フッ素の溶出を軽焼マグネサイトで抑制した 廃石膏ボード粉を含む粘土の安定処理効果[†]

山田 幹雄* 佐野 博昭** 坪川 茂***

Fluoride Leaching Control of Waste Plasterboard Powder Using Light Burned Magnesite and Its Applicability to the Stabilization/Solidification of Clay

by

Mikio YAMADA*, Hiroaki SANO** and Shigeru TSUBOKAWA***

The reuse of waste plasterboard must be promoted more to maintain the residual capacity of the controlled type landfill sites because it is predicted that the amount of plasterboard retrieved with demolition works of building continues increasing for the time being. However, mixing the board comminuted while separating base paper namely the powdery dihydrate gypsum into ground, the leaching concentration of fluoride which has been contained in plasterboard since inception by coming from raw materials might exceed the environmental quality standards for soil pollution.

The light burned magnesite has been early used for not only the improvement of soft ground but also the insoluble treatment of heavy metal pollution soil. Referring to such on-site achievements, we have made the samples which consist of powdery dihydrate gypsum, light burned magnesite and distilled water. Having added magnesite of 10% and water of 50% for the mass of gypsum, fluoride leaching concentration satisfied a target level (hereafter referred to as “insolubilization treated powder”). Moreover, regarding clay and sand mixed the insolubilization treated powder of which content was up to 30%, it was guessed that those might not re-leach fluoride under the stirring with an acid or alkaline water solution. Successively we performed the *CBR* test, box shear test and unconfined compression test to clarify a stabilization effect brought by mixing the insolubilization treated powder into clay. According to the results obtained from these tests, clay stabilized with the insolubilization treated powder surely indicated a tendency to increase bearing capacity and to develop strength as compared with clay in which only lime or cement was added.

Judging from the novel findings mentioned above, it is possible to utilize the insolubilization treated powder as part of the soil materials.

Key words : Waste plasterboard, Fluoride, Light burned magnesite, Leaching test, California bearing ratio, Constant pressure shear strength, Unconfined compressive strength

1 緒 言

建物新築系と解体系とを合わせた廃石膏ボードの排出量は増加の一途を辿っており、2020年には2011年を48万トン上回る163万トンに達する見通しにある。同時に、排出量に占める解体系の割合も漸増して9割近くになる模様である。一方で、リサイクル率は新築系の約70%に対して解体系は10%程度に止まるとのことから、とくに後者の用途拡大を図って管理型処分場の負荷軽減に寄与する必要がある。¹⁾なお、廃石膏ボードの最終処分場が安定型から管理型へ変更された端緒ともいえる硫化水素ガスの発生について、これの抑制には酸化鉄の添加が有効とされている。²⁾

一般に、石膏ボードには原料の天然石膏や副産石膏由来するフッ素が含まれており、ボード用原紙と分離、

粉碎した状態(二水石膏)のままで、あるいは、半水石膏に加工して土に混ぜ合わせると、フッ素の溶出量が土壌環境基準に抵触する恐れがある。³⁾

この点に関して、既往の研究^{4), 5)}によれば、再生半水石膏と高炉セメントB種とを併用したときに生成されるエトリンガイトがフッ素の不溶化に効果を発揮することである。また、セメントの添加は半水石膏単体使用時に現れる再泥化を防ぐ役割をも果たすようである。⁵⁾

上記の再生品のみならず、解体系廃石膏ボードのリサイクルを促進するには二水石膏からのフッ素溶出を抑制した上で、例えば土質材料の一部への転用を目指すことも方策の1つといえる。

そこで、著者らは浅層地盤改良、土系舗装や重金属等に汚染された土壌の固化・不溶化処理にあたって、予て

[†] 原稿受理 平成23年2月28日 Received Feb. 28, 2011 ©2012 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 福井工業高等専門学校環境都市工学科 〒916-8507 鯖江市下司町, Dept. of Civil Eng., Fukui National College of Tech., Geschi-cho, Sabae, 916-8507

** 正 会 員 大分工業高等専門学校都市・環境工学科 〒870-0152 大分市牧, Dept. of Civil and Environmental Eng., Oita National College of Tech., Maki, Oita, 870-0152

*** 福井工業高等専門学校教育研究支援センター 〒916-8507 鯖江市下司町, Technical Support Center, Fukui National College of Tech., Geschi-cho, Sabae, 916-8507

Table 1 Properties of waste plasterboard powder used.

