

ラオス国ナムニアップ1水力発電所 低角度弱層を有するダム基礎のせん断キーの効果

ナムニアップ1パワーカンパニー
関西電力株式会社

田渕 貴久
正会員

喜多 伸明
正会員

村上 嘉謙
正会員

○瀬岡 正彦

1. ダム地点の地質状況

ナムニアップ1水力発電所は、ダム高167mの重力式コンクリートダムを有する。ダム軸の地質縦断面図を図-1に示す。ダム地点の地質は泥岩と砂岩の互層になっており、上下流、左右岸方向に連続している。右岸側では褶曲構造が顕著で、地層の傾斜は一部垂直に近くなっている。さらに、連続する低角度弱層が多数存在しており、河床部分でもダムの安定性に影響を及ぼしうる弱層が存在することが判明した。弱層は一概に細粒分が介在しているわけではなく、部分的に岩盤がかみ合わさっている箇所もあり、厚さは最大で2m程度であった。これらの弱層は、左右岸方向の広域的な圧縮応力などの影響で生じた破砕部が風化することで形成されたと想定される。なお、弱層の設計値は、各種試験結果等より内部摩擦角を19-25度、粘着力を0 kN/m²としている。

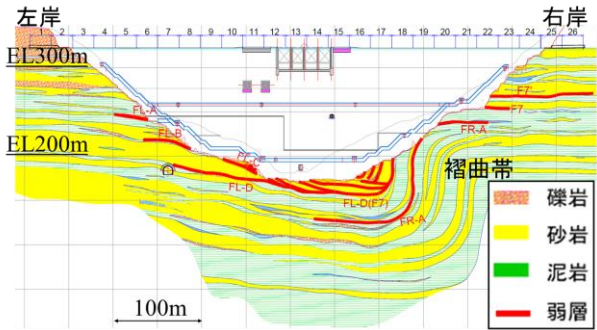


図-1 地質断面図（ダム軸）

2. 低角度弱層対策

低角度弱層への対策としては、ダウエリングやせん断キーなどの弱層を直接置き換える方法、アンカー工やカウンターウエイトを導入して抵抗力を増加させる方法、フィレットや下流面形状を変更してダム抵抗力を向上させる方法、排水孔の設置などで揚圧力を減らす方法などがある。各対策の概要と対策の概略図を表-1、図-2に示す。経済性、効果、工程を5点満点で相対評価し、全項目の積を総合評価として、30点以上を採用するものとした。アンカー工は、海外において基準の見直しに伴うダムの補強対策として採用されることが多い。これは経済性や対策の容易さが理由であるが、アンカー工は緊張力の低下や腐食などに伴う耐久性に課題があり、将来に渡ってきめ細やかなメンテナンスが必要である。1934年にアルジェリアのダムで堤体補強として適用されたアンカー工が、ダムに適用された最初の事例である。近年国内でも、耐久性、防触技術、削孔技術の向上もあり、積極的な導入が検討されている。本ダムにおいては、ダム高が高いこともあり、相当数のアンカーの導入が必要と想定されたことと、将来のメンテナンス性を考慮して採用を見送った。カウンターウエイトは、発電所背面の埋め戻し部を利用して部分的に導入するものとした。ダウエリングは、トンネル掘削により弱層を部分的に除去し、コンクリートに置き換えることで抵抗力を増加させる方法であり、ダム基礎の深部にある弱層の改良を目的として採用されることがある。せん断キーは国内外で広く採用されている工法である。弱層を直接除去してコンクリートに置き換えるため、確実に抵抗力を増加させることができる。弱層が浅いほど上載荷重が小さく、切り上がり部の岩盤のせん断抵抗も小さくなるので、より長く弱層を除去する必要があるが、せん断キー設置時の掘削量は少なくなり、有利となる。弱層が深い位置にある場合は、その逆でダウエリングが有利となる。本ダムでは、比較的浅い位置に

表-1 各対策の概要

(各項目の数字は5点満点の相対評価)

対策	経済性	効果	工程	総合点 (各項目の積)	採用
1.せん断キー	3	5	3	45	○
2.ダウエリング	2	4	2	16	×
3.アンカー	3	2	3	18	×
4.カウンターウエイト	4	2	5	40	○
5.フィレット	3	2	5	30	○
6.下流面勾配	1	2	4	8	×
7.排水孔	5	2	5	50	○

