

8. スメクタイト含有地盤の諸問題

Problems of smectite-bearing ground due to hydrothermal alteration

○田村栄治・露口耕治（株式会社四電技術コンサルタント）

1. はじめに

スメクタイトは膨潤性と吸着性を有する粘土鉱物として知られ、スメクタイトを主成分とするベントナイトは高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるオーバーパックと岩盤との間の緩衝材の有力候補とされている¹⁾。一方、応用地質分野では、スメクタイトの膨潤性に起因してその含有地盤はさまざまな問題をもたらす。

四国においてスメクタイト含有地盤は、四国の中央構造線などの大きな断層に沿う箇所や新第三紀の瀬戸内火山岩類周辺に分布している。中央構造線の四国東部の徳島県側では貫入岩が認められなくてもスメクタイトが生成されている²⁾。愛媛県の砥部地区では熱水変質により陶石鉱床が形成され、スメクタイトおよびその混合層鉱物が生成されている³⁾。

スメクタイト含有地盤では、切土による予想外の地すべり、切土地盤の盤膨れ、トンネル掘削時における大きな内空変位の発生、スレーキングの促進による地すべり、崩壊、トンネルの盤膨れなど、応用地質学的に問題となる諸現象が見られる。本論では、四国地域のスメクタイトの起源を考察したうえで、スメクタイトを含有する地盤の諸問題について総括する。

2. スメクタイトの起源と分布

スメクタイトの生成は、熱水変質作用、グリーンタフ地域の凝灰岩の続成作用、風化作用の三つの場合があるとされている⁴⁾。熱水変質は金属鉱床に見られるように開放系の地下水流動を基本とする⁵⁾が、地下深部の断層でもスメクタイトの生成が見られ閉鎖系に近い状態での変質もあると考えられるがその実態はよく分かっていない。

長谷川⁶⁾は中央構造線沿いの変質粘土の粘土鉱物組成はスメクタイトを主体とし風化によっては生成されないトリディマイト、ドロマイト、マグネサイトを伴う組み合わせを持つことを指摘した。また、田村ほか²⁾は、この鉱物組み合わせは変質分帯ではスメクタイト帯に相当し、中期中新世の貫入岩を熱源として中央構造線に沿って100℃前後の熱水変質作用を受けたとした。

農業環境研究所による全国の低地土壌の粘土鉱物調査⁷⁾によれば、スメクタイトの分布量は、グリーンタフが分布する東北地域などに比べて四国地域は極めて少なく（図1）、四国ではスメクタイトの含有地盤が少ないことが推察される。

一方、田村ほか⁸⁾は四国におけるスメクタイト含有地盤の建設工事のトラブル事例とその位置を報告した。それによれば、スメクタイトを含有する地盤は中央構造線沿いのみならず、香川県内の田中断層沿い、長尾断層沿い、三波川帯南縁部の断層沿いなどの大きな断層沿い、中新世の火山岩周辺など四国全域に及ぶものの、その分布に偏りがある。この偏りは、四国におけるスメクタイト生成の主要な起源が熱水変質によるものと考えられ、スメクタイト含有地盤の分布を推定するうえで、熱水変質の視点は極めて重要である。また、スメクタイトを含有する破碎帯の存在は、その断層が地下深くに連続する断層である、あるいはその破碎帯近くに大きな断層があることの現れであると捉えることが可能であり、地層処分地の評価においても重要な要素と考えられる。

