

論文 非貫通ひび割れを有するコンクリートの水密性評価に関する検討

名倉健二*¹・廣永道彦*²・遠藤孝夫*³・小野 定*⁴

要旨：筆者らは、劣化作用を考慮したコンクリート構造物の長期止水性能評価手法について研究中である。この研究では、コンクリート構造物に発生した非貫通（表面）ひび割れが水密性に与える影響については、ひび割れをモデル化した有限要素法を用いた浸透流解析から構築した評価モデルを提案していた。本論文は、ひび割れ深さを人工的に制御した非貫通ひび割れを有するコンクリート試験体を用いた透水試験を実施し、非貫通ひび割れの水密性について評価するとともに、提案していた評価モデルを検証した結果をまとめたものである。

キーワード：水密性評価モデル、非貫通ひび割れ、透水試験

1. はじめに

近年、コンクリート構造物は使用する目的や環境などが多種多様になってきており、コンクリートに要求される性能も複雑になってきている。筆者らは、図-1に示すような地中の地下水位以下に構築される構造物に要求される性能のひとつである水密性に着目し、劣化作用を考慮したコンクリート構造物の長期止水性能評価手法について研究中である[1]。この研究では、構造物の水密性に影響を与える劣化現象としてひび割れに着目し、さらにひび割れを貫通ひび割れと非貫通ひび割れ（以下、表面ひび割れと記す）に分類した。このうち、貫通ひび割れの水密性については、既往の研究成果[2]から、漏水量を評価項目とした水密性評価モデルを構築した。一方、表面ひび割れの水密性については、水密性に関する研究がほとんどなされていなかったこともあり、ひび割れをモデル化した二次元の有限要素法を用いた浸透流解析に基づいて水密性評価モデルを構築した[3]。このモデルは解析的に求められたものであり、その適用性や精度について課題が残されていた。

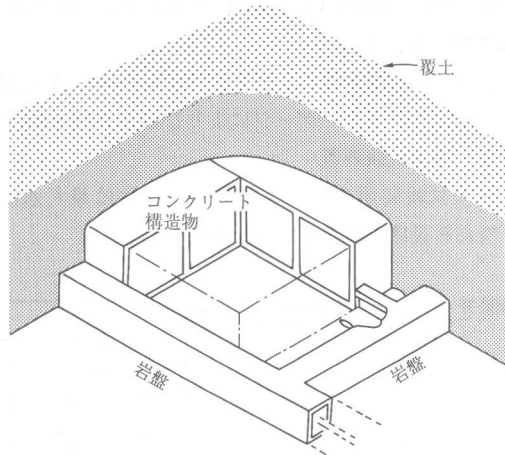


図-1 地中コンクリート構造物概念

このようなことから、人工的に制御した表面ひび割れを有するコンクリート試験体を製作し、この試験体を用いた透水試験を行い、表面ひび割れを有するコンクリートの水密性評価モデルを実験的に検証し、モデルの適用性の評価と高度化を図る必要が認められた。

本論文は、表面ひび割れを有するコンクリート試験体を用いた透水試験結果を基に、その水密性について評価するとともに、水密性評価モデルを検証した結果をまとめたものである。

*1 清水建設（株）土木本部技術第一部グループ長（正会員）

*2（財）電力中央研究所バックエンドプロジェクト部天然バリアチーム主任研究員（正会員）

*3 東北学院大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*4 清水建設（株）土木本部技術第一部副部長、工博（正会員）

2. 表面ひび割れを有するコンクリート試験体を用いた透水試験 [4]

2. 1 実験概要

(1) 使用材料と配合

試験体を用いたコンクリートの配合を表-1に示す。セメントは低発熱形高炉セメントB種（普通ポルトランドセメント：高炉スラグ=45：55）、細骨材は陸砂と砕砂の混合（混合比率40：60）、粗骨材は碎石、混和剤はリグニンスルホン酸系A E減水剤を使用した。

表-1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
25	14	4.5	55	47.0	153	279	887	1024	0.658

(2) 試験体

試験体の形状寸法は、図-2に示すように一辺が30cmの立方体とし、その一面に人工的なひび割れを設けた。人工ひび割れの深さは、0, 10, 15, 20, 25cmの4水準とした。試験体は、人工ひび割れとして厚さ2mmのステンレス板をひび割れ深さまで設置した状態でこれと反対の面からコンクリートを打込んで作製した。また、試験体は材齢21日までは20℃の室内で散水養生し、その後7日間は20℃・湿度60%の室内に放置した。材齢28日で透水試験に供した。

