

論文 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

土門 寛幸*1・渡辺 暁央*2・栗山 昌樹*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輸入セメント（以下、モンゴルセメント）について、セメント強さ試験および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、モンゴル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あることを示した。反射電子像の観察により、モンゴルセメントにはフライアッシュが多量に入っており、強度が低い要因であることが判明した。日本のセメントとフライアッシュを混合してモルタルを作製すると、圧縮強度はフライアッシュを60%置換した程度であった。

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

1. はじめに

社会資本の整備においては、持続可能性を考慮した計画が重要である。日本でも高度成長期に建設された社会資本の維持管理、更新の在り方について社会問題となっている。そのため社会資本の整備の重要性が改めて認識されるようになり、建設段階で品質を維持するための提案¹⁾を実行する試みも始められている。

発展途上国の社会資本においても、持続可能性の考え方が広がりつつある。しかし、予算及び現地技術者の不足から、低品質の社会資本が提供される懸念がある。ODA等²⁾で外国人技術者により建設される社会資本に関しては品質が確保されているものの、その後の維持管理が実施できず、社会資本の維持が困難になることが課題となっている。そのため、現地技術者の育成方法について様々な試みが行われている。

モンゴルにおいては、実践的技術者の育成のため、日本型教育システムである高専を設立して、社会資本の整備や産業の育成につなげる試みが行われている。現在、著者らはモンゴル高専の設立以来、支援しており、授業や実験方法の教授を行っている。その中には鉄筋コンクリート梁の実験等も含まれているが、日本で使用している配合や構造物の設計条件などをそのまま適用してよいかの検討を行う必要がある。

モンゴルのコンクリートの品質については、いくつか紹介されている。Henryによれば、現地のセメント工場から出荷されるセメントの品質は比較的良好であり、圧縮強度が40N/mm²を維持できるようである³⁾。しかし、モンゴルではセメントがその需要に対して不足しており、多くを中国からの輸入に依存している。2012年のモンゴル国でのセメントの総消費量は1,750,000tであったが、そのうち国内での生産量は560,000tであり、残りの約70%は輸入(中国)³⁾であるとされている。

輸入セメントは、中国/モンゴル国境の二連市の粉砕工場で粉砕され、モンゴルの鉄道の貨車で首都ウランバートルに輸送される。このセメントは麻袋に入れられ、屋根はあるが壁のないセメントターミナルに保管され(写真-1)、その後市場にて屋外で平積みされた状態で販売され、工事現場においても野晒しの状態で仮置して施工されるケースが多い(写真-2)。



写真-1 鉄道ターミナルのヤードに保管されているセメント



写真-2 建設現場における練混ぜ作業

*1 苫小牧工業高等専門学校 技術教育支援センター 技術職員 (正会員)

*2 苫小牧工業高等専門学校 創造工学科都市・環境系 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 苫小牧工業高等専門学校 創造工学科都市・環境系 教授

*4 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 校長

湯浅らは、モンゴルの建設現場から採取した輸入セメントで作製されたコンクリートについて試験をしており、圧縮強度が20N/mm²を若干下回る程度であることを報告している⁴⁾。著者らも渡蒙した時に実施したRC梁の実験を通して、材齢7日の圧縮強度が10N/mm²未満であったことから、セメントの品質について疑問を有するようになった。

本研究ではモンゴルで使用される輸入セメント（以下、モンゴルセメント）の成分やコンクリートを作製した際の強度データを得ることを目的とした。比較対象として、日本にある本校の実験で使用する国内のセメント工場から直接納入されたセメント（以下、基準セメント）および、セメントが屋外ヤードで保管されている日本のホームセンターで購入したセメント（以下、市販セメント）を用いて検証を行った。

2. セメントの分析

2.1 セメントの粉末X線回折

各セメントの粉末X線回折の結果を図-1に示す。日本のセメントである基準および市販セメントは、ともにピークがほぼ一致している。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。

