

論文 コンクリートの空隙構造を考慮した透水性モデルに関する基礎的研究

木下 勝也*1・魚本 健人*2

要旨: コンクリートの空隙構造の違いが、水の移動にどのように影響を与えるか検討するため、コンクリート中の空隙構造を想定したガラス管の管網を作成し、透水試験を行った。実験において、管網の各節点における水頭分布の測定を行い、透水係数の変化について検討を行った。また、グラフ理論を応用した管網計算を用いて、水頭ならびに流量分布の解析を行い、コンクリートの空隙構造を考慮した透水モデルの検討を行った。

キーワード: 透水係数, 空隙構造, 管網計算, ガラス管

1. はじめに

コンクリートの耐久性を論じる場合、気体や液体、イオンなどがコンクリート中をどのように移動するかが問題となる[1]。これらの物質移動について既往の研究では、主に Fick の法則による拡散現象によって説明がなされている[1][2][3]。しかし、微視的に捕えた場合、コンクリート中の物質移動が拡散によって説明されるとは考え難く、コンクリートが不均一な多孔材料であることや、ひび割れなどが存在した場合に物質の移動が促進されることなどを考え併せると、当然物質はその空間を移動するものと考えられる。また、物質移動の空間となる硬化コンクリートの空隙構造に関しては、毛細管空隙量(3nm~30 μm)が体積率で十数パーセント存在することや100nm以上の細孔径が水の移動に関係することなどが報告されている[4],[5]。

本研究においては、コンクリート中の空隙構造に影響を受ける透水係数に着目し、コンクリート中の空隙構造を想定したガラス管網による実験を行い、水みちとなる空隙構造の違いにより透水係数がどのように変化するかを検討を行った。また、水道管網の解析に一般的に用いられているグラフ理論を応用した管網計算により、透水試験時の水の挙動について解析を行いコンクリートにおける空隙と透水係数の関係について考察を行った。

2. 実験概要

実際のコンクリートの透水試験(アウトプット法)では、水は細孔径中を移動していると考えられる。この時の水の移動は水道管網における水の移動とほぼ同様であると考え、本研究では以下の実験を行いコンクリートとの対応を調べた。

2.1 実験装置

コンクリート中の空隙構造を2次元的に単純化し、想定した管網の水頭分布を測定するため、写真-1に示す実験装置(外形:380mm×380mm×525mm)を作成した。この実験装置の底面部は、十字のガラス管(縦:50mm,

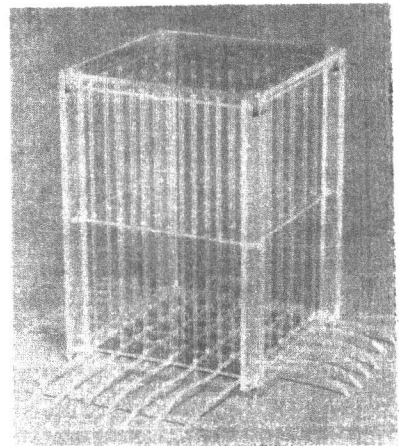


写真-1 実験装置

*1 (株)建設技術研究所, 水工本部, 下水道部 (正会員)

*2 東京大学教授, 生産技術研究所, 工博 (正会員)

横:50mm)をチューブで接続した管網部(写真-2)で構成され、上部は十字ガラス管の交点に設置したマンメーターから成る。ガラス管自体は、内径 3.5mm の十字のガラス管部に水頭測定用のマンメーターを取り付けたものが、1ユニットとなっている。

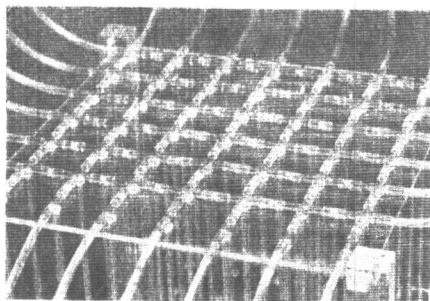


写真-2 ガラス管の管網

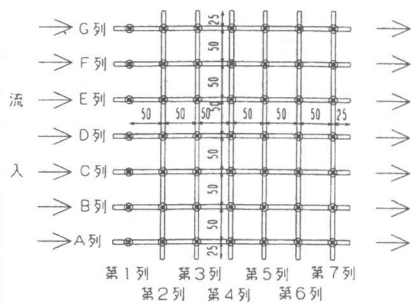
2.2 実験方法

実験方法は作成した試験装置に水位を一定とした水槽より一方向から水を流入させ反対側へ水が流出して定常状態になった後(横方向へ流出はない)、各節点での水頭ならびに各流出点での流量の測定を行った。

