

3) ECMセメントを用いた基礎構造の開発

3) Research of Building Foundation Structure Using ECM Cement

河野 貴穂 Takao Kono*¹

佐藤 英二 Eiji Satou*²

津川 澄夫 Sumino Tsugawa*³

宮本 勇貴 Yuuki Miyamoto*⁴

梗概

セメントのアルカリ性に期待しない基礎構造として、地盤改良体を用いた基礎構造の研究開発を実施した。新たに開発したECMセメントの地盤改良体への適用性を確認するため、強度発現性、六価クロムの溶質特性および耐久性について、実験室における配合試験により検討した。ECMセメントを用いた地盤改良体は、従来のセメントである高炉セメントB種を用いた地盤改良体と比較した場合、強度および耐久性において同等程度、六価クロムの溶質抑止において同等以上の性能がある事を確認した。

キーワード：セメント，地盤改良体，強度，六価クロム，耐久性

Summary

The building foundation structure with soil improvement was developed. To confirm the applicability to the soil improvement of the new ECM cement, the strength property, the solute property of the hexavalent chromium, and durability were examined in the laboratory mixing examination. The soil improvement using the new ECM cement confirmed that it was equal in strength and durability and more than the equal in the fixation of the hexavalent chromium compared with using ordinal cement.

Keywords: cement, soil improvement, strength, hexavalent chromium, durability

1 はじめに

地球温暖化の問題に対応するため、CO₂の排出量を削減することが国内外における大きな課題となっている。日本国内において、セメントの材料および製造時のエネルギーに由来するCO₂排出量は、国内総排出量の約4%といわれており¹⁾、このほとんどは、セメントの中間製品であるクリンカを製造する過程で、石灰石を焼成することにより発生している。普通ポルトランドセメントを高炉スラグに置き換え、クリンカの構成比を引き下げたセメントの利用を促進することにより、CO₂排出量を削減することが可能である。

高炉スラグの構成割合を多くした高炉スラグ高含有セメントは、微粉末量が増えるためセメントスラリーの流動性が向上するといった利点が考えられるものの、初期強度の発現が遅くまた硬化体のアルカリ性が低くなるといった問題がある。このセメントを使用したコンクリートは、アルカリ性が弱く鉄筋を防食する作用が期待できないので、アルカリによる鉄の防食作用に依存しない、地盤改良体を用いた新しい基礎構造の研究開発を行っている。このセメントを地盤改良体に適用した場合、流動性が高いことによる施工性の向上、アルカリ性が低いことによる環境負荷の低減につながると考えら得る。本論文では、地盤改良体に用いる基礎構造用のセメントの概要、地盤改良体の諸特性および地盤改良体の耐久性について報告する。

*1 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

*2 エンジニアリング本部 博士(工学) Engineering Department, Dr. Eng.

*3 東京本店 作業所 Tokyo Main Office

*4 技術研究所 研究員 Researcher, Research & Development Institute

2 地盤改良に適したセメントの構成

2.1 ECMセメントの概要

本研究に用いる高炉スラグ高含有セメントは、普通ポルトランドセメント（以下、OPCと呼ぶ）、高炉スラグ（以下、BFSと呼ぶ）、無水石膏（以下、CSと呼ぶ）および反応促進のための刺激剤（以下、刺激剤）より構成されている。各材料の化学組成をTable 1に示す。試作セメントにおける各材料の割合およびセメント製造1t当たりのCO₂排出原単位^{3), 4)}をTable 2に示す。試作したECMセメントは、OPCの含有量が強度に及ぼす影響を調査するため、OPCの含有量を15%としたECM-A0および30%としたECM-A1の2種類とした。なお、ECM-A1においては、初期強度の発現を助長するため、刺激剤をセメント質量に対して外割で0~25%添加した場合の試験も実施している。現在のJIS規格では、高炉スラグの含有率は高炉セメントB種では30~60%以下、高炉セメントC種では60~70%以下とされており、各試作セメントの高炉スラグ含有量は高炉セメントC種相当である。なお、Table 2中には、比較のためOPCおよびCO₂削減効果が高く利用促進が期待されている高炉セメントB種のCO₂排出原単位を示している。本研究に用いる高炉スラグ高含有セメントのCO₂排出原単位は、OPCに対して3割程度、高炉セメントB種に対して5割程度となっている。