一方、モンゴルセメントは、セメントクリンカのピークが確認されるが、29°および34°のC₃Sのピーク値が基準セメントの半分程度の大きさであり、相対的にC₃Sの含有量が少ないことが推定される。また、20°と26°に明瞭なピークが確認できる。これは石英のピークであると判断される。この石英は、本来のセメントに含まれる成分とは別にセメント中に石英の結晶として存在しているものと推測される。すなわち、セメントの増量材として、石英を主成分とする材料や、鋳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と考えられる。

2.2 蛍光X線分析

各セメントの蛍光X線分析の結果を表-1に示す。主成分は全て共通のものが現れたが、日本のセメントとモンゴルセメントを比較すると成分量には大きな差がある。モンゴルセメントはSiO₂、Al₂O₃およびFe₂O₃の量が多く、それぞれ基準セメントの1.8倍、2.0倍および2.4倍である。逆にCaOの量が少なく基準セメントの0.6倍程度である。SiO₂については粉末X線回折結果で判明した石英の存在が関係していることが考えられる。CaOが少ないことにより、モンゴルセメントの強度が他のセメントより低くなることが想定される。

また、基準セメントのみ少量成分の酸化マグネシウムが含まれていないという結果となった。これは製造メーカーによる違いと考えられる。しかし、少量成分の酸化マグネシウムおよび三酸化硫黄のJISの基準はそれぞれ5.0%以下および3.5%以下であり、いずれのセメントも規制値を満たしている。

2.3 強熱減量

強熱減量 (ig.loss) の結果を表-2に示す。セメント成分が同じ場合は、風化が進んでいるほど強熱減量の値は高くなる。そ

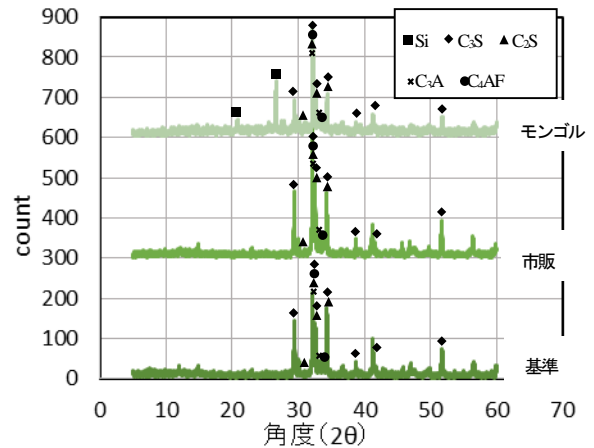


図-1 セメントの粉末X線回折結果

表-1 蛍光X線分析結果

	成分名	成分量 (%)		
		基準	市販	モンゴル
主成分	SiO ₂	18.5	18.1	33.1
	Al ₂ O ₃	4.6	4.7	9.4
	CaO	65.2	67.8	41.4
	Fe ₂ O ₃	2.9	3.1	6.9
少量成分	MgO	0	1.1	2.6
	SO ₃	3.3	3.4	3.4

表-2 強熱減量

セメント種類	ig.loss (%)
モンゴル	0.75
基準	1.01
市販	1.47

のため風化の進行が大きいと想定されるモンゴルセメントの強熱減量が大きくなる可能性を考えた。しかし、2.2節で示すようにモンゴルセメントはセメント分 (CaO) が少ないため強熱減量が小さくなったと考えられる。

3. 実験概要

3.1 セメント強さ試験

基準セメント、市販セメントおよびモンゴルセメントについて、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、40×40×160mmの角柱供試体を作製した。20℃の水で養生を行い、材齢7日および28日にて曲げ強度試験および圧縮強度試験を行った。

3.2 モルタルの粉末X線回折

材齢28日の圧縮強度試験後の供試体から試料を採取して、エタノールに浸漬して水和を停止させた。110℃で乾燥させた後、粒径が75μm以下になるまで粉碎し、粉末X線回折を行った。

