論文　コンクリートの自己治癒特性の簡易評価試験方法の提案とセメント種類による自己治癒現象の比較

數村　萌夏[*1]・橋田　浩[*2]・加藤　真奈[*3]

要旨：本研究では，コンクリートの自己治癒特性を評価する比較的簡易な試験方法を提案するとともに，普通ポルトランドセメントと混合セメントを使用したコンクリートの自己治癒特性を比較した。円柱供試体に切欠き部を設け，ホースバンドで締め付けたまま割裂載荷を行うことで，0.1mm の小さなひび割れを作製することが可能となった。また，実現象に近い常時漏水状態を保てる試験方法が，実験に適していると判断された。セメント種類による比較では，自己治癒効果は普通ポルトランドセメントが高く，混合セメントが低いことが確認された。高い閉塞性を示したのは，普通ポルトランドセメントのひび割れ幅 0.2mm 以下であった。

キーワード：ひび割れ幅，自己治癒，普通ポルトランドセメント，混合セメント，カルシウムイオン

1. はじめに

コンクリートは引張強度が圧縮強度よりも低い材料特性であるため，ひび割れが発生しやすい。コンクリート構造物におけるひび割れは，耐久性，剛性といった性能を低下させ，また，浸水や漏水を引き起こすことで構造物の長寿命化，景観に影響を及ぼす。

一方で，コンクリートは自己治癒，修復機能を有する材料であり，水分の供給を受けてひび割れ部に炭酸カルシウムが折出し，自然に漏水が止水するケースもある。この自己治癒についてはこれまでにも多くの研究 [1)]がなされてきたが，研究者によって様々な試験方法がとられているため，統一的な特性評価が難しい。

本研究では，簡易な自己治癒特性の評価試験方法を提案するとともに，ひび割れ部からの漏水量の変化を普通ポルトランドセメント及び混合セメント(高炉セメント，フライアッシュセメント)で比較することを目的にした。なお，混合セメントの自己修復については，文献 [2)]で検討されているが，凍結融解劣化などの微小ひび割れについてであり，漏水が閉塞によって減少する本検討内容のような報告は見当たらない。

2. 自己治癒特性の評価試験法の提案

2.1 ひび割れ試験体の作製方法

ひび割れ試験体作製は，斎藤・岸らの方法 [3)]を参考にした。

φ100×200mm の円柱供試体を使用し，封かん養生 28 日後，割裂引張試験(JIS A 1113)方法で直径方向に割り，漏水が発生する 0.1mm 程度の小さいひび割れ幅の作製が可能となることを目標とした。検討に使用したコンクリートは普通ポルトランドセメントを用い，**表－1** の調合とした。また，スランプ 18cm，空気量 4.5%を目標とした。なお，粗骨材の最大寸法は 15mm とした。

表－１　コンクリートの調合

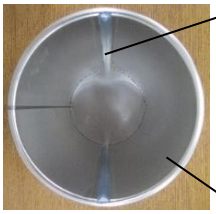
水セメント比(W/C)	54.5%
調合	単位質量(kg/m³)
水(W)	168
セメント(C)	308
細骨材(S)	806
粗骨材(G)	987
AE 減水剤	3.08

試験体のひび割れ作製方法は**図－1** に示すように，ひび割れが直線状に一本になるよう，**写真－１**に示すように，あらかじめ円柱型枠の内面に塩化ビニル製の三角棒を付けて切欠き部とし，コンクリートを打設した。

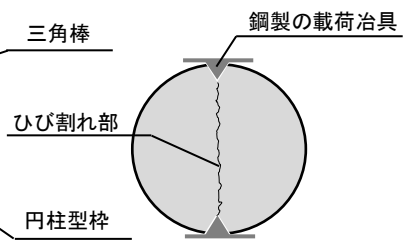
封かん養生後は，φ100×200mm の供試体を上下に二等分してから，**図－1**，**写真－2** に示す割裂載荷を行った。この時文献 [3)]では完全に破断させているが，この方法では小さなひび割れ幅を再現することが出来なかった。そのため，試験体にホースバンドを巻き，緩く締め付けた。この方法によって試験体が完全に分裂せず，小さなひび割れ幅を導入することが可能となる。割裂載荷後，所定のひび割れ幅にするため，ホースバンドで締め付け直し調整した。その後，エポキシ樹脂で切欠き部分を含む側面をコーティングし，ひび割れ幅を固定した。

