

酸性移行を呈する土の強度, 変形特性に関する研究

佐野博昭¹・山田幹雄²・太田 実³・能澤真周⁴

¹正会員 博(工) 石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒929-03 石川県河北郡津幡町北中条)

²正会員 工博 金沢工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒921 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

³正会員 工博 金沢工業大学教授 工学部土木工学科 (〒921 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

⁴正会員 石川工業高等専門学校技官 環境都市工学科 (〒929-03 石川県河北郡津幡町北中条)

本研究では, 切り取り斜面における現地調査ならびに現地採取土に対する一軸圧縮試験の結果をもとに, 空気との接触によって徐々に酸性移行を呈する土の物理, 化学的特性や強度, 変形特性を検討した。現地調査において, 切り取り斜面内部の土のpHが6.5とほぼ中性であったのとは対照的に表層部ではpHが2~3の強酸性を示し, 加えて, この土からは多量の硫酸イオンが検出された。次に, 斜面内部の中性土を室内に持ち帰って空気乾燥したところ, 日数の経過にもなって土のpHは中性(6.5)から強酸性(3)へと移行すること, さらに, pHが低下すると土の一軸圧縮強さや変形係数が大きくなることなどの新たな知見が得られた。

Key Words: acid soil, air drying, site investigation, laboratory test, hydrogen-ion concentration exponent, strength-deformation characteristics

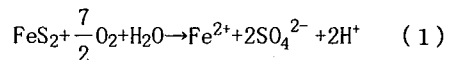
1. まえがき

現在, 世界で利用されているエネルギーの大部分は化石燃料(石油, 石炭, 天然ガス)や核燃料(ウラン)の燃焼および水力などに依存している¹⁾。このような化石燃料を燃やしている火力発電所や工場のボイラーあるいは自動車のエンジンからは二酸化炭素, 硫酸酸化物, 窒素酸化物などが排出されており, これらが大気中を循環することによって地球温暖化, 大気汚染, 酸性雨さらには砂漠化や熱帯林の減少のような地球環境の悪化に少なからず影響を及ぼしている。

上記の地球環境問題のうち, 地盤環境に影響を及ぼすことが懸念されているものとして酸性雨(pHが5.6以下の雨²⁾)を挙げることができる。酸性雨が長期間地盤内に浸透した場合の土の酸性化の進行に関して, 消石灰やセメントを添加したまき土の酸性雨に対する耐久性を検討した研究³⁾や人工的に作製した酸性雨を供試体に流下した場合の土の陽イオンと一軸圧縮強さの推移を調べた研究⁴⁾, 塩酸や苛性ソーダ(水酸化ナトリウム)などを用いて土のpHを人工的に調整し, pHと強度, 変形特性との関係を調べた研究^{5)~7)}がある。

一方, 酸性雨以外の自然的要因で土の酸性化が進行する事例として, 国内においては酸性硫酸塩土の存在が報告されている⁸⁾。この土は空気と接触する前, 言い換

れば, 土中において還元状態にある場合には中性ないしはアルカリ性を示すが, 掘削などによって土が空気中に曝されるとその直後から化学反応が進行して酸性物質を生成し, 結果として酸性移行を呈するようになる。このような性状を示す土には, 一般に黄鉄鉱(パイライト, FeS_2)と称する鉱物が含まれており, この鉱物が空気と接触, すなわち, 酸化することによって次式⁹⁾に示す化学反応が進行し, 硫酸イオンが生成されるとのことである。



上式のような化学反応によって酸性化した土が引き起こした被害事例として, コンクリート基礎の崩壊^{9), 10)}やトンネル工事における酸性水の噴出¹¹⁾, さらには, 河川や貯水池の水質の酸性化^{12), 13)}などが報告されている。国外においてはクイックレーの事例¹⁴⁾が報告されており, 異なる温度条件下で保存したクイックレーのpHは保存期間が長くなるほど, そして, そのときの温度が高くなるほど低下し, その結果, せん断強さが増加するようである。

著者らのひとり, 土の酸性化が土粒子間に作用する力の向きやその大きさに影響を及ぼすことに着目し, ベントナイト(市販の粉末試料)に硫酸を添加して人工的に作製した酸性試料の一軸圧縮試験, 標準圧密試験, 一

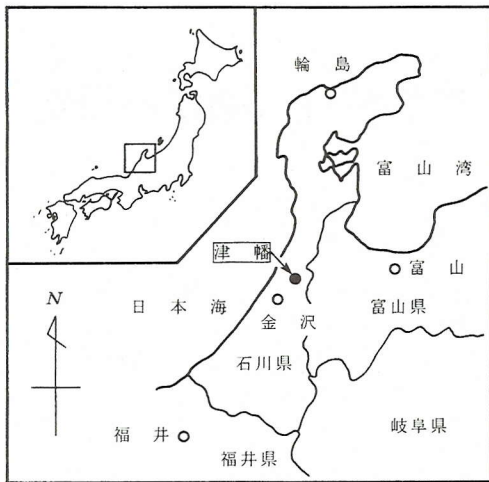


図-1 調査地点の位置図

面せん断試験を行い、pHの高低によって土の工学的特性が異なることを報告した^{15)~17)}。しかしながら、空気との接触によってアルカリ性あるいは中性から酸性へと移行する土の強度、変形特性を詳細に検討した例は見当たらず、不明な点も多く残されている。

