

真空環境におけるコンクリートの利用

金 森 洋 史
(技術研究所)
松 本 信 二
(技術研究所)
石 川 登
(技術研究所)

§ 1. はじめに

21世紀初頭にも建設が始められると期待されている月基地は、人類が本格的に宇宙へ進出し、様々な地球外資源の利用を図っていくうえで非常に重要な位置付けにある。月開発の初期段階では、基地の大部分は地球の材料を使った仮設的な構造物となるが、基地がある程度自立した機能を有する段階になると、さらに恒久的な構造物を建設する必要性が生じてくる。このような構造物の建設材料には、コンクリートなどのセメント系材料が適していると考えられる。その第一の理由は、大部分の原材料が月資源から調達できることにある。地球から建設資材を輸送するには莫大な時間とエネルギーを必要とするため、できるだけ月の資源を利用した材料を使用することが望ましいのである。第二の理由として、苛酷な月環境から構造物の内部を保護するには、コンクリートが有する断熱性や放射線遮蔽性が有効であると期待されていることが挙げられる。

月で製造ならびに使用されるコンクリート（以下、月コンクリート）に関する本格的な研究は、1980年代に入ってから開始された。以来、月資源からのセメントの抽出に関連した反応論的考察や、コンクリート製月構造物の設計などを中心に検討が進められている。しかしながら、月の環境下におけるコンクリートの特性については、それが月コンクリートの適用性を評価する場合の本質的な部分であるにもかかわらず、多くの研究者が今後の検討課題として挙げるに留め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。月の特殊環境の一つとして真空環境を取り上げ、それがモルタルやコンクリートの諸特性にどのような影響を及ぼすかを把握するために、数種類の実験を行なった。本報告では、これらの実験の結果を述べるとともに、セメント系材料を真空環境下で使用する場合の問題点およびその対策について報告する。

§ 2. 研究の背景

2.1 月コンクリートに関する既往の研究

1969年に人類が月面に到達して以来、70年代の前半にかけて月から持ち帰られた石や砂は、およそ400kgに及ぶ。その後様々な観点からの分析が行なわれ、それらの化学成分や物理特性などが明らかにされた。表-1は代表的な月の石の成分を示したものである¹⁾。月の石は大部分が酸化物であり、珪素、アルミニウム、カルシウムおよび鉄を比較的多く含んでいる。

このような分析結果を受け、W. N. Agosto らは月の高地部に比較的多く存在している長石 (Anorthosites: $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ などを含む) を熱分解することによって、地上のアルミナセメントに近い成分を有するセメントが製造できると述べている²⁾。この他にも、火山性のポゾラン物質や troilite (FeS) から抽出した硫黄などもセメントの製造に利用できると考えられている³⁾。さらに、MDF (Macro-Defect-Free) セメントや DSP (Densified with Small Particles) セメントから製造した、非常に高強度のセメント硬化体を利用することも提案されている⁴⁾⁵⁾。

成分	平原部の 土 砂 (10002)	高地部の 土 砂 (67700)	玄武岩 (60335)	斜長岩 (60015)	非晶質 火山岩 (60095)
SiO ₂	42.16	44.77	46.00	44.00	44.87
Al ₂ O ₃	13.60	28.48	24.90	36.00	25.48
CaO	11.94	16.87	14.30	19.00	14.52
FeO	15.34	4.17	4.70	0.35	5.75
MgO	7.76	4.92	8.10	0.30	8.11
TiO ₂	7.75	0.44	0.61	0.02	0.51
Cr ₂ O ₃	0.30	0.00	0.13	0.01	0.14
MnO	0.20	0.06	0.07	0.01	0.07
Na ₂ O	0.47	0.52	0.57	0.04	0.28

() 内は試料番号

表-1 月の石の成分¹⁾

一方、コンクリートに使用する水や各種の補強材料に関しては、月の海に多く存在するイルメナイト(Ilmenite: FeTiO_3)を水素で還元する方法が提案されている⁶⁾⁷⁾。イルメナイトからは、次式に示すように鉄やチタニア(二酸化チタン)および水などが製造される。



本来この方法は、月における酸素の製造を目的として提案されたのであるが、同時に製造される水や鉄はコンクリートの材料としても有効に利用することができる。

骨材に関しては、粒度の調整などを行なうことによって、月の砂や石をそのまま利用することができる。T.D. Linらは、本物の月の砂40gを骨材として使用したモルタル供試体の強度試験を行なっている。その結果、月の砂は骨材として十分使用できることを確認した⁸⁾。

