

柱状節理の掘削と法面保護方法について Method statement of columnar joints excavation, and slope protection

萩本 晃弘*
Akihiro Ogimoto

中井 利幸*
Toshiyuki Nakai

要 約

柱状節理は、景観が非常に美しいため、宮崎県の高千穂峡など他の地域でも保全対象となることが多い反面、施工上は節理面から柱状岩塊ごと剥落する懸念があり、掘削時の安全対策や法面保護など、特別な対処が必要な岩盤である。本稿では、柱状節理部に位置するダムの基礎岩盤の掘削方法と、永久法面での自然景観に配慮した法面保護方法についての実績を報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. ダム工事の概要
- § 3. ダム基礎掘削における課題
- § 4. 柱状節理岩盤の掘削方法
- § 5. 自然景観に配慮した法面保護方法
- § 6. 施工方法の効果
- § 7. 今後の課題とまとめ

§ 1. はじめに

立野ダムは、堤体積約 40 万 m^3 の曲線重力式コンクリートダムである。曲線重力式コンクリートダムは、主に重力により貯水池の水圧に抵抗するとともに、アーチ作用によって水圧を兩岸の基礎岩盤にも分散させ、堤体の安定を確保する構造である。

本ダムは 1 級河川白川とその支川黒川の合流点に建設され、「阿蘇くじゅう国立公園」内に位置する。主な地質の特徴としては、溶岩が冷え固まる際に形成された柱状節理の存在がある。柱状節理は、景観が非常に美しいため、宮崎県の高千穂峡など他の地域でも保全対象となることが多い反面、施工上は節理面から柱状岩塊ごと剥落する懸念があり、掘削時の安全対策や法面保護など、特別な対処が必要な岩盤である。本稿では、柱状節理岩盤の掘削および法面保護方法において、その特徴に配慮して施工した実績について報告する。

2. ダム工事の概要

工 事 名：立野ダム建設（一期）工事

発 注 者：国土交通省九州地方整備局

工事場所：左岸 熊本県菊池郡大津町大字外牧地先

右岸 熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字立野地先

工 期：2018 年 2 月 16 日～2021 年 3 月 31 日

ダム諸元：型式曲線重力式コンクリートダム

堤高 $H=87\text{ m}$ 、堤頂長 $L=197\text{ m}$ 、堤体積 $V=\text{約 } 400,000\text{ m}^3$ 、天端高 $\text{EL}282.0\text{ m}$ 、洪水時最高水位 $\text{EL}276.0\text{ m}$ 、集水面積約 383 km^2 、湛水面積約 0.36 km^2 、貯留容量約 $1,010\text{ 万 m}^3$

（図一～四、表一）



図一 立野ダム位置図



図二 立野ダム完成イメージ

* 九州（支）立野ダム JV（工）

表-1 立野ダム緒元

位置	左岸：熊本県菊池郡大津町大字外牧地先		
	右岸：熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字立野地先		
河川名	白川水系白川	堤高(高さ)	87m
ダム名	立野ダム	堤頂長(長さ)	197m
型式	曲線重力式コンクリートダム	堤体積(減勢工を含む)	約40万m ³
集水面積	約383Km ²	天端高	標高282.0m
湛水面積	約0.36km ²	洪水時最高水位	標高276.0m
総貯水量	約1,010万3	計画堆砂量	約60万m ³

