

はじめ

土に吸着されているイオン(特にカチオンの影響が大)が土中水の浸透によりリーチングされると、土粒子-水系においては土粒子表面の拡散イオンの分布および水分子構造に変化が生ずることが考えられる。その結果は粒子間力の変化(おもに電気的な力)、吸着水の物性に变化をきたし、ひいては土の構造(土粒子配列)、粒子間力(吸引力と反発力)、および水の粒子表面への吸着容量などを変えることとなる。すなわちリーチング作用を受けた粘土の性質は、それを受けていない粘土の性質にくらべてかなり違ったものを示すこととなる。

自然界におけるリーチング作用とそれに伴う土性変化を問題として、いろいろな立場から研究がなされているが、土質工学に関連することとしてはクイックレー化による地盤の安定性の問題、アースダムのパイピング(原因の一つとして)の問題などがあげられる。

本文は、(1)自然界におけるリーチングのプロセスを想象し、それを類似的な方法(原理的に)によって実験室内で再現してみようとした。(2)リーチングのメカニズムを理想化した土粒子-水系について理論的に考えてみる。(3)電解透析法を用いて強制的なリーチングを行なった場合の、カチオンの移動状況、含水量および固相量の変化の程度、およびコンシステンシの変化などを実験によって調べ、類似的方法の適用性とリーチングを受けた粘土の特性を見出す。等のことについて述べる。

I. 海成滞積粘土におけるリーチングプロセス

地下水の流動あるいは固相水圧によって粘土層中を清純な水が絶えず浸透していると、固相水中に含まれていた塩類はだんだんに流出していく、また土粒子表面に吸着あるいは拡散しているものカチオンも溶脱されていく。その結果は、土粒子表面のカチオン不飽和をきつめていくこととなる。

カチオンの不足を補うために浸透水中の水素イオンが吸着されていく。換言するとリーチングは清純な水の浸透に伴って起る一種のカチオン交換で、粘土は H-clay と化していく過程である。

図-1は、リーチングのプロセスおよびリーチングを受けた粘土の特性を示したものである。

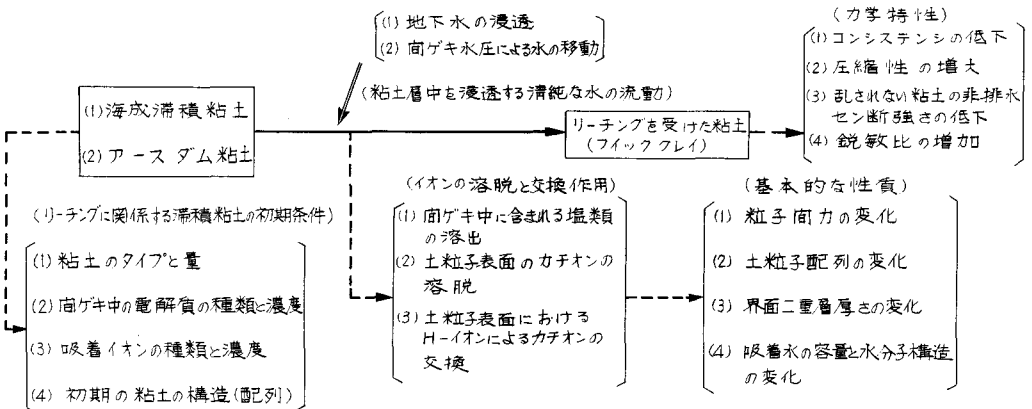


図-1 リーチングのプロセス

II. リーチングを受けた粘土の特性

リーチングを受けた粘土は、図-1にも示したように土質工学的影響の大きいいくつかの性質が、もとの粘土のそれと著しく違ったものとなることが知られている。L. Bjerrumは、粘土の工学的性質に及ぼすリーチングの影響として次の三つの特性をあげている。

(1) リーチングによって粘土の含水量と間ゲキ量はほとんど変化しないが、その粘土のコンシステンシはかなり大きく低下する(たとえば L_w は、もとの粘土の場合48%のものが、リーチングによって37%まで低下)。したがってその粘土の含水量は、その土の L_L よりも著しく大きいものとなる。

