

研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	地震や断層変位で損傷した地中 RC 構造物の貯水性能評価法の高度化
研究者名※	小松 怜史
所属組織※	横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 准教授
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

（ ）は、報告書提出時所属先。

大林財団 2022 年度研究助成実施報告書

所属機関名 横浜国立大学
申請者氏名 小松 怜史

研究課題 地震や断層変位で損傷した地中 RC 構造物の貯水性能評価法の高度化

(概要) ※最大 10 行まで

地震や断層変位で損傷を受けた原子力発電所屋外重要土木構造物（地中 RC 構造物）の要求性能の一つとして、貯水性能が挙げられる。貯水機能として原子炉冷却水の漏水が懸念される場合、コンクリート構造物のひび割れ幅より透水係数を想定することで、漏水量を評価する。しかし、漏水量やひび割れ幅を構造解析より直接的に算出することが難しいため、ひび割れ幅と相関のあるひずみ指標（ $\sqrt{J_2}$ ）で照査するが、照査箇所が不明瞭であること、そもそもひずみ指標で良いのか、実規模レベルの実験での検証が不十分など、合理的な照査手法の確立には至っていない。

そこで、本研究ではまず、当該構造物の実規模部分模型 RC 試験体（500mm, 1000mm）を製作し、ひび割れ部からの漏水現象の解明を行った。その結果、ひび割れ幅 0.2mm の時は既往の研究で想定される透水性を示すことが分かった。一方で、ひび割れ幅が大きい場合のデータを蓄積する必要性が確認された。

1. 研究の目的

地震により損傷を受けた原子力発電所屋外重要土木構造物（地中 RC 製ボックスカルバート、図-1）の貯水性能評価法高度化のため、本研究では当該構造物の部分模型 RC 試験体を製作し、ひび割れ部における漏水現象の解明を行う。

1/4 縮小ボックスカルバートの載荷実験から、（表面）ひび割れ幅と損傷指標の関係性を見出し、貯水性能照査の限界値として、ひび割れ幅 0.2mm 以下では $\sqrt{J_2}$ を

1000 μ 、0.8mm を 5000 μ と定めた。しかし、限られた実験条件での結果であり、論理的かつ合理的な照査法とは言い難い現状にある。

福島第一原子力発電所の事故を教訓に、屋外重要土木構造物の要求性能の一つである貯水機能を被災後も維持することは必須である。現在の貯水性能評価は非常に保守的で、他の性能（耐荷性など）より先に貯水性能で決まってしまう場合がある。合理的な設計手法の構築に向け、本成果は標準的な設計法を構築する上での基礎データになると考えている。

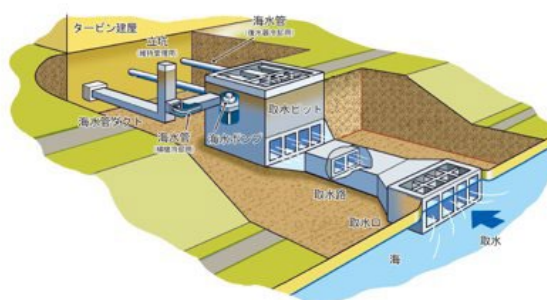


図-1 原子力発電所屋外重要土木構造物のイメージ

2. 研究の経過

■試験体の概要

作製した試験体の概要図を図-2 に示す。試験体は $500 \times 400 \times 100\text{mm}$ と $1000 \times 400 \times 100\text{mm}$ の 2 種類とし、曲げによりひび割れ導入を誘発させるために試験体中央・上下に誘発目地（ $\nabla 20 \times 10\text{mm}$ ）を設けた。また、実構造物を模擬し、両側（下図で上下側）に D13 の異形鉄筋を配置させた。試験ケースの一覧を表-1 に示す。ひび割れの違いによる水の移動を把握するため、ひび割れ幅を 3 ケース設け、試験ケースごとに各 1 体試験体を作製した。

