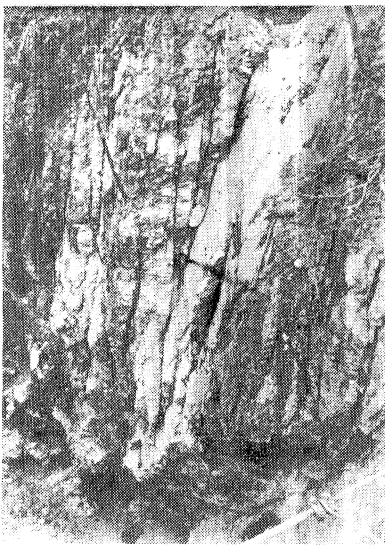


アーチダムの岩盤処理

—川俣ダム左岸の基礎岩盤改良計画—

駒 井 勲*
柴 田 功**



1. まえがき

アーチダムは両岸の基礎岩盤に伝達する力が大きいので、基礎岩盤も構造物の重要な部分として、力学的性状を検討し、ダム本体とあわせ、全体として均衡のとれた安全性を保つように設計しなければ不経済である。

しかるに、アーチダム本体の安全性についての研究は相当進んでいるが、わが国では水力の開発が進むにつれ、自然条件の困難な地点が残されるようになったにもかかわらず、基礎岩盤の安全性の問題は、最近になって、やっととりあげられるようになったのが実状である。

アーチダムの基礎岩盤の強さを支配する種々の要素は、各ダム地点によっていちじるしく異なり、さらに同一地点内でも異なる値をもつのが普通であって、岩盤力学の組織だった研究は非常に困難である。このような現状では、アーチダムの設計者は、その地点の各種の自然条件をよく調査し、その特性を把握して、これに適應する検討を行ない安全性を確認する必要がある。

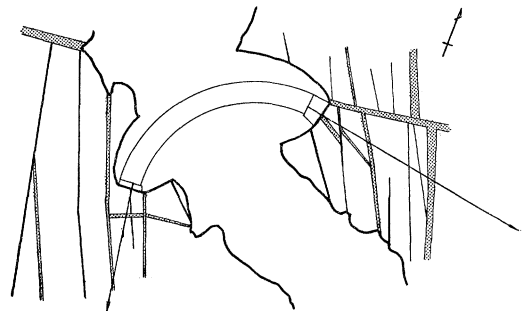
筆者らは1959年春以来、関係機関、各権威者の協力を得て、鬼怒川川俣ダム左岸の基礎岩盤が特に悪いため、その安全性確保のために調査研究を続け、その結果として相当大規模な岩盤改良工事を計画し、現在工事中である。筆者らが研究を始めてから約半年後に、マルパッセ・アーチダムの崩壊事故が起り、アーチダムの基礎岩盤の強さの問題がクローズアップされている折でもあり、その概要を報告する。

2. 川俣ダム地点の自然条件

川俣ダム地点は利根川支川鬼怒川上流の瀬戸合峡に位置し、石英粗面岩質溶結凝灰岩からなる急峻な狭いU字形の谷を作っている。瀬戸合峡の上下流には、古生層が分布し、谷幅が広くなり、ハイダムの建設に適する地

形はみられない。ダムサイトの石英粗面岩は、古生層の上に北東方向の土呂部から出た溶岩が流れてきたものと考えられ、きわめて堅く侵食管力に対する抵抗力が大きい。地質図(図-1)にみられるように、EW方向の断層やN10°~30°W方向のシーム、クラックなどが発達し、その一部は温泉変質を受けている。左岸ではN10°~30°Wのシーム群が下流側に抜けてオープンクラックとなっており、これらとダムサイト最大の断層No. 30とにかこまれるロッキーピラーが小さい。その内部では、スラストライン沿いに断層があり、前にあげたシーム群と交差する付近での圧砕がいちじるしい。またN10°~30°Wのシーム群は、80°Wの傾斜をもっているが、これとは別に、約50°Wの傾斜をもつ管理群が発達し、さらにスラストラインと地表等高線が、ほぼ平行なのに、その距離が小さい。

