

論文

[1031] 高流動コンクリートの細孔構造が透気・透水性に与える影響

中瀬博一*¹ 柿崎正義*² 枝広英俊*³ 藤井和俊*⁴

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造建築物の高層化が進み、これに伴って配筋も過密化してきた。また、建築物の形状にも複雑なものが見られるようになり、従来のコンクリート打込み方法では施工不良などの問題が見られるようになってきた。これらの施工条件に対応し、かつ耐久性の高い建築物を造るために、締固め不要の施工性の良い高流動コンクリートが開発され、各方面で普及しつつある。しかし、締固めを行わない高流動コンクリートの透気・透水性については未だ説明されていないのが現状である。そこで本研究は、高流動コンクリートの細孔組織を細孔径分布試験によって確認し、耐久性を判断する指標となるコンクリートの透気・透水性との関連性について検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

表-1 に実験の要因と水準を示す。

2.2 使用材料及びコンクリートの調合

表-2 に使用材料を、表-3 にコンクリートの調合条件を示す。なお、単位水量は180kg/m³で一定とし、結合材量を変化させた。目標とするスランブフローは65±5cm、空気量は4.5±1.5%とした。練り上がり時のコンクリート温度は約20℃とした。練混ぜは、容量100ℓのパン型強制練り小型ミキサで2分間行った。

2.3 供試体の作製方法

供試体はφ15cm×30cmの円柱型枠に打込み（一層につき11回突き）、翌日脱型して材齢28日まで水中養生した後、20℃, 60%R.H. で約10か月間養生を行った。その後、供試体を3等分に切断して、中央部分のφ10cm×10cmを20℃, 60%R.H. で60日間養生し、側面からの空気または水の侵入を防止するために供試体の側面をエポキシ系樹脂でシール（厚さ2mm程度）した。

2.4 実験方法

(1) 透気試験

透気試験は、供試体上面にコンプレッサーで2.0、3.5、4.5kgf/cm²の圧力を順次に加えてそれ

表-1 実験の要因と水準

要 因	水 準
水 結 合 材 比	5 水準 (40~60%)
フライアッシュ混和量	5 水準 (0~150kg/m ³)
分離低減剤, 高性能減水剤	2 水準

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
粗骨材	砕石 (2005)
細骨材	陸砂と細砂の1:1 (重量比) 混合砂
混和材	フライアッシュ
混和剤	分離低減剤(セルローズ系, アクリル系) 高性能減水剤(メラミン系, ナフタリン系) A E 減水剤, A E 助剤

*1 三菱建設(株)技術研究所 研究員 (正会員)
 *2 鹿島技術研究所 専門部長 工博 (正会員)
 *3 芝浦工業大学助教授 工学部 建築学科 (正会員)
 *4 三菱建設(株)技術研究所 副所長 (正会員)

それぞれ下面へ透過してくる空気の流量が一定になった後に、単位時間あたりの透気量を測定し、透気係数を算出した。式(1)に算出式を[1]、図-1に実験装置概略を示す。

$$K = \frac{2 L P_2 \gamma_A}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \dots (1)$$

K:透気係数(cm/s) Q:透気量(cm³)

L:供試体厚さ(cm) A:透気面積(cm²)

P₁:載荷圧力(kgf/cm²)

P₂:大気圧(kgf/cm²)

γ_A:空気の単位容積重量(1.205×10⁻⁶kg/cm³)

(2) 透水試験

透水試験は、供試体上面に2.0kgf/cm²の水圧を加え24時間経過した後、供試体を強度試験機で直径方向に割裂した。透水深さは、割裂面の端から4cmを除いた中央部の3ヵ所をデジタルノギスで測定し(図-2参照)、その平均値とした。拡散係数は式(2)によって算出した[1]。

$$\beta i^2 = \alpha \frac{Dm^2}{4 t \xi^2} \dots (2)$$

βi²:拡散係数(cm²/sec) Dm:平均透水深さ(cm)

t:加圧時間(sec) α:加圧時間に対する係数

ξ:水圧に対する係数

(3) 細孔径分布の測定

透気・透水試験で使用したφ10cm×10cmの供試体の中心部分を粉碎し、直径2~5mmのモルタル部分を採取した。これを真空脱気し、水銀圧入式ポロシメータを用いて、3.75~7500nmの細孔径分布を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 透気性に影響を与える諸要因

