

# 黄鉄鉱含有土のスレーキング特性と力学的性質

A STUDY ON SLAKING CHARACTERISTIC AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE PYRITE INCLUSION SOIL

山田幹雄\*・佐野博昭\*\*・稲澤知洋\*\*\*・田辺和康\*\*\*\*

by Mikio YAMADA, Hiroaki SANÔ, Tomohiro INAZAWA and Kazuyasu TANABE

## 1. はじめに

周知の通り、黄鉄鉱は硫化鉱物の一種であり、鉄と硫黄から成っている。

鉱山で採掘される黄鉄鉱の多くは立方体の結晶形で、色調は金属光沢のある淡黄色を呈する。一方、海成の泥岩および未固結堆積物に含まれる黄鉄鉱は、フランボイダルパイライトと称する微小な球状結晶の集合体として土粒子間に存在している<sup>1)</sup>。

黄鉄鉱を含む泥岩、細粒堆積物は還元状態で地中に在るときには中性を示すものの、掘削されて空気に接触すると徐々に酸性へ移行する。その原因は、黄鉄鉱が酸化して硫酸を生成することにある。また、この反応には酸素だけでなく微生物(鉄酸化細菌、硫黄酸化細菌)も関与しているとされている<sup>2), 3)</sup>。なお、酸化反応の速度は、黄鉄鉱に由来する硫黄の量と緩衝能(中和能)をもつ方解石などの無機炭素の量との均衡状態によって異なるようである<sup>1), 2)</sup>。

そのため、同じ地山の黄鉄鉱含有土でも酸化反応が顕在的であるか潜在的であるかの相違が、例えば切土斜面の安定性や盛土・路床構築材料としての適性の指標となるスレーキング(乾いた土塊や泥岩が吸水して崩れ、細分化する現象)、強度定数、CBR、一軸圧縮強さにおよぼす影響を知ることは、天然資源や建設発生土の循環利用を促進する上に役立つ。

著者らは、既往の研究において取り扱われた事例の見当たらない「酸性の黄鉄鉱含有土」、「未だ中性の黄鉄鉱含有土」双方のスレーキング特性と力学的性質とを一緒に求めて、それらを比較した。

## 2. 試料の鉱物組成、元素組成および物理・化学的性質

写真-1は、新潟県村上市内の地山斜面露出箇所にて2010年9月に採取した土塊(以後、試料と表記)を

示す。村上市は地質的には沖積平坦地と山間部洪積地で構成されており、採取場所は第四紀更新世中期の上助淵[かみすけぶち]層にあたる<sup>4)</sup>。

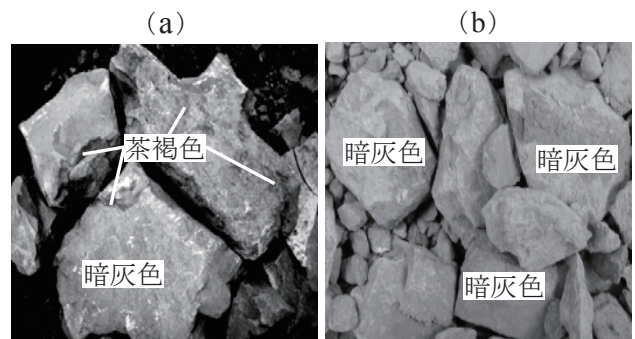
写真-1において試料(a)、(b)の違いは色調と土懸濁液に蒸留水を用いたときのpH(H<sub>2</sub>O)とにある。すなわち、試料(b)は単色、中性であるのに対して、(a)は茶褐色の斑(酸化鉄)を晶出し、強い酸性を示す。ところが、蒸留水の代わりに過酸化水素水を用いたときのpH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)はいずれも極めて低い。

過酸化水素水を加える目的は硫化鉄を全て強制的に酸化させることにあり、pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ≤ 3.5の場合には「長期にわたり酸性化の可能性がある」と判断する<sup>5)</sup>。したがって、試料(a)のみならず(b)にも黄鉄鉱が含まれている1つの根拠となる。

文献6)にはpH(H<sub>2</sub>O)の測定値を基準とする土壤酸性の段階が掲げられており、6.6~7.2は中性域、4.4以下は極強酸性域に区分されている。この土壌学での見地をもとに、以降の記述において試料(a)を「極強酸性土」、(b)を「中性土」と呼称する。

参考までに、村上市ではこれまでに圃場整備事業や高規格幹線道路新設工事に際して、極強酸性土の出現が確認されている<sup>6), 7)</sup>。

前述のように、黄鉄鉱の酸化により硫酸が生成される。このとき黄鉄鉱中の鉄も溶け出すが、重金属



pH(H<sub>2</sub>O) = 2.9~3.3  
pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) = 2.0~2.1

【極強酸性土】

pH(H<sub>2</sub>O) = 6.7~7.2  
pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) = 2.0~2.2

【中性土】

写真-1 試料の外観、色調とpH(実験室搬入時)

\* 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, \*\*\*\* 福山大学 教授 工学部 建築・建設学科