最近では、以上のような材料に関する研究に加え、コンクリートを利用した月構造物に関する研究が行なわれている。T. D. Linは直径約36m、高さ約7.2mの円筒を3層に積み重ねたコンクリート構造物を提案した¹⁰⁾⁹⁾。構造物内部の圧力(1気圧)に耐えられるように、側壁コンクリートは内側に膨らんだアーチ形状となっており、緊張材によって構造物全体の安定を確保する構造となっている。図-1は、筆者らが提案したコンクリート製月構造物のレイアウトを示したものである¹⁰⁾¹¹⁾。一辺3.6m、高さ5.6mのプレストレストコンクリート製の六角形モジュールを、構造物の用途に合わせて自由に組み合わせることができるようになっている。筆者らは、この構造物の構造的な安定性、基地機能への適用性ならびに施工性などについての検討も行なっている。

月コンクリートに関する研究は、まだ比較的歴史が浅い分野である。したがって、既往の研究は以上に示したような理論的考察や構想などの提案がほとんどである。しかしながら、最近ではより実現性の高い提案を目標として、実験を含めた基礎的な研究が行なわれ始めている。

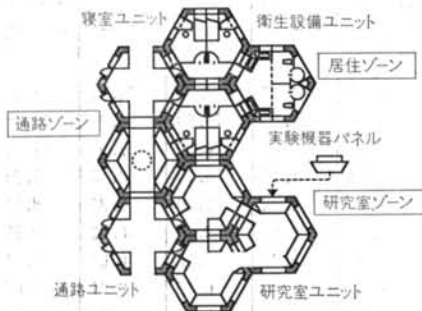


図-1 筆者らの提案するコンクリートモジュールのレイアウト例¹⁰⁾¹¹⁾

2.2 月環境と研究の着眼点

コンクリートを構造材料として使用する場合、そのコンクリートの製造方法や施工後の品質に影響を及ぼす月環境として、表-2に示すような高真空($1 \times 10^{-9} \sim 10^{-12}$ torr = $1 \times 10^{-7} \sim 10^{-10}$ Pa)、低重力(約1/6g、重力加速度=約1.6m/sec²)、高温度差(135~170°C)、放射線(宇宙線、太陽風)、ならびに隕石の飛来(直径数 μm 、衝突速度=秒速数10km)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ため、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なうことになると考えられる。図-2は、その製造プロセスを示したもので、図中の数字は1ton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¹²⁾。工場で製造されたコンクリート製品は、その後月の自然環境下で使用される。

構造物を月面下に建設するか、あるいは月表面に存在する砂(Regolith: レゴリスと呼ばれる)で覆うことによって、苛酷な温度環境や放射線環境から構造物および

環境	資源	高真空	低重力	温度差	放射線	隕石
工程						
材料	○					
練りませ		○	○			
運搬		○	○			
打込み		○	○			
締固め		○	○			
養生		○		○		
脱型		○		○		
供用		○		○	○	○

表-2 コンクリートの製造工程と月環境の関係

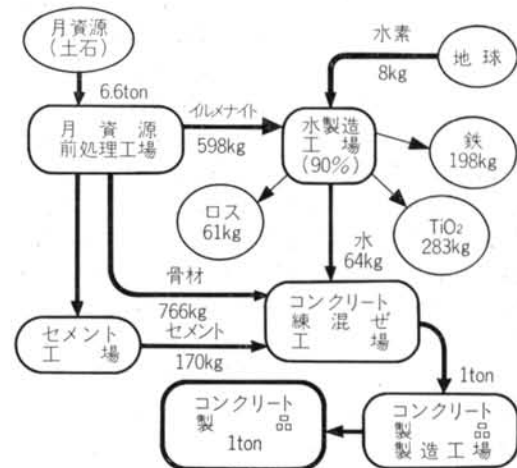


図-2 月コンクリート製造プロセス¹²⁾

その内部を比較的容易に保護することができる。したがって、表一2に示した各種環境の中で構造体のコンクリートに最も大きな影響を与える要因は、真空環境であると考えられる。以上の観点から、図一2に示したコンクリートの製造方法を考察すると、コンクリートの物性に関連して、

- (1)工場の内部で製造したコンクリート製品はどの程度の養生を行えば真空環境に暴露できるか？
- (2)長期的に真空環境に暴露されたコンクリートの品質はどのように変化するか？

という疑問が挙げられる。本研究は、これらの疑問に答えるための基礎データを収集することに着目したものである。

§ 3. 長期的に真空中に暴露されたモルタルの特性

3.1 実験計画

長期的な真空暴露が、モルタルの諸特性に及ぼす影響を捉える実験を行なった。実験の要因と水準を表一3に示す。各種の特性を評価する材令は最長364日とし、またモルタルを真空中に暴露する前の養生の効果を把握するために、供試体の真空暴露開始材令を1日～28日の範囲で変化させた。なお、比較のために20℃水中養生を行なった供試体についても同様の試験を行なった。

