

論文 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

齊藤 準平^{*1}・下邊 悟^{*2}

要旨: PRC 構造には、塩分浸透特性に対して、ひび割れ幅の拡大の制限による優位を示す知見がある。一方、コンクリートには、圧縮応力の付与による劣位を示す知見がある。本研究は、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対して、ひび割れ幅の拡大の制限と圧縮応力付与の複合的な影響を明らかにするために、それら条件を与えたモデル供試体を作製し実験的検討を行った。その結果、塩分浸透特性には、ひび割れ幅の拡大制限と圧縮応力付与の各影響が表れ、PRC 構造で扱う程度の付与応力の繰返し載荷では、ひび割れ幅の拡大制限による優位の影響が優った。

キーワード: 塩分浸透, ひび割れ幅, 圧縮応力, 塩分浸せき試験

1. はじめに

PRC 構造は、PC 構造と RC 構造の両面の長所を生かした構造であり、多くの高速道路橋および一般道路橋等に採用されている。PRC 道路橋は、RC 道路橋と同様に、長年にわたる交通量の増加や過積載などによって生じる疲労損傷と塩害の影響を同時に受けると、著しい鉄筋腐食が生じることによって、構造的機能を失う恐れがある。それらに対して、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持つ¹⁾、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^{2) 3)}、という応力付与の面からの劣位な知見がある。そのため、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 構造を対象に、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することを目的とする。

2. 本研究が対象とする応力およびひび割れ状態

本研究の目的のため、それら検討を可能にする供試体のモデル化、それらの载荷による圧縮応力の付与、ひび割れ幅の加工、および塩分浸せき試験を行った。

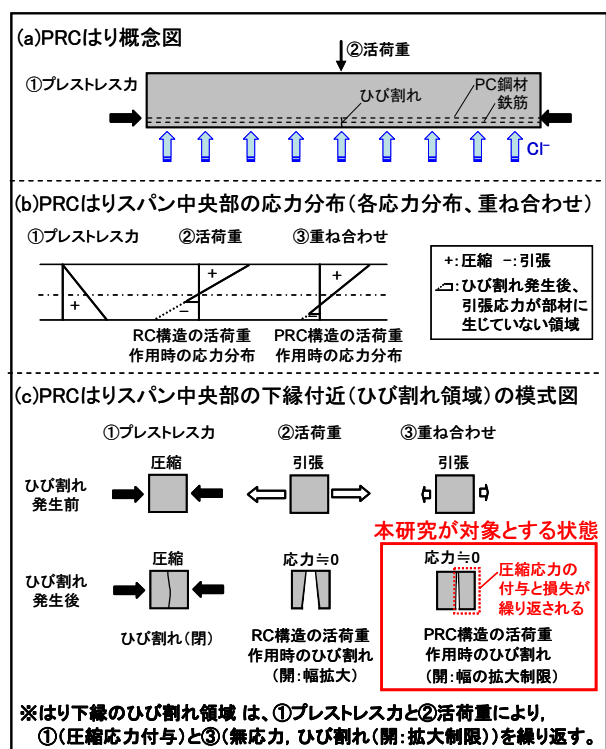


図-1 本研究が対象とする応力およびひび割れ状態

図-1は、本研究が対象とする応力およびひび割れ状態を表すものである。図には、PRC はりに活荷重が作用する時の応力分布や、ひび割れが発生する下縁付近の応力ならびにひび割れの開閉の概念を示している。PRC はりのひび割れ発生後のひび割れ領域において、活荷重が作用しないときは、圧縮応力が付与され、ひび割れは閉じた状態(図-1(c)①)となる。一方、活荷重が作用したときは、ひび割れ周辺の部材には圧縮応力はほとんど無くなり、ひび割れは拡大するものの、その幅は一定幅に制限される状態(図-1(c)③)となる。PRC はりにおいては、この状態が飛来塩分がひび割れからコン

*1 日本大学 理工学部交通システム工学科助教 博(工)(正会員)

*2 日本大学 理工学部交通システム工学科教授 工博

クリートに最も浸透しやすく、交通量が 30,000 台/日を超えるような場合は、この状態が連続的に繰り返されると予測される。したがって、本研究が対象とする応力およびひび割れ状態は、この無応力でひび割れ幅が一定幅の状態とする。

