

MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION

動解析・液状化分野 2



MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION

動解析・液状化分野

2.

被災フィルダムの3次元地震 応答解析事例および性能設 計について

農研機構フェロー 谷 茂 様



被災フィルダム の3次元地震応答解析事例 および性能設計について

1. 被災フィルダム の3次元地震応答解析事例
2. フィルダム の性能設計について
 - 2-1 フィルダム のレベル2地震動を考慮した性能設計について
 - 2-2 LCCを考慮した既設フィルダム の耐震補強について

平成27年7月9日

農研機構フェロー 谷 茂

1

被災フィルダム の地震応答解析 —三次元地震応答解析による被災原因の解明—



2

中越地震で堤高43m のA ダム（中心コア型フィルダム）が被害を受けた。A ダムはフィルダム設計基準で施工されたダムであり、上流側・左岸よりに深さ1.5m程度の表層滑りと、堤体全体の変状が報告されている。

特に上流斜面、左岸部に特に大きな被害が発生した。基礎地盤面の形状が断面により異なっており、この形状の違いが、被害の違いに関係したと推測された。

本報告では地震時にAダムで発生した挙動について、3次元地震応答解析を行い、地盤形状が被害に与える影響を検討した。

3



- ・ かんがいダム（新潟県中魚郡川西町）
- ・ 堤高 43 m,
- ・ 総貯水量1,118千トン、1978年完成

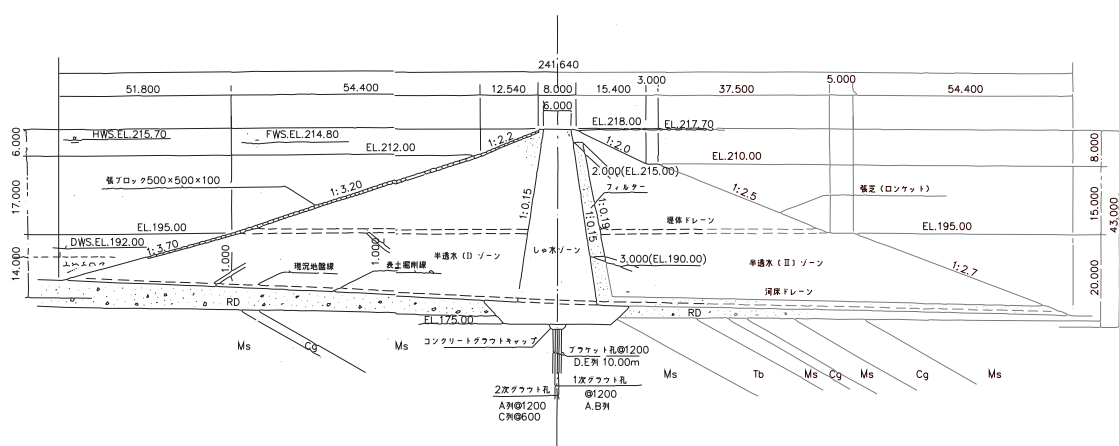
図- Aダム

4



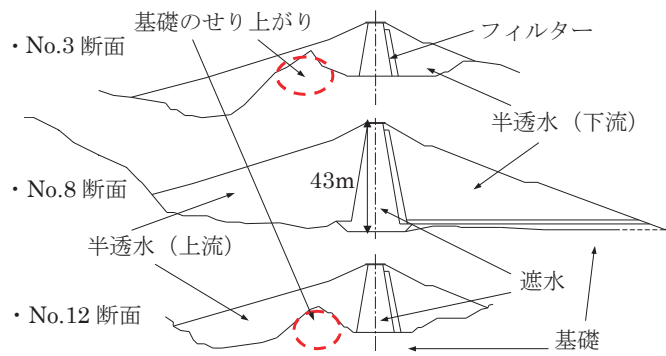
図ー Aダムの上流斜面全景（被災前）

5

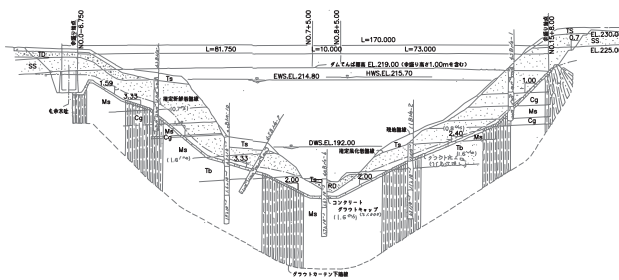


図一 Aダム標準断面

6



図一 Aダム断面図



図一 Aダム縦断面図

7

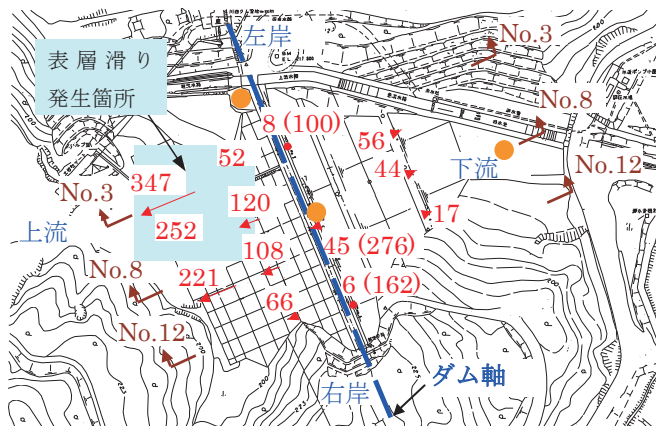


図- Aダムの被災状況

←水平変位、() 内は鉛直変位、単位 mm、●地震計

8

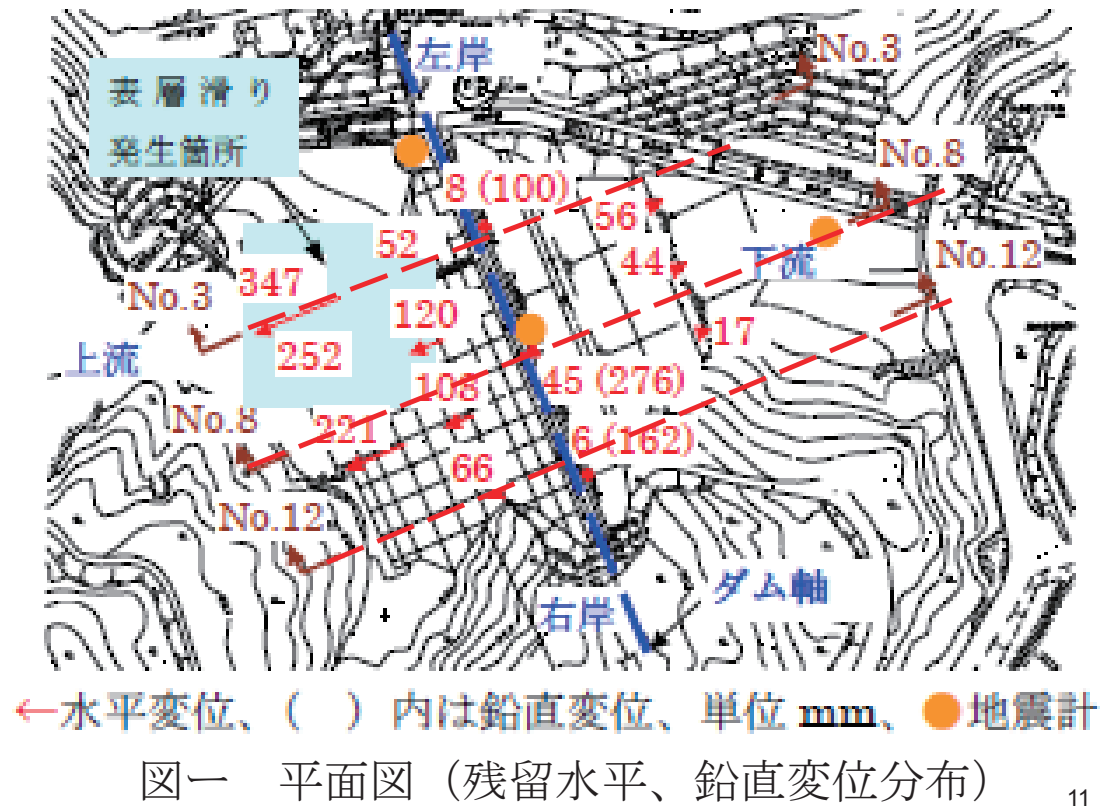


図一 Aダム、左岸崩壊部（下流より見たもの）⁹

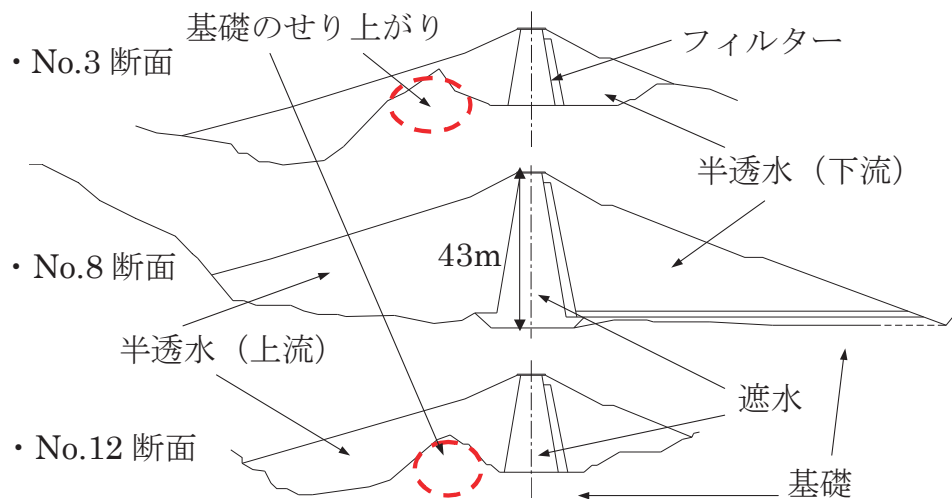


図一 Aダム、左岸崩壊部（下流より見たもの）

10



11



図一 ダム基盤（No. 3, 8, 12断面）

12

ダム地震記録

本震(10.23.17.56)では下記の地震記録が得られている。本ダムには天端中央、左岸地山、下流法尻、3箇所地震計が設置されている。上下方向成分がX方向成分の58%~74%となっているのが特徴である。