(2) リーチングを受けた粘土の非排水せん断強さは、低減する。(ベーンせん断試験による現位置試験結果では、^(γ_{max})リーチングを受けない粘土の50%であったと報告している。)

(3) リーチングを受けた粘土の圧縮性はかなりの増加をみる。(清純な水を浸透させて行なったリーチングの室内実験で、NaCl含有量がもとの粘土で $2/9/2$ のものを $1/9/2$ まで低下するまでリーチングし、両者の圧縮性をしらべ、リーチング粘土のそれがかかなり大きくなることを提示している)。

リーチングを受けた粘土をフイッククレと呼ばれるのは、乱した状態ではいちぢるしく液状化するという性質による(通常の粘土にくらべてきわめて高い鋭敏比を示す)。

この原因のおもなもの、(1)に関連して ($w > L_w$)、その土のもつコンシステンシにくらべて過剰の水分がその粘土の間ゲキ中に含まれていることによるとされている。

また基本的には、土粒子界面の二重層内で起るイオン交換の結果として二重層厚さが変化する(水分吸着能に関係すること、カチオンの変化に伴って吸着している水分子のオリエンテーションが変わること)の二つの理由でその現象が説明されている。

リーチングを受けた粘土の特性に関与する主因子は、上述した「吸着水のあり方」ということにあるが、リーチングの過程を通じて起る土粒子の配列の変化(粘土の構造の変化)も工学的な性質に大きく影響すると考えられる。特に圧縮性に及ぼす影響としてそれがあげられる。この問題については実験結果の考察のところで詳説する。

III. リーチングのメカニズム(理論的考察)

リーチングのプロセスは一種のイオン交換現象である。しかしこの場合のイオン交換は、たとえば置換力の大きいイオンを含む溶液を交換体に接触させて起させるような交換反応とは違ったプロセスで行なわれる。それは、(1)間ゲキ内の溶液濃度を低下させる清純な水の浸透が緩速であることと、その水に含まれる過剰の水素イオンが少量であることから、交換反応はきわめて緩慢である。また機構上の違いとして、(2)土粒子界面二重層内のカチオン濃度の低下が、二重層外の溶液濃度の低下に付随して起ると考えられる、リーチングにおけるイオン交換は次のような段階を経て起ると考えるのが適当であろう：

(a) 二重層外にある溶液が清純な水によって洗滌され、濃度が低下される。(b) その結果、二重層内外(二重層と外溶液との間に仮想の半透膜作用をもつ境界を考える)の液相の化学ポテンシャルが非平衡となる。(c) 化学ポテンシャルの平衡化のために内液相から外液相へとカチオンの移動が生ずる。(d) 交換体としての土粒子表面の負電荷に対応するカウンターイオンの不足が生じ、外液相から過剰の水素イオンを吸着し、交換平衡が保たれる。

上述のことを説明するのに、粘土-水系のイオン交換平衡を一種の *Donnan* 平衡と考えると、その系を理想的なモデルで表わしてみると便利である。図-2(a)は単一の *NaCl* 溶液に浸されたある粘土の場合の系を示すものであり、図-2(b)は、モデルの各境界を並列に表わしたものである。

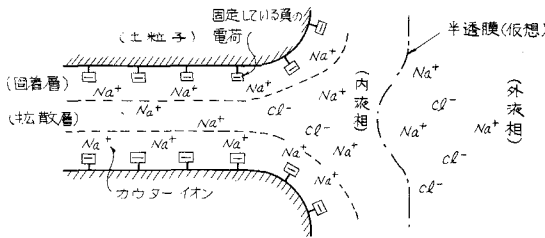


図-2 (a)

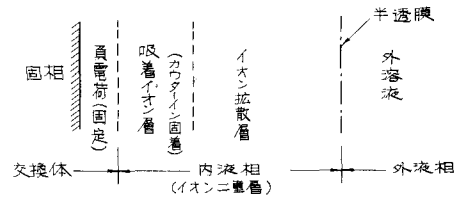


図-2 (b)

