

(120) 強震時におけるロックフィルダムの非線形性状

東京工業大学 ○年縄 巧 翠川三郎 大町達夫

1. はじめに

1985年のメキシコ地震の本震 ($M_s=8.1$) では震源域に位置するラビジータダムで上下流方向に最大加速度700galもの強震記録が得られ、クレストに数本のクラックが入ったことが報告されている¹⁾。このような事実からこのダムは本震時にかなりの非線形的挙動を示していたものと考えられる。大地震時に実在のロックフィルダムがどのような挙動をするかを室内実験の結果のみから予測することは現状では難しく、実測記録に基づいた定量的解析を行うことが望ましい。Abdel-Ghaffar等はダムのクレストと地山の同時記録を用いてフィルダムの非線形性状を定量的に評価している²⁾が、絶対時刻の揃った強震記録を手に入れられることはむしろまれである。

そこで本稿ではクレストで得られた強震記録のみから、ロックフィルダムの強震時の非線形挙動を解析するために従来から地盤のひずみ量を算定するために用いられてきた重複反射理論³⁾をフィルダムに準用し、ラビジータダムの非線形的挙動の定量化を試みた。

2. ラビジータダムの強震記録

ラビジータダムは図1のように河床砂礫上に築造された高さ60m,長さ420mのロックフィルダムであり、クレスト脇中央部C8及び右岸地山RAに強震計が設置されている⁴⁾。このダムの微小ひずみレベルにおける基本周期は

土木学会調査団の常時微動測定から0.7秒と推定されている⁵⁾。図2に本震、及び余震⁶⁾ ($m_b=4.5$)時にC8において得られた加速度記録のNS成分(上下流方向),及びそれらを積分した波形を示す。積分に際しては2秒から5