実験は、空隙構造の違いをメッシュ間隔と管径の違いで表現した管網(3種類)について初期水頭(水槽高さ, 2種類)を変化させ、6CASE の試験を行った(表-1)。

表-1 試験ケース

CASE	初期水頭 (m)	管径 (mm)	最大メッシュ間隔 (mm)	管内体積 (m ³)	空隙比
LH2-4	1.48	φ 3.5	100	2.23E-05	54.3%
SH2-7	1.48	φ 3.5	50	4.11E-05	100.0%
CH2-4	1.48	φ 3.5 / 2.0	100	1.13E-05	27.5%
LH1-4	0.42	φ 3.5	100	2.23E-05	54.3%
SH1-7	0.42	φ 3.5	50	4.11E-05	100.0%
CH1-4	0.42	φ 3.5 / 2.0	100	1.13E-05	27.5%



適用ケース SH2-7 SH1-7

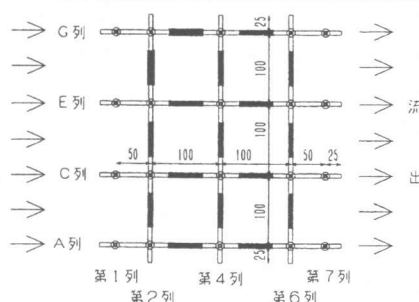
[管網]

◎:水頭測定節点

- ・ LHシリーズは、内径 3.5mm のガラス管のみで、100mm ピッチの管網
- ・ SHシリーズは、内径 3.5mm のガラス管のみで、50mm ピッチの管網
- ・ CHシリーズは、LHシリーズの管網に途中、内径 2.0mm のガラス管を使用した管網

[水頭]

- ・ LH2-4,SH2-7,CH2-4 は、初期水頭が高い場合
- ・ LH1-4,SH1-7,CH1-4 は、初期水頭が低い場合



適用ケース LH2-4 LH1-4
CH2-4 CH1-4

CHシリーズでは黒く塗りつぶしたところはφ2mmを使用

3. 実験結果

3.1 水頭分布

初期水頭が高い場合の水頭分布測定結果を図-1に示す。図-1より、いずれのケースにおい

でも流入部から流出部に向かうに従い管路の摩擦損失や分岐部などの損失により、水頭が減少していくことがわかる。管網のピッチが異なる LH と SH においては、水みちの少ない LH の方が第 1 列目における水頭はいくらか高いが、いずれも 5cm 前後で、第 2 列目以降においては水頭の差が小さくなっている。

しかし、管網中に内径 2.0mm の細い管がある CH は、第 1 列目における水頭は約 20cm まで上昇しているが、その後急激に減少し、流出付近では 1~2mm 程度の水頭になる。第 2 列目から第 6 列目にかけて、水頭が急激に減少するのは、ガラス管が細くなっている影響と思われる。初期水頭が低い場合も水頭の上昇高さが低くなるものの、同様の現象が見られた。また、両側面の流出点を閉じているため、横方向への流れは、生じていないことが確認されている。

水頭測定時に流出点付近で、マンメーターの水位が上がらず、マンメーター一部から空気が流水中に入り込んでしまう現象が見られたが、これは、その節点において、負圧が発生しているためと考えられる。本実験の場合、負圧を測定することはできないため、そのような現象がおきている点での水頭は、0 として取り扱っている。

なお、ケース SH2-7 において、流入側の中央付近で水頭が高くなるが、それは水を流入させる際に中央付近で分岐させている影響のためである。

3.2 透水係数

この実験結果を基にそれぞれの管網における透水係数について検討を行った。透水係数の決定は以下のように行った。実験結果より、第 1 列における平均水頭と第 7 列における総流出量を用いて、式(1)に従い、その管網における透水係数を決定した。結果は、表-2 に示す。

$$k = \frac{Q L}{A H} \quad (1)$$

k : 透水係数 Q : 流量 (m^3 / s)
 L : 距離 (m) A : 断面積 (m^2)
 H : 水頭 (m)

