

積算温度方式を導入した 土の酸性移行速度の評価手法に関する研究

佐野博昭¹・山田幹雄²・奥村充司³・能澤真周⁴・平井裕二⁵

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 (〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条)

²正会員 工博 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)

³正会員 工修 福井工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

⁴正会員 石川工業高等専門学校技官 環境都市工学科 (〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条)

⁵正会員 西松建設株式会社技術研究所 主任研究員 (〒242-8520 神奈川県大和市下鶴間)

本研究では、空気との接触によって徐々にpHが低下する土、いわゆる「酸性移行を呈する土」のpHの低下速度に及ぼす日数や温度の影響を調べるために、現場で採取した未だ酸性化していない土を室内で所定の期間保存したところ、pHの推移には保存日数や温度が深く関わっており、日数が長いほど、また、温度が高いほどpHが低くなることが明らかとなった。また、pHの推移に及ぼす日数と温度の影響を定量的に評価するために積算温度の概念を導入した結果、積算温度とpHとの間に直線関係が成立するという新たな知見が得られ、原位置における追跡調査によりこの手法の有効性を確認した。さらに、積算温度方式を導入した評価式を用いることによって、「酸性移行を呈する土」の工学的性質を推定することが可能であることが示された。

Key Words: acidified soil, hydrogen-ion concentration exponent, temperature, acidification rate, maturity

1. まえがき

近年、地盤環境は、酸性雨の浸透にともなう土の酸性化や地盤改良にともなうアルカリ溶出水の浸透、さらには重金属による汚染などによって苛酷な状況下に曝されている。著者らのひとは、これらの地盤環境問題の中でも土の酸性化に着目し、地盤環境に及ぼすpHの影響を探求するために、人工的にpHを調整した土の強度、変形特性について検討を行い、両者の間に密接な関係があることを報告してきた^{1)・2)}。その後、石川県内の新第三紀中新世の泥岩層において、空気との接触によって土中で硫酸イオンが生成され、その結果、土のpHが2～3にまで低下する土、いわゆる「酸性移行を呈する土」の存在を確認し、このような土のpHと工学的性質との関係を明らかにするために現地調査と室内試験を行ってきた^{3)～6)}。これより、空気と接触してからの日数の経過にともなう、土のpHが低下することやpHとコンシステンシー限界、締め固め特性、強度および変形特性との間に密接な関係があることなどが明らかとなった。

空気との接触によってpHが低下する土は全国各地に点在しており、これまでもこの土に関連した研究例が

報告されている^{7)～9)}。このうち、文献9)では福島県いわき市を中心とする新第三紀層の未風化泥岩からなる地盤地域において、この土に起因した地盤隆起などの被害事例が報告されており、併せて対策工法についても検討されている。いまのところ、著者らが研究の対象としている石川県内の泥岩層において、この土が関与した深刻な被害事例はないようであるが、今後の山間地域への宅地造成工事の拡大にともなう、「酸性移行を呈する土」との遭遇も十分に予測され、このことより、土の酸性化にともなう被害事例の発生も十分に考えられる。

これまでの研究成果より、「酸性移行を呈する土」のpHと工学的性質との関係についてある程度明らかとなっているが、このpHの低下速度に影響を及ぼす要因を詳細に検討した例は少ない。

以上のことから、本研究では、「酸性移行を呈する土」のpHの低下速度に及ぼす日数や温度の影響を調べることを目的に、所定の深さより採取した現場土のpHおよび現場で採取した未だ酸性化していない土を室内で所定の期間保存し、徐々に酸性化した土のpHの推移について検討を行った。また、pHの推移に及ぼす日数と温度の影響を定量的に評価するために、積算温度の概念を導

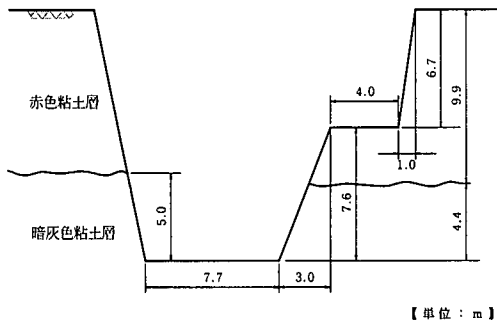


図-1 調査地点の断面図

入した評価手法を提案し、原位置追跡調査によりこの手法の有効性を確認した。さらに、この手法を用いた土の工学的性質の推定法についても検討を行った。

2. 空気との接触によるpHの推移

現地調査は、1990年12月に切り取りが行なわれた石川県河北郡津幡町地区の廃材運搬用道路の切土斜面において行った。図-1は、調査地点の断面図を示す。調査地点の概要については文献(4)に詳述しており、当地域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いる。現場土の採取は、図中に示した切土斜面の暗灰色粘土層(高窪泥岩層)を水平方向に2mの距離まで掘削して行い、各距離ごとに採取した土に対して地盤工学会基準¹⁰⁾に準拠して含水比試験、pH試験、強熱減量試験、水溶性成分含有量試験および硫酸イオン含有量試験を行った。ここで、硫酸イオン含有量の測定は重量法により行った。なお、本論文においては便宜上、水平方向の距離を深さと表現することにする。

図-2は、1992年7月から1994年3月にかけて計4回にわたって採取した土の採取深さと自然含水比、pH、強熱減量との関係を示す。図より、自然含水比は35～40%の間を推移しており、採取の時期や深さによる明確な違いは認められない。これに対して、pHは採取時期によって幾分ばらつきが認められるものの、概ね0.5m以深ではpH 6.5程度の中性を示しているが、0.5mより表層付近に近づくにつれてpHは徐々に低下し、表層部(採取深さ0m相当)ではpH 2～3の強酸性となっていることがわかる。また、強熱減量は、表層部で6%と斜面内部(5%)よりも大きな値を示している。

図-3は、計4回行った現地調査のうち、1992年7月と1993年8月に採取した土の水溶性成分含有量、硫酸イオン含有量を採取深さごとに示す。図より、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、

