

論文 連続真空曝露を受けたセメント系材料の物性変化に関する研究

迫井 裕樹*1・堀口 敬*2・佐伯 昇*3

要旨：本研究では、月面環境下におけるコンクリート構造物の可能性を検討することを最終目標としている。その第一ステップとして、高真空環境下におけるセメント系材料の力学的挙動について検討した。その結果、セメント系材料が月面環境のような高真空環境下でもその特性を十分発揮できることが確認されたが、水分逸散が顕著となり、曝露初期に著しい変化を生じることが明らかとなった。

キーワード：真空環境，モルタル，水分蒸発，強度，ひずみ

1. はじめに

現在世界各国で進められている宇宙開発において、セメント系材料が様々な利点を有した有効な建設材料として注目されている。

すでに行われている宇宙でのセメント系材料の利用に関する研究^{例えば 1)}では、現地鉱物からの材料抽出に関する研究、セメントの製造、骨材の種類と性質、両極における氷の存在の可能性などが報告され、月面におけるコンクリート構造物の可能性はますます高くなっている。しかしながら、こうした月面環境下におけるコンクリートの物理的挙動は未解明な事柄が多く、今後多くの研究が必要である。すでに著者らは月面環境を視野に入れた高真空環境下でのセメント系材料の基礎的な物性変化に関する検討を行っている^{例えば 2)}。本論文もその延長線上の研究であり、連続的な真空曝露を受けたセメント系材料の物性変化について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 供試体

本研究では、粗骨材の品質変動を除くため、 $40 \times 40 \times 160$ mmのモルタル供試体を用いた。W/C=50%，S:C=3:1とした。セメントは普通

ポルトランドセメントを使用し、砂は鶴川産川砂（比重： 2.70g/cm^3 ）を用いた。

2.2 養生・曝露条件

表 - 1 に養生・曝露条件を示す。

真空環境は非常に特異な乾燥環境とみなせる。そこでまず、地球上における他の乾燥環境との比較検討を行った（以下、実験 1 と示す）。初期養生は、打設後ポリエチレンシートでシールし、 20°C で水分の吸湿・脱水が無い状態で行った。所定の初期養生期間終了時にシールを外し、各環境下で曝露を開始した。実験 1 では、初期養生期間を 7 日間一定とし、曝露条件（環境条件）として真空、加熱乾燥（ 105°C ）、気中乾燥（ 20°C ，RH $60 \pm 5\%$ ）および重量変化がなくなるまで 105°C 加熱乾燥した後真空に曝露するもの（以下それぞれ、V7，D，A および DV と示す）を設定した。また比較検討のため初期養生終了後もシールを継続したもの（以下、S と示す）を設定している。

次に実験 2 として、初期養生期間の違いが連続真空曝露を受けたモルタルに及ぼす影響を把握するため、曝露環境を真空とし、初期養生期間を変化させた実験を行った。初期養生方法は、実験 1 と同様である。初期養生期間は、3，7

*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 工学研究科助教授 工博 (正会員)

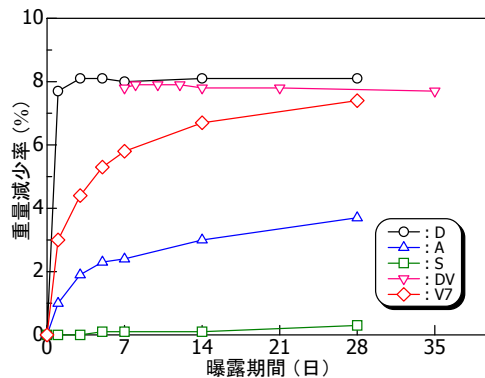
*3 北海道大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

