

IV-4 ポーラスコンクリートの耐久性評価手法の開発

研究予算：運営費交付金（治水勘定、道路整備勘定）

研究期間：平 15 ～平 17

担当チーム：技術推進本部（構造物マネジメント技術）

研究担当者：渡辺博志、片平博

【要旨】

ポーラスコンクリートは環境対応型コンクリートとして河川護岸や道路舗装への適用に関心が高まっているが、耐久性については不明な点が多い。そこで本研究ではポーラスコンクリートの(1)凍結融解抵抗性、(2)乾湿繰り返し抵抗性、(3)流水による水酸化カルシウムの溶脱に対する抵抗性について実験的な検討を行った。この結果、(1)(2)(3)に対するポーラスコンクリートの特性を明らかとするとともに、(1)(2)についての評価試験法の提案を行った。

キーワード：ポーラスコンクリート、耐久性、凍結融解、乾湿繰り返し、溶脱

1. はじめに

ポーラスコンクリートは粗骨材にセメントペーストを絡めたオコシ状のコンクリートであり、多自然型河川護岸や排水性舗装への適用に期待が高まっている。しかしながら、耐久性や長期的な物性の変化については不明な点が多い。そこで(1)凍結融解抵抗性、(2)乾湿繰り返し抵抗性、(3)流水による水酸化カルシウムの溶脱に対する抵抗性について実験的な検討を行った¹⁾。

2. 凍結融解抵抗性の検討

2.1 JIS A 1148をポーラスコンクリートに適用することの問題点

コンクリートの凍結融解抵抗性を評価する試験法としてJIS A 1148 (A法)がある。この試験法をポーラスコンクリートに実施すると、少ないサイクル数で試験体が破断に至る。

この理由としては、図-1に示すように、凍結融

解試験では試験体の周囲から内部に向かって凍結が進行するので、試験体中央部の空隙の水が凍結する際に氷結圧(膨張圧)が作用するためと考えられる。しかしながら自然環境下での凍結は、外気に接する面から深部に向かって1方向にしか進行しないので、氷結圧が発生する可能性は低いと考えられる。

これを確認する目的で自然環境を模した凍結融解試験を実施した。この結果、ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性は必ずしも低いものでないことが分かった²⁾。ただし、この試験には1年以上の試験期間を要し、試験法としては現実的なものではなかった。そこで、比較的簡易かつ短期間で結果が得られる試験法について検討を行うこととした³⁾。

2.2 ポーラスコンクリートの凍結融解試験法(案)

今回検討した試験法は、図-2に示すように試験体の下方から一方向に凍結融解作用を与える方法とし、試験期間を短縮する目的から試験体寸法を4×4×16cmとした。提案した試験法を表-1に示す。

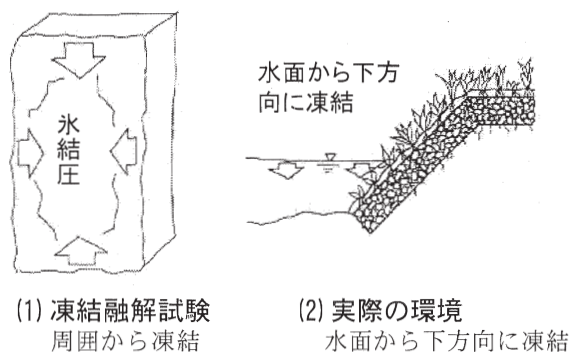


図-1 凍結過程の比較

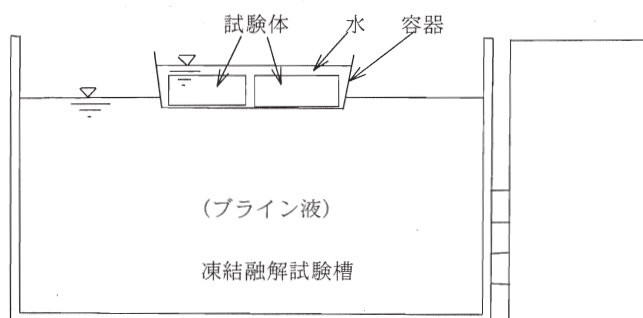


図-2 新しい試験法の概要図

表-1 ポーラスコンクリートの凍結融解試験法(案)

