

## 論文 荷重と乾湿塩分暴露作用を受けるハイブリッド繊維補強 コンクリートの透水性

堀口至\*1・金南旭\*2・堀口敬\*3・佐伯昇\*4

要旨：低レベル放射性廃棄物の埋設施設などの高耐久性コンクリートの性能を調べる一環として圧縮荷重と乾湿塩分暴露作用を受けるマイクロ繊維とマクロ繊維両方を混入したハイブリッド繊維補強コンクリートの透水性を明らかにする実験を行った。プレーンコンクリートにおいて載荷荷重レベルが 0.3 で水密性がかなり向上し、ハイブリッド繊維補強コンクリートにおいて繊維の混入率、長さ、種類を変化させたところ、マイクロ鋼繊維の混入率が 0.5%、長さが 12mm、マイクロポリプロピレン繊維の混入率が 0.1%の場合に水密性が向上した。また、乾湿塩分暴露作用の結果、水密性の低下は確認されなかった。

キーワード：繊維補強コンクリート、マクロ繊維、マイクロ繊維、透水性、乾湿塩分暴露

### 1. はじめに

コンクリートは潜在的に微細なひび割れを持っている。コンクリートに荷重がかかる場合を考えると、骨材界面に付着ひび割れが入り、さらに荷重が増大するとモルタル中にひび割れが伝播し、連結して連続ひび割れが生じる。コンクリート中の初期微細ひび割れを拘束することができれば従来のものに比べて緻密なコンクリートができる。この考えからハイブリッド繊維補強コンクリートが実験されている。

ハイブリッド繊維補強コンクリートはマクロ繊維(長さ 25~60mm,直径 0.3~3mm)とマイクロ繊維(長さ 20mm 以下,直径 25 $\mu$ m 以下)の繊維を混入したコンクリートである。マクロ繊維はコンクリートにひび割れが生じた後、ひび割れにブリッジした繊維の引き抜きエネルギー強さによりタフネスを増加させ、マイクロ繊維は初期微細ひび割れを拘束する効果があることが報告されている<sup>1), 2)</sup>。

しかし、コンクリートを実構造物に用いる場合、実際コンクリートは無載荷状態ではなく構

造物は荷重や自重などを受けた状態であるので荷重の影響を考慮して水密性を論じる必要がある。コンクリート中の水の伝達には微細な空隙やひび割れが大きく影響を及ぼす。しかし、荷重が載荷されることによりこれらの微細な空隙やひび割れが閉塞され水密性が著しく高くなることが考えられる。米倉らによると、コンクリートにプレストレスを導入したまま透気性を測定した結果、プレストレスが圧縮強度の 0.3 レベルにおいてプレストレスなしの場合と比較して空気透過量が 1/2 以下になったと報告されている<sup>3)</sup>。また、Sugiyama らによるとコンクリートに圧縮応力をかけながら透気試験を行ったところ、W/C=0.4,0.6 の普通コンクリートの透気性が圧縮強度の 76,79%で著しく増加したと報告されている<sup>4)</sup>。

また、実構造物への適用を考えるならば、コンクリートに繊維を用いた場合、繊維の腐食の影響についても考慮する必要がある。一般に鉄が酸化するとその酸化物は鉄より大きな容積、おおよそ 2.5 倍の容積を持つため、膨張圧によ

\*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 (正会員)

\*3 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

\*4 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

りコンクリートがひび割れを起こす原因となり得る。繊維が腐食することによって水の伝達に大きな影響を与える微細ひび割れ幅が拡大されたり、新たなひび割れが形成された場合、結果的にコンクリートの水密性は著しく低下することが考えられる。また逆に錆によりコンクリートの内部構造が緻密になり水密性が向上することも考えられる。

