

論文 水セメント比の違いによる鉄筋近傍の透水性状に関する実験的研究

青木 秀行^{*1}・村上 祐貴^{*2}・大下 英吉^{*3}

要旨：水セメント比の相違が鉄筋近傍部における透水性に与える影響評価を目的として、水セメント比の異なるコンクリート供試体の加圧透水試験を行い、鉄筋軸方向に対する打設方向、材齢および鉄筋径の相違をパラメータとした議論を行った。その結果、鉄筋近傍部における透水性は、水セメント比、打設方向、材齢および鉄筋径により大きく変動することが確認された。

キーワード：透水性，ブリーディング，水セメント比，打設方向，鉄筋径

1. はじめに

近年、耐久性が高いと考えられていたコンクリート構造物の早期劣化が問題となっている。コンクリート構造物の早期劣化の要因には様々なものが考えられるが、その要因の一つに初期欠陥とも言えるコンクリート内部の鉄筋近傍部の遷移帯における各種物質移動性状、すなわち透水問題が挙げられる。従来、水密性が要求されるコンクリート構造物にとって、コンクリートの水密性は強度および耐久性と共に重要な性質である。特に、ひび割れ面からの透水挙動は、構造物の安全性を損なうばかりでなく、機能や防食上、すなわち鉄筋コンクリート構造物内部における鉄筋腐食の面において非常に重要な問題となってくる。

一般に、コンクリートは大小様々な空隙を有する多孔質複合材料である。ひび割れやマイクロレベルの空隙が道筋となって、水分や酸素、塩化物イオン或いは炭酸ガスなどの有害物質が侵入するため、合理的耐久性設計に際しては、上述のような有害物質の移動性状を定量的に評価する必要がある。特に、初期欠陥等によって断面を貫通するひび割れが発生した場合には、ひび割れを通じて内部に浸透した有害物質はコンクリート打設時の材料分離によって形成される

鉄筋近傍或いはコンクリート材料特有の性質である打継ぎ面といった非常に粗な連続した空隙を通して急速に浸透すると考えられる。すなわち、鉄筋近傍部或いは打継ぎ面という先天的な水みちの形成に焦点を置いた透水性に関する研究が非常に重要となるわけである。

本研究では、上嶋らの鉄筋近傍部における透水性状に関する研究¹⁾を基に鉄筋近傍部の透水性状を詳細に解明することを目的として、水セメント比、コンクリートの打設方向、材齢および鉄筋径による鉄筋表面積の違いにより鉄筋近傍部の透水性に及ぼすブリーディング水により形成される連続した空隙の影響を定量的に評価した。

2. 実験概要

本研究における重要なポイントは鉄筋軸に対するコンクリートの打設方向が鉄筋近傍の透水性状に及ぼす影響評価であり、その影響度合いが、水セメント比、材齢および鉄筋径に対してどの程度あるのかということである。すなわち、水平方向に鉄筋が配された供試体の鉄筋下面には、材料分離によって上昇したブリーディング水が滞留することにより非常に粗な連続した空隙が形成されることになる。一方、鉄筋が鉛直

*1 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

*3 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

表 - 1 コンクリートの配合表

W/C (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単用量(kg/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
50	25	10 ± 2	2.5 ± 2	36	189	378	625	1133
60	20	12 ± 2	4.0 ± 1	48	182	303	853	944

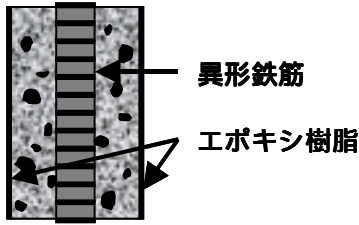
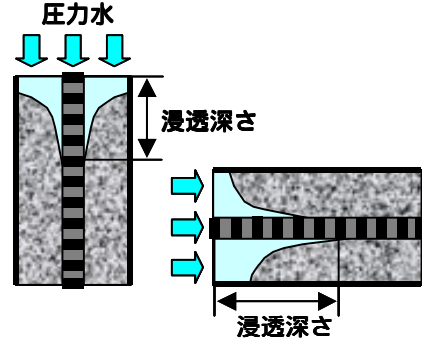