3.2 実験方法

3.2.1 材料

月資源から製造されるセメントの成分構成は、アルミナセメントに近いと考えられているが、現状ではまだまだ明確にされていない。したがって、本実験では一般に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3180 cm²/g)を使用した。

モルタルの練りまぜには水道水を使用した。

骨材には、再現性の高い実験とするために豊浦標準砂(気乾比重2.62, 単位体積質量2241 kg/m³)を使用した。標準砂は、通常の細骨材に比べ月の砂(レゴリス)に近い粒度分布を有しているという特徴がある。

要因	水準
真空暴露開始材令(日)	4, 1, 3, 7, 28
試験材令(日)	1, 3, 7, 28, 91, 182, 364

表一3 実験の要因と水準

3.2.2 供試体の作製

供試体の作製は“JIS R 5201:セメントの物理試験方法”に準じた。モルタルの配合は S/C=2, W/C=65%とし、供試体数は各実験条件につき3本ずつとした。

3.2.3 測定項目

以下に示すモルタルの特性について評価を行なった。

- (a)真空暴露前後の質量変化
- (b)真空暴露前後の長さ変化
- (c)真空暴露後の供試体含水量
- (d)真空暴露後の細孔分布特性(全細孔容積, 平均細孔径など)
- (e)真空暴露後の圧縮強度
- (f)真空暴露後の曲げ強度

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、その他の特性に関しては材令364日まで測定した。なお、細孔分布特性の測定は外注試験とした。

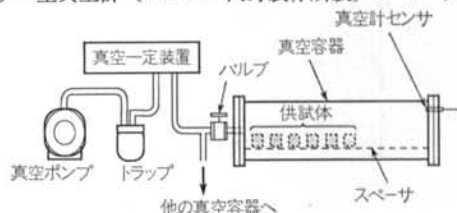
3.2.4 装置

実験に使用した主な装置・器具類は、以下のとおりである。なお、モルタルミキサ、型わく、強度試験装置などについては、JIS R 5201に準じたものを使用した。

- (a)コンタクトゲージ一式
- (b)真空暴露装置
- (c)真空デシケータ(暴露後供試体保存用)
- (d)強熱減量測定器具一式: 乳鉢(φ120, φ60mm), ふるい(内径50mm, ふるい目4.75, 2.36mm, 106μ), マグネティックスターラ, ガラス器具類, るつぼ, 電気炉, アセトン, ろ紙など
- (e)不溶残分測定器具一式: 上記の他, 塩酸
- (f)細孔分布測定装置: 島津オートポア9220型(水銀圧入法)

上記のうち、真空暴露装置は特別に製作したものである。以下に、その構成ならびに仕様の概略を述べる。

本装置は図一3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、その両端部には円形の鋼板が取り付けられている。一方の端部鋼板は、供試体を出し入れするためのふたとなっており、ピラニ型真空計(PG-1S: 岡野製作所製)のセンサが取



図一3 真空暴露装置

り付けられている。反対側の鋼板にはパイプおよびバルブが取り付けられており、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ともに、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ための装置である。最小分解能は0.1 torr (約13Pa: 1万分の1気圧) である。

トラップは排気中の水分を捕集し、また排気温度を下げることによって排気効率を高めるためのものである。排気の冷却にはドライアイスを使用した。

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。写真-1に装置の概観を示す。

3.2.5 実験手順

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 水中養生を行なった。

所定の真空暴露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、直ちに真空暴露を開始した。真空は0.1 torr (13 Pa) に設定した。この真空度は装置の能力から決定されたものである。月の真空度よりは低い値であるが、この程度の真空度でも水は液体にならないため、セメントの水和反応に及ぼす影響に関しては月の場合と大きく違わないと判断した。

次に、所定の材令まで真空養生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を測定した後、曲げおよび圧縮強度試験を行なった。強度試験は、JIS R 5201 に準じた。

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なった。



写真-1 真空暴露装置概観

強熱減量および不溶残分の試験方法は、セメント協会報告に提案されている方法に準じた¹³⁾。使用したセメントならびに標準砂についても同様の測定を行ない、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出した。

$$C_t = \frac{(I_{g,m} - 100) \cdot (I_{n,m} - I_{n,s})}{(I_{g,c} - 100) \cdot (I_{n,c} - I_{n,s})} \cdot M_t \quad \dots\dots(2)$$

$$S_t = \frac{(I_{g,m} - 100) \cdot (I_{n,m} - I_{n,c})}{(I_{g,s} - 100) \cdot (I_{n,s} - I_{n,c})} \cdot M_t \quad \dots\dots(3)$$

$$W_t = M_t - C_t - S_t \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 C_t : モルタル中のセメント量 (g)

S_t : モルタル中の標準砂量 (g)