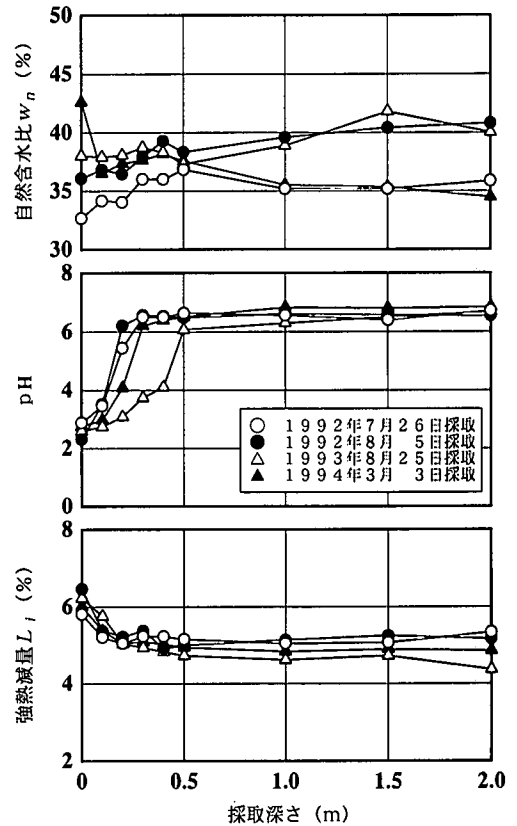


図-2 採取深さと自然含水比、pH、強熱減量との関係

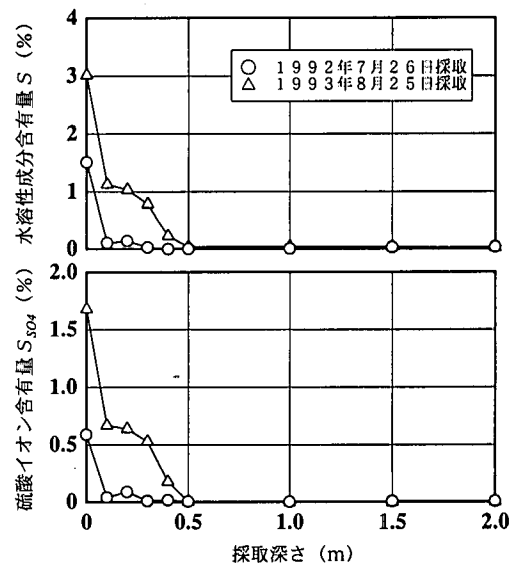


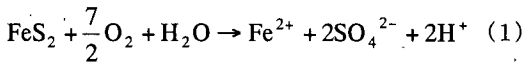
図-3 採取深さと水溶性成分含有量、硫酸イオン含有量との関係

表-1 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

とりわけ低pHを示した表層部の土からは0.6~1.7%の硫酸イオンが検出されたが、0.5m以深の土からは水溶性成分、硫酸イオンとも検出されなかった。

図-2(中段の図)と図-3(下段の図)の結果を併せて考えると、切土斜面表層部の低pHの主な原因は、硫酸イオンの存在にあることが明らかとなった。このように、同じ地層構造(暗灰色粘土層)を有する切土斜面において、斜面内部と表層部とでpHに違いが生じた原因、言い換えれば、斜面表層部(0~0.5m)において硫酸イオンが存在した原因として次のことが考えられる。すなわち、斜面表層部の土は切り取りを行う以前は土中であって空気から隔絶されていたが、1990年12月の切り取りによって土が取り除かれた時点で、土中に含まれていたと考えられる黄鉄鉱(パイライト、FeS₂)と空気とが接触することによって次式(1)に示すような化学反応が進行し、硫酸イオンが生成され、結果として土の酸性化が進行したものと考えられる⁸⁾。



また、このような空気との接触による土の酸性化の影響範囲は表層部に留まることなく、空気と接触後1年半~3年の間に深さ0.3~0.5mの斜面内部まで拡がったものと推察される。

参考までに、斜面表層部と内部の土の酸化還元電位(pH6に補正)を測定したところ、斜面表層部では480mVであるのに対して斜面内部では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300mV付近といわれており¹¹⁾、これより大きいと酸化的状態にあるとされている。したがって、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裏付けられたことになる。

このような土の酸性化のメカニズムは文献8)や9)に報告されており、とくに文献9)では土の酸性化に3種類の微生物(硫酸還元菌、硫酸酸化細菌、鉄酸化細菌)が関与していることが記されている。今回調査の対象となった土の酸性化にこのような微生物がどの程度関わっているか不明であるが、著者らのひとりが行った予備調査によれば、暗灰色粘土層中に硫酸酸化細菌と鉄酸化細菌

の存在自体は確認しており、土の酸性化にこの菌が少なからず関与しているものと推察される。

一般に、酸化のような化学反応の進行には温度などの要因が深く関与していることより、今回の土の酸性化の進行にも温度などの影響が含まれているものと考えられる。また、微生物の活動にも温度が深く関与していることが報告されている⁹⁾。このことより、今回研究の対象となった土の酸性化現象は、空気との接触による化学反応に依存していると考えられるため、この現象は空気と接触してからの経過日数や気象条件(例えば、降水、気温、湿度など)、さらには浸透水や地下水などの周辺環境の影響を受けているものと推察される。

そこで、空気と接触した後、徐々に酸性化していく過程で、主として日数の長短や温度の高低が土のpHの推移にどの程度影響を及ぼすのかを詳細に調べるために、現場で採取した未だ酸性化していない土を室内において異なる温度条件下で所定の期間保存し、含水比試験、pH試験、強熱減量試験、水溶性成分含有量試験、硫酸イオン含有量試験を行ってみることにした。

試験には、図-1に示した切土斜面内部(暗灰色粘土層の表層より1.2~1.5m)より採取した土を用いた。表-1は、採取直後の土、すなわち、未だ酸性化していないpH約6.5の土の物理的性質を示す。ここで、空気から隔絶されていた土が空気と接触した時点で土に含まれている水に空気中の二酸化炭素が溶解し、土中水がやや酸性を帯びるものと推察されるが、この反応が土のpH(厳密には土懸濁液のpH)に及ぼす影響は僅かであり、以後pHの測定値に及ぼす二酸化炭素の溶解の影響はないものと判断した。

