

動態観測による古第三紀層切土法面における地すべり発生機構解析

Mechanism Analysis of Paleogene Landslide Based on Multi Observation

張 永杰 Yongjie ZHANG (株式会社リクチコンサルタント)
青木 正延 Masanobu AOKI (株式会社東建ジオテック山口支店)
萩原 秀雄 Hideo HAGIWARA

山口県油谷地域の古第三紀泥岩砂岩互層分布域において広域農道の4段切土法面が計画された。切土法面に分布する地層の層理面は30度の流れ盤であったので、切土法面末端からの層理面すべりを想定してアンカー工が計画・実施された。逆巻き施工で上から3段目のアンカー工を施工したときに、法面に変状が発生した。そこで、応急対策工を実施しつつ、当初調査の見直しと追加調査を実施したところ、当初予測より深いすべりが確認された。この深いすべりの対策工として、増しアンカー工が立案・設計され、法面工は無事完成した。

本報告は変状発生後の調査とその結果に基づき解析した地すべり発生機構をまとめたものである。

キーワード：アンカー、地盤伸縮計、地すべり、ロードセル、孔内傾斜計（IGC：C-7, E-6, K-14）

1. 調査地の概要

調査地は、第三紀層地すべり地帯として有名な山口県油谷半島に位置し、小起伏丘陵（油谷丘陵）で特徴付けられる。調査地の南には中起伏山地が東西に連なり、標高300～500mの開析の進んだ晩壮年期の地形を示している。その北側は十楽-貝川断層線によって穏やかな油谷丘陵と明瞭に区分される。

調査地の地質は、図-1に示したように古新第三系の日置層群峠山累層に属し、砂岩と泥岩を主体とする。また周辺には断層が多く、先に述べた十楽-貝川断層線のほかに、北西-東南方向の断層が発達する。

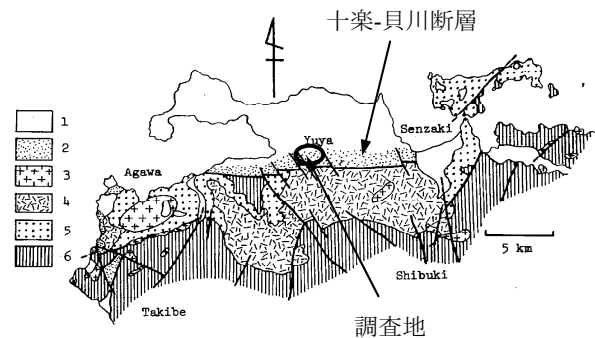


図-1 調査地周辺地質図¹⁾ 1：第四系・新第三系, 2：古第三系, 3：貫入火成岩類, 4：日置層群峠山累層, 5：青山層, 6：関門層群及び古生界

2. 調査結果

2.1 変状切土法面の地質状況

(1) 地層分布

現地踏査の結果により、調査区間の測点 No.507～No.512間における地質を図-2にまとめた。

調査地の地層は表層の崖堆積物・上位砂岩・中位泥岩・下位砂岩の4層に分けられる。

中位泥岩は、灰色泥岩主体で、オリーブ色凝灰岩層と厚さ約5cm程度の炭層を挟んでいる。

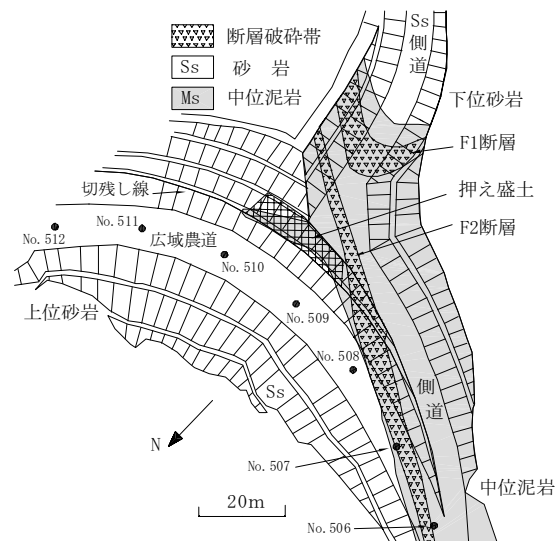


図-2 切土法面の地質図

(2) 断層分布

調査地には図-2 に示すとおり、F1 (下位断層) と F2 (上位断層) が認められた。

F1 (下位断層) : 側道の測点 No.1 付近の路面と両側法面には下位から上位へ炭層・凝灰岩・オリブ色泥岩・凝灰岩の層序がみられる。そのうち、凝灰岩は見かけ上厚さ 40 cm の層状を示しており、直径 5 mm 以下の粒状となっている。法面に露出する炭層は厚さ 5 mm 以下の薄片状を示す。

