

論文内容要旨

I 緒論

本研究は、今日さまざまな重大な土木工学的問題のみられる軟岩について、近年土壌学分野で確立された鉱物化学的手法を応用し、軟岩の力学的事象と比較検討を行い、力学的事象の推定・判断材料となる鉱物化学的指標を検討したものである。ついで、これらの軟岩の鉱物化学的性質から、地すべりへの対策への応用、事前調査項目の提案等の検討を進めたものである。

土木工学的に多く軟岩と分類される第三紀泥岩、凝灰岩、更新世粘土等の堆積岩は、我国ではグリーンタフ地域に主に分布している。グリーンタフ地域は、東北・襄日本から西南日本にかけ日本列島の1/3以上を占めている。これらの軟岩は従来地耐力の不足により大型建造物の基礎として採用されず、また材料的にも軟らかいため、あまり利用されていない。しかし、近年、社会基盤の整備が進むにつれ、大型土木工事が軟岩の分布地域で施工されるようになり、軟岩の物性の把握が建造物の品質、施工の安全性、経済性に重要な位置を占めるようになった。

堆積岩は、堆積時の土粒子の特性を保持したまま圧密固結した堆積物である。また、初期の堆積環境に強く影響を受け、また、褶曲作用や侵蝕作用等の圧密・除荷のくり返し作用を受けている。したがって、軟岩の物性は堆積環境やその後の地質作用の大きさ等、個々の地域性によって異なっていることが特徴的である。この為、建造物の設計・施工にあたっては、土質・岩盤工学の力学的事象・数値を推定・判断材料となる適当な指標と決めることが必要となる。特に、グリーンタフ地域の含モンモリロナイト堆積岩帯では、施工時、トンネルの膨圧、地すべり、斜面崩壊等の力学的現象がみられ、施工上、大きな障害となる事が多い。

以上のように、我が国軟岩には、今日多くの重大な問題があり、それらの対応策が強く求められて来た。筆者は、これらの問題に対して、近年進歩の著るしい土壌、鉱物学手法を主体にアプローチを行ったものである。本論文は、その研究成果をとりまとめたものである。

II トンネルの膨圧現象を起す泥岩の鉱物化学的研究

モンモリロナイトを含む泥岩帯をトンネル掘削した場合、地山の膨圧現象が各地で見られた。このような膨張性地山は、モンモリロナイトや石油、メタンガスを含有していることを特徴としていることが新潟県をはじめ各地でみられた。そこで、本研究はこのような岩を対照にして事前にどの程度膨張してくるか、判断する指標を泥岩の鉱物化学的性質から検討した。表-1に試料・施工状況を示す。

本研究は、このような膨圧現象が、以下で述べるように泥岩に含められるモンモリロナイト鉱物の存在によること、そして、膨張性泥岩の判定指標として、モンモリロナイト鉱物のもつ大きな一定負荷電、すなわち、CECの値が有効な判定指標となることを明らかにした。

- 1) 強大な膨圧現象がみられた地層は椎谷層であり、灰爪層は中程度、魚沼層はほとんど認められなかった。

椎谷層部分は土被りが薄く、褶曲作用の背斜軸のうねりの部分、及び翼部にあたり、石油、メタンガスが湧出した。表-2に鉱物組成、 2μ 以下の粘土含有量、CECを示す。表-3に交換性陽イオン分布を、図-1にCECと液性・塑性限界の関係を、図-2に他のトンネルの応用例を示す。

- 2) 発生土圧の大きかった椎谷層の泥岩は、粘土鉱物組成がモンモリロナイトを主体にし、CECが高く、 2μ 以下の粘土含有量が高い。椎谷層泥岩は、モンモリロナイトのような微粒子が初期にゆっくりと海底深部に堆積生成したものであり、その結果、 Na^+ / CEC 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$ や硫化物含有量が高い。この為、液性限界、塑性指数の高い物理的性質を有している。

- 3) 発生土圧の中程度であった灰爪層の泥岩は、多種の粘土鉱物組成を示し、特に火山ガラスを母材にした第三紀層海成堆積物の続成作用によって生成するクリノプロライトが含まれていた。このことは、灰爪層は活発な火山活動に伴って、火山ガラス等の火山碎物が一時的に多量に堆積生成し、それが海水環境下でその後絶成作用を受けたものとみられる。このため、CECが椎谷層の泥岩より低く、 2μ 以

下の粘土含有量の少ない。物理的性質は以上の性質から、液性限界、塑性指数も椎谷層の泥岩よりも小さい。しかし、塑性限界、自然含水比には両者の差は認められなかった。

4) 発生土圧の小さい魚沼層の泥岩はカオリナイトを主体にしており、 Mg^{2+}/Ca^{2+} 比も低く、かなり陸化した状態で堆積したもので、CECが低く、 2μ 以下の粘土含有量が少ない。物理的性質は、灰爪層のものに近かった。

5) 以上から、膨張性の有無の判定は、CECが有効な指標となり、他のトンネルや、本研究以降に他の研究者にも応用された。その結果、膨張性泥岩は、CECが高く、液性限界、塑性指数の高い粒子で構成されていることを特徴としている。これは、膨張性、泥岩が、モンモリロナイトや、硫化物および石油・メタンガス等の有機物が堆積されやすい、海底深部の還元環境に生成した海成堆積物であることから起因している。

なお、CECは、本研究成果から、膨張性泥岩の判定指標として、土木学会、山岳トンネル調査標準仕様書（土木学会編 1977）の中に採用された。

Ⅲ 第三紀地すべり層の鉱物化学的性質とその対策

地すべり現象は、第三紀泥岩のもつ重大な土木工学的問題の1つである。本研究はこのような地すべり層に対してC. Veder が提案した導電体挿入工法を適用しその効果を本邦の地すべり層の鉱物化学特性から調査判定しようとしたものである。その結果、導電体挿入工法は、地すべり層中の還元物質を酸化し、交換性 Na^+ イオンを減少させ、自然含水比を低下させる効果が認められた。さらに地すべり層の鉱物化学特性は膨張性トンネルの泥岩と同様に泥岩の初期の堆積環境に密接な関係があることから、第三紀地すべりに酸化還元反応、イオン交換反応が関与し、これらの反応量の多い深海成泥岩が地すべり、膨張性に関与していることを考察した。本研究から、導電体挿入工法は、特許番号 1145184 「軟弱地盤の改良方法」として特許となった。以下に具体的研究成果を述べることにする。

1) C. Veder は、ヨーロッパの多くの地すべりを調査するうち、地すべり層は上層の酸化層と下層の還元層の電気化学的二層分化がみられ、その層境界に水が集中し、地すべりの要因となっている仮説をたてた。またこれらの二層に導電体を挿入すれば、水分の移動がなくなり、地すべりを抑止することが出来るとし、導電体挿入工法を、「地すべりの電気化学的な安定化工法」として提案した。

