

## 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

日本大学 正会員 博(工) ○齊藤 準平  
日本大学 工博 下邊 悟

Abstract : A principal advantage of PRC structures is resistance to chloride ion penetration resulting from limiting crack expansion. Against this, however, is the evidence that this type of concrete performs less well when placed under compressive stress. This study set out to examine the way in which chloride ion penetration from a crack on throughout the concrete of a PRC structure. Accordingly, test model structures were created to replicate these conditions and were subjected to measured chloride ion immersion to permit an examination of the effectiveness of crack reduction at the same time that compressive stress was also being applied (prestress). The results showed that limiting crack expansion offered more benefit than the compressive stress approach when the low compressive stress (PRC structure's prestress) was applied.

Key words : Chloride ion penetration , Crack width , Compressive stress , Submergence test

### 1. はじめに

多くの高速道路橋や一般道路橋に採用される PRC 道路橋は、RC 道路橋と同様に、交通量増加や過積載によって疲労損傷と塩害を同時に受けることで著しい鉄筋腐食が生じ、構造的機能を失う恐れがある。それに対して、維持補修を効率的に行うためには、現状の損傷状態における塩分浸透特性を適切に評価し、補修・補強の必要性を的確に見極める必要がある。

PRC 構造の塩分浸透特性に関しては、ひび割れ幅 ( $w_{cr}$ ) を一定幅に制限できるため、腐食に対する高い耐久性をもつ<sup>1)</sup>、というひび割れ性状の面からの優位な知見がある。一方、コンクリートには、材料として圧縮応力が付与されると塩分が浸透しやすくなる<sup>2) 3)</sup>、という応力付与の面からの劣位な知見がある。それら知見を総合すると、PRC はりにおけるひび割れからコンクリートへの塩分浸透には、プレストレスが作用するはり下縁付近のひび割れが存在する領域においては、そのような優劣相反する影響因子が混在していると考えられる。したがって、PRC はりを対象とした、より精度の高い塩分浸透特性評価のためには、それらの複合的な影響を解明する必要がある。本研究では、PRC 構造におけるひび割れからコンクリートへの塩分浸透特性について、ひび割れ幅の拡大の制限と、プレストレスを想定した圧縮応力付与との、複合的な影響を検討した。

本検討の目的には、著者が構築を目指すひび割れを有するコンクリートの塩分浸透特性の評価式において、当該式を PRC 構造に適用できるようにするために、当該式の重要なパラメータ (塩分浸透影響範囲) を決定するために必要な、ひび割れから直角方向への塩分浸透挙動の把握がある。そのため本研究は、ひび割れと圧縮応力付与の状態における、ひび割れ直角方向への塩分浸透の影響範囲いわゆる塩分濃度が高くなる範囲を探るための実験となる。

### 2. 実験方法

#### 2.1 本研究が対象とする応力およびひび割れ状態

本研究は、供試体のモデル化、圧縮応力の付与、ひび割れ幅の加工、塩分浸せき試験および塩分濃度分析によって、ひび割れ幅の拡大の制限と圧縮応力付与との複合的な影響を検討する。

供試体のモデル化に用いる PRC はりの対象領域は、ひび割れからの塩分浸透に大きな影響を及ぼす

と推測される、応力変動差が大きい下縁付近とした。図-1は、PRC はりに活荷重が作用するときの下縁付近のコンクリートの応力ならびにひび割れの開閉の概念を示している。本研究が対象とする状態は c.重ね合わせの状態、活荷重の作用時にひび割れ周辺のコンクリートにプレストレスによる圧縮応力がほとんど無くなり、ひび割れ幅は拡大するもののその幅は一定幅に制限される状態である。この状態は、PRC はりの供用状態において、飛来塩分がひび割れからコンクリートにもっとも浸透しやすく、交通量が著しく多い場合に連続的に繰り返される状態と考えられる。さらに、ひび割れ付近のコンクリートは、プレストレスと活荷重の繰り返し作用に伴う圧縮応力とその損失が繰り返されることで疲労損傷が生じ、その影響によってよりコンクリートへの塩分浸透を加速させると考えられる。

