

初期養生以降のセメントの水和の影響を 考慮した中性化進行予測

佐伯竜彦¹・米山紘一²・長滝重義³

¹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)

²正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科

³正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

本研究では、初期養生以降のセメントの水和の進行が中性化速度に対してどのような影響を及ぼすかを明らかにするため、実験のおよび解析的検討を加えた。その結果、乾燥や水分の供給を受ける場合のセメントの水和進行予測手法と中性化進行予測手法とを組み合わせることにより、促進試験中のセメントの水和の影響を考慮した中性化進行予測が可能となった。

Key Words : carbonation, hydration of cement, initial curing

1. まえがき

コンクリートの中性化速度は二酸化炭素等の物質移動性に関する細孔構造と細孔溶液のpHの保持に依存する水酸化カルシウム量に依存するが¹⁾、これらはセメントの水和の進行によって変化する。しかし、中性化する前の細孔構造や水酸化カルシウム量は中性化速度の評価に際して考慮されているが、初期養生以降の暴露中もしくは促進試験中のセメントの水和の進行の影響はほとんどの場合考慮されていない。セメントの水和反応は初期養生以降も継続するため、中性化に対する抵抗性は材令とともに変化すると考えられる。自然暴露したコンクリートの場合、特に降雨により水分の供給を受ける屋外暴露状態においては、長期にわたり水和反応が継続すると考えられ、この影響が顕著になると予想される。これに対し、促進試験は二酸化炭素濃度を高くすることにより中性化を短時間で進行させるが、中性化の促進と同じ倍率でセメントの水和反応を促進しているわけではない。従って、促進試験によって自然暴露状態のコンクリートの中性化深さを推定する場合や初期養生条件が中性化速度に及ぼす影響を評価する場合には、促進試験および自然暴露状態でのセメントの水和進行特性とセメントの水和が中性化に及ぼす影響を定量的に把握する必要がある。

そこで本研究では、初期養生以降のセメントの水和の進行が中性化速度に及ぼす影響を基礎的に評価するた

め、モルタル供試体を用いて、促進試験における中性化速度および乾燥や水分の供給を受けて含水状態の変化する場合の水和の進行について検討し、それらに基づいてセメントの水和の影響を考慮した中性化進行予測手法を開発することを目的とした。

2. 促進試験中のセメントの水和が中性化の進行に及ぼす影響²⁾

(1)実験概要

a) 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セメントであり、セメントの化学成分を表-1に示す。

細骨材は豊浦標準砂、相馬砂の細、粗砂の3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45%、55%および65%の3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。

b) 初期養生条件

初期養生期間は1日、7日、28日および91日の4種類である。供試体は打設後24時間で脱型し、所定の材令まで20℃の水中養生を行った。

c) 供試体

供試体は40×40×160mm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(40×160mm)を除いた他の5面をエポキシ系の接着剤で

表-1 セメントの化学成分

ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	N ₂ O	K ₂ O	Total	(%)
1.2	22.2	4.9	3.0	64.0	1.3	2.1	0.29	0.48	99.47	

表-2 モルタルの配合

水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	単位細骨材量 (kg/m ³)	f l o w
4.5	648.6	291.8	1316.0	171
5.5	573.6	315.5	1316.3	209
6.5	514.2	334.2	1316.7	238

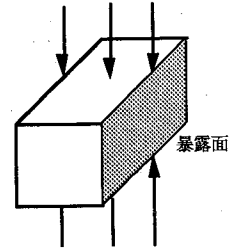


図-1 圧縮強度試験における載荷方法

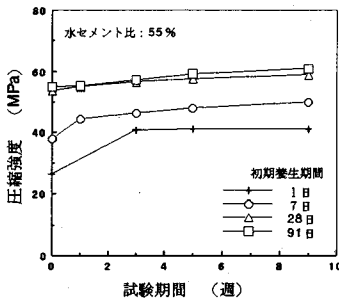


図-2 二酸化炭素を除去した暴露試験における圧縮強度の経時変化

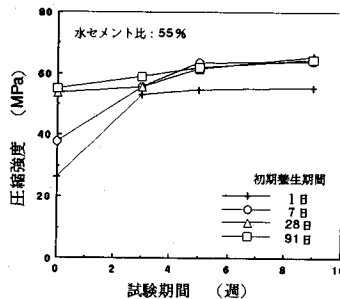


図-3 二酸化炭素を除去した乾湿繰り返し暴露試験における圧縮強度の経時変化

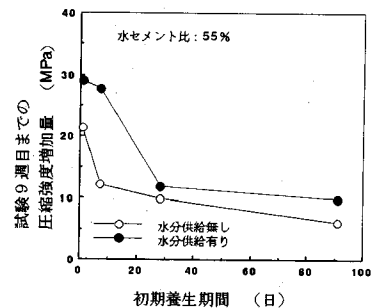


図-4 初期養生期間と圧縮強度増加量の関係

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。

d) 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℃、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促進開始から1週、3週、5週、9週目において、供試体を軸方向端部より25mmの厚さで割裂して、40×40×25mm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。測定値は2個の供試体の平均値とした。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。

e) 散水促進中性化試験

降雨などにより水分の供給を受けるコンクリートの中性化進行性状について検討するため、促進中性化試験中に定期的に供試体に水分の供給を行う散水促進中性化試験を行った。試験は毎日一定時刻から連続3時間シャワー状の水分を毎分1.5ℓ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た。なお、水分供給以外の条件は促進中性化試験と同じである。

f) 二酸化炭素を除去した暴露試験

中性化による強度変化と水和の進行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暴露試験を行い、経時的に圧縮

強度を測定した。測定材合は試験開始後1週、3週、5週および9週目である。

試験条件は温度40℃、相対湿度50%であり、二酸化炭素の除去にはソーダ石灰を用いた。供試体は促進試験を行うものと同様に、初期養生終了後に5面をシールして恒温恒湿槽内に設置した。

暴露試験を継続するものは促進中性化試験に対応し、乾湿繰り返しを行うものは散水促進中性化試験に対応する。乾湿繰り返し試験では毎日3時間ずつ、40℃の水中浸漬を行った。

供試体は所定の材合においてシールを除去し、24時間の炉乾燥(105℃)を行った後、圧縮強度を測定した。これは、試験期間によって供試体の含水率が異なることによる影響を補正するためである。1回の測定には3個の供試体を用いた。また、載荷の方法を図-1に示す。