2) 本工法を本邦の代表的地すべりである第三紀地すべりに適用した。試験地は新潟県新井市の猿供養寺地すべりで、基盤岩は、椎谷層より古い第三紀中新世寺泊層である。粘土鉱物はモンモリロナイトを主体にしている。

導電体は、 $\phi 25\text{mm}$ の丸鋼を4m間隔に、根入れを基盤の寺泊層泥岩に2m挿入した。

3) 導電体挿入1年経過後、挿入区、挿入区域外の詳細調査を行い、事前調査と挿入2週間後の調査結果と比較を行った。図-3にpHの変化、図-4に自然含水比の変化、図-5に鉄化合形態の変化、図-6に交換性 Na^+ イオンの変化を示す。

導電体挿入1年経過後、地すべり層の移動土塊下部に鉱物化学的性質に変化が認められ、pH、Ehの上昇、第1鉄イオン、交換性 Na^+ イオンの減少が顕著にみら

れ、自然含水比が挿入前より約5%程度低下した。

- 4) この現象は、導電体挿入によって、移動土塊下部の酸化還元状態が変化し、移動土塊下部の還元物質が、地表部の酸化還元電位と等しくなるように、酸化されたことに起因していると考えられた。

自然含水比の低下は、交換性 Na^+ イオンの減少により、地すべり層の粘土が1価の陽イオンで飽和されていたものが Ca^{2+} 等の2価の陽イオンに飽和されるようになり、粘土の保水能が低下し、圧密された結果と考えられた。

- 5) 本工法を兵庫県神戸層群の地すべりである大沢地すべりにも適用した。導電体挿入後、移動土塊のpHが上昇し、猿供養寺地すべりと同様な挙動が認められた。施工後8年経過したが、現在地すべりが再発した報告は受けていない。

以上から、導電体挿入工法は、地すべり層の還元物質を酸化し、鉱物化学的变化を引き起し、それによって自然含水比を低下させる効果があることが判明した。また、地すべりの素因に、陽イオン交換反応、酸化還元反応が関与していることが考察された。この為、地すべり面、硫化物のX線マイクロアナライザー分析、地すべり地の湧水の水質分析を行い、これらの反応の可能性を検討した。

したがって、地すべり性泥岩かどうかの判定は泥岩中のイオン交換容量や還元物質量を測定することで予測可能である。これらの項目は、CEC、交換性陽イオン硫化物、鉄量等があげられる。

IV 掘削によって、斜面崩壊を起す更新世粘土の鉱物化学的性質と崩壊予測指標についてさらに鉱物化学的調査手法を、大規模に掘削されたモンモリロナイトを含む更新世粘土の長大斜面の崩壊例で適用した。ここでは次のような点を鉱物化学調査で明らかにした。

- (1) 斜面崩壊が掘削後更新世粘土に含まれる硫化物の酸性化によるかどうかの確認、酸性層の存在の確認
- (2) 掘削斜面間の地層区分、地質記載調査の数値化
- (3) 掘削が更新世粘土に与える影響
- (4) 斜面崩壊を起す粘土の指標項目の抽出
- (5) 第三紀泥岩との比較

以上の結果から、モンモリロナイトの Na^+ イオン溶脱と、 K^+ イオンの撰択吸着が掘削の影響を示す指標となり、 K^+/Na^+ 比は、掘削によって変化し、これによって、粘土の膨張能力に影響を与えることが判明した。さらに、鉱物化学的指標から、複雑な更新世粘土の地層区分が可能となり、堆積地史が明らかとなった。以下に研究概要を述べることにする。

- 1) 各斜面のボーリング時に行ったpH、Ehの測定から、崩壊斜面やその他の斜面において、著しい酸化現象はみられず、酸性化は認められなかった。
- 2) 鉱物化学調査から、各斜面に分布する更新世粘土間の堆積地史を明らかにした。指標として、モンモリロナイト量を示すCEC、海成か淡水成かを示す全硫化物含有量(TS)、堆積当時活発な生物活動を有していたかを示す全有機態炭素(T-OrgC)をとりあげた。

その結果、更新世初期から後期に褶曲作用によって、初期に山側であったものが、後期に谷側となる地形変化が行なわれたことが判明した。崩落の原因となった更新世粘土層は、その上部に発達している更新世風積砂層との境界部に存在し、崩落斜面が谷側であったため、厚く堆積していた。海成堆積物でCECの高い、TS、T-OrgC量の多い粘土層であった。

この堆積地史の指標は、一般の地質記載に比べて、更新世以降の地殻作用まで推

定出来、広域な地質調査時の層相の分類に有効であることが判明した。

3) 掘削後の更新世粘土の化学的特徴は、交換性 Na^+ が溶脱される環境におかれ、 K^+ イオンが選択吸着により保存される傾向が認められた。図-7に崩壊の起きた斜面試料の結果を示す。この傾向は更新世粘土層の全体の厚さに左右され、上部層は $\text{K}^+ \approx \text{Na}^+$ で K^+ / Na^+ が低く、中間層は $\text{K}^+ > \text{Na}^+$ で $\text{K}^+ / \text{Na}^+ = 2 \sim 3$ 、下層では $\text{K}^+ \leq \text{Na}^+$ で K^+ / Na^+ が1前後となる。

4) 掘削後の更新世粘土の化学的性質と物理的性質との関係はCECと 2μ 以下の粘土粒子の含有量、及び塑性指数(Ip)とよい相関が認められた。図-8にCECとIpとの関係を示す。また、塑性指数(Ip)はCECが低い砂質粘土層であってもT-OrgC量が多ければ高い値となっていた。

現地盤の物理、力学的性質と関連のある自然含水比(Wn)と K^+ / Na^+ 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ を評価すると、Wnが塑性限界(Wp)に近いもの程(コンシステンシー指数(Ic)が大きい程)、 K^+ / Na^+ 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ が小さい傾向にあった。これを、液性限界(W_L)、Wn、Wpとの関係で評価すると、 $W_L - Wn / Wp$ と K^+ / Na^+ 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ とは負の関係があった。(図-10、図-11) $W_L - Wn$ は更新世粘土の自然含水比が液状となる W_L までの水の吸水能力を示し、Wpは塑性を呈する限界の含水比である。したがって $W_L - Wn / Wp$ は更新世粘土のもつ、吸水能力値/吸水限界値=膨張能力(係数)を示し、 K^+ / Na^+ 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ は土の膨張能力を示す指標となることが判明した。すなわち K^+ / Na^+ 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ の小さい粘土程、膨張能力が大きくなる。