3. 地すべりに関する問題

スメクタイトを含有する切土のり面や斜面では、予想外の地すべりが発生している。中央構造

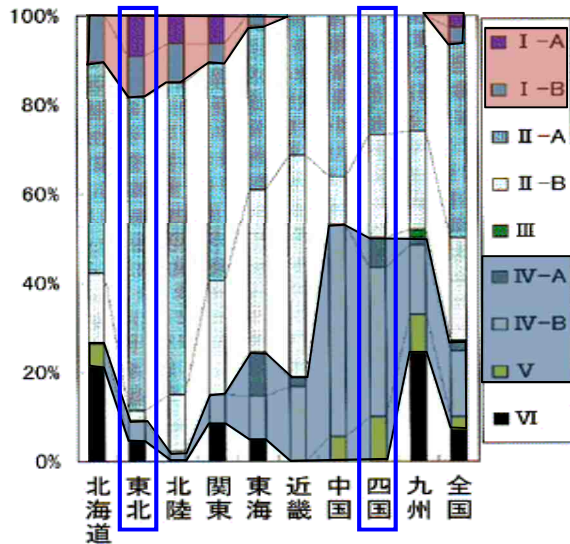


図1 地方別の類型区分の分布割合

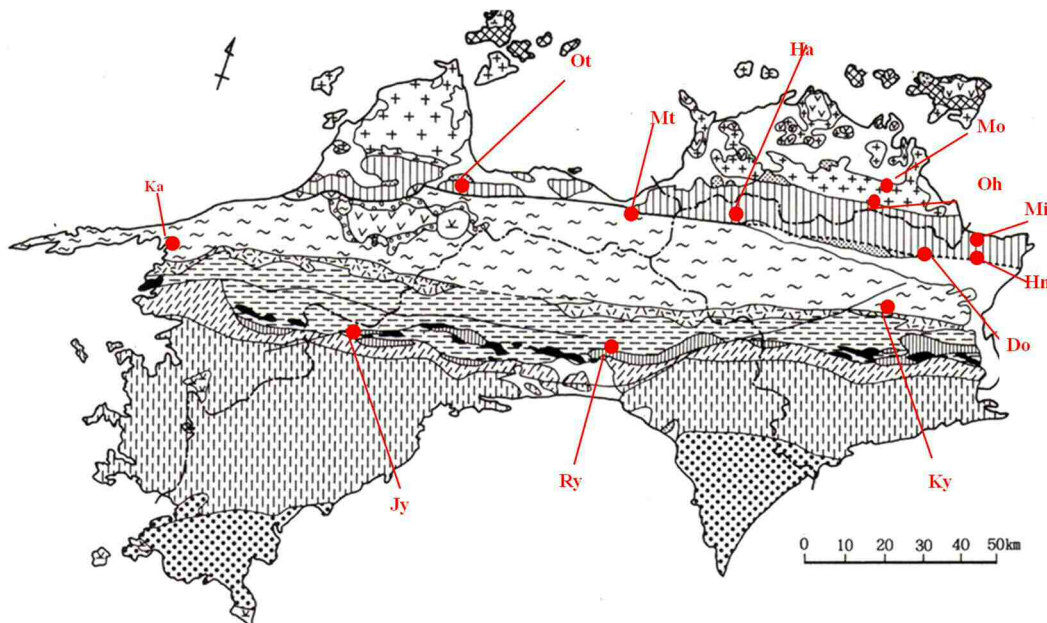
表1 低地土壌の粘土鉱物組成の類型区分

区分/亜区分	類型の名称
I $65\% \leq Sm$	
A $85\% \leq Sm$	スメクタイト土壌
B $65\% \leq Sm < 85\%$	スメクタイト質土壌
II $50\% < 2:1$ 型 ($Sm+V+Ch+It$)	
A $It < 20\%$	非伊利石質混合型土壌
B $20\% \leq It$	伊利石質混合型土壌
III $65\% \leq It$	伊利石土壌
IV $50\% \leq Kl < 65\%$	
A $20\% \leq It$	伊利石・カリウム質混合型土壌
B $It < 20\%$	カリウム質混合型土壌
V $65\% \leq Kl$	カリウム質土壌
VI	非晶質が多い 非晶質土壌

注) Sm:スメクタイト, V:パーミキュライト, Ch:クライト
It:伊利石, Kl:カリウム質物
×線回折でピークの弱いものを非晶質とした

(注: 農業環境技術研究所による全国の主要河川約200流域366地点の低地土壌の分析結果)

