

## 酸性雨が化学安定処理土の耐久性に及ぼす影響

嘉門 雅史・勝見 武・応 長雲・宮武 一都

### EFFECT OF ACID RAIN ON DURABILITY OF LIME AND CEMENT STABILIZED SOILS

By Masashi KAMON, Takeshi KATSUMI, Changyun YING and Kazuto MIYATAKE

#### Synopsis

The infiltration and soak tests were conducted at different pH levels of artificial acid rain to experimentally simulate the erosion process on stabilized soils, which were used at parts of the subgrade and base course. The authors used three types of lime and cement stabilized soils, and focused on the physico-chemical and engineering behaviors of the eroded soils. Results obtained show that the pH values of the lime and cement stabilized soils generally decreased with continuous infiltration or soak and that these decreases were greater under a higher acid condition. A large reduction of the unconfined compressive strength obtained from the specimens eroded by the higher acid rain was observed in comparison to ones eroded by the weaker acid rain. In particular, the unconfined compressive strength of the lime stabilized decomposed granite soil (LDGS) eroded by the acid rain with pH 2.0 decreased to 1/6 of its initial value after a small flux of infiltration.

#### 1. はじめに

工業化による地球環境の悪化によって環境地盤工学へのアプローチがますます重要になりつつある。特に、安定処理地盤に影響を及ぼす環境的要因の1つである降雨の酸性化が注目されている。石灰及びセメントは、軟弱で圧縮性の高い土の工学的特性を改良するために用いられる安定材である。石灰やセメントは高アルカリ性であるから、酸性雨が長期間継続すると中性化される恐れがある。化学反応生成物、土の構成物質、土の性質など安定処理土に影響する内的要因に関してはすでに数多く研究されてきたが、外的要因が安定処理土に及ぼす影響に関しては十分な研究がなされていない。Gohら<sup>1)</sup>はフライアッシュ安定処理土の溶出特性を調べた。Broderickら<sup>2)</sup>によって、石灰及びセメント安定処理土は無処理土に比べ有機物に侵食されにくいことが報告された。Edilら<sup>3)</sup>によって、締め固めたポゾランフライアッシュに無機物を長期間浸透させた結果や、浸出液中の化学成分の変化などが報告されている。またPoranら<sup>4)</sup>は、安定処理フライアッシュの工学的特性を調べ、環境的側面からみたフライアッシュの有効利用に関して研究した。古河ら<sup>5)</sup>は水中と0.2N酸性溶液に浸したセメント安定処理土の工学的特性の変化を調べたり、0.2N酸性溶液に浸漬した供試体から得られたCBRは水に浸漬した供試体から得られたものより低いことを指摘した。しかし、古河らの研究を除いては、酸性雨が石灰及びセメント安定処理土の工学的特性の及ぼす影響についてはほとんど研究されていない。酸性雨による石灰及びセメント安定処理土の侵食メカニズムを解明するためにさらなる研究が必要である。

一般に石灰及びセメント安定処理土は物理的作用や化学反応によって強度が増加することが知られている<sup>6), 7), 8)</sup>。物理的作用にはアルカリ状態のもとで土粒子に $\text{Ca}^{2+}$ が吸着するといったような陽イオン吸着反応などがある。石灰及びセメント安定処理土中に含まれる $\text{Ca}^{2+}$ には自由、吸着、水和状態のものがある。

石灰及びセメント安定処理土が酸性雨に侵食されると、 $\text{Ca}^{2+}$  は  $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{H}^+$  との間のイオン交換反応により溶出し、その結果、安定処理土の中性化が起こる。それゆえこの研究の目的は、(1)酸性雨を用いて流下及び浸漬試験を行うことによって安定処理土の物理化学的特性や耐久性を調べ、(2)酸性雨による石灰及びセメント安定処理土の侵食メカニズムを明らかにすることである。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験材料

本研究で使用した3種類の土(まさ土、関東ローム、沖積粘土)はそれぞれ大津市(滋賀県)、町田市(東京都)、東大阪市(大阪府)で採取されたものである。まさ土と関東ロームは2mmふるいを通したものをを用いた。まさ土(DGS)、関東ローム(KL)、沖積粘土(AC)の物性値をTable. 1に示した。

### 2.2 添加量の決定

流下及び浸漬試験を行う前に、数種類の添加量を持つ石灰及びセメント安定処理土から得られた一軸圧縮強さをもとに石灰やセメントの添加量を決定した。添加量による安定処理土の一軸圧縮強さの変化をFig. 1に示してある。3つの安定処理土は異なった強度変化を示した。一定の養生期間では、まさ土に石灰で安定処理を施した供試体の一軸圧縮強さは添加量が増加するにつれて初めは著しく増加して、その後は緩やかに増加する。逆に、関東ロームに石灰で安定処理を施した供試体の一軸圧縮強さの変化は少量の添加量ではあまり差がなく、その後は添加量の増加とともに一軸圧縮強さも増加する。セメント安定処理を施した沖積粘土の場合は、添加量が増加するにつれて一軸圧縮強さも増加する。それゆえ、まさ土や関東ロームの石灰添加量を、9日間の空気養生と1日間の水中養生の後の一軸圧縮強さをもとに、それぞれ5%、12%に決定した。また、沖積粘土をセメントで安定処理した供試体の添加量は、6日間の空気養生と1日間の水中養生の後に測定した一軸圧縮強さをもとに7.5%と決定した。添加材の量は土の乾燥質量に対する量である。本研究では、5%石灰安定処理まさ土、12%石灰安定処理関東ローム、7.5%セメント安定処理沖積粘土をそれぞれ略してLDGS、LKL、CACと表した。3種類の安定処理土の物性値をTable. 2に示した。