以上の簡易な作製方法により，0.1mm の小さいひび割れ幅を有する試験体を作製することが可能となった。

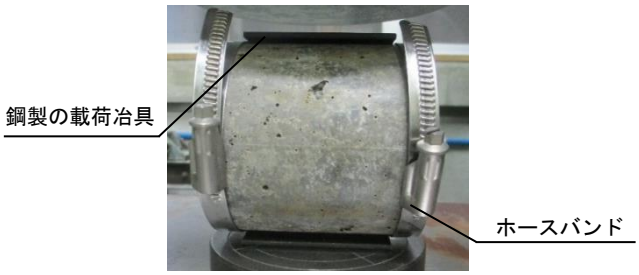
*1 中部大学　大学院工学研究科建設工学専攻　(学生会員)
*2 中部大学　工学部建築学科教授　(正会員)
*3 中部大学　工学部建築学科



写真－1　型枠の準備



図－1　試験体作製イメージ図



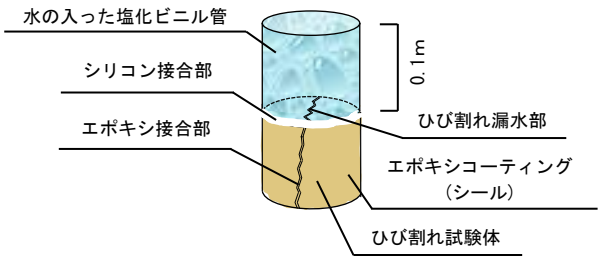
写真－2　割裂載荷の様子

2.2 漏水試験の比較

自己治癒特性評価のための漏水試験方法は，次の 2 種類を検討した。参考文献 [3]から，試験時以外は静水中に保管する(1)の方法だけではなく，実際の漏水状況に近い状態のボックス水圧式の(2)の方法も加えた。

(1) 円筒水圧式での漏水試験

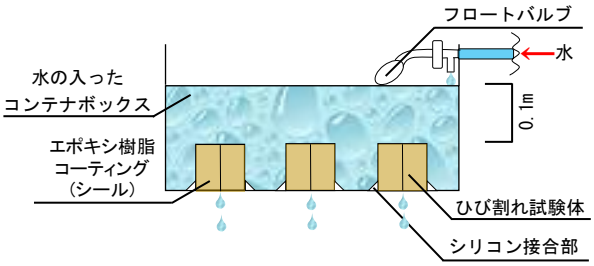
0.10，0.15，0.20mm の幅のひび割れ部を形成させ，試験体の側面をエポキシ樹脂で完全にコーティングした。これをひび割れ試験体とし，シリコンシーリング材で塩化ビニル管と繋ぎ，その塩化ビニル管を貯水状態にする。その状態で試験体のひび割れ部分からの漏水，時間経過に伴う止水状況を観察した。本検討では水頭差 10cm とした。試験状況を**図－2** に示す。なお，本法は文献 [3]でも採用されている。この試験体の保存方法は漏水試験時以外，常に水中保存とした。



図－2　円筒水圧式の漏水試験の状況

(2) ボックス水圧式での漏水試験

(1) と同一のものをひび割れ試験体とし，底面に開口を設けたコンテナボックスにシリコンシーリング材で固定し，漏水試験を行った。本検討でも，水頭差 10cm とした。試験状況を**図－3** に示す。この試験体は，常時一定の水圧がかかるようフロートバルブで水面高さを保つことで漏水試験時以外も，常に漏水状態になるようにした。



