

論文

[1118] 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

小川洋二*¹・河野 清*²・尾畑真由美*³・中村秀三*⁴

1. はじめに

地球環境問題が世界中でクローズアップされている昨今、環境への配慮がこれからのすべての生産活動において重要課題となってきている。本研究では、それらのうち地球温暖化現象の原因のひとつとされている二酸化炭素（以下CO₂）に着目した。

コンクリートは、本来CO₂を吸収する性質がある。セメントの水和反応によって生じた水和物が、CO₂と反応して炭酸カルシウムなどに変化すると同時にアルカリ性を失っていく。従来この現象は中性化と呼ばれ、鉄筋コンクリートにとって鉄筋の防錆上好ましくなく、いかにしてこれを防ぐかという研究がなされてきている。

一方、コンクリートがCO₂を吸収することによる物性の変化は、現在までいくつかの報告がされているが、いまだ明確にはなっていない[1]。筆者らは、限定された条件下ではあるが、コンクリートの性能が向上するという結果を得ている[2]。また最近では、鉄筋に代わって腐食をしない炭素繊維、アラミドなどの新素材の開発、研究も進んできている。したがって、コンクリートがCO₂を吸収するという性質をうまく活かせば、CO₂の有効利用につながる可能性があると考えられる。しかし、コンクリートに積極的にCO₂を吸収させるという視点からの研究は少ない。

そこで本研究では、CO₂を吸収しやすい多孔質なコンクリートを作製し、その炭酸ガス吸収特性や物性の変化について検討することを目的とした。本研究では、コンクリート自身の要因として、空隙構造、空隙量を取りあげ、炭酸ガス吸収特性との関係について評価を行い、さらに吸収後の圧縮強度、静弾性係数の変化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構造および空隙量とした。空隙構造は、気泡剤を用いて独立空隙を混入したものと、粗骨材にセメントペーストをまぶして連続空隙にしたものの2種類である。実験項目は、炭素含有率の経時変化と炭酸ガス吸収後のコンクリートの圧縮強度、静弾性係数の測定を行った。

2.2 使用材料および配合

(1)使用材料

使用材料を表-1に示す。セメントは、より多くのCO₂を吸収させるために、CO₂吸収源となる水酸化カルシウムを多く生成する早強ポルトランドセメントを使用した。骨材は、川砂と硬質砂

*1 徳島大学助手 工学部建設工学科 (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科, 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻

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

岩砕石を用いた。一部の配合（空隙率26%コンクリート）にのみ高炉スラグ骨材を用いたのは、高炉スラグ骨材の形状が多孔質であること、および成分にカルシウム分を多く保有するため、セメント以外にCO₂吸収源となるアルカリ供給源として期待したためである。

(2)配合

まぶしコンクリートの配合は、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した [3]。気泡コンクリートの配合については、基準となる空隙率が0%の配合を、空隙率が20%となったときの単位セメント量が、まぶしコンクリートと同じになるように決定した。空隙率は気泡剤の混入量によって調整し、6、10、22、26%の4種類を設定した。

また、まぶしコンクリートを除いた各コンクリートのスランプ値は、18±2.5cmとなるように混和剤を添加した。表-2は、各コンクリートの空隙率を練り上がり後重量法によって測定し、基準配合から算定したものである。各配合によって単位セメント量は異なるが、単位容積重量に対するセメントの重量割合はほぼ同一である。

(3)養生方法

各コンクリートは、φ10×20cmの円柱型枠に均等に打設し、十分に強度を発現させるために脱型後6日間20±3℃の水の中にて前養生を行った。その後、CO₂濃度20%、温度30℃、湿度55%に設定した炭酸ガス養生槽にて養生を開始した。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 [4]。本実験では、これらの産業排ガスを利用することができるように考慮した。

2.3 試験方法

炭素含有率の測定は、炭酸ガス養生開始からカウントした材齢ごとに各供試体を取り出し、図-1のように試料のサンプリングを行い、乾燥、微粉碎した後、酸素気流中燃焼-赤外線吸収方式によるカーボン分析装置にて行った。各コンクリートの炭酸ガス吸収量は、材齢0日（前養生終了時）での値を基準として測定時点までの増量分とした。圧縮強度試験および静弾性係数の測定は、前養生終了時と材齢4、8、13週に行った。

