

# 論文 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

上嶋宣裕\*<sup>1</sup>・一ノ瀬晴幸\*<sup>2</sup>・大下英吉\*<sup>3</sup>

**要旨**：加圧透水試験により、打設方向の異なるコンクリート供試体を用いて、打設方向の相違が鉄筋近傍部における透水性に与える影響を基礎的に評価する実験を行った。また、打設方向に加えて鉄筋径の異なる供試体を用い、鉄筋径がブリージング水の上昇による鉄筋下面の透水性に与える影響を評価した。その結果、鉄筋近傍部における透水性は打設方向および鉄筋径による両者の影響を大きく受けることが確認された。

**キーワード**：透水性、ブリージング、打設方向、鉄筋径

## 1. はじめに

近年、50年以上の耐久性があると考えられていたコンクリート構造物の早期劣化が社会問題となっている。コンクリート構造物の劣化の要因には様々なものがあるが、その要因の一つに、鉄筋コンクリート構造物内部における鉄筋腐食が挙げられる。従来、コンクリート中の鉄筋はセメント成分中の水酸化カルシウム水溶液によるアルカリ性によって不動態化されることにより、錆の発生に対する抵抗力を持つと考えられていた。しかしながら、コンクリートを各層に分けて材料的に見ると、様々な固体層とともに形状および大きさの異なる空隙層により構成された多孔質複合材料である。このような材料の特性ゆえに、長い年月が経つとひび割れやマイクロレベルの空隙より腐食反応を促進する酸素や塩化物イオン、あるいはコンクリートの中性化を促す炭酸ガスなどが侵入することによって鉄筋が腐食する。また、実構造物において、各種の劣化要因によって断面を貫通するひび割れが発生した場合、そのひび割れを通じて、内部に浸透した水が、水平に配された鉄筋に達する。このとき侵入した水は、コンクリート打設時の材料分離により発生するブリージング水の上昇によって形成される、鉄筋下面のポーラスな組

織を通して急速に浸透すると考えられる。しかしながら、コンクリートの鉄筋周辺部における、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は現状では十分と言えない。

本研究では、鉄筋周辺部の透水性状を詳細に解明することを目的としており、コンクリート打設方向に関して鉄筋を水平および鉛直に配することにより、水平方向に配された鉄筋の下面に、ブリージングが上昇することによって形成される連続した空隙が、鉄筋周辺部の透水性に与える影響を評価するとともに、鉄筋の径による鉄筋表面積の大小が、鉄筋周辺部の空隙の形成、すなわち、透水性に与える影響について実験的評価を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び配合

本研究における使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント(比重 3.16)、細骨材は富士川産細骨材(比重 2.61)、粗骨材は富士川産粗骨材(比重 2.66、最大寸法 20mm)、公称直径 12.7mm および 25.4mm の A 社製鉄筋コンクリート用異形棒鋼(以下、 $\phi 13$  鉄筋および  $\phi 25$  鉄筋と称す)である。なお、コンクリートの配合表を表-1に示す。

\*<sup>1</sup>中央大学学生 理工学部土木工学科 (正会員)

\*<sup>2</sup>中央大学技術員 理工学部土木工学科 (正会員)

\*<sup>3</sup>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

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	ブリージ ング率 (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )			
						水	セメン ト	細骨材	粗骨材
20	12±2	4±1	60	48	15	182	303	853	944

## 2.2 実験供試体

実験供試体は、φ10×20(cm)のコンクリート円柱供試体である。供試体の中心部には、それぞれ針金によって固定されたD25 鉄筋およびD13 鉄筋が配置されている。水平方向打設に使用した型枠は、円周部上面に打設口が設けられた型枠を使用した。供試体の処理方法は、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った。そして、打設後7日間水中養生したのち、供試体の端面を研磨して平滑に仕上げ、7日間20℃の室内で乾燥させた。また、図-1に示すように、圧力水を加圧する際に一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。なお、コンクリートの打設方向は、図-2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る。

