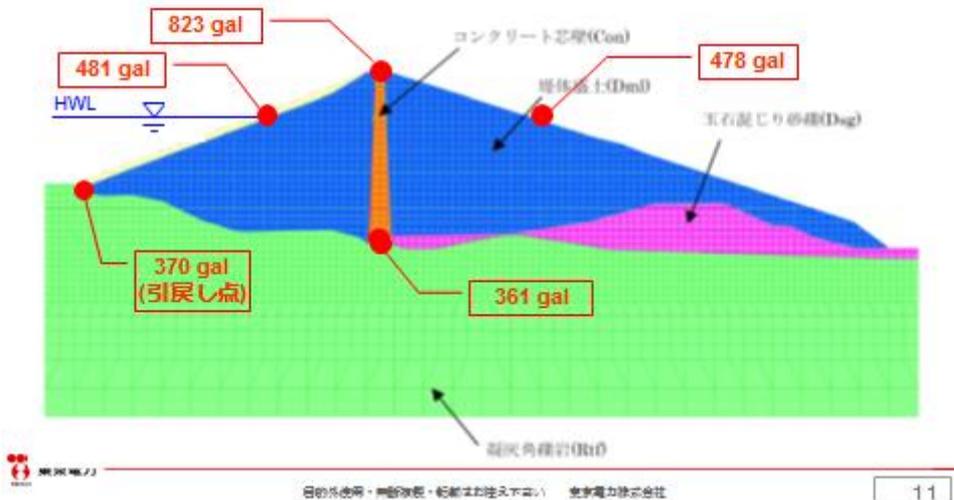


3-1-1.1. アースダムの耐性評価の事例【東京電力(株)の例】

耐震性能照査結果

主な箇所の最大加速度分布(上下流方向)

- ・天端における増幅率は、天端/基礎≒2.3倍



3-1-1.2. アースダムの耐性評価の事例【東京電力(株)の例】

耐震性能照査結果

① F_L 値による液状化(剛性低下)の判定

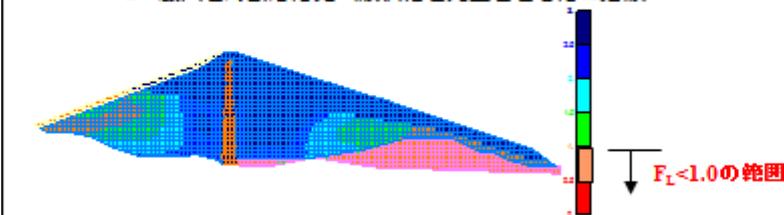
$$F_L = R/L$$

$F_L < 1.0$ になると、発生範囲を確認の上、詳細検討の必要性を判断

R: 液状化強度比 (液状化に対する抵抗力の指標)

※地盤工学会の液状化指標において標準し固数20個でDA=5%となる標準し応力比

L: 最大せん断応力比 (液状化を発生させる力の指標)



- ・地下水位以深の緩い砂層で生じるような“流動化を伴う液状化”は発生しない

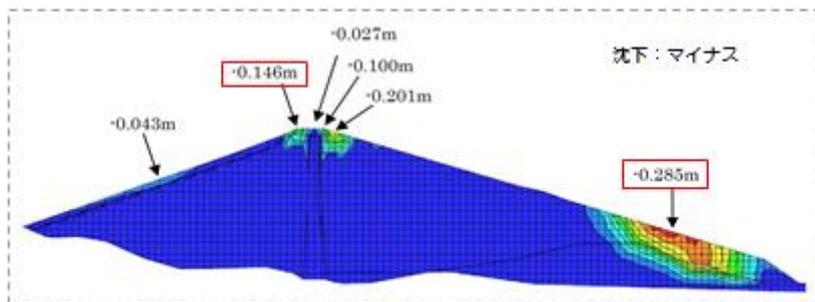
- ・上流側堤体盛土の一部、および下流側玉石混じり砂礫層にて、 $F_L < 1.0$ となる
⇒剛性低下を考慮した静的自重解析で、堤体沈下量を評価

3-1-13. アースダム耐性評価の事例【東京電力(株)の例】

耐震性能照査結果

①剛性低下に伴う沈下に対する安定性の検討

- ・繰返しせん断による剛性低下を考慮した静的自重解析より沈下量を算定
 ⇒沈下量が最大となるのは、 $F_L < 1.0$ となった玉石混じり砂礫層付近で約29cm
 ⇒天端沈下量は約15cmで、フリーボード(常時満水位～天端の標高差)5.13mより小さいため、越流が生じる恐れはない