W_t : モルタルの含水量 (g)

M_t : モルタル試料の質量 (g)

$I_{g,m}$: モルタルの強熱減量 (%)

$I_{g,c}$: セメントの強熱減量 (%)

$I_{g,s}$: 標準砂の強熱減量 (%)

$I_{n,m}$: モルタルの不溶残分 (%)

$I_{n,c}$: セメントの不溶残分 (%)

$I_{n,s}$: 標準砂の不溶残分 (%)

細孔分布は、直径2.5~5.0mm程度の大きさに粉碎したモルタル試料を使用して測定した。細孔径の測定範囲は0.002~1000 μ mで、水銀圧入法によって測定した。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 質量変化率

モルタル質量の経時的な変化を図-4に示す。質量変化率は、脱型時 (材令1日) の供試体を基準とした質量変化の割合を示している。真空暴露前の水中養生期間が短いほど、供試体の質量は大きく減少した。真空暴露したセメントならびに標準砂には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考えられる。いずれの供試体からも材令91日までに大部分の水が逸散しており、その後の質量変化は小さい。しかしながら、長期的な質量減少率は13%程度

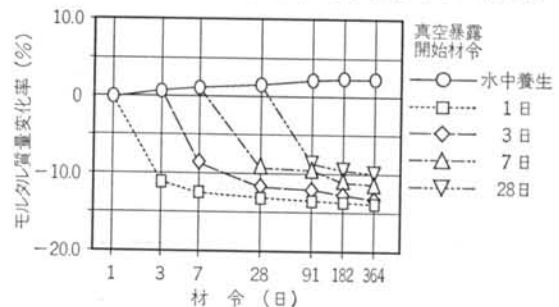


図-4 モルタル質量の変化

となり、初期のモルタルに含まれていた水量（18%）の約70%が逸散した。

3.3.2 ひずみ変化

一般に、コンクリートやモルタルの乾燥収縮機構は、その乾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によって説明される¹⁴⁾¹⁵⁾。乾燥によって毛細管水のメニスカス半径が減少すると、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。

図-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。

水中養生を行なった供試体がわずかに膨張したのに対し、真空暴露したモルタルはいずれも材令とともに急激な収縮を示した。また、暴露開始材令が遅いほど、長期的な収縮は大きくなる傾向を示した。これは、先に述べた未水和セメントの拘束が影響したものと考えられる。

細孔中の水がおおむね蒸発すると、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。しかしながら、実験では真空という極端な乾燥環境下にもかかわらず、長期的な収縮傾向を示した。このことから、真空暴露によるモルタルの収縮は、その初期において毛細管水

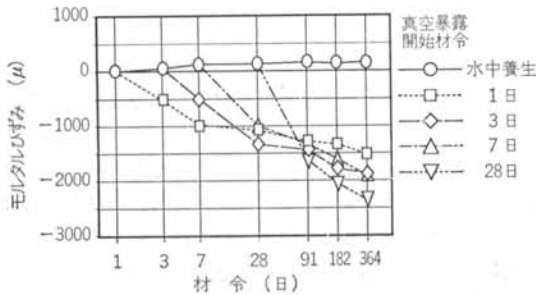


図-5 モルタルひずみの変化

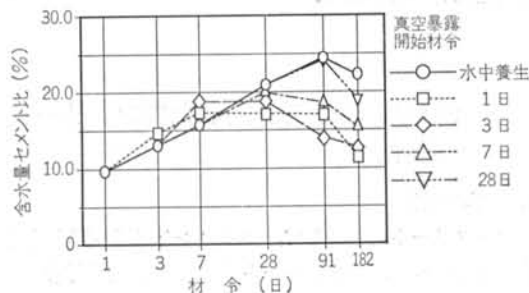


図-6 モルタルの含水量・セメント比の変化

の逸散、その後はセメントゲルの吸着水あるいは層間水の逸散が主要因となって発生したと考えられる。

3.3.3 含水量

図-6に、モルタル供試体の含水量・セメント比: W_c の変化を示す。含水量・セメント比は、前出の式(2)~(4)から求めた W_i と C_i の比をとったもので、見かけの水セメント比を示している。また、含水量はモルタル塊の強熱減量から算定したもので、結合水および吸着水の一部を含んでいる。

W_c の値は水中養生によって増加し、真空暴露の開始後しばらく経ってから最大値を示し、その後徐々に減少する傾向を示した。水中養生期間中の W_c の増加はセメントの水和反応が進行したことによるもので、結合水量の増加を示していると考えられる。真空暴露開始後も水和反応は内部において継続され、含水量はさらに増加を示した。ここで特筆すべき傾向として、若材令で暴露を開始したモルタルの W_c が、材令3日および7日において水中養生供試体のそれを上回ったことが挙げられる。真空暴露によってセメントの水和反応が一時的に促進されたと考えると上記の傾向は容易に説明できるが、本実験の結果からだけでは明確ではない。真空暴露による表面部の急激な収縮が、内部の吸着水の蒸発を妨げたと考えられることもできる。一方、長期的な W_c の減少は3.3.2で述べたような吸着水の逸散によるものと考えられる。

