

VI-230

月面構造物設計条件の検討
— 設計法検討とその一試案 —

佐藤工業㈱ 正員 ○相越 宏

佐藤工業㈱ 吉仲 真

1. まえがき

21世紀に向けて宇宙インフラストラクチャーが急速に整備される中、建設会社が地上施設以外の宇宙開発分野に貢献できるかどうかその可能性を探ってきた。その結果、建設技術の応用可能性の高い分野として月面、火星および宇宙空間における構造物の設計施工技術や建設材料・建設機械、および居住環境分野が考えられた。特に、月面は環境条件では地球上に比べ多少の違いが認められるが、土砂や岩盤上、あるいは地中に構造物を建設することから最も有望な検討分野である。また、これまで建設工学的見地から検討された月面開発構想や調査研究報告が極めて少ないことを考慮すると、まず建設のベースである土質工学的見地から月面構造物の設計法を検討する必要性が高いと考えられた。ここでは、こうした検討内容の背景となった月面基地と建設技術の係わり、月面構造物の設計法の検討の必要性とその方法について報告する。

表-1 月面基地と建設技術との係わり^{1) 4)}

2. 月面基地と建設技術

21世紀初頭に建設予定の月面基地と建設技術の係わりを表-1に示した。月面基地における建設技術のニーズは、ロケットなどによって無人で建設する小規模な初期月面基地の頃に始まり、人間が常駐し始める恒久的月面基地の頃に最も高まるものと考えられる。

特に、月面の表土(レgris)は、着陸船の月面到達時から本格的な施設の運用開始に至るまで構造物の基礎、放射線遮蔽材、および構造物などとして極めて汎用性が高く、設計法の検討に重要な建設材料である。

項 目	概 要
○月面施設の構造形式	プレハブモジュール、コンクリート構造物、キャストバルスト構造物、プレハブ式骨組構造物、鋼構造物、地下構造物 他
○月 質 源 を 利 用 した 構 造 材 料	レgrisを利用したガラス繊維やブロックの製作、コンクリート、金属などの製造
○月面での建設機械	クレーン、トラックやブルドーザーなど地上の建設機械と類似した性能のもの
○施 工 技 術	基地建設初期の段階では掘削、整地、埋戻、盛土技術などが重要
○運 用 技 術	酸素などのガスや水の循環システムの技術が必要

3. 月面構造物設計法の検討の必要性

米国航空宇宙局(NASA) J.S.C.「Lunar Outpost²⁾」では、科学的探求を目的に比較的平坦な西経87.5°南緯13°の海部にロケット着陸施設、居住施設、生命維持施設、エネルギー供給設備、酸素生産工場、連絡道路、および付帯施設等を計画している。これら構造物を厳しい月面環境条件や複雑な地形・地質等の自然条件の中で設計する場合は、高い安全性や耐久性、その他機能性などを確保するために工事中および完成後に予想される荷重、外力等の設計条件を設定する必要がある。

建設条件に未知数の多いという点で月面と類似点の多い南極基地「あすか」では、設計外力の設定など一般的な設計手法を確立するため数年前から建物の沈下特性や風圧特性等の観測を行ってきた。その結果、積雪層の圧密沈下の差が主要因で年間約50cm³⁾もの構造物の沈下が明らかになったが、月面基地では構造物の修復や移動修正が事実上困難なため、このような不同沈下は未然に回避する必要がある。そのためにはリモートセンシングやローバー等の十分な事前探査に基づいた建設適地の検討が重要である。

NASAでは、これまで7月着陸船が月面に到達した時の脚部の支持についての設計検討を行っている。また、7月11～17号ミッションが海部6ヶ所の着陸地点でサブリグしたレgris総重量 381kgの力学的試験から土質定数を、宇宙飛行士の足跡やローバーのわだちから地盤支持力を推定している。レgrisについては水分、化学的固結作用がないにもかかわらず、粘着力や引張抵抗が存在するなど地球上の一般的な土の力学的特性とは著しく異なっている⁴⁾との報告もされている。しかし、これらは一部特定地域における少量のサブリグであり現位置実験の試料ではないことから地盤特性を推定の上最適サイトで合理的な設計を行うことは難しい。こうした問題点は、今後NASA等の月探査ミッションによって解決されると思われるが、これらの動きに先がけ建設会社が月面構造物構築に必要な設計条件について検討しておく意義は大きいと思われる。