(2)初期養生以降の圧縮強度の経時変化

図-2に二酸化炭素を除去した暴露試験におけるモルタル供試体の圧縮強度の経時変化の一例を示す。図より、初期養生期間が7日以下の場合には明らかに強度が増加しており、初期養生期間の比較的長い28日および91日のものも若干ではあるが増加が見られる。

図-3に二酸化炭素を除去した乾湿繰り返し暴露試験における強度変化の一例を示す。図-2との比較により、試験中に供試体に水分の供給を行った場合は、供給を行わない場合に比べて強度の伸びが大きいことが確

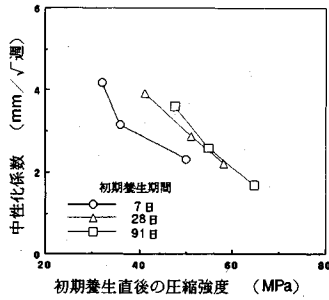


図-5 初期養生直後の圧縮強度と中性化係数の関係 (促進中性化試験)

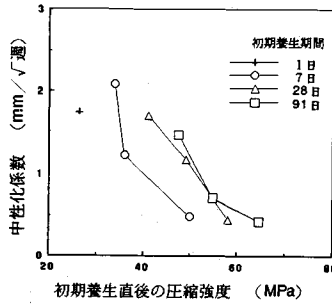


図-6 初期養生直後の圧縮強度と中性化係数の関係 (散水促進中性化試験)

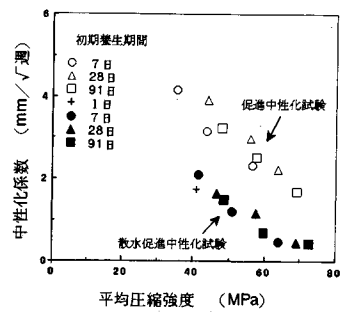


図-7 平均圧縮強度と中性化係数の関係

認できる。また、初期養生期間1日の場合を除き、試験3週目にはほぼ同じ強度に達し、その後5週目から9週目にかけてはほぼ一定値となっている。

以上のことから、条件によって差はあるものの、初期養生以降においてもセメントの水和が継続していることが確認できる。

図-4に初期養生期間と初期養生直後から試験9週目までの圧縮強度増加量の関係を示す。水分の供給がある場合は、無い場合に比べ増加量が大きく、また、初期養生期間が短いほどそれ以降の水和の余地が大きいいため強度の増加量は大きくなっている。初期養生期間28日と91日を比較すると強度の増加量はほぼ同じとなっている。従って、材令28日強度を用いて初期養生期間28日以上のコンクリートの中性化速度を評価すること³⁾はある程度妥当であると考えられる。

(3) 促進試験中のセメントの水和を考慮した中性化速度の評価

図-5および図-6に促進中性化試験および散水促進中性化試験における初期養生直後の圧縮強度と中性化係数(中性化深さの促進期間の平方根に対する比)の関係を示す。中性化係数は促進9週目までのデータから最小2乗法により求めた。図より、促進方法によらず圧縮強度が大きいほど中性化係数が小さくなる。即ち、中性化速度が小さくなる傾向が見られる。しかし、どちらの促進方法においても、初期養生期間によって圧縮強度と中性化係数の関係は異なっており、特に、初期養生期間7日と28日および91日との差が大きい。即ち、初期養生直後の圧縮強度が同じであっても初期養生期間が異なると中性化係数が異なり、初期養生期間が短い方が中性化係数が小さくなっている。2. (2)で検討したように、初期養生以降でも強度の増加が起きており、初期養生直後の圧縮強度で評価したものは異なる水和進行度のモルタルで中性化が進行しているものと考えられる。ま

た、図-4より、初期養生期間が短い方が試験中の強度の伸びが大きくなっている。このため、初期養生直後において同じ圧縮強度が得られている場合には初期養生期間が短い方が中性化に対する抵抗性が大きくなるものと考えられる。従って、初期養生条件の異なる供試体の中性化速度を比較検討するためには、試験中の水和進行の影響を考慮する必要があり、初期養生直後の圧縮強度だけでは不十分であると思われる。また、図-3に示したように、初期養生期間1日の場合を除いて、同じ水セメント比では水分の供給がある条件では試験3週目においてほぼ同じ強度に達している。しかし、初期養生期間が長い方が中性化速度は小さい。従って、中性化速度は初期養生直後の水和進行度の影響もある程度受けていると考えられる。

そこで、初期養生直後の圧縮強度と二酸化炭素を除去した暴露試験9週目の圧縮強度の平均値(平均圧縮強度)を中性化速度評価のパラメータとして用いることとした。図-7に促進中性化試験、散水促進中性化試験における平均圧縮強度と中性化係数の関係を示す。図より、初期養生直後の圧縮強度を用いた場合と異なり、初期養生期間によらず平均圧縮強度によって一律に中性化係数を評価できると考えられる。ただし、測定される圧縮強度は供試体各部分の強度の平均的な値として得られるが、暴露試験においては供試体表面(シールの無い面)から水分の蒸発が起きているため供試体表面付近と内部では含水率が異なり、水和の程度が異なっている可能性がある。このため、平均圧縮強度は実際に中性化が進行している部分の水和度を正確に反映しておらず、中性化速度を支配している部分の微細組織の状態および水酸化カルシウム量は圧縮強度からは確認できない。しかし、促進試験中の水和の進行の影響を含む平均圧縮強度は中性化速度を評価するための一応の目安となるものと考えられる。

