第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集
(社)土木学会　2004 年 1 月　自由投稿論文(48)

寒冷地における長大切土斜面の安定性評価

Investigation on Stability of large cut slope of rock in cold region

日比野悦久*・神野恵介*・高橋章**・高橋信之***・岡部豊二***・小野丘****
Yoshihisa HIBINO,Keisuke JINNO,Akira TAKAHASHI,Nobuyuki TAKAHASHI,Toyozi OKABE and Takashi ONO

This report treats a effectiveness of the slope protection on the large cut slope in locally cold area and a interpretation of the monitoring data on surface measurements. The investigated slope is a large cut of 70m heights and located in an altitude of 1,500m above sea level. The condition of the slope is two kinds of unfair factors, a geological and an environmental. Geologically, the weak zone with clay continued to the deeper part by hydrothermal alterations are found on the slope : And environmentally, the slope caused a repetition of the freeze-thaw cycle by annual temperature change. The measuring data while and after excavation on the slope indicates the convergence for these two factors. This report introduces the effects on the countermeasure for sliding with in the geological weak zone and the estimation of the measured convergence while and after the countermeasures.

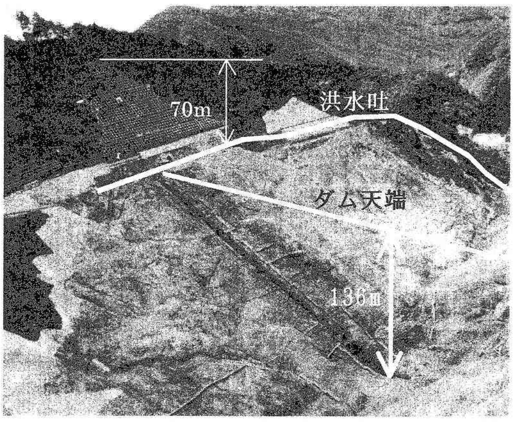
Key words: Rock, Slope, Sliding surface, PS anchor, Freezing depth, Frost heave of rock

1．はじめに

東京電力㈱では，信濃川水系南相木川の最上流部にロックフィルダムを建設しており，ダム建設に伴いダム直上左岸部に勾配 1:0.7，法高 70m の切土斜面を施工した．

当該斜面は斜面深部に熱水により粘土状に劣化した弱層が法勾配とほぼ同等の傾斜で存在するという地質面の特徴と，1年の温度変化により、凍結・融解の繰り返し作用をうけるという環境面の特徴をあわせ持ち、これら2つの要因が斜面の安定性に影響を与えることが掘削当初から懸念された。

また、斜面直下には洪水吐が存在し、将来的に斜面が安定性を損なうことがダム機能に影響を及ぼすことから PS アンカー、ロックボルトなどによる対策工を施工し、掘削完了後も斜面挙動の計測・監視を継続的に実施してきた。[1)]



図－1.1　左岸斜面全景写真

本論文では、当該斜面が有する上記2つの特徴に着目した、挙動計測結果、対策工の効果並びに現状の安定性を評価した内容を報告する。

*　正会員　東京電力㈱　神流川水力建設所　南相木工事事務所
**　正会員　東京電力㈱　建設部土木・建築技術センター　***　東電設計㈱　第一土木本部開発環境部
****　正会員　北海学園大学

2．地質および計測概要

斜面を構成する地質は、秩父帯に属する堆積岩類であり、砂岩を主体とし、泥岩の薄層を不規則に挟んでいる。地質構造は概ね斜面に対し流れ盤であり、かつ地質構造に調和的に熱水脈が発達し、熱水により粘土～砂状に劣化した弱層(岩盤等級ではD級に相当)が法勾配と同傾斜か、やや高角度で存在する。さらに斜面下部に弱層が集中し、かつ応力が大きい法尻では中央部に弱層が存在していることから、斜面中央・下部付近が地質的には最も不安定箇所であると判断される。図-2.1, 図-2.2 に当該斜面の正面・断面図並びに計測概要を示す。

