

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

BEHAVIOR OF A HYDROGEN ION EXPONENT AND THE STRENGTH DEVELOPMENT IN
ACID SOIL TREATED WITH LIME

山田幹雄*・佐野博昭**・稲澤知洋***・小木曾晴信****

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

1. はじめに

pH(H₂O) ≤ 4.4 の極強酸性¹⁾を呈する土は、海成性や火成性のパイライト(黄鉄鉱: FeS₂)に由来する硫酸根を含むために酸性硫酸塩土と呼ばれている。

一般に、この土の酸化過程は2つの段階から成り、初めにパイライトと空気中の酸素との接触によって無機化学的酸化作用が進行し、pH(H₂O) ≃ 4にまで低下する。次いで、硫黄酸化菌や鉄酸化菌といった微生物が介在する生物的酸化作用に移行し、急激に硫酸が生成されてpH(H₂O) < 3にいたる²⁾。

酸性硫酸塩土は大規模な土地改変をとともなう農地開発のほかトンネル、道路、宅地造成などの工事で出現している³⁾。対策としては硫酸根を含まない消石灰や炭酸カルシウムの投入による中和処理が常套であるが、重金属等の有害物質を含有する場合には不溶化処理をも施して循環利用が図られている⁴⁾。

これら従前に陸化した地層からの出現に加えて、先の東北地方太平洋沖地震がもたらした津波堆積物(959万トン)には酸性硫酸塩土と判定されるヘドロが広範囲にわたって分布していた^{5), 6)}。国土交通省が示したガイドライン⁷⁾では、津波堆積物が主体の再生土砂を、沈降地盤を嵩上げして宅地造成を行うための復興資材として活用することが推奨された。そこでは、造成地用盛土材料の品質を満足する上で再生土砂の安定処理も手順の1つに組み込まれた。

安定処理した酸性硫酸塩土の挙動について、例えば、重松ら⁸⁾は消石灰添加、最長30日養生の供試体における一軸圧縮強さ q_u はSEM像に映ったエトリンタイトの形成状況をもって説明でき、それゆえに次なる課題は反応生成物の定量的把握としている。

以上のことから、著者らは酸性硫酸塩土の現場内

利用や工事間流用の促進に資する目的で、4種類の安定材(消石灰のほか3つの酸化鉄-石灰系材料)を個別に添加した酸性硫酸塩土におけるpH(H₂O)と一軸圧縮強さ q_u の経時変化を1年間にわたって調べた。さらに、X線回折分析と熱分析とを組み合わせた手法でエトリンタイト生成量の概算を試みた。なお、次章以降、酸性硫酸塩土を酸性土と称する。

2. 試験に用いた酸性土の性質および安定材の種類

試験には、大分市内の道路新設工事における地山切取り区間で採取した土を用いた。現場は大分層群滝尾層の分布域にあり、法面は海成粘土を主とする泥岩である。試験に先立ち、塊を木槌で叩いて砕き、2mmふるいでふるってこれを通過した部分のみをビニール袋に入れて暗所に置いた。

本研究で扱うpH(H₂O)は「試料と蒸留水との質量比=5」を検液とするJGS 0211の方法⁹⁾に準じて測定した値とするが、採取した土はすでに極強酸性を呈していた。

酸性土の蛍光X線分析の結果を表-1に示す。主な成分は、二酸化ケイ素と酸化アルミニウムである。

別途、環境省告示第18号溶出試験を行って第二種特定有害物質(9種)の溶出量を調べたところ、いずれも基準に適っていた。

表-2は、酸性土の土質試験や化学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(シルト分+粘土分)の含有量が2倍程度多い。これに関連して、最適条件(最適含水比 w_{opt} 、最大乾燥密度 ρ_{dmax})を目標に作製した供試体の変水位試験⁹⁾での透水性は非常に低いものとなっている。pH(H₂O)の値と「酸性化可能性試験」⁴⁾で測定したpH(H₂O₂)の値との差は小さく、採取箇所では土中に含まれるパイライトの酸化分解(硫酸の生成)がかなり進んでいるとみられる。この点については、硫酸イオン含有量が“コンクリートに対する強侵食性有り”と判定される5000mg/kg以上⁹⁾であることから窺い知れる。通常、有機炭素含有量の1.7~2

*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 酸性土の化学成分組成

二酸化ケイ素 [SiO ₂] (%)	55.9
酸化アルミニウム [Al ₂ O ₃] (%)	24.4
酸化第二鉄 [Fe ₂ O ₃] (%)	6.8
三酸化硫黄 [SO ₃] (%)	6.0
酸化ナトリウム [Na ₂ O] (%)	1.5
酸化マグネシウム [MgO] (%)	1.5
酸化カリウム [K ₂ O] (%)	1.3
二酸化チタン [TiO ₂] (%)	1.3
酸化カルシウム [CaO] (%)	1.2
計 (%)	99.9

