

高真空下に曝露したモルタルの物理的性状

～初期養生期間の影響～

Physical Properties of Mortar Under the High Vacuum Environment

～ Effect of Pre-Curing Periods ~

北海道大学工学部土木工学科 ○学生会員 伊藤 賀章(Yoshiaki Ito)
 北海道大学大学院工学研究科 学生会員 迫井 裕樹(Yuki Sakoi)
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 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

現在、世界各国で進められている宇宙開発において、モルタルやコンクリート等のセメント系材料が月及び火星における建設材料の一つとして注目されている。その主な理由として、これらのセメント系材料は現地資源より製造可能であること、地球上における建設材料としての豊富な実績から月における過酷な環境に適していると考えられること等が挙げられる。

月面環境下におけるコンクリートの適用性に関する既往研究は、月鉱物よりセメントを製造する方法^(例えば1)、2)、あるいは月面構造物の設計論^(例えば3)、4)等が主であり、重要な検討項目の一つである物性に関する研究^(例えば5)、6)、7)は少ないのが現状である。

そこで本研究では、月面構造物への適用を最終的な目標として、真空曝露開始材齢の異なるモルタルの力学的挙動について検討を行なった。

2. 実験概要

2.1 供試体及び使用材料

真空環境は特異な乾燥環境と考えられる。本研究においては、乾燥環境における粗骨材の品質変動の影響を除くため、モルタル供試体を用いることとした。供試体は、水/セメント比=50%、砂:セメント=3:1、サイズ:40mm×40mm×160mmとし、各条件について2~3本作製した。

既往の研究において、月面鉱物から製造されるセメントは、地上で用いられているセメントと成分構成が非常に似ていることが示されている^{8)、9)}。そこで本研究では、普通ポルトランドセメントを用いることとした。

細骨材に関しては、既往の研究よりレゴリス(月面の砂及び岩石)を使用することの可能性が示されている^{8)、9)}が、本研究においては、鶴川産川砂(比重:2.70)を用いた。

水に関しては、月面鉱物より水を製造する方法や月の極部に存在するとされる氷から得られると考えられているが、現在のところ確立された方法はない。そこで本研究では、一般水道水を用いることとした。

2.2 養生・曝露条件

供試体は、打設後24時間で脱型し、養生段階で蒸発・吸湿がないよう真空曝露開始材齢までポリエチレンシートで密封した。養生終了後にシートをはがし、曝露を開始した。

ここでは、初期養生期間の違いが高真空下における物理的挙動に及ぼす影響を検討するため、真空曝露開始材齢(3、7、28日間、以下、それぞれV3、V7、V28と示す)が異なり、真空曝露期間(28日間)が同一のものを設定した。

2.3 真空装置概要

本研究に用いた真空曝露装置を図-1に示す。また、図-2は真空チャンバー内に供試体を配置した様子を示したものである。本研究に用いた真空チャンバーは、供試体の真空曝露と同時に真空下での载荷試験が可能で、比較的サイズの大きなもの(φ250mm×長さ約1000mm)である。本装置は高真空を得るために、2種類のポンプ(油回転ポンプ及びターボ分子ポンプ)を併用するものである。また、この装置には、ひずみ測定用端子及び真空度測定用端子が設置されている。この真空装置の最大到達真空度は 10^{-7} torrであり、本実験では、真空曝露材齢28日で 10^{-4} torrに到達する環境で実験を行なった。