3.3 モルタルの反射電子像観察

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て、エタノールに浸漬して水和を停止させた。真空含浸装置を使用してエポキシ樹脂を含浸させた。耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを使用して、注意深く鏡面研磨を行った。研磨で使用したダイヤモンドスラリーの最小の粒度は 0.25 μm である。白金蒸着を行って反射電子像観察用試料を作製した。反射電子検出器を備えた走査型電子顕微鏡を使用して加速電圧 15kV で骨材を避けてセメントペーストマトリックスの相について反射電子像を取得した。なお、観察倍率は 500 倍である。

4. 結果および考察

4.1 曲げ強度試験

供試体の見かけ密度を表-3、曲げ強度試験結果を図-2 に示す。見かけ密度は供試体質量を体積で除して求めたものである。材齢 7 日では、いずれのセメントで作製した供試体もほぼ同じ見かけ密度となった。材齢 28 日では、市販およびモンゴルセメントの供試体の見かけ密度が基準セメントのものより若干小さいようである。

曲げ強度は、基準および市販セメントの供試体で、材齢 7 日で約 7.5N/mm²、材齢 28 日で約 8.5N/mm² である。一方で、モンゴルセメントでは、材齢 7 日で約 3.5 N/mm²、材齢 28 日では約 5 N/mm² であり、基準セメントの半分程度の強度しか発現していない。

4.2 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-3 に示す。基準セメントおよび市販セメントの圧縮強度は、材齢 7 日で約 50 N/mm²、材齢 28 日で約 60 N/mm² である。一方、モンゴルセメントの圧縮強度は材齢 7 日で 17 N/mm²、材齢 28 日で 25 N/mm² であり、基準セメントの 3~4 割程度の強度しか発現していない。JIS 規格と比較すると、普通ポルトランドセメントは材齢 7 日で 17N/mm² 以上、材齢 28 日で 22.5 N/mm² 以上の強度が必要であり、モンゴルセメントは日本の規格を大きく下回っている。

4.3 モルタルの粉末 X 線回折

各セメントモルタルの材齢 28 日の粉末 X 線回折の結果を図-4 に示す。各モルタルはほぼ同じピークを示しており、組成は同様であると考えられる。しかし、モンゴルセメントモルタルは約 26° および約 28° の石英のピーク値が基準セメントモルタルと比較して大きい値を示しており、セメント自身に含まれる石英が影響しているものと推察される。

4.4 モルタルの反射電子像解析

各セメントモルタルの反射電子像の例を写真-3~5 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、白色の粒子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であり、黒色の相が粗大毛細管空隙である。