図 - 1 実験供試体断面



(a)鉛直方向 (b)水平方向

図 - 3 浸透深さの測定

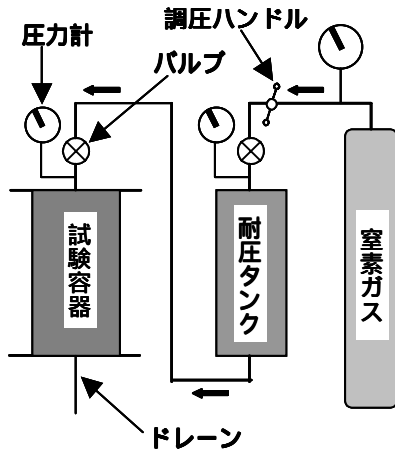


図 - 2 透水試験装置

鉄筋軸方向に対して

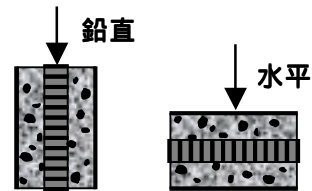


図 - 4 打設方向

に配された供試体では、このような現象はほとんど生じない。前者のような非常に粗な連続した空隙形成は、水セメント比、材齢或いは鉄筋径によって差異を生じるものと考えられるが、その差異の程度を鉄筋が鉛直に配された供試体における鉄筋近傍の透水性状を基準として定量的に評価することが重要となるわけである。

2.1 使用材料および配合

使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)、細骨材は富士川産細骨材(密度:2.61g/cm³)、粗骨材は富士川産粗骨材(密度:2.66g/cm³、最大寸法:25mm)、公称直径12.7mm および 25.4mm 異形鋼棒(以下、D13 鉄筋および D25 鉄筋と称す)である。本実験では、寸法5mm から 15mm までの粗骨材と寸法15mm から 25mm までの粗骨材を 45:55(重量比)で用い、混和材は無添加とした。なお、コンクリートの配合表を表 - 1 に示す。

2.2 実験供試体

実験供試体は、10×20cmのコンクリート円柱供試体であり、供試体の中心部には、それぞれ水系によって固定されたD13鉄筋およびD25鉄筋が配置されている。コンクリート供試体の作製方法は、コンクリートは三層に分けて打設し、それぞれ型枠外部よりパイプレータを用いて締固めを行い、そして、7日間および28日水中養生した後に供試体の端面を研磨して平滑に仕上げるとともに6日間20±2、40±5%R.H.の恒温室内で乾燥させた。実験に際しては、図 - 1に示すように、圧力水を加圧する際に次元の流れが得られるように供試体の側面部にエポキシ樹脂を塗布し防水処理を施した。

2.3 透水試験方法

透水試験は、鉄筋とコンクリート界面における定量的な透水性状の把握を目的としているため鉄筋軸に沿う方向に加圧した。透水試験装置は、図 - 2に示す加圧試験装置を用いた。試験は、インプット方法を用い、供試体を試験容器