等を含んでいる場合にはそれらも併せて溶出する恐れがある<sup>2)</sup>。溶出試験の結果を表-1に示す。極強酸性土, 中性土ともに土壤環境基準を下回っていた。

続いて, X線回折分析を行って鉱物を同定した。図-1(左)は極強酸性土の回折図, (右)は中性土の回折図である。双方の試料に石英[Q], 俊男石[T], 曹長石[A]に加えて回折角 $2\theta \approx 29^\circ, 33^\circ, 37^\circ, 41^\circ, 47^\circ$ に黄鉄鉱[Py]のピークが現れた。これらの鉱物のほか, 中性土には炭酸カルシウムを主成分とする方解石[C]や二水石膏[G]のピークが確認できる。ここに, 二水石膏は硫酸と方解石との反応生成物であって, 中和作用の継続を裏付けるものである。

図-1には電子線マイクロアナライザー(EPMA)で観察したフランボイダルパイライトの像も示したが, 極強酸性土では黄鉄鉱の酸化分解(硫酸の生成)が進行しているので, 球状結晶の大半が潰れた組成像となっている。また, 中性土の観察から球状結晶の径は元来 $10\mu\text{m}$ 以下とみられる。

表-2は, 蛍光X線分析の結果をまとめたもので

表-1 試料の重金属等溶出量\*

第二種特定有害物質	極強酸性土 [mg/L]	中性土 [mg/L]	基準値 [mg/L]
カドミウム	0.001 未満	0.002	0.01
全シアン	不検出 (定量限界0.1)	不検出 (定量限界0.1)	検出されないこと
鉛	0.002 未満	0.002 未満	0.01
六価クロム	0.01 未満	0.01 未満	0.05
ヒ素	0.006	0.005 未満	0.01
総水銀	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005
セレン	0.001 未満	0.002	0.01
フッ素	0.7	0.1 未満	0.8
ホウ素	0.02 未満	0.52	1.0

\* 環境省告示第18号溶出試験に準拠

ある。極強酸性土と中性土の元素組成(化学成分組成)に差はなく, 主な成分はいずれも二酸化ケイ素( $\text{SiO}_2$ ), 酸化アルミニウム( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )および酸化第二鉄( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )である。

【極強酸性土】

【中性土】

Q: 石英, T: 俊男石, A: 曹長石, Py: 黄鉄鉱, C: 方解石, G: 二水石膏

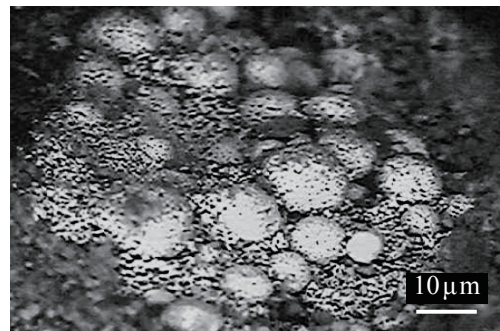
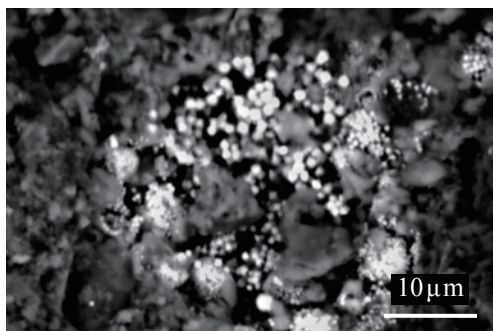
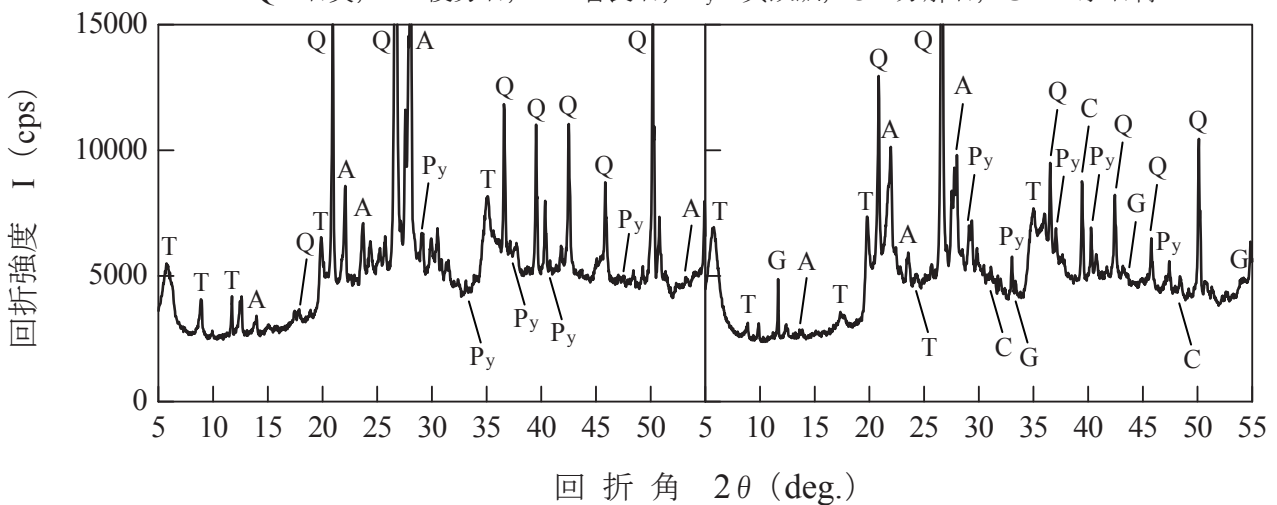


