

酸化鉄の濃集及び砂泥互層がスレーキングを伴う表層崩壊に与える影響

— 島根半島新第三系泥質岩層を例として —

Effect of Ferric Oxide Concentration and Alternation of Sandstone and Mudstone beds on the Surface Collapse with Slaking in Neogene Pelite beds, Shimane Peninsula

和田佳記 Yoshiki WADA (島根大学大学院総合理工学研究科)
 増本 清 Kiyoshi MASUMOTO (島根大学総合理工学部)

スレーキングを伴う表層崩壊の予測精度を高めることを目的として、島根半島の新第三紀層の内、淡水成の古浦層、海成の成相寺層、牛切層、古江層のスレーキングを起こしている泥質岩露頭について観察した。その中で一軸圧縮強度、CIA(化学的風化指標)、砂泥互層の傾斜、酸化鉄の濃集割合を見積もり、スレーキングを伴う表層崩壊の程度を表すと考えられる斜面勾配との相関について定量的に検討を行った。その結果、一軸圧縮強度、CIAは斜面勾配との相関が低かった。古浦層露頭における砂泥互層では、いずれも地層の傾斜が緩く、露頭の勾配が急に保たれている可能性がある。成相寺層、牛切層、古江層における酸化鉄の濃集割合は斜面勾配との相関が高く、酸化鉄が多く濃集していれば斜面を安定させる要因になると考えられる。

キーワード：スレーキング、表層崩壊、酸化鉄、砂泥互層 (IGC: F02)

1. はじめに

堆積性軟岩を扱う土木工事の現場ではスレーキング現象が要因となって起こる切土の急速な風化、地すべりなどの斜面不安定化が問題となっている。このような問題に対してはスレーキングを伴う崩壊・斜面の長期安定性の予測を行い、適切な対策を行うことが重要になる。これらの問題を解決するために、既往の研究として軟岩における多様なスレーキング特性、要因の研究^{1)~3)}とスレーキング特性を評価する室内試験の提案^{4)~6)}が行われている。

また、増本他⁷⁾⁸⁾は島根半島における新第三紀層の古浦層泥岩(淡水成)と成相寺泥岩(海成)を用いて堆積環境の違いが崩壊に与える影響を室内スレーキング試験によって検討し、定性的に壊れ方の違いを示している⁷⁾。さらに壊れ方の違いを客観的に評価するために、室内スレーキング試験によって崩壊した泥岩岩片の形状・大きさの違いと崩壊過程の違いを定量的に評価をしている⁸⁾。しかし、これらは室内試験のみによる評価であり、実際の露頭でのスレーキングを伴う崩壊の評価までには至っていない。

実際、島根半島のスレーキングを起こしている露頭でも斜面勾配が大きく、スレーキングを伴う表層崩壊を起こしていないと考えられる露頭が見られる。そのため、スレーキングを伴う表層崩壊はスレーキングだけではなく他の要因が大きく影響している可能性があり、表層崩壊の評価、予測を行うためには露頭における諸条件を考

慮に加える必要があると考えられる。すなわち、露頭の一部の岩石のみで行う室内スレーキング試験だけでは適切な崩壊・長期安定性の予測、判断を行うことは難しいと考えられる。

そこで、まだ未解明であるスレーキングメカニズムの中で露頭における崩壊に着目し、スレーキングを伴う表層崩壊の予測をより精度高く行うことを目的とした。本研究では、露頭における表層崩壊に関係すると考えられる要因が崩壊に及ぼす影響を定量的に検討した。

2. スレーキングを起こしている露頭の表層崩壊要因

島根半島の新第三紀層である古浦層、成相寺層、牛切層、古江層の泥質岩露頭の内、スレーキングを起こしており、植生の影響の少ない露頭を対象として観察を行った。そのため、スレーキングを起こしていない露頭は対象外とした。古浦層は主に淡水成で、成相寺層、牛切層、古江層

