

真空曝露および種々の乾燥作用を受けたモルタルの物性変化

金森洋史*・松本信二**

月コンクリートの適用性を探る一つのアプローチとして、モルタル供試体の諸物性に及ぼす真空の影響を調べた。所定の期間水中養生した供試体を真空に曝露し、質量、ひずみならびに強度などの変化を捉えるとともに、これらの物性変化を炉内あるいは気中で乾燥した供試体の物性変化と比較した。その結果、乾燥による強度の増加は、真空曝露した場合に最も大きいことなどが明らかとなった。

Key Words: mortars, vacuum, drying, shrinkage, strength, porosity

1. はじめに

将来の月基地建設において期待される材料の1つに、コンクリートなどのセメント系材料が挙げられる。月資源からセメントを抽出できうことや、基本的なコンクリートの物性が月の環境に比較的適していると考えられていることなどがその主な理由である。この分野の研究が本格的に開始されたのは1980年代に入ってからであり、以来、セメントの抽出に関連した反応論的考察^{1)~9)}やコンクリート製月構造物の設計^{8)~10)}などを中心に検討が進められてきている。しかしながら、月の環境下においてコンクリートがどのように機能するかということについては、月でのコンクリートの適用性を論ずる場合の本質であるにもかかわらず、多くの研究者が今後の課題として挙げるに留まっているのが現状である。

本研究は、このような課題に対する実験的なアプローチを試みたものである。月の特殊環境の1つである真空環境を探り上げ、それがコンクリートなどのセメント系材料の物性に与える影響を把握することを目的とした。

2. 研究の着眼点

コンクリートを月の構造物に適用する場合、その製造過程や品質に影響を及ぼす月環境として、高真空($10^9 \sim 10^{12}$ torr = $10^7 \sim 10^{10}$ Pa)、低重力(約 1/6 g、重力加速度=約 1.6m/sec²)、高温度差(昼間 135°C ~ 夜間 -170°C)、放射線(銀河宇宙線、太陽風)ならびに隕石(直径数 μm、衝突速度秒速数十km)などが挙げられる。

このような厳しい環境の中でコンクリートを製造することは非常に難しいと考えられ、当面は与圧された工場の中でプレキャストコンクリートの製造を行う方法が現実的である^{12)~14)}。Fig. 1は、この場合のコンクリートの

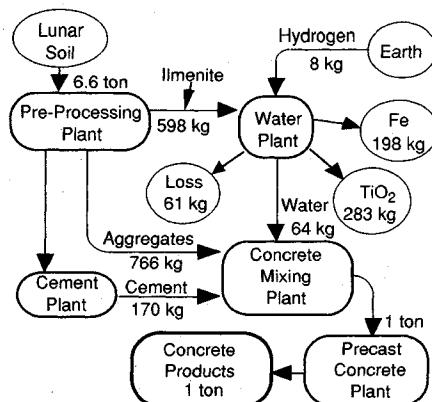


Fig. 1 Lunar Concrete Production Process

製造プロセスを示したものである。図中の数字は、1 ton のコンクリートを製造するために必要な各原材料の所要量を示している¹³⁾。

構造物を月面下に建設するか、あるいは月表面の砂(Regolith: レゴリスと呼ばれる)で覆うことによって、苛酷な温度変化、放射線ならびに隕石などの環境から構造物およびその内部を比較的容易に保護することができる。また低重力についても既往の研究から、コンクリートの強度に及ぼす影響は比較的小ないと推定されている¹⁵⁾。従って、構造体のコンクリートに最も大きな影響を与える月環境は真空であると考えられる。

真空環境では水蒸気分圧がゼロに等しいため、水の蒸発現象に着目した場合、これを極端な乾燥環境と見做すことができる。本研究では、このような環境に曝露されたセメント系材料の乾燥機構ならびに物性変化を把握することを目的に2種類の実験を行った。実験には、乾燥の影響を大きく受けるセメントマトリックスの容積を多くし、かつ粗骨材の品質変動に伴うデータのばらつきを排除することを考慮して、コンクリー

*正会員 工修 清水建設(株)技術研究所

**工博 清水建設(株)技術研究所

(〒135 東京都江東区越中島 3-4-17)

Table 1 Test Cases for Experiment I

		Age for Testing (days)						
		1	3	7	28	91	182	364
Pre-Curing Duration (days)	1	—	○	○	○	○	○	○
	3	—	—	○	○	○	○	○
	7	—	—	—	○	○	○	○
	28	—	—	—	—	○	○	○
	W*	○	○	○	○	○	○	○

* Cured in Water

トではなくモルタル供試体を使用した。以下に各実験の概要を述べる。

実験Ⅰ：真空に曝露されたモルタルの物理特性および組織構造に関する実験

長期的に真空環境に曝露されたモルタルの質量、ひずみ、圧縮および曲げ強度、残存水分量、ならびに細孔構造の変化を捉えることに着目した実験である。真空曝露の開始時期および期間を変化させ、上記特性に及ぼす真空曝露の影響について検討した。

所定の期間（1日～28日）20℃の水中で前養生を行なったモルタル供試体をその後真空環境へ暴露し、最長材令364日までの上記特性の変化を調べた。

実験Ⅱ：乾燥方法の違いがモルタルの物理特性に及ぼす影響に関する実験

真空曝露による供試体の乾燥機構と他の方法による乾燥機構との違いを調べ、真空曝露独特の影響を把握することに着目した実験である。

所定の期間（1日～28日）20℃の水中で前養生を行なったモルタル供試体をその後種々の乾燥環境に曝露し、最長材令182日までの圧縮および曲げ強度、ならびに質量変化を測定した。乾燥方法として、1) 水中養生を行なった後、強度試験直前に24時間110℃で乾燥、2) 継続的に気中で乾燥、ならびに3) 継続的に110℃で乾燥、の3種類を設定した。これらの方によって乾燥されたモルタル供試体の諸特性を、実験Ⅰの供試体の諸特性と比較した。

