

# 論文 産業副産物を使用したポーラスコンクリートの力学特性および耐久性に関する研究

大谷 俊浩<sup>\*1</sup>・村上 聖<sup>\*2</sup>・佐藤 嘉昭<sup>\*3</sup>・三井 宜之<sup>\*4</sup>

**要旨**：再生骨材や高炉徐冷スラグ骨材をポーラスコンクリートの粗骨材として使用した場合における各種力学特性および耐久性に及ぼす粗骨材の影響を把握することを目的として、圧縮強度試験、曲げ強度試験および乾湿繰返しによる耐久性試験を行った。その結果、両骨材を使用する場合、強度特性については硬質砂岩砕石より強度の低下がみられるが、その低下は調合の修正により補うことが可能な範囲であり、また、圧縮強度に関する乾湿繰返し抵抗性は硬質砂岩砕石を使用した場合より低い、曲げ強度に関する乾湿繰返し抵抗性は逆に高いことが明らかとなった。

**キーワード**：ポーラスコンクリート、再生骨材、高炉徐冷スラグ骨材、硬質砂岩砕石

## 1. はじめに

近年、天然骨材資源の枯渇などの理由で天然骨材の採取が規制されてきており、今後、良質な天然骨材の生産量は減少することが予想される。そのため、コンクリート解体ガラから再生した再生骨材をはじめ各種産業より発生する産業廃棄物や産業副産物をコンクリート用骨材として有効利用するための研究が盛んに行われている。しかしながら、それら骨材は、品質などの問題で必ずしもコンクリート用骨材への利用が進んでいるとはいえないのが現状である。

再生骨材の場合、2000年に標準情報（TR A 0006）が公開されたが、用途が裏込めコンクリートなど高い強度や耐久性を要求されない部位を対象としているため、あまり普及していない。

高炉スラグ骨材は、1997年にJIS A 5011が制定され、水砕した細骨材は骨材としての利用だけでなく、高炉セメントとして利用され、かなり普及しているが、粗骨材については再生骨材と同様にあまり普及していないのが現状である。

ポーラスコンクリートは、エココンクリートとして環境負荷を低減することを目的に様々な用途開発が行われている。ポーラスコンクリー

トの用途を考えた場合、それほど強度を必要とせず、低品質な骨材の用途としては非常に適していると考えられる。

そこで、本研究では、再生骨材や高炉徐冷スラグ骨材の新たな用途開発を目的として、それらをポーラスコンクリート用粗骨材として使用した場合における各種力学特性に及ぼす影響について検討するとともに、ポーラスコンクリートは水に接する箇所でも利用されることが多いことから、乾湿繰返し促進暴露試験を行い、乾湿繰返しに対する耐久性について検討を行った。

## 2. 力学特性に及ぼす影響（シリーズ1）

### 2.1 使用材料および調合

表-1に使用材料を示す。セメントは高炉セメントB種、粗骨材は再生骨材および高炉徐冷スラグ骨材の2種類に加え、比較用に硬質砂岩砕石を使用した。今回、実験に使用した再生骨材は、モルタル分が多く残っているため6%を超える高い吸水率を示しているが、TR A 0006に規定される再生粗骨材の品質（吸水率7%以下）を満足するものである。また、高炉徐冷スラグ骨材は、多孔質であるため吸水率が比較的高くな

\*1 大分大学 工学部福祉環境工学科 助手 工修（正会員）

\*2 熊本大学 大学院自然科学研究科 助教授 工博（正会員）

\*3 大分大学 工学部福祉環境工学科 教授 工博（正会員）

\*4 熊本大学 工学部環境システム工学科 教授 工博（正会員）

っており、JIS A 5011 によれば L 区分に相当する。

表 2 に調合を示す。結合材は細骨材を使用せず、セメントペーストとした。セメントペーストの水セメント比を 25% で一定とし、目標空隙率を表に示すように段階的に変化させた調合とした。また、セメントペーストのフロー値は、予備実験の結果をもとに高性能 AE 減水剤を使用して 200±10mm に調整したものとした。

