

第三紀神戸層群凝灰岩の強度低下と遅れ破壊の関係

The nature of strength-reduction and delayed failure on tuff in Tertiary Kobe Group, SW Japan

中川 渉

Wataru Nakagawa

応用地質株式会社新潟支店

Oyo, Co. Ltd., 27-35 Shichiku-7, Niigata 950-0864, Japan

Nakagawa-wataru@oyonet.oyo.co.jp

1. はじめに

新生代第三紀堆積岩類分布地域では, 数多くの地すべりが発生し, 一般に第三紀地すべりと呼ばれている. 第三紀の堆積岩類の中でも凝灰岩は, 軟質化した薄層として分布し, 層状破碎帯や地すべり面粘土へ移行し, 地すべり発生の主要な素因となるケースが多い. このような軟質な凝灰岩の分布する切土のり面において, 当初硬質な岩石であった凝灰岩が風化・変質され, 時間とともに強度が著しく低下する現象が認められる. その強度低下の過程で, 土塊の重量バランスが崩れ, 斜面変形, 地すべり, 崩壊などが発生すると考えられる (中川・遠藤, 2004). また, この軟質凝灰岩の強度低下は, 凝灰岩の初期組成にも関連していると考えられる.

一般に第三紀の凝灰岩の軟質化現象とは, 風化・変質によってスレーキング (slaking) ならびに膨潤 (swelling) を発生し, 強度低下が進行するものが多い. また大規模な掘削や侵食により地盤中で発生した応力開放によるリバウンドは, 割れ目の発達や地下水流の変化をもたらし, 風化・変質の進行を助長する. このような変形後の風化・変質が遅れ破壊地すべりの要因となっていると考えられている (中川, 2003). しかしながら, 実際に凝灰岩が, 時間とともに劣化していく状況を捉えた事例は少ない. これは岩石の劣化には時間を費やし, 様々な初期条件を保った状態での強度確認が困難なためであると考えられる.

本論文では, 第三紀の堆積岩である神戸層群の凝灰岩を事例として取り扱い, 施工中から施工終了後の切土のり面に分布する凝灰岩の劣化過程において明らかになった組成

ならびに含水比の相違による劣化強度への影響を報告する.

2. 試験試料の特性と試験方法

試料は, 神戸市西区の木津地域に分布する層準の異なる 3 枚の軟質な凝灰岩薄層 (軟質凝灰岩 I~III) を採取した. 木津地域の位置図と層序をそれぞれ図 1 と図 2 に示す.

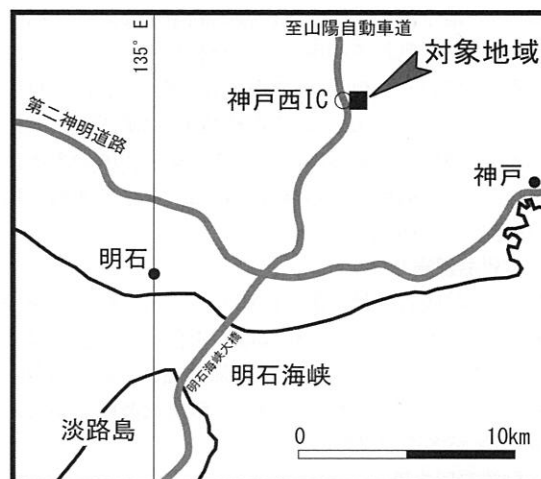


図 1. 試料採取を行った神戸市西区木津地域の位置図.

