

長大法面掘削の際に生じた変状 — 初生地すべりの視点からみる —

独立行政法人水資源機構 阪元恵一郎

1. はじめに

法面掘削の際に変状が生じた事例は、過去いくつもある(本論では、変状とは「掘削法面において有害な変形が生じ、その安定を確保するために当初計画していなかった何らかの対策が必要となった法面の變形現象のこと」をいう)。これら変状の経緯や挙動実態を「初生地すべり」の視点で改めて見直してみると、初生地すべりについて何らかの示唆が得られると考えられる。本論では、特に法面規模が大きく、変状発生前から以降の経過や挙動観測結果がよく把握されているダム建設時における長大法面掘削の際の変状事例を紹介するとともに、初生地すべりに関して今後取り組むべき課題について述べるものである。本論が本シンポジウムにおける一つの議論の材料となれば幸いである。

なお、掘削法面においては、一般に上載荷重の除荷によって必ず「応力解放による変形」が生じる(この「変形」とは、本論でいう「変状」ではなく、法面安定上問題とならない、いわゆる単純なリバウンドによる動きのこと)。この「応力解放による変形」の大小は、除荷量に左右されるため、法面が長大であるほど「応力解放による変形」は一般に大きい。従って、この変形の量がある限界レベルを超えたり、単純なリバウンドの方向と異なる有害な方向に生じることによる変状は、崩壊などの極端な土塊の移動を伴う変状を除いて法面が長大であるほど顕著である。ゆえに、長大法面掘削の際の変状は、生じうる現象や挙動が顕著で捉えやすいという利点があるため、本論で紹介するものである。

2. A 法面

2.1.1 法面の概要

A 法面はダム堤体材料採取により生じた残壁法面である。掘削深さは最深部で約 130m、最終的な法面は、北山と南山の大きく 2 つからなり、法高約 300m、法長 400m 以上、平均勾配 38°である。

地質は中生代白亜紀の花崗岩に新生代第三紀の流紋岩が貫入し、みかけ流紋岩中に花崗岩が板状に挟まれる構造をなしている。両者の地質境界の走向は法面と鋭角で斜交し、傾斜は鉛直ないし貯水池側(斜面下方向)への高角度である(傾斜は法面勾配よりも急角度)。A 法面の地質断面図を図-1 に示す。

2.1.2 変状の経過と機構

掘削開始後、法高約 100m が掘削され(掘削深さ約 60m)越冬した後、図-2 に示す法面表面での変状が生じた。変状は、法面に地層と同方向の亀裂と段差(最大約 80cm)が出現し、その段差には山側が高いものと谷側が高いものとの 2 つがあった。また、南山法面(図-2 の右側の法面)には、法面上方に滑落崖状の段差が現れた。

この変状に対し、切り直しとロックボルト工による対策が行われ、掘削が継続された。その後、法高約 250m までの掘削が終了した時点で、開口亀裂や法枠の圧縮・引張破壊が生じた。このため、ロックボルトの増設ならびに PC アンカー工の施工が行われた。このような安定化対策完了後、法面は安定を保っている。