表－1 実験条件

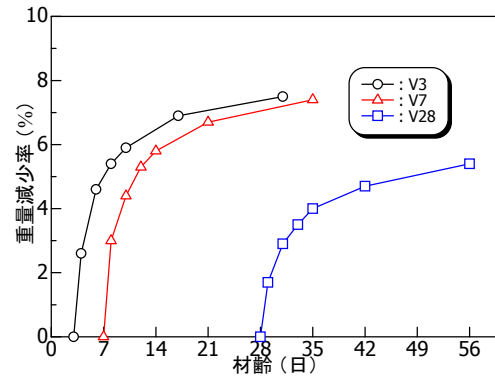
	記号	W/C	初期養生期間	曝露環境
実験1	V7	50	7日間	真空
	D			加熱(105℃)
	A			気中(20℃, RH60±5%)
	DV			加熱(105℃)+真空
	S			シールを継続
実験2	V3	50	3日間	真空
	V7		7日間	
	V28		28日間	



写真－1 高真空载荷装置



図－1 重量変化（実験1）



図－2 重量変化（実験2）

および28日（以下、V3、V7およびV28と示す）の3種類に設定した。

2.3 測定項目及び測定方法

測定項目は、重量、強度（曲げおよび圧縮）、曝露後の含水状態である。また真空曝露を行った供試体に関しては、真空中におけるひずみ、および曝露後の細孔分布の測定を行っている。

ここで強度の測定に関しては、大気下に戻しても速やかに測定を行えば影響しないことが、事前の実験により確認されていることから、曝露後大気下において測定を行った。

ひずみ変化に関しては、埋め込み型ゲージを用いた。埋め込み型ゲージは供試体作製時に供試体中央部に埋設した。

曝露後の供試体中における含水状態の測定には、供試体の表面部および中心部から抽出したサンプルを用いた。抽出したサンプル約15gを微粉碎した後、105℃で重量変化が無くなるまで加熱し、その減少分を供試体中の残存蒸発性水分とした。その後、同一サンプルを975±25℃で加熱し、その減少分を結合水量とした。

2.4 真空载荷装置

写真－1に本実験で用いた真空载荷装置を示

す。本装置は、φ250×L1000 mmと比較的サイズの大きなチャンバーを使用している。本装置は、2種類のポンプ（油回転ポンプおよびターボ分子ポンプ）を併用することにより高真空を得ることが可能となっている。本装置の最高到達真空度は、 1.0×10^{-7} torrであるが、実験に用いる供試体数を考慮し、本実験では、 1.0×10^{-3} torrとした。チャンバーには、真空度測定用端子、ひずみ測定用端子が付設されており、真空環境内におけるひずみの測定が可能となっている。

3. 結果及び考察

3.1 重量変化

図－1および図－2にそれぞれ実験1および実験2の重量減少率を示す。横軸は、図－1は曝露期間で、図－2は材齢で示している。

図－1より各乾燥環境における同一曝露期間での重量減少率はD>V7>Aとなった。Aにおける曝露28日で生じる重量減少率は、V7における曝露初期で生じる重量減少率と同程度であることが明らかとなった。またV7における曝露28日の重量減少率は、Aにおける同一曝露期間の2倍程度となることが明らかとなった。

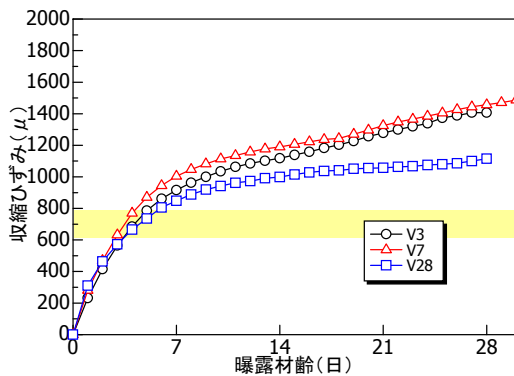


図-3 真空環境におけるひずみ変化

図-2 より真空環境においては、初期養生期間の違いによらず、いずれも同様の挙動を示す傾向にある。つまり、曝露初期に著しい重量減少が生じ、曝露 28 日を経過してもなお、重量減少が増加する傾向を示す。またいずれも曝露 28 日における重量減少率の 70~80%が曝露初期に生じることが明らかとなった。