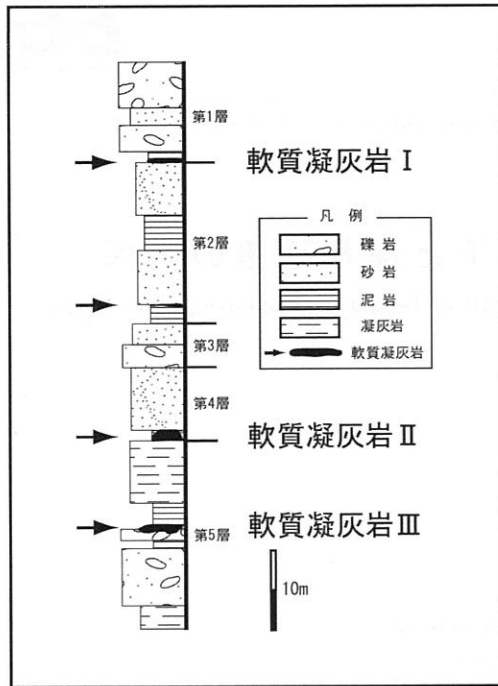


図 2. 木津地域の地質柱状図. 軟質凝灰岩 I は当該地域で最も浅層部に分布し、その層厚は十数 cm~30cm 程度である。軟質凝灰岩 II は厚い凝灰岩の最下部に位置し、その層厚は数 cm~10cm である。軟質凝灰岩 III は当該地域の深層部に分布し、層厚は三枚の軟質凝灰岩の中で最も薄く、1cm~5cm 程度である。

2-1. 試料の特性

採取した軟質な凝灰岩薄層 I~III の特性を以下に記す。

2-1-1. 軟質凝灰岩 I

当該地域で最も浅層部に分布している。層厚は十数 cm~30cm 程度である。最下部に 10cm 程度の白色~灰色の凝灰岩が分布し、それを 12cm~18cm 亜炭層が被覆する。それをさらに数 cm の灰色~青灰色の凝灰岩が被覆している (図 3: 写真 1)。最下部の凝灰岩は比較的固結しており、指圧で碎片状~砂状に割れる程度の硬さを有している。亜炭は比較的固結しており、扁平状に割れる。割れ目肌は、鏡肌を有していることが多い。これらを被覆する凝灰岩は、1cm 程度の白色の薄層、5cm 程度の灰色層、5cm 程度の青灰色層、1cm ほどの暗褐色層から構成される。白色の薄層は場所により分布しない場合もある。

2-1-2. 軟質凝灰岩 II

非常に厚い凝灰岩の最下部に位置している。軟質凝灰岩 II は層厚 cm~10cm である。色調は、灰色~暗灰色を呈している (図 3: 写真 2)。凝灰岩には層理面に対して高角の割れ目が発達し、その割れ目に対して軟質な凝灰岩が流入している箇所が多くて認められる。

2-1-3. 軟質凝灰岩 III

三枚の軟質凝灰岩の中で最も薄く、1cm~5cm 程度である。色調は白色~灰色を呈している。この軟質凝灰岩 III は、上位に分布する硬質な凝灰岩中の割れ目に深く流入してきている (図 3: 写真 3)。



写真 1



写真 2



写真 3

図 3. 軟質凝灰岩の産状. 写真 1: 軟質凝灰岩 I の産状. 上位に褐色化した亜炭が分布する。写真 2: 軟質凝灰岩 II の産状. 脆弱化した凝灰岩と砂岩境界部に分布している。写真 3: 軟質凝灰岩 III の産状. 上位の硬質な凝灰岩中の亀裂に流入してきている。

2-2. 試験方法

軟質凝灰岩 I から 4 試料、軟質凝灰岩 II から 8 試料、軟質凝灰岩 III から 4 試料の合計 16 試料について、X 線回折分析、CEC 試験、含水比、コンシステンシー、吸水膨張試験および一面せん断試験等を実施した。CEC (陽イオン交換容量) 試験は Schollenberger and Simon (1945) に従い、フレーム光度法およびフレーム原子吸光法により定量した。コンシステンシー、含水比等は地盤工学会の仕様に準拠した (社団法人地盤工学会, 2000)。また一面せん断試験機は持田ほか (1998) に従い、北大型の一面せん断試験器を使用した。

表 1. 軟質凝灰岩 I, II, III の物理特性一覧.

試料	土粒子の比重	湿潤密度 (g/cm ³)	自然含水比 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)
軟質凝灰岩 I	2.63-2.76	1.63-2.14	8.7-69.0	38-102	15-33
軟質凝灰岩 II	2.72-2.78	1.38-2.06	14.9-59.2	54-116	16-31
軟質凝灰岩 III	2.58-2.70	1.32-1.96	52.2-161	102-323	23-50

表 2. 軟質凝灰岩 I, II, III の構成鉱物. ○: 含有される. -: 含有されない.