まず、SH と LH を比較した場合、管網間隔の大きな LH の水みち（空隙）は管網間隔の小さい SH の 54% 程度（体積比）にであるにもかかわらず、透水係数は LH が $k=1.34 \times 10^{-1}$, 8.31×10^{-2} , SH が $k=9.00 \times 10^{-2}$, 1.15×10^{-1} と水みちが少ない LH の方が透水係数では大きな値となっている。

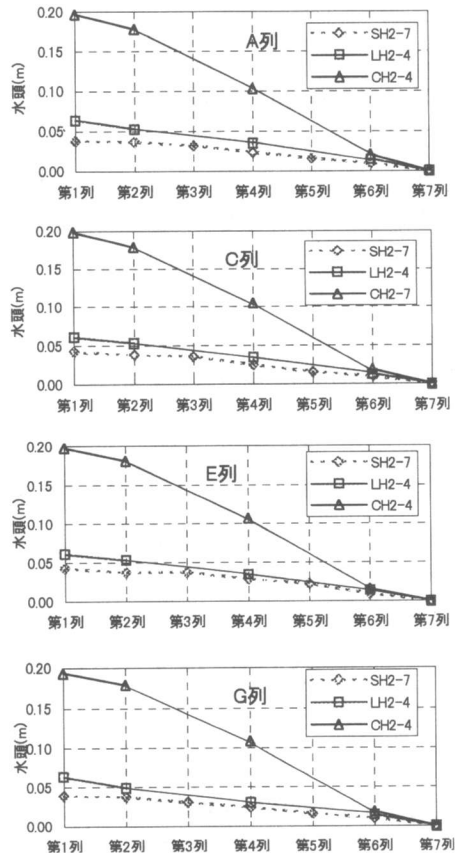


図-1 水頭分布

表-2 透水係数の比較

	平均水頭 (m)	総流量 (m^3/s)	透水係数 (m/s)
LH2-4	0.0623	2.11×10^{-5}	1.34×10^{-1}
SH2-7	0.0473	2.40×10^{-5}	9.00×10^{-2}
CH2-4	0.1968	1.17×10^{-5}	1.58×10^{-2}
LH1-4	0.0383	3.00×10^{-6}	8.31×10^{-2}
SH1-7	0.0303	1.88×10^{-6}	1.15×10^{-1}
CH1-4	0.0883	4.94×10^{-6}	5.94×10^{-2}

また、同じ管網間隔である LH と CH を比較した場合、途中管が細くなっている CH の水みちは LH の水みちの 28% であるが、透水係数は CH で $k=1.58 \times 10^{-2}$, 5.94×10^{-2} , LH で $k=1.34 \times 10^{-1}$, 8.31×10^{-2} と水みちの少ない CH の透水係数の方が小さな値である。

このことから、水の通りやすさは単に水みちとなる空隙のトータル量だけではなく、水が通過する径の大きさに大きく左右されることがわかる。

4. 解析

4.1 管網解析の基礎方程式[6][7]

本研究で用いた解析手法は、上水道の分野で一般的に用いられている管網計算である。解析は直径 D 、管路長 L および管内壁面の状態を表す流速係数 C の管路で構成された管路網内の流量分布および水頭分布を特定節点のエネルギー位と各節点からの流出水量(本実験では第 1 列の水頭と第 7 列における流量)から解析する手法であり、以下に示す 3 つの基礎方程式からなる。

- (a) 各管路の損失水頭 H を流量 Q で表示するための損失水頭式
損失水頭式は指数流量型とし、式(2)で示される。

$$H = r' |Q|^{u-1} Q \quad (2)$$

$$\text{ただし、} r' = 10.666 C_H^{-1.85} D^{-4.87} L, \quad u = 1.85 \quad (\text{Hazen - Williams の式}) \quad (3)$$

