

論文 静的圧縮荷重下における繊維補強コンクリートの塩分浸透性

迫井 裕樹*1・岡田 賢司*2・堀口 敬*3

要旨: 本研究では、繊維補強モルタルおよびコンクリートの塩分浸透に及ぼす荷重の影響を把握するため、静的圧縮状態における塩分浸透を電気泳動法(非定常)により検討した。本研究の結果より、無荷重、静的荷重での塩分浸透は異なることが明らかとなった。さらに繊維を混入することで塩分浸透抵抗性が高くなる傾向にあることが明らかとなった。

キーワード: 塩分浸透, 静的荷重, 短繊維, モルタル, コンクリート

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性低下を招く主要劣化要因の一つとして、塩化物イオンの浸透およびそれに伴う鉄筋の腐食が挙げられる。各種コンクリート構造物は、その供用段階において、常に自重を含む様々な荷重が作用しており、外観上、変状が認められなくても、内部においては、多くのマイクロクラックが発生している。これらマイクロクラックは、劣化要因となり得る種々の物質(水、気体、イオン等)の移動を容易にさせ、塩化物イオンの浸透・拡散にも影響を及ぼすものと考えられる。

一方、繊維のカット長が数mmの短繊維は、荷重および乾燥収縮等に伴いコンクリート中に発生するマイクロクラックを分散・抑制することが明らかにされており、荷重作用時における塩化物イオンの浸透・拡散に対しても抑制効果が期待されている。

塩化物イオンの浸透・拡散に関して、これまでに多くの検討が行われているが、荷重の影響を考慮した研究は少ない。また荷重の影響を考慮したものであっても、塩分浸透試験実施前に除荷したものが多く、荷重状態で塩分浸透試験を実施した研究^{1),2)}は少ない。実際の多くの構造物では、供用時において、常に荷重の影響下

にあるため、荷重状態における塩化物イオンの浸透・拡散を検討することが重要である。

そこで本研究では、繊維補強モルタルおよびコンクリートを用いて、静的圧縮荷重下の塩分浸透試験を行い、繊維の形状および混入率等が圧縮応力下での塩化物イオンの浸透・拡散に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体作成

(1) 使用繊維

本研究で使用した繊維を図-1に、使用繊維の特性を表-1に示す。使用した繊維のカット長は10および30mmであり、両繊維ともストレートタイプのポリプロピレン繊維である。

(2) 配合

本研究では、普通ポルトランドセメントを用いて供試体を作成した。モルタルの配合は、水、セメントおよび細骨材を重量比で1:2:6とした。繊維の混入率は、10mm繊維で0.3、0.5および1.0%、30mm繊維で0.5、1.0および1.5%とした。また、コンクリートの配合を表-2に示す。コンクリートの水セメント比は50%、単位水量は175kg/m³、細骨材率は0.52の一定とした。粗骨材は最大寸法12mmのものを用いた。

*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (非会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究科助教授 工博 (正会員)



図－1 使用繊維（左：PP30S，右：PP10S）

表－1 使用繊維の特性

繊維	形状	材質	カット長 [mm]	径 [mm]	アスペクト比 (l/d)	密度 [g/cm ³]	引張強度 [GPa]
PP10S	ストレート	ポリプロピレン	10	0.23	43	0.9	0.52
PP30S	ストレート	ポリプロピレン	30	1	30	0.91	0.44

表－2 モルタルおよびコンクリートの配合

Type	Fiber (%V)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Fiber (g/m ³)
PC	0	175	350	928	879	0
PP30S	0.5			960	909	0.45
	1.0			953	902	0.91
	1.5			946	896	1.37
PP10S	0.3			962	911	0.27
	0.5			960	909	0.45
	1.0			953	902	0.91

またコンクリートの配合では、目標スランプ 10 ±2 cm，目標空気量 5%となるように、混和剤を適宜使用している。

(3) 供試体

供試体は 100×100×200 mmの縦打ちの型枠を用いた。打設後 24 時間で脱型し、28 日水中養生を行った後、圧縮強度の測定を行った。28 日養生した後、湿式コンクリートカッターを用いて、角柱供試体の中央部から厚さ 50±2 mmで、電気泳動試験用の供試体を切り出した。その後、材齢 91 日まで、気中養生を行った後、電気泳動試験に供した。