試料	石英	斜長石	雲母類	灰十字沸石	斜ブチル沸石	スメクタイト	緑泥石	カリ長石	カオリナイト
軟質凝灰岩 I									
1	○	○	-	-	-	○	-	-	-
2	○	-	-	○	-	○	-	-	-
3	○	○	-	-	-	○	-	-	-
4	○	-	-	○	-	○	-	-	-
軟質凝灰岩 II									
5	○	○	○	-	-	○	○	○	○
6	○	○	○	-	-	○	-	○	○
7	○	-	-	○	○	○	-	-	-
8	○	○	○	-	-	○	-	-	○
9	○	○	○	-	○	○	-	-	○
10	○	○	○	-	○	○	-	-	○
11	○	○	○	-	-	○	-	-	○
12	○	○	-	-	-	○	-	-	○
軟質凝灰岩 III									
13	○	○	○	-	-	○	○	-	-
14	○	○	○	-	-	○	-	-	-
15	○	○	-	-	-	○	○	-	-
16	○	○	○	-	-	○	○	-	-

表 3. 軟質凝灰岩 I, II, III の陽イオン交換容量.

試料	採取深度 (m)	陽イオン交換容量 (meq/100g)	交換性陽イオン (meq/100g)	交換性Na (meq/100g)	交換性K (meq/100g)	交換性Ca (meq/100g)	交換性Mg (meq/100g)	モンモリロナイト量 (meq/100g)
軟質凝灰岩 I								
1	14.60	32.9	53.1	0.3	0.4	49.0	3.1	25.0
2	11.35	57.8	93.4	0.9	0.6	78.7	13.2	39.0
3	3.40	58.7	81.6	0.7	1.0	71.3	8.6	32.0
4	14.60	60.5	75.0	0.4	0.7	65.8	8.3	39.0
軟質凝灰岩 II								
5	39.80	26.3	38.4	7.3	2.4	28.4	0.3	13.0
6	10.30	24.8	35.2	4.4	4.0	25.7	1.1	12.0
7	7.23	79.2	79.5	10.5	4.5	62.9	1.6	10.0
8	20.80	29.2	46.6	7.7	2.3	36.3	0.3	11.0
9	35.65	18.0	27.0	4.2	1.1	21.6	0.1	9.0
10	31.35	27.8	39.6	7.6	2.5	29.2	0.3	14.0
11	28.70	35.1	49.1	9.4	2.5	36.5	0.7	22.0
12	33.55	44.7	82.9	7.2	2.2	72.2	1.3	18.0
軟質凝灰岩 III								
13	50.00	63.0	97.2	20.8	3.0	72.2	1.2	32.5
14	50.20	29.8	46.0	7.0	1.7	36.9	0.4	12.0
15	40.00	62.3	93.8	18.4	3.1	70.1	2.2	45.0
16	28.70	40.7	61.7	8.7	1.2	51.3	0.5	24.0

試験は、まず自然条件での含水比、コンシステンシーを測定した。その後、X線回折分析によってスメクタイトの有無を確認し、CEC試験により陽イオン交換容量を求め、崩壊型スメクタイト、中間型スメクタイトに分類することを試みた(石田・西川, 1992)。さらに、これらの試料について吸水膨張試験、単純一面せん断試験を実施した。

軟質凝灰岩Ⅰ、軟質凝灰岩Ⅲについては、時間に伴う強度の低下を把握することを目的に切土後約30日、1年後、4年後の試験を実施した。試料の採取は、地表面に放置されスレーキングならびに含水比の増加が予想される箇所での採取は避け、地表より50cm~100cmの深さを掘削し、そこから不攪乱試料を採取した。

3. 試験結果

3-1. 自然含水比とコンシステンシー

自然含水比は、軟質凝灰岩Ⅰで $w=10\%$ から70%までの値を示し、軟質凝灰岩Ⅱにおいても $w=15\%$ から60%程度までを示す。一方、軟質凝灰岩Ⅲは $w=50\%$ から160%までを示し、他の軟質凝灰岩に比べ深部に位置しているもの高い含水比を示している(表1参照)。