<p>1. 適用範囲</p> <p>この規格は骨材最大寸法が 20mm 以下のポーラスコンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性を、供試体を用いて凍結及び融解の急速な繰り返しによって試験する方法について規定する。</p> <p>この試験方法は、使用材料や配合などの異なるポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性を相互に比較するためのものであって、ポーラスコンクリート構造物の耐凍害性を直接評価したり、耐凍害性によって定まるポーラスコンクリート構造物の耐用年数を予測するためのものではない。</p> <p>2. 引用規格</p> <p>次に掲げる規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格は、その最新版(追補を含む)を適用する。</p> <p>JIS A 1127 共鳴振動によるコンクリート動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法</p> <p>3. 試験装置及び器具</p> <p>3.1 試験装置 試験装置は、供試体に所定の凍結融解サイクルを与えるのに必要な冷却及び加熱装置、試験槽、制御装置、並びに温度測定装置から成るものであり、「JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法」a 法に使用する凍結融解試験槽を用いることができる。温度測定装置は、槽内の温度等を 1.0℃以内の精度で測定できるものとする。</p> <p>3.2 動弾性係数測定装置 動弾性係数測定装置は JIS A 1127 に規定するものとする。</p> <p>3.3 はかり はかりは、ひょう量 1 kg 以上、感量 0.1g 以下のものを用いる。</p> <p>4. 供試体</p> <p>4.1 供試体の寸法 供試体の断面は、正方形でその 1 辺の長さは 40mm とし、供試体の長さは 160mm とする。</p> <p>4.2 供試体の個数 供試体の個数は、同一条件の試験に対して 3 個以上を標準とする。</p> <p>4.3 供試体の作り方 供試体の作り方は、実際のポーラスコンクリート構造物と同等の品質が確保される方法により行う。なお、一次共鳴振動数測定の際の起振部と受信部については必要に応じてペースト等で平らに成形すると良い。</p> <p>4.4 型枠の取り外し及び養生 打設の翌日に脱枠し、ペースト等の成形を行った翌日から、20 ± 2℃の水槽で養生することを標準とする。</p> <p>4.5 試験開始材齢 試験開始材齢は 28 日を標準とする。</p> <p>5. 凍結融解試験の方法</p> <p>5.1 試験装置と供試体の配置 図-2 に示すように、凍結融解試験槽のブライン液の液面上に深さ 5cm 以上のステンレス製の容器を配置する。容器内に供試体を配置する。このとき、容器底面に供試体が直接接しないように厚さ 3 ~ 5mm 程度の線状のゴムを敷き、隙間を設ける。容器内に水を満たし、試験体を冠水させる。</p> <p>容器の大きさに対して供試体の占める割合が小さい(水が多い)と凍結融解に長時間を要するので、容器の大きさは供試体の数を考慮して選定すると良い。</p> <p>5.2 凍結融解温度の管理 凍結融解温度の管理は、容器内の供試体の上面付近と下面付近に温度計を配置し、この温度計の測定値により行う。</p> <p>5.3 凍結融解の温度 2 箇所の温度計で測定される温度として、凍結時の最低温度が $-15 \sim -10$℃の範囲、融解時の最高温度が $5 \sim 10$℃の範囲となることを標準とする。</p> <p>5.4 ブライン液の温度 ブライン液の温度は $-25 \sim +20$℃の範囲を超えてはならない。</p> <p>5.5 1 サイクルの所用時間凍結融解 1 サイクルに要する時間は 4 時間を標準とする。</p> <p>5.6 試験の終了 試験の終了サイクル数は試験の目的にあわせて設定する。なお、試験途中で相対動弾性係数が 60 %以下になったものは、そのサイクルで試験を終了する。</p> <p>6. 測定の方法</p> <p>6.1 測定項目 測定項目は、各供試体の JIS A 1127 によるたわみ振動の一次共鳴振動数、及び質量とする。一次共鳴振動数からは相対動弾性係数、質量からは質量減少率を求める。</p> <p>6.2 測定時期 測定は、水中養生終了後の試験開始前、及び凍結融解試験期間中は試験体の一次共鳴振動数や質量の低下傾向が十分に把握できる頻度で測定を行う。</p> <p>6.3 測定方法 測定は、融解行程終了後に行う。供試体を水中から取り出した後、約 1 時間放置することで空隙内部の水を自然排水させ、その後、速やかに供試体のたわみ一次共鳴振動数及び質量を測定する。このあと、供試体に新たなひび割れ、又は破損が生じている場合には、これらを記録して試験槽に戻す。</p>
--

