

中性化によるモルタルの強度変化

佐伯竜彦*・米山紘一**・長滝重義***

コンクリートは中性化することによって内部鉄筋の腐食の可能性が生じるばかりでなく、強度などの物理的性質も変化することが知られている。しかし、どの程度中性化すればどの程度強度が変化するという、定量的な評価はなされていないのが現状である。本論文はモルタル供試体内の水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウム量と微細組織の関係をを用い、中性化したモルタルの圧縮強度予測手法を提案するものである。

Keywords: carbonation, compressive strength, calcium hydroxide, calcium carbonate

1. ま え が き

従来、コンクリートの中性化現象は鉄筋の腐食を念頭におき、主として進行速度や中性化深さと鉄筋の腐食との関係について論じられてきた。

しかし、中性化は鉄筋の腐食だけでなくセメント硬化体の微細組織や水和生成物も変化させることが早くから指摘されている^{1),2)}。このことは、中性化は強度などの物理的性質にも影響をおよぼすことを示していると考えられる。

一般に、促進中性化試験を行ったコンクリートは中性化が進行することによって強度が増加するとされている³⁾。しかし、屋外に自然暴露されたコンクリートでは強度が低下している例も見られる⁴⁾。また、鈴木らはセメントの主要水和物であるC-S-Hを測定し、炭酸化による分解を確認している⁵⁾。これら実構造物における強度低下もしくは劣化が中性化によるものか、または他の要因によるものか明確な結論は得られていない。また、どの程度中性化すればどの程度強度が変化するかについても不明である。

そこで本研究では、中性化によるコンクリートの強度変化を定量的に評価するためモルタル供試体を用いて、促進中性化試験、乾湿繰り返し促進中性化試験および散水促進中性化試験の三種類の試験を行い、中性化による水和物および微細組織の変化と強度変化の関連について検討を加えた。また、強度変化の予測手法を考案し、実験値との比較を行った。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

本研究で用いたセメントは普通ポルトランドであり、化学成分を表-1に示す。

細骨材は豊浦標準砂、相馬砂の細、粗砂の三種類を等重量混合して用いた。

モルタルの配合は、水セメント比を55および65%の二種類とし、ペーストと骨材の体積比が一定となるように決定した。得られた配合を表-2に示す。

(2) 初期養生条件

供試体は打設後24時間で脱型し、材令7および91日まで20°Cの水中養生を行った。

(3) 供試体

供試体は40×40×160 mmの角柱供試体を用いた。所定の初期養生終了後、型枠底面に接する面を除いた他の五面をエポキシ系の接着剤でシールし、これらの面からの水分および二酸化炭素の出入りを遮断した。

(4) 試験方法

a) 促進中性化試験

所定の初期養生終了後、供試体を促進装置内に設置し促進中性化試験を行った。促進条件は温度40°C、相対湿度50%、二酸化炭素濃度15%である。

中性化深さの測定は所定の材令において供試体の軸方向端部より25 mmの厚さで割裂して40×40×25 mmの試験片を採取し、試験片の割裂面にフェノールフタレインの1%エタノール溶液を吹き付け、未着色部分を中性化部分として測定した。測定に用いた供試体は1材令につき2本である。供試体は試験片採取後、割裂面を再度シールして促進中性化試験を継続した。

b) 乾湿繰り返し促進中性化試験

本研究では、屋外において降雨などによって水分の供給を受けるコンクリートの中性化について検討を行うた

* 正会員 工修 新潟大学助手 工学部 建設学科
(〒950-21 新潟県新潟市五十嵐2の町 8050 番地)

** 正会員 工博 新潟大学教授 工学部 建設学科

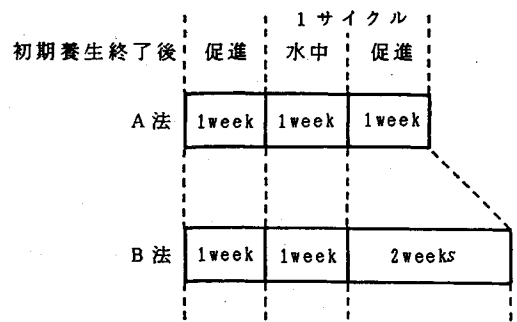
*** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部 土木工学科

表一 セメントの化学成分 (重量%)

ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
1.7	21.6	4.7	3.3	63.6	1.5	2.0	0.25	0.58

表二 モルタルの配合

W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	s/c	flow	Air (%)
5.5	573.6	315.5	1319.4	2.30	214	4.2
6.5	514.2	334.2	1319.4	2.57	241	4.3



図一 乾湿繰り返し促進中性化試験サイクル

めに乾湿繰り返し促進中性化試験を行った。

試験は所定の初期養生終了後、供試体を促進装置内で1週間暴露した後、1週間の水中浸漬(20C°)と1週間の促進試験を繰り返すA法および1週間の水中浸漬と2週間の促進試験を繰り返すB法の二種類を行った。試験サイクルを図一に示す。

中性化深さの測定は促進中性化試験の場合と同様である。

c) 散水促進中性化試験

乾湿繰り返し試験と同様に供試体が水分の供給を受ける場合の中性化現象を対象として、散水促進中性化試験を行った。

試験は促進中性化試験中に毎日一定時刻から連続3時間シャワー状の水を毎分1.5 l供給するもので、どの供試体にも均等に水分が供給されるように留意して行った。

中性化深さの測定は促進中性化試験と同様である。

d) 二酸化炭素を除去した環境下での暴露試験

本研究では、中性化による強度変化と水和等による強度変化を区別するため二酸化炭素を除去した環境下での暴露試験および乾湿繰り返し試験を行い、後に述べる強度試験・分析用の試料採取を行った。

試験条件は、温度40C°、相対湿度50%である。二酸化炭素の除去にはソーダ石灰を用いた。供試体は促進試験と同様に初期養生終了後、40×160 mmの一面を除いた他の五面をシールした。