以上の事項をふまえて、本研究は荷重と腐食作用を受けるハイブリッド繊維補強コンクリートの水密性を明らかにする目的で実施したものである。

## 2. 実験概要

### 2-1. 試験供試体

試験供試体に用いた材料は、セメントに普通ポルトランドセメント、骨材には川砂と最大骨材寸法 10mm の川砂利、混和剤にはプレーンコンクリートでは AE 剤、繊維補強コンクリートには高性能 AE 減水剤を用いた。空気量 5%、スランプ 10cm を目標とした。繊維は長さ 3,6,12,30mm の鋼繊維(SF)、長さ 6mm のポリプロピレン繊維(PP)、長さ 3,30mm の鋼繊維に亜鉛メッキを施した鋼繊維(GaSF)を用いた。表-1,2 に繊維と配合の詳細を示す。

供試体は各配合で透水試験用供試体 3 本、圧縮試験用供試体 3 本を作成した。透水試験用供試体には直径 100mm、高さ 180mm、中心孔の直径約 22mm の中空円柱供試体を用いた。圧縮試験用供試体には直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を用いた。

### 2-2. 透水試験方法

一般にコンクリートの透水試験はアウトプット法とインプット法に大別できる。アウトプット法は実際に水の浸出量を測定して透水係数を計算する方法である。この方法の長所は解析が容易なこと、短所は試験日数がかかることである。インプット法では供試体を乾燥後ある一定時間水圧をかけ、その後供試体を割って水の浸透深さを測定して浸透係数を求める。この方法

表-1 繊維の種類と形状

記号	繊維の種類	長さ	直径	7 $\mu$ 外比	形状
SF3	鋼繊維	3mm	0.02mm	150	平滑
SF6		6mm	0.02mm	300	平滑
SF12		12mm	0.25mm	48	波形
SF30		30mm	0.6mm	50	波形
PP6	ポリプロピレン繊維	6mm	0.02mm	300	平滑
GaSF6	亜鉛メッキ鋼繊維	30mm	0.5mm	12	波形
GaSF30		6mm	0.5mm	60	波形

表-2 供試体の配合

記号	混入率 (%+%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	混和剤 (%) <sup>*,**</sup>
PC0	-	50	45	166	0.44
SF30+SF6	1.0+0.5	50	60	166	0.70
	1.0+0.3	50	60	166	0.40
	1.0+0.1	50	60	166	0.30
SF30+PP6	1.0+0.5	50	60	166	0.30
	1.0+0.3	50	60	166	0.45
	1.0+0.1	50	60	166	0.40
SF30+SF3	1.0+0.3	50	60	166	0.75
SF30+SF12	1.0+0.3	50	60	166	0.65
GaSF30+GaSF6	1.0+0.1	50	60	166	0.55

\*繊維補強コンクリートには高性能AE減水剤を用い、プレーンコンクリートにはAE剤を用いた

\*\*単位セメント量に対する添加量

ではだいたい 2 日間ぐらいの試験期間でよいが、解析が難しいことが難点である。本研究では、試験日数はかかるが解析が容易であり、実際に水の浸出量を測定して透水係数を算出することのできるアウトプット法を用いた。

実験手順であるが、まず供試体端面を研磨機により平滑にする。透水試験装置を組み立てる際に、装置の部品に O-リングがついているので水密性を高めるためにシリコングリースを塗る。透水試験装置を組み立て終わると、次に油圧式ジャッキにより供試体に所定の圧縮荷重をかける。その後供試体に 1.0 または 2.0MPa の水圧をかけて測定を開始する。試験装置の浸出孔からの水の浸出量を電子天秤により測定する<sup>3)</sup>。得られた流出量より透水係数を Darcy 則により算出する。図-1 に単位時間流出量の経時変化の一例を示す。