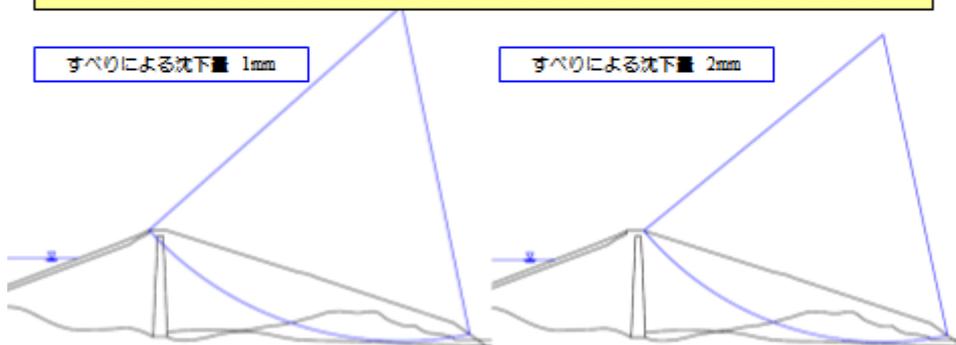


3-1-14. アースダム耐性評価の事例【東京電力(株)の例】

耐震性能照査結果

②すべり安定性・浸透破壊に対する検討

- ・すべり安定性の検討は、「渡辺・馬場法⁵⁾」により塑性変形解析を実施。
- ・中心と半径を変えて検討を行ったところ、2つの円弧で安全率<1となったが、いずれも地震中の0.01s間だけであり、これに伴う沈下も2mm以下
 ⇒大きな変形は発生せず、ダム水位以下を起点とする下流すべりも発生しない



【参考文献】

5) 渡辺啓行, 馬場幹平: フィルダムの動的挙動に基づくすべり安定評価手法の一考察, 大ダム, No.97, p29, 1981.

3-1-15. アースダム耐性評価の事例【東京電力(株)の例】

耐震性能照査結果(まとめ)

- ダムのレベル2地震動：関谷断層（最大加速度 370 gal）
- ダムの応答：天端で最大となり 823 gal
- 越流に対する照査結果
天端の最大沈下量はダムのフリーボードに対し十分に小さいことから、越流に対して安全である。
- 浸透破壊に対する照査結果
ダム水位以下を始点とする下流側すべりが発生しないことから、浸透破壊を生じる恐れはない。