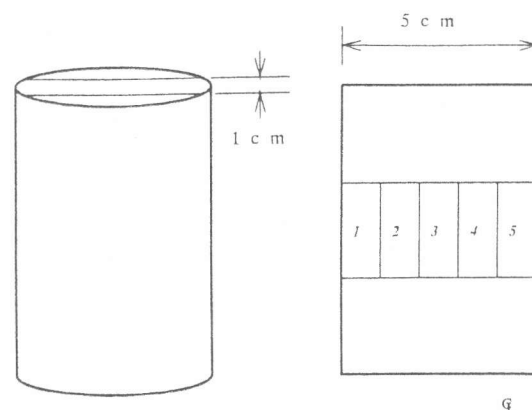


図-1 試料のサンプリング

表-1 使用材料

使用材料		比重	吸水率(%)
セメント	早強ポルトランド	3.14	
粗骨材	硬質砂岩砕石	2.56	2.04
	高炉スラグ砕石	2.41	4.50
細骨材	川砂	2.61	1.73
	高炉スラグ砕砂	2.66	3.10

表-2 コンクリートの配合

コンクリートの種類	W/C (%)	空隙率 (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
No Fines	35	20	131	373	0	1403
Air-6%	35	6.1	154	438	1348	330
Air-10%	35	9.7	148	421	1296	318
Air-22%	35	21.6	129	366	1125	275
Air-26%	35	26.1	121	345	1081	245

3. 実験結果および考察

3. 1 炭酸ガス吸収特性

(1) 空隙量の影響

図-2は、空隙率6%の供試体深さ方向と炭素含有率の経時変化を示す。このようにカーボン分析を行うことによって、供試体表面から内部方向への炭酸ガスの浸透状況が明らかになる。

空隙率が通常のコクリートに近い6%の場合、ごく表面部分においてのみ炭酸化が進行した。そして、炭酸化期間が91日となっても内部への炭酸ガスの拡散は認められなかった。空隙率が10%になると、炭酸化期間が1か月頃から表面から少し内部に入った位置(表面から2cm)まで炭酸ガスが浸透していることが確認できた。これは、混入気泡量が増加するにつれて、気泡どうしの連結の可能性が高くなったことに起因し、内部への炭酸ガスの浸透が容易になったためと理解される。しかし空隙率10%では、それ以上内部への炭酸ガスの浸透は見られなかった。

さらに空隙率を22%まで増加させた場合には、図-3に示すように、養生初期の段階から供試体中心部まで炭酸ガスが拡散していることが確認できた。そして、表面から中心部の炭素含有率の勾配は、ほぼ一定のまま材齢とともに炭酸化が進行した。この傾向は、空隙率が26%の場合も同様であった。これは前述のように、空隙量の増加によるモルタル部分のポーラス化により炭酸ガスの拡散が容易になったことと、微細な独立気泡の多量な存在により、比表面積が増加して炭酸化が一層進行したと考えられる。以上から、気泡混入による空隙率が6~10%までは、炭酸化は表面部分でしかおこらないが、20%を越えると短期間に中心部までかなりの炭酸化が進行することが明らかになった。