2.2 荷重方法

本研究の目的の一つに、荷重状態での塩分浸透・拡散を検討することがある。本研究では、

荷重状態を再現するため、図－2 に示すフレームを作成した。軸に取り付けたひずみゲージで測定を行いながら、ボルトを締め付け、供試体に静的圧縮応力を導入した。なお供試体の側面は、シリコンによりシールしている。

静的圧縮荷重の荷重レベルは、各供試体の 28 日圧縮強度の 30%を設定した。各供試体に所定の荷重を行った後、その状態を保持したまま電気泳動試験に供した。

2.3 電気泳動試験（非定常法）

塩化物イオンの浸透性の実験状況を図－3 に示す。本研究では、NT BUILD 492 –非定常状態電気泳動試験³⁾に準じて、塩化物イオンの浸透・拡散を検討した。所定の時間電気泳動した後、供試体を割裂し、割裂面に硝酸銀水溶液を

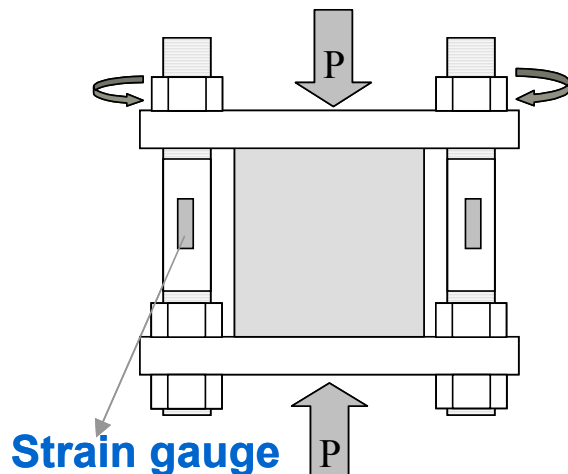


図-2 荷重フレーム

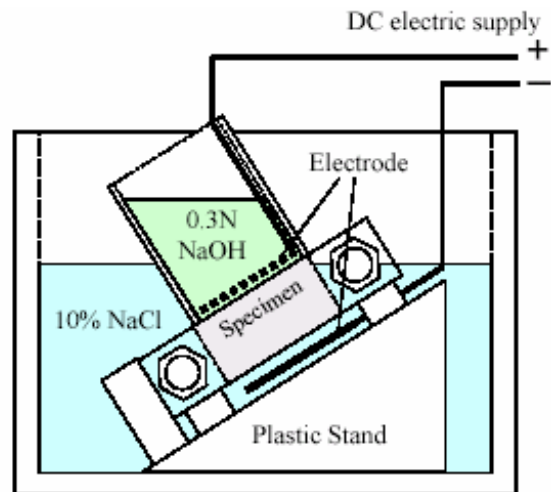


図-3 電気泳動試験（非定常法）

噴霧し、その変色域（浸透深さ）を求め、次式により拡散係数を求めた。また電気泳動試験後、供試体を割裂する際の荷重を測定し、各供試体における割裂強度とした。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (2)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (3)$$

ここで、 D_{nssm} ：拡散係数（非定常）（ m^2/s ）， R ：気体定数（ $=8.314J/(K \cdot mol)$ ）， T ：溶液の平均温度（ K ）， z ：イオンバランス（ Cl^- ， $z=1$ ）， F ：ファラデー定数（ $=9.648 \times 10^4 J/(V \cdot mol)$ ）， U ：電圧（ V ）， L ：供試体厚さ（ m ）， x_d ：浸透深さの平均値（ m ）， t ：試験時間（秒）， erf^{-1} ：誤差関数， c_d ：変色部における塩化物イオン濃度（ $c_d = 0.07N$ ）， c_0 ： $NaCl$ 溶液の塩化物イオン濃度（ $c_0 = 2N$ ）である。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

各供試体の 28 日圧縮強度を図-4 に示す。図-4 より、モルタルは繊維混入率、繊維のカット長の違いによる顕著な差は認められず、繊維無混入のものと比較して、ほぼ同程度の強度