このような変状を生じた本法面の変状機構は、以下のように考えられている(図-3)。

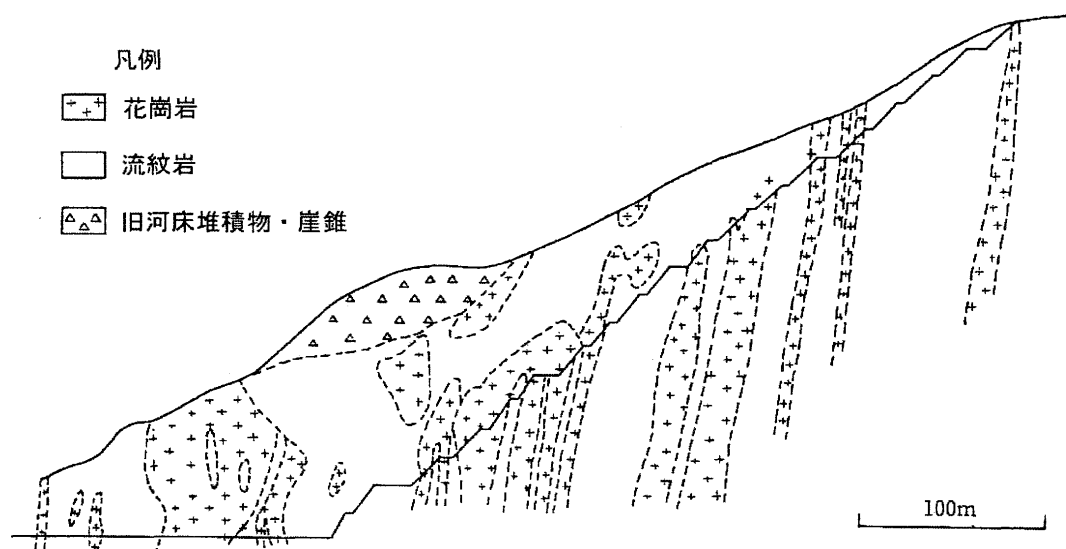


図-1 A 法面地質断面図

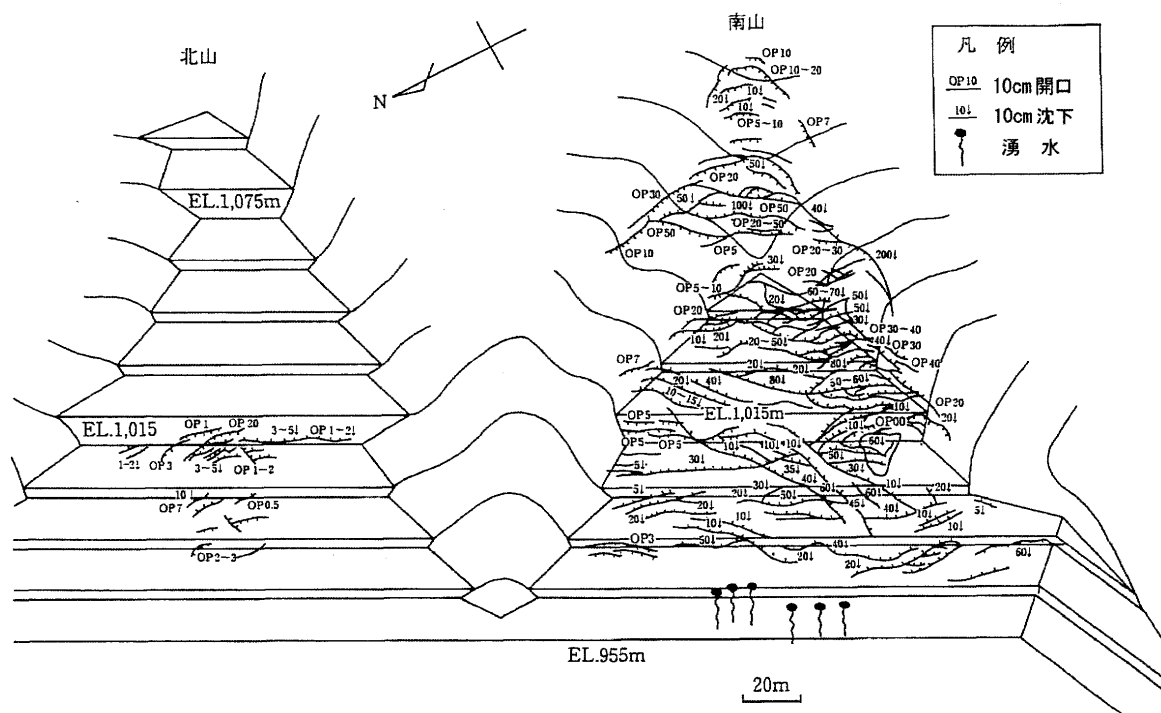


図-2 A 法面に生じた変状

掘削に伴いリバウンドが発生した(図-3 の 1.)。このリバウンドの大きさは変形性の異なる地質ごとに差異があったため、地質境界や急傾斜潜在・顕在節理等沿いの分離面が形成された(図-3 の 2.)。具体的には、花崗岩の変形係数が流紋岩の変形係数よりも小さかったことから、除荷によるリバウンド量が花崗岩の方が大きかったために、地質境界に段差が生じるとともに、地質境界にゆるみが生じた。さらに、重力や自由面(法面)の影響によりトップリングが発生した(図-3 の 3.)。また、それに伴い斜面上部ではオープクラック等が形成されながら、すべり破壊へと転化した。また、法面の変状が越冬後に発見されたことから、おそらく融雪による法面への水供給も法面変状への影響が大きいと考えられる。すなわち、亀裂等へ浸透した地下水による間隙水圧の作用により岩盤強度が低下したことも法面変状の一因と想定される。

2.2 B 法面

2.2.1 法面の概要

B 法面はダム堤体材料採取によって生じた残壁法面である。掘削深さは最深部で約 130m 以上、最終的な法面の形状は、法高約 400m、法長約 550m、平均勾配 43°である。法面に大きな変状が生じた際の法高は約 250m である。