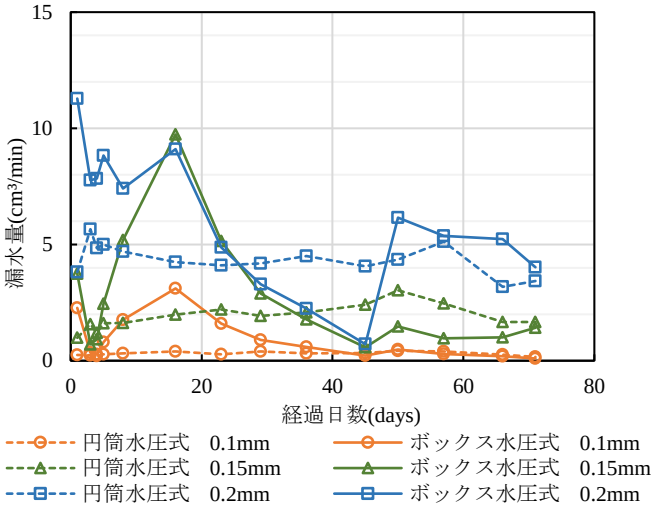
図－3　ボックス水圧式の漏水試験の状況

2.3 実験結果及び考察

図－4 に経過日数に伴う漏水量の変化を示す。2 種類の漏水試験の方法で比較したところ，円筒水圧式は全体的に変化が小さく，ボックス水圧式の方は変化が大きかった。

ボックス水圧式の漏水試験方法は，実現象と同じ常時漏水状態であり，0.1～0.2mm 全てのひび割れ幅で明確な漏水の低減が確認出来た。また，文献 [4]にもボックス水圧式のような通水状態の方が，円筒水圧式のような静水中の状態よりも通水量の減少が著しかったと報告されている。

以上の点から，より実現象に近いボックス水圧式での漏水試験方法が可能と判断して以降はボックス水圧式で行うことにした。なお，温度変化が試験結果に影響を及ぼすことも考えられるので，以降は，実験室の室温は 20℃前後を保つこととした。



図－4　円筒水圧式，ボックス水圧式それぞれのひび割れ幅の漏水量の変化

3. 各種セメントコンクリートの漏水試験

3.1 ひび割れ試験体の作製方法

2.1 と同様の方法でひび割れ試験体を作製した。

普通ポルトランドセメントコンクリート(以下，OP)，高炉セメントコンクリート(以下，BB)は，普通ポルトランドセメント，高炉セメントＢ種のセメントを使用した。一方で，フライアッシュセメントコンクリート(以下，FB)は，セメントは普通ポルトランドセメントで，混和材としてフライアッシュII種を結合材料の 20%割合で使用した。

各種のコンクリートの調合を**表－3** に示す。水セメント比 55%，スランプ 18cm，空気量 4.5%を目標とした。各種のコンクリートの練上がり性状を**表－2** に示す。なお，本検討でも粗骨材の最大寸法は 15mm とした。

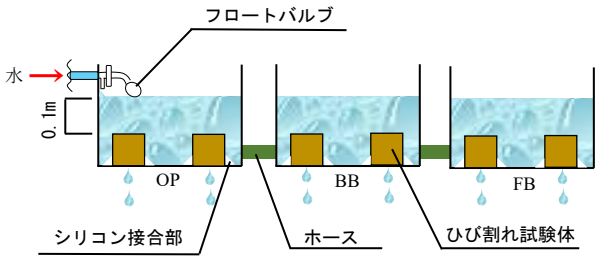
20℃の恒温室で封かん養生 28 日及び封かん養生 8 カ月後，割裂引張試験(JIS A 1113)方法で直径方向に割り，0.1～0.3mm のひび割れ幅を目標に，試験体を作製した。以降，それぞれ短期養生，長期養生試験体と称する。

