斜面安定に及ぼすイオン交換の影響*

松尾 新一郎** 富田 武 満***

The Effect of Ion Exchange on the Stability of Earth Slope

by

Shinichiro MATSUO and Takemitsu TOMITA

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

The earth slope, natural or artificial, very frequently loses its stability in the course of time, resulting in failure or slippage. In this case, every deterioration of the slope is induced by nothing other than natural alternation of the soil forming the slope.

The authors have paid close attention to the exchangeable ions contained in the soil and to the effect of groundwater on the soil at the site. Chemical analysis shows that the soil forming unstable slope is partly saturated with calcium ions or magnesium ions in natural state, and that the artificial soil which is supplied with divalent ions to saturation exceeds the original soil in natural state in shearing strength. We have thus reached a conclusion that the stability of the slope was upset through loss of divalent ions out of the slope soil by seepage water.

(Received June 22, 1970)

1 ま え が き

自然あるいは人為的に形成された斜面が、かなりの年月を経た後とか、何年かの周期で安定を失って崩壊もしくは滑動するにいたることがしばしばある。

この現象を引き起こすものは斜面を構成している土質の自然変化にはかならない。この変化には周期的な自然営力を主とする物理的、力学的なものと連続的に作用する化学的なものとがあり、両者相まって作用するものと考えられる。しかし、前述の場合、かなりの長年月、時、日、月ないし年的な周期で降雨、温度変化、地震、地下水位の変化などを経験したのであるから、崩壊の原因としてこのような物理的、力学的なものよりもむしろ連続的に緩慢に働く化学的なものの方がより大きく影響を及ぼすものと考えられる。

通常、地すべり地帯には地すべり粘土が生成されており、この粘土は長年月にわたる物理的な風化作用の結果である。このような粘土の場合、粒子表面積が増大しているので、種々の化学的な作用を受けやすい状態におかれている。その中でもとくに、粘性土の工学的性質に大きな影響を及ぼすイオン交換作用に着目し、各地の地すべりについて調査した。

地すべり調査地は次の4箇所である。

- (1) 京阪神急行電鉄今津線仁川駅付近の鹿塩で昭和

26年7月13日より20日間にわたり、起こったもので、当地は10数年間安定であった半ば人工的な斜面が、外的条件に特別の変化が認められないにもかかわらず滑動を生じたものである。

(2) 大阪府堺市の泉北ニュータウン建設予定地の小規模な自然斜面の地すべりであり、当地は大阪層群海成粘土層をすべり面としているのが特徴である。

(3) 昭和44年5月初旬大阪府柏原市田辺地区国分で面積約4haの地すべりが発生した。当地すべり発生の直接誘因は、2年前に完工した西名阪道路の半ば人為的な地すべり地帯下部の切土にあるが、工事完成後地すべり発生にいたる2年間を前述の立場から考察した。

(4) 奈良県と大阪府の境をなしている生駒山の半ば人工的な斜面において、昭和44年7月に起こったものである。当地は過去10年ごとに移動を繰り返しており、今回の移動は3度目にあたる。

上記地すべりをイオン交換による地すべり地粘土の弱体化に着目して考察していく。

2 地すべり粘土のX線解析結果

地すべり地には特有な地質の特徴がある。第1に、地すべりの原因になるような粘土の生成が容易に行なわれ、地すべり地特有の粘土鉱物が存在すること、第2に、このような粘土に容易に地下水を供給できるような地質条件をそなえていることである。したがって、地すべり調査の1つとして試料土のX線解析による粘

* 原稿受理 昭和45年6月22日

** 正会員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

土鉱物の同定があげられる。これは地盤の安定度合を判定する一手段ともなる。

地盤中の粘土鉱物の判定法としてX線解析を用いた。これは試料中から粒径 2μ 以下のものを採取し、有機物を H_2O_2 で処理して除去し、その後、アルコールサスペンション・オリエンテーション法で分析用試料を作成し、回析する。この方法で粘土鉱物を同定した結果がFig. 1~3である。

泉北地すべり粘土は、モンモリロナイト、イライト、カオリナイトがほぼ等量含まれている。とくに差異のあるのは、すべり面とすべり面以下でのモンモリロナイトの占める割合であろう。

Fig. 1. X-diffraction analysis (At Senboku).