表 - 2 供試体一覧

供試体名称	W/C(%)	実験材齢(日)	配筋方向	鉄筋径(mm)	浸透深さ(cm)	透水係数(cm/s)
60-14-V-無し	60	14	鉛直	無し	4.7	23.6×10^{-11}
60-14-V-D25	60	14	鉛直	D25	6.1	46.6×10^{-11}
60-14-V-D13	60	14	鉛直	D13	5.8	35.9×10^{-11}
60-14-H-D25	60	14	水平	D25	15.3	25.0×10^{-10}
60-14-H-D13	60	14	水平	D13	12.7	17.2×10^{-10}
60-35-V-無し	60	35	鉛直	無し	1.7	30.9×10^{-12}
60-35-V-D25	60	35	鉛直	D25	2.6	72.3×10^{-12}
60-35-V-D13	60	35	鉛直	D13	2.0	42.8×10^{-12}
60-35-H-D25	60	35	水平	D25	10.7	12.3×10^{-10}
60-35-H-D13	60	35	水平	D13	8.7	81.0×10^{-11}
50-14-V-無し	50	14	鉛直	無し	2.0	42.8×10^{-12}
50-14-V-D25	50	14	鉛直	D25	4.9	25.7×10^{-11}
50-14-V-D13	50	14	鉛直	D13	4.1	18.0×10^{-11}
50-14-H-D25	50	14	水平	D25	12.6	17.0×10^{-10}
50-14-H-D13	50	14	水平	D13	10.3	11.4×10^{-10}
50-35-V-無し	50	35	鉛直	無し	1.0	10.7×10^{-12}
50-35-V-D25	50	35	鉛直	D25	2.3	56.6×10^{-12}
50-35-V-D13	50	35	鉛直	D13	1.8	34.7×10^{-12}
50-35-H-D25	50	35	水平	D25	9.5	96.6×10^{-11}
50-35-H-D13	50	35	水平	D13	7.3	57.0×10^{-11}

に設置し一定圧力のもとで供試体の上端面に一定時間の水圧を加える。浸透深さの測定は、試験終了後に JIS A1113「コンクリートの引張強度試験方法」に従って供試体を直径方向に割裂し、図 - 3 (a)および(b)に示すように鉄筋近傍部における浸透深さの最大値を浸透深さとして断面の浸透部を測定した。そして、浸透深さ、水圧および加圧時間との関係からコンクリート中の水の拡散係数を算出し、得られた拡散係数よりコンクリートの透水係数を算出した。なお、本研究においては、作用水圧は 0.245MPa、水圧の作用時間は $24 \times 60^2 \text{sec}$ とした。

2.4 実験パラメータ

実験パラメータは、表 - 2 に示すように水セメント比、鉄筋軸に対するコンクリートの打設方向、鉄筋径および材齢とした。コンクリートの打設方向は、図 - 4 に示すように埋設された鉄筋軸方向に対して鉛直および水平方向であり、水セメント比は 50%、60%¹⁾とした。

3. 鉄筋近傍における透水性状

3.1 浸透深さおよび透水係数

コンクリートは砂層などに比べ、はるかに高密度の多孔質複合材料であるため、コンクリート体の厚さをある程度大きくすると高水圧を加

えても水は透過しない。そこで、コンクリート中に圧入された水の流れは一般に拡散流れと考えられるが、非常に空隙の多いコンクリート供試体の厚さをごく薄くしたコンクリートの場合にはダルシー則に従うものと考えられ、このような場合には、水の浸透深さや浸透量を鉄筋近傍の透水性の尺度として用いることが可能となるわけである²⁾。

拡散係数は、次式に示すように村田の式²⁾を用いて算出した。これは、コンクリート中の水の流れが、比較的高密度の空隙体に対して相当な圧力で水を圧入する場合、空隙体内の水の流れを熱伝導に類似のもの、すなわち拡散流れと捉えた一次元の流れを考慮可能とする式を以下に示す。

$$\beta_i^2 = \alpha \frac{D_m^2}{4t\xi^2} \quad (1)$$

β_i^2 : コンクリートの拡散係数(cm^2/s)

D_m : 浸透深さ(cm)

t : 水圧を加えた時間(sec)

ξ : 水圧に関する係数

α : 水圧を加えた時間に関する係数

さらに、式(1)に対して岩崎の式³⁾を引用することにより、本実験で用いた透水係数 k の算出式を以下に示す。

$$k = \beta_i^2 \times 10^{-8} \quad (2)$$

式(2)を用いることにより、各種要因における透水性状を評価していくこととする。

3.2 水セメント比の違いによる打設方向に関する影響評価

(1) 鉄筋径 D25 における検討

図 - 5 は、D25 鉄筋において鉄筋軸方向に対するコンクリートの打設方向が鉄筋近傍の透水性状に及ぼす影響を表したものである。図中の記号 および は水セメント比 60% における結果¹⁾、記号 および は水セメント比 50% における結果であり、記号、および記号、は、それぞれ鉄筋軸方向に対してコンクリートが水平および鉛直に打設された結果に対応するものである。