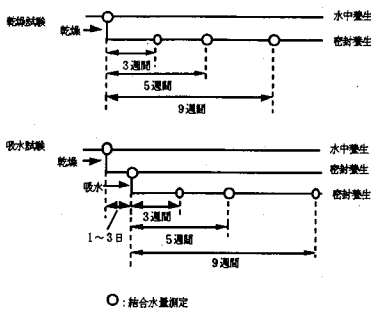


図-8 乾燥試験および吸水試験の概要

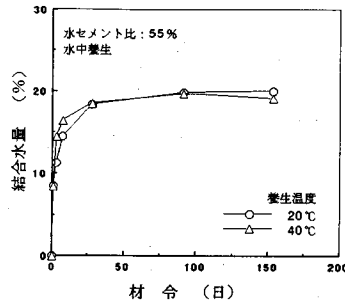


図-9 水中養生継続試験における結合水量の経時変化

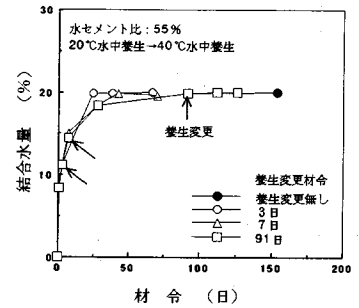


図-10 養生変更試験における結合水量の経時変化

3. 初期養生以降に乾燥や水分の供給を受ける場合のセメントの水和

2. (3) で述べた通り、平均圧縮強度は中性化速度に関係する部分の水和度だけを評価しているわけではなく、中性化の進行に関係無い部分の影響を含んでいる。また、今回は初期養生直後と二酸化炭素を除去した暴露試験9週目における強度により平均強度を求めたが、どの時点の強度を用いればよいか理論的に明確になっていない。そのため、本研究の範囲内では良い結果が得られたが、諸条件が異なる場合にもこの方法が有効であるかについては不明である。そこで、含水率の変化に応じて供試体の各部分ごとに経時的にセメントの水和の進行を予測する方法について検討した。

(1) 実験概要

a) 使用材料および配合

使用材料およびモルタルの配合は2. (1) と同様である。

b) 初期養生

初期養生条件についても2. (1) と同様とした。

c) 供試体

供試体は40×30×5mmの薄板状のものを用了。これは、供試体内の含水状態を均一にするためである。

d) 水中養生継続試験・密封養生継続試験

基本的な水和性状を検討するため、水中養生および密封養生を継続し、水和の程度を表わす指標として、材令154日まで経時的に結合水量を測定した。密封養生は供試体をビニール袋に包み、さらにパラフィンでシールして行った。養生温度は20°Cおよび40°Cの2種類である。

結合水量は供試体を105°Cで24時間乾燥した後、電気炉を用いて1000°Cで6時間の加熱を行い、測定した。105°Cまでの重量減少を蒸発可能水量とし、105°Cから

1000°Cまでの重量減少を結合水量とした。また、結合水量の測定に併せて、水銀圧入法による細孔径分布の測定および熱重量分析による水酸化カルシウム量の測定を行った。それぞれの測定値は3個の供試体の平均値とした。

e) 養生変更試験

本研究で用いるモルタル供試体は全て初期養生として20°Cの水中養生を行った後、40°Cの条件で促進中性化試験等を行っている。そこで、温度変更のある場合の水和性状について検討するため、20°C水中養生を行った供試体を所定の材令で40°C密封養生に養生方法を変更する試験を行い、結合水量の経時変化を測定した。養生変更材令は3日、7日、28日、91日の4種類である。

f) 乾燥試験

乾燥によって含水状態が変化する場合の水和性状について検討するため、所定の初期養生終了後、供試体に乾燥を与え、その後密封保存して経時的に結合水量を測定した。測定は密封養生開始から3週、5週および9週目に行った。乾燥はその後の密封養生の温度(20°Cまたは40°C)と同じ温度で相対湿度50%の恒温恒湿槽内に供試体を1時間または6時間暴露することで与えた。逸散水分量は乾燥前後の供試体の重量変化より求めた。試験の概要を図-8に示す。

g) 吸水試験

2. (2) で検討した通り、暴露中に水分の供給を受ける場合には、圧縮強度が大きく増加する。そこで、暴露中に水分の供給がある場合のセメントの水和性状について検討するために、乾燥を与えた供試体に水分を供給し、その後の結合水量の経時変化を測定する吸水試験を行った。具体的には、初期養生終了後に所定の乾燥を与えた供試体を1日間または3日間密封保存し、5秒間、30秒間もしくは60秒間水中浸漬して供試体に吸水させた後、密封保存し、経時的に結合水量を測定した。測定は乾燥試験と同様に密封養生開始から3週、5週および

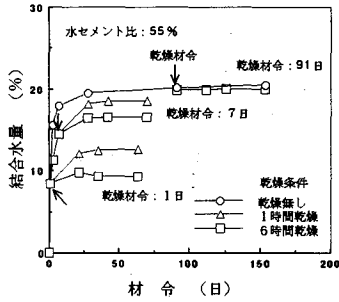


図-11 乾燥試験における結合水量の経時変化

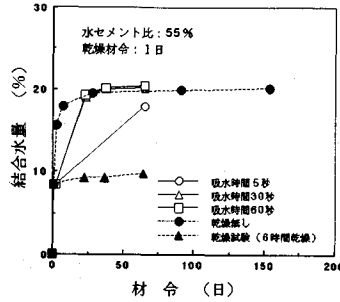


図-12 吸水試験における結合水量の経時変化

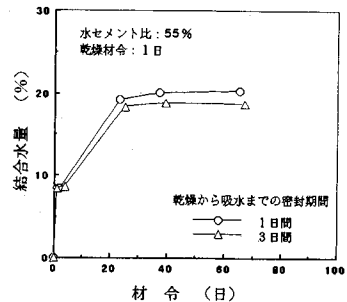


図-13 乾燥から吸水までの密封期間が水和に及ぼす影響

9週目に行った。浸透水分量は供試体の重量変化より求めた。試験の概要を図-8に示す。

(2) 結合水量の経時変化

本研究では、セメントの水和進行の指標としてセメント重量当たりの結合水量を用いた。以下に各種条件における結合水量の経時変化を示す。

a) 乾燥を受けない場合

図-9に水中養生を継続した場合の結合水量の経時変化を示す。図より、材令7日程度までは結合水量は急激に増加しているが、それ以降は緩やかに増加している。また、養生温度の影響を見ると、材令28日までは温度が高い方が結合水量も大きくなっているが、それ以降はほぼ同じとなっている。

図-10に養生変更試験を行った場合の結合水量の経時変化を示す。図より、養生温度が高くなることにより、結合水量は増加している。しかし、その影響は温度変更を行う時期が遅くなるほど小さくなっており、材令91日で変更を行ったものは20℃水中養生を継続したものとの違いは見られなかった。これは、水和が進行するほど、それ以降の水和の余地が少なくなるためであると考えられる。示した図は水セメント比55%のもののみであるが、他の水セメント比でも同様の傾向であった。

b) 乾燥を受ける場合

図-11に初期養生終了後に乾燥を与え、その後密封養生を行った供試体の結合水量の経時変化を示す。比較のために併記した無乾燥のデータは、乾燥を与えた材令と同じ材令において、水中養生から密封養生へ養生条件を変更したものとしている。図より、乾燥を与えたものは無乾燥に比べて、結合水量の増加が著しく抑制されている。特に、乾燥時間が6時間のものは乾燥後の結合水量の増加がほとんど無く、乾燥の程度が水和に与える影響は非常に大きいと考えられる。また、乾燥時期の影響については、乾燥を与えるまでの水中養生期間が長くなる