Fig. 2. X-diffraction analysis (At Kokubu).

国分地域の粘土鉱物測定結果をFig. 2に示している。モンモリロナイトを多量に含んでいることが特徴的である。モンモリロナイトは粘土鉱物の中で最も表面活性が大なので、後述するイオン交換作用を受け入れやすい状態にある。

生駒地域地すべり地内の粘土鉱物の解析結果をFig. 3に示している。図中の数字は地表からの深さを示しており、それぞれの深さにおける含有粘土鉱物を判定することができる。粘土鉱物は地表からの深さに関係なく、カオリナイト、イライトが多い。これは現地がマサ土地帯なのでカオリン系粘土鉱物が生成されやすいことに起因する。深さ方向の粘土鉱物からみて、現地土層は3つに大別できる。すなわち、地表から3mまで、6.0~9.5m および、13.0~15.5m である。地表から3mまでは地表水の直接浸透、温度変化などの物理化学的作用の影響が大なために、モンモリロナ

Fig. 3. X-diffraction analysis (At Ikoma).

イトが生成されたものと考えられる。6.0~9.5m はカオリナイト、ハロイサイトなどのカオリン系粘土鉱物のピークが異常に大きくでている。これは、とくに9.0~9.5m において著しい。このことはマサ土地帯地すべりの特殊性を物語っている。すなわち、マサ土の2次風化鉱物として、カオリン系粘土鉱物が生成されることから、すべり面粘土がこの付近に形成されたと判断できる。13.0~15.5m はパイデライトのピークが出ているが、この付近の粘土は肉眼による観察でも比較的新鮮であり、地下水その他の作用をほとんど受けてないものと推察できる。

3 地すべり粘土のイオン交換特性

地すべり地帯には、粘土層を含んでいることが多い。粘土粒子は粒径が小さいゆえに、粒子界面において、地下水の作用により、イオン交換作用を受け入れやすい状態におかれている。したがって、斜面の緩慢な滑動の原因としてイオン交換の影響を無視することができない。

吸着カチオンの定量はボーリングで得られた気乾試料5gを正確に採り、蒸留水でよく洗ったビーカーに入れ、これに酢酸アンモニウム1規定溶液を約50cc加える。このままで約20時間放置し、蒸留水でよく洗った三角ろ斗を用いてろ過する。ろ液が約250ccになるまで、酢酸アンモニウムを加え、ろ液の量を正確に測定し、これを原子吸光分光装置でカチオン濃度を測定した。

塩基置換容量 (C.E.C) の測定は、同じ様に5gの気乾試料を取り、塩化カルシウム溶液で洗浄し、 Ca^{++}

Table I. Chemical properties of rainwater and groundwater (At Kashio).

Sample	Cl ⁻ m. e. q/l	SO ₄ ²⁻ m. e. q/l	SiO ₃ ²⁻ m. e. q/l	Acid degree m. e. l	Alkali- nity m. e. l	Free carbonic acid m. e. l
Rainwater	3.04	0.019	—	0.498	—	0.0398
Groundwater	1.14	0.044	40.54	2.77	0.247	2.4

を吸着させ、その量でもってかえた。

鹿塩地すべり地の雨水と地下水の化学的性質を調べると Table I のようであり、ここでとくに顕著なのは遊離炭酸イオンが地下水中に多く溶存していることである。この遊離炭酸イオンは土粒子に吸着しているカチオンを溶脱する。この過程を示すと次のようになる。

したがって、遊離炭酸を多く含んだ地下水が土粒子の間げきを流れると、土粒子に吸着しているカチオンが溶かし出される。このことは Table II の雨水と地下水の溶存イオンにおいて、Ca⁺⁺ のみ顕著な差が認められることから、雨水が土と接触し、流出してくる間に土の吸着 Ca⁺⁺ を置換浸出させた事は明らかである。

Table II. Dissolved cations in rainwater and groundwater and adsorbed cations of soils (At Kashio).