表-2 ポーラスコンクリートの配合条件

配合名	粗骨材の種類		W/C (%)	目標全空隙率(%)	単位量(kg/m ³)		
	粒度(mm)	種類			W	C	G
Aシリーズ	①	13-20 砂岩(5号)	25	25	79	316	1524
	②	13-20 砂岩(5号)	30	25	87	290	1524
	③	13-20 砂岩(5号)	35	25	94	269	1524
Bシリーズ	④	5-13 砂岩(6号)	25	25	79	316	1524
	⑤	5-13 砂岩(6号)	30	25	87	290	1524
Cシリーズ	⑥	10-20 風化花崗岩	25	25	79	316	1403
	⑦	10-20 再生骨材	25	25	79	316	1422

表-3 粗骨材の品質

	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性損失率 (%)
砂岩(5号)	2.66	0.46	5.5
砂岩(6号)	2.65	0.68	1.7
風化花崗岩	2.53	1.47	31.1
再生骨材	2.36	5.37	39.0

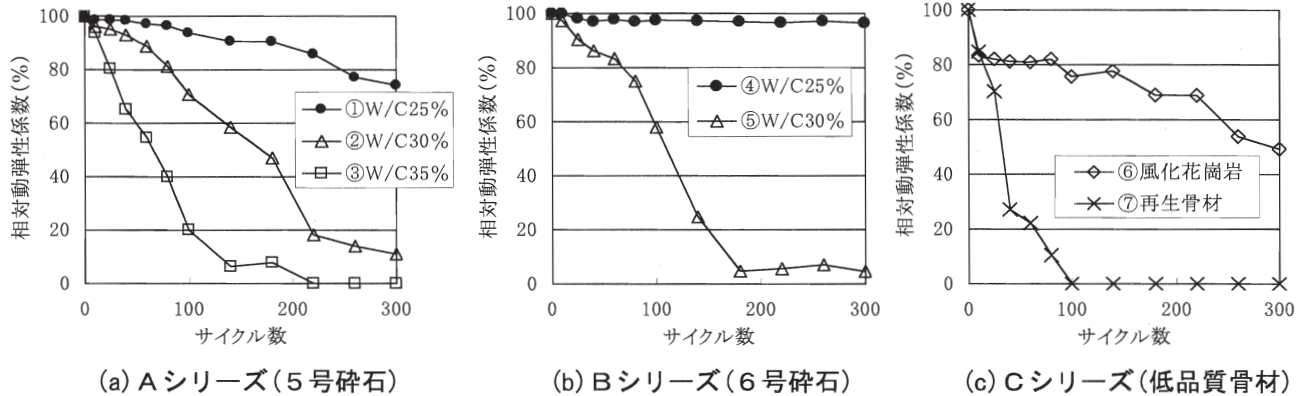


図-3 凍結融解試験結果

2.3 検証試験

表-1の試験法によって、材料や配合の違いによるポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性の違いが評価できるかどうかについて検証試験を実施した。

表-2にポーラスコンクリートの配合を示す。

Aシリーズは粗骨材に5号砕石(13-20mm)を用い、W/Cを25,30,35%と変化させたケース、Bシリーズは粗骨材に6号砕石(5-13mm)を用い、W/Cを25,30%と変化させたケース、Cシリーズは粗骨材に低品質骨材や再生骨材を用いたケース(粗骨材寸法は10-20mm)とした。各粗骨材の品質を表-3に示す。これらの配合でポーラスコンクリートを練混ぜ、表-1に従って凍結融解試験を実施した。凍結融解の繰り返し回数は300回とした。

試験結果から得られる相対動弾性係数の変化を図-3に示す。これより以下の傾向が確認できた。

- (1) A, Bシリーズともに、W/Cが大きくなるほど相対動弾性係数が低下する傾向を示した。
- (2) 品質の劣る粗骨材を使用したCシリーズでは相対動弾性係数が低下する傾向を示した。

