

レベル 2 地震動に対するアースダムの耐震性能照査

九州大学工学部 学生員 綿島敬太
九州大学大学院 フェELLOW 大塚久哲

九州大学大学院 正会員 古川愛子

1. 序論

我が国のダムの耐震設計は修正震度法に基づいており、レベル 2 地震動を考慮したものではないが、未だ嘗てダムが地震で大きな被災を受けた事例はない¹⁾。しかしながら、土質材料を盛りたてて施工されるアースダムは、老朽化したダムが比較的多く、新潟県中越地震・新潟県中越沖地震では亀裂が生じるなどの被害が報告されている。本研究では、修正震度法によって設計されたアースダムが、レベル 2 地震動に対してどの程度の耐震性を有するのかを把握することを目的に、動的解析と塑性変形解析を実施した。

2. レベル 2 地震動に対するアースダムの耐震照査

(1) 解析モデル

解析モデルを図 1 に示す。厚さ 10m の工学的基盤の上に、高さ 30m で勾配 1/2 の堤体と幅 6m の遮水層がある。堤体の左側には貯水を想定し、静水圧の影響を考慮している。地盤定数を表 1 に示す。境界条件は、基盤・側方ともに粘性境界とした。

平面すべり面を仮定した平面すべり面法²⁾を用いて算出した設計震度 0.18 (修正震度法の強震帯地域の設計震度) に対する安全率は 1.35 であり、許容値 1.2 を満足している。

(2) アースダムの耐震性能照査方法

レベル 2 地震動に対するダムの耐震性能は「地震時に損傷が生じたとしても、ダムの貯水機能が維持されるとともに、生じた損傷が修復可能な範囲にとどまること」と規定されている¹⁾。アースダムの「貯水機能が維持されること」の判定には、越流の起きない「沈下量 1m 以内」を許容値としてよいとしている¹⁾。沈下量は、まず動的解析を行い各節点の加速度応答を求め、次に得られた加速度応答を用いた塑性変形解析によってすべり量を推定することとしている¹⁾。本研究では、動的解析手法として等価線形解析と非線形解析の 2 手法を採用し、結果の差異を比較した。塑性変形解析手法としては、実績豊富な円弧すべり面を仮定した Newmark 法¹⁾を採用した。入力地震動は道路橋示方書 V 編³⁾のレベル 2 地震動 Type211 を用いた(図 2)。

3. レベル 2 地震動に対するアースダムの耐震照査結果

(1) 動的解析結果 (等価線形解析と非線形解析の結果の比較)

土質材料のせん断剛性 G と減衰定数 h にはひずみ γ 依存性(非線形性)がある。等価線形解析は、平均的なひずみの値に対する剛性・減衰を用いた線形解析のことであり、非線形解析はひずみに依存して時々刻々変化する剛性・減衰を用いた解析である。遮水層のひずみ依存性は式(1)を、堤体/基盤のひずみ依存性は式 (2)を用いた¹⁾。 G_0 は初期せん断剛性である。

$$\text{遮水層 } G/G_0 = (4 \times 10^{-3}) / (4 \times 10^{-3} + \gamma) \quad h = (0.15 \times \gamma) / (4 \times 10^{-3} + \gamma) \quad (1)$$

$$\text{堤体/基盤 } G/G_0 = (1.3 \times 10^{-3}) / (1.3 \times 10^{-3} + \gamma) \quad h = (0.25 \times \gamma) / (1.3 \times 10^{-3} + \gamma) \quad (2)$$

動的解析結果を図 3, 4 に示す。図 3 は、天端中央を通る縦に

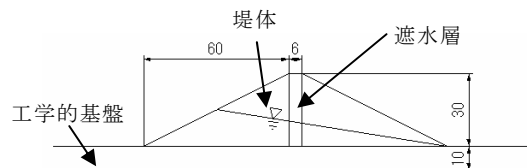


図 1 解析モデル(単位 m)