## 2.2 実験方法

コンクリートの練混ぜは、容量 100 リットルの強制 2 軸ミキサを使用し、まずセメントおよび骨材を投入して空練りを 30 秒間行い、次に水および混和剤を投入して 150 秒間練り混ぜることでコンクリートを作製した。練り上げたコンクリートを圧縮強度試験用供試体は φ10×20cm の鋼製型枠に 2 層で詰め、各層につき 17 回突き棒で突き固め、曲げ強度試験用供試体も同様に 10×10×40cm の鋼製型枠に 2 層で詰め、各層につき 87 回突き棒で突き固めた。

作製した供試体は、材齢 1 日で脱型して 20℃ 水中養生を行い、材齢 14 日で空隙率を測定し、材齢 28 日で圧縮および曲げ強度試験に供した。

空隙率の測定は、日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの物性試験方法 (案)<sup>1)</sup> に準拠して容積法で行った。

圧縮強度試験は容量 1000kN 万能試験機を使用し、両端面をセメントペーストまたは硫黄でキャッピングした供試体を用いて行った。また、各調合 6 体の供試体のうち 4 体は、ポーラスコンクリート用に爪の部分の部分が横長に改良されたコンプレッソメータを用いて縦方向のひずみの測定を行い、応力-ひずみ曲線より 1/3 割線ヤング係数を算出した。

曲げ強度試験は、容量 250kN 変位制御型試験機を使用し、スパン 300mm、3 等分点曲げ載荷で行った。また、荷重が均一にかかるように上面載荷点部分にセメントペーストによるキャッピングを施した供試体を用いて行った。なお、各強度試験時の供試体は表乾状態とした。

表 1 使用材料

セメント	高炉セメント B 種 : 密度 3.04g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	硬質砂岩碎石 5 号 : 粒径 13~20mm, 表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup> , 絶乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.40%, 実積率 57.6%
	再生 : 粒径 5~20mm, 表乾密度 2.43g/cm <sup>3</sup> , 絶乾密度 2.24g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 6.42%, 実積率 56.8%
	高炉徐冷スラグ : 粒径 5~25mm, 表乾密度 2.47g/cm <sup>3</sup> , 絶乾密度 2.36g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 4.47%, 実積率 51.6%
細骨材	混合砂 : 表乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.57%, 粗粒率 2.87, 最大寸法 2.5mm
混和剤	高性能 AE 減水剤 : ポリカルボン酸エーテル系

表 2 調合 (シリーズ 1)

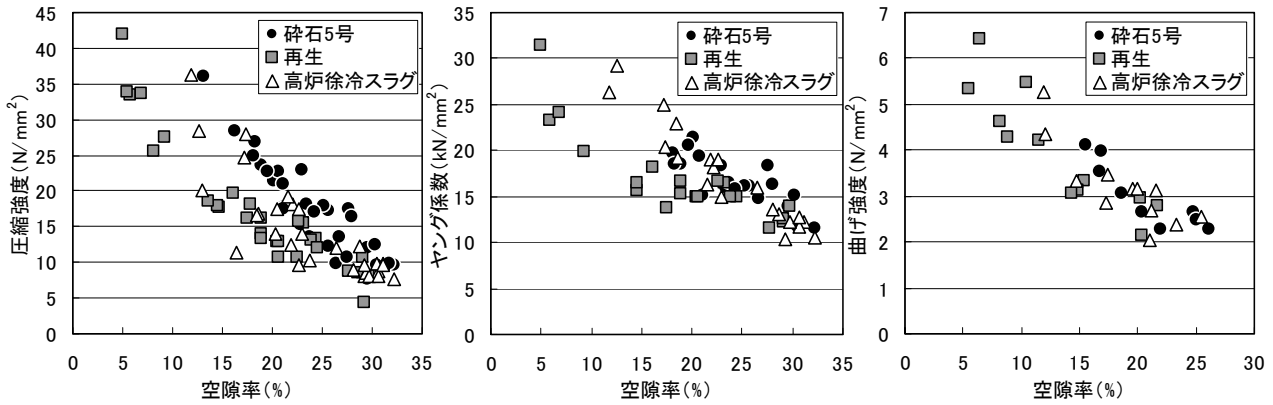
調合	粗骨材種類	W/C (%)	目標空隙率 (%)
1~5	硬質砂岩碎石	25	5, 10, 15, 20, 25
6~10	再生		0, 10, 15, 20, 25
11~15	高炉徐冷スラグ		0, 10, 15, 20, 25