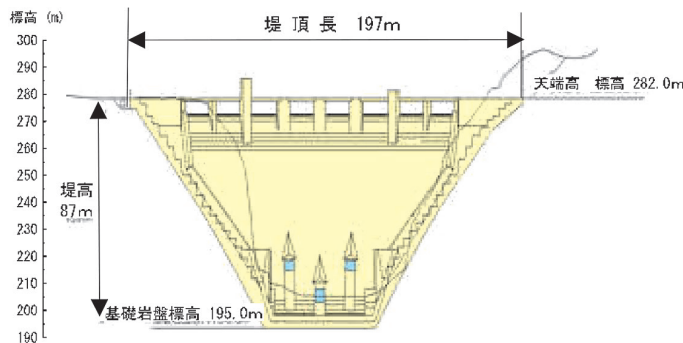


図-3 立野ダム下流面図

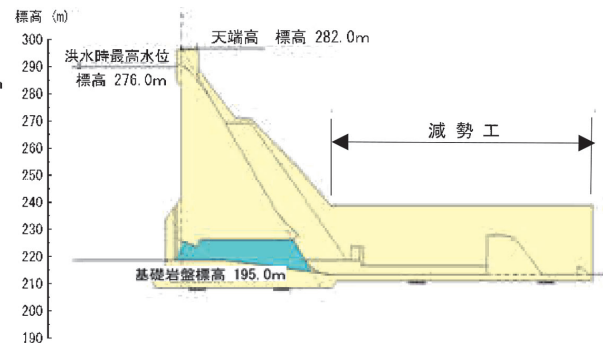


図-4 立野ダム下流面図

§ 3. ダム基礎掘削における課題

3-1 立野ダムの柱状節理とその特徴について

立野ダムの地質分布を図-5に示す。立野ダムの右岸側には立野溶岩塊状部(Ttm)があり(写真-1)、その一部区間において柱状節理が形成されている(写真-2)。

柱状節理とは、溶岩流(火山岩)が冷え固まる際、温度の低下とともに溶岩が収縮し、規則的な割れ目ができ形成されたものである。東尋坊(福井県)、高千穂峡(宮崎県)、デビルスタワー(米国ワイオミング州)等各所で国の名勝・天然記念物に指定されている。

3-2 ダム基礎掘削の課題

重力式コンクリートダムでは、貯水による上下流方向の荷重を堤体自重と基礎地盤のせん断抵抗力で受け持つため、基礎となる岩盤は堅硬で緩みのないことが求められる。また、当ダムは「阿蘇くじゅう国立公園」内に位置し、自然景観を保全・保護することを求められた。特にダム本体の上下流部は、堤体本体作業と近接施工となるため、岩盤の剥落を防止するとともに、柱状節理の形状と岩肌を保全した掘削・法面保護が求められた。

ダム基礎掘削における課題をまとめると以下である。

- 課題① ダム基礎岩盤の掘削による緩みの抑制
- 課題② 景観に配慮した法面保護方法

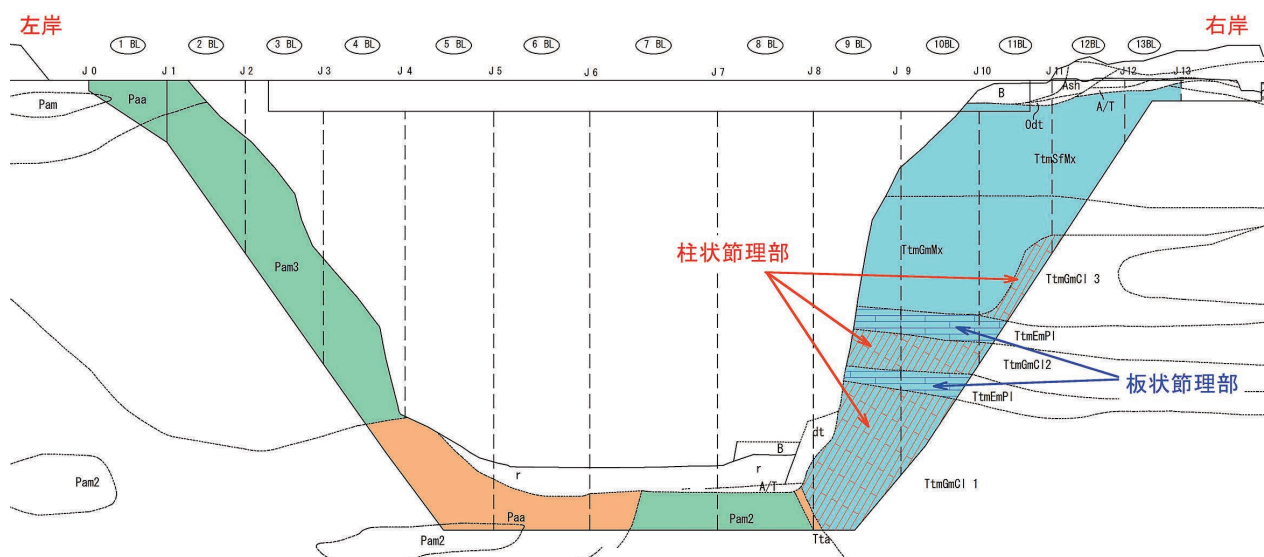
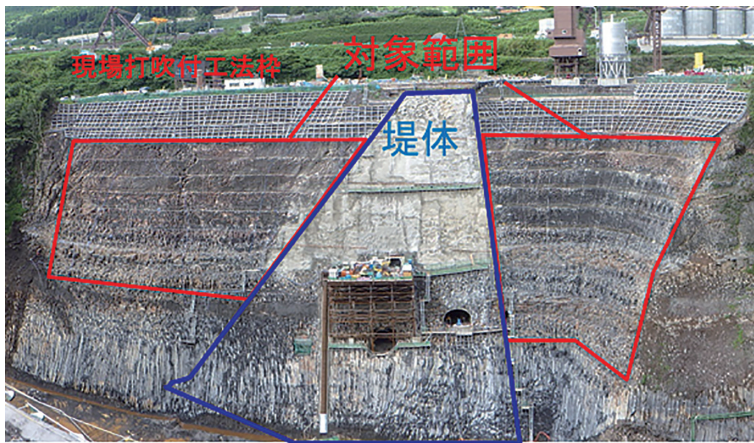