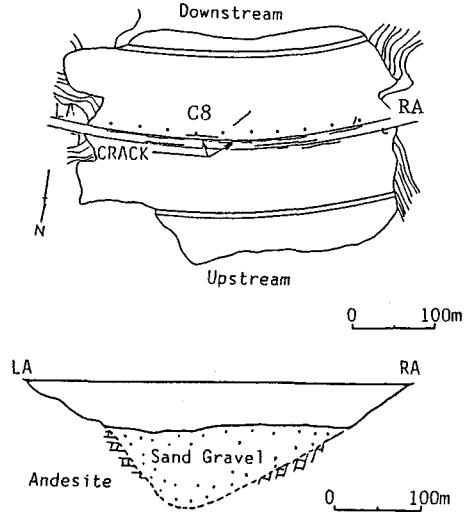


図1 ラビジータダムの平面図及び断面図

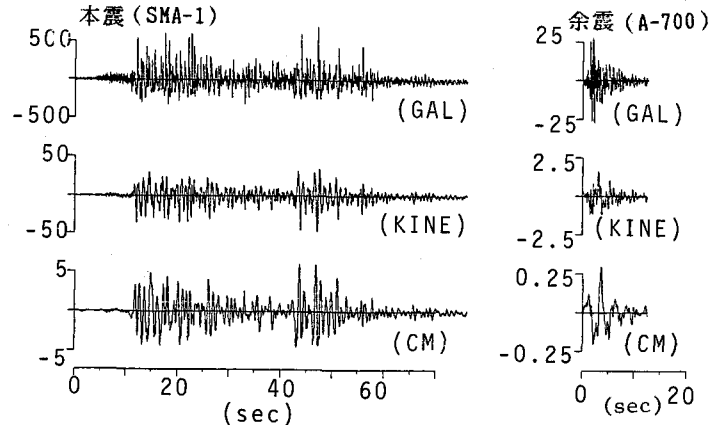


図2 本震及び余震でのC8の強震記録及びそれぞれの積分波形

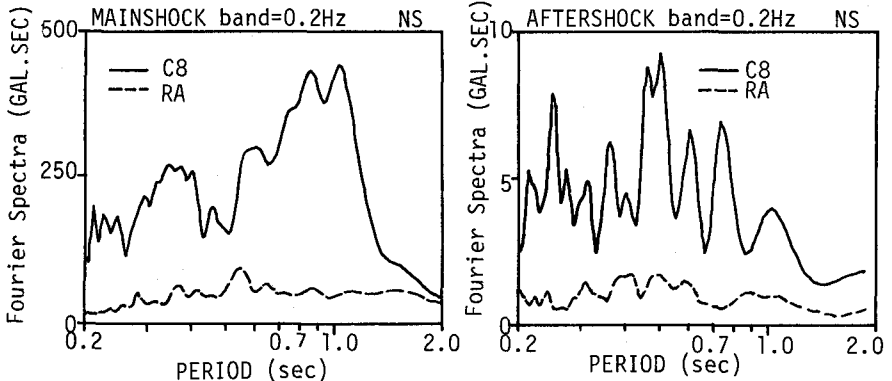


図3 本震及び余震でのC8, RAの強震記録の加速度フーリエスペクトル

秒まで直線的に減少し、5秒以上はゼロであるようなハイパスフィルターをかけた。また図3にはそれぞれの地震記録及びRAにおいて得られた記録のフーリエスペクトル、図4にはRAのスペクトルに対するC8のスペクトルのスペクトル比を示す。スペクトル比から本震における基本周期は約1秒で、余震や微動測定から得られた基本周期に比べてかなり延びていることがわかる。

3. ダム内の剛性低下と平均ひずみ量の算定手法

a) 剛性低下

一般に一樣なくさび形断面を持ち、密度 ρ 、せん断剛性率 G_0 、高さ H であるダムの基本周期 T_0 は、

$$T_0 = 2.6H \sqrt{\rho/G_0} \quad (1)$$

と表される⁷⁾から、剛性が G_0 から G^* に低下した場合、基本周期 T^* は

$$T^* = T_0 \sqrt{G_0/G^*} \quad (2)$$

となる。

従ってスペクトルの基本周期の伸び T^*/T_0 から平均的な剛性低下率 G^*/G_0 を決定することができる。

b) ひずみ量の算定手順

図5のような密度 ρ 、せん断剛性 G^* である表層地盤を考える。地表面を基準にして鉛直下向きに座標軸をとり、 f 、 g をそれぞれ上昇波、下降波であるとすると地盤内の深さ z におけるせん断ひずみ $\gamma(t, z)$ 、及び速度波形 $c(t, z)$ は f と g の時間微分 \dot{f} 、 \dot{g} を用いてそれぞれ

$$\gamma(t, z) = \partial u(t, z) / \partial z = \{ \dot{f}(t+z/v^*) - \dot{g}(t-z/v^*) \} / v^* \quad (3)$$

$$c(t, z) = \partial u(t, z) / \partial t = \dot{f}(t+z/v^*) + \dot{g}(t-z/v^*) \quad (4)$$

と表される。但し、 $v^* = \sqrt{G^*/\rho}$ である。

$z=0$ でひずみがゼロという条件と(4)より(3)は次のように書き換えられる。

$$\gamma(t, z) = \{ c_0(t+z/v^*) - c_0(t-z/v^*) \} / 2 v^* \quad (5)$$

ここに $c_0(t)$ は地表面での速度波形であるとする。

(5)は地表面の速度波形と地盤のせん断波速度から地盤内の任意深さのひずみ波形が求められることを示している。すなわち、地盤内で深さ方向に複数点でひずみ波形を求め、それらの最大値の平均 γ_{max} を算出し、この γ_{max} に0.65を乗ずることによって有効ひずみ γ_{eff} を求めればよい³⁾。

以上のことは地表面が平坦な成層地盤について導かれるものである。成層地盤内の変位は三角関数の足し合わせで表現されるのに対し、くさび形断面を有するダム内の変位はベッセル関数の足し合わせで表現され