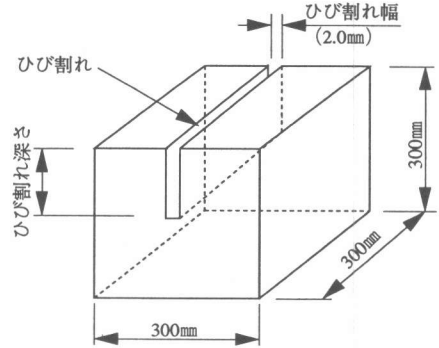


図-2 試験体の形状寸法

なお、ひび割れ幅の変動を確認するため、透水試験の直前までコンタクトゲージによりひび割れ幅を測定したが、ひび割れ幅の変動は認められなかった。

(3) 透水試験装置

透水試験装置を図-3に示す。装置は最大水圧が30kgf/cm²まで载荷可能である。透水試験はひび割れを設けた面から水圧を载荷した。

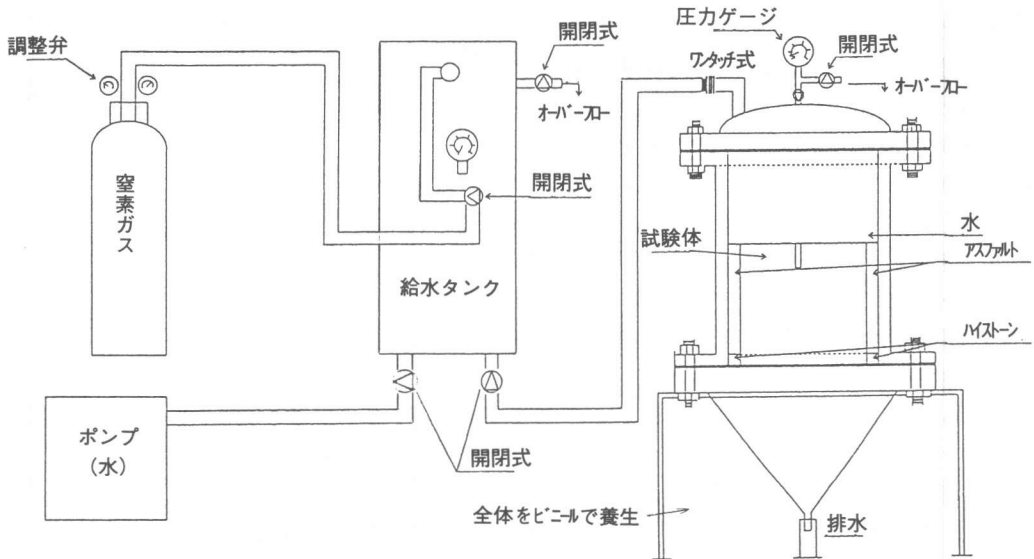


図-3 透水試験装置

2. 2 実験結果および考察

透水試験はアウトプット法とした。透水試験で得られた透水量から、次式により透水係数を算定した。すなわち、ひび割れが存在することにより増大する透水量の影響を相対的な透水係数の増大で評価したものである。

$$K = \frac{Q}{\frac{P}{W} \cdot A} \quad (1)$$

ここに、K：透水係数 (cm/s)

Q：透水量 (cm³/s)

P：水頭 (cm)

W：部材厚 (cm)

A：透水面積 (cm²)

ひび割れ深さと透水係数との関係を図-4に示す。この結果から、当然の結果ではあるが、ひび割れ深さが深くなるに従って

透水係数が大きくなるのがわかる。また、ひび割れ深さが深くなるほど、透水係数の増大量は大きくなっている。これは、ひび割れ先端から部材端面までの健全部の大きさが透水係数に大きな影響を与えていることが考えられる。