採取した土は直ちに2mmふるいで裏ごしして貝殻などの夾雑物を除去した後、0、20、40℃の温度に設定した恒温器内にバットを置き、その中に土を薄く引き延ばした状態(厚さ約3~4cm)で最長720日間保存し、所定の日数が経過した時点でpH試験を実施した。保存期間中は、試料の状態をできるだけ均一にするために、ときどきへらでかき混ぜ、よく混合させた。pH試験は測定値に及ぼす試験時の温度の影響を取り除くために、恒温器より取り出した試料を温度20℃に設定している恒温器内でしばらく放置した後試験を行うこととした。ここで、恒温器内の設定温度は、現場の温度条件を再現するために、周辺の公共機関で観測された3年間の気象データ(最低気温-3.8℃、最高気温34.3℃)を基に決定したものである。なお、保存期間中、湿度の調整はとくに行わなかった。

図-4は、保存日数の経過にともなう含水比、pH、強熱減量の推移を保存温度ごとに示す。採取直後にpH6.5とほぼ中性を示した試料は日数の経過にともなって酸性試料へと移行し、最終的にはpH3の強酸性となって

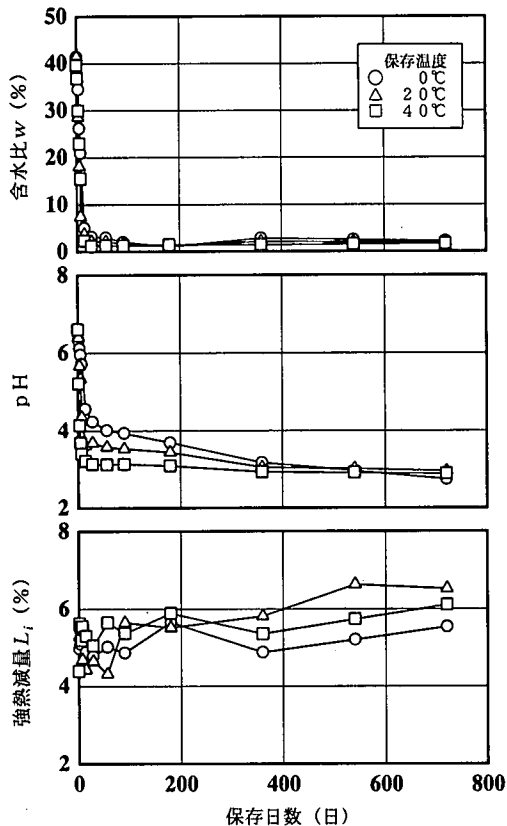


図-4 保存日数の経過ともなう含水比、pH、強熱減量の推移

いることがわかる。また、このような酸性移行過程には保存時の温度が深く関与しており、温度が高いほど比較的短期間で低pHへと移行していることがわかる。強熱減量は採取直後5%前後であったものが、日数の経過ともななって僅かに増加する傾向を示しているが、保存温度による影響は定かでない。

文献12)によれば、福島県内の新第三紀鮮新世大年寺層より採取した土を温度10、20、30°Cで30日間保存したところ、20、30°Cでは当初pH7.5であったものが30日が経過した時点でpH3となったが、温度10°Cで保存した土のpHの推移はほとんど認められなかったと報告している。今回採取した土では温度0°Cで保存した場合、20、40°Cと比較してpHの低下速度はやや小さいものの、日数の経過とともに徐々に酸性化する傾向が認められ、最終的には20、40°Cで保存した土のpHと同じとなった。このことより、空気との接触によって酸性化する土においても、土の種類が異なるとpHの低下速度に及ぼす温度の影響度合いは異なるものと推察される。

図-5は、保存日数の経過ともなう水溶性成分含有量、硫酸イオン含有量の推移を示す。日数の経過ともな

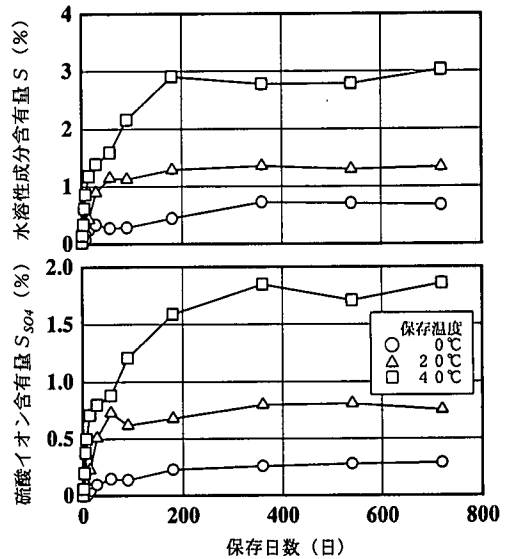


図-5 保存日数の経過ともなう水溶性成分含有量、硫酸イオン含有量の推移

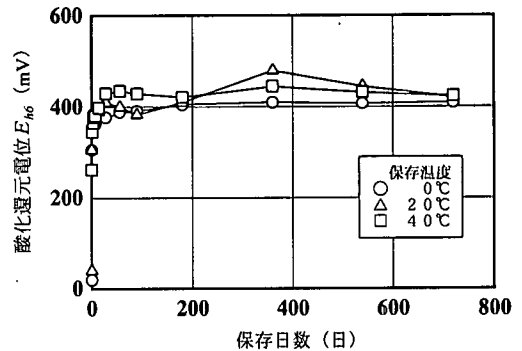


図-6 保存日数の経過ともなう酸化還元電位の推移

なって水溶性成分含有量、硫酸イオン含有量は増加しており、0°Cよりも20°C、20°Cよりも40°Cで保存した試料の含有量が大きくなっている。ここで、温度40°Cで保存した試料の水溶性成分含有量と硫酸イオン含有量に着目すると、3%と1.7%となっており、この数値は前出図-3の試料採取斜面の表層部の結果にほぼ対応していることがわかる。