### 2.3 実験方法

流下及び浸漬試験に用いた供試体はセメント協会(JCA)の締固め方法(JCAに基づく締固め試験、締固めエネルギーはJISA1211と同等である)によって作製した。塩ビのモールド( $\phi 5\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ )に入ったLDGSとLKLの供試体を締固めエネルギー5、10、10、20回 $\times$ 4層で締固めた。CACの供試体

Table 1 Properties of Non-stabilized Soils

	$w_n$ %	$w_L$ %	$w_P$ %	$I_p$ %	pH
DGS	7.6	—	—	—	6.10
KL	74.9	114.0	87.2	26.8	6.17
AC	64.0	93.0	34.2	58.8	7.72

Note : DGS, KL and AC stand for decomposed granite soil, Kanto Loam and alluvial clay, respectively.

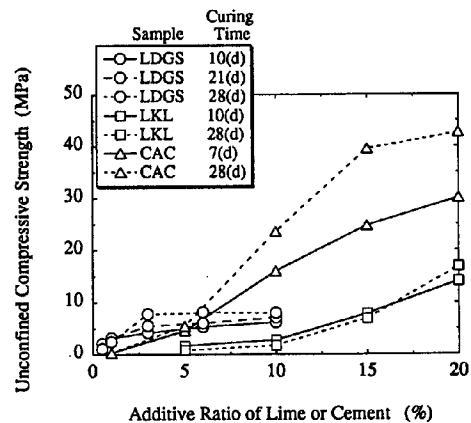


Fig. 1 Relation between  $q_u$  and Additive Ratio

Table 2 Properties of Stabilized Soils

	$\rho_d$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$q_u$ (MPa)	$k$ ( $\text{cm}/\text{s}$ )	pH
LDGS	1.717	2.64	$1.80 \times 10^{-5}$	12.2
LKL	0.967	0.61	$1.71 \times 10^{-4}$	11.3
CAC	1.288	1.05	$1.50 \times 10^{-6}$	10.2

Note : LDGS, LKL and CAC stand for lime stabilized decomposed granite soil, lime stabilized Kanto Loam and cement stabilized alluvial clay, respectively.

は静的締固めを行い作成した。

人工模擬酸性雨は硫酸と硝酸を蒸留水で薄めて作成した。降雨の成分<sup>9)</sup>を参考にして、硫酸と硝酸の比率を3:1に決定し、模擬酸性雨のpHを5.6、5.0、4.0、3.0、2.0と決定した。流下試験における模擬酸性雨の流下量を日本の年間降雨量の平均値から1.2L/年に定め<sup>10)</sup>、浸漬試験では6.0、12.0、24.0、36.0、48.0リットルがそれぞれ5、10、20、30、40年に相当する浸漬年数と定めた。

本研究における流下試験は水頭差1.0mの重力流下方式で行った。流下が進行するにつれて、水頭差が初期水頭差の80%以下にならないようにした。浸漬試験では、供試体を直接模擬酸性溶液に浸した。供試体を流下及び浸漬試験を行う前に4ヶ月間水中養生し、強度が一定値になるようにした。それぞれの流下量及び浸漬期間の後、供試体を抽出し、一軸圧縮試験、透水試験、pH試験、中性化試験を行った。

中性化試験はLuzex3粒子分析器を用いて行った。模擬酸性雨によって侵食された供試体を垂直に切断し、切り口にフェノールフタレイン溶液をかけた。中性化領域は垂直部分の陰の部分をもとに決定し、中性化の深さは中性化領域から決定した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 流下試験

##### (1) 供試体のpH

Fig. 2にはLDGS供試体の上部端面と下部端面のpHとその両方のpHの平均値を示した。供試体の上部端面から得られたpHは下部端面から得られたpHよりもかなり小さい。その理由は、流下過程において酸性雨がイオン交換反応によって緩衝され、酸性雨のpHが供試体下部に行くにつれて小さくなるため、供試体中のCa<sup>2+</sup>との交換量が減少するからと考えられる。