セメントは真空曝露を行っても重量変化が生じないことが確認されており、ここで測定された重量減少は、供試体からの水分の逸散によるものと考えられる。したがって、曝露 28 日目の重量減少率に差が生じている理由として、初期養生期間が長いほど、水和が進行しており、①供試体中の自由水の絶対量が少ない、②マトリックスが密実であり、水分の移動が困難である等が大きな理由とであると推察される。

3.2 ひずみ変化

図-3 に真空環境におけるひずみの経時変化を示す。縦横軸ともに曝露開始を基準として示している。図中の網掛け部 (600~800 μ) は、既往の研究等も参考(例えば 3) に、初期養生 7 日、W/C=45~60%の同サイズモルタルの気中における収縮量の範囲を示している。

図より初期養生期間が長いほど、同一曝露期間での収縮量が少ないことが明らかとなった。また V7 における曝露 28 日の収縮量は、既往研究の気中における収縮量の約 2 倍程度の値を示しており、真空曝露により生じる収縮量の大きいことが把握された。また真空曝露を継続することで、ひずみはさらに増大する傾向を示す。

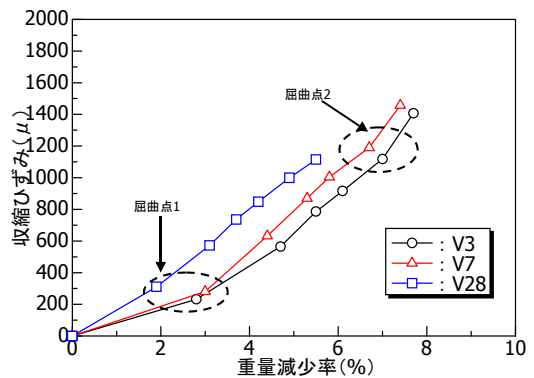


図-4 真空におけるひずみと重量の関係

図-4 に真空曝露により生じる重量減少率とひずみの関係を示す。

これより両者の間には、傾きが変化する屈曲点が 2 つ存在し、ひずみ変化と重量減少の関係は 3 段階に大別されることが明らかとなった。各屈曲点が出現するまでの重量減少率は、初期養生期間が短いほど大きく、また第 2・第 3 段階の傾きは、初期養生期間の違いによらず、同程度となることが明らかとなった。

既往研究データを参考に同様の図を書くと、屈曲点が一つ存在することが確認される。連続高真空曝露により、第 2 の屈曲点が存在することおよび、第 2 の屈曲点以降は重量変化に対してひずみ変化が大きいことから、高真空環境では、吸着水や一部の層間水など、通常の乾燥環境において蒸発が困難であるような水分の蒸発あるいは、非常に微細な空隙における水分の移動が生じていると考えられる。

3.3 強度変化

(1) 曲げ強度

図-5 および図-6 に実験 1 および実験 2 の曲げ強度をそれぞれ示す。横軸はそれぞれ、曝露開始および打設を基準として示している。

図-5 より V7 および A は、明らかに他のものと異なる挙動を示している。また図-6 より、真空曝露を行った供試体は、初期養生期間の違いによらず、いずれも同様の挙動を示すことが明らかとなった。つまり、曝露初期に急激な強度低下を示し、その後曝露期間の経過とともに増加に転ずることが把握された。また曝露 28

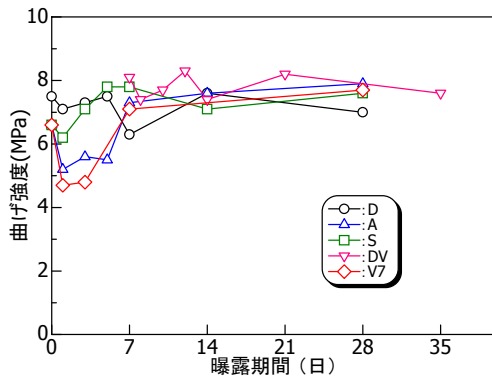


図-5 曲げ強度 (実験 1)