コンシステンシーにおいても軟質凝灰岩Ⅰと軟質凝灰岩Ⅱは液性限界で40%から120%程度まで、塑性限界で15%から35%程度までの値を示しているのに対し、軟質凝灰岩Ⅲでは液性限界で100%から320%程度までを示している(表1)。

深部に位置する軟質凝灰岩Ⅲの自然含水比とコンシステンシーは、軟質凝灰岩Ⅰおよび軟質凝灰岩Ⅱと比べて特異である。

3-2. X線回折分析とCEC試験

X線回折分析結果を表2に示した。軟質凝灰岩には、石英と共にスメクタイト、カオリナイト、緑泥石および沸石類などの粘土鉱物が含有されている。石英とスメクタイトは、いずれの軟質凝灰岩においても含まれている。軟質凝灰岩Ⅰは、沸石類を含有するものの、カオリナイトはまったく含まない。また軟質凝灰岩Ⅱはカオリナイトを含み、稀に沸石類を含む。また軟質凝灰岩Ⅲは、緑泥石を含むものの、カオリナイトを含まない。

CEC試験の結果を表3に示した。採取された試料にはいずれも交換性陽イオンが含有されている。比較的浅層に分布している軟質凝灰岩Ⅰは、交換性Naの含有量が極めて低く、交換性Caおよび交換性Mgの多いことが特徴である。

軟質凝灰岩Ⅱは、交換性Naの含有量がやや多くなり $Ca/Na=4\sim 10$ を示し、軟質凝灰岩Ⅲは同様に Ca/Na は3~6を示す。これらの値を採取深度と交換性Ca/交換性Naの比として示すと図4のようになる。浅い深度に分布する軟質凝灰岩Ⅰは Ca/Na 比がバラツキ、大きな値を示す。一方深部で採取された軟質凝灰岩Ⅲは Ca/Na が小さい。その原因として風化の影響により交換性Naが交換性Caに置換したものと考えられる。

軟質凝灰岩ⅠのスメクタイトはCaスメクタイトで、崩壊型に相当し、軟質凝灰岩ⅡならびにⅢのスメクタイトは

中間型スメクタイトで、膨潤型に相当すると考えられる。当該地では、中間型に相当するスメクタイトが崩壊型へ変化していくことが予想される。

3-3. 吸水膨張特性

軟質凝灰岩Ⅱはモンモリロナイト量が極めて少ないことが表3より明らかである。また軟質凝灰岩Ⅰと軟質凝灰岩Ⅲはモンモリロナイト量がある程度認められるものの、吸水膨張は深部にある軟質凝灰岩Ⅲが相対的に大きい傾向があることが明らかになった(図5)。