Particle density (g/cm ³)	Texture [d : Grain diameter]					pH [H ₂ O]	f.w. ⁸⁾ (%)
	2000 ≤ d < 4750 μm (%)	850 ≤ d < 2000 μm (%)	250 ≤ d < 850 μm (%)	75 ≤ d < 250 μm (%)	d < 75 μm (%)		
3.02	15.6	35.3	42.8	6.2	0.1	7.4	0.5

(unit : mg/L)

Soil leachate standard	Class 2 Designated hazardous substances (Heavy metals etc.)							
	Cd	Cn	Pb	Cr(VI)	As	Hg	Se	F
Leaching concentration	0.001	not detectable	<0.002	<0.01	<0.005	<0.0005	<0.001	5.7
Target level of sample solution	≤0.01	not detectable	≤0.01	≤0.05	≤0.01	≤0.0005	≤0.01	≤0.8

よりカルシウム系に加えてマグネシウム系の材料も多用されている実績^{6), 7)}に着目し、廃棄物中間処理施設から入手した廃石膏ボード粉を対象に、初めにフッ素溶出量の低減におよぼす軽焼マグネサイトの有用性を調べた。次に、フッ素を不溶化した「廃石膏ボード粉-軽焼マグネサイト混合物」を含む粘土や砂の pH の変化（酸、アルカリ）に対する安定性を確かめた。さらに、当該混合物を含む粘土の安定処理効果を CBR 試験、定圧一面せん断試験および一軸圧縮試験を通して追究した。

2 廃石膏ボード含有フッ素の不溶化処理

Table 1 は、試料に用いた廃石膏ボード粉の物理・化学的性質および第二種特定有害物質の溶出量（環境省告示第 18 号）を示す。ここに、f.w. は JIS R 9101 の方法で求めた水分付着率⁸⁾を表す。廃石膏ボード粉の粒度組成の約 8 割を粗・中砂分（径 2000 ~ 250 μm）が占めるが、径 4750 ~ 850 μm のふるいには原紙屑が残留し、その率は粉質量の 2% 未満であった。溶出量をみると、フッ素 (F) のみ土壤環境基準を超越し、7 倍の濃度となっている。ただし、土壤含有量（環境省告示第 19 号）は基準 (4000mg/kg) を下回る 1100mg/kg であった。

Table 2 は廃石膏ボード粉、軽焼マグネサイト (MgO 分 92%, pH = 11.4)、蒸留水の組み合わせを示す。軽焼マグネサイトの色調は褐色に近く、75 μm ふるいを通して 45 μm ふるいに 1.8% 留まる粉体である。ここで、加水を前提としたのは、試行の段階において無水の配合ではフッ素溶出量が土壤環境基準に全く適わない 2 ~ 3mg/L であった経緯に拠るものである。

Type A, B, C の混合物の作製にあたっては、ポリエチレン製の袋の中に廃石膏ボード粉、軽焼マグネサイト

の順に入れ、袋ごと左右に振って攪拌した。続いて、蒸留水を少量ずつ注いで静置、その後、風（室温）を当てて乾かした。この時点で径 5mm 程度の粒 (Fig. 1 (a)) となり、これを袋の外側から指で圧して径 850 ~ 75 μm に砕いた (Fig. 1 (b))。このときの f.w. は、加水量に応じて 20.4 ~ 31.8% であった。

混合物の入っている袋は厳重に封をして 20℃ に調節した恒温器内に最短で 3 日間、最長で 28 日間静置した後、溶出試験の前処理に移行した。

Fig. 2 は Type A, B, C の混合物におけるフッ素溶出量 F および pH の経時変化を示す。F は 0.6 ~ 1.7mg/L の範囲で、pH は 10.5 ~ 11.2 の範囲で変動するものの、これらの推移に日数 De の関与は認められず、結果として Type B（記号●）の混合物が土壤環境基準を満足した。

この混合物の X 線回折パターンを Fig. 3 に示す。硫酸塩 (An, Ba, G) は廃石膏ボード粉で常に同定されることから、 $2\theta \approx 19^\circ, 38^\circ$ にピークの現れる水酸化物 (M) の生成がフッ素の溶出を抑制する主因とみなされる。⁹⁾

参考までに、Type B の混合物の 4 ヶ月経過時におけるフッ素溶出量 F = 0.7mg/L、また、含有量が 670mg/kg の別の廃石膏ボード粉を用いて Type A の混合物を作製したところ、F は粉単体の 3.2mg/L から 0.8mg/L へと減少した。このように、日数を経ても F に増加の兆しはみられず、かつ、軽焼マグネサイトの添加量は廃石膏に含まれるフッ素の量によって加減が可能といえる。

いずれにしても、土壤環境基準に抵触しない Type B の混合物を、以後「不溶化処理済粉」と称することにする。

次に、不溶化処理済粉を Table 3 に示す粘土（大分市産）や砂（福井県越前市産）に混入したときのフッ素溶

Table 2 Mix proportion of waste plasterboard powder, light burned magnesite and distilled water.