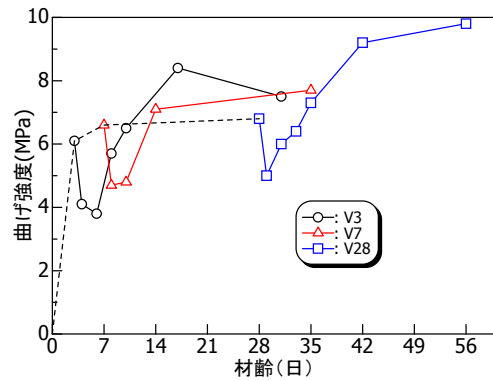


図-6 曲げ強度 (実験 2)

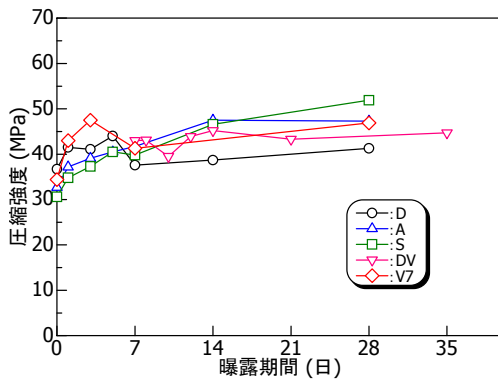


図-7 圧縮強度 (実験 1)

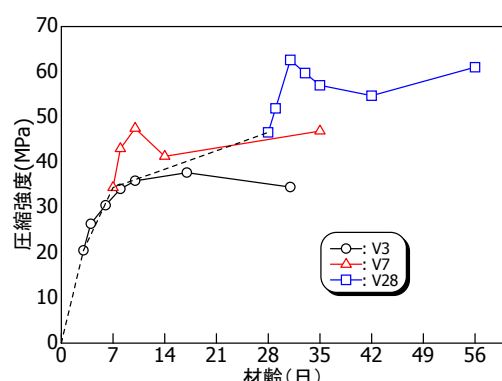


図-8 圧縮強度 (実験 2)

日の強度はいずれも、曝露開始時の強度よりも高い値を示すことが明らかとなった。なお真空曝露を行った供試体に関して、一度低下して再び増加に転ずるまでの時間は、初期養生期間が長いほど、早くなる傾向が示された。

(2) 圧縮強度

図-7 および図-8 に、実験 1 および実験 2 における圧縮強度の経時変化を示す。横軸はそれぞれ曝露期間および材齢で示している。

上述した曲げ強度において、V7 は A と類似した挙動を示したが、圧縮強度に関しては、D のそれと類似した挙動を示している。つまり、曝露後 1~3 日にかけて急激な強度増加を示した後、7 日までに低下する。しかしその後も真空曝露を継続することで、強度回復を示し、再び増加することが明らかとなった。

図-8 より、真空曝露を受けた供試体の圧縮強度は、初期養生期間により異なる傾向を示した。つまり初期養生期間の短い V3 は、通常の乾燥環境における圧縮強度変化と同様の挙動を

示し、時間の経過とともに増加する。一方ある程度初期養生期間をとったもの (V7 および V28) は、曝露後 1~3 日の間に急激に増加した後、減少するが、真空曝露を継続することで、増加に転じ、強度が回復する挙動を示す。またいずれも曲げ強度の場合と同様、曝露 28 日の強度は、曝露開始時の強度よりも高い値を示すことが明らかとなった。

連続真空曝露により上述した強度変化が生じる要因として、強度が一度低下した後、回復している事実から、強度に影響を及ぼす致命的なマクロひび割れの発生は考えにくい。したがって、水和の進行、表面および内部の乾燥収縮差に伴う内部応力、乾燥効果およびこれらが複合的に作用する効果と考えられる。乾燥による類似の研究結果も報告されている⁴⁾。