3.2 漏水試験

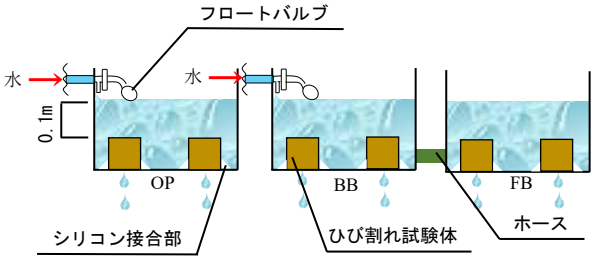
2.3 の結果から，2.2 (2) のボックス水圧式での方法を用いた。

0.1，0.2，0.3mm の幅でひび割れ部を形成させ，同じように試験体の側面をエポキシ樹脂で完全にコーティングし，底面に開口を設けたコンテナボックスにシリコンシーリング材で固定し，漏水試験を行った。長期養生の漏水試験の状況を**図－5**，実際の試験の様子を**写真－3**，短期養生の漏水試験の状況を**図－6** に示す。左から OP, BB, FB とし，それぞれのひび割れ幅で φ100×200mm の円柱を上下に二等分した 2 つの試験体，計 6 個の試験体を 1 つのコンテナボックスに設置した。

長期養生のコンテナボックス設置順は試験体作製順に OP，BB，FB とした。このようにホースで連結していくことで多数の漏水試験が可能となる。なお，短期養生で OP と BB，FB を連結しなかった理由については後述する。



図－5　長期養生で行った漏水試験の状況



図－6　短期養生で行った漏水試験の状況

表－2　練上がり性状

	セメント種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
短期	OP	20.0	3.0	24.2
	BB	20.5	5.3	21.1
	FB	20.5	5.8	21.1
長期	OP	19.0	3.4	19.9
	BB	18.5	3.3	15.0
	FB	19.0	5.7	15.0

写真－3　図-5 の実際の漏水試験の様子

表－3　コンクリートの調合表

セメント種類	水結合材比	単位質量(kg/m³)						
		水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE 助剤※
OP	55%	180	327	-	764	987	2.29	-
BB		180	327	-	751	987	2.29	-
FB		180	262	65	744	987	1.64	5.89

※100 倍希釈液とする。

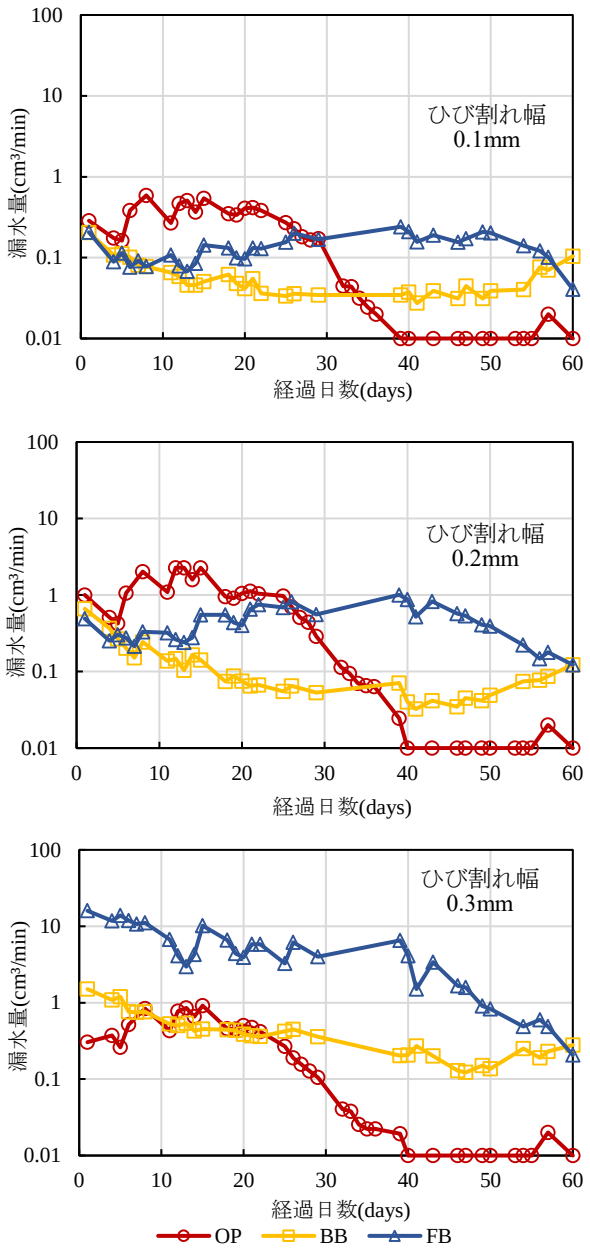
3.3 結果と考察

(1) 漏水試験の結果(全体)