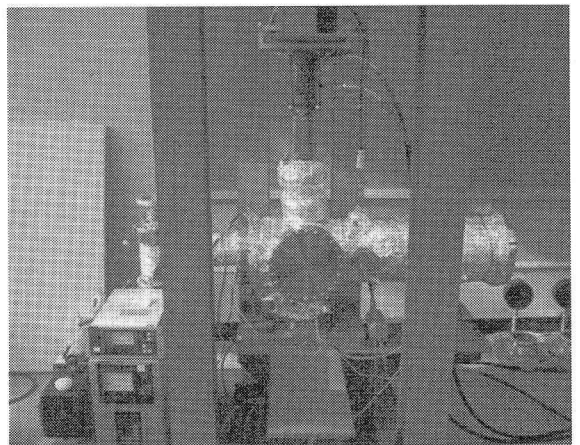


図-1 真空曝露装置の概要

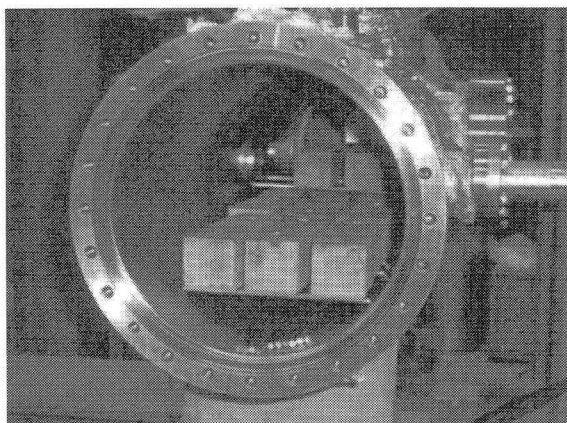


図-2 真空チャンバー内部と供試体

2.4 測定項目

本研究では、高真空下での物理的性状を把握するための測定項目として、重量変化、ひずみ変化、曲げ強度、圧縮強度を選択し、真空曝露開始後 0、1、3、5、7、14、28 日目で測定を行なった。

ひずみは、埋め込み型ゲージを用いて、真空曝露中におけるひずみの経時変化を測定した。ゲージは供試体作成時に供試体中央に埋設した。

強度特性(曲げ・圧縮強度)については、JIS R 5201 に準じて行ない、所定の期間真空曝露した供試体を大気中に戻して測定した(強度試験は真空曝露後大気中に戻しても、速やかに行なえば影響ないことが仮実験により確認されている)。

3. 結果及び考察

3.1 重量変化

図-3 に重量変化率と真空曝露期間の関係を示す。真空曝露開始時の重量を基準とした変化率として示した。

V3、V7、V28 全てにおいて真空曝露開始直後から急激な重量減少が見られ、変化量全体の約 70% が曝露開始 1 週間以内に起こっていた。また初期養生が 3 日と 7 日のものは、ほぼ同程度の重量損失が認められ、28 日間養生した後に曝露したものと比較して、大きな値を示していた。これは、真空曝露開始時におけるモルタル供試体内部に存在する自由水の量及び水和度の違いによるものと考えられる。

3.2 ひずみ変化

図-4 にひずみと真空曝露期間の関係を示す。ひずみは真空曝露開始を基準とし、図中の負号は収縮を示す。

図-4 より、真空曝露した供試体は曝露開始直後から急激に収縮し、その後時間の経過とともにひずみが進行することが明らかとなった。この挙動は、真空曝露開始材齢に関係なく共通であるが、初期養生期間が短いものの方が収縮ひずみは大きいことがわかる。これは主に、供試体の水和度の違い(供試体からの水分逸散の容易さ)に起因するものと考えられる。図-3 から明らかなように、V3 及び

V7 は、V28 と比較して重量減少(蒸発水量)が多いため、供試体中に未水和セメントが多く存在する(結合水が少ない、空隙が多い)ことを考えると、これは推測可能なことである。

図-3、図-4 において、重量変化とひずみの挙動が類似しており、両者の関係を図-5 に示す。

図-5 における○印(実線)の領域では、初期養生期間に関係なく傾きは等しいことが明らかとなった。しかし、○印(破線)の領域では、V3 及び V7 の傾きが V28 のものと異なっていた。これは、水和進行度の違いによる内部空隙の大きさが影響すると考えられる。つまり、初期養生期間が短い V3 及び V7 には大きな空隙が存在し、真空曝露初期段階ではこれらの空隙から水分が蒸発するため、重量変化に対するひずみの値が小さくなるものと考えられる。