PRCはりスパン中央部の下縁付近(ひび割れ領域)の模式図

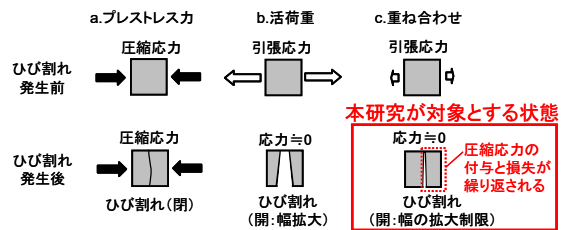


図-1 本研究が対象とする状態

2.2 実験概要

実験概要を図-2に示す。本研究では、次の(a)~(c)の比較検討を行う。(a)ひび割れ幅を一定幅に制限した PRC 構造の優位性の検討(ひび割れ幅制限の影響)では、一定幅に制限したひび割れにはアクリル板を用いて模擬ひび割れを加工し、ひび割れが拡大した場合にはその影響を受けないものとしてアクリル板を用いずに開放させ、これらを比較する。(b)圧縮応力付与の劣位の程度の検討(応力付与の影響)では、PRC モデル供試体を対象とし、荷重によって発生する圧縮応力と、荷重作用に伴う曲げ引張応力の発生によるその圧縮応力の減少との応力変動を荷重によって与える。これらの有無の影響の比較によって、圧縮応力付与の劣位の程度を検討する。さらに、本研究の主目的となる、(c)ひび割れ幅が一定幅に制限された条件と圧縮応力が付与された条件の複合的影響の検討(ひび割れ幅制限と応力付与の複合的影響)では、ひび割れ幅を一定に制限する影響(優位性)と、圧縮応力付与による影響(劣位性)の、いずれが塩分浸透特性への影響度合いが大きいかを明らかにするために、圧縮応力が付与されたひび割れ幅が一定の供試体と、圧縮応力が付与されずひび割れ幅が拡大した供試体の実験結果の比較検討を行う。なお、実際の PRC 部材では、ひび割れの開閉が生じるためひび割れ面の凹凸の繰り返し接触による損傷進行が影響すると考えられるが、本実験では影響因子を限定し実験を行うために、それによる損傷進行の影響は無視した。

2.3 配合と使用材料および力学的性質

塩分浸透への骨材の影響を少なくするため、供試

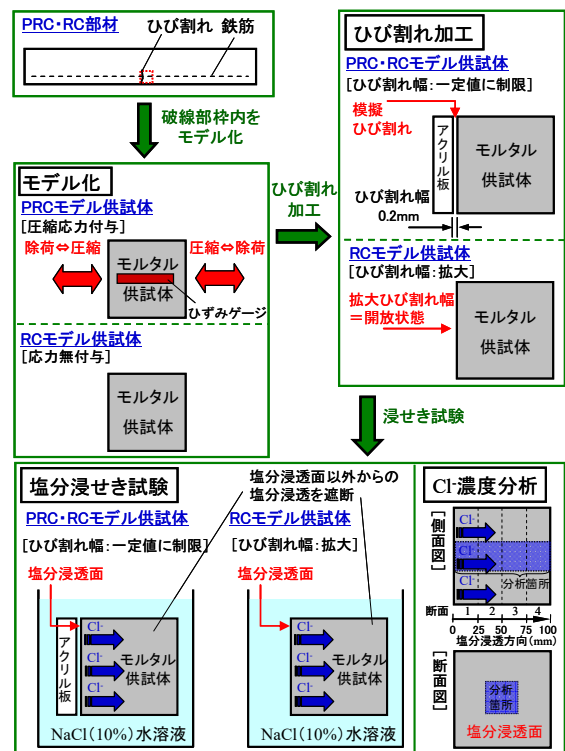


図-2 実験概要

表-1 モルタルの配合と力学的性質

W/C (%)	S/C (vol%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )			単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
		W	C	S			
55	400	257.9	469.0	1576	2145	36.8	22.1