Table 2 セメントの割合とCO₂排出量
Cement composition rate and CO₂ emissions

	OPC (%)	BSF (%)	CS (%)	刺激剤 (%)	CO ₂ 排出原単位 ^{2), 3)} (kg/t)
ECM-A0	15	75	10	0	146
ECM-A1	30	60	10	0~25	264~442
普通ポルトランドセメント	100	0	0	0	787
高炉セメントB種	55	45	0	0	473

Table 1 セメントの化学成分
Chemical component of cement

	比表面積 cm ² /g	化学成分 (%)											
		ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO	P ₂ O ₅	MnO
OPC	3130	0.85	21.31	5.46	2.74	64.37	1.72	2.12	0.25	0.39	0.27	0.26	0.08
BFS	4220	0.07	33.10	14.03	0.44	42.43	6.10	-	0.28	0.36	0.64	0.02	0.37
CS	4290	0.05	1.32	0.36	0.13	39.34	0.11	58.14	-	-	-	-	-
刺激剤	2000	1.30	1.00	0.00	0.00	65.60	32.10	-	-	-	-	-	-

2.2 強度発現性の調査⁴⁾

試作したセメントを用いて地盤改良体の強度特性を調査した。試料は粘性土と珪砂を質量比1:1で混合した混合土を用いた。また、開発したセメントとの強度を比較するため、市販の高炉セメントB種を用いた。試験に用いた材料および試験における割合をTable 3, Table 4にそれぞれ示す。本研究においては、高強度の地盤改良体（一軸圧縮強度 $q_u = 5\text{N/mm}^2$ 以上）を対象としており、注入するセメントミルクの水セメント比は60~100%、セメント添加量は改良対象土1m³当たり200~400kgとした。ECM-A1における刺激剤は改良対象土1m³当たり0~50kgとした。ソイルセメントの練混ぜは、JIS R 5201に準じたモルタルミキサーを用い、あらかじめ水とセメントを2分間混合攪拌した後、試料土を投入し5分間練混ぜた。

強度試験結果の一例として、W/C=100%の場合の結果をFig.1に示す。ECM-A0およびECM-A1のセメント添加量が200kg/m³の場合、1W強度がほとんど発現していない。また、ECM-A0の300kg/m³以下およびECM-A1の200kg/m³の場合、4W強度がほとんど発現していない。これはセメント中のOPCの絶対量が少ない

Table 3 使用材料
Materials

試料土	粘性土と珪砂の混合土（質量比1:1） ：湿潤密度1.927g/cm ³ 、含水比22.6% 粘性土（神奈川県横浜市） （砂分8.4%、シルト分44.5%、粘土分47.1%） 珪砂（豊浦珪砂）
セメント	ECM-A0, ECM-A1 高炉セメントB種
水	上水道水

Table 4 試験の割合
Test conditions

セメントの種類	W/C (%)	セメント量 (kg/m ³)	刺激剤 (kg/m ³)
ECM-A0	60, 80, 100	200, 300, 400	0
ECM-A1	100	200, 300, 400	0, 30, 50
高炉B種	60, 80, 100	200, 300, 400	0

ため、水和反応が起こらなかったと考えられる。

ECM-A1において、W/C = 100%の条件における刺激剤の添加量を変えた場合の強度試験結果をFig.2に示す。刺激剤の添加により、1Wにおいて高い強度が発現していることが判る。初期強度発現における刺激剤の有効性を確認できた。強度試験結果に基づき、地盤改良体を用いるECMセメントとしては、ECM-A1（OPC30%，BFS60%，CS10%）を用いることとする。

3 ECMセメントを用いた地盤改良体の特性

3.1 強度特性⁴⁾

開発したECMセメントを用いた地盤改良体を基礎構造に用いるためには、各種地盤において適切な強度を発現する必要がある。強度発現がし難い粘性土を対象として、実験室で強度の試験を実施した。試験においては、ECM-A1との強度比較を行うため、高炉B種セメントを用いた地盤改良体の強度も合わせて調査した。地盤改良体作製に用いた土の性質をTable 5に示す。対象とする土は東京、横浜、大阪の3地点の原位置より採取した沖積粘性土と市販の蛙目粘土である。蛙目粘土は(株)ヤマスの原蛙目粘土100MS⁵⁾を用いた。