## 2.3 透水試験容器

透水試験容器は、図-3に示すように鋼製の円筒容器からなるものを使用した。試験容器の中心部に実験供試体を設置し、上部の圧力水注入口より注水し供試体上面を加圧する。その際、圧力水注入口に隣接するエア抜きバルブから容器内部の空気を完全に排出した後、実験を行った。また、容器の上端にバックアップリングを配置し、供試体側面上部にビニール製テープを巻くことにより、容器と実験供試体の隙間から外部への圧力水の漏洩を防止した。

## 2.4 透水試験方法

透水試験は鉄筋とコンクリートの界面での水みちの透水性に焦点をおき鉄筋に沿う方向で行った。透水試験装置は図-4に示す加圧透水試験装置を用いた。供試体を試験容器に設置し、

供試体の上端面に水圧を所定時間加える。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」にしたがって、供試体を直径方向に割裂して断面の浸透部を測定

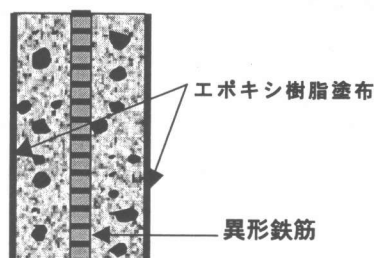


図-1 実験供試体

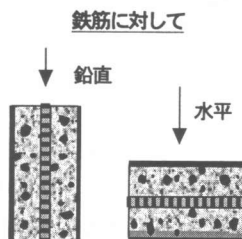


図-2 打設方向

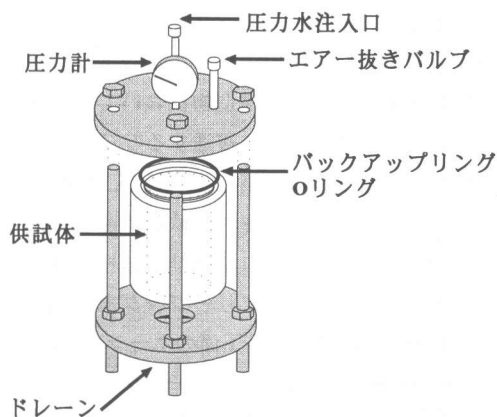


図-3 透水試験容器

表-2 供試体一覧

供試体No	水セメント比 (%)	材齢 (日)	打設方向 (配筋方向)	鉄筋径 (mm)	浸透深さ (cm)	透水係数 (cm/s)
I-0	60	7	鉛直	無し	4.7	$23.6 \times 10^{-11}$
I-1	60	7	鉛直	D25	6.1	$46.6 \times 10^{-11}$
I-2	60	7	鉛直	D13	5.8	$35.9 \times 10^{-11}$
I-3	60	7	水平	D25	15.3	$25.0 \times 10^{-10}$
I-4	60	7	水平	D13	12.7	$17.2 \times 10^{-10}$
II-0	60	28	鉛直	無し	1.7	$30.9 \times 10^{-12}$
II-1	60	28	鉛直	D25	2.6	$72.3 \times 10^{-12}$
II-2	60	28	鉛直	D13	2.0	$42.8 \times 10^{-12}$
II-3	60	28	水平	D25	3.2	$11.0 \times 10^{-11}$
II-4	60	28	水平	D13	3.0	$96.3 \times 10^{-12}$

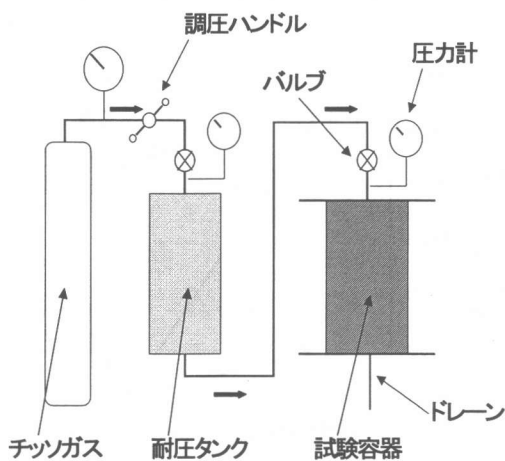


図-4 透水試験装置

し、鉄筋近傍部における浸透深さの最大値を目視によって求めた。この浸透深さと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求め、透水性の尺度とした。なお、本研究においては、試験水圧を  $2.5 \text{ kgf/cm}^2$  ( $0.245 \text{ MPa}$ ) とし、試験時間は  $24 \times 60^2 \text{ sec}$  とした。