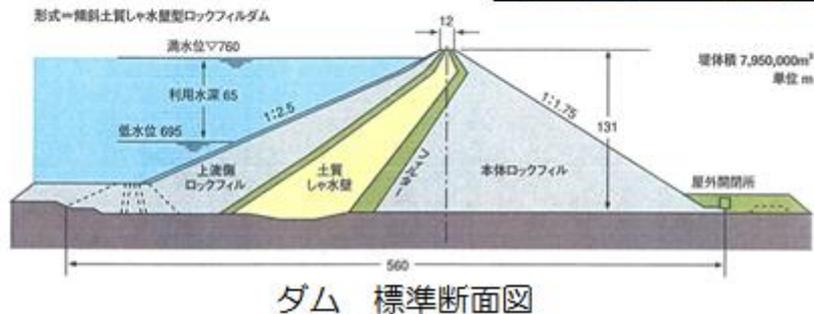


以上より、貯水機能が維持され、損傷が修復可能な範囲に留まると評価されるため、所要の耐震性能を有している

3-2-1. ロックフィルダムの耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

1. 概要

ダム型式	ロックフィルダム
竣工年	1961年(昭和36年)
ダム高/堤長	131.0m/405.0m
総貯水容量	370,000千m ³

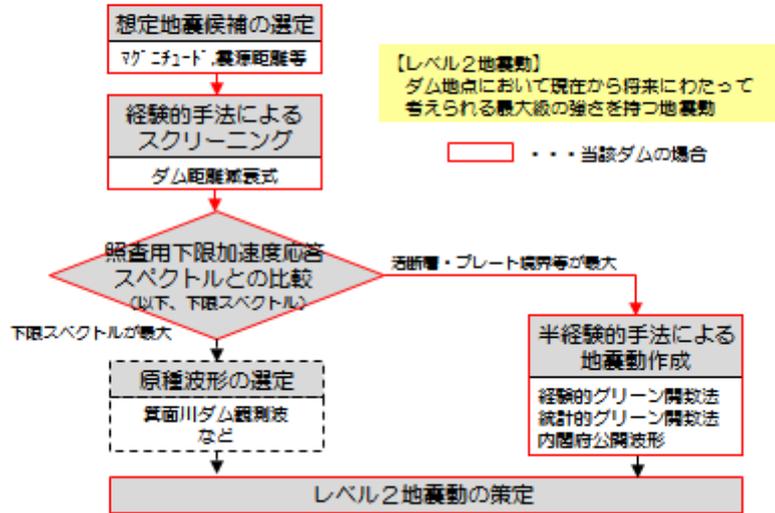


<<参考資料>>

3-2-4. ロックフィルダムへの耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

3. 照査用地震動の策定

(1) 概略フロー



© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

5

3-2-5. ロックフィルダムへの耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

3. 照査用地震動の策定

(2) 地震の選定

- 政府調査機関等による活断層情報や国交省指針(案)のダム距離減衰式を用いた評価により、当該ダムに最も影響を及ぼすのは庄川断層帯を震源とする地震であることがわかりました。
- 地震調査研究推進本部(文部科学省)の文献*によれば、庄川断層帯はダム右岸側の山腹を通過するとしており、当社の調査でも同様の結果が得られています。

*「庄川断層帯の長期評価について」、3ページ、図2



活断層名	マグニチュード	断層長さ	発生確率				平均活動間隔
			30年以内	50年以内	100年以内	300年以内	最新活動時期
庄川断層帯	7.9	67 km	ほぼ0%	ほぼ0%	ほぼ0%	ほぼ0%	約3,600~6,900年 11~16世紀

地震調査研究推進本部(文部科学省)「庄川断層帯の長期評価について」(http://www.earthquake.go.jp)より

© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

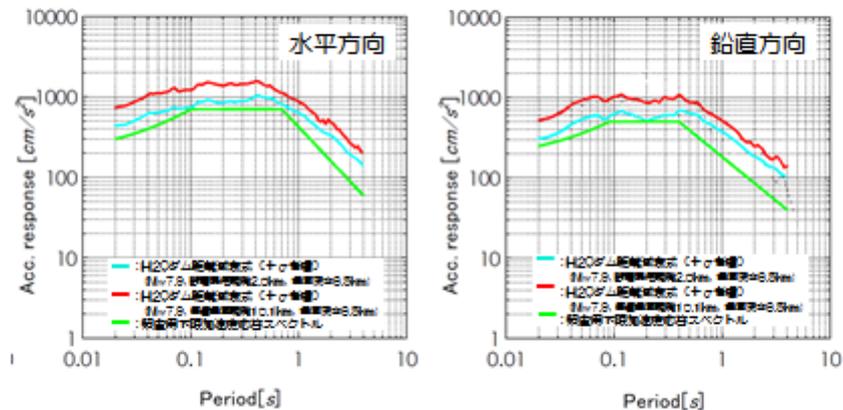
6

<<参考資料>>

3-2-6. ロックフィルダムへの耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

3. 照査用地震動の策定

(3) 経験的手法(ダム距離減衰式)によるスクリーニング



当該ダム地点の庄川断層帯を震源とする地震動は、国交省指針(案)で最低限考慮すべきとした地震動(下限A'外)を上回ることを確認しました

© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

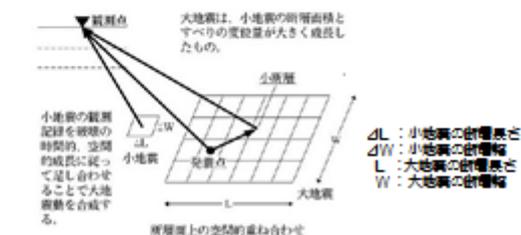
7

3-2-7. ロックフィルダムへの耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

3. 照査用地震動の策定

(4) 地震動の作成

- 当該ダム地点の庄川断層帯を震源とする地震動は、国交省指針(案)で最低限考慮すべきとした地震動(下限A'外)を上回ることを確認しました。
- 照査用レベル2地震動は、政府調査機関である地震調査研究推進本部(文部科学省)で用いられている“レシビ”に則って作成しました。
- 地震動作成は、半経験的手法の一つである経験的グリーン関数法を採用しました。



