

論文 高真空下におけるセメント系材料の物性変化

田中 良介*1・堀口 敬*2・佐伯 昇*3・福島 道人*4

要旨: 将来の月面基地建設において、コンクリートは有用な建設材料の候補として挙げられる。本研究では、月コンクリートの適用性を検討するために、セメント系材料としてモルタルを作製し真空曝露実験を行った。真空度は3段階設定し、それぞれの条件下に曝露したモルタル供試体の物性変化を調べた。結果より、強度の低下は圧縮強度、曲げ強度共に認められず、超高真空環境下(10^{-5} torr)における圧縮強度の増加が認められた。また、真空度が高まるにつれ供試体表面の結合水量は減少し、月面上の真空度における結合水量の逸散は真空曝露2週間程度でも20%以上になることが予想された。

キーワード: 高真空, 結合水量, 乾燥, モルタル, 月面基地

1. はじめに

21世紀, 人類は宇宙での活動領域をさらに広げていくことは間違いない。国際宇宙ステーションでの活動も始まり, 近い将来には月面基地建設や火星有人探査等が実現するだろう。アポロ計画での宇宙飛行士の月面滞在は3日弱であったが, 月面基地ができ, そこでの有人活動が現実のものとなったら宇宙開発は新しい時代を迎えることになる。

月面基地建設において期待される材料の一つにセメント・コンクリートが挙げられる。その理由はコンクリートが月資源より製造することが可能であり, 過酷な月面環境に比較的適していると考えられるからである。現在までに, 月鉱物よりセメントを製造する方法¹⁾, 月コンクリートの施工法²⁾, 月コンクリート構造物³⁾等について様々なアイデアが出され研究が行われている。

月コンクリートの適用性を検討する時, 重要な検討材料の一つは月環境を考慮するということである。地球環境とは全く異なる月の過酷な

環境下で, 実際コンクリートが本来の性質を失わずに機能するかどうかは未だ明確でない。コンクリートに影響を与える月環境として, 高真空(約 10^{-9} ~ 10^{-12} torr), 低重力(地球の約 1/6), 高温差(-137°C~190°C), 隕石の衝突, 放射線(太陽風, 宇宙線)等が挙げられる。これらの月環境のうち, 本研究においては高真空に注目しモルタルの真空曝露実験を行った。

2. 本研究の着眼点

月面の真空度は約 10^{-10} torr であり, 将来の月面基地においてコンクリート構造物がこうした真空環境下で長期的な耐久性を保持できるか否かを確認することは非常に重要なことである。コンクリート中の水は毛管水, 吸着水, 層間水, 結合水等の形態で存在しており, 蒸気圧もそれぞれ異なる。真空度を徐々に上げていったとき, 月の真空度以下で結合水が大量に逸散し強度が低下するようでは現在のコンクリートは月面上で使用できないことになる。すでに 10^{-1} torr 程度の真空度におけるモルタルの強度は, 早期曝

*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

*3 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

*4 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

露においては強度増進が認められないものの、十分な湿潤養生後に真空(10^{-1} torr)曝露したモルタル供試体は、乾燥効果により強度が増加することが確認されている⁴⁾。本実験ではこれよりもさらに真空度を上げた3種類の真空度(10^{-5} , 10^{-3} , 10^{-1} torr)を設定し、それぞれの条件下にモルタル供試体を2週間曝露した。モルタル供試体の物性変化を調べると共に変化のメカニズムについても考察した。また、更に真空度が高くなったとき、すなわち月の真空度における結合水量変化の予測を行った。この実験を通してセメント系材料としての月コンクリートの適用性を検討した。

3. 実験方法

3-1 実験材料

セメント：月に存在する玄武岩や灰長石のCaOやAl₂O₃含有率を増やすことによってポルトランドセメントやアルミナセメントに近いものが製造可能であると考えられており、既往の研究においてもその可能性が確認されている⁹⁾。初期の月面基地においてコンクリートを製造する場合、製造(養生)期間は昼の14日間に限定される。月の昼と夜は14日周期であり、太陽光発電を利用してエネルギーを得る場合十分なエネルギーを得ることができるのは昼間に限定されるからである。このことより、月面で使用されるセメントは短期間で強度を発現するものでなければならず、14日間以内に養生が終了することが要求される。よって今回の実験においては早期強度の大きい早強セメントを使用した。骨材：月の砂や石は骨材として使用できそうなことが既往の研究により確認されている⁵⁾。しかしながら月骨材は以前に水による影響を受けていないので、予想外の反応が起こる可能性がある。また、昼と夜とで気温差が約300℃もある月面では、熱による骨材の膨張収縮がコンクリートにひび割れを発生させることも考えられる。よって、できるだけ熱膨張係数の小さい骨材を選別する必要がある。本実験では物質の安

