

高真空下におけるモルタルの物性変化

The physical properties of mortar exposed to high vacuum

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 田中良介 (Ryosuke Tanaka)
北海道大学大学院工学研究科 正員 堀口敬 (Takashi Horiguchi)
北海道大学大学院工学研究科 フェロー 佐伯昇 (Noboru Saeki)

1. まえがき

将来の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^{1)~3)}。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⁴⁾、月コンクリートの施工法⁵⁾、月コンクリート構造物⁶⁾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環境下のコンクリート挙動に着目した。

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、化学的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、月の真空度以下で化学的結合水等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⁵⁾。

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最長3ヶ月間曝露した。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。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。

2. 実験方法

2.1 使用材料

(1)セメント

月に存在する玄武岩や灰長石の CaO や Al_2O_3 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⁴⁾。

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日間に限定され则认为られる。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。よって月面上では超早強セメントやジェットセメントのような短期間で強度発現が可能なセメントが使用されるであろう。

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。

(2)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⁸⁾。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°C 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(絶対比重: 2.64、単位容積重量: 1.76)を使用した。

(3)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。

2.2 供試体の作製方法

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⁵⁾。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 $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ 、 $S/C=3.0$ 、 $W/C=50\%$ とした。

2.3 養生・曝露

Table 1 に各養生・曝露条件を示す。打設後 24 時間で脱型し 20°C で 3 週間水中養生を行った (W)。水中養生後、供試体を乾燥機(105°C)で 4 日間乾燥させた (D)。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 (V1)・ 10^{-3}torr (V3)・ 10^{-5}torr (V5) の 3 種類とし、比較のため一気圧(760torr)の気乾養生も行った (A)。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供試体を曝露することをいう。曝露期間は最長で 3 ヶ月とした。

2.4 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 種類の真空装置を使用した。3 種類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。

2.5 測定項目

Table 1 で示した供試体について、以下に示す項目を測定した。2 週間・1 ヶ月・2 ヶ月・3 ヶ月目に各測定を行った。なお、測定本数は各測定項目につき 3 本ずつとした。

1) 重量変化

1/10g 単位まで測定可能な電子天秤を使用した。

2) 長さ変化

1/1000mm 単位まで測定可能なコンタクトゲージを使用し、標点間距離を測定した。

3) 結合水量変化

強度試験後、供試体断片を微粉碎し、乾燥機(105°C)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°C 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。この結合水量測定において、自由水とは 105°C で蒸発する水、結合水とは 600°C で蒸発する水、と定義する。

4) 曲げ・圧縮強度変化

JIS R 5210 に準じて行った。

3. 実験結果

3.1 重量変化

モルタル質量の変化を Fig.4 に示す。 105°C 乾燥処理後の供試体 (D) からの変化率として示した。V1 では真空曝露による重量変化はほとんどなかった。V3、V5 では重量の減少が見られ、2 ヶ月減少量の約 80%が曝露

Table 1 Specimen and Exposure Condition

Specimen	Exposure Condition
W	Water Curing (3weeks)
D	Water Curing(3weeks) → Drying(4days)
A	Water Curing(3weeks) → Drying(4days) → Air-Dried Curing(2weeks-3months)
V1	Water Curing(3weeks) → Drying(4days) → 10^{-1}torr Vacuum Exposure(2weeks-3months)
V3	Water Curing(3weeks) → Drying(4days) → 10^{-3}torr Vacuum Exposure(2weeks-3months)
V5	Water Curing(3weeks) → Drying(4days) → 10^{-5}torr Vacuum Exposure(2weeks-3months)



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



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

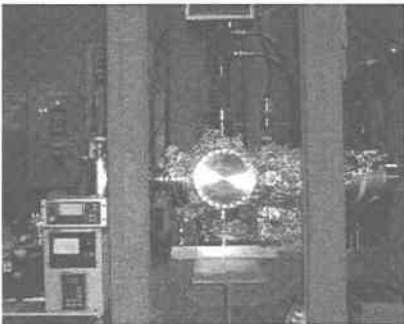


Fig.3 10^{-5}torr Vacuum Chamber and Pump

開始後 2 週間以内に起こっていた。2 週間後も僅かながら重量が減少し 2 ヶ月目には 0.1% 近くの重量が減少した。また 2 週間目には V3 より V5 の方が減少量が大きかったが、1 ヶ月目以降には V3、V5 とともに大きな差はなかった。A には重量増加がみられた。

3.2 長さ変化

長さ変化を Fig.5 に示す。真空曝露した供試体には全て収縮ひずみが見られた。V3 と V5 のひずみ量はほぼ等しく、V1 のひずみ量の約 2 倍であった。また A は膨張することが分かった。また変化の割合は重量変化と同じく 2 週間目までが一番大きかった。

