

# 乾燥に伴うコンクリート露出面の強度性状 に関する実験的研究

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH OF CONCRETE SURFACE BY DRYING

鮎田 耕一\*・林 正道\*\*

By Koichi AYUTA and Masamichi HAYASHI

### 1. ま え が き

コンクリート部材の露出面は、風雨雪・寒暑等の気象作用による影響を受けやすく、したがってセメントの水和性状などに複雑に関与し、それが部材の強度・耐久性に与える影響は少なくない。

十分な水分と温度が与えられているとき、材令の進行とともにコンクリートの強度・耐久性が増大することは広く認識されている。しかし、養生終了後も十分な水分に恵まれることは少なく、一般のコンクリート部材では露出面からの水分の蒸発が徐々に起こり、しだいに内部に及ぶ。内部の水分が蒸発するにはかなりの日数を要するので、コンクリート中の水分の蒸発による損失は露出面で大きく内部に入るほど少なくなる。コンクリート露出面からの水分損失量に関する既述の研究<sup>1)~6)</sup>によれば、露出面数 cm 厚(約 5 cm 前後)は乾燥の影響を大きく受け容易に水分を失うようである。

セメントの水和には水分が不可欠であるから、露出面に近いほど水和が不十分になり、強度・耐久性が十分に期待できなくなるおそれがある。たとえば、Petersons<sup>7)</sup>は過去の多くの研究者のコア採取による強度試験の結果から内部より表層部が低強度であるとしている。これは上部のコンクリートがブリージングのために  $W/C$  が大きくなっている影響と合わせて考えなければならないが、水分が不十分の場合には表層部と内部との強度差が大きくなることを示している。

このように乾燥面の水和はあまり進行しないが、内部は引き続き水和が進み強度の増進が期待できる。部材の断面全体としては乾燥面の低強度の部分が内部の十分に水和した高強度の部分で補われ部材としての耐荷力を保つので、大きな断面の部材では露出面の乾燥が耐荷力に

及ぼす影響はあまり問題にならない。

しかし、寒冷地ではコンクリート露出面の乾燥に伴う水和の停滞が重要な問題になる。すなわち、凍結は水和の最も不十分な強度の低い露出面から始まり内部へと進むので露出面ほど凍結する機会が多い。したがって、凍結融解の繰返しも内部より表層部ほど多くなる。換言すれば、最も弱い露出面が最も厳しい気象作用を受けることになる<sup>8)</sup>。また、北海道各地で報告されている冬季における表面剝離現象<sup>9)</sup>は、表層部にある粗骨材の界面の付着の弱い箇所からモルタルマトリックスにひびわれが伝播して剝離に至ると考えられている。したがって、表層部のモルタルマトリックスの強度が小さいと表面剝離が起きやすくなると想像される。このように寒冷地のコンクリートの耐久性は、露出面の強度性状によって支配されることが少なくない。そこで、本研究では乾燥に伴う露出面の強度性状を実験的に明らかにすることを目的とした。

ところで、コンクリート部材の露出面から内部にかけての強度分布は明確ではないし、また容易に試験することができない。すなわち、コンクリートの強度はセメントの水和度のほかにブリージングその他によるモルタルマトリックスと粗骨材との付着性状の影響などをも受けるからである<sup>10)</sup>。しかし、凍結融解作用による初期(粗骨材が剝落する以前)の劣化状況を考えれば、対象になる表層部はきわめて薄いモルタルマトリックス部分である。そこで、本研究ではモルタルを実験対象にした。

### 2. 実験概要

#### (1) 実験内容

実験は A, B, C の 3 つに大別される。実験 A では一面乾燥したモルタル円柱供試体(φ5×25 cm)を所定深さごとに薄層に切斷し、セメントの結合水量を求めた。

\* 正会員 工修 北見工業大学助教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 北見工業大学教授 工学部開発工学科

これにより乾燥に伴う深さ方向の水和性状を明らかにした。しかし、この方法では強度を直接求めることができないので、実験Bでは大きさの異なる小さな寸法のモルタル円柱供試体（直径 1~5 cm、高さは直径の 2 倍、以下微小モルタル供試体とよぶ）の圧縮強度と結合水量を求めた。ここで大きさの異なる微小モルタル供試体を用いたのは次の理由による。乾燥雰囲気中にある供試体はその大きさによって供試体全体としての水分状態が異なってくる。供試体が大きいくほど乾燥の影響が内部に及ぶまで時間がかかり、その間に水和がある程度進行する。したがって、部材の露出面の強度を考える場合には乾燥の影響が厳しく現われるよう小さな供試体が適当となる。そこで強度試験が可能な最小寸法の供試体として  $\phi 1 \times 2$  cm のモルタル円柱を用いた。また、供試体寸法が大きくなるにつれて、その水分状態は部材露出面から内部にかけての状態を表わしていると考えられるので、直径 5 cm までの範囲で寸法の異なる円柱供試体を用いた。すなわち、供試体寸法の大きさが部材露出面からの深さに比例するものと考えられるからである。

次に、実験Cでは、炭酸ガスを含まない気中で乾燥させたモルタル供試体を用いて、圧縮強度試験・長さ変化試験などを行った。この結果から、空気中の炭酸ガスがモルタルの強度性状に及ぼす影響について検討した。