F2 (上位断層) : 測点 No.506~No.509 間は切土法面に断層岩が見られる。その特徴として、①地層の乱れがみられる。特に炭層はせん断され、その走向・傾斜が著しく変化している。②岩石は礫状・片状を示している。③鏡肌と条痕が目立つ (写真-1) などが挙げられる。断層面は走向 N66° W, 傾斜 26° N を示している。



写真-1 断層角礫岩及び鏡肌

2.2 法面変状

変状法面の状況は、写真-2~9 のとおりである。変状の履歴と位置を図-3 に示す。2001 年 6 月に上から 3 段目切土完了後のアンカー工事中に、A 法面の法枠目地の開口と側道法枠天端に開口幅 5 mm のクラックが確認された。変状発生後、応急措置として押え盛土が実施された (写真-3)。その後 7 月と 10 月に本線に面する後背部側道にクラックが発生した。

炭層が分布する箇所

クラック (写真-5 参照)

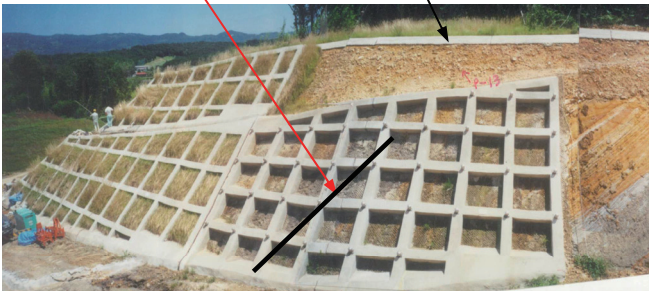


写真-2 側道の左側法面 (A 法面の後背部)

クラック (写真-6 参照)

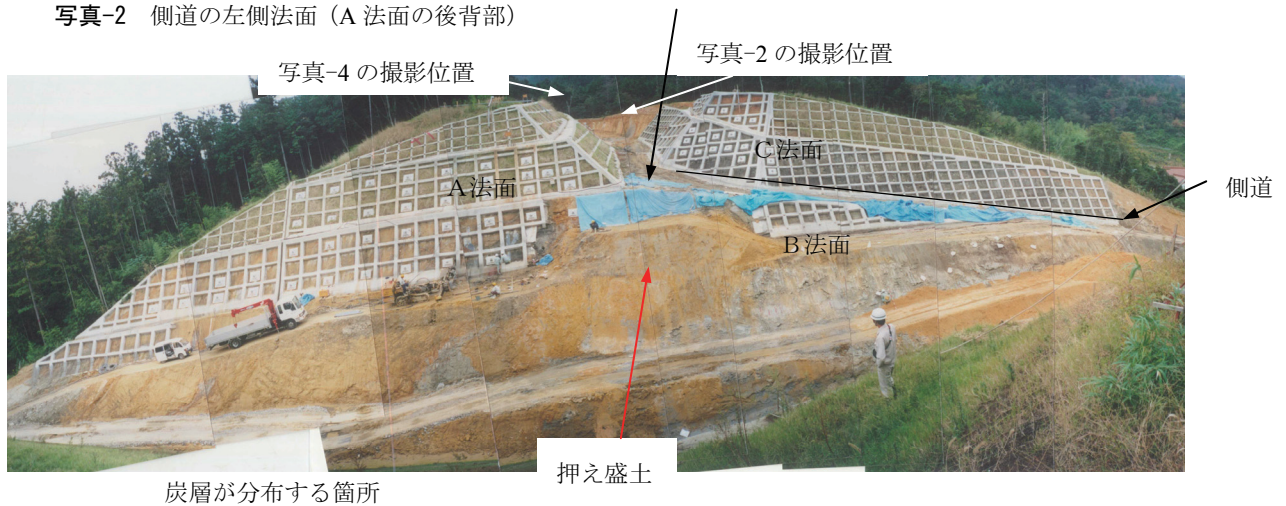


写真-4 の撮影位置

写真-2 の撮影位置

A 法面

C 法面

B 法面

側道

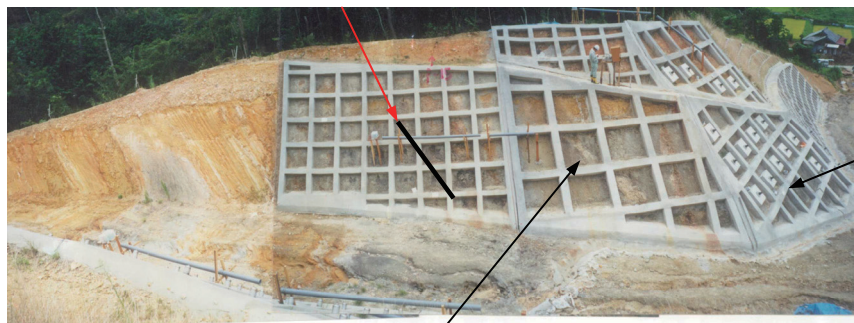
炭層が分布する箇所

押え盛土

写真-3 切土法面全景

C 法面

写真-4 側道の右側法面 (C 法面後背部)