図1 低地土壌の地域別の粘土鉱物の分布比率⁷⁾



注): ●は事例箇所、略号は地点名

図2 四国におけるスメクタイト含有地盤(熱水変質)に起因する建設工事トラブル事例地点⁸⁾

線に沿う徳島県土成地点²⁾や香川県の田中断層に沿う切土のり面⁸⁾では、切土数年後に豪雨や地震動をきっかけとしないで地すべりが発生している(図3)。このように、スメクタイトを含有するすべりでは、切土後、数年を経過して地すべりが発生することがあり、変状の時間遅れと強度低下の問題を有している。この原因として、スメクタイトは切土による荷重の除去により数年の時間をかけて吸水膨張圧を発生し、それに伴い強度低下がおき、切土のり面のすべり発生の一因となっている可能性がある。スメクタイトの吸水膨張による強度低下の程度については、植本ほか⁹⁾により、ボーリングコアに強制的に膨潤ひずみを与え一軸、三軸圧縮試験による強度低下量を検討した事例はあるが、その評価方法については今後の研究課題である。

また、香川県の長尾断層付近¹⁰⁾や三波川南縁帯¹¹⁾の斜面では、切土時に地すべりが発生し、切り直しでも再度すべりが起きるなど、切土のり面の保全に難渋している。徳島県の蛇紋岩分布域の地すべり¹²⁾では、主すべり面の勾配が12度と極めて小さいにも係わらず、数mの大きな変位が生じた(図4)。これらの地すべりの原因は、スメクタイト粘土のせん断強度が他の粘土鉱物に比べて小さいこと、及びその残留強度も極めて小さいこと(図5)に起因するものと思われる。

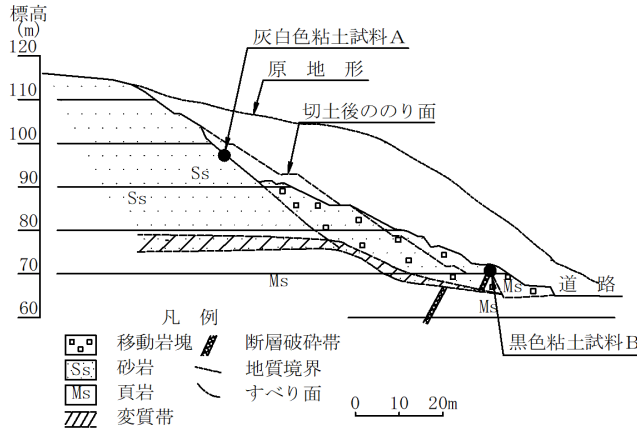


図3 和泉層群の流れ目の変質帯に沿う地すべり²⁾

このように四国地域においては、スメクタイト含有地盤では、強度低下の疑いのある地すべり、極端に低角度の地すべりなど、予想が難しい地すべりが発生している。このことから、四国地域において、斜面や切土のり面の安定性を評価するうえで、スメクタイトの有無を把握することは、重要な事項である。さらに、田村ほか¹⁴⁾はスメクタイトが持つ交換性陽イオンにより、その膨張性の違いと地すべりの平均的なすべり面勾配を示している(表2)。それによると、東北地方のグリーンタフ地域のすべり面勾配は約19度、四国地方ではスメクタイトの含有事例が少なく22~27度であることを報告している。

4. 切土地盤の盤膨れの問題

切土地盤の盤膨れ

は、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの膨潤によるケース、第三紀層泥岩などに含まれる黄鉄鉱がもととなって硫酸の生成、引き続き起きる石膏の晶出のケースなどが主要な要因として生じ