以上の実験のうち、実験 B については文献 11), 12) に、実験Cについては文献 13) にその結果の一部を発表している。

(2) 使用材料と配合

セメントは混合材を加えていない普通ポルトランドセメントと、フライアッシュセメントB種の 2 種類を用いた。その物理的性質を表一に示す。細骨材は豊浦標準砂を用いた。モルタルの配合は  $W/C=0.55$ 、普通ポルトランドセメント使用の場合は  $s/c=2.00$ 、フライアッシュセメント使用の場合は  $s/c=2.07$  とし、フロー値が  $170 \pm 10$  になるようにした。練り混ぜは温度 20°C、湿度 95% の恒温恒湿室でセメント強さ試験用のモルタル練り混ぜ機を使用し、すべての材料投入後 3 分間行った。

3. 一面乾燥供試体による深さ方向の水和性状 (実験A)

(1) 実験方法

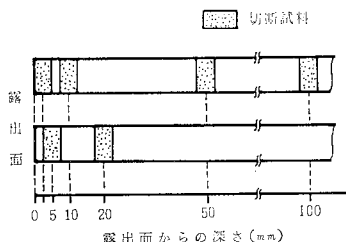
a) 供試体と温度・湿度条件

直径約 5 cm、長さ約 25 cm の円柱供試体を用いた。成形用型には片端部にゴム栓をしたポリエチレンチューブ（肉厚 4 mm）を使用し、温度 20°C、湿度 95% の恒温恒湿室で型詰めし、突き棒により一層 3 cm 程度ずつ締め固めた。成形面にゴム栓をした後、材料分離を防ぐために供試体を横置きして約 1.0~1.5 rpm で回転し硬化させた<sup>14)</sup>。材令 2 日で片端部のゴム栓を取りはずし、露出部を 2 cm 切断した後、成形用型のまま材令 28 日、91 日まで 20°C 水中養生または 20°C、50%RH の乾燥状態（恒温恒湿室）に保った。

供試体数は各条件につき 8 本とした。

b) 試料採取位置

所定材令経過後、成形用型を取りはずし供試体 8 本から図一のように切断して、各位置 4 個の 5 mm 厚の試料を得た。



図一 試料採取位置

c) セメントの結合水量試験方法

1.2 mm ふるいを全部通過するように切断試料を粉砕し、結合水量試験用の試料とした。

セメントの結合水量は、硬化したセメントペーストを常温真空乾燥、あるいは 105°C で乾燥して追い出すことのできなかつた水分<sup>3)</sup>として求められるが、この化学的に水和物と結合した水分を求めるための強熱温度は、研究者によって異なっており、600~1 050°C の範囲で行われている。これは結合水とほかの状態の水を厳密に分

表一 セメントの物理的性質

項目 種類	比重	粉末度			安定性	フロー値 (mm)	曲げ強さ (kgf/cm <sup>2</sup> ) (MPa)			圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> ) (MPa)		
		比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結				3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
			始 発 (h-min)	終 結 (h-min)								
普通ポルトランドセメント	3.18	2 940	3-26	4-28	良	237	34 (3.3)	53 (5.2)	78 (7.6)	107 (10.5)	196 (19.2)	378 (37.1)
フライアッシュセメントB種	2.97	3 090	3-18	4-20	良	253	25 (2.5)	42 (4.1)	77 (7.6)	79 (7.7)	157 (15.4)	338 (33.1)

離することが困難なためであり、したがって、いずれの強熱温度によっても結合水量の多少を示す目安が得られるに過ぎないことになる<sup>15)</sup>。そこで、本研究では1000°C強熱と105°C乾燥の質量差を結合水量とみなすことにした。

具体的な実験方法を次に記す。

105°Cで約24時間乾燥後質量を測定し、るつぼに約20gずつ入れた。乾燥試料を250°Cに予熱した電気炉の中に入れ、2.5時間かけて徐々に1000°Cまで温度を上げ、1000°Cになってから30分間その温度を保持した。これをデシケータの中に移し放冷後質量を測定した。また、セメント、標準砂の乾燥質量、強熱質量も同様の方法で測定した。以上の測定結果からモルタルのセメント質量当たりの結合水量を求めた。この方法で結合水量を求める場合、セメントペースト硬化体が炭酸化していると、それによる質量増分の影響を受けるが、このことについては5.で検討する。

(2) 露出面から内部にかけての水和性状の変化

セメントの結合水量の測定結果を図-2に示した。

水中養生の場合、露出面から内部にかけての水和度の変化は、ほとんどないとみなしてよい。結合水量は材令28日(平均値163mg/g)から材令91日(平均値181mg/g)に進行する間に約11%増加している。

50%RHの乾燥状態の場合、結合水量は露出面にごく近い部分で大きく測定され、水中養生の場合よりも大きな値を示している。最小値は材令28日では5mm深さの位置(露出面から2.5~7.5mm)、材令91日では10mm深さの位置(露出面から7.5~12.5mm)に現われている。この位置から内部に入るとつれて結合水量は漸増している。

この試験結果から次のことがいえると思われる。

50%RHの乾燥状態のもとでは表層部の水和の進行は、水中養生の場合に比べて停滞する。たとえば、露出面から深さ1cmの部分の材令91日における結合水量

は、水中養生91日の80%程度である。しかし、内部ほど水和反応の停滞の度合は小さくなる。一方、深さ1cmより露出面に近い部分で、1cm深さの部分より結合水量が多く測定されているのは後述(5.)の炭酸化の影響であると思われる。

4. 乾燥に伴う微小モルタル供試体の結合水量と圧縮強度(実験B)