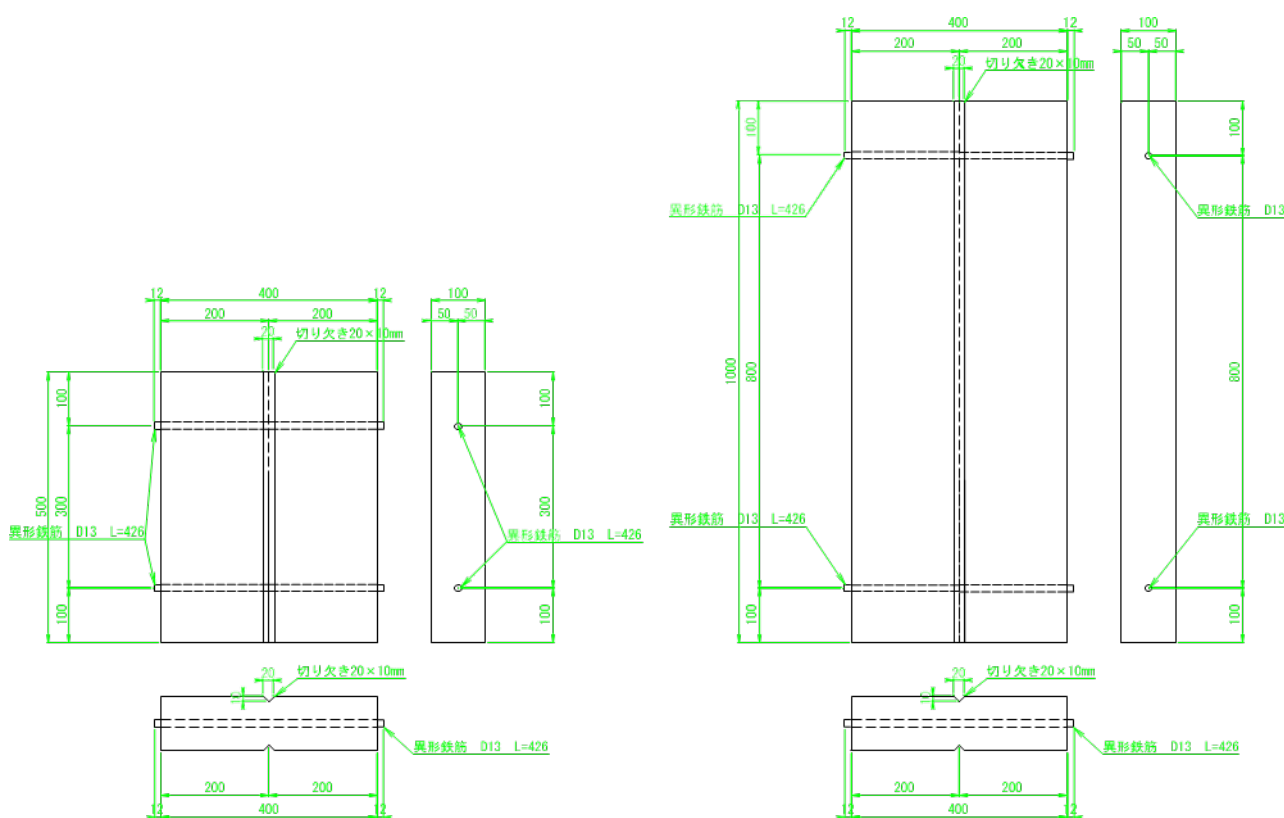


図-2 製作した試験体の寸法

（左図：試験体 $500 \times 400 \times 100\text{mm}$ 右図： $1000 \times 400 \times 100\text{mm}$ ）

表-1 製作した試験体一覧

項目	ひび割れ幅	数量（体）	
		$500 \times 400 \times 100\text{mm}$	$1000 \times 400 \times 100\text{mm}$
試験体作製	0.2mm	1	1
	0.8mm	1	1
	2.0mm	1	
計		3	2

■使用材料およびコンクリート配合

本実験では普通 27-12-20H の早強セメントを用いたレディーミクストコンクリートを使用した。当日のフレッシュ試験の結果を表-2 に示す。

表-2 フレッシュ試験の計測結果

スラブ° (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	14 d 強度 (N/mm ²)
12.0	5.4	11.3	35.9

