Cl^- 濃度分布に関する実験的検討

3.1 実験方法

2.2 結果および考察で得られたひずみ分布と Cl^- 濃度分布の関連性に関し、応力付与面近傍域のひずみ分布と Cl^- 濃度分布をより詳細に把握するために、図-6に示す供試体を用いて2.1(1)実験方法と同様の実験を行った。なお、供試体の配合は表-1と同様とし、左右試験面の処置はアクリル板を型枠に用いた付与面の平滑処置と

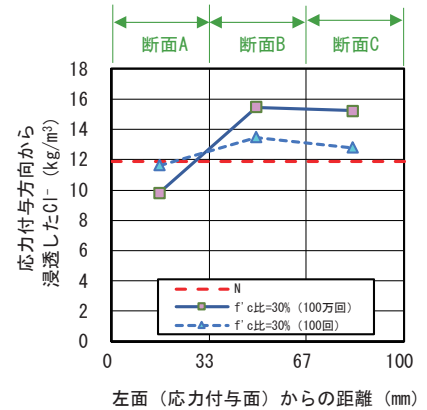


図-2 Cl^- 濃度分布

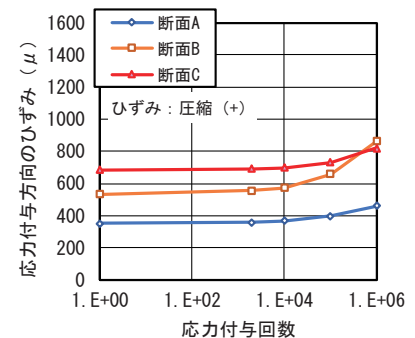


図-3 付与方向のひずみと付与回数の関係

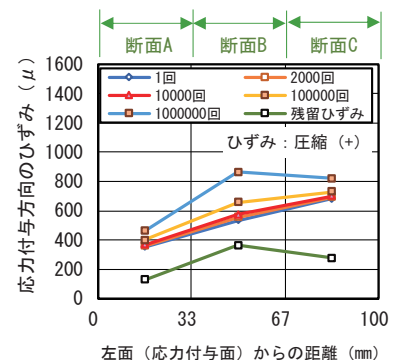


図-4 付与方向のひずみ分布

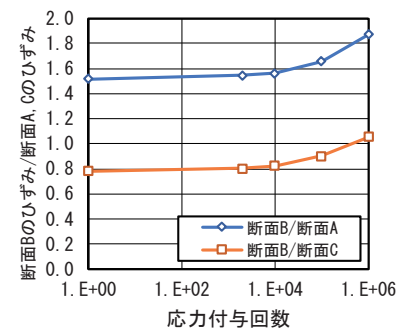


図-5 断面 B のひずみ / 断面 A, C のひずみ

した。養生方法は封緘養生で 28 日間とし、応力付与方法は左面（加圧板）と右面（耐圧板）に減摩処置を施し、左の端面より繰返し载荷を行った。

実験は供試体への応力付与、供試体の切断、塩水浸せき、Cl⁻濃度の分析の流れで実施する。供試体は図-6に示すように、ひずみ分布と Cl⁻濃度分布を細かくそして広い範囲で捉えるために断面 100×100mm の正方形で長さ 200mm とした。Cl⁻濃度分布を細かくとることとひずみゲージが貼れる大きさを考慮し、応力付与後に切断し加工する浸せき用供試体の厚みは 15mm とした。分析箇所は、分析のサンプル量が取得できる範囲として中心部（1辺 50mm 正方形）とした。応力付与は、 f_c 比 = 30%，繰返し回数は 100 万回とした。