(1) 実験方法

a) 供試体と温度・湿度条件

供試体はモルタル円柱であり、寸法は直径が1, 2, 3, 4, 5cmの5種類、高さは直径の2倍である。成形用型は鋼製である。締固めは突き棒によったが、供試体の大きさにより締固めの状態が異なるのを避けるため、成形用型の径と突き棒の径の比を一定にした5種類の太さの突き棒を用いた。各供試体は型詰め後約5時間でセメントペーストキャッピングを行い、表-2に示す温度・湿度条件のもとにおいて。表中、強制乾燥の温度を他の条件より高くしたのは、用いた恒温恒湿器の性能の範囲で25%RHの低湿度を得るためである。型枠の取りはずしは型詰め後約24時間で行った。ただし、材令1日で試験を行う供試体は型詰め後約20時間で型枠から取りはずした。作製した供試体の一例を写真-1に示した。

b) 圧縮強度試験と結合水量試験

乾燥状態にあった供試体は強度試験開始前2時間水中に浸し表面を吸水性の布で拭いた後用いた。圧縮強度試験は載荷荷重が500kgf(4.90kN)以上のときは、ひよ

表-2 温度・湿度条件

温度・湿度条件	キャッピング後	型枠から取りはずした後
(1) 水中養生	20°C, 湿度95%	20°C 水中
(2) 湿度50%	20°C, 湿度50%	20°C, 湿度50% 恒温恒湿室
(3) 強制乾燥	30°C, 湿度25%	30°C, 湿度25% 恒温恒湿器
(4) 屋外暴露	24°C, 湿度60%	透明ビニールテント内 暴露期間の平均気温15°C, 湿度82%, 風速1.5m/s

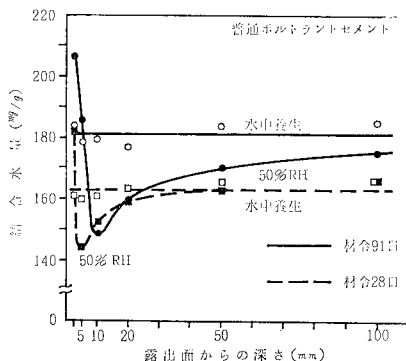


図-2 露出面からの深さと結合水量

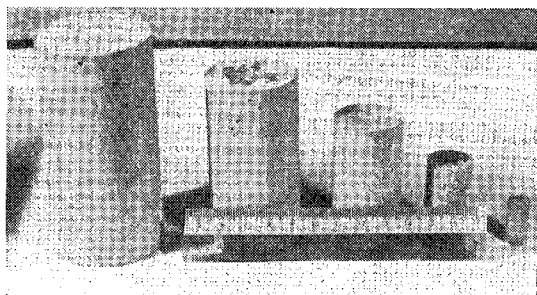


写真-1 微小モルタル供試体

う量 2.5 tf (24.5 kN)~25 tf (245 kN) の圧縮試験機，それより小さい荷重に対しては最大荷重に応じて 3 種類のブルーピングリング {1 000 kgf (9.80 kN), 200 kgf (1.96kN), 50 kgf (0.49 kN)} 使用の一軸圧縮試験機を用いた．載荷速度は毎秒 2~3 kgf/cm<sup>2</sup> (0.20~0.29 MPa) とした．なお，球座は各供試体の直径に応じたものをそれぞれ作製し使用した．

圧縮強度試験後ペーストキャッピングの部分を取り除いた残りを粉砕して結合水量試験用の試料とした．結合水量試験の方法は 3. (1), c) と同じである．

圧縮強度・結合水量試験は材令 1, 3, 7, 28, 91 日に行った．供試体は同一条件に対し 6 個作製した．

c) 供試体寸法による圧縮強度の補正

異なる寸法の供試体を用いて圧縮強度試験をする場合，寸法の小さい供試体の方が大きい強度を示すことはよく知られている．したがって，寸法が異なる供試体を用いて強度を比較する場合，得られた強度を寸法に応じて補正する必要が生じてくる．供試体寸法と圧縮強度の補正率の関係については通常のコンクリート供試体を対象とした場合については明らかにされているが，本実験に使用しているようなきわめて小さい寸法の供試体は特殊であるため，その寸法と強度比率との関係は既応の報告に見当たらない．そこで，20°C 水中養生を行った供試体を用いて供試体の寸法と圧縮強度の関係を調べた．その結果が 図-3 である．図から明らかなように，その関係は試験時の供試体の強度レベルによって異なる傾向をみせ，強度レベルが低いほど供試体寸法の影響を大きく受けている．したがって，本実験の圧縮強度の測定値をその強度レベルごとに 図-3 によって補正した．

(2) 乾燥に伴う結合水量の変化および微小モルタル供試体の寸法と露出面からの深さの関連

各温度・湿度条件における材令 91 日のセメントの結合水量の試験結果を 図-4 に示した．この結果から明らかなように水中養生の場合，供試体寸法による結合水量の変化はない．一方，25%RH の強制乾燥の場合，供試体寸法が小さくなるほど結合水量が少なくなっている．