ほど無乾燥との差が小さくなっている。これは、水和が進むほどそれ以降の水和の余地が小さくなることによって、乾燥の影響が小さくなること、乾燥を与える方法として一定時間恒温恒湿槽内へ供試体を暴露しているため、水中養生期間が長くなるほど組織が緻密化し、逸散水分量が少なくなることが原因として考えられる。

c) 乾燥後に水分の供給を受ける場合

図-12に吸水試験における結合水量の経時変化を示す。比較のために併記したデータは、吸水試験において乾燥を与える材令と同じ材令において20℃水中養生から40℃密封養生へ養生変更を行ったもの、即ち乾燥を受けないものと、吸水試験と同じ乾燥を与え、その後水分を供給せずに密封養生した試験における結合水量の測定結果である。図より、乾燥を与えたものはその後の結合水量の増加がほとんど見られないのに対して、乾燥後に吸水したものは結合水量が増加している。また、吸水時間が長い程、結合水量は大きくなっており、吸水時間が30秒および60秒の場合は乾燥を与えない供試体とほぼ同程度の結合水量となっている。また、吸水時間が5秒のものは両者より結合水量の増加が小さくなっており、吸水量がセメントの水和に及ぼす影響は非常に大きいと考えられる。

本研究で行った吸水試験では原則として、乾燥から吸水までの間は1日間の密封養生としているが、乾燥材令1日のものについては密封養生期間を3日間としたものも併せて実験を行った。結合水量の経時変化を図-13に示す。図より、密封養生期間1日のものの方が3日より若干結合水量が大きくなっており、乾燥から吸水までの期間が長いほど水和に及ぼす乾燥の影響は大きくなると考えられる。このことは、乾燥履歴の違いによって水和の進行性状が異なってくることを示していると思われるが、本研究では、乾燥から吸水までの密封養生期間を3日間以上にした実験は行っておらず、また、密封期間を変えたのは乾燥材令1日の場合のみである。従って、今

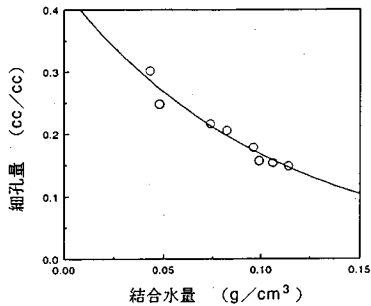


図-14 結合水量と細孔量の関係

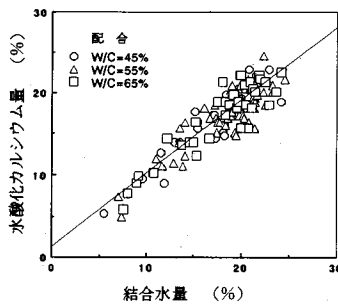


図-15 結合水量と水酸化カルシウム量の関係

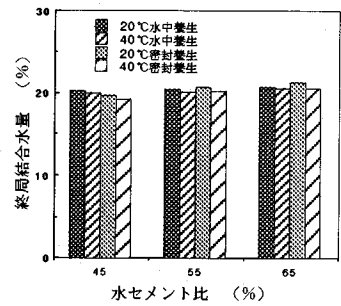


図-16 配合条件および養生条件と終局結合水量の関係

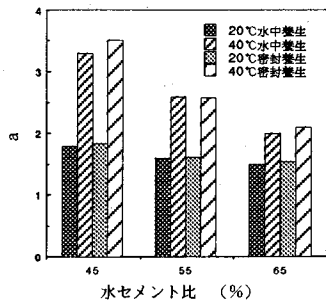


図-17 配合条件および養生条件と係数 a の関係

後はこの影響について検討する必要があると考えられる。但し、本研究の主要な検討対象の一つである散水促進中性化試験では21時間おきに水分の供給を行っており、乾燥後の結合水量の増加量が最も大きい乾燥材令1日の条件においても、密封期間による結合水量の相違が1~2%程度であることから、以降は乾燥から吸水までの期間の影響は考えないこととする。

d) 結合水量と細孔量の関係

本研究でセメントの水和進行について検討する本来の目的はセメントの水和の程度を正確に把握することではなく、水和の進行の結果、中性化の進行に影響を及ぼすコンクリートの物理的性質および化学的性質がどのように変化するかを知ることである。中性化の進行に影響を及ぼす物理的要因としては、コンクリート中の物質移動速度に関連する細孔構造が挙げられる。

図-14に結合水量と細孔量の関係を示す。結合水量はセメント量当たりの値ではなく、モルタル1cm³当たりの結合水量(単位セメント重量当たりの結合水量×モルタル1cm³中のセメント量)とした。これは、配合の違いによるセメント量の影響を考慮するためである。また、細孔量は20℃水中養生継続試験の材令7日、28日および91日のもので、範囲は半径75~75000Åとした。図より、結合水量が増加するに伴い、細孔量が減少して

いる。また、両者の関係は配合および初期養生条件によらず、以下の式で表わせる。

$$V = 0.431 \times 10^{-0.412w} \quad (1)$$

ここで、V：細孔量(cc/cc)

w：モルタル1cm³当たりの結合水量(g/cm³)

e) 結合水量と水酸化カルシウム量の関係

中性化の進行速度に影響を及ぼすものとして、細孔量とともに水酸化カルシウム量が挙げられる。図-15に結合水量と水酸化カルシウム量の関係を示す。結合水量および水酸化カルシウム量はセメント重量当たりの量とした。また、データは行った実験全ての結果(温度の違いも含む)を用いた。図より、結合水量の増加とともに水酸化カルシウム量が増加している。また、配合や温度、乾燥などの条件によらず結合水量と水酸化カルシウム量は一つの直線で表わすことができる。以下に、実験より求めた回帰式を示す。

$$C = 1.201 + 89.8w_n \quad (2)$$

ここで、C：セメント量当たりの水酸化カルシウム量(%)

w_n：セメント量当たりの結合水量(g/g)

