

論文 コンクリートのひび割れからの漏水挙動と超音波法による貫通ひび割れ評価に関する検討

小佐野 依美*1・大野 健太郎*2・上野 敦*3・鎌田 知久*4

要旨：筆者らは、超音波法によりコンクリートのひび割れからの漏水量推定を検討した結果、漏水量の変化と超音波伝搬挙動の変化が対応し、漏水量評価の可能性を見出した。本研究では、水の流下方向にひび割れ幅を変えた供試体を作製し、同様の検討を行った。その結果、ひび割れ幅が流下方向で異なる場合は、漏水速度が流下方向の最小ひび割れ幅に依存することが確認された。さらに漏水有無の判断として、対象ひび割れの貫通の有無が重要となるため、貫通ひび割れの評価を超音波法により検討した。その結果、伝搬時間差法 ($T_c - T_0$ 法) では、ひび割れの貫通有無の推定はできず、ひび割れ深さを過小評価する可能性が示唆された。

キーワード：コンクリート、ひび割れ幅、ひび割れ深さ、貫通ひび割れ、漏水、超音波法

1. はじめに

コンクリート構造物に対する要求性能に影響を及ぼす要因の一つとしてひび割れがあり、これはコンクリート構造物の変状のうち、最も頻度の高い変状である。特に、配水池、貯水池、タンク等の水密性が要求されるコンクリート構造物では、ひび割れが漏水の直接的な要因となる。これらの構造物において、適切な材料選定、施工、維持管理が実施されない場合、コンクリートにひび割れが発生し、最終的には漏水などの変状が生じることで要求性能を満たすことができなくなり、補修などの対策が必要となる。

ここで、コンクリートのひび割れからの漏水は、通水部分を凹凸のある平行平板と仮定したポアズイユ流れに関する式を基本とし、ひび割れ幅が直接的かつ最も大きな影響を及ぼす¹⁾。防水性・水密性の許容ひび割れ幅について、これまで数多くの研究が実施されてきたが²⁾、常時水圧下における漏水挙動は非常に複雑である。現状では、常時水圧下においてひび割れ幅 0.05mm 付近が漏水に関する制限値として概ね妥当と考えられている³⁾。これは、ひび割れ幅が 0.05mm 以下では漏水量が著しく低下する実験結果に基づいていると考えられるが、コンクリートの厚さが増加するにつれ限界ひび割れ幅が 0.15mm 程度に大きくなると報告されている⁴⁾。いずれにしても、コンクリートのひび割れからの漏水は、対象となるひび割れの貫通有無が判断指標となる。ところが、コンクリートに生じているひび割れに対し、貫通を明確に判断できる試験方法は定まっていない現状にある。さらに、ひび割れ中を水が流下する場合において、流下方向にひび割れ幅が異なる場合（凹凸を有する平行平板で

ないひび割れの場合）、表面に生じているひび割れ幅により漏水量を推定すれば、過小または過大評価する可能性が考えられるため、ひび割れ内部の情報も考慮した漏水評価が必要であると考えられる。

以上の背景から、筆者らの既往の検討³⁾では、コンクリートのひび割れ深さが推定可能とされている超音波法に着目し、コンクリートの貫通ひび割れを対象とした超音波法による漏水規模（量）推定について検討した。その結果、ひび割れ幅 0.18mm を境に、漏水挙動と超音波伝搬挙動が変化することが確認され、超音波法によりひび割れからの漏水規模を評価できる可能性が示唆された。ここで、既往の検討³⁾では、円筒形のコンクリート供試体に、割裂にてひび割れを導入し、このひび割れを平行平板に見立てることで漏水試験を実施したが、平行平板でないひび割れへの適用性、および貫通ひび割れの評価試験方法については未検討であった。したがって、本研究では、ひび割れ幅が一定でない（凹凸を有する平行平板でない）ひび割れをコンクリート供試体を導入し、漏水挙動の把握を行った。併せて、超音波法によるひび割れの貫通有無の推定について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体の概要を図-1 に示す。供試体は厚さを 75mm（以下、H75 と称す）と 150mm（以下、H150 と称す）の 2 水準とし、外径 266mm、内径 250mm の塩ビ管（VU パイプ）内にコンクリートを打ち込んで作製した。なお、本実験ではコンクリートの打込み面を上面、型枠底面を下面と称する。コンクリートの使用材料および計画配合