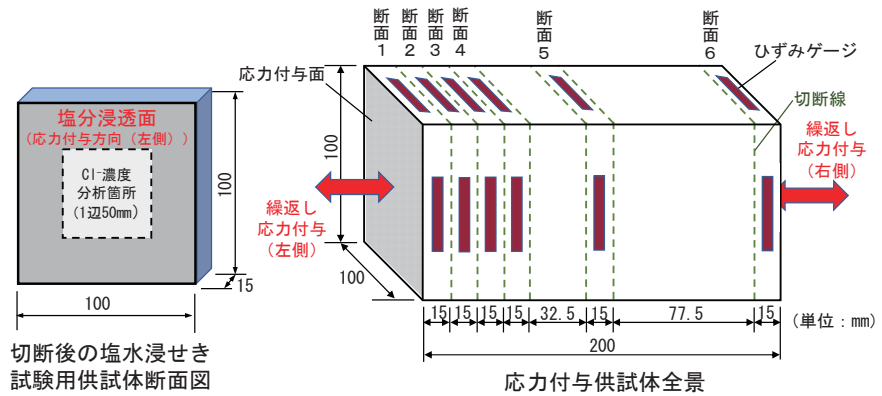


図-6 付与面近傍のひずみ分布と Cl⁻濃度分布の詳細把握用供試体

3.2 結果および考察

(1) ひずみ分布と Cl⁻濃度分布の関係に関する詳細な検討

図-7に Cl⁻濃度分布を示す。図より、断面 1 が他の断面と比べて極端に低いこと、断面 1 に比べ断面 2,3,4 はかなり大きく付与面に比較的に近い断面 4 が最大値になること、断面 5, 6 と緩やかに低下することが分かる。断面 1 は最大値である断面 4 より 36.9%低下しているが、この低下率は図-2の断面 B に対する断面 A の低下率=36.1%と近い値を示している。これにより、図-2と同様の現象を再現でき、且つ同様の Cl⁻濃度分布を詳細に取得できたと判断できる。なお、断面 1 と 6 の Cl⁻濃度が同じ結果とならない理由として、減摩処置した载荷試験において载荷が進むにつれて加圧板付近に局所的にひずみが大きくなるとの報告⁵⁾を一つの要因として推測するが、これについては今後の検討課題としたい。実験では応力を付与しない比較用の供試体を用意しなかったが、その低下率から判断すると、本実験においても応力付与しない場合の Cl⁻濃度より低かったと推測できる。その上でさらに考察を進めると、まず、Cl⁻濃度の低下した領域は応力付与面のわずか数 cm（ここでは 1.5cm）に限られることが分かった。それより離れた領域の断面 2~6 においては、Cl⁻濃度が最小値となる断面 6 が最大値となる断面 4 の約 10%の低下率であることを考えると、この断面 1 の低下率がかなり大きいことが分かる。そして、この数 cm の領域にあるかなり低い Cl⁻濃度を生む浸透特性が、近傍域と遠隔域の塩分浸透特性の違いや、近傍域における応力無付与よりも付与の場合が Cl⁻濃度が低くなることの要因であったと理解することができる。

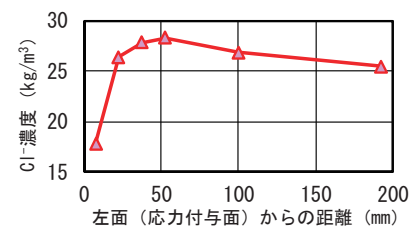


図-7 Cl⁻濃度分布

この断面 1 の Cl⁻濃度低下の要因をひずみ分布から検討する。なお、本章の Cl⁻濃度分布との比較、前章とのひずみ分布および Cl⁻濃度分布との比較をしやすいするために、引張ひずみの符号を+として扱う。図-8に、ひずみと応力付与回数の関係を示す。応力付与回数の増加に伴いひずみの増加が確認できる。断面の特徴をひずみから読みとると、断面 3, 2, 4 が比較的大きく、断面 1 が極端に小さい値を示しており、各断面の Cl⁻濃度とひずみの大きさが概ね定性的に対応していることが認められる。それら対応関係をわかりやすく見るために、図-9に各付与回数時のひずみ分布を示す。図より、付与面近傍における極端にひずみが小さい状況が明確に認められる。図では、断面 2, 3 と増加し、断面