CH: 流速係数, D: 管路直径, L: 管路長

- (b) 各節点に接続する管路の Q が満たすべき節点方程式
節点方程式とは節点における流量の連続方程式であり、式(4)で示される。

$$\sum (\pm Q_{i,j}) = p_i \quad (i \in INR) \quad (4)$$

ここで、 INR は、水の供給地以外の節点の集合
 p_i は節点 i から流出する流水量

- (c) 各要素閉管路を構成する管路の H が満たすべき閉管路方程式
閉管路方程式とは閉管路におけるエネルギーの平衡式で、式(5)で示され、式数は要素閉管路数 K に等しい。

$$\sum (\pm H_{i,k}) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (5)$$

式(5)に式(2)を代入すると

$$\sum (\pm r'_{i,k} |Q_{i,k}|^{u-1} Q_{i,k}) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (6)$$

となり、この式(6)と式(4)とで、管路数に等しい連立方程式ができる。これを Newton-Raphson 法で解いて各管路の Q を求める。

この手法を用いて、透水実験における水頭分布の解析を行った。

4.2 解析結果

(1) 水頭分布

図-2 に SH2-7、図-3 に CH1-4 の水頭分布解析結果を示す。水頭が高い段階では実際の水頭を良く表しているが、水頭が低くなり 0 に近づくにつれて、実験値と解析値のずれが大きくなる。

特に、初期水頭が低い場合、この傾向が強くなる。これは、水頭の測定上の問題であり、負圧が生じた場合に正確な測定が不可能になるためである。今回の実験では流出点付近で水頭が上がらず、負圧が生じていると思われるところは水頭を0としているため、解析値と実験値とのずれが大きくなってしまった。

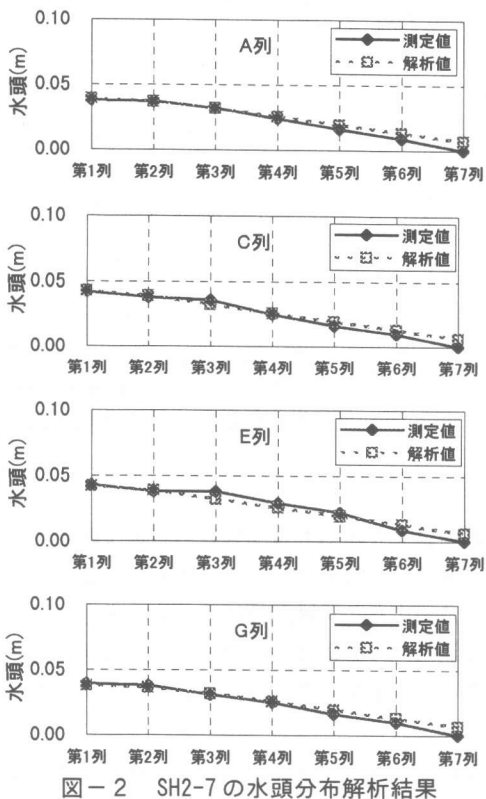


図-2 SH2-7の水頭分布解析結果

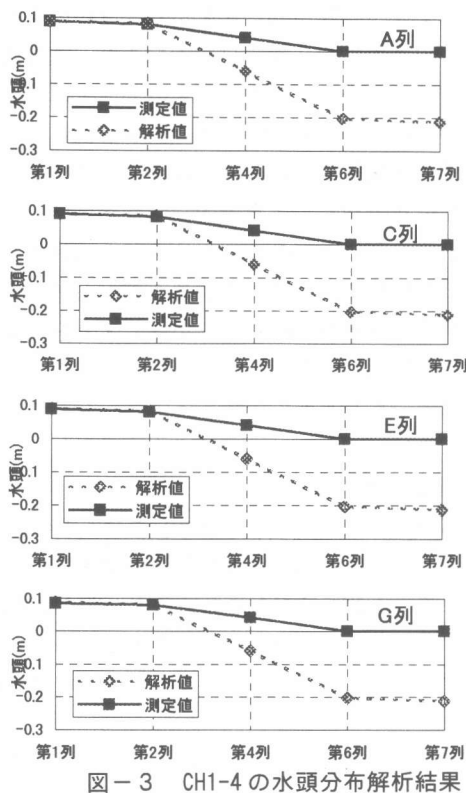


図-3 CH1-4の水頭分布解析結果

(2) 流量分布

図-4にSH2-7の縦方向における流量分布を示す。図に示すように流入部中央付近と流出部中央付近において、流量が多くなっている。これは水頭の測定時と同様に、水が流入する際に中央付近で分岐させている影響である。また、両端(A,G列)においては僅かながら流入部と流出部で流量が下がっているが、これも中央部の影響と思われる。