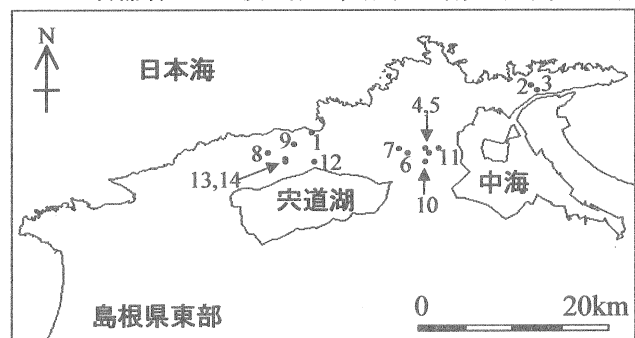
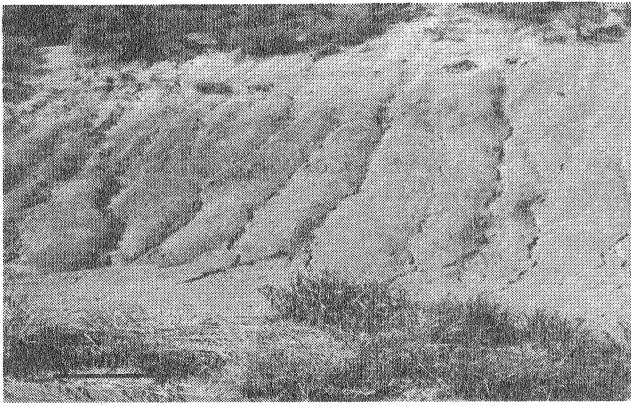
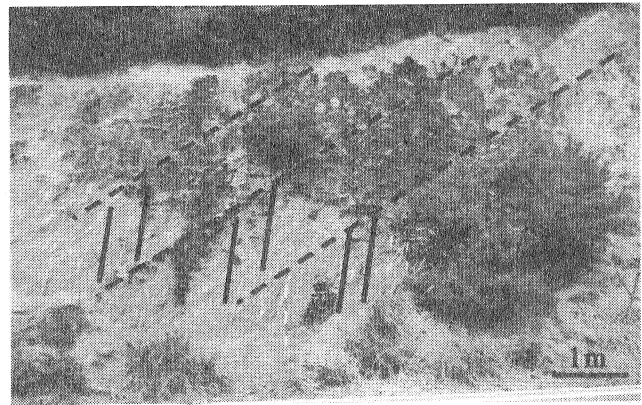


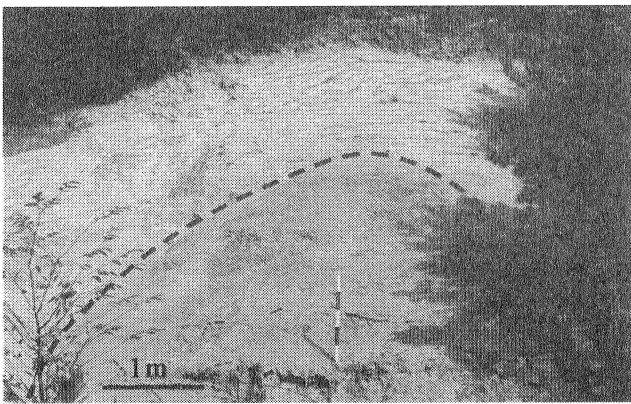
図-1 島根半島と露頭の位置



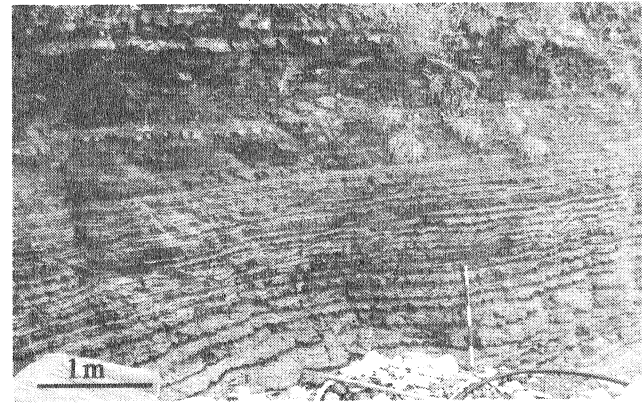
(a)ガリー侵食：スレーキングによって細片化した岩片が落下せずに斜面に残っているため、ある部分の岩片が優先的に流されてガリーを形成している。



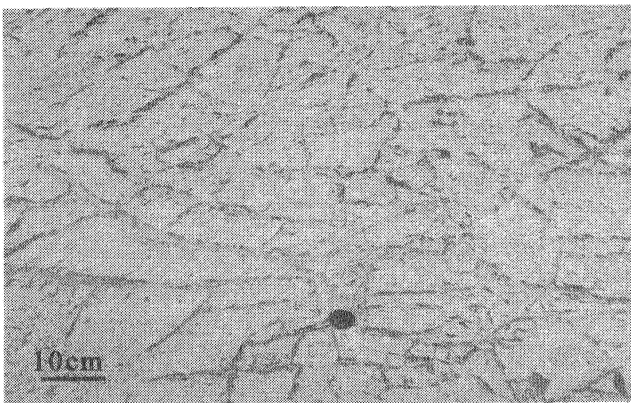
(b)露頭スケールの節理,割れ目(実線:割れ目,点線:走向傾斜) :スレーキングによる数 cm の割れ目の他に露頭スケールの数十 cm~数十 m の割れ目が存在している。