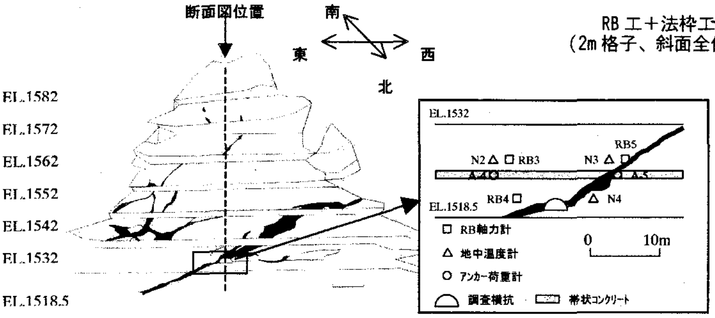


図-2.1　斜面正面図

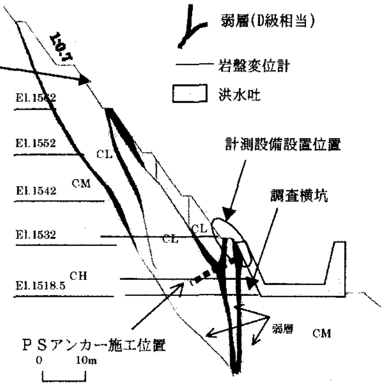


図-2.2　斜面断面図

3．大量降雨時の斜面挙動と対策工の実施

3．1　大量降雨時の斜面挙動

掘削完了後の1999年8月13～14日にかけて350mmを越える大量降雨があり、斜面に設置した各種計測計器の動きから斜面に大きな変状が発生していることが判明した。

伸縮計の計測結果から、斜面深部から斜面最上段で地表面に到達する弱層を介して斜面が、ほぼ全体にわたり斜面下方に変位していると判断された。

また、最下段斜面に設置した岩盤変位計の累計変位は40mmを越え、最深部の弱層区間では9㎜谷側へ変化し、沈下も斜面下部のみではなく上部まで10mm以上確認され、ＲＢ軸力も全体的に増加し最大で6tf増加したものも確認された。変状の概要を図-3.1に示す。

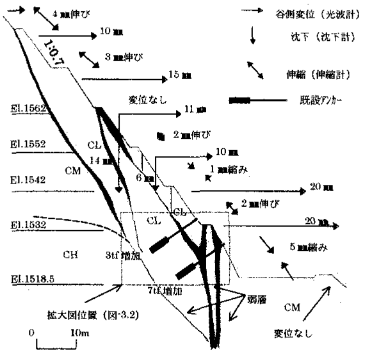


図-3.1　大量降雨時の斜面変状

3．2　対策工の選定

この斜面変状に対する対策工として、当該斜面のすべり面を泥岩主体の深部弱層（D級（泥岩）層）と砂岩主体とする法尻付近の弱層（CL 級（砂岩）層）の2つを想定し、この弱層を貫通し、基盤と直接固定するPSアンカーを追加施工することとした。アンカー追加施工に際しては2面すべりモデルを用いて抑止力を算定する事とし、アンカー仕様・配置を決定した。想定した弱層位置を図-3.2に2面すべりモデルを図-3.3にそれぞれ示す。

