

日光華嚴の滝の崖面を守る 大谷川山腹崩壊対策工事第三期工事

伊藤 文雄¹・鈴木 修²・大西 幹夫³・田邊 信一⁴

¹正会員 工修 大成建設株式会社土木本部土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

²工士 大成建設株式会社 関東支店作業所 (〒321-1661 栃木県日光市中宮詞2479)

³工士 日本工営株式会社 首都圏事業部 (〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4)

⁴工士 栃木県日光土木事務所 河川砂防部河川砂防課 (〒321-1414 栃木県日光市萩垣面2390-7)

華嚴の滝周辺の急崖では、過去に幾度となく崩壊や崩落が発生したことから、栃木県は県営観瀑台直下のオーバーハング部で崩壊の危険性があり、砂防並びに自然環境保全の両面から崩壊防止の必要性があると判断した。対策工は、崖面には構造物の構築は一切行わず、立坑内などから全ての作業を行うロックアンカー工法が採用され、無事平成13年3月第二期工事が終了し、平成14年10月第三期工事の施工を開始した。平成15年7月に小崩落が発生したため、新たな施工方法を検討し、崖面計測値に基づき管理値を再設定した上で、平成17年12月より施工を開始した。本論文は、計測結果に基づく新たな施工法の検討結果をまとめたものである。

キーワード：崖面崩落対策、ロックアンカー、岩盤斜面、亀裂性岩盤、ロックネット工

1. はじめに

当地は、日光国立公園内にあり、日本三大名瀑として名高い華嚴の滝に隣接している。華嚴の滝周辺は、垂直ないしオーバーハングの急崖で、これを形成する岩盤(安山岩)は亀裂が発達しているため崩落を生じやすい条件を備えている。近年では、昭和51年1月に左岸県営観瀑台上流部20mの箇所から滝つぼにかけて、昭和61年10月には本滝の落ち口部で大規模な崩壊が発生している。特に左岸オーバーハング部(県営観瀑台直下)で崩落の危険性が考えられ、砂防並びに自然環境保全の両面から崩落防止の危険性が指摘された。又急崖下の有料観瀑台を訪れる多くの観光客に対する安全確保のためにも崩落防止対策工を実施することが提案された。これを受けて、平成元年度に対策工の設計が行われ、景観保護を優先し、地山内の立坑より、放射状にロックアンカーを施工する工法が採用された。

立坑内部から行うロックアンカー工法の利点は

1. 現場地形上、施工の危険性を少なくする。
2. 施工中及び完了後、景観に影響を与えない。
3. 観光客等、第三者に対する安全性が確保できる。
4. 施工に対する気象条件の影響が少ない。

等である。

工事は三期に分けられ、平成2年度より6年度にかけて一期工事(上流側)が施工され、平成8年10月二期工事に着工し、平成13年3月に完了した。三期工事は平成14年10月着工し、平成17年3月完了予定であった(図-1)が、平成15年7月8日に有料観瀑台上部斜面にて崖面崩落が発生(写真-1)したため、一旦工事を中止した上で崖面踏査を実施した。

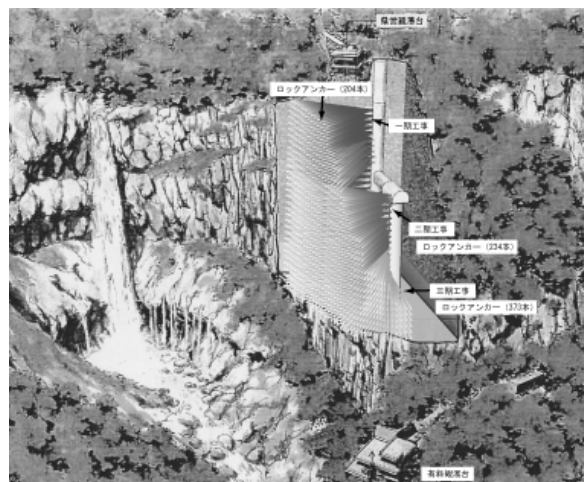


図-1 大谷川山腹崩壊対策工事概要図

その結果、岩盤斜面表層部の崩落であることが確認されたため、崩落監視用の計測器を設置し、平成15年11月工事を再開した。工事再開後、有料観瀑台上部斜面に対する崖面崩落防止対策工について平成16年6月から詳細検討を進め、今までの立坑よりのロックアンカー工のみならず、崖面に対するロープネット及びロックネット工、落石防護柵設置工の採用方針が提案され、専門委員会による検討が開始された。従って、第三期その1工事は、平成17年7月末で一旦中止となり、専門委員会における施工方法の承認、決定を経て平成17年12月末第三期その2工事が再開された。本稿では、三期その1工事における立坑掘削・アンカー施工時の計測管理に基づいた三期その2工事としての有料観瀑台上部斜面に対する対策工の検討について報告する。



