

論文

[1093] コンクリートの炭酸化に関する研究

正会員 小林一輔 (東京大学生産技術研究所)

正会員○宇野祐一 (ショーボンド建設 技術研究所)

1. はじめに

コンクリートの炭酸化に影響を及ぼす要因として、これまでに、コンクリートの特性に関わるものとしてはセメントの種類、水セメント比、混和材の種類と添加量、空気量、施工(養生、締固め)などがあり、コンクリートが置かれる環境に関わるものとしては温度、湿度、CO₂濃度などがあることが明らかにされている。また、これらの要因効果を考慮した中性化速度の推定式も岸谷式をはじめとして数多く提案されている。

しかし、近年になってこれらの中性化速度式で推定した値に比べて、実際の構造物の中性化深さが異常に大きいことを指摘する報告が数多く出されるようになってきた¹⁾。したがって、従来より指摘されている要因の他に別の要因が存在し、これが炭酸化を促進していると考えられる。

一方、近年になってセメントの製造方法が湿式法より乾式法に変わり、アルカリ分を多量に含んだセメントが供給されるようになってきていることはよく知られている事実である。このような観点にたち、筆者らは既にコンクリートの炭酸化を促進する新しい要因としてセメントに含まれるアルカリ分ならびに孔隙水のpHとその移動があることをモルタル供試体を用いた炭酸化試験を通じて明らかにし、化学的、物理的考察を行っている²⁾。

本報告は、コンクリートを用いて促進炭酸化試験を行うことにより前報の結果を確認するとともに、セメント中のアルカリ分がコンクリートの炭酸化に及ぼす影響を従来より指摘されている水セメント比、養生条件、高炉水砕スラグ微粉末混入の影響と比較検討したものである。

2. 実験概要

実験に用いたセメントは、R₂O=0.31ならびに0.57%の普通ポルトランドセメントAおよびBである。その化学組成を表-1に示す。

表-1 セメントの化学組成

	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O
A	0.7	21.2	5.7	3.4	64.3	1.8	1.9	0.16	0.23	0.31
B	1.1	22.1	4.8	2.9	64.9	1.4	1.9	0.24	0.50	0.57

単位: wt%

なお、セメント中のアルカリ量を変化させるためにR₂O=0.57%のセメントにNaOHを添加して、等価Na₂O量を0.9, 1.2および1.5%に調整した。また、混和材としては、表-2に示すような化学組成を持つ高炉水砕スラグ微粉末(以下、高炉スラグと呼ぶ)を用い、セメント重量に対して30、50および70%をセメントに置換して混入した。

骨材は、粗骨材として最大粒径が20mmの秩父両神産砕石(砂岩)を、細骨材として大井川産川砂(砂岩)を用い、水は水道水を使用した。コンクリートの水セメント比は、40、50、60、70%の4種類とし、スランプが8cmになるように配合を定めた。表-3にその配合を

表-2 高炉スラグの化学組成

比重	粉末度 (cm^2/g)	ガラス化率 (%)	塩基度	化学分析 (wt%)						
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
2.92	3820	99.0	1.86	34.0	15.1	0.6	42.1	6.0	0.20	0.25

示す。

コンクリートは、打設1日後に脱型し、養生条件が炭酸化に及ぼす影響を調べるために、1) 温度20℃、相対湿度100%の霧室内に4週間(以下、湿潤と呼ぶ)、2) 同霧室内に1週間置いた後、温度20℃の室内に3週間(以下、湿潤+気中と呼ぶ)、3) 温度20℃の室内に4週間(以下、気中と呼ぶ)の3条件で養生を行った。

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (Kg/m^3)			
		W	C	S	G
40	43	196	490	731	997
50	45	196	392	802	1008
60	47	196	327	862	1000
70	49	196	280	917	983

養生を終了した供試体は、温度20℃で、相対湿度60%、CO₂濃度10%の促進炭酸化槽に所定の期間保存した後、炭酸化深さ測定に供した。

供試体は、φ10×20cmの円柱供試体で、一部孔隙水の移動をシミュレートするために供試体の中央部にφ8mmの円筒状の穴を設け、炭酸化期間を通じてpH13の水を供給した。

炭酸化深さは、供試体をφ10cmの破断面が得られるように割裂し、フェノールフタレイン1%エタノール溶液を吹き付け呈色させた後、非呈色部を炭酸化部として、画像解析装置を用いて炭酸化面積を測定し算出した。

