

論文 モルタルの力学的特性に及ぼす炭酸化の影響

上田 洋*¹、来海 豊*²

要旨：炭酸化がモルタルの力学的特性に与える影響を調べるために、促進炭酸化環境および気中環境にそれぞれ置いたモルタルについて、割裂引張強度、曲げ強度、圧縮強度試験を行った。その結果、炭酸化によるモルタルの強度変化は、各試験方法ごとに異なることがわかった。また、いずれの場合においても、強度測定前の吸水の影響を非常に強く受けることがわかり、これらの原因について考察した。

キーワード：コンクリート・モルタル, 炭酸化, 圧縮強度, 割裂引張強度, 曲げ強度, 吸水

1. はじめに

コンクリートの炭酸化は、鉄筋腐食を誘発するだけでなく、コンクリート組織そのものを変質させ、各種の物性に影響を及ぼしている[1]。このうち、炭酸化したコンクリートの強度については、古くから多くの報告があり、炭酸化によって圧縮強度は増大するという結果が得られているものが多い[2]。強度増進の理由として、生成した炭酸カルシウムが空隙を充填して硬化体組織を緻密化させるためであること等が考えられている。一方で、促進炭酸化試験では圧縮強度は増大するが、屋内暴露試験では低下するという報告[3]や、促進炭酸化試験を行った後に海洋暴露試験を行うと強度が低下するという報告[4]など、ある条件下では強度の低下がみられる例もある。しかし、現状では圧縮強度や静弾性係数の変化についても十分に明らかにされているとは必ずしもいえず、炭酸化による引張強度や曲げ強度の変化について検討した例はほとんどない。

本研究では、促進炭酸化環境あるいは気中環境に所定の材齢まで置いたモルタル供試体について、割裂引張強度、曲げ強度および圧縮強度に及ぼす炭酸化の影響を検討し、強度測定前の吸水の影響も併せて考察している。その結果、興味深い結果が得られたので報告する。

2. 実験の概要

割裂引張強度試験と圧縮強度試験には、それぞれφ5cm×約7cmの円柱供試体とφ5cm×10cmの円柱供試体を用いた。曲げ強度試験については、4cm×4cm×16cmの小型角柱供試体を用いた3点曲げ載荷法と、10cm×10cm×40cmの寸法で中央に切欠き（深さ50mm、幅1mm）を設けた切欠き付き角柱供試体を用いた3等分点4点曲げ載荷法により行った。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は40%、50%、60%の3種類とした。また、細骨材として切欠き付き角柱供試体には大井川水系産陸砂（粗粒率2.74）、他の供試体にはセメント協会のISO標準砂を用いた。モルタルの配合を、一覧にして表-1に示す。

供試体は、材齢14日目で標準水中養生を行った後、所定の材齢まで温度20℃、相対湿度60%、二酸化炭素濃度20%の促進炭酸化環境に置き、強度試験に供した。また、比較用として、促進炭酸

* 1) (財) 鉄道総合技術研究所材料技術開発推進部技師、理修 (正会員)

* 2) (財) 鉄道総合技術研究所材料技術開発推進部主幹技師、工博 (正会員)

化環境と同一の温度・湿度で同一期間気中環境に置いたものを用いた。さらに、一部の供試体については、各環境に所定の材齢まで置いた後、測定前に水中で一定期間吸水させてから強度を測定した。

表-1 モルタルの配合

供試体種類	水セメント比 (%)	S/C	単位量(kg/m ³)			備考
			水	セメント	細骨材	
切欠き付き角柱供試体	40	1.8	272	681	1226	細骨材には大井川水系産陸砂を使用
	50	2.8	254	507	1420	
	60	3.6	250	417	1501	
小型角柱供試体および円柱供試体	40	1.8	270	675	1231	細骨材にはセメント協会のISO標準砂を使用
	50	2.8	255	510	1409	
	60	3.6	251	418	1496	