3. 真空に曝露されたモルタルの物理特性および組織構造に関する実験

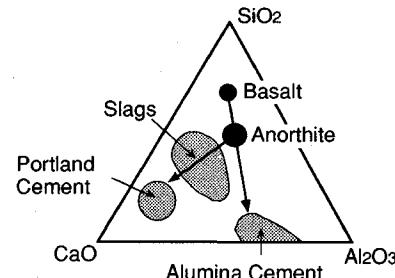
(1) 実験計画

実験条件として、真空曝露開始材令（供試体を真空に曝露する前の水中養生期間）を1, 3, 7, 28日の4水準、試験材令（水中養生あるいは真空曝露を終了して強度等の試験を行う材令）を1, 3, 7, 28, 91, 182, 364日の7水準設定した。これらの実験ケースの組合せをTable 1に示す。比較のために、20℃の水中養生のみを施した供試体についても同様の試験を行った。

(2) 実験方法

a) 材料

セメント：月コンクリートに使用されるセメント

Fig. 2 SiO₂ - CaO - Al₂O₃ Diagram

は、月の玄武岩あるいは灰長石から造られる。Fig. 2の矢印に示すように、灰長石に石灰分を加えることによってポルトランドセメントや高炉スラグセメントに近いものが、また玄武岩や灰長石を溶融して不要な物質を取り除くことによって、アルミナセメントに近いものが作られると考えられている^{10, 11}。現在これらのセメントの可能性について、さらに詳細な検討が行われている。本実験では基礎的なデータを探ることを目標として、一般に広く使用されている普通ポルトランドセメント（比重3.16、比表面積3180cm²/g）を使用した。

水：月の鉱物はその大部分が酸化物であり、元素構成にして約40%を酸素が占める。地球から運び込む水素によってこれらの鉱物を還元すると、月基地の様々な活動に必要な水や酸素を製造することができる¹⁰。ただし月では水は非常に貴重なため、コンクリート等には生活排水を浄化処理した水を使用することになると考えられる。この場合の水質等についてはまだ明確とはなっていないことから、本実験では、一般に使用される水道水を練りまぜ水として使用した。

骨材：月コンクリート用の骨材には、月の砂や石を使用する。既往の研究結果から、月の砂は骨材として利用できそうなことが明らかとなっている¹²。ただし、これらの砂や石には様々な粒径のものが含まれているため、粒度を調整して使用する必要がある。また、月の石は過去に水の作用を受けておらず、絶乾状態となっているため、コンクリート中の水を吸水して様々な不安定性状（溶解、膨潤破壊など）を示す可能性がある。従って、これらを一旦水に浸し、充分安定であると認められたものをコンクリートの骨材として使用することになる。

本実験では、物性の安定性を考慮して、豊浦標準砂（気乾比重2.62、単位体積質量224kg/m³）を使用した。

b) 供試体の作製

供試体には、「JIS R 5201 セメントの物理試験方法」に準じて作製した4×4×16cmの直方体供試体を使用した。モルタルの配合は、月コンクリートの配合に関する検討が現在までになされていないことから、JIS R 5201に準

じて S/C=2, W/C=65% とした。また、供試体数は各実験条件につき 3 本ずつとした。

c) 測定項目

以下に示すモルタルの特性について、真空曝露前および曝露後の測定を行った。

- ・質量

- ・長さ

- ・供試体含水量

- ・細孔分布特性（全細孔容積、平均細孔径など）

- ・圧縮強度

- ・曲げ強度

以上の測定項目のうち、供試体含水量ならびに細孔分布特性については最長材令 182 日まで、その他の特性に間違っては材令 364 日まで測定した。

d) 装置

実験に使用した主な装置および器具は以下のとおりである。なお、モルタルミキサー、型わく、および強度試験装置は JIS R 5201 に準じたものを使用した。

- ・コンタクトゲージ 1 式（ひずみ測定用）

- ・真空曝露装置

- ・真空デシケータ（曝露後の供試体保存用）

- ・強熱減量測定器具 1 式：乳鉢（φ 120, φ 60mm）,

- ふるい（内径 50mm/ふるい目 4.75, 2.36mm, 106

- μ），マグネティックスターラー，ガラス器具類，るつぼ，電気炉，アセトン，ろ紙など

- ・不溶残分測定器具 1 式：上記の他，塩酸

- ・細孔分布測定装置：島津オートボア 9220 型（水銀圧入法）

真空デシケータは、真空曝露後の供試体が吸湿しないように、各物性値の測定の際に供試体を一時的に保存するための容器である。また、真空曝露装置は本実験のために特別に製作したものである。その構成ならびに仕様の概略を以下に述べる。

本装置は Fig. 3 に示すようなシステム構成となっている。鋼製の真空容器は内径 20cm、長さ 70cm で、その両端には円形の鋼板が取付けられている。一方の端部鋼板は供試体を出し入れするための蓋となっており、ピラニ型真空計（PG-1S：岡野製作所製）のセンサーが取付けられている。反対側の鋼板にはパイプおよびバルブが取付けられており、このパイプは真空一定装置およびトラップを介して真空ポンプに接続されている。

真空一定装置（VC-20S：岡野製作所製）は、真空容器内部の真空度をデジタル表示すると共に、電磁バルブを開閉することによって設定した真空度を維持する機能を有する。最小分解能は 0.1mmHg（約 13Pa：1 万分の 1 気圧）である。

真空ポンプは、排気速度 200 l/min. の油回転型ポンプで、到達圧力は 5×10^{-4} torr (6.7×10^2 Pa) である。Photo 1

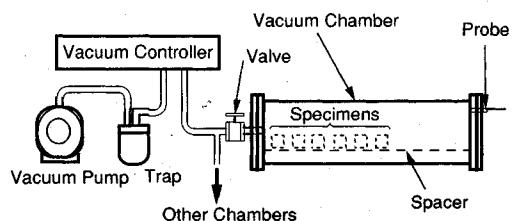


Fig. 3 Vacuum Exposure Apparatus

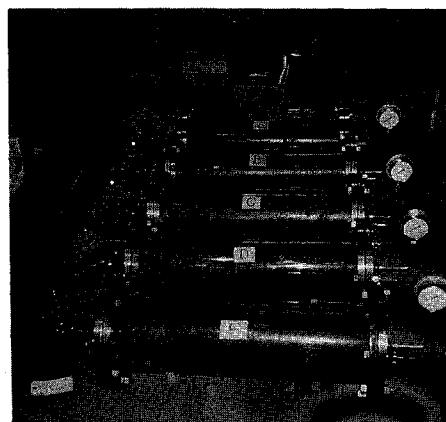


Photo 1 Vacuum Chambers

に装置の概観を示す。

e) 実験手順

供試体の成形は、20°C・相対湿度 80% の恒温恒湿室で行い、材令 1 日まで供試体をそのまま放置した。材令 1 日で脱型したモルタル供試体に、コンタクトゲージの標点（標点距離：100mm）を貼付し、20°C の水中で養生を行った。なお、試験材令あるいは前養生期間が 1 日の供試体については、成形した供試体が形状を保持できるようになるまで（約 8 時間）そのまま恒温恒湿室に放置し、その後材令 1 日まで水中養生を施した。