3.3 結合水量変化

結合水量変化を Fig.6、Fig.7 に示す。供試体内部の結合水量は平均して約 16% 程、表面付近の結合水量は 15% 程であった。また、内部・表面付近とも曝露期間の違いによる結合水量の変化は見られなかった。

3.4 曲げ・圧縮強度変化

曲げ強度の変化を Fig.8 に、圧縮強度の変化を Fig.9 に示す。曲げ強度、圧縮強度共に若干のばらつきが見られるが、真空曝露により強度は減少しないことが判明した。

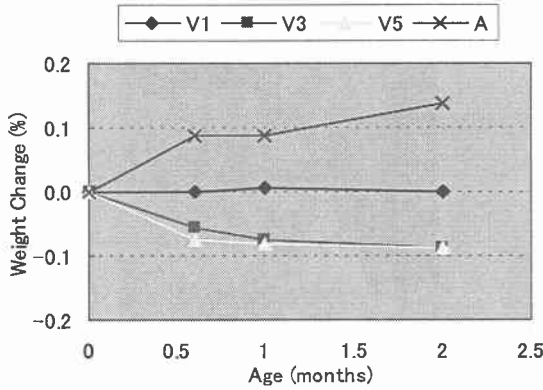


Fig.4 Weight Changes vs. Age

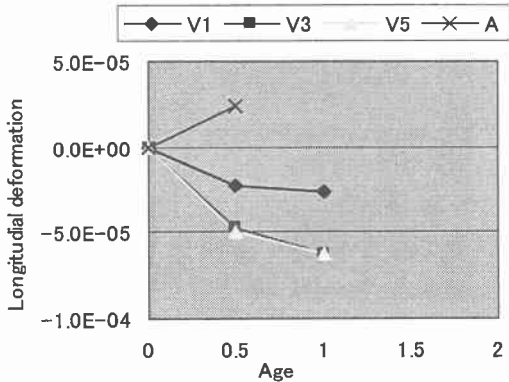


Fig.5 Longitudinal deformation vs. Age

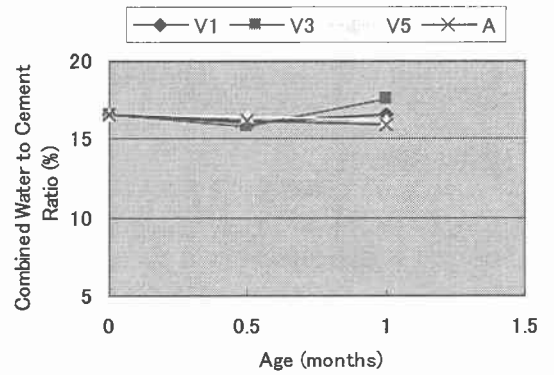


Fig.6 Changes in Combined Water to Cement Ratio (Inside)

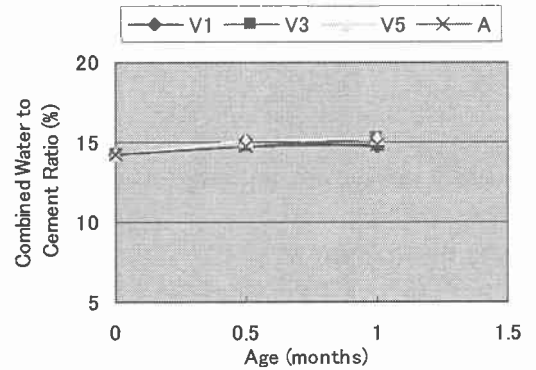


Fig.7 Changes in Combined Water to Cement Ratio (Surface)

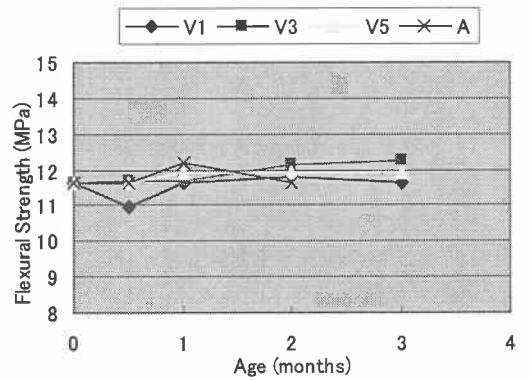


Fig.8 Changes in Flexural Strength

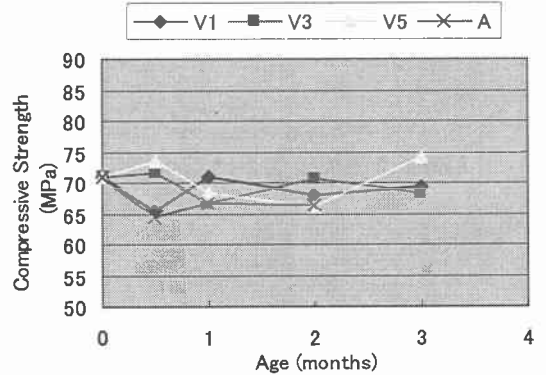


Fig.9 Changes in Compressive Strength

4. 考察

4.1 真空曝露前における供試体中の水の状態

真空曝露前の 105℃乾燥処理により、モルタル供試体中の自由水はほぼ 100%蒸発し、結合水の一部も蒸発したと思われる。よって真空曝露前の供試体中に含まれる水は結合水のみであると考えられる。このことを踏まえて以下の考察を行う。

