

愛知工業大学 正員 大根義男 正員 成田国朝 学生員 山里剛史

1. はじめに フィルダムの地震応答特性については実ダムにおける地震記録の解析や起振実験¹⁾、振動台による模型実験²⁾、ならびに有限要素による数値解析など³⁾、大別すると三つの方面から研究が進められており、その成果も徐々に整理されつつある。しかしながら地震外力の非線形性や築堤材料の非線形性などによりフィルダムの地震時挙動はもろめて複雑であり、依然として解明の遅れている部分も少なくない。本研究は、ロックフィルダムを対象として有限要素法による非線形振動解析を行い、堤体の非線形応答特性や線形解の適用性などについて議論しようとするものである。

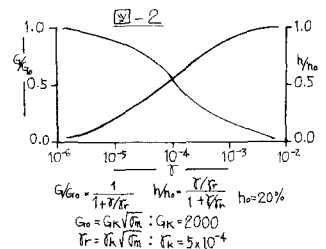
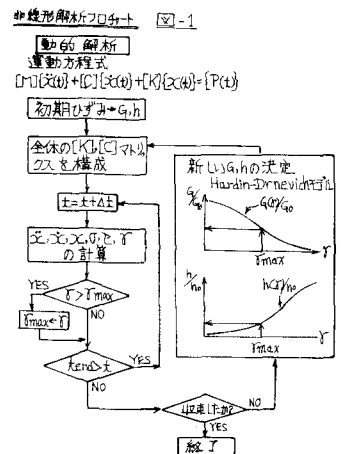
2. 非線形振動解析

解析法： 解析モデルは堤高100m、上下流斜面勾配がそれぞれ1:2.6, 1:2.2の三角形ダムとした。そして振幅や振動数をいろいろ変化させた正弦波加速度を堤底に入力し非線形の応答を調べた。多自由度系の運動方程式は一般に $[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{P(t)\}$ で表わされるが、このうち減衰マトリックス $[C]$ については $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ で表わし、 α, β は堤体の1次固有振動数 ω_1 と材料の減衰比 h から $\alpha = h\omega_1$, $\beta = \gamma\omega_1$ で与えられるものとした。図-1は解析のフローチャートである。1回の繰返しの中では正弦波を数波与えて応答が定常になつた時点で各要素のせん断ひずみレベルを抽出し、対応する剛性 G 、減衰比 h を決定して次の繰返しにうつる。そして全要素においてせん断ひずみがある範囲内で収束するまで繰返し計算を行う。

材料特性： 解析に用いたロック材の物性値 (G, h) は、よく知られている Hardin-Drnevich モデル⁴⁾である(図-2)。ロック材に対するデータが不足しているため、ここでは $\gamma = 10^{-6}$ の $G(G_0)$ を拘束圧 σ_m の関係、および規準ひずみ γ_r と σ_m の関係を砂質材料のデータからそれぞれ $G_0 = G_k \sqrt{\sigma_m}$, $\gamma_r = \gamma_k \sqrt{\sigma_m}$ で表わし、 G_k については碎石のデータから2000、 γ_k については砂のデータから 5×10^{-4} を用いた。また限界の減衰比 h_0 は砂のデータから20%をとった。

3. 解析結果と考察

応答倍率： 図-3は入力振動数 f を変化させたときの堤頂の水平加速度の応答倍率を示したものである。実線は入力加速度 a_0 を10gal, 50gal, 100gal としたときの非線形解、破線は全要素について一定のせん断ひずみレベル γ を仮定して G, h を決定し、そのまま一定の正弦波入力を与えて求めた解であり、以後、線形解とよぶ。線形解は γ が 10^{-4} 以下であると、堤体の1次固有振動数に最も近い入力振動数(1.5Hz)において特に大きな応答倍率を示し、次に3次固有振動数付近の3.0Hzにおいて2番目のピークを示す。しかし γ を大きくするとピークの値や位置が徐々に変化し、応答曲線は次第になだらかになる傾向を示す。



一方、非線形解は、 $\alpha_b=10\text{ gal}$ では線形解とよく対応した応答倍率を示すが、 α_b が50gal, 100gal と大きくなるに従って応答曲線がなめらかになり、ピークが消滅する。この傾向は線形解で γ を大きくしたときのものに似ており、応答のひずみ依存性が線形解でも説明し得ることを示唆している。

