

(125)スメクタイトを含む軟岩の劣化に関する研究

前田建設工業（株） 鷺沢 栄紀
石田 良二
神藤 健一

A Study on Deterioration of Smectite Bearing Soft Rocks.

Eiki WASHIZAWA, Ryoji ISHIDA, Kenichi KANTO MAEDA Corporation

Abstract

Sedimentary rocks of the Neogene, so called "soft rocks" are widely distributed in Japan. These soft rocks, especially smectite bearing tuffs and mudstones, sometimes cause the serious troubles such as ground pressure, landslide and crumbling of cut slope. To clarify the deterioration of the soft rocks during repeat of dry and wet condition, typical soft rock samples collected from hydrothermally or diagenetically altered Neogene system have been studied by mineralogical・chemical tests and deterioration tests. All of samples contain smectite. These rocks can be divided into three groups on the basis of exchangeable cation compositions, Na-type, Ca-type, and mixed type. Exchangeable cation types are closely related with the deformation by slaking test and by deterioration tests. It is considered that the strength and Vp of rock specimens can indicate well the deterioration of soft rocks during repeat of dry and wet condition.

1. はじめに

第三紀後半以降の固結度の低い泥岩や凝灰岩などの堆積岩類、いわゆる堆積軟岩¹⁾（本文では以下軟岩とする）は東北日本を中心にかなり広範囲に分布している。このうち、東北日本内帯に広く分布するグリーンタフ地域の新第三紀中新世～鮮新世の堆積岩及び火山岩は、様々な変質を受け、スメクタイト・緑泥石・沸石などの変質鉱物を伴っていることが多い²⁾。一方、グリーンタフ地域以外の堆積岩の中にも続成変質や局所的な熱水変質により、スメクタイトや沸石を含むことがしばしばある。このような変質鉱物を含む軟岩は、岩石自体が軟質で強度が低いばかりでなく、含有粘土鉱物、特にスメクタイトによる吸水膨張や乾湿の繰り返しに伴うスレーキングによる岩石組織の分離などの劣化現象を生ずる。その結果、地すべりなどの災害やトンネルの変状、切り取り斜面の崩壊など建設工学上重大な問題を引き起こすことが多い。

本研究は、スメクタイトを含む軟岩の劣化現象の解明及び劣化対策に関する基礎資料を得ることを目的として、鉱物・化学的試験及び乾湿による劣化試験を行ったものである。本報告では、これらの試験結果のうち、鉱物・化学試験として、偏光顕微鏡観察、X線回折、CEC及び交換性陽イオン分析、スレーキング試験の結果を、また劣化に伴う物性の変化として、一軸圧縮試験及び弾性波速度測定結果を述べ、鉱物・化学的性質と劣化に伴う物性の関係について考察した。

2. 試料の鉱物・化学的特徴

実験に用いた試料は主として、グリーンタフ地域から採取した9種類の軟岩である。これらはいずれも新第三紀中新世～鮮新世に堆積したものであり、凝灰岩7種類、泥岩2種類である。表-1にそれらの試料の

鉱物・化学的特徴を示す。

鉱物組成については、偏光顕微鏡及びX線回折により、試料中の鉱物種とその概略の存在量を調べた。全ての試料にスメクタイトが含まれていることが確認された。X線回折ピークによるスメクタイトの(060) 反射を検討した結果、全ての試料が1.49~1.50Åの底面間隔を有し、二八面体型のスメクタイトであることが明らかとなった。スメクタイトの相対的な含有量はTT, TK, TDで最も多く、TU, THがそれに続き、TS, TO, MK, MMは含有量は少ない。

