

## 月面におけるコンクリート舗装の設計に関する研究

中央大学 正会員 小山 俊  
五洋建設 松本 卓  
中央大学 フェロー 姫野賢治

### 1. はじめに

NASA (アメリカ航空宇宙局) によるアポロ計画以来、月探査に関する様々な研究が各国の研究機関で実行され、数々の成果を挙げていた。そのような状況の中で、NASA は更なる宇宙開発のために月面基地計画を提案した。それ以降有人月面基地建設の必要性が高まっている。仮に将来、人類が月で生活をする事になった場合、当然のことながら基地内での移動、輸送等が行われると考えられる。

月の表面はレゴリスと呼ばれる非常に粒径の小さい破碎岩石の粒子で覆われている。現在ではレゴリス上を走行する乗り物が開発されているが、レゴリスは非常にきめ細かく機械の隙間に入り込みやすい性質を持っているため、道路の建設が必要と考えられている。

現在、道路建設のために使用する建設材料を地球から運搬することを想定すると、運搬費が非常に高価なため、月面基地計画の遂行が経済的に困難になることが予想される。そこで解決方法として月資源の利用が必要不可欠となってくる。月資源から得られる建設材料はコンクリート、鋼、アルミニウム等が挙げられており、その作製費の試算例を表-1 に示す。材料単価を比較するとコンクリート用の材料は、他の建設材料よりも安く調達できることがわかる。また、地球から運搬した場合と比較すると約 1% の費用でコンクリートが作製できる。以上のことから、コンクリートは月面での建設材料として非常に有効な材料であるといえる。

表-1 作製材料とその費用 (円/kg)

コンクリート	3500
鋼	8500
アルミニウム	400000

地球~月間の運搬単価：400000 (円/kg)  
工場の償却期間：10年

### 2. 研究目的

コンクリートを月面での建設材料に適用する場合、その製造や品質に影響を及ぼす月環境の特徴として、高真空 ( $10^{-10} \sim 10^{-7}$  Pa)、低重力 (約 1/6g)、高温度差 (-170 ~ +130 )、放射線、隕石などが挙げられる。低重力については既往の研究から、比較的コンクリートの強度に及ぼす影響は小さいと推定されており、コンクリート構造物に工学的に影響を及ぼす月環境は真空、高温度差とみなすことができる。よって、本研究では、月資源から製造可能とされているコンクリートに着目し、高温度下、低温度下、高真空下でのコンクリートの材料特性を実験的に把握し、月面におけるコンクリート舗装の適用性を検討することを目的とする。

### 3. 実験概要

本研究では、月資源を用いたコンクリートの強度の検討、真空暴露によるコンクリート内部の変化の検討、高温度差がコンクリートに与える影響の検討を行うこととする。以上のことから以下に示す実験を行った。

#### (1) 一軸圧縮試験

コンクリート供試体の作製条件として、水セメント比を 40% とし、暴露気圧、暴露温度、細骨材種類を変化させ、合計 10 種類の供試体を各条件につき 5 個作成した。月資源から製造可能とされているコンクリートの細骨材として、レゴリスは入手が事実上不可能なため、地球上の資源を用いて作製した月土壌シミュラントを用いた。セメントには月資源から製造されるセメントと比較的成分が似ているとされているアルミナセメントを用いた。

各供試体に一軸圧縮試験を行い、圧縮強度、弾性係数、ポアソン比を測定した。供試体作製後 24 時間後に脱型を行い、その後各条件に従い養生を行った。暴露期間は 7 日間とした。

#### (2) 細孔径分布測定

細孔径分布の測定には、直径 2.5 ~ 5.0mm に粉碎したモルタル試料を使用し、水銀圧入法により測定を行った。供試体を作製後、各条件に従い真空及び大気中に暴露した。暴露期間は、1 日間、7 日間、14 日間、21 日間、28 日間とし、経年変化による細孔径分布の変化を調べた。

キーワード：レゴリス、コンクリート舗装

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学道路研究室 tel.03-3817-1796 fax. 03-3817-1796

### (3) 熱定数の測定

温度応力の算出に使用する線膨張係数，比熱，熱伝導率について調べた．実験は月土壤シュミラントを細骨材に用いた供試体を使用し，大気圧下，真空下で暴露後，測定を行った．線膨張係数の測定は，六面カット供試体を用い，供試体作製後，それぞれの温度においてコンクリート供試体の垂直ひずみを測定した．熱伝導率はオングストロームの方法により求めた熱拡散率の測定結果よりを算出した．

