

酸化鉄－石灰系材料を添加した粘性土の 固化性状に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON SOLIDIFICATION QUALITIES OF COHESIVE SOIL
TREATED BY ADDING THE IRON OXIDE - LIME BASED MATERIALS

山田幹雄*・佐野博昭**・稲澤知洋***・小木曾晴信****

by Mikio YAMADA, Hiroaki SANŌ, Tomohiro INAZAWA and Harunobu OGISO

1. はじめに

周知のとおり、「酸化鉄」とは鉄の酸化物である酸化第一鉄(FeO)、酸化第二鉄(Fe₂O₃)、四酸化三鉄(Fe₃O₄)の総称であり、これの一般的な用途に塗料、顔料、触媒、研磨剤、腐食防止剤などがある。

そのほか、建設や環境の分野ではこれまでも①軟弱粘土の粒子結合を促すことによる強度増加¹⁾、②揮発性有機化合物に汚染された土壌の浄化²⁾、③下水汚泥焼却灰に含まれる重金属等(とくにヒ素、セレン)の不溶化^{3),4)}、④安定型最終処分場における硫化水素類の捕捉・固定化⁵⁾に役立てられている。

上記①～④の技術には、金属鉄酸化物を元とする鉄粉製品や鉄粉廃棄物が採用されている。他方、非鉄金属レアメタル31鉱種の1つであるレアアースを原材料に希土類磁石を製造(2015年の国内生産量:13,800トン)する工程で生じる研磨屑(生産量の20～30%)から湿式法によってレアアース溶液を回収するときに、酸化鉄を多く含む湿潤残渣、いわゆる鉄スラッジが排出される^{6),7)}。

乾燥物換算で研磨屑の約7割を占める鉄スラッジは産業廃棄物にあたり、従前から循環活用の方策が模索されてきた。近年、「炭素熱還元法」を応用して鉄分を有価物の銑鉄に再利用する技術⁸⁾が開発されたものの、当面は埋め立て処分が主体となろう。

予てより、著者らは鉄スラッジの消費先を軟弱な建設発生土や地盤表層の改良に用いる安定材の原料に求めて、手始めに“鉄スラッジ+生石灰”を普通の配合とした材料(酸化鉄－石灰系材料と称する)を酸性硫酸塩土に添加した後の強度増分を調べた⁹⁾。

その研究で酸性硫酸塩土を扱った理由は、硫酸と含有鉱物の方解石との反応生成物である二水石膏を

付加的に石灰分が作用すると、土粒子の移動を拘束して固化を促すエトリングイト結晶を形成することにある^{10),11)}。つまり、強度増分の一端をエトリングイト生成量との関連をもって説明できる点にあった。

引き続き、著者らは中和能の現れともいえる二水石膏を生成しない土、言い換えれば、黄鉄鉱の酸化分解が顕在しない土を対象に酸化鉄－石灰系材料を添加したときの強度および支持力特性の追究に着手した。この論文では一軸圧縮強さ、強度定数(粘着力、せん断抵抗角)やCBR値の経時変化を述べるほか、二次生成物の成分元素など結晶情報にも言及する。

2. 試料の性質および酸化鉄－石灰系材料の特長

2.1 鉄スラッジの物性と成分組成

鉄スラッジの色調、pH(H₂O)、密度 ρ および砂分(径2000～75 μ m)含有率を写真－1に示す。ここに、pH(H₂O)はJGS 0211、 ρ はJISA 1202、砂分はJISA 1214〔ふるい分析〕の方法に準拠して求めた¹²⁾。

表－1に示すように、鉄スラッジは酸化第二鉄と水を主たる成分とし、これらに加えて酸化ネオジムや酸化ジスプロシウムなどの希土類酸化物をいくらか含有している。また、少量のホウ素も成分とするが、当該元素については次章で改めて述べる。

2.2 試料土の元素組成、鉱物組成および物理・化学・化学的性質

室内試験には、福井県越前市内の一級河川吉野瀬川〔よしのせがわ〕築堤工事現場で採取した土(以降、越前土と称する)を用いた。

表－2は、環境省告示第18号溶出試験の結果を示す。9種の第二種特定有害物質(重金属等)は、いずれも土壤溶出量基準を下回っていた。表－3は、蛍光X線分析の結果を示す。元素組成(化学成分組成)のおよそ9割は二酸化ケイ素、酸化アルミニウム、酸化第二鉄に因っていた。X線回折分析で越前土の鉱物組成を調べた結果を図－1に示す。回折線の位置(回折角 2θ)から曹長石[A]、白雲母[M]、石英[Q]が同定されたものの、黄鉄鉱のような硫化鉄物

* 福井工業高等専門学校 教授 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町), ** 大分工業高等専門学校 教授 都市・環境工学科, *** 緑商事株式会社 代表取締役社長, **** 福井工業高等専門学校 教育研究支援センター技術職員



pH(H₂O) = 6.2, 密度 ρ = 5.24g/cm³,
砂分含有率 = 97.4%

写真-1 鉄スラッジの外観, 色調および性状 (有姿: 湿潤状態)

の回折ピークは現れなかった。

採取の時点で夾雑物や堅硬な土塊を撤去, 実験室に搬入して空気乾燥後に2mmふるいでふるって, これを通過した部分のみを土質試験や一軸圧縮試験, 定圧一面せん断試験, CBR試験に供した。