Fig.3に、地盤改良体の一軸圧縮強さ（1W強度）の結果を示す。高炉スラグ高含有セメントを用いた地盤改良体の1W強度は高炉セメントB種を用いたものと比べて同等以上である。高炉スラグ高含有セメントを用いた地盤改良体が十分に初期強度を発現することを確認した。Fig.4に地盤改良体の一軸圧縮強さ（4W強度）の結果を示す。高炉スラグ高含有セメントを用いた地盤改良体の4W強度は、高炉セメントB種を用いたものと比べて、同等以上である。特に、東京粘土では高炉スラグ高含有セメントを300kg/m³、400kg/m³添加した地盤改良体の4W強度は、強度が小さい高炉セメントB種の2倍以上であり、高強度の地盤改良体にも適したセメントであると考えられる。

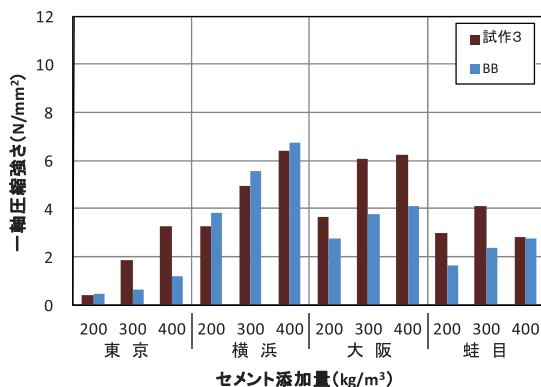


Fig.3 一軸圧縮強度（一週）
Unconfined compressive strength (1 week)

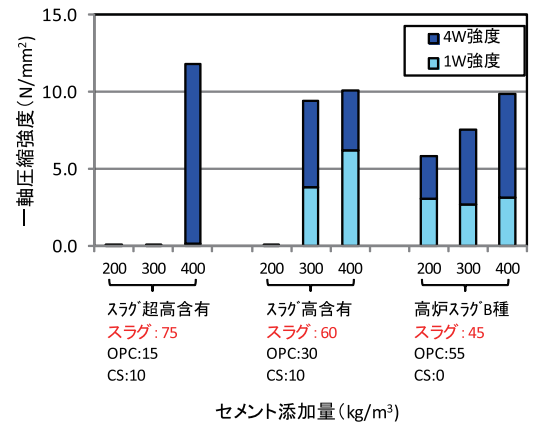


Fig.1 一軸圧縮強度（セメントの構成の影響）
Unconfined compressive strength
(Influence of cement composition)

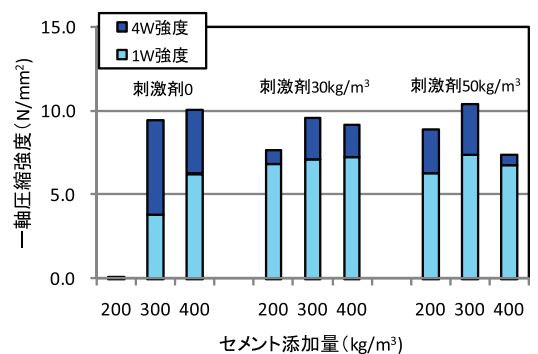


Fig.2 一軸圧縮強度（刺激剤の影響）
Unconfined compressive strength (Influence of stimulant)

Table 5 試験に用いた地盤の性質
Soil conditions

採取場所		東京	横浜	大阪	蛙目 ³⁾
分類		粘性土	粘性土	粘性土	粘性土
湿潤密度 (g/cm ³)		1.65	1.52	1.70	1.60
含水比 (%)		58.6	81.4	50.1	69.2
粒度	砂分 (%)	7.6	8.4	5.8	0.0
	シルト分 (%)	53.0	44.5	57.1	17.4
	粘土分 (%)	39.5	47.1	37.1	82.6
液性限界 (%)		70.7	91.5	63.7	69.2
塑性限界 (%)		31.1	38.0	26.4	30.3
pH		7.7	8.2	8.0	7.8

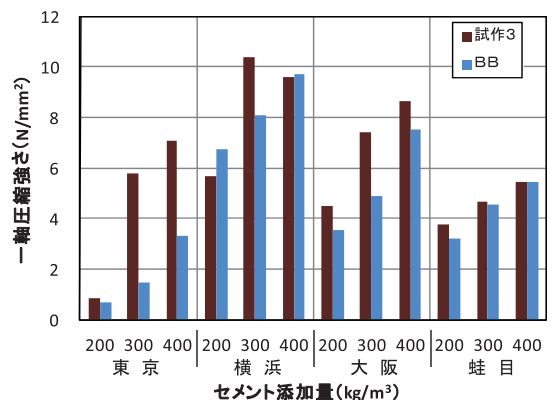


Fig.4 一軸圧縮強度（四週）
Unconfined compressive strength (4 week)