(3) 結合水量の予測

a) 乾燥を受けない場合の水和進行

本研究では、セメントの水和進行の基本式として永松らの研究⁴⁾に従い、以下の式を用いることとした。

$$w_n = \frac{WT}{1 + T/aW} \quad (3)$$

ここで、w_n：材令Tにおけるセメント重量当たりの結合水量(g/g)

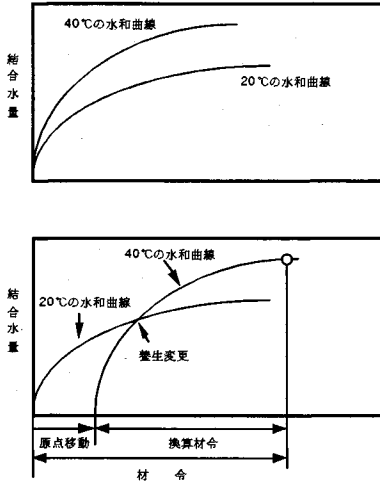


図-18 養生変更試験における水和進行模式図

W: セメント重量当たりの終局結合水量 (g/g)
a: 水和の進行しやすさを表わす係数

終局結合水量とはセメントの水和がほぼ終了したと考えられる結合水量であり、本研究では、材令154日の値を用いた。図-16に配合条件および養生条件と終局結合水量の関係を示す。図より、水セメント比による違いは殆ど無く、1~2%の差にとどまっている。また、温度や養生方法によらず、終局結合水量はほぼ同じ値となっている。セメントの水和は温度が高いほど進行が速いが、長期的にはほぼ同じ水和度に達するとされている。

図-17に配合条件および養生条件と係数 a の関係を示す。図より、水セメント比が小さい方が a の値は大きくなっている。また、温度が高いほど、a の値が大きくなっている。a の値が大きいことは水和速度が大きいことを示しており、温度と水和速度に関するこれまでの知見と一致している。

次に、養生温度が変化した場合の水和進行予測手法について検討する。本研究で行った養生変更試験では、温度が20°Cから40°Cへ変化するのみで、乾燥は受けない。従って、式(3)で示される水和進行の基本式を組み合わせることで、予測を行うこととした。水和進行の模式図を図-18に示す。具体的には、温度変更を行うまでは20°Cの水和式に従い、温度変更後は40°Cの水和式に従うとし、最初から40°Cを継続する試験で得られた水和進行曲線が温度変更材令時の結合水量の値の点を通るように平行移動させて換算材令を求めることとした。以下に、温度変更を行った場合の水和進行式を示す。

$$\text{温度変更前 (20°C)} \quad w_n = \frac{WT}{1+T} \cdot \frac{1}{aW} \quad (4a)$$

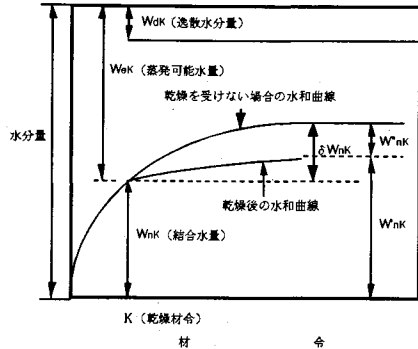


図-19 乾燥試験における水和進行模式図

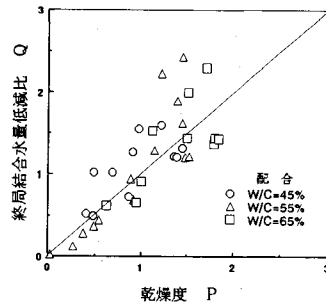


図-20 乾燥度と終局結合水量低減比の関係(乾燥試験)

$$\text{温度変更後 (40°C)} \quad w_n = \frac{W'T'}{1+T'} \cdot \frac{1}{a'W'} \quad (4b)$$

ここで、W' : 養生変更後の条件における終局結合水量
a' : 養生変更後の条件における水和の進行しやすさを表わす係数

T' : 換算材令

b) 乾燥を受ける場合の水和進行予測

3. (2)で示したように、水分の逸散はその後の水和の進行を阻害し、結合水量の増加量は逸散水分量が增加するほど小さくなる。このため、乾燥を受ける場合の水和の進行を予測するためには、逸散水分量もしくは空隙内に残存する水分量と水和の進行特性を定量的に把握する必要がある。

乾燥が水和に与える影響の定式化については、乾燥の程度に応じて終局結合水量を低減させる方法とし、永松らが定義した、以下のような乾燥度 P と終局結合水量低減比 Q を用いることとした⁴⁾。式中の記号の定義を図-19に示す。

$$P = \int_0^{w_dK} \frac{dw_d}{w_{eK} - w_d} = \ln \frac{w_{eK}}{w_{eK} - w_dK} \quad (5)$$

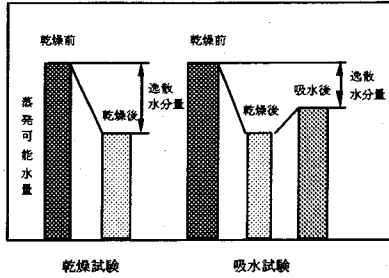


図-21 吸水試験における逸散水分量の考え方

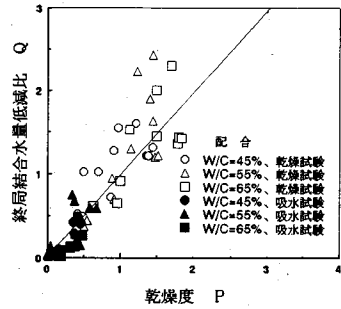


図-22 乾燥度と終局結合水量低減比の関係 (乾燥試験, 吸水試験)