NaCl に浸された粘土の界面は、図-2(a)に示したように固定した負電荷をもった土粒子表面に液相から選択吸着された Na^+ イオンがあり固着層を形成し、その外側拡散イオン層があっていわゆるイオン二重層が形成される。その二重層と外液との間に水、 Na^+ 、 Cl^- を拡散移動させる半透膜の機能をもった仮想境界を考える。これはリーチングが開始される以前の平衡系である。この系における内液相のあり方(二重層厚、イオンの濃度分布、半透膜の活性)は、交換体としての土粒子の性質と外液相の物理・化学的な性質とによってきまる。

リーチング作用は、その外液相の条件だけが変化し、その変化が内液相の変化を誘発するのである。外液相の濃度変化に伴う内液相のイオン濃度の変化を、静電気ポテンシャル分布から考えた理論式によって、たとえば土粒子表面から 50\AA の距離について計算すると、初期外液相の濃度 0.1 molar (*NaCl*) が 0.01 molar まで低下すると、内液相($x=50\text{\AA}$)の濃度は 0.102 molar から 0.0196 molar まで低下する。(註) $n_+ = n_0 \coth \frac{Ux}{2}$, n_+ : 任意距離 x における内液相のカチオン濃度, n_0 : 外液相濃度, U : Boltzmann 定数, 静電ポテンシャルなどときまれば

内液相のイオン濃度の低下は、その相におけるカチオンの不足をきたし、外液相からの H^+ の介入となり、 Na^+ に代わって H^+ の交換が起る。リーチング進行中のある時点の交換平衡式を考えると、接触交換反応の場合と同じく $\frac{[CH][Na^+]}{[CNa][H^+]} = K_c$ が成立しよう。

リーチングに伴って土粒子-水系に変化が生ずるが、特に工学的性質に影響のあるものとして、(1) 電気ポテンシャルの変化による粒子間力の変化、(2) 吸着水の物性の変化、の二つがあげられる。

IV. リーチングを再現する類似的方法としての電解透析法

リーチングを実験室内で再現する方法として、いくつかの手段が考えられる。最も端的な方法としては、圧力を与えた蒸りゆう水(繰り返し)を粘土供試体に透過させる。いわゆる透水法を用いることである。

リーチングのメカニズムから考えてこの方法は、実際的にはあるが、粘土の透水性がきわめて低いことと、水に含まれる過剰の水素イオンが少なく、交換反応が弱いということ、リーチングに長い時間を要するという欠点をもっている。後者の欠点を補うために水のかわりに、たとえば高い濃度の *HCl* (1*N*) を用いると、リーチング時間は短縮できる。しかしこの場合粘土粒子を破壊させるという可能性があることと、高い濃度の酸の使用は取り扱い上問題が多い。ケン濁液状にした粘土の場合であると、酸に代えて *RI-120* といったようなイオン交換樹脂が用いうる。しかしこれも乱されぬ粘土供試体に対しては適用できない。本研究で用いた電解透析法は、上記の欠点をカバーし、次のような特徴をもっている：

- (a) リーチングを迅速に行ないうる。(b) 電解透析時間を制御することによって希望するリーチング度のものが容易に得られる。(c) 粘土の透水性に影響されない。(d) 土粒子の破壊を起す可能性は少ない。
- (e) 装置を工夫することによって乱されない粘土に對し、任意の鉛直応力を与えた条件下でリーチングを行ないうる

電解透析によるリーチングは、図-3に示すような装置(陽室, 中室, 陰室の三つのチャンバーが一体となったもので中央部に供試体を入れ、その両側に極性に応じた特別な隔膜を入れている)に直流電流(この実験では 200 Volt, 電位傾度約 $11\frac{1}{2}$ cm, 平均電流 0.8~10 mA)を課す。電流の適用によって両ゲキ中の電解質は電離し、イオンの性質に応じてそれぞれ陽室, 陰室へと移動する。一たん室に入ったイオンは、逆移動を生じないように隔膜がその役割をする。両ゲキ中の電解質のほかには粒子表面のイオンも移動する。