図-6は、pH試験に用いた懸濁液の酸化還元電位(pH6に補正)を測定した結果を示す。図より、当初280mVであった酸化還元電位は日数の経過ともななって急激に増加しており、14日が経過した時点で400mVとなっている。また、保存温度の違いによる差は認められないようである。先にも述べたように、酸化と還元との境界を示す電位は300mV付近といわれていることより、斜面内において還元状態にあった土が採取後空気と接触し、

表-2 加算温度と相関係数との関係

加算温度 α (°C)	相 関 係 数 r
0	0.854
5	0.887
10	0.900
15	0.894
20	0.888
25	0.882
30	0.878
35	0.874
40	0.871

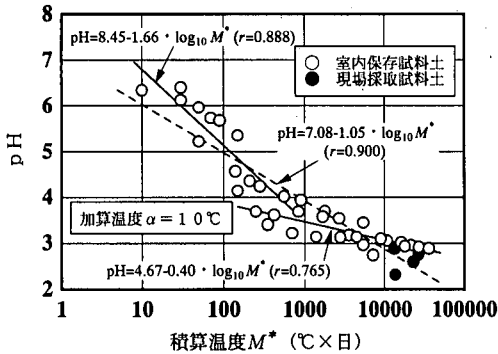


図-7 積算温度とpHとの関係

酸化反応が進行したものと考えられる。

以上の現地調査および室内試験の結果より、斜面内部において還元状態にあった土が切り取り後、空気との接触によって硫酸イオンを生成し、結果として土のpHが3の強酸性まで低下したものと推察される。また、このようなpHの推移には保存時の日数と温度とが深く関わっていること、今回の試験において、最長720日間保存した試料のpHは保存温度の高低によらずほぼ一定の値(pH2~3)に達することなどが明らかとなった。

3. 積算温度方式の導入の試み

一般に、コンクリート工学の分野では、セメントの水和反応に日数と温度とが重要な役割を果たしていることより、次式(2)に示す積算温度の概念を導入して強度、変形特性との関連性を検討した研究例が多数報告されている。

$$M = t \cdot (T + \alpha) \quad (2)$$

ここに、M: 積算温度 (°C×日)

t: 養生日数 (日)

T: 養生温度 (°C)

α : 加算温度 (°C)

ここで、加算温度 α はセメントの水和反応が-10°Cで停止するという物理的な意味を有している。

この積算温度の概念の基本的な考え方は、積算温度が一定ならば温度と時間との組み合わせによらず一定の強度を与えるということである。本研究で対象としている「酸性移行を呈する土」のpHの推移には、日数と温度とが深く関与していることが第2章から明らかとなったわけであるが、これより、「酸性移行を呈する土」に対して積算温度の概念を導入することが十分に可能であると考えられる。そこで、空気との接触ともなって酸性化する土のpHと積算温度との関係を以下に検討してみることとした。なお、積算温度の算出に当たっては、式

(2)の養生日数を保存日数、養生温度を保存温度と置き換えることとする。

まず、「酸性移行を呈する土」の積算温度の計算に先立って、式(2)中の加算温度 α を決定することが必要となる。セメントの加算温度の概念(水和反応が停止する温度)を「酸性移行を呈する土」に当て嵌めると、酸性移行が停止する温度ということになる。先にも述べたように、今回は保存温度を0~40°Cとして実験を行ったわけであるが、少なくともこの温度の範囲内ではpHの低下が確認されており、加算温度に相当する温度を見出すまでには至らなかった。そこで、今回の研究においては、加算温度については、0~40°C、すなわち、温度が-40~0°Cの範囲内で土の酸性化が停止するという仮定の基に積算温度とpHとの関係について検討してみることにした。

図-7は、一例として加算温度 α を10°Cと仮定した場合の積算温度 M^* とpHとの関係を示す。図中には、参考までに前出図-2(中段の図)の切土斜面表層部のpHと積算温度 M^* との関係(記号●)も併せて示しており、現場採取試料土の積算温度は、切り取りが行なわれた1990年12月を基点とし、それぞれの採取日までの日数と現場周辺の公共機関で観測された温度とを基にして算出した。具体的な数値としては、現地調査を行った1992年7月26日の時点では $M^* = 13325^{\circ}\text{C}\times\text{日}$ 、以下1992年8月5日では $13680^{\circ}\text{C}\times\text{日}$ 、1993年8月25日では $22943^{\circ}\text{C}\times\text{日}$ 、1994年3月3日では $26739^{\circ}\text{C}\times\text{日}$ となった。室内試験時の積算温度 M^* と比較すると、温度0°Cで720日間保存すると $7200^{\circ}\text{C}\times\text{日}$ 、40°Cで720日間保存すると $36000^{\circ}\text{C}\times\text{日}$ となる。

図より、積算温度の増加にともなってpHは低下しており、その傾向は積算温度 M^* の大小によって異なっていることがわかる。そこで、(i) $\text{pH} \geq 4$ と(ii) $\text{pH} < 4$ の範囲において、積算温度 M^* とpHとの間に回帰直線を施したところ、次式(3)、(4)に示すような直線関係(図-7中の実線)が得られた。

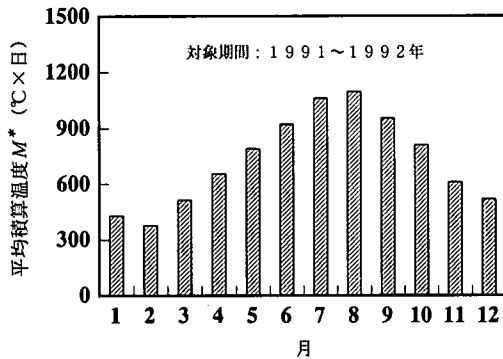


図-8 月別平均積算温度

- (i) pH ≥ 4 の場合

$$\text{pH} = 8.45 - 1.66 \cdot \log_{10} M^* \quad (r = 0.888) \quad (3)$$
- (ii) pH < 4 の場合

$$\text{pH} = 4.67 - 0.40 \cdot \log_{10} M^* \quad (r = 0.765) \quad (4)$$

このように pH 4 を境としてその傾向が異なった原因のひとつとして、土自体が有している酸に対する緩衝能力を上げることができる。積算温度の増加にともなって pH が低下する傾向は、次章以下で述べる原位置追跡調査の結果においても認められているものの、pH の推移に及ぼす緩衝能力の影響を必ずしも見出すことができなかった。そこで、今回は、積算温度 M^* と pH との間 (図-7 中の●印を除く全データ) に近似的に直線回帰を施し、両者の関係について検討してみることにした。