表-2 供試体一覧

モデル化構造形式	供試体名	ひび割れ条件	圧縮応力付与条件		備考
		ひび割れ幅 $w_{cr}$	繰返し回数 n (回)	上限荷重の圧縮強度比 ( $f_{cr}$ 比)	
RC	NL-N	拡大(開放)	0	0%	既往研究 <sup>1)</sup>
	NL-CR	制限(0.2mm)			"
PRC	D30-2CR	制限(0.2mm)	100	30%	既往研究 <sup>1)</sup>
	D55-2CR	"		55%	"
	D30-4CR	"	10,000	30%	"
	D55-4CR	"		55%	"
	D30-6CR	制限(0.2mm)	1,000,000	30%	本研究
	D55-6CR	"		55%	"

体にはモルタルを用いる。配合と使用材料およびその力学的性質を表-1に示す。セメント (C) には普通ポルトランドセメントを、細骨材 (S) には山砂 (表乾密度  $2.65\text{g/cm}^3$ , 最大寸法  $2.5\text{mm}$ ) を、そして練混ぜ水 (W) には蒸留水を用いた。打設後は 28 日間の封緘養生を実施した。材料の力学的性質は、モデル供試体と同一形状の立方体 (1 辺  $100\text{mm}$ ) を用いた。圧縮載荷試験から、圧縮強度とヤング係数を算出した。なお、算出結果は、高さとの幅の比に基づく補正をしていない値を示している。

## 2.4 圧縮応力付与のための載荷

圧縮応力付与のための載荷は PRC モデル供試体に対し行う。供試体形状は、模擬ひび割れ用のアクリル板の加工を施しやすい形状とするため、1 辺が  $100\text{mm}$  の立方体とした。供試体一覧を表-2に示す。応力変動の回数 (繰返し回数  $n$ ) の違いによる  $\text{Cl}^-$  の浸透特性の変化を見るために、動的載荷回数を変化させた。本研究は継続研究であり、本稿では  $1,000,000$  回動的載荷の結果が新たに得られたため、その結果を中心に著者の既往研究結果 ( $n=100$  回および  $10,000$  回)<sup>4)</sup> も適宜用いて、種々の検討を行う。なお、既往研究結果の供試体は本研究の供試体と同一バッチで打設したものである。上限荷重は、本供試体と同一バッチの同形状寸法の供試体を用いた圧縮強度試験結果を基準に決定した。上限荷重の圧縮強度比 ( $f_c$  比) 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  $30\%$  と、参考のために  $200$  万回疲労強度の目安とされる  $55\%$  とした。下限荷重は、荷重制御の安定性を保つために上限荷重の  $10\%$  とした。

載荷は油圧サーボ式疲労試験機を用いて行った。繰返し載荷は荷重制御とし、正弦波による片側載荷とした。載荷速度は、予備実験によって試験機の荷重制御可能な周波数を検討し、安定した荷重制御ができる  $0.5\text{Hz}$  とした。計測項目は、試験機のロードセルによる荷重と、全側面に各 1 枚ずつ載荷軸方向に貼り付けたひずみゲージによる軸方向ひずみ (各面 1 枚の計 4 枚) である。計測は動ひずみ計を介し、周波数  $50\text{Hz}$  でデータを取得した。載荷終了後は、荷重除荷後の残留ひずみを取得した。

## 2.5 ひび割れ条件およびその加工方法

ひび割れ条件は、ひび割れ幅  $w_{cr}$  を一定に制限 ( $w_{cr}=\text{制限}$ ) するものと拡大 ( $w_{cr}=\text{拡大}$ ) したものととなる。 $w_{cr}=\text{制限}$  時の  $w_{cr}$  は、実構造物における一般的な補修・補強の目安とする値を想定し  $0.2\text{mm}$  とした。ひび割れの加工においては、供試体の塩分浸透面とアクリル板の間隔が条件どおりの  $w_{cr}$  となるように、プラスチック製の棒部材を供試体とアクリル板に接着剤でバイパスし固定保持した。 $w_{cr}=\text{制限}$  と拡大のいずれの条件においても塩分浸透面は 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。