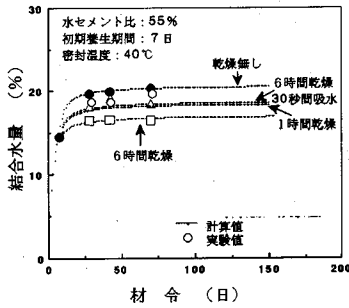


図-23 結合水量の予測結果

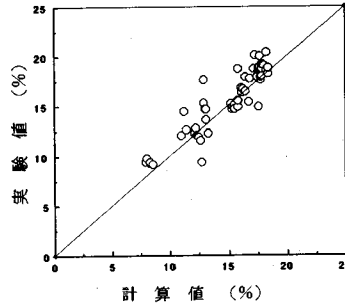


図-24 結合水量予測における実験値と計算値の関係

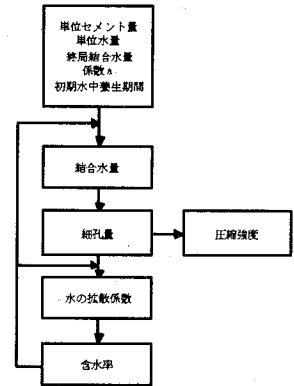


図-25 圧縮強度予測のフローチャート

$$Q = \int_0^{W_{nK}} \frac{dW_n''}{\delta W_{nK} - W_n''} = \ln \frac{\delta W_{nK}}{\delta W_{nK} - W_n''} \quad (6)$$

ここで、 w_d : 逸散水分量

w_{eK} : 材令K (乾燥を与える材令) における蒸発可能水量

w_{dK} : 材令Kにおける逸散水分量

W_n'' : 乾燥による結合水量低減量

δW_{nK} : 乾燥を受けない場合の材令Kから終局時までの結合水量の増分

W_{nK}'' : 材令Kでの乾燥による結合水量低減量

図-20に乾燥試験における各測定値を式(5)および式(6)に代入して求めた乾燥度Pと終局結合水量Qの関係を示す。図より、PとQの関係は配合条件および乾燥材令によらず、以下のような直線式で表わされる。

$$Q = 0.982P \quad (7)$$

結合水量予測においては、実験により測定した逸散水分量から乾燥度Pを計算し、式(7)を用いてQを求めることにより、乾燥によって変化した終局結合水量を求め、式(4)の係数aはそのまま使い、終局結合水量を乾燥時のものに入れ替え、養生変更を行う場合と同様に換算材令を用いて結合水量を求めることとした。なお、Pが大きい場合にデータのばらつきが見られるが、乾燥度が大きい場合にはその後の水和の進行がほ

んど見られないため、結合水量の予測に問題は生じなかった。

c) 乾燥後に水分の供給を受ける場合の水和進行

乾燥を受けても、その後に水分の供給があれば水和が進行することは、3. (2)で確認した通りである。従って、屋外で雨水等により水分の供給を受けるコンクリートの水和進行の予測を行うには、水分供給の影響を考慮する必要がある。

乾燥を受けた場合は逸散水分量から乾燥度を求め、終局結合水量低減比を計算することにより、終局結合水量を求め、水和の進行を予測することができる。乾燥後に水分供給を受ける場合も乾燥で失った水分が全て吸水によって回復しているわけではないため、終局結合水量に若干の低下が見られる。従って、乾燥のみを受ける場合の取り扱いに準じて、見かけの乾燥度をパラメータとして用いることとした。見かけの乾燥度とは、乾燥前の蒸発可能水量から吸水後の蒸発可能水量を差し引いたものを逸散水分量として、式(5)から求めたものである。即ち、図-21に示すように、乾燥前から吸水後までのトータルの水分量変化を用いたことになる。この方法を用いる前提は、乾燥を受けてから吸水までの期間が吸水

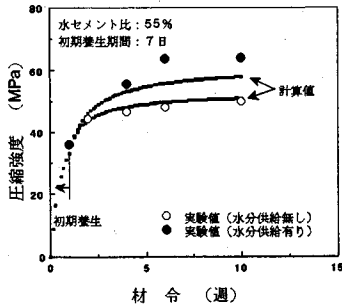


図-26 圧縮強度の予測結果

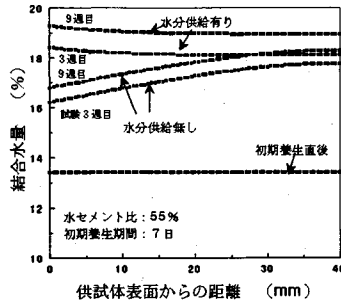
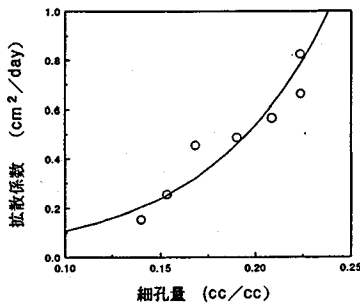
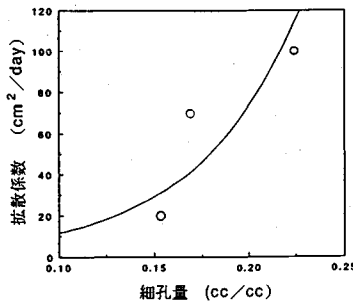


図-27 供試体内の結合水量分布



(a) 乾燥時



(b) 吸水時

図-28 細孔量と水の拡散係数の関係

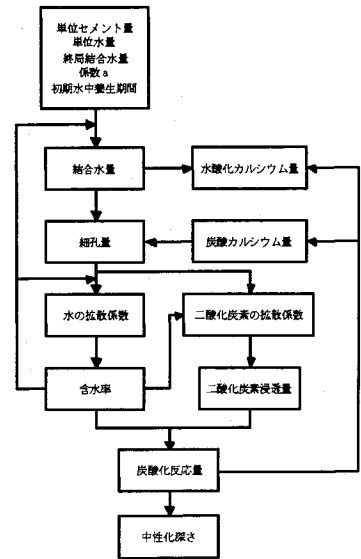


図-29 中性化進行予測のフローチャート

後の水和性状に影響を及ぼさないことである。本研究で行った吸水実験では、乾燥から吸水までの期間は1日または3日の2種類であり、図-13に示すように、この程度の範囲であれば吸水後の水和性状に大きな違いは見られず、前提条件が成り立つものと考えられる。図-22に吸水試験における見かけの乾燥度Pと終局結合水量Qの関係を示す。図より、乾燥試験の場合と同様にPとQの関係は直線式によって表わすことができると考えられる。また、図には乾燥試験結果より得られたものを併せて表示してあるが、吸水の有無によらず乾燥度と終局結合水量の関係は同一であり、吸水試験の場合も乾燥試験と同様に扱えると考えられる。

d) 結合水量の予測結果

図-23に各種条件下における結合水量の経時変化の予測結果の一例を示す。図より、予測値は実験値の傾向をよく捉えている。また、図-24に実験値と計算値の比較を示す。計算値は実験値と良く一致しており、予測手法の妥当性が確認されたと考えられる。

