

Kandil Dam (トルコ) の地質工学的設計パラメータの評価

国際委員

水野 直弥

1. はじめに

私はこれまでに国内のダム建設事業に関わる地質調査・解析に携わる機会が多かったが、最近、インドネシアのダム建設事業に関わる地質調査・解析に携わり、国内との類似点や相違点を知る機会があった。

私としては、今後、海外で仕事をする日本の地質技術者が増えることを期待している。また、海外の調査・評価手法を知ることは、国内の地質調査・解析においても役立つだろう。

そこで、今回は Bulletin の第 75 巻 p439~449 に掲載された「Assessment of engineering geological design parameters for Kandil (CFRD) Dam, Kahramanmaraş-Turkey」を紹介させていただく。本論文は、地質的課題とその解決について議論されたものではないため、やや面白みに欠けるかもしれないが、その分、当該サイトにおける地質調査・解析を網羅的に紹介できると考えて選定した。

2. Kandil Dam の特徴

Kandil Dam はトルコの南東部を流れる Ceyhan 川に位置し、発電と灌漑を目的とした堤高 107m、堤頂長 350m、総貯水容量 4 億 4,000 万 m³ の表面遮水型ロックフィルダム (Concrete Face Rockfill Dam : CFRD) で、2013 年 11 月に竣工している。ちなみに、日本国内で施工実績の多いロックフィルダムは、中央土質遮水壁型で ECRD (Earth Core Rockfill Dam) と呼ばれる。

CFRD 型式は、日本では昭和 20~40 年代に石淵ダム、皆瀬ダムなど数基の建設事例があるが、当時は堤体ロック材の締め固め工法が現在のように進んでいなかったため不等沈下やクラックが発生しやすく、国内では施工事例が少ない。しかし、その後の技術進歩を背景として、CFRD 型式のメリットが注目され、近年では徳山ダムの上流二次締切 (堤高 37m) の施工実績があるほか、建設中の南摩ダム (堤高 86.5m、堤頂長 359m) のダム型式として採用されている。

CFRD 型式には、以下のメリットがある。

- ① コア材等の土質材料をあまり必要としない。
- ② 堤体材料のほとんどがロック材なので ECRD 型式に比べて盛立の工程を短縮できる。
- ③ 上流面で遮水するため、堤体に作用する浮力が小さい。このため、堤体安定面から ECRD 型式に比べて堤体積を縮小でき、建設コストを縮減できる (周辺環境への負荷も軽減できる)。

以下に、本論文を紹介させていただくが、オリジナルの本論と私 (紹介者) の意見や考えが混在しないよう、両者を分けて記載した。

3. Abstract

本論文は、Kandil Dam 建設事業に関わる地質調査、ダム基礎岩盤の評価、堤体材料採取地の決定について論じる

地質調査としては、地表踏査および踏査結果にもとづく割れ目 (不連続面) 解析、ボーリング調査、ピット調査、透水試験 (ルジオンテスト) および室内試験が実施された。

ダム基礎岩盤、仮排水路トンネル (直径 6.5m、延長 500m) および発電のための導水路トンネル (直径 6m、延長 9,367m) の地山については、上記の地質調査結果をもとに、Rock Mass Rating System (RMR 法) に従って岩盤を評価した。

堤体材料については、現地調査結果および室内試験結果をもとに品質および賦存量を検討し、3 地区の採取候補地の中から 2 地区に決定した。

4. Engineering geology

4.1 Topographic mapping and survey

地形判読は、ダムサイトの地形をもたらししたプロセスを理解する上で非常に重要である。本サイトの調査では、分解能 20m、縮尺 1 : 25,000 の地形図より作成した DEM データを用いて、ダムサイト周辺の斜面の形状や傾斜、起伏を表現した 3 次元の鳥観図を作成し、地形解析を行った。