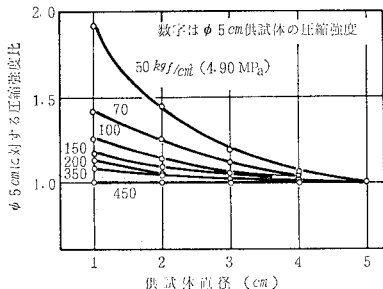


図-3 圧縮強度に及ぼす供試体寸法の影響

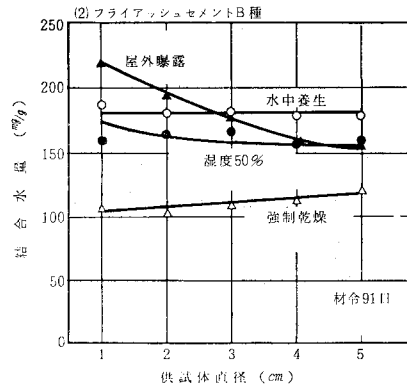
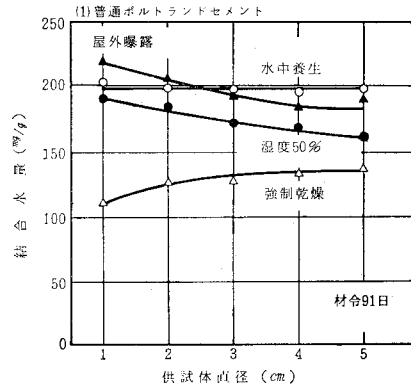


図-4 微小モルタル供試体の結合水量

すなわち，水中養生の場合には部材露出面から内部にかけての水和度の違いはないが，25%RH というような強い乾燥を受ける場合には部材露出面に近いほど水和が停滞するといえよう．

屋外暴露および 50%RH の乾燥状態にあった供試体の結合水量は寸法が小さいほど多くなる傾向を示している，3. の露出面近傍の測定値と同じ傾向を示している．

さて，ここで本章で用いている微小モルタル供試体の水和性状がコンクリート部材の露出面からどの程度の深さの性状を示しているかを明らかにしておこう．本節の 50%RH の乾燥状態にあった微小モルタル供試体の結合水量の測定値 (図-4) を，同じ条件にあった 3. の一面乾燥供試体 (φ5 × 25 cm) 切断片の結合水量の測定値 (図-2) 上にプロットした結果が 図-5 である．ここで微小モルタル供試体の結合水量は供試体全体の平均値であるから，各寸法の供試体の水和性状が部材露出面からどの程度の深さの部分の水和性状と等しいかを示していることになる．この結果から，本章で用いている微小モルタル供試体の寸法の範囲は露出面からおおよそ 10mm 深さ以内の部分に相当しているといえよう．

(3) 乾燥に伴う圧縮強度の変化

各温度・湿度条件における材令 91 日の圧縮強度の試験結果を図-6 に示した。この結果から明らかなように乾燥状態にあった供試体の圧縮強度は水中養生の場合に比べて各寸法の場合ともかなり小さい。3 種類の乾燥条件のうち、屋外暴露と 50%RH の乾燥条件では、寸法の小さい供試体が寸法の大きい供試体より強度が大きくなっている。強制乾燥の条件では、供試体寸法による圧縮強度の違いはほとんどない。

図-6 の (1), (2) からセメントの種類による圧縮強

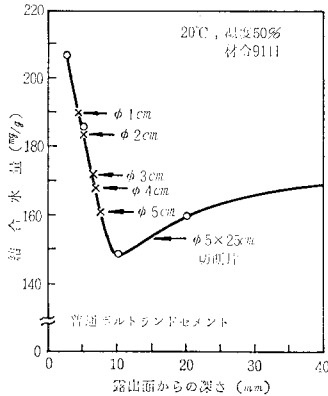


図-5 微小モルタル供試体の寸法と露出面からの深さの関連

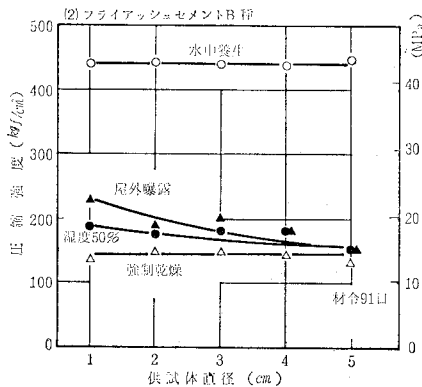
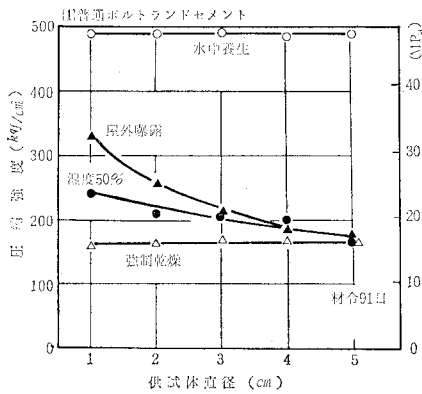


図-6 微小モルタル供試体の圧縮強度

度の発現性状の違いをみると、いずれの条件の場合も普通ポルトランドセメントを使用した場合の圧縮強度が大きくなっている。この実験の場合、材令 91 日まで水中養生してもフライアッシュのポゾラン反応がまだ十分に発揮されていないといえよう。また、乾燥を受けることによりフライアッシュセメント使用の場合、強度発現の停滞の度合いが大きくなるといえよう。

次に 図-7, 8 は供試体直径 5 cm と 1 cm の場合の材令の進行に伴う圧縮強度の発現性状を示したものである。水中養生供試体はいずれの直径の供試体とも材令の進行とともに順調に圧縮強度が増加している。