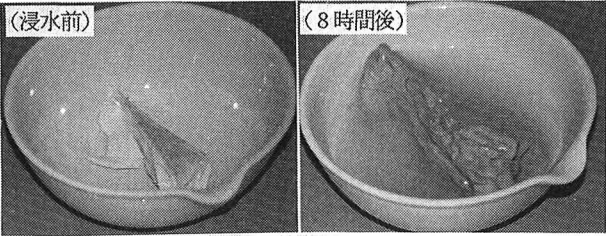
CEC測定と交換性陽イオンの分析はSchollenbergerの方法⁹⁾に準拠した。測定されたCEC値は、10~90meq/100gの範囲にわたり、試料によりかなりの差異が認められる。今回の試料はスメクタイトと沸石が共存するものが多く、測定されたCEC値はスメクタイトと沸石の陽イオン交換容量の総和に対応するものと考えられる。交換性陽イオン組成については組成により3つに分類でき、TS, TT, TUはNaを多く含むタイプ(Na型)であり、TH, TD, MKはCaを多く含むタイプ(Ca型)である。また、TO, TK, MMはNa, Caとも多く含むタイプ(混合型)である。

軟岩のスレーキング程度を判定する方法として、乾湿を多数繰り返す方法⁴⁾と1回の乾湿により判定する方法⁵⁾がある。スメクタイトを含む軟岩はスレーキングしやすく、1回の浸水で崩壊することが予想されるため、今回の実験では、1回の乾湿における浸水後の形状変化のみを観察する方法、すなわち、簡易スレーキング試験に準拠した方法で行った。スレーキングによる形状変化の程度を表す指数は、市川ら⁶⁾のスレーキング区分に従った。表-1にスレーキング試験結果を示した。これによると、ほとんど変化のみられなかったものはTS, TO, MMであり、他の試料は、顕著な変化が認められた。スレーキング試験の浸水後の劣化形態の様式は、徐々に膨張する膨潤型、砂状~ブロック状に崩壊・分離する崩壊型、両者の中間的形態を示す中間型の3つに分類できる⁷⁾。今回の結果をそれに従って分類すると、膨潤型がTT, TU、中間型がTK、崩壊型がTH, TD, MKにそれぞれ分類される。代表試料の劣化形態の特徴を写真-1に示す。

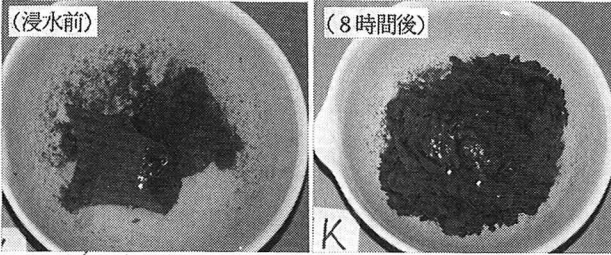
表-1 試料の鉱物・化学的特徴

	岩 種	スメクタイト含有量	スメクタイトの入り方	交換性陽イオン組成	スレーキング試験	
					指数	劣化形態
TS	凝灰岩	少	脈状	Na型	1*	劣化せず
TT	"	多	均質	"	4	膨潤型
TU	"	中	均質	"	3	"
TO	"	少	脈状	混合型	0	劣化せず
TK	"	多	脈状	"	4	中間型 (崩壊+膨潤)
MM	泥 岩	僅か	(均質)	"	0	劣化せず
TH	凝灰岩	中	均質	Ca型	4	崩壊型 (砂~細片)
TD	"	多	脈状	"	4	崩壊型 (泥~砂状)
MK	泥 岩	少	均質	"	3	崩壊型 (細片~ブロック)

*スレーキング指数は24時間の値



膨潤型(試料TT)



崩壊型(試料MK)

写真-1 スレーキング試験における劣化形態の特徴

3. 劣化試験

劣化試験は、乾湿に伴う各種物性の変化を把握する目的で行った。試験は直径5cm、高さ10cmの円柱供試体を用いた。試験条件は、水中+強制乾燥（記号WDを用いる）、水中+自然乾燥（WN）、水中放置（WW）の3ケースとし、水中・乾燥はそれぞれ1日とし、2日で1サイクルとした。強制乾燥は60℃の炉乾燥とした。劣化に伴う物性の変化を次に示すような試験により経時的に測定した。