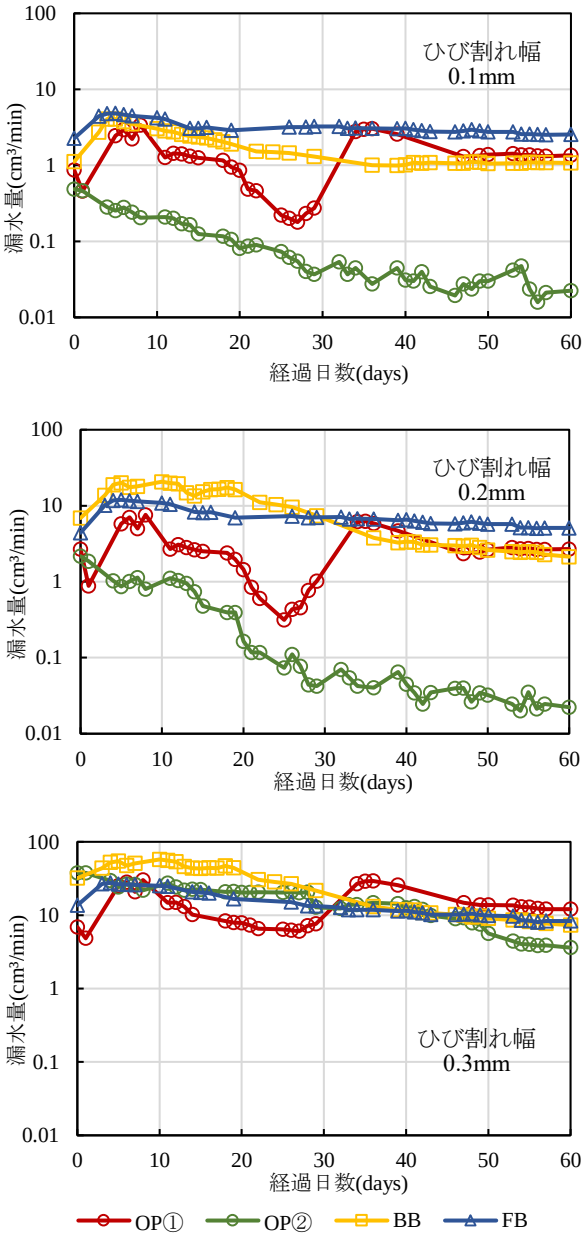
短期養生，長期養生したそれぞれのひび割れ幅の漏水量を対数軸にしたものを**図－6，7** に示す。漏水量は上下に二等分した 2 試験体の測定値の相乗平均(対数平均)で示している。なお，漏水量 0.01cm³/min 以下はほぼ止水しているとみなせる。また，長期養生の試験体を設置したコンテナボックスでは，30 日を超えたあたりで OP の試験体(以下，OP①)で原因不明の漏水量の急増現象が見られた。そのため，再現性を確かめるために別途新しい OP の試験体(以下，OP②)を設置した。

まず短期養生及び長期養生の試験体で共通することは，長期養生のひび割れ幅 0.3mm を除いて，OP よりも BB，FB の方が漏水量の減少が小さく，BB，FB の自己治癒効果が低いことが分かる。特に，BB よりも FB の方が減水量が小さかった。

また，短期養生の試験体と長期養生の試験体のグラフを比べると，OP と BB，FB で漏水量の変化の差が大きく，自己治癒効果の違いがより明確に見られるものは長期養生のコンクリートの試験体だった。特に高い閉塞性を示したのは OP のひび割れ幅 0.2mm 以下であり，短期養生ではひび割れ幅 0.3mm の OP も高かった。



