

論文 モルタルの強度に及ぼす炭酸化和吸水の影響

来海 豊^{*1}

要旨：促進炭酸化環境および気中環境に置いた水セメント比が25～60%のモルタルについて、炭酸化と吸水が割裂引張強度および曲げ強度に与える影響を調べた。その結果、モルタルの各強度性状は、水セメント比、炭酸化期間および吸水期間の影響を顕著に受けることがわかった。特に、曲げ強度については、水セメント比により強度性状が大きく異なり、炭酸化と吸水によって強度上昇するか強度低下するかの水セメント比の限界値が存在することを明らかにした。

キーワード：割裂引張強度、曲げ強度、水セメント比、炭酸化、吸水

1. はじめに

炭酸化がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響については、多くの研究がなされてきているが¹⁾、十分に解明されているとは必ずしもいえない。また、割裂引張強度や曲げ強度については、炭酸化養生の観点からみたコンクリートの性状の一部として実験データが含まれている報告²⁾はあるものの、ほとんど検討されていない。一方、筆者らは、炭酸化がモルタルの強度に及ぼす影響は試験方法ごとに相違することや、吸水がモルタルの強度に及ぼす影響も単に気中環境に置いた場合と炭酸化作用を受けた場合とでは大きく異なること等の傾向について検討してきた³⁾。しかし、硬化体組織の緻密さ、炭酸化期間、吸水期間等がモルタルやコンクリートの強度に及ぼす影響については、いまだ不明な点が多い。したがって、これらの点の現象解明は、コンクリートの強度が種々の要因の影響を受けることから、今後のコンクリート構造物の信頼性向上につながると考えられる。

本研究では、促進炭酸化環境および気中環境に所定の期間置いた水セメント比が25%、40%、50%および60%のモルタルについて、新たに水セメント比、炭酸化期間、吸水期間が割裂引張強度および曲げ強度に及ぼす影響を検討した。

2. 実験の概要

割裂引張強度試験には、 $\phi 5\text{ cm} \times \text{約 } 7\text{ cm}$ の円柱供試体を用いた。曲げ強度試験については、 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ の角柱供試体を用いた3点曲げ載荷方式により行った。セメントおよび細骨材としては、普通ポルトランドセメントおよびセメント協会のISO標準砂を使用した。モルタルの配合条件を表-1に示すが、水セメント比(W/C)が25%の配合ではフロー値 270 ± 10 となるようにポリカルボン酸系高性能AE減水剤を添加した。また、W/Cが40%、50%および60%配合は、混和剤無添加とし、フロー値 210 ± 5 のものである。

供試体は、材齢14日ま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%の促進炭酸化環境およびこれと同一の温度・湿度の気中環境に置き、所定の期間吸水させてから強度試験に供した。吸水開始材齢については、割裂引張強度の場合に10

表-1 配合条件

水セメント比W/C(%)	25*	40	50	60
砂セメント比 S/C	1.17	1.82	2.76	3.58

*混和剤の添加量：C×1.75wt%

* 1 (財) 鉄道総合技術研究所構造物技術開発事業部主幹 工博 (正会員)

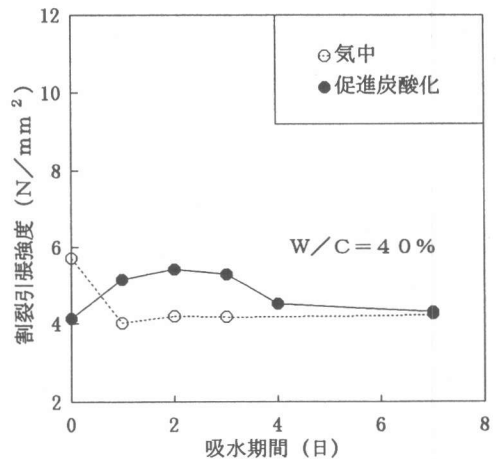
週～34週，曲げ強度の場合に10週～28週とした。
また，吸水期間は，1日～7日とした。