試験項目：弾性波速度（Vp, Vs）、比抵抗（ρ）、重量（W）、一軸圧縮強度（qu）、含水比（W）、反発度（硬度）、色彩色差

これらのうち、一軸圧縮強度は劣化試験とは別に、劣化してない（新鮮な）供試体の自然状態と60℃1日乾燥試料についても試験を行い、劣化後の試験値との比較に用いた。また、劣化した試料の一軸圧縮試験は、スレーキング試験結果を参考にしたり、劣化状況の観察により完全に崩れる前の試料を用いて行った。今回は、上述した試験のうち、一軸圧縮試験及び弾性波速度について述べる。

3-1 劣化に伴う状況

表-2に試料が劣化し崩壊するまでのサイクル（日数）と劣化の状態についての一覧表を示す。どの条件でもほとんど変化がなかったのはTOのみで、他の試料は何らかの変化が認められた。変化があった試料のなかではTT, TU, TK, TH, TD, MKの6試料がWDとWNの条件では1サイクルで崩壊し、非常に劣化しやすい軟岩であるといえる。劣化状態に注目すると、TT, TUのNa型スメクタイトを含む試料は水浸により表面が膨潤し、溶出したり、膨らんで軟質化している。これに対し、TK, TH, TD, MM, MKのCa型と混合型のスメクタイトを含む試料は、乾燥によりひび割れが入り、次の浸水で砂～岩片状に崩壊するのが特徴的である。また、ひび割れの入り方や崩壊形態がMM, MKのやや強度が大きくスメクタイト量の少ないものと、TK, THなどの強度が小さくスメクタイト量の多いもので異なり、前者は、ひび割れの本数が少なく、水浸後の崩壊も大きな岩片状になるのに対し、後者はひびわれが多く入り、水浸後は砂状～細片状に崩壊した。さらに、Ca型と混合型のスメクタイトを含む軟岩は、水中放置しておくほとんど変化しないことが認められた。

表-2 劣化試験における試験サイクルと劣化状態

試料	条 件		
	WD	WN	WW
TS	2 (4日) 表面の一部が砂状に崩壊	8 (16日) 変化なし	8 (16日) 変化なし
TT	1 (2日) 水浸時、表面が膨潤し溶出	1 (2日) 乾燥後、ひび割れ多く発生	1 (2日) 表面が膨潤し溶出
TU	1 (2日) 表面が膨潤し糊状化	1 (2日) 〈同左〉	0 表面が膨潤しブロック状に崩壊
TO	2 (4日) 変化なし	7 (14日) 変化なし	7 (14日) 変化なし
TK	1 (2日) 乾燥後、ひび割れが多く入る	1 (2日) WDより少ないが大きなひび割れ	4 (8日) 変化なし
TH	1 (2日) 細かいひび割れが入る	1 (2日) WDより本数少なく、大きなひび割れ	4 (8日) 変化なし
TD	1 (2日) 大きなひび割れ入る	1 (2日) ひび割れ少し入るが、大きな変化なし	4 (8日) 変化なし
MM	2 (4日) ひび割れが入り、一部岩片状に崩壊	4 (8日) ひび割れ入り両端が欠け	7 (14日) 変化なし
MK	1 (2日) ひび割れ入り2cy水浸時岩片状崩壊	1 (2日) 層理面にひびわれ入り分	7 (14日) 変化なし

上段：サイクル（日数）、下段：劣化状態

3-2 劣化に伴う物性変化

劣化に伴う物性変化のうち、ここでは、Vsとquの結果について述べる。
まず、VsのWDによる経時変化を図-1に、各試験条件によるVsの変化（Dは乾燥時のVs／自然状態、WD, WN, WWは1サイクル目のVs／自然状態のVs）を図-2に示す。図-1よりMM, TO, TSのように自然状態でのVsが大きいもの（Vs=1.3km/s以上）は、2サイクルの乾湿繰り返しで10～20%のVsの低下であるが、Vsの小さいものは2サイクル目の水中で表-2に示した状態になり測定できなくなる。1サイク