Type	Waste plasterboard powder	Light burned magnesite	Distilled water
A	200g	10g (5%)	100mL (50%)
B		20g (10%)	
C	200g	10g (5%)	140mL (70%)

Note : Percentage indicates the rate for mass of waste plasterboard powder.

Fig. 1 Waste plasterboard powder-light burned magnesite mixture.

Fig. 2 Variation with time of fluoride leaching concentration and pH in three types.

出量 F を調べた。不溶化処理済粉の $f.w.$ = 22.7%, F = 0.7mg/L, pH = 11.0 であり、粘土や砂の F は単体でいずれも 0.1mg/L 未満であった。粘土の含水比 w は 27% を目標に、砂は 20% を目標に調整したが、これらの値は最大乾燥密度の 95% に相当する密度と締固め曲線とが交差する点（湿潤側）の w にほぼ等しい。

試験の手順としては、不溶化処理済粉を乾燥質量比で 10% または 30% 混入した粘土、砂のフッ素溶出量 F を、

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of type B.

まず、7 日が経過した時点で環境省告示第 18 号溶出試験方法 (JIS K 0102 34.1, $5.8 \leq \text{pH} \leq 6.3$ の溶媒) で測って土壤環境基準に照査した。続いて、適合した検体のみを 28 日間保存、溶媒に硫酸水溶液（濃度 0.769mmol/L）と消石灰水溶液（3.85mmol/L）とを用いる方法⁹⁾に準拠してフッ素再溶出の有無を調べた。ここに、検体と水溶液との混合割合は 1 : 10（重量 : 体積）である。

2 つの方法で測定したフッ素溶出量 F を、検体の pH と併せて Table 4 に示す。マイナスイオンに帯電している粘土への不溶化処理済粉の混入が少ない場合 (10%) はフッ化物イオン F が退けられる傾向にあるものの、それを除けば、土質や溶媒の区別なく土壤環境基準を上回らなかった。なお、文献 9) の試験法に廃棄物は含まれないので、得られた結果は効用を推し量る目安に止まる。それでも、不溶化処理済粉を混入した土は pH の変化に対する安定性を担保できる公算が大きいといえよう。

Table 3 Properties of clay and sand used.

Sample	Particle density (g/cm ³)	Grain size distribution			Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Plasticity index	Optimum water content (%)	Maximum dry density (g/cm ³)	Coefficient of permeability (m/s)	Ignition loss (%)	pH [H ₂ O]
		Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)								
Oita clay	2.67	23.1	46.9	30.0	53.5	25.8	27.7	23.6	1.58	1.08×10^{-9}	9.8	5.9
Echizen sand	2.62	72.7	14.7	12.6	NP			16.3	1.76	2.74×10^{-6}	3.7	7.5

Table 4 Fluoride leaching concentration and pH of soil mixed with the insolubilization treated powder.

Sample	Mixing rate of insolubilization treated powder [in dry mass] (%)	Solvent with $5.8 \leq \text{pH} \leq 6.3$		Acid solution ⁹⁾		Alkaline solution ⁹⁾	
		Leaching concentration (mg/L)	pH	Leaching concentration (mg/L)	pH	Leaching concentration (mg/L)	pH
Oita clay	10	1.5	7.4	excluded from test		excluded from test	
	30	0.8	7.7	0.7	8.8	0.8	9.6
Echizen sand	10	0.7	8.1	0.7	9.0	0.6	10.8
	30	0.6	8.9	0.8	9.9	0.7	11.2