所定の材令に達した供試体は、寸法、質量および標点間距離を測定した後、直ちに真空曝露を開始した。真空度は、装置の能力から 0.1torr (13Pa) に設定した。この程度の真空度でも水は液体として存在できないため、セメントの水和反応は、月の場合と同じような固相反応になることが予測される。

所定の材令まで真空曝露した供試体を容器から取り出し、その寸法、質量および標点間距離に引き続き、曲げおよび圧縮強度を通常の空気中で測定した。この一連の作業における供試体の吸湿を極力少なくするために、測定時以外の供試体は真空デシケータに入れて保存した。なお強度試験は JIS R 5201 に準じて行った。

強度試験終了後の供試体片を使用して、モルタルの

含水量（強熱減量および不溶残分）ならびに細孔分布の測定を行った。

強熱減量および不溶残分は、セメント協会報告に提案されている方法に準じて測定した^{18,19)}。セメントおよび標準砂についても同様の測定を行い、モルタル中のセメント、標準砂および水の量を次式から算定した。

$$C_i = \frac{(Ig.m - 100) \cdot (In.m - In.s)}{(Ig.c - 100) \cdot (In.c - In.s)} \cdot Mi \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$S_i = \frac{(Ig.m - 100) \cdot (In.m - In.c)}{(Ig.s - 100) \cdot (In.s - In.c)} \cdot Mi \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$W_i = Mi - C_i - S_i \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、	C _i	：モルタル中のセメント量(g)
	S _i	：モルタル中の標準砂量(g)
	W _i	：モルタルの含水量(g)
	M _i	：モルタル試料の質量(g)
	Ig.m	：モルタルの強熱減量(%)
	Ig.c	：セメントの強熱減量(%)
	Ig.s	：標準砂の強熱減量(%)
	In.m	：モルタルの不溶残分(%)
	In.c	：セメントの不溶残分(%)
	In.s	：標準砂の不溶残分(%)

上式の含水量W_iは、強度試験時のモルタルに含まれるすべての水の量の総和を示している。ここでは、含水量とセメント量の比 W_b(=W_i/C_i × 100 %)を求める、これを含水量セメント比とした。

細孔分布の測定には、直径2.5~5.0mm程度に粉碎したモルタル試料を使用した。細孔径の測定範囲は0.002~1000μmで、水銀圧入法によって測定した。

(3) 実験結果および考察

a) 質量の変化性状

モルタル質量の経時的な変化をFig.4に示す。質量変化は、脱型時(材令1日)の供試体質量からの変化率として示した。真空に曝露した供試体の質量は、曝露前の水中養生期間が短いほど大きく減少した。真空に曝露したセメントおよび標準砂の質量減少が認められなかったことから、モルタルの質量減少は内部の水の逸散によるものといえる。このような供試体からの水の逸散は、真空曝露開始直後に激しく、徐々に少なくなる傾向を示した。また、材令365における質量の減少率は約13%となった。成形時の供試体に含まれていた水の量は、モルタル質量の18% (S/C=2, W/C=65%より算出)であったことから、混入した水の約70% (13/18)が真空曝露によって逸散したことになる。

b) ひずみの変化性状

コンクリートやモルタルの乾燥収縮機構は、その乾

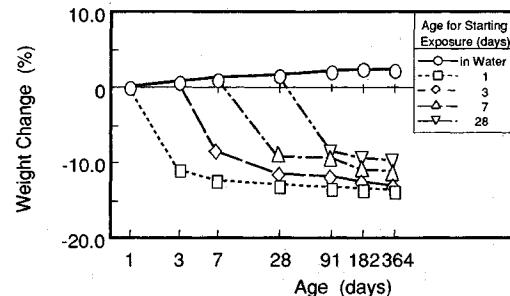


Fig. 4 Weight Changes of Mortar Specimens

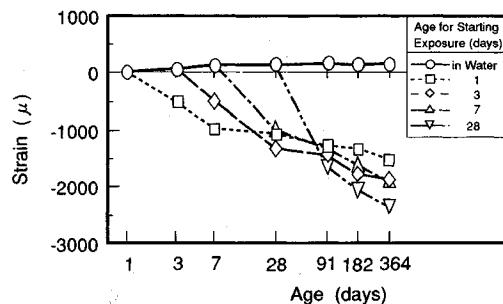


Fig. 5 Strain Changes of Mortar Specimens

燥過程に応じて毛細管張力理論、表面吸着理論、ならびに層間水理論などによって説明される^{20, 21)}。乾燥によって毛細管水のメニスカス半径が小さくなると、毛細管張力が増大してセメントマトリックスが収縮する。さらに乾燥が進むと、セメントゲルに吸着した水や層間水が逸散し、ゲル粒子間距離が縮まって収縮が進行する。一方このような乾燥収縮は、骨材や未水和セメントによって内的に拘束される。

Fig.5は、モルタル供試体のひずみ変化を示したものである。ひずみは材令1日の供試体長さを基準として算定しており、負号は収縮を示している。なお、目視で確認できるようなマクロなひびわれはいずれの供試体にも見られなかった。

水中養生を行った供試体がわずかに膨張したことに対し、真空曝露したモルタルはいずれも材令とともに急速な収縮を示した。また曝露開始材令が早いほど、長期的な収縮は小さくなる傾向を示した。これは、未水和セメントの拘束が影響したものと考えられる。