2.4 凍結融解抵抗性に関する考察

図-3の結果は、使用材料や配合条件と良く対応しており、表-1の試験法によって凍結融解耐久性の相対的評価が可能であると考えられる。

耐久性の評価基準としては、JIS A 1148 で一般的に用いられる「300 サイクル終了時点の相対動弾性

係数が60%以上」という指標が一つの目安として考えられる。ただし、この数値に明確な根拠があるわけではない。一方、河川護岸等で実際に施工されるポーラスコンクリートの配合は5号砕石を使用し、W/Cが25~30%程度の配合が多く、これが凍結融解によって劣化したという報告は現時点では無い。これと図-3(a)の結果を対応づけて考えれば100サイクルで60%以上という指標も考えられる。ただし、ポーラスコンクリートの多くの施工事例はまだ経過年数が浅いため、今後の推移を十分に観察したうえで、評価基準を検討していく必要があると考えられる。

3. 乾湿繰り返し抵抗性の検討

3.1 乾湿繰り返し試験法(案)

これまでの研究により、ポーラスコンクリートの乾湿繰り返し抵抗性は通常のコンクリートよりもやや劣ることが分かっている⁴⁾。今回は研究では、試験体の寸法や乾燥条件が乾湿繰り返し試験結果に与える影響を調査したうえで、表-4に示す試験法を提案した。

3.2 検証試験

表-4に示す試験法によって材料や配合の違いによるポーラスコンクリートの乾湿繰り返し抵抗性の違いが評価できるかどうかについて検証試験を実施した。

表-5に示す条件で7種類のポーラスコンクリート

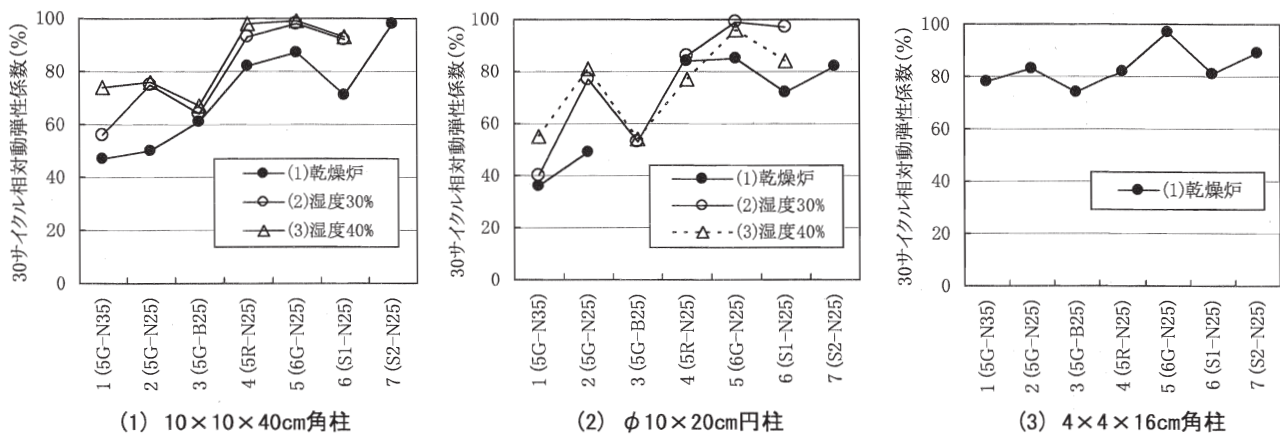
表-4 ポーラスコンクリートの乾湿繰り返し試験法(案)