*1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域(学生会員)

*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 准教授 博士（工学）(正会員)

*3 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 准教授 博士（工学）(正会員)

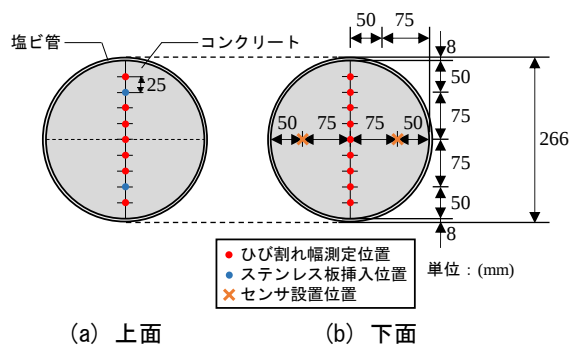
*4 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 助教 博士（工学）(正会員)

表－1 コンクリートの使用材料

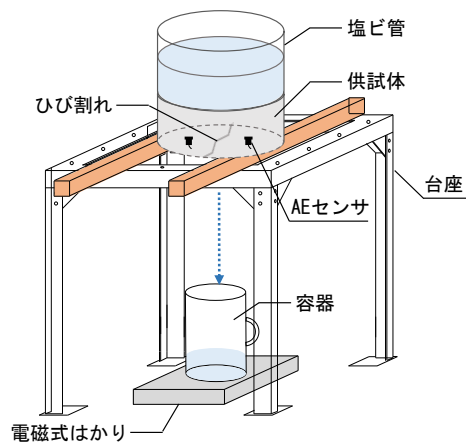
材料	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm ³ ）
細骨材	S	相模原市産砕砂（表乾密度：2.57g/cm ³ ，実積率：66.7%，粗粒率：3.12，吸水率：2.14%）
粗骨材	G	相模原市産砕石（表乾密度：2.59g/cm ³ ，実積率：58.8%，粗粒率：6.76，吸水率：1.60%）
混和剤	Ad	AE減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体）
	-	AE助剤（アルキルアリルスルホン酸化合物系および陰イオン界面活性剤）

表－2 コンクリートの計画配合

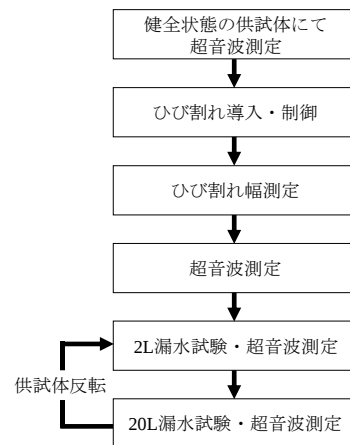
Gmax (mm)	Sl (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Ad
					W	C	S	G	
20	8	55	4.5	47.7	172	313	838	926	1.409



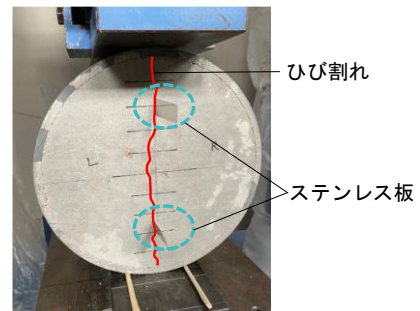
図－1 供試体概要



図－3 測定装置概要



図－2 実験手順



写真－1 供試体へのひび割れ導入

を表－1，表－2 にそれぞれ示す。また，材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度は，35.6N/mm²，弾性係数は 26.1kN/mm²であった。