経験的グリーン関数法で用いる波形合成法の概念図
(防衛科学技術研究所：強震動の基礎、カブ社刊、2000より)



※断層の傾斜角は90度としたが、ここでは0度として図化した。

断層モデル図

© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

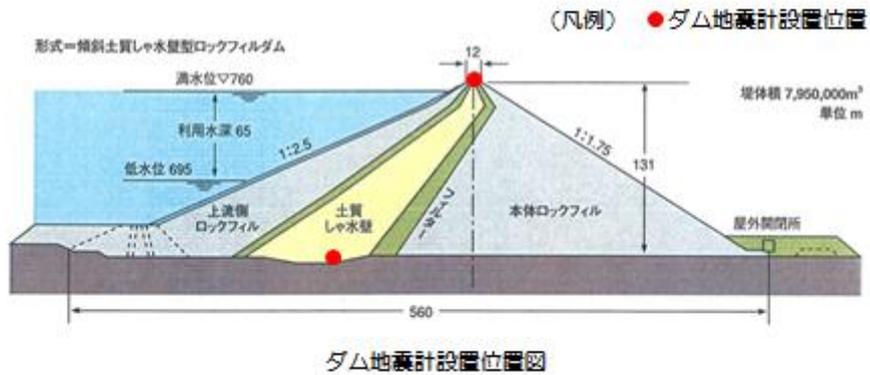
8

<<参考資料>>

3-2-8. ロックフィルダムへの耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

3. 照査用地震動の策定

(4) 地震動の作成 (半経験的手法(経験的グリーン関数)に用いた小地震記録)



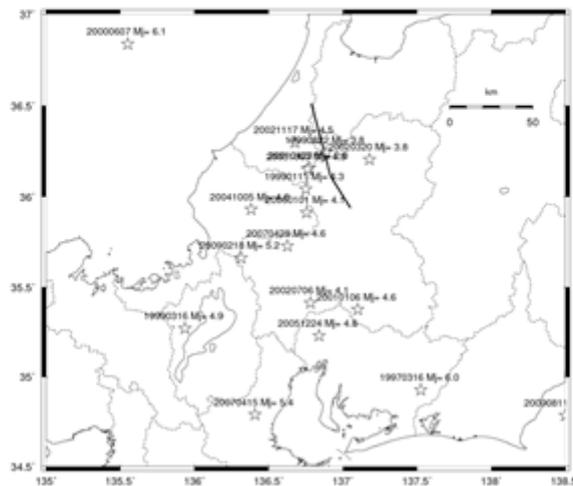
© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

9

3-2-9. ロックフィルダムへの耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

3. 照査用地震動の策定

(4) 地震動の作成 (半経験的手法(経験的グリーン関数)に用いた小地震記録)



© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

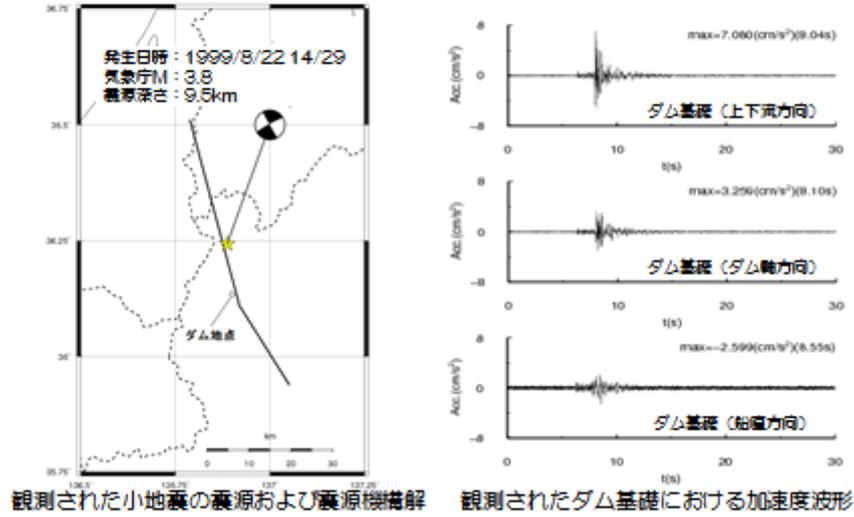
10

<<参考資料>>

3-2-10. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

3. 照査用地震動の策定

(4) 地震動の作成 (半経験的手法(経験的グリーン関数)に用いた小地震記録)