表-2 酸性土の物理的, 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)	2.572	
砂分	粗砂分 (%)	0.2
	中砂分 (%)	1.9
	細砂分 (%)	30.2
シルト分 (%)	39.2	
粘土分 (%)	28.5	
液性限界 (%)	52.2	
塑性限界 (%)	29.4	
塑性指数	22.8	
土質材料の工学的分類	シルト(MH) [高液性限界]	
力学的性質		
最適含水比 (%)	32.3	
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.283	
透水係数 (m/s)	1.3×10 ⁻⁷	
化学的性質		
pH(H ₂ O)	2.6	
pH(H ₂ O ₂)	2.2	
有機炭素含有量 (%)	2.1	
強熱減量 (%)	10.1	
硫酸イオン	濃度 (mg/L)	4700
	含有量 (mg/kg)	29000

倍が有機物含有量に相当する⁹⁾ので、換算して均すと3.9%となる。それでも、有機質土(有機物含有量 $\geq 5\%$)には分類されないものの、安定処理に際して留意すべき量といえる¹⁰⁾。

図-1は、前出表-2に記載した最適含水比 w_{opt} および最大乾燥密度 ρ_{dmax} を決定する根拠となった締固め曲線(JIS A 1210 A-a法⁹⁾に準拠)を示す。著者らは、安定処理に先立って酸性土単体の一軸圧縮強さ q_u を $w_{opt}=32.3\%$ 、 $\rho_{dmax}=1.283\text{g/cm}^3$ の条件で作製した供試体と、 ρ_{dmax} の95%にあたる乾

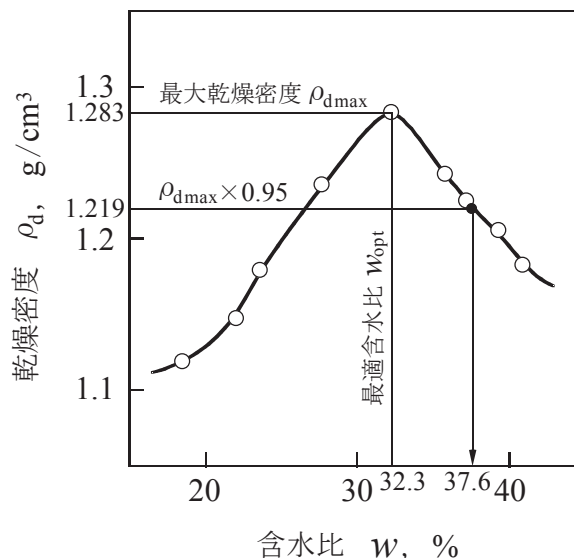


図-1 酸性土の締固め曲線および供試体の作製条件

表-3 酸性土単体で作製した供試体の一軸圧縮強さと変形係数

設定	含水比 w (%)	32.3	37.6
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)		1.283	1.219
一軸圧縮強さ q_u (MN/m ²)		0.24	0.08
変形係数 E_{50} (MN/m ²)		14.1	3.8

燥密度と締固め曲線とが湿潤側で交わる含水比 $w=37.6\%$ の条件で作製した供試体の双方で比較してみた。

供試体の寸法は直径50mm、高さ100mmであり、作製にあたっては所定の含水比に調整した酸性土を内径50mm、高さ125mmの二つ割モールドの中に入れ、これを手動の充填装置を用いて5mm/minの速度で圧した。乾燥密度は、モールドに入れる酸性土の湿潤質量を加減して目標に合わせた。一軸圧縮試験には容量19.6kNの載荷装置を使用し、ひずみ速度は1%/minに設定した¹¹⁾。なお、次章に述べる安定材を添加した酸性土についても供試体の寸法、作製手順や試験方法は同じとした。

