

原料に鉄スラッジを含む安定材を添加した酸性土の強度および支持力特性

STRENGTH AND BEARING CAPACITY PROPERTIES OF ACID SOIL MIXED WITH THE STABILIZER CONTAINING SOME SPENT IRON OXIDE INTO RAW MATERIALS

山田幹雄*・佐野博昭**・稲澤知洋***・小木曾晴信****

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

1. はじめに

既往の研究において、著者らは初めに硫化鉄物である黄鉄鉱を含み酸化反応が顕在的な土と潜在的な土のスレーキング特性や力学的性質を比較したところ、供試体の水浸を要件とする試験と要件としない試験とでは異なる挙動を示したことから、膨潤性の粘土鉱物含有量の多少を原因の1つに挙げた¹⁾。

続いて、採取後9ヶ月が経過しても化学的および生物的酸化作用が一向に出現しなかった土を対象にCNS元素分析や微生物生息検定を行った。その結果、培養法でコロニーは形成されず、これがモル比C/S < 0.5でも中性域を逸しない根拠とみなした。ただし、この土に酸性土を混ぜ合わせて好気性の環境下に置くと酸化反応が進行するという知見を得た²⁾。

これらの経緯を踏まえて、次の段階では黄鉄鉱の酸化により硫酸が生成されて酸性にいたった自然土や建設発生土の循環利用に資する目的で、酸性土に安定材を添加したときのpH(H₂O)、一軸圧縮強さ、強度定数、CBRの経時変化を調べる試験に着手した。

その際、レアアース(希土類金属)由来の酸化鉄を配合した安定材を使用した。この酸化鉄は、希土類磁石の製造過程で生産量の3割程度発生する研磨屑を酸溶解、ろ過してレアアース溶液を取り出すときの残渣であり、その量は乾燥物換算で年間3000トン余りと推定されている。酸化鉄は水洗浄→アルカリ液洗浄(中和処理)を経てpH(H₂O) > 2に調整し、構内に仮置きした後に産業廃棄物扱いで鉄原料に再生利用するほかは大半が埋め立て処分されている³⁾。

ここで、酸化鉄が軟弱粘土の土質改善におよぼす影響について、松尾ら⁴⁾は鉄粉の酸化によるセメンテーション作用で粘土粒子が結合し、この団粒化効

果によってせん断抵抗が増加するとしている。

したがって、酸性土と軟弱粘土との違いはあるものの、安定処理にあたって酸化鉄を原料の1つに求めることに齟齬はないと考えられる。加えて、そのままではコンクリートや埋設管の腐食、法面保護工の劣化などを引き起こして土構造物用資材としての適性を欠く酸性土と、産業廃棄物であるレアアース由来の酸化鉄とを併せて活用しようとするところが、一連の研究における新たな展開といえよう。なお、レアアース溶液と分離・回収した酸化鉄は水分を含んでいるので、以後「鉄スラッジ」と称する。

この論文では、“鉄スラッジを配合した安定材”と“一般的な安定材(消石灰)”とを個別に添加した酸性土の固化性状を一軸圧縮試験、X線回折分析、定圧一面せん断試験およびCBR試験を通して比較した結果について報告する。

2. 鉄スラッジ、酸性土の性質および鉄スラッジを配合した安定材の種類

2.1 鉄スラッジ、酸性土の物性と成分組成

実験室搬入時の鉄スラッジは湿り気を帯びた赤錆色を呈し、JGS 0211の方法⁵⁾で測定したpH(H₂O)の平均は6.2であった。また、JIS A 1202の方法⁵⁾を準用して求めた密度は5.07g/cm³、JIS A 1204のふるい分析⁵⁾で求めた粒度組成は径2000~75μm



pH(H₂O) = 5.6~6.7 [有姿：湿潤状態]

写真-1 鉄スラッジの外観、色調およびpH

*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

表－1 鉄スラッジの成分組成

Fe ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Tb ₄ O ₇	Cl	Na	Co	B	水分*
62.0%	1.1%	0.3%	<0.05%	<0.005%	2.0%	1.0%	0.5%	0.1%	34.0%

* 60℃に設定した恒温乾燥器内に12時間静置したときの質量減から算出.

表－2 酸性土単体の物理的および化学的性質¹⁾

土粒子の密度	砂 分	シルト分	粘土分	均等係数	曲率係数	液性限界	塑性限界	塑性指数
2.72 g/cm ³	21.3%	60.7%	18.0%	25.9	5.3	59.8%	33.8%	26.0
有機炭素含有量	強熱減量	pH(H ₂ O)*						
0.6%	5.0%	2.9~3.2**						

* 試料と蒸留水との質量比=5を検液とするJGS 0211の方法⁵⁾に準拠.

** 本研究において、各種の供試体を作製したときの酸性土のpH(H₂O).

表－3 酸性土単体の元素組成¹⁾

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	計
71.24%	14.47%	5.01%	2.56%	2.36%	1.79%	1.07%	0.76%	0.51%	0.09%	0.05%	99.91%

の砂分が97.4%を占めていた(写真－1参照).