3.4 含水状態

(1) 残存蒸発性水分量

図-9 に実験 1 における残存蒸発性水分量の経時変化を、また図-10 に実験 2 における残存

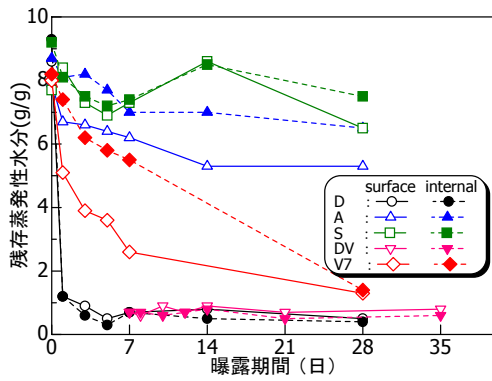


図-9 残存蒸発性水分 (実験 1)

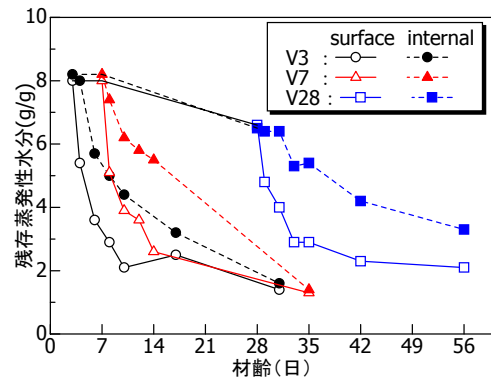


図-10 残存蒸発性水分 (実験 2)

蒸発性水分量の経時変化をそれぞれ示す。

図-9 より、加熱乾燥を行ったもの (D および DV) に関しては、供試体表面および内部において、残存蒸発性水分量に差が生じていない。また A は、曝露期間の経過とともに残存蒸発性水分量が減少し、両者に差が生じている。しかし両者とも同程度の割合で減少しているため、両者間の差に明確な変化は生じていない。

一方 V7 は、他の環境条件と比較して特異な挙動を示す。また図-10 から明らかなように、真空環境においては、初期養生期間の違いによらず、いずれも同様の傾向を示す。つまり、供試体表面および内部の残存蒸発性水分量の挙動は異なり、その結果、曝露時間の経過とともに、表面および内部における残存蒸発性水分量の差が変化することが明らかとなった。

両者の差に伴い、供試体表面および内部に収縮差が生じ、表面には引張り、内部には圧縮の内部応力が発生すると考えられる。曝露初期に両者の蒸発性水分量の差は増大することから、内部応力も増大するものと考えられ、その結果、曲げ強度は低下するものと思われる。一方、圧縮強度は、供試体表面部において急激な脱水に伴い強度増加した薄い層が形成されること及び、表面部と内部との乾燥度の差により生じるひずみ差によって拘束されることにより強度が急激に増加するものと推測される。また、真空曝露をさらに継続することで、両者の差は減少し、それに伴い内部応力も減少する結果、その影響は減少し、通常の乾燥環境と同様、時間の経過

とともに増加に転ずるものと考えられる。

ただし、強度変化に関して、内部応力の変化、乾燥効果のみならず、水和の進行、クリープの影響およびそれらが複合的に作用する効果が考えられ、今後より詳細な検討が必要であると考えられる。

(2) 結合水量

図-11 および図-12 にそれぞれ、実験 1 および実験 2 の結合水量の経時変化を示す。

図-11 よりバラツキが多いが、いずれも顕著な増加は認められない。つまり、乾燥環境に曝されたセメント系材料は、水和が早期に停止することが明らかとなった。特に V7, D 及び DV に関しては曝露開始時の結合水量が保持され、変化しないことが明らかとなった。

図-12 より V3 および V7 に関しては、真空環境においても若干の増加が認められる。しかし V28 に関しては、水和が停止し、曝露初期の結合水量がそのまま保持される結果となった。

既往研究⁵⁾では低真空環境でのみしか検討が行われておらず、高真空環境では結合水等の分解・脱水の可能性が危惧されるが、本研究の範囲では、その可能性は低いと思われる。しかしこの点に関しては、より高真空域での長期的な結果も併せて検討する必要があると考えられる。

