

平成19年4月17日

平成18年度「月面でのセメントペーストの流動性予測と "その場"観察による研究」活動報告書

代表者所属 氏名 朝倉 悦郎

1. 構成メンバ

氏 名	所属
朝倉悦郎	株式会社 宇部三菱セメント 研究所
塚本勝男	東北大学大学院理学研究科
小松隆一	山口大学大学院理工学研究 科
吉崎 泉	宇宙航空研究開発機構
田中久順	株式会社 宇部三菱セメント 研究所
下坂建一	株式会社 宇部三菱セメント 研究所
服部健一	服部分散技術研究所

2. 本年度 WG 会合開催実績

- (1) 第1回：平成18年12月7日
- (2) 第2回：平成19年3月29日

3. 活動目的

月面にコンクリート構造物を建造することを想定して、まだ固まらないコンクリート（フレッシュコンクリート）の製造開始時から硬化するまでの流動性状を予測し、諸問題の対策検討に役立てるために、コンクリートより単純な材料組み合わせである「セメントペースト」の「月面での流動性予測手法の確立」を研究目的にする。さらにセメントの水和に伴う寸法変化を精密に測定する技術を開発する。これらの成果を、月面でのコンクリート構造物の建造技術の確立に役立てる。

4. 活動内容

(1) 第1回 WG

月面で材料を調達して、軽量（気泡混入）の繊維補強コンクリートを製造することを想定し、その流動性状を中心に、問題点の解決策を検討することとした。材料の現地調達に新規性があり、プラスチックの使用よりも利点となる。項目毎の討議結果を以下に記す。

- ①月面でのセメント・繊維・混合材の製造
月面の玄武岩を太陽光等で熔融して、Ca・Al系クリンカーとガラス繊維を製造し、Si・Feを主成分とする揮発物はシリカフューム（平均粒径 $0.1\mu\text{m}$ ）のような混合材として利用する。熔融方法、原料の選択、微粒化・繊維化方法について検討する必要がある。

- ②月面でのコンクリート製造
月面の岩石を骨材として使う。水は先行文献にある水素とイルミナイトから合成する。ミキサーの構造はオムニミキサー（ゴム容器タイプ）を参考にする。

③月面での問題点

- A. 高真空（ 10^{-10} torr程度） → コンクリート中の水が瞬時に蒸発し、収縮量が多い。
- B. 低重力（地上の約 $1/6$ ） → コンクリートを混練すると構成物質の比重差が現れず、均一分布しやすいが、気泡が入りやすく抜けにくい。
- C. 広い温度域（ $-190\sim+137^{\circ}\text{C}$ ） → 水の凍結融解（体積変化）により破壊しやすい。セメントの水和反応速度への影響が多い。

- ④月面でコンクリートに要求される性能
- A. 低重力下では圧縮強度は不要で、引張り強度が必要である。
 - B. 軽量が好ましい。
 - C. 耐熱・断熱性状を持てば、金属やプラスチック等の他の材料より長所となる。

- ⑤月面でのコンクリートの種類と用途
- A. 種類 → 軽量（気泡混入）の繊維補強コンクリート
 - B. 用途 → 土木・建築の断熱性構造部材

- ⑥月面でのコンクリートの流動性の問題点
- A. 温度の影響 → HI 理論式から推測する。
 - B. 混入気泡の影響 → HI 理論に考慮されていないが、粒子数を減らすなどの補正方法を検討する。気体-固体サスペンションの未開領域である。
 - C. 重力の影響 → HI 理論に考慮されていないので、未開領域である。

- ⑦その場観察の適用
- A. セメントペーストの流動、凝結、固化には、構成粒子間の水和反応も関与するため、これまで全く行われなかったミクロな結晶成長の面から、その機構を考察する。
 - B. 位相シフト干渉法による“その場”観察法を活用すると、これらの試験期間を大幅に短縮することができる。
 - C. 上記の成果は、現在のコンクリート工学の主要な課題でアルカリ骨材反応、収縮などの耐久性関連研究や、100 年耐用セメントの研究にも大きな影響を与えることが期待される。

(2) 第2回 WG

2007 年度も、本 WG の活動を継続することを確認し、その活動内容と体制

を審議した。

2.1 今後の検討課題

当面、以下の項目・内容について検討する方針を決めた。

①微小重力・低重力下でのセメントペーストの粘度測定装置の設計

粘度測定装置の設計に、鋼球落下法を応用する。すなわち、軟らかなセメントペーストの表面付近での鋼球の落下速度を精密測定して、ペースト粘度を推定できるように、測定装置を設計する。その装置から得られたデータを従来の測定法による粘度と比較して、測定装置の信頼性と適用性を確認する。