暴露を継続するものは促進中性化試験に対応し、乾湿繰り返し暴露試験は乾湿繰り返し促進中性化試験に対応する。乾湿繰り返しの周期は乾湿繰り返し促進中性化試験と同じである。

e) 強度試験

所定の材令においてモルタル供試体の圧縮強度試験をJIS R 5021に準じて行った。供試体は中性化深さを測定したものと同配合、同初期養生条件のものを用いた。測定は供試体のシールを除去し、105C°で24時間炉乾燥した後1材令につき3本を用いて行った。供試体を

乾燥させるのは供試体の含水率によって強度の変化が起こるためである⁶⁾。中性化の進行過程では供試体内部の水分が蒸発していくが⁷⁾、配合、初期養生条件および促進期間が異なれば含水率も異なる。また、乾燥中で供試体内の含水率分布が一樣でない場合もある。従って、強度試験を行う際に含水率を統一しなければ中性化による強度変化を比較することができない。含水率を統一するには供試体を水中に浸漬して飽水状態にするか絶乾状態にするかのどちらかが適当であると考えられる。乾燥の影響を確認するために、圧縮試験の前処理として24時間の水中浸漬を行うものについても測定を行った。この結果、二種類の方法においては強度等の絶対値は異なるものの、傾向としては同じであった。しかし、吸水速度はモルタルの微細組織に依存するため完全に飽水状態にするまでの時間が供試体の条件(配合条件・初期養生条件・乾燥の程度)によって異なる恐れがあるため、考察には乾燥させてからの強度試験の結果を用いた。なお、乾燥によるひび割れの発生は目視では認められなかった。

強度試験の材令は促進中性化試験の場合、試験期間1, 3, 5および9週目であり、散水促進中性化試験では、3, 5および9週目、乾湿繰り返しのA法は1, 2, 6および10週目、B法では2, 5および8週目である。二酸化炭素を除去した環境下での暴露および乾湿繰り返し試験を行った供試体もそれぞれに対応する促進試験と同じ材令に試験を行った。

圧縮強度試験を行う際には静弾性係数および破壊時のひずみを求めるために、供試体の圧縮ひずみの測定を併せて行った。載荷方法を図二に示す。

f) 細孔量および細孔径分布の測定

細孔量および細孔径分布の試料は強度試験に用いた試験片3個から採取し、測定値に偏りがないように混合して1つの試料とした。試料は各促進および暴露試験を行った水セメント比65%の供試体の供試体表面(シールの無い面)から0~5, 5~10, 10~15, 15~20 mmの4カ所から採取したものを24時間アセトンに浸漬し、

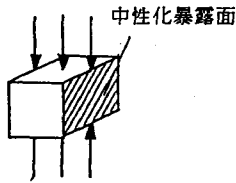


図-2 強度試験における荷荷方法

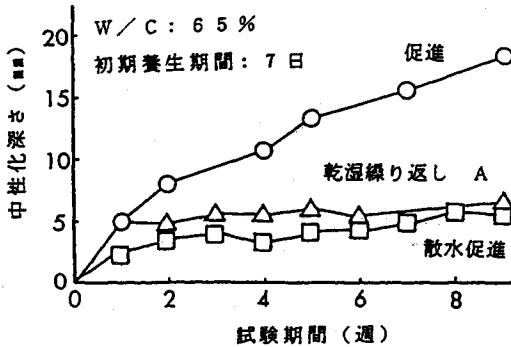


図-3 中性化深さの経時変化

その後デシケータ内で24時間自然乾燥させ、測定まで窒素を封入して保管した。測定は5mm程度に砕いた試料を1回に2~3g用いて、原則として2回、水銀圧入法によって行った。測定値は2回の平均値とし、平均値からの差が10%を越えた場合には再度測定を行って近い方の2つの値を平均して用いた。測定材令は強度試験を行った材令と同じである。

9) 水酸化カルシウム量および炭酸カルシウム量の測定

水酸化カルシウム量および炭酸カルシウム量の定量は熱重量分析によって行った。試料の採取および測定材令は細孔径分布の測定と同じである。但し、熱分析の場合は水セメント比55%のものについても測定を行った。

3. 中性化による強度変化

(1) 中性化深さの経時変化

図-3に各種促進試験における中性化深さの経時変化を示す。図より、通常の促進中性化試験に比べ、水分の供給がある乾湿繰り返し促進中性化試験および散水促進中性化試験は中性化の進行が遅くなっている^{8),9)}。また、既往の研究より、水セメント比が大きいほど、初期養生期間が短いほど中性化の進行が速くなる傾向があるとされているが¹⁰⁾、本研究でも同様の結果が得られた。

(2) 促進中性化試験による圧縮強度変化

図-4に水セメント比65%で促進中性化試験および二酸化炭素を除去した環境下で暴露試験を行った供試体の圧縮強度の変化を示す。強度の変化は初期養生終了後の強度に対する測定材令の強度比で示す。図より、初期養生条件にかかわらず供試体は中性化することで圧縮強

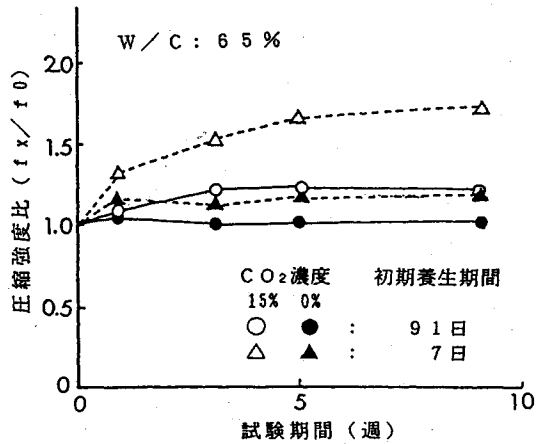


図-4 促進中性化試験における圧縮強度の経時変化

度が増加しているが、初期養生期間が短い方が増加の割合が大きくなっている。これは、初期養生期間中に不完全だった水和反応が試験中に進行することと、初期養生期間が短いほど中性化の進行が速いためと考えられる。

