

論文 引張荷重下における短繊維補強コンクリートの塩分浸透抵抗性

迫井 裕樹*1・堀口 敬*2・志村 和紀*3

要旨：本研究では、引張荷重が短繊維補強コンクリートの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響を電気泳動法（非定常状態）により、実験的に検討を行った。本研究の結果より、引張荷重の増加に伴い、拡散係数が増加すること及び短繊維を混入することにより、拡散係数変化率を抑制する傾向にあることが把握された。

キーワード：電気泳動（非定常）、コンクリート、引張応力、短繊維

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性問題の一つに塩化物イオンの浸透・拡散による鉄筋腐食問題が挙げられる。塩化物イオンの拡散現象に関しては、従来から非常に多くの検討が行われているが、それら既往研究の多くは、無載荷状態（載荷履歴を受けた状態を含む^{1), 2)}あるいは表面に劣化が顕在化した状態で検討を行ったものである。各種コンクリート構造物は、その供用段階において、自重やプレストレスなどを含む様々な荷重の影響下にあり、表面に劣化が顕在化する以前でさえ、内部においては、多くの微細ひび割れが生じている。それら微細ひび割れは塩化物イオンなど劣化要因となる物質の浸透・拡散にも影響を与えるものと考えられることから、実際に載荷した状態での浸透・拡散を検討することが必要であると考えられる。

一方ここで、短繊維をコンクリートに混入することで、微細ひび割れの分散・抑制効果が明らかにされており、塩化物イオンの浸透・拡散に対しても、その効果が期待される。

著者らは、移動物質として塩化物イオンを選定し、応力レベル（載荷応力/強度）の異なる静的圧縮応力状態において、短繊維補強コンクリートにおける塩化物イオンの拡散係数の変化

を検討した^{3), 4)}。本研究では、引張応力が生じた状態での、短繊維補強コンクリートにおける塩化物イオンの拡散係数の変化に関して検討を行った。

2. 実験概要

2.1 材料および配合

本研究で用いたコンクリートの配合を表-1に示す。W/C、単位水量および細骨材率は各々50%、175 kg/m³および0.52の一定とした。

本研究で用いたセメントは、普通ポルトランドセメント（密度：3.16）であり、細骨材および粗骨材はそれぞれ、鶴川産川砂（密度：2.70）および碎石（密度：2.77）を使用した。また使用繊維は、繊維長のみ異なる2種類のPVA繊維（6 mmおよび12 mm、繊維径はいずれも0.04 mm）を用いており、繊維混入量は、それぞれ、0.05、0.1および0.3%vol.とした。

2.2 供試体

2.1で示す配合で、圧縮強度用に円柱供試体（φ100×200mm）を、また電気泳動試験用に角柱供試体（100×100×200 mm）を作成した。角柱供試体は、縦型の型枠を用いて作成した。

打設後24時間で脱型し、材齢28日まで水中養生を行った。所定の水中養生期間終了後、円

*1 北海道大学大学院工学研究科 工修（正会員）

*2 北海道大学大学院工学研究科助教授 工博（正会員）

*3 北海道大学大学院工学研究科助手 工博（正会員）

表-1 配合, スランプ, 空気量および 28 日圧縮強度

Specimen	Fiber type, Length	V _f [%]	w/c [%]	Water [kg/m ³]	Cement [kg/m ³]	AE [%]	SP [%]	Air [%]	f _c at 28days [MPa]
PC	-	-	50	175	350	0.9	0.7	5.5	45.74
PVA6-0.05	PVA, 6mm	0.05				0.8	0.8	4.8	40.15
-0.1		0.1				0.7	0.9	5.2	37.90
-0.3		0.3				0.6	1.0	4.4	41.90
PVA12-0.05	PVA, 12mm	0.05				0.7	0.9	4.4	39.82
-0.1		0.1				0.6	1.0	4.5	42.11
-0.3		0.3	0.4	0.9	5.8	40.37			

