

# 論文 二酸化炭素ガスを吸収したポーラスコンクリートの圧縮強度と細孔容積

加地 貴<sup>\*1</sup>・小川洋二<sup>\*2</sup>・島 弘<sup>\*3</sup>・中村秀三<sup>\*4</sup>

要旨：ポーラスコンクリートの配合および養生条件を変化させて促進炭酸化させ、二酸化炭素ガス吸収特性、圧縮強度、セメントペースト部分の細孔容積の相互関係について検討を行った。その結果、二酸化炭素ガス吸収特性は配合や養生条件によって影響を受け、二酸化炭素ガス吸収量の増大とともに、細孔容積が減少することを確認した。また、二酸化炭素ガスの吸収の程度が異なることによるセメントペースト部分の細孔容積率とポーラスコンクリートの圧縮強度との関係は、水和反応の進行程度が異なることによる両者の関係と等しいことが明らかになった。

キーワード：ポーラスコンクリート、二酸化炭素ガス、圧縮強度、細孔容積

## 1. はじめに

コンクリートの炭酸化は、コンクリート構造物中の鉄筋の腐食につながるため、コンクリートに対して悪影響をおよぼすものとされてきた。しかし炭酸化によって、セメントの水和生成物が炭酸カルシウムとしてコンクリートの細孔中に析出し、組織を緻密にするため、コンクリート自身の強度は増大するという報告もある[1~4]。

一方、細骨材を用いず、セメントペーストと粗骨材とからなるポーラスコンクリートは、表面の凹凸や内部にまで連続した粗大な空隙を有するため、表面積が大きいという特徴から、様々な機能を持たせたコンクリートの研究、開発が行われている[5,6]。

コンクリートの炭酸化とポーラスコンクリートを組み合わせ、ポーラスコンクリートを用いて二酸化炭素ガス（以下  $\text{CO}_2$ ）を吸収させると、ポーラスコンクリートの物性の向上が期待できる。著者らは、これまでポーラスコンクリートの  $\text{CO}_2$  吸収特性と物性変化について研究を行ってきた[7~9]。しかし、ポーラスコンクリートの  $\text{CO}_2$  吸収量と強度との関係、およびそのメカニズムは明確ではない。そこで本研究では、それらの関係を明らかにするため、ポーラスコンクリート中のセメントペースト部分の細孔容積変化を調査し、ポーラスコンクリートの  $\text{CO}_2$  吸収特性および圧縮強度との関係について考察を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験要因と測定項目

本研究の実験要因は、ポーラスコンクリートの配合と養生環境とした。配合としては水セメント比を3水準設定し、養生環境としては  $\text{CO}_2$  養生以前の初期養生を3水準、 $\text{CO}_2$  養生時の相対湿度を2水準設けた。実験条件を表-1に示す。測定項目は、ポーラスコンクリートの  $\text{CO}_2$  吸収量と圧縮強度、セメントペーストの  $\text{CO}_2$  吸収率と細孔容積とした。

\*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

\*2 徳島大学助手 工学部建設工学科（正会員）

\*3 徳島大学助教授 工学部建設工学科，工博（正会員）

\*4 秩父小野田（株）セメント・コンクリート研究所研究員，M.Build（正会員）

## 2. 2 使用材料と配合

セメントは、CO<sub>2</sub>吸収源である水酸化カルシウム生成量の多い、早強ポルトランドセメントを使用した。骨材は、粒径5~10mmの硬質砂岩碎石（比重2.50、吸水率3.18%）を使用した。ポーラスコンクリートの配合は、まず粗骨材量を実積率から求め、詰められた粗骨材の間の空隙をセメントペーストで所定の空隙率になるまで充填するという考えに基づいて設計した。ポーラスコンクリートの配合を表-2に示す。

## 2. 3 供試体

ポーラスコンクリートはセメントと粗骨材とを30秒間空練りし、水を加えて90秒間を練り混ぜた。そして所定の空隙率になるように配合から算出した質量をφ10×20cm円柱供試体に突き固めて成形した。また、ポーラスコンクリートの細孔構造を調査するためのセメントペーストは、180秒間練り混ぜた後、4×4×16cmの三連型わくに成形し、脱型後モルタルカッターを用いて、0.5×0.5×16cmの棒状に切断した。これは、ポーラスコンクリートの骨材を覆うセメントペーストの厚さにできるだけ近い状態で養生を行うためである。