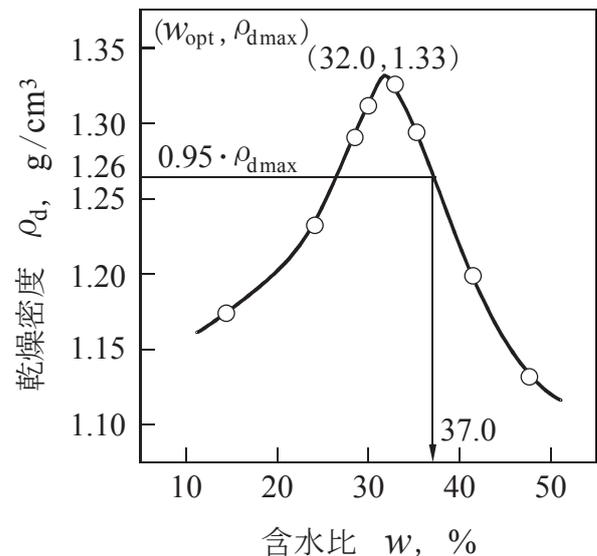
鉄スラッジは酸化第二鉄(Fe₂O₃)を主体に、希土類酸化物の酸化ネオジム(Nd₂O₃)、酸化ジスプロシウム(Dy₂O₃)や塩素(Cl)、ナトリウム(Na)、コバルト(Co)などのほか、30%を超える水分から成っている(表－1参照).

新潟県村上市産酸性土の物理的および化学的性質を表－2に、元素組成(化学成分組成)を表－3に示す. 採取当初、この土はpH(H₂O)=7.6のアルカリ性であったが、50日後に7.0の中性に、70日後に6.3の酸性となり、140日後には3.3まで低下した. そして、160日以降観察を止めた1100日目にわたり3.2≧pH(H₂O)≧2.9の範囲にあった. 酸性土の液性限界および塑性指数を塑性図⁵⁾に照合すると、土質材料の工学的分類では「シルト(MH)[高液性限界]」に該当する. また、主な成分は二酸化ケイ素(SiO₂)と酸化アルミニウム(Al₂O₃)である^{1),2)}.

別途、この土の鉱物組成を調べたところ、回折線の位置から黄鉄鉱、石英、曹長石、俊男石が同定された. ここに、俊男石は緑泥石と膨潤性の粘土鉱物に属するスメクタイトとの混合層鉱物である¹⁾.

2.2 酸性土の締固め特性と強度特性

図－1は、JIS A 1210 A-a法⁵⁾に準拠して求めた酸性土の締固め曲線を示す. 先の表－2に記載したように、シルト分と粘土分とを合わせた細粒分を80%近く含有しているので、質量2.5kgのランマーによる突固めにおける乾燥密度 ρ_d の変動0.19g/cm³(最小1.13g/cm³, 最大1.32g/cm³)の割に含水比 w の変化は33.3%(14.4~47.7%)と大きく、曲線の形状はなだらかとなっている.



図－1 酸性土単体の締固め曲線

そこで、酸性土単体の一軸圧縮強さ q_u を最適含水比 $w_{opt} = 32.0\%$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.33\text{g/cm}^3$ の条件で作製した供試体と、 ρ_{dmax} の95%に当たる $\rho_d = 1.26\text{g/cm}^3$ と締固め曲線とが湿潤側で交わる $w = 37.0\%$ の条件で作製した供試体双方で比べてみることにした.

供試体の寸法は直径50mm、高さ100mmであり、所定の含水比に調整した酸性土を内径50mm、高さ125mmの二割モールドの中に入れ、これを手動の試料充填装置により5mm/minの速度で圧して作製した. 乾燥密度は、モールドに入れる湿潤質量を加減して目標に合わせた. 試験には容量19.6kNの載荷装置を用い、ひずみ速度は1%/minとした⁶⁾.

表-4 酸性土単体の一軸圧縮強さと変形係数

作製条件	含水比 w (%)	32.0	37.0
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.33	1.26
	一軸圧縮強さ q_u (MN/m ²)	0.51	0.32
	変形係数 E_{50} (MN/m ²)	55.56	35.16

なお、次章に述べる“安定処理した酸性土”の供試体についても、同様の作製手順や試験方法を採用した。

表-4は、酸性土単体を対象とした一軸圧縮試験の結果をまとめたものである。含水比 w を5.0%高く、乾燥密度 ρ_d を0.07g/cm³ 小さくして作製した供試体では一軸圧縮強さ q_u 、変形係数 E_{50} とともに4割減となっている。

さらに、 $\rho_d = 1.19\text{g/cm}^3$ ($0.9 \cdot \rho_{d\max}$)、 $w = 42.0\%$ の条件でも作製を試みたが、この場合には二つ割モールドから取り出す際に破断するか、もしくは、ようやく取り出せても自立しなかった。

これらを参考に、母材である酸性土の含水比 w を37.0%に一旦調整した上で安定材を添加する手筈とした。とりわけ、一軸圧縮試験および定圧一面せん断試験には、乾燥密度 $\rho_d = 1.26\text{g/cm}^3$ を目標に安定材を添加した酸性土を静的に締め固めて作製した供試体を用いた。

2.3 安定材の原料、種類と添加率

今回の研究では鉄スラッジのほか炭酸カルシウム(石灰石の粉砕物)、生石灰(粉状、純度93%以上)、高炉スラグ微粉末、無水石膏微粉末を原料に、それらを表-5におけるCase I, II, IIIのように組み合わせた材料を“鉄スラッジを配合した安定材”として扱った。ここに、炭酸カルシウムは中和作用の助長を、高炉スラグ微粉末はアルカリや硫酸塩の刺激によって硬化する性質、いわゆる、潜在水硬性の発揮を、無水石膏微粉末はエトリンタイトの生成を期待して加えたものである⁷⁾。