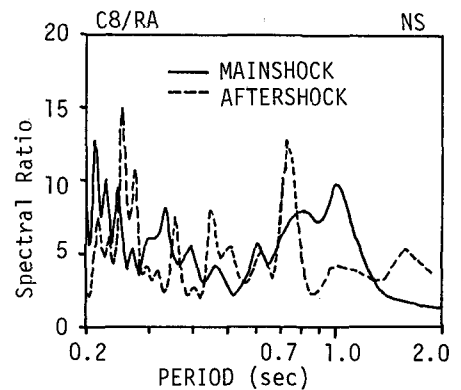


図4 RAに対するC8のスペクトル比

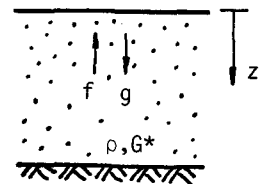


図5 表層地盤のS波の重複反射

る点に相違があるが、基本モードにおいては三角関数とベッセル関数には大きな違いが無いことや、地震時のダムの変位は基本モードが卓越するということから、ダム内のひずみをSH波の重複反射理論によって求めても大きな誤りは無いものと考えられるのでこの手法をそのままダムに準用してみた。

c) 本算定手法の検証

まずこの算定手法の妥当性を検討するため、先に述べた Ghaffar 等の解析結果と比較してみた。Ghaffar 等の方法はダムを一質点系にモデル化し、クレストの加速度波形を絶対加速度、クレストの変位波形から地山の変位波形を引いたものを相対変位として、ある時間間隔毎に、ヒステリシス曲線を描いて、この曲線の傾きや、相対変位の最大値等から剛性率や最大せん断ひずみを求めというものである。

図6は1977年のサンフェルナンド地震 ($M_L=6.3$) の記録を用いて米国カリフォルニアのサンタフェリシアダムを解析した結果である。図中、○はGhaffar等が計算した結果、▲は本算定手法で計算した結果であり、横軸はせん断ひずみ、縦軸は剛性率 (lb/ft^2) であり、一点鎖線は微小ひずみ時の基本周期 ($T=0.61$ 秒) から算定されるこのダムのせん断剛性率である。本解析結果はGhaffar等の解析結果によく対応していることからこの手法は妥当な近似値を与えるものと判断した。

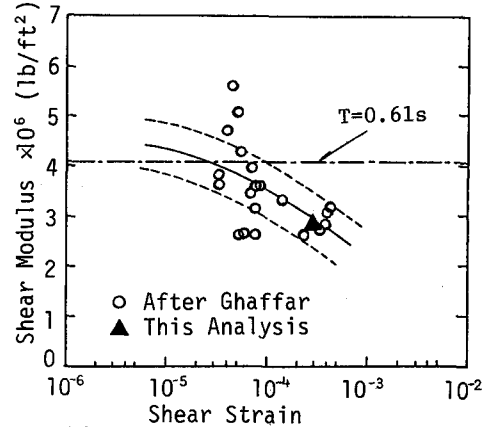


図6 サンタフェリシアダムに対する解析結果の比較

4. ラビジータダムの非線形性状の評価

前節で述べた解析手順によってラビジータダムで得られた強震記録を用いてこのダムの剛性低下率とひずみ量を算定してみた。解析に用いた強震記録は先の1985年のメキシコ地震の他に1979年の記録 ($M_s=7.6$) を加えた3つであり、最大加速度にして700galから28galにわたる。このうち1985年の記録はマルチショックであったことから波形を前後2つに分け、合計4つの波形を用いて解析を行った。ひずみ量の算定にはC8における加速度記録を積分した速度波形と(1)を変形した

$$v^* = 2.6H / T^* \tag{1}$$

から求めている。但し T^* はスペクトル及びスペクトル比から判断されたダムの基本周期であり、 H はここではダムと共に振動していると指摘されている河床砂礫の厚さ90mとダム高さ60mを合わせた150mにした⁵⁾。

表1に解析

に用いた各地震におけるダムの基本周期 T^* 、せん断波速度 v^* 、各波形の最大振幅、及び有

| 対象とした地震 | T^* (sec) | G^*/G_0 | v^* (m/s) | \ddot{X}_{max} (gal) | \dot{X}_{max} (kine) | X_{max} (cm) | γ_{err} |
|-----------------------|----------------|-----------|----------------|---------------------------|---------------------------|-------------------|----------------------|
| 1985 本震 (2nd Shock) | 1.0 | 0.49 | 390 | 700 | 47 | 6.2 | 2.7×10^{-4} |
| 1985 本震 (1st Shock) | 0.86 | 0.66 | 450 | 600 | 35 | 4.9 | 2.1×10^{-4} |
| 1979 ($M_s=7.6$) | 0.82 | 0.73 | 480 | 370 | 16 | 2.0 | 8.5×10^{-5} |
| 1985 余震 ($m_b=4.5$) | 0.73 | 0.92 | 530 | 28 | 1.6 | 0.30 | 1.1×10^{-5} |