このように、促進中性化試験による強度変化は中性化による強度変化だけでなく水和反応による変化も含んでいるため中性化による影響だけを検討するために、二酸化炭素を除去した試験での強度増加は水和反応によるものと考え、「中性化による強度変化率」を以下のように定義する。

$$\text{中性化による強度変化率} = (f_x - f'_x) / f_0$$

ここで、 f_x : 促進 X 週目の圧縮強度

f'_x : 二酸化炭素を除去した環境下での暴露 X 週目の圧縮強度

f_0 : 初期養生直後の圧縮強度

図-5に中性化係数と中性化による強度変化率の関係を示す。中性化係数(促進期間の平方根に対する中性化深さの比)とは中性化速度を評価する指標で、その値が大きいほど中性化の進行が速いことを示す¹¹⁾。図より、中性化係数が大きいほど中性化による強度変化率が大きくなっており、中性化だけによる強度の伸びも中性化の進行の速いものほど大きくなっている。

(3) 乾湿繰り返し促進中性化試験による圧縮強度変化

図-6に乾湿繰り返し促進中性化試験で繰り返しサイクルA法を行った水セメント比65%の供試体の圧縮強度比の変化を示す。図より、初期養生期間91日のものはほとんど強度の増加がみられない。これは、乾湿繰り返し促進中性化試験においては通常の促進試験より中性化の進行が遅いためと考えられる。また、初期養生期間7日のものは91日のものに比べ中性化しやすいため強度の増加がみられた。二酸化炭素を除去した環境下での乾湿繰り返し試験の結果をみると、初期養生期間中に充分水和が進行したと考えられる91日養生のものは強度

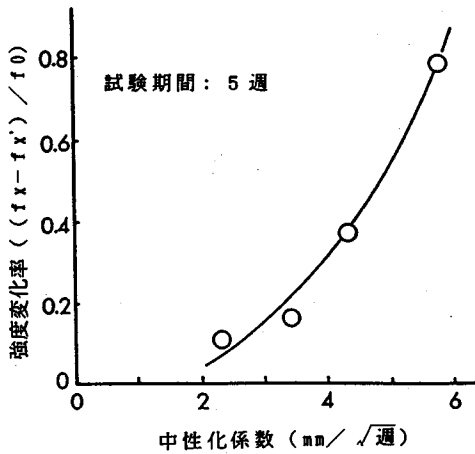


図-5 中性化係数と中性化による強度変化率との関係

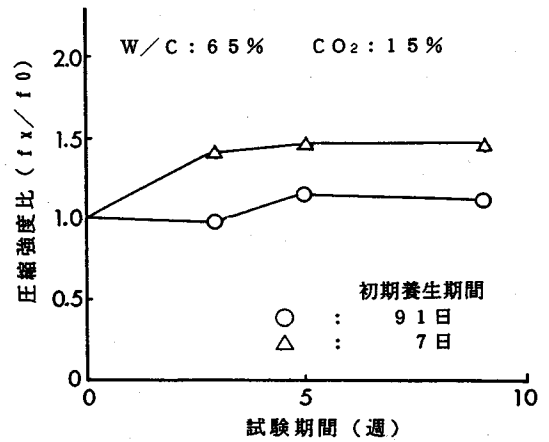


図-7 散水促進中性化試験における圧縮強度の経時変化

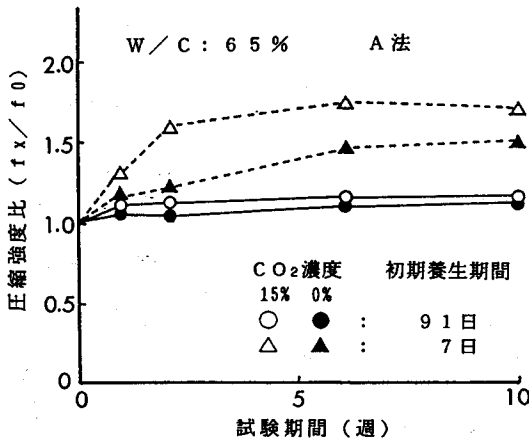


図-6 乾湿繰り返し促進中性化試験における圧縮強度の経時変化

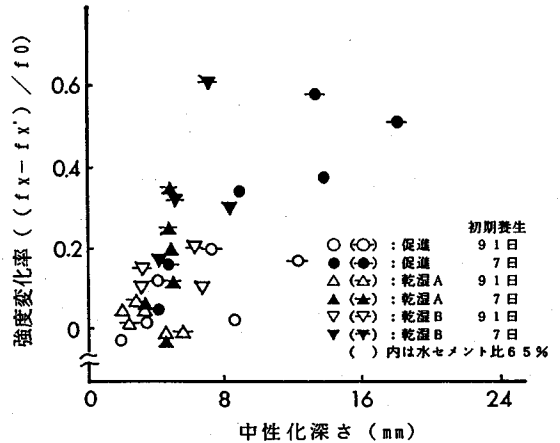


図-8 中性化深さと圧縮強度変化率の関係

の伸びがほとんど無いのに対して、7日養生では水分の供給によって乾湿繰り返しを行わないもの(図-4)より強度の伸びが大きくなっている。

(4) 散水促進中性化試験による圧縮強度変化

図-7に散水促進中性化試験を行った供試体の圧縮強度比の変化を示す。図より、通常の促進試験および乾湿繰り返し促進試験と同様に中性化の進行と共に強度が増加し、中性化が速いものほど増加の割合が大きくなっている。なお、散水促進中性化試験に対応する二酸化炭素を除去した環境下での散水暴露試験を行っていないので、水和の影響を除いた中性化だけによる強度増加については検討できなかった。