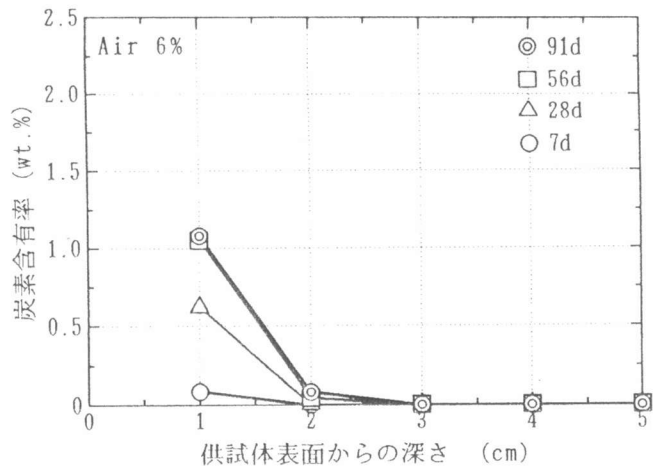


図-2 空隙率6%コクリートの炭素含有率経時変化

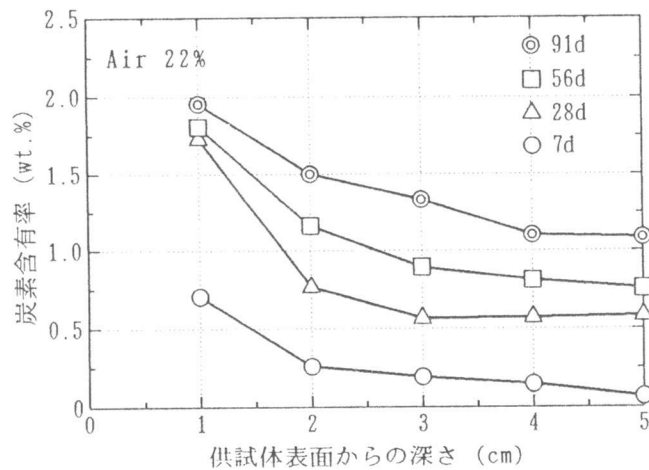


図-3 空隙率22%コクリートの炭素含有率経時変化

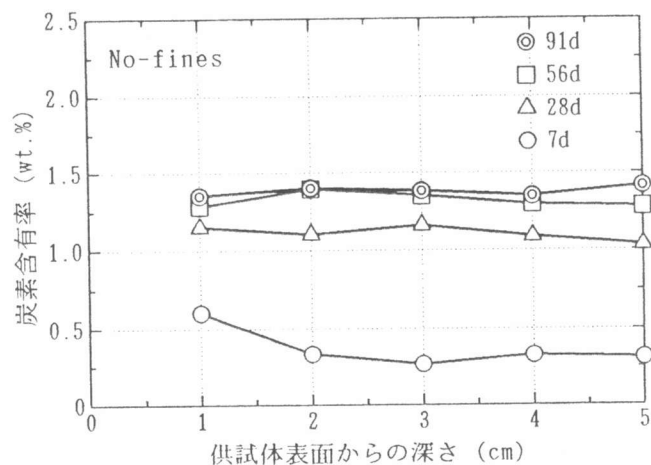


図-4 まぶしコクリートの炭素含有率経時変化

(2) 空隙構造の影響

コンクリート中の空隙構造が異なる場合の炭酸ガス吸収特性の相違を、まぶしコンクリートと気泡コンクリートの炭素含有率の経時変化から考察した。図-4に、まぶしコンクリートの炭素含有率経時変化を示す。

まぶしコンクリートは、気泡コンクリートと異なる連続した空隙を有するために、炭酸ガス養生初期から供試体中心方向にほぼ均一に炭酸化が進み、表面部と中心部の炭素含有率の差は小さいことが分かる。そして炭酸化の進行が、28日以降かなり緩やかになることが特徴である。

図-5には、各コンクリートの最も炭酸化の進む表面部での炭素含有率を示す。本実験では、各配合の単位容積重量あたりのセメント重量比が同一であるため、炭素含有率は、そのコンクリートにおける炭酸化

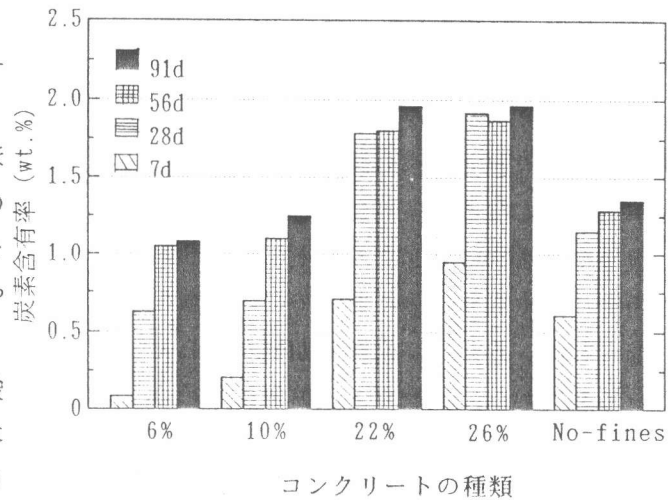


図-5 表面部の炭素含有率

の受けやすさの程度を示すと考えられる。これによると、炭酸ガス養生初期の段階では、概ね混入気泡量が2倍になることによって、炭酸化は3倍程度しやすくなることがいえる。また、まぶしコンクリートのようにマクロな空隙を多量に付与させることによって、独立気泡を10~20%混入させたものと同程度の炭酸化しやすさを有することになることが明らかである。つまり、連続空隙を有する場合、マクロな空隙の付与による表面積の増大により、炭酸ガスの吸収を急速に行うことが可能であるが、ペースト内部への進行は1か月程度で緩慢になるため、長期的にはセメントペースト部分に微細な空隙を増加させた方が、炭酸ガスの吸収すなわち炭酸化は継続されると考えられる。