原料の混合にあたり、水分を34%含む鉄スラッジにCase Iのみ同量の生石灰を予め添加し、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%)→発熱を利用して水分を蒸発、室温にまで冷めるのを待って炭酸カルシウムを混ぜた。一方、Case IIおよびIIIでは、鉄スラッジに温風を当てて水気を全て除いた後に他の原料と混ぜ合わせた。製造量はCase I, II, IIIともに5kg/回とした。

個々の原料の密度をもとに算出したCase I, II,

表-5 試用した安定材Case I~IIIにおける原料の配合割合とpH

Case	鉄スラッジ	炭酸カルシウム	生石灰	高炉スラグ微粉末	無水石膏微粉末	消石灰	pH(H ₂ O) [添加前]
I	4割	2割	4割	—	—	—	12.3
II	4割	2割	2割	2割	—	—	12.3
III	4割	—	2割	2割	2割	—	12.4
F	10割	—	—	—	—	—	6.5
L	—	—	—	—	—	10割	13.7

注) Case I では、初めに生石灰を湿っている鉄スラッジに混ぜ合わせて水分を気散。Case II, III, Fでは、温風を当てて水分0%にまで乾かした鉄スラッジを使用。

IIIの密度はそれぞれ3.04g/cm³, 3.60g/cm³, 3.68g/cm³であり、JIS A 1204のふるい分析⁵⁾で求めた砂分(径2000~75 μ m)は96.6%, 94.4%, 96.3%であった。pH(H₂O)は、いずれも12を超えていた。

これらを、酸性土の乾燥質量に対して6%(72kg/m³)添加した。Case II, IIIの原料に組み入れた2割の生石灰も土中の水分と結合して消石灰を生成する公算が大きいが、上述のように今回は粉状の生石灰を採用しているため、道路土工に倣って酸性土との混合作業は1回限りとした⁸⁾。

表-5におけるCase F, Lは酸性土の固化性状をCase I~IIIと比べることを主意とするものであり、添加率は6%とした。Case Fには温風に曝して乾かした鉄スラッジを用い、Case Lには純度95%以上の消石灰を充当した。

3. 安定処理効果の確認および結晶情報の収集

3.1 pHと一軸圧縮強さの推移

鉄スラッジを配合した安定材(Case I~III)、鉄スラッジのみ(Case F)、消石灰のみ(Case L)を個別に酸性土に添加して作製した供試体(直径50mm, 高さ100mm)は、含水比の低下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℃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。

5つのCaseの供試体におけるpH(H₂O)と一軸圧縮強さ q_u の経時変化を図-2, 3に示す。これらの図には空气中養生日数 $D_a = 0$ 日および $D_a = 360$ 日のpH(H₂O), q_u を括弧内に記入してある。

pH(H₂O)の変化について、「pH(H₂O)による土壌アルカリ性・酸性の区分⁹⁾」にもとづくとCase I, II, III, Lの供試体は360日間強アルカリ性(>8.0)の域にあったものの、 $D_a = 0$ 日から14日にかけてpH(H₂O)は2ないし3低くなり、石灰成分が中和に消費された痕跡を残している。Case Fの供試体は当初から極強酸性(<4.4)の域にあり、pH(H₂O)はほぼ一定の値で推移した。