C 法面切土時に発生したすべり面 (写真-11 参照)



写真-5 側道東側法面天端付近のクラック：
開口幅 5mm 程度



写真-7 B法面の切残し部No.507～No.509+10付近に及ぶ
クラック：最大開口幅 10cm 程度

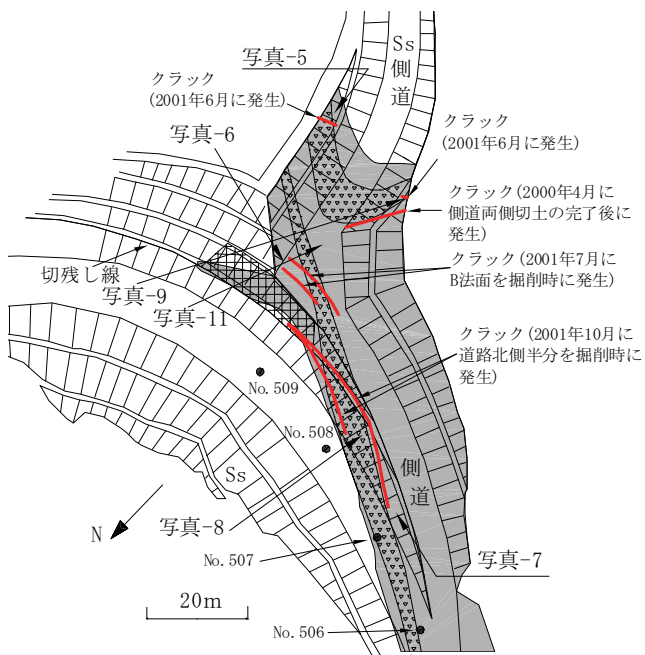


図-3 クラック位置図



写真-8 写真-7の一部の接写：断層面に沿って発生した
クラックの最大開口幅 10cm 程度
(断層面の走向・傾斜：N74°W・30°N)



写真-6 広域農道後背部の側道に発生するクラック：
最大開口幅 5cm 程度



写真-9 クラックの最大開口幅 1cm 程度

2.3 ボーリングコア

変状発生後、図-4 に示す位置で計 4 本の調査ボーリングを実施した。

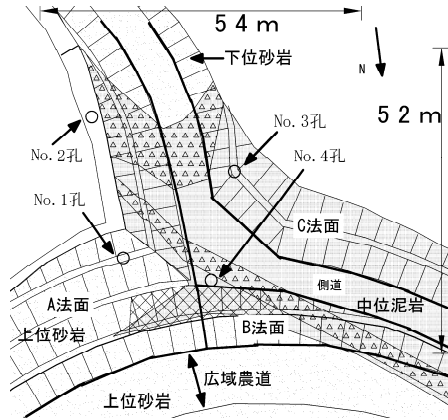


図-4 ボーリング位置図

ボーリングコアは鏡肌、条痕、直径数 mm の角礫状を示すことより以下の深度で断層岩が確認されている。

No.1 孔：

5.40~7.50 m 間と 9.55~12.50 m 間 (9.55~11.90 m 間はオリブ色泥岩, 11.90~12.50 m 間は炭質泥岩)

No.2 孔：

5.50~6.60 m 間 (6.49~6.51 m 間は炭層)

No.3 孔：

3.25~9.00 m 間 (3.55~5.85 m 間はオリブ色泥岩, 6.20~7.00 m 間は炭質泥岩)

No.4 孔：

2.50~4.00 m 間と 5.75~11.35 m 間 (5.75~8.00 m 間はオリブ色泥岩, 8.00~9.00 m 間は炭質泥岩)

以上のコア中の断層岩は、深い位置の断層岩と浅い位置の断層岩に二分できる。深い位置の断層岩はオリブ色泥岩と炭質泥岩を含む。これらの断層岩は地表踏査で確認した下位断層と上位断層のものであると考えられる。