図-2a,b に透水試験装置を示す。供試体の上面、下面と装置間との水の浸透を避けるために、

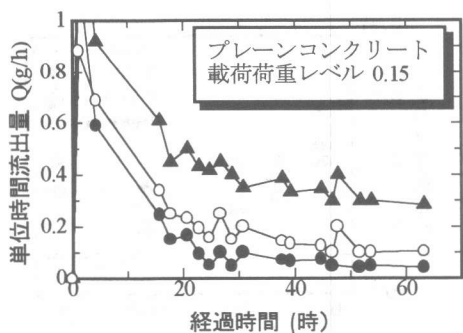


図-1 単位時間流出量の経時変化例

装置と研磨した供試体端面の間にゴム板を挟み透水試験を行った。

### 2-3. 促進暴露試験方法

乾湿及び塩分環境下によって透水係数がどのように変化するかを暴露試験によって検討した。暴露には ASTM に準拠した塩水噴霧式腐食促進装置を使った。この装置は人工的に腐食に対して厳しい環境を作り出し、平均温度 35℃で 5%の塩化ナトリウム水溶液を噴霧(湿潤状態)して、その後湿度 30~35%、35℃で乾燥(乾燥状態)させる。今回の実験では 12 時間湿潤状態の後、乾燥状態を 12 時間に設定し、これを 1 サイクルとし、2 ヶ月間 62 サイクルまで実施した。

透水試験に載荷した荷重を一定にする条件を考慮して、供試体に圧縮荷重が載荷した状態で促進させるために一定の持続荷重が作用可能なバネ式載荷装置を使用した。図-3 に示すように供試体を設置し、油圧ジャッキによりバネを伸縮させ供試体に圧縮荷重を載荷する。載荷した荷重は圧縮強度の 0.3 である。

## 3. 試験結果と考察

### 3-1. 載荷荷重レベルの影響

図-4 に圧縮強度の 0.15~0.60 の圧縮応力を載荷したときのプレーンコンクリートの透水試験結果を示す。図より、プレーンコンクリートは供試体の載荷荷重レベルを 0.15~0.23 と増加すると透水係数が著しく低くなることわかる。載荷荷重レベル 0.23~0.45 に増加しても透水係