図-3に水結合材比と各種コンクリートの透気係数

(載荷圧力2.0~4.5kgf/cm²での透気係数の平均値)の百分率の関係を示す。ただし、透気係数の百分率は水結合材比60%のA1, B1, C1コンクリートの透気係数を基準としたものである。なお、図-3、図-4は1993年日本建築学会大会学術講演梗概集に掲載したものを検討し作成したものである。

表-3 コンクリートの調合条件

コンクリートの記号	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)			混和剤種類	
		水	セメント	フライアッシュ	分離低減剤	高性能減水剤
A 1	60.0	180	300	0	セルロース系	メラミン系
A 2	50.0		360			
A 3	46.2		390			
A 4	42.9		420			
A 5	40.0		450			
B 1	60.0	300	0	0	アクリル系	ナフタリン系
B 2	50.0		60			
B 3	46.2		90			
B 4	42.9		120			
B 5	40.0		150			
C 1	60.0	300	0	0	アクリル系	ナフタリン系
C 2	50.0		60			
C 3	46.2		90			
C 4	42.9		120			
C 5	40.0		150			

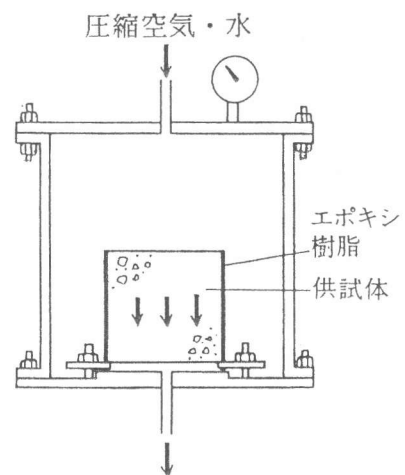


図-1 実験装置概略図

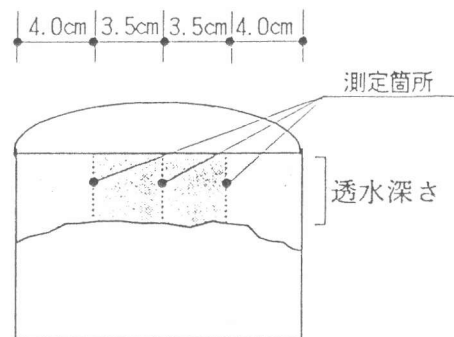


図-2 透水深さ測定箇所

(1) 水結合材比

透気係数は、いずれのコンクリートにおいても、水結合材比の増加とともに直線的に大きくなる傾向が認められた。ただし、フライアッシュ無混和のコンクリート（記号A）では水結合材比46%以上において、この傾向が認められない。

(2) 混和剤

記号B、記号Cのコンクリートの透気係数は同程度となっており、混和剤の種類の違いによる影響が顕著でない。ただし、水結合材比50%ではセルロース系分離低減剤とメラミン系高性能減水剤を使用したコンクリート（記号B）の透気係数の方が大きな値となっている。

(3) フライアッシュの混和

透気係数は、フライアッシュを混和することにより、混和量及び水結合材比にかかわらず20~50%小さくなる。

3.2 透水性に影響を与える諸要因

図-4に水結合材比と各種コンクリートの拡散係数の百分率との関係を示す。ただし、拡散係数の百分率は水結合材比60%のA1, B1, C1コンクリートの拡散係数を基準としたものである。

(1) 水結合材比

透水性は水結合材比が小さくなるに従い小さくなり、この傾向はいずれのコンクリートにおいても認められた。

(2) 混和剤

拡散係数は、水結合材比60%、50%では混和剤による影響を受けないが、46%以下ではセルロース系分離低減剤とメラミン系高性能減水剤を使用したコンクリート（記号B）が、アクリル系分離低減剤とナフタリン系高性能減水剤を使用したコンクリート（記号C）に比べて30~70%小さくなり、特に水結合材比が小さいとき、この差が顕著に認められた。