4. 検討方法と一般的な考察

月面基地の構造形式は、開発時期や使用目的によって異なり、図-1のように地上式、半地下式、および地下式に大別される。開発初期の段階では、小規模であり構造物の信頼性、安全性、および施工性などから地上式や半地下式タイプの構造形式とするのが適当である。また、恒久的有人月面基地の頃には構造物の気密性を保持することが可能となり、トンネル掘削や月内部の大規模な溶岩洞を利用する地下式タイプが普及するであろう。

今回は、月面基地「Lunar Outpost」の地上式タイプ「プレハブビル」および半地下式タイプ「膜構造物」をモデルに取り上げ、既往建設技術による月面構造物の構築の可能性を検討した。図-2に、月面構造物の設計条件の検討フローを示す。設計法は、将来月面構造物の設計施工指針案がNASAなどの機関で作成されると想定して道路橋示方書や建築基礎構造設計基準など既存の設計法を参考にし、低重力・高真空・放射線等月固有の外力（図-2の「レリスの地盤物性値」参照）を考慮して、構造物の安全性を検討する。また、検討項目として土構造物の支持力・沈下・斜面安定に着目し、地球上の設計法を月面に適用した場合のこれら検討項目の留意点を以下に述べる^{5) 6)}。

	概念図	施工時	完成時
地上式	建設シミュレーション	月面基礎状態	竣工状態
半地下式	居住施設	掘削状態	覆土状態
地下式	NASDA 案	掘削状態	覆土状態

図-1 構造形式別の検討項目⁴⁾

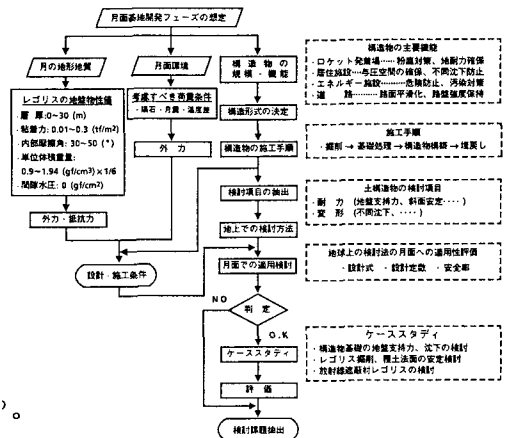


図-2 月面構造物の設計条件検討フロー

- ・地盤支持力の算定（々基礎）は、地球上に比べ粘着力の項に対する依存度が高まるため、微小な粘着力でも慎重な対応が必要である。
- ・沈下については、地盤を弾性体モデルとして想定できれば月面への適用は問題ないが、現状データから推定した地盤反力係数の適用対象はかなり限定されそうである。
- ・覆土法面の検討に円形すべり面を仮定した斜面安定解析法を適用する場合、粘着力の大きい地盤では安全性が向上するが、すべり面の設定などの点で十分な検討が必要である。

以上は、7月着陸船や宇宙飛行士の足跡から地球上の設計法の月面への適用が一応可能であることを確認できるが、不明点の多い隕石・月震などをどの程度定量的に評価するかが今後の課題である。

5. あとがき

月面構造物を最適なサイトに構築するには、まだまだ数多くの課題が残されている。今後、信頼性の高い設計法とするためには現状の知見だけでは不十分であり、計画中の月探査ミッションの成果に大きな期待をしたい。なお、本研究は宇宙開発建設研究会の「月面構造物設計条件の検討」ワーキングの活動（大林組、鹿島、熊谷組、佐藤工業、銭高組、地崎工業、東急建設、西松建設、間組、フジタ、三井建設）の成果の一部である。

【参考文献】

- 1) 宇宙開発建設研究会：宇宙開発関連建設技術に関する調査研究報告書、1990
- 2) NASA J. Alred: Lunar Outpost, NASA-Johnson Space Center, JSC-23613, 1989
- 3) 半價敏夫：水床上の建築物-日本前線地盤調査の二つの基地-，土と基礎，Vol. 38, No. 1, pp. 5-12, 1990. 1
- 4) S. Johnson: Engineering, Construction, and Operation in Space II, Proceedings of Space 90, ASCE, 1990
- 5) 高橋祐治：月面構造物の設計・施工についての一考察、第1回宇宙と建設シンポジウム講演集、1991. 10
- 6) 高津 忠：月面着陸施設および道路部の概略検討、第1回宇宙と建設シンポジウム講演集、1991. 10