(5) 中性化深さと圧縮強度の関係

各種促進中性化試験における圧縮強度変化について検討を行ってきたが、圧縮強度はコンクリートの品質を代表する重要な指標であるため、どの程度中性化すればどの程度強度が変化するかを知ることは非常に重要なこ

とであると考えられる。図-8に中性化深さと中性化による強度変化率の関係を示す。図より、中性化深さが大きいほど圧縮強度の伸びが大きくなる傾向がみられるが、その傾向はモルタルの配合および初期養生条件、促進試験の種類によって異なっている。従って、中性化深さだけから強度変化を予測することは困難であると考えられる。

4. 中性化による圧縮強度変化の予測

(1) 複合体の強度

中性化による圧縮強度変化を予測することはコンクリートの耐久性を考える上で重要であるが、3.(5)で検討したように中性化深さから強度変化を予測することは困難である。そこで本研究では供試体表面から5mm幅で試料を採取し、微細組織の状態から各部分の強度を推定し、これを合成して供試体全体の強度を推定する方法を検討した。

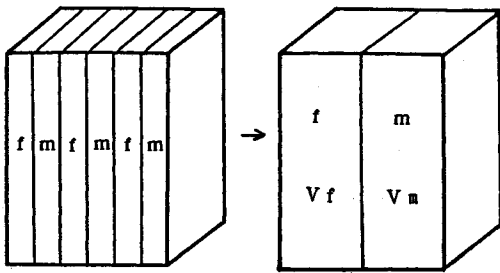


図-9 複合材料の概念

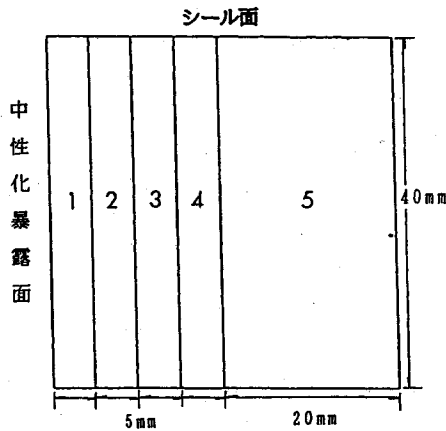


図-10 供試体の分割方法

一方強化型の複合材料の強度は近似的に次式で表すことができる²⁾。(図-9)

$$\sigma_c = \sigma_{fu} V_f + (\sigma_m) \varepsilon_{fu} V_m \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 σ_c ：複合材料の破壊応力

σ_{fu} ： f の破壊応力

$(\sigma_m) \varepsilon_{fu}$ ： f の破壊ひずみに対する m の応力

V_f, V_m ： f および m の体積比

$$(V_f + V_m = 1)$$

この関係を用いて図-10に示すように供試体を5分割してそれぞれの強度を求め、全体の強度を推定することとした。なお、供試体表面(シールの無い面)から20mmまでは試料を採取し、熱分析および細孔量の測定を行ったが、20~40mmの部分については測定値が無いのでこの部分では中性化の影響が無いものと仮定し、二酸化炭素を除去した環境下での暴露試験を行った供試体の強度をそのまま用いた。従って、中性化した供試体の圧縮強度は図-11のような概念で次式を用いて計算される。

$$F_c = \sigma_1 v_1 + \sigma_2 v_2 + \sigma_3 v_3 + \sigma_4 v_4 + \sigma_5 v_5 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 F_c ：供試体の圧縮強度

σ_n ：破壊時の各部分の応力 ($n=1\sim 5$)

$$v_n = V_n / V$$

V_n ：破壊時に σ_n の応力を持つ部分の体積

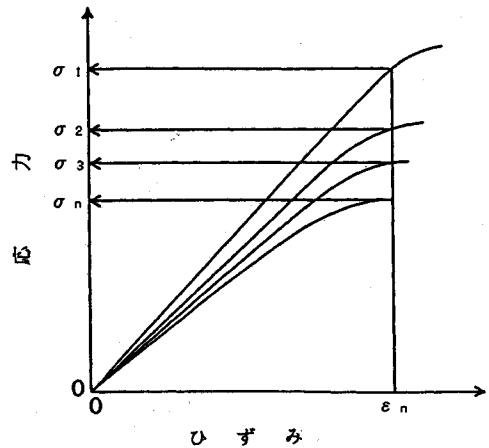


図-11 強度の計算方法

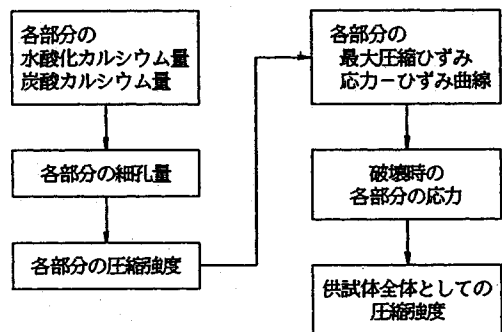


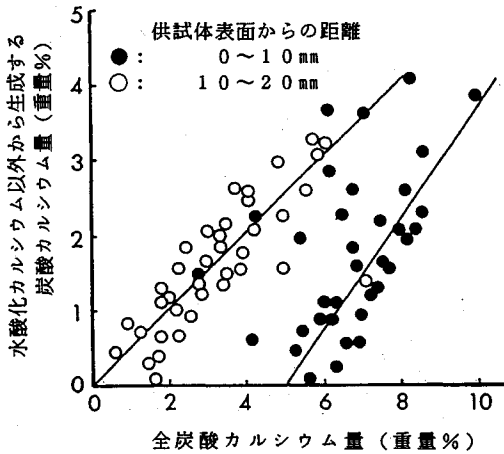
図-12 強度予測のフローチャート

V ：供試体の体積

式(2)を用いて圧縮強度を求めるには5mmの幅を持つ各部分の圧縮強度を求めなければならないが、本研究では供試体全体の強度しか測定しておらず、各部分の強度を直接測定することはできない。そこで、中性化による微細組織の変化の程度の指標となり、かつ解析¹³⁾によってその量の推定が可能な水酸化カルシウム量および炭酸カルシウム量をパラメータとして各部分の強度を求めることとした。強度予測のフローチャートを図-12に示す。