3. 実験結果および考察

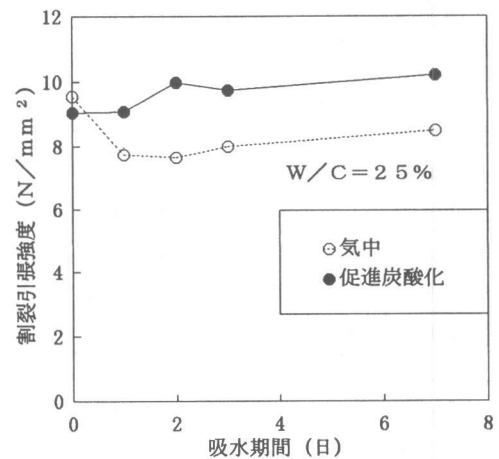
3. 1 割裂引張強度

図一1は，材齢34週まで促進炭酸化環境および気中環境に置いたW/Cが40%の供試体について，吸水期間が割裂引張強度に及ぼす影響を示したものである。気中環境に置いた場合の割裂引張強度は，吸水させる前では促進炭酸化を行った場合よりも大きい値となるが，吸水により急激に低下し，その後はほぼ一定となっている。この傾向は，吸水期間7日のものの破壊面のほぼ全面が湿っていたことから，湿潤により見かけ上強度低下するという従来から一般的にいわれている傾向と一致している⁴⁾。しかし，炭酸化を行った後に吸水させると，吸水により吸水期間3日程度まで強度上昇し，その後吸水前の強度程度まで低下する傾向を示している。この場合，吸水期間7日でも破壊面において湿っている範囲は炭酸化深さにほぼ相当する表面から6mm程度であったことから，炭酸化フロントには水の浸透をある程度抑止する作用があるものと推察される³⁾。そして，吸水が炭酸化による生成物に何らかの変化を生じさせ，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。

図一2は，材齢34週まで促進炭酸化環境および気中環境に置いたW/Cが25%の供試体について，吸水期間が割裂引張強度に及ぼす影響を示したものである。気中環境に置いた場合の割裂引張強度は，吸水前においては炭酸化を行った場合に比べて若干大きくなるが，吸水によってW/Cが40%の時と同様に強度低下が認められる。炭酸化を行った場合の強度は，吸水により逆に強度上昇し，W/Cが40%の場合と異なり，吸水期間7日においても吸水による強度低下は特に認められない。また，吸水期間7日の場合の破壊面において湿っている範囲は，炭酸化を行ったもので炭酸化深さにほぼ相当する1



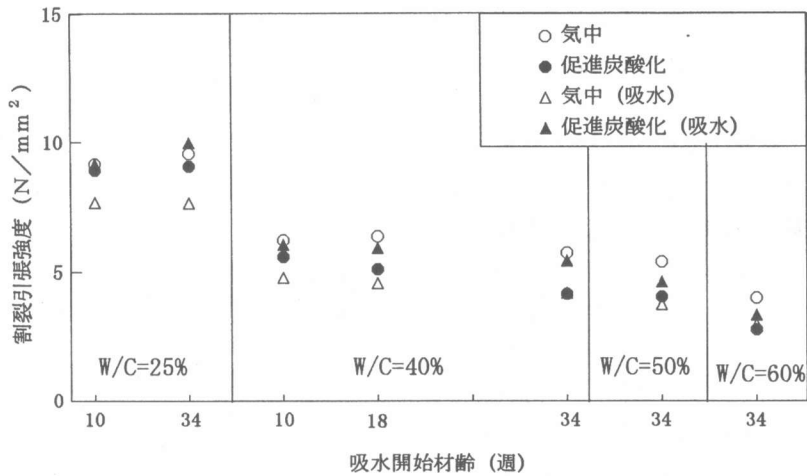
図一1 吸水期間が割裂引張強度に及ぼす影響



図一2 吸水期間が割裂引張強度に及ぼす影響

mm～2mm程度であり，気中環境に置いたものでも表面から6mm程度であった。したがって，気中環境に置いたものが吸水により強度低下したのは，割裂引張強度の乾燥による強度上昇の原因とされている表層部付近に生じる円周方向引張応力⁵⁾が吸水によって消失することが影響を及ぼしているものと思われる。

図一3は，所定の材齢まで促進炭酸化環境および気中環境に置いたW/Cが25%，40%，50%および60%の供試体について，吸水期間を2日とした場合の割裂引張強度と吸水開始材齢との関係を示したものである。また，比較のため