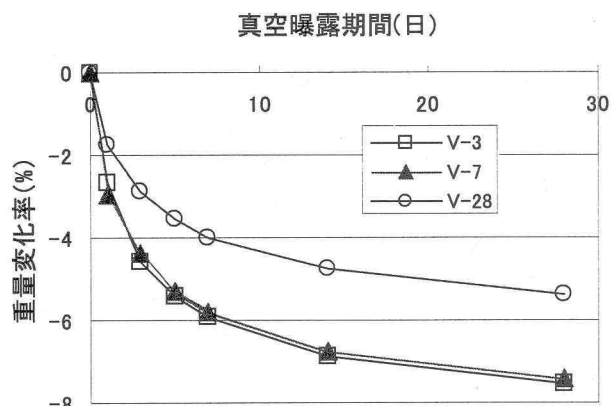


図-3 重量変化と真空曝露期間の関係

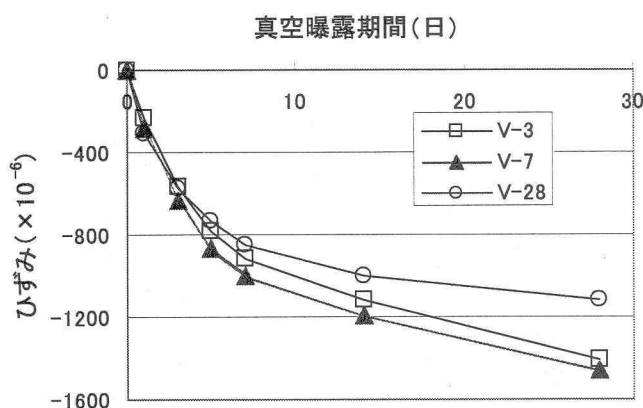


図-4 高真空下におけるひずみ変化

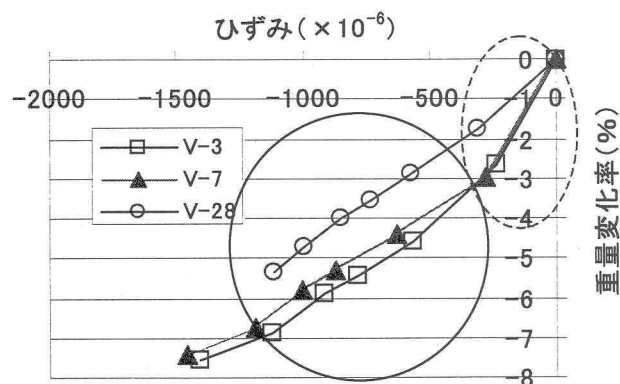


図-5 重量変化とひずみの関係

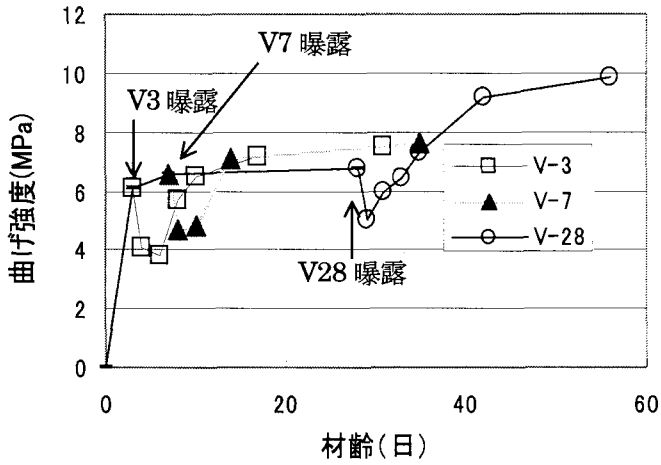


図-6 高真空下における曲げ強度の変化

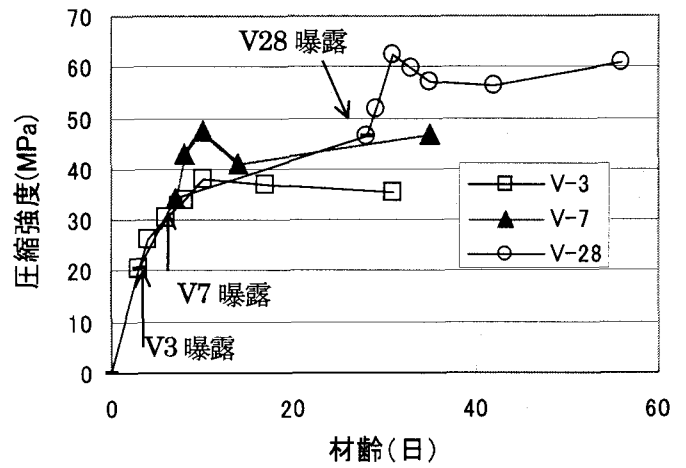


図-8 高真空下における圧縮強度の変化

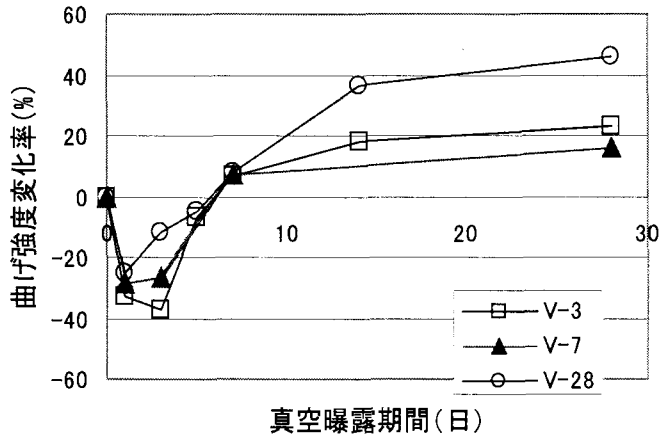


図-7 曲げ強度変化率と真空暴露期間の関係

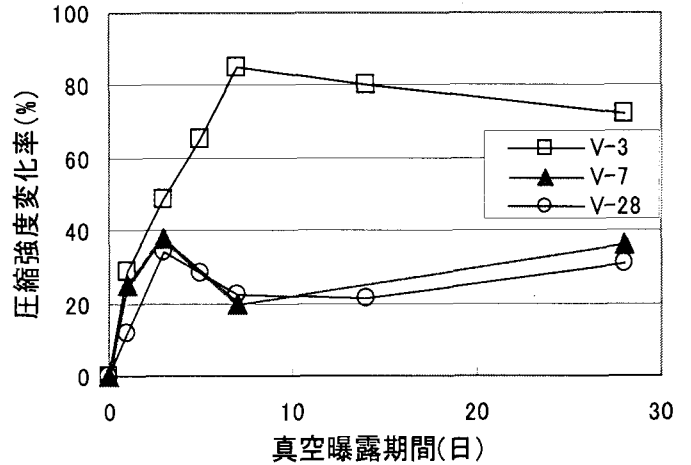


図-9 曲げ強度変化率と真空暴露期間の関係

3.3 曲げ強度・圧縮強度

図-6 に曲げ強度と材齢の関係、図-7 曲げ強度変化率と真空暴露期間の関係を示す。また、図-8 に圧縮強度と材齢の関係、図-9 に圧縮強度変化率と真空暴露期間の関係を示す。図-6 及び図-8 では、シートで密閉した養生期間中の強度変化を基準とし、養生 3、7、28 日目から真空暴露したものが、どのような挙動を示すか表したものである。また、図-7 及び図-9 における強度変化率は、真空暴露開始時の強度を基準として示したものである。

図-6 及び図-7 より、V3、V7 の曲げ強度は、真空暴露開始後 1 週間以内に急激な減少傾向を示し、その後は僅かながら増加する傾向（曝露開始時の強度に対して、1~3 日目に 28~37%低い値、7 日目に 6~7%高い値、28 日目に 16~23%高い値を示す）を示すことが明らかとなった。しかしある程度初期養生を行なった V28 の曲げ強度は、低下後の回復が極端に早く、強度の増加も著しいこと（曝露開始時の強度に対して、1 日目に約 25%低い値を示すが、その後急激に増加し始め、真空暴露開始後 28 日目には約 46%高い値を示す）がわかる。