### 2.5 実験パラメータ

実験パラメータは、鉄筋に対するコンクリートの打設方向および鉄筋径とした。打設方向に対する検討は、水平方向に鉄筋の配された供試

体の鉄筋下面に、材料分離によって上昇したブリージング水が滞留することによって形成される連続した空隙が、コンクリートの透水性におよぼす影響を、鉛直方向に鉄筋の配された供試体のケースと比較して、打設方向が鉄筋周辺部透水性におよぼす影響を評価するためのものである。また、鉄筋径に対する検討は、鉄筋の径による鉄筋表面積の大小が、鉄筋周辺部の空隙の形成、すなわち、透水性におよぼす影響を評価するためのものである。

### 3. 実験結果および考察

表-2 に本実験により得られた実験結果を示す。

#### 3.1 浸透深さおよび透水係数について

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がある程度大きくなると、高水圧を加えても水は透過しない。このような場合には、水の浸透深さや浸透量を透水性の尺度としている。浸透深さについて解析する場合は、一般的に高圧浸透モデルが適用されている。これは、ダルシー則に加えて水の浸透過程で高圧により水およびコンクリートの実体部が弾性変形を起こすことを考慮したものである。

拡散係数は、次式に示すように村田<sup>1)</sup>の式を用いて算出された。これは、コンクリート中の水の流れを拡散流れとして、Fourierの熱伝導方程式中の温度を水圧に置き換えて算定した。

ここで、

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

$\beta_i^2$  : 拡散係数 (cm<sup>2</sup>/s)

$D_m$  : 浸透深さ (cm)

$t$  : 水圧を加えた時間 (sec)

$\xi$  : 水圧に関する係数

$\alpha$  : 水圧を加えた時間に関する係数

ここで、岩崎の式<sup>2)</sup>を引用し、透水係数を算定した。

$$\beta_i^2 = \frac{kK}{\rho} = \frac{k \times 1.0 \times 1.0^5}{1.0 \times 10^{-3}} = k \times 10^8 \quad (2)$$

また、表-2に示す浸透深さは、図-5(a)(b)に示すように、鉄筋周りの水分の浸透深さの最大値とした。

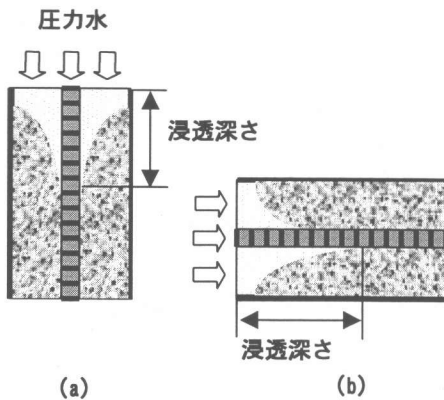


図-5 浸透深さの測定

### 3.2 打設方向に関する影響評価

#### (a) 鉄筋径 D25

D25 鉄筋における供試体の、打設方向による検討評価した実験結果を図-6に示す。鉄筋に対し水平方向に打設された供試体 I-3 および II-3 の透水係数は、鉄筋に対し鉛直

方向に打設された供試体 I-1 および II-1 に比べ大きな値を示した。特に、水平方向に打設された供試体 I-3 においては、材齢が浅いことに加えて D25 の鉄筋が配されていることにより、打設直後に発生するブリージング水の上昇の影響による、鉄筋下面の間隙の形成が著しく顕著であったものと考えられる。このことにより、水平方向打設における鉄筋下面部分の透水性が、コンクリート均質部に比べて著しく大きいことが確認され、また、コンクリートの透水性は初期養生期間の影響を大きく受けるという基礎的な性質が確認された。