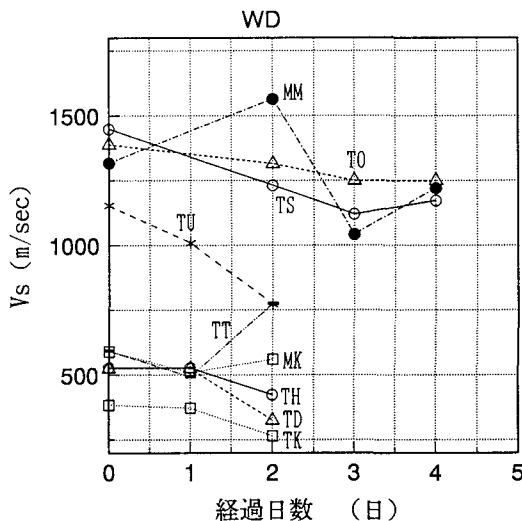


図-1 VsのWDによる経時変化

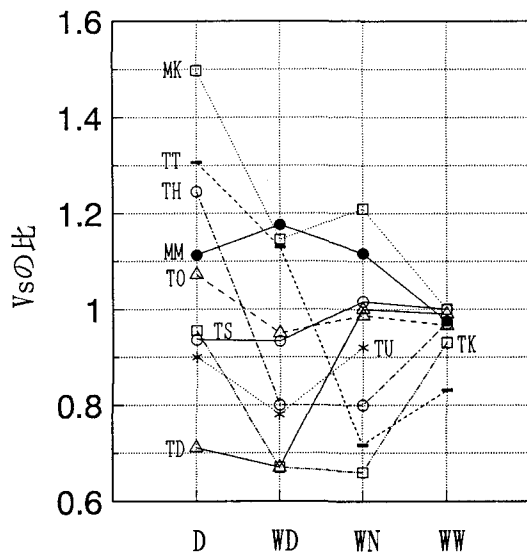


図-2 各試験条件によるVsの変化

ル目の乾燥状態（2日）では、MM、MKでVsが大きくなっているが、他は同じか低下している。また、図-2で、MM、MK、TT、THは乾燥（D）によりVsが大きくなっており、WDの程度を検討するには、この点を考慮する必要がある。次に、劣化条件についてみるとTT、TKはWWで、また、TU、TTは1サイクル目の水中状態でVsが低下しており、水による劣化が支配しているのに対して、他の試料は1サイクル目の水浸時やWWでの結果から、水による劣化は小さいものと考えられる。一方、WDでは、前述の乾燥によるVsの影響を考慮すると、1サイクル目でMM以外は劣化し、その程度はTD、TK、TH、TUなどが大きい。このうち、TD、TK、TUは乾燥によっても低下しており乾燥による潜在クラックの発生が考えられる。また、WNでは、TK、TT、TH、TUなどが低下し、水と乾燥による影響の両者によるものと考えられる。

図-3に劣化試験による強度変化を示す。ここで、quはそれぞれの条件における劣化後のquを、quの比は劣化後のquを、WDでは乾燥時のqu、WW、WNでは自然状態でのquで除した値を図示した。図-3より、劣化後のquが50kg/cm²以上の場合、MKを除いて各条件とも強度低下は少ない。一方、劣化後のquが50kg/cm²以下の条件では、TU、TTは各条件とも大きく低下し、TKはMDとWWで低下し、TD、THでは明瞭な低下は認められない。