2.2 実験手順

実験手順を図－2 に示す。初めに，ひび割れを導入する前の健全状態の供試体にて超音波測定を行い，その後写真－1 に示すように耐圧試験機にて供試体を割裂し，供試体中央に貫通ひび割れを導入した。さらに上面からステンレス板を挿入することにより，上下面でひび割れ幅の異なる供試体を作製した。なお，供試体外側の塩ビ

管はコンクリートが割裂により完全に分離するのを阻止する役目を担っている。ここで，上下面のひび割れ幅を測定した後に供試体上面を貯水側として，図－3 に示す台座に設置した。その後，供試体上面に貯水用の塩ビ管を設置し，貯水量を 2L および 20L として，漏水試験と同時に超音波測定を実施した。次に，20L の漏水試験および超音波測定の後，供試体を上下反転させ，2L および 20L の漏水試験および超音波測定を再度行った。供試体数は，供試体厚さごとにステンレス板を挿入していないものを 1 体，ステンレス板を挿入することにより上下面

でひび割れ幅を変えた供試体を2体とし、計6体の供試体にて実験した。各測定の詳細を以下に示す。

(1) ひび割れ幅の測定

ひび割れ幅の測定は、図-1 に示したように、供試体の上面および下面にて、25mm 間隔で計9箇所ひび割れ幅を、最小目盛り0.05mmのクラックスケールにて目視で読み取り、9箇所の平均値を各測定面の測定値として用いた。なお、測定開始時に上面となる測定面にはステンレス板を2箇所挿入しているため、ステンレス板の挿入位置でない7箇所のひび割れ幅を測定し、平均値を得た。

(2) 漏水試験

供試体上部に設置した塩ビ管に水を入れ、供試体へ導入した貫通ひび割れ内を通過し、漏水した水を分解能0.1gの電磁式はかりにて10分間計測した。供試体上面の貯水量は2L、20Lの2水準とした。なお、本研究ではここで取得した水量を漏水量と定義した。また、各漏水試験開始時に設定した貯水量は、試験開始後補充することなく測定を行った。また、漏水試験を行うにあたり、ひび割れ内の含水状態を同条件にするため、2Lの水を5分間通水させた後、漏水試験を行った。

(3) 超音波測定

超音波の測定は、ファンクションジェネレータにて振幅15V、継続時間10μsの矩形波をAEセンサ(60kHz共振型)に作用させることで供試体に超音波を入力した。コンクリート中を伝搬した超音波を出力点に設置したAEセンサ(60kHz共振型)にて検出し、プリアンプにて60dB増幅した後サンプリング数10000個、サンプリング時間間隔0.1μsとして記録した。超音波は漏水試験中に、2秒間隔で10分間継続して測定した。センサ設置位置は、図-1(b)に示すようにひび割れ導入位置と直交させ、ひび割れ開口位置から左右に75mmの位置とした。

3. 実験結果および考察

実験結果の凡例で示す略称は、供試体厚さ-上面ひび割れ幅(ステンレス板側)-下面ひび割れ幅-貯水量-漏水試験時の下流面とする。なお、漏水試験時の下流面について、ステンレス板がある場合をW、その反対側をNとして示す。

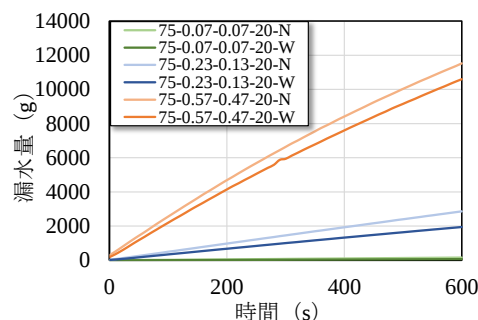
3.1 ひび割れ幅

表-3に6供試体のひび割れ幅の測定結果を示す。ステンレス板を挿入していない供試体では、ひび割れ幅が上下面で概ね同程度の値となった。これに対し、ステンレス板を挿入した供試体では、各供試体での上下面のひび割れ幅はH75では0.1mm程度、H150では0.25mm程度の差となり、上下面で異なるひび割れ幅を有する供試体を作製することができた。