Fig. 2に示しているように、pH 4.0以上の酸性雨に侵食されたLDGS供試体のpHの平均値は流下初期では酸性雨のpHにかかわらず同じように減少している、しかし流下量が10リットル以上になると供試体のpHは酸性雨のpHが減少するにつれて大幅に減少するようになった。石灰安定処理土のアルカリ性は、添加材の石灰によるものであり、安定処理土中ではCa<sup>2+</sup>の形で存在することはよく知られている。安定処理土中のCa<sup>2+</sup>は自由に存在し、吸着され、水和物を形成している。アルカリ性は主に自由Ca<sup>2+</sup>と吸着Ca<sup>2+</sup>の両方に関係があるが、水和Ca<sup>2+</sup>はほとんど関係していない。自由Ca<sup>2+</sup>は吸着Ca<sup>2+</sup>、水和Ca<sup>2+</sup>と比較して容易に交換されるため、流下初期では自由Ca<sup>2+</sup>は酸性雨のpHに関係なく溶脱され、そのため各供試体のpHは減少した。10リットル流下した後は自由Ca<sup>2+</sup>は完全に溶脱され吸着Ca<sup>2+</sup>が遊離しはじめた。pH 4.0の酸性雨によって侵食された供試体からの吸着Ca<sup>2+</sup>が目立った溶脱が、pH 5.0や5.6の酸性雨によって溶脱したものよりも供試体のpHが大きく減少する結果につながった。特に、pHが2.0や3.0の酸性雨を用いた場合は、それぞれ6.0、35.1の流下後、pHの平均値は6.0～7.0にまで減少した。低pHの酸性雨を流下した場合は自由Ca<sup>2+</sup>、吸着Ca<sup>2+</sup>は完全に溶脱し、供試体は中性化された。さらに、一部の水和Ca<sup>2+</sup>が交換され、水和構造は崩壊した。

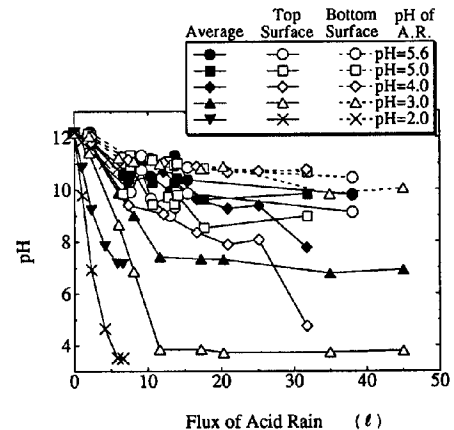


Fig. 2 pH Values of LDGS Specimens Eroded by Infiltration Test

##### (2) 供試体の中性化深さ

酸性雨によって侵食されたLDGS供試体の中性化深さをFig. 3に示した。中性化深さは流下量とともに増加し、高pHの酸性雨に比べて低pHの酸性雨に侵食された供試体の中性化深さの方が深い。pHが4.0、

5.0、5.6の酸性雨を30リットル以上流下した中性化深さは約2cmである。特に、pHが2.0、3.0の酸性雨によって侵食された供試体は、それぞれ約6.0リットル、30リットルの流下量で6cm、4cmの深さになった。高pHの酸性雨に侵食された場合は供試体から少量の自由Ca<sup>2+</sup>、吸着Ca<sup>2+</sup>しか溶脱しないが、低pHの酸性雨に侵食された場合はより自由Ca<sup>2+</sup>、吸着Ca<sup>2+</sup>が溶脱し、水和Ca<sup>2+</sup>でさえ溶脱したことが推測される。供試体の中性化深さと供試体のpHの関係を分析すると、石灰安定処理土の中性化がpHの減少につながるということがわかった。

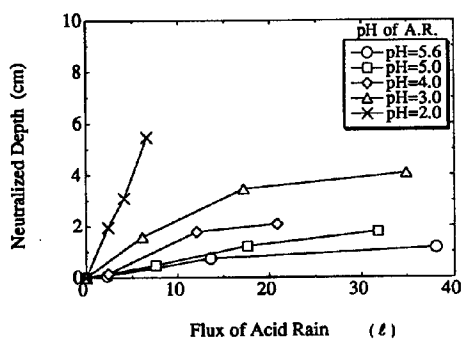


Fig. 3 Neutralized Depth of LDGS Eroded by Infiltration Test

### (3) 強度特性

侵食されたLDGS供試体の一軸圧縮強さの変化をFig. 4に示した。一軸圧縮強さは流下量の増加とともに減少したが、pH 3.0以上の酸性雨を用いた場合、流下量が少ないうちはあまり減少しなかった。酸性雨を12リットル(約10年分の流下量に相当する)以上流下すると、急激に減少しはじめ、一軸圧縮強さは最終的に1/2～1/3に減少した。安定処理土の強度は多数の要因に影響されていて、吸着Ca<sup>2+</sup>、水和Ca<sup>2+</sup>溶脱が強度低下につながるが、CaSO<sub>4</sub>やCaCO<sub>3</sub>などの再結晶物が間隙をふさぐことにより強度が増すこともあり得る。流下初期段階では、供試体にpH 3.0以上の酸性雨を流下したときに起こる自由Ca<sup>2+</sup>の溶脱がLDGS供試体の化学状態の変化の主な要因になっている。しかし、吸着Ca<sup>2+</sup>の場合はこの限りではない。自由Ca<sup>2+</sup>がアルカリ性を弱くしているのだが自由Ca<sup>2+</sup>の溶脱は強度にはあまり影響していなかった。流下量が12リットルを越えると、自由Ca<sup>2+</sup>は完全に溶脱され、吸着Ca<sup>2+</sup>も溶脱しはじめた。この吸着Ca<sup>2+</sup>の溶脱が安定処理土の強度が大きく減少することにつながっている。pH 2.0の酸性雨を流下した場合、一軸圧縮強さは急激に減少し、6.0リットルの流下量で流下前の一軸圧縮強さの1/6に減少した。低pHの酸性雨の場合、自由Ca<sup>2+</sup>は吸着Ca<sup>2+</sup>、水和Ca<sup>2+</sup>でさえも多く溶脱され、これが大幅な強度低下の原因になっている。石灰安定処理土の耐久性はそれらが酸性雨に長時間侵食されると小さくなることがわかったが、将来、降雨の酸性化がもっと進行すると、安定処理土は加速度的に侵食され、耐久性がますます失われていくことになるだろう。

