

繰返し荷重下におけるコンクリートの塩分浸透特性

日本大学 正会員 博(工) ○齊藤 準平
日本大学 工博 下邊 悟

Abstract : Around the tension edge of the PRC beam, cyclic compressive stress is applied due to the "application of prestress" and "a temporary decrease in the prestress due to the tensile stress that accompanies a live load." Chloride ion penetration into concrete comes mostly from the beam surface, but around cracks it goes in two directions, including the surface of the concrete within the cracks. A submergence test in salt water was conducted on mortar that had undergone the application of stress, in order to clarify the effect of the relationship between the direction of the stress application and the direction of chloride ion penetration around cracks with considerable chloride ion penetration. The results showed that, (1) Chloride ion penetration from the direction of stress application was faster than that from the direction perpendicular to the direction of stress application; (2) Chloride ion penetration from the direction perpendicular to the direction of stress application was slower in comparison to the case where stress was not applied when residual strain was small.

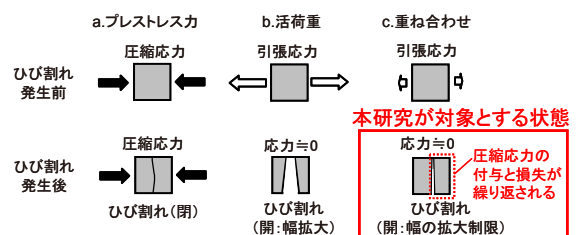
Key words : Prestress , Cyclic compressive stress , Chloride ion penetration , Submergence test

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 梁の塩分浸透特性を精度よく評価するためには、塩分浸透が著しい梁下縁付近のひび割れが存在する領域における塩分浸透特性の解明が重要となる。ところが、PRC 梁の下縁付近には RC 梁と比較しプレストレスの付与と活荷重に伴う曲げ引張応力によるその一時的損失との繰返し圧縮応力付与が作用しており、その解明には繰返し圧縮応力付与と塩分浸透特性の関係を明確にする必要がある。既往研究によれば、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^{1),2)}、という知見があるが、ひび割れ周辺のコンクリートへの塩分浸透は梁表面からだけでなくひび割れ内のコンクリート面を含め二方向であることから、応力付与方向と塩分浸透方向（応力付与方向：ひび割れから侵入した塩分のひび割れ直角方向のコンクリートへの浸透、応力付与直角方向：梁表面からコンクリートへの浸透）の関係がその塩分浸透特性に影響を及ぼすと想定すると、言い換えれば、応力付与方向からの塩分浸透と応力付与直角方向からの塩分浸透に異なる特性があるとすれば、その知見では十分とは言いがたい。そこで本研究は、繰返し圧縮応力付与方向と塩分浸透方向の関係がその塩分浸透特性にどのような影響を及ぼすかについて明確にするために、応力付与後のモルタルの塩分浸透試験による実験的検討を行った。なお、本研究は PRC はりへの塩分浸透だけでなく、繰返し圧縮を受けるコンクリートへの物質の浸透特性を解明する一助になると考える。

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. 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

本研究において供試体のモデル化に用いる PRC 梁の対象領域は、ひび割れからの塩分浸透に大きな影響を及ぼすと考えられる、応力変動差が大きい下縁付近である。図-1は、PRC 梁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、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と同時に、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る状態である。この状態は、PRC 梁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、交通量が著しい場合に繰り返し生じる状態である。

2.2 実験概要

実験概要を図-2に示す。本試験では、PRC 梁下縁付近のひび割れ周辺における塩分浸透特性に対する繰り返し圧縮応力付与の影響を検討するために、PRC モデル供試体 (タイプ PRC) に対して繰り返し圧縮荷重を与えた後、塩分浸せき試験用供試体への加工を経て、塩分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 (タイプ N) を用意する。なお、ひび割れ内部のひび割れ直角方向のコンクリート面から侵入した塩分の浸透特性の検討については、塩分浸透特性に及ぼす応力付与方向と塩分浸透方向の関係の影響にのみ着目するため、塩分浸せき試験時にはひび割れに関する全ての条件は設けず、当該コンクリート面は開放する。以上の実験によって、PRC 梁のひび割れ周辺において、この繰り返し応力付与がひび割れ内部のひび割れ直角方向のコンクリートへの塩分浸透と部材表面からコンクリートへの塩分浸透にどのような影響を及ぼすかを検討する。