## 2. 4 養生

養生は、CO<sub>2</sub>養生以前の初期養生条件およびCO<sub>2</sub>養生時の相対湿度を変化させて設定した。初期養生条件は、①成形後、封かん養生（20℃、24時間）し、脱型した後に直ちにCO<sub>2</sub>養生を開始するもの（即脱）、②成形後、20℃の前養生期間3時間、温度上昇期間3時間、最高温度65℃での等温期間4時間の蒸気養生（養生サイクル24時間）を行い、脱型した後にCO<sub>2</sub>養生を開始するもの、③成形後、封かん養生（20℃、24時間）し、脱型した後に水中養生（20℃、7日間）、乾燥（20℃、相対湿度65%、24時間）を行いCO<sub>2</sub>養生を開始するものの3水準を設定した。CO<sub>2</sub>養生は、CO<sub>2</sub>濃度、温度、相対湿度を一定値に制御できる密閉型養生槽で行った。CO<sub>2</sub>吸収の効果を検討するため、恒温室内における気中養生（20℃、相対湿度65%）、またはCO<sub>2</sub>を吸収させないようにビニールで密封してCO<sub>2</sub>養生槽内で養生を行う比較水準も設けた。

## 2. 5 試験方法

ポーラスコンクリートは、表面からの深さ方向におけるCO<sub>2</sub>吸収量の分布が一定であることが確かめられている[10]。そこでポーラスコンクリート供試体の直径方向に厚さ1cmで切り出し、上下5cmを取り除いてCO<sub>2</sub>吸収量測定用試料とした。コンクリート試

表-1 実験条件

配合条件		養生条件				
空隙率 (%)	水セメント比 (%)	初期養生	CO <sub>2</sub> 養生条件			比較養生
			CO <sub>2</sub> 濃度 (%)	温度 (°C)	相対湿度 (%)	
20	25	即脱	20	20	50	気中養生
	35					
	40	即脱 蒸気養生 水中養生		30	55	密封養生
	35					
				95		

表-2 ポーラスコンクリートの配合

骨材実積率 (%)	空隙率 (%)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
			W	C	G
55	20	25	110	439	1404
		35	131	373	1404
		40	139	347	1404

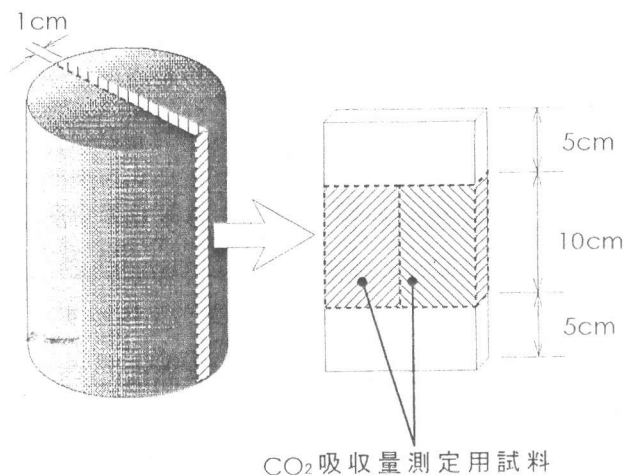


図-1 CO<sub>2</sub>吸収量測定用試料の切り出し方

料の切り出し方を図-1に示す。試料は乾燥(105℃, 24時間)させた後、微粉碎して、酸素気流中燃焼-赤外線吸収法によって炭素含有量を測定した。ポーラスコンクリートのCO<sub>2</sub>吸収量は、コンクリート1 m<sup>3</sup>が吸収した炭素量として表した。セメントペーストのCO<sub>2</sub>吸収率においても同様の方法により炭素含有量を測定し、試料質量に対する含有炭素質量の割合で表した。セメントペーストの細孔容積は、所定期間CO<sub>2</sub>養生を行った試料を24時間アセトンに浸漬して水和を止め、D-乾燥した後、水銀圧入法によって測定した。そして、セメントペースト体積に対する6 nm~2 μm細孔容積の割合を細孔容積率とした。

### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1 CO<sub>2</sub>吸収特性

水セメント比を変化させたポーラスコンクリートのCO<sub>2</sub>吸収量の経時変化を図-2に示す。この図よりCO<sub>2</sub>の吸収は水セメント比が大きいくほど速いことが分かる。これは、水セメント比が大きいくほどポーラスコンクリートを構成するセメントペースト中の細孔が多く、ペースト中でのCO<sub>2</sub>の拡散が容易であるためと考えられる。