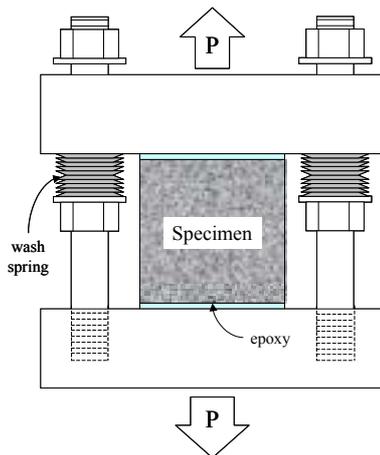


図-1 引張荷重ステンレス・フレーム

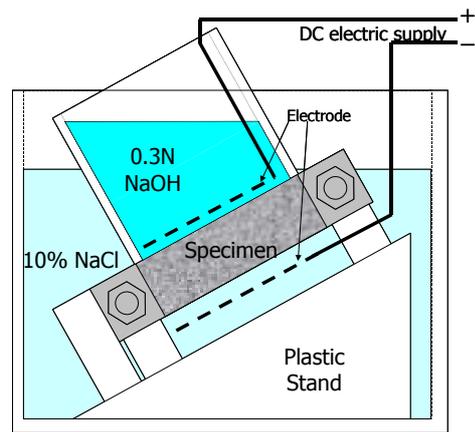


図-2 電気泳動試験概要図

柱供試体を用いて圧縮強度の測定を行い、また角柱供試体は、湿式コンクリートカッターを用いて、電気泳動試験用に厚さ 50 ± 2 mm に切断した。切断した供試体は、材齢 91 日まで恒温室内で養生を行った後、電気泳動試験を行った。

2.3 荷重方法

図-1 に本研究で用いた引張応力導入用ステンレス製フレームを示す。

上述した厚さ 50 ± 2 mm の供試体の側面をシリコンでシールした後、図に示すフレームにエポキシ接着剤で接着する。接着剤が十分に硬化するまで保持した後、スプリング下にあるボルトを締付けることにより、供試体に所定の引張応力を導入する。所定の引張応力を導入するために必要なスプリングの変位量を 0.01 mm まで読み取り可能なスケールを用いて制御し、引張力を導入している。荷重する引張応力レベルは、28 日圧縮強度の 3% および 5% とした。これらの値は、それぞれ引張強度の約 50% および約 70% 程度に相当する応力レベルである。

引張応力を導入した後、その状態を保持した

まま、電気泳動試験（非定常）に供した。

2.4 電気泳動試験

本研究では、Nord Test BUILD 492⁵⁾ に準じて電気泳動試験を行った。図-2 に試験概要図を示す。

図-1 に示すフレームにより荷重した後、供試体上面にアクリル製の箱をシリコンで貼り付け、真空飽水処理を行った。所定の時間真空放水を行った後、電気泳動試験を行った。

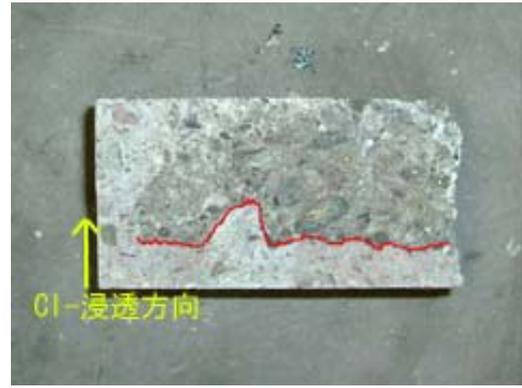
NT BUILD 492 では、電気泳動開始時の初期電流により負荷する電圧および負荷時間が異なる。本研究で用いた供試体に対して、応力レベルにより初期電流値に差が生じたが、同等の範囲にあることから、負荷電圧、負荷時間を全ての供試体において、15V、24 時間の一定とした。

所定の時間電気泳動を行った後、供試体をフレームから取り外し、応力導入方向と平行に割裂した。割裂面に 0.1N AgNO₃ 溶液を噴霧し、白く変色した部分を塩化物イオン浸透深さとして計測した。

浸透深さを測定した後、以下に示す式⁵⁾を用



(a) 無荷重状態



(b) 引張応力荷重状態

図-3 浸透状況

いて、各供試体の実効拡散係数を算出した。

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

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

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

ここで、 D_{nssm} ：拡散係数（非定常） $[\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}]$ 、 R ：気体定数 $[=8.314 \text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})]$ 、 T ：溶液の平均温度 $[\text{K}]$ 、 z ：イオンバランス (Cl^- , $z = 1$)、 F ：ファラデー定数 $[=9.648 \times 10^4 \text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})]$ 、 U ：負荷電圧 $[\text{V}]$ 、 L ：供試体厚さ $[\text{m}]$ 、 x_d ：浸透深さ $[\text{m}]$ 、 t ：電気泳動時間 $[\text{s}]$ 、 erf^{-1} ：逆誤差関数、 c_d ：変色部における塩化物イオン濃度 ($c_d = 0.07 \text{N}$)、 c_0 ： NaCl 溶液の塩化物イオン濃度 $[c_0 = 2 \text{N}]$ である。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