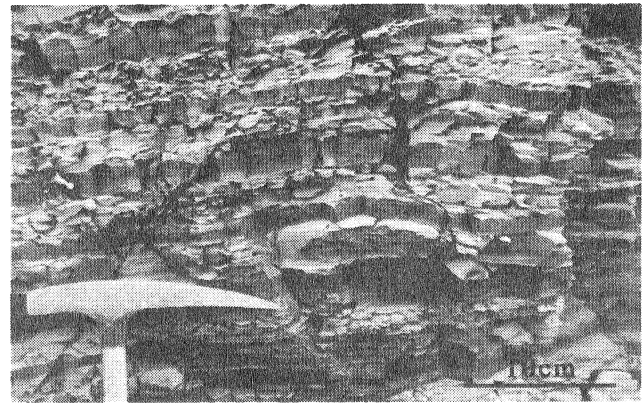
(c)選択的風化：同じ露頭内で化学的風化の程度が異なる状態で、明らかに風化が選択的に進行している。写真では点線付近で黒色と明褐色に分かれている。



(d)砂泥互層：スレーキングの崩壊の形状が異なる砂岩と泥岩からなる互層で、数 cm~十数 cm で繰返し重なっている。



(e)酸化鉄の濃集：露頭表面の割れ目に酸化鉄が充填している状態で、網目状に発達している場合もある。



(d)砂泥互層拡大：灰色で塊状に割れているのが泥岩、黒褐色でブロック状に割れているのが砂岩である。

写真-1 スレーキングを起こしている露頭の表層崩壊に関連した要因

は海成とされている⁹⁾。今回観察した露頭の位置を図-1に示す。図-1中の番号は表-2の露頭番号と対応している。これらの露頭ではスレーキングを伴う表層崩壊において影響しそうなスレーキング以外の要因のことを表層崩壊要因と呼ぶ。代表的な表層崩壊要因としてガリー侵

食・露頭スケール(数十 cm~数十 m)の節理, 割れ目・選択的風化・酸化鉄の濃集・岩相の崩壊形状が異なる砂泥互層が見られた(写真-1)。ここで述べた選択的風化とは、露頭における化学的風化の不均質性を定性的に見て明らかに判断できる状態を表している。例えば、露頭内で黒

色の泥岩と明褐色の泥岩に分かれ、明らかに選択的に風化が進行していると判断できる露頭も見られる(写真-1(c)). また、ここで述べた酸化鉄の濃集とは露頭で見られる褐色の物質が脈状に濃集したものである。その褐色の物質はXRF分析(蛍光X線分析)による主成分分析を行うことによって酸化鉄が約20~40wt%濃集したものであることがわかった(表-1)。XRF分析とは、X線を用いて試料を構成する元素の定性、定量分析を行う化学分析である。酸化鉄以外の主成分分析結果では、牛切層Alの差が見られるが顕著な差は見られなかった。その他にも、塩類析出と思われる結晶や、パイピングと思われる穴、水ミチ、そして小断層などが見られた。これらを表-2にまとめる。表-2の○は露頭全体に見られる場合、△は露頭の一部にしか見られない場合を示している。○、△の判断は定性的に行った。砂泥互層は淡水成である古浦層露頭だけでみられ、ガリー侵食は海成である成相寺層、古江層の露頭だけで見られた。また、酸化鉄の濃集は海成の成相寺層、牛切層、古江層の露頭のみ多く濃集しているのが見られた。酸化鉄が濃集している露頭ではガリー侵食は起こっていないという傾向も見られた。このように、スレーキングを起こしている露頭の表層崩壊要因は淡水成である古浦層の露頭と海成である成相寺層、牛切層、古江層露頭で傾向が異なることが見られた。そこで、このような定性的な判断で検討した露頭における表層崩壊要因が、スレーキングを伴う表層崩壊の要因であるかどうか定量的に検討するために露頭における表層崩壊要因の計測を行った。