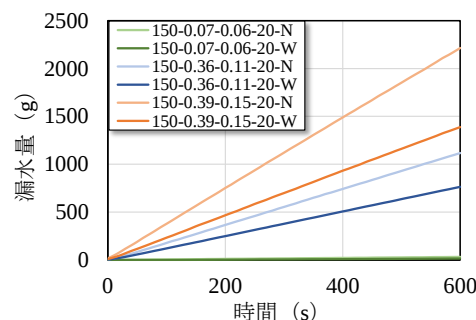
表-3 ひび割れ幅測定結果

供試体厚さ (mm)	上面ひび割れ幅 (mm)	下面ひび割れ幅 (mm)
75	0.07*	0.07*
	0.23	0.13
	0.57	0.47
150	0.07*	0.06*
	0.36	0.11
	0.39	0.15

*ステンレス板なし

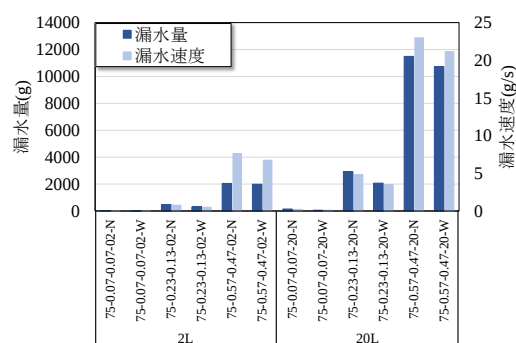


(a) H75

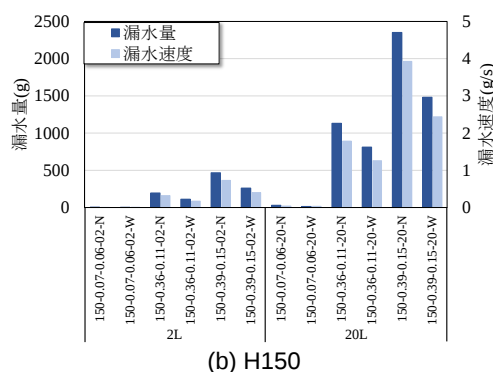


(b) H150

図-4 漏水量の経時変化(貯水量20L)