写真-10 に示すように、No.1 孔の DL-9.8~10.4 m 間は砂礫状コアとなっており、9.1~11.9 m 間に凝灰岩層を挟む。



写真-10 No.1 孔のコア写真

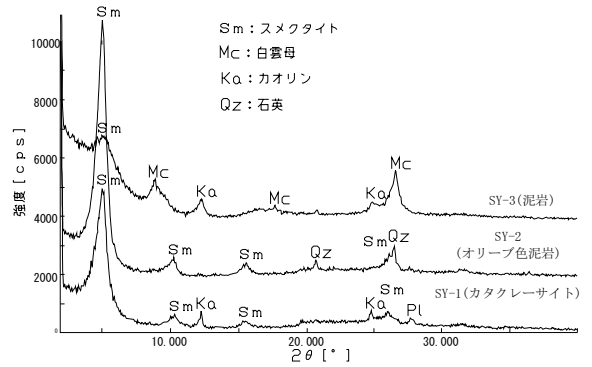


図-5 定方位試料のエチレングリコール処理後の X線回折パターン

2.4 中位泥岩の構成鉱物

No.1 孔から写真-10 に示す位置の 3 試料 (SY-1~3) を採取し X 線分析を行った。図-5 に示す X 線回折結果より、カタクレーサイト SY-1 とオリブ色泥岩の試料 SY-2 は、膨脹性鉱物スメクタイトを主体とすることがわかった。試料 SY-3 は、スメクタイトの量は低く、白云母の量が高いことが特徴である。

薄片観察で SY-1 と SY-2 は凝灰質に富み、SY-3 は凝灰質でないことがわかった。試料 SY-1, SY-2 の順に岩片の量が減り、基質の量が増える。岩片は 1 mm 以下の安山岩や軽石が多く、まれに砂岩が観察される。岩片が結晶より多い。基質は、火山灰で主にガラスからなり、脱ガラス化してさらに粘土鉱物に変質している。基質は岩片と結晶がほぼ等量である。

SY-3 は暗灰色で粘土鉱物と少量の不透明鉱物からなる。

2.5 動態観測

動態観測の内容と位置は図-6 のとおりである。観測結果を表-1~2 と図-7~10 に示す。

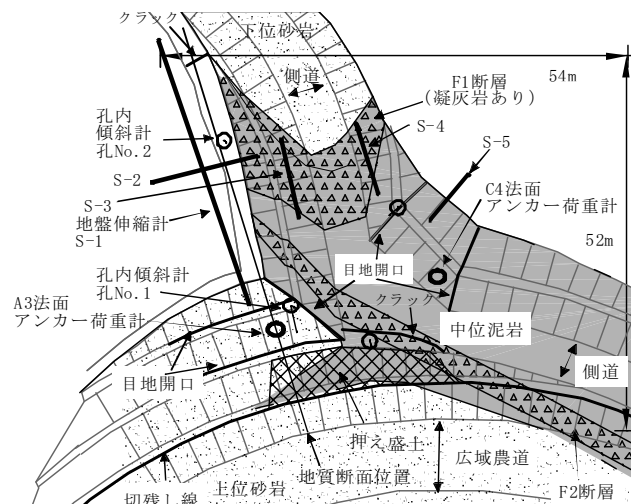


図-6 動態観測位置図

(1) 地盤伸縮計による地表変位

表-1 に示すように、A 法面の S-1～S-2 は圧縮変位を示した。A 法面の S-3 と C 法面の S-4～S-5 は全体的に引張変位を示し、S-3 は最も大きい変位を示した。

表-1 地盤伸縮計による地表変位

箇所	番号	変位量 (mm)	変位方向
A 法面	S-1	3	圧縮
	S-2	6	圧縮
	S-3	13	引張
C 法面	S-4	6	引張
	S-5	7	引張

①地表変位と降雨の関係

地表変位は、全体に降雨期の引張と乾燥期の収縮の繰り返しを示す (図-7 参照)。

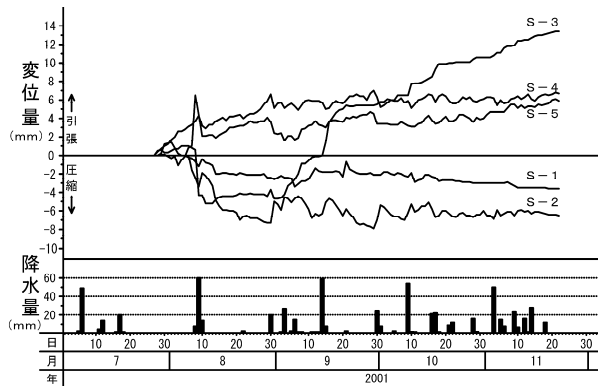


図-7 地盤伸縮計による地表変位

これは、凝灰岩層がスメクタイトに富んでいるため、乾湿による膨張と収縮の繰り返しという特徴を反映したものである。

②地表変位とアンカー施工の関係

図-7 に示すように、地盤伸縮計 S-1, S-2 では、8月上旬にアンカー (図-10 に示す A3-C-7) 施工に伴って、急速に圧縮変位を示した。S-3 では、8月中～下旬に緩やかな圧縮変位を示し、8月末～9月中旬の降雨に伴って累積 12 mm の引張変位が確認された。