積算温度 M^* と pH との間には、 $M^* \leq 36000^\circ\text{C} \times \text{日}$ の範囲において、次式 (5) に示すような非常に相関性の高い直線関係 (図-7 中の破線) が成立していることがわかる。

$$\text{pH} = 7.08 - 1.05 \cdot \log_{10} M^* \quad (r = 0.900) \quad (5)$$

なお、回帰式を求めるに当たっては、現場採取試料土の斜面表層部 (採取深さ 0m に相当) の結果 (●) は計算に含めなかった。この理由は、第 5 章で述べるように斜面表層部分の土は常に降水に曝露されており、空気との接触による酸性化以外の影響要因を含んでいる可能性があるかと判断したためである。なお、以後も同様の理由により計算に含めないものとする。

加算温度 $\alpha = 10^\circ\text{C}$ と同様にその他の加算温度についても M^* と pH との間関係を検討したところ、両者の間には直線関係が成立しており、表-2 に示すように比較的相関性の高い直線回帰式を施すことができ、とくに、加算温度を 10°C とした場合に相関係数が 0.900 と最も大きくなるという結果が得られた。そこで、今回は 10°C を加算温度に準じる係数 α^* と表すこととした。なお、今回の計算に用いた $\alpha^* = 10^\circ\text{C}$ は、 M^* と pH との相関性から判

断したものであり、本来、加算温度 α が有している物理的な意味 (本研究においては、 -10°C で酸性移行が停止すると仮定) とは異なるものである。今後は、より低い温度 (例えば、 -5 、 -10°C) の基で試料を保存することによって酸性移行が停止する温度、すなわち「酸性移行を呈する土」の加算温度を求める必要がある。また、この加算温度に影響を及ぼす要因として、パイライトの含有量、粘土鉱物の種類、粒度などが挙げられ、異なる「酸性移行を呈する土」に対して同様の検討を行なう必要がある。

Ollier¹³⁾ は、岩石の風化の進行速度が時間の対数に比例するという報告しており、このことは、風化は初期段階では速く進行し、その後徐々に遅くなっていくということを示していることになる。

今回の実験により、「酸性移行を呈する土」の pH は、日数 (時間) に温度の項目を組み合わせた積算温度の対数に比例するということが明らかとなり、これより pH の推移をある程度予測することが可能となった。通常、ある期間内に岩や土の風化 (物理的風化、化学的風化) がどの程度の深さまで進行するかということを示す用語として「風化速度」が用いられているが、今回の研究では、ある期間内に空気と接触した土の pH (化学的風化指標のひとつ) がどの程度まで低下するかということを中心として検討しており、「(化学的) 風化速度」という用語の代わりに「酸性移行速度」という用語を用いることとする。いずれにしても、式 (5) により「酸性移行を呈する土」の pH の推移を、積算温度を用いた比較的簡便な手法により評価することが可能となった。

4. 原位置追跡調査の概要

これまでの室内試験の結果より、「酸性移行を呈する土」の pH の推移には、空気と接触してからの日数と温度とが深く関与していること、日数と温度とを加味した積算温度と pH との間には直線関係があることなどが明らかとなった。これらの結果は、室内において、理想的な条件下 (例えば、温度一定) のもとで保存された試料に対して求められた結果であるが、原位置では室内とは気象条件 (気温、湿度、降水量、降雪量、日射量など) も大きく異なり、また、浸透水や地下水も存在していることより、それぞれの要因が複雑に絡み合って土の酸性化が進行しているものと推察される。このことより、前章までの室内試験の結果のみから得られた酸性移行速度の評価式を直接原位置における測定結果に適用することは困難であると考えられる。

そこで、式 (5) に示した積算温度方式による酸性移行速度の評価手法の原位置での適用性を確認するために、

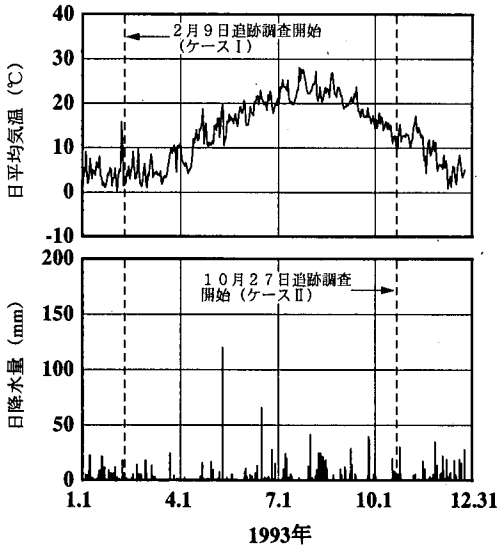


図-9 日平均気温, 日降水量

原位置において空気と接触していない斜面内部の土を人為的に空気と接触させ、その後のpHの推移を追跡調査し、室内試験により得られた結果との比較を行ってみることにした。

まず、第2章に示した切土斜面(前出図-1)を対象とし、この切土斜面の下層に位置している暗灰色粘土層を水平方向に掘削して直径1m、深さ2mの調査孔を掘り、未だ酸性化していない土を空气中に曝した。次に、所定の期間(最長720日)が経過した時点で調査孔内壁の表層部を約30cm四方、約2cmの深さにわたってへらで注意深く削り落とし、直ちに、採取した試料の含水比試験、pH試験、強熱減量試験を実施した。なお、一度試料を採取した箇所には目印を付け、次回の採取時に異なる箇所から採取するように配慮した。