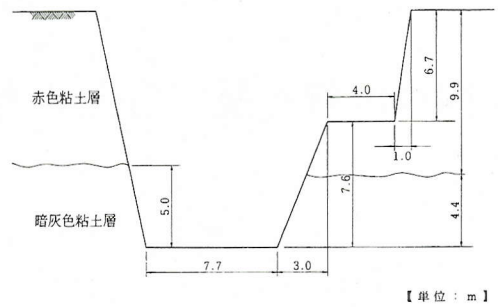
以上のことから、本研究では、酸性移行を呈する土のpHと一軸圧縮強さや変形係数との関係を調べることを目的に、①切土斜面で行った現地調査（pHや水溶性成分など）の概要と結果および②現地で採取した土を室内で保存することによって酸性化した試料の縮固め試験や一軸圧縮試験の結果について述べる。

2. 現地調査の概要および結果

現地調査は、石川県河北郡津幡町の廃材運搬用道路の切土斜面（1990年12月に切取り）で実施した。図-1は、調査地点の概略の位置を示す。調査地点は金沢市より北北東に約14km離れた能登半島の付け根の部分に位置し、海岸線からの距離はおおよそ7kmである。付近の地層は主として新第三紀鮮新世～第四紀初頭の大桑砂岩層と新第三紀の高窪泥岩層とから構成されており、また、当該地点は石川県内でも有数の地すべり多発地帯のひとつに数えられている。

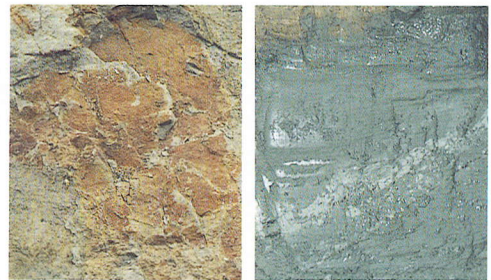
図-2は、調査地点の断面を示す。上層に赤色粘土層、下層に暗灰色粘土層（高窪泥岩層）の互層となっている。なお、切取り後に斜面表層部分の保護工はとくに施されなかった。

切取り後約1年半が経過した1992年5月に調査を行ったところ、斜面下層に位置している高窪泥岩層の表層部の土は全体的に赤褐色を呈しているのに対し、この表層部が部分的に剥離した箇所からは暗灰色の土がみられた。



【単位：m】

図-2 調査地点の断面図



(a) 斜面表層部

(b) 斜面内部

写真-1 斜面表層部と斜面内部との色調の比較

このため、斜面の表層部と内部の土の状態を観察するために、表層から水平方向に約50cmにわたって土を取り除いてみたところ、写真-1に示すように、(a)表層部の土の色調が赤褐色であるのとは対照的に(b)斜面内部の土は暗灰色であることがわかった。そこで、このような色調の違いが生じた原因を調べるために、1992年7月と8月、1993年8月、1994年3月の計4回にわたって暗灰色の粘土層を水平方向に2mの深さまで掘削し、深さごとに採取した土を直ちに2mmふるいで裏ごしした後、物理試験および化学試験を行った。なお、掘削にともなう暗灰色の粘土層から貝殻片が発見されたことから、当該地点はもともとは海であったと推断した。

図-3は深さごとに採取した試料の自然含水比 w_n 、pH、強熱減量 L_i を示す。図より、 w_n は採取した時期や深さにかかわらず35～40%であることがわかる。

pHに関しては、深さ0.5～2mで採取した土は6.5程度とほぼ中性を示しているものの、0.5mより表層に近づくにつれてpHは徐々に低下しており、表層部（採取深さ0m）ではpH2～3の強酸性となっている。また、表層部の強熱減量 L_i は約6%であり、斜面内部より1%程度大きめの値を示している。なお、斜面の上層に位置している赤色粘土層に対しても同様の調査を行ってみたが、 w_n 、pH、 L_i の値に採取した深さや時期の違いによる差はとくに認められなかった。