3.2 六価クロムの溶出特性⁴⁾

Fig.5に、地盤改良体の六価クロム溶出量を示す。六価クロム溶出量の検査で溶出検知できる最低量が0.02mg/Lであるため、それ未満のものは0.019mg/Lとしてプロットしている。高炉スラグ高含有セメントの六価クロム溶出量はすべてのケースで0.02mg/L以下であり、環境基準値を十分に満たしている。一方、高炉セメントB種の六価クロム溶出量は0.02未満～0.06mg/Lであり、一部で環境基準値を超える値もあった。ECM-A1を使用した地盤改良体は高炉セメントB種を使用したものに比べて、六価クロム溶出を抑えることができるといえる。

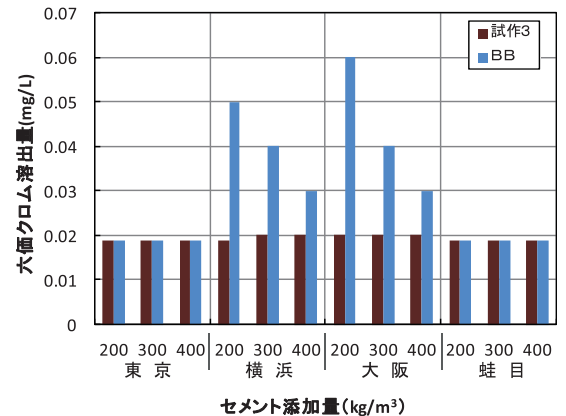


Fig.5 六価クロム溶出量 (ECM-A1および高炉B種)
Elution amount of hexavalent chromium

3.3 耐久性⁶⁾

ECMセメントを用いた地盤改良体の耐久性を確認するためにECM-A1を用いた砂質土および粘性土の地盤改良体の長期的な強度特性を検討した。なお、耐久性の研究は、ECM-A1が開発された平成21年に試験体を作製したため、本報告では半年までの結果について示す。

実験に用いた土の性質をTable 6に示す。砂質土として珪砂と蛙目粘土を質量比9：1で混合したものを使用し、粘性土として蛙目粘土を使用した。混練りおよび養生水には蒸留水（JIS規格A4クラス）を用いた。地盤改良体の調合および養生条件をTable 7に示す。CASE1・2は砂質土の改良体、CASE3・4は粘性土の改良体である。地盤改良体の実際の養生状態を模擬するため、砂質土の改良体は、砂質土地盤の透水性が高いことを考慮し蒸留水中で養生した。粘性土の改良体は粘性土中で養生した。養生に用いた粘性土は、供試体作製に用いたものと同じ蛙目粘土および蒸留水で作製した粘土とした。なお、これらの養生とは別に標準水中養生条件で養生を行い、養生環境の影響を受けない強度もあわせて検討した。

Table 6 試験に用いた地盤の性質
Soil conditions

分類	性 状	含水比
砂質土	珪砂と蛙目粘土を質量比9：1で混合したもの ・珪砂6号（飯砂産） $D_{50} = 0.28\text{mm}$, 比重2.6 最大密度 $\rho_{dmax} = 1.741\text{g/cm}^3$ 最小密度 $\rho_{dmin} = 1.395\text{g/cm}^3$ ・蛙目粘土：下表参照	25.0%
粘性土	蛙目粘土100% （株）ヤマスの原蛙目粘土100MS） 湿潤密度 1.6 g/cm^3 粒度：砂分0%, シルト分17.4%, 粘土分82.6% 液性限界69.2%, 塑性限界30.3%	69.2%

Table 7 試験体の調合と養生条件
Test and curing conditions

CASE名	対象土	セメント の 種類	調合条件			養生 条件
			W/C (%)	セメント 添加量 (kg/m ³ 土)	混練水	
CASE1	砂質土	試作3	60	400	精製水	
CASE2		BB				
CASE3	粘性土	試作3	100		粘性土 精製水	
CASE4		BB				