いずれの水セメント比においても、鉄筋に対して水平方向に打設した供試体の透水係数は、鉛直方向に打設した供試体に比べて著しく大きな値を示している。水セメント比 60% の場合、表 - 3 に示すように、鉛直方向打設の透水係数に対する水平方向打設の透水係数の比は、材齢 14 日および 35 日において、それぞれ 5.4 および 17.0 であり、水セメント比 50% の場合、材齢 14 日および 35 日において、それぞれ 6.6 および 17.1 である。ここで注目すべき点は、鉛直方向打設の透水係数に対する水平方向打設の透水係数の比は、いずれの水セメント比においても同一材齢ではほぼ同じであること、および材齢の経過とともに透水係数の比が大きくなることである。これは、水平方向打設において打設直後に発生するブリーディング水により鉄筋下面における細孔構造の緻密化が材齢とともにほとんど進行しないことによるものである。このことはすなわち、水平方向打設した鉄筋下面の透水性は、材齢の経過とともにほとんど変化しないことを表している。

また、打設方向が同じなら、水セメント比 50% の供試体の透水係数は 60% の供試体に比べて小さな値を示している。これは、水セメント比 60%

表 - 3 鉛直方向打設に対する水平方向打設の透水係数比(D25 鉄筋)

鉄筋径	水セメント比 (%)	材齢 (日)	透水係数比
D25	60	14	5.4
		35	17.0
	50	14	6.6
		35	17.1

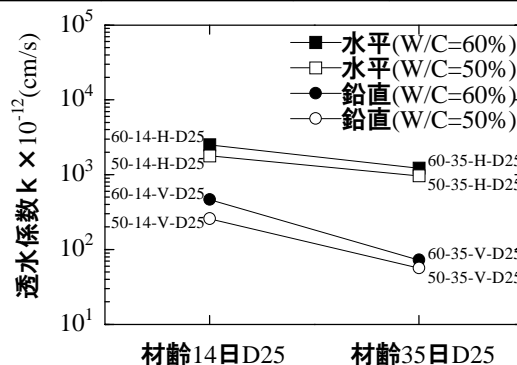


図 - 5 水セメント比の違いによる打設方向に関する影響評価(D25 鉄筋)

の供試体に比べて 50% の供試体は、低水セメント比であり細孔組織が緻密となることによるものである。したがって、鉄筋が配されたコンクリート供試体においても、水セメント比が小さい供試体の鉄筋近傍の透水性は、水セメント比が大きい供試体に比べ小さくなることが確認され、また、コンクリートの材齢が透水性に大きな影響を及ぼすという性質が確認される。

(2) 鉄筋径 D13 における検討

図 - 6 は、D13 鉄筋における供試体の打設方向による鉄筋近傍の透水性状への影響を表したものである。D25 鉄筋における実験で得られた結果と同じく、鉄筋に対し水平方向に打設した供試体の透水係数は、鉛直方向に打設した供試体に比べて著しく大きな値を示している。水セメント比 60% の場合、表 - 4 に示すように鉛直方向打設の透水係数に対する水平方向打設の透水係数の比は、材齢 14 日および 35 日において、それぞれ 4.8 および 18.9 であり、水セメント比 50% の場合、材齢 14 日および 35 日において、それぞれ 6.3 および 16.4 である。このような透水係数比は、鉄筋径 D25 の場合と同じ傾向を示しており、鉄筋径の違いによる影響はないものと考えられる。

また、水セメント比の違いで比較評価してみると、D25 鉄筋における実験で得られた結果と同様に、打設方向が同じなら水セメント比 50% の供試体の透水係数は 60% の供試体に比べて小さな値となる傾向を示している。透水係数の値は、水セメント比 60% の供試体と同様に、いずれも D25 鉄筋における実験結果と非常に類似した傾向を示しており、このことにより、水平方向に打設した鉄筋下面の透水性は、ブリーディング水による空隙形成の影響を非常に大きく受けることが水セメント比 50% の供試体より 60% の供試体の透水係数が大きいことから予想される。また、D25 鉄筋における実験結果と同様に、水セメント比が小さい供試体の鉄筋近傍の透水性は、水セメント比が大きい供試体に比べ小さくなることが再確認される。