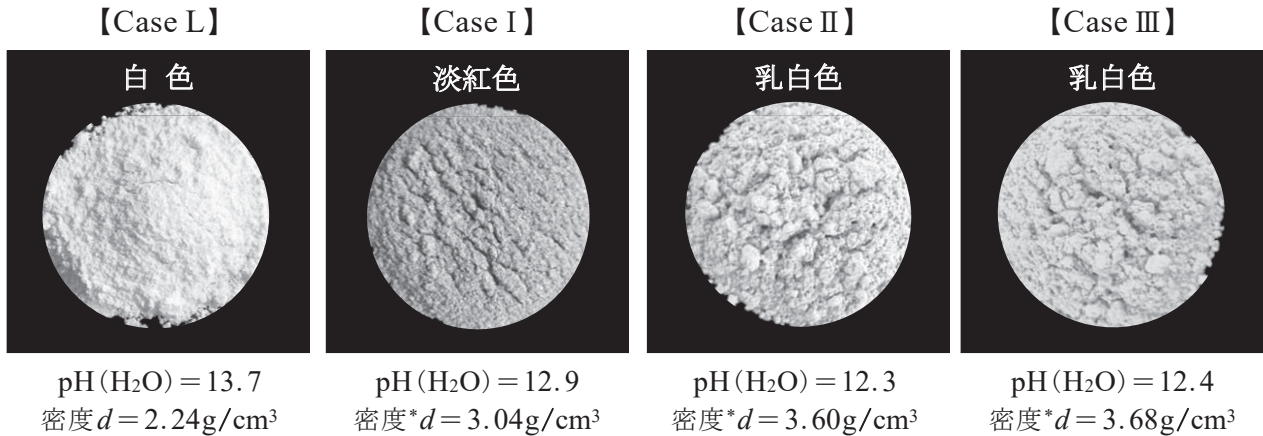
表-3は、酸性土単体における試験結果をまとめたものである。含水比 w を約5%高く、乾燥密度 ρ_d を約0.06g/cm³小さくして作製した供試体の一軸圧縮強さ q_u は最適条件で作製した供試体の1/3に、また、弾性係数の代替に利用されることもある変形係数 E_{50} ¹¹⁾は1/4の大きさに止まっている。

乾燥密度 $\rho_d=1.193\text{g/cm}^3$ ($\rho_{dmax} \times 0.93$)、含水比 $w=40.3\%$ の状態で作製した供試体は自立不能となった。

表-4 酸性土に添加した4種類の安定材における原料の配合割合

Case	消石灰 [純度95%以上]	鉄スラッジ	生石灰 [粉状] [純度93%以上]	炭酸カルシウム [JIS A 5008 適合品]	高炉スラグ微粉末 [JIS A 6206 適合品]	無水石膏微粉末 [II型]
L	10割	—	—	—	—	—
I	—	4割	4割	2割	—	—
II	—	4割	2割	2割	2割	—
III	—	4割	2割	—	2割	2割

注) Case I では、生石灰を湿ったままの鉄スラッジに予め混ぜ合わせて水分を気散。
Case II および III 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。



* 個々の原料の密度をもとに算出。

写真-1 安定材の外観、色調、pHおよび密度

これより、 $w = 37.6\%$ に調整した酸性土に安定材を添加し、 $\rho_d = 1.219\text{g/cm}^3$ を目標に静的に締固めて供試体を作製する段取りとした。

表-4に示すように、安定材には消石灰(Case L)のほか鉄スラッジ、生石灰、炭酸カルシウム、高炉スラグ微粉末、無水石膏微粉末を試行的割合で混ぜ合わせた3つの材料(Case I, II, III)を用いた¹²⁾。

ここに、鉄スラッジは希土類磁石の製造過程で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(酸化鉄)であり、水分を34%含んでいる。この残渣は産業廃棄物扱いのため、埋め立て処分量を減らす上にも有効利用が望まれている。

原料のうち、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潜在水硬性の発揮を、無水石膏微粉末はエトリンガイトの生成を期待して加えた。

湿潤状態の鉄スラッジ(pH(H₂O) = 6.2)について、Case Iではこれと同量(4割)の生石灰を添加し、消化吸水反応により消石灰となる過程の脱水・発熱を利用して乾かした。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除いていった。

著者らはCase I, II, IIIを「酸化鉄-石灰系材料」の類とみなし、併せて、当該材料の添加がもたらす土性の改善も石灰安定処理の範疇とした。

写真-1は4種類の安定材の外観、色調や性状を示す。Case I, II, IIIの粒度組成は、いずれも砂分(径2000~75 μm)が95%近くを占めていた。また、計算で求めたこれらの密度 d がCase Lに比べて大きいのは、鉄スラッジの密度 $d = 5.24\text{g/cm}^3$ に因る部分が多い。pH(H₂O)は、4種類ともに12を超えていた。

3. 安定処理した酸性土のpHおよび一軸圧縮強さの経時変化

安定材の添加率は、酸性土の乾燥質量に対して6%(68kg/m³)、8%(89kg/m³)、10%(110kg/m³)の3通りとした。前述した要領で作製した供試体は、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℃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。pH(H₂O)は、含水比を調整した酸性土に安定材を添加・混合した時点と所定の養生期間を

経て一軸圧縮試験を行った直後に測定した。

図-2はCase L, I, II, IIIの供試体におけるpH(H₂O)と一軸圧縮強さ q_u の経時変化を示す。ここで[]内、()内の数値は、それぞれ空气中養生日数 $D_a=0$ 日および $D_a=360$ 日のpH(H₂O), q_u を表す。