5) K^+ / Na^+ 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ を決める要因は、モンモリロナイトの K^+ イオンの選択吸着性、 Na^+ イオンの溶脱が関与し、これは現地形から更新世粘土層を掘削した結果である。

- 6) 同地域における別件掘削工事において、完新世風積砂層撤去前の事前調査に、本調査手法を適用した。

K^+ / Na^+ は断裂の多い層や破碎帯とみなされた層で、その前後の試料より高くなっている傾向が認められた。これらの層はいずれも海成層であった。 K^+ / Na^+ は過去に更新世粘土がこもった、地質作用も推定する指標となることがわかった。 K^+ / Na^+ と $W_L - W_n / W_p$ の関係について図-12に示す。図-10と同様な傾向にあるが、全体に K^+ / Na^+ 、 $W_L - W_n / W_p$ は図-10の試料より小さかった。斜面掘削は、これらの指標に変化を与えることが図-12からも判明した。

- 7) Iの膨張性泥岩と更新世粘土を比較した結果、膨張性の著るしい椎谷層の泥岩は、CEC、 $W_L - W_n / W_p$ が高かった。 K^+ / Na^+ 、 $K^+ + Na^+ / Ca^{2+} + Mg^{2+}$ はトンネル掘削であるため、膨張性泥岩では指標とならなかった。

以上から鉱物化学的指標である交換性陽イオン構成比は、トンネル等の地下深いところの掘削よりも、地表部の掘削による斜面崩壊や地すべりの予測に有効な指標と考えられた。

V 土木工学的に問題となる軟岩の鉱物化学的指標

以上の研究から、軟岩の掘削後の挙動を予測する鉱物化学的指標は次のようになる。

- 1) 膨張性泥岩・地すべり泥岩・斜面崩壊粘土はいづれも初期に海の深部に堆積した海成堆積物特徴を有している。

このため、CEC、TS、T-OrgC量が高い高塑性堆積物が土木工学的には問題となる。CECはイオン交換反応量を、TS、T-OrgC量は還元性物質質量を示す。

- 2) 土木工学的に問題となる軟岩の検索には、上記3項目、すなわちCEC、TS、T-OrgCの測定が有効である。これらの値から、軟岩の堆積地史も推定可能である。

- 3) 地すべりは、還元物質量の酸化・還元反応が関与している。土木工事による大規模掘削は、酸化還元反応よりは、イオン交換反応が強く関係している。すなわち、掘削は軟岩の交換性陽イオンの溶脱に働く。

- 4) 軟岩の溶脱状態や過去の堆積後の地質作用等を推定するには、交換性陽イオンの測定を行い、 K^+ / Na^+ 、 $K^+ + Na^+ / Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 等の構成比を取り、その分布を検討することが有効である。斜面形成後、 K^+ / Na^+ が変化し、塑性域の自然含水比の位置も変化する。その挙動を追跡することも、掘削の斜面崩壊層の推定に有効である。

- 5) 土木工事は、軟岩のイオン交換反応、酸化還元反応に係わり軟岩の化学的環境を変える。大型機械導入による急速施工程、その変化量は大きい。変化量の大きい軟岩はCECの高いモンモリロナイトを主要粘土鉱物としている海成堆積物であった。すなわち、モンモリロナイトが含まれる条件の高い、海底深部の堆積物を検索することが、土木工事を安全に施工する上で重要となる。CECは多くの軟岩の物理・化学的物性を推定することが出来、かつ、分析試料の状態にあまり左右されない測定項目である。今後、CECは膨張性トンネルのみならず、あらゆる土木工事の事前調査に適用されることが望まれる。

表-1 試料及び施工状況

No.	採取位置	時代及び地層	岩質	断面	膨圧状況
1	5k 200	中新世椎谷層	黒色泥岩	1号型馬蹄型	変形大*
2	5k 240	"	"	"	"
3	6k 100	鮮新世灰爪層	緑灰色泥岩	円型	変形中
4	6k 363	"	"	"	"
5	6k 657	"	"	"	"
6	6k 761	"	"	"	"
7	7k 104	"	青灰色砂質泥岩	"	"
8	7k 183.6	"	"	"	"
9	7k 509	"	"	"	"
10	7k 756	"	"	"	"
11	9k 831	鮮新世魚沼層	緑灰色泥岩	1号型馬蹄型	変形小

* 変形 支保工バックリング、ストラットの変形が大きい。
吹き付けコンクリートの剥離から判断

表-2 各試料の相対的粘土鉱物含有量及びCEC, 2μ>粘土含有量

No.	採取位置	モンモリロナイト	クロライト	イライト	ゼオライト	カオリナイト	CEC (meq/100 g)	粘土含有量 (%)	その他の鉱物
1	5K 200	●		●		●	38.7	42.5	α-石英, 斜長石 α-クリストバライト
2	5K 240	●		●		●	43.0	40.4	同上
3	6K 100	●	●	●	●	●	26.4	19.5	同上及びマグネサイト
4	6K 363	●	●	●	●	●	24.7	15.7	"
5	6K 657	●	●	●	●	●	25.1	16.8	"
6	6K 761	●	●	●	●	●	25.1	12.1	"
7	7K 104	●	●	●		●	29.2	26.0	"
8	7K 183.6	●	●	●		●	24.6	17.0	"
9	7K 509	●	●	●	●	●	23.2	32.5	"
10	7K 756	●	●	●		●	25.1	22.0	"
11	9K 831	●	●	●		●	21.2	15.0	α-石英, 斜長石 α-クリストバライト

● ———— ● 多 ← 少

表-3 交換性陽イオンの分布

地点	地層	交換性陽イオン分布		$\frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+}}$	$\frac{K^+}{Na^+}$	$\frac{Na^++K^+}{Ca^{2+}+Mg^{2+}}$	$\frac{Na^+}{CEC}$	塩基飽和度 %
		10 meq/100g	10 meq/100g					
1	椎谷層			1.61	0.13	0.72	0.34	95
2	"			1.23	0.30	0.73	0.28	85
3	灰爪層			0.45	0.13	0.72	0.49	133
4	"			0.59	0.14	0.83	0.48	119
5	"			0.46	0.19	0.89	0.47	119
6	"			0.44	0.20	0.77	0.39	109
7	"			0.40	0.17	0.80	0.31	82
8	"			0.27	0.17	0.45	0.36	136
11	魚泥層			0.20	0.12	0.20	0.15	100