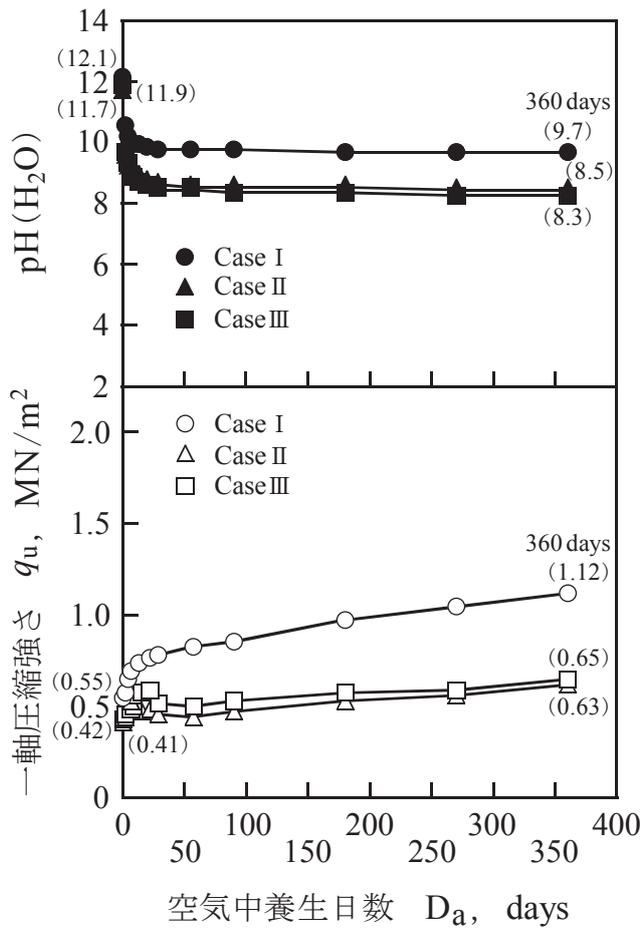


図-2 Case I, II, IIIの供試体におけるpHおよび一軸圧縮強さの経時変化

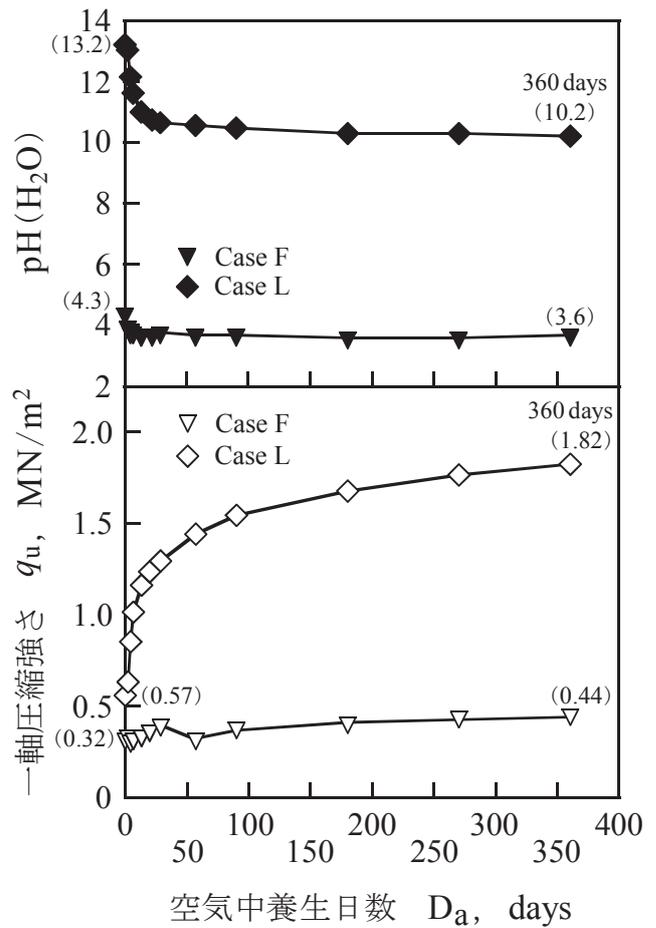


図-3 Case F, Lの供試体におけるpHおよび一軸圧縮強さの経時変化

q_u が D_a に関連して明らかに増加したのはCase IとLの供試体であり、ほかの3つのCaseでは0.1~0.2MN/m²の強度発現に止まった。すなわち、Case II, IIIはアルカリ雰囲気であるにもかかわらず安定処理効果が小さく、Case Fでは少なくとも塑性限界近くの酸性土に関しては酸化鉄単体での土質改善⁴⁾がなされにくいとの結果にいたった。

一般に、生石灰の消化吸水により添加質量の1.32倍の消石灰が生成される¹⁰⁾。したがって、Case Iの消石灰量は化学反応上約5割となって、これはCase Lの半分に相当する(前出表-5参照)。とくに深慮しなければ、Case Lの $q_u/2$ がCase Iの供試体の q_u になるといえるが、 $D_a=360$ 日の q_u をみるとCase IはCase Lの62%の大きさとなっており、中期・長期強度への鉄スラッジの関与が窺える。

Thompson¹¹⁾は、石灰安定処理土の q_u と原土の q_u との差、つまり、強度増分が最大で0.34MN/m²を上回るときに石灰反応性が良好とみなすとの見解を述べている。これを参考にすると、酸性土単体の q_u は0.32MN/m²(前出表-4参照)であるので、目指

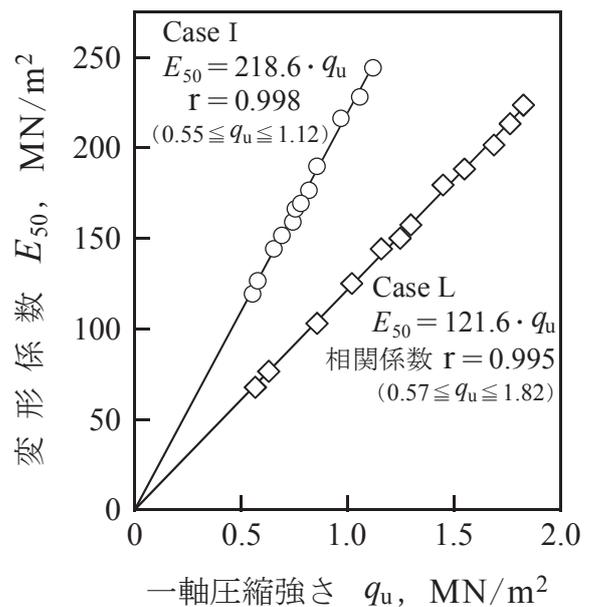


図-4 Case IおよびLの供試体における一軸圧縮強さと変形係数との関係

すべき q_u は $0.7\text{MN}/\text{m}^2$ 程度となって Case II, III はともに添加量が不足していたと推察される。

いずれにしても、事前に鉄スラッジを乾かす手間の省ける Case I で強度の発現が確認されたことは、“鉄スラッジを配合した安定材”の効用を探究する上で、言い換えれば、産業廃棄物の新たな用途を追求する上において有利な方向にあるといえよう。

図-4 は Case I, L の供試体の応力-ひずみ曲線から求めた変形係数 E_{50} と一軸圧縮強さ q_u との関係を示す。 E_{50} は q_u に比例して大きくなり、Case I は q_u のおよそ 220 倍の値に、Case L では 120 倍の値に換算できる。このように、供試体の弾性レベルの面からすると Case L よりも Case I の方が高くなった。