溶液中の塩の除去と吸着イオンの溶脱が起ると同時に水素イオンによる交換が行なわれていく。

塩の溶脱, 吸着カチオンの交換というプロセスは、自然界でのリーチングと異なるけれども、H-粘土化の過程という点では原理的に一致をみる。

V. 実験と結果の考察

試料として、カオリン+20%ベントナイト, 東京チユウ積粘土, 関東ローム(立川ローム)の三種類を選んだ。試料の初期条件として、74 μ フル仕通過した土を水中沈降させ、水中に分散した試料に RI-120 を入れ、在来のカチオンをある程度取り除いてから、漏斗で試料をとり出し、 $\frac{1}{2}N NaCl$ を注水して Na-粘土を作った。試料は 1.2 kg/cm^2 の

圧密荷重下で7日間フレロディブル, それを供試体とした。電解透析は 0.6 kg/cm^2 の水平圧密荷重を加えた状態で, D.C. 200 Volt を課電し, 指定時間(4, 8, 24, 48 および 96 hr)に達するまで行ない, 土性をしらべる各種の試験を行なった。

図-4 および 図-5 は, 指定時間の電解透析後, それぞれの供試体について測定した Na_2O および K_2O の減少量 (Flame photometer による) を, また含水量, LL, PI をそれぞれ示している。結果から次のことが考察される:

- (1) 実験誤差によるバラッキはあるが, 一般的に電解透析時間を関数として Na イオンの直線的(対数)な減少がみられる。
- (2) 土によって初期 Na 吸着量を異にするが, Na 低減率はほぼ同じである。

(3) 48 hr の透析後, チユウ積粘土で 66%, 関東ロームで 70% の Na の減少が認められる。

(4) Na 残留率を関数として, 含水量と両ゲキ比はどの土の場合も変化は少ない。一ほう LL, PL, SL など一連のコンラステンシは, リーチングに伴って低減する傾向がみられる。これらの結果は, リーチング粘土の特性をよく表わしているといえる。

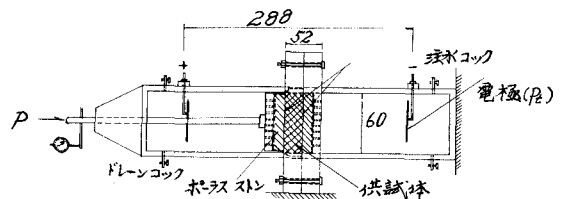


図-3 電解透析装置

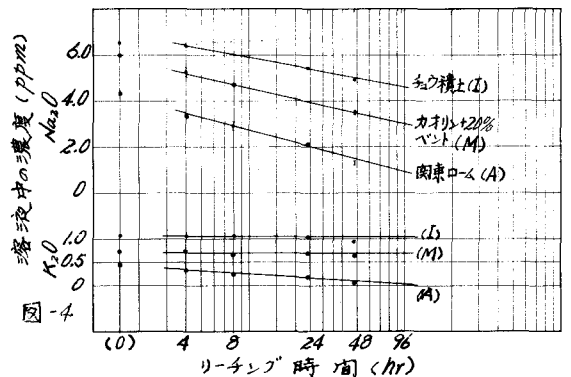


図-4

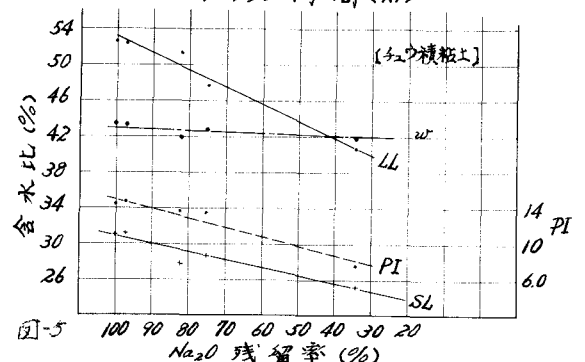


図-5