表-1 XRF分析による主成分分析結果

Element	成相寺層		牛切層		古江層	
	酸化鉄	泥岩	酸化鉄	泥岩	酸化鉄	泥岩
SiO ₂	60.16	82.96	39.54	75.09	60.36	74.32
TiO ₂	0.48	0.50	0.43	0.81	0.59	0.78
Al ₂ O ₃	11.54	12.40	10.68	17.92	13.56	17.87
Fe ₂ O ₃	21.83	0.91	37.41	2.36	20.30	2.94
MnO	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	0.80	0.50	0.72	0.84	1.01	1.05
CaO	0.08	0.09	0.04	0.08	0.08	0.09
Na ₂ O	0.41	0.63	-0.06	0.40	0.43	0.57
K ₂ O	2.01	1.44	1.99	2.78	2.02	2.59
P ₂ O ₅	0.17	0.03	0.62	0.02	0.25	0.06
Total	97.48	99.46	91.38	100.30	98.61	100.29

表-2 スレーキングを起こしている露頭における表層崩壊要因

代表露頭	A	B	C	D	E	F	G	H	I	表層崩壊要因
1 古浦層1		△			○	△			△	
2 古浦層2					○					
3 古浦層3			△	○	△				△	
4 成相寺層1	○	△			△				△	
5 成相寺層2	○	△			△	△	△			
6 成相寺層3	○	△			○				△	
7 成相寺層4	△	○			△				△	
8 成相寺層5		○			○					
9 成相寺層6		○			△					
10 成相寺層7		△	○		△					
11 牛切層1		△	○		○					
12 古江層1	○	△			△					
13 古江層2		△	○		○					
14 古江層3	△	△	○		△					

3. 露頭における表層崩壊要因の計測方法

3.1 計測項目

露頭におけるスレーキングを伴う表層崩壊とその要因との関係について調べるために、スレーキングを伴う表層崩壊の程度を表していると考えられる斜面勾配(露頭の傾斜)と各表層崩壊要因との相関をみる。計測した表層崩壊要因は以下の通りである。

- ・ 一軸圧縮強度：露頭表面における岩石の強度で、針貫入勾配(NP)を用いて換算したものである。
- ・ CIA：露頭を構成する岩石の化学的風化の程度を表す化学的風化指標である。
- ・ 砂泥互層の傾斜：淡水成の古浦層露頭で見られた砂泥互層の傾きである。水平からの角度を表している。
- ・ 酸化鉄の濃集割合：海成層の露頭表面における酸化鉄の濃集している面積の程度を表している。ここでいう濃集とは露頭表面の割れ目等に風化によって酸化鉄が充鎮していることとする。

3.2 計測方法

3.2.1 斜面勾配

クリノメータと走向版を使用し各露頭の傾斜を測定し

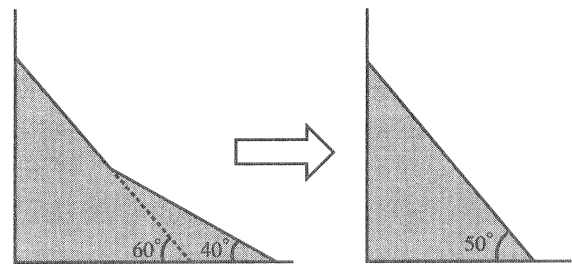


図-2 斜面勾配のイメージ

た。各露頭で最大値と最小値と思われる箇所をそれぞれ1~3箇所測定した。その中から最大値と最小値をそれぞれ選定し、その平均値が各露頭の平均勾配を表すものとした(図-2)。なお、斜面の正確な勾配を求める場合にはより精密な測定方法が必要と考えられるが、今回は斜面における崩壊の特徴を表すと考えられる最大値と最小値の平均を指標とした。

3.2.2 一軸圧縮強度

対象の露頭はスレーキングを起こしており露頭表面において規定の大きさの泥岩塊¹⁰⁾を採取するのが困難である。そのため、露頭表層の強度を計測するのに一軸圧縮試験を行うことは現実的ではない。そこで、露頭表面において針貫入試験{(株)丸東製作所の軟岩ペネトロメータSH-70)を行い、針貫入勾配(NP:kgf/mm)を求め、NPと一軸圧縮強度(q_u:kgf/cm²)の相関図を用いて一軸圧縮強度

