ダム貯水と地震活動 (2)

——タベラダム (ドミニカ) の場合——

神戸大学理学部地球科学教室 寺 島 敦
テキサス大学オースティン校地球物理研究所 松 本 利 松

(昭和 58 年 11 月 7 日受理)

Induced Seismicity and Dam Reservoirs (II)

—The Case of Tavera Reservoir, Dominican Republic—

Tsutomu TERASHIMA

Department of Earth Sciences, Faculty of Science,
Kobe University

Tosimatu MATUMOTO

Institute for Geophysics, University of Texas at Austin

(Received November 7, 1983)

In June and August of 1980 two separate swarms of microearthquakes occurred in the proximity of the Tavera Reservoir, Dominican Republic. The earthquakes were located along the Tavera Fault that runs through Tavera Reservoir. These swarms were observed after abrupt changes of water level occurred. A gradual increase of water level during the period of September through November, however, did not produce induced earthquakes except sporadic events despite the fact that the highest water level surpassed the peak elevations of two abrupt changes. It was inferred from these observations that the induced seismicity was sensitive to the abrupt changes, especially a rapid draw-down of water level rather than or in addition to the water level itself. The foci of the second swarm in August was distributed adjacent to the area occupied by the first swarm in June, implying that the rock fracture propagated from one zone to another during these two active swarm sequences.

§1. 緒 言

タベラダム湖はドミニカ共和国の北部中央、サント・ドミンゴ市の北西約 130 km にある (Fig. 1). このダムは、ロックフィル型、堤高 82 m, 堤長 297.5 m, 貯水量 1850000 m³ で、1971 年 8 月に完成し、直ちに貯水が開始された。タベラ・バオ水力発電計画に伴う地震活動調査の為に、7 点より成る地震観測網がドミニカ電力会社とテキサス大学オースティン校との協同計画に基づいて、1979 年 12 月にドミニカ共和国の北部中央に展開された。

貯水時における、ダム湖近傍で発生する誘発地震に就いては、今までに多くの研究報告がある。これ等の研究結果の大部分は、誘発地震を発生させるのに本質的に重要な役割を演ずるの

Fig. 1. Major tectonic linearments and location of seismic stations (closed circles) in the northern Dominican Republic. The plus sign indicates the location of the Tavera Dam and the area encircled by open square illustrates the area shown in Figure 2.

急激な水位変動時（6月と8月）の水位を微かに越えて、ほぼ年間最高水位を保っていたにもかかわらず、2個の散発的な地震の外は目立つた地震活動を示さなかった。

JACOB *et al.* (1979) は SNOW (1972) のモデル計算結果を基にして、種々な地質環境下での誘発地震の発生機構に就いて試みた。彼等は既存の衝上又は横ずれ断層上で、ダム湖が地震活動を引き起こす可能性の最も高い時期は水位の異常に急激な低下の時、又はその直後であると結論している。本研究結果は彼等の結論によく調和している。

§ 2. 構造地質環境

ドミニカ共和国とハイチ共和国は、大アンチル列島中の二番目に大きい島、ヒスパニオラ島を二分している。大アンチル列島はカリブ列島弧の北の境界を形成する。その境界領域で発生する地震の発震機構はカリブプレートが北米及び南米プレートに対して東方への動きを示している [JORDAN (1975)].

小アンチル列島において、大西洋底は西進し、カリブ・プレートの下に潜り込んでいる。島弧の一部を成す、小アンチル列島の地震活動は、スラブが西に向つて深くなる潜り込みを明らかに示しているが、島弧の北端で、地震活動はプエルト・リコ海溝に平行な東西方向に急に向きを変える。プエルト・リコ海溝付近で、大西洋底は又、カリブ・プレートの下に潜り込む。併し、その動きは海溝にほとんど平行である [SYKES and EWING (1965)]. 東西方向の他の活動は、不鮮明ではあるが、バージン諸島付近から枝別れしてプエルト・リコ島の南を西に走り、ヒスパニオラ島の南西部を横切り、ウインドワード (Windward) 海峡付近で、プエルト・リコ海溝を西進してきた地震活動帯と合流すると言われている。これ等東西に走る二つの地震活動帯は、バージン諸島の一部、プエルト・リコ島、ヒスパニオラ島南西部を含む、小さなサブプレートの輪郭を描く [MOLNAR and SYKES (1969)].