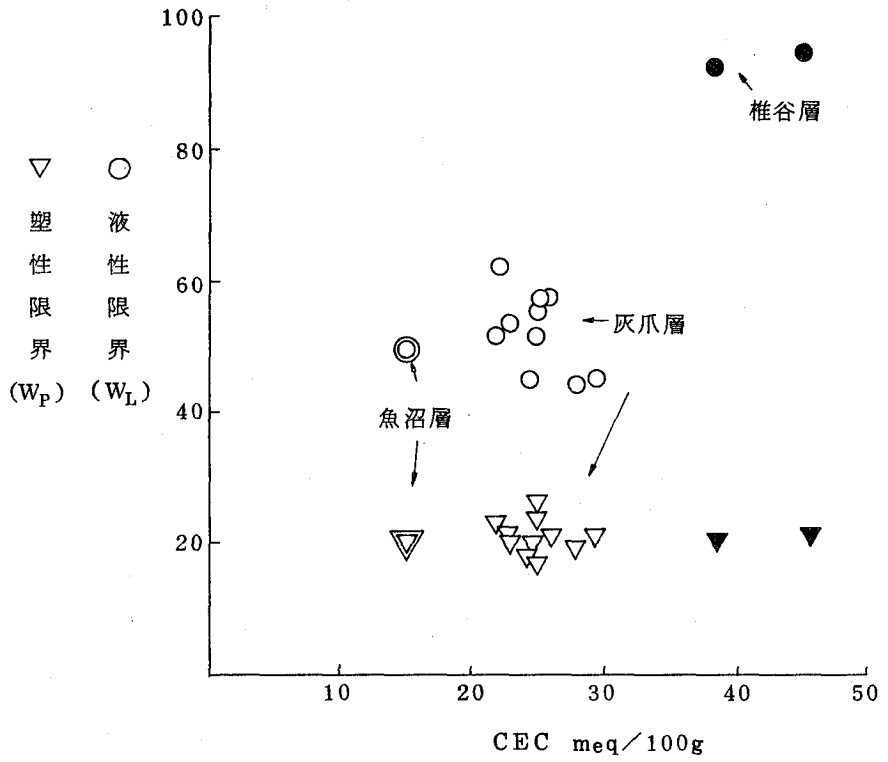


図-1 CECと液性・塑性限界

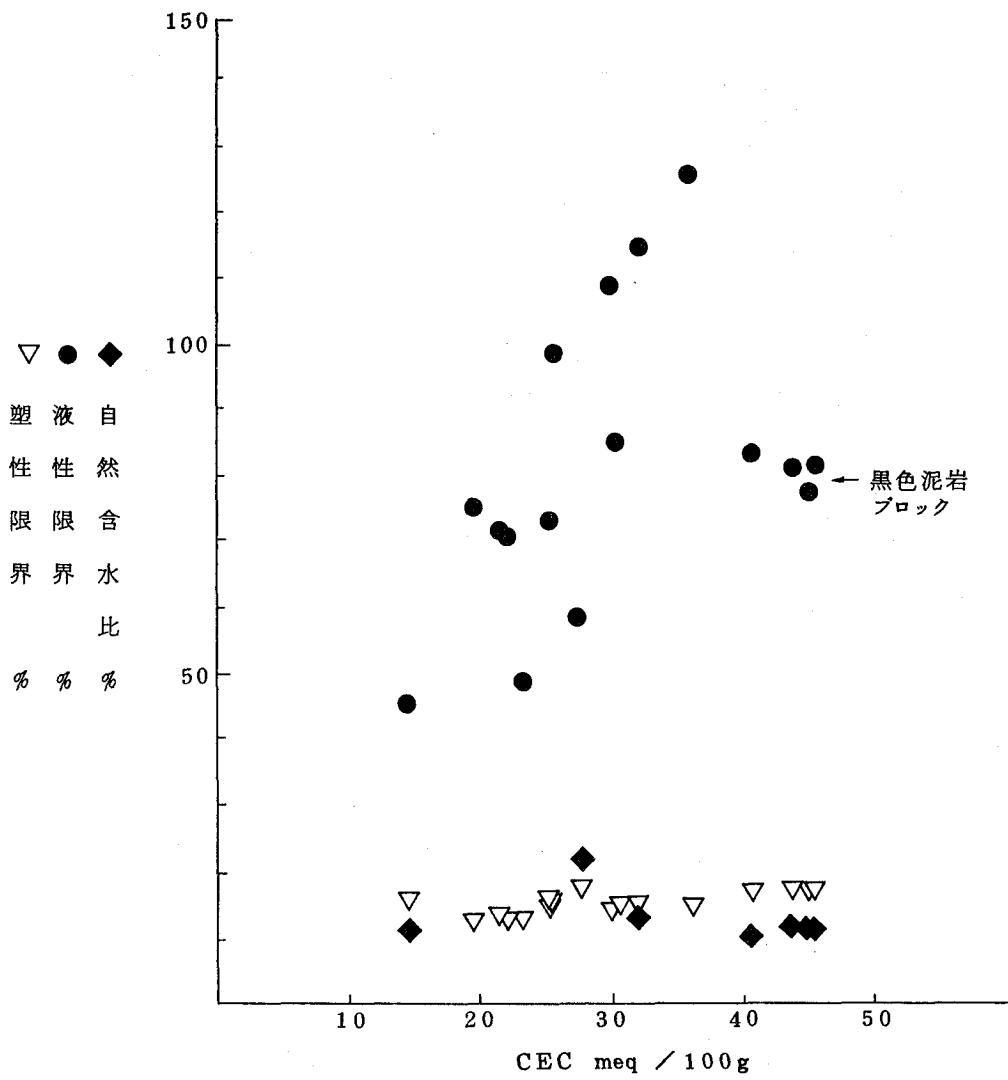


図-2 塩領トンネルの場合のCECと液塑性限界及び自然含水比

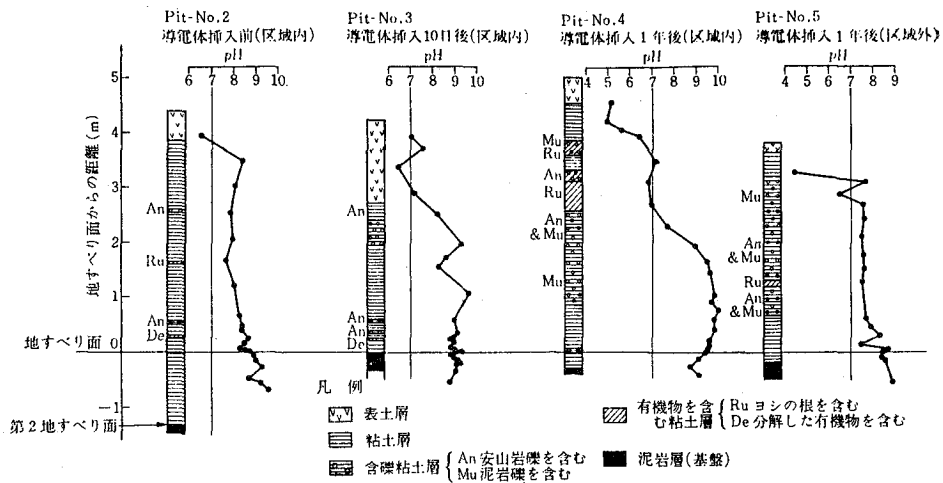


図-3 pHの測定結果

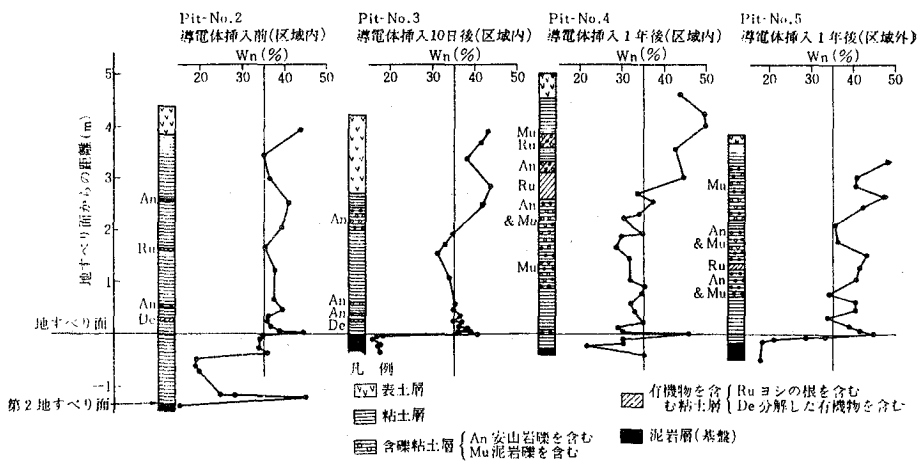