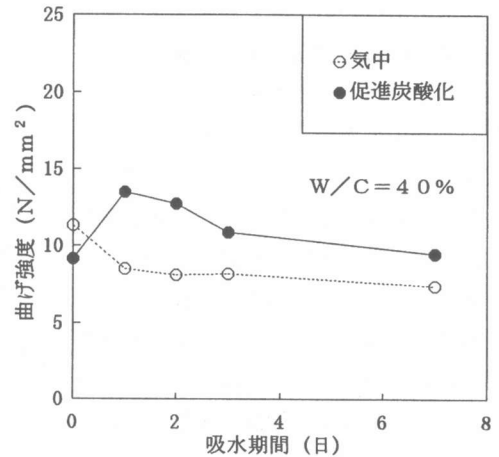


図一 3 割裂引張強度と吸水開始材齢との関係

に、吸水前の割裂引張強度も示している。まず、吸水前において炭酸화가割裂引張強度に及ぼす影響をみると、 W/C が25%の時にはさほど明瞭に認められないが、全体的な傾向として炭酸化を行った場合の強度は気中環境に置いた場合よりも小さくなっている。一方、吸水の影響を全体的にみると、気中環境に置いたものは吸水により強度低下するのに対し、炭酸化を行ったものでは吸水により強度上昇する傾向にある。そして、 W/C が40%以下では、炭酸化後に2日間吸水させた場合の強度は、いずれの吸水開始材齢においても気中環境に置いた場合の吸水前の強度に近づいている。しかし、 W/C が50%以上になると、炭酸化後に吸水させた場合の強度に吸水による強度上昇は認められるものの、その強度は気中環境に置いた場合の吸水前の値に比べ、若干強度低下している。なお、この図に示した吸水開始材齢が18週で W/C が40%の場合の割裂引張強度および吸水開始材齢が10週で W/C が25%の場合の割裂引張強度についても、吸水期間との関係はそれぞれ図一 1 および図一 2 に示した傾向とほぼ同様となった。

3. 2 曲げ強度

図一 4 は、材齢18週まで促進炭酸化環境および気中環境に置いた W/C が40%の供試体につ



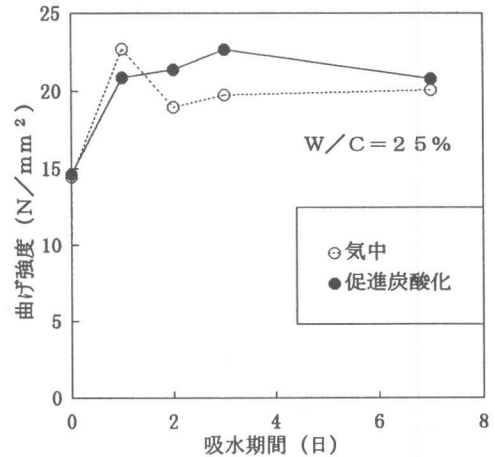
図一 4 吸水期間が曲げ強度に及ぼす影響

いて、吸水期間が曲げ強度に及ぼす影響を示したものである。気中環境に置いた場合の曲げ強度は、吸水前では炭酸化を行った場合よりも大きい値となるが、吸水させると湿潤により急激に強度低下し⁴⁾、その後徐々に吸水期間7日まで強度低下する傾向を示している。炭酸化を行った場合の曲げ強度については、吸水により一度急激に強度上昇し、その後は徐々に強度低下する傾向となるが、吸水期間7日においても吸水前の強度よりも大きい値を保持している。そして、吸水により湿っている範囲は、吸水期間7日において気中環境に置いたものではほぼ全

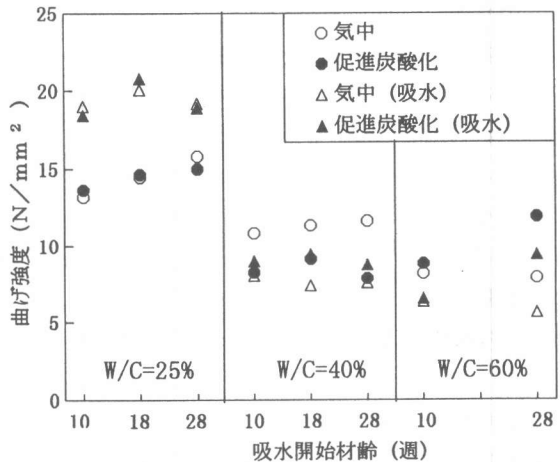
断面に近くなったが、促進炭酸化を行ったものでは炭酸化深さにほぼ相当する表面から4mm～5mm程度であった。

図一5は、材齢18週まで促進炭酸化環境および気中環境に置いたW/Cが25%の供試体について、吸水期間が曲げ強度に及ぼす影響を示したものである。気中および促進炭酸化のいずれの環境に置いた場合も、曲げ強度は吸水により顕著に強度上昇している。そして、いずれの環境に置いた場合の曲げ強度も、吸水期間が1日～3日で最大値が得られ、それ以上長くなると低下傾向とはなるが、吸水期間7日においても吸水前に比べてかなり大きい値となっている。また、炭酸化深さはほとんど確認できない程度であったが、吸水期間7日の場合の破壊面において湿っている範囲は、炭酸化を行ったもので表面から2mm程度であり、気中環境に置いたものでも6mm程度であった。