地質は美濃帯ジュラ紀の砂岩(SS)と粘板岩(SL)の互層である(図-4)。砂岩は岩片は硬質であるが、割れ目が多い岩盤であり、一方、粘板岩は全体的に軟質で、いわゆるシアーズンをなして粘土化しているものもある。地層の走向は概ね法面方向である。これらの地

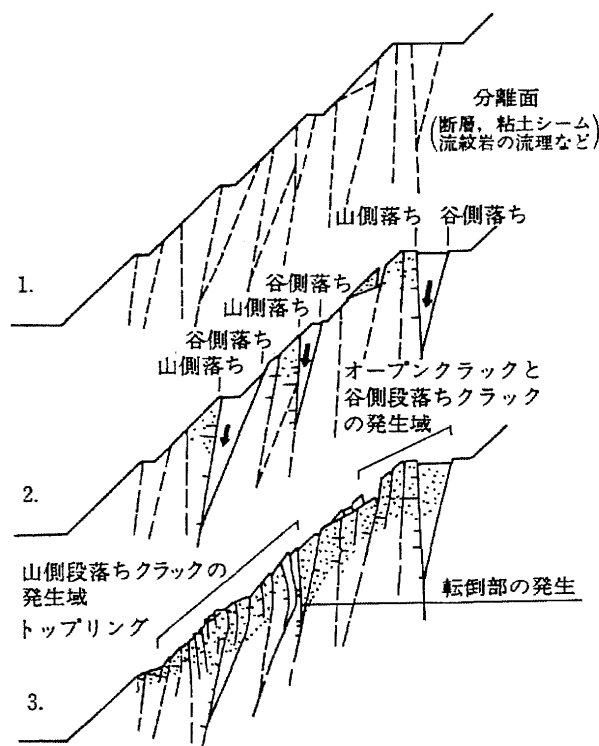


図-3 A 法面の変状進行機構模式図

層は、元来、50°～60°の受け盤構造であるが、重力によって変形し、地表ほど川側に倒れ込むいわゆるクリープが生じている。(なお、委員会において「クリープ」という用語は適切でないため、このような斜面変動現象に対して使わないようにしようとの意見が多数出たが、ここでは既往資料での記載のとおりクリープという用語を用いた)。