材齢 28 日で測定した圧縮強度の結果を表-1 に示す。結果は各配合とも 3~4 本の供試体の平均を示している。これより、繊維を混入した供試体の圧縮強度は、無混入の供試体と比較して、約 8~18% 程度低い値を示すことが把握された。しかし本研究の範囲内では、繊維長の違

いあるいは、繊維混入率の違いによる明確な傾向は見られなかった。

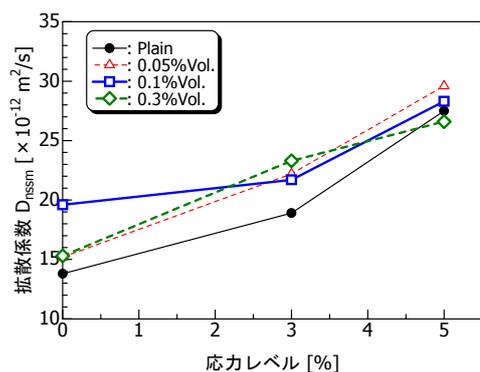
3.2 塩化物イオン浸透状況

引張応力を荷重した際、応力レベルが高くなるにつれて、ひび割れがある一部に集中するものと考えられ、クラックが集中する部分においては、浸透深さが他の部分より卓越することになると考えられる。

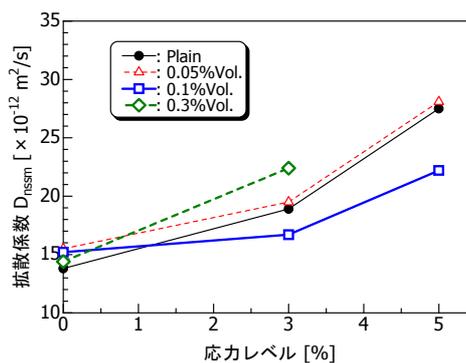
引張応力を導入した際の塩化物イオンの浸透状況に関して、図-3 に一例を示す。図-3 (b) は、応力レベル 3% を荷重した繊維無混入のもの断面である。図中の矢印が浸透方向であり、供試体断面中に示す太線は浸透深さを示している。また比較として、同一の供試体の無荷重状態における塩化物イオン浸透状況 (図-3 (a)) もあわせて示す。

これより引張応力を導入した供試体に関しては、無荷重状態の供試体における浸透状況とは異なることが分かる。つまり、無荷重状態では、供試体断面において浸透深さがほぼ一様であるのに対して、引張応力を導入した断面では、断面中の一部に、他の部分より卓越した浸透が生じていることが確認される。供試体断面において、目視で確認されるようなひび割れは確認されなかったが、引張応力導入に伴い生じる微細ひび割れが浸透状況の変化に影響を及ぼしたものと考えられる。

最大の浸透深さを把握することが最も重要と



(a) 6mm fiber



(b) 12mm fiber

図-4 拡散に及ぼす応力レベルの影響

なることから、本研究において、拡散係数を算出する際、式(1)中の浸透深さに、最大浸透深さをを用いて計算することとする。

3.3 拡散係数に及ぼす応力レベルの影響

図-4 (a) および (b) に繊維長 6 mm および 12 mm の短繊維を用いた場合の拡散係数を示す。図中の各点は、各供試体の拡散係数の平均値を示している。縦軸および横軸はそれぞれ、拡散係数および载荷した応力レベルを示している。

図-4 (a) および (b) より、引張応力が作用した状態における拡散係数の変化の傾向は、供試体の種類によらず、類似した傾向を示す。つまり、応力レベルの増加に伴い、拡散係数も増加する傾向を示すことが把握された。

繊維長 6 mm (図-4 (a)) に関して、拡散係数の値は、無混入のものと比較して、同等あるいは若干高い値を示すことが把握された。また混入率の違いによる影響として、応力レベル 0% (無载荷状態) においては、混入率 0.1% vol. が他のものより高い値を示すが、応力レベル 3 および 5% においては、混入率の違いによる明確な傾向は確認できず、いずれも同等の値を示すことが把握された。

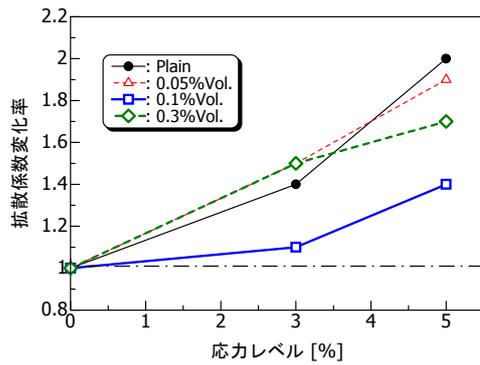
また繊維長 12 mm (図-4 (b)) に関して、混入率 0.05% vol. においては、全応力レベルを通して、繊維無混入のものとほぼ同等の値を示しており、0.05% vol. 程度の混入率では、繊維混入による影響は少ないものと考えられる。ま