3.5 細孔分布

図-13 に細孔分布測定結果の一例を示す。図は V7 における真空曝露 3, 7 および 28 日の測定結果である。

これより、真空曝露期間の延長に伴い、ピー

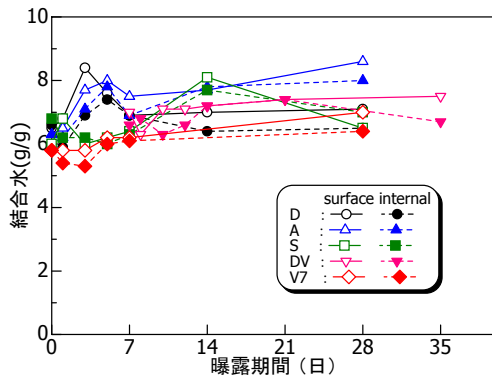


図-11 結合水量 (実験 1)

クに似た凸部の数が増大する傾向にあることが認められた。また真空曝露期間が長いほど、細孔分布の幅が広い分布を示す傾向にある。このような細孔径分布の変化は、図-4 において示唆された吸着水・層間水等の脱水に伴い、微細な空隙の連結等が生じた結果と推測される。この点に関しては、今後より詳細な検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

- (1) 真空環境における重量変化は、曝露初期に著しく、曝露期間の経過とともに重量変化率は増大する。
- (2) 真空環境におけるひずみは、曝露初期に著しく、気中環境における同一材齢のひずみと比較して、約 2 倍となる。
- (3) 真空曝露により、吸着水、一部の層間水および非常に微細な空隙からの水分蒸発が生じることが示唆された。
- (4) 真空環境における強度変化は、曝露初期に著しく、曲げ・圧縮ともに地上における乾燥環境での挙動と異なる非常に特異な挙動を示す。また真空曝露を継続することで、曝露前の強度より高い値を示す。
- (5) 真空環境における水分蒸発は、地上における乾燥環境と異なる特異な乾燥特性を示す。
- (6) 本研究の範囲では、真空曝露により化学的結合水の脱水・分解が生じることはないものと思われる。
- (7) 真空曝露により、供試体中の細孔分布が変化することが示唆された。

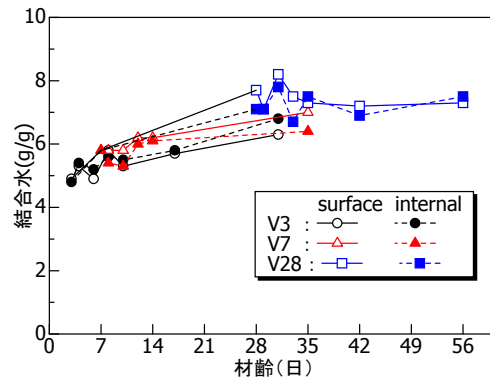


図-12 結合水量 (実験 2)

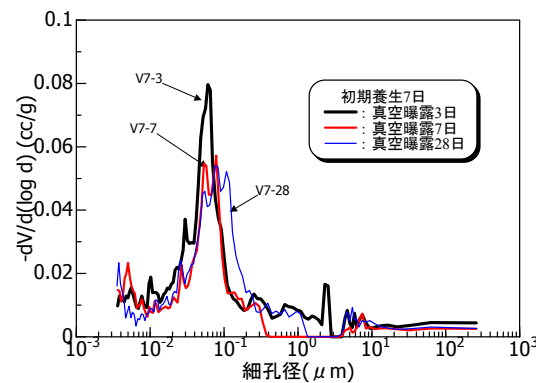


図-13 連続真空曝露による細孔分布の変化

参考文献

- 1) Mishulovich., A, T. D. Lin, and S. W. Tresouthick: Lunar Concrete Formulation, ACI SP-125, pp.255-264, 1991
- 2) 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
- 3) 下村匠, 小沢一雅, 前川宏一: 細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, 1993, pp.435-440
- 4) 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
- 5) H.Kanamori, S.Matsumoto, and N.Ishikawa: a Long-Term Properties of Mortar Exposed to a Vacuum, ACI AS-125, pp.57-69, 1991