真空暴露供試体の材令182日における W_c は10~20%となった。仮にこれを結合水率とし、また完全水和時の水セメント比を23%とすると、真空暴露したモルタル中のセメント水和度はおおむね45~85%であったといえる。ただし、前述のように W_c には吸着水も含まれているため、実際の水和度はこれより若干低い値であったと考えられる。

3.3.4 細孔分布特性

図-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のに対して、真空暴露したものは暴露開始後しばらくしてから

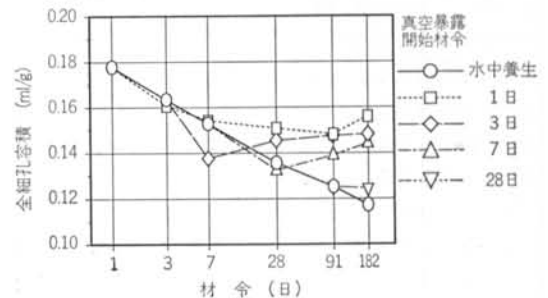


図-7 モルタル全細孔容積の変化

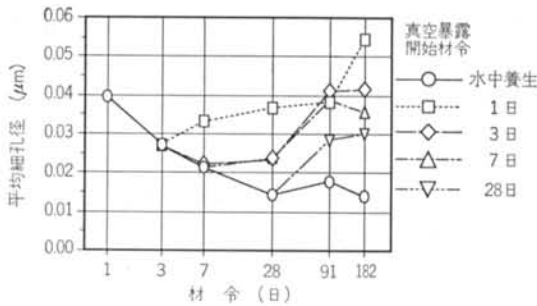


図-8 モルタル平均細孔径の変化

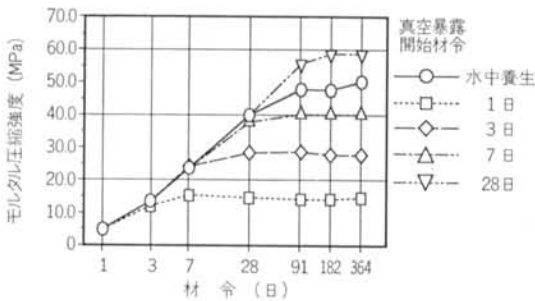


図-9 モルタル圧縮強度の変化

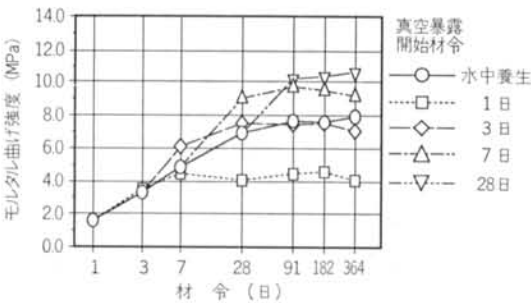


図-10 モルタル曲げ強度の変化

増加する傾向に転じた。また、図-8は平均細孔径の変化について示したものである。全細孔容積の場合と同様に、暴露開始後しばらくすると供試体の細孔径は増加する傾向を示した。

暴露初期では、毛細管水の蒸発による収縮ならびに若干のセメント水和物の生成によって、全細孔容積および細孔径が減少したと考えられる。その後、毛細管水が減少して主に吸着水が蒸発する段階になると、毛細管内部の張力が減少し、またセメントゲルそのものが収縮したため、隣接する細孔が互いに結合して次第に大きな細孔を形成したと考えられる。

3.3.5 強度特性

図-9に、モルタルの圧縮強度の変化を示す。真空暴露した供試体は、暴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。したがって、

長期的なモルタルの圧縮強度は、暴露開始材令によってほぼ決定される結果となった。

暴露初期の強度の増加には、大きく二つの要因が寄与していたと考えられる。一つはセメントの水和である。含水量ならびに細孔分布特性の項で述べたように、毛細管水が存在していた間は、暴露開始後も内部でわずかながらセメントの水和が継続していたと考えられる。

もう一つの要因は乾燥効果である。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、その圧縮強度は乾燥させないものに比べて大きくなり、また曲げ強度は逆に小さくなるのが認められている¹⁴⁾¹⁶⁾。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って圧縮強度が増加するといわれている。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7日で暴露を開始した供試体の材令28日圧縮強度が、水中養生供試体とほぼ同じになったこと、ならびに材令28日に暴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などは、乾燥効果の影響を顕著に表わしているものと考えられる。