②位相シフト干渉法によるセメント硬化体の長さ変化測定

セメントモルタルの長さ変化を、位相シフト干渉法で経時的に精密測定できるようにする。

③月のレゴリス加熱後の残渣組成を原料としたアルミナセメントの急速製造

月面に豊富に存在するレゴリス(表面土壌)をセメント原料として利用することを想定して、試験室で試薬等を用いてアルミナセメントクリンカーの急速製造を検討する。

④環境温度が変化した場合のセメントペーストの粘度変化のシミュレーション

月面での環境温度変化が、フレッシュコンクリートの流動性とその経時変化に及ぼす影響を予測するために、HI 理論を用いて、環境温度がセメントペーストの粘度に及ぼすシミュレーションを実施する。

2.2 2007 年度の体制と作業分担

①WG のメンバー

2006 年度の WG メンバーから 1 名が外れ、新たに 2 名を加えて、総勢 8 名とす

る。

②WG のリーダー

小松隆一教授（山口大学）とする。

③作業分担

- A. 微小重力・低重力下でのセメントペーストの粘度測定装置の設計 → 東北大学
- B. 位相シフト干渉法によるセメント硬化体の長さ変化測定 → 東北大学
- C. 月のレゴリス加熱後の残渣組成を原料としたアルミナセメントの急速製造 → 山口大学
- D. 環境温度が変化した場合のセメントペーストの粘度変化のシミュレーション → 株式会社宇部三菱セメント研究所

5. 成果

第 23 回宇宙利用シンポジウムで、本 WG での検討結果を発表した（添付資料）。

月面でのセメントペーストの流動性予測と“その場”観察による研究

(株)宇部三菱セメント研究所 朝倉悦郎・同 田中久順・同 下坂建一，東北大学大学院理学研究科 塚本勝男，山口大学大学院 理工学研究科 小松隆一， JAXA ISS 科学プロジェクト室 吉崎 泉

Working group report on simulation and in-situ observation of cement paste fluidity

Etsuro Asakura, Hisanobu Tanaka and Kenichi Shimosaka

Ube-Mitsubishi Cement Research Institute Corporation, Yokoze, Chichibu, Saitama 368-8604

E-Mail: asakura@mmc.co.jp, hi-tanak@mmc.co.jp and shimosak@mmc.co.jp

Katsuo Tsukamoto

Tohoku University, Aramaki Aoba, Sendai, Miyagi 980-8578

E-Mail: ktsuka@mail.tains.tohoku.ac.jp

Ryuichi Komatsu

Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755-8611

E-Mail: r-komats@yamaguchi-u.ac.jp

Izumi Yoshizaki

JAXA, Sengen, Tsukuba, Ibaragi 305-8505

E-Mail: yoshizaki.izumi@jaxa.jp

We are studying the use of cement on the moon as a building material and the control of its properties, especially fluidity. The Viscosity of cement paste in the space may be predicted by the general viscosity equation of Hattori and Izumi based on the DLVO theory that requires some parameters such as the particle friction coefficient, etc. In situ observation of dispersed particles in cement paste will be a key technology to clarify the mechanisms of the fluidity and the hardening property.

Key words; Cement, Cement paste, Concrete, Hattori and Izumi theory, Fluidity, Viscosity, In-situ observation

1. 目的

コンクリートは、その場で混練して任意の形状の堅固な構造物を形成できるので、月面に建物や土木構造物を構築する際に利用できる可能性が高い材料である。ただし、その場合にいくつかの課題がある。材料の入手、コンクリートの製造、低重力・高真空・過酷温度条件下でのコンクリートの流動性状および強度発現性の制御などである。

コンクリートの性能面では、強度発現性は、セメントの種類を選定し、硬化物の養生方法を工夫すれば、解決できる見通しが立つ。一方、流動性状は、低重力下では、セメント混練物中の粒子間摩擦が小さくなるので、その粘度の経時変化が地球上よりも小さくなることが推測されるが、その他の因子（温度、重力など）の及ぼす影響が不明であるので、難問である。セメント混練物を構造物の型枠に流し終わるまで、所要の流動性を確保でき、その後、所定時間内に硬化させるために、その流動性状の経時的挙動を把握し、制御できる技術を確立しておかなければならない。