供試体作製当日($D_a=0$ 日)のpH(H₂O)はCase

L, I, II, IIIの区別なく安定材を多く添加するほど高くなり、かつ、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) \geq 8$ の強アルカリ性¹⁾を呈している。その後、短くて $D_a=56$ 日、長い場合は $D_a=270$ 日まで石灰成分が中和作用に消費され、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は総じて1.3~2.8低くなっている。とりわけ、 $D_a=0$ 日から $D_a=14$ 日ないし21日にかけて

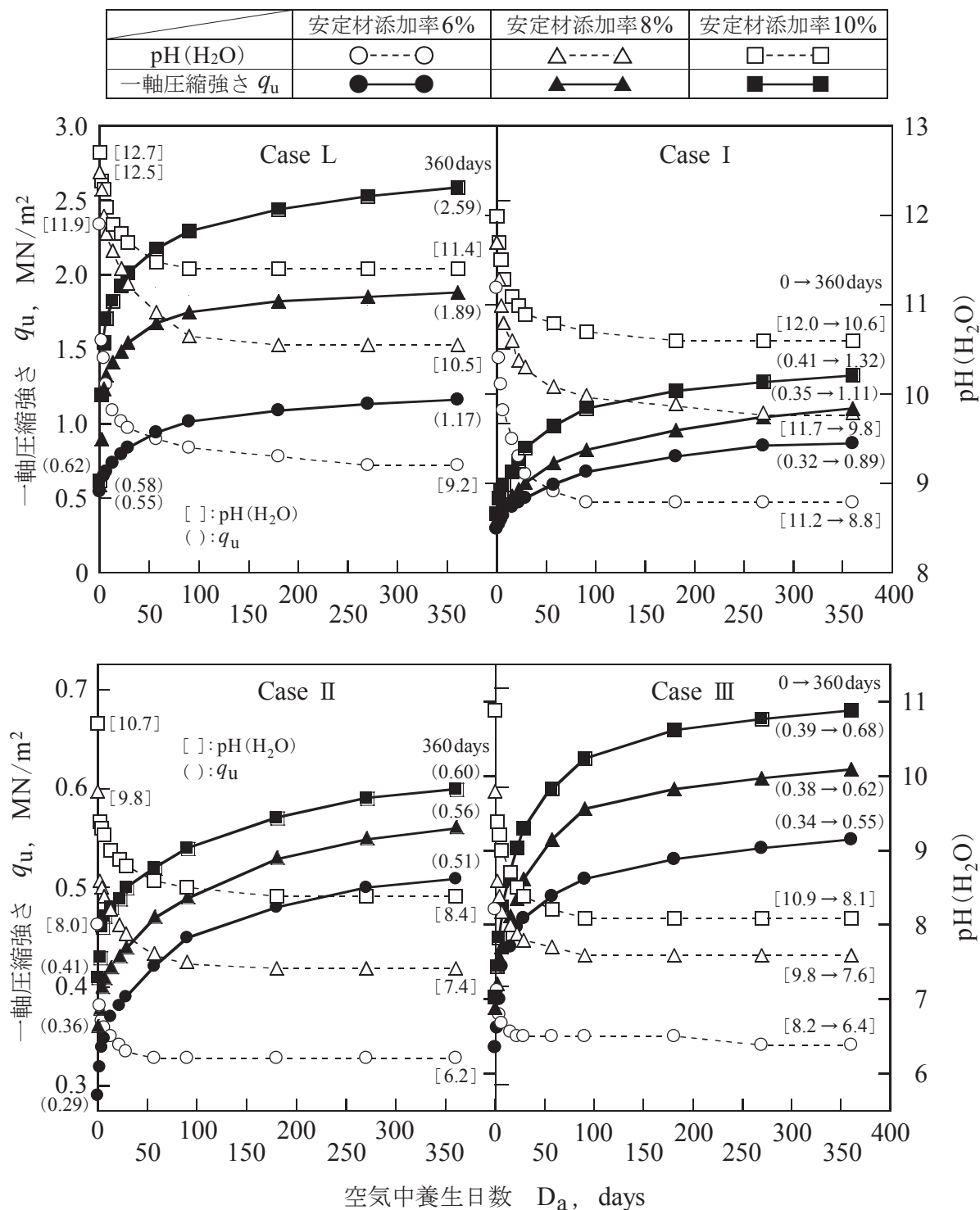


図-2 安定処理した酸性土におけるpHと一軸圧縮強さの経時変化

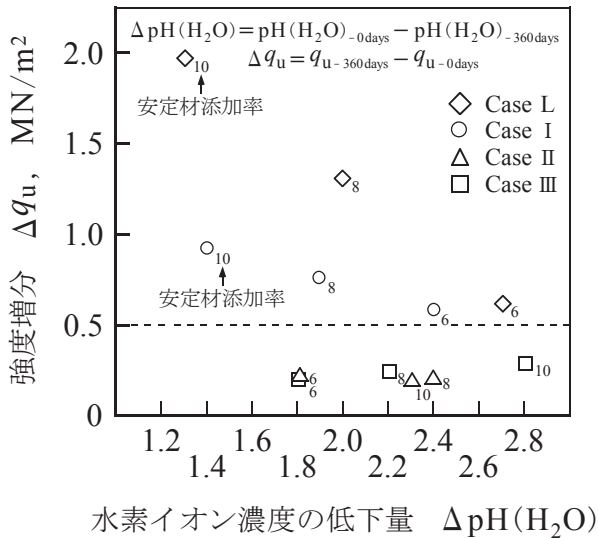


図-3 空气中養生期間に生じたpHの低下量と強度増分との関係

の低下が著しい。さらに、 $D_a = 360$ 日の $pH(H_2O)$ をみると、Case LおよびIではすべての供試体が強アルカリ性の域にあるものの、Case IIおよびIIIでは安定材添加率10%の供試体(記号□)のみが強アルカリ性、添加率8%の供試体(△)は弱または微アルカリ性($pH(H_2O) = 7.9 \sim 7.3$)¹⁾、添加率6%の供試体(○)は微酸性($6.5 \sim 6.0$)¹⁾の域にある。

酸性土に4種類の安定材を6%添加したときの含水比 w の平均は35.5%、8%添加では34.5%、10%添加では33.6%と、設定含水比 $w = 37.6\%$ から2~4%低くなった。その影響が $D_a = 0$ 日の q_u に現れ、安定材添加率6%→10%でCase L, I, II, IIIの供試体はいずれも $0.1MN/m^2$ 程度増加した。 q_u は安定材添加率とともに、そして、 D_a とともに大きくなるが、最終強度($D_a = 360$ 日の q_u)の概ね9割をCase L, II, IIIでは $D_a = 90$ 日までに、Case Iでは $D_a = 180$ 日までに発現している。上述のように、Case IIおよびIIIの一部の供試体は空气中養生の初期の時点で強アルカリ性の域を逸して中性($pH(H_2O) = 7.2 \sim 6.6$)¹⁾、微酸性へと移行したけれども、 q_u をみる限りその経緯が強度の発現を妨げる要因にはなっていないようである。