(2) 孔内傾斜計による地中変位

孔内傾斜計の観測結果を図-8～9 と表-2 に示す。その特徴は以下のとおりである。

- ①No.1 と No.3 孔では、浅い箇所と深い箇所の変位が観測された (図-8)。浅い箇所の変位は側道側へ振れているが、深い箇所の変位方向は本線に向く方向となっている。
- ②No.2 孔での変位方向は側道側へ振れている。
- ③No.4 孔での変位方向は本線に向く方向となっている。
- ④No.1 孔の GL-10.0 m 付近で 9 mm の累積変位が得られた。そのうち 9月 1～20 日間に 4 mm の累積変位があった (図-9)。

No.1 孔の GL-10.0 m 付近での急激な変位は地盤伸縮計 S-3 の変位と一致する。

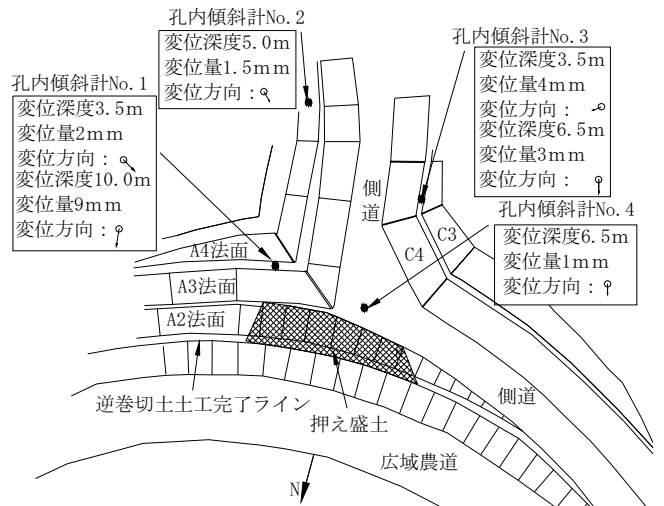


図-8 孔内傾斜計による地中変位の深度と方向

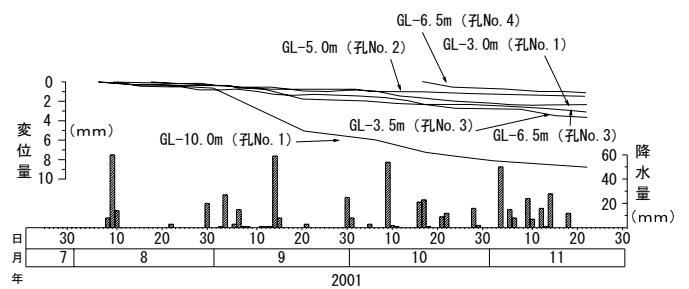


図-9 孔内傾斜計による地中変位の推移

表-2 各孔の変位深度と変位量

Bor. No.	変位深度 (GL-m)	累積変位 (mm)	対応する地層	観測期間
No.1	3.0～3.5	2	砂岩と泥岩の境界	8/9～11/22
	9.5～10.5	9	泥岩中の断層岩	8/9～11/22
No.2	5.0～5.5	2	炭質泥岩	8/9～11/22
	3.0～4.0	4	凝灰質泥岩	8/9～11/22
No.3	6.5～7.5	3	泥岩中の断層岩	8/9～11/22
	1.0～3.0	1	泥岩	10/17～11/22
No.4	5.5～7.5	1	泥岩	10/17～11/22

(3) アンカー荷重

図-10 に示すように、A3 法面に 1 箇所 (A3-C-7)、C 法面に 1 箇所 (C4-1-1) のアンカー荷重計を設置した。

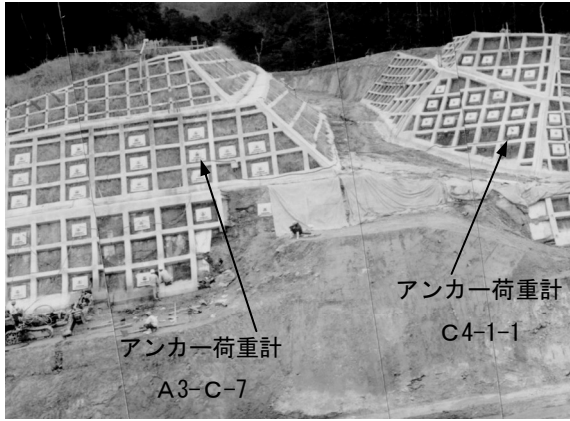


図-10 アンカー荷重計設置位置図

図-11 に示すように、A3 法面の荷重計は、8 月 22 日に最大荷重 223.1 kN を示し、9 月 16 日まで断続的に設計値 (210 kN) を上回った荷重を示した。その後 198.0~211.0 kN 程度に変化している。C4 法面の荷重計はほぼ設計荷重 (186 kN) 以下で漸増している。