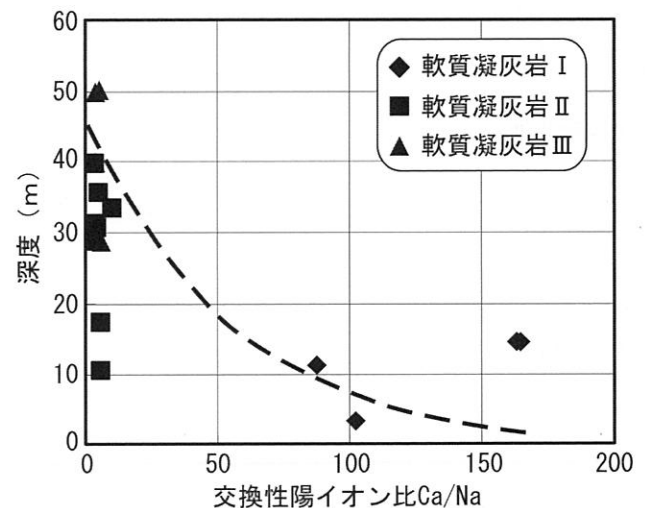


図4. 軟質凝灰岩Ⅰ、ⅡおよびⅢの採取深度と陽イオン交換容量比 Ca/Na の関係。

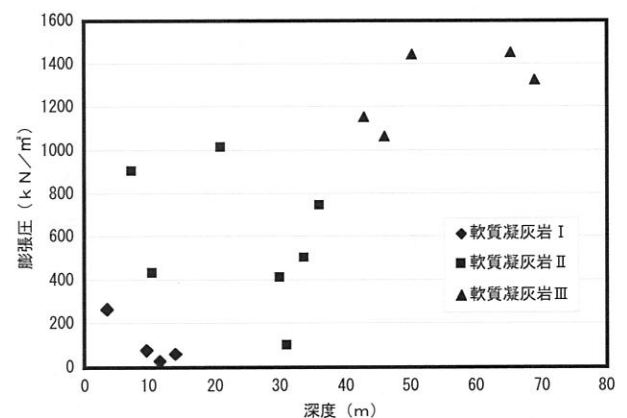


図5. 軟質凝灰岩Ⅰ、ⅡおよびⅢの採取深度と膨張圧の関係。

4. 考察

4-1. 含水比とせん断強度の関係

風化の一つの指標として, 含水比の増加が考えられる. 軟質凝灰岩 I ~ III について, 含水比とせん断強度の関係を図 6 に示した. なお含水比測定とせん断強度試験については, 特定試料以外の供試体についても試験を実施し, その値を示した.

圧密応力によりせん断強度は変化するが, 図 6 は圧密応力 100kN/m²~400kN/m² についての試験結果を示したものである. 軟質凝灰岩 I と II は含水比が比較的小さく含水比の増加に伴いせん断強度が急激に小さくなることが明らかである. 一方軟質凝灰岩 III は含水比が全体に多いとともに, 含水比が増加してもさほど強度が低下しないことが明らかである. これらは交換性 Ca/交換性 Na とモンモリロナイト含有量に関係している可能性が考えられる. 軟質凝灰岩の一面せん断試験結果は, その含水比・土粒度の状態により大小があるが, 大きな差異はない.

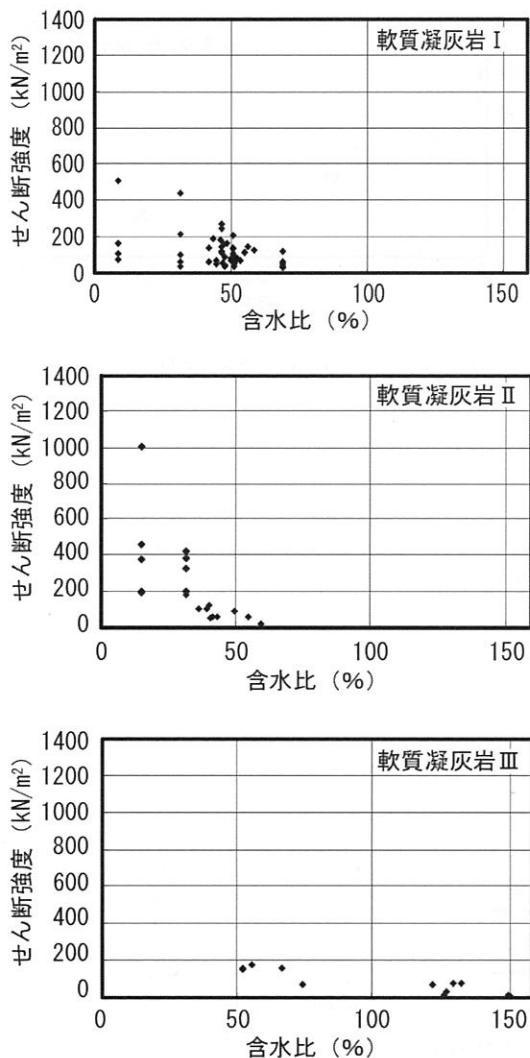


図 6. 軟質凝灰岩 I, II および III における含水比別のせん断強度.