注) W/C: 水セメント比, 結合材のフロー値は高性能 AE 減水剤で 200±10mm になるように調整した

## 2.3 実験結果および考察

今回、目標空隙率の算出には JIS A 1104 に準拠して測定した骨材の実積率を使用した。そのため、型枠接触面における骨材の配列の乱れによって実積率が低下するせき板効果<sup>2)</sup>の影響を受け、作製した供試体で実測した空隙率は目標空隙率より高い値を示した。そこで、以下は、実測した各供試体の空隙率と各物性値の関係について考察を行った。

図 1 に圧縮強度と空隙率の関係を示す。図より、再生骨材および高炉徐冷スラグ骨材を使用した場合、硬質砂岩碎石を使用したものと比較して、高空隙率側では同一空隙率における圧縮強度にあまり差はみられないが、低空隙率側では低下する傾向にある。ポーラスコンクリートの圧縮応力下における破壊のメカニズムを考えると、高空隙率の場合のような骨材の接点を拘束する結合材が少なく結合材強度が相対的に小さくなる場合、結合材のせん断破壊が破壊の



図一 1 圧縮強度と空隙率の関係 (材齢 28 日) 図一 2 ヤング係数と空隙率の関係 (材齢 28 日) 図一 3 曲げ強度と空隙率の関係 (材齢 28 日)

支配的要因となるため、骨材強度などの影響を受け難い。一方、低空隙率の場合のような接点を拘束する結合材量が多く強度が相対的に大きくなる場合、骨材の圧縮割裂破壊が支配的になり、骨材の強度などの影響を受けやすくなる。本実験結果は、その傾向があらわれたものと考えられる。しかしながら、ポーラスコンクリートの実用強度が  $10\sim 20\text{N/mm}^2$  程度であることを考えれば、その低下量は調合の修正により十分に補うことが可能な程度であることがわかる。

図一 2 にヤング係数と空隙率の関係を示す。図より、ヤング係数と空隙率の関係は圧縮強度の場合と同様の傾向にあることがわかる。したがって、ヤング係数も骨材の影響を受けやすことがわかる。

図一 3 に曲げ強度と空隙率の関係を示す。図より、曲げ強度と空隙率の関係は、圧縮強度の場合と異なり、骨材種類による差が小さいことがわかる。これは、ポーラスコンクリートのマトリックスは最密充填された粗骨材が点と点で接合された状態であり、力はその接点を介して伝達され、圧縮の場合、骨材強度や硬さの影響を受けやすいが、曲げの場合、接点の結合材、または骨材と結合材の界面の破壊が終局状態の決定要因となるため、骨材強度の影響を受け難いものと考えられる。

以上を総合して、力学特性の面で再生骨材と高炉徐冷スラグ骨材は、ポーラスコンクリート用粗骨材に十分に利用可能であることがわかる。

### 3. 耐久性に及ぼす影響 (シリーズ 2)

#### 3.1 使用材料および調合

ポーラスコンクリートの使用材料は、表一 1 と同様である。表一 3 に調合を示す。ポーラスコンクリートの結合材としては、セメントペーストよりモルタルの方が乾湿による膨張収縮が小さく、モルタルを使用した方が耐久性が高いとされている<sup>1)</sup>。そこで、今回は粗骨材に碎石を使用した場合について結合材をモルタルとセメントペーストの 2 条件としたものを作製し、結合材の種類による耐久性の検討も行った。また、レディーミクストコンクリートで作製した普通コンクリートについても乾湿繰返し試験を行い、ポーラスコンクリートと比較検討した。結合材をセメントペーストとしたものは、水セメント比を 25%、目標空隙率を 15% とし、モルタルとしたものは水セメント比、砂セメント比および目標空隙率をそれぞれ 25%、1.0 および 15% で一定とした。