(4) 圧縮強度の予測結果

結合水量の予測手法の応用として、2. の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

暴露試験を行った供試体の圧縮強度変化を予測した。具体的には、図-25に示すように、拡散方程式による水分移動解析によって逐次供試体内部の含水率を計算し、それに応じて結合水量を求め、式(1)により各部分の細孔量を求め、部分的な強度を算出し、それを合成して供試体全体の強度を求めた⁵⁾。予測結果の一例を図-26に示す。図より、計算値は実験値と良く一致していると考えられる。また、図-27は供試体の結合水量分布を示したものであるが、水分の供給が無い場合は全体的に結合水量の増加が小さく、特に乾燥面での増加が小さいことが確認できる。

なお、水分移動解析においては結合水量の変化に伴う細孔量の変化を考慮し、水のモルタル中での拡散係数を図-28(a)および(b)の様に変化させて計算を行った。図中のデータの範囲では直線で回帰した方が相関は高いが、多孔体中の物質移動速度は一般に空隙量と指数関係にあること⁶⁾を考慮して以下のような回帰式を求めた。

$$\text{水分逸散の場合 } D = 0.02 \times 10^{7.03V} \quad (8)$$

$$\text{水分浸透の場合 } D = 1.17 \times 10^{8.08V} \quad (9)$$

ここで、D：拡散係数 (cm²/day)

V：細孔量 (cc/cc)

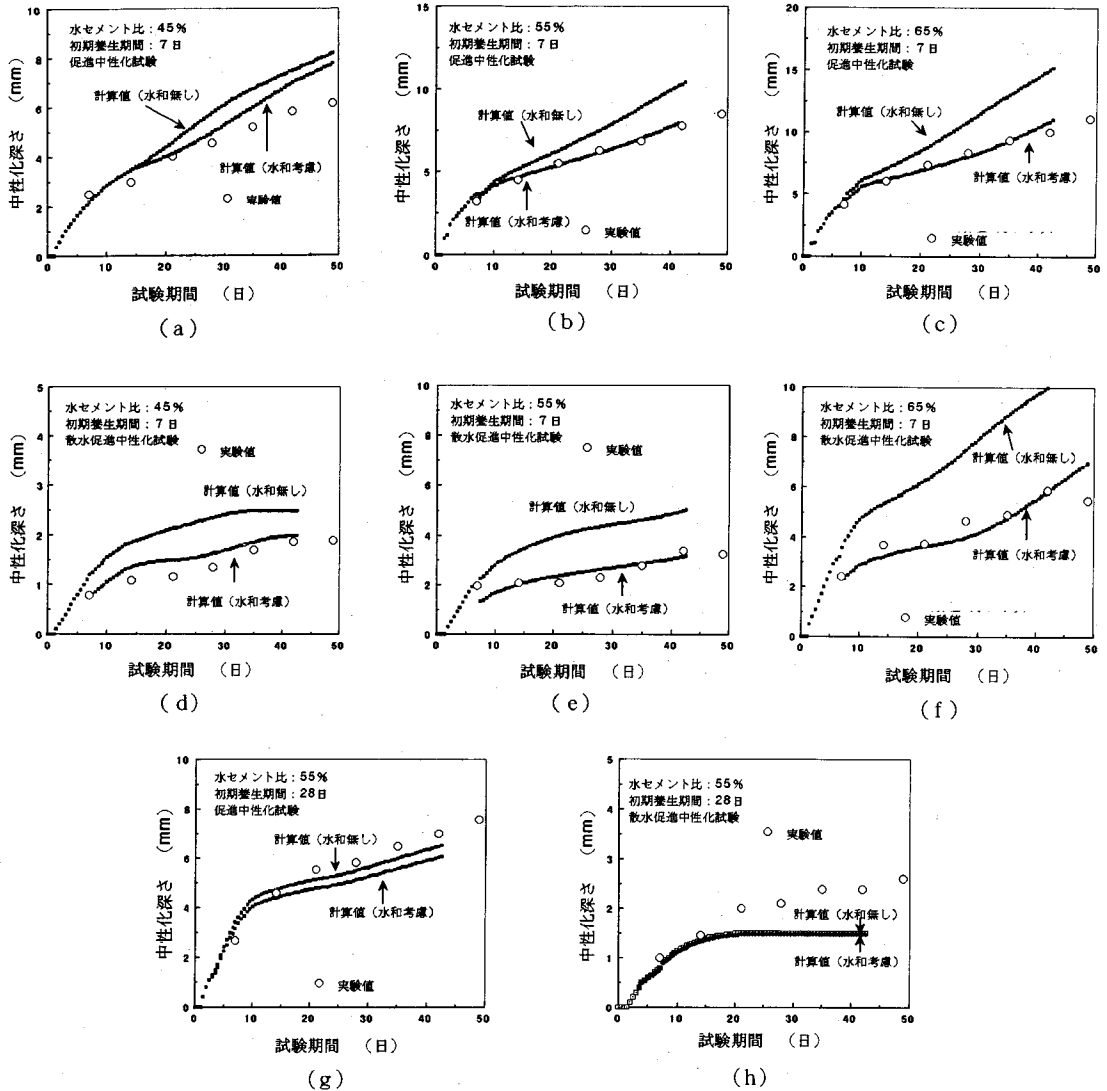


図-30 中性化深さの予測結果

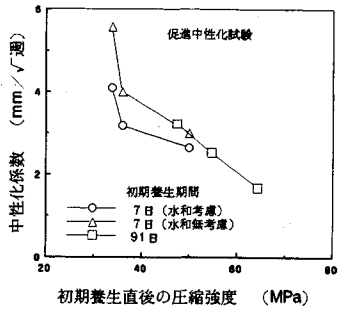
4. セメントの水和を考慮した中性化進行予測

中性化進行予測は著者らが開発した拡散方程式による中性化進行予測手法⁷⁾に結合水量予測手法を組み合わせる方法で行った。予測のフローチャートを図-29に示す。予測手法は中性化の進行に主要な役割を果たしていると考えられる。水、二酸化炭素、水酸化カルシウムの移動と反応を考慮している。各物質の移動を記述する拡散方程式中の拡散係数は細孔量の関数として定式化されており、水和の進行と炭酸カルシウムの生成による微細組織の変化の影響を取り込むことができる。