図-1 川俣ダム地質水平断面図(EL 910 m)



このような地形地質状態で、高さ120mのアーチダムの基礎としての十分な耐力をもたせるための地質処理工法を検討するのに、特に、次にあげることが考慮されるべきであると考えた。

(1) せん断破壊

コンクリートなどに圧縮力を作用させると、図-2に示すようにせん断破壊するが、左岸には図-3の点線で示すように、スラストラインと40°~50°の角度をなす多数のシームクラックなどが存在し、これらが、こ

カット写真：右岸下流側からみた左岸の地質状態

* 正員 水資源開発公団第一設計課長(前川俣ダム工事事務所長)

** 正員 建設省川俣ダム工事事務所第一設計係長

図-3 地質水平断面図

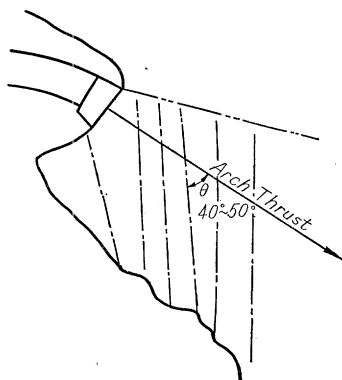
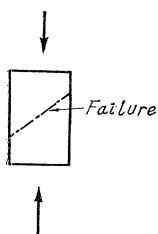


図-2 圧縮力による破壊



のせん断破壊面に類似している。さらに、これらの面の材料のせん断強さが小さいのに、スラストラインと山の表面までの距離が小さいので、ロッキーピラーのせん断破壊に対する抵抗力が小さい。この問題は、下部の山が小さくなっているため、標高が低くなるほどきつくなっている。

(2) アーチ アバットメントの山側への追込み

一般に図-4に示す $b, d/b, \alpha$ などの値が小さくなるほど、基礎岩盤の支持力は小さくなる。左岸ではダムサイト最大の断層 No. 30 との関係から山側に追込めないで、これらの値が非常に小さい。

図-4 アーチ アバットメント付近の水平断面図

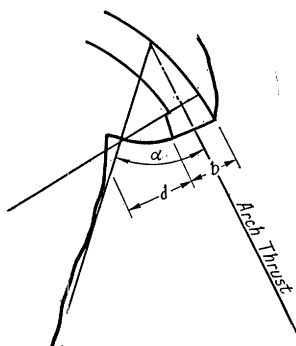
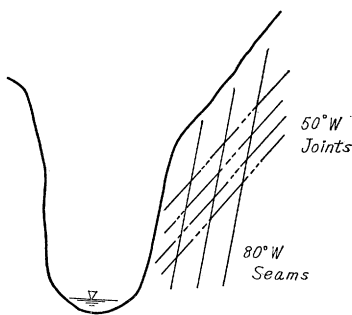


図-5 地質横断面図



(3) 山の崩落

横断面を考えると図-5に示すように、80°Wのシーム、クラック群のほか、約50°Wのゆるい傾斜を示す節理群が発達している。これをゆるめると山を崩落させることになり危険である。

3. 基礎岩盤の強さについての力学的検討

川俣ダムの左岸では、土質力学の滑り破壊面に相当す

るものとして、N 10°~30°W, 80°W のシーム群が想定されることは、前節で述べたとおりであるが、これと断層 No. 30 とで囲まれる柱状の岩塊をロッキーピラーと呼ぶこととし、そのせん断抵抗に対する安全度を検討して、基礎岩盤の強さを示すことにした。その概要は次のとおりである。

ロッキーピラーはダムから伝達される外力から、裏山の反力をさし引いた力を底面および背面 (N 10°~30°W, 80°W のシーム群) のせん断抵抗によって支えなければならない。裏山の反力は、川俣地点の地質条件から背面が平面とみなせるので、ロッキーピラーの片持ばり変形と裏山および背面の断層材料の弾性変形とが等しいものとおけば、次の計算によって求められる。