図－6　それぞれのひび割れ幅で比較した漏水量の変化（短期養生）

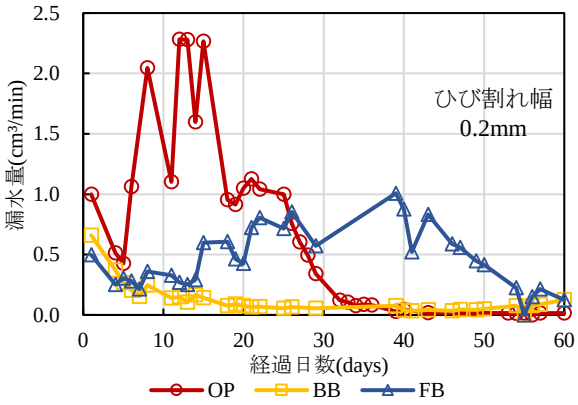


図－7　それぞれのひび割れ幅で比較した漏水量の変化（長期養生）

(2) 漏水初期の現象

短期養生のひび割れ幅 0.2mm の漏水試験の結果を漏水量を自然数軸とし，**図－8** に示す。

漏水当初で急減・急増現象が見られた。最初の急減はひび割れ部で目詰まりが起こることで発生し，その後，長期養生で自己乾燥していたコンクリート内部に水が浸透することで，ひび割れ部で通水しやすくなり，漏水量が増加したのではないかと考えた。しかし，このような現象は過去の論文 [4),5),6)]を見ても起こりうる現象であり，様々な要因が指摘されているが，直接的な原因の解明には至っていない。



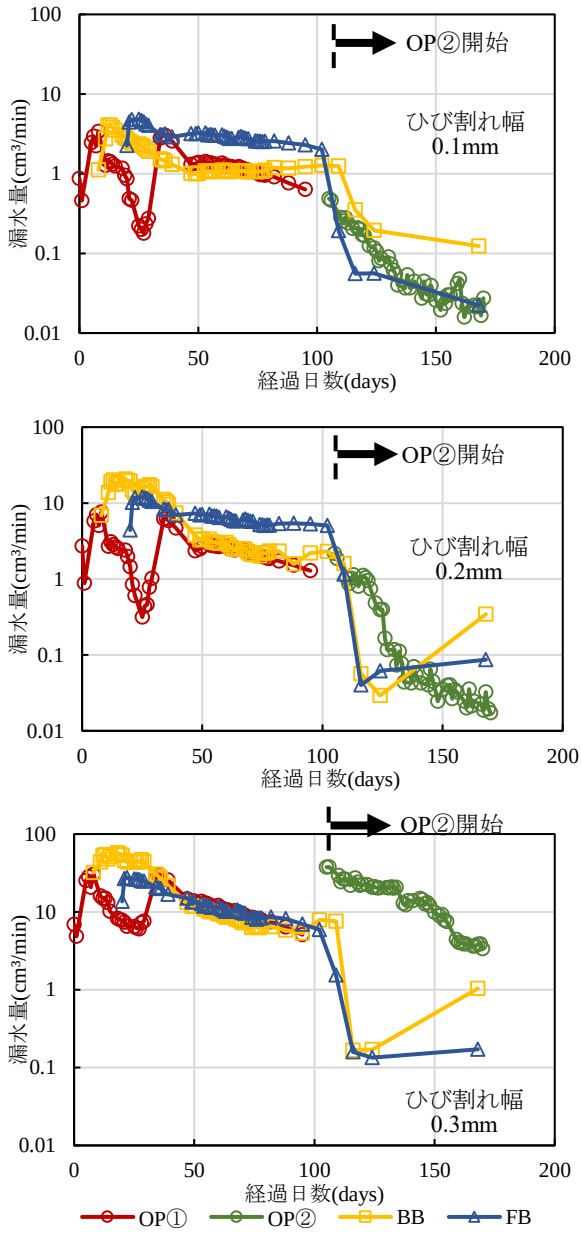
図－8　短期養生の漏水量

(3)漏水試験の問題点と得られた知見

図－9 は 1 回目の OP①試験体を設置した後に BB，FB と順にコンテナボックスを連結させ漏水試験を行い，105 日で新しく取り換えて 2 回目の OP②試験体を設置し，漏水試験を再開した長期養生の実際の試験プロセスに合わせたグラフである。