図一6には、所定の材齢まで促進炭酸化環境および気中環境に置いたW/Cが25%、40%および60%の供試体について、吸水期間7日における曲げ強度と吸水開始材齢との関係を示す。なお、比較のために、吸水前の曲げ強度も示している。W/Cが25%の時の吸水前および吸水期間7日の曲げ強度には炭酸化の影響はほとんど認められず、炭酸化深さが1.5mm程度となった吸水開始材齢28週の曲げ強度についても、吸水期間との関係は図一5に示したものと大差ない傾向となった。また、吸水前において炭酸化の影響をみると、炭酸化を行った場合の曲げ強度は、W/Cが40%の時には気中環境に置いた場合に比べて小さく、W/Cが60%の時には気中環境に置いた場合に比べて大きくなっている。そして、W/Cが60%の時の吸水前の曲げ強度には、炭酸化期間が長くなるのに伴って増大する傾向がみられる。次に、吸水の影響をみると、気中環境に置いた場合の曲げ強度は、W/Cが40%以上の時には吸水により低



図一5 吸水期間が曲げ強度に及ぼす影響



図一6 曲げ強度と吸水開始材齢との関係

下している。一方、炭酸化を行った場合の吸水期間7日の曲げ強度は、W/Cが40%以下の時にはいずれの吸水開始材齢においても吸水により強度上昇し、W/Cが60%の時にはほぼ全断面が湿ることにより強度低下している。さらに、この図に示した吸水開始材齢が28週でW/Cが40%の場合も、曲げ強度と吸水期間との関係は図一4に示した傾向とほぼ同様となった。

表一2は、吸水開始材齢が10週と28週のものについて、W/Cが促進炭酸化を行った場合の曲げ強度に及ぼす影響を示したものである。先ず、吸水前の曲げ強度についてみるために、気

中環境に置いた場合の吸水前の曲げ強度 f_a と炭酸化を行った場合の吸水前の曲げ強度 f_c を用いて式(1)に示す F_{ac} という比率を求めた。さらに、 W/C に対する F_{ac} の関係を最小二乗法により2次放物線で回帰した。そして、 F_{ac} が0となる時の W/C を2次方程式の根として推定し、二つの根の内では25%~60%の範囲にあるものを採用した。なお、 W/C が25%程度の時にも図一6に示したように炭酸化の影響がほとんど認められないために F_{ac} は0となるが、二つの根が対象範囲に入る場合には炭酸化が明瞭に確認できる高い方の W/C のみを表一2に示した。この F_{ac} が0となる時の W/C の限界値は、おおむね52%~58%の範囲にあると推定される。すなわち、 W/C が限界値より高い時には炭酸化を行った場合の方が気中環境に置いた場合よりも曲げ強度は大きくなるが、 W/C が限界値より低い時には炭酸化により曲げ強度が顕著に低下する可能性がある。この W/C が高い時の曲げ強度増大には、生成した炭酸カルシウムが空隙を充填し、元は粗な状態であった硬化体組織を緻密化させること⁹⁾が大きな影響を及ぼしているものと推測される。また、強度増大には、炭酸化期間中のセメントの水和の進行が寄与していることも考えられる。一方、 W/C が低くなると、供試体の内部と表層部付近との収縮変

形の差に基づいて表層部付近に生じる初期引張応力の影響が無視できなくなることや、炭酸化によるC-S-Hの分解⁹⁾の影響が顕在化することによって曲げ強度が低下するものと思われる。

$$F_{ac} = (f_c - f_a) \times 100 / f_a \quad \dots\dots (1)$$

次に、炭酸化を行った後に吸水させた場合の曲げ強度 f_{cw} を用いて、式(2)に示す F_{cw} という比率を求めた。さらに、 F_{cw} が0となる時の W/C を前記の F_{ac} の場合と同様の方法により推定し、表一2に示した。そして、この F_{cw} が0となる時の W/C の限界値は、材齢10週および28週まで炭酸化を行った後に吸水期間を2日と7日とした場合、おおむね45%~56%の範囲にあると推定される。すなわち、炭酸化後に吸水させた場合の曲げ強度は、 W/C が限界値より低い時には吸水により強度上昇し、 W/C が限界値より高い時には強度低下する。この原因の一つとしては、 W/C が高い時には吸水させるとほぼ全断面が湿ることによって強度低下するが、 W/C が低くなると炭酸化した表層部付近のみが吸水するために初期引張応力を生じさせていた収縮が吸水によって回復し、強度上昇することが考えられる。また、硬化体組織が比較的緻密で空隙も微細なほど炭酸化フロントの水分浸透抑止作用の影響が大きくなり、微細ひび割れ先端部の鈍化に相当するような現象が起