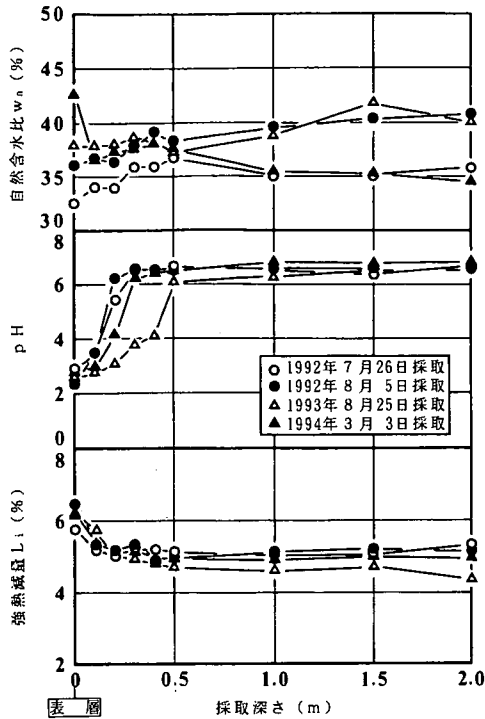


図-3 採取深さと自然含水比, pH, 強熱減量との関係

以上の結果より、斜面表層部の土(深さ0~0.5m)と斜面内部の土(0.5~2.0m)との色調の違いは主としてpHの差に起因しているものと判断された。ここで、pHが6.5ともともと中性であった斜面内部の土が表層部の土のように酸性化(pH2~3)するためには強酸性物質(例えば硫酸、塩酸、硝酸など)の存在が必要となる。このような強酸性物質が土中へ供給される代表的なシステムとしては、①酸性雨の浸透や②化学反応(酸化)の進行にともなう酸性物質(例えば硫酸イオン)の生成⁹⁾のような「自然的要因」と③化学工場からの排水のような「人為的要因」とが挙げられる。今回の調査地点の周辺にはこのうちの③に該当する施設はなく、したがって、「人為的要因」によって土の酸性化が進行したとは考えられない。そこで、次の段階として、①、②の可能性について検討してみることにした。

まず、①の酸性雨による影響を調べるために、1993年5月の時点で調査地点より370mほど離れた4階建ての建物(高さ約15m)の屋上で降水を採取し、そのpHと降水に含まれている代表的な陰イオン量の測定を行った。その結果、pHは約5.2と弱酸性を示し、また、降水中には硫酸イオン、硝酸イオン、塩素イオンなどが含まれていることがわかったが、pH6.5の中性の土をpH2~3の強酸性にまで変化させるほどの量が含まれているとはいえず、これより、①の可能性は極めて少な

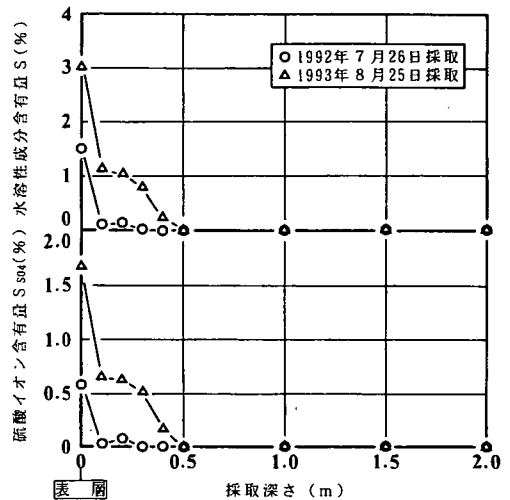


図-4 採取深さと水溶性成分含有量, 硫酸イオン含有量との関係

いものと判断した。

次に、②の化学反応の進行にともなう硫酸イオンの生成の可能性を以下の手順で調べた。初めに、「土質試験法 JSF T 241-1990 土の水溶性成分試験方法」¹⁸⁾に準拠して、深さごとに採取した土に所定量の水を加えて懸濁液とし、水溶性成分含有量については、懸濁液をろ過して得られたろ液を蒸発させ、残った蒸発残留物の質量を土の炉乾燥質量に対する百分率で表すことによって求めた。また、硫酸イオン含有量を求めるに当たっては、ろ液に塩化バリウムを加えて硫酸バリウムを生成させ、その質量から算定する手法(質量法)を用いた。なお、土質試験法によれば質量法による硫酸イオンの定量範囲は10mg以上と記されており、これを硫酸イオン含有量に換算すると0.01%以上に相当することになる。

図-4は、1992年7月と1993年8月に深さごとに採取した土に含まれていた水溶性成分含有量Sと硫酸イオン含有量S_{SO4}を示す。0.5m以浅の土からのみ水溶性成分および硫酸イオンが検出され、とりわけ低pHを示した表層部の土には水溶性成分が1.5~3.0%含まれており、そのうちの約半分に相当する0.6~1.7%が硫酸イオンであることがわかる。DIN(ドイツ工業規格)4030¹⁹⁾によれば、土に硫酸イオンが約0.2%以上含まれているとコンクリートに対して「侵食性がある」と判定されることになるが、今回調査を行った土のうち、とくに斜面表層部の土には硫酸イオンが0.6~1.7%含まれており、DINの基準に当て嵌めるとこの部分の土はコンクリートを侵食させてしまうほど酸性の強い土であったことになる。なお、暗灰色粘土層の上にある赤色粘土層についても、水溶性成分と硫酸イオンの量を調べてみたが、これらは一切検出されなかった。

図-4と先に示したpHと採取深さとの関係(図-3中段の図)とを合わせてみると、斜面表層部に近づくに従い土中の硫酸イオン含有量は増加し、pHは低下していることになり、これより、表層付近の土の酸性化の主たる原因は、「自然的要因」のうち②、すなわち、化学反応の進行にともなって生成された硫酸イオンの存在にあると判断された。