《紹介者のコメント》

地形判読が重要視されている点は、国内も海外も同じである。調査対象地域について、既存資料および野外において地質情報を得にくい場合、地形判読から地質を推定する必要性が高まると考える。なお、本論文には地形解析結果に関する記載がなく、どのような観点で地形解析を行ったかは紹介できない。

4.2 Geological ground survey

広域的に見ると、トルコはアジアからヨーロッパにわたって東西に長く延びるヒマラヤ-アルプス造山帯中にあり、北側はロシア楕状地、南はインド-アフリカ楕状地の2つの安定地塊に挟まれている¹⁾。トルコでは古生代から現在まで地殻変動が何回も繰り返されてきたが、現在のトルコの地質構造に最も強い影響を及ぼしたのは、中生代～第三紀にかけてのアルプス造山運動である。

ダムサイト周辺には、先カンブリア紀の変成岩類が、貯水池の上流には新生代のオフィオライトが分布し、両者はアルプス造山運動に関連した横ずれ断層 (Elbistan-Goksun Fault) で接している。このうち、ダム基礎岩盤は、角閃石片岩および片麻岩で構成される (図-1)。

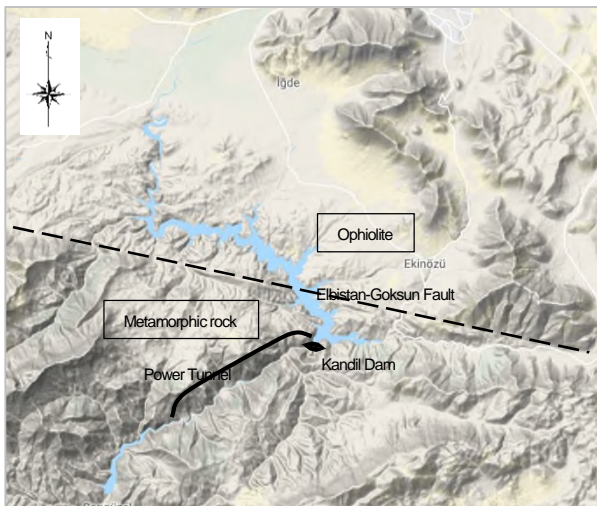


図-1 Kandil Dam 周辺の地形・地質

注) GSI による地形図に加筆して作成

地表踏査結果では、ダムサイト周辺に大規模な断層破碎帯は確認されなかった。割れ目系としては、南北方向、東西方向の2系統が卓越し、いずれも傾斜 85° 以上の高角度割れ目である。ダムサイトが位置する Ceyhan 川は、これらの割れ目系に規制されて流路が形成されている。なお、これらの割れ目系の解析には、RockWorks 2006 を使用した。

《紹介者のコメント》

RockWorks 2006 とは、コロラド州ゴールデンに本拠を置く RockWare Inc. の地下可視化ソフトウェアで、地球科学分野におけるサイトの特性評価に役立つ多数のツールが提供されている。例えば、ボーリングデータを管理するデータベース、それをもとに3次元の地質モデルを作成するツールなどである。本論文では、このソフトウェアを用いて、割れ目の走向・傾斜を、シュミットネットによるコンター・ダイヤグラムに整理している。

4.3 Field investigation

ダム基礎の岩盤状況を把握し、室内試験のための試料を得るために、ダムサイトおよび仮排水路トンネル、導水路トンネルにおいて合計 29 孔、延長 1,575.5m のボーリング調査を実施した。

コア観察では、地質ごとに岩石の RQD 値を算定した。その結果、RQD は角閃石片岩では 50% より大きく、片麻岩では、30~60% の範囲を示し、比較的良好な岩盤と評価される。

表-1 RQD による岩盤評価²⁾

RQD (%)	Rock quality
< 25	Very poor
25 - 50	Poor
50 - 75	Fair
75 - 90	Good
90 - 100	Excellent

《紹介者のコメント》

国内のダムの地質調査・解析では、ボーリングコアの品質の向上とともに、以前ほど RQD が着目されていないが、海外では定量的なパラメータとして、地盤定数の推定にも用いられている。国内でも一軸圧縮強度および RQD と岩盤の変形係数との関係が検討された研究等がある³⁾。

