

# 論文 非貫通ひびわれを有するコンクリート構造物の水密性評価手法の高度化

広永 道彦\*1・名倉 健二\*2・戸栗 智仁\*3・遠藤 孝夫\*4

**要旨:** コンクリート材料は、放射性廃棄物処分施設を構成する人工バリアの一つとして施設内への地下水の浸入を極力防ぐための水密性が期待されている。しかし、放射性廃棄物処分施設には、その環境条件から様々な劣化作用があり、ひびわれが生じる可能性を否定できない。本研究ではひびわれが生じた場合のコンクリートの透水係数の長期挙動評価手法を開発するための一環として、非貫通ひびわれに対する透水係数算定式の開発のために、実験により取得したデータと、既提案の算定式<sup>1)</sup>を検証することにより、非貫通ひびわれを有するコンクリート試験体の透水係数算定式の高度化を図った。

**キーワード:** 放射性廃棄物処分, コンクリート, ひびわれ, 透水係数

## 1. はじめに

資源の乏しい我が国の燃料政策は核燃料サイクルを確立することである。核燃料サイクルを確立するためには、原子力発電所の運転および再処理工程等で発生する放射性廃棄物を安全に処分できる技術を確立する必要がある。

現在、青森県六ヶ所村で実施されている低レベル放射性廃棄物の浅地中処分施設<sup>2)</sup>でも、コンクリートは構造部材として用いられている。

コンクリートは放射性廃棄物処分施設の中で構造部材、あるいは核種移行を抑止する人工バリアとして使用することが考えられている。人工バリアとしてのコンクリートの役割は、廃棄物中に閉じ込められている放射性核種が施設内に浸入してくる地下水によって移行することから、廃棄物と地下水を極力接触させないための「水密性」と、地下水と接触しても移行を抑止する「核種収着性能」である。

さらに、安全な放射性廃棄物処分技術を確立するためには、廃棄物中の核種の特性 (ex.放射能濃度, 半減期) に応じて、これらの性能に対

する長期的な耐久性が必要とされる。

そのため、筆者らは放射性廃棄物処分施設のような保守・補修が困難な地中構造物に対して、劣化作用の進行を考慮した長期止水性能評価手法を構築・提案<sup>3)</sup>した。この場合、曲げひびわれのように貫通ひびわれと考えることが困難なもの、すなわち非貫通ひびわれに対する透水係数の算定については、既往の研究事例がないため、浸透流量解析による算定式<sup>1)</sup>を提案したが、ひびわれ幅とひびわれ深さとの比が大きい場合、実験結果と算定式による結果に誤差があることが確認された<sup>1)</sup>。

本論文は、人工的に導入した非貫通ひびわれを有するコンクリート試験体を用いて透水試験を実施し、既提案<sup>1)</sup>の非貫通ひびわれの透水係数算定式との検証を行い、その式の高度化についてとりまとめたものである。

## 2. 透水試験

### 2.1 試験体の製造

製造したコンクリート試験体およびその材

\*1 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 高レベル廃棄物処分研究プロジェクト 主任研究員 (正会員)

\*2 清水建設 (株) 土木本部 (正会員)

\*3 清水建設 (株) 土木本部 (正会員)

\*4 東北学院大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

料仕様は表-1, 2 に示す通りである。試験体の形状および寸法は図-1 に示すものを用いた。

練混ぜは、粗骨材、細骨材、セメントの順番にミキサーに投入し、1 分間の空練り後、水を投入し、さらに 2 分間練混ぜした後、所定の型枠に打設した。

非貫通ひびわれの導入方法は、試験体打設の際にステンレス板を設置し、1 昼夜散水養生し

た後、ステンレス板を試験体から引き抜く方法で所定のひびわれ幅、深さの人工ひびわれを導入した。その後、脱型し、3 週間水中養生を行い、1 週間恒温室に放置後、透水試験を実施した。なお、導入したひびわれが所定の寸法になっていることを確認するために、コンタクトゲージを試験体に設置し、試験直前までひびわれの寸法を確認した。

表-1 コンクリートの示方配合

設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
24.5	25	14.5	4.5	55	47.0	153	279	887	1024	0.658

表-2 材料諸元

セメント	高炉セメント B 種 (スラグ 55%置換、密度 3.02g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	陸砂 (密度 2.64g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 2.07%) 砕砂 (密度 2.66g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.88%)
粗骨材	砕石 (密度 2.70g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.35%)
混和材	AE 減水剤 (単位セメント量×0.2%) vol.