ドミニカ共和国において、主要山脈と断層系は、ほぼ東西方向に走っている。これ等の山脈は総て地溝に因つて分けられている。最大の地溝は、最北の北部山脈 (Cordillera Septentrional) と中央山脈 (Cordillera Central) の間に位置するシバオ (Cibao) 地溝である。タベラダ

は、貯水位及び貯水量であると指摘している [例えば, GUPTA and RASTOGI (1978), MILNE (1976)]. 併し、タベラ・パオ地域に展開した地震観測網で得られた誘発地震活動は、今までの研究結果とやや異なる傾向を示した。タベラダム湖の誘発地震は群発地震の型で、1980年6月と8月とに、ダム湖に隣接した西方で発生した。これ等の群発地震の発生は、貯水の急激な放流に伴う、急激な水位変動に密接に関係付けられる。一方、緩慢な水位上昇を示し1980年9月から11月の期間は、誘発地震を引き起こした2回の

ムは中央山脈の北縁に沿う山麓に位置している (Fig. 1). BOWIN (1976) によつて, ヒスパニオラ断層帯と名付けられた一連の断層群は, 中央山脈の北縁に沿つて走っている. ヒスパニオラ断層帯の主要な断層のひとつであるタベラ断層はタベラダム湖の北岸に沿つて走っている (Fig. 2).

タベラ断層の運動は, 基本的には北米-カリブのプレート境界に沿つて制御される. 従つて, ヒスパニオラ断層帯に沿つて正断層や衝上断層が卓越する.

ヒスパニオラ島の歴史地震に就いて, TABER (1922) が概括している. 彼はシバオ地溝帯に沿つて3個の有感地震 (1564, 1842, 1897) を報告しているが, これ等の地震に因る被害は報告されていない. 又, タベラ・バオ地震観測網 [MATUMOTO (1981)] に依つて得られた記録解析でも, タベラダム近傍でのテクトニックな原因による地震活動は見られなかった.

§3. 資 料

Table 1 と Fig. 1 にタベラ・バオ地震観測網の位置を示す. 総ての観測点からの信号は無線搬送により, 集録解析装置 [MATUMOTO and SAENZ (1979)] のある中央観測点1に集められる. この集録解析装置は, 地震と思われる信号が検知されたとき, 総ての観測点からの信号を記録し, 直ちに, 自動的に震源要素を算出し, 表示する.

バオダム建設期間中であつた 1979~1981 に, 150 回以上の爆破地震動がこの観測網によつて記録された. その震源・発震時の知られた爆破地震動の観測記録から, 震源決定精度が検定された. その結果, 約 87% は誤差範囲 1 km 以内で決まり, 約 52% は誤差範囲 500 m 以内で決まつた.

Table 2 は, 1980 年にタベラダム近傍で発生した地震の表である. 爆破地震動は, 地震波形・初動の方向・工事現場で記録されている爆破日誌から確認された. 煩雑さを避ける為に,

Fig. 2. Tavera Fault and epicentral distribution of induced earthquakes in and near Tavera Reservoir. Two of the stations are shown on the figure. Lines AB and CD indicate the trend of the vertical sections in Fig. 3.

Table 1. Tavera-Bao seismograph network.

Station No.	Latitude (N)	Longitude (W)	Distance to station 1 (km)	Elevation (m)
1	19°18'36.5''	70°41'48.8''	0	505
2	19 21 6.7	70 46 30.9	9.4	490
3	19 16 20.9	70 46 7.9	8.6	710
4	19 27 56.0	70 21 27.9	40.0	800
5	19 37 59.2	70 51 35.1	56.8	660
6	19 13 58.0	70 59 29.5	32.1	1450
7	19 4 59.2	70 36 18.6	26.9	1200

Table 2. List of earthquakes that occurred in the vicinity of Tavera Reservoir.