(2) 水酸化カルシウム量および炭酸カルシウム量と細孔量の関係

本研究では水和の進行程度の指標として水酸化カルシウム量を、中性化の進行の指標として炭酸カルシウム量を用いて細孔量との関係を定量化した。ここで、中性化の原因となる炭酸化反応は水酸化カルシウム、C-S-H、エトリンガイトおよびモノサルフェート等から炭酸カルシウムを生成するが、このうち水酸化カルシウムから生成する炭酸カルシウムだけが組織の緻密化に貢献し、他の物質から生成する炭酸カルシウムは組織の緻密化に無関係であると仮定した。これは、エトリンガイトおよびモノサルフェートについては他の水和物と比較してその



図一三 全炭酸カルシウム量と水酸化カルシウム以外から生成する炭酸カルシウム量との関係

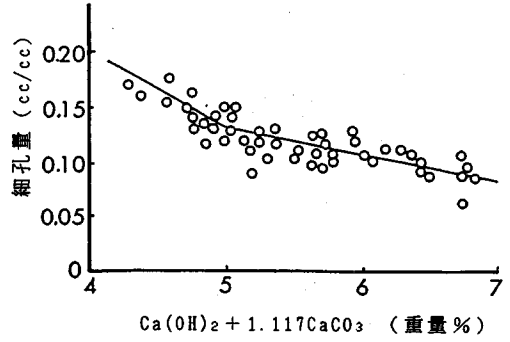
量が少ないこと、また C-S-H については、Bier らが高炉スラグを混和したセメントペーストの場合、水酸化カルシウムの生成量が少ないため炭酸化反応により生成する炭酸カルシウムのほとんどが C-S-H からのものであり、細孔量の減少が普通ポルトランドセメントに比べ著しく小さいことを実験的に確認している¹⁴⁾ためである。水酸化カルシウムから生成する炭酸カルシウムの量は初期養生直後の水酸化カルシウム量から各促進期間における水酸化カルシウム量を引くことによって炭酸化による減少量を求め、分子量の比(水酸化カルシウム:74, 炭酸カルシウム:100)から計算して求めた。なお、初期養生期間7日のものは促進試験中に水和の継続によって水酸化カルシウム量が増加する可能性があるため、二酸化炭素を除去した試験を行った供試体の水酸化カルシウム量を経時的に測定して補正を行った。図一三に全炭酸カルシウム量と水酸化カルシウム以外から生成した炭酸カルシウム量との関係を示す。図より、供試体表面からの距離によって両者の関係には異なる傾向がみられた。これは、供試体表面に近いほど供試体内の水分の蒸発が速く、水酸化カルシウム以外からの炭酸カルシウムの生成反応が起きにくくなっているものと推測される。図の関係を以下のように定式化した。

供試体表面より 0~10 mm
 $CC < 5 \quad CC' = 0$
 $CC \geq 5 \quad CC' = 0.75CC - 3.75 \dots\dots\dots (3-1)$

供試体表面より 10~20 mm
 $CC' = 0.5CC \dots\dots\dots (3-2)$

ここで、CC: 全炭酸カルシウム量 (重量%)
 CC': 水酸化カルシウム以外から生成する炭酸カルシウム量 (重量%)

水酸化カルシウムが炭酸化反応で炭酸カルシウムに変化する際、体積が約 11.7% 増加する¹⁵⁾ことから炭酸カ



図一四 水酸化カルシウム量および炭酸カルシウム量と細孔量との関係

ルシウム量を 1.117 倍して重みを加え、これに水酸化カルシウム量を足した値を細孔量推定のパラメータとして用いることとした。図一四に水酸化カルシウム量と水酸化カルシウムから生成した炭酸カルシウム量との和と半径 75~75000 Å の範囲の細孔量との関係を示す。図より、水酸化カルシウムと炭酸カルシウム量の和が大きくなるほど細孔量が減少している。また、両者の関係式は以下のようになった。

$C < 5 \quad P = -0.0750C + 0.505$
 $C \geq 5 \quad P = -0.0236C + 0.248 \dots\dots\dots (4)$
 ここで、P: 半径 75~75000 Å の細孔量 (cc/cc)
 C: $Ca(OH)_2 + 1.117 CaCO_3$ (重量%)

(3) 細孔量と圧縮強度の関係

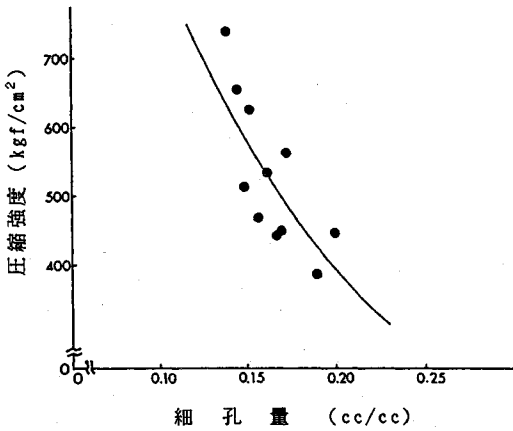
セメント硬化体のような多孔体の圧縮強度は内部の空隙の量に依存することが知られている¹⁶⁾。圧縮強度に影響を及ぼす細孔径の範囲については諸説があるが、本研究では 75~75000 Å の範囲をパラメータとして用いた。図一五に微細組織が供試体全体にわたって比較的变化が少ないと考えられる初期養生直後の供試体の細孔量と圧縮強度の関係を示す。図より、両者の関係は以下の式で表すことができる。