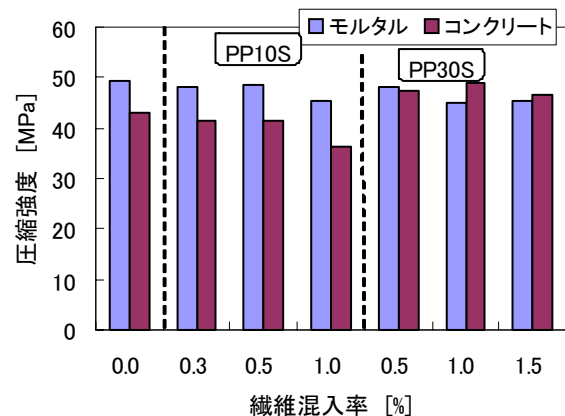


図-4 圧縮強度

を示すことが把握された。またコンクリートに関しては、PP10S は若干ではあるものの、繊維混入率の増加とともに低下する傾向が認められる。一方、PP30S に関しては、繊維混入量の違いによる差は認められないものの、全体的に繊維無混入と比較して、20～25%程度高い強度を示すことが把握された。

3.2 無載荷状態における塩分浸透

無載荷状態における繊維補強モルタルおよび繊維補強コンクリートの塩化物イオン拡散係数をそれぞれ図-5 および図-6 に示す。

繊維補強モルタルの結果（図-5）より、PP10S を混入した場合、0.3%の混入率であれば、無混入のものより高い拡散係数を示すが、

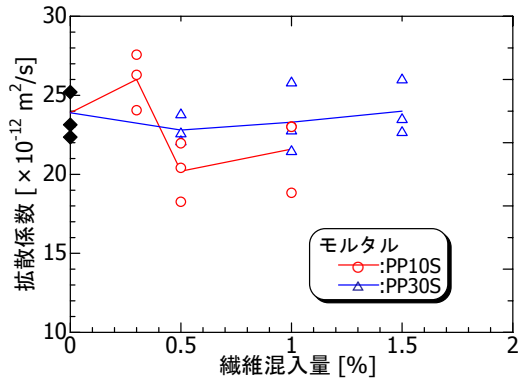


図-5 無載荷状態における繊維補強モルタルの拡散係数

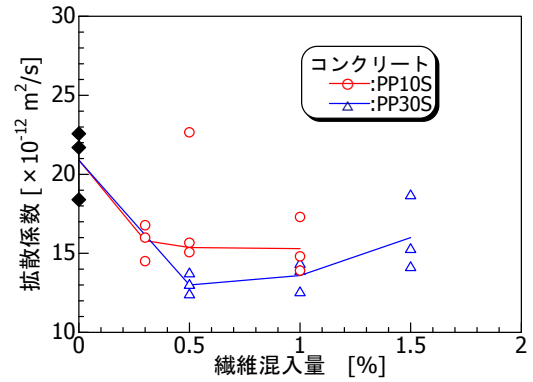


図-6 無載荷状態における繊維補強コンクリートの拡散係数

0.5%以上の混入であれば、無混入のものと比較して、10~15%程度低い値を示すことが明らかとなった。また PP10S を混入したモルタルに対しては、最適な繊維混入率の存在が示唆されている。また PP30S を用いた場合、繊維混入率の違いにより拡散係数は変化せず、無混入のものと同程度の値を示すことが把握された。

同一繊維混入量 (0.5 および 1.0%) における繊維のカット長の違いを比較すると、いずれの混入量に対してもカット長の短いものの方が低い拡散係数を示している。これより、モルタルのように内部が比較的均一な材料に対しては、カット長の短い繊維を混入することが塩化物イオン拡散に対して効果的であると考えられる。

一方、繊維補強コンクリートの場合(図-6)、繊維を混入することにより、いずれも無混入の物と比較して、低い値を示すことが分かる。特に繊維のカット長に注目すると、繊維補強モルタルの場合とは逆に、PP30Sの方が、拡散係数は低くなることが把握された。ただし、PP30Sに関しては、繊維混入量が増加することにより、拡散係数も若干ではあるものの増加する傾向にある。一方、PP10Sを混入したコンクリートでは、0.5%混入において一部高い値が示されたものの、繊維混入率の増加に伴い、拡散係数は同等あるいは若干低下する傾向を示すことが把握された。