そこで、数多くある粘度理論の中で、現在最も先

進的な服部・和泉理論と、結晶成長の“その場”観察法の組み合わせにより、水とセメントの混練物であるセメントペーストの月面での流動性状を予測できるようにすることから着手することとし、本ワーキンググループの当面の目的とした。

2. 研究内容

①服部・和泉理論の概要

服部・和泉理論（HI 理論）は、DLVO 理論を基礎にして、サスペンションの構成物質間の摩擦をニュートンの流動方程式に入れて展開された濃厚分散系の粘性理論である⁽¹⁾。この理論の特徴は、これまでに提案された 100 を越える非ニュートン粘性の基礎方程式に欠けていた、粘度の時間依存性および剪断速度依存性を表現するパラメーターが含まれ、自然凝集による粒子間結合数の増加とこれに伴う粘度上昇が考慮されている点である。HI 理論は、定量的な説明を得意とし、例えばセメントの比重、粉末度、水可溶塩や分散剤および粘剤の添加がセメントペーストの粘度に及ぼす影響を計算できる。以下に、HI 理論の要点を記述する。

分散系の粘度は、分子間摩擦粘度 η_1 、液体分子・粒子間摩擦粘度 η_2 および粒子間摩擦粘度 η_3 の3種類の物質間の摩擦粘度からなる。セメントペーストのような濃厚分散系の粘度は、粒子-粒子間の摩擦粘度 η_3 に支配されるので、溶媒の分子-分子間の摩擦粘度 η_1 および溶媒分子-粒子間粘度 η_2 は無視できる。その結果、HI 理論の一般粘度式は、次式で示される。

$$\eta_3 = B_3 \cdot n_3^{2/3} \cdot \left\{ \frac{U_0(\gamma \cdot H \cdot t^2 + 1) + H \cdot t}{(H \cdot t + 1)(\gamma \cdot t + 1)} \right\}^{2/3}$$

B_3 : 粒子間摩擦係数(N・s)

n_3 : 単位体積当たりの一次粒子数(m^{-3})

U_0 : 結合定数(測定開始時の結合数/一次粒子数)

γ : 剪断速度(s^{-1})

H : 凝集速度定数(s^{-1})

t : 時間(s)

②セメント混練物の粘度のシミュレーションと制御技術

低重力下での上記の一般粘度式のパラメーターを求めるために、重力下で条件(剪断速度、時間など)を変えたり、先行研究⁽²⁾⁽³⁾の成果を元に、月面でのセメントペーストの混練物の粘度を予測する。パラメーターが求められれば、粘度の経時変化が判るので、従来の知見を元にその制御技術を提案することができる。

本ワーキンググループでは、セメントペースト中での粒子の分散状態を“その場”観察法によって明らかにするための試験装置および試験条件についても検討する。セメントペーストの粘度は、構成粒子の凝集・分散状態を反映し、その後の凝結・固化は構成粒子間の水和反応の結果であるため、これまで全く行われなかったミクロな結晶成長への“その場”観察の活用は、セメントペーストのレオロジー研究のみならず、現在のコンクリート工学の主要な課題である骨材反応などの耐久性関連研究や、100年耐用コンクリートの研究にも役立つことが期待される。また位相シフト干渉による“その場”観察法⁽⁴⁾を活用すると、これらの試験期間を大幅に短縮することができる。

③長期目標

宇宙実験により、微小重力下での HI 理論の一般式にあるパラメーターを“その場”観察法で求め、セメントペーストの粘度の経時変化を推測できるようにし、そのデータからセメントペーストの粘度の制御技術を提案できるようにする。そのための具

体的な宇宙実験の計画を提案したい。

3.月面でのコンクリートの利用に関する考察と流動性の課題

本ワーキンググループでは、月面でのコンクリートの利用に関して、材料の入手方法、コンクリートの製造方法、望ましいコンクリートの性状に関して討議して、改めて今後の検討課題を検討した。その結果、月面で材料を調達して、軽量(気泡混入)の繊維補強コンクリートを製造することを想定し、その流動性状を中心に、問題点の解決策を課題とすることとした。このプランは、材料の現地調達に新規性があり、プラスチック等の有機系材料の使用よりも利点となる。項目毎の検討結果を以下に示す。

①セメント・繊維・混合材の製造

月面の玄武岩を、太陽光を利用して溶融して、Ca・Al系クリンカーとガラス繊維を製造し、その際に発生する Si・Fe を主成分とする揮発物はシリカフューム(平均粒径 $0.1 \mu m$) のような混合材として利用する。ただし、溶融方法、原料の選択、微粒化・繊維化方法については、検討する必要がある。