$F = 1820.1 \exp(-7.654P) \dots\dots\dots (5)$
 ここで、F: 圧縮強度 (kgf/cm²)
 P: 細孔量 (cc/cc)

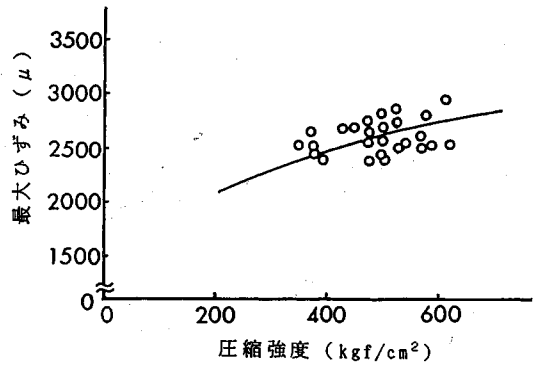
(4) 圧縮強度と最大ひずみの関係

式(2)を用いて圧縮強度を求めるには供試体内で最も弱い部分が破壊するときの他の部分の応力がわからなければならないが、これは最も弱い部分の最大圧縮ひずみによって決まる。図一六に圧縮強度と最大圧縮ひずみの関係を示す。図より、圧縮強度が大きくなるほど最大圧縮ひずみも大きくなっている。両者の関係は Popovics¹⁷⁾が提案している式をもとに以下のように定式化した。

$\epsilon_m = 5.47 \times 10^4 \cdot \sqrt{F} \dots\dots\dots (6)$
 ここで、 ϵ_m : 最大ひずみ



図—15 細孔量と圧縮強度の関係



図—16 圧縮強度と最大ひずみの関係

F : 圧縮強度 (kgf/cm²)

(5) 応力—ひずみ曲線

圧縮強度試験においては供試体で最も弱い部分が最大ひずみに達した時に他の部分はそのひずみで決まる応力を負担しており、その応力によって供試体全体の強度が決まる (図—11). 従って、式 (2) によって圧縮強度を求めるには最も強度の小さい部分については最大ひずみ、他の部分については応力—ひずみ曲線がわからなければならない。応力—ひずみ曲線の形状はPopovics¹⁷⁾が提案した以下のような関係から求めることとした。

$$S = naE / (na - 1 + E^{\mu}) \dots\dots\dots (7)$$

$$S = \sigma / F$$

$$E = \varepsilon / \varepsilon_m$$

ここで、 σ : 応力 (kgf/cm²)

F : 圧縮強度 (kgf/cm²)

ε : ひずみ

ε_m : 最大ひずみ

na : 実験定数

式 (7) を用いるには実験定数 na を求めなければならないが、この値は圧縮強度と相関があるとされている。本研究で行った実験結果からこの関係を求めると以下のようなになる。

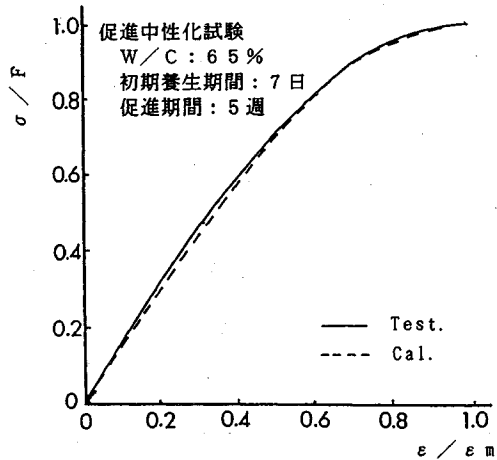
$$na = 1 + 0.30(F/100)^{1.55} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 F : 圧縮強度 (kgf/cm²)

図—17に応力—ひずみ曲線の実験値と計算値の比較例を示す。図より、計算値は実験値を精度よく表している。

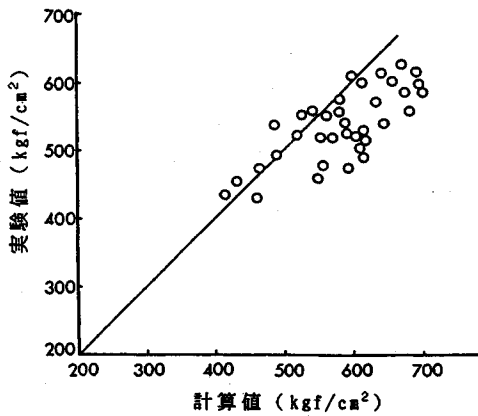
(6) 圧縮強度の予測結果

式 (2) と式 (4)~(8) を用い、図—12 に示すフローチャートに従い、中性化による圧縮強度の変化を実験で得られた水酸化カルシウム量および炭酸カルシウム量を用いて予測した。実験値と計算値を比較したものを図—18 に示す。図より、計算値は実験値より大きくなるよ