表一 3 調合 (シリーズ 2)

調合	粗骨材種類	W/C (%)	S/C	目標空隙率 (%)
N	レディーミクストコンクリート (呼び強度 18)			
C-P	硬質砂岩碎石	25	1.0	15
C-M	硬質砂岩碎石			
R-M	再生			
S-M	高炉徐冷スラグ			

注) W/C: 水セメント比, S/C: 砂セメント比, 結合材のフロー値は高性能 AE 減水剤で約 190mm になるように調整した

### 3.2 実験方法

供試体作製方法は、シリーズ1と同様である。

乾湿繰返し試験は、20℃水中養生材齢7週以上経過した供試体を用いて行った。試験条件は、日本コンクリート工学協会ポーラスコンクリートの乾湿繰返し試験方法（案）<sup>1)</sup>に準拠し、図-4に示すように40℃乾燥72時間、20℃水中24時間、40℃乾燥48時間、20℃水中24時間を2サイクル（1週）とし、全30サイクル（15週）行った。乾燥は乾燥炉（40±2℃）、水中は水槽（20±2℃）を使用し、各条件への移行は供試体を移動させることで行った。同試験方法（案）では、劣化の進行の判定を相対動弾性係数の計測により行うことになっているが、本実験では2、8、16および30サイクル終了時の水中浸漬が終了した各調合3体の供試体を圧縮および曲げ強度試験に供し、圧縮強度、ヤング係数、曲げ強度および曲げタフネスを求めた。なお、各強度試験方法は、シリーズ1と同様である。

### 3.3 実験結果および考察

表-4に実験結果を平均値で示す。曲げタフネスは、破断時点までの曲げ荷重-圧版間変位曲線より算出した。表中の水中の欄は、30サイクルと同期間20℃水中養生を継続した供試体の強度試験結果である。乾湿繰返し試験は、未水和セメントが多く残っている場合、そのセメントの水和による強度変化の影響を受けることが指摘されている<sup>3)</sup>。開始時と水中養生を継続したものを比較すると、空隙率によるばらつきはみられるが、大きな増減はなく、水和反応による影響は考慮しなくてもよいと考えられる。

図-5に圧縮強度、図-6にヤング係数の経時変化を実験開始時の値に対する相対比で示す。圧縮強度において粗骨材種類による影響についてみると、N（普通コンクリート）とC-M（碎石+モルタル）は30サイクル終了時においてもあまり強度低下がみられないが、R-M（再生+モルタル）が約15%、S-M（高炉徐冷スラグ+モルタル）が約30%の強度低下が認められ、使用する粗骨材により乾湿繰返しに対する抵抗性が