3. 実験結果および考察

3.1 割裂引張強度

図-1には、促進炭酸化環境および気中環境における割裂引張強度と材齢との関係を示す。吸水させない場合の割裂引張強度は、材齢や水セメント比にかかわらず、炭酸化させたものが気中に置いたものより小さい値となっている。ここで、養生直後と炭酸化環境に置いた後との重量減少率を水セメント比50%の場合でみると、炭酸化期間16週では1.3%、炭酸化期間32週では0.5%である。一方、気中環境に置いた場合の重量減少率は、期間16週と32週ともに4.1%である。これらのデータから、促進炭酸化を行った供試体では、炭酸カルシウムの生成による重量増加を考慮しても、重量減少率は気中環境のものより小さくなると推察される。また、炭酸化したコンクリートでは細孔量が減少するとの報告[1]が多いこと、後述するように炭酸化フロントにおいて水分の浸透が抑制されることから、促進炭酸化環境においては同じ温度・湿度であっても気中環境と比べて乾燥の進行が遅く、セメントの水和は気中環境よりも進行することが考えられる。しかし、実験では促進炭酸化を行った供試体の強度は水中養生直後の値よりも小さく、さらに水セメント比が60%の場合には全断面が炭酸化しているものの強度を測定していることから、炭酸化により引張強度は低下するものと推測され

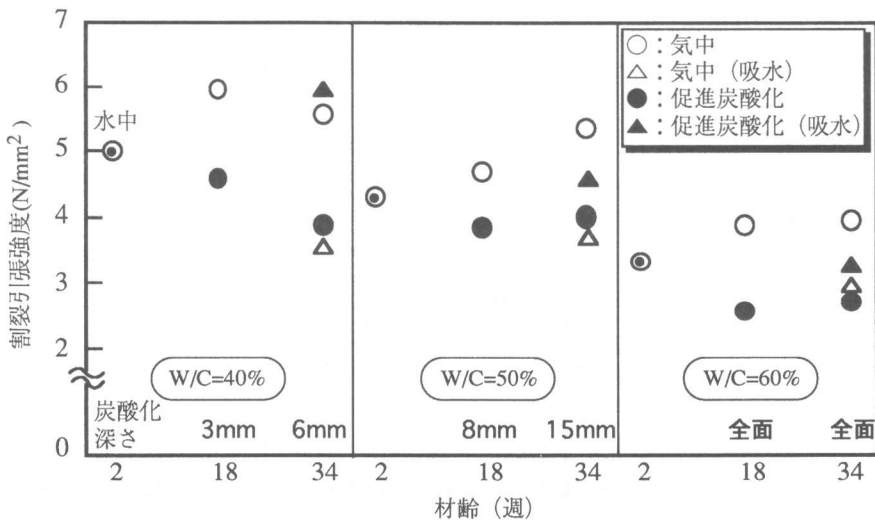
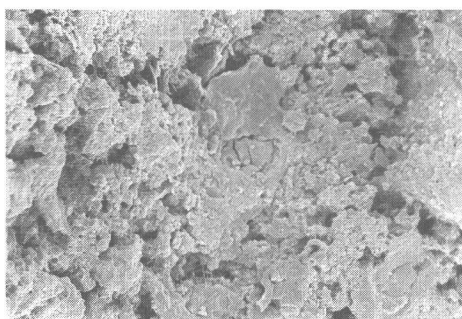
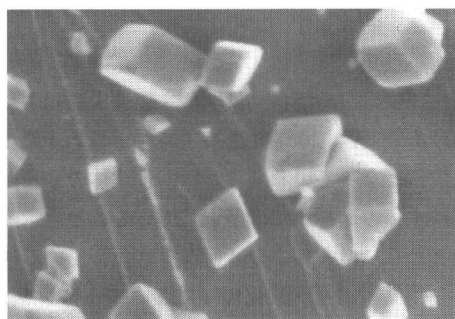


図-1 割裂引張強度



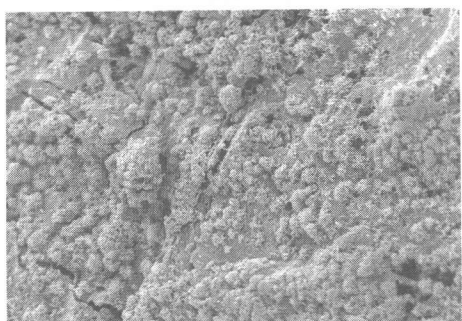
×1,000 — 10μm

(a) 炭酸化域 (表層付近)