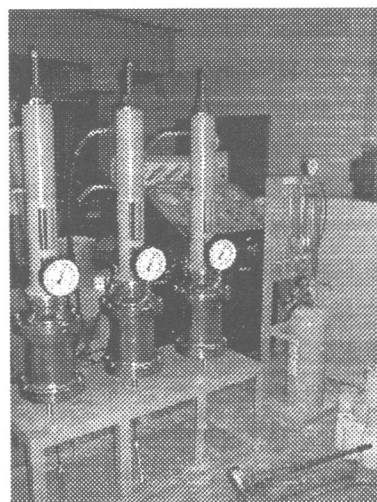


図-2a セットアップ

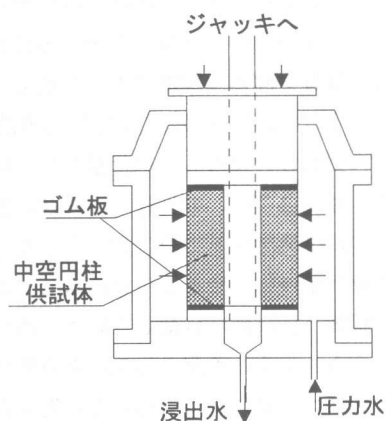


図-2b 透水試験装置

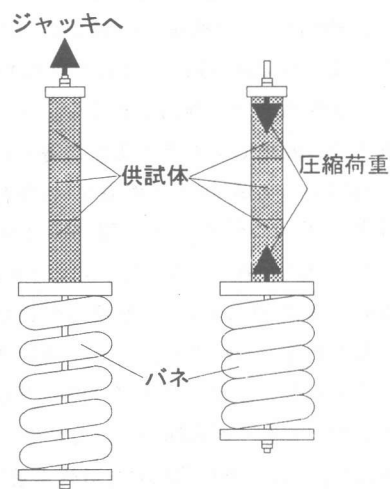


図-3 バネ式載荷装置

数はわずかに低下するが、0.60に増加すると透水係数は逆にわずかな増加傾向を示している。

載荷荷重レベルが0.15~0.23において透水係数が著しく低下する理由として次のような原因が考えられる。コンクリートには微細な空隙やひび割れが存在し、それが水の伝達に大きく影響する。コンクリートに軸方向の圧縮荷重が載荷されることによって、水の伝達に必要な微細な空隙やひび割れが閉塞され、コンクリートの水密性が著しく高くなることが考えられる。次に載荷荷重レベル0.6において透水係数がわずかに増加したが、これは微細ひび割れの伝播により、連続ひび割れの形成が開始したからと考えられる。コンクリート中の微細ひび割れは均等に分布しているが、コンクリートの横方向の引張応力は軸方向の圧縮応力よりも低く、荷重に対して平行方向には微細ひび割れは伝播しやすいが、垂直方向に対しては伝播しにくい。その結果、連続ひび割れの伝播を遅らせ、透水係数がわずかに増加するのみに終わったと思われる。さらに荷重を増加させると荷重に対して垂直方向にも微細ひび割れは伝播していき、透水係数は著しく増大すると予測される。本研究では載荷荷重レベルを0.6まで実施したが透水性の大きな変化は認められなかった。さらに高い載荷荷重レベルでの詳細な検討が必要となろう。

### 3-2. ミクロ繊維混入率の影響

図-5aにマクロ繊維SF30の混入率1.0%に対してミクロ繊維SF6の混入率を0.1,0.3,0.5と変化させた透水試験結果を示す。ミクロ繊維の混入率が変化しても透水係数に著しい変化は見られなかったが、混入率が0.5%の場合に透水係数がわずかに低下した。図-5bはマクロ繊維SF30の混入率1.0%に対してミクロ繊維PP6の混入率を0.1,0.3,0.5と変化させた透水試験結果である。これより、PP6をコンクリートに混入することによって水密性は低下して、混入率が増加すると透水係数も増加することが確認された。これはPP繊維の分散性が悪いことと、PP繊維を入れることによって空隙量が増える

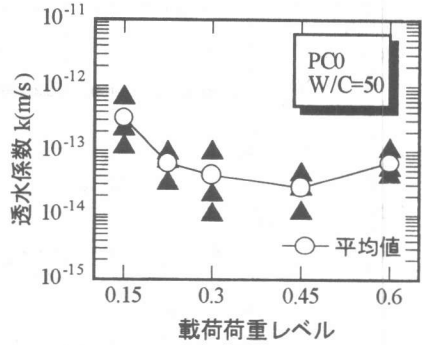


図-4 透水試験結果 (プレーンコンクリート)

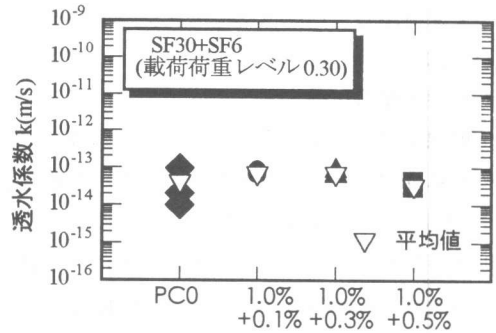


図-5a 透水係数 (SF30+SF6)

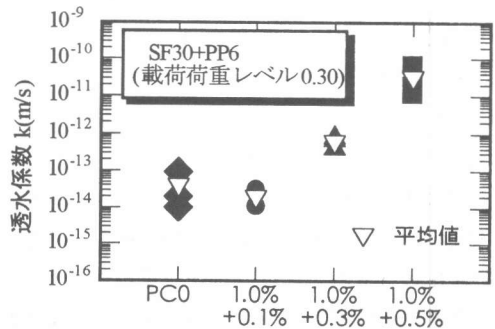


図-5b 透水係数 (SF30+PP6)

ことが原因であると思われる。しかしPP6を0.1%混入したときの透水性はプレーンコンクリートよりもわずかに低い値を示している。また、試験供試体3本のうち1本は水の流出が観察されなくなり試験期間中に透水係数が算出できなかった。以上の結果を考慮すると、適度な混入率で、分散の優れた供試体では、高い水密性が得られる可能性を秘めているものと考えられ、今後の検討課題であると考えられる。