Fig. 5には供試体の一軸圧縮強さとpHの関係を示した。供試体の一軸圧縮強さが減少するとpHも減少した。ゆえに双方には近似的な直線関係が成立している。この反応は石灰安定処理土の中性化が強度の減少につながっているということから説明できよう。言い換えると、アルカリ性は土の安定の効果的な要因になっていることが明らかである。

流下試験に用いたLDGS供試体の変形係数をFig. 6に示してある。E<sub>50</sub>値は流下量の増加にもなって減少した。この傾向は一軸圧縮強さの傾向に類似している。供試体がpH 4.0、5.0、5.6の酸性雨を流下した場合、E<sub>50</sub>の最終値は初

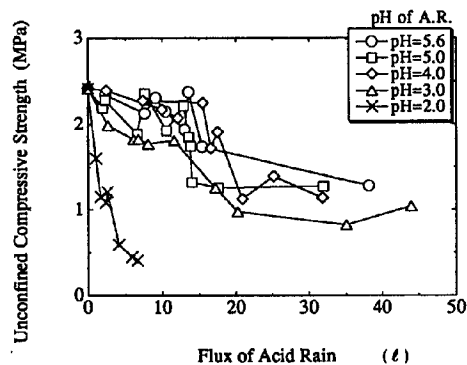


Fig. 4 Unconfined Compressive Strength of LDGS Eroded by Infiltration Test

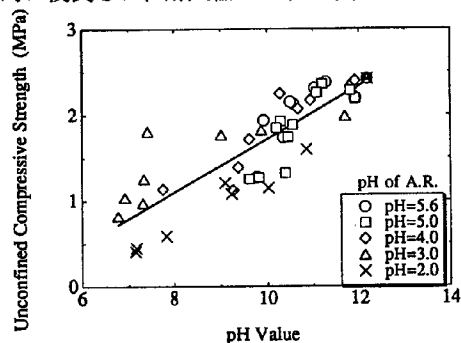


Fig. 5 Relation between  $q_u$  and pH Value of LDGS Eroded by Infiltration Test

期値の1/3～1/4に減少した。しかし、pH 2.0、3.0の酸性雨を流下した場合は、それぞれ6.0リットル、35リットル流下した後、 $E_{50}$ 値は初期値の1/10～1/15に減少した。供試体の上部端面の一部が低pHの酸性雨によってかなり中性化され、上部端面の大きな変形が $E_{50}$ 値の大幅な減少の原因となっていると考えられる。この結果は、酸性雨に侵食されていない土と比べて、侵食された土の $E_{50}$ 値の低下が地盤沈下を引き起こすことを示している。