基準セメントおよび市販セメントは未水和セメントが多く観察され、水和物の相が毛細管空隙を分断しており、毛細管空隙

表-3 供試体の見かけ密度

密度(g/cm ³)		
	7 日	28 日
基準	2.30	2.34
市販	2.31	2.28
モンゴル	2.30	2.29

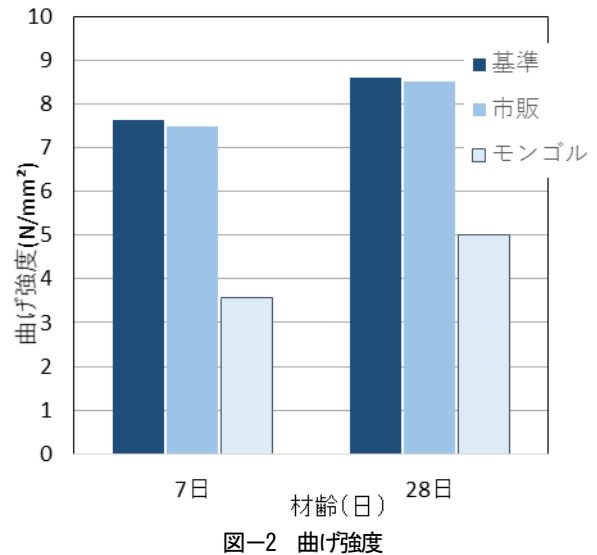


図-2 曲げ強度

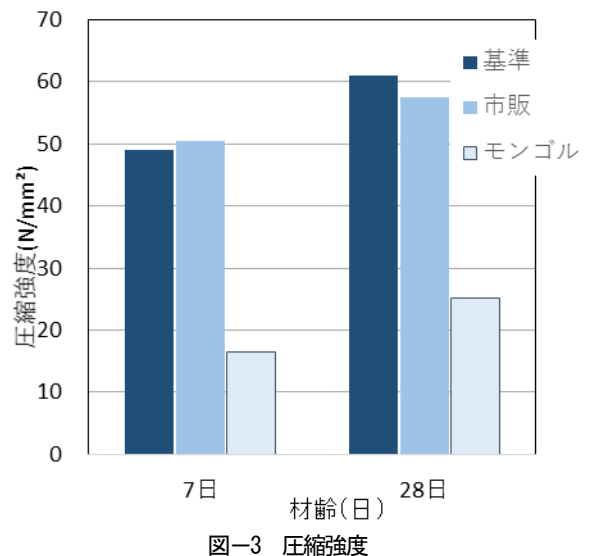


図-3 圧縮強度

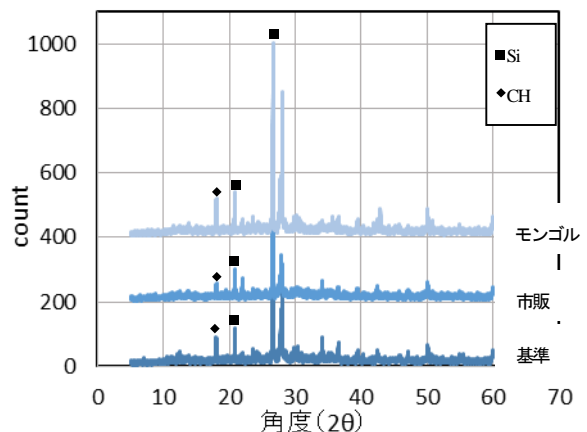


図-4 モルタルの粉末 X 線回折 (材齢 28 日)

が比較的孤立して分布している。一方、モンゴルセメントは、普通ポルトランドセメントとして販売されていたが、丸い粒子のフライアッシュが多量に観察された。未水和セメントはほとんど確認されず、材齢28日までに多くを水和反応で消費したと考えられる。毛細管空隙は連続して多く存在しており、強度が低い粗な組織を構成している。また、水酸化カルシウムの相がほとんど確認できず、今後ポズラン反応による組織の緻密化はあまり進行しないことが予想される。すなわち、モンゴルセメントは増量材としてフライアッシュが使用されており、強度試験の数値が著しく低かった要因と考えられる。

モンゴルセメントを使用したモルタルの反射電子像を10枚取得して未反応フライアッシュを抽出する画像処理を実施した。グレーレベルによりセメントおよびフライアッシュ粒子を抽出し、フライアッシュ粒子を目視判断により選択した。反射電子像に占める割合から体積を算出した。その結果、未反応フライアッシュは、セメントペーストマトリックスに約9%程度存在しており、質量ベースに換算すると置換率約18%に相当するといえる。材齢28日におけるフライアッシュのポズラン反応の進行度はそれほど高くなく、既往の実験において約5%であった⁹⁾。そのため、モンゴルセメントに混入されているフライアッシュも同程度の反応度と仮定すると、初期の混入率は約20%程度ではないかと推察される。日本のフライアッシュセメントは、セメントに対して10~20%をB種、20~30%をC種と規定しているため、フライアッシュセメントB種あるいはC種に相当する混入率であるといえる。ただし、厳密には、セメント自体について、顕微鏡観察等を行い、未反応段階の状況を調査する必要がある、今後の検討課題である。