表-4は, 土質試験の結果をまとめたものである。粒度組成をみると砂分よりも細粒分(シルト+粘土)を多く含み, 細粒分でも粘土の質量百分率が高い。また, 変水位試験¹²⁾で調べた透水性は非常に低い。酸性化可能性試験^{10), 12)}では, 過酸化水素水に水酸化ナトリウムを加えた溶液で硫化鉄を強制的に酸化させてpH(H₂O₂)を測り, pH(H₂O₂) ≤ 3.5であれば“長期的な酸性化の可能性有り”とみなす。越前土のpH(H₂O₂)は土懸濁液に蒸留水を用いて測定したpH(H₂O)と差がなく, 先のX線回折プロファイル(図-1)と併せて黄鉄鉱を含有していない裏付けとなる。有機炭素含有量について, Thompson¹³⁾はその量が1%(有機物含有量に換算して約1.7%¹²⁾)を超えると, 石灰安定処理における硬化現象の中・長期(数ヶ月~数年)に出現するポズラン反応の進行に支障をきたすとしている。越前土は, その懸念にあたるか否かの境にあるといえる。

表-3 越前土の化学成分組成

二酸化ケイ素 [SiO ₂] (%)	58.3
酸化アルミニウム [Al ₂ O ₃] (%)	21.3
酸化第二鉄 [Fe ₂ O ₃] (%)	12.6
酸化カリウム [K ₂ O] (%)	3.8
酸化マグネシウム [MgO] (%)	1.6
二酸化チタン [TiO ₂] (%)	1.1
酸化カルシウム [CaO] (%)	0.8
酸化ナトリウム [Na ₂ O] (%)	0.5
計 (%)	100.0

表-1 鉄スラッジの成分組成

酸化物	酸化第二鉄 [Fe ₂ O ₃] (%)	62.0
	酸化ネオジム [Nd ₂ O ₃] (%)	1.1
	酸化ジスプロシウム [Dy ₂ O ₃] (%)	0.3
	酸化プラセオジム [Pr ₆ O ₁₁] (%)	<0.05
	酸化テルビウム [Tb ₄ O ₇] (%)	<0.005
元素	塩素 [Cl] (%)	2.0
	ナトリウム [Na] (%)	1.0
	コバルト [Co] (%)	0.5
	ホウ素 [B] (%)	0.1
水分* [H ₂ O] (%)		34.0

* 60℃に調節した恒温乾燥器の中に12時間静置したときの質量減から算出。

表-2 越前土の重金属等溶出量*

第二種特定有害物質	溶出量 [mg/L]	基準値 [mg/L]
カドミウム	0.001 未満	0.01
全シアン	不検出 (定量限界0.1)	検出されないこと
鉛	0.007	0.01
六価クロム	0.01 未満	0.05
ヒ素	0.007	0.01
総水銀	0.0005 未満	0.0005
セレン	0.001 未満	0.01
フッ素	0.1	0.8
ホウ素	0.02	1.0

* 環境省告示第18号溶出試験に準拠

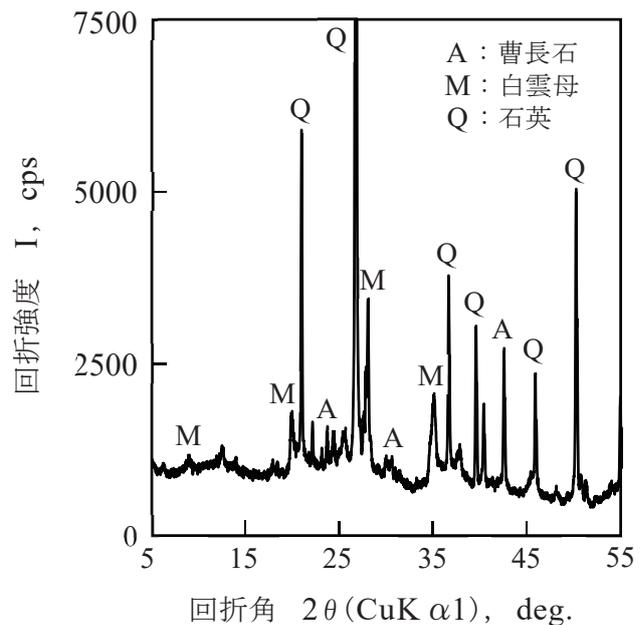


図-1 越前土のX線回折プロファイル

表－4 越前土の物理的、力学的および化学的性質

物理的性質		
土粒子の密度 (g/cm^3)	2.703	
砂分	粗砂分 (%)	11.3
	中砂分 (%)	19.8
	細砂分 (%)	14.5
シルト分 (%)	24.0	
粘土分 (%)	30.4	
液性限界 (%)	41.8	
塑性限界 (%)	20.7	
塑性指数	21.1	
土質材料の工学的分類	粘土 (CL) [低液性限界]	
力学的性質		
最適含水比 (%)	17.9	
最大乾燥密度 (g/cm^3)	1.705	
透水係数* (m/s)	1.8×10^{-7}	
化学的性質		
pH (H_2O)	7.0	
pH (H_2O_2)	6.7	
有機炭素含有量 (%)	1.0	
強熱減量 (%)	4.7	

* 変水位透水試験 [JIS A 1218].
供試体作製時の間隙比 $e = 0.605$, 飽和度 $S_r = 87.3\%$.

