

論文

[1088] 炭酸ガスを吸収したポーラスコンクリートの物性

小川洋二*¹・島 弘*²・河野 清*³・松尾保明*⁴

1. はじめに

大気中の二酸化炭素（以下CO₂）濃度が、年々増加の一途をたどっている主要原因のひとつとして、化石燃料の大量消費によるCO₂の排出があげられている。この排出されるCO₂を有効に固定・利用する方法は非常に難題であり、現在広い分野で技術開発が始まったばかりである[1]。

コンクリート工学において、CO₂を利用する方法のひとつとして、セメントの水和反応によって生じる水酸化カルシウムが、CO₂と反応して炭酸カルシウムに変化することによる炭酸化硬化反応を利用することが考えられる[2]。

コンクリートにCO₂を効率よく吸収させようとする、CO₂とセメントペーストが接触する面積が大きく、透気性のよいポーラスなコンクリートが適していると考えられる。一方、ポーラスコンクリートは、以前からその透水性、透気性、吸音性などの特長を活かして、道路舗装材や雨水浸透ます、都市景観材料などに適用されるなど機能性コンクリートとして注目されている。最近ではさらに、水質浄化用や魚礁としてなどにもその適用の可能性が広がっている[3]。

したがって、これらの2つの特長を組み合わせると、ポーラスコンクリートにCO₂を吸収させることによって、①CO₂の有効利用と②ポーラスコンクリート自身の特性の向上（強度増加、耐久性向上、親生物環境）につながる可能性が考えられ、筆者らは、ポーラスコンクリートのCO₂吸収特性とCO₂を吸収させることによっておこる物性の変化について研究を始めた[4]。

本研究では、ポーラスコンクリートの空隙率がCO₂吸収量におよぼす影響、およびCO₂吸収量と強度、弾性係数、耐海水性との関係について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験要因および実験項目

実験要因は、コンクリートの空隙率を取りあげた。実験項目は、CO₂吸収量の経時変化、CO₂を吸収したコンクリートの圧縮強度、静弾性係数および人工海水に対する耐久性の試験を行った。

2.2 使用材料および供試体

(1)使用材料

本研究では、通常のコンクリートから細骨材を除いた、セメント、水、粗骨材だけで形成されるポーラスコンクリートを対象にした。使用材料として、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。これは、より多くのCO₂を吸収させるために、セメントペースト中に水和生成物である水酸化カルシウムを多く生成させるためである。骨材は、セメントペーストとCO₂をできるだけ

*1徳島大学助手 工学部建設工学科 (正会員)

*2徳島大学助教授 工学部建設工学科, 工博 (正会員)

*3徳島大学教授 工学部建設工学科, 工博 (正会員)

*4徳島大学 工学部建設工学科

多く接触させるため、かつ空隙を多く確保させるため、単一粒径に近い5~10mmの硬質砂岩碎石（実積率54.8%、一部57.4%）を使用した。

(2)配合

本研究に用いたポーラスコンクリートの配合は、単位粗骨材容積を粗骨材の実積率より求め、粗骨材の間の空隙をセメントペーストが充てんしていくという考えに基づいて設計を行った。空隙量は、単位セメントペースト量によって変化させた。配合は、施工性がよく、材料分離が生じないもっとも最適な水セメント比として、予備実験によって定めた35%を一定条件において、空隙率を35, 25, 20%に変化させたものと、空隙率

20%一定条件において水セメント比を30, 40%に変化させたものの5通りである。コンクリートの配合と実験項目を表-1に示す。

表-1 コンクリートの配合と実験項目

W/C (%)	空隙率 (%)	単位量(kg/m ³)			CO ₂ 吸収量 経時変化	圧縮強度 弾性係数 7, 14, 28d	人工海水 に対する 耐久性
		W	C	G			
35	35	40	113	1459	○	○	
	25	106	301	1393	○	○	
	20	132	377	1393	○	○	
30	20	122	407	1393		○	○
40	20	126	314	1459		○	○