2.3 配合と使用材料および力学的性質

配合と使用材料およびその力学的性質を表-1に示す。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。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 2.65g/cm³, 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。

2.4 圧縮応力付与条件一覧と載荷方法

圧縮応力付与条件一覧を表-2に示す。圧縮応力付与後の供試体の塩分浸せき試験用供試体への切断加工を容易にするため、供試体形状を立

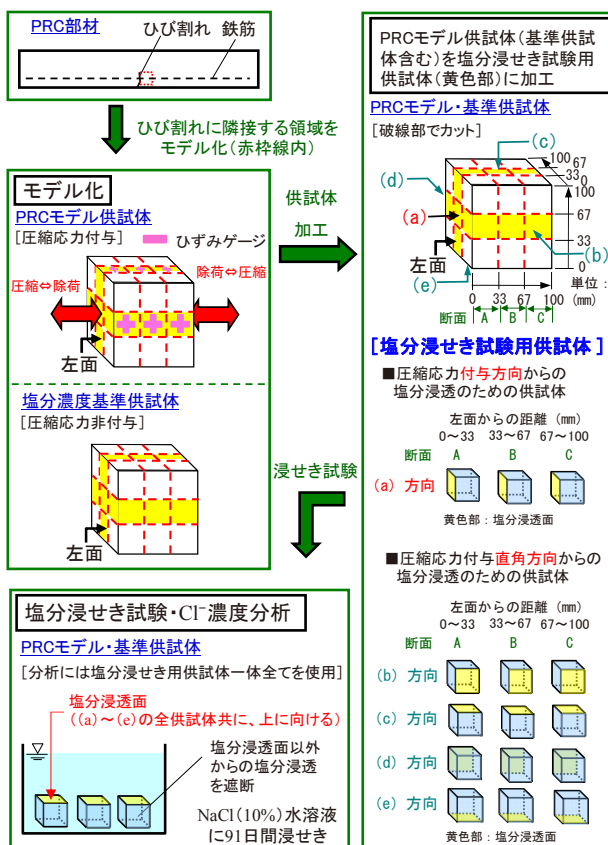


図-2 実験概要

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	2120	25.4	24.6

表-2 供試体一覧

タイプ	供試体名	載荷回数 (n)	圧縮強度比 (f _c 比)
PRC	100-30	100	30%
	100-50		50%
	10000-30	10,000	30%
	10000-50		50%
	1000000-30	1,000,000	30%
	1000000-50		50%
N	N	-	-

方体とし、塩分浸せき用供試体として十分な寸法が確保できるように、1辺は100mmとした。付与する圧縮応力の大きさや、応力付与の繰り返し回数の違いが、塩化物イオン (Cl^-) の浸透特性に及ぼす影響の違いを見るために、それら条件を変化させた。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50%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。上限荷重は、材料の力学的性質を基準に決定した。応力付与の繰り返し回数は、 $n=100$ 回、10,000回、1,000,000回とした。

荷重は油圧サーボ式疲労試験機を用いて行った。繰り返し荷重は荷重制御とし、正弦波による片側荷重とした。端面摩擦の影響を除くためにテフロンシートを供試体端面と載荷板の間に挿入した。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。塩分浸せき試験用供試体から塩分浸透特性と応力付与によるひずみの関係を検討するために、荷重時には塩分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って荷重試験を行い、荷重終了後は荷重除荷後の残留ひずみを取得した。ひずみは応力付与方向ひずみとその直角方向ひずみで、ひずみゲージはPRCモデル供試体1体あたり1面6枚、全4面計24枚を貼り付けた。計測は動ひずみ計を介し、周波数50Hzでデータを取得した。

2.5 塩分浸せき試験

塩分浸せき試験には荷重後の供試体(タイプNは基準供試体)をそのまま用いず応力付与方向に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分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分浸せき試験用供試体4体の、各断面計5体の塩分浸せき試験用供試体を切り出して用いる。