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。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返し作用によって、圧縮応力とその損失を繰返し生じることから（図-1 (c) ①, ③参照）、それによる疲労損傷の影響によって塩分は浸透をしやすくなる。そのため、その影響を検討するために、本研究における荷重による応力付与では、プレストレスによる圧縮応力発生と、荷重作用に伴う曲げ引張応力の発生による付与した圧縮応力の無応力化との、応力変動を模したものとなる。

2. 実験方法

2.1 実験概要

実験概要を図-2に示す。供試体は、PRC・RCはり下縁付近における、ひび割れとその片側の部材のかぶり部分を実構造物サイズにモデル化（それぞれ、PRCモデル供試体、RCモデル供試体と呼称する）した立方体形状とする。本研究では、次の①～③の比較検討のためにモデル化した供試体にひび割れ加工や応力付与などを施した。①ひび割れ幅を一定幅に制限した優位性の検討（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た。これらと比較することによって、PRC構造のひび割れ幅が一定幅に制限される優位性を検討した。②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、③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優位の影響と、圧縮応力付与による劣位の影響の、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、塩分浸せき試験は、JSCE G 572⁴⁾に準じて実施し、

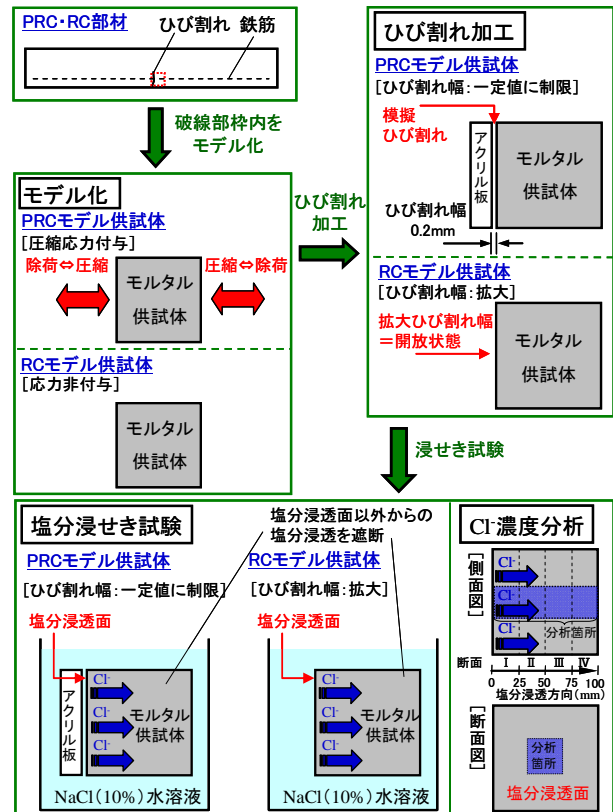


図-2 実験概要

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	2145	36.8	22.1

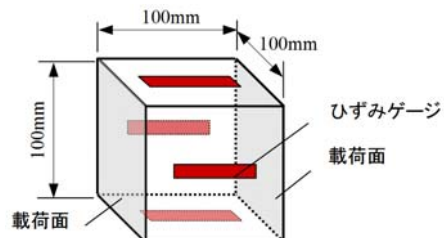


図-3 供試体形状 (PRCモデル供試体)

表-2 供試体一覧

モデル化した構造形式	供試体名	ひび割れ条件		圧縮応力付与条件				
		ひび割れ幅 w_{cr}	ひび割れ幅	載荷方法	繰返し回数 n (回)	圧縮強度比 (f_c 比) (%)		
RC	NL-CR	一定 (0.2mm)	一定 (0.2mm)	なし				
	NL-N	拡大 (開放)	拡大 (開放)					
PRC	S30-CR	一定 (0.2mm)	一定 (0.2mm)	静的	1	30%		
	S30-N	拡大 (開放)	拡大 (開放)					
	S55-CR	一定 (0.2mm)	一定 (0.2mm)					
	S55-N	拡大 (開放)	拡大 (開放)					
	S80-CR	一定 (0.2mm)	一定 (0.2mm)					
	S80-N	拡大 (開放)	拡大 (開放)					
	動的	D30-2CR	一定 (0.2mm)	一定 (0.2mm)	動的	100	30%	
		D30-2N	拡大 (開放)	拡大 (開放)				
		D55-2CR	一定 (0.2mm)	一定 (0.2mm)				
		D55-2N	拡大 (開放)	拡大 (開放)				
		10,000	D30-4CR	一定 (0.2mm)		一定 (0.2mm)	10,000	30%
			D30-4N	拡大 (開放)		拡大 (開放)		
			D55-4CR	一定 (0.2mm)		一定 (0.2mm)		
			D55-4N	拡大 (開放)		拡大 (開放)		