(3)供試体の作製および養生

試料は、締め固め不足あるいは超過を避けるため、示方配合から計算した所定の重量をφ10×20cmの円柱型枠に2層で詰め、各層ごとに突き棒で数回突き固めて作製した。コンクリートは打設後1日で脱型し、CO₂養生槽にて試験を開始した。なお、強度比較用としてCO₂を吸収させない供試体は、ビニールで厳重に密封したうえで同一環境下に供した。

2. 3 試験方法

(1)CO₂を吸収させる方法および吸収量測定方法

CO₂の吸収は、温度およびCO₂濃度を一定値に設定できる密閉型養生槽で行った。CO₂濃度は約20%、温度は30℃に設定した。湿度は95%である。CO₂設定値は、製鉄所高炉や石油火力発電所から排出される排ガス中のCO₂濃度と同程度である[5]。本実験では、これら産業排ガスによる炭酸ガス養生に適用できるようにすることも考慮して20%とした。CO₂吸収量の測定は、ガスボンベと養生槽の間にCO₂積算流量計を設置し、一定濃度に設定してある養生槽内に供給されたガス量をコンクリートのCO₂吸収量として算定した。

(2)強度および静弾性係数

所定の養生後、供試体の重量を測定したのち強度および静弾性係数を測定した。静弾性係数試験は、コンプレッソメータによって行った。

(3)耐海水性試験

所定の期間CO₂を吸収した供試体を人工海水に浸漬させて、湿潤4日、乾燥3日を1サイクルとする乾湿くり返し試験を行った。供試体は、水セメント比30%および40%、空隙率20%のコンクリートで、水準は、①CO₂を吸収していない、②7日吸収した、③28日吸収した、④比較のため終始水中養生した4種類である。なお、評価は、動弾性係数を測定して行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 CO₂吸収特性

図-1は、CO₂絶対吸収量の経時変化を示す。縦軸は単位容積あたりのCO₂吸収量（炭素換算）である。図-2は、縦軸に単位セメント量あたりのCO₂吸収量（炭素換算）をとり、各コンクリートのCO₂吸収効率の経時変化を示した。

これより、セメントペースト濃度が一定の時、CO₂の吸収は、養生直後から7日ごろまで急速に進むが、それ以後は緩慢になっている。CO₂の絶対吸収量は、空隙率の小さい、すなわち単位セメント量の多い配合のコンクリートが多くなっている。これは、生成水酸化カルシウム量がセメント量に比例することによって考えられるが、単位セメント量の差ほどには吸収量に開きがない。つまり空隙率によって吸収速度に差があり、絶対吸収量の差が縮まっていることがわかる。

図-2をみると、CO₂吸収効率は、空隙率35%が20%の約1.7倍、25%の約1.4倍程度上回っていた。このCO₂吸収効率は、本実験の条件では、各空隙率におけるCO₂と接触できる表面積の大きさに比例すると考えられる。そこで、ポーラスコンクリートの表面積を、径の等しい球を用いたモデルを考えて求めてみた。φ10mmのとき空隙率35、25、20%のポーラスコンクリートの表面積を算定すると、表-2のようになる[6]。コンクリートの空隙率の違いによるCO₂吸収効率の比と表面積の比との間には理論的には等しくなるはずであるが、実験結果を比較すると両者の間には差異が生じた。この理由としては、空隙率が小さくなるほどセメントペースト量が多くなるので、碎石間の特に狭いすき間を閉そくしやすくなるためと思われる。そのため内部空隙が連続性を失い空気と接触する面が減少し、CO₂吸収効率が低下していったと思われる。