図-4 自然含水比 (Wn)の測定結果

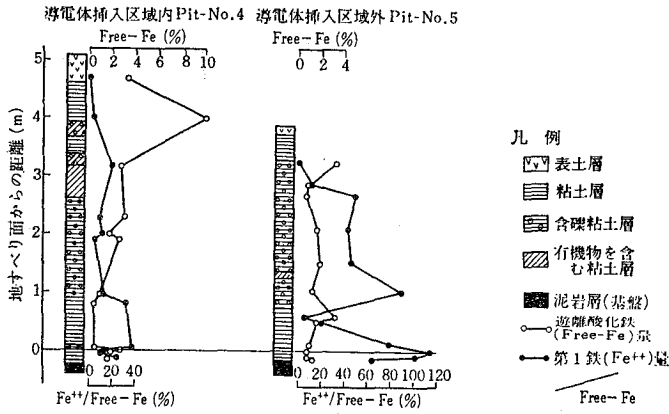


図-5 遊離酸化鉄 (Free-Fe) の柱状分布と第1鉄 (Fe⁺⁺) イオンの割合

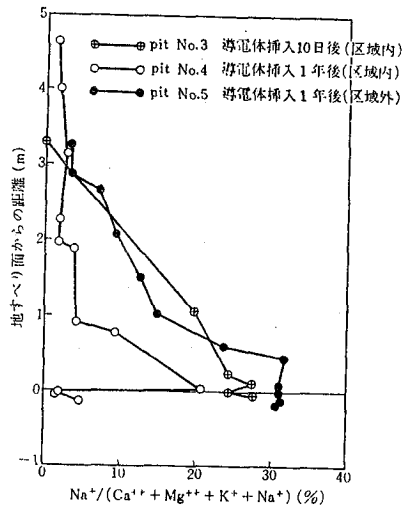


図-6 $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)$ の変化