塩分浸せき後に塩分浸透断面方向の各断面中心部の塩化物イオン（以下、 Cl^- と略称する）濃度の分析を行う。

2.2 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。水セメント比(W/C)は55%、細骨材とセメントの容積比(S/C)は400vol%とした。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 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 、最大寸法 2.5mm)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。材料の力学的性質には、モデル供試体と同一形状の立方体(1辺 100mm)を用いた。圧縮荷重試験から、圧縮強度とヤング係数を算出した。なお、算出結果は、高さとの比に基づく補正をしていない値を示している。

2.3 圧縮応力付与のための荷重

圧縮応力付与のための荷重はPRCモデル供試体に対し行う。供試体形状を図-3に示す。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 100mm の立方体とした。

供試体一覧を表-2に示す。荷重回数は、応力変動の回数(繰返し回数 n)の違いによる Cl^- の浸透特性の変化を見るために、荷重は動的荷重($n=100$ ならびに $10,000$ 回)と参考のために静的荷重($n=1$ 回)とした。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%とした。さらに、参考のために200万回疲労強度の目安とされる55%、ならびに内部損傷が顕著となる目安とされる80%(静的荷重のみ)を追加した。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。

荷重は油圧サーボ式疲労試験機を用いて行った。繰返し荷重は荷重制御とし、正弦波による片側荷重とした。荷重速度は、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 0.5Hz 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枚ずつ荷重軸方向に貼り付けたひずみゲージ(図-3参照)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 50Hz でデータを取得した。荷重終了後は、荷重除荷後の残留ひずみを取得した。

なお、本研究ではPRC構造における、③ひび割れ幅制限と応力付与の複合的影響の検討を主目的とすることから、付与する圧縮応力が f_c 比=30%で動的荷重の条件下の実験結果を中心に検討する。

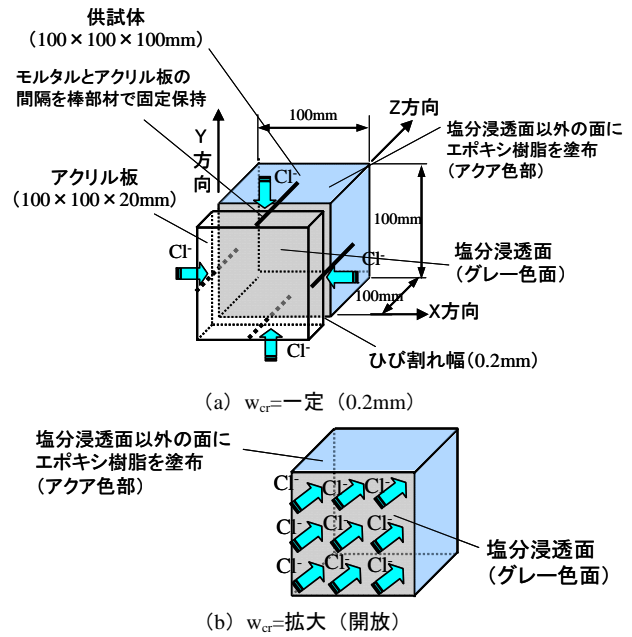


図-4 供試体のひび割れ加工状況

2.4 ひび割れ条件およびその加工方法

ひび割れ条件は、圧縮応力付与の条件ごとに、ひび割れ幅 w_{cr} を一定にする場合と拡大する場合を設けた(表-2参照)。図-4に、(a) w_{cr} =一定の供試体のひび割れ加工状況と、(b) w_{cr} =拡大の供試体を示す。 w_{cr} =一定時の 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、 0.2mm 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ごとの 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} =一定とした場合のひび割れへの塩分侵入方向は4方向とした。その理由は、付与された圧縮応力の平均箇所となる塩分浸透面の中心部を Cl^- 濃度の分析箇所とするため(図-2参照)、その分析に塩分侵入方向の違いが影響しないようにするためである。なお、 w_{cr} =一定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。