写真-1 第三期工事施工中発生崩落箇所

2. 地形・地質概要

本地域は、基盤岩(石英斑岩)の上部に男体山の火山活動によって生成された熔岩流(華厳熔岩)、火山砕屑物が覆う、男体山溶岩台地に位置し、地形的には大谷川左岸(北岸)側は日光火山群、右岸(南岸)側は足尾山地に属し、大谷川はこの二つの地形区の境界をなしており、中禅寺湖に発し、この両山地を分けて約3km区間に急峻な峡谷部を形成して東流する。

地質分布は、中・古生代の足尾層群、白亜紀～古第三紀の足尾山地北部火成岩類、第三系の足尾流紋岩類、第四紀の火山岩類である。このうち最後の第四紀火山岩類は大谷川及び中禅寺湖北部の日光火山群(安山岩～石英安山岩質)を構成し、それ以外の堆積岩類、火成岩類は南部の足尾山地を構成する。

華厳の滝とその周辺を構成する地質は、下位より、いろは坂溶結凝灰岩、下部華厳熔岩、湖成堆積物、上部華厳熔岩、火山砕屑物及び岩錐堆積物よりなる(図-2)。

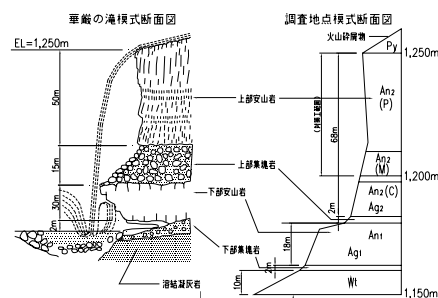


図-2 地質概要図

岩盤斜面の形状は、河床部緩斜面、下部安山岩突出部、含空凹部、安山岩急崖斜面および最上部緩斜面よりなる。地質は各々基盤部の溶結凝灰岩と下部集塊岩、下部安山岩(An1)、上部集塊岩、上部安山岩(An2)および火山砕屑物に対比される。

上記地層の内、上部安山岩層は節理状況から上部より板状(p)、塊状(m)～板状及び柱状(c)に区分される。

【板状安山岩(An2-p)】

板状安山岩は斜面上段の標高1210m～1250m間に分布しオーバーハングを形成している。節理は、斜面方向に直交し、流れないしは受盤を示す間隔20cm以下の薄板節理と、斜面方向に緩傾斜し流れ盤を示す間隔1～2mの厚板節理からなり、岩盤はこれら2方向の節理によりブロック化している。

【塊状～板状安山岩(An2-m)】

塊状～板状安山岩は斜面中段の標高1190m～1210m間に分布し、塊状ないしは不規則な板状節理が見られる。節理は間隔1～2m以上で板状安山岩と同一の2方向が卓越し、岩盤をブロック化している。ただし、上部安山岩中では最も安定している。

【柱状安山岩(An2-c)】

柱状安山岩は斜面下段に分布し有料観瀑台付近では厚さ約25cmで柱状節理が良く発達するが、上流へ向かって薄化する。

節理は斜面に対し放射状に直径50～60cmの柱状節理が連続し、小規模な柱状ブロックの抜け落ちが見られる。

以上より、不連続面の性状は以下のようにまとめられる。

- 1) 全体に薄板節理系、厚板節理系に属する不連続面が卓越している(図-3)。
- 2) 上中下流、地層、崖面からの距離等をパラメータとして不連続面の走向傾斜の比較を行ったが、概ね同様な傾向を示し、明確な差異は認められなかった。
- 3) 不連続面の傾斜は垂直に近い急なものが多い。このため僅かな違いで壁面に対して受け盤、流れ盤に