(3) フライアッシュの混和

フライアッシュを混和したコンクリートの透水性は、無混和コンクリートに比べ、水結合材比が小さいとき小さくなり、水結合材比が大きいとき大きくなる。ただし、いずれも大きな差異ではない。

3.3 細孔径分布に影響を与える諸要因

図-5に細孔径分布の測定結果を示す。

(1) 水結合材比

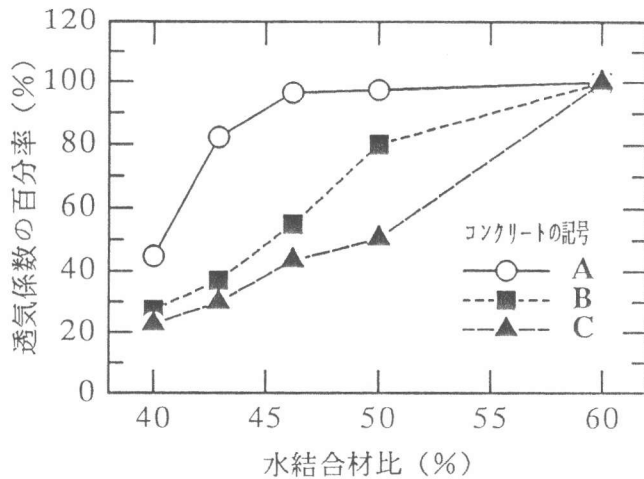


図-3 水結合材比と透気係数の百分率

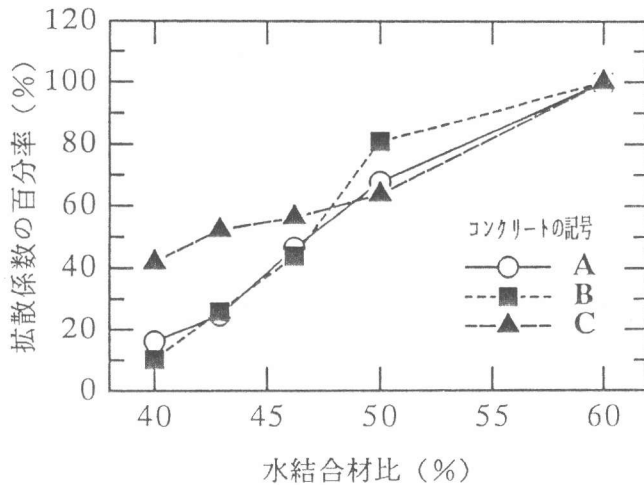


図-4 水結合材比と拡散係数の百分率

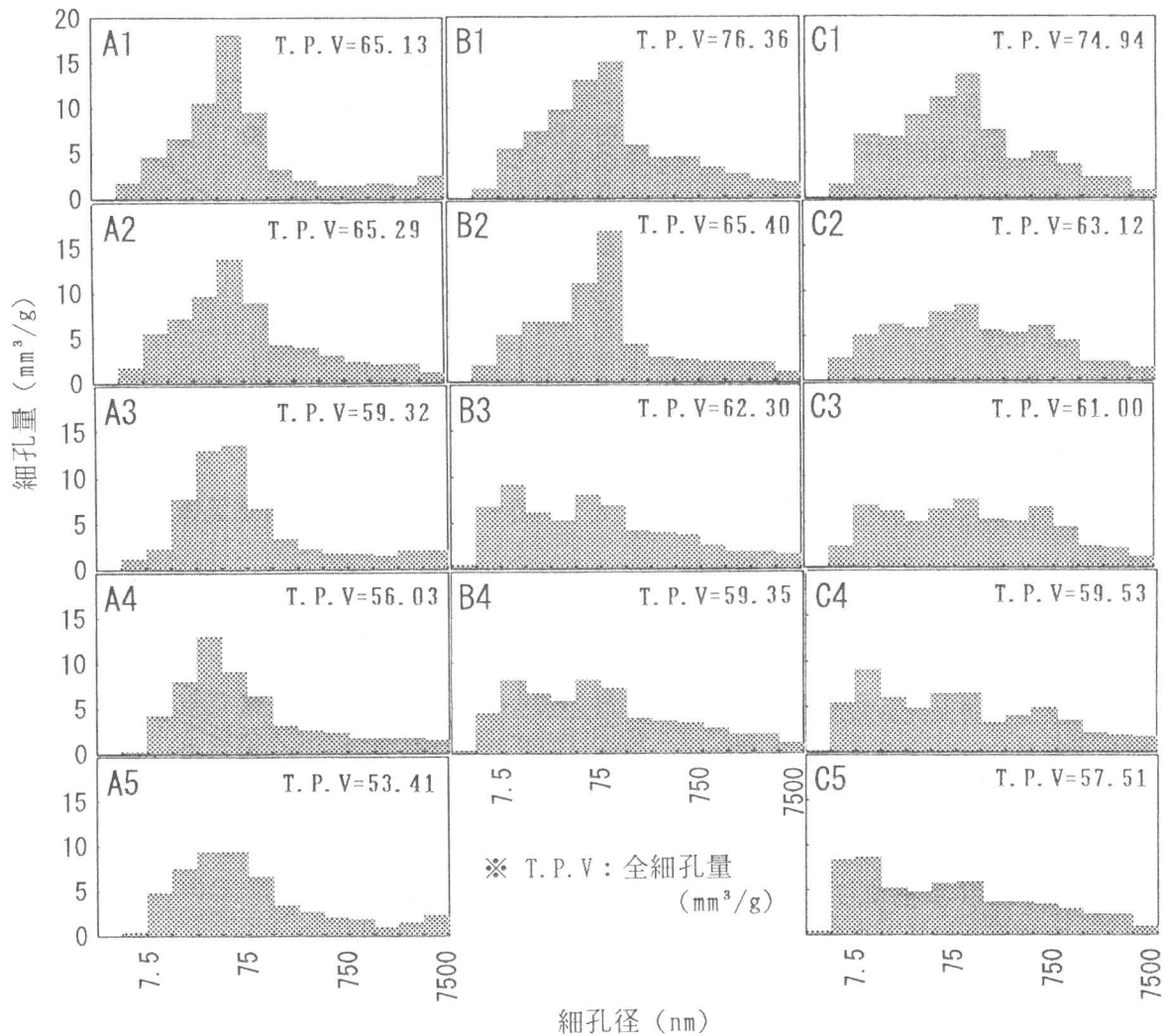


図-5 細孔径分布 (図中のA, B, Cはコンクリートの記号)

全細孔量 (径3.75~7500nmの全細孔量) は、いずれのコンクリートも水結合材比が小さくなるに従い減少している。ただし、フライアッシュ無混和のコンクリート (記号A) の全細孔量は、水結合材比60%と50%とほぼ同程度の値であった。水結合材比50%未満では、水結合材比が小さくなるに従い、微小な細孔が増加する傾向にあった。この傾向は記号A, B, Cのいずれのコンクリートにおいても認められた。