2.5 塩分浸せき試験

塩分浸せき試験は、JSCE G 572⁴⁾に準じて、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に供試体を浸せきした(図-2参照)。浸せき期間は3ヶ月とし、その間は塩化ナトリウム水溶液の水温および Cl^- 濃度を計測し、規準内に収まるようにした。

2.6 Cl^- 濃度分析

Cl^- 濃度の分析は、JIS A 1154⁵⁾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 25mm 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I~IVとした。 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 Cl^- の硝酸による煮沸抽出、ろ過、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。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮応力付与のための载荷

図-5に、圧縮応力付与のための载荷結果を示す。表-3には、载荷によるひずみ一覧を示した。载荷回数と残留ひずみの関係において、 f_c 比=30%では、残留ひずみは载荷回数の増加に伴い緩やかに増加する傾向がみられ、さらに载荷回数が増加しても、引き続き緩やかに増加すると考えられる。一方、 f_c 比=55%では、その増加傾向は f_c 比=30%と比較して大きく、载荷回数の増加に伴いその差はさらに大きくなるような推移を示すことが推測できる。これら結果は、saito や石森の以下の調査研究結果^{2),6)}から理由が説明できる。一つは、载荷の静的・動的の種類の違いとその大きさに関連するもので、静的圧縮を受けたコンクリートは、最大荷重の30~50%の荷重レベルでボンドクラックがその長さ、幅および数の増加を開始すること、さらに70~90%までの荷重レベルでモルタルクラックが進展し、ボンドクラックと連結した連続ひび割れパターンを形成すること、もう一つは、ほんの数万回の荷重繰り返しでさえ、塩化物の透過性を著しく増加する場合があることである。すなわち、PRC構造で与えられるプレストレスの応力レベル(f_c 比=30%)までは、コンクリート内部で微細ひび割れが発生しにくい、それを超えると発生しやすくなり、さらに繰り返し载荷されることによってより損傷が進むようになるわけである。

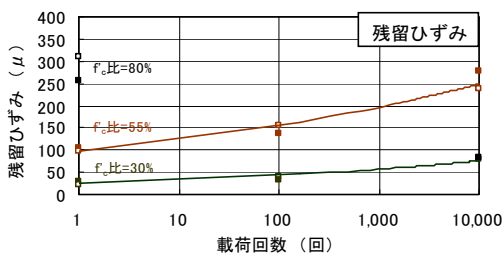


図-5 圧縮応力付与のための载荷結果

表-3 载荷によるひずみ一覧

モデル化した構造形式	供試体名	残留ひずみ (μ)	载荷最終回の振幅ひずみ (μ)	载荷最終回の上限荷重時のひずみ (μ)
PRC	S30-CR	30	-	448
	S30-N	22	-	453
	S55-CR	106	-	948
	S55-N	96	-	927
	S80-CR	254	-	1558
	S80-N	311	-	1611
	D30-2CR	40	365	472
	D30-2N	34	375	474
	D55-2CR	139	686	966
	D55-2N	155	713	1014
	D30-4CR	80	373	521
	D30-4N	83	352	502
	D55-4CR	277	722	1131
	D55-4N	237	727	1102

3.2 塩分浸せき試験結果

(1) 塩分浸透面から垂直方向へのCl⁻濃度分布

塩分浸透面から垂直方向へのCl⁻濃度分布を図-6に示す。図より、全ての供試体において、浸透方向に濃度勾配が生じていることが認められた。ここでは、ひび割れ幅の制限や応力付与のCl⁻濃度への影響について定性的に検討する。その違いが大きく表れる塩分浸透面に近い表面付近(断面I)において、①ひび割れ幅制限の影響を検討すると、動的载荷の f_c 比=30%だけでなく全データにおいて、 w_{cr} =一定の結果が w_{cr} =拡大の結果よりも小さくなり、その優位性が確認された。②応力付与の影響を検討すると、塩分浸透面に近い表面付近(断面I)では、圧縮応力付与のCl⁻濃度は、無付与(f_c 比=0%)よりほぼすべてにおいて低くなり、劣位の影響が見られなかった。一方、コンクリート内部(断面II以降)では、圧縮応力付与のCl⁻濃度が、無付与(f_c 比=0%)より高くなる傾向、すなわち圧縮応力付与による塩分浸透特性への劣位の影響