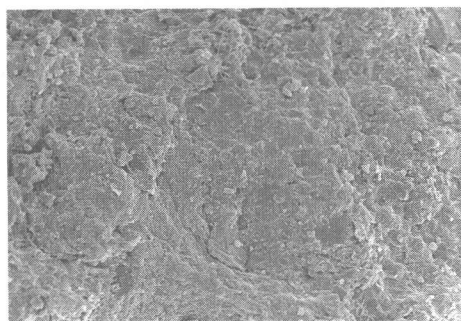
×10,000 — 1μm

(b) 炭酸化フロント周辺にみられる微結晶



×1,000 — 10μm

(c) 炭酸化フロント周辺にみられる生成物



×1,000 — 10μm

(d) 非炭酸化域

図-2 促進炭酸化を行った供試体の電子顕微鏡写真 (材齢34週)

る。また、気中環境に置いた時には、強度は水中養生後から増大しているが、これは水中養生後からの内部のセメントの水和と乾燥に起因する強度自体の上昇によって得られたものと思われる[5]。

測定前に2日間吸水させた場合の割裂引張強度は、気中環境に置いたものでは、水セメント比が40%、50%および60%のいずれの場合も、吸水させないで測定した時に比べて強度が低下している。これらの供試体は中心部分まで濡れており、濡れたことによる固体表面エネルギーの減少が大きな影響を及ぼしていると考えられる[5]。これに対し、促進炭酸化させたものは、水セメント比が40%、50%および60%のいずれの場合も、吸水させないで測定した時と比べて強度が増大している。また、水セメント比が40%および50%の場合は、2日間の吸水では供試体中心部まで濡れておらず、目視による吸水のフロントは炭酸化フロントとほぼ一致する。この現象は、切欠き付き角柱供試体など他の供試体でもみられた。図-2の電子顕微鏡写真より、炭酸化がかなり進行した表面付近では、ポーラスな組織となっている個所が存在するが、炭酸化フロントでは炭酸カルシウムの微結晶や、“イガ状”のもの[4]など独特な生成物が認められ、組織は必ずしもポーラスにはなっていない。したがって、炭酸化フロントには反応過程で生成するある種の化合物や組織がもつ特質により、水の浸透をある程度抑止する作用があるものと推定される。このような作用の影響により、2日間の吸水が炭酸化による生成物に何らかの変化を生じさせ、力学的な表現で“微細ひび割れ先端部の鈍化”に相当するような現象が起こったのではないかと推測される。この場合、“微細ひび割れ先端部の鈍化”に相当するような現象は、硬化体中の空隙が微細なほど起こりやすく、吸水による強度増大は水セメント比が小さいほど大きくなる傾向となったものと思われる。

3. 2 曲げ強度

(1) 小型角柱供試体

図-3には、小型角柱供試体を促進炭酸化環境および気中環境に置いた時の曲げ強度を示す。気中における強度は、水中養生終了時から材齢4週までの間は増大するが、その後は材齢28週まではほぼ一定の値となっている。これは、供試体の寸法が小さいために、乾燥によって比較的早い時期にセメントの水和の進行がほぼ停止していることを示唆している。一方、促進炭酸化させた場合は、材齢の経過とともに増大し、全断面が炭酸化している材齢28週では著しく大きな値となっている。この原因としては、促進炭酸化環境においてセメントの水和が進行したことが考えられる[6]。また、炭酸化と併行して乾燥が進行するため、乾燥による表層部付近の強度自体が上昇することも考えられる[5]。さらに全断面が炭酸化するような段階になると、外部拘束を受けない時の温度応力の場合の機構と同様に、表層部付近に圧縮の初期応力が作用する可能性も考えられる。測定前に7日間吸水させた供試体では、促進炭酸化環境および気中環境ともに、割裂引張強度の場合と同様に、濡れることによる強度低下が認められる。促進炭酸化環境に置いたものについて、割裂引張強度の場合のような吸水による強度上昇が得られなかった原因の一つには、曲げ強度を支配する表層部付近が炭酸化の進行によって比較的粗な組織となることが考えられる。

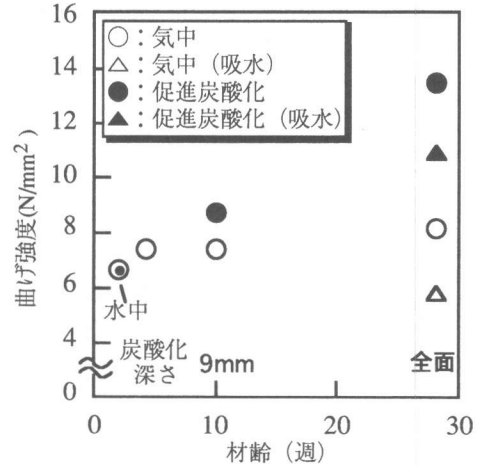


図-3 小型角柱供試体の曲げ強度 (W/C=60%)