ここで、短繊維混入率の増加に伴い総細孔量

が増加することが、水銀圧入式ポロシメータにより確認されている。総細孔量が増加するにも関わらず、拡散係数は低下する傾向にあることから、短繊維を混入することにより、マトリックス中の細孔の連結性が低下するのではないかと思われる。つまり混入された短繊維により、塩化物イオンの拡散経路となる細孔が遮断されるため、拡散係数が低下するものと考えられる。ただしこの点に関して、詳細は明らかとなっておらず、今後の検討課題である。

これらの結果より、モルタルおよびコンクリートに短繊維を混入することは、モルタルおよびコンクリート中の塩化物イオンの拡散を抑制することが可能であると考えられる。特に、モルタルの場合は、繊維のカット長の短いものが、コンクリートに対しては、繊維のカット長の長いものが有効であると考えられる。

またここで、短繊維を混入したモルタルおよびコンクリートの拡散係数を比較すると、繊維のカット長、混入率の違いによる影響を受けず、いずれの場合もモルタルの方が高い拡散係数を示すことが分かる。この点に関しては、上述の理由と同様に、コンクリートに存在する骨材および短繊維により、細孔の連結性が低下するため、結果として拡散係数が抑制されるものと考えられる。なお、このようにモルタルとコンクリートを比較した結果は、既往研究において示された結果と同様の結果^{例えば 4)}である。また若

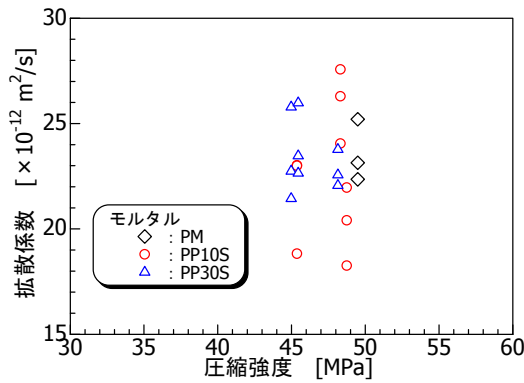


図-7 拡散係数と圧縮強度の関係

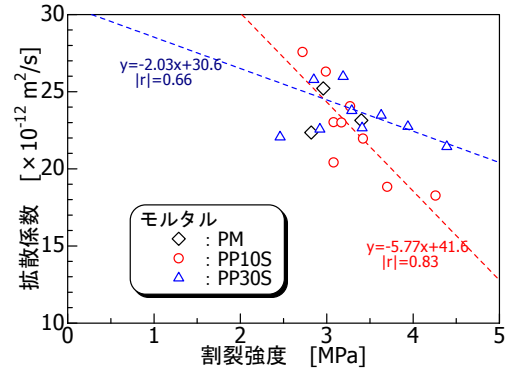


図-8 拡散係数と割裂強度の関係

干異なるが、セメントペーストとモルタルで比較した既往研究⁵⁾においても同様の傾向が見られる。

図-7に繊維補強モルタルにおける圧縮強度と塩化物イオン拡散係数の関係を、また図-8に繊維補強モルタルにおける割裂引張強度と塩化物イオン拡散係数の関係を示す。図-8中に示される破線は、最小二乗法により求めた近似線を示している。

図-7より、圧縮強度と塩化物イオンの拡散係数の間には、明確な関係は認められないことが把握された。一方、図-8の結果より、割裂強度と拡散係数の間には、比較的良好な相関が見られ、割裂強度の増加に伴い、拡散係数が低下することが把握された。その傾向は、繊維のカット長により異なり、カット長の短いもの(PP10S)の方が割裂強度の変化に対する拡散係数の変化が大きいことが明らかとなった。

3.3 静的圧縮荷状態

28日圧縮強度の30%静的圧縮荷を受けた状態における繊維補強モルタルおよび繊維補強コンクリートの拡散係数を、無荷状態における拡散係数に対する割合として図-9に示す。図-9はPP10Sに関しては0.5%、P30Sに関しては1.0%混入した結果を示している。

図-9より、繊維補強コンクリートに関して、30%の応力を作用させた状態での拡散係数は無荷の場合と比較して、変化率は10%程度であり、ほぼ同等の値を示すことが把握された。