図-1 試料のX線回折プロファイルおよび黄鉄鉱の観察像

表－2 試料の化学成分組成

	極強酸性土	中性土
SiO <sub>2</sub> (%)	71.24	73.88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	14.47	13.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.01	4.55
SO <sub>3</sub> (%)	2.56	2.53
K <sub>2</sub> O (%)	2.36	1.91
MgO (%)	1.79	1.47
CaO (%)	1.07	1.05
Na <sub>2</sub> O (%)	0.76	0.96
TiO <sub>2</sub> (%)	0.51	0.39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.09	0.07
MnO (%)	0.05	0.06
計 (%)	99.91	99.87

表－3は、試料の物理・化学的性質を調べるために行った土質試験の結果を示す。試験にあたっては塊を木槌で叩いて砕き、2mmふるいでふるってこれを通した部分のみを供した。

物理的性質について、土粒子の密度は2つの試料ともに代表的な沖積粘性土(2.50～2.75g/cm<sup>3</sup>)に相当している<sup>5)</sup>。粒度組成としては砂分よりも細粒分を多く含み、とりわけ、極強酸性土ではシルト分の、中性土では粘土分の質量百分率が高い。また、液性限界および塑性限界を測定例<sup>5)</sup>に照合すると、極強酸性土はシルト[沖積層]の範囲(液性限界30～80%、塑性限界20～50%)に、中性土は粘土[沖積層]の範囲(液性限界50～130%、塑性限界30～60%)にある。

化学的性質について有機炭素含有量、強熱減量は極強酸性土に比べて中性土の方が多くなっている。ここで、有機炭素含有量の約2倍が有機物含有量にあたる<sup>5)</sup>ことから、試料の有機物含有量は1.2%(極強酸性土)ないし2.0%(中性土)程度とみなされる。そして、この量は沖積土の測定例である1.6～2.8%におおよそ一致している。

以上のように、極強酸性土と中性土とでは重金属等溶出量および元素組成に特段の違いはないものの、鉱物組成や物理・化学的性質の面で異なる点がいくつか認められた。

### 3. 成形した試料のスレーキング特性

スレーキング試験には、塊(前出写真－1参照)をカッター、直ナイフやワイヤソーで直方体状に成形した試料を供した。その数は極強酸性土で6供試体、中性土では12供試体である。

表－4には作製した供試体の外観や寸法のほか、含水比、湿潤・乾燥密度および指標硬度を示した。

表－3 試料の物理的および化学的性質\*

	極強酸性土	中性土	
土粒子の密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.72	2.57	
砂分	粗砂分(%)	0.1	8.5
	中砂分(%)	2.0	12.0
	細砂分(%)	19.2	12.1
シルト分(%)	60.7	26.7	
粘土分(%)	18.0	40.7	
均等係数	25.9	—	
曲率係数	5.3	—	
液性限界(%)	59.8	123.4	
塑性限界(%)	33.8	36.4	
塑性指数	26.0	87.0	
土質材料の工学的分類	シルト(MH) [高液性限界]	粘土(CH) [高液性限界]	
有機炭素含有量(%)	0.6	1.0	
強熱減量(%)	5.0	5.9	

\*土質試験には2mmふるい通過分を使用

指標硬度とは、貫入式土壌硬度計(全長200mm、直径30mm、内部に78.4Nのコイルばねを装着)のコーン(頂角12°40′、長さ40mm、底面直径18mm)が地盤露出面や供試体などへ貫入する長さ(単位: mm)で表示される測定対象物の硬さを意味する<sup>8)</sup>。

極強酸性土と中性土の指標硬度である約30～35mmは、例えば、のり面緑化工における植物の生育予測からすると“根系の伸長はほとんど不可能”な基盤状態に該当し<sup>9)</sup>、また、水・セメント固化材比