なる。よって、受け盤、流れ盤の区分は有意性が小さい。

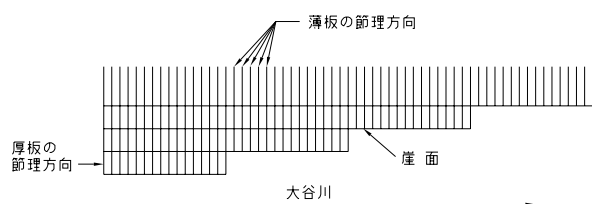


図-3 厚板・薄板節理系の模式図

3. 三期その1工事の設計・施工

(1) 全体工事概要

- ・ 工事名称：
大谷川山腹崩壊対策工事三期その1工事
- ・ 工期：
平成14年10月8日 ～ 平成17年7月29日
- ・ 工事内容：
 - 立坑掘削
 - A立坑 21.8m
 - B立坑 7.0m
 - ロックアンカー工
 - A立坑 159本
 - B立坑 110本
 - トンネル閉塞工
 - A立坑 332m³
 - 計測工
 - A立坑 6本(ロックアンカー軸力計・岩盤変位計)
 - B立坑 3本(ロックアンカー軸力計・岩盤変位計)
 - 斜面計測用 5本(岩盤変位計のみ)

(2) アンカー設計の考え方

a) 崩落のメカニズム

現況崖面の状況、ボアホールテレビカメラによる亀裂の解析およびせん断破壊と引張破壊の起こりやすさの比較等から対象崖面の崩壊形態を、厚板節理系の節理を主な分離面とする引張破壊とした。破壊規模は現状のオーバーハング最大幅(4～5m)及び昭和51年の大崩落の平均幅(約3m)を勘案して、厚板節理系2ブロックに相当する4mとした(図-4)。

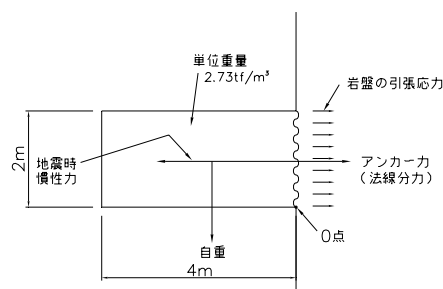


図-4 崩壊規模概念図

b) 崩落対策工の設計

不連続面の状況からアンカーの配置は、アンカー基準面で2m×2mの格子状のパターンボルティングを基本とした。アンカー水平角の許容条件は「グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説」で、一般に $\theta \leq 45^\circ$ で設計されるとしている。本対策工範囲では、地質調査結果より薄板節理系、厚板節理系が卓越していることから、水平角は崖面からではなく、厚板節理系の代表走向からの角度とすることにより、基本的に分力が崖面に向かうことのないように配慮した(図-5)。また、アンカー傾角については、本工事における不連続面の傾斜が垂直に近いものが多く、かつ下部崖面にはオーバーハング部が存在することから、下方向の分力が生じる様なアンカー傾角は避け、アンカーは基本的に水平とした。

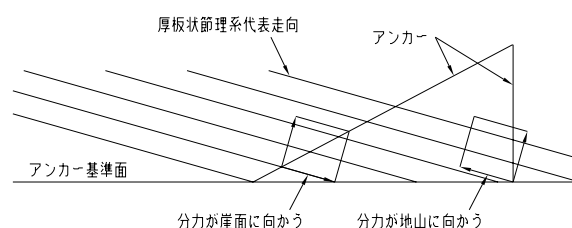


図-5 アンカー接線方向分力と崖面の関係

c) アンカー構造

アンカーの構造は、定着部の確認のため緊張試験を行い、最終的には設計緊張力の約40%で緊張し、自由長部も含め全面定着するものとした。これは、開口亀裂の発達した崖面表面に発生するひずみを少なくすることと、アンカー緊張定着部の破壊があった場合でも、アンカー構造全体の破壊を起こさないよう配慮したものである。これらの構造を確実にするため、本工事では布パッカーによるグラウト工法を採用した。布パッカー工法の利点としては、以下のことが挙げられる。

①崖面付近の岩盤の開口亀裂へ着実に定着させるた

め

- ②上向きアンカー時のセメントペーストの完全充填を行うため
- ③水平アンカー時のセメントペーストのブリージングを減少させるため
- ④崖面までの削孔でグラウトが先端から漏れるのを防ぐため
- ⑤布パッカーがセメントグラウトの引張り補助材となりテンションクラックを適切に抑止し、耐久性が向上する。
- ⑥高圧注入されるセメントグラウトに脱水効果が生じて、グラウトの強度が増す（100Mpa 程度まで向上）。
- ⑦布袋内に加圧注入するため、地山との密着が良くなり、アンカー耐力、変形性状が著しく向上する。
- ⑧軽量でフレキシブルなため、施工性に優れている。
- ⑨セメントグラウトの注入管理が容易で、ロスが極めて少ない。