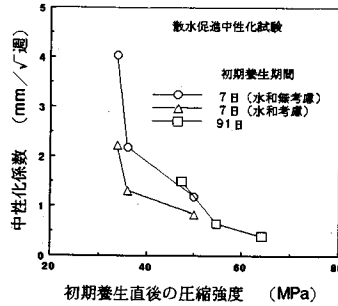
図-30 (a) ~ (h) に中性化深さの実験値と計算値を

示す。図より、配合や初期養生条件および促進方法によらず、計算値は実験値と良く一致しており、解析手法が妥当であることが確認できる。また、図中には比較のために、水和の進行を考慮しない場合の計算値を併記してあるが、初期養生期間が28日では促進試験中の水和の影響はほとんどみられない。しかし、初期養生期間7日では水和の進行を考慮しない場合に中性化深さは実験よりも大きくなっている。従って、初期養生が不十分な場合には、試験中の水和の影響を考慮する必要があると考えられる。

図-31は初期養生直後の圧縮強度と水和を考慮しない解析および水和を考慮した解析により得られた中性化係



(a) 促進中性化試験



(b) 散水促進中性化試験

図-31 初期養生直後の圧縮強度と解析により求めた
中性化係数の関係

数の関係を示したものである。図より、初期養生期間7日で水和の影響を考慮しないものは、初期養生期間91日の場合の延長線上にある。初期養生直後の圧縮強度で中性化係数を評価することは、初期養生以降の水和の影響を無視することであり、初期養生期間を91日とした場合は初期養生以降の水和の影響を無視できることから、初期養生期間7日で水和の影響を考慮しないものが初期養生期間91日の関係と一致することは、水和の影響を考慮しない解析が妥当であることを示していると考えられる。

図-32に促進試験中の水和による中性化速度低減率を示す。中性化速度低減率は以下の式で表わされる。

$$r = (b - b') / b \times 100 \quad (10)$$

ここで、 r ：中性化速度低減率(%)

b ：水和の影響を考慮しない場合の中性化係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$)

b' ：水和の影響を考慮した場合の中性化係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$)

図より、水分供給のある散水促進中性化試験においては水和の中性化進行抑制効果が大きくなっている。また、試験中の水和が抑制される通常の促進中性化試験の場合においても、試験中の水和は中性化の進行速度に影響を及ぼすことから、中性化の進行が遅く、長期的に水和が進行すると考えられる自然状態での中性化の進行では初期養生以降の水和の影響が非常に大きいものと考えられる。従って、初期養生期間が短く、水和の進行が不十分な場合もしくは低発熱セメントのようなフライアッシュや高炉スラグ微粉末を多量に混和し、水和速度の遅いものに対して水和の進行を阻害させるような条件で促進試験を行うと、中性化速度を過大に評価する可能性があるものと考えられる。しかし、本研究で検討した手法により、試験中の水和が中性化速度に及ぼす影響を定量的に

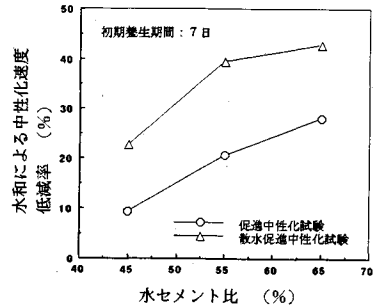


図-32 水和による中性化速度低減率

評価できることから、試験中の水和を阻害するような条件で行われた実験結果を再評価することも可能であると考えられる。

5. 結論

本研究は初期養生以降のセメントの水和が中性化の進行に対して与える影響を明らかにするため、促進中性化試験・散水促進中性化試験および二酸化炭素を除去した環境下での暴露試験を行って実験的な検討を加えた。また、乾燥や水分の供給を受ける場合のセメントの水和進行を定式化し、拡散方程式を用いた中性化進行予測手法と組み合わせることにより解析的な検討を加えた。本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 初期養生直後の圧縮強度を用いて中性化速度を評価した場合、同じ圧縮強度では初期水中養生期間が長いほど中性化速度が大きくなる。これは、促進試験中のセメントの水和が中性化速度に影響を及ぼすためである。

(2) 促進試験と同温度・同湿度・同水分供給条件で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試験9週目の圧縮強度と初期養生直後の圧縮強度の平均値を用いることにより、初期養生期間によらず中性化速度を一律に評価できる。

(3) 水分の逸散および浸透を考慮し供試体中の含水率を把握することにより、乾燥および水分の供給を受ける場合の結合水量の変化を予測することができる。

(4) 中性化進行予測手法に結合水量の予測手法を組み合わせることにより、促進試験中の水和の進行の影響を考慮した中性化進行予測が可能である。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費（課題番号 05750446, 06750493）により行ったものである。ま

た、実験の実施においては、当時新潟大学4年生であった田口浩司氏（現・新潟大学大学院）および野上摂理氏（現・大豊建設（株））の多大な御助力を頂いた。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集No.433, pp.1-14, 1991.8.
- 2) 佐伯竜彦，大賀宏行，長滝重義：暴露中のセメントの水和の進行がコンクリートの中性化速度に及ぼす影響，コンクリートの炭酸化に関するシンポジウム論文集，pp.39-46, 1993.4.
- 3) 長滝重義，大賀宏行：フライアッシュ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試験研究（そのⅢ），東京工業大学土木工学科研究報告No.38, pp.15-30, 1987.
- 4) 永松静也，竹田吉紹，佐藤嘉昭：乾燥を受けるセメント硬化体の水和の進行を表す式，日本建築学会構造系論文報告集，No.361, pp.21-30, 1986.3.
- 5) 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, pp.69-78, 1992.8.
- 6) 近藤連一編：多孔材料，技報堂出版，1978.
- 7) 佐伯竜彦，大賀宏行，長滝重義：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No.414, pp.99-108, 1990.2.

(1994.4.26 受付)

PREDICTION OF CARBONATION PROCESS IN CONSIDERATION OF HYDRATION OF CEMENT AFTER INITIAL CURING

Tatsuhiko SAEKI, Kouichi YONEYAMA and Shigeyoshi NAGATAKI

The purpose of this study is to estimate of the effect of hydration of cement after initial curing on carbonation rate. The depth of carbonation of mortar under accelerated condition and the degree of hydration of cement under water desorption and absorption conditions were measured. The hydration process of cement and the change in physical and chemical properties of mortar, - pore volume and amount of calcium hydroxide -, due to hydration of cement were formulated.

Based on these results, the depth of carbonation can be predicted in consideration of hydration of cement after initial curing.