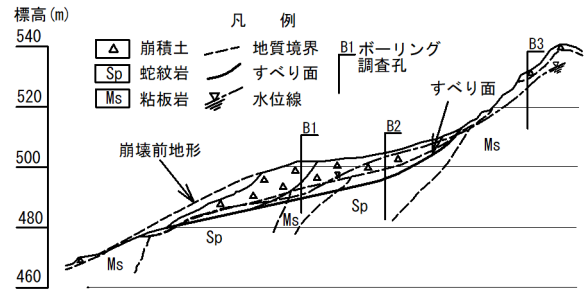
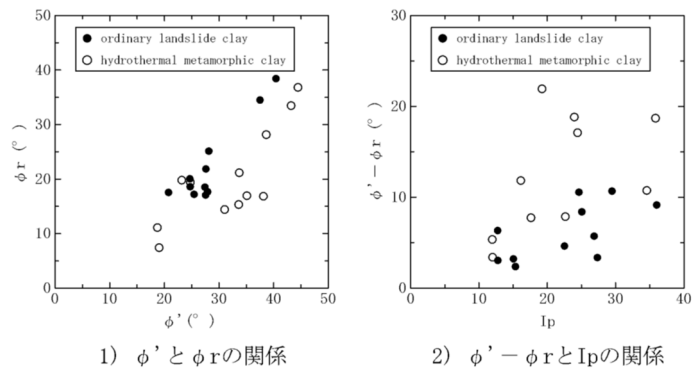


図4 スメクタイト含有地盤の低角度の地すべり(文献12)の断面を簡略化)



1) ϕ_p と ϕ_r の関係

2) $\phi_p - \phi_r$ と I_p の関係

ϕ_p : 三軸圧縮試験によるせん断抵抗角(ピーク強度)
 ϕ_r : リングせん断試験によるせん断抵抗角(残留強度)
 I_p : 塑性指数

図5 スメクタイト含有粘土のせん断抵抗角¹³⁾

表2 スメクタイトの地域特性と地すべりなど¹⁴⁾

地域	スメクタイト			地すべり		切土地盤の盤膨れ
	分布	交換性陽イオンによる分類	膨潤性	区分	すべり面勾配 ¹⁴⁾	
東北 (グリーンタフ)	広域	Na型, Ca型	大~小	第三紀層すべり	19度	大 ¹²⁾
四国 (大きな断層沿い)	局所	Ca型	小	破砕帯すべり	22~27度	小 ¹⁰⁾

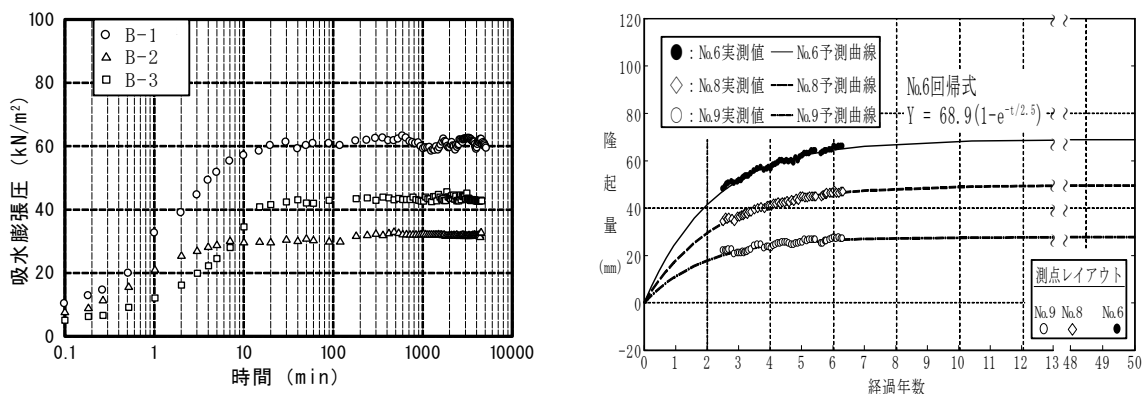
植野ほか(1998)¹²⁾: 盤膨れ量は24cm, 田村ほか(2007)¹⁰⁾: 盤膨れ量は6cm