また、布パッカー材料の選定にあたっては、布パッカーの種類、長さ、ゴムベルトの取り付け方法を変えた全七ケースについて模擬岩盤を用いた注入試験、擦れ試験及び引抜き試験を実施し、最適な材料を選定した。採用した材料は、従来矢板工法による閉め切り部の漏水防止工として用いられてきたフリクションパッカーに耐久性を増すため、柿シブを塗布したものであり、挿入時の摩擦抵抗による擦れに対して強いものとなった。

(3) アンカー施工方法及び施工管理

ロックアンカー工は、立坑を設計深さまで掘削完了後、立坑底部より足場を組み、各立坑での施工を行う。

削孔には、ロータリーパーカッション式ボーリングマシンを用い、崖面から 5m の位置までは二重管削孔にて施工を行い、先端 5m をダイヤモンドビットによるコアチューブ削孔にて行った。以下に施工手順を示す。

(1) 削孔工

- ①削孔機は各段施工時に所定の高さに設定する。
立坑覆工面に削孔ポイントをマーキングし、機械の水平方向を設定し、鉛直角度は $1/10^\circ$ 表示のデジタル式スラントを削孔ロッド上にセットし、設定する。
- ②削孔径は第一段布パッカー部（先端 5m）を $\phi 86\text{mm}$ とし、第二段布パッカー部以深を $\phi 125\text{mm}$ とする。
- ③削孔中はスライム状況を観察し、岩の状態、節理、

層理などを把握する。

- ④削孔長の検尺は、ケーシングパイプの残尺によって確認する。
 - ⑤削孔完了後アンカー孔内のスライム除去を行う。
 - ⑥ダイヤモンドビットによる削孔は、コアチューブによるオールコアボーリングとする。
 - ⑦表層付近はボーリングにより崖面が崩落しないように慎重に行う。
 - ⑧削孔長の検測はロッド検尺及びコア採取にて行う。
- #### (2) 注入工

本施工で用いたアンカーは、オール布パッカー方式であり注入空間が僅かである。狭い空間で注入材をテンドン周囲に完全に浸透させるためには、細粒子のセメントペーストが有効である。

① 注入材

注入材はセメントペーストとし、配合は次の通りとする。（ $W/C=50\%$, $\sigma_c=23.5\text{MPa}$ ）
混練り管理は表-3 の配合表をもとに行い、P ロートによる流下時間で管理する。（フロー値 15 秒 ± 5 秒）

② 注入量

注入量の管理はあらかじめ想定される注入量（孔内容積の 1.2 倍）を目安としてバッチ数（ミキサー容量に応じて作成）で行う。

③ 加圧力と加圧保持時間

加圧力は、 0.49MPa 、加圧保持時間は 5.0 分とし、圧力ゲージを確認し、加圧保持を行う。

(3) テンドン加工（KCC パッカーに柿シブを塗布したものを使用する。）

(4) 定着

- ①定着は立坑壁に支圧台座を設置する。
- ②定着方式は二段階とする。一次注入によりアンカー先端部 5m を定着し、初期緊張力（設計アンカー力の約 40%である 10t）をアンカーに導入し、二次注入によりアンカー全長を定着する。特にアンカー施工における緊張管理は、一本おきに導入力をかけ、厚板節理のブロック毎に均等に導入力がかかるように配慮した。