Sample	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Other ions	C. E. C
Rainwater m. e. q/l	0.16	0.07	0.07	0.01	0.021	—
Groundwater m. e. q/l	0.18	0.07	1.13	0.02	0.023	—
Sliding clay m. e. q/100g	0.65	0.82	14.42	4.03	1.296	21.0
Soils up sliding surface m. e. q/100g	0.10	1.12	8.37	0.13	2.868	12.5

土の分析結果では Ca⁺⁺ が非常に多く、しかも完全飽和の状態ではなく、約 14.42/21.01=3/4 程度の吸着量を示している点より見て、元来、Ca 飽和の状態にあった土が次第に地下水に洗われ、Ca が交換浸出されたものと考えられる。

泉北地すべり粘土の吸着カチオンを測定したのが Table III である。表中のその他とは、H⁺、Al⁺⁺⁺、Fe⁺⁺⁺、NH₄⁺、Mn⁺⁺ などの総和を示しているが、おもに、H⁺+Al⁺⁺⁺ と考えてよい。これらのカチオンが多量になることは、K⁺、Na⁺、Ca⁺⁺、Mg⁺⁺ がそれだけ置換溶脱された事を意味する。各試料土の吸着カチオンの量的変化は Ca⁺⁺、Mg⁺⁺ が大である。とくに、No. 6 試料においてはその他イオンの C. E. C に占める割合が50%近くになっていることから、この付近が地下水などの作用により最も激しくイオン交換を受けたものと考えられる。

Table IV では、C. E. C の値が非常に大きい。こ

Table III. Adsorbed cation quantity of clay (At Senboku) m. e. q/100 g.

Sample number	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Other ions	C. E. C
1	0.20	0.23	5.08	8.64	1.12	15.27
2	0.17	0.24	3.56	5.62	0.44	10.03
3	0.22	0.35	5.76	9.68	0.55	16.16
4	0.22	0.38	7.04	10.68	0.76	19.08
5	0.26	0.43	5.24	8.68	1.77	16.37
6	0.42	0.14	2.12	6.12	7.23	16.03

Table IV. Adsorbed cation quantity of clay (At Kokubu) m. e. q/100 g.

Sample	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Other ions	C. E. C
Sliding clay	0.848	2.545	8.028	6.174	14.523	32.118
Clay under sliding surface	0.502	3.050	9.768	12.931	8.754	34.905

れは Fig. 2 から明らかなように、粘土鉱物としてモンモリロナイトを多量に含有していることによる。とくに、この地域では、すべり面において Mg⁺⁺ が溶脱されており、(その他イオン)/(C. E. C) の比がすべり面粘土で45%、すべり面以下で25%と、明らかにすべり面粘土の方が大である。したがって、すべり面付近の粘土は水素あるいはアルミニウム粘土化がかなり進行している。

生駒地域の吸着カチオン測定結果を Table V に示す。当地域は他の地域に比較して交換性カチオン(K⁺、Na⁺、Ca⁺⁺、Mg⁺⁺)の量と C. E. C は総体的に小さい。これはX線解析結果より明らかなごとく、カオリン系粘土鉱物が多いことによる。

Table V. Adsorbed cation quantity of clay (At Ikoma).