る¹⁵⁾。

田村ほか¹⁶⁾は、三波川帯南縁の大きな断層沿いに位置する切土地盤の盤膨れ事例を報告し、(1) 盤膨れは泥質片岩を原岩とし、スメクタイトを10~15%含む固結粘土からなる破碎帯で発生した、(2) 切土による土被りの除去によりスメクタイトの膨潤を主体とする吸水膨張反応が地表から地下へと進行した、(3) 土被り圧と膨潤圧がバランスする深度まで反応が進行した、ことを明らかにした。

盤膨れが問題となった破碎帯は、熱水変質により風化が及びにくい深部までスメクタイトが生成され、切土地盤から深度8mまでの土被り圧相当の膨潤圧を有していた。このため、切土による土被り圧の解放によりスメクタイトの膨潤圧が発現したものである。

盤膨れによる地盤の変位は、図6右図に示すように数年をかけて徐々に現れ、変状の発見が遅れる恐れがある。図6左図は、径6cm、高さ2cmの不攪乱試料を用いた吸水膨張圧試験の事例を示したものである。試験では30分程度で吸水膨張が概ね終了しているが、右図の現地の膨潤の終了までにはおよそ10年程度かかる。室内試験における反応速度に比較して、現地の反応速度ははるかに遅い。これは不飽和の破碎帯が難透水地盤であり、スメクタイトの膨潤を主体とした吸水膨張反応がゆっくりと進行していたためと推定されるが、吸水膨張速度の支配要因については今後の研究課題である。



左：破碎帯粘土の吸水膨潤圧測定の結果

右：破碎帯の盤膨れの計測結果と膨れ量の予測

図6 スメクタイトを含有する破碎帯の室内試験と現地盤膨れ変位の事例¹⁶⁾

5. トンネル掘削時の大きな内空変位発生の問題

四国地方では、御荷鋤緑色岩類や黒瀬川構造帯中の蛇紋岩を源岩とする粘土にもスメクタイトが含まれることがあり、トンネル施工時に盤膨れを生じることが知られている¹⁷⁾。菅原ほか¹⁸⁾、長谷川ほか¹⁹⁾、吉田ほか²⁰⁾は、四国の中央構造線沿いのトンネル施工データをもとに、地すべりと熱水変質に着目した新たな地山区分を提案した。ここで言う熱水変質地山とは、スメクタイトの粘土細脈を伴う熱水変質を受けた地山である。それによると、内空変位が大きい傾向にある地山タイプは、熱水変質を受けているが地すべりの影響がないHタイプと、熱水変質と地すべりの両者の影響を受けたHSタイプであり、Hタイプ地山ではC等級、D等級ともに最終内空変位が50mm以上の区間が多く100mmを超えるとところも少なくはなく、HSタイプ地山も同様の傾向があるとしている。スメクタイトを伴う熱水変質を考慮した地山区分は、トンネル地山の安定性について、スメクタイトの有無によりトンネル地山の安定性を大局的に評価するうえで、重要な指標与えている。トンネル掘削による大きな内空変位の発生は、掘削による応力の再配分とスメクタイトの膨潤圧の発現とが重なっているため、地山の強度不足による変形とスメクタイトの膨潤による変

形とを識別する評価方法は今後とも研究課題である。また、切羽でC等級程度の普通程度の岩盤ながら、スメクタイトを含有する粘土細脈の膨潤により 300mmcm 程度の変形を生じた事例もある⁸⁾。なお、施工管理レベルで利用できるような、スメクタイトの有無の調査方法の開発も今後の課題である。