## 2.6 塩分浸せき試験

塩分浸せき試験は、JSCE G 572<sup>5)</sup> に準じて、濃度  $10\%$  の塩化ナトリウム水溶液中に供試体を 3 ヶ月間浸せきした。 $\text{Cl}^-$  濃度の分析は、JIS A 1154<sup>6)</sup> に準じた。図-2に示す塩分浸透方向にて、供試体を塩分浸透面から  $25\text{mm}$  間隔に 3 箇所を乾式切断し、4 断面とした。断面は塩分浸透面に近い順に 1~4 とした。 $\text{Cl}^-$  濃度の分析箇所は、各断面の中心部 (1 辺約  $3.3\text{cm}\times 3.3\text{cm}$ ) とし、サンプルの微粉末化、全  $\text{Cl}^-$  の硝酸による煮沸抽出、ろ過および自動電位差滴定装置による電位差滴定法の工程で行った。

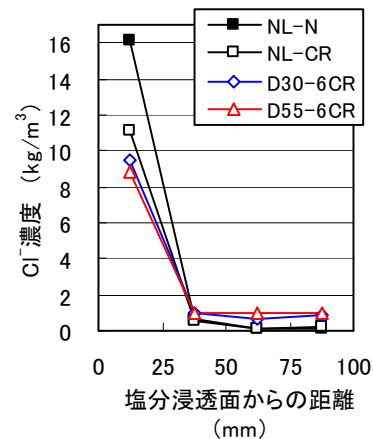


図-3 塩分浸透面から垂直方向への  $\text{Cl}^-$  濃度分布

## 3. 結果および考察

### 3.1 塩分浸透面から垂直方向への $\text{Cl}^-$ 濃度分布

塩分浸透面から垂直方向への  $\text{Cl}^-$  濃度分布を図-3に示す。図より、浸透方向に濃度勾配が生じていることが認められた。その違いが大

大きく表れる塩分浸透面に近い表面付近 (断面 1) において, (a)ひび割れ幅制限の影響を検討すると,  $w_{cr}$ =制限 (NL-CR) の結果が  $w_{cr}$ =拡大 (NL-N) の結果よりも小さくなり, その優位性が確認された。(b)応力付与の影響を同ひび割れ幅の条件で検討すると, 塩分浸透面に近い表面付近 (断面 1) では, 圧縮応力付与 (D30-6CR, D55-6CR) の Cl濃度は, 応力無付与 (NL-CR) より低くなり, 圧縮応力付与の影響 (劣位性) が見られなかった。一方, コンクリート内部 (断面 2 以降) では, 圧縮応力付与の Cl濃度が, 応力無付与より高くなる傾向, すなわち圧縮応力付与による影響 (劣位性) が表れた。断面 1 の塩分浸透の挙動に断面 2 のような影響 (劣位性) が表れなかった理由として, クリープによる載荷面付近の組織の緻密化なども考えられるが, 本実験には根拠となるデータが取得できず断定できない。これについては, 圧縮作用時の各位置のひずみ分布と, 浸透した Cl濃度の関係から解明すべく, 今後の課題としたい。(c)ひび割れ幅制限と応力付与の複合的影響を検討すると, 圧縮応力付与の  $w_{cr}$ =制限 (付与 ( $w_{cr}$ =制限)) (D30-6CR, D55-6CR) の各 Cl濃度と, 応力無付与の  $w_{cr}$ =拡大 (無付与 ( $w_{cr}$ =拡大)) (NL-N) の Cl濃度との比較によれば, 断面 1 では付与 ( $w_{cr}$ =制限) の各 Cl濃度は, 無付与 ( $w_{cr}$ =拡大) より低くなり, ひび割れ幅の拡大の制限による影響 (優位性) が応力付与の影響 (劣位性) よりも優る結果となった。断面 2 以降となると, 付与 ( $w_{cr}$ =制限) の各 Cl濃度と無付与 ( $w_{cr}$ =拡大) の Cl濃度はかなり近くなり, 断面 1 の大小関係から逆転する傾向と, 断面 3,4 になるとその関係は顕著になった。