ルジオンテスト結果により、ダム基礎岩盤の透水性は深度依存性があることを確認した。また、RQD とルジオン値との関係から、割れ目の頻度と開口度が透水要素と考えられるが、ダム基礎岩盤の主体をなす変成岩中に大規模な破碎帯は確認されず、連続した高透水ゾーンは分布しない。

《紹介者のコメント》

本論文には、ルジオンテストの方法についての記載はなく、試験方法については紹介できない。また、試験結果の整理方法や評価方法については、国内と海外でやや異なる。海

外のルジオンテストの評価方法に関して、興味のある方は、参考文献^{4),7)}を参照されたい。

基礎岩盤の評価および堤体材料採取地の検討のため、調査ボーリングコアおよび調査ピットから試料を採取し、室内試験を行った。各試験の方法は、ASTM 規格に準拠した。

《紹介者のコメント》

ASTM 規格は、世界最大規模の標準化団体である ASTM International (旧称 American Society for Testing and Materials: 米国試験材料協会) が策定・発行する規格である。例えば、岩石の比重・吸水率試験は ASTM C97 2009、含水量試験は ASTM D2216 2005、土粒子の密度試験は ASTM D854 2010 などがある。

5. Engineering classification of the rock mass

5.1 Dam foundation rock

ボーリング調査結果および室内試験結果をもとに、RMR 法により、ダム基礎岩盤を「良質の岩盤」と評価した。

RMR 法では、①インタクトロックの一軸圧縮強度、② RQD、③割れ目間隔、④割れ目の状態、⑤地下水条件、⑥不連続面の方向性の6つの要素ごとに設定された評価点の合計値により岩盤が5段階で評価される(表-2)⁵⁾。

《紹介者のコメント》

Kandil Dam がロックフィル型式であること、ダムサイトに設計上考慮すべき地質的課題が認められなかったことから、本論文では、ダム基礎岩盤の評価について詳細な議論はない。なお、RMR 法 (Rock Mass Rating System) とは Bieniawski により提案された岩盤分類法の一手法で、評価の結果から直接的に岩盤の強度、変形特性の推定が可能とされている⁶⁾。このため、設計手法等への適用も行われ、現在、国際的に知られた岩盤分類の一つとなっている²⁾。各評価点の重み付けについては、前回(2018年10月号)の IAEG Bulletin 紹介を参照されたい。

ルジオンテストの結果により、地表から深度 36m までは部分的に高透水ゾーン (> 25Lu) が分布するが、それ以深は 1Lu 以下の難透水性の岩盤が分布することを確認した。このため、カーテングラウチングは、ダム基礎から深度 36m までを改良範囲とし、リム部には奥行き 5m の注入坑を配置して、孔間隔を 3m として設計・施工した。

《紹介者のコメント》

本論文では、基礎処理に関して、カーテングラウチングのみ記載がある。当該サイトにおいて、中央内挿法を採用したかどうかの記載はないが、3m という孔間隔は、国内では 2 次孔を規定孔とした孔間隔である。ただし、ダムの地質調査・解析に関する海外の図書⁷⁾には中央内挿法が示されているので、中央内挿法は一般的であると考えられる。

5.2 Rock mass classification for tunnel design

ダム基礎岩盤と同様、RMR 法により岩盤を評価し、支保パターンを決定した。RMR 法によるトンネルの地山分類基準には、表-3 に示すものがある⁵⁾。

《紹介者のコメント》

本論文では、ダム基礎岩盤、仮排水路トンネル、導水路トンネルについて、調査・設計時の想定と施工時の評価との違いに関する記載はなく、調査・設計時の地質工学的評価の妥当性を確認できないが、各トンネルの施工については、大きな問題はなかったという記載がある。