特にフライアッシュを混和した記号B, Cでは水結合材比50, 60%において75nm前後に集中している細孔は、水結合材比が小さくなるに従い少なくなり、微小な細孔が増加し、細孔径分布のピークは認められなくなる。フライアッシュ無混和のコンクリート (記号A) については、水結合材比の違いに伴って見られるこの傾向が顕著ではない。

(2) 混和剤の影響

全細孔量は、記号Bと記号Cの同一水結合材比においてほぼ同等の値を示している。細孔径分布においても、記号Bと記号Cは良く似た形をしているが、記号B1, B2ではC1, C2と比べ75nmよりもやや大きい径のものが大きな値を示しており、高水結合材比では、セルロース系分離低減剤とメラミン系高性能減水剤を使用したコンクリート (記号A, B) よりも、アクリル系分離低減剤とナフタリン系高性能減水剤を使用したコンクリート (記号C) の方がやや緻密な組織が得られるようである。

(3) フライアッシュの混和

フライアッシュを混和した記号B、Cの全細孔量は、フライアッシュ無混入の記号Aよりも大きな値を示した。この傾向は、通常のコンクリートにおいても認められる。特に、水中養生期間が短い(材令28日)場合は、長い(材令91日)場合より著しい差が見られると指摘されている [2]。