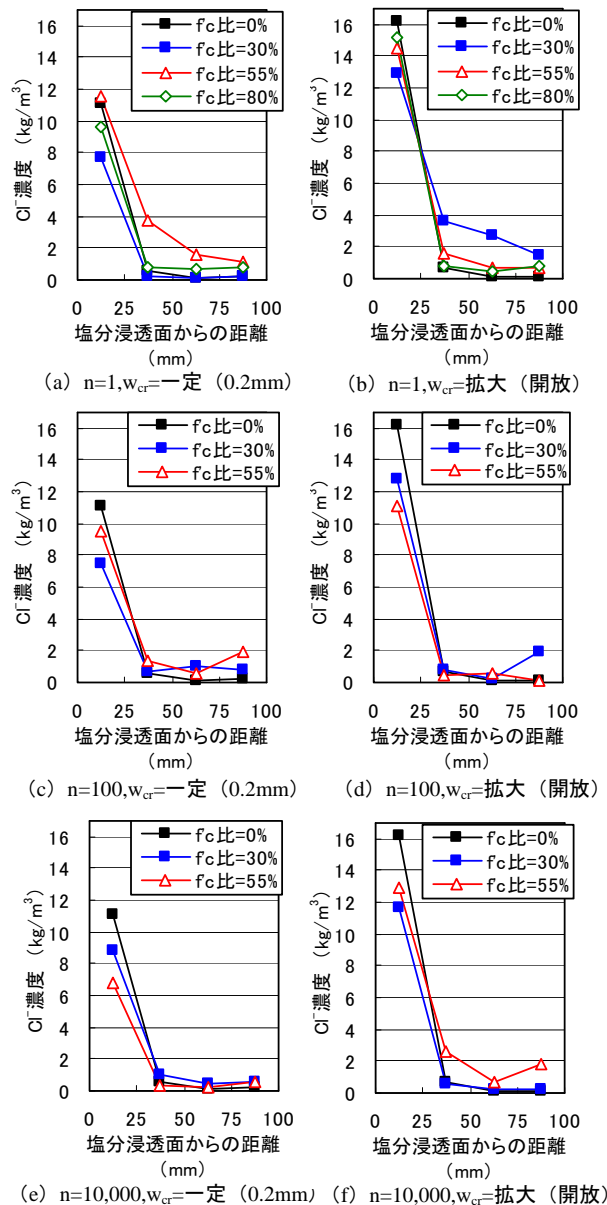


図-6 塩分浸透面から垂直方向へのCl⁻濃度分布

響が示された。断面Ⅰの塩分浸透の挙動に断面Ⅱのような劣位の影響が表れなかった理由として、局所化破壊を疑ったが、岩波らは高さ/幅=1の時には破壊は局所化せず供試体全体で平均的に破壊が進行するという実験結果⁷⁾を示しており、この可能性は低いと考えた。また、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。③ひび割れ幅制限と応力付与の複合的影響を断面Ⅰより検討する。図より、圧縮応力付与の w_{cr} =一定(付与(w_{cr} =一定))の各Cl濃度と、無付与の w_{cr} =拡大(無付与(w_{cr} =拡大))のCl濃度とを比較すると、動的載荷の f_c 比=30%だけでなく全データにおいて、付与(w_{cr} =一定)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優位の影響が応力付与の劣位の影響よりも優る結果となった。