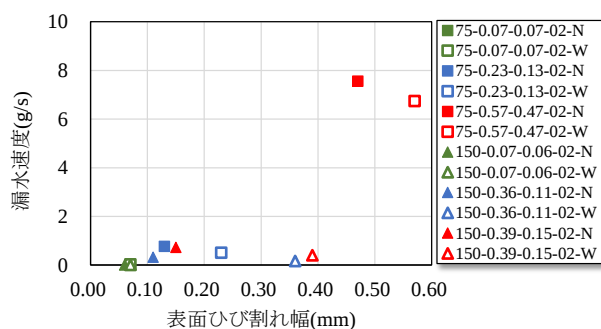


(a) H75

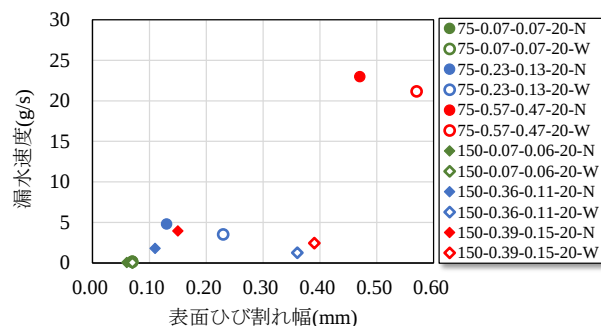


(b) H150

図-5 10分間の漏水量および漏水速度

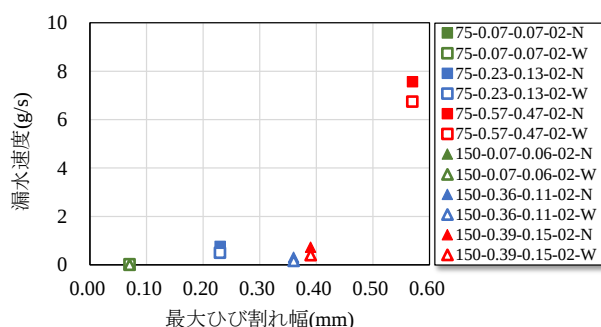


(a) 貯水量 2L

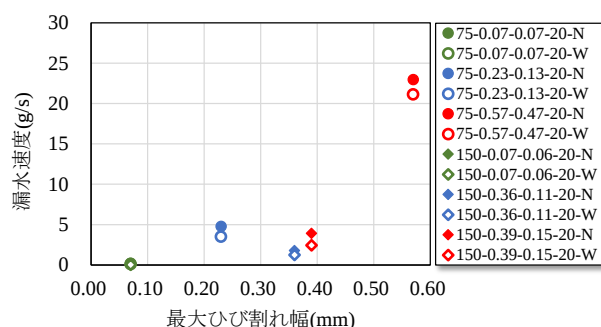


(b) 貯水量 20L

図－6 漏水試験時の下流面のひび割れ幅（表面ひび割れ幅）と漏水速度

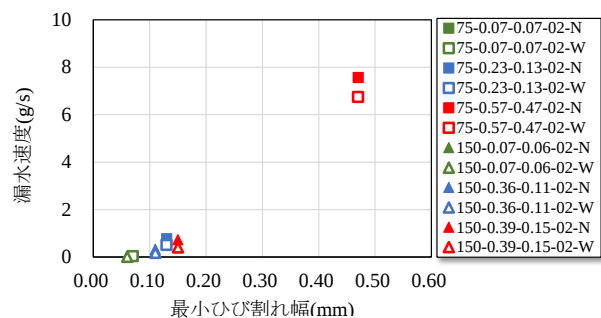


(a) 貯水量 2L

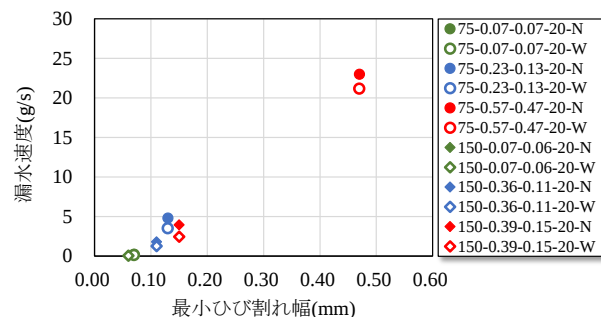


(b) 貯水量 20L

図－7 最大ひび割れ幅と漏水速度



(a) 貯水量 2L



(b) 貯水量 20L

図－8 最小ひび割れ幅と漏水速度

3.2 ひび割れ幅と漏水量の関係

図－4 に貯水量 20L での漏水試験時の漏水量の経時変化、図－5 に各供試体の 10 分間の漏水量および漏水速度を示す。図－4 より、75-0.57-0.47 の 2L と 20L の水準を除くと、経過時間に伴う漏水量の変化は概ね直線的な増加傾向を示した。75-0.57-0.47 の水準では、漏水量が多く、漏水量が多くなるにつれて貯水槽の水頭が減少し、水圧が経時的に低下した結果、漏水量の経時変化は直線性を示さなかったと考えられる。したがって、図－5 には水頭の経時変化の影響が比較的小さいと考えられる漏水し始めてから 60 秒間の傾きを漏水速度 (g/s) として表現した。漏水速度についても、各水準で比較した漏水量における大小関係と概ね同様の関係が得られた。また、貯水量 20L における漏水量および漏水速度は、貯水量 2L

