イラン南西部, Upper Gotvand ダムの地質工学的性質に対する活動的な断層運動の影響

# 1. はじめに

国際委員による IAEG Bulletin 紹介も今回で 12回目となるが、今まで紹介されてきた論文 は、地質現象に対する解析手法・測定手法を 論じたものが多かった. IAEG Bulletin には多 様な論文が掲載されていることを紹介したい ため、今回はより純粋に、地質構造や地質性 状を論じたものを選んだ.

さらに、日本ではダムの地質調査が応用地 質学の発展に寄与して来たことも踏まえると、 「ダムの地質工学的性質に対する活動的な断 層運動の影響」という興味深い題名の論文が あったため、紹介したい.

原文タイトルは「The impact of active faulting on the geotechnical properties of the Upper Gotvand Dam, southwest Iran」で, Bulletin of Engineering Geology and the Environment 第78巻709~722 ページ(2019年3月号)に掲載されている.著者 は,イラン Khuzestan 州 Ahvaz 市の Khuzestan 水・電力局の地質・地質工学グループの Arash Barjasteh 氏である.

### 2. 紹介論文の翻訳概要

### 2-1. Abstract

イラン南西部の Karun 川に建設された Upper Gotvand ダムは、イランで最も高いロックフィ ルダムであり、イランで最も活動的な地震構 造地帯である Zagros 活動帯に位置している (図-1).

そのためダム基礎やアバットメント(特に 右岸アバットメント)は、Pir-Ahmad 断層をは じめとした断層運動の影響を受け、激しく破 砕されて変位しており、漏水のリスクが高い.

本論文は Upper Gotvand ダム周辺の地質構造 や断層運動,そしてそれらのダムサイトへの 影響を論じたものである.

なお本論文に記載のキーワードは「活動的 な断層運動」「地質工学的性質」「Pir-Ahmad 断層」「Gotvand ダム」である.

### 2-2. Introduction

Upper Gotvand ダム(UGD)はイランで地震構 造的に最も活動的な地域に位置しているため, アバットメントの安定性の低下<sup>1)</sup> やダム基礎 やアバットメントからの漏水の恐れ<sup>2(3)4)5)</sup> と いった影響を受ける.

国際委員 百嶋輝

ダムサイト周辺は、Zagros 褶曲-スラスト地帯における Zagros Simply 褶曲帯のに位置しており、平行した長い背斜と向斜から構成される.これらの地質構造の走向は主として NW-SE 走向である.



図-1 Upper Gotvand ダムの位置 ※原著論文の図に加筆 Reprinted by permission from Springer Nature, License Number 4599241308560.

調査対象地域は, Karun 川が Zagros 褶曲帯 の端部付近で Khuzestan 平野に入る場所である.

UGD はイラン国内で最長かつ最大の川である Karun 川に建設された,中央遮水壁型ロックフィルダムで,高さ178m,堤長760mである.常時満水位は海抜232m,貯水容量は45億m<sup>3</sup>,貯水池長さは約90kmである. UGD はイランで最も高いフィルダムで,その水力発電所は最も大きな発電能力を持っている.

この地域の岩相は、古い方から順に、 Gachsaran 蒸発岩(Gs), Mishan 泥灰岩(Mn), Agha-Jari砂岩(Aj), Bakhtyari礫岩(Bk)及び第四 紀堆積物である(図-2). ダムサイト基盤は Agha-Jari 砂岩から成るが、アバットメントは Bakhtyari礫岩(Bk)から成る(図-3).



図-2 調査地域周辺の地表(左図)と地下(右図)の地質構造. (Mottaghi and Yassaghi 2012<sup>7)</sup>を改訂) ※ 原著論文の図に加筆修正 Reprinted by permission from Springer Nature, License Number 4599241308560.