## 4. 実験結果

### (1) 一軸圧縮試験

骨材の違いによる圧縮強度の比較から月土壤シュミラントを細骨材に用いた場合，通常の細骨材に比べ圧縮強度が低くなることがわかった．これは月土壤シュミラントの粒径が通常の細骨材に比べ小さなものであることが原因と考える．また気圧の違いによる比較では大気中に暴露したものに比べてやや圧縮強度が低下するものの，その変化量は高々9MPa であることから，月環境のように極端に気圧が低い場合でもコンクリートの強度低下は比較的小さく，舗装のような構造物への使用も可能であると推定できる．

### (2) 細孔分布測定

真空及び大気中に暴露したモルタル供試体の時間経過による平均細孔径の変化と細孔比表面積の変化を調べた．モルタル供試体の細孔径は暴露開始後7日目までは大きくなり，その後は大きな変化は見られなかった．さらに，真空に暴露したモルタル供試体は大気中に暴露したものに比べ，平均細孔径が大きくなる傾向を示した．細孔比表面積は暴露開始後7日目まで減少し，その後は大きな変化はなかった．これらより真空に暴露したコンクリート供試体の細孔径は時間経過により大きくなることがわかった．真空に暴露した供試体の圧縮強度が低下した原因であると考えられる．

### (3) 熱定数の算出

熱定数の算出結果は表-2に示す．月土壤シュミラントを細骨材に用いたコンクリート供試体の線膨張係数は大気中及び真空中に暴露したコンクリートのどちらの場合も，20～120の間ではほぼ一定の割合で膨張する結果となった．線膨張係数は約  $1 \times 10^{-5}/$  であり，通常のコンクリートとほぼ同様の結果となった．

表-2 熱定数の算出結果

	線膨張係数 ( $10^{-5}/$ )	比熱 (J/kg K)	熱伝導率 (W/m K)
大気圧	1.08	1300	3.8
真空	1.07	1200	7.5

## 5. 解析方法

本研究では月環境の影響を考慮してプレキャストコンクリート舗装を提案し，プレキャストコンクリート舗装を施工した場合の強度，温度応力を算出した．

### (1) 曲げ応力の推定

本研究では，コンクリート舗装構造解析プログラムパッケージ Windows95版を使用し，路盤とコンクリート版の二層構造からなる舗装体の曲げ応力を推定した．幅  $a=100, 200\text{cm}$ ，長さ  $b=100, 200\text{cm}$ ，厚さ  $h\text{cm}$  のコンクリート版中央に，荷重  $P=100,800 \text{ kgf}$  ( $980, 7840\text{N}$ ) を作用させ，コンクリート版に生じる曲げ応力を算出した．圧縮強度から推定される曲げ強度を破壊応力とし，算出した最大曲げ応力と破壊応力を比較し，舗装材としての適用性を検討した．

### (2) 温度応力の算出

コンクリート版の両端に拘束を与えた場合を想定し，Nastran よりに温度応力を算出した．温度応力は温度上昇と冷却に伴う熱変形が拘束された際に発生する応力であり，そり応力，水平応力，内部応力に分けられる．本研究では月環境を考慮し，主に水平応力に関して検討した．

## 6. 解析結果

### 1) 曲げ応力の推定

コンクリート版厚を1cmとした場合，コンクリート版に生じる最大応力が破壊時の応力を上回ることから，月土壤シュミラントを細骨材に用いたコンクリート舗装の版厚としては不適合であるといえる．一方，版厚を1.25cm以上とした場合，コンクリート版に生じる最大応力は破壊時の応力を下回る結果となりコンクリート版厚としては適合する．結果，この条件では十分な耐久性をもつコンクリート舗装は実現可能であるといえる．

### 2) 温度応力の算出

月の温度が130に達した場合，コンクリート版の両端を完全に固定したモデルでは水平方向の圧縮応力がコンクリートの弾性域を越える結果となることがわかった．温度が170となった場合は，水平方向の引張応力がコンクリートの引張強度を超える結果となった．したがって，今後拘束を抑えたモデルの検討が必要である．

## 7. 結論

以上の結果より，月資源を舗装材に利用した月面舗装の可能性を示すことができた．