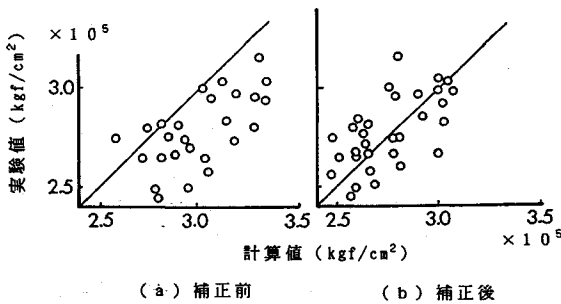


図—17 応力—ひずみ曲線の計算例

うな傾向がみられる。この現象については2つの原因が考えられる。第一は式 (2) が原因となって生じる差である。既に述べたように式 (2) は簡略化された近似的な式であるため本質的に実験値とは一致しない可能性があるものと考えられる。第二の原因は圧縮強度が空隙量からのみ決まると仮定したことによるものと考えられる。空隙以外の組織の強度が同じであれば、供試体の強度は基本的には空隙量だけから求めることができるが、実験結果をみると細孔量の減少に見合った強度増加が起こっていない。従って、中性化によって組織の緻密化による強度増加と共に空隙以外の部分で強度低下が起こっている可能性があると考えられる。鈴木らは中性化したコンクリートにおいてセメントの主要な水和生成物であるC-S-Hが分解していることを確認しているが⁵⁾、このC-S-Hの分解を空隙以外の組織の強度低下の原因と仮定して予測値に補正を行うこととした。補正は実際にC-S-Hの分解が強度に与える影響が不明なので静弾性係数(1/3セカントモデュラス)を用いて行った。式 (2) が厳密に成り立つとは言えないのに対し、静弾性係数は供試体がほぼ弾性であると考えられる範囲で求めている



図—18 圧縮強度の予測結果



(a) 補正前 (b) 補正後
図—19 静弾性係数の予測結果

ため次式が成り立つものと考えられる。

$$E_c = E_1v_1 + E_2v_2 + E_3v_3 + E_4v_4 + E_5v_5 \dots (9)$$

ここで、 E_c : 供試体の静弾性係数 (kgf/cm²)

E_n : n 部分の静弾性係数 (kgf/cm²)

$v_n = V_n/V$

V_n : n 部分の体積

V : 供試体の体積

各部分の静弾性係数 E_n は実際には測定できないので供試体全体の圧縮強度と静弾性係数の関係を実験結果を用いて式 (10) のように定式化し、細孔量から計算した各部分の圧縮強度を代入することによって求めた。

$$E = (0.00367F + 0.748) \times 10^5 \dots (10)$$

ここで、 E : 静弾性係数 (kgf/cm²)

F : 圧縮強度 (kgf/cm²)

補正は C-S-H の分解の程度を表すと考えられる水酸化カルシウム以外から生成した炭酸カルシウム量を指標とし、供試体全体の静弾性係数が実験値と最もよく一致するように try and error で静弾性係数の補正式を導いた。

$$E'_n = E_n(1 - 0.04CC') \dots (11)$$

ここで、 E'_n : 補正した n 部分の静弾性係数 (kgf/cm²)

E_n : 補正前の、細孔量から計算した n 部分の静弾性係数 (kgf/cm²)

CC' : 水酸化カルシウム以外から生成した炭酸カルシウム量 (重量%)

補正前と後の静弾性係数の実験値と計算値の関係を図—19 に示す。図より、補正することによって全体的に計算値が実験値より大きくなるような傾向が消えている。式 (11) を用いて中性化した供試体の各部分の静弾性係数を補正し、補正された静弾性係数から再度式 (10) を用いて圧縮強度を求めた。このようにして求めた各部分の強度から式 (2) と式 (6)~(8) を用い、圧縮強度を予測した。この計算値と実験値の比較を図—20 に示す。図より、計算値が実験値より大きくなるような傾向がなくなり、計算値はほぼ±10%以内の差に収まっている。また、配合条件、初期養生条件および促進方法が異なる場合においては中性化深さから強度変化を予測できなかったが、水酸化カルシウム量および炭酸カルシウム量をパラメータとする本方法ではあらゆる条件において中性化による圧縮強度の変化を予測することができると考えられる。なお、式 (9) の妥当性について検討を行った結果は Appendix において示す。

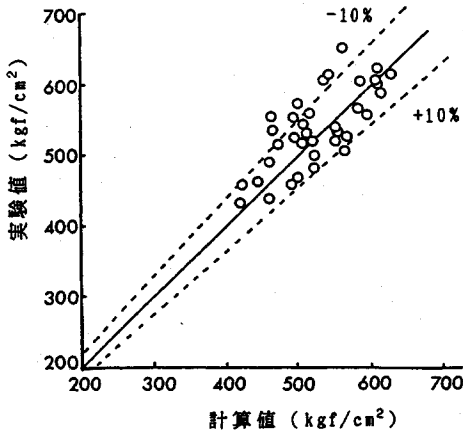
図—20 に示した計算値は熱分析によって直接測定した水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウム量を用いて計算したものである。図—21 に水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウム量を中性化深さの予測に用いた拡散方程式¹³⁾から計算される値を用いて計算を行った結果を示す。なお、解析では水酸化カルシウム以外から生成する炭酸カルシウムは考慮していないので、式 (3) を用いて水酸化カルシウム以外から生成する炭酸カルシウム量を計算した。図より、計算値は実験値とよく一致しており、促進中性化試験においては初期養生直後の細孔量と水酸化カルシウム量がわかれば圧縮強度変化を予測できると考えられる。しかし、この拡散方程式による解析では促進中の水および細孔溶液内の各種イオンの影響を考慮していないので、乾湿繰り返しおよび散水促進中性化試験のような促進中に水分の供給のある試験については適用対象外である。

5. 結 論

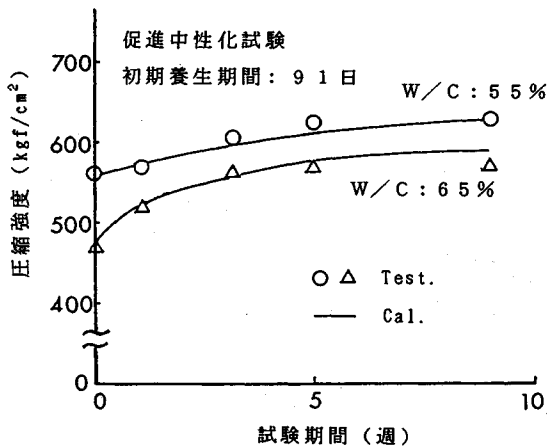
本研究では促進中性化試験、乾湿繰り返し促進中性化試験および散水促進中性化試験を行い、中性化がモルタル供試体の圧縮強度に及ぼす影響について検討を加えた。また、中性化による圧縮強度変化を予測する手法について検討を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) モルタル供試体は中性化することで微細組織の緻密化が起こり、圧縮強度が増加する。