<p>1. 適用範囲 この規格はポーラスコンクリートの乾湿繰り返し作用に対する抵抗性を、供試体を用いて乾燥及び湿潤の繰り返しによって試験する方法について規定する。 この試験方法は、使用材料や配合などの異なるポーラスコンクリートの乾湿繰り返し作用に対する抵抗性を相互に比較するためのものであって、ポーラスコンクリート構造物の乾湿繰り返しに対する抵抗性を直接評価したり、乾湿繰り返し作用によって定まるポーラスコンクリート構造物の耐用年数を予測するためのものではない。</p> <p>2. 引用規格 次に掲げる規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格は、その最新版(追補を含む)を適用する。 JIS A 1127 共鳴振動によるコンクリート動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法</p> <p>3. 試験装置及び器具 3.1 試験装置 試験装置には乾燥炉と水槽を用いる。乾燥炉は 40℃、又は乾燥炉が設置された室内温度の平均気温+20℃のいずれかの温度に対し±2℃の範囲で維持可能なものを標準とする。水槽は 20℃±2℃の水温を維持できる水槽を用いることを標準とする。 3.2 動弾性係数測定装置 動弾性係数測定装置は JIS A 1127 に規定するものとする。 3.3 はかり はかりは、ひょう量 10kg 以上、感量 2g 以下のものを用いる。</p> <p>4. 供試体 4.1 供試体の寸法 供試体は 100×100×400mm の角柱供試体、又はφ100×200mm の円柱供試体を標準とする。 4.2 供試体の個数 供試体の個数は、同一条件の試験に対して 3 個以上を標準とする。 4.3 供試体の作り方 供試体の作り方は、実際のポーラスコンクリート構造物と同等の品質が確保される方法により行う。なお、一次共鳴振動数測定の際の起振部と受信部については必要に応じてペースト等で平らに成形すると良い。 4.4 型枠の取り外し及び養生 打設の翌日に脱枠し、ペースト等の成形を行った翌日から、20±2℃の水槽で養生することを標準とする。 4.5 試験開始材齢 試験開始材齢は 28 日を標準とする。</p> <p>5. 乾湿繰り返し試験の方法 5.1 乾湿の条件 湿潤は 20±2℃の水槽、乾燥は 40±2℃の乾燥炉を標準とする。ただし、室温の日平均気温が 15～25℃の範囲にない場合には、乾燥炉の温度を日平均室温+20℃に設定する。 5.2 繰り返しの方法 乾湿の繰り返し方法は、乾燥期間 3 日、湿潤期間 1 日、乾燥期間 2 日、湿潤期間 1 日で 2 サイクル(1 週間で 2 サイクル)とすることを標準とする。なお、乾燥から湿潤に移行する場合には急激な温度変化を避ける目的から 1 時間程度の気中放置時間を設ける。 5.3 試験の終了 試験の終了サイクルは試験の目的にあわせて設定する。なお、試験の途中で相対動弾性係数が 60% 以下になったものは、そのサイクルで試験を終了する。</p> <p>6. 測定の方法 6.1 測定項目 測定項目は、各供試体の JIS A 1127 によるたわみ振動又は縦振動の一次共鳴振動数、及び質量とする。一次共鳴振動数からは相対動弾性係数、質量からは質量減少率を求める。 6.2 測定時期 測定は、水中養生終了後の試験開始前、及び乾湿繰り返し試験期間中は試験体の一次共鳴振動数や質量の低下傾向が十分に把握できる頻度で測定を行う。 6.3 測定方法 測定は、湿潤行程終了後に行う。供試体を水中から取り出した後、約 1 時間放置することで空隙内部の水を自然排水させ、その後、速やかに供試体の一次共鳴振動数及び質量を測定する。このあと、供試体に新たなひび割れ、又は破損が生じている場合にはこれらを記録して、次の乾燥の工程に移行する。</p>
--

表-5 ポーラスコンクリートの配合条件

No.	配合名	粗骨材の種類	細骨材の有無	セメントの種類	W/C (%)
1	5G-N35	5号砕石	無	普通	35
2	5G-N25	〃	〃	〃	25
3	5G-B25	〃	〃	高炉	25
4	5R-N25	5号再生骨材	〃	普通	25
5	6G-N25	6号砕石	〃	〃	25
6	S1-N25	5号砕石	有(100kg/m ³)	〃	25
7	S2-N25	〃	有(200kg/m ³)	〃	25

を練混ぜた。表-4 では供試体寸法は 10×10×40cm 角柱またはφ10×20cm 円柱としているが、検証試験では比較用に 4×4×16cm 角柱の供試体も製造した。また、乾湿繰り返し試験の乾燥の条件としては 40℃の乾燥炉を使用することとしているが、比較用に恒温恒湿槽を使用したケースを 2 ケース(温度 40℃で湿度 40%、温度 40℃で湿度 30%) 設定した。乾湿の繰り返し回数は 30 サイクルとした。