表 1 解析諸元

	s波速度 (m/s)	ポア ソン比	単位体積重量 (tonf/m ³)	減衰 定数	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kN/m ²)
遮水層	127	0.45	2.1	0.10	37	11
堤体	197	0.45	2.2	0.05	40	0
基盤	294	0.45	2.6	0.05	44	10

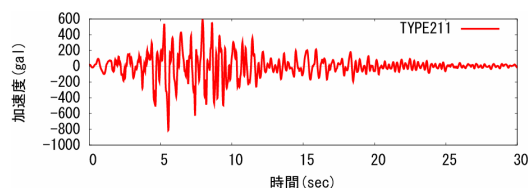
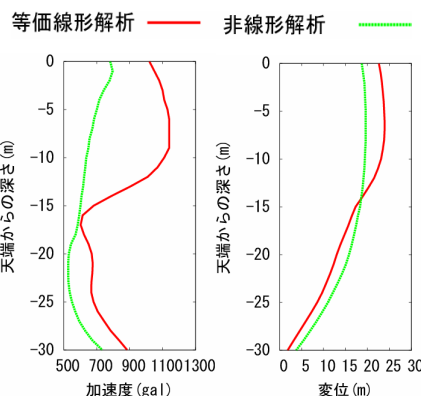


図 2 入力地震動



(a)最大加速度 (b)最大変位

図 3 天端中央を通る縦のラインに沿った最大加速度・最大変位分布

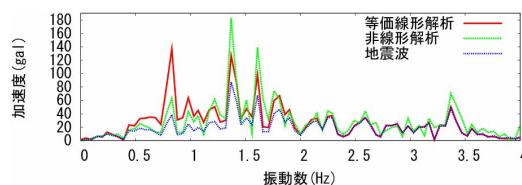


図 4 天端中央の加速度フーリエスペクトル

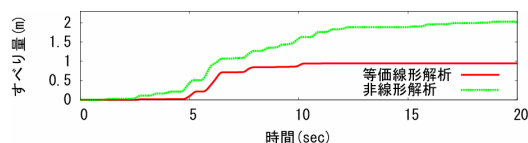


図 5 最大すべり量の時刻歴

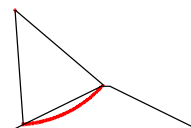


図 6 最大すべり量を与える円弧
(両解析ともに同一の円弧となった)

沿った水平方向の最大加速度・変位分布である。図 3(a)より、非線形解析では最大加速度に増幅がほとんど見られないのに対し、等価線形解析では、深さ 0～-15m において増幅が見られる。最大変位に関しても深さ 0～-15m において等価線形解析のほうが大きい(図 3(b))。この理由は、図 4 に示す天端中央の応答加速度および入力地震動のフーリエスペクトルの比較から説明できる。等価線形解析では約 0.8Hz に明瞭な増幅が見られ、等価剛性に相当する 1 次の固有振動数と考えられる。一方、非線形解析では剛性が変化するため、単一振動数成分のみが増幅するわけではないためであると考えられる。

(2)塑性変形解析結果(Newmark 法)

図 5 に等価線形解析と非線形解析それぞれの結果を用いて算定されたすべり量の時刻歴波形を示す。これらは、想定される任意の円弧すべり面の内、最も大きいすべり量を与える円弧(図 6)に対するすべり量である。最大すべり量は、非線形解析結果を用いた場合は約 2m であるのに対し、等価線形解析の場合は約 1m と約 50%の過小評価である。以上より、レベル 2 地震動に対するアースダムの耐震性能を照査する際は、適切に土質材料の非線形性をモデル化した非線形解析が必要であると考えられる。また、修正震度法による設計で安全率が 1.2 を超えていても、レベル 2 地震動に対しては貯水機能の維持という性能を確保できない可能性があることがわかった。