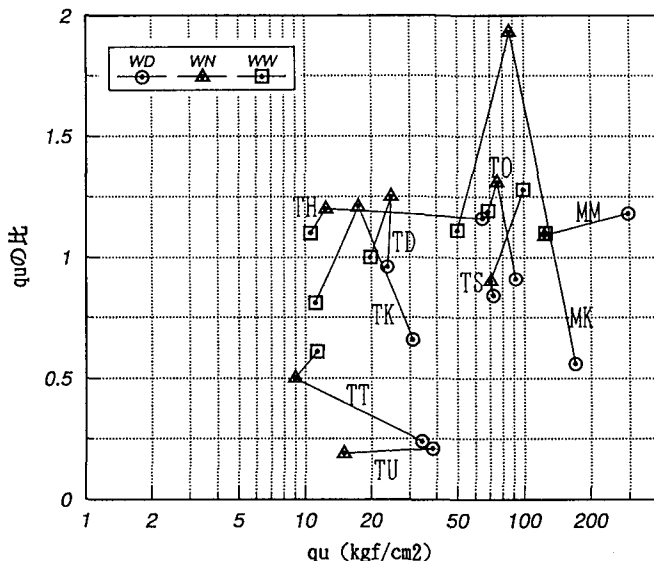


図-3 劣化試験による強度 (qu) の変化

4. 考察

4-1 交換性陽イオン組成と劣化形態の関係

スレーキング試験の結果、スレーキングによる劣化形態は、膨潤型、中間型、崩壊型の3つに分類された。この分類と各々の試料の交換性陽イオン組成のタイプの比較を行うと、表-1より、膨潤型はNa型のスメクタイトを含む軟岩に、崩壊型はCa型のそれに、また、中間型は交換性陽イオンとしてNaとCaを両方多く含む混合型に対応する。このように、スレーキングによる劣化形態と交換性陽イオン組成の間には、対応関係が認められ、顕著な劣化が認められる場合には、スレーキング試験の形態観察から軟岩中のスメクタイトの層間陽イオン組成のタイプが推定でき、これとは逆に、軟岩中のスメクタイトの交換性陽イオン組成を調べることにより、軟岩の劣化のタイプやその程度を概略推定できるものと考ええる。

ここで、崩壊型の3試料(TH、TD、MK)の劣化形態に注目する。TDは完全に泥～砂状化し、THははじめブロック状となり最終的には砂～細片状となり、MKは砂状化せず、ブロック～細片状に分離し、同じ崩壊型でも劣化形態に若干の差異が認められる。このようなことは劣化試験においても観察されており、陽イオン組成がCa型と混合型の5試料の比較によると、ひび割れの入り方、水浸後の崩壊の仕方や分離する粒度などが試料により異なる。これらの試料は劣化形態ごとにスメクタイト含有量、陽イオン量、軟岩の強度、構成粒子の粒度などが異なる。

4-2 交換性陽イオン組成・劣化形態と物性変化の関係

劣化後の qu が $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上あり、自然状態で V_s が $1.3\text{km}/\text{s}$ 以上あるもの(TO、TS、MM)は劣化による物性変化が小さい。一方、それ以下の qu 、 V_s のものは、交換性陽イオン組成と劣化形態とに大きく関係している。すなわち、Na型で膨潤型は、水浸によって V_s 、 qu とも低下し、さらに、NW程度の乾湿繰り返しでも大きく物性値が低下する。一方、崩壊型のTH、TDは、水による影響は少なく乾湿により低下するが、その物性値の変化は、乾燥による強度、 V_s の増加とクラックの発生状況(方向性と程度)による強度、 V_s の低下に関係している。また、中間型のTKは、水による劣化と乾湿による両者の影響を受けている。また強度、 V_s 等の物性値の低下は、Ca型に比較してNa型、混合型で大きく、特に強度が小さい場合大きく低下し、早期に劣化する。

以上、軟岩の劣化は qu 、 V_s 等の力学的性質と交換性陽イオン組成両者に係っており、両者の性質から概略の劣化程度を推定できるものと考えられる。ただし、実際の設計にこれらの結果を利用していくには、長期的な現場実測との対比を行っていく必要がある。また、特に強度が小さく、Na型のスメクタイトを含む軟岩は、Ca型に比較して膨潤しながら強度低下するので、適切な防止対策が早期に必要と考えられるが、現在、軟岩のタイプ別の劣化防止工法による効果についても研究しており、将来的にはこれらの効果も含めて軟岩の設計・施工に結びつけていきたい。

参考文献

- 1) 土質工学会編(1987)堆積軟岩の工学的性質とその応用, pp1-10
- 2) 吉村尚久(1985)粘土科学, Vol.25, 107~112
- 3) Schollenberger, C. and Simon, R. N. (1945) Soil Science, Vol.59, 13-24
- 4) 岩の力学連合会(1982)ISRM指針, Vol.1, 21-24
- 5) 吉中竜之進・小島圭二・田中荘一(1979)第12回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要, 36-40
- 6) 市川慧・平野勇・神保悟(1986)土木研究所資料, 第2455号
- 7) 石田良二・西川総明(1992)粘土科学, Vol.32, 97-107