下流法尻(計測震度5.7) ; X= 558 gal Y= 444
Z= 406

左岸地山 (計測震度5.6) ; 435 、 546 、 254

天端中央(計測震度6.0) ; 582 、 518 、 430

13

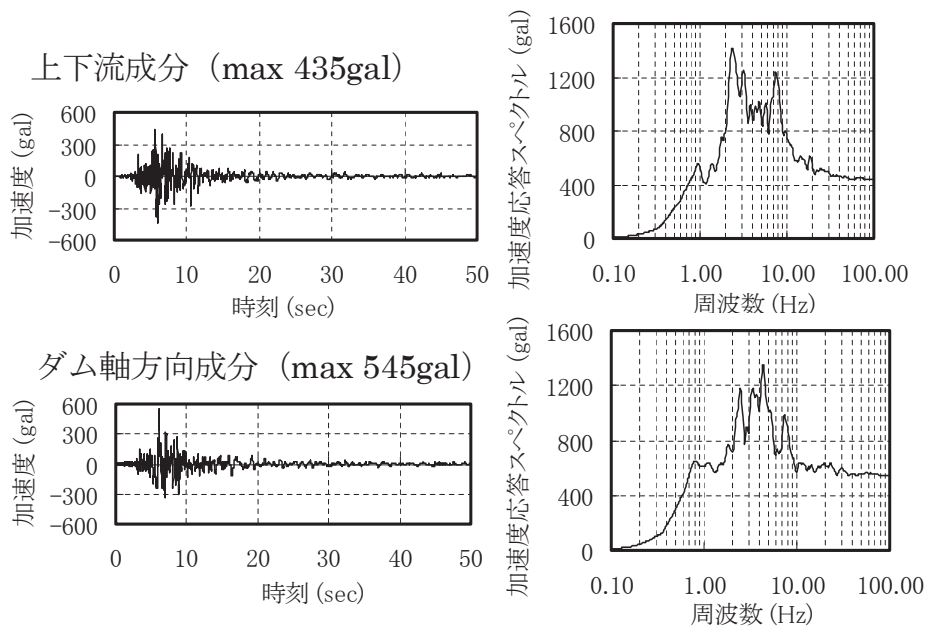


図 解析で用いた入力地震動
(左岸地山での観測波)

14

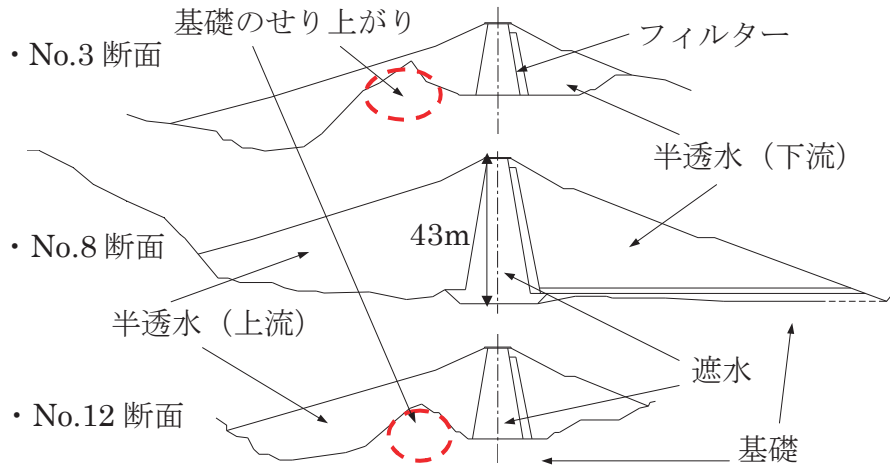


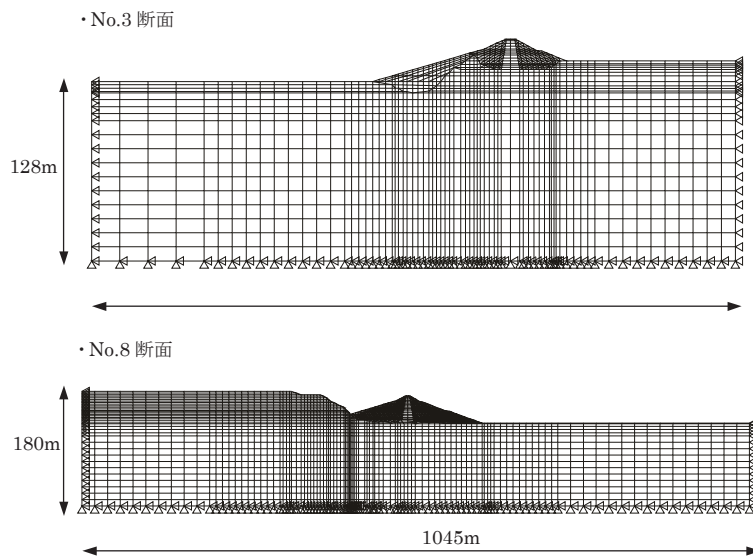
図 堤 体横断図と材料区分図

15

表一 2次元FEM解析での検討項目と得られた知見

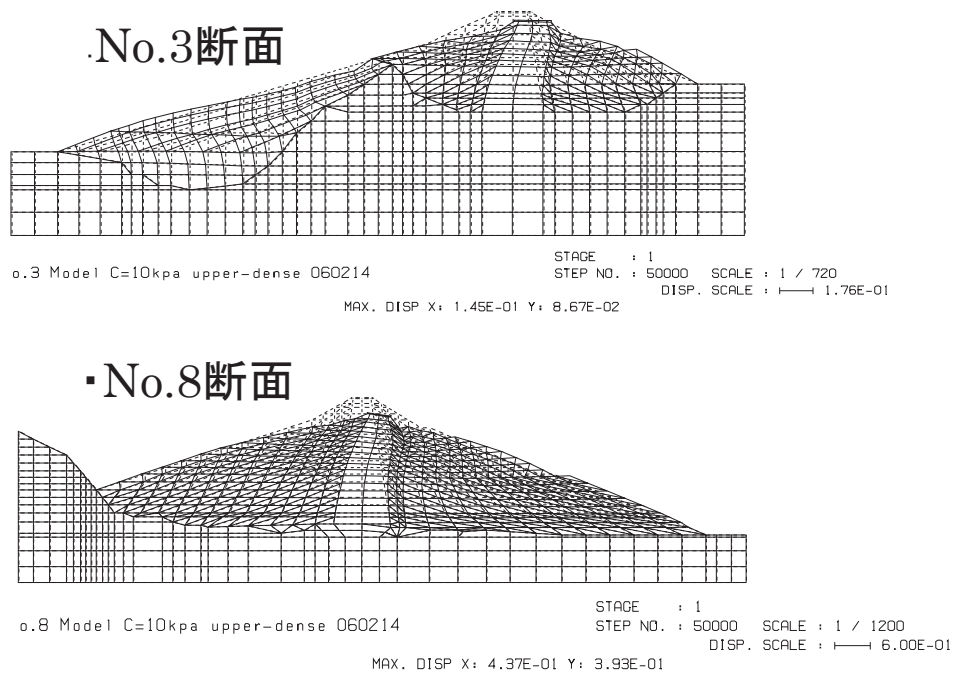
	パラメータスタディ項目	検討によって得られた知見
①	半透水部の粘着力の影響	半透水部の粘着力の設定値が解析結果に与える影響は大きく、半透水部の粘着力に設計値を用いた場合は、殆ど無視した場合に比べて、堤体天端沈下量がオーダー違いで小さくなっている。
②	基盤のせん断剛性 の影響	基盤のせん断剛性を $V_s=1600(\text{m/sec})$ から設定した方が、N値50から求まる $V_s=329(\text{m/sec})$ から設定する場合に比べて堤体天端の沈下量は大きくなる。
③	堤体密度の影響	堤体密度が大きくなる盛土の管理試験結果から密度を設定した方が、堤体天端の沈下量は小さくなる。また、堤体が大きく下流側に変位する残留変位のパターンについても、盛土管理試験結果から密度を設定した方が、堤体が下流側に移動している程度は小さい。
④	入力地震動の影響	左岸地山観測波をSHAKEで基盤に戻した地震波を用いた方が、堤体天端の沈下量は大きくなる。