と比較すると大きく、水頭による影響を受けていることがわかる。ここで、漏水試験時の下流面のひび割れ幅（表面ひび割れ幅）と漏水速度との関係を貯水量ごとに図－6 に示す。ひび割れ幅が 0mm～0.39mm の範囲では、漏水速度は表面ひび割れ幅の大小によらず、概ね一定の値を示し、それより大きいひび割れ幅では漏水速度が大きい二分した結果となった。さらに、この傾向には、貯水量（水頭）が影響を及ぼさないことがわかる。

ここで、上面および下面のひび割れ幅の測定値のうち、最大となるひび割れ幅（以下、最大ひび割れ幅と称す）、最小となるひび割れ幅（以下、最小ひび割れ幅と称す）と漏水速度との関係を検討した。ここで、貯水量ごとに最大ひび割れ幅と漏水速度の関係を図－7、最小ひび割れ幅と漏水速度の関係を図－8 に示す。図－7 より、表

面ひび割れ幅の結果と同様、ひび割れ幅が0mm～0.39mmの範囲では、漏水速度は表面ひび割れ幅の大小によらず、概ね一定の値を示し、それより大きいひび割れ幅では漏水速度が大きい二分した結果となった。図-8より、漏水速度はいずれの貯水量においても最小ひび割れ幅が0.1mm付近を境として、0.1mm以下ではほとんど漏水が生じず、0.1mm以上では漏水速度はひび割れ幅の増加に伴い増加傾向を示した。このことから、最小ひび割れ幅の0.1mm付近で漏水速度が大きくなる変曲点が存在することがわかる。この結果から、通水経路が平行平板でないひび割れにおいては、漏水速度は通水経路中の最小ひび割れ幅に依存している可能性が示された。

これらのことから、漏水速度あるいは漏水規模（量）は通水したひび割れの最小幅に依存し、最小ひび割れ幅を取得できればより詳細かつ精緻な漏水規模推定が可能と考えられる。しかしながら、コンクリート表面のひび割れ幅と内部ひび割れ幅は大きく異なっている場合があり⁴⁾、内部の最小ひび割れ幅を外観目視で捉えることは不可能である。ここで、コンクリートのひび割れからの漏水は、対象となるひび割れの貫通有無の判断が重要となる。つまり、貫通ひび割れの有無を判断し、その後、貫通ひび割れ内の最小ひび割れ幅の推定を行うことで、漏水規模推定の精度が向上すると考えられる。ところが、調査対象とするひび割れが貫通ひび割れであるかどうかを一面アクセスからの目視調査で推定することはできず、さらに、貫通ひび割れを明確に判断できる試験方法は現段階で示されていない。ここで、超音波法によれば、ひび割れ深さを推定可能とされているため⁵⁾、本研究ではひび割れの貫通の有無を超音波法にて検討することとした。

3.3 超音波速度による貫通ひび割れの評価

超音波速度による貫通ひび割れの評価は、超音波法により推定されたひび割れ深さが部材厚さと等しくなる、あるいは部材厚さよりも大きく推定される場合に貫通ひび割れの判断が可能となると考えられる。本研究では、ひび割れ深さ推定手法に T_c-T_0 法を用いた。 T_c-T_0 法によるひび割れ深さ推定式を式(1)に示す⁵⁾。また超音波の伝搬模式図を図-9に示す。

$$d = a \sqrt{\left(\frac{T_c}{T_0}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

ここで、 d ：ひび割れ深さ、 a ：ひび割れから探触子までの距離、 T_0 ：ひび割れを挟まないで探触子を設置した時の伝搬時間、 T_c ：ひび割れを挟んで探触子を設置した時の伝搬時間である。