■曲げひび割れの導入

曲げひび割れ導入のイメージを図-3 に示す。透水試験実施の為、試験体にあらかじめ 0.2mm、0.8mm、2.0mm のひび割れを導入する。ひび割れは曲げ荷重により発生させ、誘発目地に沿って発生させる。ひび割れは上下（表裏）面から、それぞれ載荷して曲げひび割れを誘発し、貫通ひび割れを発生させた。ひび割れ幅はパイゲージを用いてモニタリングしながら、適切なひび割れ幅を保持する様に荷重を調整した。

曲げひび割れ導入後、透水試験時に側面からの水漏れを防止するため、切り欠き部をエポキシ樹脂によりシーリングを行った。図-4 に示す通り、シーリングの変形防止のためのポリアセタール丸棒を設置し、速硬化型エポキシ樹脂系接着剤により丸棒の固定とひび割れ部からの浸透防止(止水)の処理を行った。その後、土木建築用に使用する強度と浸透性の高いエポキシ樹脂系接着剤でシーリングを行った。

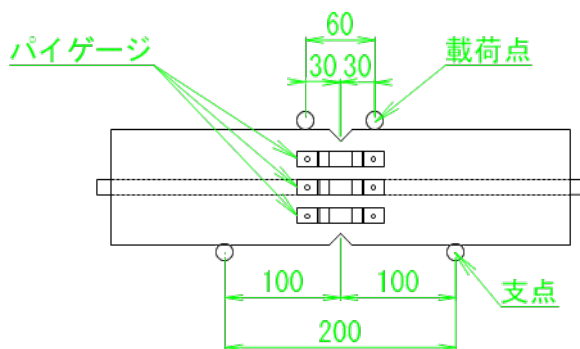


図-3 ひび割れ導入の様子

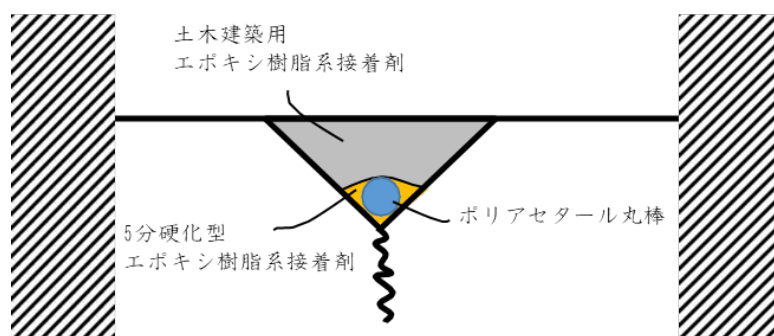


図-4 側面シーリングのイメージ図

■ 透水試験

透水試験装置の写真-1, 2 に示す。試験ではひび割れ導入上面からアタッチメントを設置し、0.1MPa の圧力（水頭 10m 相当）で水を浸透させた。試験時間は 60 分間とし、ひび割れ導入下面から流れた透水質量を一定間隔で記録した。



写真-1 透水試験装置(タンク部)

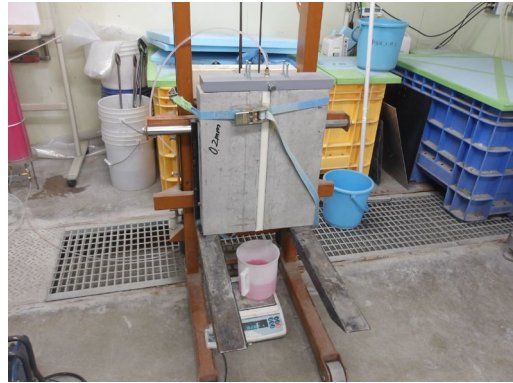


写真-2 透水試験装置(測定部)

3. 研究の成果

■ 透水量の結果

図-5～8 にひび割れ幅および試験体長さの異なる試験体の透水時間(min)と累計透水量(kg)の関係を示す。計測期間にわたって、累積透水量が一定の割合で増加することが分かった。