360日の空气中養生期間に生じた $pH(H_2O)$ 、一軸圧縮強さ q_u の変化をそれぞれ「水素イオン濃度の低下量 $\Delta pH(H_2O)$ 」、「強度増分 Δq_u 」として整理した結果を図-3に示す。ここで、記号に添えた数値は安定材添加率を表す。

Case L(記号◇)、I(○)では Δq_u と $\Delta pH(H_2O)$ との間に反比例の関係が認められ、安定材添加率が高いほど Δq_u は大きく、 $\Delta pH(H_2O)$ は小さくなって

いる。これに対して、Case II(△)およびIII(□)では $\Delta q_u - \Delta pH(H_2O)$ の関係は明らかでない。つまり、 $\Delta q_u = 0.5MN/m^2$ (破線)が $\Delta q_u \propto \{1/\Delta pH(H_2O)\}$ の兆候が現れるか否かの境になっているとみられる。

安定材Case Iでは、生石灰と鉄スラッジ中の水分との反応によって生石灰質量の1.32倍の消石灰が生成される¹³⁾。消石灰量に着目すると、Case IはCase Lの1/1.9(前出表-4参照)となって、Case Lの Δq_u のおよそ半分がCase Iの Δq_u にあたる。実際には、後者は前者の92%(安定材添加率6%)、58%(安定材添加率8%)、46%(安定材添加率10%)であり、Case Iの供試体には後述するエトリンガイトに加えて二次生成物の水酸化鉄の関与が窺える¹²⁾。

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 との関係を調べたところ、 E_{50} は q_u に比例して大きくなり、安定材添加率にかかわらずCaseごとに1本の回帰直線で表すことができた。すなわち、Case Lの供試体における E_{50} は q_u の165倍の値に、Case Iでは92倍の値に、II, IIIではそれぞれ87倍、86倍の値に相当していた。

4. 熱分析によるエトリンガイト生成量の比較

一般に、パイライトの酸化により生成された硫酸と、粘土鉱物から溶脱したカルシウムとが反応して二水石膏が生成される⁴⁾。この二水石膏に、酸性土の成分である酸化アルミニウム(前出表-1参照)の溶出、消石灰(生石灰の消化吸水反応物も含む)の添加が相乗するとエトリンガイト結晶が生成され、隣り合う土粒子に針状に絡んでそれらの移動を拘束する。石灰安定処理ではエトリンガイト反応を短期、不溶性の水和化合物を生成するポゾラン反応を長期(数ヶ月~数年)の硬化現象として区別している¹³⁾。