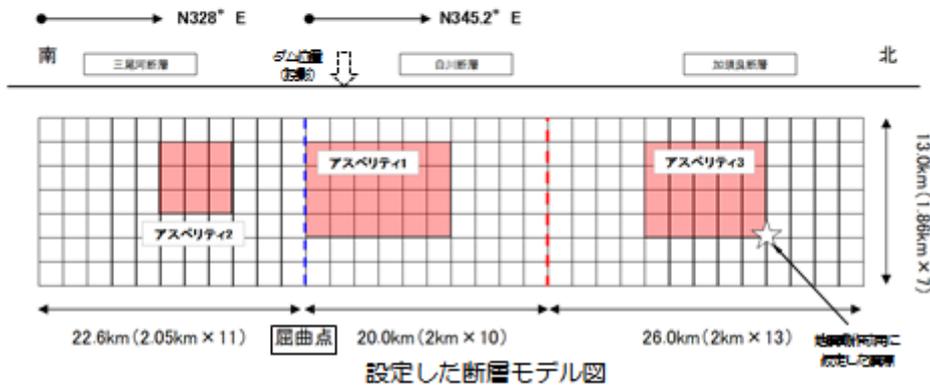
11

3-2-11. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

3. 照査用地震動の策定

(4) 地震動の作成

- 地震調査研究推進本部(文部科学省)で用いられている“レシビ”に則り、庄川断層帯をモデル化しました。
- アスペリティはできるだけダムの近くに設定し、震源は地震動が強くなるような位置に設定しました。



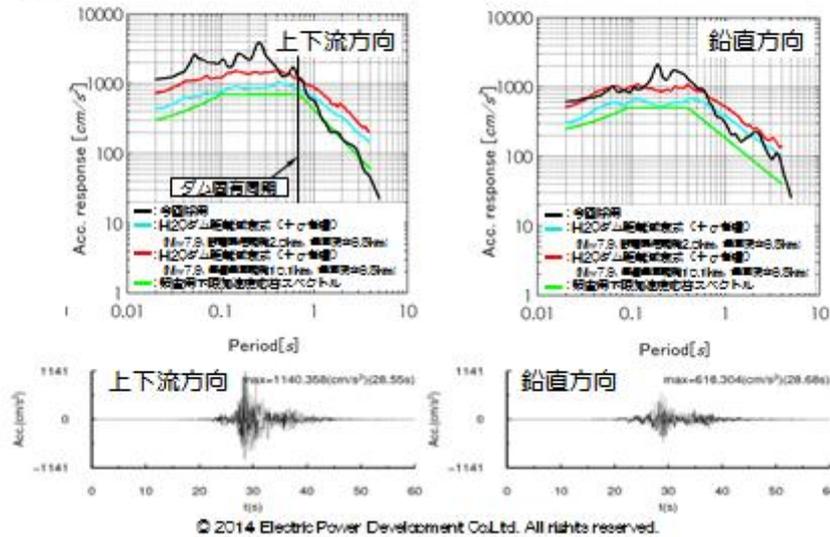
12

<<参考資料>>

3-2-12. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

3. 照査用地震動の策定

(5) 照査用レベル2地震動



13

3-2-13. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

4. 地震応答解析(国交省指針(案)の照査項目)

- ✓ **ダムの要求性能** (国交省指針(案)「1.5耐震性能」より)
 - ①貯水機能が維持されること(制御できない貯水の流出を認めない)
 - ②損傷が修復可能な範囲にとどまること

- ✓ **耐震性能照査の項目** (国交省指針(案)「3.3フィルダム本体の耐震性能の照査」より)

1. 等価線形化法等による動的解析を行い、その結果、地震時にすべり破壊が生じないと判断される場合は、ダム本体の損傷が生じるおそれはないため、所要の耐震性能は確保されるとしてよい。
2. 上記1.における等価線形化法等による動的解析の結果、ダム本体の損傷が生じるおそれがある場合には、さらに1.による解析結果を用いた塑性変形解析により、地震によるすべり等の変形を推定する。その結果、変形に伴う沈下が貯水の越流を生じるおそれがないほどに小さく、かつ地震後において浸透破壊を生じるおそれがない場合には、ダムの貯水機能は維持されるとしてよく、かつ修復可能な範囲にとどまる場合には、所要の耐震性能は確保されるとしてよい。