図-10は、モルタルの曲げ強度について同様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さらに顕著となった。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となり、また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。

以上のことから、十分な養生を行なったモルタルは、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といえる。

§ 4. 長期的に真空暴露されたコンクリートの特性

4.1 実験計画

コンクリートを使用して、モルタルと同様の真空暴露実験を行なった。コンクリート供試体は、最長材令182日まで真空暴露を行なった。また、暴露開始材令は1日

～28日の範囲で変化させた。

4.2 実験方法

4.2.1 材料

セメントおよび水はモルタルと同じ材料を使用した。細骨材は、大井川産の川砂（表乾比重2.60，吸水率1.37%，粗粒率2.91，単位容積質量1807kg/m³，実積率70.5%）を使用した。また，粗骨材は青梅産の硬質砂岩砕石（表乾比重2.65，吸水率0.63%，粗粒率6.78，単位容積質量1600kg/m³，実積率60.8%）を使用した。

4.2.2 供試体の作製

供試体は直径100mm，高さ200mmの円柱供試体とし，その作製方法はJIS A 1132に準じた。コンクリートの配合は表一4に示すとおりである。また，各実験条件につき供試体を3本作製した。

4.2.3 測定項目

以下の特性について評価を行なった。

- (a)真空暴露前後の質量変化
- (b)真空暴露前後の長さ変化
- (c)真空暴露後の圧縮強度
- (d)真空暴露後の割裂強度
- (e)真空暴露後のヤング係数

4.2.4 装置

実験に使用した主な装置・器具類は，モルタルの場合とほぼ同じである。ただし，コンクリートの場合は強熱減量，不溶残分ならびに細孔分布の測定器具は使用していない。コンクリートミキサは，100リットルパン型強制練りミキサを使用した。ヤング係数の測定には，箔ひずみゲージ（東京測器製：PL-120）ならびにひずみ測定用アンプ（東京測器製：TDS-301）を使用した。

4.2.5 実験手順

型わくに打ち込んだコンクリートは，6時間経過した時点で上面のキャッピングを行ない，その後20℃湿度80%の恒温室内に放置し，材令24時間で脱型した。その後の実験手順はモルタルの場合と同じである。コンクリートの強度試験は，JIS A 1108 および JIS A 1113 に準じた。

粗骨材 最大 寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
					水 W	セメン ト C	細骨材 S	粗骨材 G
20	8.0	2.0	55	50	195	355	874	891

$$\rho_c=3.15, \rho_s=2.60, \rho_g=2.65$$

表一4 コンクリート配合

4.3 実験結果および考察

4.3.1 質量変化率

コンクリート質量の経時的な変化はモルタルの場合と同様の傾向を示し，材令182日までに初期のコンクリートに含まれていた水量の約65%が逸散した。

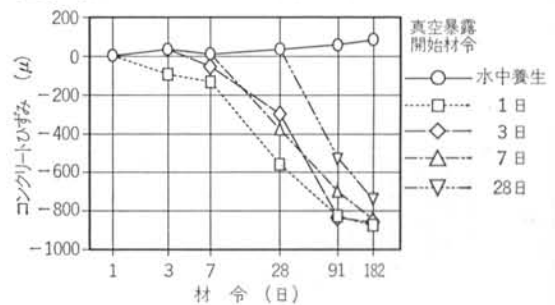
4.3.2 ひずみ変化

コンクリートのひずみ変化を図一11に示す。コンクリートには，セメントペーストの収縮を拘束する骨材が多量に含まれていたことから，ひずみ量はモルタルに比べてかなり小さくなった。一般に，材令が大きくなると骨材とペーストとの付着が強くなり，ペーストの収縮に対する拘束力が増加する。このため，モルタルの場合に見られたように，暴露開始材令の遅い供試体の収縮ひずみが，比較的早い材令で暴露開始した供試体のひずみを上回る現象はコンクリートの場合には見られなかった。

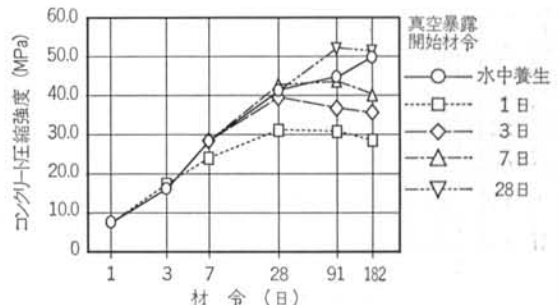
材令182日のコンクリートの収縮ひずみは約800 μ となった。これは，コンクリートが外的に拘束されていた場合，ひびわれを発生させるに十分な大きさである。