4-2. 時間に伴うせん断強度の低下について

得られた Ca スメクタイトを含む軟質凝灰岩 I と中間型のスメクタイトを含む軟質凝灰岩 III について一面せん断試験を実施し, 時間に伴う強度の低下について比較検討した (図 7, 図 8). いずれもせん断強度は, 時間とともに低下する. また垂直応力が小さいほど, 時間に伴う強度低下の率が小さい傾向がある. また, 軟質凝灰岩の組成に着目すると Ca スメクタイトの低下は, 約 1 年程度で強度が一定化するのに対し, 中間型 Na は 3 年を超えてもさらに強度が低下し続ける傾向がある.

これらの原因として Ca スメクタイトを含有する軟質凝灰岩は, 時間が経過してもある程度以上含水比が増加しない傾向があると考えられる. それに対し中間型スメクタイトを含有する軟質凝灰岩は徐々に含水比の増加により, 強度が低下し続けているものと考えられる.

4-3. 軟質凝灰岩の組成と遅れ破壊のメカニズム

図 9 は, Ca スメクタイトを含有する軟質凝灰岩と中間型のスメクタイトを含有する軟質凝灰岩の時間に伴う強度低下の過程について示したものである. 前節で述べたように, 軟質凝灰岩の組成によって強度低下に要する時間が大きく変化することが明らかになった. スメクタイトに吸収される水分の吸水速度により強度低下の割合が異なることが予想される. また, 図 4 および表 1 に示す如く Ca スメクタイトは深度に伴い含水比が減少し, Ca/Na 比も小さくなる. この現象は明らかに地表からの供給により Ca/Na 比が変化すると考えられる. 神戸層群分布地域周辺には六甲花崗岩類, 有馬層群の流紋岩類が分布する. これらの酸性岩類からの Ca イオン, Na イオンの供給が軟質凝灰岩の CEC のバランスを変化させていると考えられる. 特に酸性岩類に含まれる長石類が原因となっていると考えられる.

遅れ破壊は, 切土後ある一定の時間を経て後に崩壊する現象である. これまでの研究では, 遅れ破壊の原因として進行性破壊によるタイムラグや過剰間隙水圧の消散などが考えられている. 切土に伴う軟質凝灰岩への歪の累積, 例えば, 孔内傾斜計・スライディングマイクロメータによる切土時の弱層への変位の累積は, 進行性破壊の一つの証拠と考えられるが, この現象はせん断破壊ではなく, 地層の膨潤とも考えられる. 神戸層群の凝灰岩の場合では膨潤圧が 1500kN/m² にも及ぶことが明らかであり, 十分にアルミケーシングパイプを变形させることが可能である. 同様に過剰間隙水圧の消散は, スメクタイトへの吸水と膨潤による強度低下と考えることができる.

すなわち第三紀凝灰岩の地すべりのメカニズムは, 地すべり面へ移化する軟質凝灰岩のスメクタイトの陽イオン交換容量の違いにより発生すると考えられ, 堆積後の続成作用や環境変化により, 交換性 Ca が卓越するの交換性 Na が卓越するかにより, 変形特性が大きく変化すると考えられる. またこれらのイオン特性は可逆反応が可能であり, 条件によっては, 切土中, 切土後において大きく変化すると思われる. この変化が第三紀の凝灰岩の場合, 意外に早いことが予想される.