表1 「育ち」によるトンネル地山区分¹⁸⁾

分類項目	熱水変質	
	なし	あり
地すべり	なし	Nタイプ
	あり	Sタイプ

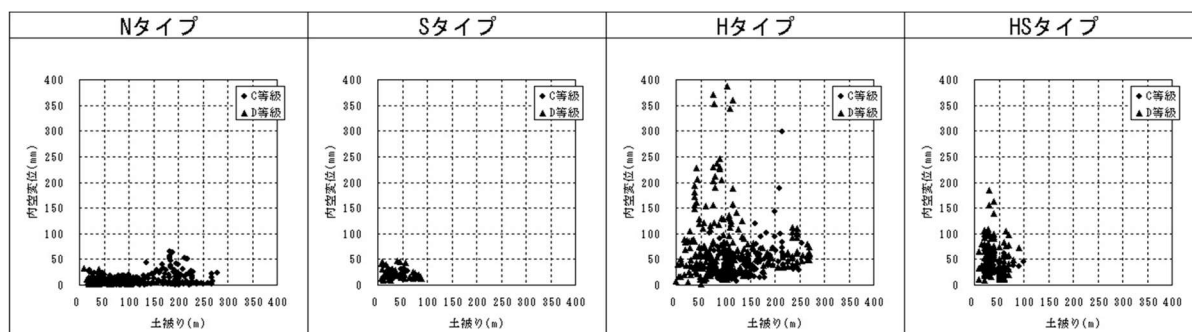


図7 地山タイプ別の土被りと最終内空変位との関係 (徳島・松山・高松道のトンネル)²⁰⁾

6. スレーキングの促進による強度低下の問題

スレーキング発生の主要因として、地盤に膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトを含有する場合が挙げられる²¹⁾。小島ほか (1984)²²⁾ はスレーキングを膨潤とスレーキングとは表裏一体の関係にあり、岩石の急速な風化の総称としている。スメクタイトを含有する場合にはスレーキングが促進され地盤の強度低下をもたらす。その結果、地すべりや崩壊、トンネルの盤膨れの問題を引き起こす。特に、トンネル地山ではスメクタイトの膨潤とスレーキングによる強度低下を招く恐れがあり注意が必要である。さらに、スメクタイトを含まない泥質岩で劈開や細かなせん断面を多くもつ場合には、応力解放によりスレーキングが促進される傾向があり注意が必要である。

7. まとめ

四国のスメクタイト含有地盤に関する諸問題は、以下のようにまとめられる。

- 1) 四国の中央構造線沿いには、中期中新世の貫入岩により、断層破碎部およびその周辺地盤に熱水変質が及んでいる。また、香川県内の田中断層沿い、長尾断層沿い、三波川帯南縁部の断層沿いなどの大きな断層、中新世の火山岩周辺も同様である。熱水変質作用が及んだ地盤には、膨潤性を有するスメクタイトが生成されている。スメクタイト含有地盤の分布には偏りがある。今後、四国地域におけるスメクタイト分布図の作成が必要と考える。
- 2) スメクタイト含有地盤では、強度低下の疑いのある地すべり、切り直しが必要となるような地すべり、極端に低角度の地すべりなど、予想が難しい地すべりが発生している。
- 3) スメクタイトを多く含有する地盤では、切土による土被りの除去をきっかけとして盤膨れが生じることがある。盤膨れは、数年をかけて徐々に発現するため、変状の発見が遅れる問題がある。
- 4) 熱水変質の影響が及んだ地山は内空変位が大きい傾向があるため、スメクタイトを伴う熱水変質を指標とする地山区分は、トンネル地山の安定性を大局的に評価するうえで重要な指標を与える。特に、熱水変質地山のC等級と判定した切羽においても内空変位が100mmを超え、300mmに達する事例もあり、特に、注意が必要である。

- 5) スメクタイトの含有は岩盤のスレーキングを促進させるため、特にトンネル地山で注意が必要である。
- 6) 上記のように、スメクタイト含有地盤には様々な応用地質的問題をはらんでいるため、重要構造物や斜面の地盤評価にあたっては、スメクタイトの有無の調査が重要であり、これらの問題を認識した調査、設計が必要と考える。また、スメクタイトの有無の簡便な調査方法の確立が望まれる。