(q_u)を求めた。なお、この相関図は(株)丸東製作所が天然岩石 114 個,セメント処理試料 50 個を使用して作成したものである。相関図における q_u と NP の関係式は(1)式である。

$$\log q_u = 0.9781 \log NP + 1.599 \quad (1)$$

淡水成泥質岩の露頭は泥岩と砂岩の NP を 6~8 箇所,海成泥岩の露頭は泥岩部分と酸化鉄部分の NP を 8~58 箇所計測し一軸圧縮強度を求め,その平均を各露頭の一軸圧縮強度とした。以下では,一軸圧縮強度の単位は kPa に換算した。

3.2.3 CIA(化学的風化指標)

露頭において泥岩塊,泥岩片を採取し,XRFにより主成分元素分析を行い,その結果を用いて(2)式より CIA を算出した。

$$CIA = \frac{Al}{(Al + Na + Ca + K)} \times 100(\%) \quad (2)$$

CIA とは,風化過程で最も安定な Al_2O_3 を分子に置き三種の可動陽イオン Ca, Na, K の減少で風化度を表し,長石類と各種粘土鉱物の割合の変化を反映している。CIA が大きいほど化学的風化が進行しているといえる。泥岩塊,泥岩片の採取箇所は,各露頭において定性的に見て色彩が異なり化学的風化の程度が異なると考えられる 1~3 箇所である。その泥岩の CIA の平均を各露頭の CIA とした。

3.2.4 砂泥互層の傾斜

砂岩層と泥岩層の傾斜を測りパラメータとし,クリノメータと走向版を用いて計測した。測定箇所は 2~5 箇所である。その傾斜の平均を各露頭における砂泥互層の傾斜とした。

3.2.5 酸化鉄の濃集割合

露頭表面の酸化鉄の濃集程度を表すために以下の手順で酸化鉄の濃集割合を算出し,パラメータとした。(写真-2) ①露頭全体を写真に撮る。露頭全体が撮れない場合は分割して撮った。

②頭全体を 50×50cm 四方のセルに分割する。この際,セルの分割は鉛直・水平方向に行い,斜面勾配などは露頭の面積に考慮していない。

③分割したセルが植生などに覆われている,また,露頭境界などで,各セルの 50%以上露頭が見えていない場合はそのセルを露頭の面積から除いた(写真-2 で塗りつぶされている格子)。残ったセルを露頭の面積とする。

④露頭の面積のセル内に一部でも酸化鉄が濃集していれば,酸化鉄が濃集している面積とする。これらより,酸化鉄の濃集割合を(3)式より求めた。

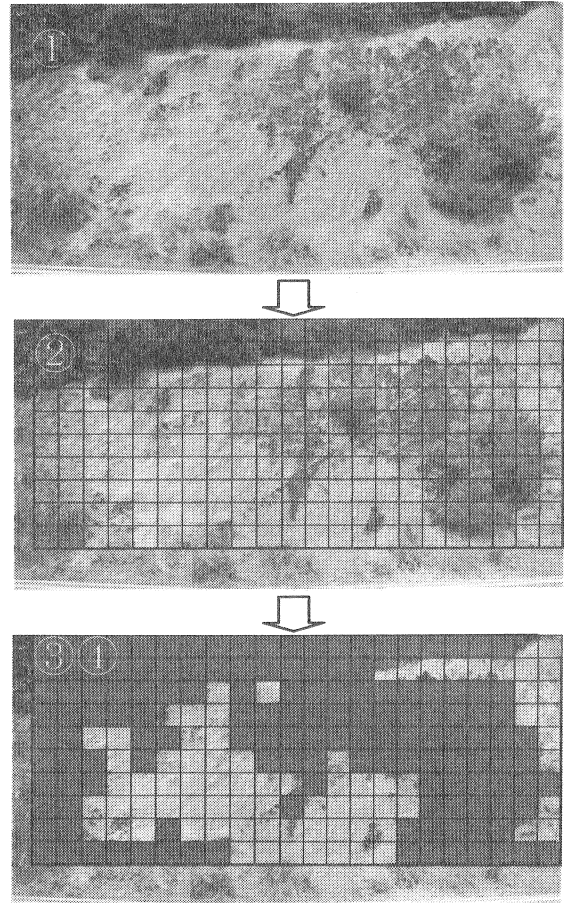


写真-2 海成層露頭における酸化鉄の濃集割合の算出例

$$\text{濃集割合} = \frac{\text{酸化鉄が濃集した面積}}{\text{露頭の面積}} \times 100(\%) \quad (3)$$