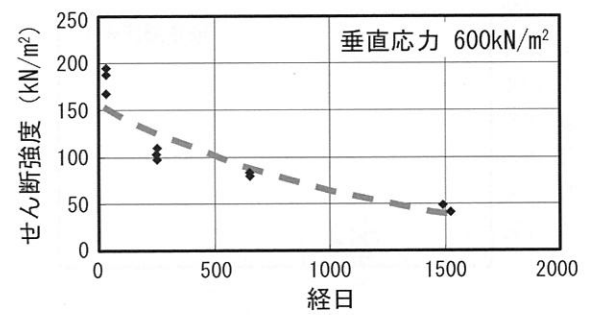
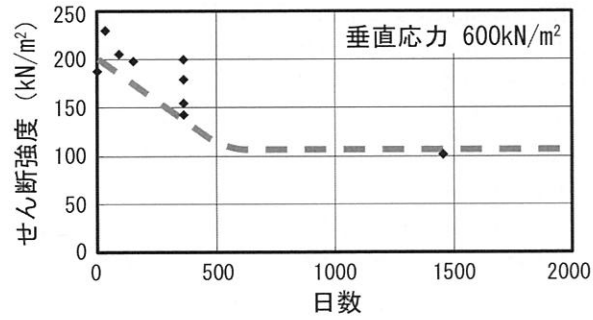
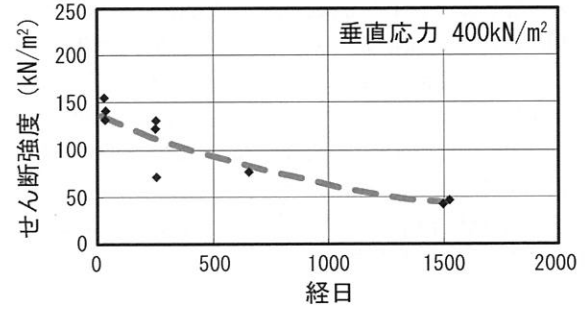
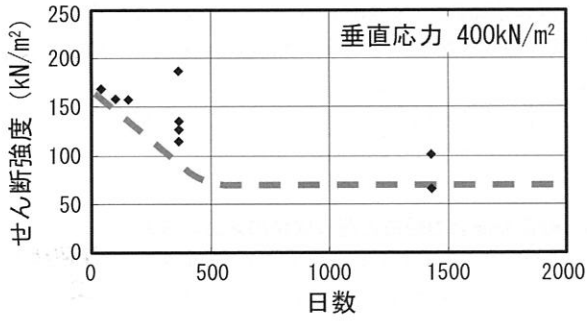
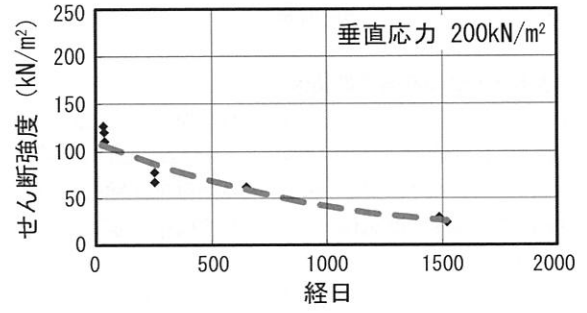
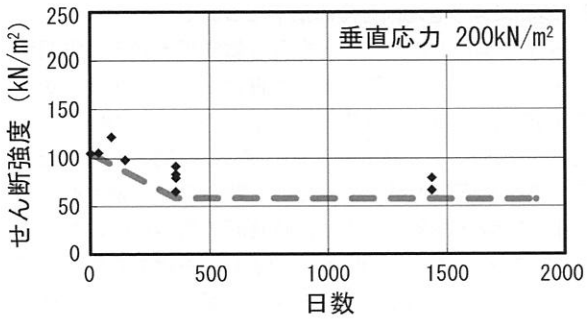