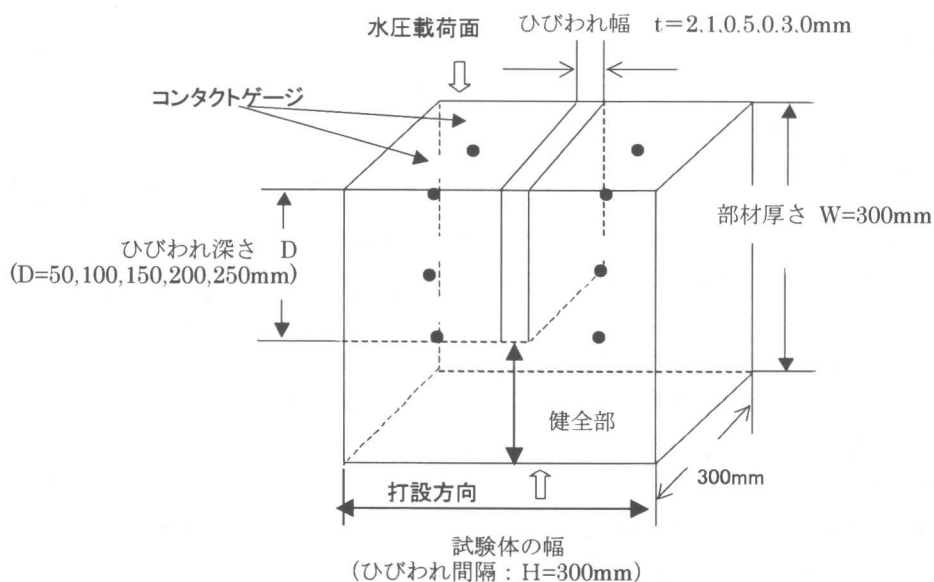


図-1 試験体形状寸法

## 2.2 試験方法

試験はアウトプット法により実施した。透水係数の算定にあたっては、加圧時間を2～3週間とし、流出量が一定になるのを確認した上で式(1)で算定した。

$$K = (W/P) \times (Q/A) \quad (1)$$

ここで、K：透水係数 (cm/sec)，P：水圧 (kgf/cm<sup>2</sup>)，Q：流出量 (cc/sec)，W：試験体厚さ (cm)，A：試験体断面積 (cm<sup>2</sup>)，水の単位容積重量 (kgf/cm<sup>3</sup>)

## 2.3 試験結果

図-2 にひびわれ深さと透水係数の関係を示す。この結果から、ひびわれ深さ0～200mm、ひびわれ幅0.3～2mmでは、透水係数の変化にあまり影響を及ぼさないことがわかった。

一方、図-2 に示したようにひびわれ深さが250mmに、すなわち健全部が50mmになると透水係数が急激に増加する。理由としては、以下の項目が考えられる。

- ① 試験体製造・水圧に伴う原因
- ② 試験体設置に伴う原因
- ③ 試験体の不均一性に伴う原因

これらのうち①、②については、試験中、および終了後の試験体割裂によって、水圧の荷重によるひびわれ先端からのひびわれ発生、および所定の荷重断面以外の水の周りこみがないことを確認した。③については粗骨材最大寸法が

25mmのため、骨材周辺の遷移帯、および粗骨材分布形態等の影響が出ていることは十分考えられる。

そのため、実験データの変動幅(変動係数：60～80%)を考慮し、実験データを用いた統計処理(母集団20～10)も別途実施して、標準偏差を超えるデータを削除した平均値を求めた。また、図-1で示した人工的に導入したひびわれ下方の健全部(流路長)のみを対象とした透水試験、すなわち断面寸法を同一にし、試験体厚さを健全部に合わせた試験を別途実施し、図-2で得られた透水試験結果に対するデータの比較検討を実施した。その結果を表-3に示す。