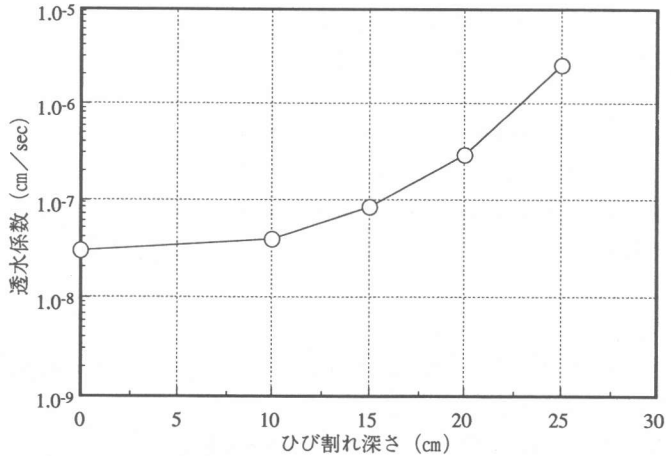


図-4 ひび割れ深さと透水係数との関係

3. 水密性評価モデルの検証

本章では、透水試験で得られた結果を基に、筆者らが提案している表面ひび割れを有するコンクリートの水密性評価モデルの検証を行う。

3. 1 水密性評価モデル

水密性評価モデルは、飽和・不飽和の浸透流解析理論に基づく二次元有限要素法によるパラメータ解析結果から構築した。

(1) 解析概要

解析モデルは、図-5に示すようなひび割れが発生したコンクリート部材の斜線部を取り出してモデル化した。また、解析のパラメータは、部材厚が42, 46, 50cmの3水準、ひび割れ深さが5, 10, 20, 30, 40cmの5水準、ひび割れ間隔が10, 20, 40, 80, 120cmの5水準、水圧は1kgf/cm² (水頭10m相当)の1水準、コンクリートの透水係数は1×10⁻¹⁰cm/sの1水準とした。

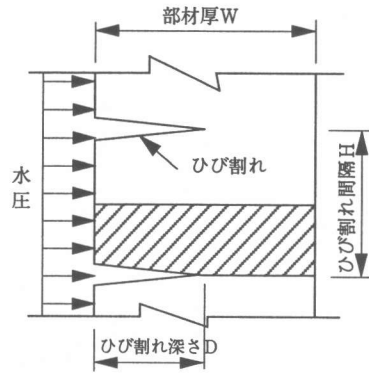


図-5 解析モデル概念図

(2) 解析結果と水密性評価モデル

解析結果の一例として、部材厚50cmの場合におけるひび割れ間隔、ひび割れ深さと浸透流量と-6に示す。この図から、ひび割れ深さが深くなるほど浸透流量は大きくなるが、深さが10cm程度まではひび割れ深さやひび割れ間隔は浸透流量にほとんど影響を及ぼさないこと、ひび割れ深さが深いほどひび割れ間隔が浸透流量に及ぼす影響が大きいことがわかる。特に、ひび割れ深さが30cm以上、ひび割れ間隔が40cm程度以下の場合には、これらの要因が浸透流量に影響を及ぼし

ていることがわかる。この理由としては、図-7および8に示す部材厚50cmの間隙水圧分布図の一例からわかるように、ひび割れ深さが浅い場合には健全部のコンクリートの間隙水圧が平行になっていることから健全部の透水性が支配的になっていること、ひび割れ間隔が大きい場合にはひび割れから離れるほどひび割れの影響を受けにくいこと、などが考えられる。

(3) 水密性評価モデル

解析結果を正規化するために、ひび割れがある場合の浸透流量をひび割れのない場合の浸透流量で除して浸透流量比 (Q/Q_0) を定義した。この浸透流量比を特性値とし、部材厚、ひび割れ深さおよびひび割れ間隔を変数とした双曲線回帰した結果から、水密性評価モデルを次式で表した。

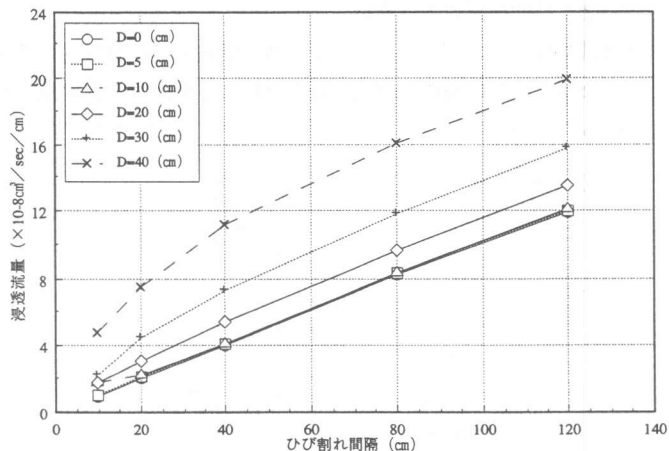
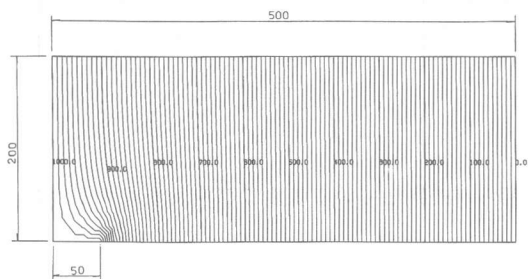
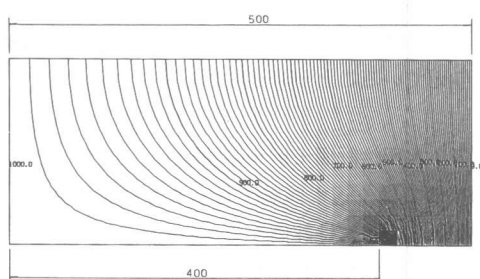