③ 一次定着後の試験内容

1) 適性試験

本数：全本数の 5%かつ 3 本以上（234 本 $\times 0.05 \rightleftharpoons 12$ 本）

荷重：設計アンカー力の 1.5 倍（但し引張材降伏荷重の 90%以内）である 38.2t

載荷方法：5 サイクルによる載荷・除荷

2) 確認試験

本数：適性試験以外の全てのアンカー

荷重：設計アンカー力の 1.2 倍（但し引張材降伏荷重の 90%以内）である 30.56t
 載荷方法：1 サイクルによる載荷（10 本に 1 本は除荷も行う）

3) 載荷時の荷重保持時間

処女載荷時 5 分、複歴内荷重 1 分

4. 計測管理

二期工事における横坑掘削に伴い、計測管理の重要な項目である直上の地中変位計が増加傾向を示し始めたため(図-9)、三次元的な崩壊面又は変位を起こしている不連続面を特定するため、立坑掘削を中断して、横坑先端から観瀑台方向及び横坑軸方向に 2 本のパイプ歪計を設置し、節理に沿っての上下方向の曲げ歪みか崖面方向へのトップリング破壊による軸歪みのどちらが卓越するかを判断した。パイプ歪計は、設置前にボアホールテレビによる孔内観察を実施し、開口している亀裂位置を把握し、その位置を挟み込む位置に歪みゲージを貼付して作成した。その結果、曲げ成分はほとんど観測されず、軸方向成分が卓越していたことより、崖面全体を巻き込むせん断破壊面は形成されておらず、局所的なトップリング破壊に起因する崖面挙動であることが明らかとなった。そこで、引続き計測監視を行いながら立坑掘削を開始したが、4 月に 500μ と 10 月に 200μ の 2 回（累計 1200μ 程度）に渡って急激な変動がパイプ歪計に見られたため、局所的な小崩落の危険性があると判断し、対策工の実施を検討し横坑軸方向にケーブルボルトによる崖面補強³⁾を行った(図-6～8)。

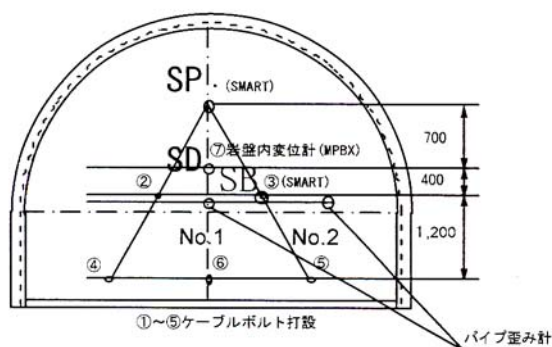


図-6 ケーブルボルト配置横坑断面図

ケーブルボルトによる補強後も、図-9 に示すように 7 年に渡る長期の監視が続けられているが、最大 1.1mm 程度の変位量しか発生していない。

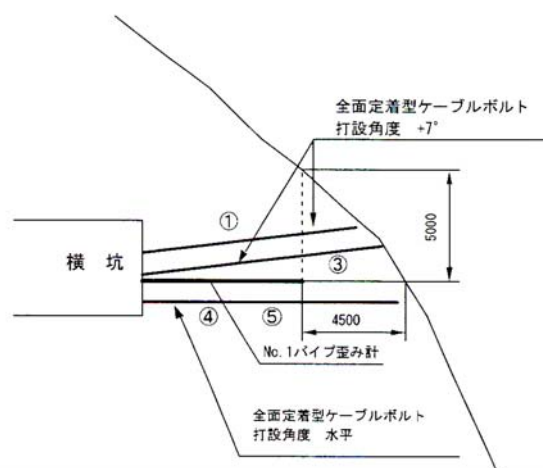


図-7 ケーブルボルト配置側面図

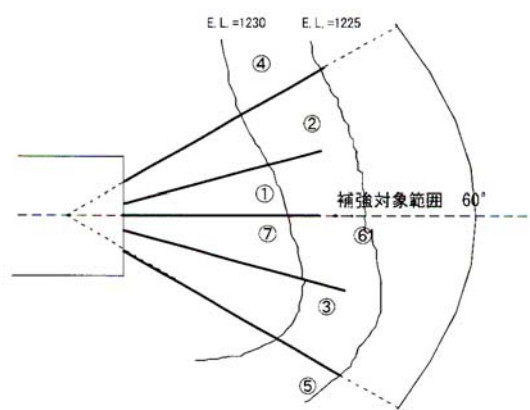


図-8 ケーブルボルト配置平面図

これは、ケーブルボルトは、板状亀裂の卓越した岩盤内を縫い合わせることによる補強効果を発揮し、亀裂間の変位が微小であることを意味すると考えられる。

このような亀裂が卓越した崖面の挙動監視は、トップリングに見られる急激な崩落現象が多く発生することから、二期工事における横坑直上の岩盤変位計の計測結果より崖面挙動に対する管理基準値の設定（管理値：累計 3mm、0.5mm/月）¹⁾²⁾を行なった上で、栃木県、有料観瀑台を経営する民間のエレベーター会社、そして施工業者の各々の緊急時の役割分担を明確にした監視体制による管理を継続した。

また、計測管理は、一時間毎に全データを現場事務所内のパソコンに収集し、専任の社員が常時監視した。さらに、各々の計測機器に対して管理基準値を越えた場合は警告ブザーが鳴るようにセットし、かつ現場代理人の携帯にも自動的に知らせ、関係者が早急に現場に集合できるようにした。