細孔中の水が概ね蒸発すると、毛細管張力が減少してモルタルは膨張に転ずるはずである。実験では真空という極端な乾燥環境下にも拘わらず、材令365日においてもなお収縮する傾向を示した。このことから、真空曝露によるモルタルの収縮は、毛細管水が非常に緩速に逸散したこと、あるいは毛細管水に加えてセメントゲルの吸着水や層間水が逸散したことなどが要因と

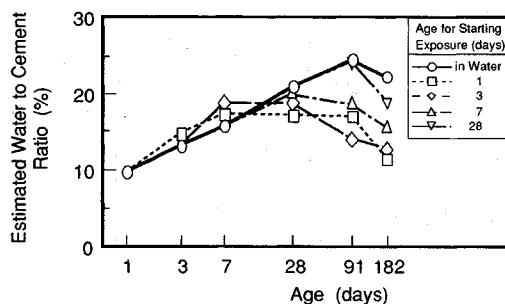


Fig. 6 Changes in Estimated Water to Cement Ratio

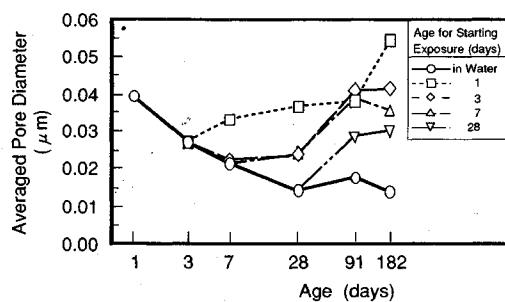


Fig. 8 Changes in Averaged Pore Diameter

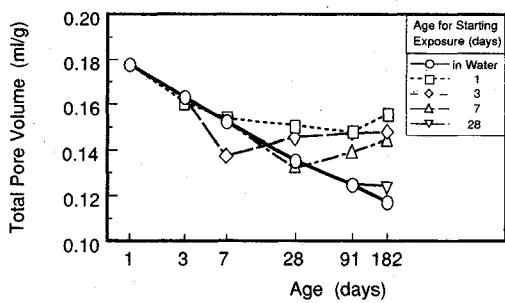


Fig. 7 Changes in Total Pore Volume

なって発生したものと考えられる。

c) 含水量の変化性状

Fig. 6 に、モルタル供試体の含水量セメント比 (Wb) の変化を示す。

Wb の値は、供試体を水中で養生することによって増加する傾向を示した。ただし、材令 182 日の Wb が材令 91 日の値よりも低下した原因については、実験操作において何らかの変動因子が混入したためと思われる。

真空曝露を開始した後も Wb はしばらく増加し、その後徐々に減少する傾向を示した。水中養生による Wb の増加はセメントの水和反応の進行によるもので、結合水量の増加を示していると考えられる。真空曝露を開始した後もこの値がさらに増加する傾向を示したことから、水和反応は、この段階においても内部において僅かながら継続していたと考えられる。一方その後の材令における Wb の減少から、一旦供試体内部に取り込まれた吸着水あるいは結合水の一部が、真空曝露によって再度逸散したと考えられる。

真空曝露供試体の材令 182 日における Wb は 10 ~ 20% となった。仮にこれを結合水率と考え、また完全水和時の水セメント比を 23 % (= 水和度 100 %) と仮定すると²¹⁾、真空に曝露したモルタル中のセメントの水和度は、概ね 45 ~ 85 % であったといえる。現実には、Wb には結合水の他に吸着水も含まれていると考えられるため、実際の水和度はこれより若干低い値になる。

d) 細孔分布特性の変化性状

Fig. 7 にモルタルの全細孔容積の変化を示す。水中養生供試体の全細孔容積が材令とともに減少したことに対し、真空曝露したものは曝露開始後しばらくしてから増加する傾向に転じた。また Fig. 8 は平均細孔径の変化を示したものである。全細孔容積の場合と同様に、曝露開始後しばらくすると、供試体の細孔径は大きくなる傾向を示した。

全細孔容積の減少ならびに平均細孔径の縮小は、セメント水和物の生成によるものと考えられる。一方真空曝露による細孔容積の増加は、供試体全体が収縮していることから、吸着水や結合水などの逸散によってセメントゲル粒子が縮小したことを示すと考えられる。ただし、より明確な議論を行うためには、細孔径分布に関するより詳細な検討を行う必要があると思われる。

e) 強度の変化性状

Fig. 9 にモルタルの圧縮強度の変化を示す。真空曝露した供試体は、曝露開始後しばらくして強度の増加を停止し、その後ほぼ一定の強度を示した。

暴露初期の強度の増加には、セメントの水和反応以外に、「乾燥効果」が寄与していたと考えられる。一般に、強度試験の直前にモルタルやコンクリートを乾燥させると、乾燥させないものに比べて圧縮強度は大きくなり曲げ強度は小さくなると言われている²²⁾²³⁾。セメントゲル粒子がファンデルワールス結合をしている部分では、結合力は薄い水の層を介して作用しているが、乾燥によってこの水の層が失われると粒子の界面エネルギー（あるいはひずみエネルギー開放率）が高くなり、その結果ゲル粒子の結合力が強くなつて圧縮強度が増加する。一方、急激な乾燥によって発生した微細なひびわれや、不均一な収縮に起因した内部応力は、引張方向の応力に対して弱点となりやすい性質を有しているため、曲げ強度は一般に低下する。

材令 28 日に曝露を開始した供試体のその後の圧縮強度が、水中養生供試体の強度を上回ったことは、乾燥

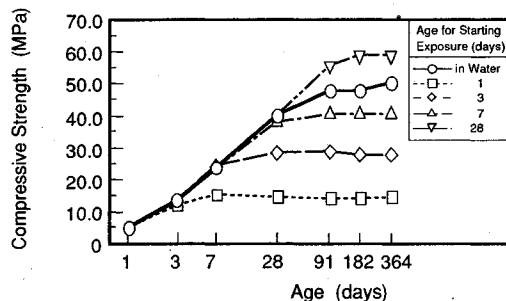


Fig. 9 Changes in Compressive Strength

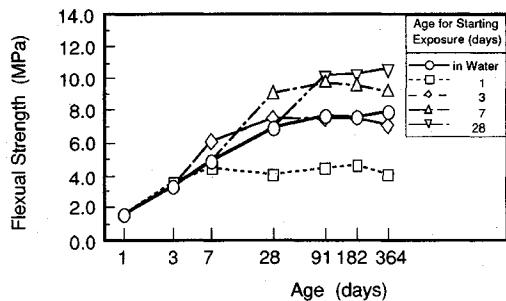


Fig. 10 Changes in Flexural Strength

効果の影響を表しているものであり、上記の解釈から推測すると、供試体から逸散した水には吸着水や層間水が含まれていたと考えられる。

Fig.10 はモルタルの曲げ強度についての結果を示したものである。基本的には圧縮強度と同様の変化を示したが、乾燥効果の影響は圧縮強度の場合よりも顕著となった。この理由として、実験では粒径の小さな標準砂を使用したために乾燥による内部の欠陥が発生し難かったこと、長期的な乾燥によって内部の収縮ひずみが比較的均一になったこと、ならびにクリープによって内部応力が緩和されたことなどが考えられる。