Origin time (GMT)					Location*			Magnitude Mb
Yr	Mo	Dy	Hr	Mn	X (km)	Y (km)	Depth	
80	2	15	12	32	-8.32	-4.94	5.00	0.0
80	6	4	13	34	-6.15	-1.07	4.00	1.5
80	6	8	13	38	-3.40	-2.38	5.00	0.3
80	6	8	14	17	-4.17	-2.11	5.00	1.7
80	6	8	14	50	-4.56	-1.57	5.00	0.6
80	6	9	22	58	-6.85	-1.72	5.00	2.3
80	6	10	20	27	-4.42	-1.10	2.74	0.9
80	6	11	2	42	-0.26	3.59	5.00	1.5
80	6	11	12	23	-4.22	-2.11	5.00	0.9
80	6	11	20	51	-4.21	-2.35	5.00	1.7
80	6	14	19	20	-4.29	-1.88	3.55	0.6
80	6	15	16	8	1.91	-3.22	5.00	1.3
80	6	16	15	27	-6.25	-2.55	3.78	1.5
80	7	2	18	35	-5.18	-5.54	13.01	0.6
80	7	2	19	25	-4.75	-1.70	6.40	0.6
80	8	10	14	14	-4.47	-1.38	2.55	1.3
80	8	11	16	36	-4.38	-1.19	2.64	2.4
80	8	11	20	56	-5.06	-0.71	2.27	2.2
80	8	12	14	17	-6.24	-1.21	4.22	1.5
**80	9	25	0					0.8
**80	11	07						0.0
80	12	11	16	1	-2.37	-0.27	5.53	1.7

* X, Y show the distance measured from Station 1. X-axis shows E-W direction (the minus signs indicate westward) and Y-axis shows N-S direction (the minus signs indicate southward).

** No epicenter determination was available, due to the number of stations recorded. These events were recorded at station 1 with S-P time interval <2 seconds.

爆破地震動の記録は Table 2 から除外してある。

National Earthquake Information Service, U.S. Geological Survey によつて決められた実体波マグニチュード m_b と地震波動継続時間 ν との間の経験式が次の様に求められた。

即ち,

$$m_b = -2.67 + 3.06 \log \nu \quad (\text{in sec}).$$

Table 2 に示したマグニチュードはこの関係式から決められたものである [MATUMOTO (1981)].

§4. 解 析

Fig. 2 は Table 2 の地震の震央分布である。図中の●印は 6 月に発生した地震 (12 個), ◎印は 8 月に発生した地震 (4 個) を示す。○印の地震 (4 個) は, 6 月及び 8 月以外の月に発生した地震である。Fig. 3a 及び 3b は, Fig. 2 中に示した線分 $\overline{AB}$ 及び $\overline{CD}$ 断面に投影した震源分布である。

6 月の誘発地震はタベラ断層沿いに発生し, その活動の大部分はタベラダム湖西方に集中し

Fig. 3. (a) Distribution of induced earthquakes projected on vertical plane. The trend of the vertical plane is parallel to the Tavera Fault (line AB in Fig. 2). (b) Distribution of induced earthquakes projected on vertical plane. The trend of the vertical plane is perpendicular to the Tavera Fault (line CD in Fig. 2).

Fig. 4. The upper frame: The change of water level of Tavera Reservoir in 1980. The middle frame: Temporal distribution of induced earthquakes (refer to Table 2) occurred in and near Tavera Reservoir. The ordinate is the body wave magnitude m_b . The lower frame: The daily variation of water level in the Tavera Reservoir.

ている。8月の誘発地震は、6月の誘発地震域に隣接して、やや北側で、やや浅い震源をもつ。

Fig. 4 は地震活動とタペラダム湖の水位変化との相関を示したものである。図中、最上部の図は、毎12時に測定した水位で、左の目盛に水深、右の目盛に標高を示す。

最下段の図は水位の日変化である(当日の水位と前日の水位との差)。1月初旬、水位は66.3 mであつたが、水位は徐々に低下し、3月下旬には、年間最低水位57.2 mまで下つた。5月初旬に、タービン修理の為、ダムからの放流は完全に止められた。その結果、水位が75 mに達する程の顕著な水位上昇が5月に見られた。タービン修理完了後、急激な放流で、1日に2.4 mという急激な水位の低下を見た(Fig. 4 最下段参照)。8月初旬の豪雨はまた、1日に2.3 mという急激な水位上昇によつて、水深は73.8 mに達した。併しながら、この急激な水位上昇は、数日間の放流によつて、水位69.4 mまで低下させられた。その後、9月に始まつた雨季は、水位を再び徐々に上昇させ、10月には水位75 cm以上にも達した。