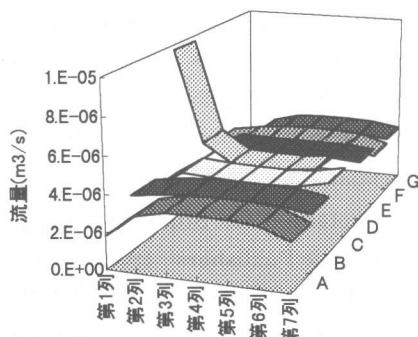


図-4 SH2-7流量分布

5. 考察

本研究においては単純な管網を想定したが、実際のコンクリート中の空隙構造は、より小さな管径による複雑な管網になっている。想定したピッチの小さな管網がピッチの大きい管網よりも複雑さを増して透水係数が減じたこと、同じ複雑さ(形状)の管網でも内径の小さな管を含むことで透水係数が減じたことを考え合わせると、透水係数は空隙構造の複雑さ、細孔の大きさ、つ

まり細孔径分布に大きく左右されることがわかる。

図-5は、既往の研究で報告されている透水係数と空隙率の関係である。本研究で行った実験をこの図にあてはめると、左上の6点になる。矢印①は細孔径の大きさを示し、管網の複雑さはそのまま細孔径が小さくなると、透水係数と空隙率が小さくなることを示す。矢印②は管網の複雑さを示し、細孔径の大きさはそのまま管網が複雑になると、空隙率が大きくなり透水係数が下がることを示す。したがって、本実験のデータと実際のコンクリートを比較すると、この2つの要因を変化させる必要があることが分かる。つまり、細孔径を小さくすると同時に管網を複雑にすることで、実際のコンクリートを表現できると考えられる。

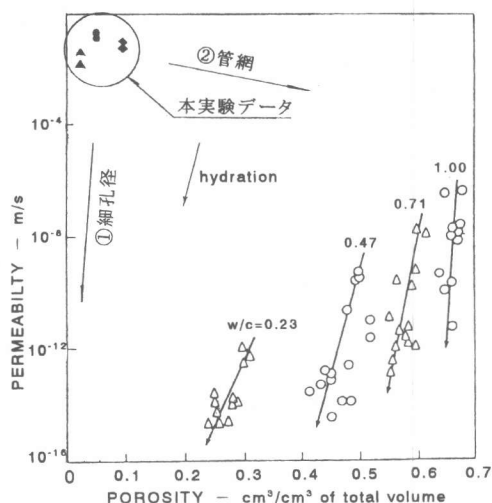


図-5 透水係数と空隙率の関係[8]

6. まとめ

本研究において実施したコンクリート中の空隙構造を想定したガラス管の透水試験により、水の通りやすさは単に水みちとなる空隙のトータル量で決まるのではなく、管網の複雑さと水の通る空隙の大きさに左右されることが明らかとなった。また、管網計算によって、透水試験時に細孔を水みちとして考えた場合の水頭分布ならびに流量分布を概ね表現することができた。

今後、水みちが小さくなるために水が通り難くなる現象をどのように表現するかが課題となる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、ご協力頂きました研究室の方々、ならびに試験装置を作成して頂いた東京大学生産技術研究所・試作工場の滑川氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 反応モデル解析研究委員会報告書(I), 日本コンクリート工学協会, 1996.5
- [2] 近藤連一: 多孔材料, 技報堂出版, 1978
- [3] 村田二郎, 岩崎訓明, 児玉和巳: コンクリートの科学と技術, 山海堂, 1996
- [4] わかりやすいセメント科学, セメント協会, pp78-104, 1993
- [5] Hamlin Jennings, Jorg Kropp, Karen Scrivener: The Modelling of Microstructure and Its Potential for Studying Transport Properties and Durability, pp433-pp442, Kluwer Academic Publishers, 1996
- [6] 宇土顕彦・西川緯一: 配水管網のグラフ処理アルゴリズムとその応用(III), 水道協会雑誌, 第55号(第623号), pp2-11, 1985.8
- [7] 高桑哲男: 配水管網の解析と設計, 森北出版, 1978
- [8] Nyame, B.K. and Illston, J.M.: Relationships between permeability and pore structure of hardened cement past, Magazine of Concrete Research, Vol. 33, No. 116, pp139-146, 1980