4. 結果および考察

古浦層 3 露頭,成相寺層 7 露頭,牛切層 1 露頭,古江層 3 露頭の計 14 露頭において,スレーキングを伴う表層崩壊の程度を表すと考えられる各露頭の斜面勾配と各露頭の一軸圧縮強度, CIA, 砂泥互層の傾斜, 酸化鉄の濃集割合についての相関性を定量的に検討した結果を以下に示す。

4.1 一軸圧縮強度

古浦層 3 露頭,成相寺層 7 露頭,牛切層 1 露頭,古江層 3 露頭の計 14 露頭の斜面勾配と一軸圧縮強度との相関性を検討した。斜面勾配と一軸圧縮強度との相関は $R^2=0.41$ である(図-3)。また,1 露頭だけ一軸圧縮強度が 15400 kPa と突出している。これはこの露頭が海岸の露頭で比較的新鮮であること,砂泥互層の露頭なので泥岩より q_u の高い砂岩を含んでいるためと考えられる。斜面勾配と一軸圧縮強度は低い相関を示しており,露頭表層の泥質岩の一軸圧縮強度はスレーキングを伴う表層崩

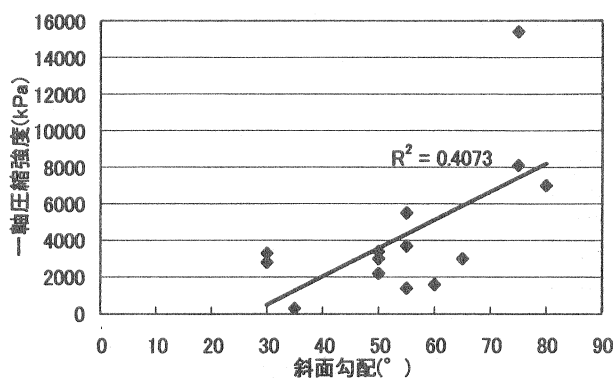


図-3 一軸圧縮強度と斜面勾配(14露頭)

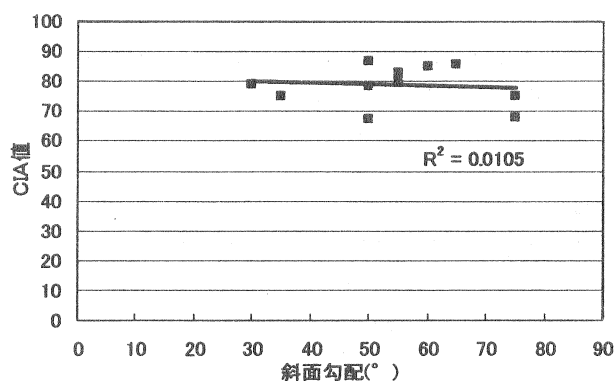


図-4 CIAと斜面勾配(12露頭)

壊れに及ぼす影響は少ないと考えられる。しかし、スレーキングを起こしている露頭は露頭スケールでの強度が低下していると考えられる。そのため、より精度の高い予測を行うためには露頭スケールでの強度パラメータが必要と考えられる。

4. 2. CIA(化学的風化指標)

古浦層 2 露頭, 成相寺層 6 露頭, 牛切層 1 露頭, 古江層 3 露頭の計 12 露頭の斜面勾配と CIA との相関性を検討した。古浦層 3, 成相寺層 2 は露頭で泥岩塊が採取できなかったため除いた。斜面勾配と CIA との相関は $R^2=0.01$ である(図-4)。斜面勾配と CIA はほとんど相関がない。泥岩自体が化学的風化をおこしていてもスレーキングを伴う表層崩壊にはほとんど影響がないと判断できる。

4. 3 砂泥互層の傾斜

淡水成である古浦層 3 露頭で検討した。斜面勾配と地層の傾斜との相関は $R^2=0.49$ である(図-5)。3 露頭の斜面勾配との相関は低いが、個数が少ないため相関性があるかどうかは断定できない。しかし、すべての露頭で緩い地層の傾斜を示し、斜面勾配が急に保たれている傾向がみられる。また、もう一つの斜面を急勾配に保つ要因として古浦層泥岩のスレーキング性による岩石の崩壊形態と考えられる。古浦層泥岩のスレーキング性は増本他⁸⁾によって大きな亀裂が生じて徐々に崩壊し、形状は塊状