第2章で述べた現地調査の結果より、切土斜面において0.3~0.5mの深さまで土の酸性化が進行していたという結果を踏まえると、今回の調査においても、掘削後、土の酸性化は掘削孔内壁表層部のみならず斜面内部にも進行していくものと推察される。しかしながら、今回の調査は原位置における気象条件下での酸性移行速度、すなわち、pHの低下速度と温度との関連性を検討することに主眼を置いており、酸性化領域がどのように拡大していくかを調べるものではない。そこで、今回の追跡調査においては、外気に曝されている掘削孔内の表層部のpHの推移のみに着目することとした。

追跡調査の実施に当たって、土の酸性化が進行していく過程で積算温度の高低が酸性移行速度にどの程度影響を及ぼすのかを調べるために、追跡調査開始時期として高温期に先駆けた時期と低温期を迎える時期の2種類に

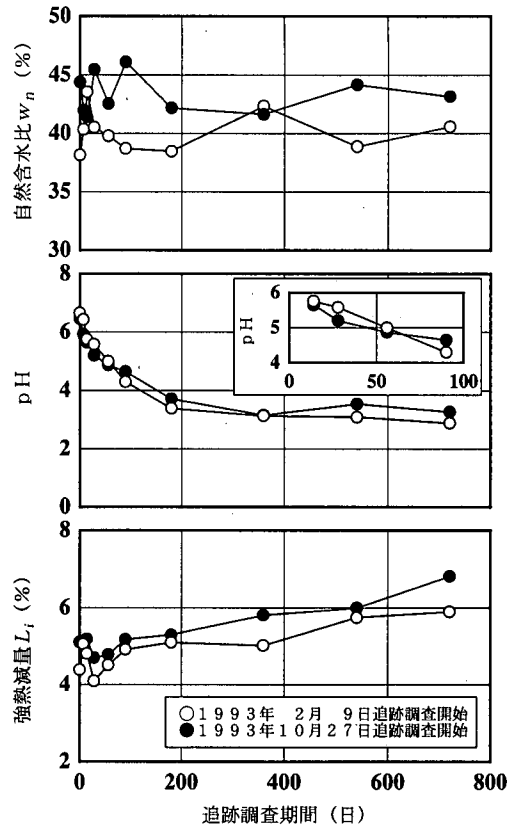


図-10 追跡調査期間の経過にともなう自然含水比、pH、強熱減量の推移

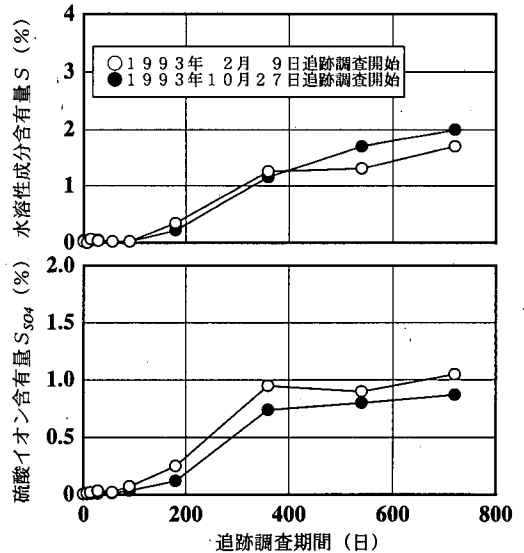


図-11 追跡調査期間の経過にともなう水溶性成分含有量、硫酸イオン含有量の推移

表-3 追跡調査期間中における積算温度の推移

追跡調査 期 間	積算温度M* (°C×日)	
	ケースI	ケースII
0日	12	20
7日	112	179
14日	221	333
28日	419	646
56日	880	1112
90日	1607	1589
180日	4328	3020
360日	8334	8764
540日	12756	11791
720日	17118	17295

ついて検討を行ってみることにした。図-8は、加算温度 $\alpha^* = 10^\circ\text{C}$ として算出した1991~1992年の月別平均積算温度 M^* を示す。図より、積算温度は、年間を通して1, 2月が最も小さく、7, 8月で最も大きくなっていることがわかる。そこで、積算温度の大小および試験実施上の都合の観点から、追跡調査を開始する時期として1993年2月(ケースI)と1993年10月(ケースII)の2種類とすることとした。

5. 原位置追跡調査の結果

図-9は、一例として1993年の気象データ(日平均気温、日降水量)を示す。ここで、参考にした気象データは、現地調査を行った地点より北北西に約1.4km離れた津幡町消防本部と北北東に約1.1km離れた石川県津幡土木事務所において測定されたものであり、日平均気温は2時間ごとに測定された12個の結果の平均値を用いた。追跡調査を開始した1993年2月9日の天候は曇時々雪で日平均気温 1.6°C 、降水量 6.0mm 、同年10月27日は晴れで 9.7°C 、降水量はゼロである。なお、日平均気温、日降水量とも、追跡調査対象期間となった1994年、1995年もほぼ同様の傾向を示した。

図-10は、追跡調査期間の経過にともなう自然含水比、pH、強熱減量の推移をケースI、IIごとに示したものである。図より、自然含水比は40~45%を推移している。pHの推移に着目すると、追跡調査開始直後、pH 6.5とほぼ中性を示したが、調査期間の経過にともなってpHは徐々に低下しており、720日が経過した時点でpH 3の強酸性となっていることがわかる。また、ケースIとIIとを比較すると、追跡調査開始当初はケースI(○)の方が幾分高めのpHとなっている。この理由のひとつとして、ケースIが低温期を控えて追跡調査を開始した