屋外暴露, 50%RH の場合、直径 5 cm の供試体は材令 7 日以降ほとんど強度の増加がみられなく、直径 1 cm の供試体は材令の進行とともに強度はやや増加している。

強制乾燥の場合、他の乾燥条件の場合に比べて若令では強度がやや高いが、長期強度の発現は停滞して、この傾向は直径 1 cm の供試体で著しい。若令の強度が他の乾燥条件に比べてやや高いのは、低温度にするために 30°C という温度条件を与えたため、水が促進されたこと、乾燥過程における供試体の水分の差などによって見掛けの圧縮強度が一時的に増加した<sup>19)</sup>ことなどのた

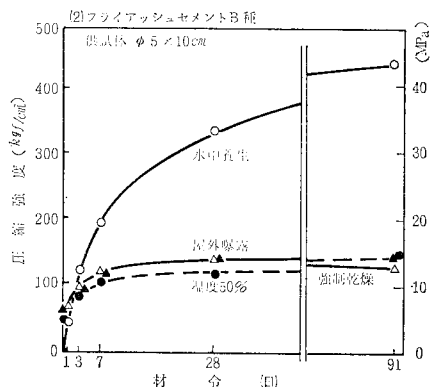
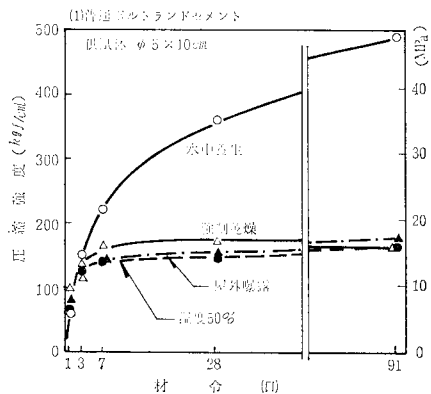
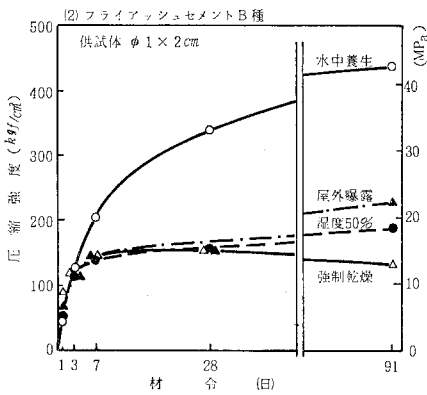
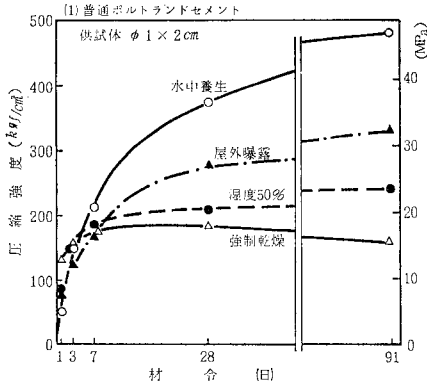
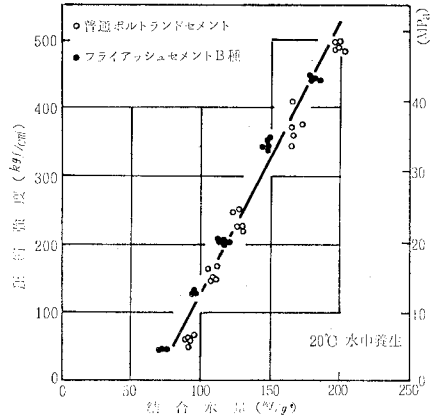


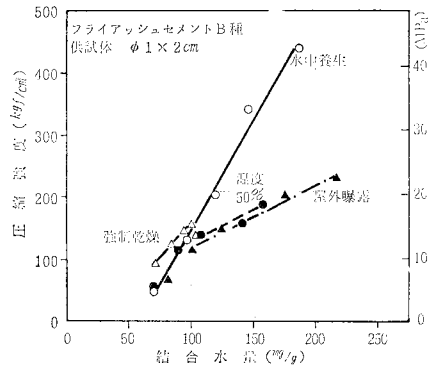
図-7 強度発現性状



図—8 強度発現性状



図—9 結合水量と圧縮強度の関係



図—10 結合水量と圧縮強度の関係

めと思われる。長期強度の発現が停滞しているのは、高野<sup>17)</sup>、Verbeck ら<sup>18)</sup>が説明しているように、温度が低い場合に比べて水和反応中のセメント粒子の周りに水和生成物の緻密な膜ができやすく、その後の水和反応を遅らせ、長期強度に不利に作用したのではないかと考えられる。

以上の圧縮強度試験結果から、乾燥に伴うコンクリート部材露出面の強度性状は次のようであると考えられる。

露出面近傍の強度発現は乾燥によりかなり停滞する。たとえば、30°C、25%RH の乾燥状態にあった場合の材令 91 日の強度は、水中養生 91 日の場合の 30% 程度にしか過ぎない。また、屋外暴露、50%RH の乾燥状態では露出面にごく近い部分の強度は大きくなる。しかし、そこより少し深い部分では材令 7 日以降の強度の発現が停滞する。