3. 実験結果と考察

3-1. プレーンコンクリートの炭酸化

図-1、図-2および図-3は、それぞれ、養生条件が湿潤、湿潤+気中、気中の場合について、促進炭酸化16週におけるセメント中のR₂Oと炭酸化深さの関係を示したものである。図-1および図-2より、同一水セメント比においてはセメント中のR₂Oが増えるにしたがって炭酸化が促進されることが明らかであり、モルタルの試験結果²⁾と同様にコンクリートにおいてもセメント中に含まれるアルカリ分が炭酸化の促進要因であることがわかる。また、モルタルに比べるとコンクリートの方が総じて炭酸化が早く、R₂Oの促進効果が顕著に現れている。これは、コンクリートの場合、その組織がモルタルに比べて多孔質になるためと考えられる。例えば、粗骨材下面とセメント硬化体との間には空隙が形成されやすいことが知られており、炭酸ガスが粗骨材界面に沿って内部へ進入しやすくなることがあげられる。

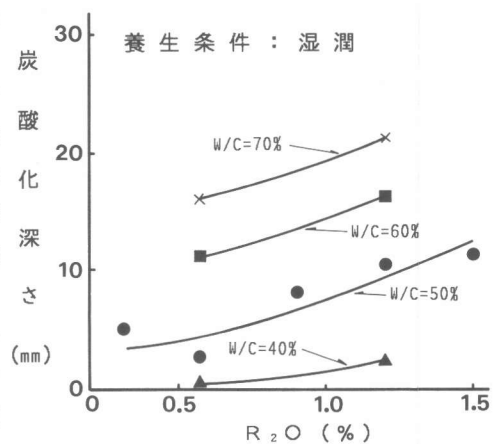


図-1 R₂Oと炭酸化深さの関係

ここで、注目される点は、気中養生を行った場合の結果である。図-3が図-1および図-2と

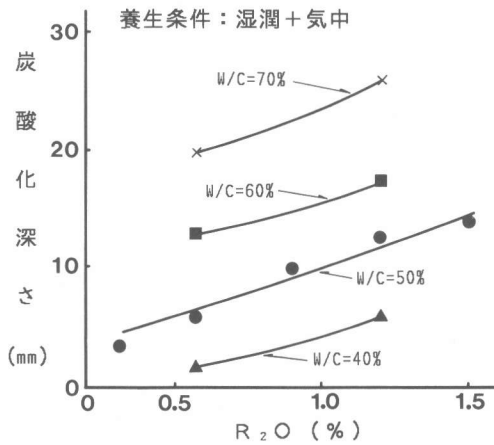


図-2 R₂Oと炭酸化深さの関係

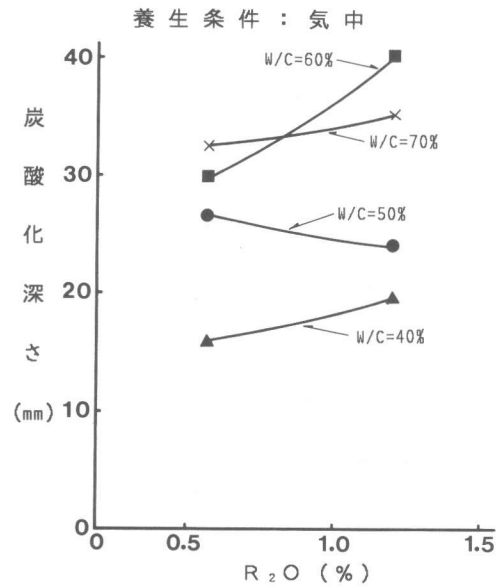


図-3 R₂Oと炭酸化深さの関係

異なる傾向を示している点である。図-3のような湿潤養生を全く行わないコンクリートが極端に早い炭酸化を示すのは、水和が不完全であるために、セメント硬化体組織が多孔質になっていることが原因であると考えられる。図-3に図-1および図-2のようなセメント中のアルカリ分による炭酸化促進効果がないのは、上述した空隙の要因が卓越しているためにセメント中のアルカリの影響が現れないためと考えられる。

一方、図-1より、従来から言われている水セメント比の要因効果とセメント中の R₂O の要因効果を比較してみると、例えば、R₂O=0.57%のセメントを用いて水セメント比70%にした場合に16mmの炭酸化が生じているが、R₂O=1.2%のセメントを用いると水セメント比を60%に下げても同等の炭酸化が生じていること、また、R₂O=0.57%のセメントでは、水セメント比60%の場合に10mmの炭酸化が生じているが、R₂O=1.2%を越えるセメントを用いると、水セメント比を50%に下げてもそれ以上の炭酸化が生じていることから、セメント中の R₂O の要因効果が水セメント比の要因効果よりも卓越していることがわかる。すなわち、水セメント比を下げても R₂O の高いセメントを用いると炭酸化はより促進されることがわかる。