Fig. 4 の中段に、Table 2 の地震を規模別に示した。図から判る様に、6月と8月とに群発地震が発生していると考え事が出来る。6月の群発地震は $m_b \leq 2.3$ で12個発生している。7月初旬の2個の地震は、この群発地震の一部とも考えられる。8月の群発地震は4個のみであるが、平均の地震規模は6月のものよりやや大きい。この両群発地震は水位の急激な変動、特に水位の急激な低下が記録された後に起こっている事がFig. 4 から認められる。

§5. 議 論

Figs. 2, 3 に示された様に、大部分の地震の震源はタペラダム湖の北縁とその西北西方向への延長線上、即ち、タペラダム湖の北縁を通り、WNW-ESEの走向をもつタペラ断層沿いに分布している。これ等の震源分布を詳細に調べると、8月の群発地震の震源分布は、6月のそれに隣接し、やや浅く、然も北部に位置している様に見える。これは、8月の地震活動域が、6月の活動域の外側に移動した事を暗示しているかも知れない。

6月及び8月の群発地震の発生は水位の急激な変動に密接な関係を持つている事は明らかである。これ等の急激な変動は、ダム湖の急激な水位上昇に続く、水位の急激な低下によつて特性付けられる。6月の地震群に先立つて、水深は26日間に61.1 mから75 mまで上昇した。そして3日間に71 mまで低下した。8月初旬に水深71.5 mであつたが、1日で73.8 mまで上昇し、その後の8日間で69.4 mまで低下した。

地震活動静穏期間中の水位の綿密な調査は誘発地震研究の新しい糸口を与える。1月から4月の間、水位は相対的に低かつた(67 m以下)。特に、2月下旬から4月初旬にかけて、水位は60 m以下であつた。一方、水位の日変動は、この期間中、相対的に激しかつた。例えば、1月下旬に水位の日変化は1.2 mに達した(2日でほぼ2 mの変化)。この期間中、地震活動が無かつた事は、浸透水による岩石強度の低下が地震を発生させるのに不十分であつたとして説明する事が出来る。9月下旬から11月初旬にかけて、年間での最高水位を維持した(約75 m)。この水位は5月の急激な変動時の最高値より微かに高く、又、8月のそれより約1.2 m高い。この期間の水位日変動は35 cm以下で相対的に静穏であつた。

これ等の観察を基にして、6月と8月とに地震を引き起こした条件は次の二つ、即ち、(1) 水深が70 m以上を維持していること、及び(2) 水位の急激で然も著しい変動が地震に先行してあること、と言える。最初の条件は、間隙圧の増加に因り、破壊の臨界状態の歪-応力関

係を維持する事であり、第二の条件はナビア・クーロンの破壊規準以上の歪-応力関係を生じさせるのに必要な応力変化（ダム水位の急激な低下による圧力減少による）を供給する事である。

せん断応力 τ は実効封圧 $\sigma_e = \sigma_n - p$ によつて、次の様に決められる。即ち、 $\tau = \tau_0 + \mu(\sigma_n - p)$ 。ここで τ_0 はせん断強度、 μ は摩擦係数、 σ_n は断層面に働く法線応力、 p は間隙圧である。

JACOB *et al.* (1979) は SNOW (1972) の綿密な計算例に従つて、種々な地質構造環境下で破壊に到るまで水を負荷する事による応力変化を示した。せん断応力 τ を実効封圧 σ_e に対して描かれるモール円が横ずれ断層と正断層とに対して Fig. 5 に示されている。破壊はモール円がナビア・クーロン破壊規準曲線に接するとき起こる。各断層の主応力方向は Fig. 5 の右側に示した。添字 1 は P 軸方向の τ の分力を示し、添字 3 は τ 軸方向の σ_3 の分力を示す。

正断層の場合、ダム湖水位の上昇は σ_1 (垂直方向) を ρgh (ρ : 水の密度, g : 重力加速度, h : 水位増加分) だけ増加させるが、 σ_3 (水平方向) は摩擦力 (ポアソン比=0.3 としたとき, $0.43\rho gh$) だけ増加する。横ずれ断層の場合、水位の上昇は水平応力 σ_1 , σ_3 共に $0.43\rho gh$ だけ増加させる。

Fig. 5. The Mohr diagram, the Navier-Coulom failure criterion curve (in the left-hand frame) and principal stresses under normal and strike-slip environment (the right-hand frame).