(4) セメントの結合水量とモルタルの圧縮強度の関係

図—9 に 20°C 水中養生の場合のセメントの結合水量とモルタルの圧縮強度の関係を示した。両者はきわめてよい相関を示している。

他の温度・湿度条件の場合を含めた一例として直径 1 cm の供試体の場合を 図—10 に示した。温度・湿度条件によってセメントの結合水量とモルタルの圧縮強度の関係は異なっている。特に、水中養生、25%RH の強制乾燥のグループと、屋外暴露、50%RH 乾燥のグループとはかなり違う傾向を示しているが、後者のグループでは主として炭酸化による見掛けの結合水量の増加が大きいため前者のグループと異なった傾向を示したと解釈できよう。

5. 強度性状に及ぼす炭酸化の影響 (実験 C)

(1) 実験目的と方法

a) 目的

3. の一面乾燥供試体を用いた結合水量の試験結果によると、50%RH の乾燥条件の場合、内部より露出面にごく近い部分の結合水量が多く測定された。また、4. の微小モルタル供試体を用いた実験結果では、50%RH あるいは、屋外暴露の乾燥状態のもとでは、供試体寸法が小さいほど、圧縮強度、結合水量が大きく測定された。

一方、25%RH の乾燥条件ではそのような傾向はみられなかった。

50%RH あるいは屋外暴露の乾燥条件と、25%RH の乾燥条件の違いは、おもに相対湿度の違いであり、このため炭酸化速度が異なり、50%RH 前後では早く進行し、25%RH 前後では遅い<sup>18)</sup>。たとえば、本実験で用いた微小モルタル供試体を割製し、フェノールフタレイン 1% 溶液を噴霧し、中性化部分を測定したところ、ビニールテント内で 3 か月間屋外暴露した直径 5 mm と 1 cm の供試体では中心部まで、直径 2~5 cm の供試体では深さ 3.6~5.3 mm まで中性化していた。一方、25% RH で乾燥した供試体には中性化した部分が認められなかった。

そこで、本章では空気中の炭酸ガスがモルタルの圧縮強度、結合水量などに及ぼす影響の程度を明らかにすることを試みた。

**b) 炭酸ガスを含まない気中での乾燥**

空気中の炭酸ガスの影響の程度を明らかにするために、炭酸ガスを含まない気中で実験を行った。空気中の炭酸ガスを除くために、炭酸ガスはアルカリに吸収される性質を利用し、水酸化カリウム (KOH) 溶液を用いた。すなわち、温度 20°C、湿度 50% の恒温恒湿室においたデシケータ(図-11)の底部に KOH 溶液を入れ、中仕切板の上に型枠取りはし後の供試体を置いた。デシケータ中の湿度は KOH 溶液の飽和蒸気圧により調節し 50%RH になるようにした。ただし、供試体をデシケータに入れた後しばらくの間はモルタル中の水分の蒸発量が多く、デシケータを密閉状態にすると湿度の制御が十分に行えないので、材令 2 週までは半密閉状態にし、その後は完全に密閉した。炭酸ガスの除去の程度を調べるために、デシケータ中の空気を二連球を通し随時採取しガスクロマトグラフにより分析した。その結果の一例を室内、屋外の空気の分析結果とともに 図-12 に示した。図中の (×1)、(×256) は窒素 (N<sub>2</sub>)、酸素 (O<sub>2</sub>) を検出したときの精度を基準 (×1) にして 256 倍に精度を上げて炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) を検出していることを示している。この結果をもとにデシケータ中の炭酸ガス濃度を定量したところ、屋外の空気中の炭酸ガス濃度の 1/10 以下であり、目的とする実験の要求をほぼ満足している状態であることが確認された。

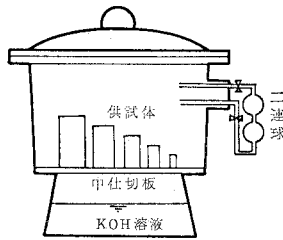


図-11 炭酸ガスを含まない気中における乾燥

らるの間はモルタル中の水分の蒸発量が多く、デシケータを密閉状態にすると湿度の制御が十分に行えないので、材令 2 週までは半密閉状態にし、その後は完全に密閉した。炭酸ガスの除去の程度を調べるために、デシケータ中の空気を二連球を通し随時採取しガスクロマトグラフにより分析した。その結果の一例を室内、屋外の空気の分析結果とともに 図-12 に示した。図中の (×1)、(×256) は窒素 (N<sub>2</sub>)、酸素 (O<sub>2</sub>) を検出したときの精度を基準 (×1) にして 256 倍に精度を上げて炭酸ガス (CO<sub>2</sub>) を検出していることを示している。この結果をもとにデシケータ中の炭酸ガス濃度を定量したところ、屋外の空気中の炭酸ガス濃度の 1/10 以下であり、目的とする実験の要求をほぼ満足している状態であることが確認された。

**c) 供試体と温度・湿度条件**

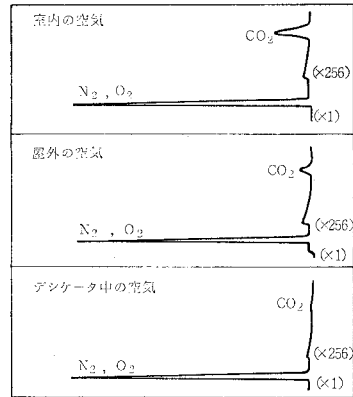


図-12 炭酸ガスの分析結果

圧縮強度、結合水量試験の方法およびそれに用いた微小モルタル供試体の形状、寸法、個数は 4. と同じである。長さ変化試験は 4×4×16 cm の供試体を同一条件で 3 個用いて、JIS A 1129 のダイヤルゲージ方法に準じて行った。また、同時に質量も測定した。