#### (b) 鉄筋径 D13

D13 鉄筋における供試体の、打設方向の影響

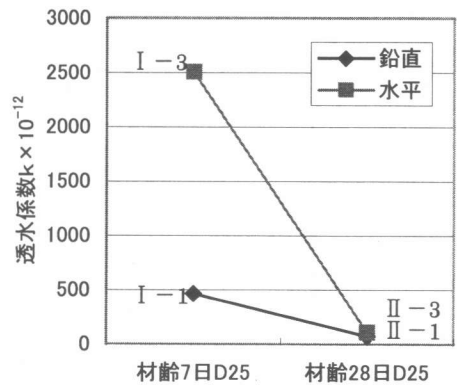


図-6 打設方向に関する影響評価(a)

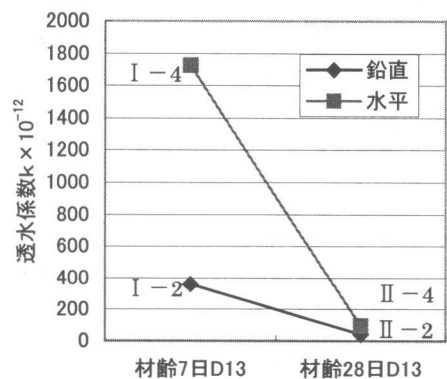


図-7 打設方向に関する影響評価(b)

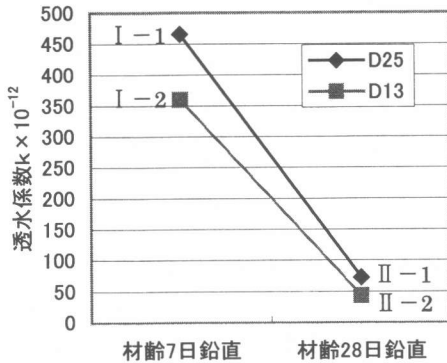


図-8 鉄筋径に関する影響評価(a)

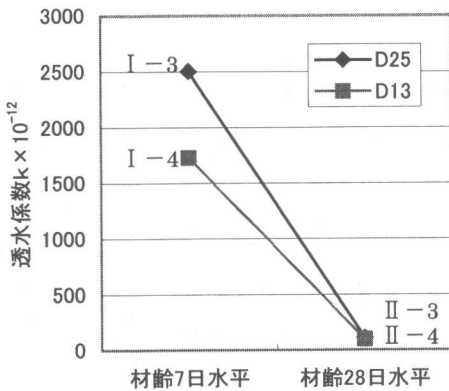


図-9 鉄筋径に関する影響評価(b)

響評価した実験結果を図-7に示す。D25鉄筋における試験で得られた結果と同様に、鉄筋に対し水平に打設された供試体I-4およびII-4の透水係数は、鉄筋に対し鉛直に打設された供試体I-2およびII-2に比べ大きな値を示した。また、得られた透水係数の値はいずれもD25鉄筋における試験結果と非常に酷似した傾向を示しており、このことにより、水平方向打設における鉄筋下面部のコンクリートの透水性は、鉄筋径の大小によらず、ブリージング水の上昇による間隙形成の影響を受けることが確認された。

### 3.3 鉄筋径に関する影響評価

#### (a) 鉛直方向打設

鉛直打設方向における供試体の鉄筋径の影響評価した実験結果を図-8に示す。D25鉄筋の配された供試体I-1およびII-1の透水係数は、D13鉄筋の配された供試体I-2およびII-2に比べわずかに大きな値を示した。これは、鉄筋径の大小により、ウォールエフェクトの影響や、鉄筋表面に形成される遷移帯組織の生成量に差が生じることによるものと考えられる。しかし、その差異は非常に小さなものであり、すなわち、鉛直方向打設においてはブリージング水の上昇が鉄筋近傍での透水性におよぼす影響が小さいため、鉄筋径の相違は透水性に影響を与えるものの、その差は小さいということが確認された。

#### (b) 水平方向打設

水平方向打設における供試体の鉄筋径の影響評価した実験結果を図-9に示す。D25鉄筋の配された供試体I-3およびII-3における透水係数は、D13鉄筋の配された供試体I-4およびII-4に比べて大きな値を示した。これは、前節で述べた鉛直方向打設のケースと比較して、鉄筋径の相違による透水係数の値の差が大きいことを示しており、すなわち、水平方向打設においては、ブリージング水の上昇による影響を大きく受けるため、鉄筋径の相違によって鉄筋下面の間隙の形成に差異が生じるということが確認された。