定性を考慮して標準砂(絶乾比重：2.64, 単位容積重量：1.76)を使用した。

水：コンクリートの製造に必要な水の存在は明確には確認されていない。実際、極部に水(氷)が存在するとしても、月面上において水は非常に貴重なものであり、その水をコンクリート製造に使用するのには難しいと思われる。しかしながら月鉱物の大部分は酸化物であり、地球から運んだ水素によってこれらの鉱物を還元し、水を得ることができると考えられている。月面上でコンクリート製造に使用される水の成分については明確になっていないことから、本実験では一般水道水を使用した。

3-2 供試体の作製

月コンクリートの製造法として、混合された乾燥材料に蒸気を吹き付けて作るDM/SI法が考案されている²⁾。この方法では液体の水を使用せず短期間で製造することが可能である。しかし、大きな供試体の製造が困難なことや、月面上にどのようにしてオートクレーブ装置を運ぶ(または月で製造する)のかという問題があり、現在のところ月コンクリート製造法として有用かどうかは疑問である。本実験では、月面上に既に1気圧に保たれたコンクリート製造工場がある段階を想定してモルタル供試体を作製した。サイズ、配合はJIS R 5210に準じて40×40×160mm, S/C=3.0, W/C=50%とした。

3-3 養生・曝露について

Table 1に各養生・曝露条件を示す。

Table 1 Specimen and Exposure Condition

Specimen	Exposure Condition
W	Water Curing (14days)
WD	Water Curing(14days)→Drying(4days)
WDA	Water Curing(14days)→Drying(4days) →Air-Dried Curing(14days)
WDV1	Water Curing(14days)→Drying(4days) → 10^{-1} torr Vacuum Exposure(14days)
WDV3	Water Curing(14days)→Drying(4days) → 10^{-3} torr Vacuum Exposure(14days)
WDV5	Water Curing(14days)→Drying(4days) → 10^{-5} torr Vacuum Exposure(14days)

打設後 24 時間で脱型し 20℃で 14 日間水中養生を行った (W)。水中養生後、供試体を乾燥機(105℃)で 4 日間乾燥させた (WD)。供試体が水分を含んだままでは目標の真空度に達するまでに時間がかかり、また、水分はターボ分子ポンプの故障原因にもなり得るからである。乾燥後、それぞれの条件で真空曝露を行った。真空度は 10^{-1} torr (WDV1)・ 10^{-3} torr (WDV3)・ 10^{-5} torr (WDV5) の 3 種類とし、比較のため気乾養生も行った (WDA)。ここでいう気乾養生とは、シリカゲルを入れたデシケーター内にモルタルを曝露することをいう。曝露期間は 2 週間とした。なお、供試体数は各実験条件につき 3 本ずつとした。

3-4 真空装置

10^{-1} torr・ 10^{-3} torr・ 10^{-5} torr の真空状態を作り出すのに 3 つの真空装置を使用した。3 つの真空装置の概観を Fig.1~3 に示す。

10^{-1} torr・ 10^{-3} torr 真空装置には油回転ポンプを使用した。 10^{-5} torr 真空装置にはターボ分子ポンプと油回転ポンプを使用した。