16



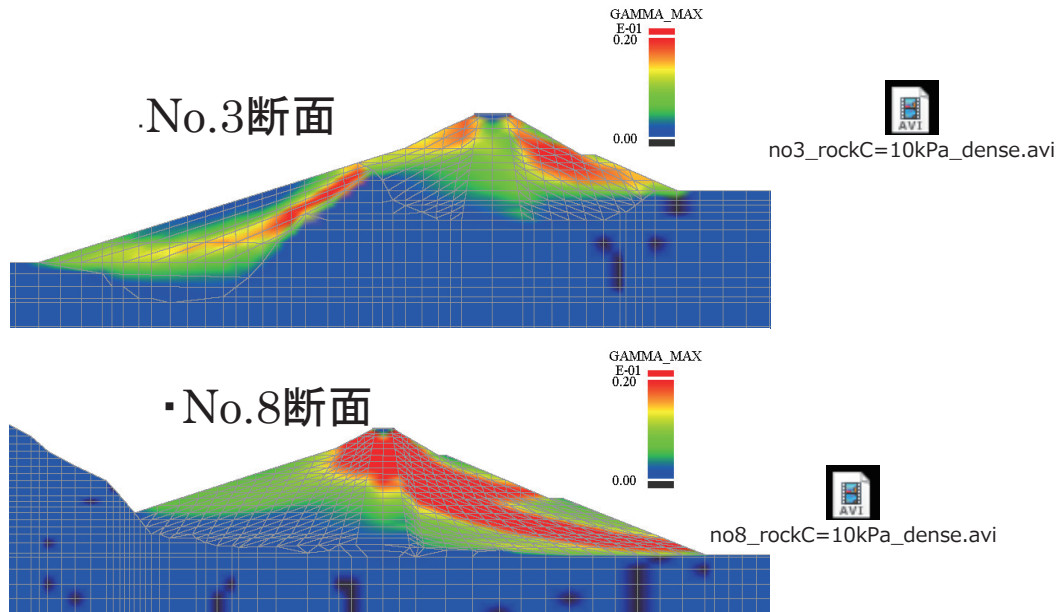
図一 2次元解析で用いたメッシュ

17



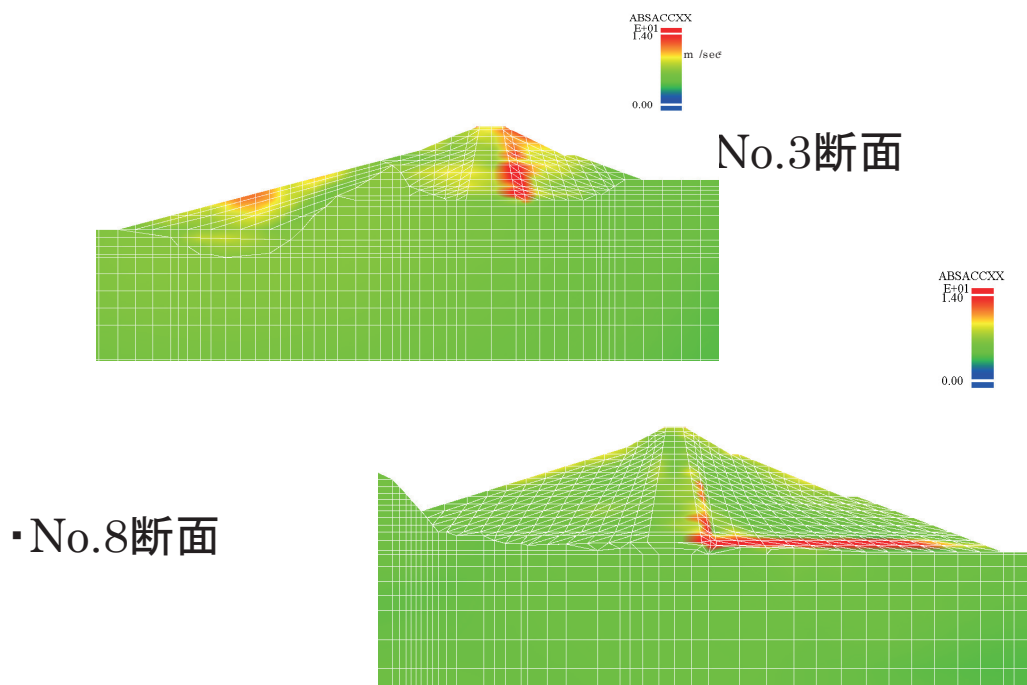
図一 解析で得られた残留変形図

18



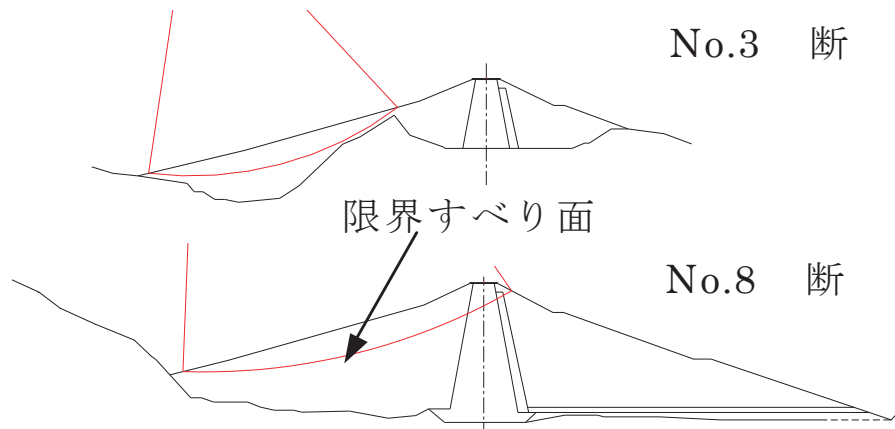
図一 解析で得られた解析最終ステップの
 $\gamma_{\max}$ コンター図

19



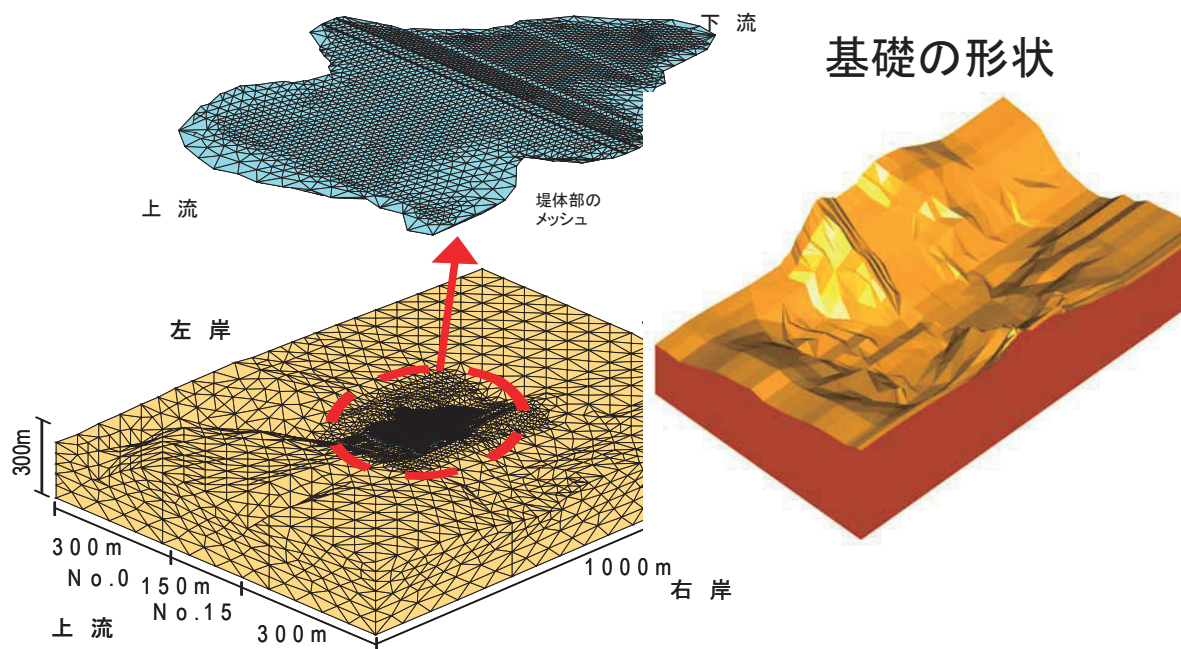
図一 解析で得られた水平加速度
の最大値のコンター図

20



図一 ニューマーク法で用いた限界すべり面

21



図一 3次元FEM解析メッシュ

22

ケース名	底面境界条件	側面境界条件
鉛直ローラー	粘性境界	鉛直ローラー
水平ローラー		水平ローラー
粘性境界		粘性境界

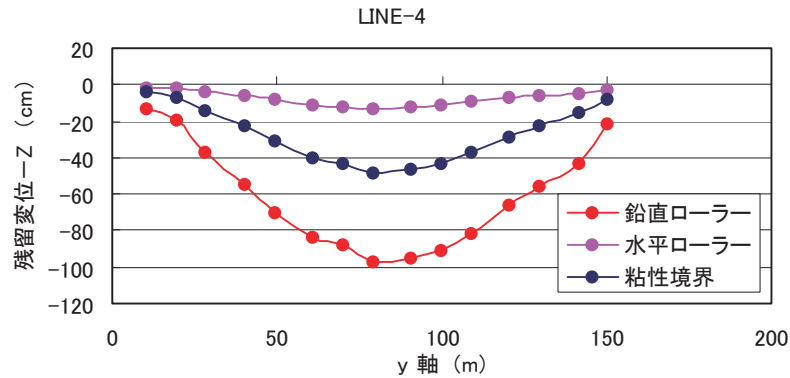
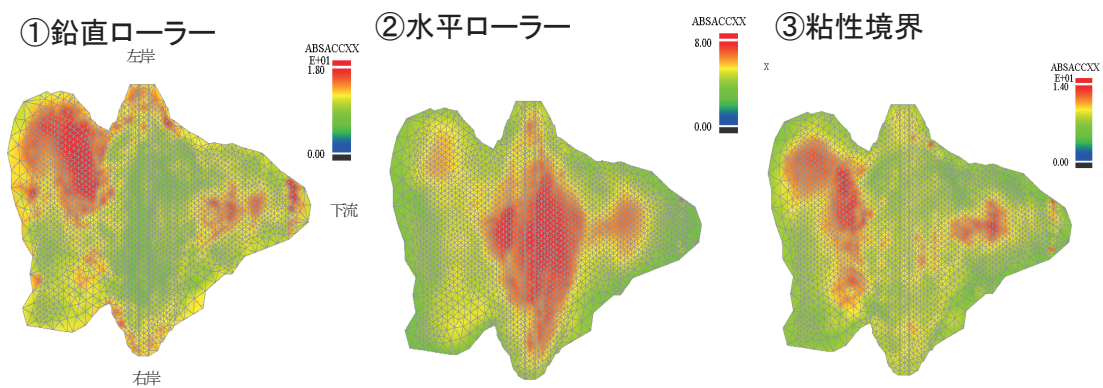