3.2 回折図と反応生成物の観察像

空气中養生日数 $D_a = 360$ 日の一軸圧縮試験を終えた Case I および L の供試体から塊 (検体) を採取して X 線回折分析を行うとともに、電界放射型走査

電子顕微鏡 (FE-SEM) で二次電子像や反射電子像を観察した。

図-5 に示すように、回折線の位置 (回折角 2θ) より Case I, L では石英 [Q], 黄鉄鉱 [Py], 俊男石 [T], 曹長石 [A] の鉱物が同定されたほか、硫酸と石灰成分との反応生成物である二水石膏 [G] や土粒子の移動を拘束して固化の進行を促すアルミン酸石灰塩系水和物の 1 つ エトリンガイト [E] の含有が確認された。さらに、Case I には原料の鉄スラッジ [酸化鉄: F] と炭酸カルシウム [C] の回折ピークが現れた。なお、Case I の供試体において二次生成物の鉄水酸化物は結晶性が低いために X 線回折分析のピークサーチで検出できなかった。しかしながら、FE-SEM による観察ではエトリンガイトとは別に白色の丸味を帯びた形状を有する像が映った。

阿部らの研究¹²⁾では、製鉄所で副産される焼結ダストと消石灰を原料とする安定材をまさ土やしらす

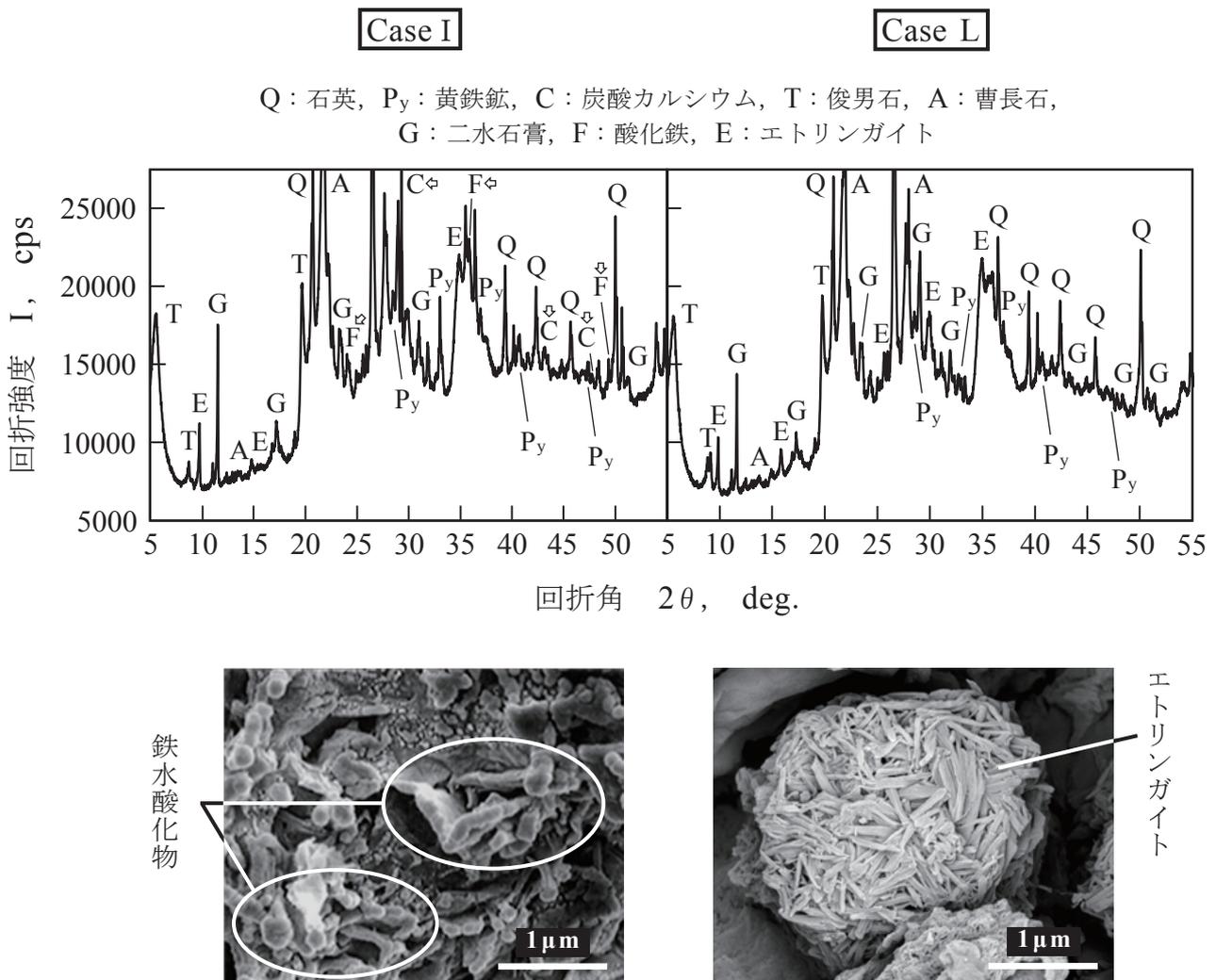


図-5 Case I, L の供試体における X 線回折プロファイルおよび SEM 像 (空气中養生日数 $D_a = 360$ days)