## 4 水分移動性状

### 4.1 一般的な水分移動

コンクリート内部に発生する間隙水圧あるいは初期応力状態は水分移動問題に対して極めて重要である。これらの間隙水圧あるいは初期応力状態は、コンクリートの体積変化により発生するものであり、水の移動をほとんど伴わない静的水分移動特性と称される。一方、静的水分移動特性とともに重要であるものに動的水分移動特性、すなわち漏水問題が挙げられるであろう。コンクリート中の動的水分移動は、コンクリートを組織する空隙に均一に生じるという

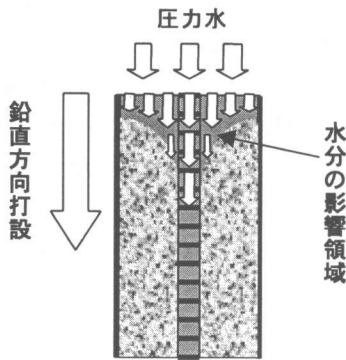


図-10 鉛直方向打設における水分の影響領域

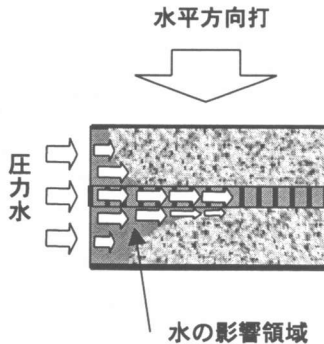


図-11 水平方向打設における水分の影響領域

よりも、むしろマイクロあるいはマクロクラックなどの流れやすい特定のクラックを通して急速に広がっていく。

#### 4.2 鉄筋周りの水分移動

鉛直方向に打設された供試体内部における圧力水の影響領域は図-10に示すとおりであり、おおよそ鉄筋を軸とした対称的な形となる。また、コンクリート実体部と鉄筋近傍部での水分の浸透状況は、ウォールエフェクト等による遷移帯組織の形成による影響で、鉄筋近傍部に水分が流れやすい傾向が見られた。水平方向に打設された供試体内部における水分の影響領域は図-11に示すとおりであり、鉄筋下面側に非常に偏った形となる。また、コンクリート実体部と鉄筋近傍部での水分の浸透状況は、鉄筋上面

側では鉛直方向に打設された供試体と類似したものであるが、鉄筋下面側では鉛直方向に打設された供試体に比べて水分の影響領域が非常に大きく、先端浸透部から加圧面に向かって二次曲線的に広がっていく傾向が見られた。

#### 5. まとめ

本研究では、鉄筋周辺部の透水性状を詳細に解明することを目的として、コンクリート打設方向に関して鉄筋を水平方向および鉛直方向に配することにより、打設方向の相違が透水性に与える影響を評価するとともに、鉄筋径の相違が透水性に与える影響について実験的評価を行った。

その結果、以下のことが確認された。

- 1) 鉄筋に対して水平方向に打設された供試体は、鉛直方向に打設された供試体に比べ、得られた透水係数は非常に大きな数値を示した。これは、打設直後にブリージング水が上昇することにより、水平方向に打設された供試体の鉄筋下面に、連続した空隙が形成されることによる影響であると考えられる。
- 2) D25 鉄筋の配された供試体は、D13 鉄筋の配された供試体に比べ、得られた透水係数は大きな値を示した。特に、水平方向打設における供試体では、透水係数の値の差が顕著であった。これは、鉄筋下面へのブリージング水の上昇により形成される空隙径や空隙分布が鉄筋の表面積、すなわち、鉄筋径に依存していることを示している。

#### 参考文献

- 1) 村田二郎, 岩崎訓明, 児玉克巳: コンクリートの科学と技術, 山海堂
- 2) 岩崎訓明: コンクリートの特性, 共立出版
- 3) 大下英吉: 微細ひびわれを含むコンクリート体の透水メカニズムに関する研究