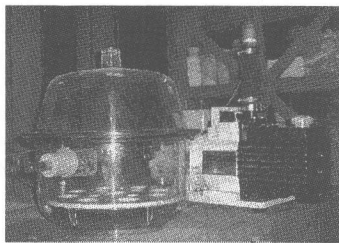


Fig.1 10^{-1} torr Vacuum Chamber and Pump

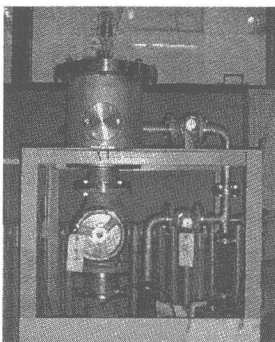


Fig.2 10^{-3} torr Vacuum Chamber and Pump

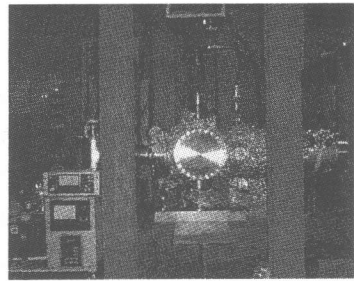


Fig.3 10^{-5} torr Vacuum Chamber and Pump

3-5 測定項目

以下に示す項目について、Table1 で示す供試体について測定した。

- 1) 重量
- 2) 圧縮強度
- 3) 曲げ強度
- 4) 結合水量

水中養生後 (W)・乾燥後 (WD) について重量・強度・結合水量を測定したのは、105℃乾燥による供試体への影響も調べるためである。圧縮強度試験と曲げ強度試験は JIS R 5210 に準じて行った。強度試験後、供試体断片を微粉砕し、乾燥機(105℃)で重量変化がなくなるまで乾燥し自由水を飛ばした。その後、600℃に調節した電気炉で重量変化がなくなるまで強熱し、その減量分より結合水量を求めた。結合水量は供試体内部(表面からの深さ: 20mm)と表面付近(表面から深さ: 0mm~5mm)の両方を測定した。ここでいう自由水とは 105℃で蒸発する水、結合水とは 600℃で蒸発する水、と定義する。

4. 実験結果と考察

4-1 真空度について

真空ポンプの排気開始後、3 つの真空チャンパーとも 24 時間以内に本実験に必要な真空度に達した。 10^{-1} torr 真空装置の到達圧力は 1.3×10^{-1} torr であり、 10^{-3} torr 真空装置の到達圧力は 3×10^{-3} torr であった。なお、 10^{-5} torr 真空装置は 1 日で 3.4×10^{-5} torr に達した後、1 週間かけて徐々に真空度が上がり、最終的には 6.3×10^{-6} torr に達した。

4-2 重量変化

モルタル質量の変化を Table 2 に示す。乾燥後の供試体(WD)からの変化率として示した。気乾養生した供試体(WDA)は若干重量が増加した。これは供試体が空気中の水分を吸収したためであると思われる。10⁻¹torr に曝露した供試体(WDV1)に重量変化はなく、10⁻³torr・10⁻⁵torr に曝露した供試体(WDV3・WDV5)は微小ながら減少した。なお、10⁻³torr・10⁻⁵torr における減少量は等しかった。これは真空曝露の乾燥効果により水が逸散したためと考えられる。

Table 2 Weight Change

Exposure Condition	Weight Change (%)
WDA	0.130
WDV1	0.000
WDV3	-0.037
WDV5	-0.037

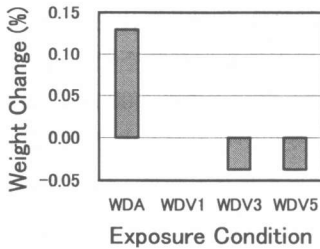


Fig.4 Weight Change

Table 3 Summary of Compressive and Flexural Strength

Exposure Condition	Compressive Strength (N/mm ²)	Flexural Strength(N/mm ²)
W	54.5	8.0
WD	71.0	11.6
WDA	63.3	11.5
WDV1	69.6	11.4
WDV3	70.8	11.3
WDV5	74.5	11.8

4-3 強度変化

強度試験結果を Table 3, Fig.5, Fig.6 に示す。まず、105℃乾燥する前(W)と乾燥後(WD)の供試体を比べた結果、曲げ・圧縮共に大きく強度が増えていることが分かる。これは熱により水和水が促進され強度が増大したと考えられる。また、乾燥によってセメントゲルなどの粒子の表面を覆っている薄い水の層が失われ、粒子の界面エネルギーが高くなる(粒子間の結合力が強くなる)ことも要因であると考えられる⁴⁾。105℃乾燥によって強度が大きく増加した事実から、105℃で乾燥すると吸着水や層間水の一部が逸脱し、ゲル粒子の結合力が増大したものと推測される。この変化を踏まえて、各条件で曝露した供試体の考察を行う。