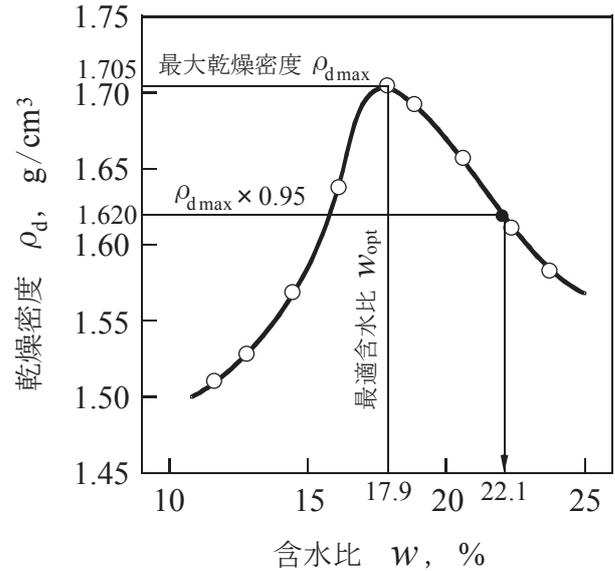
2.3 母材のみで作製した供試体の力学特性

図－2 は前出表－4 に記載した最適含水比 (w_{opt}), 最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) を決定するにいたった締固め曲線 (JIS A 1210 A-a 法¹²⁾ に準拠) を示す. 著者らは母材である越前土単体の力学特性を一軸圧縮試験, 定圧一面せん断試験, CBR 試験を通して調べることとし, 母材の含水比 w を w_{opt} および ρ_{dmax} の 95% に相当する乾燥密度 $\rho_d = 1.620 \text{g}/\text{cm}^3$ と締固め曲線とが湿潤側で交わる $w = 22.1\%$ を目安に調整した.

ここで「 $(\rho_{\text{dmax}} \times 0.95) - w$ 」の関係, 言い換えれば, 「締固め度とそれに応じた含水比」という考え方は, 建設発土を道路用盛土や構造物裏込めに利用する際の施工管理規定¹⁴⁾ に倣ったものである.

3つの試験における供試体の作製手順や装置などを以下に記すが, 養生過程が組み込まれている点を除いて, 対象を第3, 4章で述べる“安定処理した越前土”とした場合についても同様の方法を使った.

一軸圧縮試験用供試体の寸法は直径 50mm, 高さ 100mm であり, 水分を加減した母材を内径 50mm, 高さ 125mm の二つ割モールドに入れ, これを手動の充填装置により 5mm/min の速度で圧して締固めた. 乾燥密度は w_{opt} に対して ρ_{dmax} , $w = 22.1\%$ に対しては $\rho_d = 1.620 \text{g}/\text{cm}^3$ を目標に置いた. 試験には容量 19.6kN の載荷装置を使用し, ひずみ速度は 1%



図－2 越前土の締固め曲線および供試体作製にあたっての含水比, 乾燥密度の目安

/min に設定した¹⁵⁾.

定圧一面せん断試験用供試体は内径 100mm, 高さ 50mm のカッターリングの中に w_{opt} または $w = 22.1\%$ に調整した母材を, ρ_{dmax} または $\rho_d = 1.620 \text{g}/\text{cm}^3$ を目処に直径 50mm の締固め用円板で圧しながら 3, 4回に分けて充填することによって作製した. 試験には荷重計容量 4.9kN, 変位測定量 30mm の在来型装置を用いた. せん断変位速度は, 装置の作動下限に近い 0.1mm/min とした¹⁵⁾.

CBR 試験用供試体は, 所定の含水比に調整した母材を内径 150mm のモールドの中に質量 4.5kg のランマーで突固めて (67回/層, 3層) 作製した. これを水槽内に 4日間静置した後, 容量 49kN の載荷装置に取り付けた鋼製ピストンを 1mm/min の速度で貫入した¹²⁾. 実験値には, 荷重-貫入量曲線から求めたピストン貫入量 2.5mm における CBR (= CBR_{2.5}) を採用した.

表－5 は, これら 3つの試験結果をまとめたものである. ここには作製した供試体の含水比 w , 乾燥密度 ρ_d , 飽和度 S_r も併記してある. w が約 4% 高く, ρ_d が約 $0.1 \text{g}/\text{cm}^3$ 小さくなる影響は一軸圧縮強さ q_u で 1/3, 弾性係数の代替に用いられる変形係数 E_{50} ¹⁵⁾ で 1/5 の大きさ, また, 強度定数のうち粘着力 c_d で 1/4, CBR_{2.5} では 1/30 の大きさとなって現れた.

一方で, せん断抵抗角 ϕ_d や吸水膨張量 d_e に差は認められなかったものの, ρ_d および w を締固め曲線のこれより右下方に設定すると, 二つ割モールドやカッターリングから供試体を取り出せなかったり, 突固め時にこね返しを生じたりした. そのため, 安定

表-5 越前土単体を対象とした一軸圧縮試験、定圧一面せん断試験およびCBR試験の結果

一軸圧縮試験 [JIS A 1216を準用]			
作製時	含水比 w (%)	17.3	21.6
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.69	1.63
	飽和度 S_r (%)	77.7	83.7
一軸圧縮強さ q_u (MN/m ²)		0.30	0.09
変形係数 E_{50} (MN/m ²)		12.5	2.3
定圧一面せん断試験 [JGS 0561を準用]			
作製時	含水比 w (%)	17.8	21.7
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.70	1.63
	飽和度 S_r (%)	81.8	88.2
粘着力 c_d (MN/m ²)		0.08	0.02
せん断抵抗角 ϕ_d (deg.)		34.4	33.3
CBR試験 [JIS A 1211に準拠]			
作製時	含水比 w (%)	17.6	21.9
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.77	1.66
	飽和度 S_r (%)	89.8	94.0
吸水膨張量 d_e (mm)		0.24	0.24
CBR _{2.5} (%)		9.0	0.3