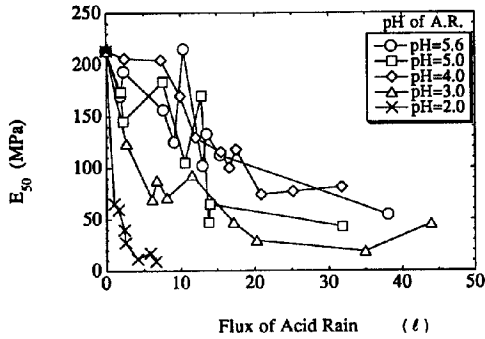


Fig. 6 Modulus of Deformation of LDGS Eroded by Infiltration Test

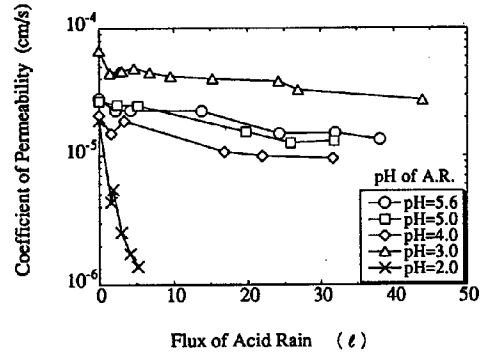


Fig. 7 Coefficient of Permeability of LDGS Eroded by Infiltration Test

(4) 透水性

Fig. 7には酸性雨による侵食がLDGS供試体の透水性に及ぼす影響を示している。無処理土のDGS供試体の透水係数は約 $10^{-3}$  cm/sであるが、LDGS供試体の透水係数は約2桁小さい値である。しかしながら、LDGS供試体の場合は最高密度に締め固めたときでさえ酸性雨が比較的自由に流下する。大多数の供試体の透水係数はほとんど同一のオーダー( $10^{-5}$  cm/s)である。(pH 3.0の酸性雨を流下した供試体の透水係数は比較的他のより大きいので除く。) pH 3.0以上の酸性雨を流下した場合、30リットル流下した後、透水係数の値は初期値の半分以下に減少した。透水係数が減少するのは、酸性雨を流下すると $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ や $\text{CaCO}_3$ などの再結晶物が生成し、それらが供試体の間隙をふさいでしまうためと考えられる。pH 2.0の場合、透水係数は流下初期で大きく減少した。pH 2.0の場合、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ などの結晶が大量に生成し、これらの再結晶物が供試体の間隙をふさいでしまい、透水性が大幅に減少する結果になったと考えられる。これらの結果から、高pHの酸性雨を流下した場合はあまり影響がみられなかったが、低pHの酸性雨を流下した場合はLDGS供試体の透水性に大きな影響を与えることがわかった。

(5) X線回折

酸性雨に侵食された安定処理土中の化学状態の変化を調べるため供試体中の水和物や結晶物をX線回折により調べた。Fig. 8、Fig. 9にはそれぞれLDGS、侵食されたLDGSから得られたX線回折の結果を示した。酸性雨を流下する前は加水ゲレナイトのピークを見いだすことができたが、pH 2.0の酸性雨を6.0リットル流下した後は、侵食されたLDGSからはピークが見いだせなかった。逆に、侵食されたLDGS内の $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ や $\text{CaCO}_3$ や未知の化学結晶物の生成が確認された。水和物の崩壊や結晶物の生成のような化学状態の変化が安定処理土の工学的特性の変化に影響を及ぼしていると考えられる。

(6) 供試体中の  $\text{SO}_4^{2-}$ 

供試体中の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度を Fig. 10 に示した。供試体中の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度は流下を続けていくにつれて増加し、pH 2.0 の酸性雨に侵食された供試体中の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度は増加していた。これは、低 pH の酸性雨を供試体に流下したとき大量の  $\text{SO}_4^{2-}$  が土に吸着し、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  のような結晶物が供試体に形成されたため、供試体中の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度は著しく上昇したためと考えられる。

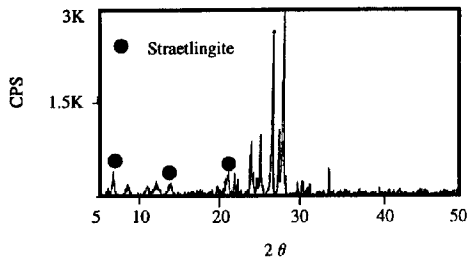


Fig. 8 X-ray Diffraction Trace of LDGS

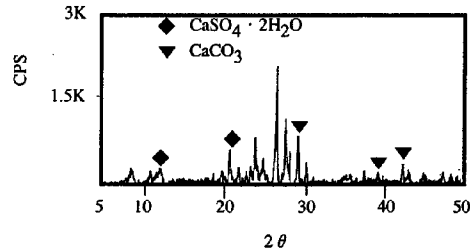
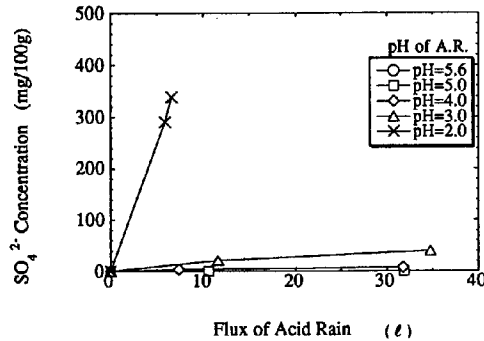


Fig. 9 X-ray Diffraction Trace of Eroded LDGS

Fig. 10  $\text{SO}_4^{2-}$  Ion in LDGS Specimens Eroded by Infiltration Test

## 3.2 浸漬試験

## (1) 供試体の pH

浸漬試験を行った供試体の上部端面から得られた pH を Fig. 11~13 に示した。pH 3.0 以上の酸性雨に 120 日間浸漬した LDGS 供試体の pH は、約 10 に減少した。pH 2.0 の酸性雨に供試体を浸漬した場合は、供試体の pH は大幅に減少し、最終的に 4.5 になった。浸漬試験における供試体の pH は流下試験の場合と同じように減少した。LKL 供試体の pH は 120 日の浸漬後、11.3 から 10 に減少したが、LKL 供試体にとって酸性雨の pH の違いによる影響は LDGS 供試体ほどはみられなかった。しかし、侵食された CAC 供試体からは、供試体の pH の減少と酸性雨の pH がかなり関連していることがわかった。pH 2.0 や 3.0 の酸性雨に浸漬した供試体の pH は高 pH の酸性雨に浸漬した場合と比べてより大幅に減少することがわかった。流下試験のところで述べたように、石灰及びセメント安定処理土の pH の減少は酸性雨による中性化が原因であった。これらの結果は、LDGS と LKL の供試体の pH を比較すると LKL 供試体の pH に比べて LDGS 供試体の pH は大きく減少していることがわかった。その理由は、LDGS は LKL と比べて石灰添加量（それぞれ 5%、12%）が少ないので、容易に酸性雨に中性化されたからと考えられる。また、pH に関する同じ変化がセメント安定処理土にもみられた。それゆえ、セメント安定処理土中の物理化学的反応は、石灰安定処理土中の反応と同じ基本メカニズムになっていると考えられる。