図-5 立野ダム地質分布



写真一 ダム本体斜面部における柱状節理の法面保護範囲



写真二 柱状節理形状

§ 4. 柱状節理岩盤の掘削方法

4-1 柱状節理部の掘削時の緩みの抑制方法

一般岩盤部での掘削方法は、計画掘削線から 0.5 m を人力掘削, そこから 3 m を小ベンチ掘削(発破掘削), 5 m を本ベンチ掘削(発破掘削)で施工した。柱状節理部では、同様の方法で掘削すると節理面が開いて基礎岩盤(計画掘削線)を緩めてしまう可能性があった。このため柱状節理部では、制御発破で本ベンチカット部を掘削した後、大きな岩塊の落下を防ぐため、小ベンチカット部を 6 m 以上確保して機械掘削を行った。また、掘削線を節理面(70°程度)に近づけた勾配とすることで、柱状節理の形状が残るように配慮した(図-6)。

(1) 本ベンチカット部の発破による掘削方法の工夫

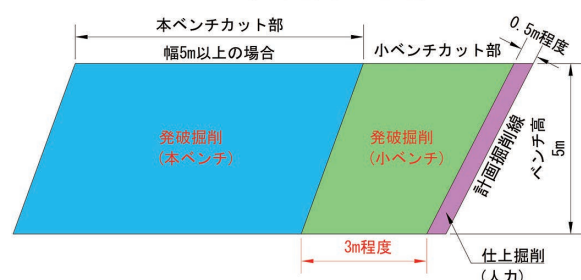
大きな振動を与えた場合、柱状節理部が緩む危険性があることから、制御発破を使用した。制御発破は多段式雷管を使用し、1 孔 1 発となる孔配置及び雷管とするため、DS 多段式電気雷管を使用した。DS 多段式雷管は、0.25 秒刻みの秒間隔で時間差を設けることができ、最大 200 孔での段発が可能な雷管である(写真-3)。

(2) 小ベンチカット部における掘削の工夫

小ベンチカット部においては、掘削線を節理面(70°程度)に沿った勾配とした上で、緩み防止のために大型バックホウ(1.4 m³級)を使用した機械掘削に変更し、小ベンチカット幅も 3 m から 6 m に広げた。

岩盤が CH 級の硬岩で小段が無く丁張をかけることが困難であるため MG (マシンガイダンス) バックホウを導入し丁張レスで施工した。また、出来形管理は整形目標範囲を定め、UAV (無人航空機) 測量による点群地形データにより管理を行った(図-7)。

【一般部掘削方法】



【柱状節理部掘削方法】

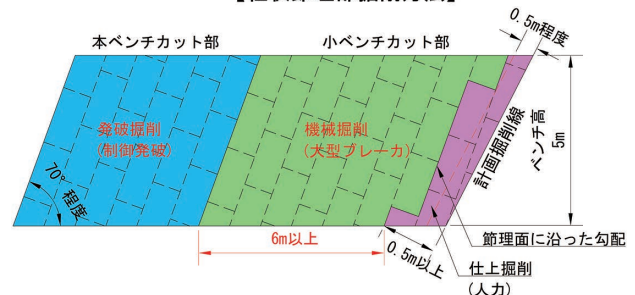


図-6 一般のベンチカット工法との違い



写真-3 DS 多段式電気雷管の発破制御器

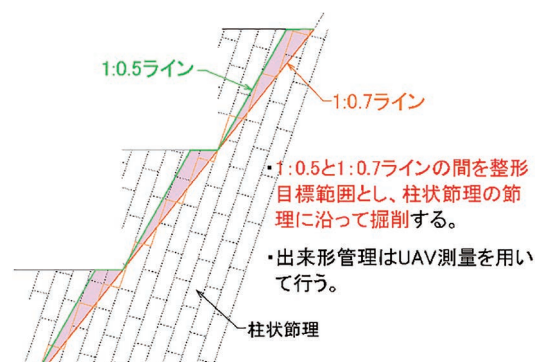


図-7 柱状節理における法面整形の方法

(3) 掘削時の安全対策

柱状節理の掘削時では、岩塊が節理面に沿って剥落する危険があることから、掘削面对岸に設置した合成開口レーダーにより動態観測を実施した。合成開口レーダーは、アンテナから電波を放射し、観測対象物から錯乱された電波を受信することで、アンテナに対する位置を計測するシステムである¹⁾ (図-8、写真-4)。