3でピークを迎えたあとは断面4, 5と低下し断面6でやや増加する分布を示し, このひずみ分布と図-7のCI濃度分布とは完全に分布形状が一致しないが, 応力付与面からわずか数cmの断面でのほかの断面に比べてかなり小さいひずみや, そこに比較的近い断面の最大値, ならびにそこから離れるにつれて低下する傾向は図-7のCI濃度分布の特徴を概ね捉えているといえる。これによって, 2.2 結果および考察で得られたひずみ分布とCI濃度分布の関連性をより詳細にみることができ, その裏付けを得ることができた。

応力付与回数について, 最終的にピーク値となる断面3に対する各断面のひずみの割合を図-10に示す。図より, 図-5と同様に10000回を以降に大きく変動している傾向が分かる。これら結果は, 圧縮強度比30%程度の繰返し応力付与の影響を実験的に検討するためには, 少なくとも10000回より多い100000回や1000000回程度の回数で繰返し付与を行わないと, その影響を検討することが難しいことを示唆するものと考えられる。

(2) 応力付与面近傍域のCI濃度が低くなる要因

付与面近傍域においてCI濃度が極端に低いことの原因について, 著者は既往研究²⁾において, 加圧板と供試体の付与面における摩擦の減摩処置(テフロンシート)の残存摩擦による変形の拘束と推測した。本実験で得られた, 近傍域のごく限られた領域にてCI濃度が極端に低いこと, 同様にひずみも極めて小さいことなどの実験結果を基に, 応力付与された際の付与面近傍のコンクリートの応力分布に着目して次のような考察を行った。

文献6)からプレストレストコンクリートの定着部の応力状態を引用し模式図を描くと図-11のようになる。また, 定着部近傍の割裂引張応力状態を, たとえばコンクリートの面積と加圧板の大きさがほぼ同じ加圧板幅 b' /供試体付与面幅 $b=0.9$ となる場合を文献5から引用し模式図を描くと図-12のようになる。 b'/b が1.0に近づくとピークは低くなる⁶⁾ため本実験のケース(図-7)では, 図-12よりピークから先の距離の傾きは緩やかになるであろうが, 図-12の応力分布は図-7のCI濃度分布と比較すると, 引張応力の立ち上がり後に比較的近い領域にピークがあり, さらにその後なだらかに減少する非線形を示す特徴から概ね相似の関係にあるといえる。

そこで, 図-11, 12より, 応力付与面近傍域のCI濃度が低くなる要因について検討する。図-11より, 局部荷重であるが荷重直近の応力状態は加圧板近傍にはまず圧縮域が存在しその先に割裂域が続くことが分かる。図-11と比較すると図-12の引張応力の立ち上がり箇所は圧縮域と割裂域の境界部となることが分かる。圧縮域の広さや圧縮応力の大きさ, ならびに割裂域の広さや割裂引張応力の大きさは図の b'/b に応じて変わる⁶⁾わけであるが, この圧縮域がCI