アンカー荷重と降雨および地表・地中変位の関係は以下のとおりである。

①アンカー荷重と降雨の関係：アンカー荷重は降雨期間に上昇する (図-11)。

②アンカー荷重と地表変位・地中変位の関係：A3 法面の荷重計は地表変位・地中変位の急激変位期間に設計値超過の荷重を示したが、その後地表変位と地中変位が続いているにもかかわらず、荷重は増加しなかった (図-11, 16 参照)。

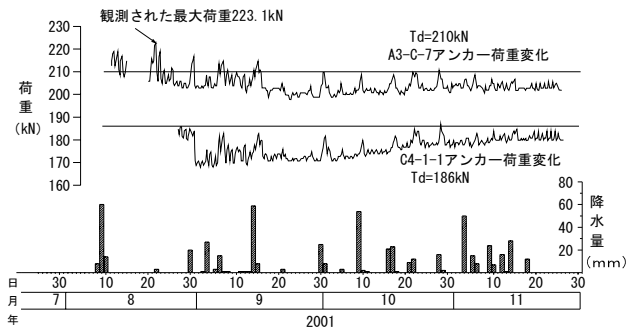


図-11 アンカー荷重の推移

3. 地すべり機構解析

3.1 地すべりブロック区分

調査範囲内には3つの地すべりブロックの存在が考えられた (図-12 参照)。

(1) 全体地すべり：もっとも深い深度をすべり面とし、側道を挟む A, C 法面を含む地すべりブロック。

(2) A 法面表層すべり：A 法面に限定され、すべり面は浅い。

(3) C 法面表層すべり：C 法面に限定され、すべり面は浅い。

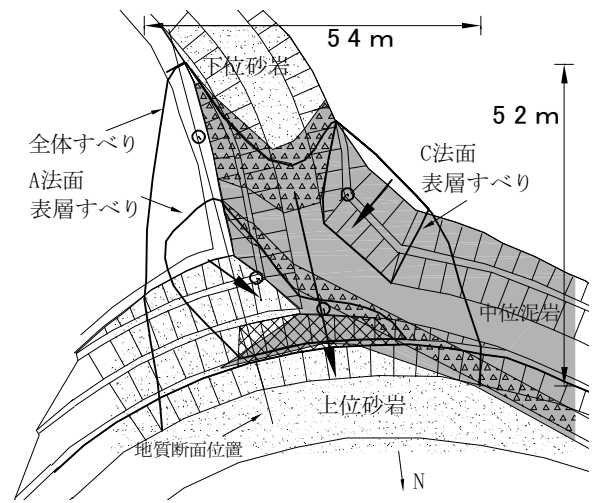


図-12 地すべり区分

地すべり区分はクラックの位置・法枠目地開口範囲・地中変位深度より、以下のように行った。

(1) 全体地すべり

①孔内傾斜計観測

孔内傾斜計で確認された A 法面のすべり面を図-13 に示す。A 法面では No.1 孔 (地すべり中央部) の GL-10 m と No.2 孔 (地すべり頭部) の GL-5.0 m で確認された変動が本ブロックのすべり面である。

C 法面では No.3 孔の GL-7 m で確認された変動がすべり面である。No.3 孔は No.2 孔と同じく地すべり頭部付近に位置しており、変動量は No.1 孔に比べると小さい。

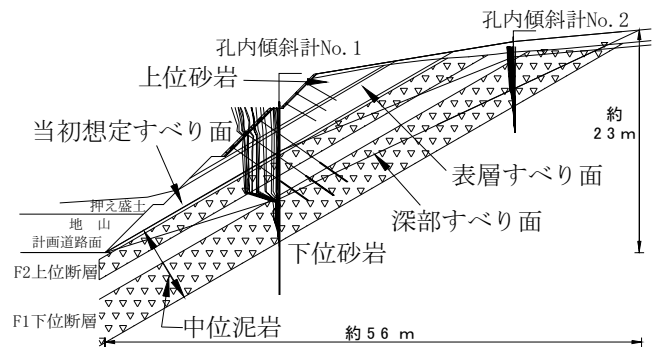


図-13 A 法面の解析断面

②地盤伸縮計

A 法面側に断層帯底面を挟んで設置した地盤伸縮計 S-3 は明瞭な引張り変動を示した。この結果は、孔内傾斜計の変動状況と一致している。一方、C 法面側でも断層帯基底