表-3には、実験値(統計処理なし)と統計処理を実施した透水係数の平均値も同時に示した。

表に示したように、健全部の厚さのみを再現した試験体の透水係数と、統計処理を実施して標準偏差を越えるデータを削除した平均値とは比較的一致する傾向が見られる。

この結果から、非貫通ひびわれを有するコンクリートの透水係数は健全部で支配されていると考えた。この健全部および統計処理後の透水係数と実験で得られた透水係数の平均値の比較を図-3に示す。

これらのことから、非貫通ひびわれの透水係数は、今回の試験で導入したひびわれの範囲で

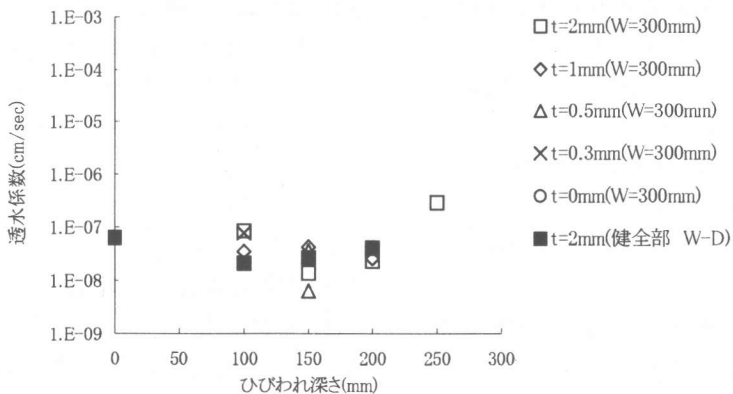


図-2 非貫通ひびわれの透水試験結果

は、ひびわれ幅に関係なく、健全部の厚さによってその透水係数は支配されていると判断した。しかし、健全部の厚さに対する粗骨材最大寸法の影響があることから、ひびわれ深さによっては、透水係数へ影響を与えることが確認された。

表-3 流路長を健全部のみとした場合の透水係数  
(単位:  $10^{-8}$ cm/sec)

健全部深さ (cm)	20	15	10
健全部のみ の試験体の 透水係数	2.08	2.65	4.11
ひびわれ試験体 (統計 処理後)	3.73	3.41	4.32
ひびわれ試験体 (実験 値)	6.16	5.12	5.17

### 3. 非貫通ひびわれを有するコンクリート試験体の透水係数算定式の高度化に関する考察

#### 3.1 高度化の方法

(1) 透水試験結果と既往算定式<sup>1)</sup>との検証

1) 既往算定式における課題点<sup>1)</sup>

前報<sup>1)</sup>で示した既往算定式は、試験体の幅 H (ひびわれ間隔) と D/W より透水係数比 (K/K<sub>0</sub>) が決まり、ひびわれのない状態での透水係数を把握していれば、ひびわれの進行程度 (深さ) を明らかにすることにより、その透水係数が計算できるというものである。すなわち、透水係数 K を、ひびわれ間隔: H(cm)、ひびわれ深さ: D(cm)、部材厚 (試験体厚さ): W をパラメータとし、ひびわれが無い場合 (D=0) における透水係数 K<sub>0</sub> との比 (K/K<sub>0</sub>) で表現した。一方、前報<sup>1)</sup>で、既往算定式は、D/W が 0.7 程度以下であれば、試験と計算値がほぼ一致するが、D/W が 0.7 以上 (ひびわれ深さが大きい) ものに対しては、実験結果を表現できていないことが確認され、既往算定式を高度化する必要性を示した。

