

愛知工業大学土木工学科

正 ○ 成田 国朝

同上

正 建部 英博

同上

正 大根 義男

1. はじめに

近年、土の動的変形特性に関する実験的研究が進み剛性率や減衰定数などの材料物性のひずみ依存性が明らかになるにつれ、非線形物性を考慮した応答解析法が種々提案されるようになった。しかし、非線形応答解析では、材料物性の表現法やパラメータの決定法、さらに解析手続きの選定方法によってさまざまな計算手法が提案されるので、それらの妥当性と適用性は常に議論されるところである。特にフィルダムの動的問題では解の検証が難しいため、この種の議論はほとんど進展していない。加えて、非線形の応答解析はどのような方法を選ぶにせよ多大の時間と労力を要する難点がある。以上のことから、本研究では一つの堤体モデルについて非線形および線形解析を幾つか行い、両者の結果を比較して線形解で非線形解をどの程度表現し得るかを調べ、応答解析における線形解の適用性を議論するものである。なお本研究は文部省科研費による研究の一部であることを付記し謝意を表する。

2. 応答解析

解析モデルは堤高 100 m、上下流斜面勾配がそれぞれ 1:2.6 および 1:2.2 の三角形ロックフィル堤体とした。これを図-1 のように 8 個のブロックに分け、それぞれに対し土かぶりに対応する拘束圧 $\bar{\sigma}_m$ を割り当てる。運動方程式は $[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = P(t)$ であるが、このうち減衰マトリックス $[C]$ については比例減衰 $a[M] + b[K]$ で表わし、 a, b は堤体の 1 次固有振動数 ω_1 と材料の減衰比 h から $a = h\omega_1$, $b = h/\omega_1$ で与えられるものとした。

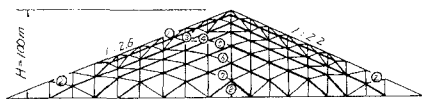


図-1 解析モデル

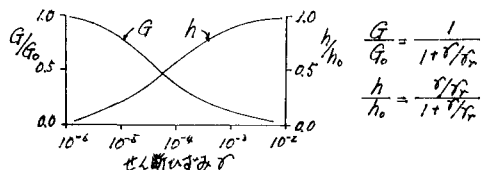


図-2 Hardin-Dreavich モデル

材料物性 (G, h) のひずみ依存性の表現には Hardin-Dreavich モデル (図-2) を用いる。ここで、 $\delta = 10^{-6}$ の $G(G_0)$ および規準ひずみ δ_r と拘束圧 $\bar{\sigma}_m$ の関係は従来のデータを参考にして $G_0 = G_r \sqrt{\bar{\sigma}_m}$, $\delta_r = \bar{\sigma}_r \sqrt{\bar{\sigma}_m}$ の形で表わされるものとし、 $G_r, \bar{\sigma}_r$ の値は砂石および砂の実験データから $G_r = 2000$, $\bar{\sigma}_r = 5 \times 10^{-4}$ とした。また限界の減衰比 h_0 は砂のデータから 20% とした。

解析内容としては堤底に正弦波加速度 (振動数 f_B , 振幅 α_B) を与える定常波の解析と、実地震波 (最大振幅 α_m を種々変えた El Centro 地震 NS 成分加速度) の解析を行った。非線形解析では、まず堤体内全要素に対して適当な初期ひずみ δ_0 を仮定して G, h を算出し、一連の正弦波 (または地震波) を与えて応答計算を行い各要素のひずみレベル (定常波の計算では最大ひずみ、地震波の計算では最大ひずみの 3/4) を求める。この値は初期値 δ_0 と異なるので、次にこの値に対して各要素で G, h を計算し直し、再び応答計算を行う。このように G, h を修正しながら全要素においてずががある範囲内 (ここでは 10% とした) で収束するまで繰返し計算を行う。線形解析は定常波外力に対してのみ行ったが、これは全要素に一定のひずみレベル δ_0 を指定して G, h を定めた一連の正弦波を 1 回だけ与える計算であり、非線形解析の 1 回目の繰返しに相当する。

3. 計算結果と考察

図-3 は $f_B = 1.5 \text{ Hz}$, $\alpha_B = 100 \text{ gal}$ の定常波外力を与えたときの線形解と非線形解との対応性を調べたものであり、堤体中心軸上の各点における絶対値最大の水平加速度の分布を (a) 図に、せん断ひずみの分布を (b) 図に示した。(a) 図で最大加速度の分布を調べると、分布をみる限りでは非線形解と線形解ではほとんど差がな