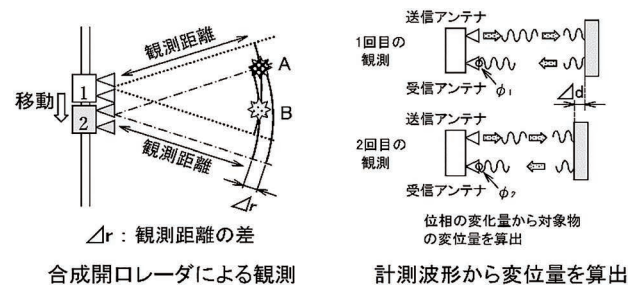


図-8 合成開口レーダーの測定原理

§ 5. 自然景観に配慮した法面保護方法

5-1 法面保護方法比較検討

柱状節理部では、自然景観と調和する法面保護の方法が課題となったため、法面保護方法として表-2の4項目について、立野ダム景観検討委員会および発注者、設計者、施工者で比較検討した。

①②の工法は人工物であるコンクリートが露出し、景観配慮の観点から適さないと判断された。③④の比較では、④クモの巣ネットの目のあきが比較的大きく、岩塊が抜け落ちる可能性があり、目を小さくするとプレートが大きくなり景観への影響が大きくなる。これに対して、③DC ネット工法は、高強度ネットを併用により小さな岩塊の崩落も防ぐことができる。部材も岩盤色に合わせて着色することで景観への影響を最小限にすることができる。さらにロックボルトを打設することによって安全性を確保できる。

以上の点から③のロックボルトを併用したDC ネット工法が採用された。

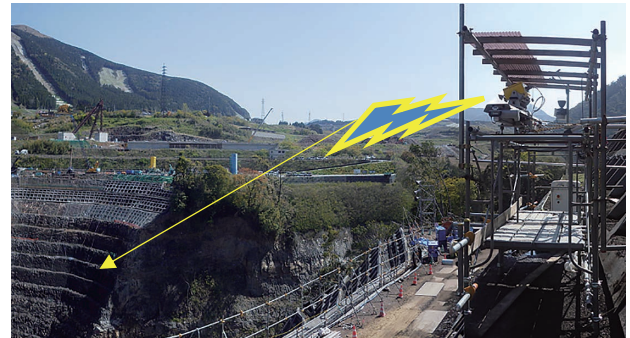


写真-4 合成開口レーダー

表-2 法面保護方法比較検討

①コンクリート吹付工 コンクリート吹付	②現場吹付法枠工(枠内モルタルまたは植生) 吹付法枠工
コンクリート吹付工 t=10cm 断面図 施工事例	モルタル吹付工 t=10cm 吹付法枠工 300x300-2,000x2,000 枠内モルタル吹付工 t=10cm モルタル吹付工(吹出し) 正面図 施工事例
景観への配慮という点においては全面コンクリートになるため適さない。	景観への配慮という点においては全面コンクリートになるため適さない。
③DCネット工法 ロックボルト+高強度ネット(50x50)+ワイヤーケーブル	④高強度ネット斜面安定工 ロックボルト+高強度ネット(82.6x82.6)
ケーブルφ10 高強度ネットφ2.6x50x50 鉄筋挿入工併用 落石ネット連結工法 プレート(150x150) 鉄筋挿入工(φ19x2,000) 2.0m千鳥配置 正面図 施工事例	高強度ネット工法 鉄筋挿入工(φ19x2,000) 2.0m千鳥配置 正面図 プレート 補強材 高強度ネット φ3.0×82.6×82.6 施工事例
高強度ネットを併用することにより小さい岩片の落下も防止することができる。部材を着色することで景観への影響は最小限にすることができる。	最大耐力が小さく、中抜けする岩塊の大きさによってはネットから抜け落ちることが考えられる。また、必要耐力を大きくするにはプレートが550mm×180mm(最大)となり、景観への影響も大きくなると考えられる。