養生条件を変化させたポーラスコンクリートのCO<sub>2</sub>吸収量の経時変化を、図-3に示す。これよりCO<sub>2</sub>の吸収は、初期養生の影響においては、CO<sub>2</sub>養生の初期において即脱、蒸気、水中の順に速いが、CO<sub>2</sub>養生期間が進むにつれてその差は小さくなっている。また相対湿度においては、55%の方が95%より速いことが分かる。初期養生による影響は、CO<sub>2</sub>養生の初期では、蒸気養生や水中養生を行ったものは、水和が進行し、セメントペーストの組織を緻密化し、CO<sub>2</sub>の拡散を抑制していることが考えられる。しかし、水和が進行しているものほどCO<sub>2</sub>と反応する水和生成物量は多いため、CO<sub>2</sub>養生期間が長くなるにつれて、初期養生によるCO<sub>2</sub>吸収量の差が小さくなっていくと考えられる。相対湿度は、コンクリート中の含水量に影響し、相対湿度が高い場合は、ペースト中の細孔が水で満たされ、細孔中へのCO<sub>2</sub>の拡散を妨げていると考えられる。

以上より、CO<sub>2</sub>養生の初期においてポーラスコンクリートがCO<sub>2</sub>を吸収する速度は、

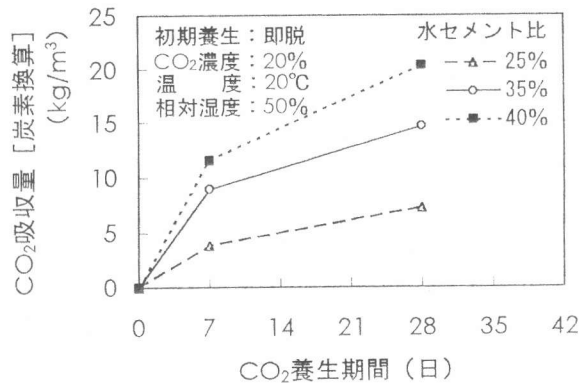


図-2 ポーラスコンクリートのCO<sub>2</sub>吸収量経時変化への水セメント比の影響

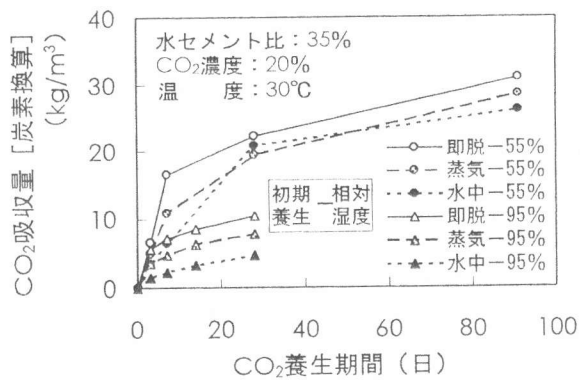


図-3 ポーラスコンクリートのCO<sub>2</sub>吸収量経時変化への初期養生、相対湿度の影響

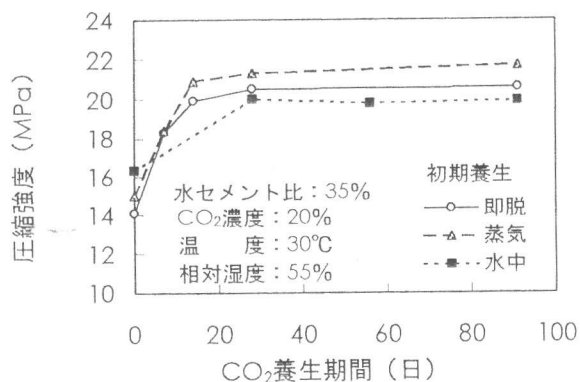


図-4 ポーラスコンクリートの圧縮強度経時変化への初期養生の影響

CO<sub>2</sub>の拡散の容易さの影響を大きく受けることが明らかになった。