### 3.2 Cl濃度と圧縮強度比の関係

図-3 で得られた結果を定量的に検討するために, Cl濃度と圧縮強度比の関係 ( $n=1,000,000$ ) を図-4 に示す。図には, Cl濃度 (全断面合計) と, 3.1 にて載荷面に近いか否かの違いによって応力付与により浸透する Clが異なる挙動を示した現象を見るために Cl濃度 (断面 1), (断面 2) を示した。Cl濃度 (全断面合計) は断面 1~4 の Cl濃度の合計である。(a)ひび割れ幅制限の影響を検討すると, ひび割れ幅の制限 ( $w_{cr}$ =制限) と拡大 ( $w_{cr}$ =拡大) の  $f_c$  比=0%の Cl濃度の比較により,  $w_{cr}$ =制限は  $w_{cr}$ =拡大の全グラフの平均で 72.0%を示し, ひび割れ幅を一定に制限することの優位性が認められた。(b)応力付与の影響を同ひび割れ幅の条件で検討すると,  $w_{cr}$ =制限における応力無付与 ( $f_c$  比=0%) と付与 ( $f_c$  比=30%, 55%) のデータの比較において, 全断面合計では圧縮応力付与のデータと  $f_c$  比=0% はほぼ同値を示し, また断面 1 では応力付与のデータは  $f_c$  比=0%の 80.5~86.3%を示し, さらにより大きい応力の  $f_c$  比=55%のデータが  $f_c$  比=30%より小さくなり, 圧縮応力付与の影響 (劣位性) は表れなかった。一方, 断面 2 では応力付与のデータは  $f_c$  比=0%の 1.75~1.77 倍を示し, 圧縮応力付与の影響 (劣位性) が表れた。(c)ひび割れ幅制限と応力付与の複合的影響を検討すると, 付与 ( $w_{cr}$ =制限) の各 Cl濃度と, 無付与 ( $w_{cr}$ =拡大) の Cl濃度とを比較すると, 付与 ( $w_{cr}$ =制限) の各 Cl濃度は, 無付与 ( $w_{cr}$ =拡大) のデータより, 全断面合計で 68.1~69.9%, 断面 1 で 54.8~58.8%, 断面 2 で 1.37~1.38 倍となり, 断面によってひび割れ幅の拡大の制限による影響 (優位性) と応力付与の影響 (劣位性) が異なる結果が確認された。

図-4 の傾向を多くのデータから検討するために, 応力付与された  $w_{cr}$ =制限の既往研究結果を含めて, 図-5 に示す。図より, 図-4 と同様に, 全断面合計および断面 1 では, 応力付与された各 Cl濃度は無付与 ( $w_{cr}$ =拡大) の Cl濃度よりほとんどのケースで低くなり, 逆に断面 2 においてほとんどが高くなる傾向が表れた。ここで, 断面 1 は上述のような何らかの影響で応力付与の影響が表れにくくなっていると仮定し, 応力付与の影響が顕著に表れている断面 2 からその影響を検討する。その結果,  $f_c$  比=0% ( $w_{cr}$ =拡大) のデータに対する圧縮応力付与の Cl濃度の増加割合を求めると,  $f_c$  比=30% では 1.03~1.62 倍程度,  $f_c$  比=55%では 0.59~2.06 倍程度となり,  $f_c$  比の増加に伴い Cl濃度が大きく, またばらつきも大きくなる傾向が示された。このことから, 繰返し応力付与の影響をみると,  $f_c$  比=30%では比較的小さい影響であったが, それ以上の応力になるとその影響は大きくなり, 付与される

応力の大きさ次第では、ひび割れ幅の拡大制限による影響（優位性）よりも応力付与による影響（劣位性）が大きくなる可能性が示唆された。そして、図-4で得られた結果とこの結果を踏まえて、(c)ひび割れ幅制限と応力付与の複合的影響を検討すると、 $f_c$ 比=30%以下の低い応力付与条件であれば、ひび割れ幅拡大の制限による影響（優位性）が応力付与による影響（劣位性）よりも優るようになるものと考えられる。