標高 m の裏山および背面の断層材料の弾性変形は、次式で示される。

$$\Delta_1 = p_m (T'/E' + \beta')$$

- 式中 p_m : 標高 m の裏山の反力強度
- T' : 背面の断層材料の厚さ
- E' : 背面の断層材料の弾性係数
- β' : 基礎定数 (Trial-Load Analysis, Foundation Constants 参照)

また、ロッキーピラーの標高における片持ばりのたわみは次式で示される。

$$\Delta_2 = \sum_n \delta_{n,m} (P_n - p_n \cdot l_n)$$

- 式中 $\delta_{n,m}$: 標高 m の単位三角荷重 n による片持ばりの単位たわみ

$$\begin{aligned} & \Sigma \left(M_A \cdot \alpha + V_A \alpha_2 + \Sigma \frac{M}{E_R I} \Delta z \right) \Delta z \\ & + \left(V_A \cdot r + M_A \alpha_2 + \Sigma \frac{VK}{AG} \Delta z \right) \end{aligned}$$

(Trial-Load Analysis, Cantilever Data 参照)

$$K = 1.25$$

- P_n : 標高 n の外力の裏山に垂直な成分
- p_n : 標高 n の P_n による反力強度
- l_n : 標高 n のロッキーピラー背面の幅
- α, α_2, r : 基礎定数

したがって、裏山の反力は次の連立方程式の解である。

$$p_m \left(\frac{T'}{E'} + \beta' \right) = \sum_n \delta_{n,m} (P_n - p_n \cdot l_n)$$

以上の計算により、外力から反力をさし引いた力が求められるが、この力がロッキーピラー底面および背面のせん断抵抗によって支持されるべき力である。

このせん断に対する安全率は、川俣地点の場合、事実上、次の近似式で求めてきつつかえない。

$$N = \frac{f \cdot \Sigma W + A_R \cdot \tau_R + \Sigma A_F \cdot \tau_F}{H}$$

- 式中 N : ロッキーピラーのもつ安全度
- H : ロッキーピラーが受持つべき力

ΣW : ロッキーピラーの重量

τ_R : ロッキーピラー底面のせん断強度

A_R : ロッキーピラーの底面積

τ_F : 背面の断層材料のせん断強度

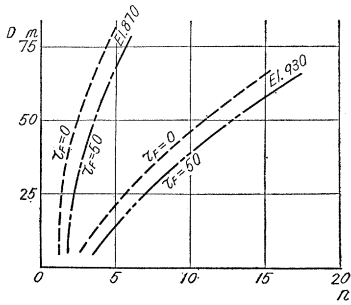
ΣA_F : 背面の断層の面積

現場実験の結果, $N 10^\circ \sim 30^\circ$

$W, 80^\circ W$ の断層材料のせん断強さは少なくとも 50 t/m^2 以上あることが確かめられたので $\tau_F = 50 \text{ t/m}^2$ とし, また, $\tau_R = 350 \text{ t/m}^2$ と推定