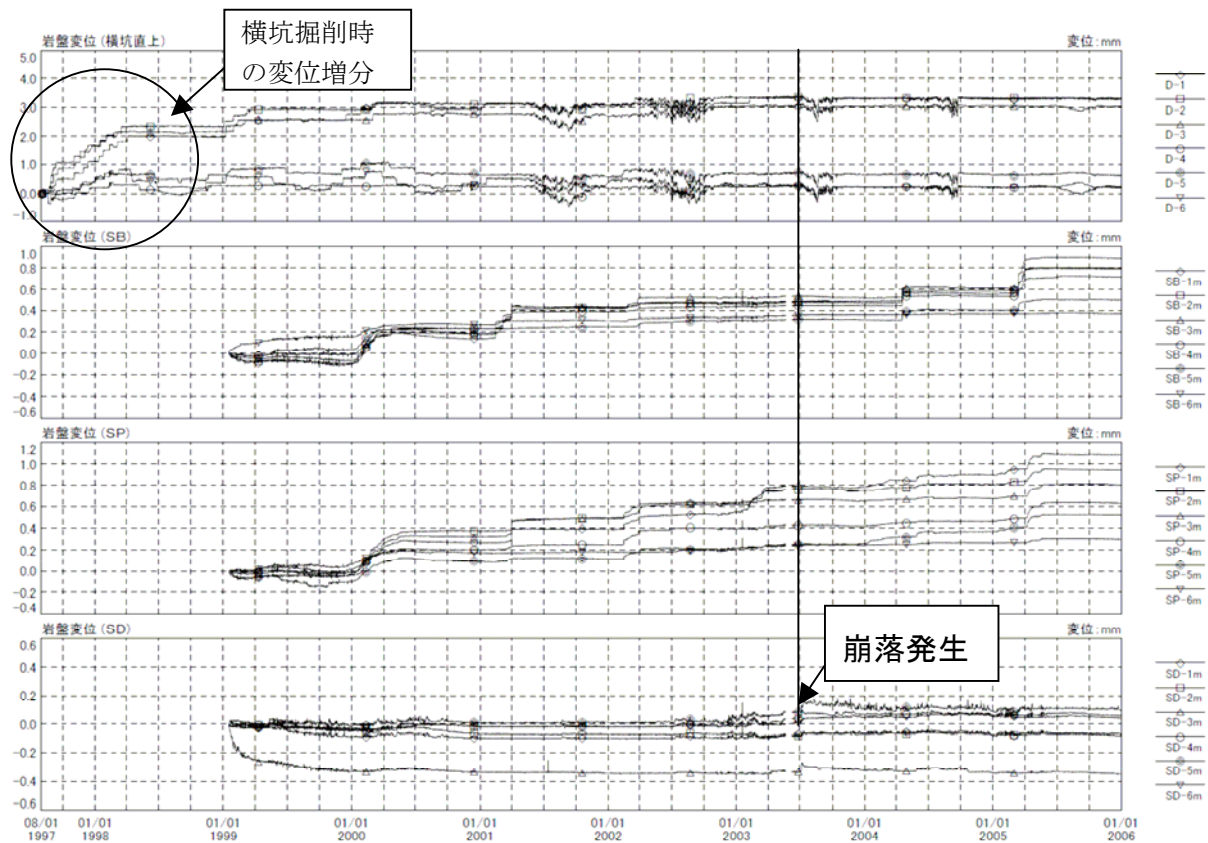


図-9 ケーブルボルトの変位計測結果

アンカー施工中の崖面監視としては、対岸に設置された監視カメラ部（高感度カラーカメラ）、空間電送式・光通信装置及び画像処理（タイムラプスビデオ）で構成される崖面監視カメラにより施工面を常時監視し、一台のカメラを工事の進捗に伴い回転させる事により、常に施工箇所を画像範囲（7m×7m）に収めるようにして対岸から伝送されてきた映像を室内に設置したカラーモニターによって崖面の部分的な欠落などの有無を監視した。

また、施工範囲の崖面挙動及びアンカー効果を把握する目的として、テンスメグによるアンカー軸力、ロードセルによるアンカー荷重の経時変化、アンカー打設方向の岩盤挙動を把握する目的で設置された地中変位計によって監視を継続した。

ケーブルボルトによる補強工の施工後、全ての計測項目に対して急激な変動は見られなかったが、平成 15 年 7 月 8 日有料観瀑台上部斜面（横坑軸方向）にて小崩落が発生した。その際、図-9 に示すようにケーブルボルトの SD の値が 0.08mm の変動を示した。ほかのケーブルボルトの変位は、凍結融解に伴い段階的に変位は増加傾向を示してはいるが、当日変化を示したのは SD のみであった。この変動量は非常に小さいものの、亀裂が卓越し、薄板節理と厚板節理に囲まれた小ブロックの崩落に到る変位