図 7. Ca スメクタイトを含む軟質凝灰岩 I の時間に伴うせん断強度の変化。

図 8. 中間型スメクタイトを含む軟質凝灰岩 III の経日後のせん断強度。

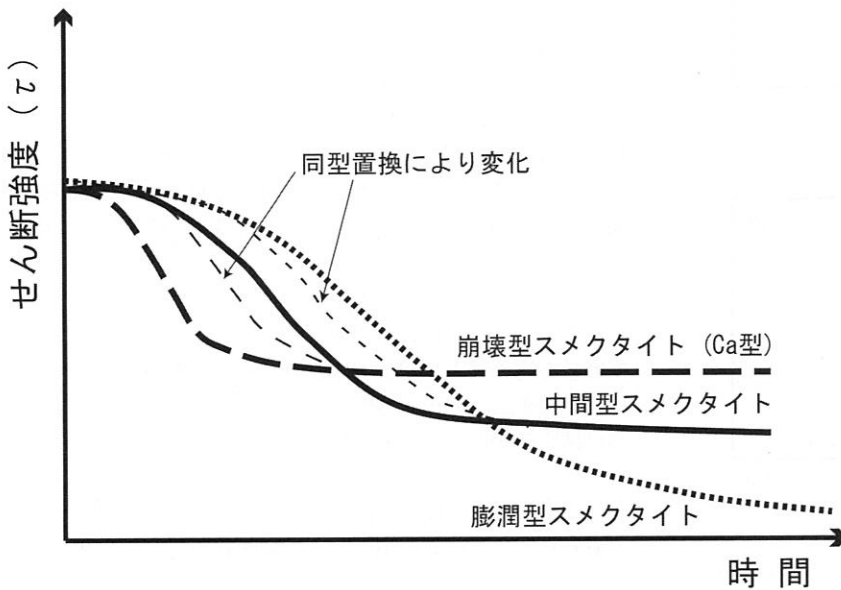


図 9. タイプの異なるスメクタイトを含有する軟質凝灰岩の時間に伴うせん断強度の低下の過程。崩壊型スメクタイトは、急速に強度低下を生じ、その後大きな低下は認められない。膨潤型及び中間型スメクタイトは時間をかけてゆっくりと強度低下を生じ、著しく低い強度まで低下する。崩壊型及び膨潤型スメクタイトは陽イオンが可逆であり、条件により同型置換を生じる。

5. まとめ

これまでの結果をとりまとめると以下のことが示される。

- (1) 神戸市西区の木津地域は 3 枚の化学的, 物理的特徴が異なる軟質凝灰岩 I~III が分布している。
- (2) 軟質凝灰岩 I は, Ca 型のスメクタイトを含み, 含水比が小さくその分布幅が狭く, 比較的早く強度が低下するものの, ある一定の時間を経ると強度の低下が著しく小さくなる。
- (3) 軟質凝灰岩 II は中間型のスメクタイトを含むものの, 含水比の分布幅が狭く, 軟質凝灰岩 I と同様に比較的早く強度が低下し, 強度の低下速度が著しく小さくなる。
- (4) 軟質凝灰岩 III は中間型のスメクタイトを含むものの, 含水比の分布幅が広く, ゆっくりと強度低下が進行している。

これらの結果は, 交換性陽イオンの Ca/Na だけではなく, モンモリロナイト含有量も関与している可能性を示している。一方含水比の増加が強度低下に大きく関わっていることを示している。したがって含水比の増加の割合が強度低下に関わっていることが考えられるが, 上記より時間による粘土鉱物の構造的な変化も強度に関わっていることが考えられる。神戸層群における切土の遅れ破壊は, 軟質凝灰岩そのものの交換性陽イオン量とその割合, そしてそのイ

オン交換の反応速度が遅れ時間に関わっていることが予想される。

また神戸層群では, 比較的浅層部には Ca 型のモンモリロナイトが多く, 小規模~中規模の地すべりが多く分布する。一方神戸層群には深度の深い大規模地すべりも存在し, これらの地すべり規模が軟質凝灰岩の化学特性とその劣化特性に関わっている可能性も考えられ, 今後の研究課題としたい。

文 献

- 石田良二・西川聡明 (1992) スメクタイトを含む軟岩の諸性質 (1) -交換性陽イオンと吸水特性-. 粘土化学, **32**, 97-107.
- 持田文弘・中川 渉・遠藤 司・川原孝洋 (1998) 神戸層群地すべり粘土の安定を評価するための一面せん断試験例. 第 33 回地盤工学研究発表会発表講演集, 575-576.
- 中川 渉・遠藤 司 (2004) 神戸層群凝灰岩の切土掘削に伴う変形と遅れ破壊. 地すべり学会誌, no. 41, 33-44.
- 中川 渉 (2003) 神戸層群の遅れ破壊と変形メカニズムについて. 神戸大学大学院自然科学研究科紀要, 21-B, 9-20.
- Schollenberger, C. J. and Simon, R. H. (1945) Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soils-ammonium acetate method. Soil Science, **59**, 13-24.
- 社団法人地盤工学会 (2000) 土質試験の方法と解説. 丸善, 902p.