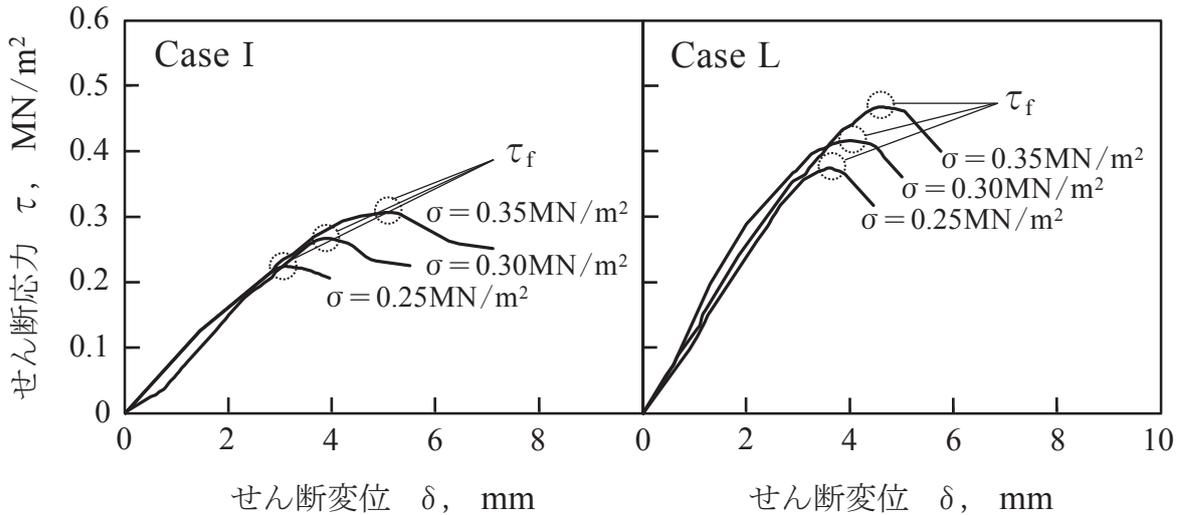


図-6 せん断応力 τ - せん断変位 δ 曲線の例 (空气中養生日数 $D_a=7$ days)

に混ぜ合わせると、ゲル状の鉄加水酸化物 ($Fe_2O_3 \cdot xH_2O$) を形成して固まると結論付けており、酸化鉄の発生経路や改良対象土は異なるけれども、丸味を帯びた生成物は $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$ に類するものといえる。

5つのCaseの供試体のうち、一軸圧縮強さ q_u が経時的に増加したCase I, Lについては、引き続き定圧一面せん断試験とCBR試験に移行した。

4. 養生期間がせん断挙動および支持力特性におよぼす影響

4.1 せん断強さと強度定数

定圧一面せん断試験には荷重計容量4.9kN、変位測定量30mmの在来型の装置を用いた。せん断変位速度は、装置の作動下限に近い0.1mm/minとした。

供試体の作製にあたっては内径100mm、高さ50mmのカッターリングの中に安定材を添加した酸性土を直径50mmの締固め用円板で押しながらか3ないし4回に分けて充填した。作業終了後には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で最長56日間静置した。供試体は、所定の空气中養生日数 D_a に達した時点でリングから順次取り出してせん断箱へ移した。

せん断応力 τ - せん断変位 δ 曲線の例を図-6に示す。ここで、垂直応力 σ は $D_a=0$ 日におけるCase I, Lの一軸圧縮強さ $q_u \approx 0.6 MN/m^2$ (前出図-2, 3参照)未満とするように、つまり、以降のセメンテーションを破壊しない応力範囲を勘案して0.25, 0.30, 0.35 MN/m^2 の3段階に設定した。

τ の最大値、いわゆる、せん断強さ τ_f は σ に比例して増加する傾向が認められる。そして、 τ_f にいたったときのせん断変位 δ_f はCase I で3.1~5.2mm、Case Lでは3.6~4.6mmとなつて、いずれも τ_f と

Case	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.)	pH (H_2O)
I	7	0.02	39.4	10.0
	21	0.03	42.3	9.9
	56	0.04	47.5	9.8
L	7	0.14	42.9	11.8
	21	0.16	47.0	10.7

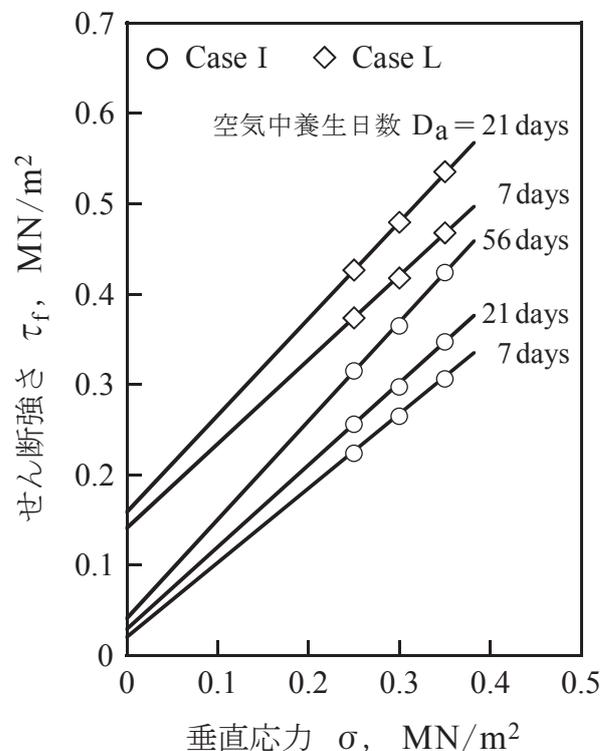


図-7 空气中養生日数と強度定数との関係 (Case I, L)