### 3. 2 圧縮強度

初期養生を変化させ CO<sub>2</sub> 養生を行ったポーラスコンクリートの圧縮強度経時変化を図-4に示す。これより、CO<sub>2</sub> 養生の開始前では、水中、蒸気、即脱の順に強度は大きくなっているが、CO<sub>2</sub> 養生を行うとその順番は入れ替わり、即脱および蒸気養生のものは水中養生のものに比べ、強度の増加量が大きいことが分かる。これは CO<sub>2</sub> 養生の初期における CO<sub>2</sub> の吸収速度の傾向と一致している。CO<sub>2</sub> 養生時の相対湿度を変化させたポーラスコンクリートの圧縮強度経時変化を図-5に示す。初期養生は即脱のものを示している。これより相対湿度95%は密封より若干の強度増加が見られるのに対し、相対湿度55%では強度の増加が顕著に認められ、その増加量は約2 MPaであった。相対湿度55%では、95%や密封に比べ水和の進行は遅いことが考えられるが、この結果は炭酸化により強度が水和反応以上に増加していることを示している。この密封養生と比較して相対湿度55%、95%の順に強度増加している傾向は、前述した CO<sub>2</sub> 吸収量の増加傾向と一致している。初期養生に蒸気養生、水中養生を行ったものについても同様の傾向が認められた。

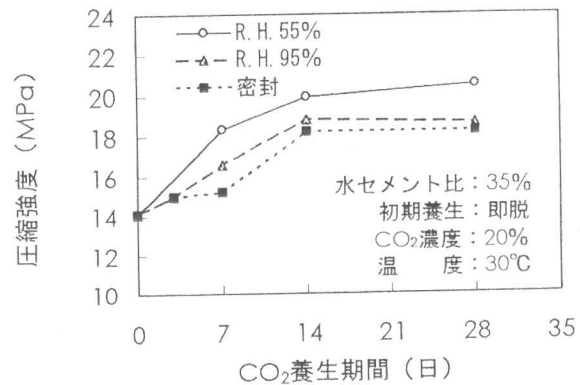


図-5 ポーラスコンクリートの圧縮強度経時変化への相対湿度の影響

### 3. 3 細孔容積

初期養生を変化させたセメントペーストの細孔容積率経時変化を図-6に示す。この図より、CO<sub>2</sub> 養生の開始時での細孔容積は即脱、蒸気、水中の順に大きい。これは図-4の圧縮強度の大小に対応しており、初期養生による水和の進行程度を表していると考えられる。CO<sub>2</sub> 養生を行うと早期に細孔容積率の急激な減少がおり、細孔容積が減少する速度は CO<sub>2</sub> を吸収する速度および圧縮強度の変化に対応している。CO<sub>2</sub> 養生時の相対湿度を変化させたセメントペーストの細孔容積率経時変化を図-7に示す。この図より、相対湿度95%で CO<sub>2</sub> 養生を行ったものは、密封養生のものとほぼ等しく細孔容積率が推移し、相対湿度55%で CO<sub>2</sub> 養生したものの細孔容積率は密封養生よりも小さく緻密な構造になっていることが分かる。この傾向は、初期養生に蒸気養生、水中養生を行ったものについても同様に認められ、この結果は圧縮強度の増加傾向に対応している。