その原因として、既往の算定式は D/W に対してのみ正規化を行い導出<sup>3)</sup>したものである。そこで、本検討では、さらに①試験体の幅、い

凡例 ▲: 健全部のみ  
の試験体の透水係数  
□: ひびわれ試験体 (統計処理後) の透水係数  
◇: ひびわれ試験体 (実験値) の透水係数

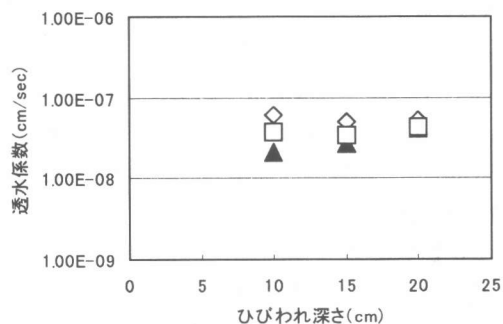


図-3 実験値と統計処理後および健全部の透水係数の比較

わゆるひびわれ間隔についても H/W (ひびわれ間隔と部材厚さの比) で正規化を行うことと、②ひびわれ深さ D に対しても、健全度部分の深さと部材厚さ (試験体厚さ) との比 (W-D) / W を用いて正規化を行い、回帰式を求めることとした。回帰式は式 (2) に示すような双曲線式を用いて、透水係数比 K/K<sub>0</sub> との関係を求めることとした。

$$\frac{K}{K_0} = \frac{m_1 + (m_2 \times \frac{W-D}{W})}{m_3 + m_4 \times \frac{W-D}{W}} \dots \dots (2) \text{式}$$

ここで、m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub>, m<sub>3</sub>, m<sub>4</sub>: 回帰係数

回帰係数を算定する上で用いるデータは、前報と同様な方法<sup>1)</sup>で検討した。

すなわち、2次元有限要素法による浸透流解析を行い、実験値と整合性のあることを確認した上で、その解析方法を用いて部材厚、ひびわれ深さ・間隔をパラメータとした浸透流解析を行って、回帰係数を算定するデータをセットする方法である。

#### 3.2 解析と実験値との検証

(1) 解析条件

前報<sup>1)</sup>で実験値と検証した浸透流解析を行い、回帰係数を算定する上で、必要なデータセット

を行った。

今回新たに設定した解析条件は表-4 の通りである。解析に当たっての、透水係数および水頭は以下のように仮定した。

透水係数： $k=k_x=k_y=1 \times 10^{-8}(\text{cm}/\text{sec})$

水頭： $P=10(\text{m})$

表-4 浸透流量解析条件

試験体 厚さ W(cm)	ひびわれ深さ D(cm)	ひびわれ間隔 H(cm)	
		30	
30	0	○	
	5	○	
	10	○	
	15	○	
	20	○	
	25	○	

(2) 解析モデル<sup>1)</sup>

解析モデルは導入したひびわれを中心とした軸対象モデル（平面 2 次元モデル）とした。

(3) 解析結果

表-5 に透水係数比換算結果と実験値を示す。

表-5 より浸透流解析による透水係数値は、ほぼ

実験結果と一致していることがわかる。

そのため、本検討で用いた浸透流解析は、回帰係数データセットのための手法の一つとして有効であるとした。

表-5 解析結果による透水係数比  $K/K_0$ <sup>3)</sup>

試験体厚さ W(cm)	ひびわれ深さ D(cm)	透水係数比 $K/K_0$ ( ) 内は実験値
30	0	1.00
	5	1.05
	10	1.19 (1.28)
	15	1.44 (1.17)
	20	1.86 (1.57)
	25	2.72 (6.00)