参考までに、採取した土の一部について、pH試験に用いた懸濁液の酸化還元電位 E_{H_2} (pH6に補正)を測定したところ、表層部では480mVであるのに対し、斜面内部では280mVという結果が得られた。一般に、酸化と還元との境界を示す電位は E_{H_2} で300mV付近とされており、これより大きいと酸化状態にあるといわれている²⁰⁾。したがって、このような酸化還元電位の測定結果からも表層部の土が酸化作用を受けていたことが立証されたことになる。さらに、斜面内部の土(深さ1~2m)に対してのみ通常のpH試験とは別に過酸化水素水によるpH試験を実施した¹⁸⁾。この試験は土の酸性化の可能性を事前に把握するための一手法であり、得られたpHは通常用いられているpHと区別するためにpH(H_2O_2)と表示する。文献8)によれば、pH(H_2O_2)が3.5以下であると酸性硫酸塩土と判定されるが、今回対象とした土のpH(H_2O_2)は2となり、上記の判定基準と照らし合わせても本研究で用いた土は酸性硫酸塩土である可能性が高いことが示された。

今回の調査に用いた土の性状は、文献8)で報告されている酸性硫酸塩土のそれと一致する部分が多いことより、この土には黄鉄鉱が含まれている可能性が高く、これが空気との接触によって式(1)に示した酸化作用を受け、結果として硫酸イオンが生成されたものと推察される。文献21)によれば、堆積性軟岩に含まれている黄鉄鉱の量を調べた1例として、国内では0.4~3%、国外では0.1~15%の事例が報告されている。

採取土の性状を調べるために湿潤密度試験(浮力法)を行ったところ、採取深さにかかわらず乾燥密度1.25~1.33g/cm³という結果が得られ、これと未だ酸性化していない土の土粒子の密度2.68g/cm³とを用いて計算したところ、空隙比は1.03~1.15、飽和度は93.2~99.8%となった。

以上の現地調査の結果より、今回調査の対象とした切土斜面においては、斜面内部の土に含まれていると考えられる数%の黄鉄鉱が空気と接触して硫酸イオンを生成し、その結果、土が中性から酸性へと移行したものと推察される。これまでの研究成果によれば、土粒子間に作用する力の向き(吸引力、反発力)やその大きさは土構造の形成に大きな影響を及ぼし、その影響が強度、変形特性に現れることが報告されている^{22)、23)}。また、吸引力や反発力のうち、とくに反発力の大きさは土のpH

の高低によって異なることが指摘されている。これより、本研究で用いたような酸性移行を呈する土、言い換えれば、中性土から徐々に酸性土へと状態を遷移させていくような土では、それぞれの状態ごとに土粒子間に作用する力の向きや大きさが異なっており、結果として強度、変形特性に違いが生じている可能性も考えられる。

そこで、次章以下では、空気との接触によって徐々に酸性化した土の強度、変形特性について調べてみることにした。なお、今回の試験に用いた土の酸性化の程度を示す指標としては、前出図-3、4の結果より、pH、強熱減量 L_i および硫酸イオン含有量 S_{SO_4} が有効であると考えられる。土の酸性化を示す指標として具備すべき条件は、①測定が簡便であること、②短時間で測定結果が得られること、③土の酸性化を十分に表していること、④信頼性が高いことなどである。本研究では、上記①~④の条件を考慮に入れて、土の酸性化の進行度合を表す指標としてpHを用いることにした。

3. 試料土の基本的性質および供試体の作製条件

土のpHは土構造の形成に大きな役割を果たしており、とくに、土のpHと強度、変形特性とは密接な関係にあることが報告されている^{5)~7)、15)~17)}。このことを踏まえて、本研究では当初現地での調査項目の中に、調査地点の強度や支持力を測定する目的でコア供試体の採取や原位置貫入試験の実施を組み入れていたが、前章で述べたように、表層部から深さ方向0.5mの範囲内の土のpHは深さにはほぼ比例して高くなっていったことから、原位置試験の結果をもとに土のpHと強度、支持力特性との関係を一義的に定めることは困難と判断した。そこで、代替の策として未だ酸性化していない斜面内部の土を室内に搬入してこれを所定の期間空气中に放置し、中性から酸性へと移行する過程を確認しながら締め試験や軸圧縮試験を行うこととした。表-1は、現地で採取した直後の土、すなわち、pH約6.5の土の物理的性質を示す。

採取した土は2mmふるいで裏ごしした後、温度20℃、湿度90%の恒温恒湿室内に水分が均一に蒸発するように薄く引き伸ばした状態で最長360日まで空気乾燥を行い、所定の日数が経過した時点でpHを測定した。また、これとは別に、採取直後の土塊をビニール袋に入れて厳封した上で同じ恒温恒湿室内に放置し、日数の経過にともなう土のpHがどの程度変化するかについても調べてみることにした。

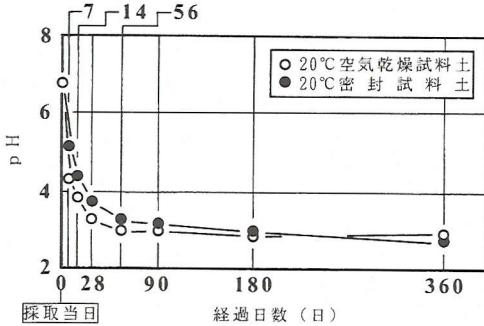
図-5は、採取後の日数の経過にともなう空気乾燥試料土(記号○)と密封試料土(●)のpHの推移を示す。当初6.5程度とほぼ中性であった土のpHは保存状態の違いによって初期段階でのpHの低下速度に多少の差が