### 3-3. ミクロ繊維の長さ種類の影響

図-6aは混入率1.0%のマクロ繊維SF30に混

入率 0.3%のマイクロ鋼繊維の長さを 3,6,12mm と変化させた供試体の透水試験結果である。SF の長さの変化による影響は顕著ではなくほぼ同様の結果を示した。SF3,6 と比べて SF12 を混入したコンクリートでは低い透水係数を示した。図-6b は混入率 1.0%のマクロ繊維 SF30 に混入率 0.1%のマイクロ繊維 SF6,PP6 を混入したときのコンクリートと、繊維に GaSF を用いたコンクリートとの透水性を比較した。各供試体の透水性に目立った違いは見られなかったが、マイクロ繊維に PP6 を用いた場合、他の繊維と比べて透水係数が低下した。以上の結果より繊維の長さや種類による目立った変化は確認されなかったが、マクロ鋼繊維 SF30 の混入率が 1.0%であることが少なからず影響していると考えられることより、マクロ繊維との組み合わせも考慮して今後の検討が必要である。

全ての透水係数の図を見ると透水係数のオーダーに幅がある種類のコンクリートもある。これは各供試体のばらつきの影響と考えられる。このため、一般にコンクリートの透水性を評価するためには透水係数のオーダーで評価されることが多い。しかし、本研究では透水性を通してコンクリートの内部構造を評価することを目的としているため、透水係数に対する小さな変化も評価に入れた。また、透水性が低くなると流出量が極端に少なくなり、透水係数の変動が大きくなり、時には水の流出が止まり透水係数を算出できないことがある。このため建築材料の透湿性評価に用いられている水蒸気拡散法を応用した透水試験評価試験法<sup>6)</sup>や水蒸気浸出量まで測定可能なベンチレーション法<sup>7)</sup>を用いた研究報告もある。

### 3-4. 促進暴露試験の影響

図-7 に混入率が 1.0%+0.3%,+0.5%である SF30+SF6 の促進暴露前と後の透水係数の変化について表した。図よりマイクロ鋼繊維の混入率が 0.3%の供試体の透水係数は変化が確認されない。一方、混入率が 0.5%に増加すると透水係数が増加しているが、その傾向はわずかなもの

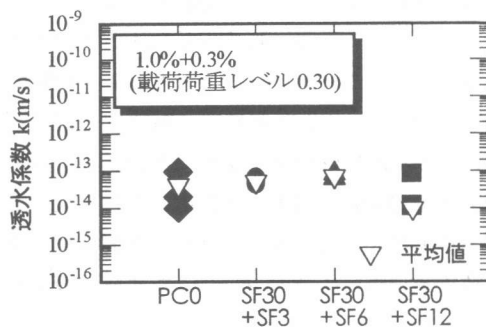


図-6a 透水係数 (繊維の長さ)

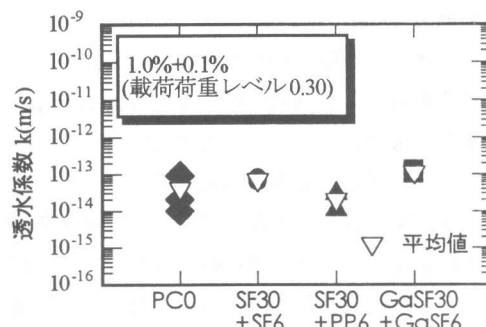


図-6b 透水係数 (繊維の種類)

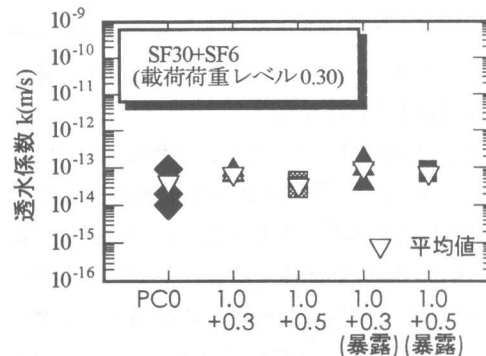


図-7 透水係数 (暴露SF30+SF6)

であるため、暴露による影響は少ないと考えられる。しかし、2ヶ月間という短い促進暴露期間のため著しい影響が見られなかったとも考えられ、より長期間の促進暴露を行い、その影響を検討する必要がある。