Fig.11 はモルタルの圧縮強度と含水量セメント比の関係を示したものである。相関係数はあまり大きくないが、両者の間には明らかに関連性が見られる。含水量セメント比が大きいほど圧縮強度が大きくなることから、含水量は、結合水量、即ちセメントの水和度を比較的良く表していると言える。また、Fig.12 に示すモルタルの圧縮強度と全細孔容積の関係は、既往の研究結果²⁾と同様に、全細孔容積が大きくなるほど、モルタルの圧縮強度は減少する傾向を示した。

以上の結果から、充分な養生を行ったモルタルは、それを真空環境に暴露しても所要の強度を確保することが可能であることが明らかとなった。しかしながら、その強度特性を説明するためには、セメントの水和の程度や細孔構造のみならず、「乾燥効果」の影響

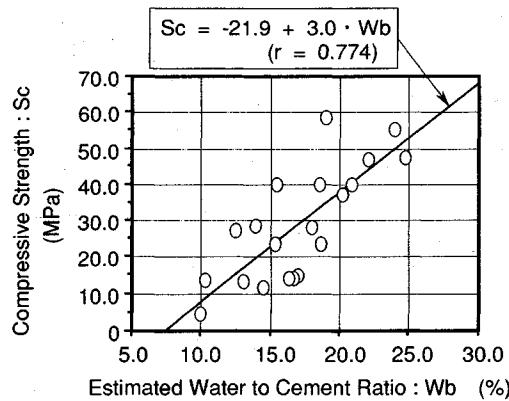


Fig. 11 Mortar Strength and Estimated Water to Cement Ratio

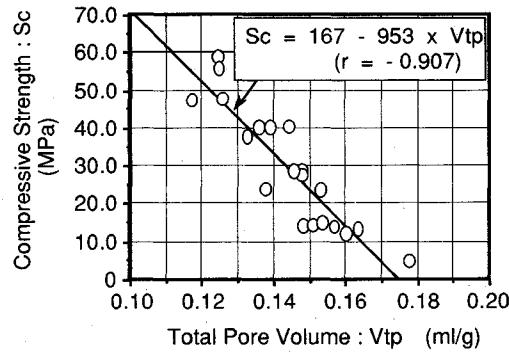


Fig. 12 Mortar Strength and Total Pore Volume

に関するさらなる検討が必要である。

4. 乾燥方法の違いがモルタルの物理特性に及ぼす影響に関する実験

(1) 実験計画

前章では、主として真空曝露による乾燥がモルタル供試体の諸特性に及ぼす影響について述べた。特に、乾燥効果による強度の増加は、月におけるコンクリートの適用性を論ずる観点から注目すべき結果であるといえる。このような乾燥効果を期待するためには乾燥機構に関するより多くの知見が必要であり、そのためには真空曝露以外の乾燥作用の影響を調べることも重要であると考えられた。本章では、種々の乾燥条件がモルタルの質量ならびに強度の変化に及ぼす影響を調べた実験について述べ、その結果を前章に述べた真空曝露供試体および水中養生供試体の結果と比較する。

実験では、乾燥方法として 1) 水中養生を行なった後、強度試験直前に 24 時間 110℃で乾燥する方法、2) 所定の材令以降、継続的に気中に乾燥する方法、ならびに 3) 所定の材令以降、継続的に 110℃で乾燥する方法、の 3 種類を設定した。1) は強度試験時における

Table 2 Test Cases for Experiment II

Drying Methods	Age for Starting Drying (days)	Age for Testing (days)				
		1	3	7	28	182
W : Water	—	○	○	○	○	○
B : Water + Heat (110°C)	One day before Testing	○	○	○	○	○
A : Water ↓ Air	1	—	○	○	○	○
	3	—	—	○	○	○
	7	—	—	—	○	○
	28	—	—	—	—	○
D : Water ↓ Heat (110°C)	1	—	○	○	○	○
	3	—	—	○	○	○
	7	—	—	—	○	○
	28	—	—	—	—	○
S : Water ↓ Vacuum	1	—	○	○	○	○
	3	—	—	○	○	○
	7	—	—	—	○	○
	28	—	—	—	—	○

* Results of Case W and Case S are the same as those of Experiment I.

供試体の含水状態に、また2)および3)は乾燥環境の違いに着目したものである。Table 2 に実験の組合せを示す。

(2) 実験方法

a) 材 料

供試体にはモルタルを使用した。使用材料ならびに配合は実験Iと同一とした。

b) 供試体の作製

実験Iと同様にJIS R 5201セメントの物理試験方法⁴に準じた。モルタルの配合は、S/C=2, W/C=65%で、供試体数は各実験ケースにつき3本ずつとした。

c) 測定項目

以下の項目について測定を行った。

・質量

・圧縮強度

・曲げ強度

d) 装 置

実験に使用した主な装置類は以下のとおりである。

・電子秤(感量0.1g)および斗量器具

・電熱式恒温槽(110°C乾燥炉)

・デシケータ(暴露後供試体一時保存用)

・強度試験装置(アムスラー万能試験機)

e) 実験手順

モルタル供試体の作製方法は実験Iと同様である。成形した供試体は、脱型後20°Cで水中養生した。

ケースB(Table 2 参照)では、そのまま水中養生を継続した後試験材令の1日前に水中から取り出し、ウェスで表面の水を拭ってから質量の測定を行った。次にこれらの供試体を110°C恒温槽内に設置し24時間乾