ともに大きくなっている。

図-7は、垂直応力 σ とせん断強さ τ_f との関係から求めた空气中養生日数 D_a ごとの強度定数(粘着力 c_d 、せん断抵抗角 ϕ_d)をまとめたものである。 D_a はCase Iの供試体(記号○)に対しては最長56日間としたが、Case Lの供試体(◇)では荷重計の容量を超過する恐れがあったので21日間に止めた。

Case I, Lの供試体において、 c_d も ϕ_d も日数の経過にもなまって漸次大きくなっている。ただし、2つのCaseの違いはせん断面の垂直応力に無関係なせん断強度成分(= c_d)にあり、Case I, Lの τ_f から c_d を差し引いた摩擦抵抗成分(= ϕ_d)だけで τ_f を比べてみると、 $D_a=7$ 日ではCase Lの88%がCase Iに、 $D_a=21$ 日ではCase Lの85%がCase Iに相当し、両者間に顕著な差異は存在しない。

c_d がCase L > Case I となった点に関して、含水比 $w=37.0\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.26\text{g/cm}^3$ の条件で別途作製した酸性土単体の供試体を用いて強度定数を求めた(垂直応力 $\sigma=0.15, 0.20, 0.25\text{MN/m}^2$ の3段階)ところ $c_d=0.06\text{MN/m}^2$ 、 $\phi_d=24.2\text{deg.}$ が得られた。したがって、大半が砂分のCase Iを添加した供試体の c_d は母材よりもいくらか小さくなり、一方のCase Lの供試体には「生石灰パイル打設による周辺粘性土の粘着力増加作用」¹³⁾に類似の兆候が現れて母材よりも大きな c_d になったと考えられる。

4.2 吸水膨張量とCBR

初めに、JIS A 1211の方法⁵⁾に準拠して酸性土単体の吸水膨張量 d_e とCBRとを求めた。すなわち、含水比 $w=32.0\%$ および 37.0% を目安に調整した酸性土を質量4.5kgのランマーで突固め(67回/層、

3層)でモールドに充填し、これを水槽の中に4日間静置した後に鋼製のピストンを1mm/minの速度で貫入した。データ整理にあたっては、貫入量2.5mmにおけるCBR(= $\text{CBR}_{2.5}$)を採用した。

作製した供試体の物性値、水浸養生で生じた吸水膨張量 d_e 、 $\text{CBR}_{2.5}$ 、コーン指数 q_c を表-6に示す。 q_c はCBR試験が終了した時点でモールドを逆さにして、供試体の中央に先端角 30° 、底面積 3.24cm^2 のコーンを人力で押し込んだときの抵抗力から算出した(JIS A 1228の方法⁵⁾を準用)。

酸性土を突固めて供試体を作製しても、乾燥密度 ρ_d は最大乾燥密度 $\rho_{d\text{max}}=1.33\text{g/cm}^3$ および $\rho_{d\text{max}}$ の95%に当たる $\rho_d=1.26\text{g/cm}^3$ に近い値となった(前出図-1参照)。含水比 w を5.0%高くしたことで、 d_e は0.3mm増えた。それでも、膨張比 r_e に換算すると1%以下となって、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})\approx 3$ という難点を除けば、道路路床(原地盤)の質の評価では良好な材料に属する⁵⁾。他方 $\text{CBR}_{2.5}$ 、 q_c はともに半減した。

表-6 酸性土単体の吸水膨張量、 $\text{CBR}_{2.5}$ およびコーン指数

供 作 試 体 時	含水比 w (%)	32.6	37.4
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.39	1.29
	間隙比 e	0.957	1.109
	飽和度 S_r (%)	92.7	91.8
吸水膨張量 d_e (mm)		0.71	1.02
$\text{CBR}_{2.5}$ (%)		7.4	3.3
コーン指数 q_c (MN/m ²)		1.74	0.83