(2) 切欠き付き角柱供試体

図-4は、切欠き付き角柱供試体を促進炭酸化環境および気中環境に置いた時の曲げ強度を示したものである。気中における水セメント比が60%の場合の曲げ強度は、材齢4週で一度低下している。これは、表層部と内部とにおける乾湿状態の差に起因する初期引張応力が切欠き先端部付近に生じるためと考えられる[7]。その後は、材齢の経過とともに内部から水分が表層に向かって拡散していくことによって徐々に水和も進行すると同時に、表層部と内部の乾湿状態の差も少しずつ小さくなっていくと思われる。さらに、乾燥によって強度自体も上昇する[5]。この結果、材齢の経過とともに曲げ強度も増大し、組織も緻密化されていくと推察される。したがって、図-3に示した小型角柱供試体の気中における曲げ強度の経時変化との比較から、切欠き付き角柱供試体と他の小型供試体とではセメントの水和の進行度や炭酸化速度が大きく相違するものと考えられる。

吸水させないで測定した曲げ強度は、水セメント比が60%の場合、材齢34週まで促進炭酸化させたものが気中のものと比べて小さく、材齢18週で測定した強度も同様の傾向にある。促進炭酸化させた場合には、内部の水分の蒸発速度が遅くなると考えられるために、切欠き先端部付近の収縮変形と内部との変形量の差は、乾燥速度の速い気中環境に置いたものよりかなり大きくなると考えられる。この収縮変形に対する拘束も供試体の形状の特殊性に起因して非常に大きく、切欠き先端部付近に生じる初期引張応力は無視できなくなると推察される。すなわち、炭酸化により曲げ強度が低下した原因として、切欠き先端部付近の初期引張応力の影響が考えられる。また、気中環境に置いた時

よりもセメントの水和が進行すると推測されるにもかかわらず、材齢18週と材齢34週で強度が増大が認められないことから、炭酸化により強度が低下していることも考えられる。さらに、水セメント比が40%および50%の場合に、材齢34週でも切欠き先端部の炭酸化深さが3~4mm程度と小さいためか、炭酸化の影響が明瞭に認められない。この原因としても、初期引張応力の影響による可能性が高いと推察される。

一方、水セメント比が60%のものを材齢18週で7日間吸水させると、気中環境に置いたものの曲げ強度が吸水により低下するのに対し、炭酸化させた場合には逆に増大している。気中環境に置いたものの吸水による強度低下については、中心部まで濡れており、割裂引張強度の場合と同様に濡れることが大きな影響を及ぼしていると考えられる。また、炭酸化させたものの曲げ強度が増大した原因としては、初期引張応力の発生原因であった収縮が吸水によって回復することが考えられる。さらに、水セメント比が60%であっても緻密化されており、割裂引張強度の場合と同様に吸水によって”微細ひび割れ先端部の鈍化”に相当するような現象が起り、強度の上昇が生じた可能性も考えられる。

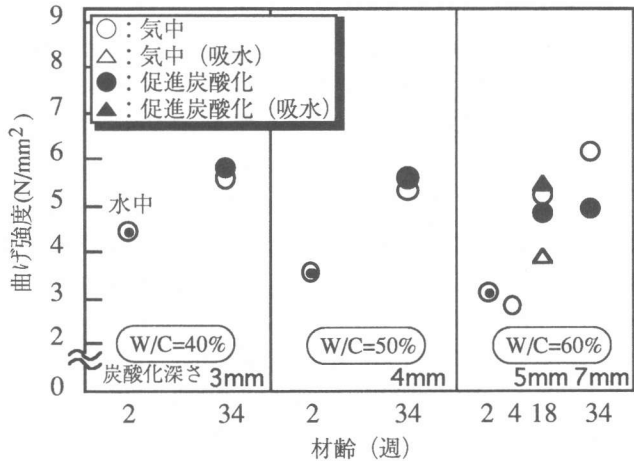


図-4 切欠き付き角柱供試体の曲げ強度

3.3 圧縮強度

図-5に、円柱供試体を促進炭酸化環境および気中環境に置いた時の圧縮強度を示す。材齢34週で測定した圧縮強度は、いずれの水セメント比においても、炭酸化させたものは気中環境に置いたものに比べて大きくなっている。これらは、7日間吸水させることにより、いずれも強度が低下している。水セメント比が40%および50%で促進炭酸化させた場合、組織も比較的緻密で炭酸化も中心部分まで達しておらず、表層側の収