塩分浸せき試験は、JSCE G 572³⁾に準じて、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に塩分浸せき試験用供試体(1辺約33mm)を91日間浸せきした。塩分浸せき試験用供試体は、タイプPRCおよびタイプNそれぞれ1体あたり15体ずつで、全モデル供試体7体の合計は105体となる。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⁾に準じて行い、塩分浸せき試験用供試体の微粉末化、全 Cl^- の硝酸による煮沸抽出、ろ過および分析(電位差滴定法)の工程で行った。

3. 結果および考察

3.1 浸透した Cl^-

(1) 応力付与方向からの浸透

図-3に、応力付与方向から浸透した Cl^- を圧縮強度比ごとに分けて示す。用いたデータは図-2に示す塩分浸せき用供試体の(a)方向から浸透した Cl^- 濃度で、タイプPRCには当該データをそのまま使用し、タイプNには各断面(A, B, C)の当該データを0~100mm間の全断面で平均した。

図より、タイプPRCはタイプNより Cl^- が高くなる傾向を示すことが確認された。これは、圧縮応力付与によってコンクリート内部に損傷が生じたことによる影響と考えられる。実際のPRCはりにおけるひび割れに侵入した塩分のひび割れ直角方向のコンクリートへの浸透においては、この結果はプレストレスによる圧縮応力の繰り返し付与がマイナスに影響することを示唆するものといえる。なお、荷重面に近い領域(断面A)の Cl^- がほかの断面と比べて低くなったが、これは本実験において載荷板と供試体の境界部における端面摩擦の影響をテフロンシートによって除く処置をとり、それによって概ねその影響を除くことができたが、完全には取り除けなかった一部がその端面付近のコンクリートの応力付与直角方向への変形を拘束したためと考えられる。

(2) 応力付与直角方向からの浸透

図-4に、応力付与直角方向から浸透した Cl^- を圧縮強度比ごとに分けて示す。用いたデータは図-2に示す塩分浸せき用供試体の (b), (c), (d), (e) 方向から浸透した Cl^- 濃度で、タイプ PRC には当該データをそのまま使用し、タイプ N には各断面 (A, B, C) の (b), (c), (d), (e) 方向から浸透した Cl^- の平均値をさらに 0~100mm 間の全断面で平均した。

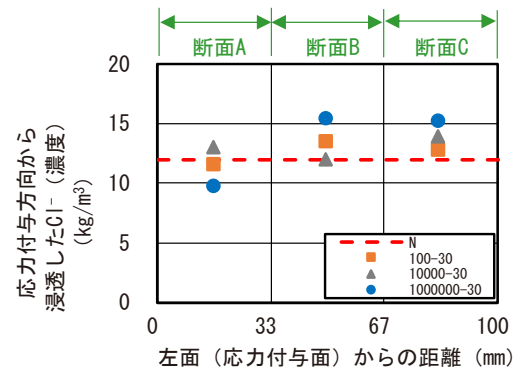
図より、タイプ PRC はタイプ N よりも Cl^- が低くなる傾向が認められた。これは、圧縮応力付与によってコンクリート内部に生じた損傷の影響よりも、応力付与による材料の緻密化の影響が大きく作用したと考えられる。実際の PRC はりにおける梁表面からコンクリートへの塩分浸透においては、この結果はプレストレスによる圧縮応力の繰り返し付与がプラスに影響することを示唆するものといえる。なお、図-3で見られた載荷面に近い領域 (断面 A) の Cl^- がほかの断面と比べて低くなった傾向は図-4では見られないが、これは端面摩擦による拘束の影響が応力付与方向のコンクリートの緻密化の要因となる圧縮変形に寄与しなかったためと考えられる。また、圧縮強度比 50% の Cl^- 濃度が圧縮強度比 30% の Cl^- 濃度よりも最大値が高く最小値が低くなる傾向、圧縮強度比 50% において繰り返し載荷回数が多いと Cl^- が低くなる傾向が見られた。