本実験における供試体厚さ、ひび割れからセンサまで

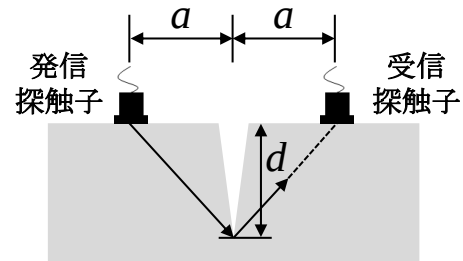


図-9 超音波伝搬模式図

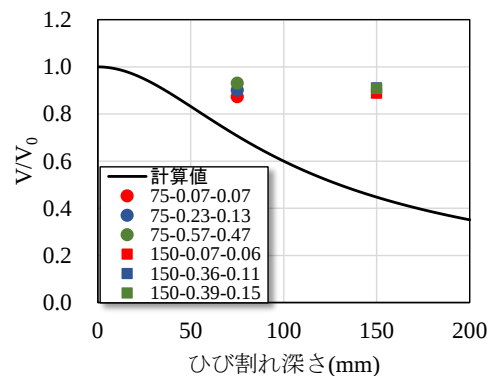


図-10 ひび割れ深さと V/V_0

の距離（センサ間距離の1/2）、健全供試体での伝搬時間を式(1)に示す d 、 a 、 T_0 にそれぞれ代入することで、 T_c の計算値を得た。これにより、ひび割れ深さ75mmおよび150mmに相当する場合の伝搬時間が算出可能となり、ひび割れ間が空気のみで満たされ、ひび割れ界面でコンクリート同士が接触していない場合は、この伝搬時間よりも早く到達することは無いと想定できる。このとき、センサ間距離150mmと計算上の伝搬時間から速度を算出し、貫通ひび割れ時の計算上の速度として表現した。

ここで、本検討では健全時の超音波速度 V_0 に対するひび割れを介した場合の超音波速度 V の比 V/V_0 を評価指標とすることで、ひび割れの貫通有無の検討を行った。図-10にひび割れ深さと V/V_0 の関係を示す。なお、凡例で示す略称は、供試体厚さ-上面ひび割れ幅（ステンレス板側）-下面ひび割れ幅とする。各ひび割れ深さの V/V_0 の計算値は T_c-T_0 法により算出した超音波速度 V および健全時の超音波速度 V_0 を用いて算出した。プロット点で示す V/V_0 については、各供試体におけるひび割れ導入後の超音波速度の実測値を健全供試体の超音波速度の実測値で除したものとした。図-10より、計算値の V/V_0 よりも各供試体において実測値から算出した V/V_0 の値が大きくなる結果となった。このことから、各供試体において実測値から算出した V/V_0 は、ひび割れ先端を回折する経路ではなく、ひび割れ内部のコンクリートの接地面を通過した可能性が考えられる。なお、塩ビ管を通過する経路を辿っていないことを計算により確認した。

ここで、図-10 より各供試体において実測値から算出した V/V_0 に、計算値の V/V_0 を対応させることによりひび割れ深さを推定した。これらの結果について、水がない場合とある場合に、推定されるひび割れ深さに及ぼす影響を確認するため、貯水量ごとに推定されるひび割れ深さを算出した結果を図-11 に示す。図-11 より、推定されるひび割れ深さは、貯水なしの場合には、供試体厚さより浅く推定される結果となり、H75 では 44～60%、H150 では 74～77%浅く評価された。また、貯水なしの場合と貯水量 2L、20L の場合の推定されるひび割れ深さの結果を比較すると、貯水がある場合には貯水なしの場合の結果よりも、H75 では 15～27%、H150 では 8～45%浅くなり、ひび割れ深さは貯水なしの場合よりもさらに過小評価された。これは、超音波がひび割れ内にある水を伝搬したことによるものであると考えられる。以上より、超音波の伝搬時間差によるひび割れ深さの推定は、ひび割れ深さが過小評価される可能性が示され、貫通ひび割れの評価が困難であることがわかった。