燥した。なお試験材令1日の場合は、成形後の供試体が形状を保持できるまで(約8時間)そのまま恒温恒湿室(20°C・相対湿度80%)に放置し、その後脱型して110°C恒温槽内に設置した。その後供試体を恒温槽から取り出し、デシケータ内で常温(20°C程度)となるまで冷却し、質量、圧縮ならびに曲げ強度を測定した。

ケースAでは、材令1, 3, 7および28日においてそれぞれ供試体を水中から取り出し、ケースBと同様に初期質量の測定を行った後、そのまま20°C・相対湿度60%の気中に放置した。その後所定の試験材令において質量ならびに強度の測定を行った。

ケースDでは、所定の乾燥開始材令においてケースAと同様の手順で初期質量の測定を行った後、供試体を110°Cの恒温槽内に設置した。その後所定の試験材令において質量ならびに強度の測定を行った。

ケースWおよびケースSについては、3章に示したとおりである。

(3) 実験結果および考察

a) 質量の変化性状

Fig.13に、乾燥開始材令に応じたモルタルの質量変化を示す。質量変化は、いずれのケースにおいても材令1日の湿潤供試体質量からの変化率として算定した。ケースWおよびケースBは乾燥開始材令とは無関係であるため、いずれの図にも同一の結果を示した。

強度試験直前に加熱乾燥したケースBでは、試験材令と乾燥開始材令がほぼ同じであることから、水和反応があまり進んでいない材令7日までの質量が大きく減少した。また材令182日におけるケースBの質量は、材令7日までに乾燥を開始したケースSとケースAの中間の値を示した。一方、これ以外の条件で乾燥した供試体では、乾燥開始後の時間経過とともに質量が減少する傾向を示した。

強度試験直前に加熱乾燥したケースBを除くと、質量がもっとも大きく減少する条件は、継続的に加熱乾燥したケースDであった。次いで真空乾燥したケースS、気中乾燥したケースAの順となった。気中乾燥した供試体の質量変化は、同期間加熱乾燥した供試体のほぼ半分となった。

ケースAならびにケースDの場合、材令7日までに乾燥を開始した供試体の材令28日と182日における質量はほぼ等しくなった。従ってこれらの条件で乾燥された供試体は、材令28日以降において蒸発平衡に達していたと考えられる。一方、材令7日までに真空曝露を開始した供試体の材令182日における質量は、材令28日の質量よりも僅かに減少する傾向を示した。真空曝露の場合には、供試体雰囲気の水蒸気分圧がほぼゼロに等しいため、蒸発平衡には至らずに僅かながらも長期にわたって内部の水が逸散したと考えられる。

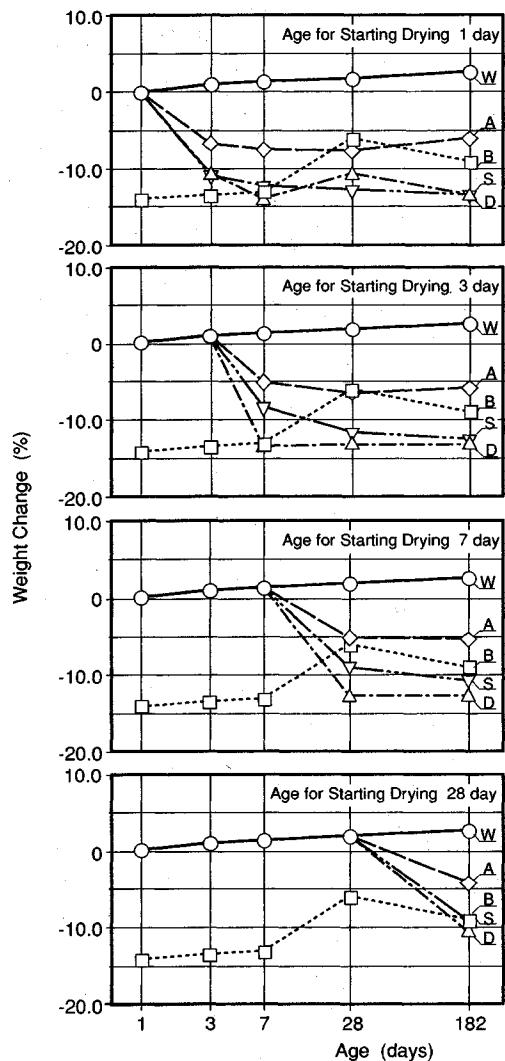


Fig.13 Effects of Drying Methods on the Mortar Weight

材令182日における質量変化に着目すると、ケースA、
ケースDおよびケースSの場合には、乾燥開始時期が遅いほど質量の減少率が小さくなつた。この原因として、乾燥を開始する時期が遅いほどセメントの水和反応が進行し、1) 供試体内部の蒸発可能な水の量が減少した、2) 供試体が緻密化して水が逸散しにくくなつた、などが考えられる。

なおケースDの結果から、110℃の加熱乾燥では蒸発平衡に達するまでに数日を要することが明らかとなつた。従つてケースBの条件では、蒸発可能な水の一部が供試体内に残存していたと考えられる。