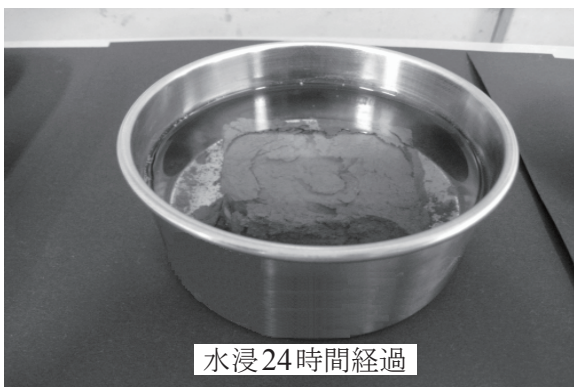
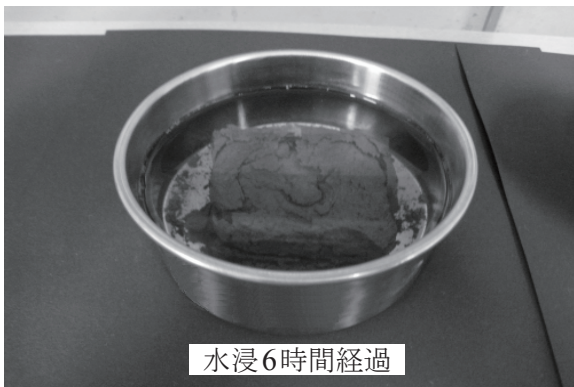
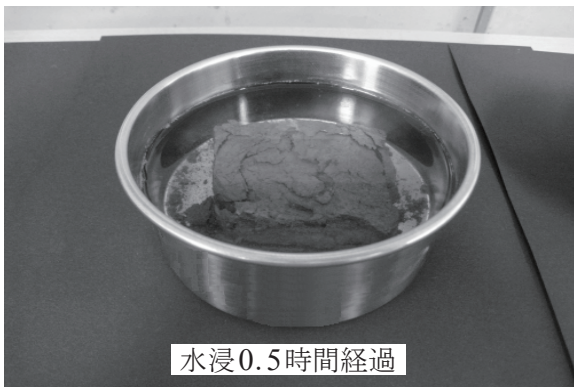
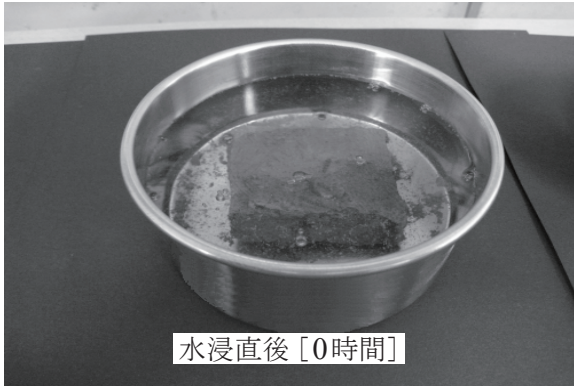
表－4 スレーキング試験に用いた供試体の寸法および性状(成形時)



	極強酸性土	中性土
寸法(mm)*	(縦)約50×(横)約50×(厚さ)約20	
湿潤密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.85～1.87	1.91～1.95
含水比(%)	30.1～32.5	24.3～28.1
乾燥密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.39～1.44	1.49～1.57
指標硬度(mm)**	29.0～32.6	32.6～33.8

\*JGS 2124-2009の試験方法<sup>5)</sup>に準拠  
\*\*文献8)を引用

【極強酸性土】



【中性土】

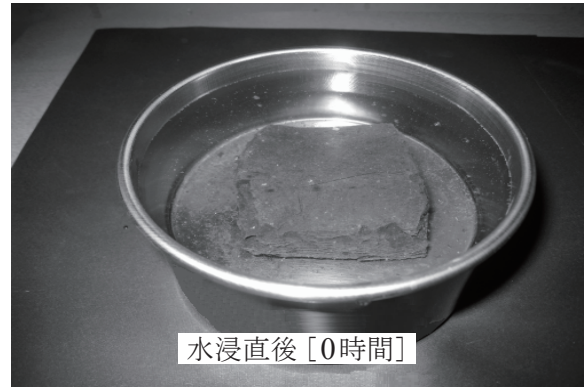


写真-2 スレーキング状況の観察例

【泥岩・凝灰岩（細粒）によくみられるタイプ】<sup>5)</sup>

	水中の供試体の形状
0	変化なし.
1	割れ目が少しできるものの、供試体の原形を保っている.
2	全体に割れ目が多数できて、いくつかの岩片に分かれる。供試体の原形は、概ね判別できる.
3	全体が細粒化して、供試体の原形は判別できない。泥状化の進行は顕著でない.
4	全体が泥状化.

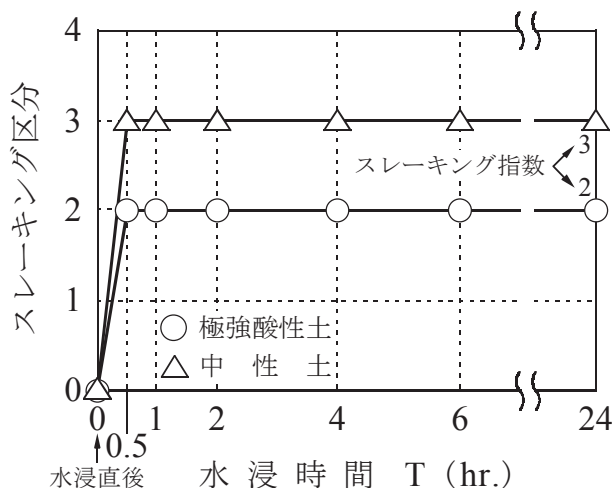


図-2 水浸時間とスレーキング区分(平均)との関係

60~80%, 固化材添加量 $100\sim 350\text{kg}/\text{m}^3$ の配合条件で作製したソイルセメント円柱供試体の材齢28日の一軸圧縮強さ $q_u$ に換算すると、 $0.5\leq q_u\leq 2.0\text{MN}/\text{m}^2$ となる<sup>10)</sup>。したがって、未だ水の作用していない段階での直方体状供試体は極強酸性土、中性土の区別なく、割と大きな緻密さならびに硬さを有しているといえよう。