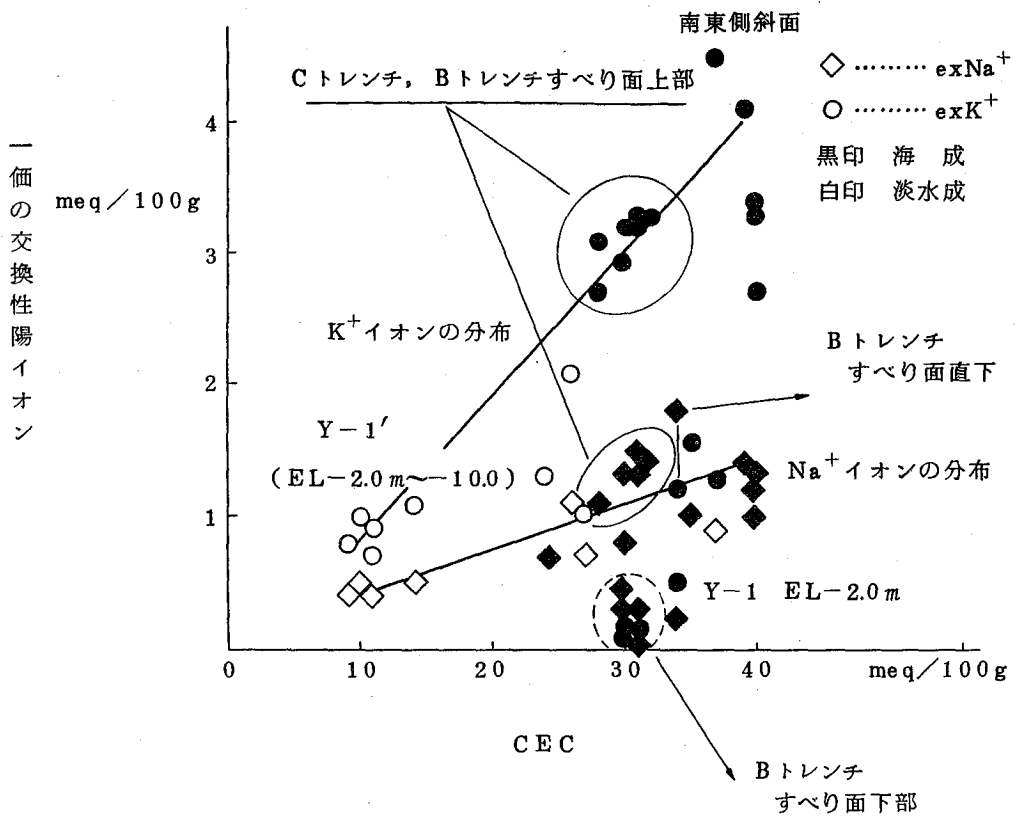


図-7 崩壊を起した斜面試料のCECとexNa⁺, exK⁺

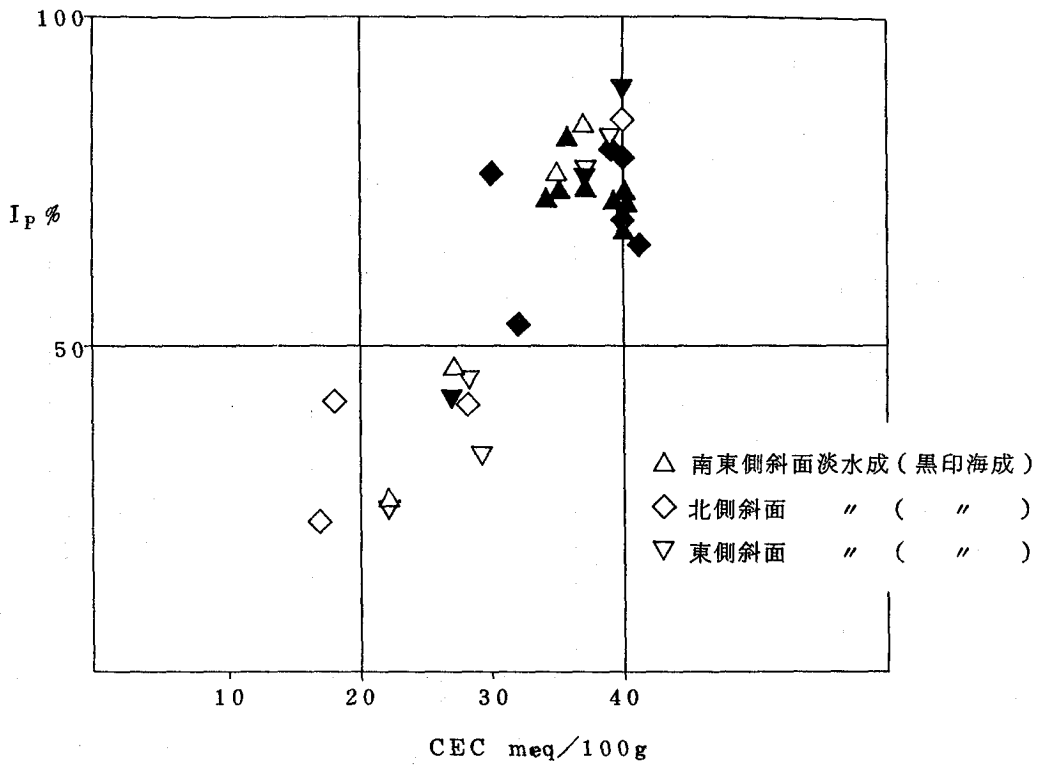


図-8 CECとIpとの関係

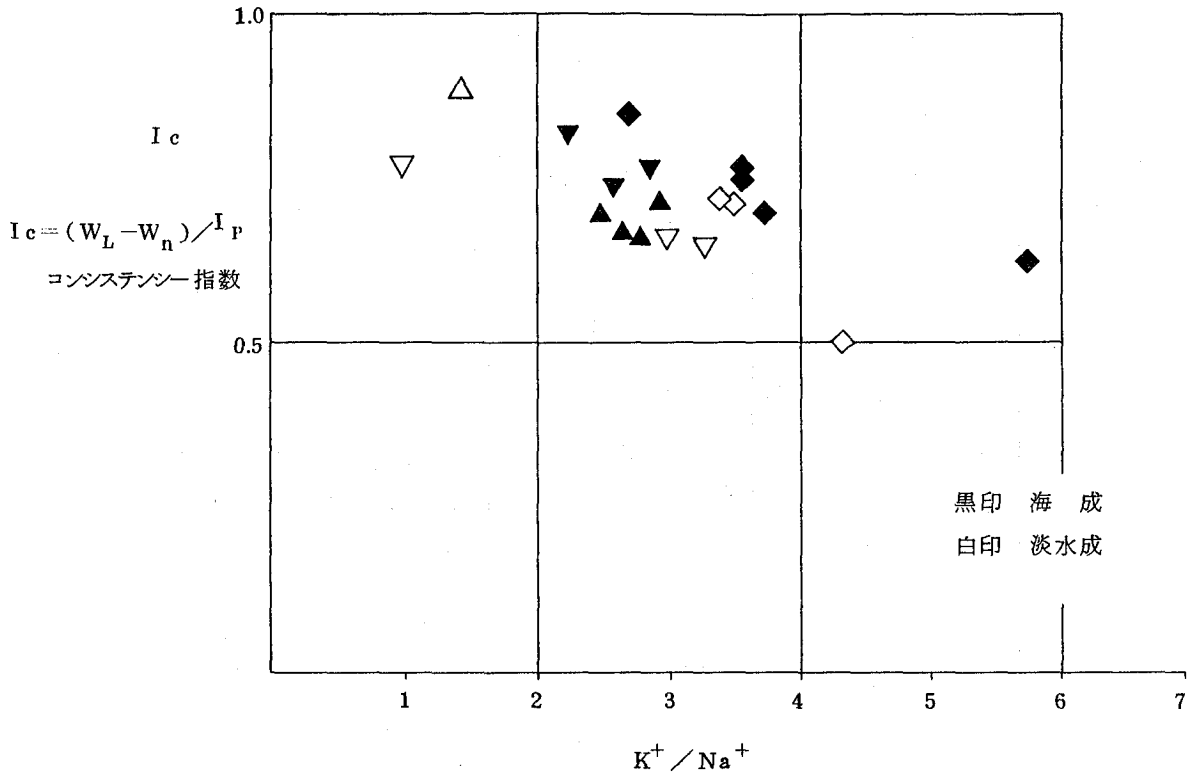
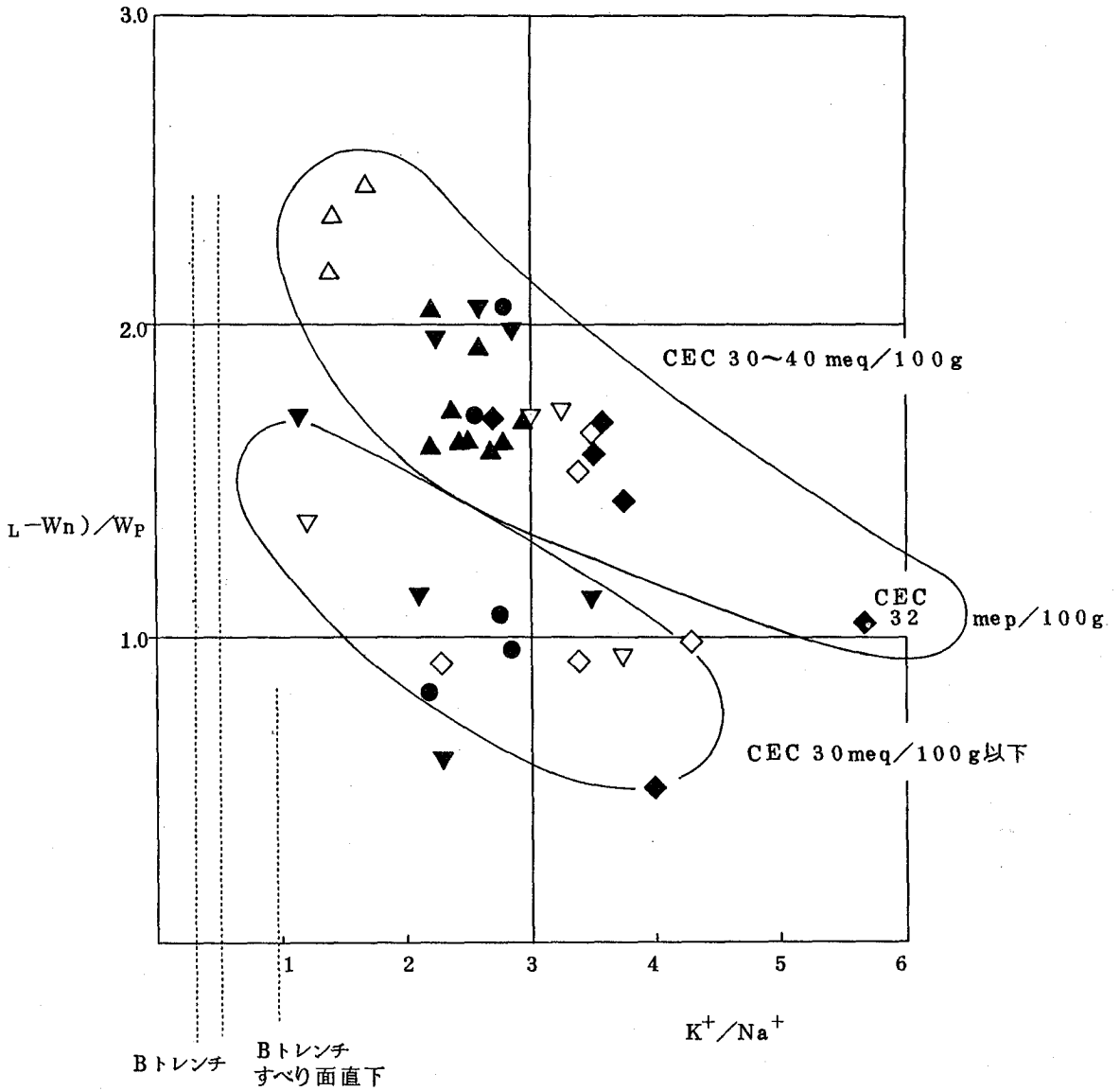


