

報告 モンゴルで使用されているセメントの力学的特徴

土門 寛幸*1・渡辺 暁央*2・中村 努*3・ムンフオチル セルゲレン*4

要旨：モンゴルで使用されている3種のモンゴル国産セメント（モンセメント、フトウルセメント、マックセメント）および輸入セメント（以下、チャイナセメント）について、セメント強さ試験および粉末X線回折、反射電子像観察等を実施し、セメントの品質について検討した。その結果、チャイナセメントのモルタル圧縮強度は、日本の普通ポルトランドセメントモルタルの半分以下で、モンゴル国産セメントの5~7割程度であることを示した。反射電子像を観察するとチャイナセメントのみフライアッシュが多量に確認できた。

キーワード：モンゴルのセメント、反射電子像、セメント強さ試験、フライアッシュ

1. はじめに

日本の急速な工業立国としての技術を支えた特徴的な教育システムとして、工業高等専門学校（高専）がある。高専は、中等教育と高等教育を5年間の一貫教育で行い、実技に裏づけされた高度な専門知識を有する技術者を育成する我が国独自の教育手法である。この高専という教育システムを海外に輸出するという考えの下、2014年9月にモンゴル国において、世界初の海外の高専が設置された^{1,2)}。モンゴル高専は、国立科学技術大学付属高専、私立工業技術大（IET）学付属高専、私立新モンゴル学園付属高専の3高専があり、主に機械・電気・化学・建設の4分野の教育を展開している。モンゴル高専が設置される前段として、高専教育システムの構築および現地教員の育成を目的として、2013年10月にIET付属の専門学校（中学校卒業者が入学する職業訓練校）から学生を選抜して、高専モデルクラスが編成された。高専モデルクラスは、建設学科として設置され、笹川平和財団の経済的な支援の下、引退した高専教員を中心とした専門家がモンゴルに派遣され、高専教育システムの構築を実施した。この高専モデルクラスが5年目を迎えて、卒業研究を実施するにあたり、著者らの現役の高専教員が陣頭指揮をとり、卒業研究の試行を実施した。この卒業研究では、モンゴルで使用されている国産セメントおよび中国からの輸入セメントについて、品質を確認する目的の研究を実施した。本文では、モンゴル高専モデルクラスの卒業研究の成果について報告するものである。

この卒業研究を実施するにあたり、モンゴル人教員に日本型高専教育による卒業研究の概要を示すため、先行研究を実施した³⁾。そこでは、モンゴルで使用されている中国からの輸入セメントと日本のセメントを比較する品質試験を行い、卒業研究の計画立案を行うための資料を作成した。先行研究の結果は、中国から輸入されたセ

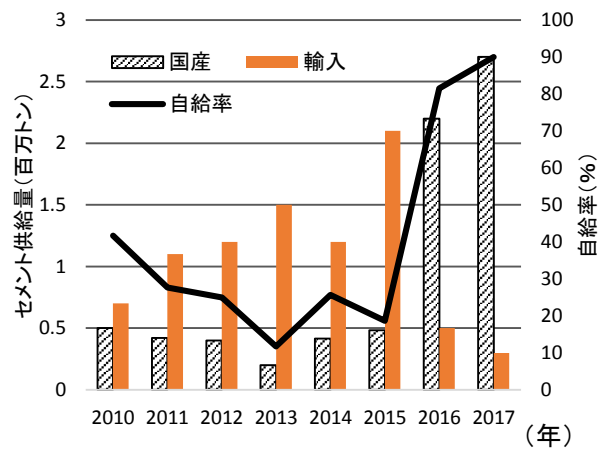


図-1 モンゴル国内のセメント供給量⁴⁾

メントは、日本の普通ポルトランドセメントと比較して、SiO₂の割合が多くCaOの割合が少ないこと、石英を含むことが明らかになった。また、中国からの輸入セメントを使用して作製したモルタルの反射電子像を観察すると、フライアッシュが多量に確認できた。さらに、中国からの輸入セメントでJIS R5201に準拠したモルタルを作製し、曲げ強さ試験および圧縮強さ試験を行うと、日本の普通ポルトランドセメントをフライアッシュで60%置換したものと同程度の強度であった。