スレーキング試験はJGS 2124-2009の方法<sup>5)</sup>に準じて風乾した供試体を $40^\circ\text{C}$ で48時間炉乾燥した後、容器に蒸留水を注いで水中静置とした。

水浸によって生じる供試体の形状変化を浸漬直後(0時間)、0.5、1、2、4、6、24時間ごとに写真撮影を行って観察した。一例として、写真-2には供試体の水浸開始から終了にいたるまでの観察経過(左：極強酸性土、右：中性土)を抜粋して示した。

図-2は極強酸性土6供試体、中性土12供試体の平均的なスレーキング区分を整理したものである。

供試体の大半は水浸直後の形状に変化を生じなかったものの、0.5時間でスレーキング区分2(極強酸性土)あるいは3(中性土)に移行し、以降それらの形状は観察を終えるまで変わらなかった。これより、24時間後のスレーキング区分をもって表されるスレ

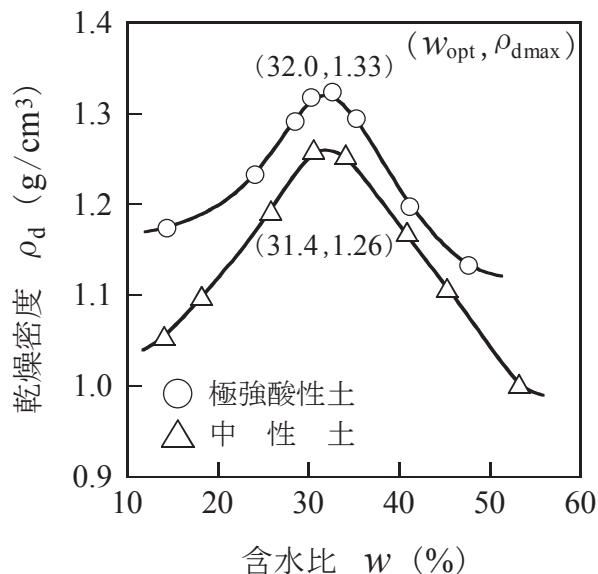


図-3 試料の締固め曲線

表-5 締固めた試料の透水係数\*

	極強酸性土	中性土
供試体製作時		
湿潤密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.76	1.65
含水比 (%)	32.0	31.1
乾燥密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.34	1.26
間隙比	1.037	1.036
飽和度 (%)	84.0	77.1
透水係数 (m/s)	$8.07\times 10^{-10}$	$7.78\times 10^{-7}$
透水性	実質上不透水	非常に低い

\* JIS A 1218の試験方法(変水位)<sup>5)</sup>に準拠

ーキング指数も2あるいは3となった。ただし、中性土では水浸直後の区分が1、指数が4となる供試体も稀に存在した。24時間後に上水のpH( $\text{H}_2\text{O}$ )を測定したところ、極強酸性土の供試体浸漬で3.4~3.7、中性土浸漬では6.8~7.4であった。

前出図-1に示したように極強酸性土、中性土はともに緑泥石とスメクタイトとの混合層鉱物である俊男石[T]を含有している。ここで、スメクタイトは膨潤性の粘土鉱物であることから、いずれも吸水膨張による形状変化を発生し易い試料とみられる。そして、スレーキング指数の差は粒度組成に占める粘土分の違い(前出表-3参照)に原因の1つがあるものと推察される。

極強酸性土を対象としたスレーキング試験に関して、文献11)には土質材料の工学的分類が粘土(CL)に属する岩片のスレーキング指数は2ないし3、上水のpH( $\text{H}_2\text{O}$ )は2.7であったという結果、つまり、本研究で扱った試料と似通った結果が報告されている。

表－6 CBR試験，一軸圧縮試験および定圧一面せん断試験に用いた供試体の作製時における諸値（平均値）

	CBR試験*		一軸圧縮試験**		定圧一面せん断試験***	
	極強酸性土	中性土	極強酸性土	中性土	極強酸性土	中性土
含水比 (%)	32.2	31.4	31.8	30.9	32.1	31.1
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.35	1.27	1.34	1.28	1.33	1.27
間隙比	1.022	1.024	1.029	1.008	1.045	1.024
飽和度 (%)	85.6	78.8	84.1	78.8	83.6	78.1

\* JIS A 1211の試験方法<sup>5)</sup>に準拠 \*\* JIS A 1216の試験方法<sup>12)</sup>を準用 \*\*\* JGS 0561-2009の試験方法<sup>12)</sup>を準用

#### 4. 破碎，締固めた試料の力学的性質

スレーキング試験に引き続き，著者らは突固めによる締固め試験，透水試験，CBR試験，一軸圧縮試験および定圧一面せん断試験を行って極強酸性土，中性土の力学的性質を調べた．これら5種類の試験には，塊を木槌で細かく砕いて2mmふるいでふるい，これを通過した部分を用いた．