(2) 中性化の進行の速いものほど圧縮強度の増加は大きい。しかし、供試体の配合、初期養生条件および中性化の促進方法によって強度増加の割合は異なり、中性



図—20 圧縮強度の予測結果 (補正後)



図—21 圧縮強度の経時変化の予測結果 (解析による)

化深さだけから圧縮強度の増加を予測することはできない。

(3) モルタル供試体の中性化による強度変化を配合条件、初期養生条件および促進方法にかかわらず水酸化カルシウム量および炭酸カルシウム量を用いて予測する手法を提案した。

(4) 中性化は細孔量の減少による強度増加の作用と同時に空隙以外の部分の強度を低下させる作用があると推定される。

謝 辞

本研究を行うに当たり、実験の実施では当時新潟大学4年生であった松尾景信氏(現・三井不動産建設(株))と池田賢治氏(現・佐藤工業(株))に多大な御助力を頂いた。また、細孔量の測定では新潟県工業技術センター複合材料科の皆様の御協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

付表—1 静弾性係数の予測結果

W / C (%)	実験値	計算値
45 + 55	3.00	2.98
55 + 65	2.63	2.87
65 + 45	2.23	2.35

単位: 10^5 kgf/cm²

Appendix

本研究において提案した圧縮強度予測手法は静弾性係数の複合則(式(9))が成り立つことが前提となっている。この点について検証実験を行っているので以下にその結果を示す。

実験は40×40×160 mmの型枠を用い、水セメント比が45、55および65%単独のモルタル供試体と、各水セメント比のモルタルを型枠内に20×40×160 mm打設し、フリージング終了後にレイタンスを取り除き、その上に異なる水セメント比のモルタルを打ち継いだ供試体を用いた。水セメント比の組合せは45%と55%(45+55)、55%と65%(55+65)および65%と45%(65+45)の三種類である。供試体は材令7日まで水中養生を行い、水セメント比の異なる部分が載荷方向に対して並列となるようにして圧縮載荷して圧縮ひずみを測定した。付表—1に水セメント比を組み合わせた供試体の弾性係数の測定結果と単独の水セメント比の供試体の測定結果から計算した値(式(9))を用いて計算)を示す。付表より、実験値と計算値はほぼ同じ値となっており、今回用いた手法は本研究で行った実験結果の評価には十分な精度を有していると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Kroone, B. and Crook, D.N.: Studies of Pore Size Distribution in Mortars, Magazine of Concrete Research, No.13, pp.127-132, 1961., No.14, pp.43-46, 1962.
- 2) Czernin, W. (徳根訳): 建設技術者のためのセメント・コンクリート化学, 技報堂出版, 1985.
- 3) 尼崎: コンクリートの諸特性に及ぼす炭酸化の影響に関する研究, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.197-200, 1984.
- 4) 土木学会編: フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究(最終報告), コンクリートライブラリー第64号, 1988.
- 5) 鈴木・西川・山出・谷口: コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析手法に関する研究, コンクリ

- ト工学論文集 Vol.1, No.2, pp.39~49, 1990.
- 6) 岡島・石川：セメント硬化体の力学的性質に及ぼす含水率の影響に関する一考察，第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.101~104, 1980.
 - 7) 佐伯・大賀・長滝：コンクリートの中性化の機構，コンクリート工学年次論文報告集11-1, pp.563~568, 1989.
 - 8) 大賀・佐伯・長滝：乾湿繰り返しを受けるコンクリートの中性化に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.43, pp.418~423, 1989.
 - 9) 佐伯・長滝・大賀・高見：降雨により水分の供給を受けるコンクリートの中性化，コンクリート工学年次論文報告集13-1, pp.609~614, 1991.
 - 10) 長滝・大賀・佐伯：コンクリートの中性化深さの予測，セメント技術年報，No.41, pp.343~346, 1987.
 - 11) たとえば，福島：鉄筋コンクリート造建築物の寿命，技報堂出版，1990.
 - 12) 藤井・座古：複合材料の破壊と力学，実務教育出版，1982.
 - 13) 佐伯・大賀・長滝：コンクリートの中性化の機構解明と進行予測，土木学会論文集，第414号/V-12, pp.99~108, 1990.
 - 14) T.H.A. Bire, J. Kropp and H.K. Hilsdorf : Carbonation and Realkalinization of Concrete and Hydrated Cement Paste, Proceedings of the First International RILEM Congress, pp.927~934, 1987.
 - 15) 後藤：セメント硬化体と空隙，セメント・コンクリート No.426, pp.16~21, 1985.
 - 16) 近藤編著：多孔材料，技報堂出版，1970.
 - 17) Popovics, S. : A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research Vol.3, No.5, Sept., pp.583~599, 1973.

(1991.4.11 受付)

CHANGE IN STRENGTH OF MORTAR DUE TO CARBONATION

Tatsuhiko SAEKI, Kouichi YONEYAMA and Shigeyoshi NAGATAKI

Physical properties of mortar change due to carbonation. An accelerated carbonation test, a wet-dry accelerated test, and a cyclic accelerated carbonation and water-spray test were performed to investigate the change in compressive strength of mortar. The depth of carbonation, the amount of calcium hydroxide and calcium carbonate, pore volume, and the compressive strength of mortar were measured. The compressive strength of mortar is increased due to carbonation. Pore volume depends on the amount of calcium hydroxide and calcium carbonate. The change in the compressive strength of mortar due to carbonation can be predicted by the use of the amount of calcium hydroxide and calcium carbonate as a parameter.