図 ダム軸での残留沈下量

23



図一 上下流方向加速度の最大値コンター図の比較

26

6. まとめ

本解析で得られた知見をまとめると、次のようになる。

- ①地震時に上流左岸側で発生した表層すべりは、上流左岸側の基礎形状に起因した応答特性によるものである。
- ②ニューマーク法による堤体滑動変位量の算出では、上流左岸側で法尻～法面中段にかけて限界滑り面が表れ、地震時に表層滑りが発生した現象と対応するが、左岸地山観測波を用いた滑動変位量の値は小さい。
- ③堤体全体の変状によってダム軸中央付近で最も沈下量が大きくなる傾向は解析で示された。堤体天端沈下量や左岸に発生した残留変形量の定量的評価を行うためには、使用する入力地震動と地盤定数、土の構成則等に依存しているために、定量的な評価は難しいが、三次元効果の定性的な影響は確認できた。

27

1. 3次元解析の必要性 ー2次元解析ではだめなのか？ー

3次元解析が必要かどうかのポイント

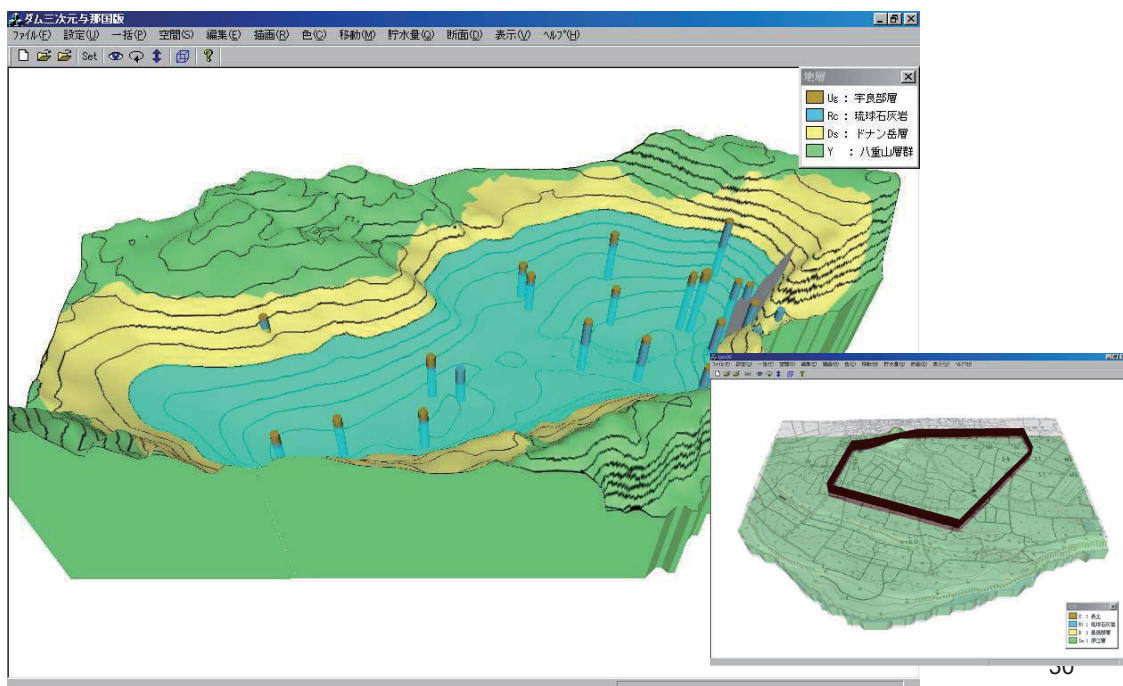
- ・ 構造物の形状が複雑、構造物の基礎となる地盤の性質が複雑
- ・ 2次元解析では「危険な判断結果」になる可能性がある場合
- ・ 3次元のデータが容易に得られるか。特に地盤の三次元情報が得られるか。
- ・ (CIM(Construction Information Modering/Management)の活用)

28

ダム(土木構造物) の三次元解析

- ・ ダム(土木構造物) の三次元解析を行う場合には、地形情報、地盤の三次元情報、構造物の三次元形状情報が必要となり、この情報をいかに効率的に取得するかがポイント。
- ・ 三次元解析ソフトがこの三次元情報を、容易に取り込める、インターフェースが必要。
- ・ 優れた三次元解析ソフトが必要。
土の構成則(液状化の考慮)、入力データの容易さ、解析時間)

地下ダム候補地での地盤の三次元表示



2-1 フィルダムのレベル2地震動を 考慮した性能設計について

1

2. 性能設計とは

‘性能設計’とは何かについて、文献によって様々なとらえ方、表現があるが、本報告では詳細については述べないので、それぞれの文献を参照されたい。各種設計指針や基準類が仕様規定型から性能規定型への移行を指向する状況下において、各関係学会等により性能設計（照査）に関する委員会や基準が設立、施行され、地盤工学会からも2006年3月に地盤工学会基準として、性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則が公表された。これらの報告書や基準等では、“仕様設計から性能設計に移行することで、新技術・新工法の採用など、設計の自由度が増し、建設コストの縮減に繋がることが期待される”と性能設計の導入効果が概念的に述べられている。

2

性能規定型設計規定の例（鉄道構造物等設計標準・同解（土構造物））について

～土構造物の要求性能としては、使用者や周辺の人々の生命を脅かさないようにするための安全性、使用者が快適に使用でき、周辺の人々が快適に生活するための瀬お能である使用性、想定される作用に対して使用可能な状態に保つ、もしくは損傷を受けた場合に容易に性能回復するが行えるようにするための性質である復旧性があります。

（地盤工学における性能設計入門、地盤工学会（2012）、30P より）

3

文献（土構造物の地震時における許容設計と性能設計に関する研究委員会. 委員会報告）では性能設計として、

「性能（照査）設計とは事業主体などが、構造物の目的、適用範囲、各限界状態における要求性能を明示し、かつ、構造物の性能照査に用いる方法に制限を設けない構造物に対して、設計者が規定した性能規定を一定のある適切な信頼度で満足することを証明する設計方法に基づく設計」と定義されている。

簡便に表現すれば、設計・照査の方法に関係なく求められる性能目標を（結果）を満足する設計法であるともいえる。

4

フィルダムに関する性能設計

ダムの要求性能

地震時に

- ①ダムの貯水機能が維持されること
- ②生じた損傷が修復可能な範囲にとどまること

フィルダムでは特に最大沈下量が、貯水の越流を生じることがない量に収まる（沈下量で規定している）（国交省指針（案））、
～パイピング破壊はどのように判断するか？

現実にはこの判断は解析等では難しいので、従来の経験から、沈下量をこの程度に抑えれば大丈夫という判断から、沈下量のみで考える。

5

耐震補強のシュミレーション事例

検討事例では、国際耐震規準として制定されているIS023469に準拠して耐震診断を実施した。次表では検討事例とIS023469との適合を項目毎にチェックした一覧である。性能目標の地震時および地震後の使用性の規定は、レベル1地震動に対する耐震性能とした。

日本において、フィルダムの耐震設計で一般的に用いられている強震帯地域の水平震度 $k_h=0.15$ を、レベル1地震動の参照地震動とした。解析手法は円弧すべりによるすべり面解析とし、耐震性能規定はすべり安全率1.20以上とした。参考にレベル2地震動相当の K_h を推定し、そのときの安全率を求めた。

6

表 ISO23469との適合チェックリスト

項 目			適用 (○)	内容と項目の説明	ISO23469 関連章節
耐震性能 地震動の 規定	耐震性能目標の 規定	使用性	○	レベル1地震動に対する耐震性能、健全性を損なわない	5.1.2
		安全性	○	レベル2地震動に対する耐震性能、限定された損傷にとどめる	
	参照地震動	使用性照査	○	レベル1地震動として強震帯地域の設計震度0.15を設定	5.1.3 6.2
		安全性照査	○	レベル2地震動として照査用下限加速度応答スペクトル適合波形と、 宮城沖地震想定波形を使用	
	耐震性能規定の 明示	使用性	○	すべり安全率で規定	5.1.4
		安全性	○	堤体天端最大沈下量で規定	
		設計耐用期間	○	100年	
地盤応答 断層変位 等の評価	地盤応答解析	経験的解析	○	設計震度による地盤種別に応じた増幅係数の適用	6.3.2
		簡易動的解析	○	想定土塊での加速度時刻歴を規定	6.3.4
		詳細動的解析	○	基盤面で加速度時刻歴を規定	6.3.5
	液状化の評価		—	液状化の予測判定なし	6.3
	地震動の空間的変動の評価		—	水平方向の波動伝播の考慮	6.4
	断層変位等の評価		—	断層変位／地盤破壊等の考慮	6.5
地震作用 の評価	地震作用の評価	簡易等価静的解析	○	円弧すべり解析を用いた地盤－構造物非一体型モデルによる静的解析	7.2.1
		詳細等価静的解析	—	地盤－構造物一体型モデルによる静的解析	7.2.2
		簡易動的解析	○	Newmark法を用いた地盤－構造物非一体型モデルによる動的解析	7.3.1
		詳細動的解析	○	FEMを用いた地盤－構造物一体型モデルによる動的解析	7.3.2