引用文献

- 1) 佐藤 努(1994):緩衝材候補材料としてのベントナイトの多様性と変化性, 日本原子力学会, vol. 36, no. 5, p. 405-412.
- 2) 田村栄治ほか (2007): 中央構造線沿いの熱水変質に起因する地すべり, 地すべり, vol. 44, No. 4, p. 1-16.
- 3) 宮地和夫・都築芳郎 (1988): 愛媛県砥部地区、万年および上尾陶石鉱床の生成に関与した熱水変質作用, 粘土科学, vol. 22, No. 4, p. 183-199.
- 4) 吉村尚久編著 (2001): 粘土鉱物と変質作用, 地学団体研究会地学双書 32, pp. 293.
- 5) 吉村尚久 (2003): 続成作用と粘土鉱物, 粘土科学, vol. 42, no. 3, p. 167-173.
- 6) 長谷川修一 (2002): 四国の地質現象の黒幕としての中期中新世珪長質火成岩体, 日本応用地質学会, 平成 14 年度研究発表会講演論文集, p. 23-26.
- 7) 農業環境技術研究所IP閲覧 (2020.9 閲覧): わが国の低地土壌における粘土鉱物組成の類型化と地域的特徴, 農業環境技術研究所 HP, 1977 作成.
- 8) 田村栄治ほか (2004): 四国における熱水変質帯に起因する建設工事トラブル事例, 愛媛大学・地盤工学会四国支部, 地盤災害・地盤環境問題論文集, 第 4 巻, p. 39-46.
- 9) 植本直之ほか (1988): 膨潤性地山における変動挙動と対策工の効果, 土と基礎, vol. 36, no. 5, p. 43-48.
- 10) 筒井信博ほか (1988): 長尾断層沿いの熱水変質帯と崩壊のり面の調査事例, 平成 10 年度応用地質学会中国四国支部研究発表会論文集, p. 1-4.
- 11) 末峯 章 (1998): 結晶片岩地域の予測しがたい地すべりの事例, 地すべり, Vol. 34, No. 4, p. 27-34.
- 12) 田村栄治ほか (2006): 土石流が発生した蛇紋岩地すべりの調査と対策, 日本地すべり学会関西支部現地討論会『徳島県那賀町における 2004 年土砂災害』, 日本地すべり学会関西支部, p. 27-67.
- 13) 矢田部龍一 (1999): 四国の地すべり粘性土の強度特性, 地盤工学会四国支部 40 周年記念論文, 四国の地すべり, p. 115-134.
- 14) 田村栄治・長谷川修一 (2008): 四国地方における熱水変質起源のスメクタイトの交換性陽イオン組成, 日本応用地質学会 平成 20 年度研究発表会講演論文集, pp. 59-60.
- 15) 田村栄治 (2019): 盤膨れの発生要因, 日本応用地質学会中国四国支部編・応用地質 Q&A 中国四国版, 土-5, 1-26-1-28.
- 16) 田村栄治ほか (2007): 結晶片岩中のスメクタイト含有破砕帯の膨潤特性と隆起メカニズム, 応用地質, vol. 48, No. 2, p. 80-89.
- 17) 土木学会 (1992): 軟岩評価—調査・設計・施工への適用, p. 130-137.
- 18) 菅原大介ほか (2003): 和泉層群における実用的なトンネル地山分類, 日本応用地質学会, 平成 15 年度研究発表会講演論文集, p. 53-56.
- 19) 長谷川修一 (2004): 熱水変質地山ではトンネル地山評価を 2 度間違う, 日本応用地質学会研究発表会講演論文, p. 23-26.
- 20) 吉田幸信ほか (2006): トンネルの地山挙動を予測する和泉層群の岩盤特性区分, 応用地質, vol. 47, no. 2, p. 77-87.
- 21) 田村栄治ほか (2019): スレーキングの諸問題, 日本応用地質学会中国四国支部・令和元年度研究発表会発表論文集, p. 9-14.
- 22) 小島圭二ほか (1984): 軟岩の膨潤・スレーキング特性 (その 1) —簡易試験による評価—, 応用地質, vol. 25, no. 1, p. 10-22.