処理にあたっては母材の含水比 w は22.1%に調整し、とりわけ、供試体を静的に締固めて作製する場合の乾燥密度 ρ_d は1.620g/cm³を条件とした。

2.4 酸化鉄-石灰系材料における原料の配合割合

前出表-1に示したように、排出時の鉄スラッジは水分を34%含んでいる。そこで、酸化鉄-石灰系材料の製造に際しては、1回につき湿潤質量2kgの鉄スラッジに粉状生石灰(純度 $\geq 93\%$)を2kg添加し、消化吸水反応で消石灰となる過程の脱水(=生石灰質量の32%) \rightarrow 発熱¹¹⁾を利用して乾かした。なお、母材の固化性状を比較する目的で、酸化鉄-石灰系材料に加えて市販の消石灰(試薬1級、純度 $\geq 95\%$)も用いた。以後、酸化鉄-石灰系材料をCase FL、消石灰をCase Lと表記する。

写真-2はCase FLおよびLの色調、pH(H₂O)、密度 ρ を示す。Case FLでは消化吸水反応によって生石灰質量の1.32倍の消石灰が生成されており¹¹⁾、これはCase Lの1/1.5[$\therefore 1.0:(1.32 \times 0.5)^{-1}$]の量となる。したがって、母材への石灰の効用だけに視点を置けば、Case FLはCase Lの65%程度の水準と目算されよう。

参考までに、酸性硫酸塩土を扱った既往の研究⁹⁾では“鉄スラッジ4割+生石灰4割”に、中和作用の助長を意図して“炭酸カルシウム2割”を配合した酸化鉄-石灰系材料を製造した。そのときの効用の水準は、消石灰単体の53%[=1/1.9]を見当とした。

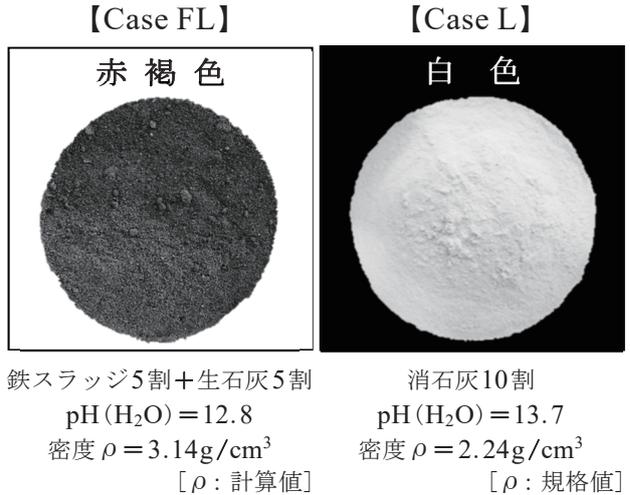


写真-2 酸化鉄-石灰系材料(Case FL)および消石灰(Case L)の外観、色調、pH、密度

3. 安定処理土の一軸圧縮強さおよび微視的性状

3.1 強度増分と強度発現過程

初めに、安定材Case FL, Lを母材の乾燥質量に対してそれぞれ6%(97kg/m³)、8%(130kg/m³)、10%(162kg/m³)添加して作製した供試体の一軸圧縮強さ q_u の経時変化を調べた。養生にあたっては、二つ割モールドから取り出した供試体を、水分の損失を防ぐためにラップフィルムで包んだ上でチャック付ポリエチレン袋に入れて密封し、20°Cに調節した恒温器の中に最長で360日間静置(空气中養生)した。

図-3は、空气中養生360日目の一軸圧縮強さ q_u

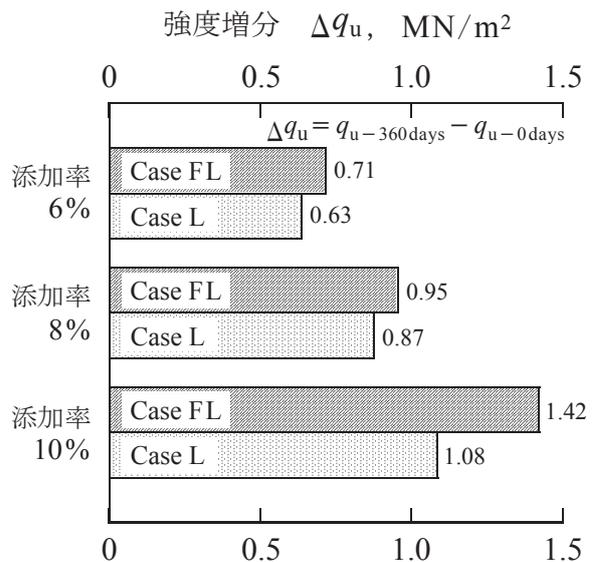


図-3 安定材の種類、添加率と強度増分との関係(供試体作製当日~空气中養生360日)