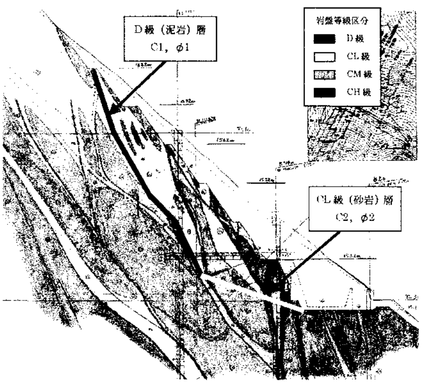


図-3.2　想定したすべり面位置

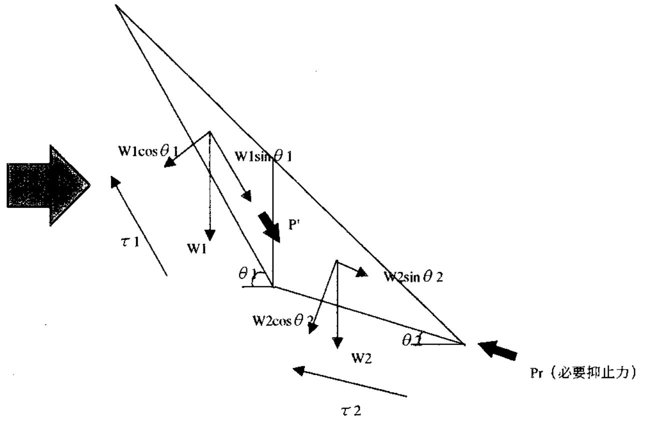


図-3.3　２面すべりモデル

必要抑止力は、滑り面の抵抗力に大きく影響を受ける。当地点では、抵抗力を決定する物性値を得るため、調査横坑より弱層部の撹乱試料を採取し、室内試験を実施した。さらに既往の文献で示されている値も参考に物性値を設定した。室内三軸試験結果、せん断定数測定例を表-3.1、3.2 にそれぞれ示す。

表-3.1　室内三軸試験結果

当地点試験結果		
飽和度(%)	C(tf/m2)	φ(°)
55	6.2×10^4	31.1
65	3.4×10^4	29.3
75	2.6×10^4	28.8
85	2.2×10^4	28.1
95	3.9×10^4	12.7

表-3.2 せん断定数測定例(道路公団)

岩級		粘板岩（ダムサイトの例）			
		C（tf/m2）		φ（°）	
		範囲	平均	範囲	平均
硬岩	B	225～275	250	40～50	45
	CH	175～225	200	35～45	40
	CM	75～175	125	35～45	40
軟岩	CL	**25**～75	50	**30**～40	35
	D	10以下	**0**	**20**～30	25

［日本道路公団　設計要領第２集．第６編Ｉ橋梁下部構造］

表-3.1 に示すように、飽和度が増大するとせん断抵抗力が低下し、飽和度が 55%から 95%に上がることで、粘着力 C は 37%、内部摩擦角 φ は 59%それぞれ低下する。

大量降雨時の斜面変状モードを、雨水の流入により弱層部分が飽和され滑り面のせん断抵抗力が低下し、斜面の安定性を損なわれるというモードと想定し、対策工としてのアンカー工の必要導入力は、表-3.2 のうち、軟岩相当の c、φ をそれぞれ室内試験で得られた低減率分低下させ、図-3.4 で示された 2 面すべりモデルを用い、すべりに対する安全率 1.0 を確保する設計とした。

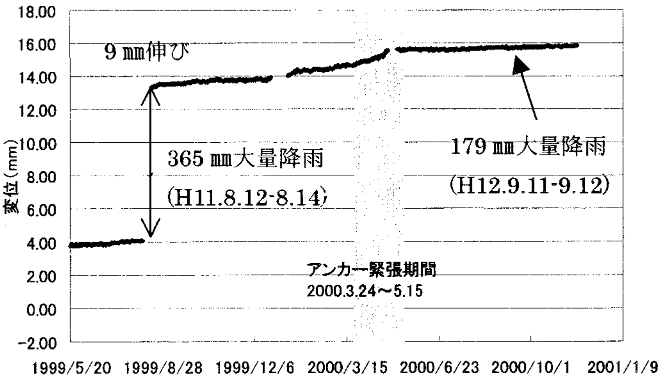


図-3.4　岩盤変位計（最深部）の挙動

3．4　対策工の効果

対策工施工後、現在までに発生した最大の降雨は、図-3.4 に示す 2000 年 9 月 11 日～9 月 12 日に発生したもの（累計雨量 179 ㎜、時間最大雨量 15 ㎜）である。この大量降雨時において、斜面不安定化の原因として懸念される深部の弱層の動きに対応する岩盤変位計の挙動を図-3.4 に示す。同図か

ら 200 mm程度の大量降雨後も岩盤変位計に変動は認められず、またPSアンカー軸力計等他計測データにも変動は認められなかった。

これらのことから、斜面深部の弱層に沿う滑りに対して追加施工したPSアンカーによる対策工は有効であると判断される。

4．凍結融解履歴を受ける斜面で認められた挙動並びに同斜面の安定性評価

4．1　岩盤の凍上に関する既往の研究実績

凍上に関する多くの研究は主に土質材料を対象としたものが多く、岩に関する凍上の研究は十分なされていないのが現状である。そこで、根井・小野ら [2]は本斜面で採取した秩父帯に属する堆積岩類(泥岩)を用いて凍上試験を行い、堆積岩類においてもアイスレンズが発生し成長することを確認した。凍結方法は、供試体(ϕ =50mm、h=55mm)の上下端面温度を一定に保つことで 0℃線を停滞させ、おおよそ 200 時間ごとに 0℃線を下方に約 10mm づつ移動させる操作を行っている。供試体の最終的な凍上量は約 4.6mm であり、試験中に確認できたアイスレンズの総和とほぼ一致する結果となった。