碎石を用いたポーラスコンクリートでは、空隙率が小さくなるほど内部表面積は、理論値と離れていきやすくなると予想され、CO₂吸収量にも影響を与えると考えられる。

3. 2 圧縮強度

(1)CO₂吸収期間と強度

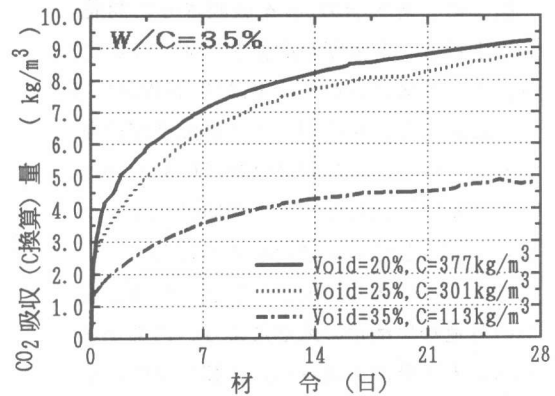


図-1 CO₂吸収量の経時変化

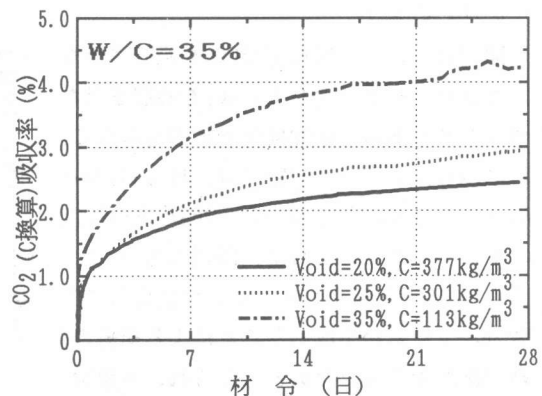


図-2 CO₂吸収率の経時変化

表-2 等球モデルによる表面積

充填形式	表面積 (cm ² /l)		
	コンクリートの空隙率 (%)		
	35	25	20
立方格子	2462	1924	1655
斜方格子	3239	2386	1959

図-3に、各配合のCO₂を吸収させた期間（以下材令）と強度の関係を示す。これより、ポーラスコンクリートはCO₂を吸収することによって、材令14日までは強度が増進する。しかし、それ以後は横ばいあるいは低下の傾向を示した。この傾向は水セメント比が変化してもほぼ同様であった。

強度が低下する原因は、ひとつには表層部の急速な炭酸化の進展により、内部からの水分の蒸発が促進され、水和反応による強度の増進を阻害した可能性が考えられる。また、珪酸カルシウム水和物の分解も指摘されているが、原因はいまだ明らかになっていない[7]。

図-4には、同一環境下でCO₂を吸収させないコンクリートに対して、CO₂を吸収させたコンクリートの圧縮強度の増加率を材令ごとに示した。今回の実験では、材令7日から14日にかけておおむね5%から20%程度の強度増加が示された。これは、既報にも示したようにCO₂と水酸化カルシウムが反応して炭酸カルシウムが生成したことによる組織の緻密化がおこったためと考えられ、本実験においてもその効果が確認できた。ただし、空隙率35%のコンクリートは、CO₂を吸収した効果が強度増加としてあらわれなかった。

(2)CO₂吸収量と強度

単位セメント量あたりのCO₂の吸収量（炭素換算）と強度増加率を図-5に示す。水セメント比が一定の場合、CO₂吸収量が単位セメント量の約2~2.5%までは、CO₂吸収効果が強度増加につながっているが、それ以上吸収すると強度は逆に減少する。つまり強度の増進につながるCO₂吸収量には限界量があると考えられる。空隙率35%のコンクリートは、養生開始後4日でこのCO₂吸収限界量に達していたため、強度試験を開始した材令7日以降では密封養生に対して強度増加がなかったと思われる。