6. Construction materials

ダム建設に必要な堤体材料は約 2,750,000 m³であった。S 地区 (S1、S-2、S-3)、KSK 地区 (KSK-1、KSK-2、KSK-3)、K 地区 (K-1、K-2、K-3) の 3 地区を対象として、現地調査および室内試験を実施した結果、堤体材料採取地を S 地区および KSK 地区の 2 地区に決定した。

KSK 地区はダム近傍に位置し、ダムサイトと同様、変成岩が分布する。S 地区はダムサイトから 12km の距離に位置し、微晶質方解石基質およびドロマイト質の石灰岩が分布する。これら岩石について物理的および力学的な室内試験を実施した結果、堤体材料に適していると評価した。また、石灰岩 (石灰石) は、すり減りに対する抵抗性が高いため、コンクリート骨材としても使用した。

《紹介者のコメント》

本論文では石灰岩を micritic と dolamitic の 2 つに分類・記載している。このことから、テチス海に堆積した中生代の石灰質の地層が広く分布するトルコでは、地質技術者が日本人以上に石灰岩や石灰質の岩石に精通していることがうかがえる。

表-2 RMR 法による岩盤評価⁵⁾

Parameter/properties of rock mass	Rock mass rating(rock class)				
	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Rating	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classification of rock mass	Very good	Good	Fair	Poor	Very poor
Average stand-up time	10 years for	6 month for	1 week for 5 m	10 h for	30min for
	15 m span	8 m span	span	2.5 m span	1 m span
Cohesion of the rock mass	> 400 kpa	300 - 400 kpa	200 - 300 kpe	100 - 200 kpa	< 100 kpa
Friction angle of the rock mass	> 45°	35 - 45°	25 - 35°	15 - 25°	< 15°

表-3 RMR 法によるトンネル地山分類⁵⁾

Rock Mass Class	Excavation	Support		
		Rock Bolts (20-mm Dia, Fully Grouted)	Shotcrete	Steel Sets
Very good rock RMR : 81 - 100	I Full face 3 m advance	Generally, no support required except for occasional spot bolting		
Good rock RMR : 61 - 80	II Full face 1.0 - 1.5 m advance Complete support 20m from face	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m, with occasional wire mesh	50 mm in crown where required	None
Fair rock RMR : 41 - 60	III Top heading and bench 1.5 - 3 m advance in top heading Commence support after each blast Complete support 10 m from face	Systematic bolts 4m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown	50 - 100 mm in crown and 30 mm in sides	None
Poor rock RMR : 21 - 40	IV Top heading and bench 1.0 - 1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation 10 m from face	Systematic bolts 4 - 5 m long, spaced 1 - 1.5 m in crown and wall with wire mesh	100 - 150 mm in crown and 100 mm in sides	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required
Very poor rock RMR : < 20	V Multiple drifts 0.5 - 1.0 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting	Systematic bolts 5 - 6 m long, spaced 1 - 1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert	150 - 200 mm in crown, and 150 mm in side, and 50 mm on face	Midium o heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and fore-poling if required Close invert

shape : horseshoe : width 10m : vertical stress : < 25 Mpa : construction : drilling and blasting

私自身はこれまでに石灰岩を細かく分類した経験がなかったため、石灰岩の分類について改めて参考文献⁸⁾を確認し、その多様さを知った。なお、海外では、炭酸塩岩中に石油貯留層が分布するため、国内に比べて石灰岩の岩石学的研究が進んでいる。

7. Conclusions

ダムサイトは、様々なオフィオライトと変成岩で構成されている地域に位置する。また、セイハン溪谷の地形は、アルプス造山運動に関連した横ずれ断層 (Elbistan-Goksun Fault) の影響を受けている。そのような地形・地質条件に対する地質工学的評価は、Kandil Dam の計画、設計、施工

において重要な役割を果たした。

ルジオンテスト結果の解析により、ダム基礎岩盤の透水性には深度依存性があることを明らかにし、カーテングラウチングを設計した。また、施工結果から、ダム基礎地盤の遮水性は十分確保されたことを確認できた。