5-2 DC ネット工法の施工方法

DC ネット工法（図-9）は、補強材のロックボルト（D19×2.0 m）、エクシードネット（高強度金網φ2.6 mm×50 mm×50 mm）、ワイヤーケーブル（φ10）およびコイルによって構成されており、すべての部材に塗装を行った。塗装色の検討では、オルソ画像を用いたダム本体3Dモデルにワイヤーケーブルをモデル化して重ね合わせ、塗装色の複数パターンを比較検討し、モデル上で景観に合う色調を確認した。その後、実際に塗装を施した部材を使用して、ダム堤体上流側法面で試験施工を行い、立野ダム景観検討委員会、発注者、施工者で景観との調和を現地で確認し最終決定された。

鉄筋挿入工は、長大法面での施工であったが、削孔足場を組むと堤体本体の施工と上下作業となり、工程内での施工の調整が困難であった。このため、無足場工法であるSD工法（写真-5）を実施した。堤体本体との施工調整を減らすとともに、ロックボルト打設完了後は速やかにDC ネットを敷設することで工程を確保した。

§ 6. 施工方法の効果

6-1 柱状節理掘削時の対策の効果について

柱状節理は岩盤の亀裂は多いが、硬度が高いため発破後の小割作業および小ベンチ部の機械掘削では、想定以上に時間を要した。このため機械の規格の格上げおよび台数を増やすことで対応した。

UAVによる点群地形データから管理断面に測量データを反映させた結果、MG（マシンガイダンス）バックホウでの慎重な施工により、基準高は最大値で+36 mm、最小値-32 mm、平均で+8 mmとなり、節理面に左右され出来形確保が難しい柱状節理部の規格値を侵すことなく精度よく掘削形状を仕上げる事ができた。

掘削中の合成開口レーダーによる動態観測を行った結果、大きな動きは無く、安全に掘削することができた。

6-2 柱状節理の法面保護工の景観

写真-6に、未施工部と施工部を比較した写真を示す。未施工範囲と比較してネット、ワイヤー色等に違和感なく、はっきりと柱状節理の特徴的形状が分かり景観を損ねることなく法面を保護できている。

DC ネットは大きな剥落は無いものの高強度ネットのすき間から数 cm 程度の小石の落石が見られるため、施工時の安全確保を目的として、DC ネットの上に仮設のグリーンネットを敷設した。

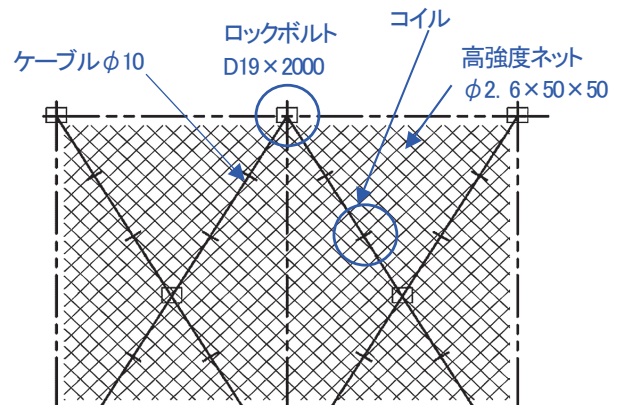


図-9 DC ネット工法詳細図



写真-5 SD工法施工状況



写真-6 DC ネットを敷設した未施工部と施工完了した箇所の比較写真

§7. 今後の課題とまとめ

掘削における対策の実施により、大きな緩みも無く掘削を完了させることができた。ただし、柱状節理は岩盤の亀裂は多いが硬度が高いため、発破後の小割作業や小ベンチ部の機械掘削工程では、想定以上に時間を要したため、機械の規格の格上げおよび台数を増やすことで対応した。

柱状節理の法面保護については、DC ネット工法が採用され、周囲と調和したワイヤー・ネット色が選定された（写真一7）。しかし、凹凸が激しい柱状節理の岩肌の状態では、SD 工法のロックボルト削孔には標準の状態に比べ2倍の時間を要した。掘削時に工程の余裕と重機が使用できるだけの敷幅があれば、クローラドリルを使用した事前削孔などにより作業効率を向上できると考えられる。今後の反省点としたい。

DC ネットは大きな岩塊の落下は無いものの高強度ネットのすき間から数 cm 程度の小石の落石が見られるため、法面下部での工事施工中は、DC ネットの上に仮設グリーンネットを敷設する事で対応した（写真一6）。

柱状節理の掘削及び法面保護対策は例が少なく、安全



写真一7 DC ネット工法近景

性と景観の両方を要求されることから、今後の景観地域における柱状節理の工事に本件が参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 17 GHz 帯地上設置型合成開口レーダーの周波数有効利用に関する調査検討報告書, 同調査検討会, 2013 年