7

照査用地震動は何を用いるか。

1. 国交省指針（案）～下限値加速度応答スペクトル
2. シナリオ地震動

実際の例では、

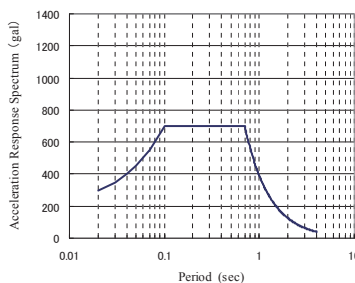
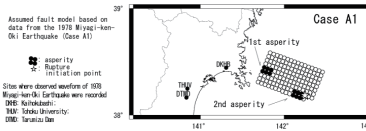
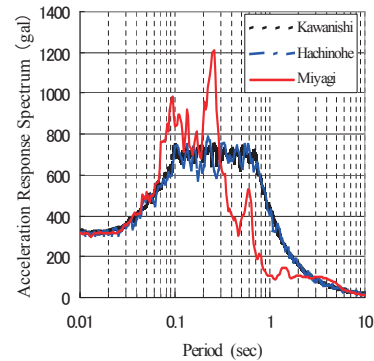
図 照査用下限加速度応答
スペクトル

図 断層モデル

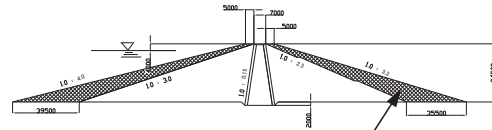
図 解析に用いる加速度応
答スペクトル

8

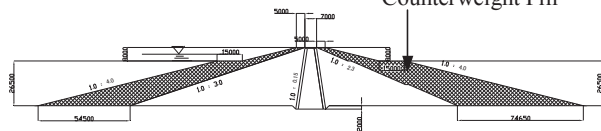
表、図 補強断面の諸元、断面

	補強断面①	補強断面②	補強断面③
補強方法	押え盛土	押え盛土	改良土
補強後の天端幅	17m	17m	7m
上流側法勾配	1.0 : 4.0	1.0 : 4.0	1.0 : 3.3
下流側法勾配	1.0 : 3.3	1.0 : 4.0	1.0 : 2.3
補強位置	既設の外側	既設の外側	既設の内側

・ Reinforcement Case①

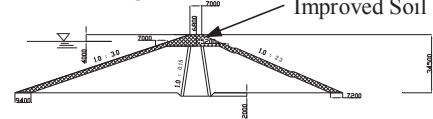


・ Reinforcement Case②



Counterweight Fill

・ Reinforcement Case③



Improved Soil

図 動的解析での堤体天端最大沈下

	堤体天端の最大沈下量 (m)		
地震波	川西波	八戸波	宮城波
無対策	0.676	0.606	0.268
補強断面①	0.507	0.433	0.146
補強断面②	0.384	0.326	0.073
補強断面③	0.244	0.242	0.102

9

表 地震時のすべり安全率一覧

補強材料	地震時安全率 ($k_h=0.15$)		地震時安全率 ($k_h=0.35$)	
	堤体材	改良土	堤体材	改良土
無対策	1.357	—	0.889	—
補強断面①	1.624	—	1.018	—
補強断面②	1.634	—	1.018	—
補強断面③	—	1.438	—	0.954

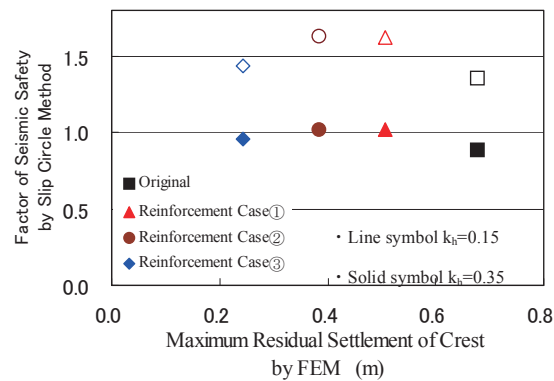


図 FEM解析の残留沈下量とすべり安全率の関係

10

表 既存フィルダムの性能設計の条件

項 目			適用 (○)	内容と項目の説明
耐震性能、 地震動の規定	耐震性能目標 規定	16.5	○	レベル1地震動に対する耐震性能、健全性を損なわない
		安全性	○	レベル2地震動に対する耐震性能、限定された損傷にとどめる
	参照地震動	使用性照査	○	レベル1地震動として強震帯地域の設計震度0.15を設定
		安全性照査	○	レベル2地震動として照査用加減速度応答スペクトル適合波形と、シナリオ地震動の想定波形を使用
	耐震性能規定の 明示	使用性	○	すべり安全率で規定(いかなる場合でも、すべり安全率 >1.20)
		安全性	○	堤体天端最大沈下量で規定(天端の沈下量が0.5m以下)
		設計耐用期間	○	100年
性能照査法	地震作用の評価	簡易等価静的解析	○	円弧すべり解析を用いた地盤-構造部非一体型モデルによる静的解析
		詳細動的解析	○	FEMを用いた地盤-構造物一体型モデルによる動的解析(変位解析)

11

事例2

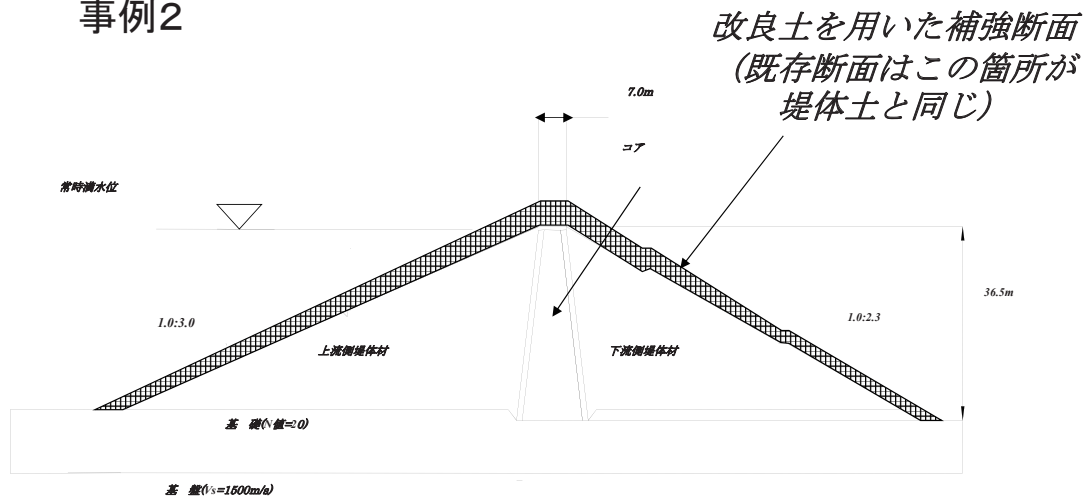


図 既存フィルダムおよび補強後の概略標準断面

12

表 解析によって求められた変形量

照査地震動	堤体天端の最大沈下量(m)	
	照査用加減速度応答 スペクトル適合波形	シナリオ地震動
既存断面(図-1)	0.676	0.268
補強断面(図-1)	0.244	0.102

13

既存フィルダムの耐震補強例 ー性能目標を決めてー

14

事例1

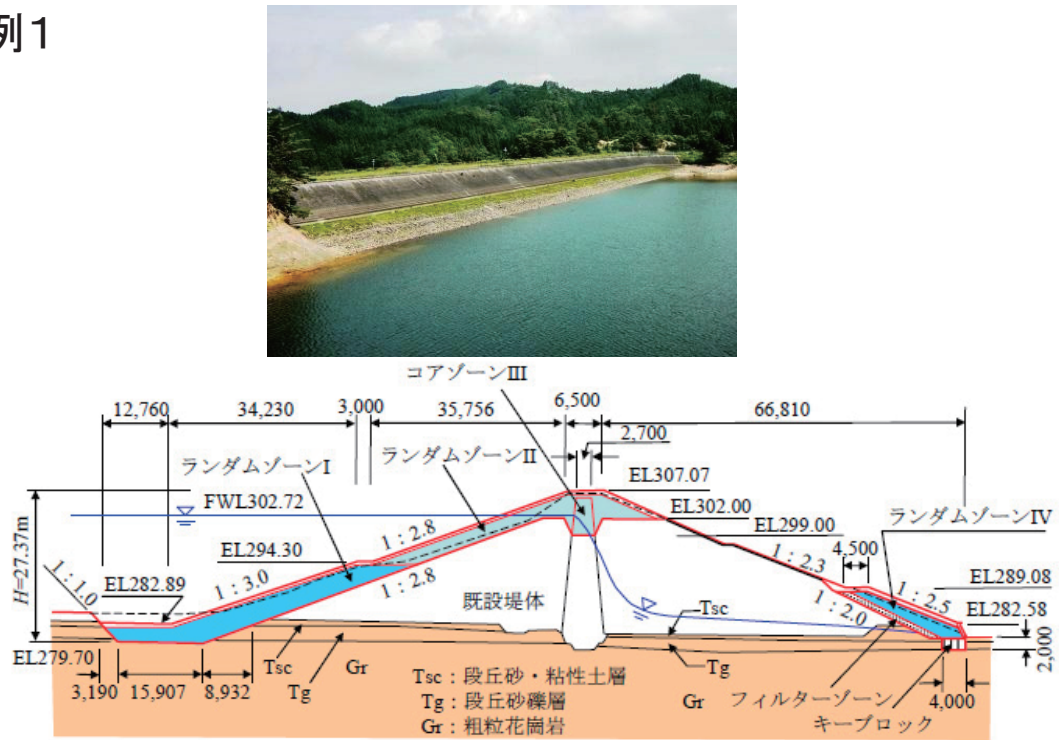
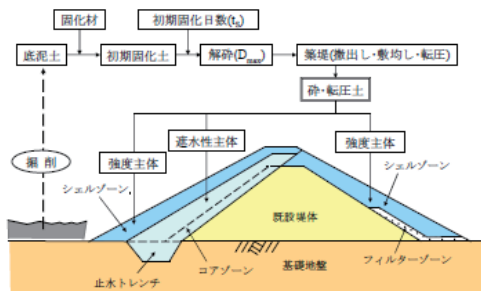