3.2 Cl^- と残留ひずみの関係

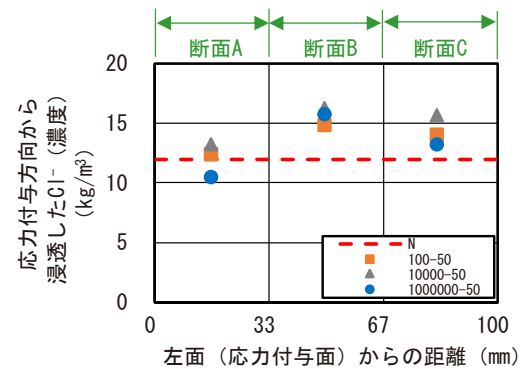
(1) 応力付与方向からの浸透

応力付与による部材の損傷の影響を検討するため、供試体に与えられた損傷の指評を残留ひずみとして、 Cl^- と残留ひずみの関係を整理した。図-5に、応力付与方向から浸透した Cl^- と応力付与方向の残留ひずみならびに応力付与直角方向の残留ひずみの関係を圧縮強度比ごとに分けて示した。図には、全データの近似線を示した。

図より、残留ひずみの方向の違いに関わらず、残留ひずみの増加とともに Cl^- も高くなる傾向が見られた。また、残留ひずみが 0 のときにタイプ N と同じ Cl^- 濃度に近い値になる傾向も示された。このことから、応力付与による損傷の影響が応力付与方向すなわちひび割れから侵入した塩分のひび割れ直角方向のコンクリートへの浸透を早めること、応力付与方向から浸透する Cl^- と残留ひずみの関係には残留ひずみが 0 のときに応力付与の影響が無く、残留ひずみの増加に伴い Cl^- が増加するという正の相関があることがわかった。

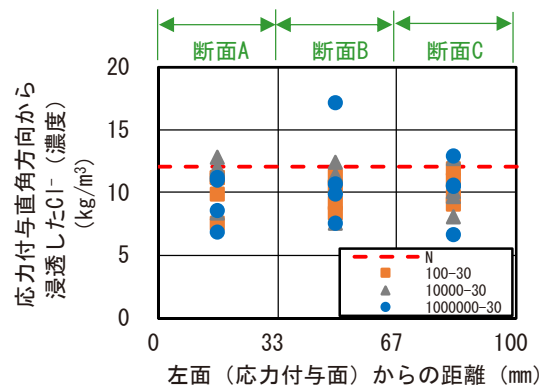


(a) 圧縮強度比=30%

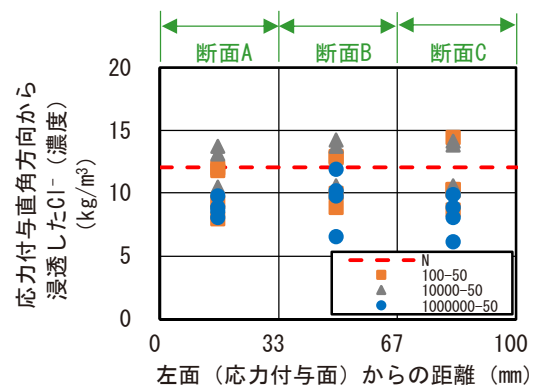


(b) 圧縮強度比=50%

図-3 応力付与方向から浸透した Cl^-



(a) 圧縮強度比=30%



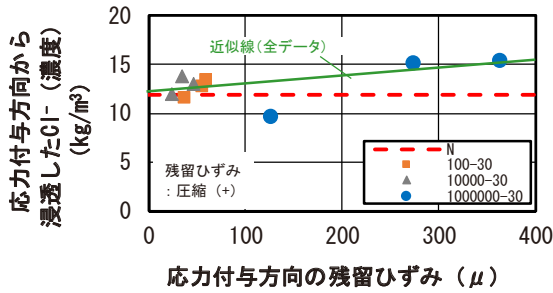
(b) 圧縮強度比=50%

図-4 応力付与直角方向から浸透した Cl^-

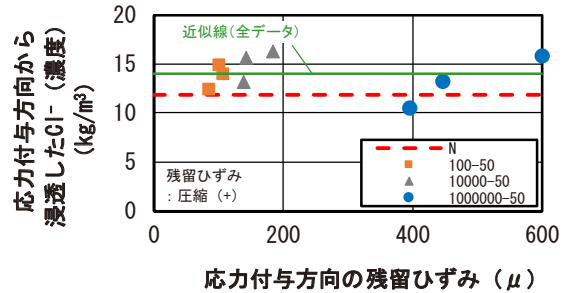
(2) 応力付与直角方向からの浸透

応力付与による部材の損傷の影響において、応力付与直角方向から浸透した Cl^- 濃度から検討するため、図-5と同様に図-6に応力付与直角方向から浸透した Cl^- と応力付与方向の残留ひずみならびに応力付与直角方向の残留ひずみの関係を圧縮強度比ごとに分けて示した。ここでは、全データの近似線と、それに追加して残留ひずみが大きく損傷の影響が著しいと考えられる応力付与の繰り返し回数がもっとも多い1000000回のデータについても近似線を示した。