また、写真-1に水セメント比60%を一例として取り

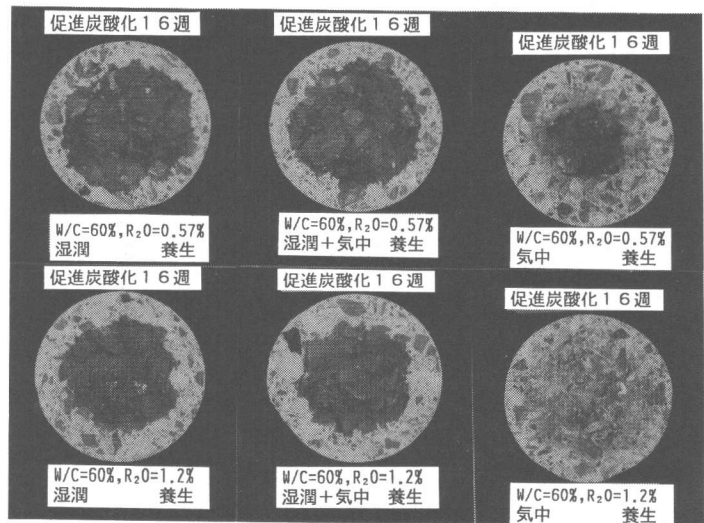


写真-1 R₂Oおよび養生条件の異なる供試体の炭酸化の様子

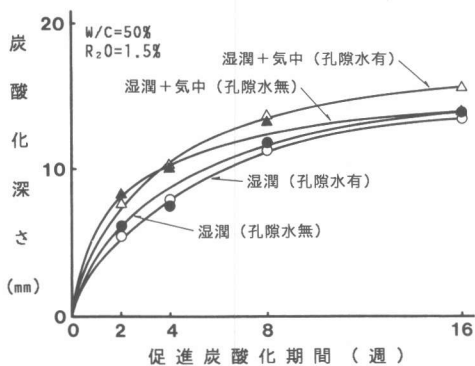


図-4 炭酸化期間と炭酸化深さの関係

上げ、各条件ごとに $R_2O=0.57\%$ および $R_2O=1.2\%$ における炭酸化の様子を示す。この写真よりセメント中の R_2O が炭酸化を促進することならびに養生条件が炭酸化に著しく影響することがわかる。特に、 R_2O が 1.2% のセメントを用いて湿潤養生を全く行わない場合には、炭酸化が供試体中心部にまで及んでいることがわかる。

図-4および図-5は、水セメント比が 50% で、 $R_2O=1.5\%$ ならびに $R_2O=0.57\%$ の供試体を例に取り、促進炭酸化期間と炭酸化深さの関係を孔隙水の移動の有無、養生条件の異なる供試体についてプロットしたものである。この2つの図を比較することにより、セメント中の R_2O が炭酸化期間を通じて炭酸化の促進要因となっていることがわかる。また、図-5より、気中養生の炭酸化が特に著しいことがわかる。ここでは、孔隙水の移動は、モルタルで行った試験結果²⁾と異なり、あまり顕著には現れていない。これは、供試体の大きさがモルタルに比べて大きいために、その効果がかなり減少しているためと思われる。

3-2. 高炉スラグ混入コンクリートの炭酸化

図-6は、促進炭酸化16週における R_2O と炭酸化深さの関係をスラグ置換率 50% を例にとり示したものである。この図より明らかなように、炭酸化は R_2O の増加にともなって促進されており、高炉スラグ混入コンクリートについてもセメント中の R_2O は炭酸化を促進する要因であることがわかる。

図-7および図-8は、高炉スラグ置換率と炭酸化深さの関係を示したものであり、各々、養生条件が湿潤、湿潤+気中の結果である。これらの図より、いずれの条件においてもセメント中の R_2O が高い場合を除いて、高炉スラグの置換率が増すにしたがって炭酸化が促進されることが明らかであり、既往の研究結果^{3) 4)}を裏付けている。本来、コンクリートに高炉スラグを混入すると潜在水硬性を持った高炉スラグ