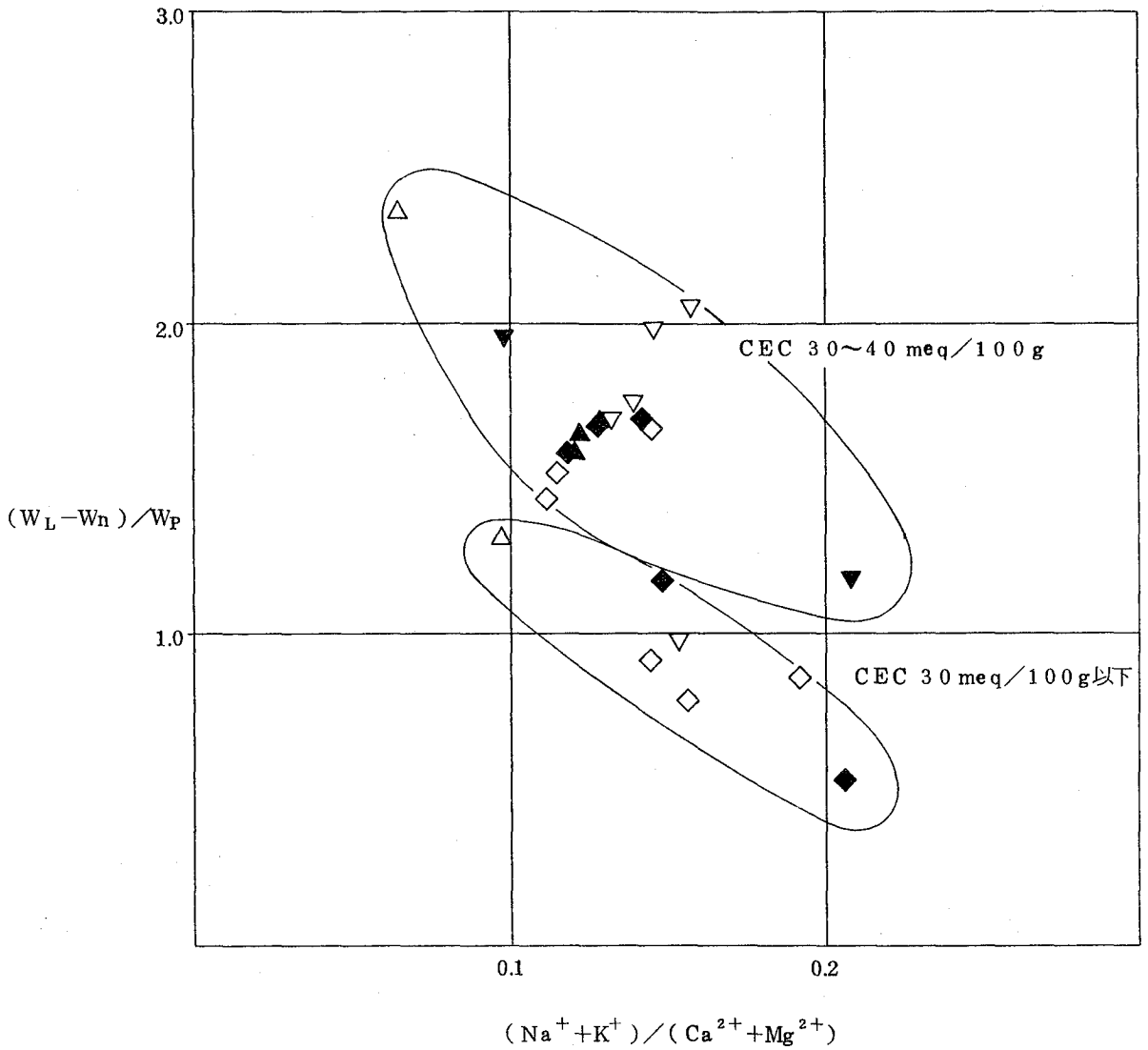
図-9 K^+ / Na^+ と I_c

- 南側斜面
- △ 南東側 " 黒印 海 成
- ◇ 北 側 " 白印 淡水成
- ▽ 東 側 "