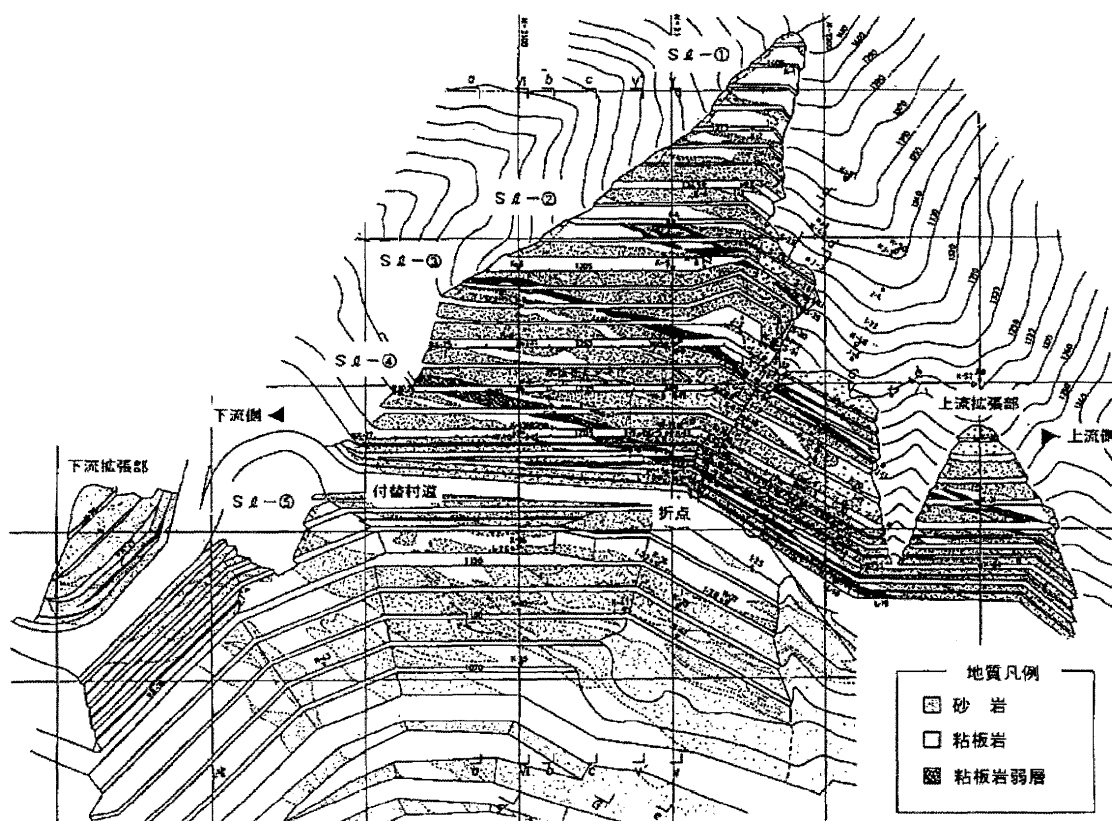


図-4 B法面地質平面図

2.2.2 変状の経過と機構

掘削開始後、地表付近の崖錐堆積物や強風化岩盤を法高約 50m 掘削した際には変状は生じなかった。引き続き掘削が行われ、法高約 250m(掘削深さ約 120m)まで進んだ時点で、その時点の法尻部にあたる粘板岩部(図-5 の SL④の部分)において、法面表面にはらみだしが生じた。また、法面頂部からその下 60m の範囲でも法面表面に亀裂が発生した。

この変状に対して、法尻部において緊急的な押え盛土を行い、変状が収束した後、PC アンカーを施工しながらの掘削が行われ、最終的には河床部からの押え盛土も併用することにより安定が確保された。その後、この法面は安定を保っており、顕著な変状は認められていない。

このような変状を生じた本法面の変状機構は、以下のように考えられている(図-5)。

斜面上部の掘削により当該部分にリバウンドが生じ、ゆるみが進行した。ただし、このゆるみは、それのみでは有害なものではなかった。さらに掘削が進んで斜面下部の破碎された粘板岩が解放され、上方からの荷重と相まって粘板岩層が上から押し潰されるように変形し、法面表面にはらみだした。これにより、ゆ

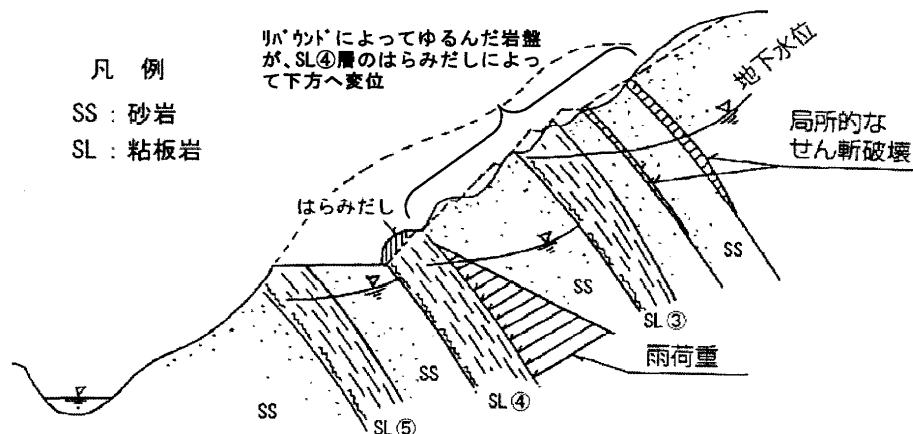


図-5 B法面地質断面図(模式図)と変状機構模式図

るみの生じていた上方岩盤の下方への変位が促進され、法面上部でも亀裂が発生した。

なお、粘板岩層は粘土化しているため、相対的に透水性が低く、それが山差しの構造であったことから、粘板岩層が地下水の受け盤となり、降雨時に雨荷重として作用したことも、変状の一因と想定されている。

2.3 C法面

2.3.1 法面の概要

C法面はダム堤体材料採取によって生じた残壁法面である。掘削深さは最深部で約 100m、最終的な法面形状は、法高約 60m、法長約 120m、平均勾配 28°である。法面に変状が生じた際の法高は約 50m である。