(2) Cl濃度(全断面合計)と圧縮強度比の関係

図-6で得られた結果を定量的に検討するために、Cl濃度(全断面合計)と圧縮強度比の関係を図-7に示す。Cl濃度(全断面合計)は断面Ⅰ~ⅣのCl濃度の合計である。①ひび割れ幅制限の影響を検討すると、ひび割れ幅の一定(a) w_{cr} =一定)と拡大(b) w_{cr} =拡大)のCl濃度の比較により、 f_c 比=30%(動的載荷)の場合では、 w_{cr} =一定の平均値が10.5(kg/m³)、 w_{cr} =拡大の平均値が14.3(kg/m³)となり、 w_{cr} =一定は w_{cr} =拡大の73.5%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。また、動的載荷の全データでも、 w_{cr} =一定は w_{cr} =拡大の72.2%を示し、同様の優位性が認められた。②応力付与の影響を検討すると、圧縮応力無付与のCl濃度(f_c 比=0%)と付与の各データの比較において、 f_c 比=30%(動的載荷)の場合では、圧縮応力付与の w_{cr} =一定、拡大のそれぞれのデータが f_c 比=0%のデータの84%~92%、74%~92%となり、圧縮応力付与の劣位の影響は表れなかった。この傾向は、動的載荷の f_c 比=55%でも見られたが、原因として断面Ⅰの塩分浸透の挙動に劣位の影響が表れなかったこと(図-6参照)がCl濃度(全断面合計)に大きく影響していることから、次の項にて表面付近(断面Ⅰ)と内部(断面Ⅱ)の各Cl濃度からも検討を行う。図-7(a)より、③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} =一定)の各Cl濃度と、無付与(w_{cr} =拡大)のCl濃度とを比較すると、 f_c 比=30%、(動的載荷)において、付与(w_{cr} =一定)の各Cl濃度は、無付与(w_{cr} =拡大)のデータの58%~64%、 f_c 比=55%(動的載荷)でも47%~78%となり、ひび割れ幅の拡大の制限による優位の影響が応力付与の影響よりも優る結果となった。

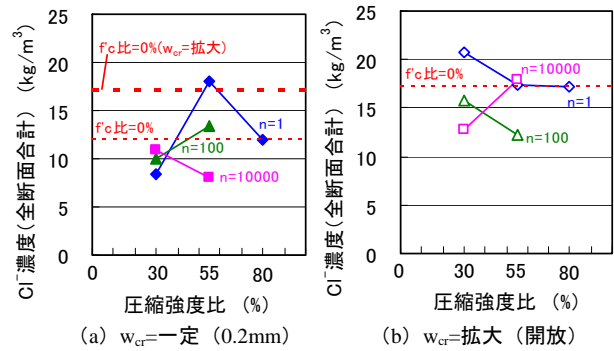


図-7 Cl濃度(全断面合計)と圧縮強度比の関係

(3) Cl濃度(断面Ⅰ, 断面Ⅱ)と残留ひずみの関係

図-6において断面ⅠとⅡにおいて、応力付与の影響の挙動が異なることから、Cl濃度と圧縮強度比の関係を図-8, 9に示し、断面Ⅰと断面Ⅱにおける応力付与の有無の関係を整理する。図-8より、断面Ⅰでは、 w_{cr} =一定と拡大の違いに関わらず、 f_c 比=30%(動的載荷)の場合では、Cl濃度は無付与のデータ(f_c 比=0%)よりすべて低くなった。一方、図-9では、断面Ⅱにおいて、 f_c 比=30%(動的載荷)の場合では、圧縮応力付与のCl濃度は f_c 比=0%のデータより、ほとんどが高くなる傾向が表れた。なお、この図-8, 9における傾向は、その他の応力付与条件においても同様に見られた。

そこで、図-9より、②応力付与の影響を検討した。断面Ⅱのデータから、動的載荷の場合における、 f_c 比=0%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、 w_{cr} =一定の場合は1.34~1.99倍