RMR 法による岩盤評価の結果から、仮排水路トンネルと導水路トンネルの支保パターンを設計し、とくに大きな問題はなく施工を完了できた。

現地調査結果および室内試験結果から、S地区およびKSK地区は、量・質ともに堤体材料の採取地として適していると評価し、施工を完了できた。

結論として、CFRD 型式のダム建設事業において最も重

要な地質工学的評価は、ダム基礎地盤の地質学的特性の評価と堤体材料採取地の選定である。

8. おわりに

本論文を読むと、国内と同様の手順で、ダムサイトおよび堤体材料採取地の地質調査・解析が実施されていることがわかる。一方、ボーリング調査の数量については、Kandil Dam の規模を考えると、国内に比べて少ない。この点については、本ダムサイトが先カンブリア紀の堅岩で構成され、とくに地質的課題がなかった（ダムサイトとして地質条件に恵まれていた）ことが大きく影響していると考えられる。

本論文の岩盤評価で用いられている RMR 法では、国内の土研式岩盤分類で用いられている 3つの要素（岩石の硬さ、割れ目間隔、割れ目状態）に加え、RQD、地下水条件、不連続面の方向性が用いられている。

これは RMR 法がトンネルの地山分類を目的として提案された手法のためである。また、今回の論文紹介では説明を割愛したが、RMR 法では各要素に重み付けがされている。国内でよく用いられる土研式岩盤分類では、各要素の組合せにより岩盤等級（岩級）を評価するが、サイトごとに各要素の組合せを設定することで、定性的に各要素の重み付けがなされている。

ダム基礎岩盤の透水性については、国内と同様に、ルジオン値の深度依存性に着目しているほか、当該サイトにおける岩盤の透水要素が検討され、高透水ゾーンの連続性について考察されている。

こうして見ると、ダムサイトの地質調査・解析において、本事例と国内との大きな違いは認められない。むしろ国内では、地質的課題を有するサイトが多く、高い密度で地質調査が実施され、多くのデータをもとに詳細な地質解析が行われている。また、これはダムサイトに限ったことではない。

このため、私としては、国内の地質技術者が海外で活躍できる余地が十分にあると考えている。そのための第一歩として、IAEG の Bulletin をはじめとする海外への論文投稿を、本学会員に限らず、国内の地質技術者の方々に改めて勧めたい。

参考文献

- 1) 鞠子正 (1974) : トルコの地質について, 地質学雑誌 83 4, pp. 38-52.
- 2) Al-Jbori A'ssim and Zhang Yong Xing (2010) : Most

Used Rock Mass Classifications for Underground Opening, American J. of Engineering and Applied Sciences 3 (2), pp. 403-411.

- 3) 独立行政法人土木研究所 橋梁構造研究グループ (2012) : 岩盤上の基礎の鉛直方向の安定照査法のための地盤反力度の評価に関する研究, 土木研究所資料第 4222 号
- 4) A.C.Houlsby (1976) : Routine interpretation of the Lugeon water-test, Q.Jl Engng Geol. Vol 9, p303-313.
- 5) Lowson, A.R. and Bieniawski, Z.T. (2013) : Critical Assessment of RMR based Tunnel Design Practices: a Practical Engineer's Approach, RAPID EXCAVATION & TUNNELING CONFERENCE, Session: Design and Planning
- 6) 岡部幸彦・進士正人・呉旭・川本眺万 (2000) : RMR による岩盤の変形係数の推定, 土木学会論文集 No.652 III-51, pp. 283-286.
- 7) Robin Fell, Patrick MacGregor, David Stapledon, Graeme Bell, Mark Foster : Geotechnical Engineering of Dam, CRC Press
- 8) 庄司力偉 (1970) : 石灰岩および苦灰岩の分類, Gypsum & Lime No.108, pp. 62-71.
- 9) Mehmet Ozcelik : Assessment of engineering geological design parameters for Kandil Dam, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 75 (2), pp. 439-449.