南側，縞状地すべり面下部粘土

図-10 K^+/Na^+ と $(W_L - W_n)/W_p$



☒-11 $(Na^+ + K^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+})$ と $(W_L - W_n) / W_P$

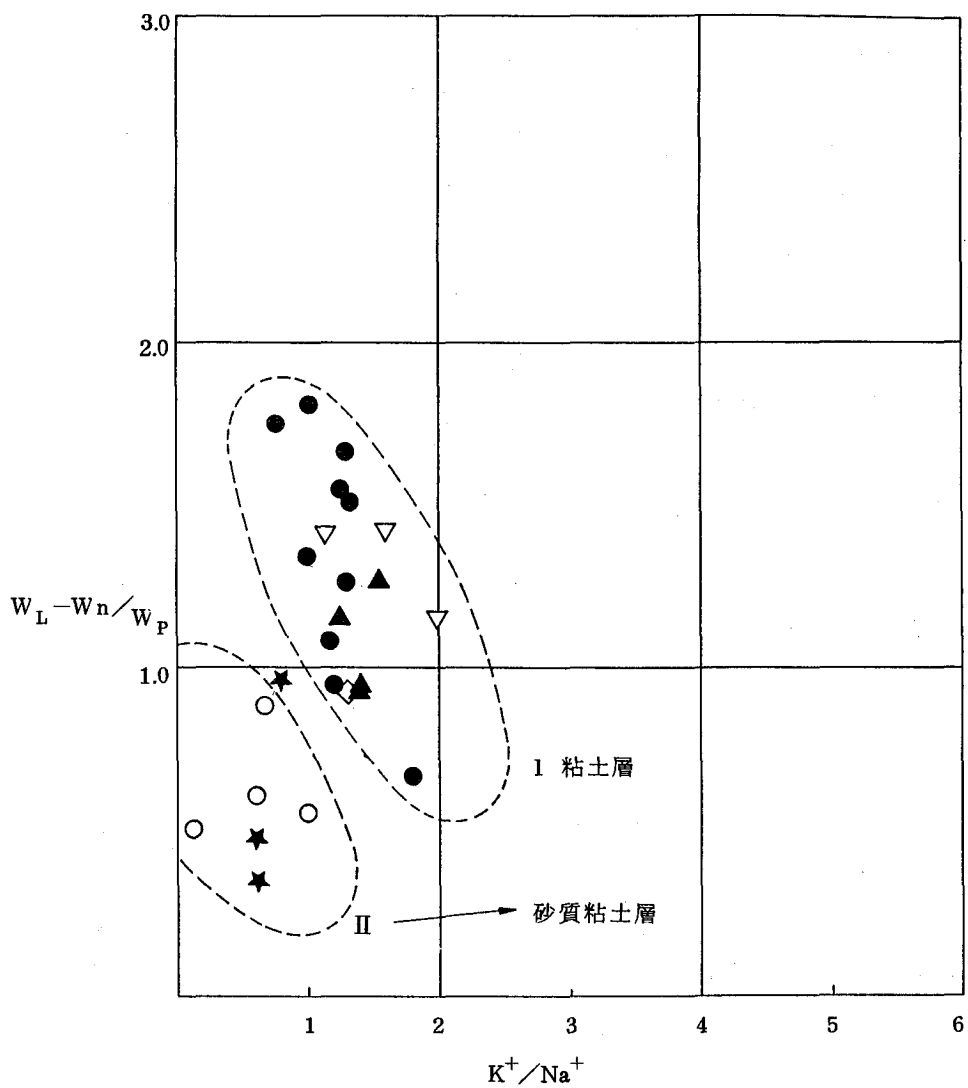


図-12 上部完新世砂層撤去後の $\frac{K^+}{Na^+}$ と $\frac{W_L - W_n}{W_p}$
(CEC30mg/100g以上)

審 査 結 果 の 要 旨

近年軟岩ではトンネルの膨圧現象、地すべり、斜面崩壊といった力学的事象が生じ、工期の遅れや工事費の増大等施工上重大な支障を来している。本研究は軟岩の鉱物化学的性質に着目して、力学的事象の原因究明から鉱物化学的指標を求めた。さらに、鉱物化学的性質から対策上に応用した。

施工に重大な力学的事象を起す軟岩は含モンモリロナイト堆積岩であり、この指標として軟岩粒子の負荷電量である塩基交換容量（CEC）が有効であることを認めた。さらに、地すべりには酸化還元物質量とその反応が斜面崩壊には軟岩粒子の保水性に関与する交換性 Na^+ イオンの溶脱が関与することを認めた。これらの研究成果は土木学会山岳トンネル標準仕様書や、地すべり対策上の特許、大規模掘削の場合の設計資料に活用された。

本研究の成果を具体的に述べると以下の通りである。

第1に第三紀中新世泥岩のトンネル膨圧現象の予測を行った。泥岩のCECは泥岩粒子の物理性、特に液性限界塑性指数と正の関係があり、膨圧現象を起す泥岩が高塑性泥岩であることを明らかにした。したがって発生土圧は高塑性泥岩の塑性流動に係る破壊現象であり泥岩粒子のCECと密接な関係がある事を認めた。そして発生土圧はCECから予測することが可能となった。

第2に地すべりの予測手法と対策工法について検討した。その結果、地すべり層は還元的であり交換性 Na^+ イオンが多い保水性の高い粘土で構成されていることを明らかにした。この為、地すべりに酸化還元反応を促進する鉄筋棒等の導電体を挿入すれば、酸化的となり、保水性が低下する事を認めた。

第3に掘削中や掘削後に起る斜面崩壊について検討した。その結果斜面崩壊粘土は、第1、第2の問題と共通する。CEC、交換性 Na^+ イオンに代表されるイオン交換反応量の高い硫化物有機物、第1鉄イオン等の還元物質の多い深海成の堆積物であることを認めた。また粘土の膨張能力は粘土のもつ交換性 K^+/Na^+ 比と密接な関係があり、膨張能力の高い交換性 K^+/Na^+ 比の低い粘土が崩壊を起すことを認めた。

以上の研究成果は土壌鉱物化学を土木工学に活用し土木工学の研究に重要な知見をもたらしたものである。よって審査員一同は著者に農学博士の学位を授与するに充分値するものと認定した。