温度・湿度条件は 20°C、50%RH とし、通常の空気中と炭酸ガスをほとんど含まない気中における結果を対比した。

**(2) 炭酸化に伴う乾燥収縮と質量増加**

図-13、14 は 50%RH の雰囲気中での供試体の長さや質量の変化を示したものである。

Verbeck ら<sup>18)</sup>は炭酸ガスを含む空気中における乾燥収縮は外気の相対湿度に依存し、湿度が 50~60% のとき最大の収縮を示すことを明らかにしている。したがって本実験の空気中での乾燥は最も炭酸化収縮の生じやすい条件といえよう。図では材令 91 日まで乾燥した供試体は炭酸化のために収縮率が大きくなり(約 20% 増加)、質量の減少が抑制(約 15% 増加)されている。

これらのことから空気中の炭酸ガスがセメントペースト硬化体と反応することにより、露出面にごく近い部分

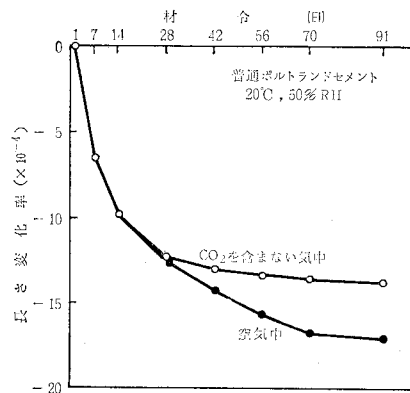


図-13 長さによらず炭酸化の影響

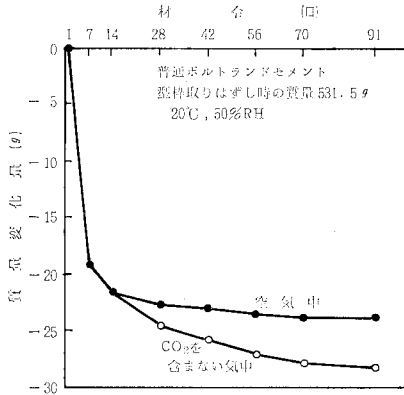


図-14 質量に及ぼす炭酸化の影響

のモルタルが収縮・緻密化し、これが強度性状にも影響を及ぼしていることが推測される。

(3) 炭酸化による圧縮強度・結合水量の変化

炭酸ガスをほとんど含まない 50%RH の気中で乾燥させた微小モルタル供試体の圧縮強度と結合水量を求め、4. の 50%RH の空気中の結果と対比した。その結果が図-15, 16 である。この結果から炭酸ガスをほとんど含まない気中の乾燥では供試体寸法が小さいほど圧縮強度・結合水量は小さくなるのが明らかである。Manns ら<sup>19)</sup>は炭酸ガス養生 (CO<sub>2</sub> 分圧 9%) によるモルタル (4×4×16 cm) 強度の変化を調べ、ポルトランドセメントあるいはポルトランドセメントクリンカー含有量が 40% 以上の混合セメントを用いた場合は、炭酸ガス養生により強度が増進することを示している。図-15, 16 の結果からこの強度増進現象は供試体寸法が小さい場合には通常の炭酸ガス濃度の空気中でも生じることが明らかである。

以上の実験結果から、3. (2) の一面乾燥供試体を 50%RH で乾燥した場合、露出面にごく近い部分で内部より結合水量が多く測定されたり、4. (2), (3) の微小モルタル供試体を 50%RH あるいは屋外暴露で乾燥した場合、寸法の小さい供試体の結合水量、圧縮強度が寸法の大きい供試体より大きく測定されたりしたのは、水和が進行したためではなく、炭酸化によるためであったといえよう。すなわち、コンクリート部材の露出面にごく近い部分では、水和セメント中に遊離の Ca(OH)<sub>2</sub> が存在する場合に空気中 (50%RH) の CO<sub>2</sub> との反応が内部に比べて促進され、セメントペースト硬化体部分が緻密化し、強度が増進すると考えられる。

6. ま と め

本研究は寒冷地のコンクリート構造物の耐久性に影響

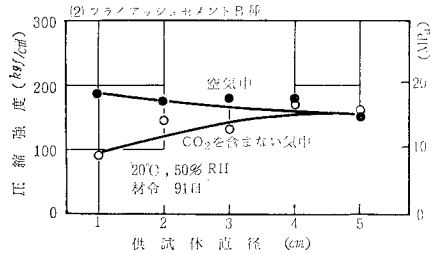
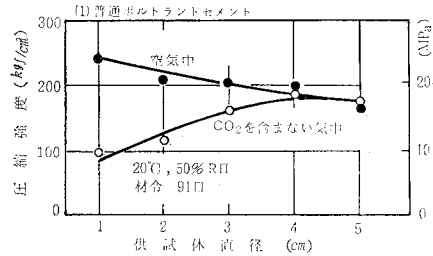


図-15 圧縮強度に及ぼす炭酸化の影響

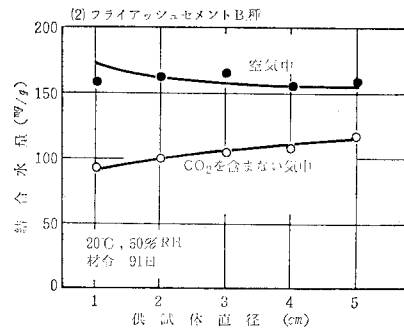
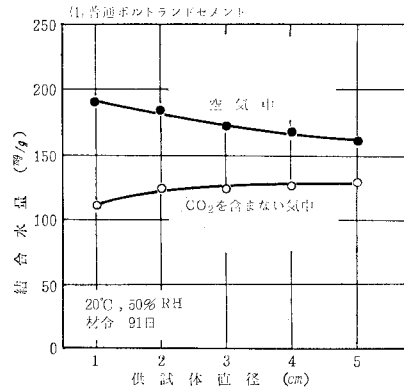