(3)動的解析の必要性について

非線形解析では最大加速度がほとんど増幅しなかった(図 3(a))ことを受けて、動的解析により増幅を考慮する場合と、増幅を考慮せず入力地震動の加速度波形を用いる場合の、最大すべり量の比較を行った。堤体の内部摩擦角のみを 33～52° の範囲で変化させ比較したところ(図 7)、総じて差異がないことがわかった。

次に、図 8 に平面すべり面法と入力地震動の最大震度から決定された安全率(凡例：平面)と非線形解析により増幅を考慮する場合の安全率(凡例：円弧(増幅考慮))の比較を示す。これらは、非常に良い精度で一致している。平面すべり面法により安全率の評価が可能となれば、すべる可能性がある場合(安全率 1 以下)だけ詳細な解析を実施すればよいことになり、耐震照査業務の効率化に繋がる。本検討により実現可能性が示唆されたが、様々なモデルを用いた更なる検証が必要である。

(4)土質材料の劣化の影響

土質材料は劣化により内部摩擦角が減少すると考えられる。図 7 の堤体の内部摩擦角とすべり量の関係から分かるとおり、劣化(内部摩擦角の減少)に伴いすべり量は双曲線状に増加するため、耐震性を照査するには土質定数の適切な評価が重要であることがわかる。

4. 土質材料の不確実性を考慮に入れた信頼性解析

感度解析の結果、塑性変形解析結果は堤体の内部摩擦角の影響を最も強く受けることがわかったため、堤体の内部摩擦角を変動させたモンテカルロシミュレーションを実施した。ばらつきは正規分布に従うと仮定し、変動係数は 0.1、サンプル数は 100 とした。5 通りの平均値(40,41,42,43,44°)に対して検討を行った。限界状態を、越流の恐れのある「すべり量 1m」と設定した。図 9 に例として内部摩擦角の平均値が 42° の時のすべり量の確率分布を示す。表 2 に各内部摩擦角の平均値に対する限界状態の超過確率を示す。越流を起こす確率は、57～48%となっており、レベル 2 地震動では高い確率で越流する結果となった。

5 結論

修正震度法により設計されたアースダムは、レベル 2 地震動に対して越流の可能性があること、より詳細な非線形解析の必要性が示された。しかしながら、日本では過去にアースダムが 1m 以上すべるような大規模な被害は確認されていない。この理由が、土質定数の設定時に過剰な安全率を見込んでいるためなのか、現行の照査手法が現象を正しく再現できていないためなのか、更なる検討が必要であると考えられる。

参考文献 1)独立行政法人土木研究所,土木研究所資料「大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料」,2005, 2)ダム技術センター,多目的ダムの建設,2005, 3)日本道路協会,道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編,2002

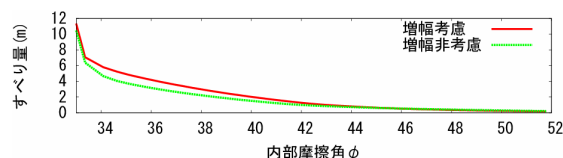


図 7 内部摩擦角とすべり量の関係

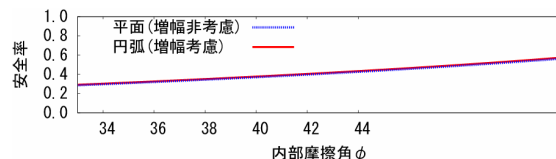


図 8 内部摩擦角とすべり安全率の関係

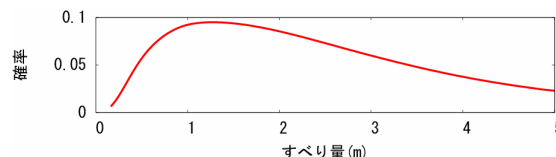


図 9 すべり量の確率分布(平均値 42°)

表 2 すべり量の限界状態の超過確率

内部摩擦角の 平均値	40	41	42	43	44
平均値に対する すべり量(m)	2.0	1.6	1.3	1.0	0.8
超過確率(%)	57.0	54.7	52.4	50.0	48.0