地質は中生代白亜紀の花崗閃緑岩である。変状発生

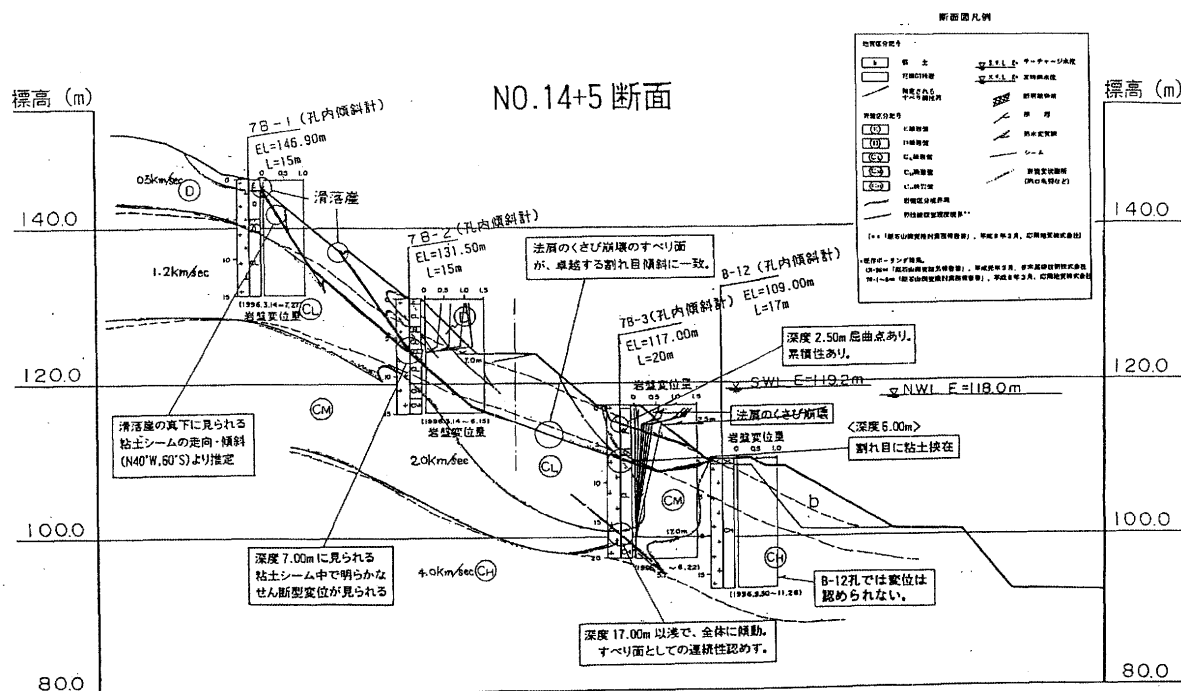


図-6 C 法面断面図および変動状況

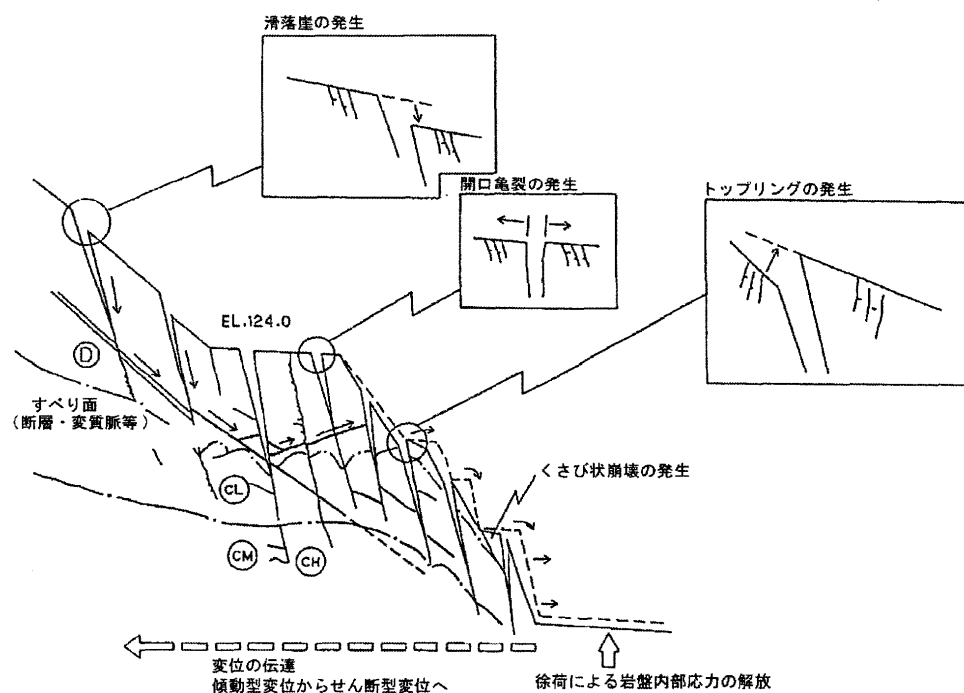


図-7 C 法面の変状機構模式図

後の地質調査で急傾斜流れ盤状の断層が想定された他には規模の大きな断層は存在しない。地山全体に地表からの風化が進んでおり、地表から約 20m までは D 級あるいはそれ以下の岩盤、その下位 5~10m 程度が CL 級岩盤、それよりさらに下位が CM 級以上の堅岩である。