3 安定材を添加した不溶化処理済粉混入土の固化性状

次の段階として、不溶化処理済粉の混入が安定処理土の支持力および強度特性におよぼす影響を調べた。

具体的には、粘土（大分市産）に安定材のみを添加して作製した供試体（Case I）、安定材の添加に先立ち粘土の乾燥質量に対して 10% の不溶化処理済粉を混入した供試体（Case II）、不溶化処理済粉の混入率を 30% とした供試体（Case III）の *CBR* を求めてこれらを比較した。そして、溶出試験（JIS K 0102 34.1：フッ素，JIS K 0102 65.2：六価クロム）を経て危惧のない安定処理材料であることを確認した配合については強度定数（粘着力 c_d ，せん断抵抗角 ϕ_d ）や一軸圧縮強さ q_u を求める手筈とした。

ここで、前出 Table 4 にも示したように、不溶化処理済粉を 10% 含む粘土のフッ素溶出量 F は土壤環境基準を 2 倍近く上回っており、厳密にはこの研究の主意に合うものとは言いが、配合による違いを明らかにする目的で *CBR* 試験までは敢えて供することにした。

安定材には市販の消石灰 (L)、セメント系固化材 (C)、高炉セメント B 種 (S) を使用した。添加率は Case I では粘土の乾燥質量の 0、3、5%、Case II および III では粘土の乾燥質量と不溶化処理済粉の湿潤質量との合計に対して 0、3、5% とした。なお、添加率を添加量に換算すると 3% は概ね 45kg/m^3 に、5% は 70kg/m^3 に当たる。

粘土の設定含水比 w ，不溶化処理済粉の $f.w.$ は前章に述べた通りであり、安定材を添加する前の Case II の砂分は 27%、III では 31% と粗・中砂分が主体の不溶化処理済

粉の増量にともない、粘土単体（前出 Table 3）に比べて粒度組成に占める割合が大きくなった。反面、液性限界は Case II で 59%、III では 61% と少しずつ高くなった。

Table 5 は全 21 種の配合のもとで求めた吸水膨張量、銅製ピストン貫入量 2.5mm における $CBR_{2.5}$ および *CBR* 試験を終えた供試体で採取した塊からのフッ素 (F)、六価クロム (Cr (VI)) の溶出量を示す。ここに、供試体の養生方法と期間は、安定材無添加の配合 (N) では水浸のみ 4 日間、消石灰 (L) 添加では水浸 4 日に先行して空気中 6 日の計 10 日間、セメント系固化材 (C) と高炉セメント B 種 (S) 添加では空気中 3 日、水浸 4 日の計 7 日間とした。

水浸養生で生じた吸水膨張量をみると、大半の供試体が 0.1mm 未満であり、これに配合による相違はない。 $CBR_{2.5}$ は Case I < II < III、すなわち、不溶化処理済粉を含まない供試体よりも混入した供試体で、さらに、量を多く配合した供試体で大きくなっている。また、 $CBR_{2.5}$ は安定材の種類とも関連し、3 つの Case でいずれも $S < C < L$ となり、この傾向は添加率の高い供試体でより明確に現れている。安定材を添加した供試体から土壤環境基準を超えるフッ素 (F) は溶出しなかったが、六価クロム (Cr (VI)) については、セメント系固化材 (C) の使用に際して大部分で土壤環境基準 (0.05mg/L) に接触した。

上記の結果を踏まえて、引き続き行う定圧一面せん断試験や一軸圧縮試験では Case I および III の N、L₃、S₃ の 6 種の配合を扱うことにした。L₅ は添加量の割に

Table 5 Results of *CBR* and leaching tests under various mix proportions.