表一 採取直後の試料土の物理的性質

土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)	2.68
液性限界 w_L (%)	68.6
塑性限界 w_p (%)	41.6
塑性指数 I_p	27.0
砂分 (%)	7.4
シルト分 (%)	75.6
粘土分 (%)	17.0

表二 試料土の締め固め特性

経過日数 (日)	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)	最適含水比 w_{opt} (%)
0	1.54	24.2
7	1.58	22.7
14	1.58	22.3
28	1.60	21.4
56	1.60	20.9
90	1.62	20.3
180	1.62	19.2
360	1.62	19.2



図一五 日数の経過にもなる pH の推移



(a) 空気乾燥試料土 (b) 密封試料土

写真一 空気乾燥試料土と密封試料土との色調の比較 (経過日数 360日目)

認められるものの、日数の経過にもなると徐々に低下し、90日が経過した時点では両者とも pH が約 3 の強酸性となっていることがわかる。この pH 3 は前出図一 3 (中段の図) に示した調査地点での斜面表層部 (採取深さ 0 m) の pH にほぼ一致しており、室内と現場とでは気温の高低や降水量、積雪の有無などの気象条件や酸性化に要する時間などがかなり異なっているものの、室内に放置した土の pH の推移は現地における土の酸性化現象をある程度再現しているものと推察される。また、空気乾燥試料土と密封試料土とでは長期にわたる pH に差がなく、ビニール袋で密封した密封試料土には保存中に外部から酸性化を促す物質が混入する恐れはないことから、今回用いた土の酸性化の原因となった硫酸イオンは土の内部で生成されたものであることが実験的にも確かめられたことになる。

表三 供試体作製時の状態

経過日数 (日)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)
0	1.53	24.5	0.75	87.0
7	1.55	23.8	0.73	87.0
14	1.58	22.2	0.70	85.4
28	1.60	21.3	0.67	84.9
56	1.60	21.0	0.67	83.5
90	1.61	20.5	0.66	82.8
180	1.62	19.1	0.65	78.4
360	1.61	19.3	0.67	77.7

写真一 2 は、360日が経過した時点での (a) 空気乾燥試料土と (b) 密封試料土との色調を比較したものである。密封試料土の表面は赤褐色に変化しており、これは前出写真一 1 に示した (a) 斜面表層部の色調と一致するものである。

表一 2 は、経過日数ごとに行った空気乾燥試料土の締め固め試験の結果をまとめたものである。日数が経過すると最適含水比は低下し、最大乾燥密度は増加する傾向にあることがわかる。一軸圧縮試験に使用する供試体は、この表に示したそれぞれの最適含水比と最大乾燥密度とを目標にして、容量 5 tf (50kN) の油圧試験機を用いて 50mm/min の速度で静的締め固め^{2,4)} により作製した。

作製した供試体 (直径約 5 cm, 高さ約 10 cm) はビニール袋に入れて厳密封し、温度 20°C、湿度 70% の恒温器内に最長 14 日まで養生した後、ひずみ速度 1%/min の条件下で一軸圧縮試験を行った¹⁸⁾。表一 3 は、供試体作製時の平均的な性状を示す。

4. 供試体の一軸圧縮試験結果

図一 6 は、採取後 0 ~ 360 日が経過した試料土の一軸圧縮強さ q_u の推移を横軸に養生日数をとって示したものである。ここで、養生日数 0 日とは試料土採取後所定の日数が経過した時点で供試体を作製し、その当日に一軸圧縮試験を行ったことを意味する。図より、 q_u は経過日数の長いときほど、また、養生日数が長くなるほど大きくなる。なお、養生期間中に供試体の体積に変化が生じるかどうかを調べるために、供試体作製時と一軸圧縮試験時に直径および高さを数箇所測定してみたが、体積変化の兆候は認められなかった。

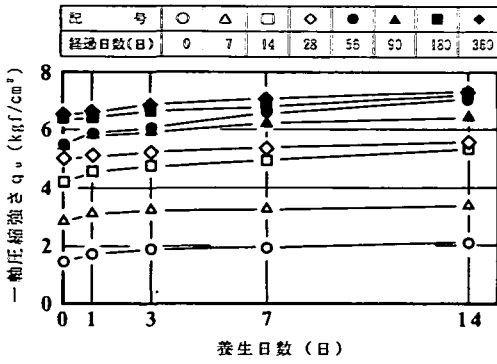


図-6 養生日数の経過ともなう一軸圧縮強さの推移

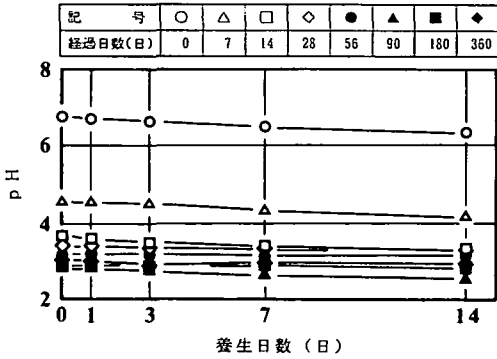


図-7 養生日数の経過ともなうpHの推移

図-7は、養生日数と一軸圧縮試験終了後の供試体のpHとの関係を示す。供試体のpHは、経過日数や養生日数が長くなると小さくなっていくことがわかる。

以上の結果より、締め固めた供試体の一軸圧縮強さやpHは経過日数ならびに養生日数の影響を少なからず受けていることが明らかとなった。そこで、次の段階として強度、変形特性とpHとの関係について調べてみることにした。