2.3.2 変状の経過と機構

変状は法面最下部 CM 級岩盤掘削完了後に発生した。法面上部の D 級岩盤および CL 級岩盤部では、急傾斜で川側が下がる亀裂が発生し、法面最上部に形成され

た滑落崖様の亀裂が最も顕著で連続性があった。また、法面下部の CM 級岩盤部では、急傾斜で山側が下がる亀裂が多数発生した。ただし、これら亀裂に特に連続性を有するものはなかった。地山内の動きに関しては、変状発生後に設置した孔内傾斜計観測において、法面下部では明瞭なせん断がみられず、深度 15m 付近から全体的に傾動する変位が観測され、一方、法面上部では深度 7m 付近において明瞭なせん断変位が観測された(図-6)。

この変状に対して、切り直し、ロックボルト工、法

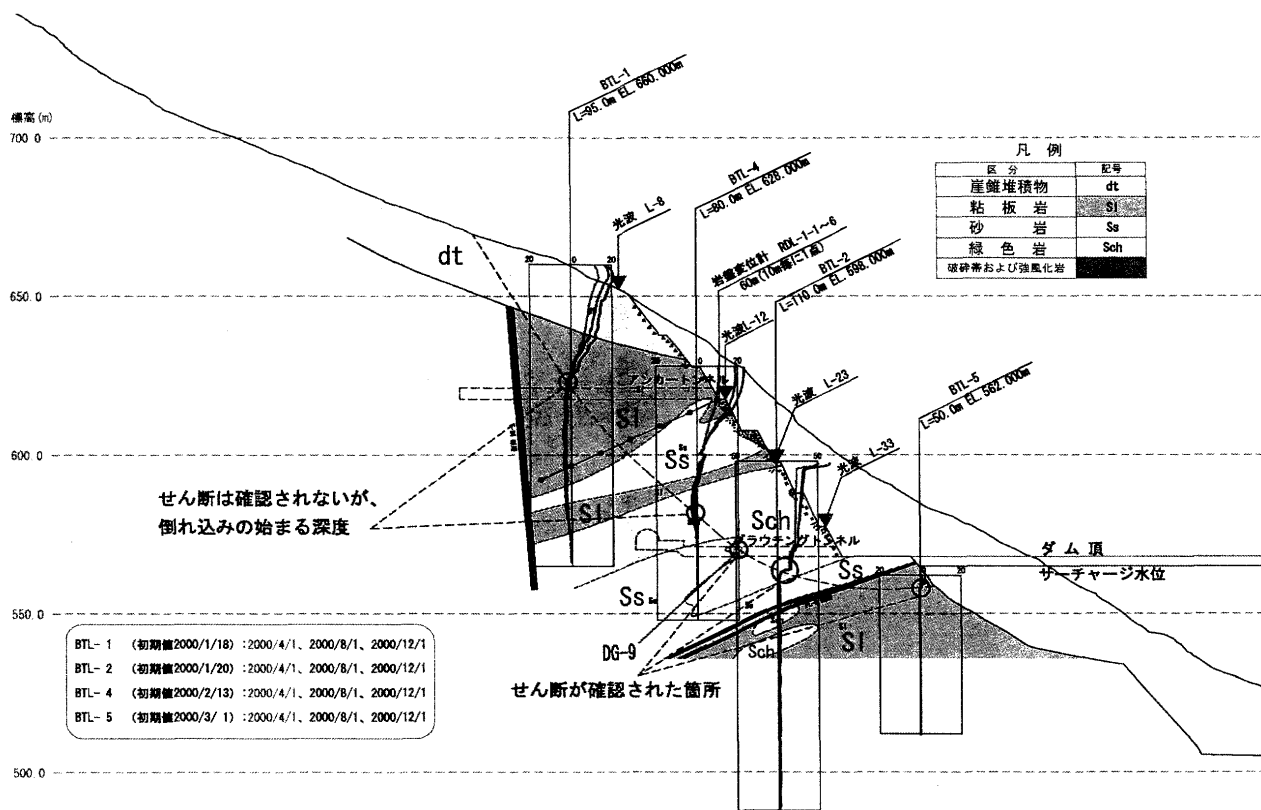


図-8 D 法面地質断面図および変動状況

枠工、および一部で透水性コンクリート吹付工などの対策工が実施され、安定化が図られている。

このような変状を生じた本法面の変状機構は、以下のように考えられている(図-7)。

法面下部の堅岩部を掘削したことによりリバウンドが生じた。リバウンドにより下方の堅岩が川側に変位したことによって上部 D 級岩盤および CL 級岩盤は下部の支えを失い、下方に変形した。この変形により局所破壊が進展し、下部の堅岩の変形を促す形となり、最終的には D 級岩盤および CL 級岩盤のすべりへと進展した。