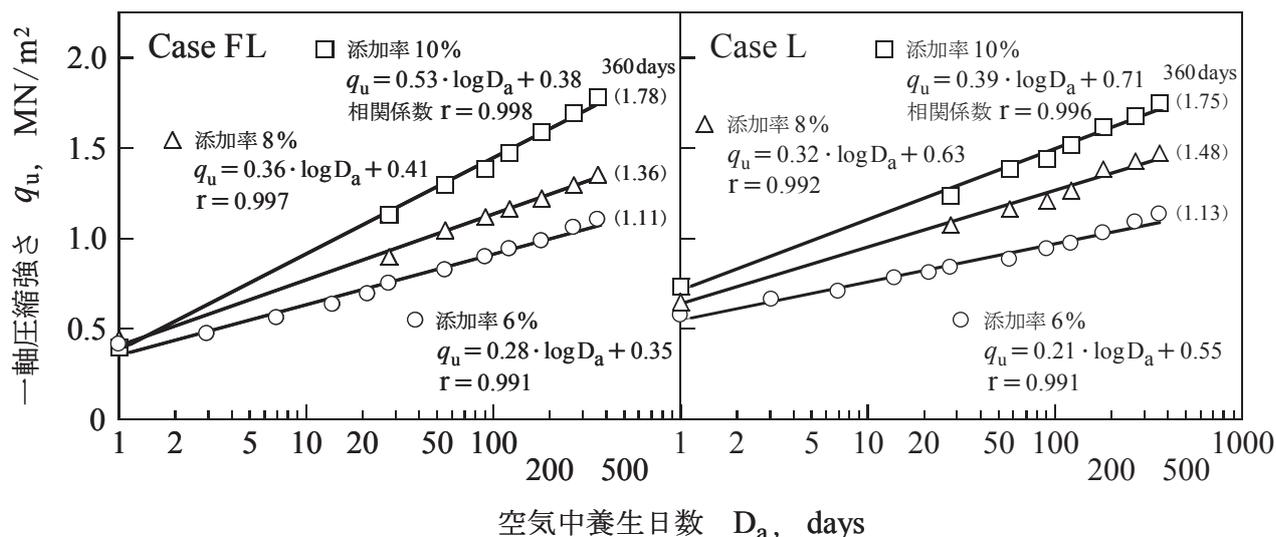


図-4 安定処理土の強度発現過程 (空气中養生1日~360日, 空气中養生日数 D_a : 対数目盛)

-360days と、供試体を作製した直後の一軸圧縮強さ $q_{u-0days}$ との差を「強度増分 Δq_u 」として整理した結果を示す。安定材の添加率が高くなるほど、 Δq_u も大きくなる傾向が認められる。さらに、 Δq_u は Case L よりも Case FL で大きくなっているが、これは前者の $q_{u-0days}$ は添加率6%の供試体で 0.50 MN/m^2 、8%で 0.61 MN/m^2 、10%で 0.67 MN/m^2 と母材単体の q_u の5.5~7.5倍 (前出表-5 参照) であった一方で、後者の $q_{u-0days}$ は添加率にかかわらず概ね 0.38 MN/m^2 [4倍] であったという相違に起因している¹¹⁾。

消石灰量の比に着目すると、化学反応上 Case FL の効用は Case L の7割未満との目算を先に述べた。しかしながら、強度増分 Δq_u は逆に Case FL の方が優位であり、その背景には生成された消石灰量のみならず酸化鉄の形態変化といった微視的要因の関与も介在するものと考えられる。土性、鉱物組成、酸化鉄-石灰系材料における原料の配合割合や添加量が異なるので一概には比べられないけれども、酸性硫酸塩土では 100 kg/m^3 以上を混ぜ合わせたときに効用の水準は5割をわずかに下回った経緯がある⁹⁾。

図-4 は Case FL, L を添加した母材の一軸圧縮強さ q_u の推移を示す。ここで、横軸の空气中養生日数 D_a は対数目盛で表してある。安定材の区別なく、 q_u と D_a 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、回帰直線の勾配を表す係数は添加率の高い順に大きくなっている。さらに、その係数の大小はいずれの添加率においても Case FL > Case L となっている。ただし、 $D_a = 360$ 日の q_u (括弧内の数値) はほぼ等しい。

pH(H₂O) の推移について、供試体作製時の値は Case FL 添加で12.5 (6%)~12.7 (10%), Case L 添

加で12.8 (6%)~13.0 (10%)であり、360日が経過しても安定材の種類や添加率には関連をもたずに、平均して0.2の低下に止まった。

図-5 は、供試体の応力-ひずみ曲線から求めた一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} との関係を示す。 E_{50} は q_u に比例して増加し、6~10%の安定材添加率に対して Case FL, L とともに1本の回帰直線で表される。これより、 E_{50} は q_u のおよそ170倍 (Case FL) ないし200倍 (L) の値に換算できる。