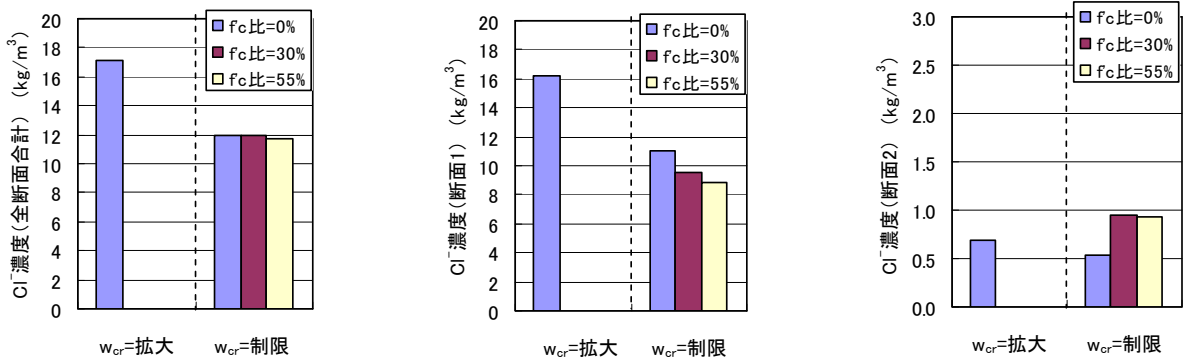


図-4 Cl<sup>-</sup>濃度と圧縮強度比の関係 (n=1,000,000)

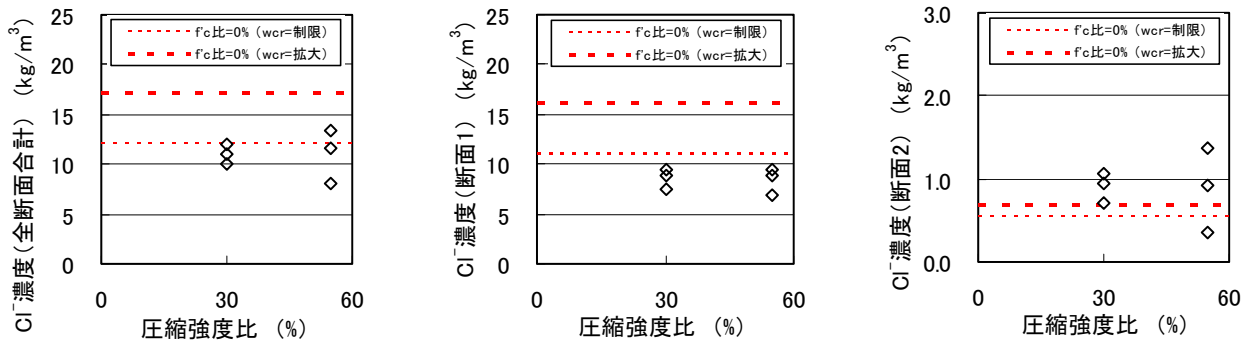


図-5 Cl<sup>-</sup>濃度と圧縮強度比の関係 (n=全データ)

### 3.3 Cl<sup>-</sup>濃度（全断面合計）と残留ひずみの関係

saito らは、繰返し载荷による残留ひずみと塩化物イオンの透過性には相関があり、残留ひずみが小さいうちはほとんど変化がないものの残留ひずみが増加すると、それにともない急激に透過性が増加する<sup>2)</sup>ことを示した。それを参考に、Cl<sup>-</sup>濃度に対する圧縮強度比、および载荷回数の影響として、材料の損傷の累積の程度を表す指標に残留ひずみを用いて、繰返し回数の増加の影響を検討するために、 $f_c$ 比=30%の本研究と著者の既往研究<sup>4)</sup>のデータを用いた Cl<sup>-</sup>濃度と残留ひずみの関係を近似線も含めて図-6に示した。また、本研究の実験データの残留ひずみの範囲における saito らの繰返し载荷試験 ( $f_c$ 比=50%~80%, n=50~1,234,000回)の電気量と残留ひずみの関係<sup>2)</sup>を併記した。なお、ここでいう電気量とは、供試体端面に定電圧を負荷し塩分を透過させる電気化学的実験によって得られるもので、電流値と通電時間の積である。一般に電気量が大きいほど塩分浸透量は多いと判断される。

図-6より、saito らの結果は残留ひずみの増加に伴い Cl<sup>-</sup>濃度（全断面合計）が緩やかに増加する傾向がみられる。本結果では一部のデータにバラつきが現れている可能性が否めないものの、saito らの結果と同様の傾向がみられた。この結果に図-4で得られた結果を踏まえると、本研究で扱った  $f_c$ 比=30%程度より低い応力であれば問題ないと思われるが、万が一にも残留ひずみが比較的大きくなるような繰返し応力付与条件（応力と回数の組み合わせ）が与えられ、残留ひずみが大きくなるような場合は、塩分浸透特性に応力付与による影響（劣位性）が大きくなる恐れがあることが懸念される。なお、圧縮载荷していない残留ひずみゼロの状態と圧縮载荷を施したデータの近似線の切片がかい離し