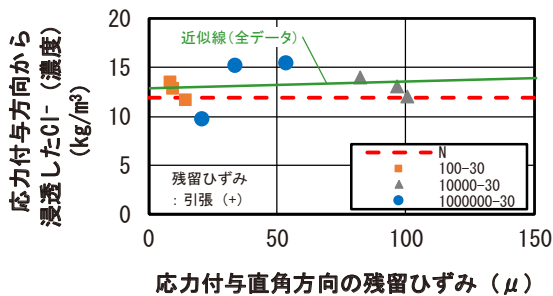
図より、タイプ PRC の Cl^- は残留ひずみの方向の違いに関わらず、図-4でも見られたように、全体的にタイプ N より低くなる傾向を示した。この傾向について、残留ひずみが小さい領域の同程度の



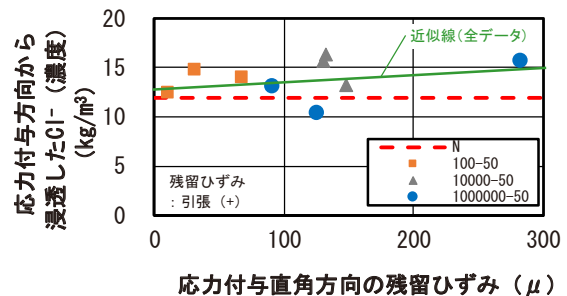
(a) 圧縮強度比=30%, 残留ひずみ:応力付与方向



(b) 圧縮強度比=50%, 残留ひずみ:応力付与方向

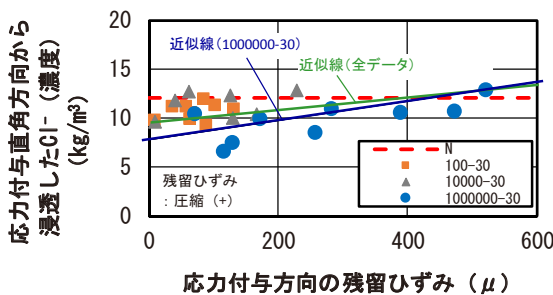


(c) 圧縮強度比=30%, 残留ひずみ:応力付与直角方向

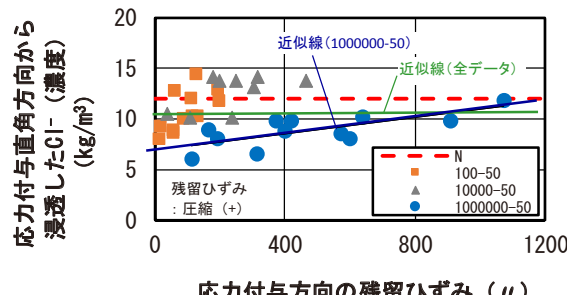


(d) 圧縮強度比=50%, 残留ひずみ:応力付与直角方向

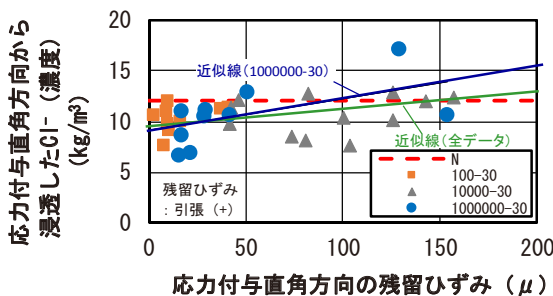
図-5 応力付与方向から浸透した Cl^- と残留ひずみの関係



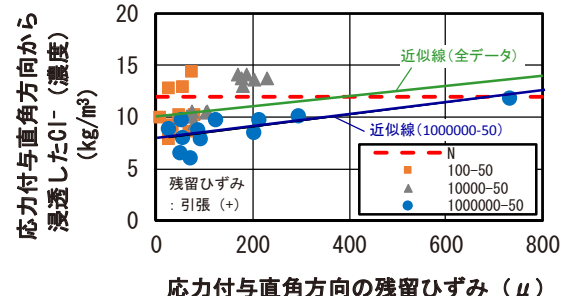
(a) 圧縮強度比=30%, 残留ひずみ:応力付与方向



(b) 圧縮強度比=50%, 残留ひずみ:応力付与方向



(c) 圧縮強度比=30%, 残留ひずみ:応力付与直角方向



(d) 圧縮強度比=50%, 残留ひずみ:応力付与直角方向

図-6 応力付与直角方向から浸透した Cl^- と残留ひずみの関係

きさの残留ひずみで比較すると、繰り返し回数が多いほうが Cl^- が低くなる傾向を示した。これは、繰り返し圧縮応力付与作用による材料の緻密化が繰り返し回数の増加に伴い進行したことによるものと考えられる。一方で、**図-5**と同様に、全体データの近似線、1000000回データの近似線共に残留ひずみの方向の違いに関わらず、残留ひずみの増加に伴い Cl^- が高くなる傾向が見られた。以上をまとめると、応力付与直角方向からの Cl^- の浸透には、繰り返し圧縮応力付与による材料の緻密化と損傷の影響が複合して影響していると考えられ、今回の実験結果を整理したその関係は、材料の緻密化の影響がタイプ N よりもマイナス分の切片を示し、損傷の影響が残留ひずみの増加に伴う Cl^- の増大となる傾きを示す一次式として表されることがわかった。