た混入率 0.1% vol. においては、応力レベルの増加に伴い拡散係数も増加しているが、その値は繊維無混入と比較して低い値を示しており、繊維混入による効果であると考えられる。

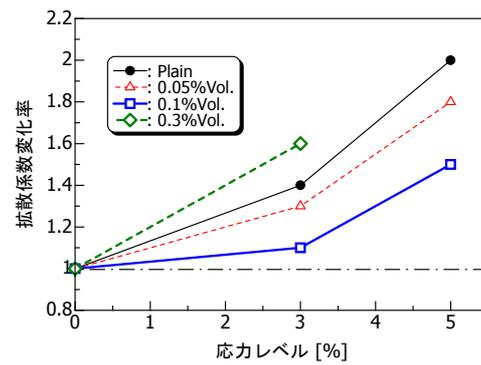
また図-4 (a) および (b) より、繊維長の違いに着目すると、全応力レベルを通じて、繊維長の長いもの (12 mm) を用いた際に、拡散係数が低い値を示す傾向にあることが把握された。拡散係数に及ぼす繊維長の影響は、混入率 0.1% vol. において特に顕著であり、引張応力が導入された状態における拡散係数の抑制には、繊維長の長いものが効果を示すと考えられる。

この点に関して、引張応力により生じるひび割れは繊維長の違いにより異なり、塩化物イオンの拡散経路となり得るひび割れのサイズおよびそれらの連結性が異なるためと考えられる。ただしひび割れの連結性の違いおよびそれに及ぼす繊維長および混入率の影響に関しては、今後のより詳細な検討が必要であると思われる。

また、引張応力が作用する状態において、応力レベルの増加に伴い拡散係数が増加する傾向を示すが、これは载荷状態における供試体の見掛けの密度の変化に起因すると思われる。つまり、引張载荷状態と無载荷状態では、供試体内部の微細ひび割れあるいは空隙の形状が異なり、引張载荷状態において供試体の見掛けの密度が低下することが、拡散係数の増加につながると考えられる。ここで応力レベルの低い圧縮载荷



(a) 6mm fiber



(b) 12mm fiber

図-5 拡散係数変化率と载荷レベルの関係

状態において、拡散係数が減少する傾向が示されており⁴⁾、またこの状態でコンクリート中に潜在的に存在する微細ひび割れおよび空隙が閉じる（潰れる）ことが顕微鏡観察により確認されている。このことから、荷重状態における拡散係数は、微細構造、遷移帯および微細ひび割れ等を含む、コンクリートの見掛けの密度が重要となることを示唆するものと考えられる。

以上、応力レベルの変化に伴う拡散係数の変化および繊維の影響を検討したが、応力レベルの増加に伴う拡散係数の変化割合は、繊維長および混入率により異なる。そこで、各供試体の応力レベル 0%（無荷重状態）を基準とした拡散係数変化率（ $D_{\text{loading}} / D_{\text{non-loading}}$ ）を求めた。その結果を図-5 (a) および (b) に、繊維長の違いごとにそれぞれ示す。

これより、繊維長 6 mm を用いた場合、混入率 0.05%vol. に関しては、短繊維無混入のものと同等的な変化率を示している。0.1%vol. 混入したものに関しては、応力レベルの増加とともに、拡散係数も増加する傾向を示すが、その変化率は、他のものと比較して、抑制されていることが分かる。また混入率 0.3vol. において、応力レベル 0~3% までは、無混入および 0.05%vol. 混入のものと同等的な変化率を示すものの、応力レベルが 3~5% になる際に、0~3% までの拡散係数変化率と比較して、拡散係数変化率を抑制することが把握された。

繊維長 12 mm のものを用いた場合(図-5 (b))、混入率 0.05 および 0.1%vol. において、応力レベル 3% 以上でいずれも変化率が增加するが、繊維無混入のものと比較すると、拡散係数変化率は抑制されることが把握された。