Sampling depth (m)	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Other ions	C. E. C
2.5~3.0	0.115	0.206	1.120	0.698	7.681	9.820
6.0~6.5	0.213	1.255	2.685	1.770	1.316	7.239
9.0~9.5	0.409	1.069	1.840	2.345	5.205	10.868
13.0~13.7	0.470	0.554	8.237	9.308	0.671	19.240
15.0~15.5	0.279	0.690	6.188	8.158	0.549	15.864

その他イオンと C. E. C の量的割合に着目すると、試料 No. 1 では、2.5~3.0 m の深さで H⁺+Al⁺⁺⁺/C. E. C=0.78 と非常に大である。また、9.0~9.5 m 付近でも約50%を占めている。これは、本来 Ca⁺⁺、Mg⁺⁺ などの2価イオンを吸着していた土が、雨水あるいは、地下水の洗浄、溶脱作用により、交換浸出されたものと考えられる。

Fig. 4. Relative relationship of Ca^{++} , Mg^{++} , and other ions.

Fig. 4は Ca^{++} 量, Mg^{++} 量, その他イオン量の相対的な関係を示すために, 三角座標上に生駒地すべり地試料の測定値をプロットしたものである。それぞれのイオン量は C.E.C に対する比率を示している。

図中の黒丸の領域は地下水, 降雨, 温度変化などの影響をとくによく受けて, 水素あるいはアルミニウム粘土化の著しいものである。

三角形印の領域はある程度イオン交換が進んでいるが, 強度その他の工学的性質において弱体化が起っていない。しかし, 将来はこの層ですべり面が形成される恐れがある。

上半分が黒い丸は Ca^{++} が多く含まれ, 下半分が黒い丸は Mg^{++} が多く, それぞれ安定な地層を示している。この図から明らかなように, その他イオンの C.E.C に占める割合が30%以下の時, 比較的安定な地層を構成している。

現地を観察と, 上記の結果および含有粘土鉱物より, 当地すべりは表層部において, 流動化すべり, 下層土においては, 約 9.0~9.5 m 付近にすべり面を持つすべりの2つが複合したものと推定できる。

10年周期の地すべり移動は, このイオン交換作用による粘土の弱体化と斜面の安定性との関連でとらえるべきである。すなわち, 2価イオンの溶脱に伴う粘土の弱体化と斜面の安全率の低下速度との関連で, 10年周期の移動が起こったものと考えられる。

4 イオン交換による地すべり粘土の強度変化

前項において述べたように, 地すべり地の粘土は地下水中の遊離炭酸イオンその他により, イオン交換を不断に受けている。その結果は, 2価のカチオンが置換浸出され, H-粘土あるいは, Al-粘土と変質する。これが強度その他の物理的性質に大きな影響を与えるものと考え, 自然土とカチオン吸着粘土との間でせん断試験を実施し, 比較を試みた。

鹿塩地区の自然土と Ca^{++} 飽和粘土の強度測定結果を示したのが Fig. 5 と Fig. 6 である。土のせん断強度

Fig. 5. Relationship between cohesive strength and water contents.

Fig. 6. Relationship between frictional angle and water contents.

は含水比によって変化するので, 自然含水比に近い値でせん断試験を行ない比較をした。これよりみて, 自然含水量において摩擦角は Ca-土で 0.45° , 自然土で 0.06° , 粘着力は Ca-土で 0.163 kg/cm^2 , 自然土で 0.088 kg/cm^2 である。この値を用いて, 斜面の安定計算を行なった結果では Ca-土で安全率 1.3 に対し, 自然土では 0.6 となった。

同様に, Fig. 7 と Fig. 8 は泉北地すべり粘土を用いて, 自然土, Na-粘土, Ca-粘土, Mg-粘土との強度の比較を試みたものである。この図より明らかな

Fig. 7. The effect of adsorbed cations (At Senboku).

Fig. 8. Effect of adsorbed cations (At Senboku).

とく、未処理の粘土に比べて塩基置換した粘土の強度は低含水比の場合、かなりの差が出ている。一方、高含水比の場合については、それ程顕著な差は認められないが、自然含水比（62%）で約2倍の強度差が出ており、地すべりの原因としての塩基置換の影響は大である。とくに、2価のカチオンを吸着した粘土の強度が大であることは Table III の結果とあわせ考えれば明らかである。

Fig. 9 は生駒地域のボーリング孔を利用した標準貫入試験によるN値と試料の Ca^{++} 量が C.E.C に占める割合との関係を求めたものであるが、深さ方向の強度変化と Ca^{++} 濃度とが良好な相関を示している。この事は強度増大には Ca^{++} の強制吸着が効果的な事を示している。

以上のことよりみて、当初2価のカチオンで飽和されていて、力学的に安定であった土が、地下水により

 Fig. 9. Relationship between Ca^{++} quantity and N-values (At Ikoma).