Case		Mixing rate of insolubilization treated powder [in dry mass] (%)	Additive content of stabilizer			CBR test			Leaching test	
			Hydrated lime (%)	Cementitious soil improving agent (%)	Portland blast-furnace slag cement (%)	Dry density (g/cm ³)	Amount of swelling (mm)	CBR _{2.5} (%)	Leaching concentration	
									F (mg/L)	Cr(VI) (mg/L)
I —	N	0	0			1.50	<0.1	1.7	<0.1	<0.01
	L ₃		3	—	—	1.55	<0.1	17.6	<0.1	excluded from test
	L ₅		5	—	—	1.57	<0.1	47.0	<0.1	
	C ₃		—	3	—	1.56	<0.1	9.1	<0.1	0.07
	C ₅		—	5	—	1.59	<0.1	18.9	<0.1	0.07
	S ₃		—	—	3	1.55	<0.1	9.1	<0.1	<0.01
	S ₅		—	—	5	1.58	<0.1	15.2	<0.1	<0.01
II —	N	10	0			1.48	0.23	2.7	1.5	excluded from test
	L ₃		3	—	—	1.53	<0.1	53.0	<0.1	
	L ₅		5	—	—	1.54	0.18	116.6	<0.1	
	C ₃		—	3	—	1.53	<0.1	23.5	0.3	0.07
	C ₅		—	5	—	1.56	0.11	49.2	0.3	0.06
	S ₃		—	—	3	1.53	<0.1	14.8	0.6	<0.01
	S ₅		—	—	5	1.56	<0.1	26.1	0.3	<0.01
III —	N	30	0			1.45	<0.1	6.7	0.8	excluded from test
	L ₃		3	—	—	1.50	0.15	77.1	<0.1	
	L ₅		5	—	—	1.50	<0.1	187.4	<0.1	
	C ₃		—	3	—	1.50	<0.1	27.9	0.4	0.04
	C ₅		—	5	—	1.51	0.12	63.7	0.2	0.06
	S ₃		—	—	3	1.50	<0.1	25.3	0.5	<0.01
	S ₅		—	—	5	1.51	<0.1	47.4	0.3	<0.01

Note : Regarding additive content of stabilizer, percentage in case I is a rate for the dry mass of clay, and percentage in case II and III is a rate for the total mass of clay and insolubilization treated powder.

$CBR_{2.5}$ が大きかった経緯を考慮して、試験の対象から外した。

これらの Case において、乾燥密度は CBR 試験で作製した供試体での実測値 $1.45 \sim 1.55 \text{ g/cm}^3$ を目処とした。

一面せん断試験には在来型の装置（荷重計容量 4.9 kN 、変位測定限度 30 mm ）を用いた。せん断変位速度の最低は 0.1 mm/min であって排水、排気状態の充足が難しいので、実験効率を優先して 0.2 mm/min に設定した。

内径 100 mm 、高さ 50 mm のカッターリングの中に入れた 6 種の配合の材料を締め固め用円板で圧すことによって作製した供試体のうち、安定材を含む L_3 、 S_3 はリングごとビニールで包んで密封し、 20°C に調節した恒温器内に 3、7、14 日間静置した後、供試体をリングから取り出してせん断箱に移した。

試験結果を Fig. 4 に示す。粘着力 c_d に不溶化処理済粉混入の有無 (Case I と III)、安定材の種類 (L と S) や養生日数の長短 (3 ~ 14 日) が関与する兆候は認められない。一方、せん断抵抗角 ϕ_d は Case III の方で、つまり、不溶化処理済粉を混入した供試体で明らかに大きくなり、安定材添加 (L_3 、 S_3) のもとでは経時的な変化も現れている。

このように、せん断強さ τ_f は専ら ϕ_d に依存し、かつ、 τ_f は Case I < III の関係にあることがわかった。さらに、Fig. 4 において Case III の安定処理には高炉セメント B 種 (S) に比べて消石灰 (L) の使用がより効果的といえる。

一軸圧縮試験には容量 19.6 kN の載荷装置を使用し、ひずみ速度は $1\%/min$ に設定した。供試体の寸法は直径 50 mm 、高さ 100 mm であり、二分割モールドの中に入れた 6 種の配合の材料を静的に締め固めて作製した。

Case I、III ともに L_3 、 S_3 についてはラップフィルムで供試体を包み、 20°C で最長 180 日間養生した。

Fig. 5 は Case I- L_3 、 S_3 および III- L_3 、 S_3 の供試体で求めた一軸圧縮強さ q_u の推移を示す。養生日数 D_c は、対数目盛で表してある。いずれの Case においても q_u と D_c の対数との間には高い相関をもって直線関係が成り立ち、それらの回帰直線の勾配は Case I < III となっている。これを $D_c = 1$ から 180 までの q_u の増分でみると、Case I- L_3 、 S_3 ではそれぞれ 0.9 MPa 、 1.0 MPa 、III- L_3 、 S_3 では 1.3 MPa 、 1.1 MPa であり、先の $CBR_{2.5}$ やせん断強さ τ_f ほどではないにせよ、 q_u の発現過程を追跡しても不溶化処理済粉を含む粘土には消石灰 (L) を配合するのが幾分有利との結果にいたった。

180 日間の養生を経て一軸圧縮試験を終えた供試体から塊（検体）を採取して、X 線回折を行った。例として、Case III- L_3 の結晶情報を Fig. 6 に示す。水酸化マグネシウム (M) に加えて $2\theta \approx 9^\circ$ 、 16° に重金属等を固定するエトリンガイト (E) の生成が確認できる。なお、 MgO は土に含まれている SiO_2 などの可溶性非晶質成分と結合して、安定した硬化化合物を形成するようである。¹⁰⁾

Fig. 4 Influences of mix proportion and curing time on strength parameter.