モンゴル高専モデルクラスの卒業研究では、前述した日本の普通ポルトランドセメントを基準として、中国からの輸入セメントおよびモンゴル国産の代表的な3つのメーカーのセメントについて、先行研究と同様の品質試験を実施し、成果をとりまとめた。本報告では、その結果について示すものとする。

2. モンゴルのセメント事情

図-1 はモンゴル国内でのセメント供給量の推移であ

*1 苫小牧工業高等専門学校 技術教育支援センター (正会員)

*2 苫小牧工業高等専門学校 創造工学科 准教授 工博 (正会員)

*3 苫小牧工業高等専門学校 創造工学科 准教授 工博

*4 モンゴル工業技術大学付属モンゴルコーセン技術カレッジ 校長

る⁴⁾。モンゴルは1990年に社会主義を放棄し、1992年に現在のモンゴル国が成立して市場経済が導入された⁵⁾。その結果経済的な混乱もあり、2015年まではセメントの国内生産量は概ね年間50万トンで推移している。

2000年代後半からの経済成長により、国産セメントが不足し、多くを中国からの輸入セメントで対応していた。特に2010～2015年は首都ウランバートルの社会基盤整備が急速に進行し、セメント需要が急速に拡大した。その結果として、中国からの輸入セメントの割合が多くなり、自給率が急速に低下した。現地の技術者および日本を含めた外国の技術者からのヒアリングによると、この輸入セメントを使用した配合（調合）を決定するのが困難であり、良好なワーカビリティを確保しながら設計強度を満足することが難しいことが話題となっていた。しかし、セメントの品質を調査する技術者が現地になかったこと、それ以外のセメントを調達することができなかったことから、輸入セメントを使用し続けざるえない状況であった。

この状況が変化したのは、2016年以降、欧州規格に基づいて建設された100万トンクラスの生産量を誇るセメント工場が2箇所稼働したことである⁶⁾。これにより国内の需要を国産セメントで賅うことができる体制が整ったが、関税の取引により中国から一定量の輸入が必要となっており、輸入セメントが年間30万トン程度市場に出回っている。

本報告では、モンゴル国産セメントのうち、近年稼働を始めたМак（マック）セメントおよびМон（モン）セメント、ソビエト時代に建設されたХөтөл（フトウル）セメントを選定して品質調査を行った。これらのセメントは欧州規格のEN197-1:2000にある42.5クラス（材齢28日の標準強さが42.5 N/mm²以上62.5 N/mm²以下）の強さの製品である。さらに中国からの輸入セメント（以下、チャイナセメント）、および日本のセメント工場から直接納入された普通ポルトランドセメント（以下、基準セメント）について、品質の調査およびモルタル供試体の強度の比較を実施した。

3. セメントの分析

3.1 セメントの粉末X線回折

各セメントについて、X線回折装置を使用して化合物の結晶構造を分析した。測定条件は、ターゲットCuK α 、走査範囲5~60deg.2 θ 、ステップ幅0.01deg.とした。各セメントの粉末X線回折の結果を図-2に示す。すべてのセメントでC₃S、C₂S、C₃A、C₄AFなどの一般的なセメントクリンカのピークが確認できる。マックセメント、チャイナセメントにはこれに加え26°の石英のピークが明瞭に確認できることから、石英を主成分とする材料や、