b) 強度の変化性状

種々の乾燥作用を受けたモルタル供試体の圧縮強度および曲げ強度の変化を、それぞれ Fig.14 および Fig.15

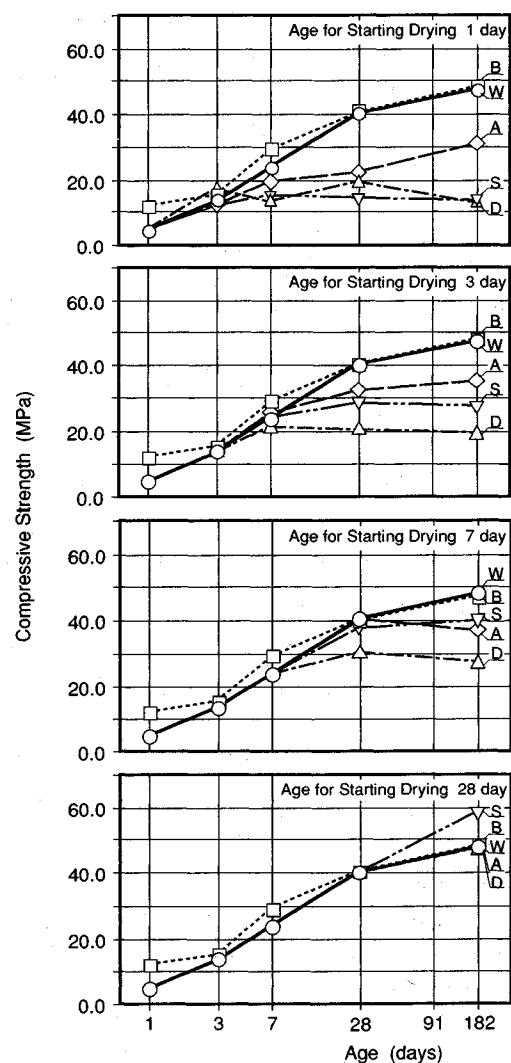


Fig.14 Effects of Drying Methods on the Compressive Strength

に示す。

強度試験直前に加熱乾燥した供試体（ケースB）の圧縮および曲げ強度は、材令7日までは水中養生供試体（ケースW）の強度を上回つた。ケースBの水中養生期間がケースWよりも24時間短かったにもかかわらず、このような結果が得られたことは、3章で説明したような乾燥効果を明確に表すものと考えられる。ただし、材令28日以降の強度は水中養生供試体とほぼ同等の値を示しており、急激な乾燥が、乾燥効果による強度の増大を打ち消すような欠陥を発生させたことも考えられる。

気中乾燥供試体（ケースA）の圧縮強度には明確な乾燥効果は見られず、概ね水中養生供試体の強度を下回つた。一方、材令3日までに気中乾燥を開始した供

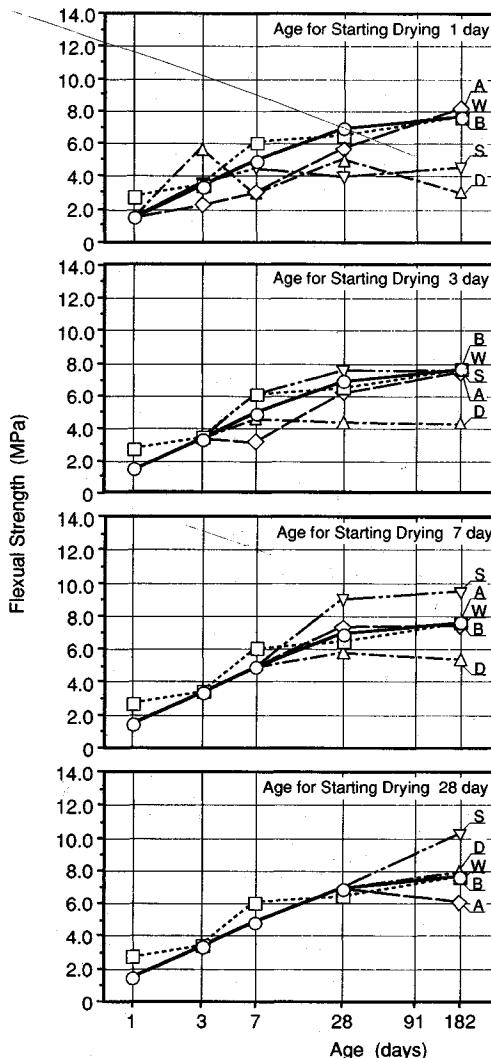


Fig.15 Effects of Drying Methods on the Flexual Strength

試体の曲げ強度は、一旦水中養生供試体の強度を下回ったものの、その後徐々に水中養生供試体と同等の強度へと近づく傾向を示した。この原因として、乾燥の初期に発生した供試体表面近傍の引張応力が、その後供試体の中心部にまで乾燥が進むことによって緩和されたためと考えられるが、より明確な議論を行うためには、供試体内部のひずみの変化を捉える必要があると思われる。

加熱乾燥した供試体（ケースD）は、圧縮および曲げともに最も低い強度を示した。材令7日までに乾燥を開始した供試体は、水和反応の停滞によって低い強度を示し、材令28日に乾燥を開始した供試体は、乾燥効果によって水中養生供試体と同程度の強度を示した。

真空曝露供試体（ケースS）では、材令7日までに曝

露を開始した場合のその後の圧縮強度、ならびに材令1日で曝露を開始した場合のその後の曲げ強度が、ともにケースDを僅かに上回り、また水中養生供試体（ケースW）を大きく下回った。これに対し、これらの材令以降に曝露を開始した場合には、ケースWと同等あるいはそれ以上の圧縮および曲げ強度を示した。真空曝露を開始する時期が、その後のモルタルの強度に対して大きな影響を及ぼしている。

真空曝露による乾燥効果の特徴的な点は、材令28日において乾燥を開始した場合、真空曝露した供試体が他のどの方法で乾燥した場合よりも大きな強度を示したことである。真空曝露供試体は、水の逸散によってセメントゲル粒子の界面エネルギーが高くなると同時に、加熱乾燥の場合ほどその変化が急激ではないため、内部組織の破壊が少なく比較的高い強度を示したと考えられる。

以上のように、充分な養生を行ったモルタルを真空曝露すると、水中養生を行った供試体や他の方法によって乾燥した供試体に比べて強度的に有利となる。ただし、ここで一つ考慮しなければならないことは、本実験ではモルタル供試体を使用したことである。モルタルはコンクリートに比べて内部が比較的均質なため、真空曝露による乾燥作用を受けても供試体の内部に大きな欠陥が生じなかつたと考えられる。従って、粗骨材が入ったコンクリートやその他ひずみを拘束する要因が有る場合には、必ずしも真空曝露が強度的に有利であるとは限らない。このことは、真空曝露によるモルタルのひずみ変化が大きいことからも容易に推察される。

このような乾燥に起因する欠陥の発生を抑え、かつ充分な前養生を行なうことができれば、真空環境下においてコンクリートあるいはモルタルを使用しても、構造設計上必要な強度を確保することは充分可能であると考えられる。