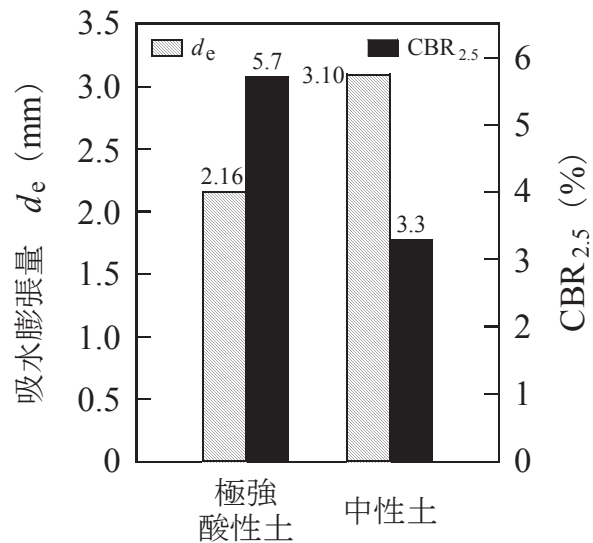
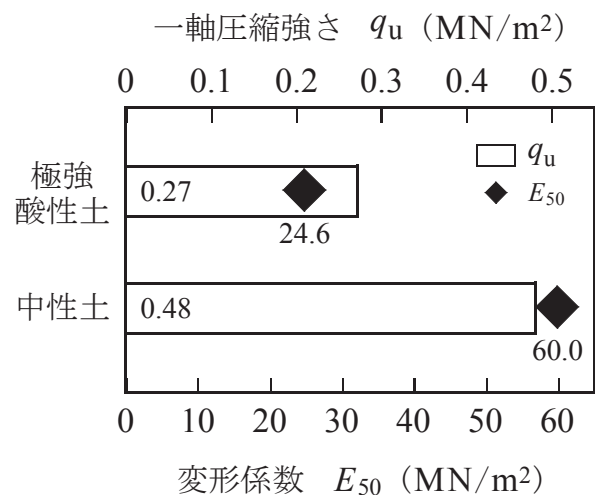
図－3は，JIS A 1210 A-a法<sup>5)</sup>で求めた2つの試料の締固め曲線を示す．細粒分をおよそ70～80%含む（前出表－3参照）ので，曲線はなだらかである．極強酸性土の締固め曲線（記号○）は，中性土の曲線（△）のいくらか右上方に位置する，すなわち，小異ながらも最適含水比 $w_{opt}$ は高く，最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ は大きくなっている．

これらの $w_{opt}$ ， $\rho_{dmax}$ を目標に質量2.5kgのランマーで落下高さを30cm，突固め層数を3，突固め回数を25回/層（締固め試験のA法）として作製した供試体の透水係数を，変水位試験<sup>5)</sup>により求めた結果を表－5に示す．粒度組成の約80%が細粒分である極強酸性土の透水性は，70%近くの中性土に比べて低いことがわかる．なお，試験後の供試体の飽和度は99%を超えていた．

前章でスレーキング指数と粒度組成との関連について推察したが，それには締固めた試料の透水係数の大小も併せて考慮するのが妥当といえる．

表－6はCBR試験，一軸圧縮試験，定圧一面せん断試験用に作製した供試体の含水比，乾燥密度，間隙比および飽和度の平均値をまとめたものである．含水比はいずれも先の $w_{opt}$ に設定し，CBR試験に用いる供試体は質量4.5kgのランマーで突固め（67回/層，3層）で，また，一軸圧縮試験と定圧一面せん断試験に用いる供試体は $\rho_{dmax}$ を目標に静的に締固めて作製した．

CBR試験の結果を図－4に示す．供試体を水槽内に4日静置している間に生じた吸水膨張量 $d_e$ は中性土で大きく，反面，ピストン貫入量2.5mmにおける $CBR_{2.5}$ は小さい．このように，塊を成形した試料と塊を砕いて突固めた試料との違いはあるものの，水