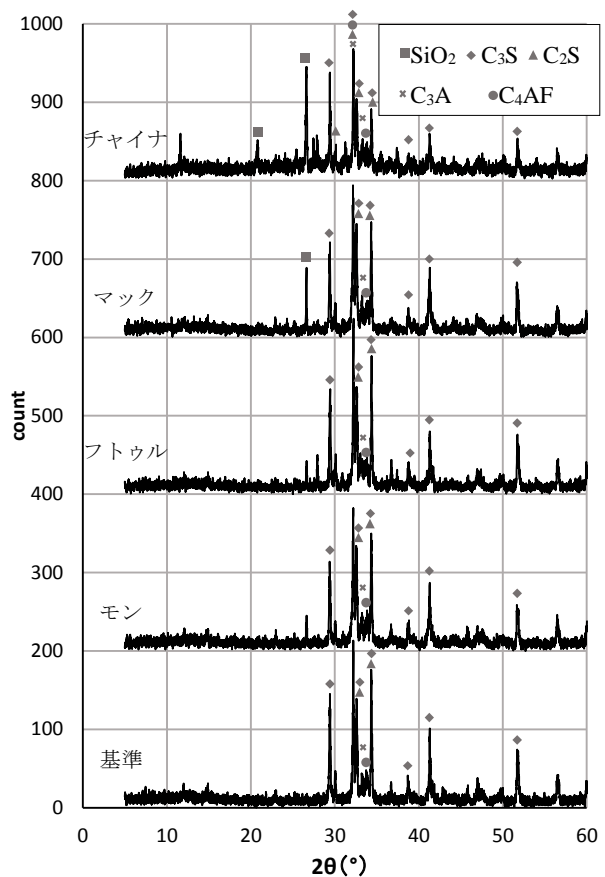


図-2 セメントの粉末X線回折結果

表-1 セメントの強熱減量

セメント種類	ig.loss(%)
基準	1.01
モン	2.06
フトウル	2.40
マック	4.73
チャイナ	4.63

鉱物として石英を含む材料が混入されている可能性がある。また、チャイナセメントは、バックグラウンドのカウント値が他のセメントより高くなっており、非晶質の物質が含まれている可能性が示唆される。

3.2 強熱減量

各セメントについてJIS R 5202に従い強熱減量の定量を行った。強熱減量(ig.loss)の結果を表-1に示す。基準セメントに比べモンゴルで使用されているセメントは強熱減量が大きくなっている。モンゴルでは、セメント工場で作られたセメントが麻袋に入れられて鉄道でウランバートルに運ばれ、市場に流通する。その流通段階では、屋外に平積みされ、風雨に曝される環境に置かれることもあり、風化が進行しやすいことが原因といえる。日本のようにセメントをバラ積みで生コン工場に運搬しない理由は、現地の作業員の教育レベルが低く、個別袋の製品を購入しなければ、

運搬中に何を混ぜられるかが分からないためである。今回の実験に使用したセメントは、強熱減量が大きかったことから、市場での保管が長く、風雨により風化が進行していたことが推察される。

3.3 密度試験

各セメントについて JIS R 5201 に準じた密度試験を行った。セメント密度試験の結果を表-2 に示す。日本の普通ポルトランドセメントの密度は $3.14\sim 3.16\text{g/cm}^3$ であり、実験値も 3.14g/cm^3 と適切な値が得られている。モンゴル国産の3つのセメントの密度は $3.10\sim 3.12\text{g/cm}^3$ であり、日本の普通ポルトランドセメントより若干小さい。チャイナセメントの密度は 2.79g/cm^3 と明らかに小さい値となっており、セメント成分以外の異なる材料が混合されていると考えられる。

4. モルタル供試体の実験概要

4.1 セメント強さ試験

各セメントについて、JIS R 5201 に準じて、水セメント比 0.5、砂セメント比 3.0 の配合で $40\times 40\times 160\text{mm}$ の角柱供試体を作製した。20℃で水中養生を行い、材齢 7 日および 28 日にて曲げ強さ試験および圧縮強さ試験を行った。

4.2 反射電子像観察

材齢 28 日のモルタル供試体から 10mm 角程度の試料を切り出した。切り出した試料は、エタノールに浸漬して水和反応を停止させた後、真空樹脂含浸装置にて低粘度のエポキシ樹脂を含浸させた。表面を耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを使用して粒度 $1/4\mu\text{m}$ まで注意深く研磨し、白金蒸着を行った。反射電子検出器を備えた走査型電子顕微鏡を使用し、倍率 500 倍で骨材を避けるようにセメントペーストマトリックスに対して反射電子像を観察し、画像をパーソナルコンピュータに取り込んだ(加速電圧: 15kV)。1 画像は 1280×1024 画素からなり、1 画素は約 $0.2\mu\text{m}$ に相当する。なお、反射電子像は 10 枚取得し、本文では代表的な画像について掲載した。