浸漬した LDGS 供試体の pH の変化と供試体の上部端面からの深さとの関係を Fig. 14 に示した。上部端面の pH は大きく減少していたが、表面からの深さが深くなるにつれてその程度は減少し、供試体内部の

pH にはほとんど変化がなかった。浸漬試験では安定処理土の表面部分は酸性雨によって容易に中性化されたが、安定処理土の内部には酸性雨の影響をほとんどみることができなかった。

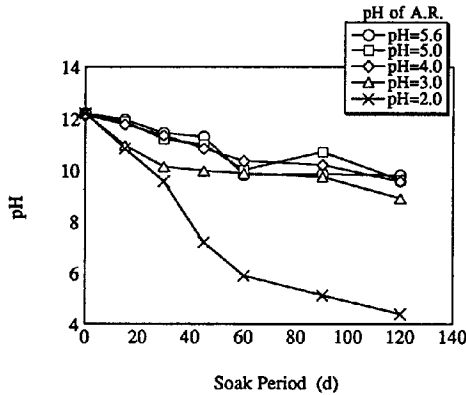


Fig. 11 pH Value of Top Surface of Soaked LDGS Specimens

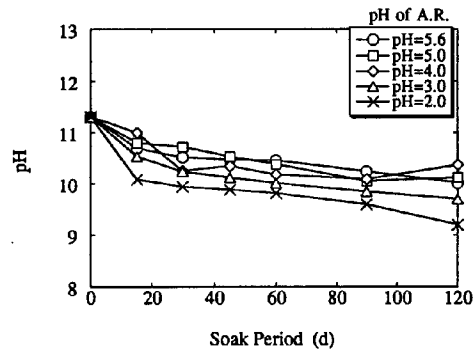


Fig. 12 pH Value of Top Surface of Soaked LKL Specimens

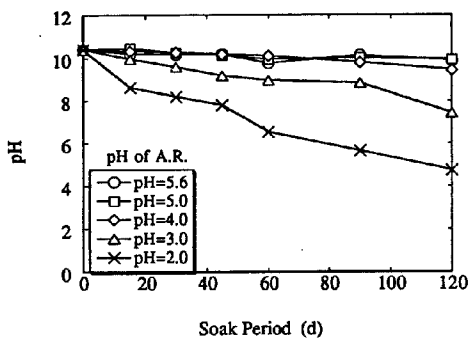


Fig. 13 pH Value of Top Surface of Soaked CAC Specimens

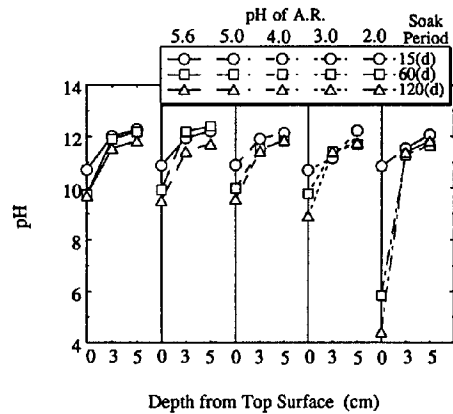


Fig. 14 Variation of pH Value of LDGS with Depth

(2) 強度特性

Fig. 15~17 には浸漬試験を行った LDGS、LKL、CAC の供試体の一軸圧縮強さの変化を示した。LDGS 供試体の一軸圧縮強さは浸漬時間が増えると減少し、120 日の浸漬後、約 2.0 MPa になった。LDGS 供試体を pH 2.0、3.0 の酸性雨に浸漬すると、浸漬初期には一軸圧縮強さは急激に減少するが、その後はほとんど変化しなくなった。流下試験と浸漬試験を比較すると、流下試験における一軸圧縮強さの方が大きく減少しており、浸漬試験における酸性雨の影響は供試体の表面だけに限られるということがわかった。LKL、CAC の両供試体から得られた一軸圧縮強さは同じような減少傾向を示した。pH 4.0 以上の酸性雨に浸漬した場合、供試体の一軸圧縮強さはほとんど変化しなかったが、供試体を低 pH の酸性雨に浸漬すると、一軸圧縮強さは少しだけ減少した。pH 2.0 の酸性雨に浸漬した LKL、CAC 供試体の最終的な一軸圧縮強さはそれぞれ初期値の 1/2、3/4 に減少した。浸漬は安定処理土の強度に関する 2 つの同時に起こる対比した影響を引き起こすと考えられる。浸漬時間の増加とともにポズラン反応の進行によって強度が増加する一方で、酸性雨による供試体の中性化によって強度が減少する。さらに低 pH の酸性雨が吸着  $Ca^{2+}$  や水和  $Ca^{2+}$  を交換するために必要な  $H^+$  を供給し、供試体を中性化し、分解するので (あるいはその両方起こるが)、一軸圧縮強さは短い浸漬時間で減少する。言い換えると、低 pH の酸性雨に浸漬したとき、石灰安定処理土の一軸圧