図-8 および図-9 より、V3 の圧縮強度は、一般的な気中乾燥下の挙動と類似しており、真空暴露後増加するが、

その後徐々に減少していく傾向にあることが明らかとなった。しかし、ある程度初期養生を行なったモルタル (V7、V28) の圧縮強度は、真空暴露開始後 1 週間以内に極端な変化を起し、その後は僅かながら増加する傾向（曝露開始時の強度に対して、3 日目に 30~35%高い値、7 日目に 20~22%高い値、28 日目に 31~36%高い値を示す）にある。これは初期養生期間の違い（水和進行度）が、供試体中の水分移動やその蒸発速度に影響を与えたと考えられる。

曲げ強度や圧縮強度が真空環境下において独特な挙動を示す主要因として、真空で生じる供試体表面と内部における一時的な乾燥度の違いによる内部応力の発生が考えられる。この現象は高真空下に曝露された場合の特異な現象であるが、一部の乾燥環境下においても同様の現象が認められることが報告されている¹¹⁾。その他考えられる要因として、通常の気中乾燥においても見られる乾燥効果、及び先に述べた真空乾燥に伴う内部応力と乾燥効果の複合的な効果が挙げられる。しかし、これらの関連性について不明な点も多く、更に詳細な検討が必要と思われる。

4. まとめ

本研究の結果を以下に示す。

- 1) 真空曝露開始時期が早いものほど重量減少が著しく、その変化の大部分が真空曝露後1週間以内に起こることが明らかとなった。
- 2) 真空曝露による収縮ひずみは、初期養生期間が短いものほど大きくなるが、3日と7日ではそれほど違いはなく、28日では大きく異なることが判明した。
- 3) 初期養生期間に関係なく、真空曝露されたモルタルの曲げ強度は、真空曝露初期において急激に低下し、その後増加する傾向にある。
- 4) 初期養生期間が短いモルタルは、通常の気中環境における圧縮強度の挙動と同様な挙動を示す。
- 5) ある程度水和したモルタルの圧縮強度は、真空曝露初期に急激な変化を起こすが、その後増加していく傾向にある。
- 6) 初期養生期間を長く設けることで、真空曝露初期における急激な強度変化が小さくなり、最終的な到達強度も期待できることが明らかになった。

参考文献

- 1) Burt,D.M. : Production from Lunar Anorthite, Lunar Concrete, ACI SP-125, pp.237-244,1991
- 2) Mishulovich , A , T. D. Lin, and S.W.Tresouthick : Lunar Concrete Formulation, ACI SP-125, pp.255-264, 1991
- 3) Chow, P. and T.Y.Lin : Lunar Concrete Construction Requires New Value System and Concept, ACI SP-125, pp.177-190,1991

4) Kaden,R.A. : Methodology for Forming and Placing Lunar Concrete, ACI SP-125, pp.71-96,1991

5) 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

6) 田中良介、堀口敬、佐伯昇：高真空下におけるセメント系月面材料の物性変化、第18回宇宙利用シンポジウム、pp.272-275, 2002

7) 迫井裕樹、堀口敬、佐伯昇：超高真空下におけるセメント系材料の物性変化、第19回宇宙利用シンポジウム、pp.201-204, 2003

8) Horiguchi,T, Saeki,N, Yoneda, T. , Hoshi,T. and Lin,T.D : Study on Lunar Cement Production Using Hokkaido Anorthite and Hokkaido Space DevelopmentActivities, Proc.of Fifth Int.Conference on Space'96, ASCE, pp.621-629,1996

9) Horiguchi,T, Saeki,N, Yoneda, T. , Hoshi,T. and Lin,T.D :Behavior of Simulated Lunar Cement Mortar in vacuum Environment, Proc.of Sixth Int.Conference on Space'98, ASCE, pp.621-629,1998

10) Lin, T.D. et al : Lunar Concrete Made with The Dry- Mix / Steam - Injection Method, SPACE98, ASCE, p p.571-576.1998

11) 永松静也、佐藤嘉昭、武田吉紹：乾燥にともなうコンクリートの各種強度変化について、セメント技術年報36、pp.271-274,1982