### 3-5. 圧縮強度及び単位容積質量との関係

図-8a,b にそれぞれ透水係数と圧縮強度、透水係数と単位容積質量の相関を表した。図から透水係数は圧縮強度及び単位容積質量の増加と

共に急激に低下することが分かる。図-8a より圧縮強度が  $17\text{N/mm}^2$  程度を境に水密性が大きく改善されることがわかる。すなわち、 $17\text{N/mm}^2$  以下のコンクリートでは圧縮強度の低下と共に急激な水密性の低下が起こるが、逆に圧縮強度が  $17\text{N/mm}^2$  以上であれば水密性に大きな変化は少ないと言える。図-8b より同様に単位容積質量では、 $2.13\text{g/cm}^3$  付近で同様な傾向を示した。

#### 4. まとめ

本研究により以下のことが判明した。

- 1) 圧縮荷重による透水性の変化を検討した結果、荷重が破壊荷重の 45%程度まで低下し、それ以降はわずかに上昇する傾向を示した。
- 2) ミクロ繊維の長さや混入率を変化させても透水係数に目立った変化は確認されなかったが、ミクロ鋼繊維の混入率が 0.5%、長さが 12mm、ミクロポリプロピレン繊維の混入率が 0.1% の時に透水係数がわずかに低下したことより、今後マクロ繊維との混入率を変化させるなどのハイブリッドとしての組み合わせを考慮する必要性が確認された。
- 3) マクロ鋼繊維 1.0%にミクロ鋼繊維 0.3%と 0.5%混入した供試体に対して乾湿-塩分の暴露による促進による影響を調べた結果、混入率 0.5%の供試体では促進暴露試験を行わなかった供試体に比較して水密性が低下傾向を示したが、その影響はわずかなものであった。
- 4) ハイブリッド繊維の透水係数は圧縮強度及び単位容積質量と密接な相関があり、それぞれ  $17\text{N/mm}^2$ 、 $2.13\text{g/cm}^3$  程度を境界として透水係数は著しく低下することが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) 金南旭ら: ハイブリッド繊維補強コンクリートのひび割れ抵抗性, 第 52 回セメント技術大会講演要旨, pp.396-397, 1998
- 2) Banthia N.: Restrained shrinkage cracking

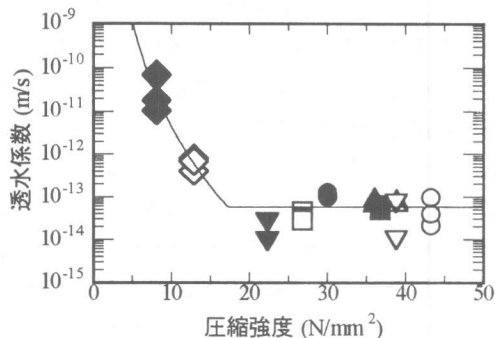


図-8a 圧縮強度と透水係数の関係

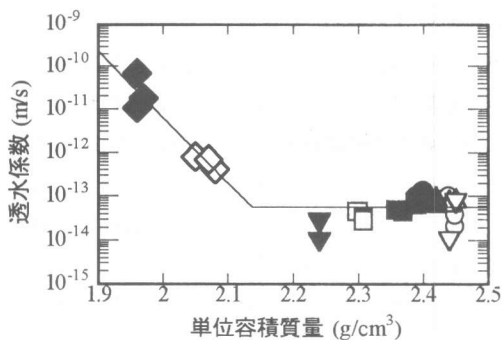


図-8b 単位容積質量と透水係数の関係

in fibre-reinforced cementitious composites, *Materials and Structures*, 26, pp.405-413, 1993

- 3) 米倉 亜州 夫ら: 一軸圧縮応力を受けるコンクリートの透気性および吸水特性, *V.12, No.1*, pp.401-406, 1990
- 4) T. Sugiyama, et al.: Effect of stress on gas permeability in concrete, *ACI Materials Journal*, V.93, No.5, pp.443-450, 1996
- 5) 村田 二郎: 中空円筒形供試体を用いる透水試験方法, *土木学会論文集第 63 号*, pp.1-7, 1959
- 6) 伊藤 洋ら: 水蒸気拡散法によるコンクリートの透水性評価試験について, *コンクリート工学年次論文報告集*, V.14, No.1, pp.733-738, 1992
- 7) 伊藤 洋ら: コンクリート表面からの水分蒸発過程による透水性評価実験, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol.15, No.1, pp.507-512, 1993