気乾養生した供試体(WDA)の圧縮強度は、明らかに 105℃乾燥後の供試体(WD)より低下していた。105℃乾燥時、熱により骨材は膨張、

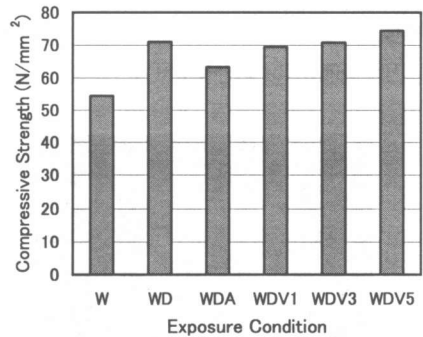


Fig.5 Compressive Strength

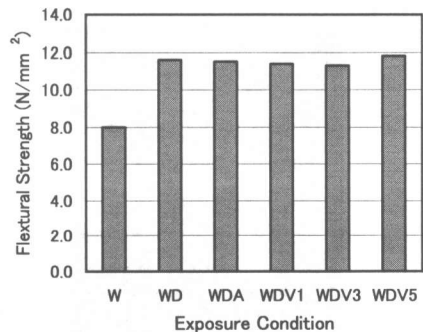


Fig.6 Flexural Strength

セメントペーストは乾燥により収縮する。その結果、セメントペーストは引張り応力を生じる。その応力によって微小なひび割れが起こるが、曲げ強度に低下が見られないことから、このひび割れは供試体に影響を与えない程度のごく微小なものであろうと思われる。そして気乾養生期間、骨材は常温下に置かれるため収縮するが、セメントペーストはもはや乾燥しないために変化は起きない。その結果、骨材と骨材を包むセメントペーストの界面に欠陥が生じ、圧縮強度低下につながったと予測される。

$10^{-1}\text{torr} \cdot 10^{-3}\text{torr}$ に曝露した供試体 (WDV1・WDV3) の圧縮強度は曝露前の強度とほぼ同じであった。 10^{-5}torr に曝露した供試体 (WDV5) においては、曝露前より強度は上がっていた。 $10^{-1}\text{torr} \cdot 10^{-3}\text{torr} \cdot 10^{-5}\text{torr}$ に曝露した供試体 (WDV1・WVD3・WVD5) の圧縮強度を比べると、真空度が高いほど強度が高いことが分かった。気乾養生と同じく常温下に移されたため骨材は収縮する。気乾養生と異なるのは、このときセメントペーストも真空曝露の乾燥効果により脱水され収縮するということである。その結果、骨材、セメントペースト共に収縮するため、骨材とセメントペーストの間にさほど欠陥が生じず、強度も低下しない。さらに供試体表面は、後述する結合水量から判断すると、セメントペーストの収縮が起こり、一種のプレストレスが供試体に働き、WDV5 の強度が増加したものと推定される。その他の考えられる要因としては、ゲル水が 105°C 乾燥後も多少存在していて、 105°C 乾燥の時と同様、真空曝露でゲル水が蒸発することによりゲル粒子間のファンデルワールス力が増加したといったことや、水和反応平衡状態が変化したこと、等が考えられる。今後これらの項目について詳細な確認が必要である。

曲げ強度に関しては、曝露前と比べてほとんど変化がなかった。ただ、 10^{-5}torr に曝露した供試体に関しては若干強度が増した。この理由も上で述べたように、骨材とセメントペーストの収縮によるものであると思われる。

4-4 結合水量の変化

供試体の結合水量を Table 4, Fig.7 に示す。

Table 4 Estimated Combined Water (%)

Exposure Condition	Inside	Surface	Mean
W	15.11	15.07	15.10
WD	17.31	16.97	17.14
WDA	18.38	15.02	16.70
WDV1	17.97	15.14	16.55
WDV3	16.53	14.78	15.66
WDV5	17.23	14.37	15.80

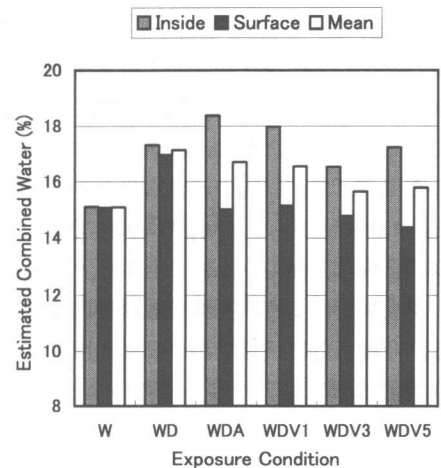


Fig.7 Estimated Combined Water (%)