地盤改良体の作製は以下の手順とした。

- 1) 地盤改良体をJIS R 5201⁷⁾ に準じて作製。
- 2) 地盤改良体を一面開放プラスチック容器（Φ115×114mm）へ充填。
- 3) 充填した地盤改良体を一週間封緘養生。
- 4) 砂質土の改良体は、6Lの養生容器に開放面を横向きに入れ6Lの蒸留水（JIS規格A4クラス）を注水した。粘性土の改良体は6Lの養生容器に開放面を上向きに入れ、開放面を厚さ10cmの粘性土で覆い、さらにその上に2cmの蒸留水を注水した。養生室の室温は $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度は95%以上とした。
- 5) 砂質土の改良体は、4週に1回、養生水の交換を行い、粘性土の改良体はそのままの状態です所定期間（材齢28日、材齢180日）養生した（Photo 1参照）。また、各CASE、各材齢においてΦ50×100mmの改良体を3本作製し、封緘状態と同養生室

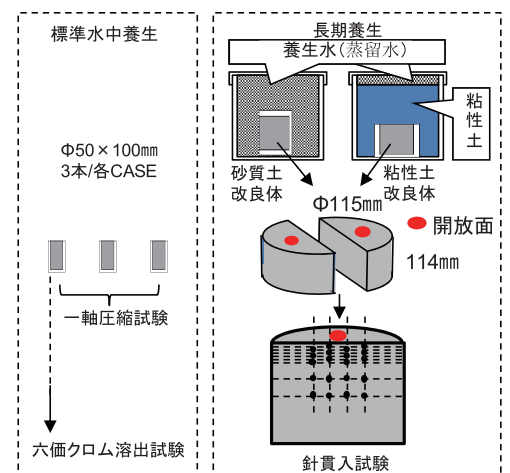


Fig.6 調査方法の概要
Outline of strength investigation

にて所定期間、標準水中養生した。Fig.6に作製した地盤改良体の実験方法を示す。標準水中養生した地盤改良体では一軸圧縮試験を行った。蒸留水もしくは粘性土中で養生した地盤改良体の開放面からの強度変化を試験するため、開放面から深さ方向に15mmまでは2.5mmピッチ、15mm以深は30mm、45mmの計8深度の強度を針貫入試験により測定した。

Fig.7に標準水中養生した改良体（ $\Phi 50 \times 100\text{mm}$ ）の一軸圧縮強度を示す。ECM-A1を用いた砂質土および粘性土の改良体の強度は、材齢28日および材齢180日でともに高炉セメントB種を用いたものと同等である。材齢28日から材齢180日までの砂質土および粘性土の改良体の強度増加はECM-A1、高炉セメントB種いずれも少なかった。

標準水中養生における、材齢28日と材齢180日の一軸圧縮強度にほとんど差がないため、養生環境の影響を受けない健全部（中心部分）の強度は、ほぼ等しいと判断し、材齢28日に比べ材齢180日で表面部の強度が低下している部分を強度の低下量とする。Fig.8およびFig.9に材齢28日および材齢180日の砂質土および粘性土の針貫入強度比を示す。Fig.8およびFig.9は、健全部（養生環境の影響を受けないと考えられる改良体の開放面からの深さ30mm・45mmの強度の平均値）に対する各深度の強度比で示している。

Fig.8に示す砂質土の改良体では材齢28日の深さ2.5mmの強度比は、ECM-A1および高炉セメントB種とともに0.5程度となっている。この要因としてセメント水和物の溶出とともに改良体作製時のブリージングの影響等が考えられる。Fig.8およびFig.9に示す様に、材齢180日のECM-A1を用いた改良体における強度低下がみられる深さは、砂質土で5mm、粘性土で12.5mmである。高炉セメントB種では砂質土で12.5mm、粘性土では10mmである。材齢180日の粘性土の改良体は、養生面からの水和物の溶出等の影響を受け、強度の低下が進んでいると考えられる。ただし、強度の低下量はECM-A1と高炉セメントB種を用いたものとほぼ同等である。材齢180日までの実験の範囲ではECM-A1を用いた地盤改良体は、高炉セメントB種を用いた地盤改良体と同等の耐久性を有していると考えられる。