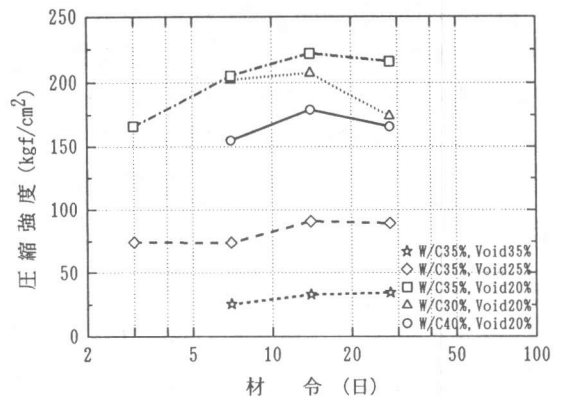


図-3 CO₂養生期間と強度変化

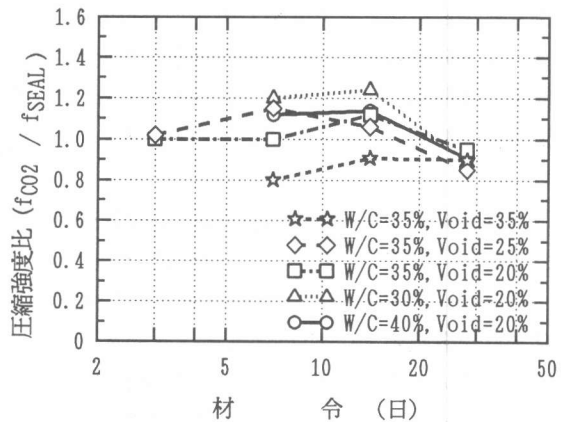


図-4 CO₂養生期間と強度増加率

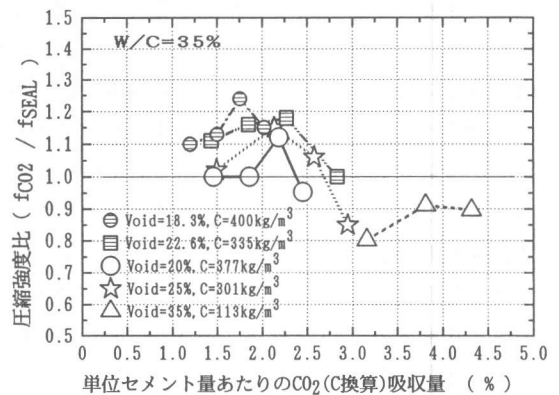


図-5 CO₂吸収割合と強度増加率

3.3 静弾性係数

図-6にCO₂を吸収させないコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す[8][9]。両者の関係は、コンクリートの単位容積重量1.9t/m³で求めた建築学会の推定値とおおむね一致した。CO₂を吸収させたコンクリートの場合、吸収量による静弾性係数への影響を、縦軸に建築学会推定式にあてはめた値と実測値の比をとり、横軸に単位セメント量あたりのCO₂吸収量（炭素換算）をとって図-7に示した。静弾性係数に対するCO₂吸収量の影響は、圧縮強度に対する影響ほどには明確にあらわれなかった。静弾性係数は、CO₂吸収による強度の増減に対応していた。

3.4 耐海水性

図-8に動弾性係数と試験サイクル数の関係を示す。CO₂を吸収させない供試体は、浸漬1サイクルから供試体表面にカルシウム分が溶出し始め、4サイクル目あたりから急速に動弾性係数が低下し始めた。これに対し、7日間あるいは28日間CO₂を吸収させた供試体の外観の状態（写真-1）はほとんど変化がなく、動弾性係数はほぼ横ばい状態になっていた。この結果から、CO₂をある程度吸収させることによって、海水に対する抵抗性は向上するといえる。この理由としては、セメントペースト表面部が炭酸化したことにより、組織が緻密化しているとともに、水酸化カルシウムを消費しているため、カルシウム分の溶出が抑制され、海水中の塩化物あるいは、硫酸塩に対して抵抗性が向上するためと考えられる。この結果から、魚礁用、護岸用コンクリートとしての適用は十分考えられる。また、海洋生物の着生には、アルカリ分が少ない方が生育しやすいとの報告もあり、CO₂を吸収させることによってさらに生物環境にとって好ましくなることも考えられる[6]。