今回、著者らは酸性土単体のTG-DTA(熱重量-示差熱)曲線を基準に置いてCase L, I, II, IIIの供試体(全12本)を対象にエトリンガイト生成量の比較を試みた¹⁴⁾。なお、熱分析およびこれに先立って実施したX線回折分析には、空气中養生日数 $D_a = 360$ 日の一軸圧縮試験を終えた供試体を砕いた塊(検体)を用いた。以下に、分析手順と測定結果の例を記述する。

初めに、酸性土単体の鉱物組成を調べたところ、図-4(a)に示すように回折線の位置(回折角 2θ)から黄鉄鉱[Py]、石英[Q]、曹長石[A]、白雲母[P]が同定されたほか、鉄明礬石[J]や二水石膏[G]の二次的な生成が確認された。

4つのCaseのすべての検体にはPy, Q, A, P, J, Gのピークに加えて、回折強度Iには差があるものの回折角 $2\theta \approx 9^\circ, 16^\circ, 18^\circ, 19^\circ, 26^\circ, 31^\circ, 32^\circ, 35^\circ$,

Py: 黄鉄鉱, Q: 石英, A: 曹長石, P: 白雲母, J: 鉄明礬石, G: 二水石膏, E: エトリングライト

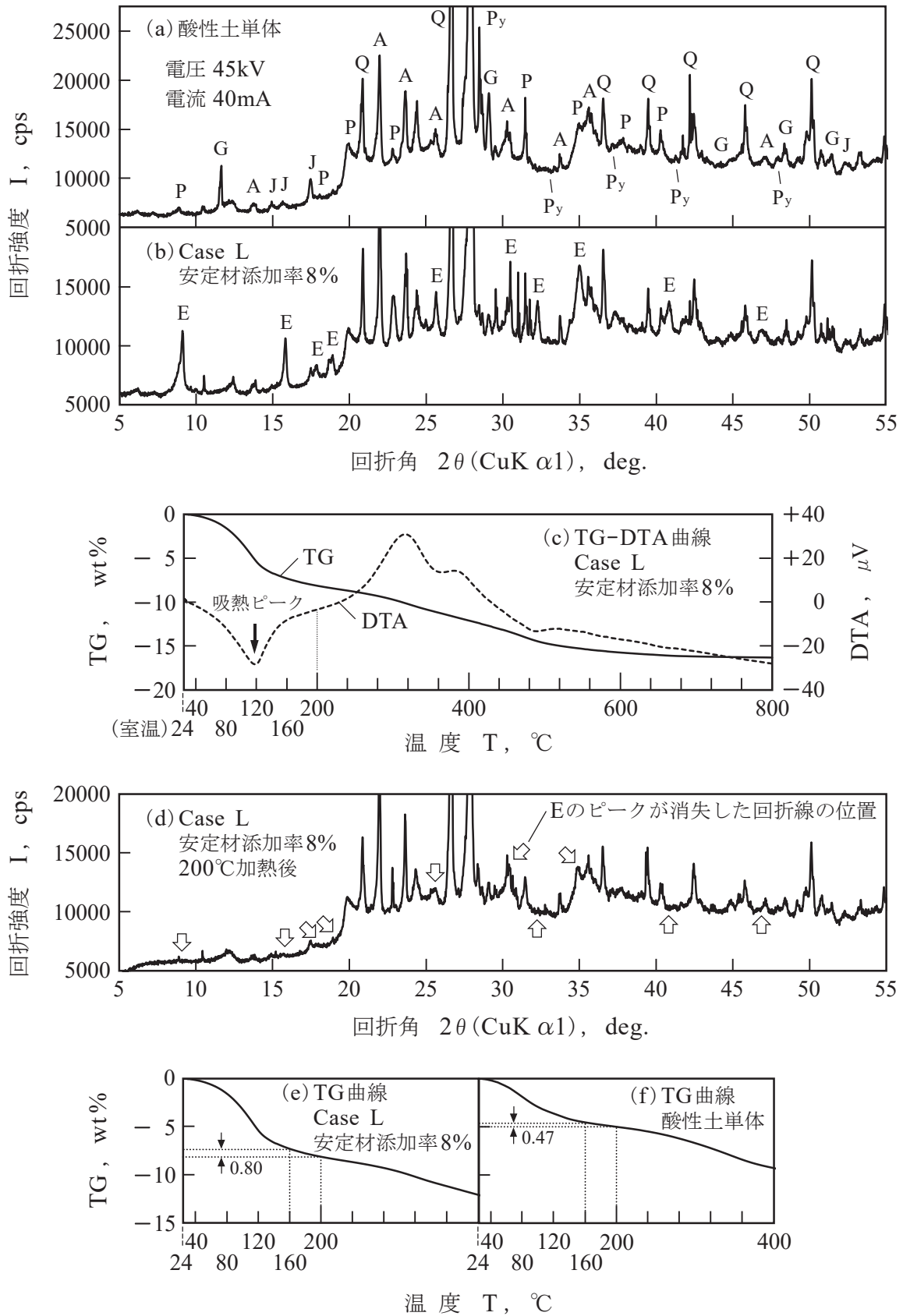


図-4 X線回折プロファイルおよびTG-DTA測定結果の例

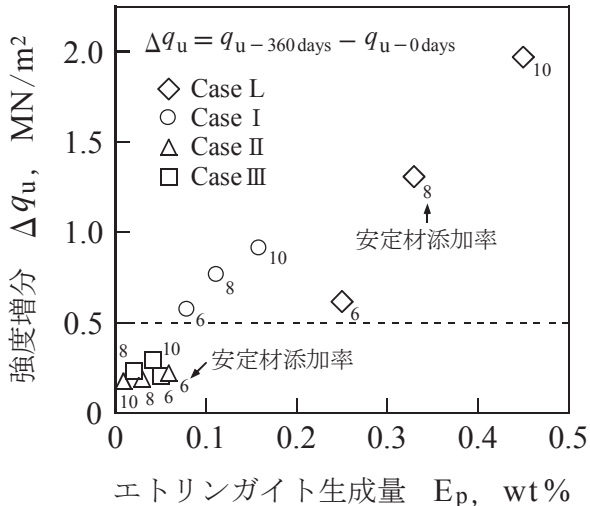


図-5 エトリンガイト生成量と強度増分との関係

41°, 47° にエトリンガイト [E] のピークが現れた。ただし、Case I, II, III の9検体において水酸化鉄は非晶質のためにピークサーチで検出されなかった¹²⁾。1例までに Case L, 安定材添加率8%の検体のX線回折プロファイルを図-4 (b) に示した(後出(c)~(e)も当該検体での例)。

次に、空気を100mℓ/minで供給しながら室温24°Cから800°Cまで昇温したときのTG-DTA曲線を求めた。その結果、120°C付近に大きな吸熱ピークがみられたので(図-4 (c) 参照)、この吸熱ピークの収束点である200°Cまで加熱した検体のX線回折プロファイルを図-4 (b) に照合したところ、加熱前には存在したエトリンガイト [E] の回折ピークはすべて消失していた(図-4 (d) の☐参照)。

これより、室温24°C~200°CのDTA曲線の吸熱変化に対応するTG曲線の減量(TG減量)をもとに検体ごとのエトリンガイト生成量を概算した。