効ひずみを示す。またこの結果を縦軸を剛性低下率 G^*/G_0 、横軸をせん断ひずみとして図示すると図7のようになる。図7の破線と点線はそれぞれSeed等が砂礫について行った室内実験の結果³⁾、及び境野等が行ったロック材についての室内実験の結果⁹⁾であり、●はラビジータダム、▲はサンタフェリシアダムである。尚、境野等は 10^{-5} のひずみに対する剛性の低下率を求めているのでここではこのひずみレベルにある余震時の剛性低下率を基準にして曲線を引いた。図7を見るとひずみ量の増加に伴ってダムの剛性が低下していることがわかる。ロックフィル材の動的変形特性に関する既存のデータ量は少ないが、今回の解析結果は従来の知見にほぼ一致していると言える。

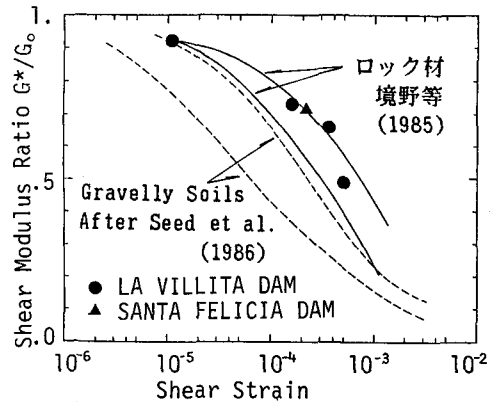


図7 ラビジータダムに対する解析結果

5. むすび

メキシコラビジータダムの強震記録を用いてフィルダムの非線形性状を定量的に評価した。この解析方法は、多少厳密さに欠けるところがあるが得られた結果はほぼ満足のいくものであり、実ダムが大地震時に示す非線形的挙動の概要を理解することができた。本解析に用いた1985年のメキシコ地震本震の記録は UNAM, C.F.Eから数値化されたデータを載いた。また余震の記録は文献6, 1979年の記録は文献4, 10から筆者等の責任で数値化したものである。関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Gonzalez, F., "Earthquake Response of La Villita Dam," Preprint, 1986.
- 2) Abdel-Ghaffar, A. M. and Scott, R. F., "Shear Moduli and Damping Factors of Earth Dam," J. G. E. D., ASCE, Vol. 105, No. Gt12, Proc. Paper 16097, pp.271-286, 1981.
- 3) Tokimatsu, K. and Midorikawa, S., "Nonlinear Soil Properties Estimated from Strong Motion Accelerograms," International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp.117-122, 1981.
- 4) C.F.E., "Behavior of Dams Built in Mexico (1974-1984)," VOL. II, 1985.
- 5) Ohmachi, T., Kawamura, M., Yasuda, S., Mimura, C. and Nakamura, Y., "Damage due to the Mexico Earthquake of 1985 and the Ground Condition," Preprint, 1987.
- 6) Munguia, L., et al., "Aftershock Acceleration Data Recorded by a Temporary Installation of Strong Motion Instruments," Geophysical Research Letters, VOL. 13, NO. 6, pp.581-584, 1986.
- 7) 岡本舜三, "建設技術者のための振動学," オーム社, P.91, 1976.
- 8) Seed, H. B., et al., "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soil," Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, No. 11, 1986.
- 9) 境野典夫, 安田成夫, 松本徳久, "粗粒材料の動的変形特性," 第18回地震工学研究発表会講演概要, PP.445-448, 1985.
Report of Civil Engineering Institute, No. 1085, Ministry of Construction, 1976.
- 10) Marsal, R. J., "Lessons Learned from Measurements in Earth and Rockfill Dams," Seminar on Earthquake Engineering of Rockfill Dams, 1987.