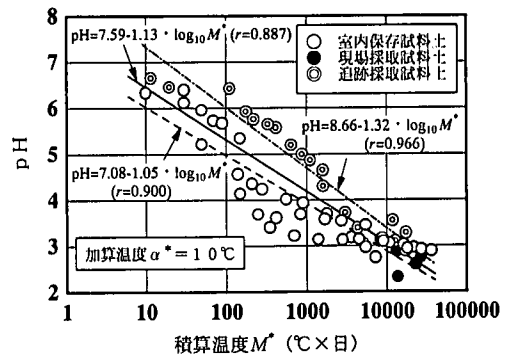


図-12 積算温度とpHとの関係

ことが挙げられる。

強熱減量は日数の経過にともなって僅かに増加しており、室内試験の結果(前出図-4(下段の図))とほぼ同様の傾向が認められた。

図-11は、追跡調査期間中の水溶性成分含有量、硫酸イオン含有量の推移を示す。図より、測定結果にばらつきが認められるものの、追跡調査期間の経過にともなって水溶性成分、硫酸イオン含有量ともに漸次増加している。

以上の自然環境下における追跡調査の結果より、調査期間の経過にともなってpHが低下すること、水溶性成分含有量と硫酸イオン含有量が増加することなどが明らかとなった。また、これらの傾向には追跡調査開始時期の影響が含まれていることなども明らかとなった。

今回の調査は、斜面表層部より水平方向に2m掘削した調査孔の内壁より試料を採取しているため、図-11に示した試料土中に含まれている水溶性成分含有量や硫酸イオン含有量に、降水中に含まれているイオン成分(塩素イオン、硫酸イオン、硝酸イオンなど)が影響を及ぼしている可能性はほとんどないものと考えられる。また、前出図-1の調査地点断面図より、赤色粘土層内に浸透した水が調査対象となった暗灰色粘土層へ影響を及ぼしている可能性はないと言い難いが、赤色粘土層の層厚は3.2~9.9mあり、この層自体が有する緩衝能力が発揮されることによって降水の影響は暗灰色粘土層の試験結果に含まれていないものと推断した。

表-3は、追跡調査開始後、所定の日数が経過した時点での積算温度 M^* をまとめたものであり、追跡調査開始当初は10月開始時(ケースII)の方が2月開始時(ケースI)より幾分大きめの値を示しているが、90日の時点で両者は逆転していることがわかる。この積算温度の推移が図-10に示したpHの推移に少なからず影響を及ぼしているものと推察される。また、両ケースとも、積算温度は最終的には $17000^\circ\text{C}\times\text{日}$ に達していることがわかる。

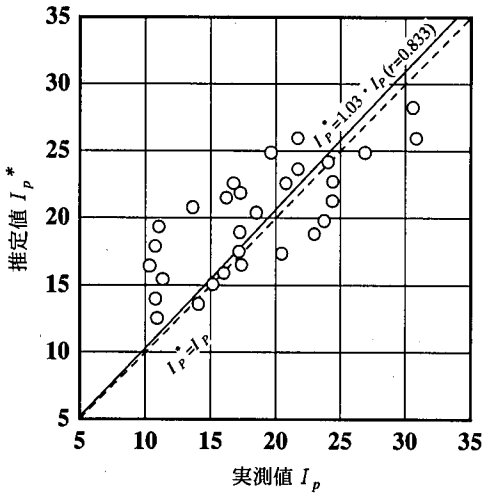


図-13 推定値と実測値との比較 (塑性指数)

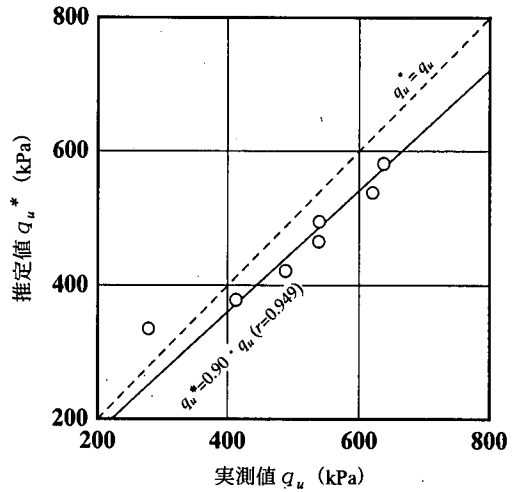


図-14 推定値と実測値との比較 (一軸圧縮強さ)

図-12は、前出図-7の積算温度とpHとの関係に追跡調査によって得られた結果(◎)を加えたものである。図より、室内保存試料土(○)と比較して追跡採取試料土(◎)は幾分高め値を示しているが、前出図-7と同様に M^* とpHの間には、次式(6)に示すように直線関係(図-12中の一点鎖線)が成立している。

$$pH = 8.66 - 1.32 \cdot \log_{10} M^* \quad (r = 0.966) \quad (6)$$

そこで、○と◎との結果を基にして再度直線回帰を施したところ、 $M^* \leq 36000^\circ\text{C} \times \text{日}$ の範囲において、次式(7)に示すような回帰直線(図-12中の実線)が得られた。

$$pH = 7.59 - 1.13 \cdot \log_{10} M^* \quad (r = 0.887) \quad (7)$$

なお、式(7)を求めるに当たっては式(5)、(6)の算出と同様に現場採取試料土の結果(●)は計算に含めなかった。

先述した室内保存試料土の式(5)は、0、20、40℃の一定温度条件下で保存された場合の結果を示しているのに対し、追跡採取試料土の式(6)は、複雑な温度の変動を始め、降水、湿度、浸透水など様々な外的要因を受けた場合の結果を示していることより、これらの影響が式(5)と(6)の係数の違いとなって表れたものと考えられる。いずれにしても、積算温度方式を導入することによって、「酸性移行を呈する土」のpHを比較的高い精度で求めることが可能となった。

以上の室内試験、現場試験双方の結果より、積算温度方式を用いることによって酸性移行速度をある程度の精度で評価することが可能であることが示された。

ところで、著者らは、これまでに行ってきた「酸性移行を呈する土」に関する一連の研究の中で、この土の工学的性質とpHとの関係について検討を加え、土の工学的性質はpHと非常に相関性の高い関係にあることを報告してきた^{4)~6)}。本研究において、式(7)に示したようにpHと積算温度との間には非常に相関性の高い関係があるということを明らかにしたわけであるが、これらの結果を総合的に判断すると、積算温度と「酸性移行を呈する土」の工学的性質との間に密接な関係があることが十分に予想される。そこで、次章では、積算温度と工学的性質との関係について言及してみることにする。