105°C 乾燥後は乾燥前と比べて約 2% 結合水量が高かった。これは、熱により水和が促進されたと考えられる。表面付近については真空度が上がれば結合水量は減少する傾向が見られる。真空に直接曝される表面付近においては、真空度が上がれば結合水の蒸発量も多くなり、その蒸発水は全て外部に放出される。内部においては、気乾養生、 10^{-1}torr 、 10^{-3}torr を比べると真空度が高いほど結合水量の減少分は大きかった。しかし、 10^{-5}torr においては 10^{-3}torr と比べて結合水量が高かった。高真空下においてはゲル水の一部と結合水の一部がコンクリート内

部で水蒸気になると思われる。この水蒸気の一部は外部へと出て行き、残りは再び未水和セメント粒子と結合することも考えられる。要するにモルタル内部で水が移動する可能性がある。よって2週間という曝露期間では内部においては真空度が上がっても結合水量にそれほど大きな変化はないことが分かった。

表面付近における結合水の変化より、X軸を真空度の対数、Y軸を結合水量として、回帰直線を作成した結果、線形に近い形となった。このグラフ (Fig. 8) より、さらに真空度が高い状態での変化を予測した。その結果、月の真空度 10^{-10} torr において、今回作製したモルタル供試体の表面付近の結合水率は 13.41 (%) と予測される。すなわちモルタル表面では常圧における結合水の 20%以上が2週間程度の間には逸散していくことになる。ただし、供試体内部では全ての真空環境下で同程度の結合水量を示したことから、 $40 \times 40 \times 160$ mm の小型供試体でさえ真空曝露の影響は表面のみに留まるものと考えられる。本実験では2週間程度の短期曝露の結果である。今後さらに長期的かつ高真空度の試験を行う予定である。

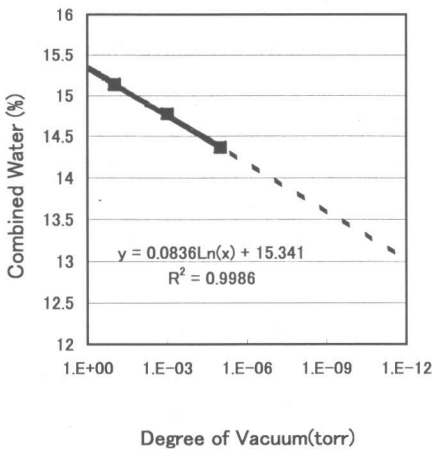


Fig.8 Estimated Combined Water v.s. Degree of Vacuum

5. 結論

今回の実験の条件下において得られた結果をまとめると以下ようになった。

- (1) 105°C で4日間乾燥させた後に真空曝露した場合、真空曝露による重量変化は 10^{-1} torr 程度では認められず、 10^{-3} torr 以上になると減少傾向を示す。
- (2) 真空曝露における強度の低下は圧縮強度、曲げ強度共に認められなかった。超高真空環境下 (10^{-5} torr) では逆に圧縮強度の増加が認められた。
- (3) 真空度が高まるにつれ供試体表面の結合水量が直線的に減少することが判明した。
- (4) 真空度と供試体表面の結合水量の回帰式から、月面上に真空度における結合水量の逸散を推定すると 20%以上の結合水が逸散することが予測される。

参考文献

- 1) Mishulovich A. et.al.: Lunar Cement Formulation, ACI125 Lunar Concrete Symposium, pp.225-263, 1991
- 2) T.D.Lin, et.al.: Lunar Concrete Made with The Dry-Mix/Steam-Injection Method, SPACE V, Vol.1, pp.552-599, 1996
- 3) T.D.Lin: Concrete for lunar base construction, Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, pp.381-390, 1985
- 4) 金森洋史, 松本信二: 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, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.81-90, 1993.11
- 5) Lin.T.D., Love, H, and Stark.D: Physical Properties of Concrete Made with Apollo 16 Lunar Soil Sample, The Second Conference on Lunar Based and Space Activities of the 21st Century NASA, pp.483-487, 1987