4.5 フライアッシュ置換モルタルの強度試験

モンゴルセメントがフライアッシュセメントであると仮定した検討を実施した。基準セメントをフライアッシュII種で20%、40%および60%置換してセメント強さ試験用の角柱供試体を作製した。20°Cの水中養生を行い、材齢7日および28日にて曲げ強度試験および圧縮強度試験を行った。

曲げ強度を図-5に、圧縮強度を図-6に示す。モンゴルセメントで想定されたフライアッシュの置換率は約20%である。基準セメントをフライアッシュに20%置換したモルタルは、材齢28日の曲げ強度約7.5N/mm²、圧縮強度が約50N/mm²であり、基準セメントモルタルよりそれぞれ約1N/mm²および約10N/mm²低くなる。しかし、モンゴルセメントの材齢28日の曲げ強度5N/mm²および圧縮強度25N/mm²と比較すると強度が大きい。基準セメントのフライアッシュの置換率を増大させていくと、モンゴルセメントの供試体はフライアッシュ60%置換したモルタルに近い強度であることが判明した。

以上の結果を整理すると、XRDでは石英のピークが検出されていること、画像解析および強度試験での置換率の推定結果に差があることから、石英を含むフライアッシュを主体とした材料が混合されていると推察される。またそれらの混合材は、合