堤体内の加速度応答： 図-4.5は、堤体内の各点における加速度ベクトルを正弦波1サイクルについて軌跡として描いたものである。図-4は図-3で応答倍率に最大ピークが見られた $f=1.5\text{ Hz}$ のものであり、この場合は堤体内のどの部分でも鉛直加速度はほとんど誘発されず水平方向のみの振動が卓越している。これに対し応答倍率に2番目のピークが見られた $f=3.0\text{ Hz}$ の場合(図-5)は特に堤頂部および斜面表層部で大きな鉛直加速度が誘発され、軌跡ループが斜面に沿って発達しており、表層すべりなど堤体の安定上好ましくない挙動が見られている。

せん断ひずみ分布： 図-6.7は $f=1.5\text{ Hz}$, 3.0 Hz について堤体内のせん断ひずみ分布を示したものである。図-6ではひずみ分布が水平帯状に分布し、図-4の加速度ベクトル軌跡と対応してせん断梁的な振動挙動がうかがわれる。これに対し図-7では斜面表層部に大きなひずみが集中する傾向が見られる。

線形解との対応： 図-8は $\alpha_b=100\text{ gal}$, $f=3.0\text{ Hz}$ の場合について堤体中心軸上の水平加速度分布を線形解と非線形解で比較したものである。これによると非線形解は堤頂部を除いて $\gamma=2.5 \times 10^{-4}$ と $\gamma=5 \times 10^{-4}$ の間で線形解に対応していることが

わかる。このことは γ を全要素一定として1回の計算で求めた線形解でも非線形の挙動をかなり説明し得ることを示唆している。このひずみ範囲が非線形解の中心軸上のひずみ分布とどのように対応しているかを見たものが図-9である。これによると非線形解で得られるひずみ分布を単紙に平均した値は $\bar{\gamma}=2.36 \times 10^{-4}$ となり線形解のひずみ範囲に比較的近い値を示すことがわかる。

4. あとがき 材料の非線形性を簡単なモデルで表現してフィルダムの非線形振動挙動を調べた。この結果入力加速度が水平だけであつても堤体内に鉛直方向の加速度が誘発される場合があること、線形解でも適当なひずみレベルの選択によつて非線形挙動を説明し得ることなどが知れた。前者については今後、実地震波を入力した場合の応答を調べて議論したいと思つてゐる。

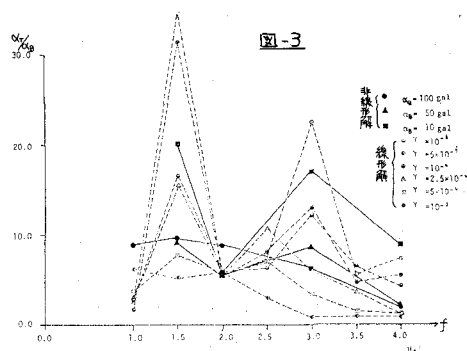


図-3

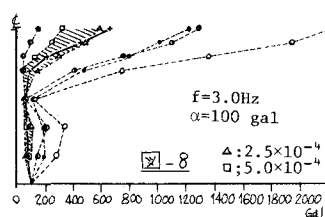
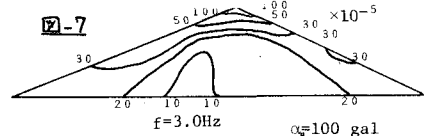
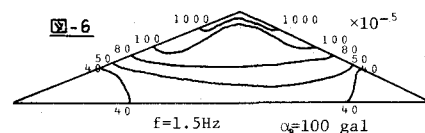
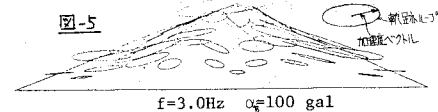
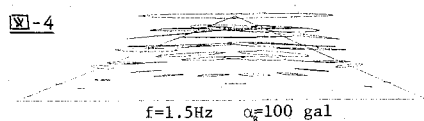


図-8

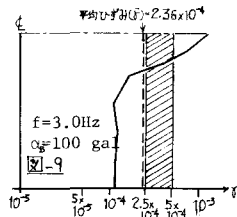


図-9

- ＜参考文献＞ ①大根, 成田, 竹村, 村瀬「中里ダム起振実験」土木学会中部支部(1977), ②大根, 連部, 成田「シラス材を用いたフィルダムの模型実験」第14回土工学会, 3) Clough, R. W. and Chopra, A. R. 「Earthquake stress Analysis in Earth Dams」Structural Engineering Laboratory Report No. 65-8, 4) Hardin, and Drnevich 「Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves」Proc. ASCE Vol. 98, SM7 (1972), 5) 渡辺 啓行 第14回土工学会研究発表.