図-6 ひび割れ間隔と浸透流量 (部材厚50cm)

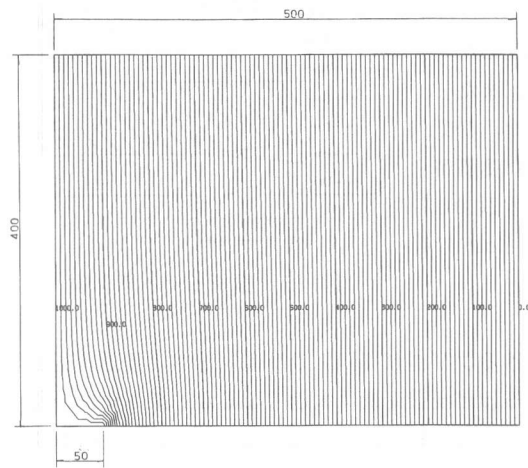


(a) ひび割れ深さ5cm

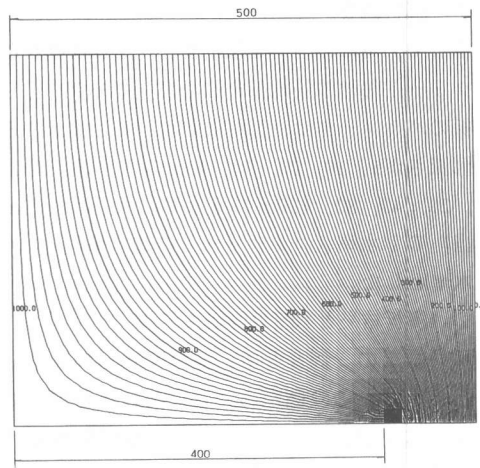


(b) ひび割れ深さ40cm

図-7 間隙水圧分布 (部材厚50cm、ひび割れ間隔40cm) の一例



(a) ひび割れ深さ5cm



(b) ひび割れ深さ40cm

図-8 間隙水圧分布図 (部材厚50cm、ひび割れ間隔80cm) の一例

$$Q/Q_0 = \frac{D/W}{(0.0793H + 0.5672) - (0.0831H + 0.5240) \cdot D/W} + 1 \quad (2)$$

ここに、Q：任意のひび割れ深さ、部材

厚、ひび割れ間隔における単位奥行き当たりの浸透流量 (cm³/s/cm)

Q₀：ひび割れない場合の単位奥行き当たりの浸透流量 (cm³/s/cm)

D：ひび割れ深さ (cm)

W：部材厚 (cm)

H：ひび割れ深さ (cm)

すなわち、表面ひび割れを有するコンクリートのひび割れ深さ、部材厚およびひび割れ間隔がわかれば、その水密性は浸透流量比で評価できる。また、表面ひび割れがある場合には、ひび割れない場合に比べて相対的な透水係数がQ/Q₀倍になるとの評価ができる。

3. 2 水密性評価モデルの検証

水密性評価モデルを検証するために、実験で得られた透水係数を、ひび割れがない場合に対する表面ひび割れがある場合の透水係数の比で評価することとした。この透水係数の比は式(2)に示した水密性評価モデルの部材厚30cmにおける浸透流量比と同じことになる。この両者を比較した結果を図-9に示す。この結果から、浸透流量比はD/Wが0.5程度以下の範囲では実験結果と水密性評価モデルはよく一致しているが、D/Wがこれよりも大きくなる