3.2 検体の回折図とSEM像

空气中養生日数 $D_a = 360$ 日の一軸圧縮試験終了後には供試体から塊 (検体) を採取して、二次的に生成

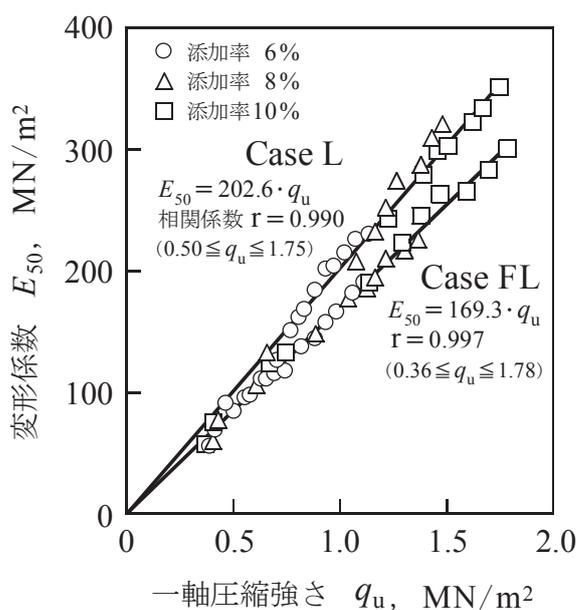


図-5 一軸圧縮強さと変形係数との関係

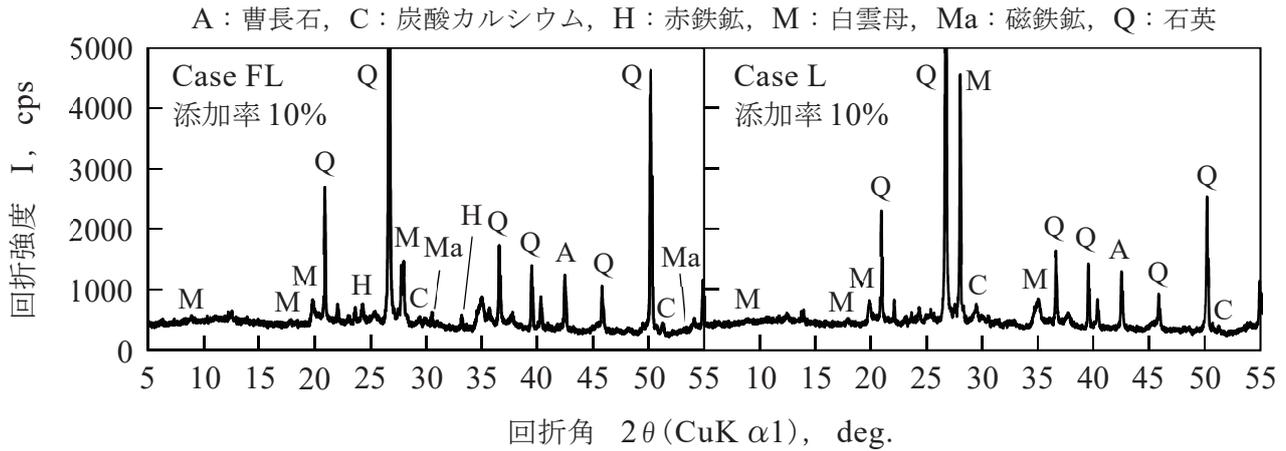


図-6 Case FL, Lを添加した供試体(検体)のX線回折プロファイル(空气中養生日数 $D_a = 360$ days)

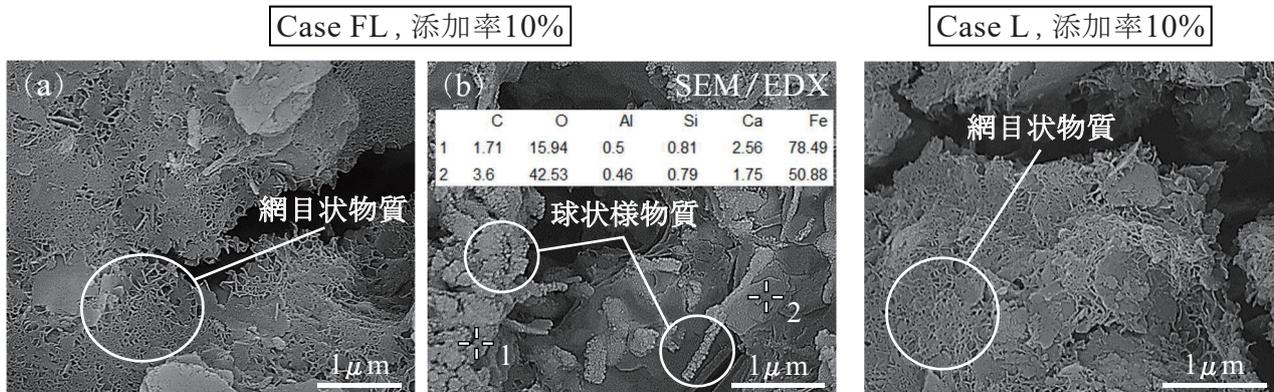


写真-3 Case FL, Lを添加した供試体(検体)のSEM像(空气中養生日数 $D_a = 360$ days)

する化合物をX線回折分析および電界放射型走査電子顕微鏡(FE-SEM)による観察を行って調べた。

1例までにCase FL, Lを10%添加した検体のX線回折プロファイル, SEM像をそれぞれ図-6, 写真-3に示した。

図-6において曹長石[A], 白雲母[M]や石英[Q]は母材である越前土単体の鉱物組成(前出図-1参照), 赤鉄鉱[H]と磁鉄鉱[Ma]は鉄スラッジ由来の酸化鉄であり, 回折角 $2\theta \approx 29^\circ, 51^\circ$ にピークが存在する炭酸カルシウム[C]は消石灰の炭酸化反応で生成された物質^{11), 16)}である。

次に, 写真-3においてCase FLを添加した検体(a)およびCase Lの検体(右)に微細な網目状物質が観察されるが, これはポズラン反応で生成された不溶性の水和化合物^{16), 17)}とみなされる。その像は改良対象土の性質に応じて網目状のほか板状, 薄膜状, ゲル状などさまざまなようである¹⁶⁾。

さらに, Case FLの検体(b)には鉄スラッジの二次的な形態変化, すなわち, 酸化第二鉄が養生期間中に溶解析出の過程を経て水酸化物または含水塩に

徐々に変化したとみられる球状様物質が観察された。エネルギー分散型X線分光法(EDX)で成分元素を調べたところ鉄, 酸素に加えて微量のカルシウム, 炭素, ケイ素やアルミニウムが検出された。

別途, ホウ素の溶出試験(環境省告示第18号に準拠)と含有試験(同第19号に準拠)を実施した。その結果, Case FLを10%添加した検体の溶出量は 0.33 mg/L , 含有量は 12 mg/kg であり, 基準値の 1.0 mg/L , 4000 mg/kg を下回った。材料の安全性を担保する上で, 他の8物質についても調べる予定にある。