4．2　岩盤の凍上に起因する斜面挙動

図-2.1 に示すダム左岸斜面に設置されている計測器の内、代表的な岩盤変位計，ロックボルト軸力計及び地表面・地中温度計の計測結果、及び表面波探査の測定結果を以下に述べる。

4．2．1　計測挙動について

(1)　岩盤変位計

岩盤変位計は斜面下部の水平孔に設置されており，地表面から深度 3m, 7m, 12m, 17m, 22m地点の変位を計測している。岩盤変位計の各測点間の区間変位量を図-4.1 に示す。

地表面から深度 3m 間は、他の区間変位量と異なる挙動を示し，冬季に変位量が増大し，春季に残留変位を一部残す形で回復する傾向が認められる。冬季における変位量の増大原因は，(4)項の地中温度計計測結果から、凍上によるものと推定される。

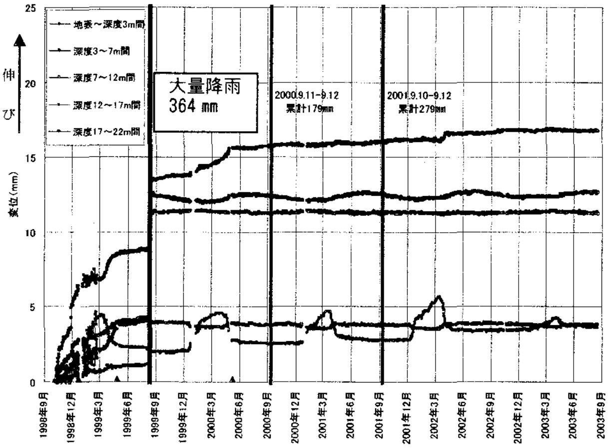


図-4.1　岩盤変位計計測結果

(2)　ロックボルト軸力計

ロックボルト軸力計は、斜面下部の 6 箇所に設置されており、一例として、RB-5 の軸力変動を図-4.2 に示す。RB-5 には，深度 0.5m、1.0m、1.5m、2.0m、3.0m、4.5m の 6 箇所にひずみゲージを取り付け，軸力を計測している。

ロックボルト軸力計測結果より、冬季に軸力が引張方向に増大する傾向が認められるが，変位計と同様にこの範囲は地表面から 3.0m 以浅で生じている。なお、2002 年度冬季の軸力増大は人為的要因によるものである。