図一4 乾湿繰り返し試験結果

試験終了時の相対動弾性係数を試験体の形状ごとに整理した結果を図一4に示す。これより以下の傾向が認められた。

(1) 試験体の形状寸法の影響としては、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 角柱と $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱では配合による違いが現れたが、 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 角柱では違いが現れなかった。これは、試験体が小さいと試験体全体が乾湿によって伸縮し、拘束ひずみが発生しにくくなるためと考えられる。

(2) 乾燥条件の影響としては、湿度40%、30%、乾燥炉の順で相対動弾性係数が低くなる傾向を示した。これより、少ないサイクル数で結果を得るためには乾燥炉を用いる方法が合理的と考えられる。

(3) 配合の影響としては、配合1、2、3に比較して、粗骨材寸法を小さくした配合5および細骨材を使用した配合6、7の相対動弾性係数が高く、これらの方法が乾湿繰り返し抵抗性の向上に有効と考えられる。再生骨材を用いた配合4の相対動弾性係数も高いが、これは粗骨材の変形性が大きく、ペーストの伸縮に対する拘束力が小さいためと考えられる。従って、試験体全体の伸縮が大きくなる可能性があり注意が必要である。

3.3 乾湿繰り返し抵抗性に関する考察

検証試験の結果から、表一4で提案した試験法によって、ポーラスコンクリートの乾湿繰り返し耐久性の相対的評価が可能であると考えられる。

表一4の試験法は、促進試験としての位置づけを有しており、実際の自然環境よりも過酷な試験条件と考えられる。一方、実際に施工されたポーラスコンクリートが乾湿作用によって劣化したという報告は現時点では無い。これらのことから、適切な配合・製造・施工されたポーラスコンクリートについては、乾湿繰り返し作用に対して特段な対策を講じる必要は無いと考えられるが、乾燥の影響が特段に厳し

い場合や、乾湿作用に対して万全な構造体として施工したい場合、さらには特殊な材料または配合でポーラスコンクリートを製造するような場合には、表一4に示す乾湿繰り返し試験を実施して、乾湿繰り返し抵抗性を検証するのが良いと考える。

4. 溶脱に関する抵抗性の検討

4.1 検討の概要

ポーラスコンクリートは骨材を覆うペースト膜が薄く、流水によって水酸化カルシウム等が溶脱し、ペースト強度が低下する可能性がある。そこでポーラスコンクリートの溶脱抵抗性について実験的検討を行った。

4.2 実験方法

表一6に示す6種類のポーラスコンクリートを練混ぜ、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 供試体を3本ずつ作製した。

試験装置を図一5に示す。水は上部水槽から通水筒を通して下部水槽に自由落下する。下部水槽から上部水槽にポンプアップすることで水は循環して使用する。各通水筒ごとに3本の供試体の設置が可能である。

試験条件としては以下のように設定した。

(1) 初期の試験条件：6配合の供試体を各3本ずつ通水筒にセットした。循環水にはイオン交換水100リットルを使用し、7日ごとに循環水を交換した。筒

表一6 ポーラスコンクリートの配合条件

配合名	粗骨材の種類	細骨材の有無	セメントの種類	W/C (%)
5G	5号砕石	無	普通	25
5G-S	〃	有(100kg/m ³)	〃	〃
6G	6号砕石	無	〃	〃
5GBB	5号砕石	〃	高炉	〃
5G35	〃	〃	普通	35
5G再	5号再生骨材	〃	〃	25