3.3 水セメント比の違いによる鉄筋径に関する影響評価

(1) 鉛直方向打設における検討

図 - 7 は、鉛直方向打設における供試体の鉄筋径による鉄筋近傍の透水性状への影響を表したものである。いずれの水セメント比においても、D25 鉄筋が配された透水係数は、D13 鉄筋が配された透水係数に比べると、わずかではあるが大きな値を示しており、その割合は材齢 14 日および 35 日でそれぞれ 1.42 および 1.63 である。

材齢 14 日の透水係数に対する材齢 35 日の透水係数の比は、表 - 5 に示すように水セメント比 60% の場合、鉄筋径 D25 および D13 において、それぞれ 0.16 および 0.12 であり、水セメント比 50% の場合、鉄筋径 D25 および D13 において、それぞれ 0.22 および 0.19 である。すなわち、材齢の経過とともに透水係数は急激に小さくなり、その程度は鉄筋径が小さいほど顕著である。これは、鉄筋径における鉄筋表面積の大小により形成される遷移帯領域が異なることすなわち鉄筋面積が大きいと電位差によって鉄筋近傍に移動する水分量は多くなり遷移帯領域は広くなることによるものと考えられ、鉄筋軸に沿うブ

表 - 4 鉛直方向打設に対する水平方向打設の透水係数比(D13 鉄筋)

鉄筋径	水セメント比 (%)	材齢 (日)	透水係数比
D13	60	14	4.8
		35	18.9
	50	14	6.3
		35	16.4

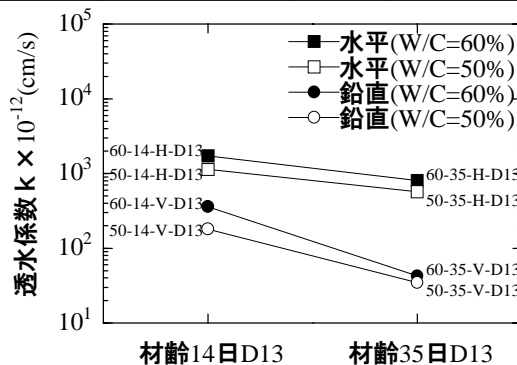


図 - 6 水セメント比の違いによる打設方向に関する影響評価(D13 鉄筋)

表 - 5 材齢 14 日に対する材齢 35 日の透水係数比(鉛直方向打設)

打設方向	水セメント比 (%)	鉄筋径	透水係数比
鉛直	60	D25	0.16
		D13	0.12
	50	D25	0.22
		D13	0.19

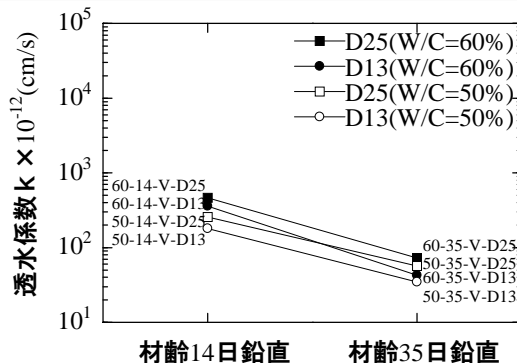


図 - 7 水セメント比の違いによる鉄筋径に関する影響評価(鉛直方向打設)

リーディング水の上昇過程において形成される空隙構造は、ブリーディング水量に依存するため両鉄筋径でその影響は小さいながらもブリーディング水量に差異があることが確認されるとともに、鉄筋径の相違は無視できないことが確認される。