5. 結果および考察

5.1 曲げ強さ

曲げ強さ試験の結果を図-3 に示す。材齢 7 日および 28 日ともに基準セメントが最も高い値を示し、材齢 7 日から 28 日の強度の増加は 0.8N/mm^2 である。モンゴル国産の3つのセメントの材齢 7 日における曲げ強さは、基準セメントより若干低い程度である。しかし、材齢 28 日では、モンセメントの曲げ強さが材齢 7 日より低い値となっている。通常、標準養生をしている限り強度が低下することがないので、供試体製作時の施工不良等も予想される。マックセメントは強度の増加が 0.6N/mm^2 であ

表-2 セメントの密度

セメント種類	密度(g/cm^3)
基準	3.136
モン	3.118
フトウル	3.122
マック	3.103
チャイナ	2.789

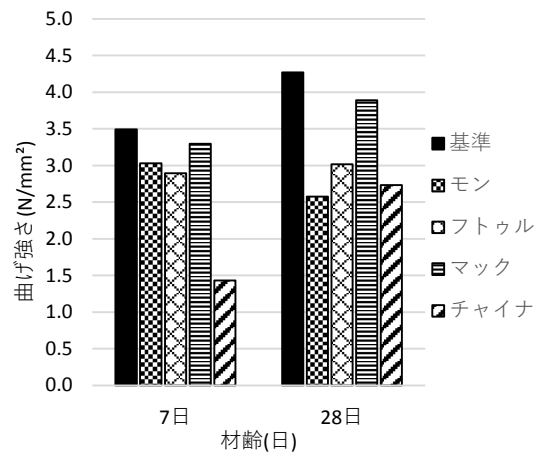


図-3 曲げ強さ試験結果

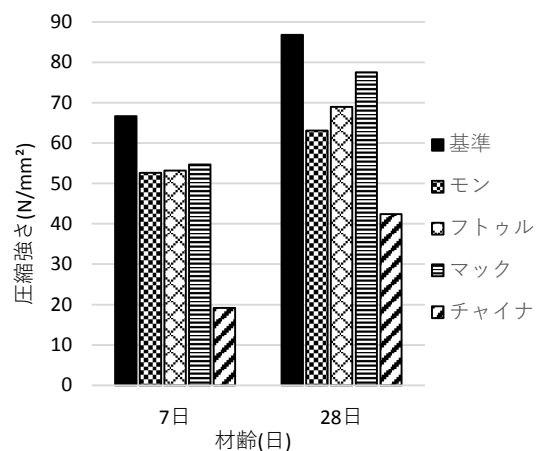


図-4 圧縮強さ試験結果

り、基準セメントと同様の強度発現といえる。

一方、チャイナセメントの曲げ強さは、材齢 7 日で 1.5N/mm^2 と基準セメントの 3.5N/mm^2 の半分以下の強度である。この原因として、チャイナセメントで作製したモルタルのフレッシュ特性が他のセメントと異なっていることが挙げられる。通常セメント強さ試験の打ち込みでは、テーブルバイブレータにより、若干のブリーディングが発生する程度のフレッシュ特性を有している。一方で、チャイナセメントのモルタルはブリーディングの発生はなく、モルタルがパサパサという感触であり、セメント強さ試験の打設で必要なワーカビリティを確保で