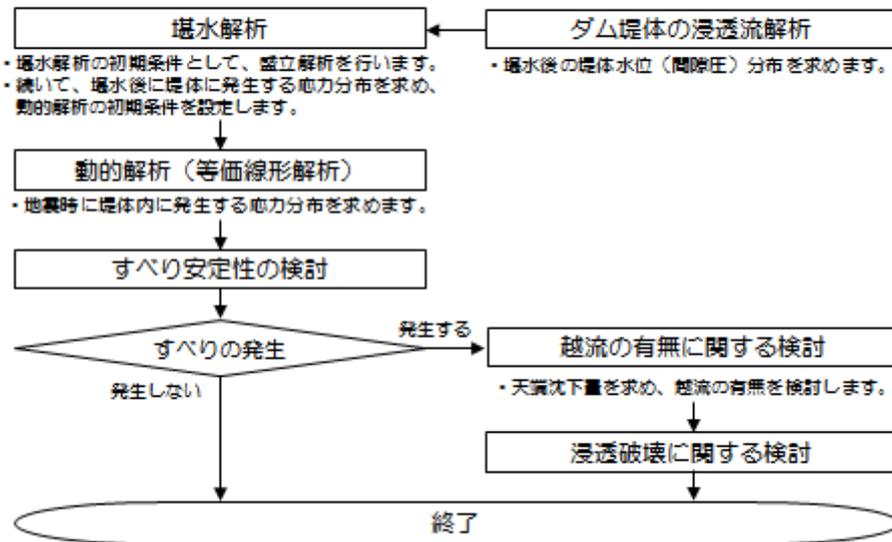
© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

14

<<参考資料>>

3-2-14. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

4. 地震応答解析(解析フロー)



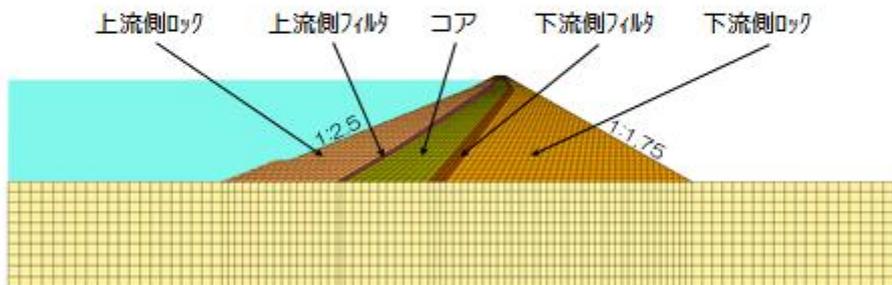
© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

15

3-2-15. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

4. 地震応答解析(解析モデル)