図-8 (a) ~ (c) は、pHと一軸圧縮強さ q_u 、破壊ひずみ $(\epsilon_a)_f$ 、変形係数 E_{50} との関係を示す。ここで、破壊ひずみ $(\epsilon_a)_f$ は応力-ひずみ曲線において一軸圧縮強さ q_u に対応する軸ひずみ ϵ_a で、また、変形係数 E_{50} は同じ曲線において圧縮応力 σ が一軸圧縮強さ q_u の $1/2$ となる点と原点とを結ぶ割線でそれぞれ定義した。この図より、測定結果に多少のばらつきはあるものの、おおむね採取後の経過日数が長くなるとpHは酸性側へ移行し、それともなうて q_u 、 E_{50} は増加、 $(\epsilon_a)_f$ は減少していることがわかる。また、経過日数が28日(記号◇)を越えるとpHは2.5~3.2の範囲でほとんど変化しなくなるのに対して、 q_u および E_{50} は経過日数56日(●)以降も増加する傾向にあることが認められる。

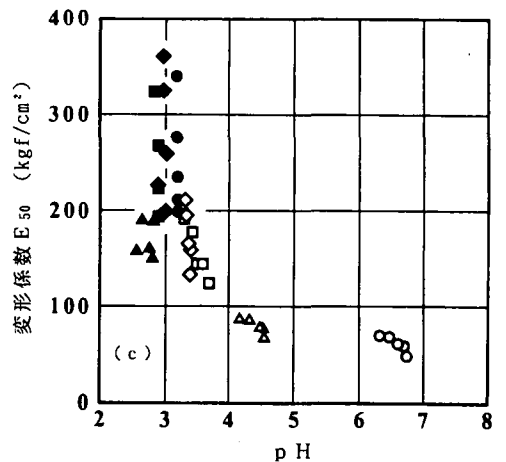
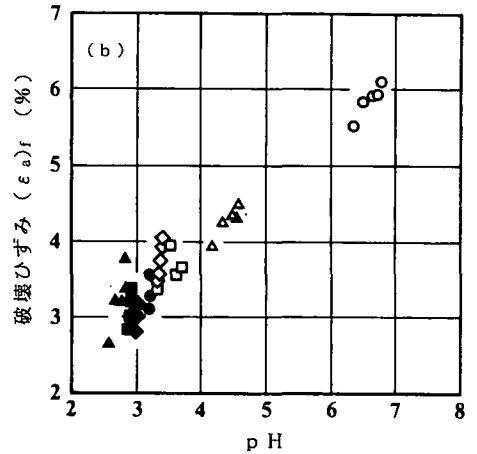
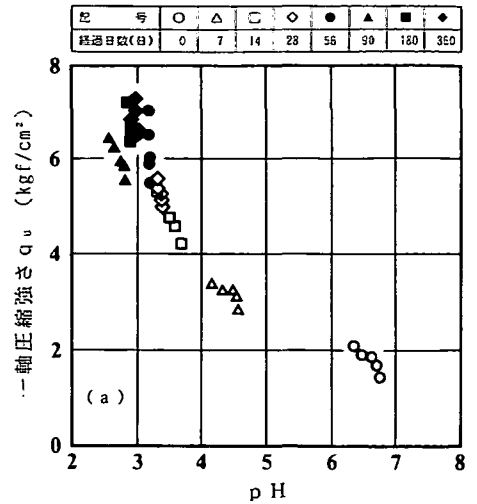