図 0 ダムの改修前、改修後の標準断面

15



16

図 31 設定地震動の時刻歴

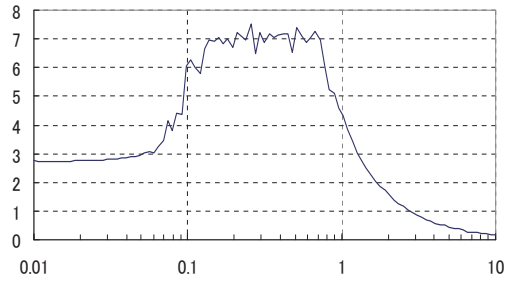


図 設定地震動の応答スペクトル(減衰 5%)

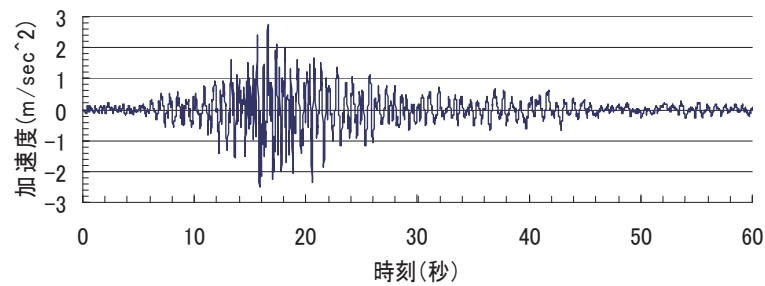
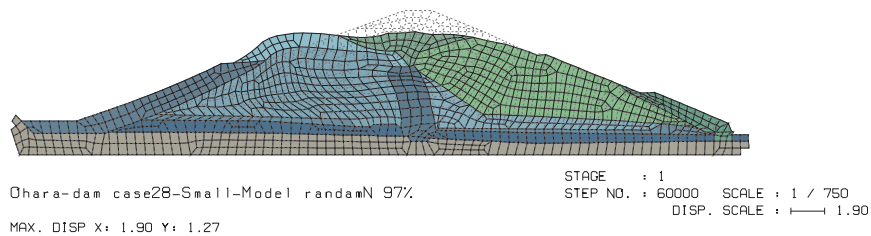
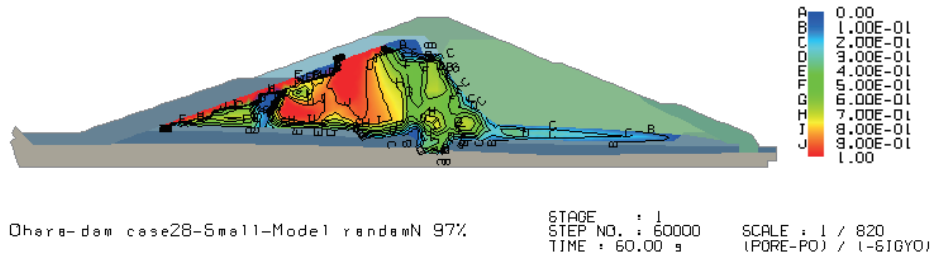


図 設定地震動の時刻歴

17



(a) 60秒後の変形図



a) 60秒後の間隙水圧分布図

18

事例2

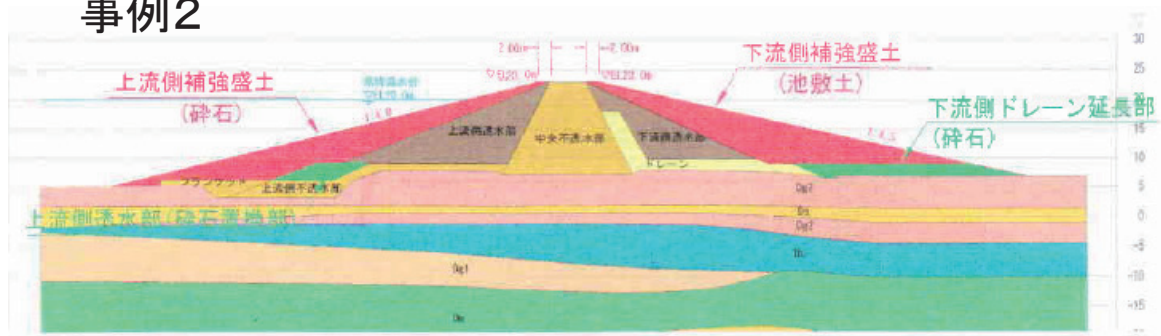


図-12 押え盛土

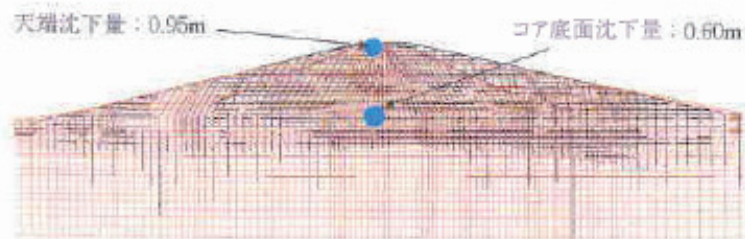


図-14 圧密沈下終了時の沈下量 (地震終了21時間後)

21

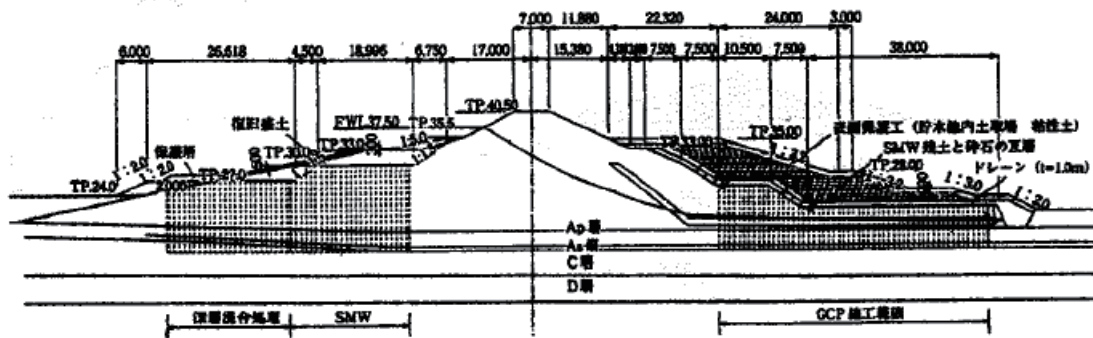
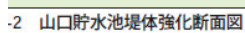


図-15 山金ダムの改修後堤体横断面(4)

22



地震リスクを考慮した既存フィルダムの耐震補強について

1

1 はじめに

近年、大規模地震に対する老朽化フィルダムの安全性の評価において、耐震補強対策の必要性、対策の合理性の説明が求められていること、仕様設計から性能設計へと移行していること等から、耐震補強する場合でも、耐震補強対策の程度と地震リスクを考慮したLCCの概念に基づく耐震補強対策の最適化が求められている。

本論文では仮想フィルダムを対象として、築堤材のばらつきを考慮し、性能目標を設定し、動的応答解析によりレベル2地震動における安全性の検討を行った。さらに地震動や地震ハザードの設定、および補強工法を仮定して耐震補強を行った場合の破壊確率を求め、大規模地震動のリスクを考慮した既存フィルダムのライフサイクルコストの評価を行った。

2

2. 性能設計について

フィルダムの性能設計に必要なものとして下記の項目が主に挙げられる。

設計条件；

外力(レベル地震動)の設定～たとえばシナリオ地震動

性能目標～たとえば、沈下量

設計手法と評価法～適切な信頼度を有する性能照査法(動的解析)