2.4 D 法面

2.4.1 法面の概要

D 法面は、ダム基礎掘削により生じたダムの天端よりも上位標高の残壁法面である。掘削深さは最深部で約 40m、最終的な法面の形状は、法高約 80m、法長約 110m、平均勾配約 52° である。法面に変状が生じた際の法高は約 70m で、掘削がほぼダム天端標高付近にかかった時点である。

地質は北部四万十帯の粘板岩、左岸、チャート、石灰岩、砂岩、およびそれらの細互層からなる。それら地層の構造は、概ね上下流方向、すなわち法面方向の走向で、山側に緩傾斜していた。ダム天端近くに山側に緩傾斜する FL-0 断層があり、それを境に上下でやや岩盤状況が異なっていた。すなわち、下位でほとんど CM 級岩盤以上の堅硬な岩盤からなっていたが、FL

-0 断層より上位は下位よりやや劣っていた。それでも、表層より 10~20m 程度のゆるみはあったものの、それより深部では CM 級以上の堅硬な岩盤が確認されていた。

なお、この法面部においては、掘削前までにボーリング 9 孔(総延長 890m)の調査が実施されており、断層については、FL-0 断層および法面奥側(山側)の高角度断層 F-36 以外に顕著なものは確認されていなかった。また、法面の上部に地すべりブロックが想定されていたものの、この部分を除く掘削後の法面自体には地すべりの存在を示唆するすべり面等の地質状況は確認されていなかった。

2.4.2 変状の経過と機構

掘削法面上部については、地すべりブロックの末端にかかっていたことから、この部分の掘削勾配を 1:0.8 として掘削量を極力小さくし、末端土塊の掘削除去による地すべりの安全率低下分をアンカー工で補いつつ、それ以下の掘削を法面勾配 1:0.5 で進めた。

掘削がダム天端標高(EL.567)より 1 段上の小段標高(EL.578: 法高約 70m)に達した時点頃から光波観測データにおいて法面に川側方向と法面下方向の変位が急増した。変状の範囲は、高さ約 100m、幅約 130m)で、左岸法面のほぼ全体におよんだ。

変状発生後、孔内傾斜計による深度方向の観測が行われ、変状深さの調査とモニタリングが行われた。その結果、下部の 2 つの孔内傾斜計では特定深度においてせん断変形が観測され、一方、上部の 2 箇所の孔内

傾斜計ではせん断変位は確認されず、ある深度より上位が倒れ込むような変位が観測された(図-8)。

急激な変位の発生後、応急対策としての押え盛土とその後の恒久対策としてのPCアンカー工が施工され、安定化が図られ、その後、ダム天端から下のダム基礎掘削は問題なく進められた。

このような変位を生じた本法面の変状機構は、以下のように考えられている。

掘削に伴う応力解放と岩盤のゆるみが誘因となり、岩盤の倒れ込みが進行するとともに、掘削面下端周辺の応力集中と相まってFL-0断層および周辺の低角度の亀裂や節理などに規制されたせん断が発生し、せん断面が連続してすべり面を形成した。

3. 事例のまとめ、および今後の課題

3.1 事例から言えること

以上述べた長大法面の変位を改めて表にまとめると表-1のとおりである。

ここで取り上げた事例が少ないため、統計的な定量的事項までは言及できないが、定性的には以下のようなことが言える。

- ① 上載除荷による応力解放とリバウンドによる岩盤表面のゆるみの発生が一次的な原因。
- ② 流れ盤の方が変位の規模が小さい。：一般的に言われるとおり、流れ盤は小規模で頻繁に変位、崩壊するからと考えられる。
- ③ 法尻に弱層が存在(B法面、D法面)：法面の応力が集中する法尻に力学性が劣るものが存在すれば不安定化しやすいということは理解しやすい。
- ④ 法面の平均勾配が急なほど、変位が深い。：法面勾配が急であることは自然斜面からの改変の影響が大きいこととなり、つまり与えるインパクトが強いほど、生じる現象も大きいということと考えられる。
- ⑤ 法面表面からみて変位範囲の深さが最大となる箇所は、掘削前の地表面から深さが最大となる箇所(すなわち最大除荷箇所)とは必ずしも一致しない。：単に除荷量が最大の要因ではなく、③も踏まえて、むしろ内部の岩盤(力学性)分布、地質構造が最大の要因であることが示している。
- ⑥ 地下水が関与：水荷重、間隙水圧として作用し、岩盤強度を低下させる(A法面、B法面)。C法面については、不明。D法面については、変位発生前に比較的強い降雨があったが、特に変位の著しい進行はなかったことから、あまり変位に対して影響を及ぼしていないと考えられる。