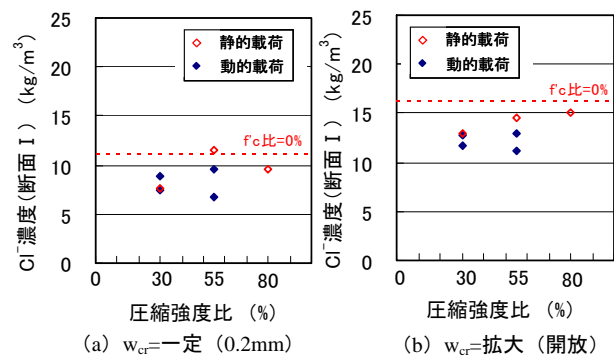


図-8 Cl濃度(断面Ⅰ)と残留ひずみの関係

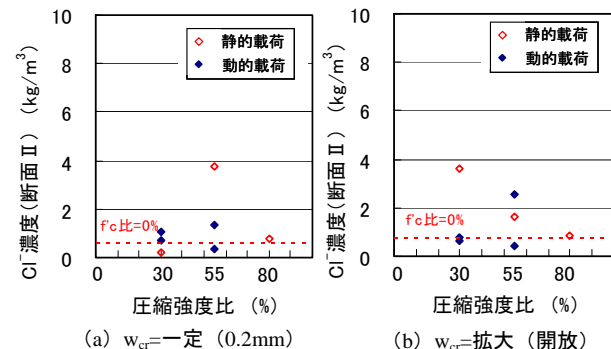


図-9 Cl濃度(断面Ⅱ)と残留ひずみの関係

程度、 w_{cr} =拡大の場合は 0.90~1.12 倍程度となり、 f_c 比=55%では w_{cr} =一定の場合は 0.66~2.59 倍程度、 w_{cr} =拡大の場合は 0.60~3.77 倍程度となり、 f_c 比の増加に伴い CI 濃度が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% (動的载荷) 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優位よりも応力付与による劣位の影響が大きくなる可能性が示唆された。さらに、図-7とここでの結果を踏まえ、③ひび割れ幅制限と応力付与の複合的影響を検討すると、本研究の動的载荷の f_c 比=30%以下となる低い応力付与条件では、ひび割れ幅拡大の制限の影響が応力付与の影響よりも優位のものと考えられる。

(4) CI濃度 (全断面合計) と残留ひずみの関係

saito らの研究結果²⁾では、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ことを示している。また、静的载荷による応力付与では、相当大きい応力を付与しないと繰返し载荷の塩分浸透挙動と同じ挙動を示さないとしている。それを参考に、CI 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、CI濃度 (全断面合計) と残留ひずみの関係を図-10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 ら繰返し载荷試験 (f_c 比=50%~80%, $n=50\sim 1,234,000$ 回)の電気量と残留ひずみの関係²⁾を併記した。なお、 f_c 比=30% (動的载荷) のデータは、CI (動的) における残留ひずみの小さい方からの2点である。

図-10 (a), (b) より、CI濃度 (全断面合計) と残留ひずみの関係について動的载荷のデータに着目して検討すると、saito らの結果は CI濃度 (全断面合計) に対し残留ひずみの影響が表れにくい小さいひずみの範囲のため、わずかに増加する傾向が見られるが、本結果では

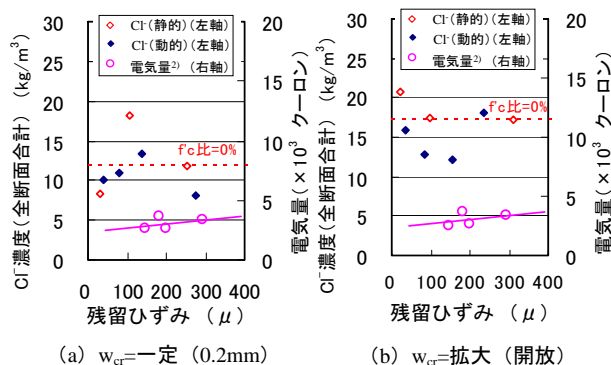


図-10 CI濃度 (全断面合計) と残留ひずみの関係

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-5の結果を踏まえると、本研究で扱った f_c 比=30%程度の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, 回数) が与えられる場合は、塩分浸透特性に影響をおよぼす恐れがあることが懸念される。

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) ひび割れ幅の拡大の制限と圧縮応力付与のそれぞれの影響が表れた。
- (2) 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、ひび割れ幅の拡大の制限による優位の影響が表れた。
- (3) 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、応力付与による劣位の影響を示す可能性がある。

謝辞

本研究の一部は、科研費 (若手 (B) No.26820186) の助成を受けたものである。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, コンクリート工学年次論文集, 第18巻第3号, pp.1-7, 2007
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 石森 広, 齊藤 満: 圧縮载荷を受けた軽量コンクリートの塩化物イオン透過性, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.997-1002, 1997
- 7) 岩波 光保, 渡辺 健, 横田 弘, 二羽 淳一郎: コンクリートの局所的圧縮破壊現象とその評価方法, 港湾空港技術研究所報告, 第42巻第3号, pp.1-32, 2003