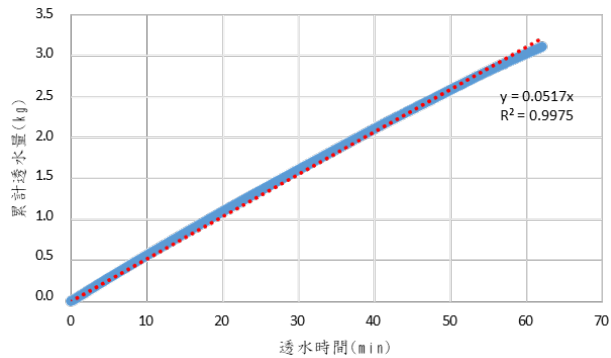


図-5 透水時間と累計透水量の関係
(500mm ひび割れ幅 0.2mm)

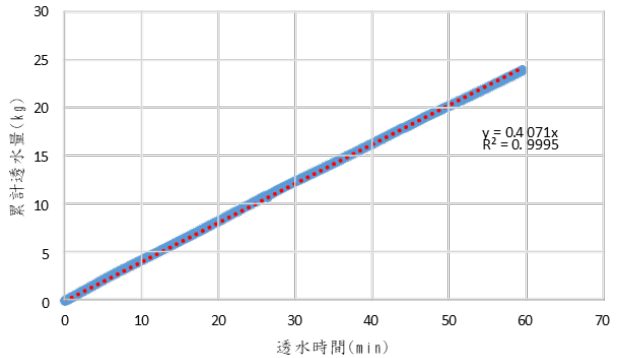


図-6 透水時間と累計透水量の関係
(500mm ひび割れ幅 0.8mm)

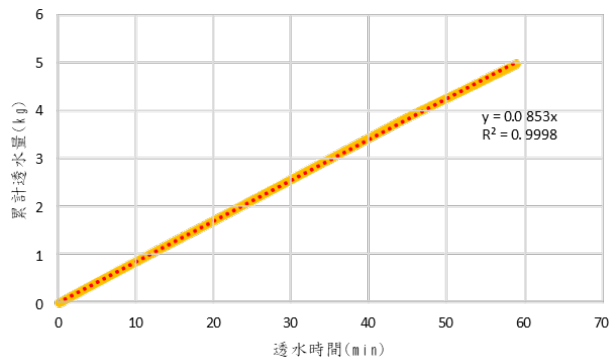


図-7 透水時間と累計透水量の関係

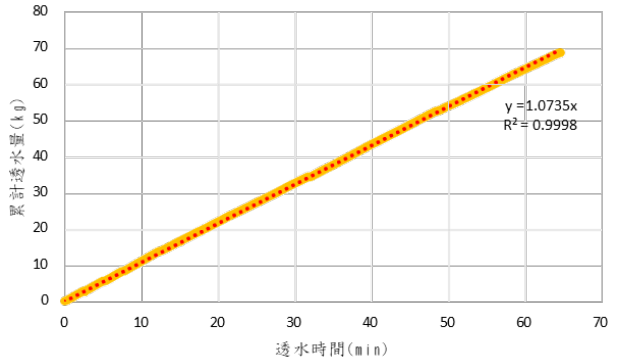


図-8 透水時間と累計透水量の関係

(1000mm ひび割れ幅 0.2mm)

(1000mm ひび割れ幅 0.8mm)

単位時間あたりの透水量の比較を図-9 に、単位時間あたりの透水量の一覧を表 -3 に示す。単位時間あたりの透水量は 500mm の試験体よりも 1000mm の試験体の方が大きくなる傾向にあった。ひび割れ幅が 2.0mm の 0.8mm よりも単位時間当たりの透水量が小さくなった。シーリング時にひび割れ部に樹脂が浸透した可能性があり、分析を進める予定である。