具体的には『① 24°C~200°CのTG減量』から『② 24°C~160°CのTG減量』を差し引いて、図-4 (e) に示すようにエトリンガイトの160°C~200°Cでの加熱分解に起因するTG減量を求めた¹⁵⁾。ここで、②を考慮に入れた理由は120°C~160°CのTG減量には母材の酸性土、原料の高炉スラグや無水石膏、二次的に生成する二水石膏などの影響も含まれると判断した点にある。さらに、『③ 酸性土単体の160°C~200°CのTG減量(図-4 (f) 参照)』を空白値とし、これを差し引いてベースライン補正を行った。

したがって、本研究では“160°C~200°Cの温度範囲でのTG減量=エトリンガイト生成量”とみなし、“①-②-③”で算出されるものとした。

Case L, I, II, IIIの供試体(検体)におけるエトリ

ンガイト生成量 E_p と一軸圧縮試験で得られた強度増分 Δq_u との関係を整理した結果を図-5に示す。図中の記号に添えた数値は、安定材添加率を表す。

$\Delta q_u > 0.5 \text{ MN/m}^2$ の Case L (記号◇) と I (○) では、安定材添加率が高くなると Δq_u のみならず E_p も増加しており、 E_p を比べると Case L の3割ないし4割が Case I にあたる。一方、 $\Delta q_u < 0.5 \text{ MN/m}^2$ の Case II (△) および III (□) では安定材添加率と E_p 、 E_p と Δq_u との間に明確な傾向は認められない。

Case II, III の E_p が0.06wt%以下で Δq_u も小さいのは、エトリンガイト反応の途中で高アルカリ雰囲気損なわれたのが原因と推察される¹³⁾。これは、前出図-2で Case L, I よりも全般に $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ が低いこと、つまり、酸性土に対処する安定材としての石灰成分の配合不足を意味している。

今回の熱分析には、入手の困難なエトリンガイトそのものを標準試料に用いていないので、厳密には定量分析とは言い難い。また、限られた温度範囲でのTG減量に着目しているために、エトリンガイト生成量 E_p を少なく見積もっている懸念が残る。それでも、Caseごとに現れた一軸圧縮強さ q_u や強度増分 Δq_u の大小(前出図-2, 3参照)を説明する根拠の1つには成り得るといえよう。