# 2-3. ダムサイトの地質

ダム基盤を成す Agha-Jari 層は、ダム基礎か ら右岸アバットメントにかけて,褶曲・断裂 により、層理面・節理がさまざまな角度で傾 斜し, 破砕部・鏡肌を伴う(図-3). Agha-Jari層は、石膏の脈を含むがそれらは可溶性が あり,大きな浸透流を招くおそれがある<sup>4)</sup>. 左岸アバットメントは,ほぼ水平層の Bakhtyari 礫岩から成る(図-3). 右岸アバッ トメントの一部は,分断され移動して来た Bakhtyari 礫岩から成る(図-3). 川の北端に 沿って Gachsaran 層が, Pir-Ahmad 断層の断層 運動により、Agha-Jari 層の上に乗り上がり、 Bakhtyari 層と接触している (図-2). Agha-Jari 層の石膏脈の最大厚さは2cm以上であり、 層理面及び節理面に沿って薄いフィルムとし て現れる. 節理面に沿ったものは後で形成さ れ,石膏の溶解及び節理面への再沈殿を示す.

Bakhtyari 層は全体的に、シルト岩から巨礫 岩まで及ぶ、陸起源の砕屑性の堆積物から成 る.Bakhtyari 層の断裂は通常垂直で比較的大 きな開口部を持ち、開口部の連続性はしばし ば数メートルに達する.

#### 2-4. 地質構造

ダムサイト地域では,Karun 川の北側に, NW-SE~E-W 走向の Pir-Ahmad 断層が分布し, Karun 川の南側には,NW-SE 走向の Lahbari 活 断層が山地と平野の境界<sup>8)</sup>に分布する(図-2).河床部は Agha-Jari 層から成る小さく密 な背斜によって占められており(図-3),こ の背斜の褶曲軸は,E-W 走向である.ダム軸 に沿った地質断面(図-3)と, 脆性的な砂岩 層と延性的なシルト岩・泥岩互層, および河 床下の断層の存在から, 現存する褶曲は断層 伝播褶曲であり<sup>9)10</sup>, フレキシュラルスリップ は, 周辺地域で主要な褶曲メカニズムである <sup>11)</sup>ため支配的メカニズムとして想定される<sup>12)</sup>. 背斜の南部と北部における Lahbari と Pir-Ahmad 衝上断層(図-2)の活動は, 激しい圧 縮を引き起こし, Agha-Jari 層にタイトな褶曲 を起こした(図-3). いくつかの剪断および 破砕帯が基礎掘削やボーリングにより観察さ れた<sup>13)</sup>. Agha-Jari 層の脆性的な砂岩層と延 性的・流動的なシルト岩・泥岩層の同時圧縮 は, 層理面に沿って鏡肌を伴うフレキシュラ ルスリップを引き起こした.

谷の中心から右岸に向かって、4 つの局所 的な断層が分布し(図-3)、急な層理面の急激 な傾斜変化がある.既存のデータに基づくと、 両翼の角度は約 30°であり、タイトな褶曲とし て分類される<sup>10)</sup>.この地域の主な断層の走向 は、NW-SE~E-W及びNE-SWであり、断裂の 主な走向は、NE-SW及びE-Wである.NE-SW 走向は一般的な褶曲の軸に垂直な最大圧縮の 方向と一致する.

衛星画像とリモートセンシング技術<sup>14)</sup>に基 づく morphotectonic analysis(地質構造形態解 析)<sup>11)</sup>により,右横ずれ運動を伴う N-S 方向 の構造的リニアメント<sup>15)</sup>が明らかになった (図-2). それは Lali-Ahvaz トレンドと呼ば れている.地域全体は地質構造を示す N-S 方 向の Lali-Ahvaz リニアメントの影響を受けて



図-3 ダム軸の簡易地質断面図(左図)(Ahmadi et al.2008<sup>4)</sup>を改訂) と 推定変形メカニズム(右図). 太い直線は断層. ※ 原著論文の図に加筆

Reprinted by permission from Springer Nature, License Number 4599241308560.

いると考えられる. Karun 川は明らかにダム サイトの上流部で,この基盤のトレンドをた どっている<sup>16)</sup>.

## 2-5. 活発な断層運動

Lahbari 活断層は, 調査地域では, 平均 1250 m の垂直変位を示す<sup>17)</sup>. Lahbari 活断層周辺の 1977.06.05 (Ms (surface wave magnitude) = 5.8) と 1985.09.18 (Mb (body wave magnitude) = 5.2) の地震は, 深部でのこの断層の再活動化と関 連している. NW-SE~E-W 走向の Zagros 褶曲 は, N-S~NNW-SSE 走向の右横ずれ断層帯に よって局部的に歪曲され崩壊している.