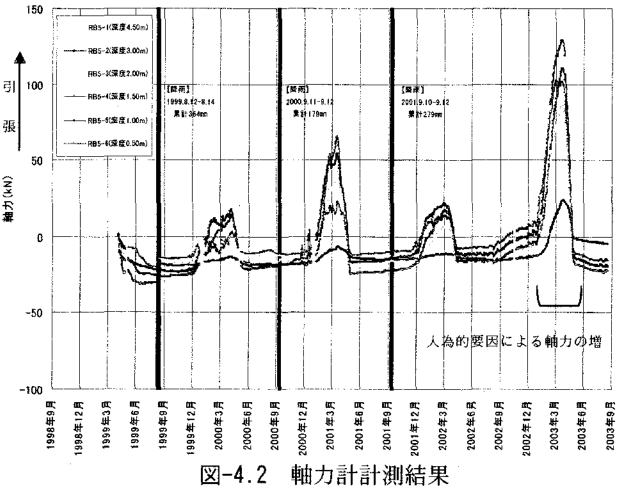


図-4.2　軸力計計測結果

(3)　地表面温度計

斜面の中段中央部における地表面温度計

(EL-1562m:TSL2-7)計測結果の履歴を図-4.3に、以下に認められた挙動の特徴を述べる。

① 地表面の最高温度は約 20℃(夏季)，最低温度は約-15℃(冬季)であり，年間の地表面温度変化量は約 35℃である。

② 11月中旬より0℃以下を観測し，12月中下旬から連日地表面温度は0℃以下となり，翌年の3月下旬から4月初旬まで継続する。

③ 地表面付近の岩盤変位計、ロックボルト軸力計に伸びが顕著に現れる時期は，上記②の時期に相当する。

(4) 地中温度計

地中温度計は，斜面下部のEL.1518.5m～EL.1542m間に5箇所埋設されており、深度方向の地中温度が計測されている。一例として中央部(N2)における深度方向の地中温度(月平均温度)の履歴を図-4.4に示す。同図より，地中深部においても季節的な温度変化が生じており、深度4.35mにおける夏季と冬季の温度変化量は最大約10℃である。また、岩盤内の温度履歴には位相差が生じており，表層部(0.10m)に対して，深部(4.35m)では夏季で2ヶ月程度，冬季で3ヶ月程度の遅れが認められる。

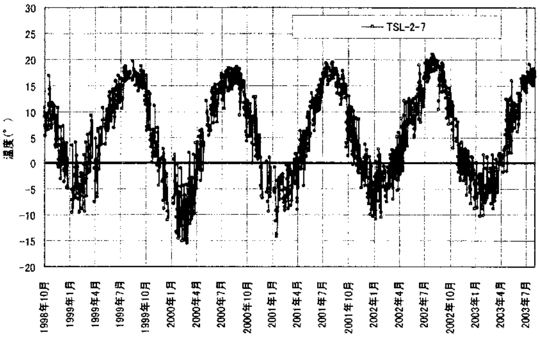


図-4.3 地表面温度計計測結果

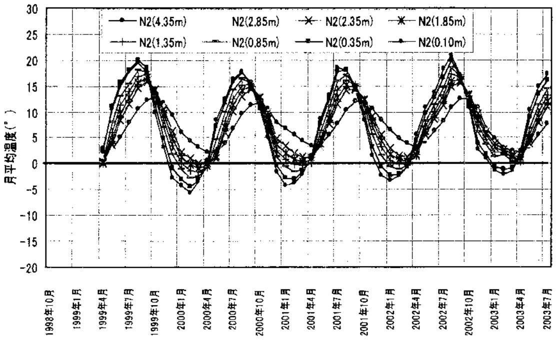


図-4.4 地中温度計計測結果

1999年度～2002年度の4年間で冬季において平均的な温度が最も低かった1999年度における日平均の地中温度(N2)の履歴を図-4.5に、計測結果の特徴を以下に示す。

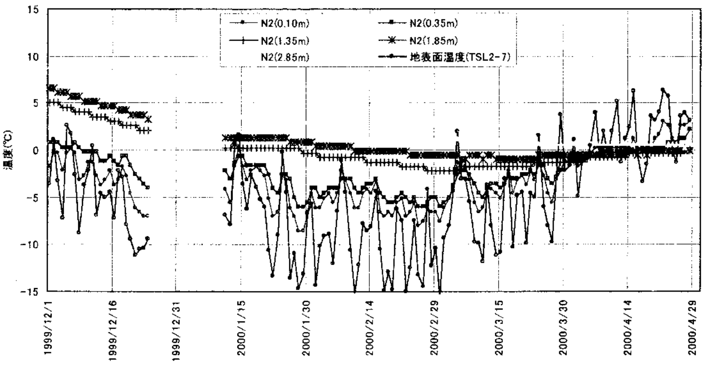


図-4.5 日平均地中温度(N2)

① 地表面に近い程，日レベルでの温度変動が大きく，深部程変動は緩慢である。深度1.35m以浅の表層部の変動は地表面温度の日変化の影響を受けている。

② 深度1.35m以深では地表面温度の日変化の影響はほとんど受けず、季節的な温度変化が卓越している。

③ 0℃以下となる時期は，深度0.35mで12月初旬，深さ1.35mで1月下旬，深さ1.85mで2月中旬である。

④ 0℃以下にならない深度は2.85m以深である。

4.2.2 表面波探査結果

2000年から2002年にかけて、凍上による斜面表層部における緩みの進行の把握を目的として、斜面下部の5測線(KNKA～KNKE)で実施した表面波探査の結果を図-4.6に、特徴を以下に示す。