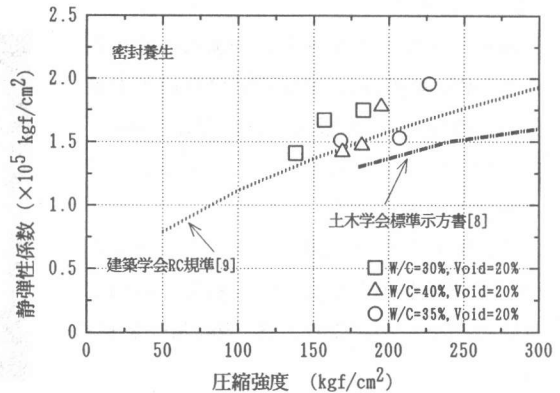


図-6 密封養生供試体の強度と静弾性係数

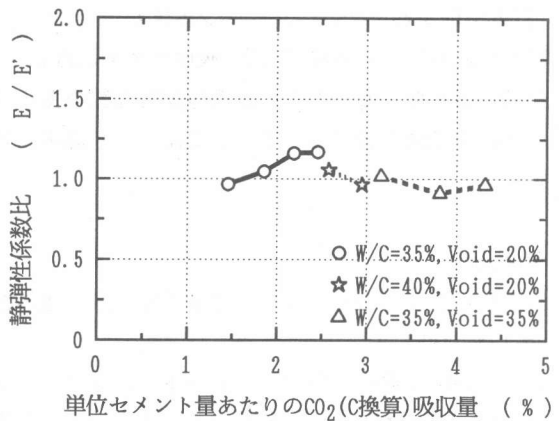


図-7 CO₂吸収割合と静弾性係数比

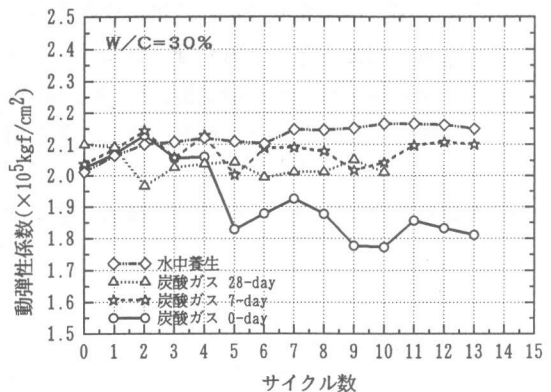


図-8 動弾性係数の経時変化

4. まとめ

ポーラスコンクリートの空隙率を変化させて、CO₂濃度20%、温度30℃の環境下で養生し、空隙率とCO₂吸収特性、および物性の変化について検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

(1)CO₂吸収量は、空隙率によって変化するが、空隙率が小さくなるにつれて、内部で空隙の閉そくがおこり、CO₂吸収量に影響を与える。

(2)本実験条件下でCO₂を吸収させると、水セメント比、空隙率に関係なく14日までは強度が増加した。それ以後の強度増進は横ばい状態になった。

(3)本実験条件下では、水セメント比が一定の時、強度の増進に影響をおよぼすCO₂吸収量には限界点があり、その点までのCO₂吸収量であれば強度増加に効果がある。

(4)CO₂を吸収させることによる静弾性係数の変化は、強度の増減に対応していた。

(5)CO₂を適度に吸収させることによって、海水に対する抵抗性は向上した。

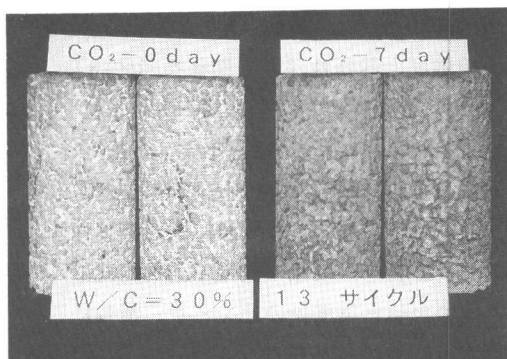


写真-1 耐海水性試験中の供試体外観

参考文献

- 1)白田利勝：炭酸ガス問題に関する国の取り組みと研究課題，セメント・コンクリート，No. 530，pp. 1-8，1991. 4
- 2)坂井悦郎：炭酸化反応，セメント・コンクリート，No. 551，pp. 72-79，1993. 1
- 3)河野 清・木下義康・天羽和夫・金澤英爾：漁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
- 4)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
- 5)小宮山宏編：地球環境のための化学技術入門，オーム社，1992
- 6)玉井元治・河合 章・来田秀雄：まぶしコンクリートの海中における性質と水質浄化の可能性，セメント・コンクリート論文集，No. 46，pp. 880-885，1992
- 7)小林一輔：コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断，森北出版，1991
- 8)土木学会：コンクリート標準示方書，1986
- 9)日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準，1975