洗われて、その交換性カチオンが置換浸出され、次第にその安定性を減じ、ついには外部条件がこの安定性を上回る状態になって地すべりを起こしたものと考えられる。

5 地すべりにおけるイオン交換作用のメカニズム

地すべり地に存在する粘土は地下水の流動、あるいは地下水のしゃ断による間げき水圧の上昇によって、絶えず洗われた状態におかれている。したがって、土粒子間げきに含まれていた塩類は次第に洗い流され、土粒子界面に吸着あるいは拡散しているものカチオンとの間で電気的なポテンシャルの不均衡が生じ、土粒子に吸着していたカチオンも次第に溶脱されていく。その結果、土粒子表面のカチオン不飽和を招き、地下水中の水素イオンを吸着し、H-粘土化が進行することになる。

他の作用としては、地下水中の遊離炭酸イオン（鹿塩地区の地下水の分析結果参照）が次のような役割りを演ずる。

生成された重炭酸カルシウムは水溶性であり、地下水により、遊離、運搬される。

この前記2つの作用により置換溶脱を受けた粘土は水素粘土化し、第4項に述べたように、力学的な弱体化が起こる。カチオンの種類による強度の変化は粘土鉱物によって若干異なるが、われわれの調べた範囲では Mg^{++} 、 Ca^{++} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、自然土（すべり面粘土）の順に強度が小さくなる。

これらのイオン交換速度は、地下水中に含まれているカチオン濃度と遊離炭酸イオン濃度および、土の透水性によって規定される。

6 イオン交換による斜面安定工法

地すべりの要因として、イオン交換作用が大きなウェイトを占めている場合には、現在以上に吸着カチオンを置換浸出させない事が重要である。したがって、置換浸出作用を行なう地下水の排除工が最も有利かつ経済的な対策といえる。しかし、これだけでは現在以上に土の強度を高めることができないので、置換浸出されたカチオンを補なえばよい。

とくに、現在までに明らかのように、2価イオンを含んだ塩類で強制的に塩基置換を行なわせるのも一方法と考えられる。具体的にはボーリング孔に塩化カルシウムや塩化マグネシウムを投入し、自然状態で塩基置換を行なわせるかあるいは、注入による強制的な施工のいずれかになる。さらに確実なものとして、生石灰パイルによるイオン交換とクイ効果の両方持たせる工法も得策である。

7 あとがき

上述してきたごとく、各地の複雑な地すべり現象を

単純にイオン交換に基づく土のせん断抵抗の劣弱化のみに帰することには問題があるが、少なくともその一大要因と考えてよいと思われる。とくに、地すべりの反復性とか交互性の解明には大きなウエイトを占めるだろう。

このような関係を利用して、将来地すべりの予想される場所において、その土の交換性イオンを調査することにより、また交換性イオンを2価のものに変化させることによって、地すべりの安定化が可能である。

参 考 文 献

- 1) Matsuo, S., and T. Mise, "A Study on the Analysis of Land Slide in the Kashio District" (1956) The Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University.
- 2) Matsuo, S., "Effect of Ion Exchange in Stability of Earth Slope" Proc. Conf. the 4th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 330 (1957).
- 3) 松尾新一郎, 富田武満, 「地すべり粘土の構造的変質について」土木学会第24回年次学術講演会講演概要集, III—54, p. 157 (1969).
- 4) 松尾新一郎, 富田武満, 「地すべり粘土の物理化学的性質とその対策について」第5回土質工学研究発表会講演概要集IV—11, p. 413 (1970).