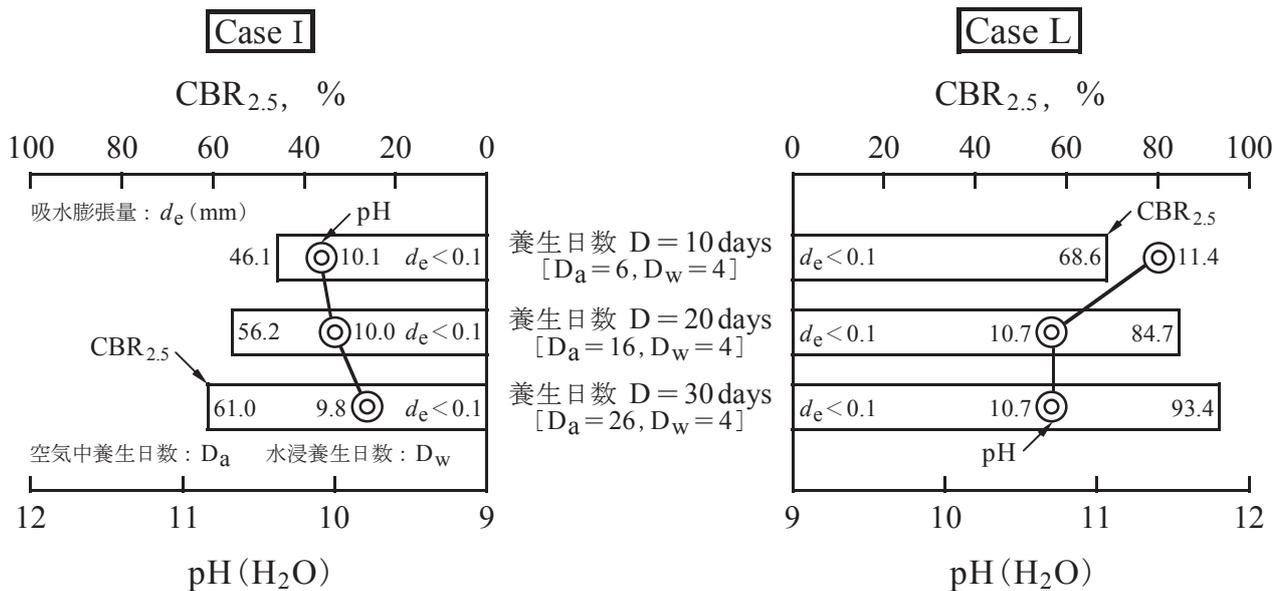


図-8 日数の経過にもなう $\text{CBR}_{2.5}$ およびpHの変化 (Case I, L)

次に、「安定処理土のCBR試験方法」¹⁴⁾に倣ってCase I, Lの供試体の吸水膨張量 d_e と $CBR_{2.5}$ とを求めた。その際、石灰安定処理土に関する養生日数Dの規定は空气中養生日数 $D_a=6$ 日、水浸養生日数 $D_w=4$ 日の計10日であるが、今回は $D_a=6$ 日に加えて $D_a=16$ 日、26日(計20日、30日)として支持力特性を調べた。

試験結果を図-8に示す。この図には $pH(H_2O)$ も併記してある。全ての供試体で d_e は微少であり、 $6 \leq D_a \leq 26$ の期間内に固化した供試体は吸水して膨らむ恐れはないといえる。 $pH(H_2O)$ は一軸圧縮試験や定圧一面せん断試験に用いた供試体で測った値(前出図-2, 3, 7参照)と同様に推移しているので、水浸の有無は中和作用に影響をおよぼさないとみられる。また、Case Iの供試体における $CBR_{2.5}$ はCase Lのおよそ65%の大きさとなっており、消石灰量の比を上回る安定処理効果は一軸圧縮強さ q_u に限らず支持力の面にも現れている。

5. まとめ

天然土砂の活用と産業廃棄物の再利用の観点から、黄鉄鉱の酸化反応によって $pH(H_2O)$ が低下した土にレアアース由来の鉄スラッジを配合した安定材を添加したときの一軸圧縮強さ q_u 、強度定数(粘着力 c_d 、せん断抵抗角 ϕ_d)や $CBR_{2.5}$ の経時変化を調べた。

以下に、本研究で得られた主要な成果を列挙する。

- (1) 試用した“鉄スラッジを配合した安定材”3種類のうち、 q_u の明らかな増加が確認されたのは生石灰の消化吸水反応を意図したものであり、実用化にあたって鉄スラッジの乾燥工程を省ける可能性が高い。
- (2) 上記(1)の安定材による固化の成因は、エトリンガイトに加えて鉄水酸化物の生成にあるとみられる。
- (3) 上記(1)の安定材を添加した場合と消石灰のみを添加した場合との比較において、前者の ϕ_d と後者の ϕ_d との差は小さかったので、供試体のせん断強さ τ_f を左右するのは専ら c_d となる。
- (4) 同様の比較において、供試体の吸水膨張量 d_e は双方ともにわずかであり、また、 $CBR_{2.5}$ については前者は後者の概ね65%の大きさに相当する。先の q_u では62%であることを併せて考えると、消石灰量の比を上回る安定処理効果が期待できる。

これより、安定処理した酸性土の用途として構造物の基盤材や盛土・路床の構築材などが挙げられる。

謝 辞

研究の遂行にあたり、ご協力いただいた株式会社福井環境分析センターの山口秀尚氏および福井工業高等専門学校の学生諸君に厚く御礼申しあげる。

参考文献

- 1) 山田幹雄・佐野博昭・稲澤知洋・田辺和康：黄鉄鉱含有土のスレーキング特性と力学的性質，建設用原材料，第21巻，第1号，pp.1-8 (2013年3月)
- 2) 山田幹雄・佐野博昭・稲澤知洋・田辺和康：黄鉄鉱を含む中性土の化学的性質に関する一考察，建設用原材料，第22巻，第1号，pp.1-8 (2014年3月)
- 3) (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 (2010年3月)
- 4) 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)
- 5) (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 一二分冊の1 (2009年11月)
- 6) (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 一二分冊の2 (2009年11月)
- 7) 小林一輔 監修：コンクリート実務便覧，オーム社，3・2 混和材，pp.48-54 (2004年12月)
- 8) (社)日本道路協会：舗装施工便覧一平成18年度版一，pp.74-77 (2006年2月)
- 9) 農林水産省・新潟県農林水産部編：新潟県における土づくりの進め方一3 化学性の改善一，pp.71-74 (2005年2月)
- 10) 日本石灰協会：石灰による地盤改良マニュアル，pp.16-21 (2014年1月)
- 11) 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.
- 12) 阿部頼政・井 清・溝口孝芳：Fe石灰工法の開発と発展，舗装，第28巻，第9号，pp.16-22 (1993年9月)
- 13) 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.111-122 (1994年8月)
- 14) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧一第4分冊一，pp.155-158 (2007年6月)

(2014年9月26日受付 2015年2月17日受理)