図－4 吸水膨張量と $CBR_{2.5}$ 

図－5 一軸圧縮強さと変形係数

が作用したときの挙動には一致する点が認められる．

次に，一軸圧縮試験用供試体の寸法は直径50mm，高さ100mmであり，作製にあたっては二つ割モールド（内径50mm，高さ125mm）の中に入れた試料

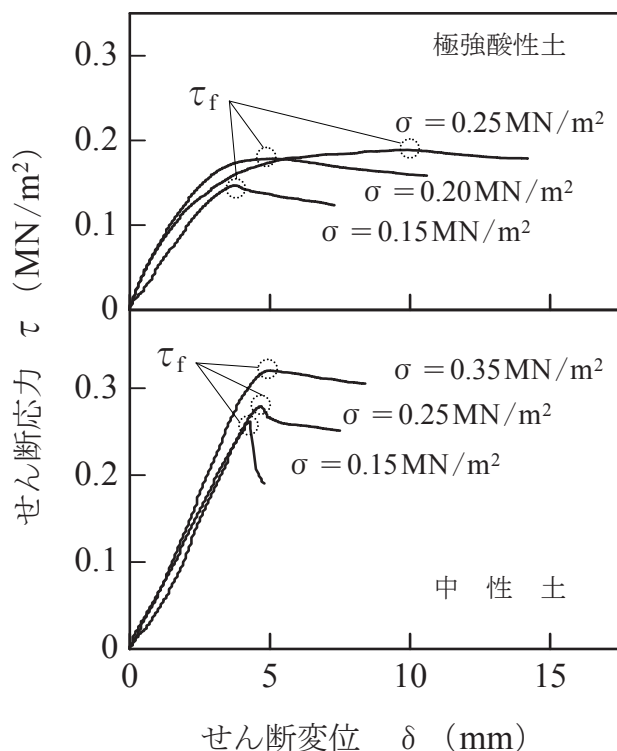


図-6 せん断応力  $\tau$  - せん断変位  $\delta$  曲線

( $w_{opt}$ に調整済)を手動の充填装置により5mm/minの速度で圧した。試験は、1%/minのひずみ速度で行った。

一軸圧縮試験の結果を図-5に示す。载荷に先立ち供試体の水浸養生を要件としない当該試験において、一軸圧縮強さ $q_u$ は極強酸性土に比べて中性土の方が約2倍大きく、さらに、弾性係数の代替に利用されることもある変形係数 $E_{50}$ <sup>12)</sup>は約2.5倍の差となって現れている。

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、予め $w_{opt}$ に調整した試料を締固め用円板で圧しながら3ないし4回に分けて詰めることによって作製した。試験には荷重計最大容量4.9kN、変位測定限度30mmの在来型装置を使用した。せん断変位速度は、装置の作動下限に近い0.1mm/minとした。

供試体に加える垂直応力 $\sigma$ について、その大きさを $q_u$ 未満とするために、極強酸性土の供試体は $\sigma = 0.15, 0.20, 0.25 \text{ MN/m}^2$ の3段階に、中性土は $\sigma = 0.15, 0.25, 0.35 \text{ MN/m}^2$ の3段階に設定した。

図-6は、せん断応力 $\tau$ -せん断変位 $\delta$ 曲線を示す。 $\tau$ の最大値、いわゆるせん断強さ $\tau_f$ は $\sigma$ に比例して増加している。ただし、極強酸性土の $\tau_f$ は中性土の $\tau_f$ の6割程度に止まっている。 $\tau_f$ にいたった時点のせん断変位 $\delta_f$ は、極強酸性土の供試体で3.8~

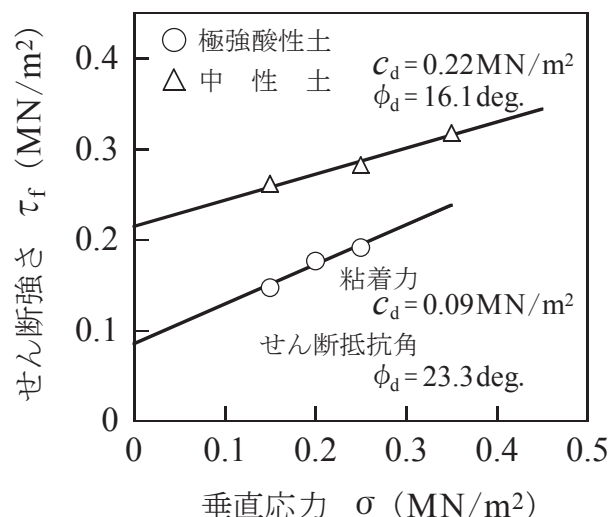


図-7 粘着力とせん断抵抗角

10.0mm、中性土では4.3~5.0mmであり、 $\tau_f$ とともに大きくなるのがわかる。

図-7は、垂直応力 $\sigma$ とせん断強さ $\tau_f$ との関係から求めた強度定数(粘着力 $c_d$ 、せん断抵抗角 $\phi_d$ )を示す。 $c_d$ は中性土の方で、 $\phi_d$ は極強酸性土の方で明らかに大きくなっている。したがって、前者の $\tau_f$ は $c_d$ に、そして、後者の $\tau_f$ は $\phi_d$ に依存する部分が多いといえる。

かつて、著者らは道路切土斜面で採取した黄鉄鉱含有土のpH( $\text{H}_2\text{O}$ )が6.5から3.0へと低下する過程でのコンシステンシー限界、締固め曲線や一軸圧縮強さ $q_u$ の推移を調べたことがある<sup>13), 14)</sup>。そこでは、空気に曝した状態で酸性が進行する土の液性限界、塑性限界、塑性指数はしだいに小さくなり、締固め曲線は左上方に位置して、 $q_u$ は漸増するという結果が得られた。ところが、同じ黄鉄鉱含有土でも湿潤状態に置くと、強酸性になるにともない液性限界、塑性限界や塑性指数のほか、 $q_u$ も漸次小さくなるとの報告がある<sup>15)</sup>。

このように、今回の研究で取り扱った極強酸性土は空気や水との接触履歴にもとづく物理的、力学的性質をすでに有しており、一方の中性土の諸性質は以後の履歴に応じて遷移していくものと考えられる。