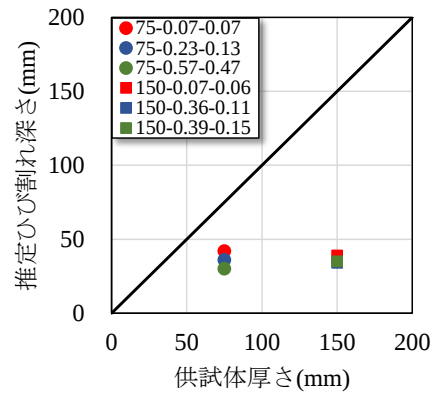
4. 結論

本研究では凹凸を有する平行平板でないひび割れに対する漏水挙動の把握と超音波法によるひび割れの貫通有無の推定を目的として、水の流下方向にひび割れ幅を変えた供試体を作製し、漏水試験および超音波測定を実施した。その結果、以下のことが明らかとなった。

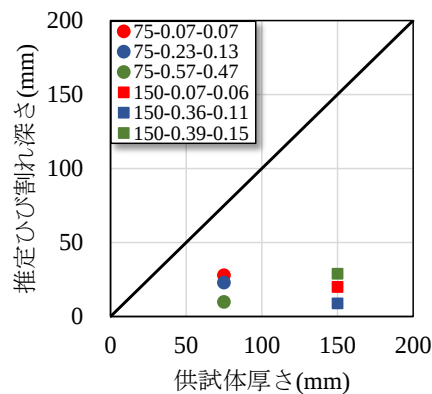
- (1) 漏水試験の結果より、漏水速度は通水経路中の最小ひび割れ幅に依存している可能性が示された。また、ひび割れ幅が 0.1mm 付近で漏水速度が大きくなる変曲点があることが示された。
- (2) ひび割れの貫通有無の評価について、超音波の伝搬時間差 ($T_c - T_0$ 法) によるひび割れ深さの推定を行った結果、ひび割れ深さが 75mm では 44～60%、150mm では 74～77%浅く推定されたことから、この方法では、貫通有無の推定は困難であること、さらにひび割れが貫通している場合にはひび割れ深さを過小評価する可能性が示された。

参考文献

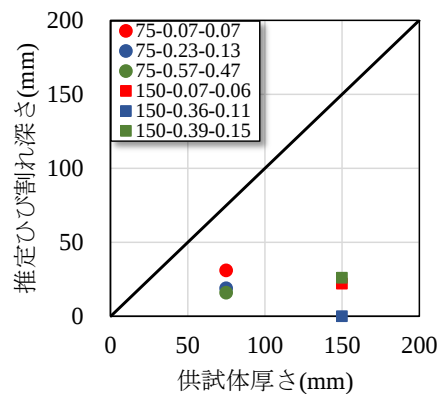
- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013-，pp.85-86，2015.12
- 2) 今本啓一：ひび割れ幅の許容値，コンクリート工学，Vol.43，No.5，pp.67-74，2005.5
- 3) 小佐野依美，大野健太郎，上野敦：コンクリートのひび割れ幅と漏水が超音波伝搬特性に及ぼす影響，



(a) 貯水なし



(b) 貯水量 2L



(c) 貯水量 20L

図-11 推定されるひび割れ深さ

コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1384-1389，2022.6

- 4) 小日山喬，細田暁，栗田淑乃：コンクリートのひび割れ幅の制御方法と漏水速度低減効果の評価方法についての考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1439-1444，2011.6
- 5) 一般社団法人日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の弾性波による試験方法-第1部；超音波法解説，NDIS2426-1：2009，pp.27-29，2009