②コンクリート製造

月面の岩石を骨材として使う。水は先行文献⁽⁵⁾にあるように水素とイルメナイトから合成する。セメント、骨材、繊維、混合材および水を混練するミキサーの構造は、オムニミキサー(密閉のゴム容器タイプ)を参考にする。

③コンクリートの品質上の問題点

月面の過酷な環境下⁽⁶⁾で、コンクリートの性状に及ぼす影響として、以下のことが考えられる。まず、高真空(10^{-10} torr 程度)下では、コンクリート中の水が瞬時に蒸発し、収縮量が大きくなり、亀裂の発生に繋がる。さらに、低重力(地上の約 $1/6$)下では、コンクリートを混練すると構成物質の比重差が現れず(材料の分離現象がなく)、均一分布しやすい利点がある一方、気泡が入りやすく抜けにくいという、通常は問題になりやすい現象がある。また、温度域が広い($-190 \sim +137^\circ C$)ため、コンクリート中の空隙に残る水の凍結融解(体積変化)により、硬化したコンクリートが破壊しやすく、セメントの水和反応速度への影響が大きいので、高温下では柔らかい状態から急激に硬化したり、逆に低温で水和が遅延する(固まりにくい)ことがある。

④コンクリートに要求される性能

月面の構造物用コンクリートに望まれる主な性

能は、所要の引張り強度、耐熱・断熱性および放射線の遮蔽性である。低重力下では圧縮強度は不要で、引張り強度が必要となる。また、月面での広い温度域では耐熱・断熱性状が望まれるので、その面でコンクリートは、金属やプラスチック等の他の材料に比べて利点となる。なお、コンクリートに耐熱・断熱性状を付与するには、材料混練時に気泡を混入させて軽量とするのが好ましい。

⑤コンクリートの種類と用途

前記④の要求性能に合致するコンクリートの種類は、「軽量（気泡混入）の繊維補強コンクリート」であり、その用途は土木・建築用の断熱性構造部材とみなせる。

⑥コンクリートの流動性の問題点

月面で任意の形状のコンクリート構造物を建造するには、密閉した条件下で、軟らかい（フレッシュ）コンクリートを型枠に流し込む必要がある。その場合、品質並びに作業性の両面から、コンクリートに適切な流動性状を保持させなければならない。月面でのコンクリートの流動性に大きな影響を与える要因として、温度、気泡混入および重力が考えられる。その影響を考察する際に、拠り所とするHI理論の適用について、次のように考える。

温度の影響は、HI理論式から推測できそうである。混入気泡の影響は、HI理論に考慮されていないが、粒子数を減らすなどの補正方法を検討すれば、大略の影響が把握できそうである。しかし、気体-固体サスペンションの未開領域でもあり、検討すべきことは多い。重力の影響は、HI理論に考慮されていないので、未開領域である。したがって、いずれは宇宙実験で確認すべき課題である。

⑦その場観察の適用

セメントペーストの流動、凝結、固化には、構成粒子間の水和反応も関与するため、これまで全く行われなかったミクロな結晶成長の面から、その機構を考察する。特に、位相シフト干渉による“その場”観察法を活用すると、寸法変化を高精度に測定でき、しかも試験期間を大幅に短縮することができる利点がある。

この成果は、現在のコンクリート工学の主要な課題であるアルカリ骨材反応、収縮などの耐久性関連研究や、100年耐用コンクリートの研究にも大きな影響を与えることが期待される。

文献

- (1) 例えば、K. Hattori and K. Izumi : A Rheological

Expression of Coagulation Rate Theory, J. Dispersion Science and Technology, 3(2), 129-145, 147-167, 169-193 (1981), 11(3), 307-321 (1990)

- (2) 服部健一，室 博，和泉嘉一：新しい粘性理論によるセメントペーストの粘度のシミュレーション，セメント・コンクリート論文集，50，192-197 (1996)
- (3) 服部健一，和泉嘉一：セメントペースト及びコンクリートの粘度についての2，3の理論的考察，セメント・コンクリート論文集，51，412-417 (1997)
- (4) 例えば，塚本勝男，西村良浩，横山悦郎：微小重力での結晶成長“その場”観察，可視化情報学会誌，25(98)，8-15 (2005)
- (5) 例えば，松本信二，金森洋史：未来文明とコンクリートー 月面基地におけるコンクリートの利用ー，28(7)，119-122 (1990)