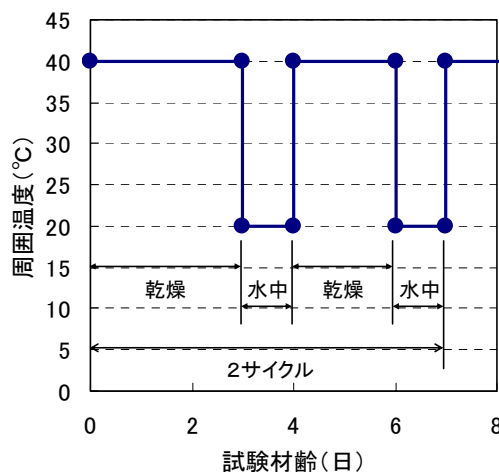


図-4 乾湿繰返し試験条件

表-4 実験結果（シリーズ2）

調合	サイクル数	Va (%)	Fc (N/mm <sup>2</sup> )	E (kN/mm <sup>2</sup> )	Va' (%)	Fb (N/mm <sup>2</sup> )	Fbt (kN・mm)
N	0	/	35.9	28.2	/	5.12	5.78
	2	/	35.8	26.3	/	5.17	5.88
	8	/	34.3	25.4	/	5.19	7.18
	16	/	32.9	26.2	/	5.33	5.84
	30	/	34.1	25.6	/	5.22	6.43
	水中	/	37.0	29.8	/	4.75	5.77
C-P	0	21.3	20.2	19.6	14.4	4.30	6.73
	2	19.8	17.2	16.2	15.1	4.15	5.89
	8	18.9	17.3	17.0	13.0	3.86	4.23
	16	19.3	17.5	12.5	14.6	2.76	2.89
	30	20.8	13.5	6.37	14.2	2.16	2.23
	水中	18.8	20.4	20.8	13.9	3.89	5.27
C-M	0	23.7	11.9	15.6	22.0	3.01	4.63
	2	24.5	11.4	13.4	23.0	2.66	2.91
	8	23.5	11.2	13.8	23.0	2.17	2.24
	16	25.0	10.9	13.2	21.9	2.40	2.18
	30	23.9	12.0	12.1	23.1	1.74	1.41
	水中	24.5	12.2	16.1	22.9	2.91	3.22
R-M	0	21.3	10.8	13.2	21.0	2.50	3.02
	2	20.6	11.7	13.0	21.6	2.27	2.61
	8	20.5	10.0	11.1	21.7	2.16	2.30
	16	20.3	10.3	10.7	19.8	2.07	2.01
	30	20.6	9.1	6.93	21.5	1.71	1.67
	水中	20.2	13.0	15.6	21.7	2.91	3.90
S-M	0	17.2	19.9	20.7	17.2	3.81	4.53
	2	18.8	17.0	15.5	16.3	4.01	5.53
	8	18.6	15.9	15.1	16.7	3.70	4.22
	16	18.7	14.1	15.0	16.2	3.69	5.18
	30	18.4	14.1	7.43	16.7	3.30	3.45
	水中	17.9	18.5	19.7	15.4	3.65	5.70

注) Va: 圧縮強度試験用供試体の空隙率, Fc: 圧縮強度, E: ヤング係数, Va': 曲げ強度試験用供試体の空隙率, Fb: 曲げ強度, Fbt: 曲げタフネス

異なり、碎石、再生、高炉徐冷スラグの順に乾湿繰返しに対する抵抗性が高いことがわかった。また、C-MとC-P（碎石+ペースト）の結合材の違いで比較すると、梶尾らの報告<sup>4)</sup>と同様にモルタルの方がペーストより乾湿繰返しに対する抵抗性が高いことが示された。ヤング係数については、圧縮強度と同様の傾向にあるが、その低下量は圧縮強度より著しいことがわかる。