図-8 pHと一軸圧縮強さ、破壊ひずみ、変形係数との関係

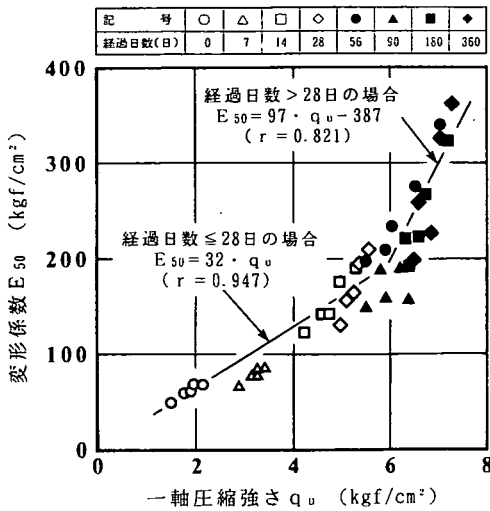


図-9 一軸圧縮強さと変形係数との関係

通常、土は「負の永久荷電」と「pH依存荷電(pHの変化にともなって発生したり消滅したりする)」とを有しており、双方の荷電の符号や大きさは粘土鉱物の種類(例えばカオリナイトやモンモリロナイトなど)やpHの高低によって異なるようである。今回の試験に用いた土の粘土鉱物の種類は判定されていないが、pHの低下にともなって強度、変形特性が大きくなる図-8の結果とベントナイト(モンモリロナイトを主な粘土鉱物とする)を用いて行った文献(15)、(16)との結果が一致していることから、今回の土の主な粘土鉱物はモンモリロナイトであると推測され、このことより、土の酸性化の進行にともなって「負の永久荷電」と「正のpH依存荷電」との間に吸引力が作用しているものと考えられる。また、このような現象にはpHのみならずイオンの種類や濃度なども関与している部分が多いと考えられている。いずれにしても、pHの低下(酸性化)は土の一軸圧縮強さ、破壊ひずみおよび変形係数に影響を与えることだけは明らかとなった。

図-9は、一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} との関係を示す。 q_u が大きくなると E_{50} も大きくなり、 q_u と E_{50} との間に直線回帰を施したところ、経過日数28日(記号◇)を境として次式が得られた。

- (1) 経過日数 ≤ 28 日の場合

$$E_{50} = 32 \cdot q_u \quad (r = 0.947) \quad (2)$$
(2) 経過日数 > 28 日の場合

$$E_{50} = 97 \cdot q_u - 387 \quad (r = 0.821) \quad (3)$$

先に示した図-7によれば、経過日数が28日の供試体のpHはおよそ3.5であり、これより、pH 3.5を境として式(2)、(3)のように q_u と E_{50} との関係に変化が現れたと判断することができる。

以上の結果より、pHの低下にともなって一軸圧縮強さや変形係数が大きくなり、破壊ひずみは小さくなるのが室内試験の結果より明らかとなった。先にも述べたように現場で自然に酸性化した土と室内で人工的に酸性化した土とでは、酸性化する過程での温度の高低や水の有無、酸性化に要する時間、さらには、酸性化した土の含水比、乾燥密度、土構造、pH、硫酸イオン含有量などの物理あるいは化学的性質が必ずしも一致しておらず、今回の室内試験により得られた一軸圧縮強さや変形係数をそのまま現地の状態に当て嵌めて考えるのは困難であるが、それでも、土の強度、変形特性を評価する上において土のpHが重要であることだけは示されたことになる。

5. まとめ

本研究では、酸性移行を呈する土の強度、変形特性を調べるために、切土斜面より採取した土に対して物理、化学試験を行うとともに、同じ土を室内で所定の期間空気に曝して酸性化した試料土に対して締固め試験や一軸圧縮試験を行った。本研究により得られた主要な結果を以下に列挙する。

(1) 空気との接触によって中性から酸性へと移行する土が存在し、その主な原因として黄鉄鉱の酸化反応によって生成される硫酸イオンの存在が挙げられる。

(2) 酸性移行を呈する土ではpHの低下にともなって一軸圧縮強さ q_u 、変形係数 E_{50} は増加し、破壊ひずみ(ϵ_a)は減少する。

(3) 一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} の間には直線関係が成立し、その関係はpHの高低によって異なる。

このように酸性移行を呈する土の物理、化学的特性ならびに強度、変形特性を現地調査や一軸圧縮試験の結果よりある程度明らかにすることができたが、このような現象には粘土鉱物の種類、空気存在や温度、さらには、これらに起因する化学反応が相互にかつ複雑に絡みあっており、今後このような微視的領域の検討を行うためにも、X線回折分析装置や走査型電子顕微鏡などの分析機器の導入が必要不可欠となるであろう。

一方、土の酸性化は隣接したコンクリート構造物の劣化や土中に埋設した鋼材の腐食などを引き起こす要因となることが予想され、酸性化した土に石灰やセメントなどを混合して土のpHを中性やアルカリ性に移行させることが必要となる。今後は酸性土を対象とした安定処理効果の検討を行うために、酸性土に産業副産物であるフライアッシュやパルプアッシュのようなアルカリ性材料を添加し、さらに消石灰やセメントを混合した供試体の強度、変形特性を調べる予定にしている。いずれにしても、酸性土を土質材料として用いるためにはpHのみな