3

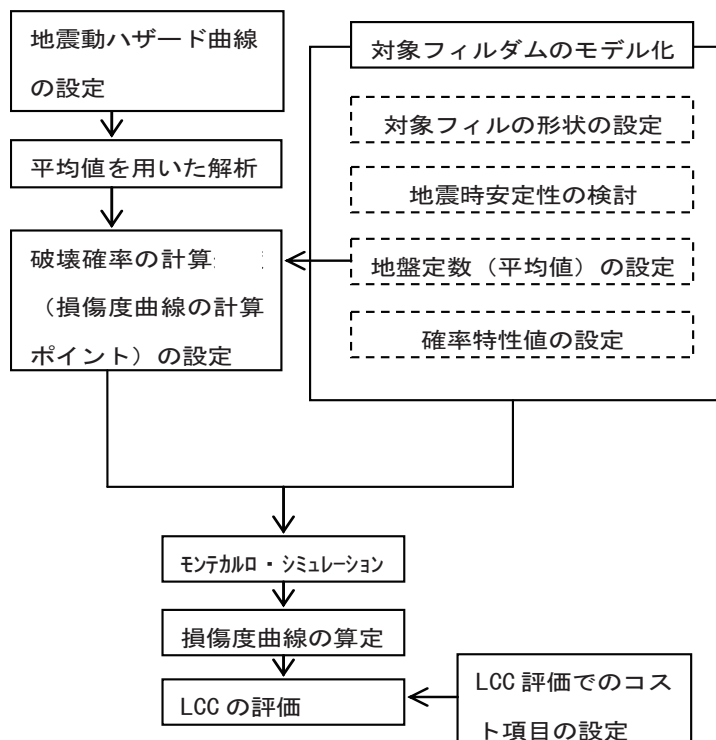


図-1 LCC 評価の流れ

4

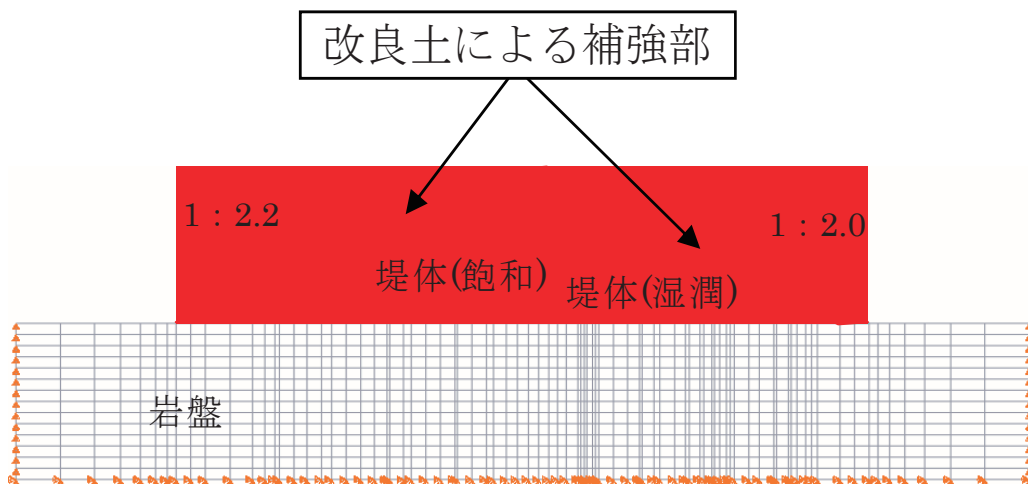


図-2 解析対象のフィルダムの標準断面

5

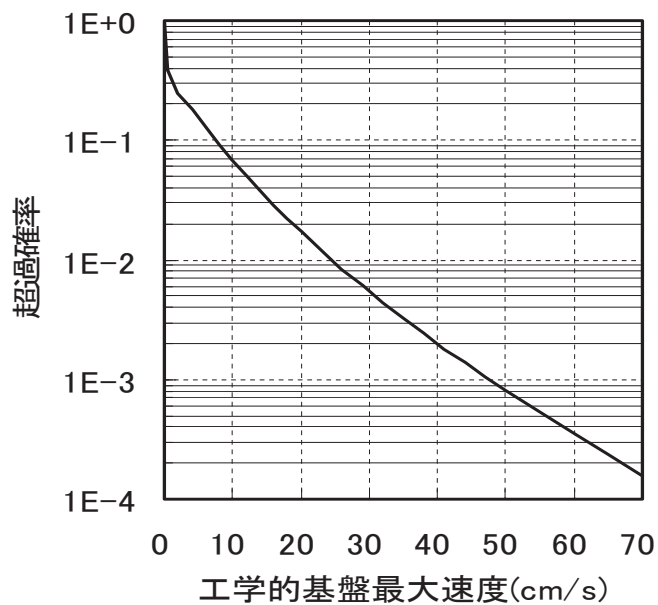


図-3 地震ハザード曲線

(防災科学技術研究所のデータによる)

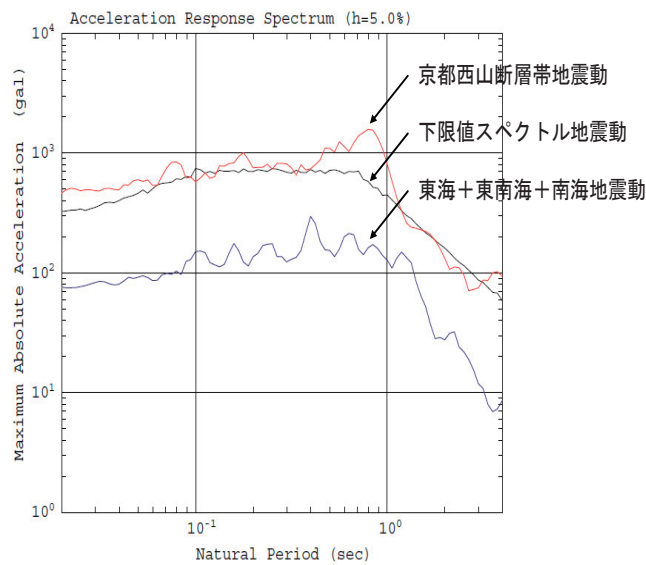


図-4 候補とした波形の加速度応答
スペクトルの比較

7

表 動的応答解析に用いる地盤定数

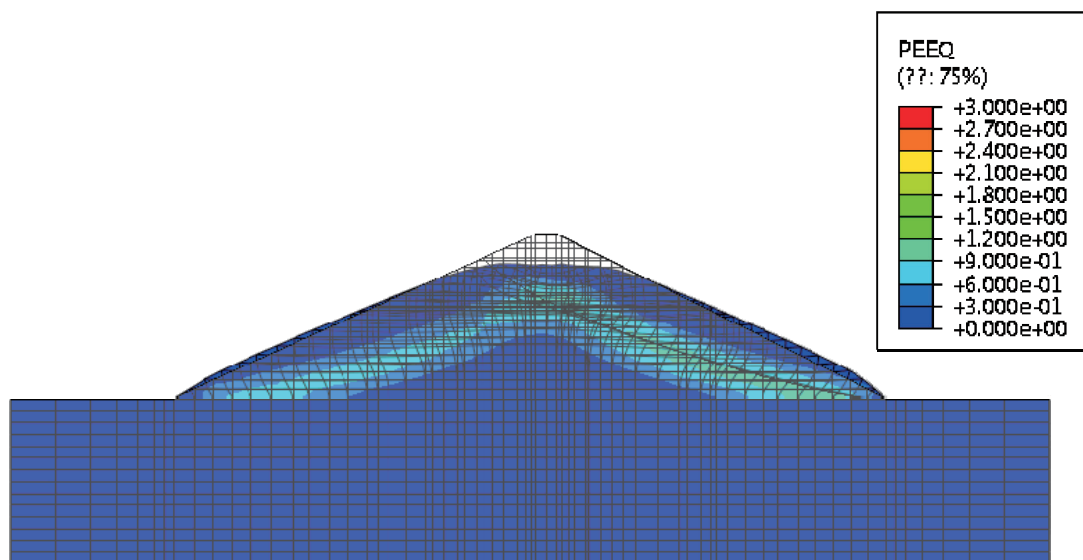
材料区分		弾性係 数*) (kN/m ²)	ポアソン 比	密度 (t/m ³)	ϕ (°)	C (kN/m ²)	せん断 剛性 (kN/m ²)
堤体材	湿潤	121,000	0.41	1.9	25	5	42,750
	飽和	134,000	0.49	2.0			45,000
改良土	湿潤	482,000	0.41	1.9	10	150	171,000
	飽和	536,000	0.49	2.0	10	150	180,000
岩盤		3,572,000	0.35	2.7	—	—	1,323,000

8

表 地盤定数の確率特性値

対象		変動係数	確率密度関数
堤体材	内部摩擦角	0.10	対数正規分布
	粘着力	0.30	
改良土	内部摩擦角	0.10	
	粘着力	0.30	

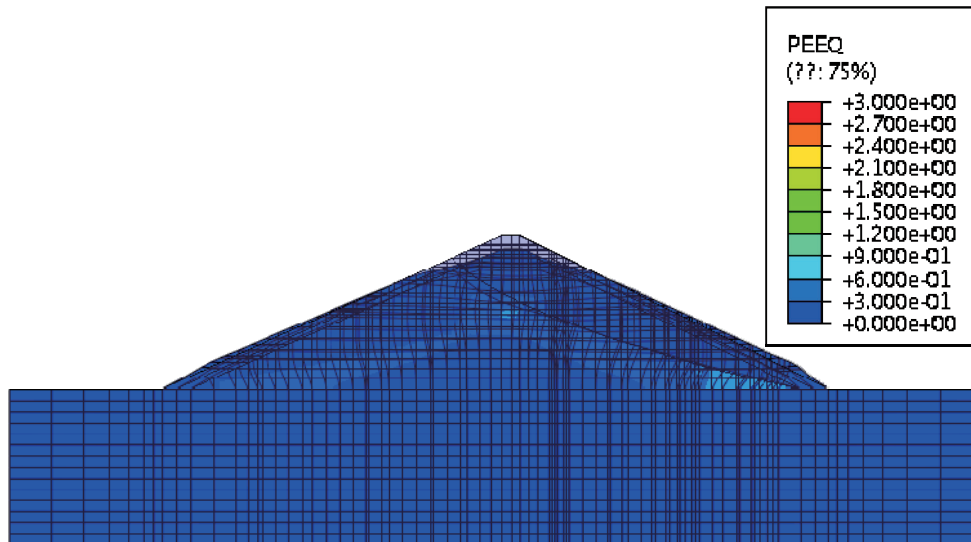
9



最大加速度 300cm/s^2 ($c=8.05\text{kN/m}^2$, $\phi=20.35^\circ$, 天端沈下量 102.2 cm)

図一 変形と塑性ひずみコンター(対策前)

10



最大加速度 300cm/s^2 (天端沈下量 46.31cm)

図一 変形と塑性ひずみコンター(対策後)

11

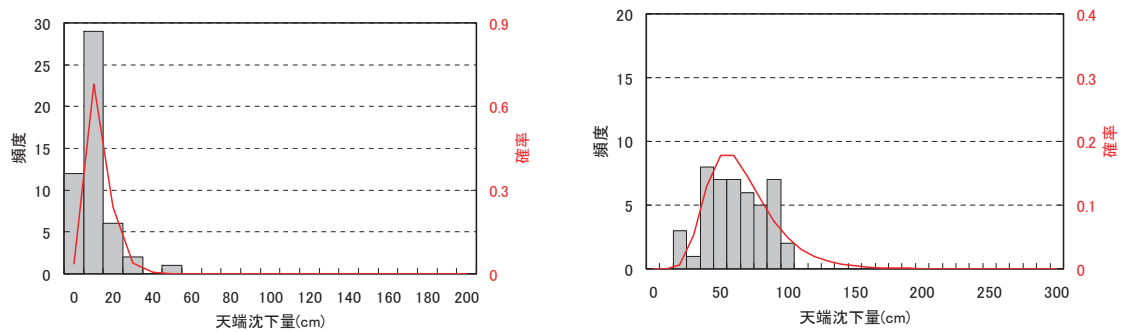


図 - 天端沈下量のヒストグラム(最大加速度 300cm/s^2 , 対策前, 対策後)