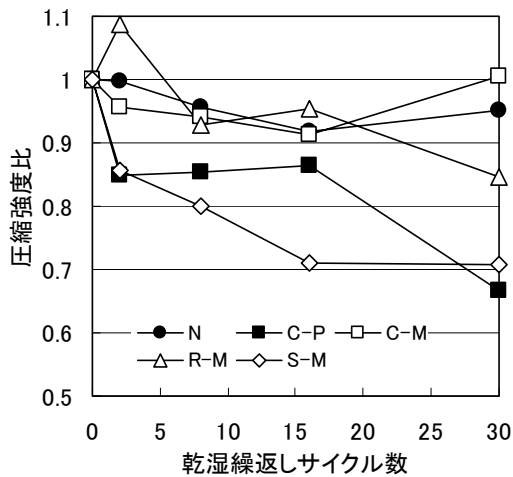


図-5 圧縮強度の経時変化

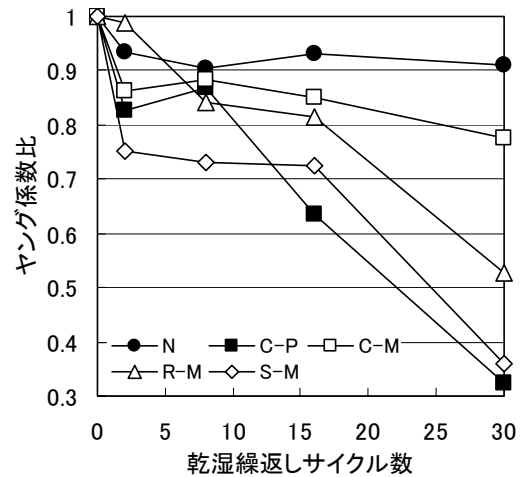


図-6 ヤング係数の経時変化

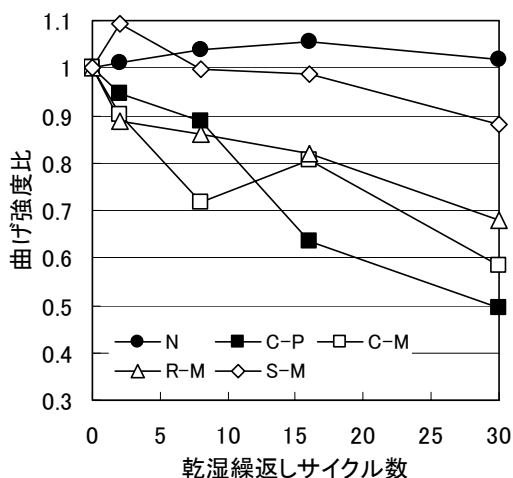


図-7 曲げ強度の経時変化

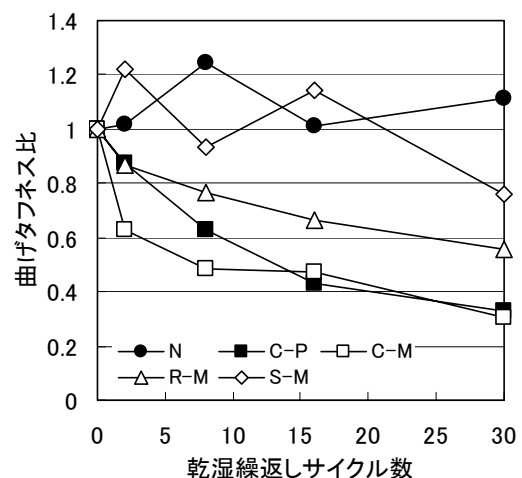


図-8 曲げタフネスの経時変化

図-7に曲げ強度、図-8に曲げタフネスの経時変化を実験開始時の値に対する相対比で示す。曲げ強度において、普通コンクリートは圧縮強度と同様に乾湿繰返し30サイクル終了時においても強度低下は認められない。ポーラスコンクリートについては、圧縮強度と同様に低下傾向にあるが、高炉徐冷スラグ骨材を使用したものの強度低下が最も小さく、砕石を使用したものが最も大きな強度低下を示し、圧縮強度の場合と異なる傾向を示した。また、結合材の違いを比較すると、圧縮強度の場合のような大きな差はみられず、曲げ強度に関しては結合材の違いによる影響は少ないものと考えられる。曲げタフネスに関しては、曲げ強度と同様の傾向を示した。

粗骨材の種類によって乾湿繰返しによる劣化の程度が圧縮と曲げで異なる原因としては、骨

材が結合材に供給する水分量が影響しているものと考えられる。図-9は表乾状態の各粗骨材500グラムを40℃で乾燥させ、その質量減少量を水分放散量として求めたものである。図より、硬質砂岩砕石より再生骨材および高炉徐冷スラグ骨材の水分放散量は非常に多く、乾燥初期では再生骨材より吸水率の小さな高炉徐冷スラグ骨材の方が水分放散量が多いことがわかる。乾燥条件下のポーラスコンクリートは、表面の結合材から乾燥が進行するが、それと同時に内部の骨材から水分が供給される。上記の水分放散量は、結合材への水分供給量に比例すると考えられる。そのため、水分放散量が特に乾燥初期に多い骨材は、結合材の急激な乾燥を妨げ、結合材および骨材界面の劣化の進行を抑制するものと考えられる。つまり、上述のポーラスコンクリートの圧縮と曲げの破壊メカニズムの違い