面を挟んで地盤伸縮計（S-4）を設置したが、明確な変動は示さなかった。この結果は、C法面側の孔内傾斜計観測孔（No.3孔）の変動量が小さかったことを反映していると考えられる。

③断層帯と法肩部のクラック

写真-5と写真-9に示す側道両側法面の法肩付近に認められたクラック位置を頭部位置とした。孔内傾斜計で本ブロックのすべり面として変動を確認した深度はすべてF1断層およびF2断層を含む断層帯内に位置し、すべり面がこの断層帯中を通過することは確実である。側道の路面では断層帯の基底位置を確認できたが、この延長は側道両側法面にも追跡でき、この位置をすべり面頭部位置とした。

末端部位置は明確ではないが、法尻（道路面）位置とした。側部には明瞭なクラックがないため、側部範囲を限定することは難しい。このため、地表面クラックや法枠目地部の開口が認められる領域も参考にして範囲を想定した。

(2) A法面表層すべり

孔内傾斜計では、No.1孔のGL-3.5mで微小な変動を記録した。すべり面は層理面に沿うため、その延長位置を末端部位置とした。

(3) C法面表層すべり

C法面すべりは切土時に発生した層理面すべり面である(写真-11)。孔内傾斜計では、No.3孔のGL-3.5mで微小な変動を記録した。



写真-11 C法面の切土時に発生した表層すべり
(写真位置は図-3に示す)

3.2 地すべり発生機構

地すべり発生機構を図-14に示す。

当初想定すべり面は、掘削が道路面まで達していなかったこともあり、この間に活動は認められなかった。しかし、掘削の進行とともに、打設アンカーの先端部付近を通過する新たなすべりが発生した(図-13と図-15)。

すべり面は断層帯内にあり、頭部付近よりもブロック中央部での変位量が大きかった。これは、ブロック中央部から順次頭部方向へせん断帯が進展していく「進行性すべり」であることを反映している可能性もある(末端部の変位量は不明)。

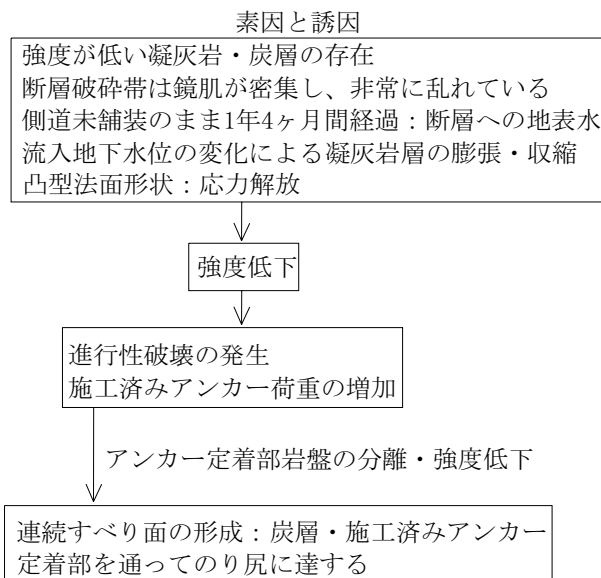


図-14 地すべりの発生過程

当初想定したすべり面位置より深い位置にすべりが発生した原因としては以下のことが考えられる。

(1) アンカー工の拘束効果

アンカー工の打設により、アンカー周辺の領域が圧縮拘束され、せん断歪みが深い位置に追いやられた。すべり面は図-15に示すようにアンカー定着部末端付近を通過しているが、施工したアンカーが引張り型アンカーであるため、定着部の先端部には応力が伝搬しにくく、拘束効果が低かったためと考えられる。

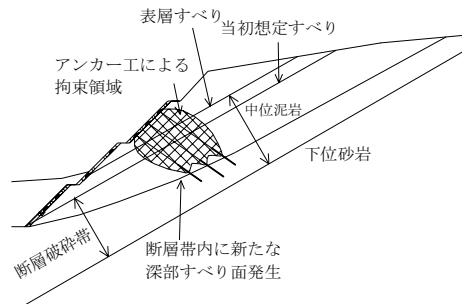


図-15 アンカー工拘束によるすべり面の深部への転移
(A法面)

(2) 断層破碎帯の影響

断層破碎帯は鏡肌を伴うせん断帯を内在している。せん断帯そのものは比較的硬質であるが、鏡肌面の引張り強度が極端に低いために、掘削に伴う応力開放によって面が分離した可能性がある。これらが「先行する傷」となり、進行性破壊ですべり面は徐々に形成したと考える。