縮強さが急激に減少した理由は、低 pH の酸性雨によって吸着  $Ca^{2+}$  が溶脱し、水和  $Ca^{2+}$  でさえも溶脱するからである。LDGS 供試体の一軸圧縮強さと pH の関係を Fig. 18 に示しているが、流下試験の場合と同じ関係が得られた。浸漬した供試体の pH が小さいほど、一軸圧縮強さが大幅に減少した。

浸漬時間と LDGS 供試体の  $E_{50}$  値との変化を Fig. 19 に示した。LDGS 供試体の  $E_{50}$  値は浸漬時間が長くなるにつれて減少した。pH 4.0 以上の酸性雨に浸漬すると、120 日間の浸漬後、 $E_{50}$  値は初期値の 1/3 に減少した。流下試験と浸漬試験を比べると、流下試験に用いた供試体のほうが浸漬試験の供試体に比べて  $E_{50}$  値がより大きく減少した。

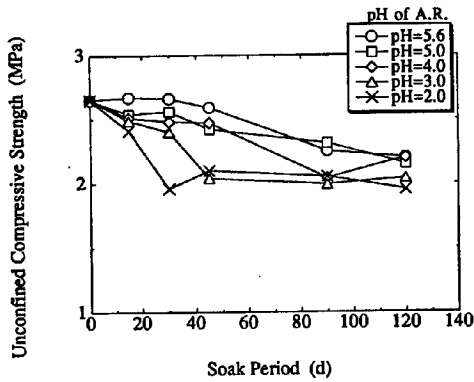


Fig. 15 Unconfined Compressive Strength of LDGS Eroded by Soaked Test

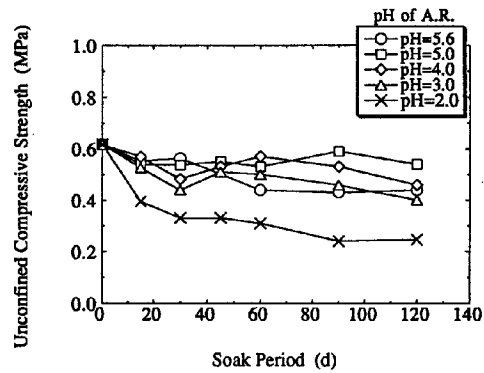


Fig. 16 Unconfined Compressive Strength of LKL Eroded by Soaked Test

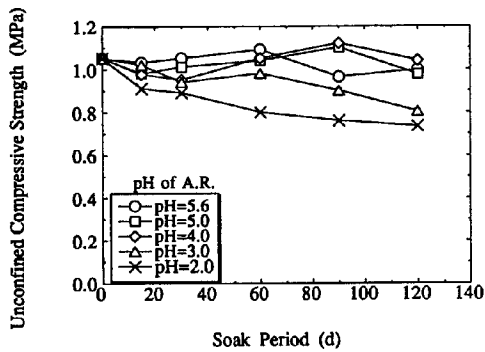


Fig. 17 Unconfined Compressive Strength of CAC Eroded by Soaked Test

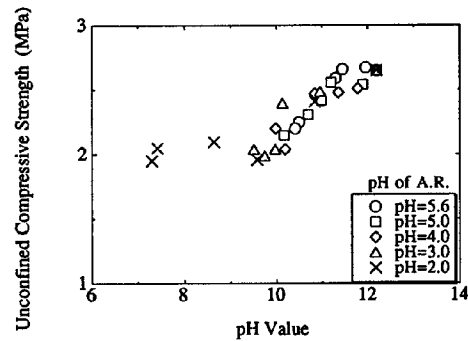


Fig. 18 Relation between  $q_u$  and pH Value of LDGS Eroded by Soak Test

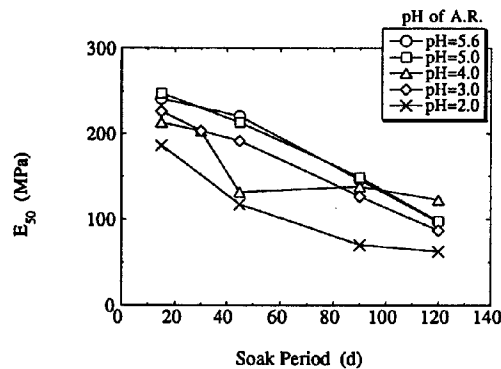


Fig. 19 Modulus of Deformation of LDGS Eroded by Soak Test



#### 4. 結論

本研究では、酸性雨に侵食された石灰及びセメント安定処理土の工学的特性の変化を調べ、実地盤における酸性雨の浸透過程をもとに室内実験を行い、侵食メカニズムを解明した。この研究から得た結果は酸性雨が化学安定処理土に及ぼす影響を予測し、評価するのに用いる。