細孔量が大きくなる細孔径は、水結合材比の大きい場合75~100nmである。フライアッシュを混和した記号B、Cの細孔量は、フライアッシュの混和量の増加に伴い細孔径が小さいものが多くなっている。このようなことは、フライアッシュのようなボゾラン材料を混和したコンクリートが、水和反応過程における毛細管空隙の充填および閉塞により、材令とともに細孔組織の緻密化および均質化が進むと指摘され [3]、高流動コンクリートにおいても、特に水結合材比の小さい場合は空隙の充填効果、細孔の均質化が顕著に表れているものと考えられる。

3.4 コンクリートの細孔構造と透気・透水性との関係

図-6、図-7に全細孔量と透気係数、拡散係数の関係を示す。これより、フライアッシュを混和した記号B、Cの透気係数は全細孔量が同じ場合、フライアッシュ無混和の記号Aと比べて小さな値を示した。フライアッシュは、ボゾラン反応により骨材とペーストとの界面に生成する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を消費し、セメントの水和を促進するため骨材界面が密実になると指摘されている [4]。また、ボゾラン反応により生成されるC-S-Hは、毛細管空隙を閉塞することが指摘されている [5]。これらがフライアッシュを混和したコンクリートの透気性が小さくなる原因と考えられる。

記号Aと記号B、Cの透気性の違いは、全細孔量が小さい時大きくなり、全細孔量が大きい場合小さくなる。全細孔量が小さくなることは、水結合材比が小さくなることであり、それによってフライアッシュ無混和の記号Aではセメントの未水和粒子が増加するためであると考えられる。

拡散係数と全細孔量との間には、フライアッシュの混和、無混和にかかわらず相関性が認められた。

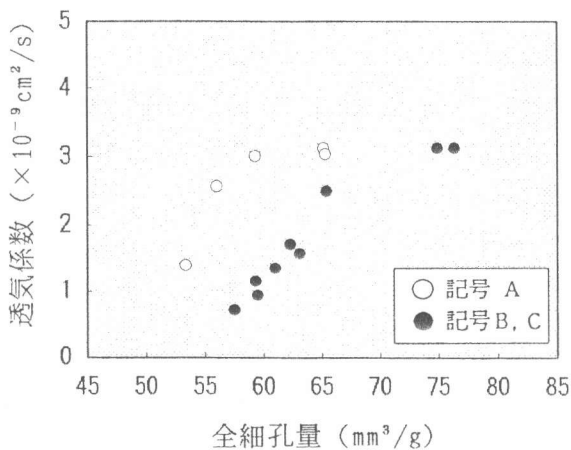


図-6 全細孔量と透気係数

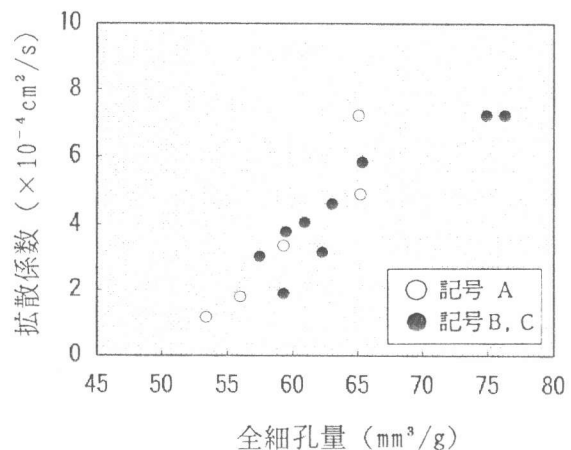


図-7 全細孔量と拡散係数

図-8、図-9に13.5nm以上の細孔量と透気係数、拡散係数との関係を示す。これより、細孔半径13.5nm以上の細孔量と透気・透水性の間には良い相関性が認められた。フライアッシュを混和したコンクリートが無混和のものに比べ、全細孔量が同程度であるにもかかわらず透気性が小さくなるのは、13.5nm程度以下の細孔が多いことが原因の一つであると考えられる。