らずその強度、変形特性についても調べておくことが今後の重要な課題となるであろう。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、金沢工業大学教授宮北 啓先生、長岡工業高等専門学校長小川正二先生および福井工業高等専門学校教授渡邊康二先生には貴重なご助言を賜った。また、各種の室内試験および結果の整理には、石川工業高等専門学校土木工学科ならびに金沢工業大学土木工学科卒業研究生諸君のご協力を、現地調査にあたっては地元の役所や企業の方々の深いご理解と多大なご尽力をいただいた。ここに、深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 経済広報センター：ECO JAPAN 1996 環境データ集 [国際比較版]，1996. 1.
- 2) 池田有光：酸性雨の発生，土木学会誌，Vol. 75，No. 5，pp. 28-31，1990. 4.
- 3) 古河幸雄，藤田龍之，平山和雄：安定処理したまき土へ及ぼす酸性雨の影響，土質工学会論文報告集，Vol. 34，No. 3，pp. 125-135，1994. 9.
- 4) 嘉門雅史，勝見 武，応 長雲：酸性雨が土の界面体イオン及び一軸圧縮強さに及ぼす影響，第29回土質工学研究発表会平成6年度発表講演集，D-2，102，pp. 243-244，1994. 6.
- 5) Olson, R. E. : Shearing strengths of kaolinite, illite, and montmorillonite, *Proc. ASCE*, Vol. 100, No. GT11, pp. 1215 - 1229, 1974. 11.
- 6) Torrance, J. K. and Pirnat, M. : Effect of pH on the rheology of marine clay from the site of the south nation river, Canada, landslide of 1971, *Clays and Clay Minerals*, Vol. 32, No. 5, pp. 384-390, 1984. 12.
- 7) Kumapley, N. K. and Ishola, A. : The effect of chemical contamination on soil strength, *Proc. 11th ICSMFE*, Vol. 13, pp. 1199-1201, 1985. 8.
- 8) 佐々木信夫：新第三系強酸性硫酸塩土壌に関する研究，岩手県立農業試験場研究報告，第20号，pp. 23-54，1977. 3.
- 9) 落合英俊，松下博通，林 重徳：硫酸イオンを含む地盤における住宅基礎，土と基礎，Vol. 34，No. 6，pp. 45-50，1986. 6.
- 10) 高谷精二：東石崩壊の発生した地域にみられる塩類集積現象について，土と基礎，Vol. 31，No. 1，pp. 101-104，1983. 1.
- 11) 津高正高：地盤の発熱と地下水の酸性化，地下水地盤環境に関するシンポジウム'95-地下水に係わる諸問題と対策一発表論文集，pp. 121-132，1995. 10.
- 12) 武藤速夫：石灰乳中和法による酸性河川の水質改善について，土木学会論文報告集，第275号，pp. 41-52，1978. 7.
- 13) 五十嵐敏文，大山隆弘：黄鉄鉱の酸化に伴う貯水池水質の酸性化現象，電力中央研究所報告，No. U95024，1996. 2.
- 14) Mitchell, J. K. : Practical problems from surprising soil behavior, *Proc. ASCE*, Vol. 112, No. GT3, pp. 259-289, 1986. 3.
- 15) 亀井健史，佐野博昭：ペントナイトの工学的特性に及ぼす水素イオン濃度指数の影響，地すべり，第30巻，第2号，pp. 30-40，1993. 9.
- 16) 亀井健史，佐野博昭：水素イオン濃度指数の違いがペントナイトのせん断特性に及ぼす影響，地すべり，第31巻，第3号，pp. 37-42，1994. 12.
- 17) 亀井健史，佐野博昭：粘性土の強度・変形特性に及ぼす酸性化の影響，土木学会論文集，第517/Ⅲ-31，pp. 189-196，1995. 6.
- 18) 土質工学会：土質試験の方法と解説，1990. 3.
- 19) 土質工学会：土質工学における化学の基礎と応用，土質基礎工学ライブラリー-15，pp. 287-289，1978. 3.
- 20) 塩入松三郎，青峰重範：湛水状態の土壌中に於ける窒素の形態変化，日本土壤肥料学雑誌，第14巻，第6号，pp. 369-370，1940.
- 21) 千木良雅弘：講座「建設工事における風化・変質作用の取扱い方」4. 軟岩の風化作用，土と基礎，Vol. 40，No. 8，pp. 71-79，1992. 8.
- 22) Yong, R. N. and Warkentin, B. P. : Introduction to soil behavior, Macmillan Co., 1966. (山崎不二夫，山内豊聡監訳：土質工学の基礎《土の力学的挙動》，鹿島出版会，1972. 6.)
- 23) Yong, R. N. and Warkentin, B. P. : Soil properties and behaviour, Elsevier Scientific Pub. Co., 1975. (山内豊聡，竹中 肇，東山 勇，前田 隆監訳：新編土質工学の基礎《土の性質と挙動》，鹿島出版会，1978. 2.)
- 24) Venkatarama Reddy, B. V. and Jagadish, K. S. : The static compaction of soils, *Geotechnique*, Vol. 43, No. 2, pp. 337-341, 1993. 6.

(1996. 12. 3 受付)

A STUDY ON STRENGTH-DEFORMATION CHARACTERISTICS OF ACIDIFIED SOIL BY AIR DRYING

Hiroaki SANO, Mikio YAMADA, Minoru OHTA and Masatika NOZAWA

This paper describes the measurement results of site investigation and laboratory tests performed on soils sampled from the excavation slope.

The main concluding remarks derived from these studies are as follows; i)The inward soil of the excavation slope is neutral, on the other hand, the subsurface soil is strongly acidic. ii)The hydrogen-ion concentration exponent (pH) value of air drying soils decreases with an increasing elapsed time. iii)Unconfined compressive strength and deformation modulus increase corresponding to an increase of pH. Therefore, pH is the most important factor in considering strength-deformation characteristics of acid soils.