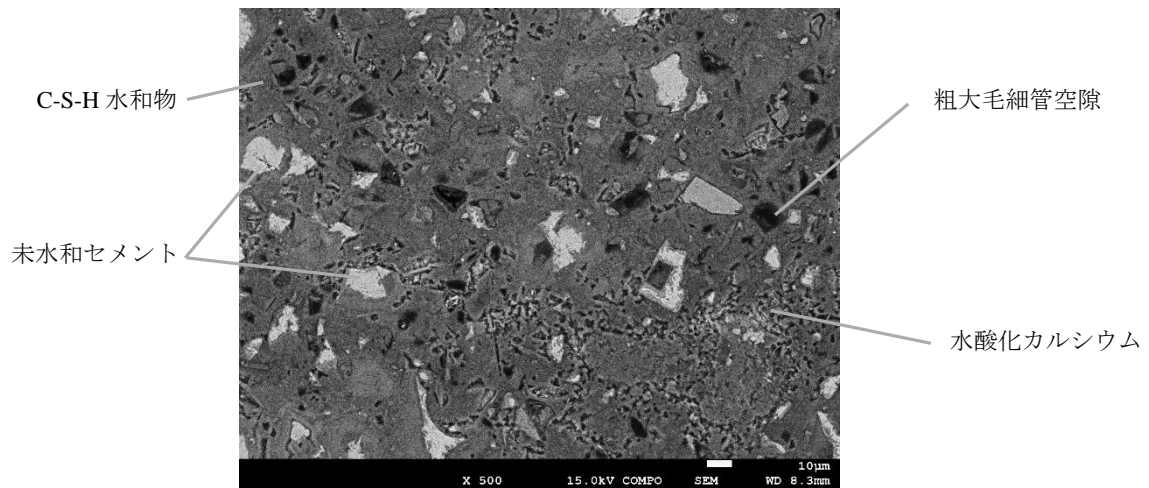


写真-1 基準セメントの反射電子像例

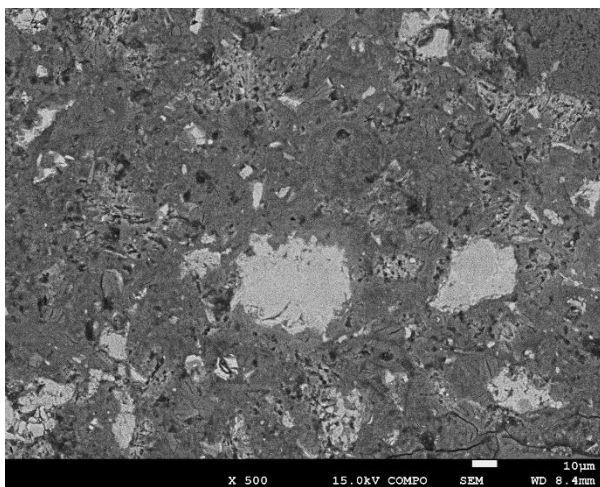


写真-2 モンセメントの反射電子像例

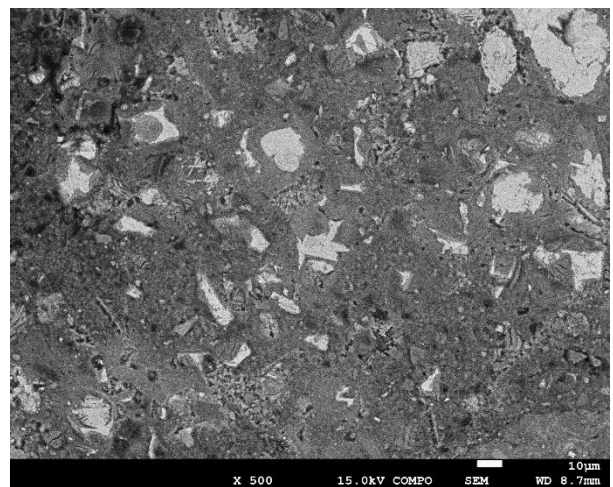


写真-3 フトゥルセメントの反射電子像例

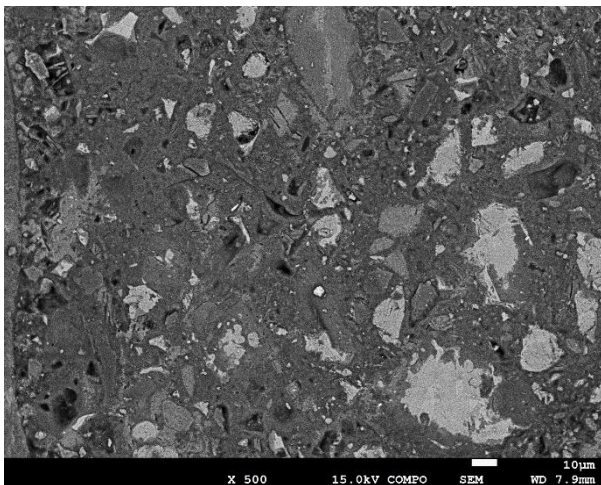


写真-4 マックセメントの反射電子像例

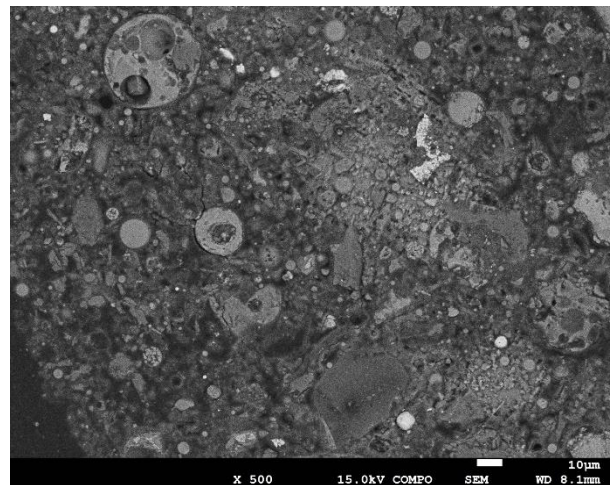


写真-5 チャイナセメントの反射電子像例

きていない状況であった。そのため、施工不良が発生しやすかったことが強度の低い要因として考えられる。しかし、材齢 28 日の強度の増大は 1.3N/mm^2 と、基準セメントの強度の増大より大きくなっており、モルタルのフレッシュ特性だけでなく、強度発現特性も普通ポルトランドセメントと異なっている。

5.2 圧縮強さ

圧縮強さ試験の結果を図-4 に示す。基準セメントの圧縮強度が材齢 7 日で 67N/mm^2 であるのに対し、モンゴル産セメント 3 種はその 8 割程度の強度が発現し、チャイナセメントは 19N/mm^2 と 3 割に満たない強度であった。一方、材齢 28 日では、基準、マック、チャイナセ