図－9 から 105 日で新たに OP②試験体を設置した後，いずれのひび割れ幅でも BB，FB の漏水量の急減が確認された。その後はひび割れ幅 0.1，0.2mm では漏水量が 0 に近い試験体もあった。原因として，**図－5** のようにコンテナボックスを 3 連にしていたため，設置した OP②から高濃度の溶解カルシウムイオンがすでに設置していた BB, FB のコンテナボックスに流入してしまったことが考えられる。OP①の時は， 試験を開始してから 8 日後に BB，19 日後に FB のコンテナボックスを連結したので，その間に漏水に伴い補充される水道水によって OP①のカルシウムイオン濃度が低下しており，影響が少なかったと考えられる。3.2 で示した，短期養生の試験は長期養生の試験の後に実験しており，上記のカルシウムイオンの影響を排除する目的で OP と BB，FB を連結しなかった。

なお， 150 日を超えたあたりでほぼ止水していた混合セメントが，増加に転じた原因は閉塞物質が再度溶解し始めたためではないかと考えているが，今後検討課題としたい。



図－9　それぞれのひび割れ幅で比較した漏水量の変化（長期養生）

4. カルシウムイオンの濃度測定

3.3(3)より，BB，FB の突然の漏水量の低下は，カルシウムイオンの影響と推察したが，本試験中の濃度は測定していない。

試験水としている水道水にも，カルシウムイオンは溶存しており，測定値は 12ppm であった(**写真－4**)。 この程度では治癒作用に影響がないはずである。参考までに，短期養生後のコンクリートを一定容量の水中に 3 日間浸漬してカルシウムイオン濃度計で測定した。その結果か

ら，ボックス水圧式の試験の容器の水量，コーティングされていない試験体の表面積を考慮し，仮に漏水しない時の初期のボックス中のカルシウムイオン濃度は158ppm と計算された。長期養生のコンクリートでは，さらに低い濃度になると思われる。どの程度の濃度のカルシウムイオンが溶存している場合に顕著な治癒作用が生じるのかは今後の検討課題としたい。

なお，水酸化カルシウム水の飽和濃度は 20℃で 1600 ppm である。

写真－4　漏水試験で使用した水道水のカルシウムイオン濃度

5. まとめ

コンクリートの自己治癒特性を評価する比較的簡易な試験方法を提案するとともに，ひび割れ部からの漏水量の変化を普通ポルトランドセメント及び混合セメント(高炉セメント，フライアッシュセメント)を用い，それぞれ短期養生，長期養生したコンクリートで比較した。その結果，以下の知見が得られた。

(1)コンクリートに切欠き部を設け，ホースバンドで締め付けたまま円柱供試体の割裂載荷を行うことで，0.1mm 程度の小さなひび割れを簡易に作製することが可能となった。また，そのままホースバンドで締め付け直すことで，ひび割れ幅を調整することが出来た。

(2)ボックス水圧式の漏水試験方法は，実現象と同じ常時漏水状態であり，ひび割れ幅によって明確な漏水の低減が確認出来たため，自己治癒特性評価試験方法に適していると考えられる。

(3)普通ポルトランドセメントより混合セメントの方が自己治癒効果が低く，特に高炉セメントよりもフライアッシュセメントの方が低かった。

参考文献

1) JCI-TC075B セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会:セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会報告書，pp.11-13，117-119，2008

2) 羅　承賢・濱　幸雄・谷口　円・佐川　孝広：フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの自己修復効果の比較，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No1，pp.1403-1406，2012

3) 斎藤　尚・岸　利治：ひび割れからの通水量に基づく自己治癒性能の評価試験方法の一提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1342-1345，2018

4) 小松　怜史・細田　暁・安　台浩・池野　誠司：ひび割れ間で通水する自己治癒コンクリートの治癒性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.119-122，2008

5) 生駒　勇人・岸　利治：自己治癒現象に関わるコンクリートのひび割れ初期通水量の急速抑制メカニズムの解明，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1649-1653，2014

6) 佐藤　成幸・Muzafal KAYONDO・岸　利治：コンクリート中のひび割れを通る液状水からの気泡発生メカニズムに関する研究，Cement Science and Concrete Technology，Vol.69，pp.331-333，2015