Fig. 5 は水位変動による群発地震発生機構をモール円とナビア・クーロン破壊規準曲線とを用いて示したものである。半円 a-a は初期状態を示す。そして、水位の上昇に伴なつて半円 b-b に動く、増加した間隙圧はモール円を半円 c-c に動かすが、間隙圧 p は拡散によつて徐々に伝播するので、この変化には若干の時間を要する。水位の急激な低下はモール円をナビア・クーロン破壊曲線に近付け、その半円が曲線に接する時、地震を引き起こす。その間、水位低下に因つて引き起こされた間隙圧の低下はダム湖付近から徐々に伝播し、半円は破壊曲線から離れ、地震活動を停止する。

年間最高水位を示し、水位日変動が静穏であつた 9 月下旬から 11 月初旬までの期間は、ナビア・クーロン破壊曲線とモール円との関係は Fig. 5 の半円 c-c の位置 (但し、破壊曲線に非常に接近して) に相当し、地震発生の臨界状態にあると考えられる。従つて、水位日変化量が 5 月及び 8 月程激しくなくとも、急激な水位日変化があつた場合は誘発地震が活発になるであろう。

タペラダム近傍の誘発地震の発生機構をナビア・クーロン破壊曲線とモール円とを用いた岩石破壊説で考察した。この場合、定性的な時間の概念を導入して考察したが、元来この破壊説には時間の概念が入っていない。もし、時間を考慮する必要がないとすれば、9 月下旬から 11 月初旬までの最高水位期より約 3.7 m 水位の低下した 12 月に、地震活動が活発にならねば

ならない。この疑問を解消する為には、水位変化による応力及び間隙圧変化の伝達速度又は加速度の要素を加味した改良破壊説の登場を待つて、誘発地震の発生機構を再検討する必要がある。

謝 辞

著者等は、この研究を遂行するに当り、タペラダムの水位記録を心よく提供して下さり、更に、地震観測装置の保守・点検を引き受けられたドミニカ電力会社 (Corporacion Dominica de Electricidad) の関係諸氏に深甚の謝意を表する。

INSTITUTE FOR GEOPHYSICS, UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN
CONTRIBUTION NO. 563.

文 献

- BOWIN, C., 1976, Caribbean Gravity Field and Plate Tectonics, Geol. Soc. Amer. Special Paper, **169**, 79.
- GUPTA, H. K. and B. K. RASTOGI, 1976, Dams and Earthquakes, Elsevier Scientific Publishing Co., p. 229.
- JACOB, K. H., W. D. PENNINGTON, J. ARMBRUSTER, L. SEEGER, and F. FARHATULLA, 1979, Tarbela Reservoir, Pakistan: A Region of Compressional Tectonics with Reduced Seismicity upon Initial Reservoir Filling, Bull. Seism. Soc. Amer., **69**, 1175-1192.
- JORDAN, T. H., 1975, The Present-Day Motions of the Caribbean Plate, Journal Geophys. Res., **80**, 4433-4439.
- MATUMOTO, T. and R. SAENZ, 1979, Computerized Seismic Monitoring System for a Small Network, Transactions Amer. Geophys. Union, EOS, **60**, 888.
- MATUMOTO, T., 1981, Technical Report, CDE Seismograph Network, Submitted to Corporacion Dominicana de Electricidad.
- MILNE, W. G. (ed.), 1976, Induced Seismicity, Engr. Geol., **10**, 83-385 (Special Issue).
- MOLNAR, P. and L. R. SYKES, 1969, Tectonics of the Caribbean and Middle America Regions from Focal Mechanisms and Seismicity, Bull. Geol. Soc. Amer., **80**, 1639-1684.
- SNOW, D. T., 1972, Geodynamics of Seismic Reservoirs, Proc. Symp. on Flow through Fractured Rock, Deutsche Ges. Erd-und Grundbau, Stuttgart, T2-J, I-19.
- SYKES, L. R. and M. EWING, 1965, The Seismicity of the Caribbean Region, J. Geophys. Res., **70**, 5065-5074.
- TABER, S., 1922, The Seismic Belt in the Great Antilles, Bull. Seism. Soc. Amer., **12**, 199-219.