いことと知れる。そこで非線形解の前後で最も適合する線形解を選出し、非線形解に通

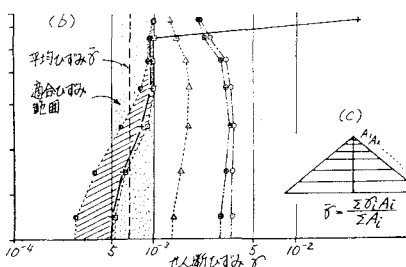
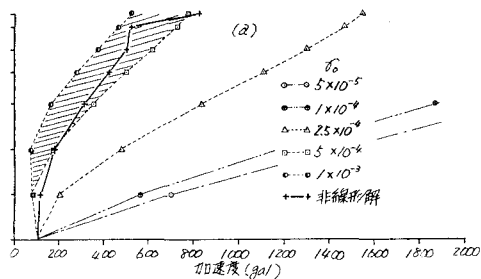


図-3 堤体中心軸上の加速度、ひずみ分布

合する線形解の範囲を示すと図の斜線部になる。また (b) 図でひずみ分布を見ると、堤頂部で非線形解が極端に大きくなっているが、全体的には斜線部で示した α_B の範囲の線形解が非線形解によく対応していることがわかる。図にはこの適合ひずみ範囲も示したが、非線形解のひずみ分布は大体この範囲に含まれている。

以上のように線形解と非線形解では加速度やひずみの分布形に大きな差異はなく、適合ひずみ範囲で α_B を仮定して線形計算を行えば非線形応答の概略がつかめることが示唆せられる。ここで、この適合ひずみ範囲が非線形解のひずみ分布とどのように対応するかを調べるために、(c) 図のように堤体中心軸上の各水深代表する水平層の面積と重みとして非線形解の平均ひずみ $\bar{\epsilon}$ を定義し、適合ひずみ範囲と比較してみたのが (b) 図の太い破線であり、両者はよく対応していることがわかる。図-4 は今回計算したすべてのケースについて適合ひずみ範囲と平均ひずみ $\bar{\epsilon}$ を比較したものである。

f_B が大きい場合は堤体内のひずみ分布が複雑なため上記の平均化の考え方が必ずしも適合しないが、 $f_B = 1.5 \text{ Hz}$ (共振時) ではひずみ分布が全体的に水平になるため、 $\bar{\epsilon}$ が堤体全体のひずみレベルを説明する上で良いパラメータになるものと考えられる。

図-5 は入力加速度の増加に伴って堤体内のひずみレベルがどのくらい上昇するかを調べたものであり、横軸に入力加速度振幅、縦軸に堤体のひずみレベルを表わす量として定常波の場合は適合ひずみ範囲、地震波の場合は $\bar{\epsilon}$ ととっている。定常波の計算結果を見ると、 $\alpha_B = 100 \text{ gal}$ では α_B の増加に伴ってひずみレベルが急激に増加するが、 α_B が 100 gal をこえるとひずみ増加が次第に小さくなって一定値に漸近する傾向がうかがわれる。これは、ひずみレベルの増加によって材料物性が急激に変化し、 G の低下によって固有振動数が減少して共振からずれる一因、 f_B の増加によって減衰効果が増大し、その両者があかまって応答が制限されるためと考えられる。また実地震波の計算結果が加速度の大きい範囲で定常波の $f_B = 1.5 \text{ Hz}$ の計算結果と類似しているが、これは収束時の堤体の固有振動数と入力振動数の関係が定常波と実地震波の計算で似通っているためと思われる。

4. あとがき

以上、線形解析でも非線形の振動挙動をある程度説明し得ることと述べたが、線形解の適用性やその限度さらに明確にするには、もう少し議論をつけ加える必要があると思われるので今後検討したい。

参考文献: 1) 畑野 清通 (1969): P-スプリングの振動解析, 地球物理学, 2) 渡辺 昌博: ロックフィルムの耐震設計法に関する考察 (1980), 電研報告

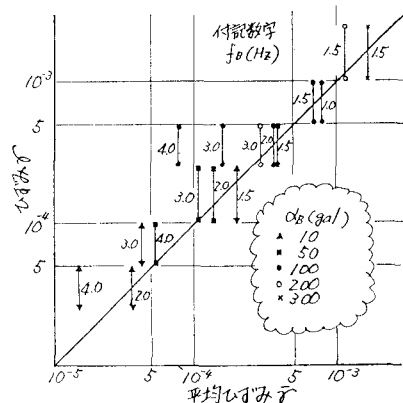


図-4 $\bar{\epsilon}$ と適合ひずみ範囲

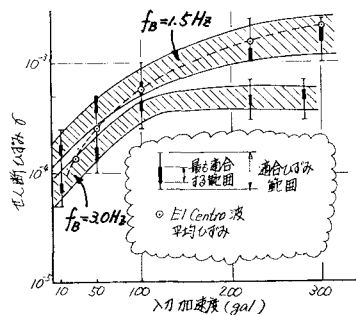


図-5 入力加速度とひずみレベル