また、骨材に高炉スラグ骨材を用いた空隙率26%の炭酸ガス吸収特性は、表面部は約1か月で炭酸化が緩慢になり、以後は内部の炭酸化が急速に進行して、91日までに表層部と中央部の炭素含有率がほぼ同等、すなわち均一に炭酸化された状態になる。炭素含有率の最大値が空隙率22%の最大値と同等であることから、本実験の範囲では、高炉スラグ骨材自身が新たな炭酸ガス吸収源としては寄与していなかったと考えられる。

3. 2 炭酸ガス吸収量の比較

図-6に各コンクリートの炭酸ガス養生期間と単位容積あたりの炭酸ガス吸収量の関係を示す。図の縦軸は、炭素量に換算してある。炭酸ガス吸収量(炭素換算)は、各供試体の炭素含有率の分布を曲線近似して求めたものである。

各コンクリートの炭酸ガス吸収源をセメント水和物と仮定して、炭酸化反応式から可能炭酸ガス吸収量を求めて炭素換算する

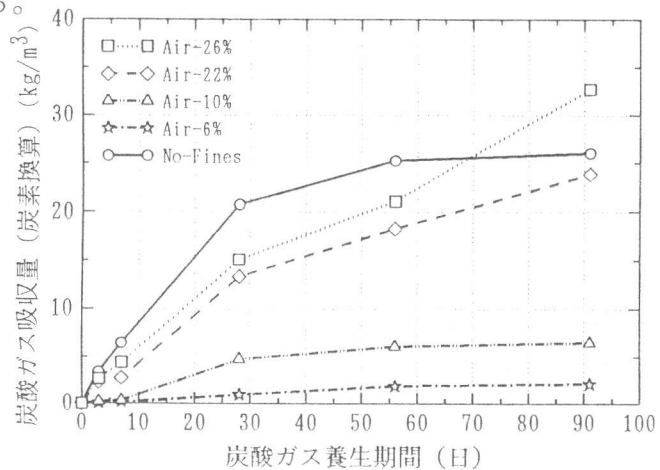


図-6 各コンクリートの炭酸ガス吸収量

と、単位セメント量が370kgの場合、45kg程度になる。まぶしコンクリートは、早期に急速に炭酸ガスを吸収し、炭酸ガス養生1か月で可能炭素吸収量の45%に相当する約20kg/m³を吸収することが推察される。また、同程度の空隙量を有する空隙率22%と比較して、材齢1か月では約1.5倍だが、3か月ではほぼ同等となった。

気泡コンクリートでは、炭酸化期間に比例して炭酸ガス吸収量が多くなる。空隙量の違いにより空隙率6～10%までは炭酸ガス吸収量は少なく、20%を越えると格段に炭酸ガス吸収速度が増加することが明らかである。空隙率26%では、3か月で可能炭素吸収量の約75%に相当する炭酸ガスを吸収した。

3. 3 圧縮強度および静弾性係数

(1) 炭酸ガス養生期間と強度変化

図-7は、気泡コンクリートの炭酸ガス養生期間と圧縮強度の関係を示す。また、標準養生における材齢0日に対する強度増進率を100としたときの、炭酸ガス養生下での強度増進率を表-3に示す。

この図より、気泡コンクリートにおいては、空隙量の多少にかかわらず、炭酸ガスを吸収することにより標準養生に比較して圧縮強度が増加することが認められた。また、炭酸ガス養生による強度の増進割合は、空隙率の多いものが大きくなる傾向がみられ、標準養生下での供試体と比較して最高で62%の強度増加がみられた。この理由としては、炭酸化により細孔部分が炭酸カルシウムで充てんされ構造的に緻密になったことや、水和物の細孔組織が改質され、新たに炭酸カルシウムなどによる組織の架橋などが形成されたことが考えられる。しかし、各配合ごとの炭酸ガス吸収率すなわち炭酸化率と強度発現との関係は、本実験では明確に表れなかった。

一方まぶしコンクリートは、気泡コンクリートと比較して強度の増進割合が少なかった。これは、まぶしコンクリートは、炭酸化期間28日以降の強度の増進がほとんどなく横ばい状態になったためである。まぶしコンクリートでは、炭酸化反応の大部分が早期におこり、表面部分のみで炭酸化が急速に進み、急激に反応が緩やかになってしまうため、セメントペーストの内部まで炭酸化が進行していかなくなる。また、骨材どうしが点で連結されているという構造的にも特殊であるため、セメントペーストの強度増加が、コンクリートとしての強度増加になりにくいことなどが理由として考えられる。