3.3 非貫通ひびわれ透水係数算定式の高度化

式(2)の回帰係数を算定するために、3.2 で実施した浸透流解析を下記に示すパラメータを用いて、解析上で  $K/K_0$  を算定し、各回帰係数を導出した。

①部材厚さ W(cm)：50,46,42,30,20

表-6 回帰結果

W	D	H	(W-D)/W	H/W	解析 $K/K_0$	回帰 $K/K_0$	m1	m2	m3	m4	R <sup>2</sup>
50	40	10	0.20	0.20	4.30	4.30	1.71	0.08	0.05	1.78	1.00
	30		0.40		2.31	2.30					
	20		0.60		1.58	1.58					
	10		0.80		1.20	1.21					
	5		0.90		1.07	1.08					
	0		1.00		1.00	0.98					
46	40	10	0.13	0.21	6.04	6.04	1.68	0.07	0.06	1.73	1.00
	30		0.35		2.61	2.60					
	20		0.57		1.66	1.67					
	10		0.78		1.22	1.23					
	5		0.89		1.08	1.09					
	0		1.00		1.00	0.98					
42	40	10	0.05	0.24	11.5	11.5	2.08	0.06	0.08	2.11	1.00
	30		0.29		3.08	3.07					
	20		0.52		1.78	1.78					
	10		0.76		1.25	1.26					
	5		0.88		1.09	1.10					
	0		1.00		1.00	0.98					
30	40	10	0.17	0.33	4.37	4.37	1.70	0.15	0.09	1.81	1.00
	30		0.33		2.53	2.52					
	20		0.50		1.78	1.78					
	10		0.67		1.37	1.39					
	5		0.83		1.12	1.14					
	0		1.00		1.00	0.97					

②ひびわれ深さ D(cm) : 0,5,10,20,30,40

③ひびわれ間隔 H(cm) : 10

その結果を表-6 に示す。

表-7 に回帰結果と、既往算定式との残差集計結果、および新算定式を示す。

また、図-4 に実験値と各算定式による透水係数比算定結果を示す。

その結果、表-7 中の式(2)の残差は小さくなっており、既往の算定式よりも精度よく評価できるものと考えられる。

したがって、新たに式(2)を非貫通ひびわれを有するコンクリート試験体の透水係数算定式として提案することとした。

#### 4. まとめ

非貫通ひびわれを有するコンクリート試験体の透水係数算定式の高度化の検討を実施した。

透水試験で得られる透水係数は、バラツキが大きく、いわゆる試験値に対する妥当な変動係数が従来の知見でも明らかにされていない。本報告で実施した非貫通ひびわれ試験体でもバラツキがあるため、実験で得られたデータに基づく統計処理、およびひびわれ先端部からの健全部に支配されていることを検討し、新算定式を提案した。

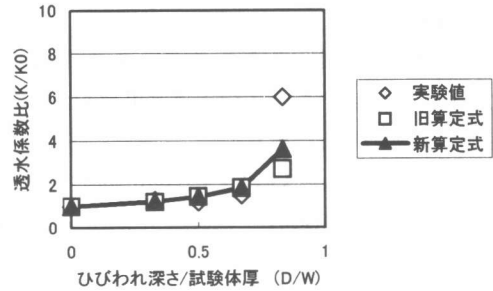


図-4 算定式の比較結果

#### 5. 今後の課題

さらに実験データを蓄積し、透水係数の統計処理に対する精度を向上させるとともに算定式の高度化を図る。

#### 参考文献

- 1) 名倉健二, 広永道彦, 遠藤孝夫, 小野定: 非貫通ひびわれを有するコンクリートの水密性評価に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, 1997.
- 2) 六ヶ所村低レベル放射性廃棄物埋設センター その概要と安全性について: 日本原燃(株)
- 3) 広永道彦, 名倉健二, 遠藤孝夫他: 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, No. 502/V-25, pp63-72. 1994. 11

表-7 新提案式の回帰結果と残差集計結果

透水係数評価式		【新算定式】
K/K <sub>0</sub>		$\frac{m_1 + (m_2 \times \frac{W - D}{W})}{m_3 + m_4 \frac{W - D}{W}}$
回帰結果	平均	$m_1 = 1.869 - 0.355 \times \frac{H}{W}$
	最大	$m_2 = -0.066 + 0.884 \times \frac{H}{W}$
	標準偏差	$m_3 = (-884 + 11842 \times \frac{H}{W}) / (21786 + 28707 \times \frac{H}{W})$
	標準偏差	$m_4 = 1.787 + 0.425 \times \frac{H}{W}$
残差	平均	0.01 (0.26 : 旧算定式)
	最大	0.40 (9.87 : 旧算定式)
	標準偏差	0.07 (1.68 : 旧算定式)

【旧算定式】

$$\frac{D/W}{(0.0793H + 0.5672) - (0.0831H + 0.5240) \cdot D/W} + 1$$