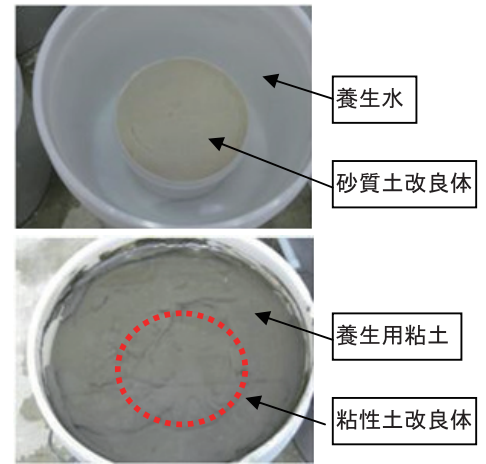


Photo 1 養生状況
Curing condition

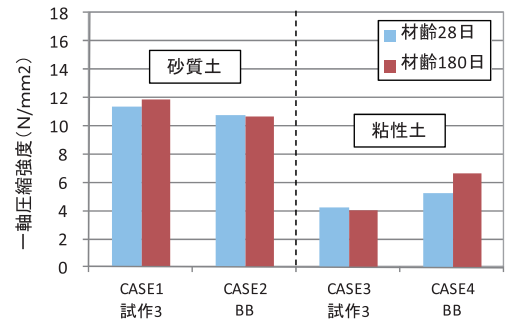


Fig.7 六価クロム溶出量 (ECM-A1および高炉B種)
Elution amount of hexavalent chromium

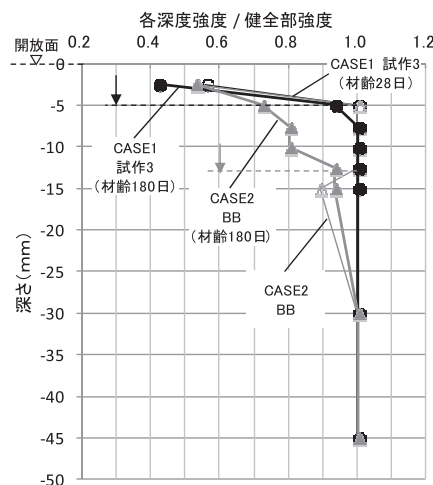


Fig.8 強度比分布 (砂質土)
Distribution of strength ratio (sand)

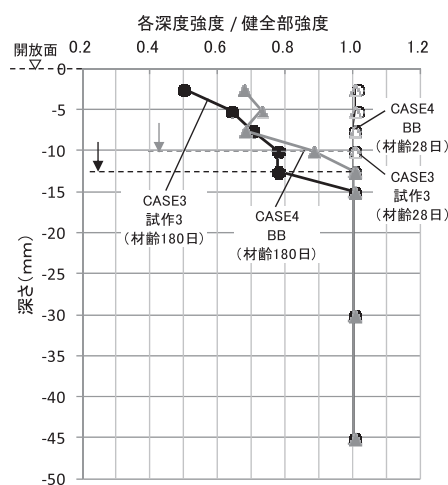


Fig.9 強度比分布 (粘性土)
Distribution of strength ratio (silt)

4 まとめ

CO₂排出量の削減を目的として、高炉スラグの含有率の高いECMセメントを開発し、そのセメントを用いた地盤改良体の強度特性、六価クロム溶質特性および耐久性を示した。ECM-A1（OPC30%，BFS60%，CS10%）を用いた地盤改良体は、高炉セメントB種を用いた地盤改良体と比べ、強度および材齢180日における耐久性は同等であることおよび六価クロムの溶出量を抑止する能力が高いことを確認した。室内における試験結果より、ECM-A1は高強度地盤改良体に適したセメントであると判断できる。

参考文献

- 1) 堺孝志, 他: コンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1-10, 2008
- 2) 経済産業省: 平成20年度セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素対策に関する調査-混合セメントの普及拡大方策に関する検討報告書, pp.12-14, 2009
- 3) 土木学会: 土木学会コンクリートライブラリー125, コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案), pp.50-51, 2005
- 4) 河野貴穂, 他: 高炉スラグ高含有セメントを用いた地盤改良体の特性(その1)(その2), 第45回地盤工学研究発表会, pp.565-568, 2010
- 5) 齋藤聡: 粘性土を対象にしたセメント改良土の強度式, 竹中技術研究報告, No.55, 1999
- 6) 宮本勇貴, 他: 高炉スラグ高含有セメントを用いた地盤改良体の特性(その5), 第46回地盤工学研究発表会 pp.565-566, 2011
- 7) JIS R 5201, セメントの物理試験方法