ダム地域は、中程度の地震活動で知られている. 20世紀最大の地震は1978年12月14日の地震である(Mb5.9, Ms6.1).

前述のように、Pir-Ahmadスラスト断層はダ ムサイトに最も近い断層であり、地質学的お よび morphostructural な(構造形態的)証拠に 基づいてダムの右岸アバットメントに影響を 及ぼすと考えられている.

#### 2-6. 地質工学的特徴

ダムの両岸アバットメントは Bakhtyari 層の 異地性岩塊を含む.右岸アバットメントの岩 塊は明らかにトップリングした岩盤であり, 左岸アバットメントの岩塊はすべった岩盤で ある(図-3).この地域の最大主応力はほぼ NE-SW 方向の水平応力である.Lahbari 断層の 派生断層と考えられる Pir-Ahmad スラスト断 層(図-2)は、右岸アバットメントに影響を 及ぼしている.

Agha-Jari 層では,3 つの節理セットが測定 されたが,その一つは層理面に平行である. 節理の大部分はせん断され,鏡肌を伴い<sup>5)13)</sup>, 表面は石膏と粘土で満たされている.非常に 密な節理間隔は剪断帯の存在を示す. RQD 値 は, 10~100%と広範囲に変化する.

Bakhtyari 層では,2 つの節理セットが測定 された.1 つは NW-SE~E-W 走向を持ち,も う1つは NE-SW 走向を示す<sup>13)</sup>.後者のセット の走向は,一般的な圧縮応力の方向,すなわ ち Zagros 褶曲スラスト帯の短縮方向とほぼ平 行である. Bakhtyari 層の RQD 値は一般的に 50%未満である.

Agha-Jari 層のヤング率は 2.28~11.2 GPa の 値をとり, Bakhtyari 礫岩のヤング率は 2.1~ 13.6 GPa の値をとる.

Agha-Jari 層の引張強度は 1.9~3.2 MPa の値 をとり, Bakhtyari 礫岩の引張強度は 2~2.8 MPa の値をとる.

ダム地域の Bakhtyari 層と Agha-Jari 層の岩盤 分類は「比較的弱い」から「非常に弱い」に 分類される.

右岸アバットメントの広範囲にわたる脆弱 さと透水性への対策として、右岸アバットメ ントでの止水壁、ジオメンブレン(遮水・防 水シートの製品名),セメントグラウトなど のさまざまな処理を行った.

連続的なカーテングラウトを設置しても右 岸アバットメントの水の浸透を効果的に減ら すことはできないため,水密性を確保するた めに最大高さ 124m で幅約 700m の可塑性があ るコンクリート止水壁を採用した.

既存のダムサイトの静的および動的解析では、局所的および地域的な断層を設定していない<sup>2)4)18)</sup>.しかしそれら断層は、将来にわたって危険であると考えるべきである.

# 3. 終わりに

Zagros 褶曲帯はアラビアプレートとユーラ シアプレートの衝突により形成された褶曲帯 である.アラビアプレートはユーラシアプレ ートに対して北東の方向へと沈みこんでいる. これが本論文調査地域での最大主応力である NE-SW 方向の水平応力の原因であると考えら れる.

日本は同じく、プレートの衝突・沈み込み 帯に位置しているので、本論文はいい参考事 例になると思われる.本論文に興味を持たれ た方は、是非原著を参照して頂きたい.本紹 介文では都合により3つの図面しか掲載でき なかったが、原著には詳細な文章に加えて豊 富な図表類も掲載されており、より深く詳細 な理解が出来るものと思われる.

IAEG Bulletin には、このように普段の業務 の参考になる事例が掲載されているので、目 を通すことで有益な情報が得られるものと思 われる.