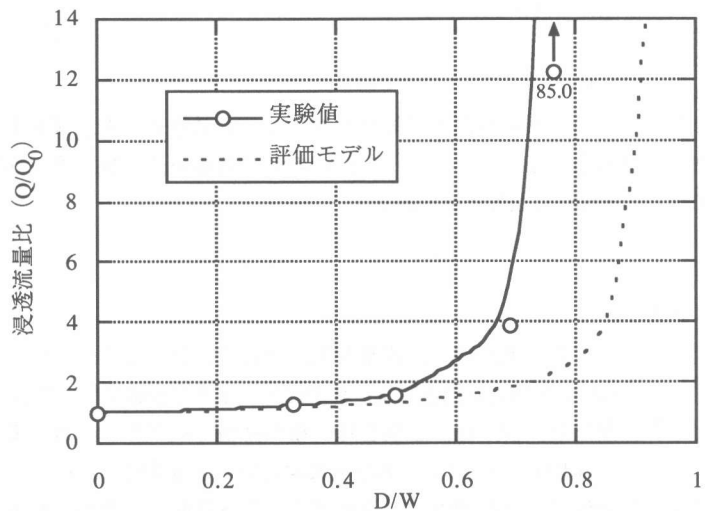


図-9 実験結果と水密性評価モデルの比較

ほど実験結果の方が大きくなる傾向がみられ、整合性が悪くなる結果となった。

この理由としては、試験体の形状寸法とコンクリートの均質性が考えられる。浸透流解析結果では図-7および8からもわかるように、浸透流量はひび割れ間隔に対してもひび割れ深さや部材厚も影響を及ぼしている。一方、実験では部材厚、ひび割れ間隔(試験体中央部にひび割れを設置したため)とも30cmの一定としたため、ひび割れ間隔に対する解析よりも小さい部材厚が透水量の増大に影響したことが考えられる。すなわち、表面ひび割れを考慮した透水係数を評価する場合には、ひび割れ間隔だけではなく、任意のひび割れ深さおよび部材厚に対応する透水断面積(有効断面積)といった要因も考慮する必要があると思われる。さらに、水密性評価モデルでは、ひび割れ深さと部材厚との比(D/W)をとることにより部材厚を正規化しているが、実際には試験体の大きさ、いわゆる寸法効果のようなものが影響している可能性も考えられる。また、解析ではコンクリートは透水に対しては均質性であると仮定していたが、実際にはコンクリート内部には粗骨材とモルタルとの界面の付着低下部、ブリーディング等による微細な空隙、微細な

ひび割れ等が連続あるいは不連続に存在している。ひび割れ深さが深いほど、すなわちひび割れが発生していない部分が少ないほど、コンクリート内部の微細な空隙が透水量の増大に影響を与えたとも考えられる。水圧が30kgf/cm²とかなり大きかったこともこの傾向を助長した可能性がある。

4. まとめ

表面ひび割れを有するコンクリート試験体を用いた透水試験を行い、その水密性を評価するとともに、既報の表面ひび割れを有するコンクリートの水密性評価モデルの検証を行った。その結果のまとめは以下のとおりである。

- (1) 透水試験結果から、ひび割れ深さが深くなるほど相対的な透水係数は大きくなる。また、ひび割れ深さが深くなるほどその増大量も大きくなった。
- (2) 部材厚に対するひび割れ深さの比 (D/W) が0.5程度以下であれば、実験結果と水密性評価モデルはよく合っているが、これ以上の範囲では評価モデルは過小評価となることが認められた。

5. おわりに

今後は、ひび割れ間隔と部材厚を変化させた試験体の透水試験を実施して有効断面積に関する知見を得るとともにコンクリート内部の微細構造が透水性に及ぼす影響についても検討し、評価モデルの高度化を図る予定である。

参考文献

- [1] 広永道彦, 名倉健二, 遠藤孝夫, 小野定, 辻村捷太郎: 劣化作用を考慮したコンクリート構造物の長期止水性能評価手法の提案、土木学会論文集No502/V-25, pp.63-72、1994.11
- [2] 伊藤忠彦, 西保, 土橋吉輝, 和田高清: ひびわれを有するコンクリートの高水圧下における漏水量について、土木学会第44回年次学術講演会、pp.412-413、1989.10
- [3] 名倉健二, 辻村捷太郎, 遠藤孝夫, 広永道彦: ひびわれを有するコンクリートの止水性能に関する解析的検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No1, pp.723-726、1992.6
- [4] 広永道彦, 河西基: 劣化の進行を考慮したコンクリート構造物の長期止水性能評価手法の提案、電力中央研究所報告、平成8年3月