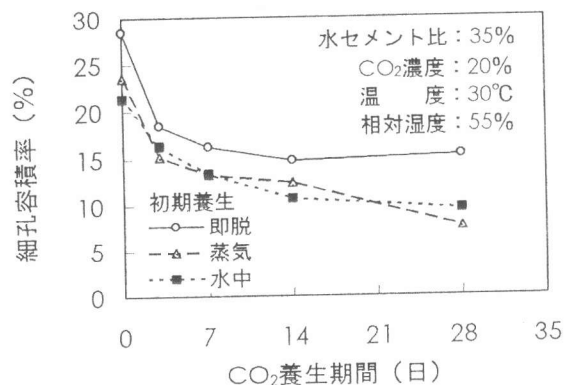


図-6 細孔容積率経時変化への初期養生の影響

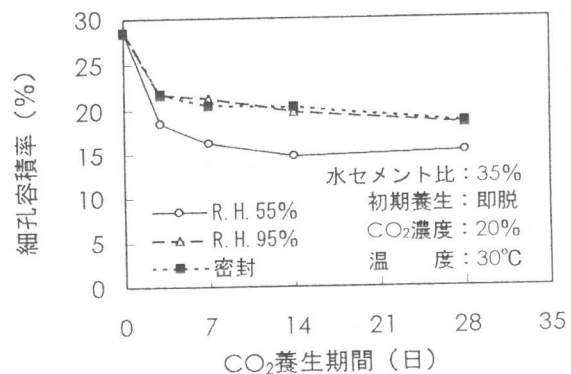


図-7 細孔容積率経時変化への相対湿度の影響

初期養生を変化させたセメントペーストの細孔閉塞率の経時変化を図-8に示す。この図より、細孔閉塞率は図中の曲線のように変化し、どの初期養生の場合でもCO<sub>2</sub>養生7~14日以降の細孔閉塞率の変化は横這いに近いことがわかる。細孔閉塞率は、CO<sub>2</sub>養生開始時の細孔容積率に対する、各CO<sub>2</sub>養生期間での比較養生とCO<sub>2</sub>養生との細孔容積率の差の割合で表しており、炭酸化を要因とする細孔の閉塞率を表している。そしてグラフの傾きが大きいほど細孔の閉塞速度が大きいことを示している。実験結果より、本研究の条件ではCO<sub>2</sub>養生7~14日前後までの炭酸化による細孔の閉塞速度が大きいことが分かる。

### 3.4 CO<sub>2</sub> 吸収特性、細孔容積および圧縮強度の関係

セメントペーストのCO<sub>2</sub>吸収率と細孔容積率の差との関係を図-9に示す。細孔容積率の差は、各CO<sub>2</sub>養生期間における、CO<sub>2</sub>養生を行ったセメントペーストと比較養生を行ったセメントペーストの細孔容積率の差で表した。これは、水和の影響を除き、炭酸化のみの影響による細孔容積率の変化量を表している。図中の実線および破線は比較養生にそれぞれ気中養生、密封養生を行ったもののCO<sub>2</sub>吸収率と細孔容積率の差との関係を直線回帰したものである。この図より比較養生に密封養生を行っているものは、気中養生を行っているものには比べ回帰直線の傾きが小さくなっている。これは、比較養生に密封養生を行ったものは、密封養生の方がCO<sub>2</sub>養生より相対湿度が高く、水和による細孔の減少量が大きいと考えられ、細孔容積率の差で表すと過剰に差し引いているためであると考えられる。しかし、CO<sub>2</sub>吸収率が増加すると細孔容積率は減少し緻密化する傾向は認められ、CO<sub>2</sub>吸収率と細孔容積率の差との関係は比較養生に気中養生を行った直線に近い挙動を示すと考えられる。

配合の等しいセメントペーストの細孔容積率とポーラスコンクリートの圧縮強度との関係を図-10に示す。図中の直線は、両者の関係を直線回帰したものである。この図より、セメントペーストの細孔容積率の減少にともなってポーラスコンクリートの圧縮強度は増加しており、両者の間に相関が認められる。この結果は、ポーラスコンクリートはCO<sub>2</sub>を吸収することによりセメントペースト部分の細孔容積率が減少し、それにもともって圧縮強度は増加するという、CO<sub>2</sub>