酸性雨は石灰及びセメント安定処理土の物理化学的性質に影響を及ぼし、低 pH の酸性雨に侵食されると、安定処理土のアルカリ性が弱まり、pH が大きく減少する。室内実験で LDGS が完全に中性化されるには、pH 2.0 の酸性雨を流下した場合は、約 5 年、pH 3.0 の場合は約 10 年、pH 4.0 の場合は約 30 年の連続した流下が必要なことがわかった。

浸漬試験においては、安定処理土供試体の表面は酸性雨に容易に中性化されることがわかったが、供試体内部は酸性雨の影響をあまり受けていなかった。3 種類の土を比較すると LDGS と LKL は CAC より中性化されやすいことがわかった。

侵食された土からは、加水ゲーレンナイトが検出され、その他に  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCO}_3$  や未知の化学結晶物も検出された。

このような安定処理土の化学特性の変化は、安定処理土の工学的特性に影響を及ぼした。pH 3.0 以上の酸性雨を流下した場合、約 10 年分の流量を流下するまでは LDGS の一軸圧縮強さはほとんど変化しないが、10 年を越えると、急激に減少し、初期値の  $1/3 \sim 1/2$  になった。特に pH 2.0 の酸性雨を流下した場合、5 年分に相当する流下量で一軸圧縮強さは初期値の  $1/6$  にまで減少した。浸漬試験における 3 種類の安定処理土の一軸圧縮強さは浸漬期間の増加、酸性雨の pH の低下とともに減少したが、流下試験に用いた供試体ほどの変化はみられなかった。

pH が 3.0 以上の酸性雨を 3.0 リットル以上流下した場合、供試体から得られた透水係数は半分以下になった。pH 2.0 の酸性雨を流下した場合、透水係数は初期値から 1 オーダー減少した。

概して、酸性雨による侵食メカニズムは、(1) 自由  $\text{Ca}^{2+}$  の溶出が安定処理土のアルカリ性を弱くしている。(2) 吸着及び水合  $\text{Ca}^{2+}$  の分離が強度の減少につながっている。(3)  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCO}_3$  や未知の化学結晶物が透水性などの工学的特性に影響している。

この研究における最も重要な成果は、石灰及びセメント安定処理土が酸性雨に長時間侵食されると工学的特性や物理化学的性質が変化することである。それゆえ、酸性雨が石灰及びセメント安定処理土に及ぼす影響を十分に考慮し、直接的に接触をしない等の対策を樹立するべきである。

#### 参考文献

- 1) Goh, A. and Tay J.: Municipal solid-waste incinerator fly ash for geotechnical applications, J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 119, No. 5, 1993, pp. 811-825.
- 2) Broderick G. and Daniel D.: Stabilizing compacted clay against chemical attack, J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 116, No. 10, 1990, pp. 1549-1567.
- 3) Edil T., Sandstrom L. and Berthouex P.: Interaction of inorganic leachate with compacted pozzolanic fly ash, J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 118, No. 9, 1992, pp. 1410-1430.
- 4) Poran C. and Ahtchi-Ali F.: Properties of solid waste incinerator fly ash, J. Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 115, No. 8, 1989, pp. 1118-1133.
- 5) 古河幸雄・藤田龍之・平山和雄：安定処理したまさ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, 1994, pp.123-135.
- 6) セメント協会：地盤改良マニュアル，1994, pp. 15-47.
- 7) 宋 永昆・応 長雲：関東ロームのアロフェン含有量が石灰-石膏安定処理土に及ぼす影響，土質工学会論文報告集，Vol. 34, No. 4, pp.97-107.

- 8) 日本材料学会土質安定材料委員会：地盤改良工法便覧, 1991, 日刊工業新聞社, pp. 137-185.
- 9) 環境庁酸性雨対策検討会：第2次酸性雨対策調査の中間取りまとめについて, 1992.
- 10) 嘉門雅史・勝見 武・応 長雲・宮武一都：酸性雨が石灰及びセメント安定処理土に及ぼす影響, 第30回土質工学研究発表会, 1995, No. 73.

### 付 録

酸性雨の流量は、地盤に浸入すると考えられている量の1/3として計算した。日本の年間平均降雨量は約1800 mmで、1年分に相当する酸性雨の流量(Flux)を次式をもとに計算する。

$$\text{Flux} = 1/3 \times \text{Rave} \times A \quad \dots\dots\dots (1)$$

Rave と A はそれぞれ年間平均降雨量と供試体の断面積を表している。それゆえ、

$$\begin{aligned} \text{Flux} &= 1/3 \times 180 \text{ cm} (1800 \text{ mm}) \times 21.4 \text{ cm}^2 \\ &= 1200 \text{ ml} \end{aligned}$$

となる。