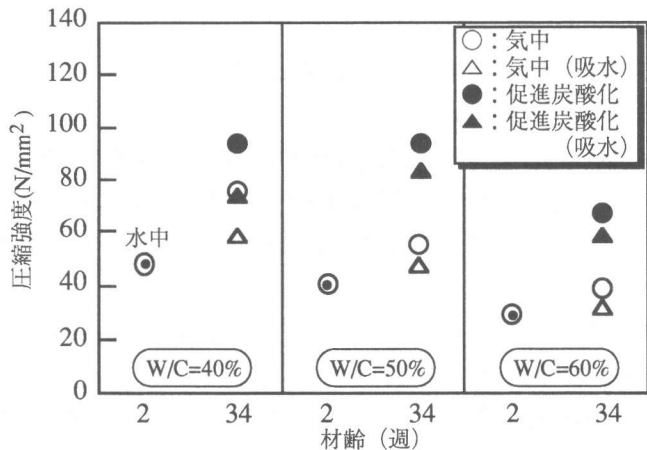


図-5 圧縮強度

縮が内部よりも大きくなると推察される。このような状態となる供試体においては、中心部分が表層側のモルタルにより外周から拘束圧を受け、圧縮強度が増大することが考えられる[7]。しかし、7日間吸水させると、前述したように炭酸化フロント付近まで吸水して収縮の回復を生じ、外周からの拘束圧が期待できなくなって圧縮強度は低下するものと思われる。その他の供試体の場合には、吸水により中心部分まで濡れており、割裂引張強度や曲げ強度の場合と同様に、濡れることが強度低下に大きな影響を及ぼしていると考えられる[5]。また、いずれの場合にも、吸収された水が間隙水圧として作用することが、強度低下の原因となっている可能性が考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた結果をまとめると、次のようになる。

(1) 所定の材齢まで促進炭酸化環境に置いた場合の強度を、同一の温度・湿度の気中環境に置いた場合と比較した結果、炭酸化による影響は、割裂引張強度、曲げ強度および圧縮強度の各強度試験方法ごとに相違することがわかった。

(2) 所定の材齢まで気中環境に置いた後、強度測定前に吸水させた場合には、曲げ強度、圧縮強度および割裂引張強度のいずれにおいても吸水による強度低下が認められた。これに対し、促進炭酸化環境に置いた後に吸水させた場合には、各強度が吸水の影響を顕著に受け、その影響は各強度試験方法ごとに相違することが明らかとなった。

(3) 炭酸化および測定前の吸水の影響が各強度試験結果ごとに相違するのは、炭酸化開始前の組織の粗密状態や炭酸化期間中におけるセメントの水和の進行度等によって、炭酸化が進行した後の硬化体組織の粗密状態が大きく異なるためと考えられた。

(4) 所定の材齢まで炭酸化させた後に吸水させた場合、比較的緻密な硬化体組織を有するものでは、目視による吸水のフロントは炭酸化フロントとおおむね一致し、炭酸化フロントにおいて水の浸透がある程度抑止する作用があるものと推測された。

5. 参考文献

[1] (社)日本コンクリート工学協会、炭酸化研究委員会報告書,1993.3

[2] 例えば、Leber,I. and Blakey,F.A. : Some Effects of Carbon Dioxide on Mortars and Concrete、ACI Journal,28(3)(Proceedings Vol.53),295-308,Sep.1956

[3] 高田良章、魚本健人：中性化の進行に伴うコンクリートの品質変化、コンクリート工学年次論文報告集14-1,901-904,1992

[4] 星野富夫、魚本健人：海洋環境下に暴露した炭酸化させたコンクリートへの塩化物の浸透に関する考察、コンクリート工学年次論文報告集17-1,847-852,1995

[5] 岡島達雄：コンクリートの力学的性質と水分、セメント・コンクリート、No.464,pp.18-26, 1985.10

[6] 佐伯竜彦、米山紘一、長滝重義：中性化によるモルタルの強度変化、土木学会論文集No.451/V-17,pp.69-78,1992.8

[7] 永松静也、佐藤嘉昭、竹田吉紹：乾燥にともなうコンクリートの各種強度変化について、セメント技術年報 36,pp.271-274,1982