して計算し, 次に示す安全率の曲線が求められた。この曲線によると, 川俣ダム左岸では標高が低くなるほど基礎岩盤の安全性が低下していることがわかる。

図-6 ロッキーピラーのせん断に対する安全率 n とアーチアバットメントからの距離 D との関係



4. 基礎岩盤の改良計画

(1) 設計上考慮すべき事項

川俣地点左岸では, 前に述べた悪条件を改良しなければならないが, その設計上考慮すべき事項として, 次にあげることが考えられる。

a) アーチダム

① アーチアバットメントをできるだけ山側に迫込むこと。

② スラストラインが, できるだけ山側に向くような形状を選定すること。

b) 山の補強

① 山をゆるめたり, 分離させてはならない。

② 軟弱層のせん断抵抗を増すこと。

これには次の対策がある。

④ 軟弱層を乾燥状態に保つこと。

⑤ 軟弱層の材料のせん断強さを改良すること。

③ 軟弱層に作用するせん断応力度を低下させること。

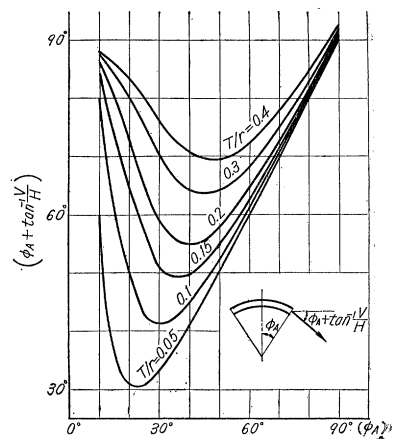
② アーチアバットメント付近の大きな応力に対して補強すること。

(2) アーチダム

これまでのアーチダムは, 主としてダム本体の安全性についての研究が重ねられてきたが, 川俣ダムのように自然条件のよくない場合は, ダムから伝達される合力の位置および方向が基礎岩盤の強さに大きな影響をおよぼすので, 基礎の問題に最も有利になるように, ダムの位置, 形状を選ばなければならない。

この観点から 図-7 アーチ中心角とスラスト方向の関係

ら, アーチ中心角とスラストライン方向との関係に極値が存在することを確かめ, ダム本体の安全性が許容する限度までダム形状をフラットにし, スラストラインと地表



面のなす角を大きくするようにした。

このようにして設計されたアーチの中心角は, 一般のアーチダムよりかなり小さく約 $80^\circ \sim 100^\circ$ である。

(3) 基礎改良工法の検討

岩盤処理に際しては, このような条件に加え岩盤の持つ性質に対応して, その性質を損ねることなく利用することが原則であり, これらを考慮して川俣地点左岸の欠陥改良工法として

① 狭い谷であることを利用して, 対岸からの支柱でおさえる案

② 左岸の表面に沿うよう壁でおさえる案

③ 断層内にジュベルを設ける Dowelling 案

④ 必要範囲をコンクリートで置きかえる案

⑤ 鋼材を埋設する Tying 案

⑥ PC鋼材を埋設し, これにプレストレスを与える Prestressed Tierods 案

⑦ 岩盤内にくい状構造物を作る Pile 案
などの単独または組み合わせ工法が考えられた。

これらについて検討すると, ①, ②, ③ 案は非常に大きなものを要し, ③ 案は弱層が多いのに, その間隔も小さいので数が多くなり, かえって山をいためる可能性が強い。したがって, コンクリート構造物による山を分離させないための工法および, コンクリート構造物による軟弱層材料のせん断強さを改良するための工法には, 無理が生ずると判断されたことにより, 軟弱層に作用するせん断応力度の低下と応力を広い範囲に分散させることを目的とする Pile 案と, 山をしぼる Prestressed Tierods 案の併用および 2 次的な補強として, 想定滑り面の末端の根固めを目的とする左岸下部標高の凹部填充コンクリートを拡張した擁壁と Prestressed Tierods 案の併用について, 安全度の問題はもちろん, 経済性についても検討され, 最終的に, これらの組み合わせが実施されることになった。

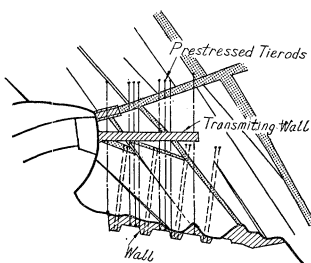
次に、これらの概要を説明する。

(4) 採用工法

a) Transmitting Wall 川俣地点左側のような地質条件では、ダムからのスラストが作用すればアーチ アバットメントに近い軟弱層に最も大きなせん断応力が作用し、ここから滑るようになる。これに Pile を入れれば、荷重が奥に伝達され、アーチ アバットメントに近い軟弱層に作用するせん断応力が小さくなって滑り面が大きくなり、安全度を増すことは明らかである。この Pile は施工条件から形状を壁状にする必要があり、われわれは、これを Transmitting Wall と呼ぶことにした。この工法には必要範囲を一体化するか、満水時のスラストラインに沿って施工する場合に偏向荷重が作用しても安全であるか、サイズはどのようにして設計されるべきか、さらに所定の工期内に山をゆるめることなく施工するか、などの諸問題がある。これらについて検討すると、火薬の使用によって山をゆるめるという問題は、Smooth Blasting により最少限に止めることができると考えられ、ほかの問題にしばられる。