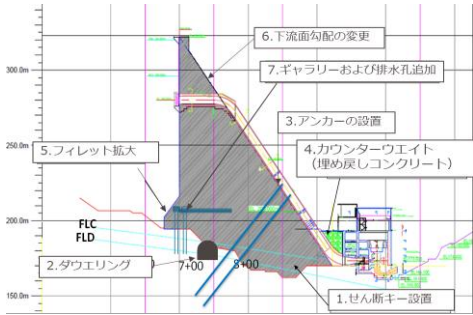


図-2 安定化対策の概要

弱層があったこと、掘削のための十分な数の重機が現場にあったことから、せん断キーの設置を主な対策とすることとした。地形的な制約から、十分なせん断キーが設置できない箇所では、フィレットを拡幅して水圧による上載荷重とせん断長増加を図った。排水孔は、各種ダム設計基準においても設置することになっている。本ダムにおいても、低コストで揚圧力を低減できる排水孔の本数を増やすことに加え、ギャラリーを上流に移動させて、さらなる揚圧力の低減を図った。

3. ダムの安定性

せん断キーの設置に伴い、ダムの転倒、滑動、支持力について再検討を行った。転倒については、せん断キーの設置に伴い自重が増加するため、基本的には安全率が増加する傾向となるが、せん断キーの位置が下流側にある場合、転倒の安全率が低下することがある。発電所を含む一部の断面では、せん断キーが下流側に設置されているため、安全率がわずかに低下するが、フィレットの拡大と排水孔の設置により、転倒に対する抵抗性が大きく上昇している。排水孔の設置などの対策は、こういったせん断キーの転倒に対する抵抗性の低下を補完する効果がある。また、支持力については、せん断キー設置により 5%程度荷重が増加するものの、岩盤が堅固であるため許容値に対して裕度が大きく、剛体計算による設計上問題にならない。また次節で述べるが、せん断キーは本来つま先に集中する応力を分散する役割もあり、実際は支持力に対して有利に働くと想定される。滑動については、ダム基礎直下の河床部に下流下りの低角度弱層が確認されたため、弱層に沿った滑動に対する検討としてくさび解析を行った。くさび解析は、図-3 に示すように水平弱層に対して複数の滑り線上のブロックに分けて滑動力と抵抗力の検討を行うものである。解析における外力条件および必要安全率等は、United States Army Corps of Engineers (EM 1110-2-2200) に準拠した。ここで、それぞれの対策を適用した場合、安全率が何%程度向上したかを図-4 に示す。せん断キーの設置が、滑動の安全率の向上に対して非常に有効であることが分かる。

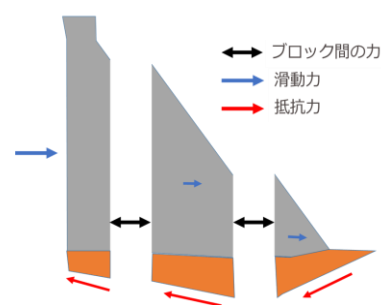


図-3 くさび解析概念図

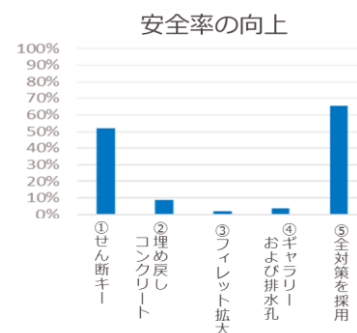


図-4 安全率の向上

4. 応力状態

応力状態を確かめるために、せん断キーを設置した断面の非線形弾性解析 (FEM) 結果を評価した。満水時の最小主応力の分布を図-5 に示す。通常はダムのつま先に応力が集中するが、せん断キーがあることでせん断キーの下流端でも大きな応力が発生している。これにより、応力の集中が緩和されている。この効果は剛体計算では確認できないものである。また、地形的な制約や発電所のレイアウトの関係で、せん断キーの位置がダムの中央付近にあるので、弱層との境界部に引張応力が発生している。そのため、掘削時に可能な限り弱層を掘り込み応力集中を緩和し、鉄筋を配置して堤体のクラック発生防止を図った。

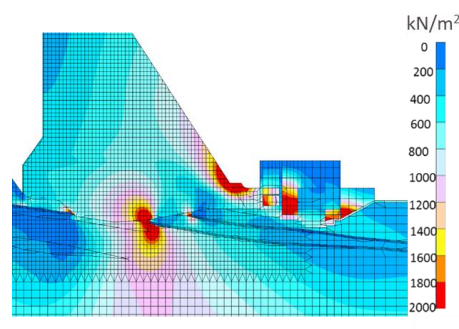


図-5 河床断面最小主応力

4. おわりに

本稿では、滑動抵抗性の大幅な向上とダム基礎における応力の分散の観点から、せん断キーによる対策の有用性を示した。今後は、本稿で概説した設計と解析から得られたせん断キーの有用性を、ダムの各種計測結果や湛水後に実施した地質調査結果をもとに検証していく予定である。