(3) 連続すべり面の形成

図-16 中の GL-10.0 m (No.1) の変位量推移から、連続すべり面は 9 月上旬の連続降雨期間に形成したと考える。8 月にアンカー工打設の効果で、A 法面では、圧縮地表変位を示した。その後 9 月上旬の連続降雨により、アンカー荷重は設計値以上となり、A 法面に急激な変位が発生した。

(4) 既設アンカー工の抑止効果

A 法面では、連続すべり面の形成に伴って地表変位と地中変位は拡大しているにもかかわらず、アンカー荷重は設計値付近に推移しており、効いている状態にある。この原因は、アンカー拘束部が一体性を保ちながら移動していることが考えられる。

No.3 孔のすべり面は浅い箇所 (GL-3.5 m)、深い箇所 (GL-6.5 m) とともに変位量が 4 mm 以下と小さい。これは、①C 法面付近の全体すべりの移動土塊が側道の構築のため多く除去されたこと、②C 法面のアンカーは断層帯で深い安定した砂岩に定着しておりアンカー拘束で大きな変位が発生しなかったことが考えられる。

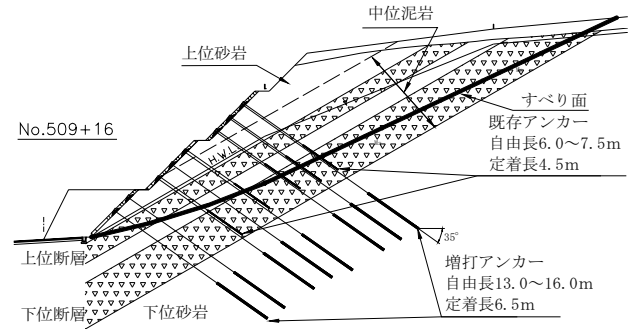


図-17 対策工計画 (A 法面)

5. おわりに

第三紀層の切土法面の設計において、緩い流れ盤の層理があれば、法尻からの層理面すべりを予測し、その対策を計画することはしばしばある。しかし、本事例では施工途中に想定より深い位置にすべり面が形成され、変位が発生した。

変位発生後の動態観測を中心とした調査により、想定より深いすべり面が形成された原因は、掘削による応力解放、断層破碎帯の存在および打設されたアンカー工の拘束効果によるものであることが明らかになった。第三紀層における切土法面の設計はあらゆる条件を考慮し、切土に伴う新規すべり発生の可能性とその対応策を検討しなければならない。今回の変位発生およびその後の調査・解析は一つの参考になると考える。

謝辞

本業務の実施にあたり、山口県日置農林事務所農村整備部の桂昭二氏と中野英之氏のご指導とご協力をいただいた。ここで深くお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 山口県立山口博物館：山口県の地質, p. 137, 1975
- 2) 社団法人地盤工学会：斜面の安定・変形解析入門, p. 11, 2006.

(2010 年 6 月 27 日 受付)

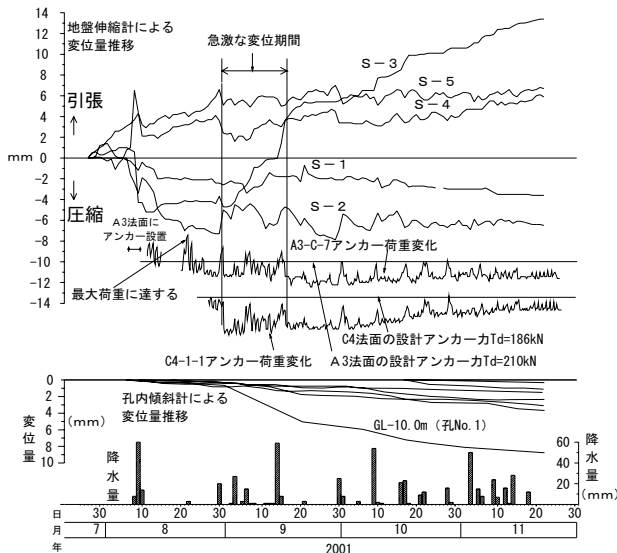


図-16 推定すべり形成時期

4. 対策工

対策工は、図-17 に示すように深いすべりを対象にした増し打ちアンカーとした。増し打ちアンカーの定着部は断層破碎帯を避け、断層破碎帯で深い硬質な下位砂岩層とした。増し打ちアンカーは、2001 年 10 月中旬から施工を開始し、2002 年 9 月までに完了した。その後、変位の進行はみられない。