また、水セメント比の違いに対して比較評価を行うと、鉄筋径が同じなら水セメント比 50%

の供試体の透水係数は60%の供試体に比べて小さな値となる傾向を示している。これは、前節で述べた打設方向に関する影響評価と同様に、水セメント比60%の供試体に比べて50%の供試体は、鉄筋軸方向に沿うブリーディング水量が少ないため、コンクリート細孔組織が密になることによるものである。このことにより、鉛直方向に鉄筋が配されたコンクリート供試体においても、水セメント比が小さい供試体の鉄筋近傍の透水性は水セメント比が大きい供試体に比べて小さくなることが確認され、また、コンクリートの材齢が透水性に大きな影響を及ぼすという性質が確認された。

(2)水平方向打設における検討

図 - 8 は、水平方向打設における供試体の鉄筋径による鉄筋近傍の透水性状への影響を表したものである。いずれの水セメント比においても、D25 鉄筋が配された透水係数は、D13 鉄筋が配された透水係数に比べると、わずかではあるが大きな値を示しており、その割合は材齢 14 日および 35 日でそれぞれ 1.49 および 1.69 であり、鉛直方向打設と同じような傾向を示している。

材齢 14 日の透水係数に対する材齢 35 日の透水係数の比は、表 - 6 に示すように水セメント比 60% の場合、鉄筋径 D25 および D13 において、それぞれ 0.49 および 0.47 であり、水セメント比 50% の場合、鉄筋径 D25 および D13 において、それぞれ 0.57 および 0.50 である。このような材齢の経過にともなう透水係数比の低下割合は、前項に示した鉛直方向打設に比べて非常に緩やかであることが注目すべき点である。すなわち、鉛直方向打設は材齢の経過とともにコンクリートの細孔組織が緻密となるが、水平方向打設は材齢が経過しても鉄筋下面の細孔組織が粗な状態のままであることを示している。

4. まとめ

本研究では、鉄筋近傍部の透水性状を詳細に説明することを目的として、水セメント比、コ

表 - 6 材齢 14 日に対する材齢 35 日の透水係数比(水平方向打設)

打設方向	水セメント比 (%)	鉄筋径	透水係数比
水平	60	D25	0.49
		D13	0.47
	50	D25	0.57
		D13	0.50

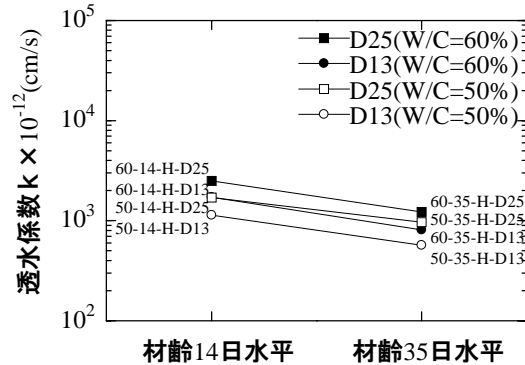


図 - 8 水セメント比の違いによる鉄筋径に関する影響評価(水平方向打設)

ンクリートの打設方向、鉄筋径および材齢の違いが、透水性に与える影響についての実験的評価を行った。本研究により得られた結果を以下に示す。

- 1)鉄筋に対して水平方向に打設した供試体の透水係数は、鉛直方向に打設した供試体に比べ非常に大きな値である。
- 2)D25 鉄筋が配された供試体の透水係数は、D13 鉄筋が配された供試体に比べ大きな値である。
- 3)鉄筋に対して鉛直方向打設に対する水平方向打設の透水係数比は、水セメント比に関係なく、材齢の経過とともに非常に大きくなる。
- 4)材齢の経過にともなう透水係数の低下割合は、鉛直方向打設では急激であるが、水平方向打設では緩やかである。

参考文献

- 1)上嶋宣裕，一ノ瀬晴幸，大下英吉：コンクリートの打設方向による鉄筋近傍の透水性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，vol.23，No.2，pp.841-846，2001
- 2)村田次郎：コンクリートの水密性の研究，土木学会論文集，No.77，pp.69-103，1961.11
- 3)岩崎訓明：コンクリートの特性，共立出版