サイズは極限設計法が可能であるとすれば U 字形の谷であるため、ダムの主応力線が、ほぼ水平であることを考慮に入れ、任意標高の Transmitting Wall の厚さは、その標高の任意の滑り面で形成されるロッキーピラーの持つせん断に対する安全率の不足分の力を支持するコンクリート柱として設計される。しかし、この場合はアーチアバットメントから離れるほど小さくてよいが、クサビ作用を除くため形を平行にする必要がある。また解析方法の不完全と、ダムという構造物の安全の重要性から、少なくとも満水

図-8 左岸改良工事水平断面図



時のスラストを十分に支持する厚さにする必要があり、周囲の岩盤のおさえがあるので、短柱とみなし、 10° の偏向荷重に対して安全率 2 以上の支持力をもたせ

表-1 Transmitting Wall の寸法

EI	スラスト	必要耐荷力	ピラーを考慮した必要厚	伝達に対する必要厚	厚さの施工案	長さ
	(H)	(4H)	(4H-nH)	(2H)	(2H)	
	t/m	t/m	m	m	m	m
970	1 500	6 000	—	—	—	—
950	2 700	10 800	—	1.8	—	—
930	4 250	17 000	1.0	2.8	2.3	30.0
910	5 250	21 000	3.0	3.4	3.4	40.0
890	5 400	21 600	3.5	3.5	3.5	45.0
870	3 500	14 000	3.0	3.5	3.5	55.0

るようにすることも考えに入れた。このようにして求められた施工方案は表-1 のとおりである。

この施工方案について、建設省土木研究所によって石コウ 2 次元模型による破壊実験、および計測が行なわれ、また理化学研究所および京都大学工学研究所によって、2 次元光弾性模型実験が行なわれた。その詳細は別に報告するが、Transmitting Wall はせん断滑り破壊面を大きくするのに有効であること、 10° の偏向荷重が作用する場合でも、この構造物を入れた範囲が十分に一体化されること、サイズの極限設計法が可能と考えられることなどが確かめられた。

b) Prestressed Tierods Tying または、Prestressed Tierods に全面的にたよる工法は川俣地点で考えられるせん断滑り破壊に対しては、必要工費の割合にくらべると効果が少ない。しかし、

① 岩盤内に Transmitting Wall を施工するので結果として山を二分するという好ましくない現象を生じ、また Smooth Blasting を採用しても Blasting によって岩盤にゆるみが生ずるので一本化しなければならない。

② 岩盤表面の崩落を防止する必要がある。

③ 貯水位の変動によるくり返し荷重によって、ヤング率の高い Transmitting Wall と周囲の岩盤とが離れる可能性がないとはいえない。

などの理由から Prestressed Tierods の併用が考えられた。その量は Transmitting Wall 側面に満水時にダムから伝達される荷重の約 4% にあたる 15 500 t のプレストレスを加えることにした。これは決め手がないが、左岸が完全弾性体であると仮定した場合に生ずるスラストに直交する引張応力を光弾性実験の結果から求め推定したものである。なお、採用された設計は高張鋼棒を使う Dywidag 工法である。

c) 左岸押え壁および Prestressed Tierods 筆者たちは前項までに概説した Transmitting Wall と Prestressed Tierods の併用により、前にあげた基礎岩盤の改良計画に際して具備すべき条件は、ほぼ満足されるものと考え、左岸下部にくぼ地があり、これをコンクリートで填充する工事を利用して扶壁を作り、ここから岩盤にプレストレスを加える 2 次的補強の設計を採用した。この PC 工法には B.B.R.V. 工法を使うが岩盤に加えるプレストレス量は 8 500 t (3.5 t/m) であり、スラストラインから地表面までの距離を約 5% 増大させたのと同様で、滑り面末端の根固め、および岩塊のせん断変形に効果があるものとする。

(原稿受付：1962.8.29)