量として50~60%前後置換されている可能性が示唆された。



写真-3 基準セメントモルタルの反射電子像の例

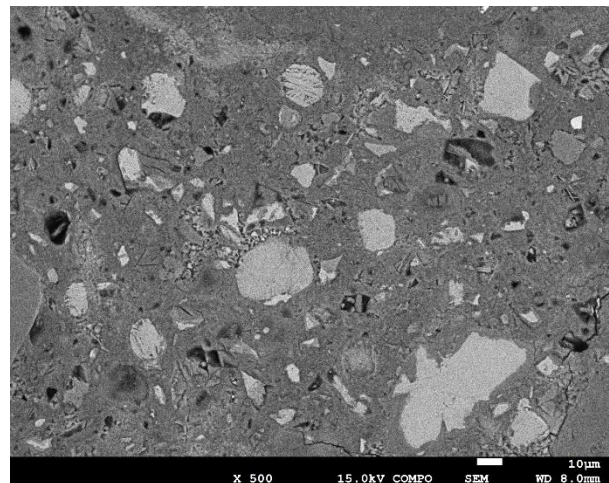


写真-4 市販セメントモルタルの反射電子像の例

フライアッシュ

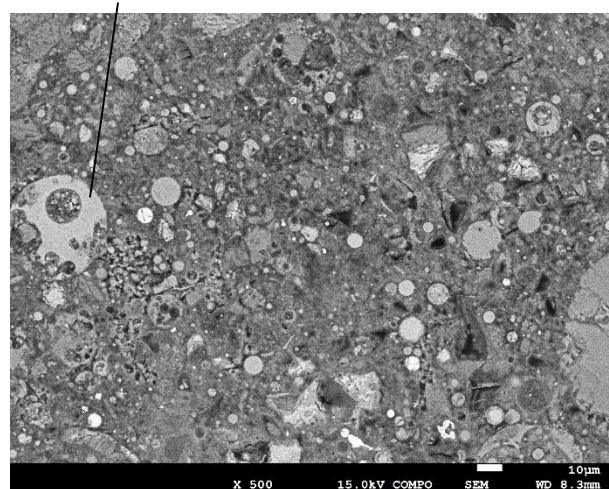


写真-5 モンゴルセメントモルタルの反射電子像の例

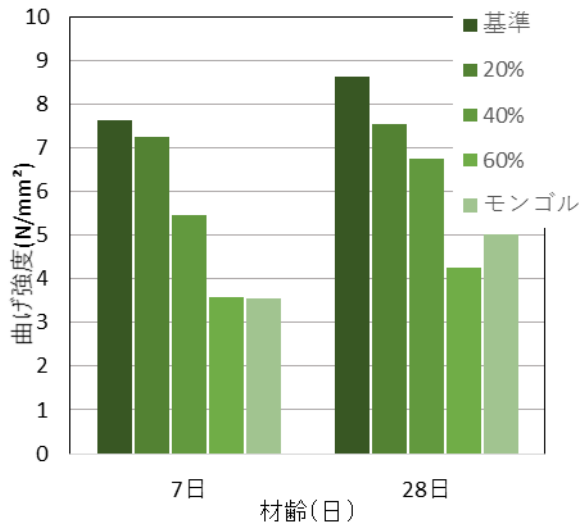


図-5 モルタルの曲げ強度

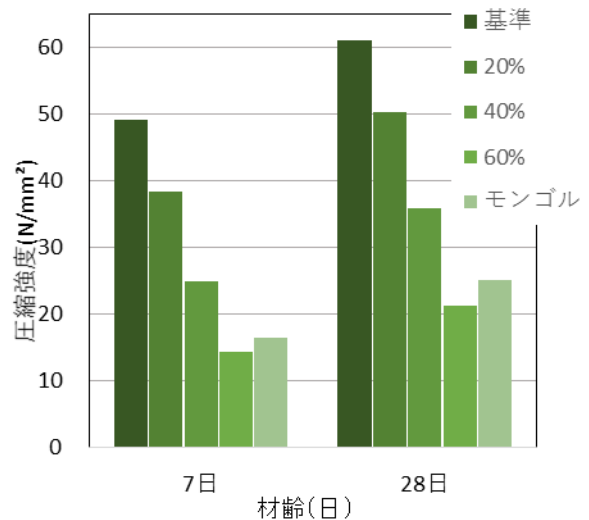


図-6 モルタルの圧縮強度

5. まとめ

本研究では、モンゴルで使用されている輸入セメントについて、力学試験を実施して品質の検討を行った。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) モンゴルセメントは SiO_2 が多く含まれ、 CaO の割合が少ない。また、X線回折の結果、石英を検出した。
- (2) モンゴルセメントのモルタル強度は、日本の普通ポルトランドセメントと比較して半分以下であった。
- (3) モンゴルセメントモルタルについて反射電子像観察を実施するとフライアッシュが多量に観察された。
- (4) 普通ポルトランドセメントにフライアッシュⅡ種を置換してモルタル供試体を作製すると、モンゴルセメントモルタルの強度はフライアッシュ置換率が60%相当であった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、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教職員および学生、笹川平和財団および苫小牧工業高等専門学校の廣川一巳教授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) 土木学会：コンクリート構造物における品質を維持した生産向上に関する提案，コンクリートライブラリー148，2016.12
- 2) Henry.M：Current state and sustainable prospects in the Mongolian concrete industry，コンクリート工学年次論文集，vol.34，No.1，pp.1846-1851，2012.7
- 3) GEC JCM 実現可能性調査（FS）：http://www2.gcc.jp/gcc/jp/Activities/fs_newmex/2013/2013fs09j_rep.pdf，（閲覧日2017年1月12日）
- 4) 湯浅昇，川岸梅和，長谷川光弘：モンゴルの建築材料—コンクリート及びゲル材料—，日本大学生産工学部第38回学術講演会建築部会講演概要集，4-27，2005.12
- 5) Scrivener, K.L. and Pratt, P.L.：Back-scattered electron images of polished cement sections in scanning electron microscope, Proc. 6th Int. Conf. on Cement Microscopy, New Mexico, pp.145-155, 1984
- 6) 渡辺暁央，五十嵐心一，川村満紀：反射電子像の画像解析による鉱物質混和材混入セメントペーストの細孔構造の解明，土木学会論文集，No.781/V-66，pp.145-155，2005.2