以上より、無荷重状態を基準とした拡散係数変化率でみた場合、全体的に繊維長の長いもの（12 mm）の方が、応力レベルの増加に伴う拡散係数の変化率を抑制する傾向にあることが把握された。また、いずれの繊維長に対しても、混入率 0.1%vol. において、拡散係数変化率の抑制効果が顕著に現れることが把握された。これより、拡散係数の変化を抑制する繊維混入率は、混入率の増加に伴い、抑制効果も増加するのではなく、最適混入率が存在するものと思われる。つまり、混入率が少ない場合は、クラックの分散効果が少なく、また混入率が多い場合、繊維による細孔の連結性が増加するため、拡散係数の変化が大きくなるものと考えられる。さらに、繊維混入の有無による拡散係数変化率の差は、応力レベルが高いほど顕著に現れることが明らかとなった。

ここで、繊維を混入したものが、荷重状態において、拡散係数を抑制する傾向にある点に関して、繊維を混入することによる、ひび割れの分散効果に起因するものと考えられる。引張応力を負荷した状態における浸透深さは図-3 に示すとおり、一部で他の部分より卓越した浸透

が確認される。繊維無混入のものに関しては、断面上のある部分に比較的大きなひび割れが生じるのに対して、繊維を混入したものは、ひび割れが分散されるものと考えられる。つまり、繊維を混入したものは、無混入のものと比較して、浸透深さが卓越する割合が異なるものと考えられる。

そこで、浸透深さの計測結果より、断面内の最大浸透深さが、平均浸透深さに対して、どの程度卓越しているのか検討した。これより、卓越した割合が大きいくほど、一部にひび割れが集中し、塩化物イオンの浸透が促進されたものと考えられ、また、卓越した割合が少ないものほど、ひび割れが生じていないあるいは、分散された結果であると考えた。最大浸透深さが卓越した割合について、混入率の違いにまとめた一例を図-6に示す。図は、応力レベル5%を負荷したものの結果である。図中の繊維長0mmは、繊維無混入のものを示す。

これより、繊維長が長いものほど、浸透の卓越した度合いが小さくなる傾向にあることがわかる。また図-5と比較すると、卓越した割合が小さいものほど、拡散係数変化率が小さくなる傾向が見られる。以上の結果より、短繊維を混入することにより、引張応力状態において、無載荷状態の拡散係数に対する変化率を抑制することが可能であると考えられる。

4. まとめ

- 1) 圧縮強度および無載荷状態における拡散係数に及ぼす短繊維の影響は少なく、繊維長および混入率の違いによる明確な傾向は見られなかった。
- 2) 供試体の違いによらずいずれも、引張応力の増加に伴い、拡散係数は増加する傾向を示す。
- 3) 引張載荷状態において、繊維長の長いものほど拡散係数は低い値を示す傾向にあり、その傾向は、混入率0.1%vol.において顕著である。

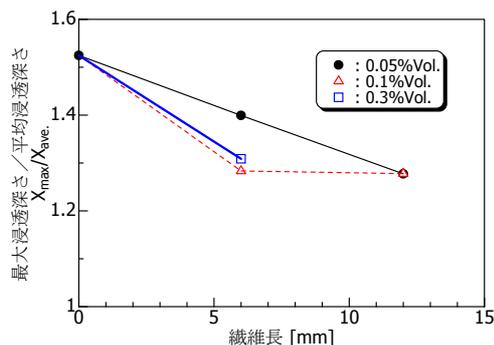


図-6 平均浸透深さに対する最大浸透深さの度合い

- 4) 繊維混入による拡散係数変化率の差は、応力レベルが高いほど顕著に現れる。
- 5) 引張載荷状態において、短繊維を混入することにより、無載荷状態を基準とした拡散係数の変化率を抑制することが可能である。

参考文献

- 1) Mitsuru Saito, Hiroshi Ishimori : Chloride permeability of concrete under static and repeated compressive loading, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.4, pp.803- 808, 1995
- 2) C.C.Lin,N.Gowripalan,V.Sirivivatnanon: Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression, Cement and Concrete Composites, Vol.22, pp.353- 360, 2000
- 3) 迫井裕樹, 岡田賢司, 堀口敬, 志村和紀 : 圧縮応力載荷状態における塩化物イオン浸透抵抗性に関する研究, 第8回日韓材料構造シンポジウム, pp.1-6, 2005
- 4) 迫井裕樹, 志村和紀, 堀口敬 : コンクリートの塩分浸透に及ぼす静的圧縮載荷の影響, 第60回年次学術講演会講演概要集, CD-ROM, pp.385- 386, 2005
- 5) Nordtest NT BUILD 492, "Chloride migration coefficient from non- steady state migration experiment", Nordtest, Finland, 1999