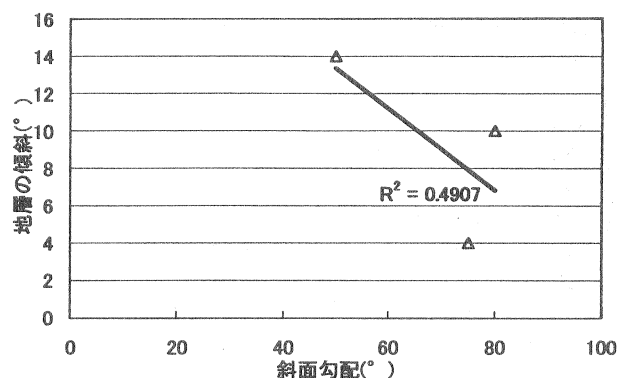


図-5 淡水成層の砂泥互層の傾斜と斜面勾配(3露頭)

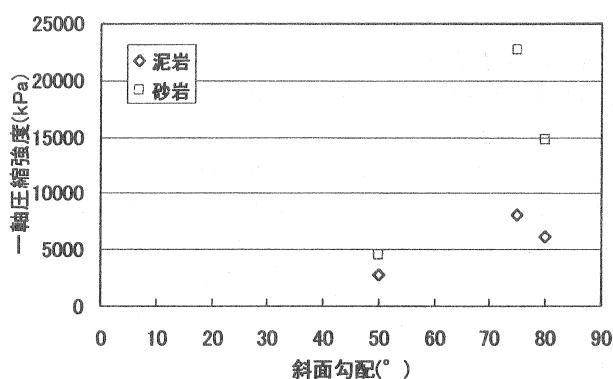


図-6 淡水成層の砂岩, 泥岩の一軸圧縮強度(3露頭)

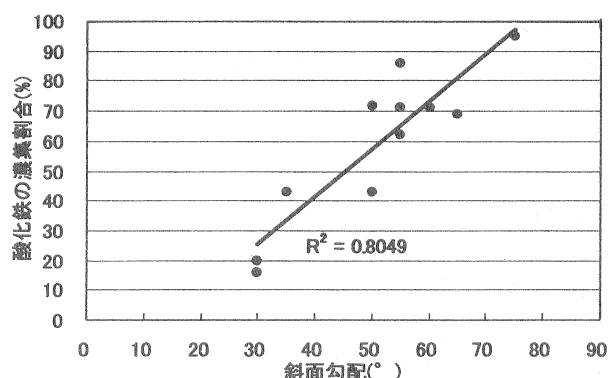


図-7 海成層の酸化鉄の濃集割合と斜面勾配(11露頭)

であることが定量的に示されている。それと図-6より一軸圧縮強度もかなり高い値を示している。すなわち、古浦層泥岩は塊状(数 cm)に壊れ、一軸圧縮強度も高いことが示された。これらのことより、古浦層泥岩で緩く砂泥互層を成している場合はスレーキングを起こしても比較的大きな岩片であり、それが重なり合うことによって割れていても落下せずに自らを支えるようにして急な勾配を保っていると考えられる。しかし、スレーキングを起こしているため降雨や地震のような誘因によって一気に落下する可能性が考えられる。今後予測を行う上で、スレーキングを伴う表層崩壊と合わせて崩落についての検討も必要であろう。

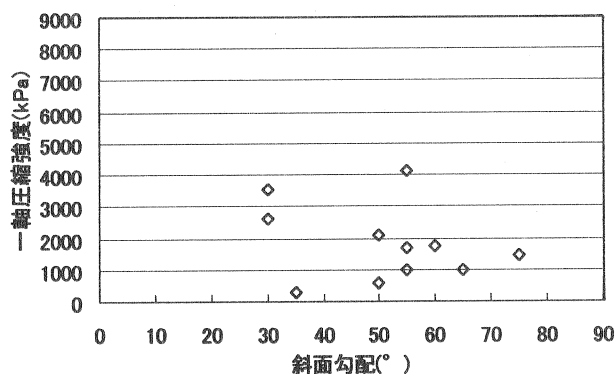


図-8 海成層の泥岩の一軸圧縮強度(11 露頭)

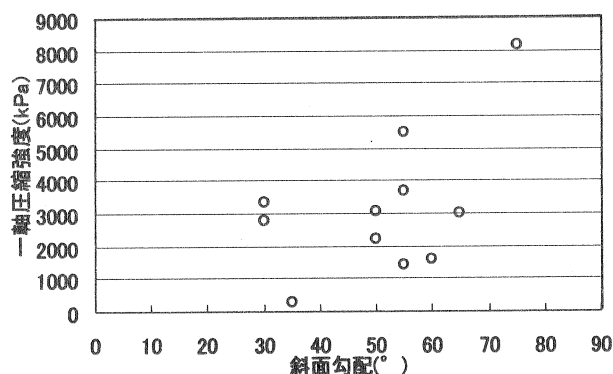


図-9 海成層の酸化鉄の一軸圧縮強度(11 露頭)