## 5. まとめ

著者らは、黄鉄鉱の酸化により硫酸が生成されてpH( $\text{H}_2\text{O}$ )の低下した土(極強酸性土)と、未だ炭酸塩鉱物の緩衝能が優位で中和作用を継続している土(中性土)の乾燥・水中浸漬における形状変化および力学的性質を比較する目的で、スレーキング試験や締固め試験、透水試験、CBR試験、一軸圧縮試験、定圧一面せん断試験を行った。

以下に、本研究で得られた主要な成果を列挙する。  
 (1) 直方体状に成形した試料の指標硬度がほぼ同等でも、スレーキング指数には差を生じる。それには粒度組成に占める粘土分の割合、とりわけ、膨潤性の粘土鉱物であるスメクタイトの多少が係わっているとみられる。併せて、その影響は破碎、締固めた試料で求めた透水係数にも現れる。

(2) CBR試験において、供試体を水浸養生している間に生じた吸水膨張量 $d_e$ は中性土で大きく、極強酸性土で小さくなった。この傾向は、双方のスレーキング指数の大小に整合する。なお、CBR<sub>2.5</sub>は中性土<極強酸性土の関係にある。

(3) 供試体の水浸養生を要件としない一軸圧縮試験および定圧一面せん断試験において、一軸圧縮強さ $q_u$ 、変形係数 $E_{50}$ やせん断強さ $\tau_f$ はいずれも中性土>極強酸性土となった。ここで、中性土の $\tau_f$ は粘着力 $C_d$ に、極強酸性土の $\tau_f$ はせん断抵抗角 $\phi_d$ に依存する部分が多い。

極強酸性土の対策工には覆土工法、層厚基材吹付工法、中和工法やビニールシート工法があり、盛土構築などで利用実績を重ねている<sup>2)</sup>。留意すべきは中性土であって、一見したところ通常の粘土であるものの、酸化反応が潜在的である期間を正確に把握できないことから、土構造物建設資材としての使用に懸念が残る。

この論文に述べた中性土は、採取後2年以上経過した2012年11月の時点でもpH(H<sub>2</sub>O)は6~7の間で変動している。これまでに、分級した試料のX線回折分析を行って粒径と鉱物組成との関係を調べたり、一定の間隔でC(炭素)・N(窒素)・S(硫黄)元素分析を実施して酸化還元度の推定にあたっている。これらの分析結果については、稿を改めて報告することにしたい。

## 謝辞

研究の遂行にあたり、種々の室内試験やデータ整理に携わった福井工業高等専門学校および大分工業高等専門学校の学生諸君に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 土木地質の達人編集委員会編：土木地質 達人の知恵，オーム社，pp.22-28（2009年9月）
- 2) 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）
- 3) 丸茂克美：黄鉄鉱と酸性水，地盤工学会誌，第58巻，第4号，pp.49-50（2010年4月）
- 4) 「日本の地質」刊行委員会：日本の地質4 中部地方I，共立出版，pp.123-142（2007年5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—二分冊の1（2009年11月）
- 6) 青木正雄：強酸性土および酸性水による被害と環境保全対策，材料，第53巻，第12号，pp.1351-1358（2004年12月）
- 7) 山田一夫・菅原寛明：日本海沿岸東北自動車道事業(荒川胎内IC~村上瀬波温泉IC)報告，国土交通省北陸地方整備局 平成23年度管内事業研究会，I.イノベーション-発表論文プログラムNo.9（2011年7月）
- 8) (社)地盤工学会 基準部：地盤工学会基準案「土壌硬度試験方法」ならびに「針貫入試験方法」の公示について，地盤工学会誌，第59巻，第7号，pp.73-74（2011年7月）
- 9) (社)日本道路協会：道路土工一切土工・斜面安定工指針（平成21年度版），pp.203-210（2009年6月）
- 10) 大関敏広・日比野信一・村山篤史：山中式土壌硬度計を用いたソイルセメントの品質管理，第39回地盤工学研究発表会講演集，384，D-00，pp.767-768（2004年7月）
- 11) 鈴木素之・横矢直道・西村昌也・都築俊輔・岡本憲治・山本哲朗：法面工の劣化を生じた酸性土の工学的性質とその残土改良，土木学会論文集C，第64巻，第2号，pp.327-339（2008年6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2（2009年11月）
- 13) 佐野博昭・山田幹雄・太田 実・能澤真周・渡邊康二：酸性移行を呈する土のコンシステンシー限界に関する研究，土木学会論文集，No.610/Ⅲ-45，pp.97-104（1998年12月）
- 14) 佐野博昭・山田幹雄・太田 実・能澤真周：酸性移行を呈する土の強度，変形特性に関する研究，土木学会論文集，No.575/Ⅲ-40，pp.159-167（1997年9月）
- 15) 重松宏明・東 真吾・池村太伸・澤本洋平・林宗平・能澤真周・八嶋 厚：黄鉄鉱に起因する酸性化が粘性土の土質特性に及ぼす影響評価，土木学会論文集C，第62巻，第2号，pp.429-439（2006年5月）

(2012年11月8日受付 2013年2月26日受理)