① 2000年から2001年にかけて，5測線中のうち、A,Cの2測線において、表層3m付近でS波速度が，300m/sec程度から200m/sec程度に低下している。この原因として表層部の凍結融解による緩みの進行が考えられる。

② 一方、2001年以降は、5測線のいずれにもS波速度の低下はみられないことから，凍結融解等による岩盤の緩みの進行は収束に向かっていると考えられる。

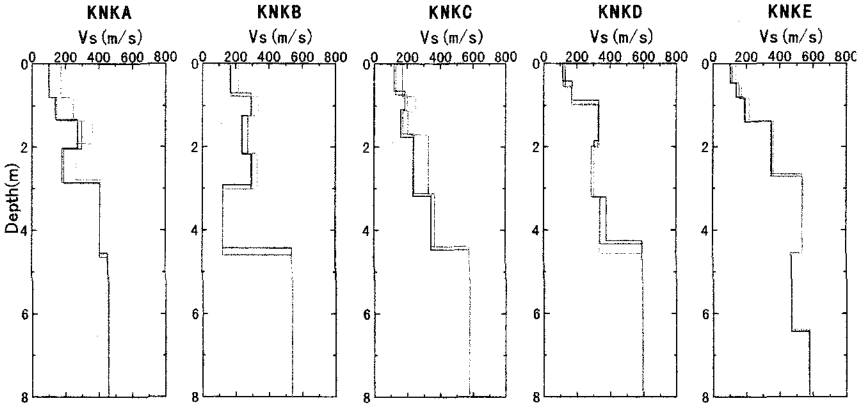


図-4.6 測線KNNKA～KNNKEのS波速度構造
(過去3ヶ年の比較)

4．2．3 計測及び表面波探査結果の評価

以上の計測・試験結果から，本斜面は、冬季に斜面表層部に伸びとしての変形が発生し春季に回復していることから、凍上による凍結融解の影響を受ける斜面であると考えられ、以下の特徴を有する。

① 地表面から深度3m間における岩盤変位計の計測データから，冬季に地表付近の岩盤が凍上により膨張し，春季に回復するものの変形量は微少であるが累積している。ただし、深度3mより深い位置では，このような現象は認められない。

② 軸力計のデータも，冬季に軸力が引張方向に増大する傾向が認められるが，変位計と同様，この範囲は地表面から3.0m間に限られている。

③ 地中温度が0°C以下とならない深度は，至近年で最も気温が低い1999年度の冬季で2.85m以深である。

④ 3ヶ年にわたって実施した表面波探査結果から、S波速度の深度毎の変化は3m以深ではほとんど変化していない。

これら計測データに基づき，凍上に凍結融解の影響を受けたゆるみ領域の範囲は，現状では地表面より3m以浅に存在するものと考えられる。ロックボルト軸力計の計測データでは、地表面から深度3m間のゆるみ領域において変位は増大・減少を繰り返しながら漸増傾向にあるが、この区間はロックボルト工による対策範囲内であること、また、コンクリート法枠の点検結果からも顕著なクラックの発生、増大などの変状は認められてないことから、現時点では、斜面の安定性は確保されているものと判断される。

凍上による凍結融解作用を受ける岩盤斜面において、長期的な安定性を評価する上で明確化すべき課題は、凍結融解作用により緩みの度合い(強度低下)がさらに進行するのか、もしくは収束傾向にあるかを判断することにある。今後は、凍結融解作用を繰り返し受ける当該斜面の将来における安定性を評価(崩壊の危険性)するため、原位置におけるゆるみ領域の強度、室内凍上試験による強度低下の把握等を行うことで、継続して検討を進めていく計画である。

参考文献

1)浅井大輔、岸裕和他：弱層を介在した岩盤斜面安定性評価に対するRBSM解析の適用について、岩盤力学に関するシンポジウム、p.136－140 、2001

2)根井剛一、小野丘他：凍害を受ける切土軟岩の室内凍上試験、日本雪氷学会、全国大会講演予稿集、p.197、2002