図-16 結合水量に及ぼす炭酸化の影響

を及ぼす露出面の強度性状について実験的に検討したものである。ここで対象としている露出面とは、露出面とその内側のごく薄いモルタルマトリックス部分である。この部分の強度性状を把握するために、主として直径が 1~5 cm のきわめて小さいモルタル円柱供試体 (微小モルタル供試体) の圧縮強度、結合水量を求めた。本実験



で得られた結果のうちおもな項目を要約すると次のようになる。

(1) 微小モルタル供試体を用いることにより、部材露出面からおおよそ 10 mm 深さ以内の部分の強度性状を表わすことができる (図-5)。

(2) 20°C 水中養生の場合、露出面から深さ方向にかけての強度、水饱和度はほぼ同じである (図-2, 4, 6)。

(3) 乾燥により露出面近傍の強度はかなり小さくなる。たとえば、30°C, 25%RH の乾燥状態にあった場合の材令 91 日の圧縮強度は、20°C 水中養生 91 日の場合の 30% 程度である (図-6)。

(4) 乾燥条件によっては露出面にごく近い部分の結合水量は内部より多く測定される。たとえば、材令 91 日まで 20°C, 50%RH で乾燥させた場合、露出面にごく近い部分 (約 5 mm 厚) で水中養生のものより大きな値を示し、露出面から 10 mm の位置で最小値を示し、以下内部に入るにつれて漸増する (図-2, 4, 5)。

(5) 同様に 20°C, 50%RH あるいは屋外暴露の乾燥状態では、露出面にごく近い部分の強度はそれより少し深い部分の強度より大きくなる (図-6)。

(6) このように乾燥条件によっては露出面にごく近い部分の強度が内部より大きくなるのは炭酸化のためである。したがって、炭酸化の影響の受けにくい部分では乾燥により強度発現は停滞する (図-15)。

## 7. あとがき

本実験に協力していただいた猪狩平三郎、岡田包儀両技官に心から感謝致します。なお、本研究の一部は文部省特定研究「構造物の耐寒特性に関する研究」および文部省科学研究費補助金試験研究 (1) の交付を受けて行われたものであることを付記する。

### 参考文献

- 1) Carlson, R.W.: Drying shrinkage of large concrete members, Journal of ACI, Jan.~Feb., 1937.
- 2) Bloem, D.L.: Concrete strength in structures, Journal of ACI, Mar. 1968.

- 3) W. チェルニン (徳根吉郎訳): 建設技術者のためのセメント・コンクリート化学, 第2版, 技報堂, 1969年.
- 4) 後藤幸正・藤原忠司・飯泉 章: 乾燥過程におけるコンクリート内部の含水状態について, セメント技術年報 XXIX, 1975年.
- 5) 鎌田英治・田畑雅幸・中野陽一郎: コンクリート内部の含水量の測定, セメント技術年報 XXX, 1976年.
- 6) 阪田憲治・蔵本 修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集 316, 1981年.
- 7) Petersons, N.: Should standard cube test specimens be replaced by test specimens taken from structures?, Materials & Structures, Vol. 1, No. 5, Sept.~Oct. 1968.
- 8) 林 正道: コンクリートの耐久性について, 土木学会北海道支部講習会テキスト, 1976年.
- 9) 佐伯 昇・鮎田耕一・前川静男: 北海道における海岸および港湾コンクリート構造物の凍害による表面剝離損傷, 土木学会論文報告集, 第327号, 1982年.
- 10) 林 正道・清水 昭: 寒中および暑中コンクリート・軽量骨材コンクリート, 山海堂, 1980年.
- 11) 林 正道・鮎田耕一・長山裕一: 乾湿に伴うコンクリート露出面の強度の変化, 土木学会北海道支部論文報告集第37号, 1981年.
- 12) 鮎田耕一・林 正道・猪狩平三郎: 乾湿に伴うコンクリート露出面の水和度の変化, 土木学会北海道支部論文報告集第37号, 1981年.
- 13) 鮎田耕一・林 正道: 微小モルタル供試体の強度に及ぼす炭酸化の影響, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1981年.
- 14) 鎌田英治・洪 悦郎: 人工軽量骨材コンクリートの凍害機構に関する考察, セメント技術年報 XXV, 1971年.
- 15) 山崎寛司: 気物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎研究, 土木学会論文集, 第85号, 1962年.
- 16) セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-17: 各種セメントを用いたコンクリートの長期強度, 1967年.
- 17) 高野俊介: 打込み温度がマッサコンクリートの強度に及ぼす影響の研究, 土木学会論文集, 第26号, 1955年.
- 18) Verbeck, G.J. and R.A. Helmut: Structures and physical properties of cement paste, The 5th Int. Symp. on the chem. of cement, Principal Paper III-1, 1968.
- 19) Manns, W. and K. Wesche: Variation in strength of mortars made of different cements due to carbonation, The 5th Int. Symp. on the chem. of cement, Supplementary Paper III-16, 1968.