6. 酸性移行を呈する土の工学的性質の推定法

6. 酸性移行を呈する土の工学的性質の推定法

著者らは、これまでに前出図-1に示した切土斜面より採取した「酸性移行を呈する土」の強度、変形特性やコンシステンシー限界は、pHをパラメーターとして次式に示すような関係があることを報告してきた^{4)~6)}。

$$w_L (\%) = 7.08 \text{ pH} + 25.85 \quad (r = 0.920) \quad (8)$$

$$w_p (\%) = 2.79 \text{ pH} + 25.25 \quad (r = 0.864) \quad (9)$$

$$I_p = 4.28 \text{ pH} + 0.60 \quad (r = 0.842) \quad (10)$$

$$q_u \text{ (kPa)} = -1.30 \text{ pH} + 9.88 \quad (r = 0.920) \quad (11)$$

$$(\varepsilon_a)_r (\%) = 0.73 \text{ pH} + 1.11 \quad (r = 0.964) \quad (12)$$

$$E_{50} \text{ (kPa)} = -32.42 \text{ pH} + 261.81 \quad (r = 0.826) \quad (13)$$

先にも示したように、「酸性移行を呈する土」のpHは、積算温度の関数(式(7))で表されることより、式(8)~(13)のpHの項に式(7)を代入することによって、土の工学的性質を、日数と温度から算出した積算温度 M^* を用いた手法により推定することが可能になるものと考えられる。

一例として、図-13は、実測された塑性指数 I_p と計算により求めた塑性指数 I_p^* を、図-14は、実測された一

軸圧縮強さ q_u と計算により求めた一軸圧縮強さ q_u^* を、それぞれ比較したものである。

図より、塑性指数、一軸圧縮強さともに実測値と計算値との間には比較的相関性の高い結果が得られていることがわかる。なお、これ以外の特性についても塑性指数や一軸圧縮強さとほぼ同様の結果が得られた。このことより、積算温度方式を導入した評価手法を用いることによって、「酸性移行を呈する土」の工学的性質を推定することが可能であることが実験的に明らかとなった。

7. まとめ

本研究では、「酸性移行を呈する土」の pH の低下速度に及ぼす日数や温度の影響を調べるために、切土斜面より採取した土を室内で所定の期間空气中に曝し、酸性化した土に対して pH 試験を行った。また、pH の推移に及ぼす温度と日数との関係を積算温度によって表し、この有効性を確認するために現地調査を行った。本研究により得られた主要な結果を以下に列挙する。

(1) 「酸性移行を呈する土」の pH の推移には保存日数や温度が深く関わっている。

(2) 室内試験および原位置追跡調査の結果より、積算温度 $\leq 36000^\circ\text{C} \times \text{日}$ の範囲において、積算温度と pH との間に直線関係が成立する。

(3) 積算温度方式を導入した評価式を用いることによって、今回の実験に用いた「酸性移行を呈する土」の工学的性質を推定することが可能である。

このように「酸性移行を呈する土」の pH の推移に及ぼす日数や温度の影響を、積算温度の概念を導入することによってある程度明らかにすることができたが、この評価手法の精度を高めるためには、積算温度を求めるに当たって用いた加算温度を決定することが必要である。

一方、「酸性移行を呈する土」は石川県内に留まらず全国各地に存在していることが報告されており、今後はこのような土に対しても同様の検討を行っていく予定である。

いずれにしても、土の pH は地盤環境を左右する重要な指標のひとつであり、土の工学的性質を考える上において重要な項目のひとつであろう。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、金沢工業大学名誉教授宮北 啓先生には貴重なご助言を賜った。日本大学教授山中健生先生ならびに助教門井守夫先生には微生物

の存在確認試験をしていただいた。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卒業研究生諸君のご協力をいただいた。ここに、深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 亀井健史, 佐野博昭: ベ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.
- 2) 亀井健史, 佐野博昭: 水素イオン濃度指数の違いがベ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.
- 3) 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, No. 517/III-31, pp. 189-196, 1995. 6.
- 4) 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. 9.
- 5) 佐野博昭, 山田幹雄, 能澤真周, 奥村充司, 渡邊康二: 酸性移行を呈する土の工学的性質に関する研究, 日本材料学会第3回地盤改良シンポジウム発表論文集, I-4, pp. 41-48, 1998. 11.
- 6) 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, 第610号/III-45, pp. 97-104, 1998. 12.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 陽田秀道: 新第三紀泥岩の生化学的風化現象と被害, 土木学会論文集, No. 617/III-46, pp. 213-224, 1999. 3.
- 10) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 1990. 3.
- 11) 塩入松三郎, 青峰重範: 湛水状態の土壤中に於ける空素の形態変化, 日本土壌肥科学雑誌, 第14巻, 第6号, pp. 369-370, 1940.
- 12) 平井裕二, 斎藤顕次, 門井守夫: 酸性土の中和に関する実験的研究—その1 酸化条件の違いが土の pH に及ぼす影響—, 第32回地盤工学研究発表会, 平成9年度発表論文集 D-2, 162, pp. 325-326, 1997. 7.
- 13) Ollier, C. D., 松尾新一郎監訳: 風化—その理論と実態, ラテイス社, pp. 327-341, 1971. 12.

(2000. 7. 21受付)

A STUDY ON EVALUATION METHOD OF ACIDIFICATION RATE OF SOILS BY USING MATURITY

Hiroaki SANO, Mikio YAMADA, Mitsushi OKUMURA, Masachika NOZAWA and Yuji HIRAI

In order to investigate the influence of preserving time and temperature on the variations of hydrogen-ion concentration exponent (pH) values of the acidified soil by air drying, site observation and laboratory test were performed. As a result, the hydrogen-ion concentration exponent (pH) values decreased with preserving time and the decreasing degree was influenced by preserving temperature. In addition, it was found that there was a straight relationship between pH and maturity which was calculated by preserving time and temperature, the engineering characteristics of the acidified soil by air drying could be estimated by simple evaluation equations used maturity.