4.4 酸化鉄の濃集割合

海成である成相寺層 7 露頭, 牛切層 1 露頭, 古江層 3 露頭の計 11 露頭の斜面勾配と酸化鉄の濃集割合との相関性を検討した。斜面勾配と酸化鉄の濃集割合の相関性は $R^2=0.81$ となった(図-7)。このように比較的高い相関があるために, 海成泥岩の露頭では, 酸化鉄の濃集割合がスレーキングを伴う表層崩壊に及ぼす影響は大きいと考えられる。さらに, 海成泥岩だけの一軸圧縮強度は斜面勾配に関係なくほぼ一定の値を示している(図-8)。しかし, 酸化鉄の一軸圧縮強度は泥岩の強度より高く, 斜面勾配の大きい露頭では一軸圧縮強度がかなり高い酸化鉄も見られる(図-9)。これらより, 泥岩より強度の高い酸化鉄が濃集することによってスレーキングを伴う崩壊に影響し, スレーキングを伴う表層崩壊を妨げている要因となっていると考えられる。

5. まとめ

島根半島新第三紀層である古浦層, 成相寺層, 牛切層, 古江層の泥質岩の内, スレーキングをおこしている露頭の観察を行い, 各露頭においてスレーキングを伴う表層崩壊に関する要因として一軸圧縮強度, CIA, 砂泥互層の傾斜, 酸化鉄の濃集割合を算出した。この 4 つの表層崩壊要因とスレーキングを伴う表層崩壊の程度を表すと考えられる露頭の斜面勾配との相関性を定量的に検討した。その結果を以下に列記する。

- (1)一軸圧縮強度, CIA はスレーキングを伴う表層崩壊と相関性がほぼないことが示された。
- (2)淡水成である古浦層露頭では緩い傾斜をもつ砂泥互層が斜面を急勾配に保っている可能性が示された。
- (3)海成である成相寺層, 牛切層, 古江層露頭では泥岩より一軸圧縮強度の高い酸化鉄が濃集することによって斜面勾配を大きく保ち, 斜面を安定させていると考えられる。
- (4)スレーキングを伴う表層崩壊の予測モデルは淡水成泥岩露頭と海成泥岩露頭で分けて考えることにより, 精度の高いモデルを構築できる可能性がある。

今後は露頭のデータを考慮し, 露頭での崩壊メカニズムを加味することによってより精度の高い崩壊モデルを構築していきたいと考えている。

謝辞

島根大学の山内靖喜名誉教授には調査地点に関するご助言をいただいた。沢田順弘教授には XRF の使用方法をご指導いただいた。横田修一郎教授, 三瓶良和教授には試料, 分析についてのご助言をいただいた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 山口晴幸, 吉田廣太郎, 黒島一郎, 福田誠: 泥岩のスレーキング特性, 土木学会論文集/III-11, pp.17-26, 1989.
- 2) 杉井俊夫, 木村努: 岩の水分特性曲線とスレーキング特性の関係, 第 47 回地盤工学シンポジウム, pp.321-326, 2002.
- 3) 石田良二, 西川総明: 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-, 粘土科学, Vol.32, No.2, pp.97-107, 1992.
- 4) 土木学会: 軟岩の調査と試験の指針(案), pp.64-72, 1991.
- 5) 岩の力学連合会: ISRM 指針, Vol.1, pp.21-24, 1982.
- 6) 日本道路公団: KODAN 111-1975 岩の乾湿繰返し試験法, 日本道路公団土木工事試験方法, 1975.
- 7) 増本清, 亀井健史, 三枝暁弘, 佐藤貴史: 頁岩のスレーキング特析に及ぼす堆積環境と試験条件の影響, 地盤と建設, Vol.20, No.1, pp.93-102, 2001.
- 8) 増本清, 北島涼子: 島根半島新第三系泥岩のスレーキングによる破壊形態とその定量評価, 地盤と建設, Vol.21, No.1, pp.121-126, 2003.
- 9) 猪木幸男, 村上允英, 大久保雅弘: 日本の地質 7 中国地方, 共立出版, pp.115-117, 1988.
- 10) 土木学会: 軟岩の調査と試験の指針(案), pp.36-38, 1991.

(2004年7月30日 受付)