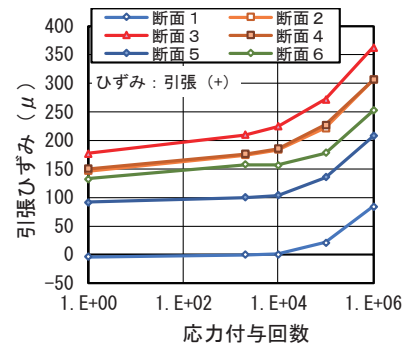


図-8 ひずみと付与回数の関係

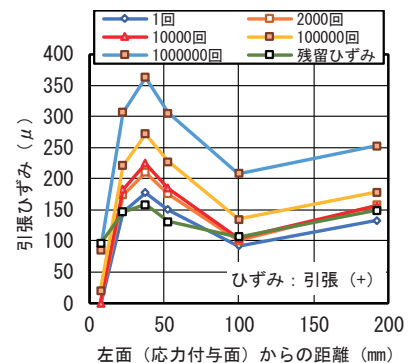


図-9 ひずみ分布

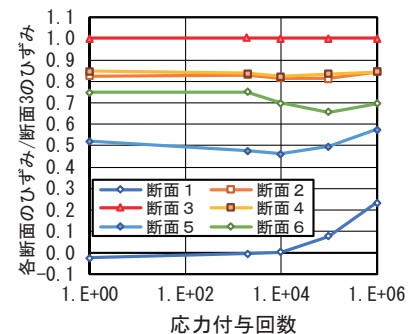


図-10 各断面のひずみ/断面3のひずみ

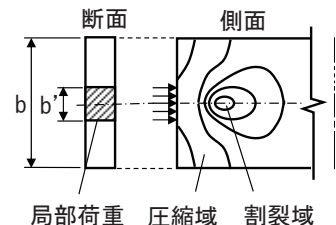


図-11 局部応力状態⁶⁾を基に描画

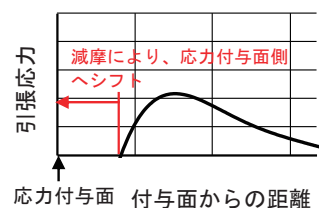


図-12 割裂引張応力⁶⁾を基に描画

濃度を低下させている要因と考えると、付与面近傍域は圧縮域となることでコンクリートが圧縮応力によって緻密化し、それが要因となってこの圧縮域では塩分浸透が難しくなり Cl⁻濃度が低くなったと推測することができる。当該推測理由として、 f_c 比=30%の静的圧縮応力の継続付与状態での Cl⁻の拡散係数から、潜在的なクラックや空隙が閉塞され細孔構造の連続性が低下するとした、迫井らの結果⁷⁾が根拠として挙げられる。さらに、加圧板による面拘束面積が小さくなるためと推測するが、 b'/b が小さくなると圧縮域は付与面側にシフトすること⁶⁾に基づき考えると、本実験の場合においては施している付与面摩擦の減摩処置によって付与面の変形拘束が緩まることから、圧縮域が付与面側にシフトし Cl⁻濃度が低くなる領域を付与面の直近に限定させたものと考えられる。以上より、付与面より比較的近い箇所に Cl⁻濃度のピークが存在すること、Cl⁻濃度の分布は一定ではなく引張ひずみ分布や割裂による引張応力分布などと概ね相似の特徴を示すこと、付与面近傍は圧縮域が要因となって Cl⁻濃度がかかなり低くなることが考えられることなどが明らかになった。

4. まとめ

本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) 応力付与面近傍域 (応力付与面から 33mm までの領域) の Cl⁻濃度は遠隔域 (応力付与面から 33~100mm 程度までの領域) に比べて低く、近傍域と遠隔域で塩分浸透特性が異なる傾向がある。また、繰返し応力付与回数の増加に伴いその特性の傾向は顕著となる。
- (2) Cl⁻濃度の分布は一定ではなく引張ひずみ (載荷中のひずみおよび残留ひずみ) 分布や割裂による引張応力分布と概ね相似の特徴を示す。
- (3) 応力付与面より比較的近い箇所 (応力付与面から 15~60mm 程度までの領域) に Cl⁻濃度のピークが存在する。
- (4) 応力付与面近傍 (応力付与面から 15mm までの領域) の Cl⁻濃度がかかなり低くなるのは、応力付与面近傍の圧縮域の存在が起因していると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、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。また、実験の実施に際し、平成 29 年度日本大学理工学部交通システム工学科卒業研究生の竜岳弘君に多大な協力をいただいた。ここに付記し、謝意を表します。

引用・参考文献

- 1) 齊藤準平, 下邊悟: 塩分浸せき試験を用いた PRC はりのひび割れ領域部の塩分浸透に関する検討, 第 25 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.187-192, 2016
- 2) 齊藤準平, 下邊悟: 繰返し荷重下におけるコンクリートの塩分浸透特性, 第 26 回プレストレスト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
- 3) 土木学会: 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] (2013 年版), pp.372-376, 2013
- 4) 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
- 5) 渡辺健, 岩波光保, 横田弘, 二羽淳一郎: AE 法を用いたコンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.85-90, 2001
- 6) 岡田清, 藤井学, 小林和夫: プレストレストコンクリート構造学, 国民科学社, pp.139-140, 2002
- 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