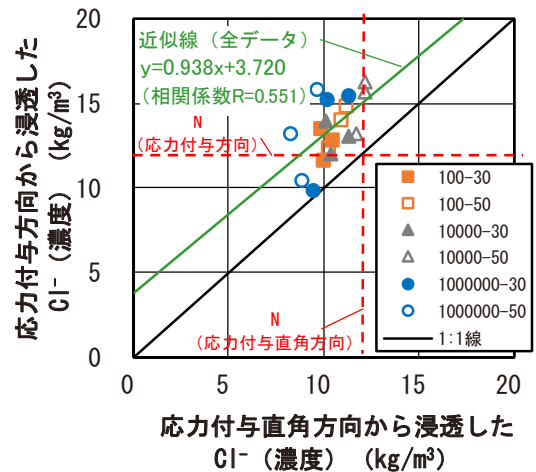


図-7 各方向から浸透した Cl^-

3.3 応力付与方向と応力付与直角方向から浸透した Cl^- 濃度の比較

図-7に、応力付与方向からの塩分浸透特性と応力付与直角方向からの塩分浸透特性の関係について、 Cl^- で整理したものを示す。プロットデータは、同一供試体の各断面における、応力付与方向の当該データ (縦軸) と、応力付与直角方向の4面の各データの平均値 (横軸) を用いた。さらに、図には各浸透方向から浸透したタイプ N の Cl^- 濃度と、1:1 線、ならびに近似線を併記した。

図より、応力付与方向から浸透した Cl^- の濃度が 1:1 線より高く、応力付与方向からの塩分の浸透が応力付与直角方向よりも容易であることが分かる。また、応力付与方向からと応力付与直角方向からの塩分浸透の関係は、近似線が 1:1 線とほぼ平行の関係にあることが読み取れ、また応力付与直角方向からの塩分浸透において緻密化によって塩分が浸透しにくくなった分が、1:1 線よりシフトした分と捉えることができる。

4. まとめ

PRC 梁の塩分浸透特性について、塩分浸透が著しいひび割れ周辺においてプレストレスに相当する圧縮応力付与の方向と塩分浸透方向の関係が塩分浸透特性に及ぼす影響を検討し、以下の結論を得た。

- (1) 応力付与方向と応力付与直角方向では塩分浸透特性が異なり、塩分浸透は応力付与方向からのほうが応力付与直角方向より速い。
- (2) 応力付与によって残留ひずみが増加すると塩分浸透はしやすくなる。
- (3) 応力付与直角方向からの塩分浸透は、残留ひずみが小さい状態では応力付与されない場合と比べ遅くなる傾向を示す。

引用・参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 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