量のオーダーは 0.1mm 程度であることを示す貴重なデータであると考えている。しかしながら、予測は困難であることも事実である。

従って、予測困難である崩落発生により、横坑軸方向の崖面が不安定となることが懸念されるため、それまでの立坑からのロックアンカーにより崖面を補強する施工方法のみでは、有料観瀑台の観光客に対する安全性を確保することは難しいと判断され、追加の補強対策について検討を開始した。

その結果、崖面を直接保護するロープネット及びロックネット、さらには有料観瀑台に対する防護柵の対策工の採用に到った。

5. 三期その2工事の施工

(1) 工事概要

- ・工事名
大谷川山腹崩壊対策工事三期その2工事
- ・工期
平成 17 年 12 月 23 日 ～ 平成 20 年 3 月 10 日
- ・工事内容(図-10～12)
 - ・ロックアンカー工（平均長 28.09m）：104.0 本
 - ・計測工：5.0 本

- ・立坑閉塞工 : 344.0m³
- ・ロープネット工 : 1420.0m²
- ・ロックネット工 : 338.0m²
- ・落石防護柵 (H=4.0m) : 18.9m
- ・タワークレーン設備 1.0式

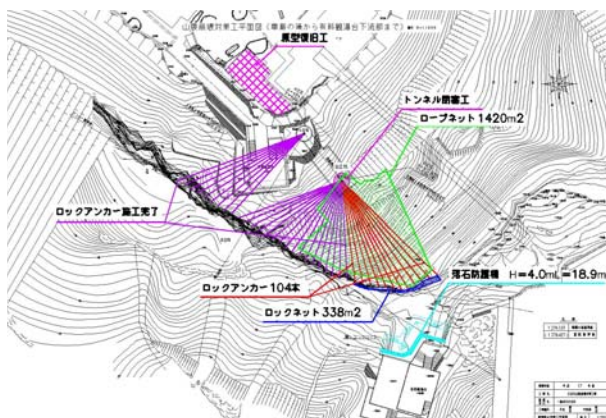


図-10 大谷川山腹崩壊対策工事平面図

b) 施工法の検討

施工範囲直下には、有料観瀑台が存在し、年間100万人の観光客が常時いる。そのためには、確実に小崩落の影響を防ぐ必要があり、国立公園内であるにも関わらず、崖面を外から直接防護する方策と



図-12 踏査平面図

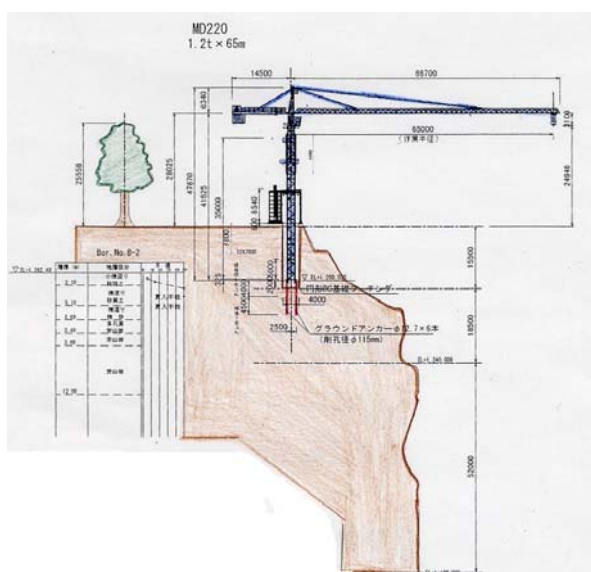


図-11 タワークレーン

(2) 現地状況踏査に基づく施工計画

a) 斜面踏査結果

ロックライマーによる踏査を実施した結果、斜面は崖錘堆積物等による被覆層分布領域と露岩部に大別された。被覆層の層厚は、50cm以下の領域がほとんどであり、露岩部は、浮石が分布する領域と存在しない安定岩盤に区分されることが明らかとなった。