を考慮すれば、初期の水分放散量が小さな硬質砂岩碎石の場合、圧縮強度の低下が小さいことから骨材の劣化はあまり進行していないが、結合材への水分供給量が少ないため、結合材および骨材界面の劣化は進行し、結果として曲げ強度の低下が大きくなったものと考えられる。一方、初期の水分放散量が大きな高炉徐冷スラグ骨材の場合は、逆の結果になったと考えられる。したがって、骨材の水分の供給速度は、今回の実験結果の傾向をうまく説明することができ、乾湿繰返しに対する抵抗性に変化を生じさせる一要因であると考えられる。その他、再生骨材に付着するモルタルの性状や、骨材の強度および収縮性状も影響すると考えられ、この点について、今後検討する必要がある。

また、今回の実験結果では、ポーラスコンクリートは普通コンクリートより乾湿繰返しによる強度低下を生じやすいという結果となったが、今回の乾湿繰返し試験は供試体を移動する方法で行ったため、温度勾配が急激であり、耐久性試験条件としては厳しいことが予想される。梶尾ら<sup>4)</sup>が乾湿繰返し試験では温度勾配の影響が大きいと指摘しているように、今回の実験結果がどの程度の促進暴露に相当するののかということに関しては現時点では明らかとなっておらず、この点についても今後検討する必要がある。

#### 4. まとめ

再生および高炉徐冷スラグ骨材をポーラスコンクリート用粗骨材として使用した場合における各種力学特性および耐久性に及ぼす粗骨材の影響を把握することを目的として、圧縮強度試験、曲げ強度試験および乾湿繰返しによる耐久性試験を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 再生および高炉徐冷スラグ骨材は、硬質砂岩碎石を使用したものと比較して、圧縮強度や曲げ強度が低下するが、その低下量は調合の修正で補うことが可能な範囲であり、強度特性面では十分に利用可能である。
- (2) 再生や高炉徐冷スラグ骨材は硬質砂岩碎

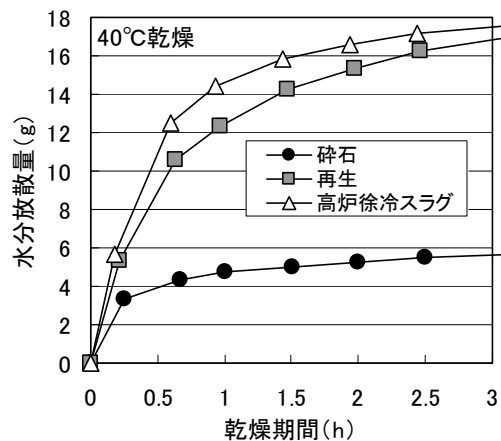


図-9 骨材の水分放散速度の比較

石を使用したものと比較して、圧縮強度に関する乾湿繰返し抵抗性は劣るが、曲げ強度に関する乾湿繰返し抵抗性は逆に高いことが明らかになった。

今回、ポーラスコンクリートの乾湿繰返しに対する抵抗性を検討したが、耐久性評価として、その他に凍結融解や耐磨耗性なども挙げられ、ポーラスコンクリートの耐久性を総合的に評価するには、それらの検討を行う必要がある。

#### 謝辞

本実験において大分大学工学部福祉環境工学科清原千鶴助手並びに遠矢義秋技官、同大学院生三島剛君、藤田純君らに御助力賜りました。また本実験に使用した高炉徐冷スラグ骨材は(株)製鉄鉱業大分より提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書、日本コンクリート工学会、2003.5
- 2) 越健ほか：せき板効果を取り除くことによるポーラスコンクリートの透水試験方法の改善、コンクリート工学年次論文集、Vol.23, No.1, pp.157-162, 2001.6
- 3) 平居孝之ほか：乾湿繰返しによる短繊維補強コンクリートの耐久性試験に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.56, pp.641-648, 2002
- 4) 梶尾聡ほか：ポーラスコンクリートの乾湿繰返し抵抗性に関する研究、ポーラスコンクリートの設計・施工法とその適用例に関するシンポジウム論文集、pp.139-142, 2003.5