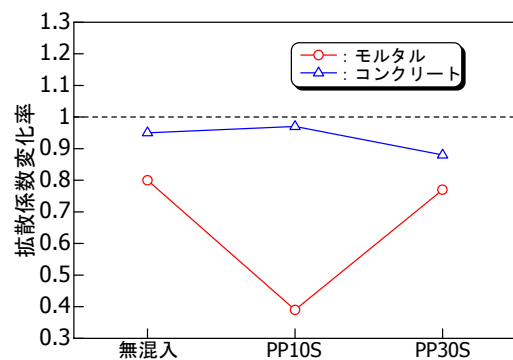


図-9 無荷時の拡散係数に対する30%静的圧縮荷時の拡散係数変化率

一方、繊維補強モルタルに関して、30%の静的圧縮荷状態における拡散係数は無荷状態と比較して、いずれも減少することが把握された。特に、PP10Sを混入した場合、その減少傾向が顕著である。

30%程度の圧縮応力が作用した状態では、マトリクス中の骨材界面において、マイクロクラックが発生し、拡散係数は無荷状態の際よりも増加すると考えられる。しかし荷状態における実験結果からは、無荷状態と同等あるいは低下する傾向が見られた。この点に関して今後詳細な検討が必要であるが、荷による内部クラックの発生と閉塞および繊維による内部クラック進展の抑制によるものと考えられる。つまり、30%程度の荷レベルにおいて、繊維無混入のものに関しては、内部クラックの発生による拡散係数の増加に比較して、荷による

内部クラックの閉塞の影響が優先し、拡散係数が低下する傾向を示したものと考えられる。また繊維を混入されたモルタルおよびコンクリートに関しては、繊維によるクラックの分散・進展の抑制効果および荷重により内部クラックを閉塞させる影響が大きく、30%程度の荷重状態において、見かけ上、拡散係数が低下する傾向を示すものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 無荷重状態において、モルタルおよびコンクリートに短繊維を混入することで拡散係数を低下させることが可能である。特にコンクリートの場合にその傾向が顕著である。
- 2) 無荷重状態における拡散係数に及ぼす繊維カット長の影響は、モルタルの場合はカット長の短い繊維が、またコンクリートの場合はカット長の長い繊維の方が、高い塩分浸透抵抗性を示す。
- 3) 繊維補強モルタルにおける拡散係数と割裂強度の関係は、PP10S, PP30Sともに高い相関があり、割裂強度の低下に伴い、拡散係数は増加することが判明した。
- 4) 繊維補強コンクリートにおいて、30%静的圧縮荷重状態での拡散係数は、無荷重状態とほぼ同等であることが把握された。
- 5) 繊維補強モルタルにおける30%静的圧縮荷重状態での拡散係数は、無荷重時と比較して、いずれも低下することが判明した。特にPP10Sを混入したモルタルはその変化率が顕著である。

本研究では、荷重作用を受けた状態での塩化物イオン拡散係数を電気泳動法（非定常）によ

り検討した。また短繊維を混入することにより、荷重が作用した際のクラックを抑制し、拡散係数を抑制することを検討した。

本研究では、荷重レベルを28日圧縮強度の30%に設定しているが、今後、荷重作用時に発生するマイクロクラック等を含む、空隙構造特性と併せて検討を行うことが必要であると考えられる。さらに、荷重レベルが変化した場合の拡散係数あるいは、圧縮応力作用時のみならず、引張応力が作用した状態での拡散係数の変化も検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Antoni, T. Horiguchi, N. Saeki : Influence of stress on chloride penetration into fiber reinforced concrete, JCI, pp.779-784, Vol.25, 2003
- 2) Antoni, T. Horiguchi, N. Saeki : Performance of fiber reinforced concrete against chloride penetration under loading, JCI, pp.921-926, Vol.26, 2004
- 3) Nordtest NT BUILD 492, "Chloride Migration Coefficient from Non-Steady State Migration Experiment", Nordtest, Finland, 1999
- 4) 北島裕之, 前田聡, 武若耕治, 山口明伸 : 通電によるコンクリート中の塩化物イオンの泳動に及ぼす諸要因, コンクリート工学年次論文集, pp.737-742, Vol.25, No.1, 2003
- 5) H. Diab, A. Bentur, C. Heitner-Wirguin and L. Ben-Dor : THE DIFFUSION OF Cl- THROUGH PORTLAND CEMENT AND PORTLAND CEMENT-POLYMER PASTES, CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, Vol.18, pp.715-722, 1988