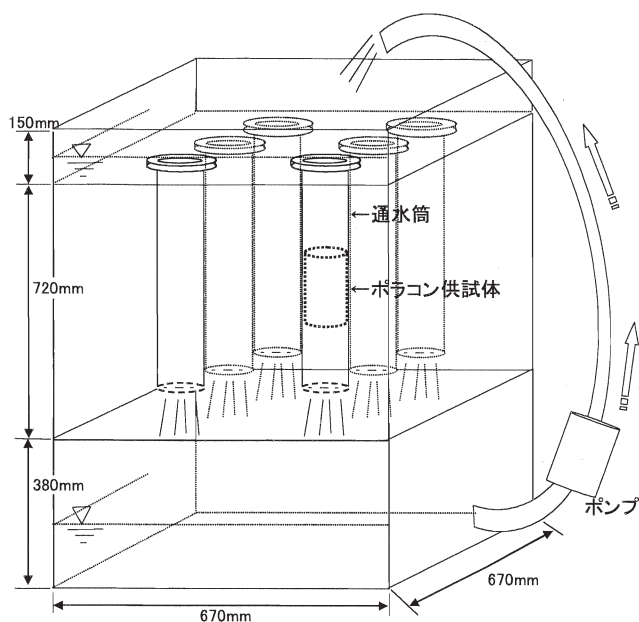


図-5 溶脱試験装置

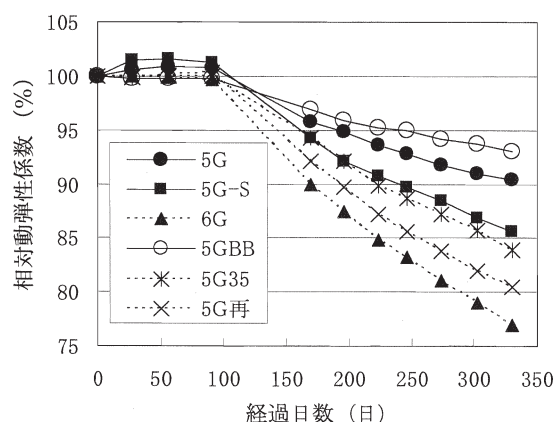


図-6 溶脱試験による相対動弾性係数の変化

1 本あたりの流下水量を概ね毎分 15 リットルとした。
 (2) 試験条件の変更：(1)の条件では循環水中の水酸化カルシウムの濃度が早期に上昇して飽和状態となり、溶脱が進行しない傾向が認められた。そこで 50 日目以降、循環水の交換は 1 日に 1 回 (113 ~ 217 日の期間は 1 日に 2 回、土日は除く) とした。また、101 日目以降、通水筒内の試験体を各 1 本ずつとし、330 日まで試験を実施した。

4.3 実験結果

試験期間中の相対動弾性係数の変化を図-6 に示す。100 日目以降から値が低下する傾向を示したが、低下傾向はほぼ直線的で急激な低下は見られない。動弾性係数の低下量を配合ごとに比較すると、ペースト膜が薄い 6G の低下量が大きく、高炉セメントを使用した 5GBB の

低下量はやや小さかった。

4.4 ポーラスコンクリートの溶脱抵抗性に関する考察

動弾性係数の低下の原因は、水酸化カルシウム等の溶脱によりペーストが徐々に脆弱化、流失し、剛性が低下するためと考えられる。ただし、低下の傾向は直線的で緩やかなことから、ポーラスコンクリートの河川護岸等が急激に崩壊するような劣化は生じ難いと考えられる。

実際の河川護岸では、流水に曝されるのは護岸のごく表面のみで護岸内部の環境は大幅に緩和される。このため溶脱による劣化は護岸表面から徐々にしか進行しないと考えられる。また、溶脱による劣化は目視確認が容易なことから、目視による巡視点検を行うことで十分に対応が可能と考えられる。

溶脱に対する抵抗性は普通セメントよりも高炉セメントのほうがやや高い結果となった。これは、水酸化カルシウムが高炉スラグと反応して溶脱しにくい硬化体組織を形成するためと考えられる。

【参考文献】

- 1) 渡辺博志、片平博「ポーラスコンクリートの耐久性評価手法の検討」土木研究所資料、No.3997 号、2006.3
- 2) 片平博、河野広隆「実環境を考慮した河川護岸ポーラスコンクリートの水中凍結融解耐久性」ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用事例に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp.135-138、2003.5
- 3) 片平博、渡辺博志「新しいポーラスコンクリートの凍結融解試験法の検討」セメント技術大会講演要旨、(社)セメント協会、Vol.59、230-231、2005.5
- 4) 片平博、河野広隆「ポーラスコンクリートの乾湿繰返しに対する耐久性の検討」第 55 回セメント技術大会講演要旨、(社)セメント協会、pp.308-309、2001.5
- 5) 片平博、河野広隆「実環境を考慮したポーラスコンクリートの凍結融解・乾湿繰返し耐久性の検討」第 56 回セメント技術大会講演要旨、(社)セメント協会、pp.354-355、2002.5