5. 結論

建設発土に混じって出現したり、津波堆積物のように元は水底に在った砂泥が陸上に運ばれて残留したり、極強酸性を呈する土と遭遇する機会は依然として多い。著者らは、取り扱いに造作の掛かる土であっても廃棄よりも活用が常軌の時局に鑑みて、消石灰や酸化鉄-石灰系材料を酸性土に加えた後の添加率と $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 、一軸圧縮強さ q_u との関係を調べるとともに、熱分析を行って強度発現の差を裏付けるエトリンガイト生成量 E_p の比較を試みた。

本研究で得られた主要な成果を要約すると、次の4つとなる。

- (1) 安定材の種類や添加量の多少にもよるが、作製した供試体の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は空气中養生日数 $D_a = 14$ 日ないし21日にかけて著しく低下する。その後、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ が一定となるまでに最長で $D_a = 270$ 日を要する。
- (2) 供試体の一軸圧縮強さ q_u は安定材添加率および D_a とともに増加し、 $D_a = 90$ 日ないし180日を経て $D_a = 360$ 日の q_u の9割に達する。したがって、上記(1)と併せて、石灰安定処理した酸性土の挙動を追究するには短くても1ヶ年の期間を見込むのが妥当といえる。
- (3) 強度増分 $\Delta q_u = 0.5 \text{ MN/m}^2$ を境に、 Δq_u がこれ

を超えるると水素イオン濃度の低下量 $\Delta\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ との間に反比例の関係が成り立つ。

- (4) $\Delta q_u > 0.5\text{MN}/\text{m}^2$ の安定処理効果が発揮されると、添加量を多くするにともない Δq_u のみならずエトリンサイト生成量 E_p も増える傾向にある。

6. あとがき

建設発生土(固結度の低い凝灰岩)に生石灰を4%添加して自動車専用道路の構築路床に用いた事例¹⁶⁾によると、供試体材齢14日の一軸圧縮強さ $q_u = 0.6\text{MN}/\text{m}^2$ 、材齢28日では $q_u = 1.1\text{MN}/\text{m}^2$ であったと報告されており、この結果は前出図-2のCase L, 安定材添加率6%およびCase I, 添加率10%の q_u にほぼ該当する。これより、改良対象土は異なるけれども、石灰安定処理した酸性土の現場内利用や工事間流用にあたって道路の路床・盛土を視野に入れるのも一策と考えられる。

試行した熱分析には、定量精度や感度の面に未だ検討の余地がある。いずれにしても、データの蓄積のもと、一軸圧縮試験をともなわずにエトリンサイト生成量 E_p をもって酸性土の安定処理効果を推測可能となれば、配合設計や品質管理に有益となろう。

謝 辞

研究の遂行にあたり、貴重なご助言を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に厚く御礼申しあげる。さらに、種々の室内試験、データ整理や事前の現地調査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る。

参考文献

- 1) 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 -3 化学性の改善-, pp.71-74 (2005年2月)
- 2) 中野裕司：極強酸性土壌のり面の緑化について、新潟応用地質研究会誌, 第37号, pp.28-39 (1991年12月)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 北川 巖・友正達美・原口暢朗・塩野隆弘・若杉晃介・芦田敏文・瑞慶村知佳：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による津波被災農地の堆積物・土壌の理化学的特徴, 農村工学研究所技報, 第213号, pp.39-51 (2012年5月)
- 6) 高井敦史・肴倉宏史・八村智明・打木弘一・大嶺 聖・飯塚 敦：津波堆積物とその特性, 地盤工学会誌, 第61巻, 第2号, pp.16-19 (2013年2月)
- 7) 国土交通省都市局都市安全課：迅速な復旧・復興に資する再生資材の宅地造成盛土への活用に向けた基本的考え方 (2012年3月)
- 8) 重松宏明・西木佑輔・西澤 誠・池村太伸：酸性硫酸塩土の石灰安定処理に関する一考察, 土木学会論文集C, 第65巻, 第2号, pp.425-430 (2009年5月)
- 9) (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)
- 10) (社)地盤工学会：土質工学用語辞典 (1996年4月)
- 11) (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)
- 12) 山田幹雄・佐野博昭・稲澤知洋・小木曾晴信：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, 建設用原材料, 第23巻, 第1号, pp.12-19 (2015年4月)
- 13) 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)
- 14) 荻野圭三：示差熱分析法の原理と測定法, 色材協会誌, 第43巻, 第6号, pp.287-293 (1970年6月)
- 15) 栗本雅裕・廣中哲也・東 邦和・森本克秀：硫酸腐食環境下でのコンクリートの劣化予測モデル, コンクリート工学年次論文集, 第27巻, 第1号, pp.853-858 (2005年6月)
- 16) 日本石灰協会：石灰による地盤改良事例集(Ⅱ), pp.117-132 (2013年10月)

(2016年1月4日受付 2016年4月8日受理)