4. 安定処理土の一面せん断特性および支持力特性

引き続き, 定圧一面せん断試験およびCBR試験に移行した。これらの試験にはCase FL, Lの添加率を6%として作製した供試体を用いた。

その理由の1つには, 固化の進行速度におよぼす添加率の影響については, 一軸圧縮試験を通して全容を把握できた点がある。もう1つは, 添加率 $\geq 8\%$ で硬さの増した供試体の場合, 最大せん断力にいたる前に荷重計容量を超過する懸念があった。

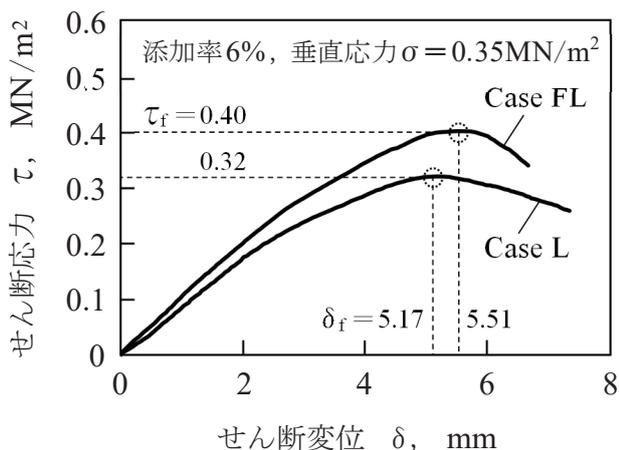


図-7 せん断応力 τ -せん断変位 δ 曲線の例
(空气中養生日数 $D_a = 28$ days)

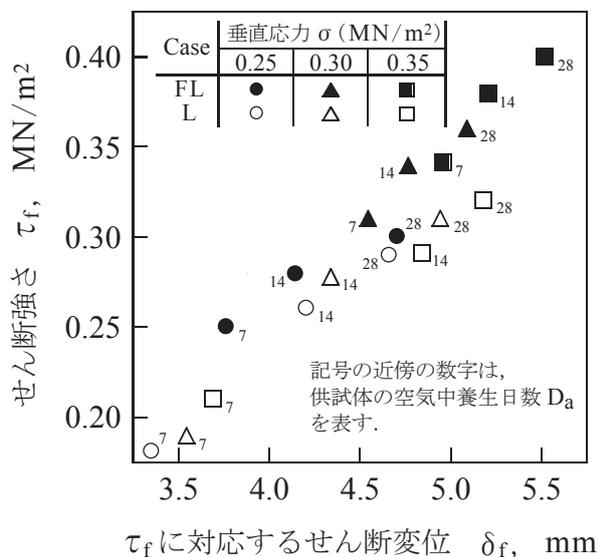


図-8 せん断強さと到達時せん断変位との関係

4.1 養生日数と強度定数との関係

カッターリングの中にCase FLまたはLを添加した母材を充填した後、カッターリングごとチャック付ポリエチレン袋に入れて密封し、20°Cに調節した恒温器内に7, 14, 28日間静置した。そして、所定の空气中養生日数 D_a に達した時点で、供試体をリングから順次取り出してせん断箱へ移した。

供試体に作用させる垂直応力 σ は前述の一軸圧縮強さ $q_{u-0days} = 0.38 \text{ MN/m}^2$ (Case FL), 0.50 MN/m^2 (L) 未満とするように、つまり、以降に形成されるセメンテーションを破壊しない応力範囲を考慮して0.25, 0.30, 0.35 MN/m^2 の3段階に設定した。

せん断応力 τ -せん断変位 δ 曲線の例を図-7に示す。 τ の最大値、いわゆる、せん断強さ τ_f に到達

表-6 安定処理土における強度定数の経時変化

安定材	添加率 (%)	空气中養生日数 D_a (days)	粘着力 c_d (MN/m^2)	せん断抵抗角 ϕ_d (deg.)
Case FL	6	7	0.03	42.3
		14	0.04	44.4
		28	0.04	46.4
Case L	6	7	0.10	17.3
		14	0.18	17.9
		28	0.21	18.1

したときのせん断変位 δ_f は τ_f の大 (= Case FL), 小 (= Case L) に応じた値となっている。このような傾向は当該例に限らず、 τ_f と δ_f との関係を整理した図-8によれば、 δ_f は τ_f の増加にともなって大きくなり、かつ、 τ_f は同じ空气中養生日数 D_a , 垂直応力 σ の条件のもとではCase L (記号○, △, □) よりもFL (●, ▲, ■) が平均して1.3倍大きくなった。

表-6は、強度定数(粘着力 c_d , せん断抵抗角 ϕ_d)の空气中養生日数 D_a の経過にともなう推移を示す。Case FLの供試体において c_d は一定で母材単体とほぼ同値(前出表-5参照)、 ϕ_d は漸次大きくなった。Case Lでは c_d は D_a に依存、 ϕ_d は母材単体に比べて小さくなり、この点は機を改めて追究したい。また、 c_d および ϕ_d によるクーロンの破壊基準と一軸圧縮強さ q_u によるモールの応力円とが交差して、モール・クーロンの破壊基準に合わないという疑問を残した。

4.2 養生日数と吸水膨張量、CBRとの関係

JIS A 1211の方法¹²⁾に準拠して作製した供試体の乾燥密度 ρ_d の平均は 1.692 g/cm^3 であり、それらを「安定処理土のCBR試験方法」¹⁸⁾に倣って養生した。