4.3.3 強度特性

図一12に，コンクリートの圧縮強度の変化を示す。材令と強度の関係はモルタルの場合と同様で，真空暴露を開始した後のコンクリートの圧縮強度はセメントの水和および乾燥効果によって増加した。ただし，長期材令の圧縮強度はわずかに減少する傾向を示した。このような強度の減少は，ペーストの乾燥収縮によって骨材との界



図一11 コンクリートひずみの変化



図一12 コンクリート圧縮強度の変化

面付近に微小なひびわれが発生したためと考えられる。

図-13は、割裂強度の結果を示したものである。長期材令における割裂強度の減少は、圧縮強度の場合よりも顕著となった。モルタルの場合は供試体内部が比較的均一であったことから、真空暴露による欠陥はほとんど発生しなかった。これに対し、コンクリートの場合は内部に比較的大きな骨材を含んでいたため、これに起因した欠陥が発生しやすかったと考えられる。

図-14に示すように、ヤング係数に関しても長期的な減少傾向は顕著に現われた。例えば、材令28日で真空暴露を開始したコンクリートでは、材令182日のヤング係数は 2.7×10^4 MPaとなり、暴露開始時のヤング係数 3.2×10^4 MPaに比べて15%程度の減少を示した。また、これを同一材令の水中養生供試体のヤング係数と比較すると、約23%の減少となった。この結果からも、長期的な真空暴露によってコンクリートの内部に欠陥が発生したことが分かる。

§ 5. 月におけるセメント系材料の利用

前章までの検討結果から、モルタルやコンクリートを月の真空環境で使用する場合の大きな問題点は、セメントペーストの過大な収縮にあることが明らかとなった。したがって、この問題を解決すれば月におけるセメント

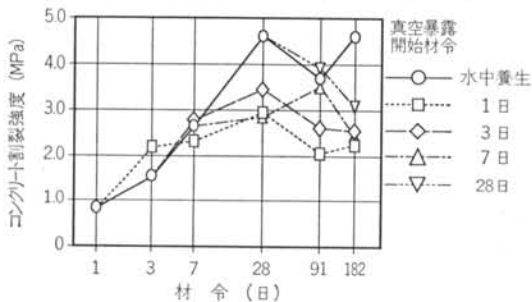


図-13 コンクリート割裂強度の変化

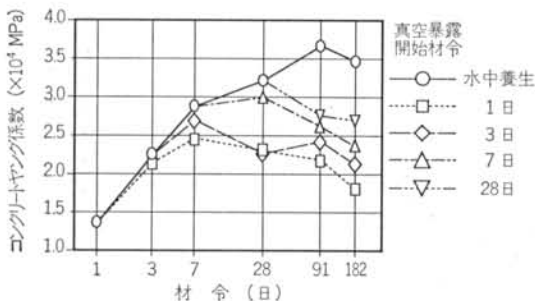


図-14 コンクリートヤング係数の変化

系材料の適用性は大きく拡大すると考えられる。

真空環境下における材料の収縮およびその影響を低減する方法は、地上におけるいわゆる乾燥収縮の低減手法と類似している。以下に、幾つかの対策手法を示す。

1) 混入水量を減ずる。

一般に、逸散水量が多いほど材料の収縮が大きくなるため、混入水量は極力減ずる必要がある。これは、月では水が非常に貴重な存在であるという観点からも望ましい。

2) 真空暴露する前に材料をゆっくり乾燥させる。

十分に養生した材料の周囲圧力を徐々に減ずると収縮がゆっくり進行し、クリープによる内部応力の低減が期待できる。また、減圧過程で吸い出された空気中には材料から放出された水分が含まれているので、これを回収することによって水を有効に利用できる。

3) プレストレスを導入する。

モルタルやコンクリートの製造過程において、あらかじめ部材に圧縮応力を導入しておけば、収縮によって発生する引張応力を軽減することができる。特に、膨張性材料を使ったケミカルプレストレスが有効と考えられる。

4) 高強度化する。

月には、いわゆるポゾラン性の鉱物 (SiO_2 を多く含む) が存在する。このような材料から、例えばシリカフェームのような混和材を製造し、高性能減水剤などと併用すると、単位水量の小さい非常に高強度な材料が製造できる。

5) ブロック材とする。

今回の実験で得られたように、比較的均一で寸法の小さな部材 (ブロック) を製造すれば、真空暴露による材料の劣化はほとんど見られない。このような材料を組み合わせると、舗装材やセグメント材などとして利用することができる。

6) 気密性材料を使用する。

気密性材料によってモルタルやコンクリートからの水の逸散を抑えれば、真空暴露による乾燥を防ぐことができる。内部に水を含んだモルタルやコンクリートは、中性子などの遮蔽材として有効である。また、気密材料に鋼板などを使用し、内部の材料にケミカルプレストレスを導入すると、非常に強度の高い部材が製造できる。