12

性能目標について;

ダム機能の面、安全性から考えると、レベル2地震動に対しても貯水機能を保持出来る範囲の沈下量に納めなければならないことになり、地震後の天端標高が貯水位よりも下回らないこと、すなわち盛土の余裕高以内に沈下量が収まるように設計することが、最低限必要になってくる。

フィルダムでは“余裕高さ”（付加高さ）が設計基準で少なくとも1.0 m以上は確保されていることから、堤高にかかわらず概ね1 mぐらいを性能目標とするが、解析に用いる土質定数のばらつき、解析の誤差等を考えて、解析結果に「安全率」的な係数を考えれば、結果に50%～100%かけて、評価をする考え方もある。

13

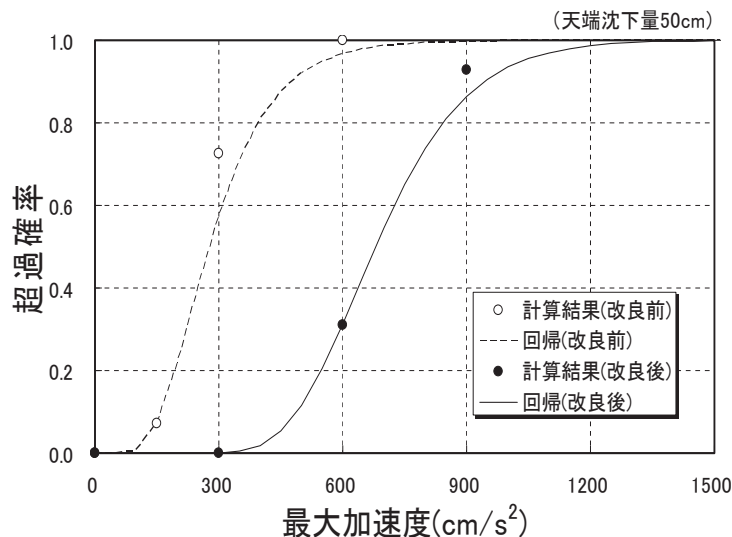


図-5 損傷度曲線（地震加速度に対する損傷確率）

14

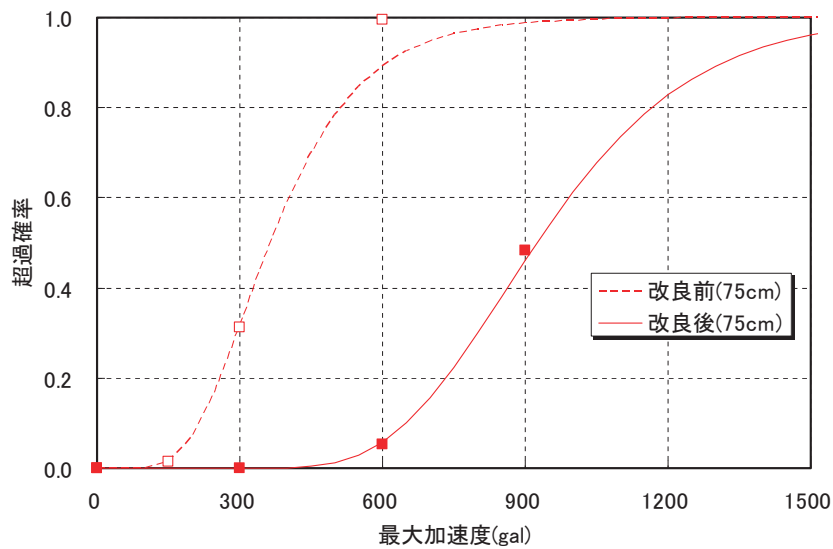


図- 損傷度曲線（地震加速度に対する損傷確率）

15

$$p = \int_0^{\infty} F(\alpha) \frac{dH(\alpha)}{d\alpha} d\alpha$$

ここに、 p : 1年間当りの破壊確率,
 $F(\alpha)$: 損傷度(フラジリティ)曲線,
 $H(\alpha)$: 地震ハザード曲線, α : 最大加速度

	年間破壊確率
対策前	1.1×10^{-2}
対策後	2.7×10^{-4}

表- 年間破壊確率の算定結果（天端沈下量の限界値50cm）

	年間破壊確率
対策前	4.92×10^{-3}
対策後	5.77×10^{-5}

表- 年間破壊確率の算定結果（天端沈下量の限界値75cm）

16

LCCの計算と評価

LCCの評価について、天端沈下量50cmの場合で、対策費10億円、被害額50億円を仮定してLCCを評価した。対策費は上下流斜面を図-1のように改良土で補強した場合で対策工事費を10億円とした。維持費については考慮していない。被害額は洪水解析で求めた氾濫域の被害額を算定した額38億円+フィルダムの復旧費を12億円とし、合計50億円の損害額とした。LCCの計算結果を図-6に示す。今回の試算では約40年で既存と対策後のLCCが同額になる。設計期間をどの程度にするかによるが、100年とするとこの補強対策はLCCの観点からは合理的であると判断される。

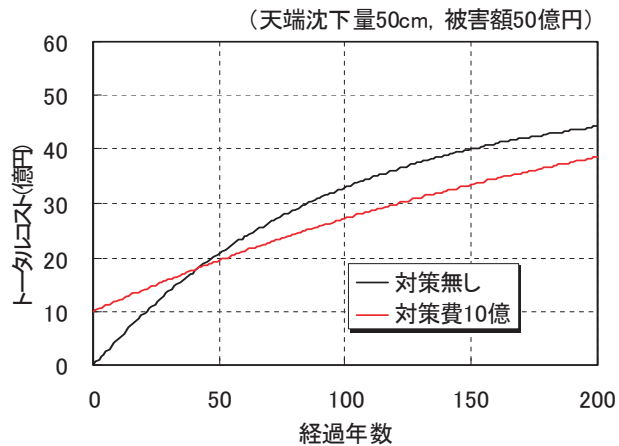
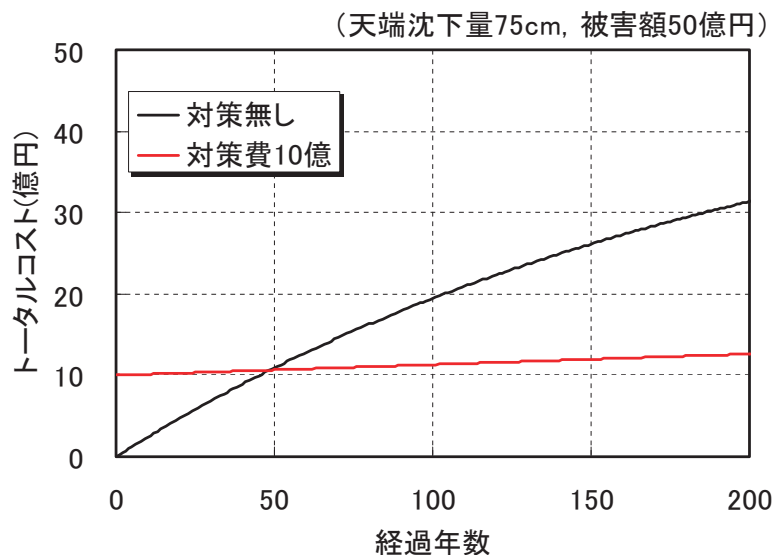


図 LCCの評価結果

17



18

4. まとめ

本報告では既存フィルダムをモデルとして、性能目標を設定し、地震リスクを考慮し、改修前と改修後の破壊確率を計算し、ライフサイクルコストを評価した。このような手法を使うことにより、より適切な耐震補強の実施の判断と方法が選択できると考える。

19

今日の講演のまとめ

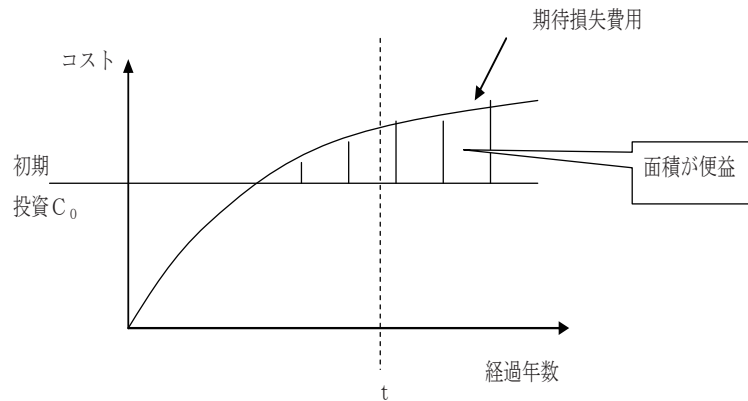
1. 2次元解析、三次元解析～地質の三次元情報が得られるか？
2. 性能設計～許容変位量？
3. LCCを考えた、合理的な耐震補強方法
～重要構造物の場合、B／Cの考えが受け入れられるか？
～地震動（外力）のレベルをどこまでにするか？ レベル2でもいろいろなレベルがある。

20

社会的割引率は、事業の投資効率性を評価するときに用いられており、例えば国土交通省の費用便益分析で用いられている。

これは、得られる便益BとコストCの比較で事業の投資効果を判断するもので、防災事業では、便益は「期待被害額」の軽減分を防災事業の便益としている。

今回の例では、下図に示すように面積を便益とした場合は、次式で求まる t が社会的割引率を考慮した費用分析結果となります。



$$\sum \frac{B_t}{(1 + i^1)} - {}_0C = 0$$

21

動解析・液状化分野

MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION



株式会社マイダスイティジャパン

〒101-0021 東京都千代田区外神田5-3-1 秋葉原OSビル7F

TEL 03-5817-0787 | FAX 03-5817-0784 | e-mail g.support@midasit.com | URL <http://jp.midasuser.com/geotech>

Copyright © Since 1989 MIDAS Information Technology Co., Ltd. All rights reserved.