文献18)において、石灰安定処理土の養生日数 D は「{空气中養生日数 $D_a = 6$ 日} + {水浸養生日数 $D_w = 4$ 日}」の計10日を標準としている。今回は D_a の長短が供試体の吸水膨張量 d_e や $\text{CBR}_{2.5}$ におよぼす影響を調べる目的で、 D_a を10日ずつ2回延長 ($D = 20$ 日および30日)した試験も行った。

試験結果を表-7に示す。Case FL, Lの供試体に膨張の兆候は認められず、 $\text{CBR}_{2.5}$ のみ D_a とともに増加している。ただし、その大きさは安定材で異なり、 $D_a = 6$ 日 \rightarrow 16日 \rightarrow 26日のCase FL添加とL添加との $\text{CBR}_{2.5}$ の差は3.3% \rightarrow 5.9% \rightarrow 8.9%となって、経時的にCase FLの優位性が現れている。

5. まとめ

希土類磁石研磨屑由来の鉄スラッジを原料とする酸化鉄-石灰系材料を、エトリンガイト結晶の生成が期待できない黄鉄鉱非含有土に初めて適用して安定

表－7 安定処理土における吸水膨張量およびCBR_{2.5}の経時変化

空气中養生日数 D _a (days)	水浸養生日数 D _w (days)	養生日数 D (days)	安定材 Case FL [添加率6%]		安定材 Case L [添加率6%]	
			吸水膨張量 d_e (mm)	CBR _{2.5} (%)	吸水膨張量 d_e (mm)	CBR _{2.5} (%)
6	4	10	0.09	35.4	0.08	32.1
16		20	0.00	45.8	0.00	39.9
26		30	0.00	59.5	0.00	50.6

処理効果を確認したところ、次の3つの知見を得た。

(1) 市販の消石灰との比較において、酸化鉄－石灰系材料を添加して養生した供試体の強度増分 Δq_u 、せん断強さ τ_f 、CBR_{2.5} はいずれも大きくなる。

(2) 酸化鉄－石灰系材料添加後、空气中で養生した供試体の粘着力 c_d は一定であるものの、せん断抵抗角 ϕ_d は養生日数の経過にともなって大きくなる。

(3) 酸化鉄－石灰系材料による固化の成因は、ポゾラン反応の進行に加えて鉄スラッジの二次的な形態変化とみられる球状様物質の形成にある。

以上のように、酸化鉄－石灰系材料は消石灰単体と同等、もしくは、それより大きな強度や支持力を有する改良土を経済的に提供できる可能性が高い。したがって、道路用盛土(路床・路体)、構造物裏込めや河川築堤(一般堤防)への利用が期待される。

謝 辞

検体の化学分析にご協力いただくとともに、考察にあたり貴重なご助言を頂戴した株式会社福井環境分析センターの山口秀尚氏に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 松尾新一郎・嘉門雅史：鉄イオンによる軟弱粘土の安定処理，材料，第26巻，第290号，pp. 1034-1040 (1977年11月)
- 2) 稲葉 力・武井正孝：酸化鉄と石膏系固化材を用いたVOC処理技術，第39回地盤工学研究発表会発表講演集，1115，B-12，pp.2227-2228 (2004年7月)
- 3) 小菅博明・伊熊信男・西山 寛：焼却灰中の重金属不溶化処理技術の開発，横浜市環境科学研究所報，第31号，pp.130-135 (2007年3月)
- 4) (社)日本下水道協会技術部技術第三課：焼却灰中の重金属溶出抑制技術に係る調査報告書，pp. 1-21 (2008年3月)
- 5) 小野雄策：廃石膏ボード類埋立における硫化水素ガスの発生とその防止対策，安全工学，第49巻，第4号，pp.212-219 (2010年8月)
- 6) ネオマグ株式会社：磁石・レアメタル関係統計資料－ネオジム磁石の世界生産量推移－ (2016年10月)

- 7) (社)日本機械工業連合会：平成21年度持続可能社会に向けたものづくりにおけるサプライチェーンの課題と対応策についての調査研究報告書，pp.93-95 (2010年3月)
- 8) 星 裕之・宮本 雄・古澤克佳：炭素熱還元法による希土類磁石スラッジのリサイクル技術，日立金属技報，第31巻，pp.8-15 (2015年1月)
- 9) 山田幹雄・佐野博昭・稲澤知洋・小木曾晴信：石灰安定処理した酸性土におけるpHの推移と強度発現過程，建設用原材料，第24巻，第1号，pp.6-13 (2016年6月)
- 10) 建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル－暫定版－ (2010年3月)
- 11) 日本石灰協会：石灰による地盤改良マニュアル，pp.7-21 (2014年1月)
- 12) (社)地盤工学会地盤調査法改訂編集委員会編：地盤材料試験の方法と解説－二分冊の1 (2009年11月)
- 13) Thompson, M. R. : Lime Reactivity of Illinois Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 92, No. SM5, Proc. Paper 4907, September, 1966, pp.67-92.
- 14) (独)土木研究所 編著：建設発生土利用技術マニュアル－第3版－，丸善，pp.36-41 (2004年9月)
- 15) (社)地盤工学会地盤調査法改訂編集委員会編：地盤材料試験の方法と解説－二分冊の2 (2009年11月)
- 16) 日本石灰協会：石灰による軟弱地盤の安定処理工法，鹿島出版会，pp.14-16 (1983年11月)
- 17) 平岡成明・平井孝典 編著：ニューコンストラクションシリーズ 第3巻 大地を甦らせる地盤改良，山海堂，pp.111-119 (1994年8月)
- 18) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧－第4分冊－，pp.155-158 (2007年6月)

(2017年10月6日受付 2018年6月18日受理)