4.2 重量・長さ変化の要因

重量変化の測定結果より、 10^{-3}torr 、 10^{-5}torr の真空中に曝露した供試体(V3、V5)からは、結合水の一部が逸散したと推測される。しかし結合水量の測定では結合水量に明確な変化が観察されなかったことより、結合水は逸散していたとしてもほんの僅かであったと考えられる。また重量変化のグラフと長さ変化のグラフが比較的似ている事実から、結合水の逸散、すなわちセメントペーストの脱水作用が、供試体の収縮につながったと考えられる。この収縮は、一種の乾燥収縮ととらえることもできる。

10^{-4}torr に曝露した供試体(V1)の重量には特に変化が見られなかったが、長さに関しては 10^{-3}torr 、 10^{-5}torr 供試体(V3、V5)の半分程度の収縮ひずみが生じた。今回使用した電子天秤は 0.1 g 単位までしか測定できないため、長さ変化から判断すると、V1 にも 0.1g 以下の重量減少があったと考えても良い。しかしいずれにせよ 10^{-4}torr 程度の真空度ではモルタル供試体にさほど影響を与えないことが判明した。また、気乾養生した供試体(A)は気体中の水分を吸収したために、重量が増加し膨張したと考えられる。

Fig.4、Fig.5 より、供試体の重量変化と長さ変化に関しては、継続して長期間測定を行えばさらに大きな変化が現れる可能性がある。また本実験においては真空曝露前に 105℃乾燥処理を行っており、自由水が既に逸散してしまっている。よって自由水が含まれた段階から、真空による乾燥作用を受けると、さらに大きな重量変化と収縮ひずみが発生すると考えられる。そしてその変化が、強度等にも影響してくることも十分考えられる。

4.3 強度について

真空曝露による重量減少と収縮ひずみより、供試体中にマイクロクラックが発生する可能性があり、また結合水の逸散がモルタル強度の低下を招くことも予想される。しかしながら、本実験においては強度に大きな変化がなかった。この考えられる要因として以下の3つが挙げられる。

- (1) 重量の減少と収縮ひずみから判断すると、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、マイクロクラックや結合水減少による強度低下を打ち消す作用が働いた。
- (2) セメントゲルがファンデルワールス結合している部分では、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、C-S-H 構造の中での化学結合が発達した。結果、(1)と同様、強度低下を打ち消す作用が働いた。

- (3) 本実験におけるモルタル供試体は真空曝露による乾燥作用を受けても供試体内部に大きな欠陥が生じなかった。しかし、これはモルタルがコンクリートに比べて内部が比較的均質であるためであるとも考えられる。

真空曝露によるモルタル・コンクリートの物性変化メカニズムについて、今後より詳細な検討を行う必要があると思われる。

5. まとめ

- ・真空度が 10^{-3}torr 以上になると重量が減少し、その変化の大部分が 2 週間以内に起こった。
- ・真空曝露によって収縮ひずみが生じ、 10^{-3}torr 以上の真空度になると大きな値を示した。
- ・結合水量に明確な変化は観察されなかった。
- ・高真空下においても、曲げ・圧縮強度の減少は見られなかった。
- ・ 10^{-3}torr と 10^{-5}torr の真空中に曝露した供試体両者の間には、物性変化の差があまりなかった。
- ・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結合水の一部が逸散したと推測される。

参考文献

- 1) Horoguchi,T., Saeki,N., Lin,T.D., et al. : Study on Lunar Cement Production Using Hokkaido Anorthite and Hokkaido Space Development Activities, SPACE V, ASCE, Vol.2, pp.621-629, 1996
- 2) Horoguchi,T., Saeki,N., Lin,T.D., et al. : Behavior of Simulated Lunar Cement Mortar in Vacuum Environment, SPACE98, ASCE, pp.571-576, 1998
- 3) 田中良介、堀口敬、佐伯昇：高真空下におけるセメント系材料の物性変化、コンクリート工学年次論文集、23-1、日本コンクリート工学協会、pp.1231-1236、2001
- 4) Mishulovich,A. , et al. : Lunar Cement Formulation, ACI125 Lunar Concrete Symposium, pp.225-263, 1991
- 5) Lin,T.D., et al. : Lunar Concrete Made with The Dry-Mix/Steam-Injection Method, SPACE V, ASCE Vol.1, pp.552-599, 1996
- 6) Lin,T.D. : Concrete for lunar base construction, Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, pp381-390, 1985
- 7) 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
- 8) 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