# 4. 紹介論文中の引用文献抜粋

- Sharifi Boroujerdi, M., Salehi, D., Hazrati, M. and Mahjoub, D. (2012) : Dynamic stability analysis of the Upper Gotvand dam right abutment against earthquake (in Persian). Proc. 1st Int. and 3rd National. Conf. on Dam and Hydropower Plants, IWPCO, Tehran, Iran, 9p.
- 2) Nateghi, R. and Kiyani, M. (2008) : Application of DEM technique in estimation of seepage and water tightening limit in dam sites (case study of the Upper Gotvand dam), (in Persian). Proc. 2nd National. Conf. on Dam and Hydropower Plants, IWPCO, Tehran, Iran, 8p.
- Sharifzadeh, M., Nateghi, R. and Kiyani M (2008) : Hydro-mechanical modeling of seepage in Gotvand dam foundation. In: Shao J-F, Burlion N (eds) Thermo-Hydromechanical and chemical coupling in Geomaterials and applications: proceedings of the 3rd international symposium GeoProc'2008. Wiley, Hoboken.
- Ahmadi, M., Rostami, M. and Mahmoodi Dovom Niasar, H. (2008) : Time dependent behavior of the Upper Gotvand dam foundation (in Persian). Proc. 2nd National. Conf. on Dam and Hydropower Plants, IWPCO, Tehran, Iran, 8p.
- 5) Khosravi, F. (2000) : Dam site selection on problematic foundation with slickensides (in Persian). Proc. 4th NIRCOLD Conf. On Dam Construction, Ministry of Energy, Tehran, pp.636–644.
- 6) Falcon, N.I. (1974) : Southern Iran, Zagros

Mountains, In : Spencer, AM (ed), Mesozoic – Cenozoic Orogenic Belts, Geol. Soc. London, Spec. Publ. No. 4, pp. 199–211.

- 7) Mottaghi, F. and Yassaghi, A. (2012) : Investigation of the effect of Gachsaran formation on fold style of the overlying rock units in Lali, Papileh and Zilaie oilfields, Zagros fold-Thrust Belt (in Persian). Adv Appl Geol J Chamran University of Ahvaz 1(4), pp.71–81.
- 8) Berberian, M. (1995) : Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. Tectonophysics, 241. pp. 193-224.
- Jamison, JW. (1987) : Geometric analysis fold development in overthrust tranes. J Struct Geol 9, pp. 207–219.
- Van der Pluijm, B.A. and Marshak, S. (2004) : Earth Structure (2nd edition); An introduction to structural geology and tectonics. W. W. Norton & Company. 673p.
- Barjasteh, A. (1994) : Morphotectonics and its role on Karun River evolution (in Persian). Abstracts. 3rd Seminar on River Engineering, Ahvaz University, Ahvaz, Iran, p. 122.
- Twiss, RJ. and Moores, EM. (1992) : Structural Geology. W. H. Freeman & Co., San Francisco, p. 532.
- 13) Shahrokhi, Z. (2000) : Application of rock mass classification in determination of geotechnical parameters of the Upper Gotvand Dam (in Persian). Proc. 4th NICOLD Conf. On Dam Construction, Ministry of Energy, Tehran, pp.840–861.
- 14) Ahmadi, T., Rahimi-Chakdel, A. and Barjasteh, A. (2012) : Investigation of the active tectonics of Lali-Gotvand region using channel length, and drainage basin asymmetry indices (in Persian). Proc. 16th Symp. Geol .Soc. Iran, 4–6 Sept. Shiraz University, Shiraz, Iran, 8p.
- Barjasteh, A. (2012) : Salt Tectonics Impact on Dam Construction in Khuzestan Province of Iran. Proc. 24th ICOLD congress. Kyoto, Japan, 6p.
- 16) Gutiérrez, F. and Lizaga, I. (2016) : Sinkholes, collapse structures and large landslides in an active salt dome submerged by a reservoir: The unique case of the Ambal ridge in the Karun River, Zagros Mountains, Iran. Geomorphology, Volume 254, pp. 88-103.
- Pattinson, R. and Jazayeri, B. (1972) : Structural Analysis of Zagros Anticlines. I.O.O.C., Internal Report No. 1188, p. 78.
- 18) Mahmoodi Dovom Niasar, H., Farough Hossieini, M., Ahmadi, M. and Jalali, ME. (2010) : Investigation of the role of dam weight on time dependent behavior of the upper Gotvand dam foundation (in Persian). Omran Modarres Sci Res J 2:13.