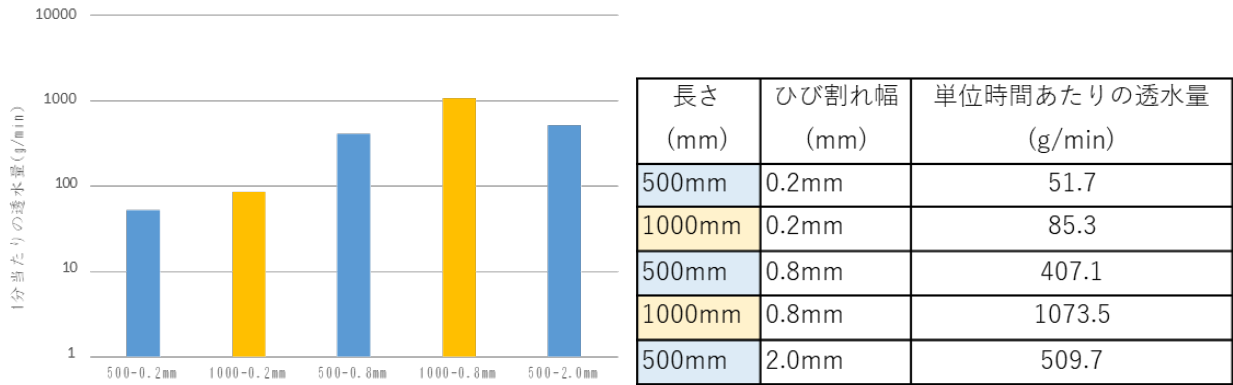


図-9 単位時間当たりの透水量の比較

■評価

並行平板を通過する水の流れはハーゲンポアズイユの流れが適用できる。しかし、ひび割れ面は並行平板ではないため、水の流れが層流であると仮定すると、ポアズイユ流れにひび割れ面の粗さを考慮した補正係数 c を取り入れた次式（1）で近似できるという研究¹⁾がある。

$$Q = c \frac{P}{12\mu L} w^3 \quad \dots (1)$$

ただし、 Q :透水量 ($\text{cm}^3/\text{cm}/\text{sec}$)、 w :ひび割れ幅 (mm)、 c :補正係数、 μ :水の粘性係数 (Ns/cm^2)、 P :水圧 (N/cm^2)、 L :厚さあるいは試験体長さ (cm) である。

本実験²⁾を過去の実験群にプロットしたのが、図-10 となる。ひび割れ幅 0.2mm のケースは既往の文献同様、おおよそ本式が適用できることが改めて確認された。

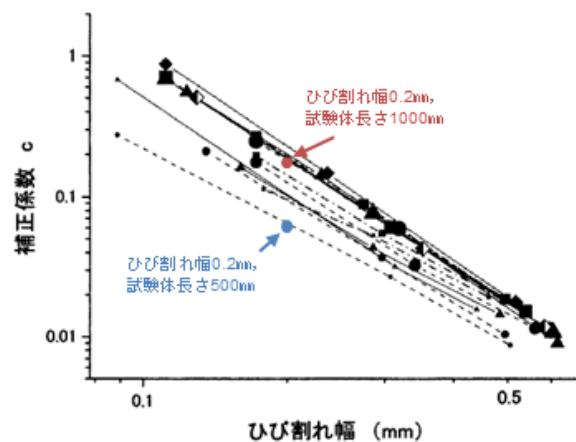


図-10 ひび割れ幅と補正係数の関係²⁾

しかし、ひび割れ幅 0.8mm および 2.0mm のケースは、本図の範囲外の値となる。現状では、ひび割れ粗さを考慮した補正係数は実験を試みないとわからない。損傷指標と補正係数そして透水量を結び付けるためにも、ひび割れ内部の損傷状況を定量的に評価していくことが必要であると考えている。

本文中の参考文献：

- 1) 壱岐直之ほか：沈埋トンネル側壁のひびわれからの漏水と自癒効果の確認実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.737-742，1995.7
- 2) 早野博幸ほか：ひび割れ面の粗さがコンクリートの水密性に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第 615 号，pp.23-30，2007.5

4. 今後の課題

- ・ 本実験で用いた試験体の内部ひび割れ性状の分析
- ・ ひび割れ幅が大きい，試験体長さの長い試験体の透水データの蓄積
- ・ 損傷指標と補正係数の関係性の提案