5. 結 論

本研究で実施した真空曝露およびその他の乾燥作用に関する2種類の実験の結果から、以下の事項が明らかになったと思われる。

1) モルタルの物性変化から、真空曝露によってモルタル中の毛細管水のみならず、セメントゲルの吸着水や層間水なども逸散したと推測される。

2) 真空曝露を開始した直後のモルタル供試体の内部では、僅かながら水和反応が継続する。これは、曝露開始後の供試体含水量の増加、全細孔容積の減少、平均細孔径の縮小、ならびに強度の増加などの現象によって観察される。

3) 実験で使用したモルタル供試体のように比較的

均質で寸法の小さい部材は、充分な湿润養生を行った後に真空に曝露すると、乾燥効果による強度の増加が期待できる。月ではこのようなモルタルブロックを使用することも考えられる。

4) 乾燥効果による強度の増加は、真空曝露に限らず、加熱乾燥あるいは気中乾燥などにおいても観察される。材令 28 日に乾燥を開始した供試体の材令 182 日強度は、真空に曝露した供試体が最も大きな値を示す。

6. 今後の課題

本実験の結果から、材料の収縮という問題を解決することによって、セメント系材料の月の真空環境下への適用性をさらに拡大することができると考えられる。ただし、この結果は供試体の寸法が変化することによって異なる傾向を示すことも考えられるため、今後はモルタルのみならずコンクリートをも含め、収縮およびその影響を低減する方法に関する検討が必要と考えられる。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、清水建設技術研究所の方々に多大なる援助ならびに御指導をいただきました。また、本論文をまとめるに当たっては、早稲田大学理工学部土木工学科・関博教授に多くのご指導を賜わりました。ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Lin, T.D.: Concrete for Lunar Base Construction, *Concrete International*, Vol.9, No.7, 1987.
- 2) Agosto, W.N., and A.M.M.Gadalla: Lunar Cement Formulations for Space Systems Shielding and Construction, *Space Manufacturing 5 / Engineering with Lunar and Asteroidal Materials / Proceedings of the Seventh Princeton / AIAA / SSI Conference*, p179, 1985.
- 3) Agosto, W.N., J.H. Wickman, and E. James: Lunar Cements / Concretes for Orbital Structures, *Space 88 / Engineering, Construction, and Operations in Space*, ASCE, Aug. 1988.
- 4) Young, J.F.: Concrete and Other Cement-Based Composites for Lunar Base Construction, *Lunar Base and Space Activities in the 21st Century*, Houston, Apr. 1988.
- 5) Schilling, P.J., et al.: Use of Alkali Activation of Alumino-Silicates to Form Binders from Lunar Soil, *Space 88 / Engineering, Construction, and Operations in Space*, ASCE, Aug. 1988.
- 6) Burt, D. M.: Lime Production from Lunar Anorthite, *Lunar Concrete*, ACI SP-125, pp. 237-244, 1991.
- 7) Mishulovich, A., T. D. Lin, and S. W. Tresouthick: *Lunar Cement Formulation*, ACI SP-125, pp. 255-264, 1991.
- 8) Lin, T.D. et al.: *Concrete Lunar Base Investigation*, *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, Vol. 2, No. 1, Jan. 1989.
- 9) Chow, P. and T. Y. Lin: *Lunar Concrete Construction Requires New Value System and Concepts*, ACI SP-125, pp. 177-190, 1991.
- 10) Kaden, R. A.: *Methodology for Forming and Placing Lunar Concretes*, ACI SP-125, pp. 71-96, 1991.
- 11) Matsumoto, S., et al.: *Concrete Structure Construction on the Moon, Lunar Base and Space Activities in the 21st Century*, Houston, Apr. 1988.
- 12) Drake, R. M.: *Production of Lunar Concrete in A Large Pressurized Assembly Facility*, ACI SP-125, pp. 211-222, 1991.
- 13) Kanamori, H., et al.: *A Cost Study of Concrete Production on the Moon, Space 90 / Engineering, Construction, and Operations in Space*, ASCE, Albuquerque, Aug. 1990.
- 14) Hwang, C. L., et al.: *Precast Segments Made With Compacted Dry Mix for Lunar Construction*, ACI SP-125, pp. 265-276, 1991.
- 15) 金森・石川・今井: セメントベーストおよびモルタルの脱水性状に及ぼす加速度の影響, 土木学会第43回年次学術講演会, 第5部門, Oct., 1988.
- 16) Knudsen, C. W., et al.: *Recent Developments of the Carboket Process for Lunar Oxygen Production*, *AIAA Space Programs and Technologies Conference*, Huntsville, Mar. 1992.
- 17) Lin, T. D., H. Love, and D. Stark: *Physical Properties of Concrete Made with Apollo 16 Lunar Soil*, *Space Manufacturing 6 / Nonterrestrial Resources, Biosciences, and Space Engineering/ Proceedings of the Eighth Princeton / AIAA / SSI Conference*, p.361, 1987.
- 18) コンクリート専門委員会: 硬化コンクリートの配合推定について, セメント協会報告, セメント・コンクリート, No.251, 1968.
- 19) コンクリート専門委員会: F-18 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告, セメント協会, 1967.
- 20) 岩崎: コンクリートの特性, コンクリートセミナー1, 共立出版, 12月, 1975.
- 21) Neville, A. M.: *Properties of Concrete*, Pitman Publishing Ltd., London, 1973.
- 22) 大岸: コンクリートの組織構造と力学的性質, コンクリート工学, Vol. 19, No. 11, 1981.
- 23) 鎌田・吉野・寺井: コンクリートの強度と細孔構造に関する実験, セメント技術年報, Vol. 31, 1977.

(1993. 2. 22 受付)

PROPERTIES OF MORTAR EXPOSED TO VACUUM AND OTHER DRY ENVIRONMENTS

Hiroshi KANAMORI and Shinji MATSUMOTO

Effects of vacuum and other dry environments on properties of hardened mortar are discussed aiming at studying feasibility of lunar concrete. Mortar specimens cured in water for first several days were exposed to various dry environments which include; (1) a vacuum, (2) furnace dry at 110 °C for 24 hours immediately before strength tests, (3) air dry at 20 °C and 60 % R.H., and (4) continuous furnace dry at 110 °C. Weight losses and strength gains caused by the drying effect were observed for most of the dried specimens. Since the vacuum dried specimen showed the largest strength gain among these specimens, it was expected that well-cured mortar could be used in a vacuum environment.