以上に述べた手法には、種々の混和材料を必要とするものが含まれている。これらの有効性ならびに経済性を評価することにより、さらに本格的な材料およびその製造方法に関する検討が行なわれるであろう。

§ 6. おわりに

本研究では月の特殊環境として真空環境を取り上げ、それがモルタルやコンクリートの諸特性に及ぼす影響を把握するための実験を行なった。その結果は、以下のようによまとめられる。

(1)セメント系材料を真空環境下に暴露すると、そのセメントペースト部は大きな収縮を示すと同時に、乾燥効果による強度の増加を示す。このペースト部の収縮は、主にセメントゲル吸着水の蒸発によるものである。

(2)モルタルのように比較的均一で寸法の小さな部材は、十分な湿潤養生によって所要の強度を確保することができれば、それを真空環境に暴露しても内部の劣化は少ない。

(3)コンクリートのように比較的大きな骨材を含む材料を真空暴露すると、急激な乾燥によって内部に欠陥が発生し、強度やヤング係数が長期的に低下する。

以上のように、真空暴露によるペーストの収縮が、セメント系材料の諸特性に望ましくない影響を与えること

が明らかとなった。本報告ではこの結果に基づき、幾つかの対策手法を提案した。

一方、今後の課題としては以下の項目が挙げられる。

(1)真空環境以外の月の環境条件およびそれらの相互作用が、モルタルやコンクリートの諸特性に及ぼす影響に関する検討

(2)より実現性の高い材料および配合を使用した真空暴露実験

(3)本研究成果の地上技術への展開

本研究に関連した技術分野として、原子力発電施設の減圧容器、核融合実験用の加速容器、その他極端な乾燥作用を受けるコンクリート、コンクリートの耐久性と細孔構造に関連した研究等が挙げられる。今後、このような研究および開発分野への展開を順次進めていきたい。

最後に、本研究を進めるに当たって協力していただいた建設技術研究部ならびに開発研究部の関係各位に深く感謝する。また、実験の遂行に際しては建設技術研究部・コンクリートグループの益田忠氏に多大なるご協力をいただいた。ここに、改めて謝意を表する次第である。

<参考文献>

- 1) T. D. Lin: "Concrete for Lunar Base Construction" Concrete International, Vol. 9, No. 7 (1987)
- 2) W. N. Agosto & 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 7th Princeton/AIAA/SSI Conference (1985)
- 3) W. N. Agosto, J. H. Wickman & E. James: "Lunar Cements/Concretes for Orbital Structures" Space 88/Engineering, Construction, and Operations in Space, ASCE (1988)
- 4) J. F. Young: "Concrete and Other Cement-Based Composites for Lunar Base Construction" Lunar Bases and Space Activities in the 21st Century, Houston (1988)
- 5) J. F. Young & R. L. Berger: "Cement-Based Materials for Planetary Facilities" Space 88/Engineering, Construction, and Operations in Space, ASCE (1988)
- 6) M. A. Gibson & C. W. Knudsen: "Lunar Oxygen Production from Ilmenite" Proceedings of Lunar Bases and Space Activities in the 21st Century, No. LBS-88-056 (1988)
- 7) E. L. Christiansen & C. H. Simonds: "Conceptual Design of a Lunar Oxygen Pilot Plant" Proceedings of Lunar Bases and Space Activities in the 21st Century, No. LBS-88-200 (1988)
- 8) T. D. Lin, H. Love & D. Stark: "Physical Properties of Concrete Made with Apollo 16 Lunar Soil" Space Manufacturing 6/Nonterrestrial Resources, Biosciences, and Space Engineering/Proceedings of 8th Princeton/AIAA/SSI Conference (1987)
- 9) T. D. Lin et al.: "Concrete Lunar Base Investigation" Journal of Aerospace Engineering, ASCE, Vol. 2, No. 1 (1989)
- 10) H. Namba et al.: "Concrete Production Method for Construction of Lunar Bases" Space 88/Engineering, Construction, and Operations in Space, ASCE (1988)
- 11) S. Matsumoto et al.: "Concrete Structure Construction on the Moon" Lunar Bases and Space Activities in the 21st Century, Houston (1988)

- 12) H. Kanamori et al.: "A Cost Study of Concrete Production on the Moon" Space 90/Engineering, Construction, and Operations in Space, ASCE (1990)
- 13) セメント協会コンクリート専門委員会編: "硬化コンクリートの配合推定について" セメント・コンクリート No. 251(1968年)
- 14) 岩崎: "コンクリートの特性" 共立出版 (1975年)
- 15) A. M. Neville: "Properties of Concrete" Pitman (1973)
- 16) 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年)