メントは、材齢7日より20N/mm²程度の強度の増大が認められるのに対して、モンおよびフトゥルセメントの強度増大は10~16N/mm²と小さい傾向がある。この結果を考慮すると、5.1節の曲げ強さ試験において、モンセメントが材齢7日から28日にかけて若干の強度低下を示したのは、おそらく強度が低下したというより、強度の増大がほとんどなかったため、試験値のばらつきによって平均値が小さくなったと考えられる。

一方、チャイナセメントは、強度の伸びは確保されているが、絶対的な強度が低いことは明白である。材齢7日の初期強度は基準セメントの1/3、材齢28日の強度は基準セメントの半分程度である。EN-197-1に従うなら32.5Nクラス(材齢7日で16N/mm²以上、材齢28日で32.5N/mm²以上52.5N/mm²以下)の強さクラスのセメントと判断され、現在ヨーロッパで主流の42.5クラスより低い強度の製品であると考えられる。

5.3 モルタルの反射電子像観察

各セメントモルタルの反射電子像の例を写真-1~5に示す。反射電子像は256段階のグレーレベルで構成されており、白色の相が未水和セメント、明るい灰色の相が水酸化カルシウム、濃い灰色の相がC-S-Hなどの水和物、黒色の相が粗大毛細管空隙である。

基準セメントモルタルの反射電子像は濃淡が明瞭であり、10 μ m程度の孤立した粗大な毛細管空隙が確認できる。孤立した空隙は連続した空隙よりも強度や耐久性が良好になる傾向があり、基準セメントの強度の要因と考えられる。基準セメントモルタルと同様の雰囲気なのがマックセメントモルタルである。マックセメントは強度発現特性も基準セメントと類似しており、内部組織の類似性から日本のセメントとほぼ同じ性質であると予想される。本研究の結果だけでは断言できないが、日本の技術者にとってはマックセメントの方が取り扱いやすい可能性がある。