Fig. 5 Relationship between strength and curing time.

An : CaSO₄   G : CaSO₄·2H₂O
 M : Mg(OH)₂   Q : α-SiO₂
 E : Ettringite   Ka : Kaolinite   Mu : Muscovite

Fig. 6 X-ray diffraction pattern of a specimen cured for 180 days.

4 結 言

解体系廃石膏ボードをリサイクルする際の選択肢の1つに、二水石膏のままで含有フッ素の溶出量が土壤環境基準に適う方法を試行し、併せて、不溶化を成した材料を30%まで含む粘土の支持力、強度特性を調べた。

以下に、本研究で得られた新たな知見を列挙する。

(1) 廃石膏ボード粉に加水を前提に軽焼マグネサイトを混ぜるとフッ素の溶出が抑制され、かつ、この措置を施した混合物（不溶化処理済粉）を配合した粘土や砂は酸性、アルカリ性の水に曝される地盤環境のもとでも再溶出の懸念は少ないとみられる。これより、土質材料の

一部としての利用にとくに支障はないと判断される。

(2) 種々の配合で作製した供試体の支持力特性について、 $CBR_{2.5}$ は不溶化処理済粉を多く混入するほど大きくなる。また、安定材の種類との関係において、 $CBR_{2.5}$ は高炉セメントB種→セメント系固化材→消石灰の順に大きくなり、この傾向は添加率が高いほど明確に現れる。

(3) 強度定数（粘着力 c_d 、せん断抵抗角 ϕ_d ）のうち、安定材を添加した不溶化処理済粉混入土のせん断強さ τ_f には ϕ_d が主に関与する。さらに、当該土の一軸圧縮強さ q_u の推移は、養生日数の対数との間に成立する回帰直線式で表される。なお、高炉セメントB種と消石灰との比較において、 τ_f や q_u には後者の効能がより反映される。

参 考 文 献

- 1) Japan Gypsum Board Association, "On a countermeasure of the waste plasterboard", pp.4-6 (2010).
- 2) Y. Inoue, "Mechanism of strong hydrogen sulfide gas formation in inert industrial waste landfill sites and countermeasures", Research Report from the National Institute for Environmental Studies, Japan, No.188, pp.62-67 (2005).
- 3) S. Ohsawa, K. Sasaki, K. Tanabe, T. Tomita and K. Watanabe, "The basic researches of soil improvement by neutral hardening materials", Construction Materials, Vol.13, No.1, pp.1-5 (2004).
- 4) T. Kamei and H. Horai, "Development of solidification technology for fluorine contaminated bassanite using Portland blast-furnace (B) cement", Japanese Geotechnical Journal, Vol.4, No.1, pp.91-98 (2009).
- 5) K. Sato, H. Yoshida, T. Oshikata, T. Takeshita and K. Oyama, "Deliberation of environment and foundation improvement effect used waste plaster board", Proceedings of the Ninth National Symposium on Ground Improvement, pp.81-86 (2010).
- 6) T. Yamada, K. Nishida, T. Nishigata, T. Tanaka, J. Nakazawa and Y. Matsuda, "Mechanical properties and mechanism of cementation improved soil using MgO", Proceedings of the Sixth National Symposium on Ground Improvement, pp.75-78 (2004).
- 7) S. Oyama, M. Okumura, Y. Hoga and R. Nishimura, "Solidification/stabilization treatment with MgO-based material", Geotechnical Engineering Magazine, JGS, Vol.57, No.7, pp.20-23 (2009).
- 8) Japanese Standards Association, "Methods for chemical analysis of gypsum", pp.2-3 (1995).
- 9) Geo-Environmental Protection Center, "Leaching test for heavy metals-immobilized soil using acid or alkaline solution", GEPC・TS-02-S1, S2 (2008).
- 10) T. Nishigata, T. Yamada, K. Nishida and Y. Matsuda, "A study on applicability of magnesia to soil improvement", Journal of the Japanese Geotechnical Society (Tsuchi-to-Kiso), Vol.54, No.7, pp.19-21 (2006).