また、急勾配の斜面が大部分を占めており、落石等による下部施設への影響が高いと判断された。

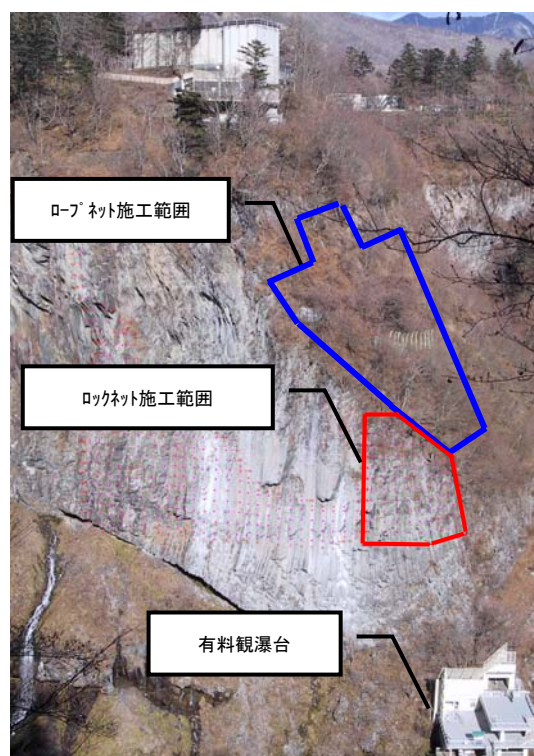


図-13 現地周辺状況図

して、図-13に示すように、ロックアンカー施工と共に、斜面上部にロープネット、斜面下部にはロックネットを施工するものとした。そのため、資材運搬方法として、立坑を利用したタワークレーンを用いるものとした。これにより、設計上想定した崩落規模(4m×2m)以下の小ブロックに対する対策工に相当する施工方法が明確となった。

さらに施工範囲の斜面には、伸縮計、傾斜計を設

置し、有料観瀑台付近には振動計を設置し、常時観測を継続しながら施工を行うものとした（図-14）。

また、管理値についても、小崩落の発生に伴い、過去の計測値に基づいた見直しを行い、変位速度の管理値を 0.5mm/月から 0.08mm/hr に変更し、新たな管理値を適用した施工を進めることとした。

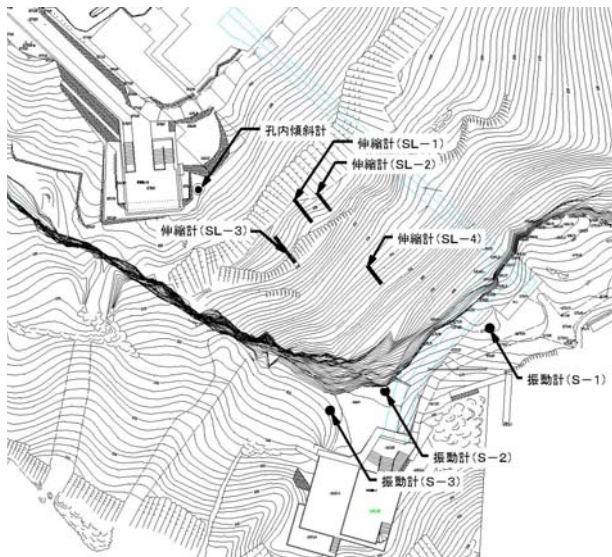


図-14 斜面計測器位置図

6. おわりに

本工事は、当初県営観瀑台の補強を目的として実施されたが、崩落の危険区域直下に民間の観瀑台が営業しており、一年を通じて観光客が絶えないため、

工事の安全管理には最大限の配慮が必要であった。

特に節理性岩盤である崖面の計測管理をどう進めるかは最も難しい命題であったが、小崩落の発生を伴った長期計測結果に基づき管理値の再設定を行い、施工を再開することが出来た。

末筆ながら、二期工事の4年6カ月もの長期に渡る施工経緯および計測データに基づき、三期施工時に発生した崩落を考慮した様々な検討にあたって指導・協力・援助を頂いた関係各位に厚く御礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 丸山清輝・小嶋伸一：移動観測による地すべり斜面の管理基準値、地すべり、第31巻、第1号、1994
- 2) 土木学会岩盤力学委員会：岩盤斜面の調査と対策、1999.
- 3) 伊藤文雄・津野 巖・清水則一：崖面崩壊対策工事に対するケーブルボルトの適用，第30回岩盤力学に関するシンポジウム、2000.
- 4) 斉藤 勤・伊藤文雄・津野 巖：日本の名瀑「日光華厳の滝」の景観を守る—一級河川大谷川山腹崩壊対策工事—，トンネルと地下、Vol. 3, No. 2, 2002.