モンおよびフトゥルセメントモルタルの反射電子像は、水和物の灰色の相の中に細かく毛細管空隙が分布しており、一見すると灰色が薄く感じられる。基準セメントやマックセメントモルタルのような10 μ m程度の粗大な毛細管空隙は少ないようである。しかし、基準セメントおよびモンゴル国産セメントは、基本的な構造として、未水和セメント、C-S-H水和物、水酸化カルシウムおよび毛細管空隙で構成されており、通常の普通ポルトランドセメントと同様の組織である。

一方、チャイナセメントの反射電子像は、他のセメントとは全く異なり、球形粒子が多量に確認できる。球形粒子はフライアッシュであり、多量に混入されていることが分かる。既往の研究からセメント置換率20%相当と推定され³⁾、強度が他のセメントより低い原因と考えら

れる。このフライアッシュがポゾラン反応により組織の緻密化が進行するならば、長期材齢において強度の増大が期待できると推察される。

本研究で使用したセメントは複数の試料からサンプリングを行ったわけではないため、今後、より多くの流通するセメントの品質に関するデータを集積することが重要である。

6. まとめ

本報告は、モンゴルで使用されている3つのモンゴル産セメント(モン、フトゥル、マック)および中国からの輸入セメント(チャイナ)について、日本の普通ポルトランドセメント(基準)と比較して、品質を調査したものである。主な結果を以下に示す。

- (1) X線回折の結果から、マックおよびチャイナセメントには、26°の石英のピークが明瞭に確認できる。また、チャイナセメントのバックグラウンドが高くなく、非晶質物質の存在が推定される。
- (2) モンゴルで使用されているセメントの強熱減量が大きく、セメントの風化が進行している可能性がある。
- (3) チャイナセメントの密度が他のセメントと比較して低い。
- (4) 曲げ強さは、チャイナセメントを除いて、材齢7日はほぼ同程度の強さであった。基準およびマックは材齢7日から28日にかけて強度増大が確認できたが、モンセメントは強度増大が確認できず、材齢28日はチャイナセメントと同程度の強さであった。
- (5) 圧縮強さは、モンゴル国産セメントは基準セメントの8割程度の強さであり、欧州基準における42.5クラスの最低強度を満たしている。チャイナセメントは材齢7日で基準セメントの1/3程度、材齢28日で基準セメントの半分程度であり、欧州基準における32.5クラスの強さのセメントであると推定される。
- (6) 反射電子像の観察より、チャイナセメントはフライアッシュを多量に含む混合セメントであることが明らかとなった。

謝辞

本報告は、モンゴル工業技術大学附属モンゴルコーセン技術カレッジの高専モデルクラスの高専卒業研究を試行した成果である。モデルクラスの卒業研究の試行では、モンゴル工業技術大学の教職員および学生、笹川平和財団、苫小牧工業高等専門学校の澤田知之名誉教授を始めとする教職員および学生の協力を得た。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) ムンフオチル セルゲレン, 中西佑二: モンゴル高専教育の現状と将来, 日本とモンゴル, 第 51 卷, 第 1 号 (133 号), pp.2-13, 2016.9
- 2) 福田誠, 木村智博: モンゴルでの日本式高専教育普及の試み, 土木学会誌, Vol.103, No.2, pp.56-57, 2018.2
- 3) 土門寛幸, 渡辺暁央, 栗山昌樹, ムンフオチル セルゲレン: モンゴルで使用されている輸入セメントに関する力学的特徴, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.75-80, 2018.7
- 4) National Statistic Office of Mongolia
- 5) 外務省ホームページ, <https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/mongolia/index.html> (閲覧日:2018.9.10)
- 6) 世界が認めるモンゴル・セメント, 「メイド・イン・モンゴリア」ブランドシリーズVII, <https://montsame.mn/jp/read/141449> (閲覧日:2018.9.10)