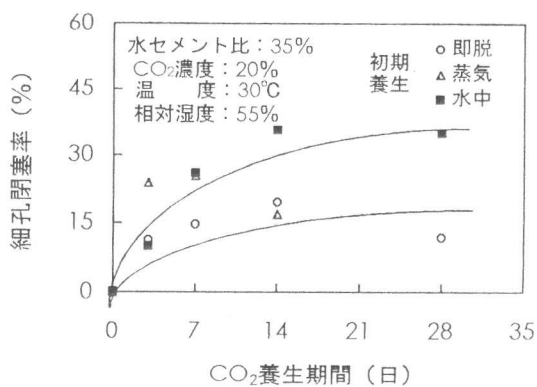


図-8 細孔閉塞率の経時変化

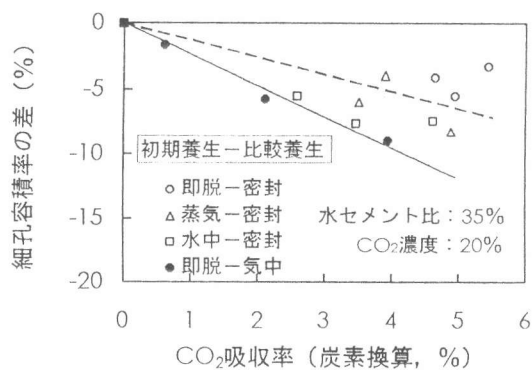


図-9 セメントペーストのCO<sub>2</sub>吸収率と細孔容積率との関係

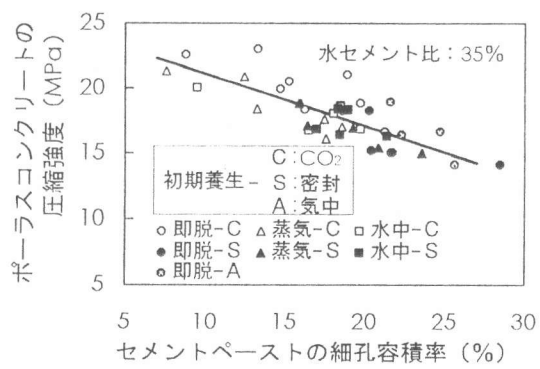


図-10 セメントペーストの細孔容積率とポーラスコンクリートの圧縮強度との関係

の吸収による強度増加メカニズムを示している。また、炭酸化を行っていない密封養生および気中養生のものについても同一直線上付近にプロットされている。この結果より、配合が等しい場合、CO<sub>2</sub>の吸収の程度の違いによるセメントペーストの細孔容積率とポーラスコンクリートの圧縮強度との関係は、水和反応の進行程度の違いによる両者の関係と等しいといえる。

以上より、ポーラスコンクリートの配合・養生条件～CO<sub>2</sub>吸収特性～細孔容積変化～強度変化の一連の関係が、定性的にはあるが明らかになった。

#### 4. まとめ

ポーラスコンクリートの水セメント比、初期養生およびCO<sub>2</sub>養生時の相対湿度を変化させて実験を行い、そのCO<sub>2</sub>吸収特性、圧縮強度、セメントペースト部分の細孔容積の相互関係について考察した。その結果を以下に示す。

- (1)ポーラスコンクリートがCO<sub>2</sub>を吸収する速度は、水セメント比、初期養生、CO<sub>2</sub>養生時の相対湿度により異なる。
- (2)ポーラスコンクリートがCO<sub>2</sub>を吸収する速度は、CO<sub>2</sub>養生の初期にはCO<sub>2</sub>の拡散の容易さの影響が大きい。
- (3)CO<sub>2</sub>を吸収すると、水和反応以上にセメントペースト中の細孔容積が減少し、ポーラスコンクリートの圧縮強度は増加する。
- (4)炭酸化による細孔の閉塞速度は、CO<sub>2</sub>養生期間7～14日前後までが大きい。
- (5)同一配合の場合、CO<sub>2</sub>の吸収の程度の違いによるセメントペーストの細孔容積率とポーラスコンクリートの圧縮強度との関係は、水和反応の違いによる両者の関係と等しい。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、徳島大学の河野 清教授には終始ご指導いただきました。また秩父小野田(株)セメント・コンクリート研究所の金子 勝氏には実験に多大なご協力いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 松里広昭, 船戸已知雄, 山崎之典: 炭酸化したセメント硬化体の強度と微細構造, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.592-597, 1992.12
- 2) 炭酸化研究委員会報告書, 社団法人日本コンクリート工学協会, 1993.3
- 3) 鈴木康弘, 金井謙介, 五十畑達夫: 炭酸化反応によるセメント硬化体の物性の向上, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.52-57, 1993.12
- 4) Cahyadi, J.H. and Uomoto, T.: Effect of Carbonation on Compressive Strength of Mortar, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.929-934, 1994.6
- 5) 玉井元治, 河合 章: 連続空隙を有するコンクリートに付着する海洋生物の遷移に関する研究, 土木学会論文集, No.452/II-20, pp.81-90, 1992.8
- 6) 河野 清, 木下義康, 天羽和夫, 金澤英爾: 魚礁用超硬練りコンクリートに対する配合条件の影響, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.446-451, 1992.12
- 7) 島 弘, 原田直樹, 河野 清: ポーラスコンクリートの二酸化炭素ガス吸収による強度増加, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.904-909, 1992.12
- 8) 小川洋二, 島 弘, 河野 清, 松尾保明: 炭酸ガスを吸収したポーラスコンクリートの物性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.531-536, 1993.6
- 9) 小川洋二, 加地 貴, 島 弘, 河野 清: ポーラスコンクリートの二酸化炭素吸収特性に及ぼす養生条件の影響, セメント・コンクリート論文集, No.48, pp.780-785, 1994.12
- 10) 小川洋二, 河野 清, 尾畑真由美, 中村秀三: 各種多孔質コンクリートの炭酸ガス吸収特性と物性変化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.717-722, 1994.6