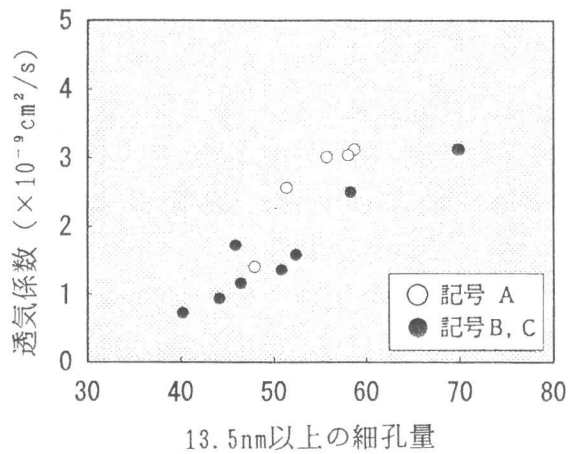


図-8 13.5nm以上の細孔量と透気係数

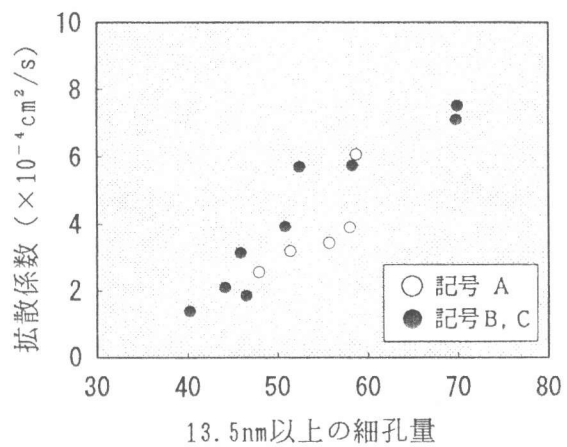


図-9 13.5nm以上の細孔量と拡散係数

4. まとめ

高流動コンクリートの細孔構造が透気・透水性に及ぼす影響について検討した結果をまとめると以下ようになる。

- ①高流動コンクリートの透気・透水性は、フライアッシュの混和及び混和剤の種類に拘らず水結合材比が小さくなるに従い小さくなる。ただし、フライアッシュ無混和のコンクリートの透気性については水結合材比46%以上において異なる傾向が認められた。
- ②高流動コンクリートの透気性はフライアッシュを混和することにより小さくなり、特に低水結合材比の場合にその効果が大きい。
- ③高流動コンクリートは水結合材比が小さくなるに従い、全細孔量（径3.75～7500nm）が減少し、微小な細孔が増加する。この傾向はフライアッシュを混和した場合に顕著に認められた。
- ④透気性は全細孔量が同じ場合、フライアッシュを混和したコンクリートの方が無混和の場合と比べて小さくなる。
- ⑤高流動コンクリートの透気・透水性は、13.5nm程度以上の細孔量と良い相関性が認められた。

本研究ではコンクリートのモルタル部分について3.75～7500nmの細孔径を対象に細孔構造と透気・透水性の関係の検討を行ったが、水や空気の透過経路がすべてこの範囲にあるわけではないため、今後更に検討を行い、透気・透水性との関係を総合的に評価する必要があると考えられる。

[謝辞] 本研究を実施するにあたりご協力いただいた三菱マテリアル(株)セメント研究所の方々に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 笠井芳夫・池田尚治：コンクリートの試験方法（下）、技術書院、1993.
- 2) 桑野陵一・篠田佳男・窪 泰浩・今井澄雄：フライアッシュの品質変動がコンクリート性状に及ぼす影響について、コンクリート工学年次論文報告集、vol. 13, No. 1, pp. 45-50, 1991.
- 3) 鳥居和之・川村満紀：種々のポゾラン材料を使用したコンクリート中の鉄筋の腐食性状、コンクリート工学年次論文報告集、vol. 12, No. 1, pp. 489-494, 1990.
- 4) 内川 浩・羽原俊祐・平尾 宙：超流動・高強度コンクリート硬化体の組織と構造、超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp. 161-166, 1993.
- 5) 長滝重義・氏家 勲・荒木 淳：コンクリートの透気性に影響を及ぼす諸要因、セメント技術年報、vol. 39, pp. 209-212, 1985.