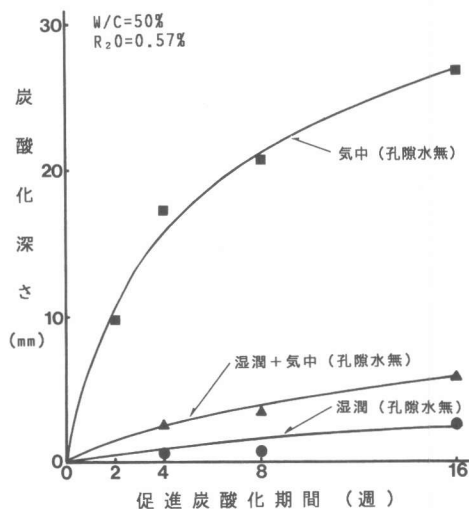


図-5 炭酸化期間と炭酸化深さの関係

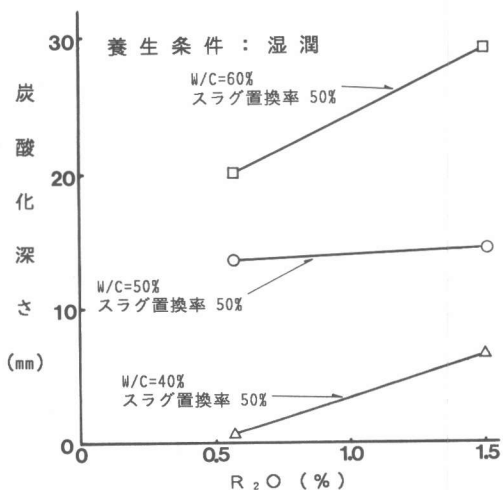


図-6 R_2O と炭酸化深さの関係

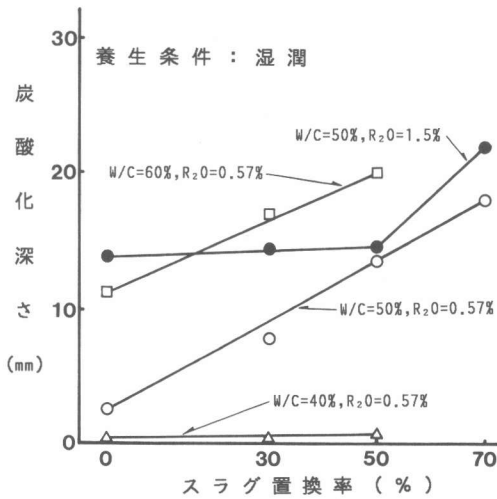


図-7 スラグ置換率と炭酸化深さの関係

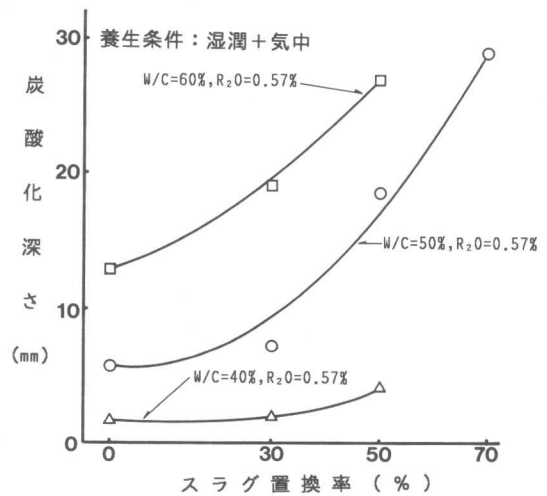


図-8 スラグ置換率と炭酸化深さの関係

がセメント水和生成物である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と二次的に反応し、その生成物がコンクリート中の空隙を埋めて組織が密になり、外部からの腐食因子の侵入を抑制するとされている。本結果において、炭酸化が高炉スラグの置換で促進されているのは、既に指摘がなされているように、高炉スラグによって普通ポルトランドセメントの相当量を置換するために結合材の CaO 量が当初より少ないこと⁵⁾、ならびに高炉スラグの反応によって水和生成物である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費され、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 総量が減少する⁴⁾効果が上記の効果より卓越しているためと考えられる。図-7で、セメント中の R_2O が1.5%の場合に高炉スラグ置換率の影響が現れていないのは、水溶性のアルカリを練り混ぜ時に多く添加しているために、高炉スラグの反応が当初より促進され、組織が緻密になっていると考えることで説明できるが、このことから推測すると、低アルカリセメントを用いた場合において、本実験のような4週間の湿潤養生とその後の湿度60%の炭酸化期間中で高炉スラグの反応がコンクリートの組織を緻密にするほど進行しているか否かについては疑問の余地が残り、更に検討の必要がある。図-9、図-10、図-11および図-12は、促進炭酸化期間と炭酸化深さの関係を示したものである。これらの図より、炭酸化は材令とともに進行していることがわかる。図-9より、湿潤+気中のような不十分な養生条件は、プレーンコンクリートで行った結果と同様に炭酸化を著しく促進することがわかる。ここで、注目すべきは、孔隙水の移動をシミュレートした供試体の挙動である。これらの図より、促進炭酸化初期は孔隙水の移動のない供試体の方が炭酸化が早い、材令とともに孔隙水の移動の効果が現れており、特に高炉スラグの置換率の高い場合にこの効果は顕著に現れていることがわかる。前報で孔隙水の移動が炭酸化を促進する要因となることをモルタル