ている点に関しては、図-3とその考察に関する当該箇所記したように、断面1において応力付与のデータが応力無付与のデータよりも低いことによる原因と考えられる。

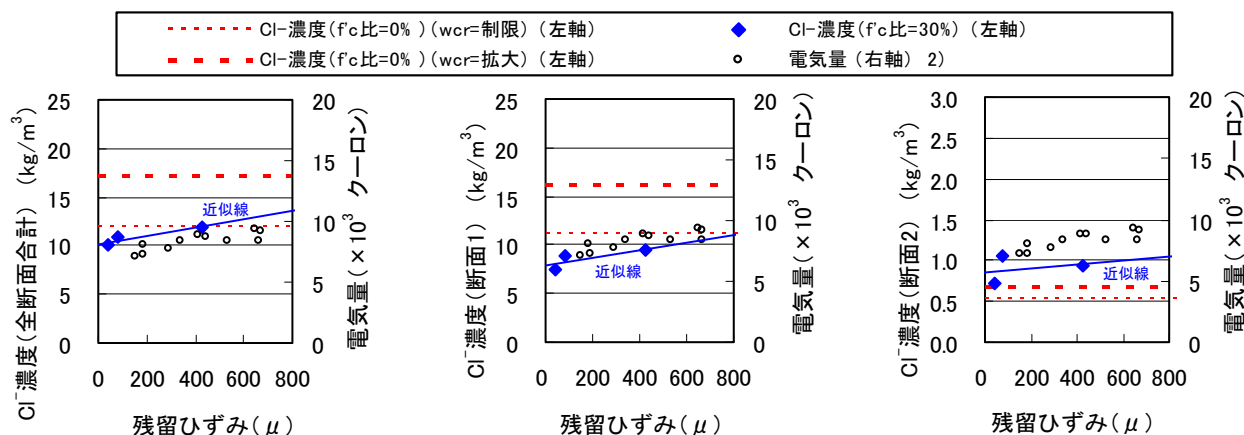


図-6 Cl<sup>-</sup>濃度と残留ひずみの関係

4. まとめ

本研究の範囲内で、塩分浸透特性に対し以下のことが明らかになった。

- 1) PRC 構造で扱う程度の小さい付与応力における繰返し载荷条件では、ひび割れ幅拡大の制限による影響（優位性）が、応力付与による影響（劣位性）よりも優る傾向がある。
- 2) 残留ひずみが比較的大きくなる繰返し応力付与条件では、ひび割れ幅拡大の制限による影響（優位性）よりも、応力付与による影響（劣位性）が大きくなる可能性がある。

ただし、塩分浸透面（応力付与面）に近い領域か否かによって、塩分浸透の挙動にひび割れ幅の拡大の制限と応力付与の影響が異なる結果をもたらしたことから、圧縮作用時の各位置のひずみ分布と浸透した Cl<sup>-</sup>濃度の関係からその相違の影響を解明すべく、今後の課題としたい。

謝辞

本研究は、科研費 (No.26820186) の助成を受けて行われた。実験は、H27 年度卒研究生の中原新太君、名塚雅義君、吉澤里香さんの熱心な取り組みによって行われた。ここに付記し、謝意を表します。

引用・参考文献

- 1) 川名 桂子, 西岡 友樹, 睦好 宏史, 浅本 晋吾: 腐食促進実験による RC および PRC 梁の鉄筋腐食に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.825-830, 2008
- 2) Saito, M. and Ishimori, H.: Chloride Permeability of Concrete under Static and Repeated Compressive Loading, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.4, pp.803-808, 1995
- 3) 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
- 4) 齊藤 準平, 下邊 悟: ひび割れを有するコンクリートの塩分浸透に及ぼすひび割れと圧縮応力の複合的な影響に関する実験的検討, コンクリート工学論文集, 第 38 巻, pp.933-938, 2016
- 5) 土木学会: 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] (2013 年版), pp.372-376, 2013
- 6) 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