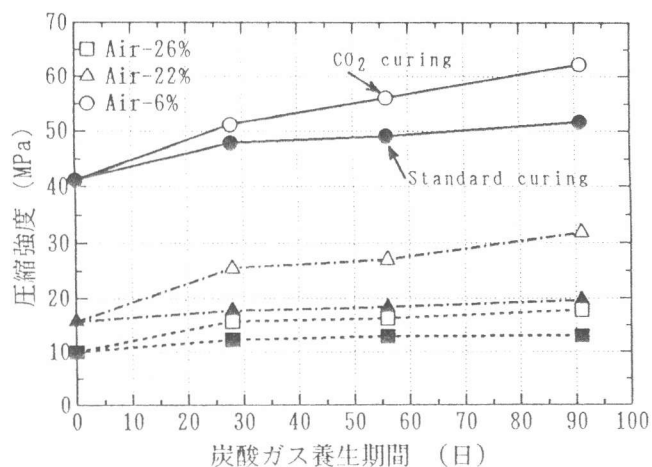


図-7 炭酸ガス養生期間と圧縮強度

表-3 炭酸ガス養生下での強度増進率

コンクリートの種類	炭酸ガス養生期間 (週)		
	4	8	13
Air-6%	107	114	121
Air-22%	144	147	162
Air-26%	129	127	138
No-Fines	116	106	106

(2) 静弾性係数

図-8に空隙率22%コンクリートの圧縮強度と静弾性係数との関係を示す。図中には、炭酸化したものと標準養生での値をプロットした。図中の直線は、コンクリートの比重を1.9として求めたACIの実験式による推定値である。これによると、コンクリートの炭酸化によって、圧縮強度と静弾性係数の関係に大きな変化は認められないといえる。また、他の気泡コンクリートの場合も同様な傾向を示し、ACI推定値よりも上回っていることから、本実験の範囲では、静弾性係数は炭酸化にかかわらず圧縮強度の変化によって影響されるといえる。

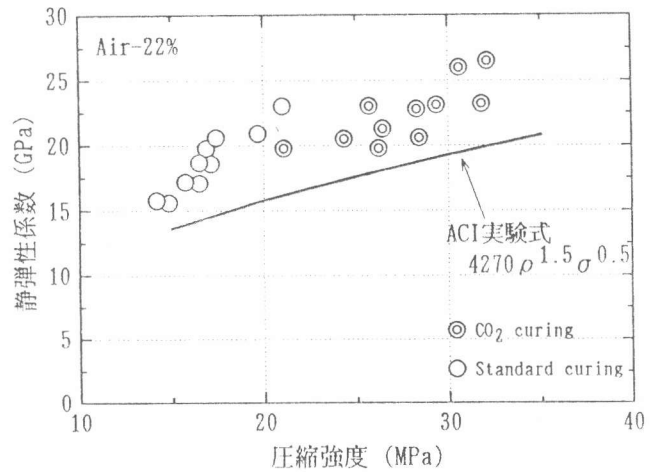


図-8 圧縮強度と静弾性係数

4. まとめ

空隙構造や空隙量を変化させて作製した各種の多孔質コンクリートを、炭酸ガス養生を行ってそれぞれの炭酸ガス吸収特性および圧縮強度、静弾性係数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) 気泡コンクリートの場合、気泡量が多くなるにしたがって炭酸化は起こりやすくなる。そして、空隙率が6~10%までは表面部分のみで反応がおこるが、20%をこえると短期間に内部までかなりの炭酸化が進行した。
- (2) 概ね混入気泡量が2倍になると、初期の炭酸化は3倍程度しやすくなった。
- (3) 内部まで連続空隙を有するまぶしコンクリートでは、早期から多量の炭酸ガスを吸収できる。
- (4) 気泡コンクリートでは、微細な空隙を有するため炭酸化が長期にわたって継続された。
- (5) 本条件下においては、多孔質コンクリートに炭酸ガスを吸収させた場合、圧縮強度は増加した。その増加割合は、標準養生下での増加割合に対して上回っていた。
- (6) 静弾性係数は、炭酸化が進行することにかかわらず、圧縮強度の変化によって影響される。

参考文献

- [1] 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
- [2] 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変化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.531-536，1993.6
- [3] 玉井元治・杉野守・芦田馨：連続空隙を有するポーラスコンクリートを用いた緑化に関する研究，コンクリート構造物の緑化に関するシンポジウム，pp.37-42，1993.9
- [4] 小宮山宏編：地球環境のための化学技術入門，オーム社，1992