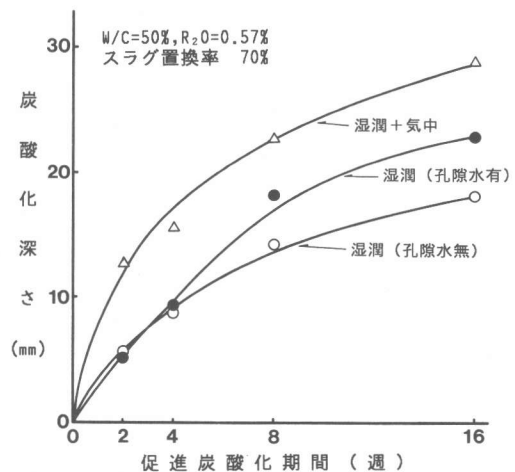


図-9 炭酸化期間と炭酸化深さの関係

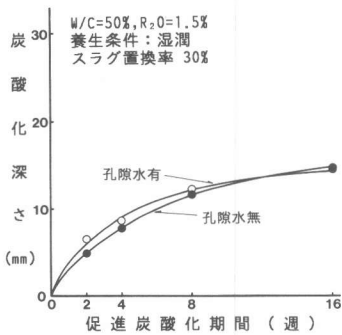


図-10 炭酸化期間と炭酸化深さの関係

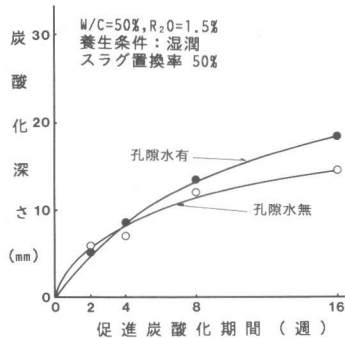


図-11 炭酸化期間と炭酸化深さの関係

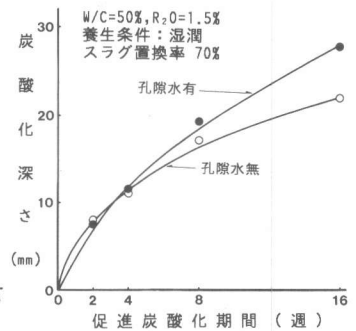


図-12 炭酸化期間と炭酸化深さの関係

供試体の炭酸化を通じて明らかにしている²⁾が、前項でプレーンコンクリートにおいて供試体の大きさがモルタルに比べて大きいために、孔隙水の移動が顕著な促進要因となっていないことを述べた。高炉スラグ混入コンクリートにおいても高炉スラグ置換率の低いものでは同様の結果となっているが、高炉スラグ置換率の高いコンクリートでは供試体の大きさを考慮に入れても孔隙水の移動が起こると炭酸化が促進されると考えられる。

4. まとめ

本実験の結果を要約すると以下ようになる。

- (1) セメント中のアルカリ分は、コンクリートの炭酸化を促進させる。また、このことは普通ポルトランドセメントを用いた場合のみならず、高炉水砕スラグ微粉末を混入したコンクリートについても炭酸化の促進要因となる。
- (2) セメント中のアルカリ分は、その量によっては、従来から指摘されている水セメント比の要因効果よりも卓越する要因となる。
- (3) コンクリート内部の孔隙水の移動は、炭酸化の促進要因となる。この効果は、特に、高炉水砕スラグの置換率を高くした場合に顕著に現れる。

[参考文献]

- 1) 例えば、石橋忠良・北後征雄：鉄筋コンクリート床版下面に施工した各種補修工法の効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9-1，pp429-434，1987
- 2) 小林一輔・宇野祐一：コンクリートの炭酸化とその評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10-2，pp431-436，1988
- 3) 依田彰彦・横室隆：各種セメントを用いたコンクリートの中性化深さ，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9-1，pp327-332，1987
- 4) 長滝重義・大賀宏行・荒井俊晴：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化，高炉スラグ微粉末のコンクリートの適用に関するシンポジウム，土木学会，pp143-150，1987.3
- 5) Schmidt, C.H.: Über die Kalk-Bindung durch Hochfenschlacke bei der hydraulischen Erhartung von Schlackenzementen, Zement-Kalk-Gips, 8, 1963