3.2 課題1 初生地すべり発生場について

長大法面の変位現象と自然斜面における初生地すべりを比較した場合、最も異なる点は時間スケールである。地盤、岩盤の力学的性質が時間スケールによって変わるため、生じる現象を単純には比較できない。しかしながら、以下の点は指摘できる。

A斜面やB斜面における表層付近のゆるみは、自然斜面における削剥除荷でも継続的に進行しているはずである。このような現象が生じている斜面において、長い時間スケールにおいては、地表面付近のゆるんだ岩盤の小崩壊が断続的に発生することにより斜面全体は力学的に安定を保ち続け、事例で紹介したような長大法面掘削時のような急激かつ大規模な初生地すべり的な変位は生じないと想像できる。実際、A斜面やB斜面周辺においては、「ある程度まとまって岩盤が不安定化する」と考えられる地すべりは存在しない。C斜面周辺も、地質が花崗閃緑岩であることもあり、地すべりは発達していない。

一方、事実としてD斜面の近隣には地すべりが多い。D斜面における変位機構が周辺の地すべりの発生と対応するかどうかは現時点では不明であるが、興味ある点であり、今後取り組むべきテーマと考えられる。

また、このような視点で、既往の長大法面の変位事例を再検証していくことによって、初生地すべり発生場についてのさらなる議論が進められることも期待できる。

3.3 課題2 初生地すべり発生の予見について

筆者のような建設工事に携わる技術者や防災に携わる技術者にとって、初生地すべりが発生しそうな場所、および発生するかどうか、発生するのであればその時期を事前に予見することは、実務上、非常に重要なテーマである。発生しそうな場所については、前節で述べたような取り組みが期待される一方、実際発生するかどうか、発生の時期については、現状では非常に難しい課題であるのが事実である。

これについては、貞弘ら¹⁾が掘削法面における変位発生の予見に関して数値解析の適用の可能性について述べている。今後、掘削法面のみならず、自然斜面における初生地すべりについての数値解析による検証事例の蓄積と、それからのさらなる考察と議論が望まれる。

文 献

- 1) 貞弘ほか(1998)：長大法面掘削時の変形モード解析の実例と考察。ダム技術、No.139, p33-45。

※本論中の図は事例各ダムの工事誌等の技術資料から転載(一部加筆修正)したものである。引用の都合で名前を伏せた関係上、引用文献は記載していない。

表-1 長大法面変状事例のまとめ

諸元	地質		特筆すべき地質構造・特徴	法面(変状発生時)				変状						変形モード	特徴的な変状		
				法高 (m)	法長 (m)	平均勾配(°)	最大掘削深さ (m)	法面からの最大深さ		原地形面からの最大深さ		長さ(斜面長)				幅	
	位置	深さ(m)						位置	深さ(m)	(m)	備考	(m)	備考				
	法面	岩種		構造	法高 (m)	法長 (m)	平均勾配(°)	最大掘削深さ (m)	位置	深さ(m)	位置	深さ(m)	長さ(斜面長) (m)			備考	(m)
A法面 (南山)	白亜紀花崗岩 第三紀流紋岩	受け盤	100	170	38	60	変状範囲 上部	30	変状範囲 中央部	45	20	180	頭部は法 面上位の 自然斜面	125	法面内	トッピング	地質境界における段 差の発生 段差を境とする岩塊 の倒れ込み
B法面 (d測線)	ジュラ紀 砂岩・頁岩	受け盤	150	230	42	60	変状範囲 中央部?	30	-	-	-	-	-	-	-	はらみだし	法尻部の粘土化した 粘板岩のはらみだ し、および、それに伴 う上部の下方への変 位
C法面 (No.14+5 測線)	白亜紀 花崗閃緑岩	(流れ盤) * (流れ盤)	50	80	35	50	変状範囲 中央部	10	変状範囲 下部	45	7	70	頭部は法 面頂部	90	法面内	トッピング スライディング	下部倒れ込み 上部すべり
D法面 (主測線)	ジュラ紀 堆積岩類	受け盤	70	95	52	30	変状範囲 中央部	50	変状範囲 中央部	60	50	180	頭部は法 面上位の 自然斜面	130	法面内	トッピング スライディング	下部すべり 上部倒れ込み

* : C法面における流れ盤とは、変状範囲の下面を規制する小断層が流れ盤であったことから。
 — : B法面では、明確な変状範囲が示された既往資料がないため、変状の諸元が不明。