表一2 水セメント比 W/C が曲げ強度に及ぼす影響

吸水開始材齡 (週)	吸 水 期 間 (日)	W/C (%)	曲げ強度 (N/mm ²)			Fac*1 (%)	Fcw*2 (%)	Fac=0 と なる推定 W/C (%) *3	Fcw=0 と なる推定 W/C (%) *3
			気中環境		促進炭酸化環境 吸水後fcw				
			吸水前fa	吸水前fc					
10	2	25	13.2	13.7	20.2	3.79	47.4	58	54
		40	10.9	8.26	11.0	-24.2	33.2		
		60	8.18	8.82	7.15	7.82	-18.9		
	7	25	13.2	13.7	18.4	3.79	34.3	58	45
		40	10.9	8.26	9.02	-24.2	9.20		
		60	8.18	8.82	6.55	7.82	-25.7		
28	2	25	15.8	15.0	20.8	-5.06	38.7	52	56
		40	11.6	7.87	10.7	-32.2	36.0		
		60	7.92	11.9	10.1	50.3	-15.1		
	7	25	15.8	15.0	18.9	-5.06	26.0	52	48
		40	11.6	7.87	8.75	-32.2	11.2		
		60	7.92	11.9	9.44	50.3	-20.7		

*1: $F_{ac} = (f_c - f_a) \times 100 / f_a$, *2: $F_{cw} = (f_{cw} - f_c) \times 100 / f_c$, *3: 最小二乗法による推定値

こりやすくなるのではないと思われる。一方、気中環境に置いた後に吸水させた場合の曲げ強度についても、図-6に示したように、 W/C が25%の時には内部まで湿らないために強度上昇し、40%以上の時には強度低下していることから、25%~40%の間に W/C の限界値が存在することになる。

$$F_{cw} = (f_{cw} - f_c) \times 100 / f_c \quad \dots\dots (2)$$

以上に述べたように、炭酸化和吸水が曲げ強度に及ぼす影響が反転する W/C の限界値が存在し、その限界値はおおむね45%~58%の範囲にあると推定された。割裂引張強度についても、図-3に示したように炭酸化後の吸水によって強度上昇し、気中環境に置いた場合の吸水前の強度に近づく程度が、 W/C が40%以下の場合と50%以上の場合で相違した。このような値の W/C で炭酸化と吸水により強度性状が変化したのには、従来からコンクリートの透水係数が W/C が50%~55%程度を境に大きく変化すること⁷⁾とも関連しているのではないと思われる。

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) 促進炭酸化を行った後に吸水させないで測定した割裂引張強度は、同一の温度・湿度の気中環境に置いた場合の強度に比べて小さくなる傾向を示したが、水セメント比が25%と低い時にはさほど明瞭にその差が認められなかった。
- (2) 促進炭酸化を行った後に吸水させると、割裂引張強度は一時強度上昇する傾向となった。その程度は水セメント比によって相違するが、水セメント比が40%の場合には大きい強度が得られる吸水期間の範囲が存在すると考えられた。
- (3) 吸水させないで測定した曲げ強度は、ある限界値よりも高い水セメント比の時には促進炭酸化を行った方が同一の温度・湿度の気中環境に置いた場合よりも大きくなった。その限界値はおおむね52%~58%の範囲にあると推定され

た。そして、水セメント比が限界値よりも低くなると、炭酸化によって曲げ強度が大きく低下する可能性が示された。

(4) 促進炭酸化を行った後に吸水させた場合の曲げ強度は、水セメント比がある限界値よりも低い時には吸水により、一時強度上昇した。また、水セメント比が限界値よりも高くなると、曲げ強度は吸水により強度低下した。その水セメント比の限界値は、おおむね45%~56%の範囲にあると推定された。なお、気中環境に置いた後に吸水させた場合の曲げ強度についても、水セメント比が40%以上の時には吸水によって強度低下する傾向を示したが、水セメント比が25%の時には吸水による強度上昇が認められた。

参考文献

- 1) たとえば、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
- 2) Leber, I. and Blakey, F. A. : Some Effects of Carbon Dioxide on Mortars and Concrete, ACI Journal, 28(3) (Proceedings Vol. 53), pp. 295-308, Sep., 1956
- 3) 上田 洋・来海 豊：モルタルの力学的特性に及ぼす炭酸化の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 1, pp. 787-792, 1997
- 4) 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
- 5) 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，セメント技術年報 36, pp. 271-274, 1982
- 6) (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
- 7) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点 '89, pp. 53-54, 1989