- 解析モデルは、基礎～ダム～貯水の2次元連成モデルとしました。
- 地震応答解析は、常時満水位を対象とした等価線形解析により行いました。



ダム解析モデル図

© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

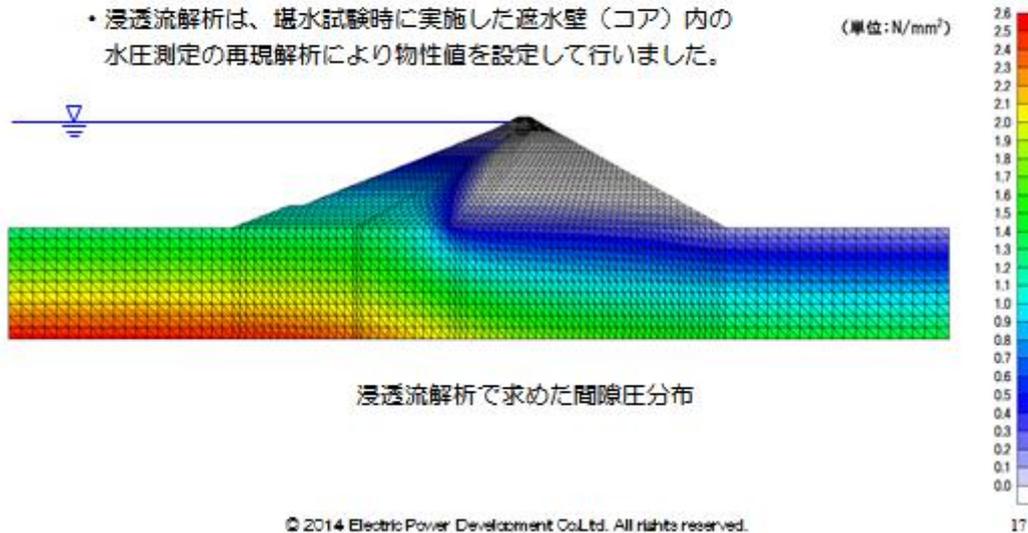
16

<<参考資料>>

3-2-16. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

4. 地震応答解析(浸透流解析)

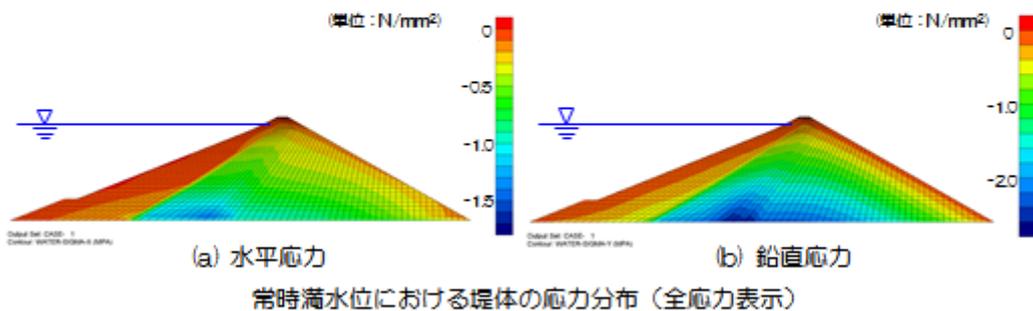
- 浸透流解析は、堰水試験時に実施した遮水壁(コア)内の水圧測定の結果を再現解析により物性値を設定して行いました。



3-2-17. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

4. 地震応答解析(湛水解析)

- 物性値は、工事記録や下記参考文献1)を参考に設定し、常時満水位を対象とした盛立解析および湛水解析を行いました。



【参考文献】

- 1) 原田次夫、松井家幸：ロックフィルダムの盛立中およびたん水後の挙動、護岸一土と基礎に関する構造物の挙動、電力中央研究所、1977.05

<<参考資料>>

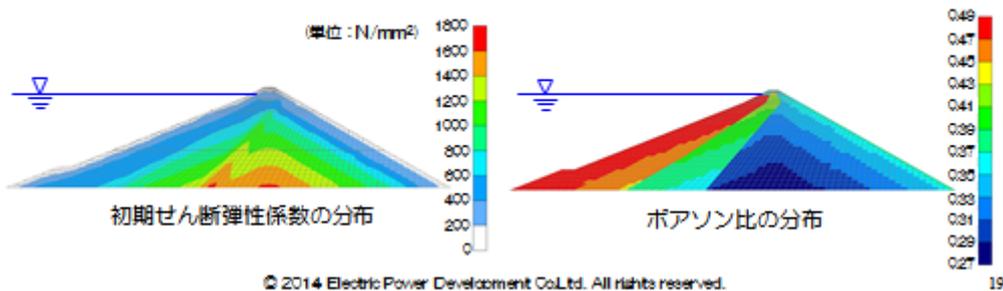
3-2-18. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

4. 地震応答解析

(動的解析(等価線形解析)に用いた物性値 その①)

- 初期せん断弾性係数、ポアソン比、基準ひずみ、最大減衰定数等の物性値は、下記参考文献②～⑤)を参考に設定しました。

材料	ロック	フィルタ	コア
初期せん断弾性係数	参考文献②)で求まるVsから要素毎に設定		
ポアソン比	参考文献②)を基に要素毎に設定		
基準ひずみ	1.56×10^{-3} *1)	1.00×10^{-3} *2)	5.00×10^{-4} *3)
最大減衰定数	23% *1)	30% *2)	23% *3)
備考	*1) 文献③)による	*2) 文献④)による	*3) 文献⑤)による



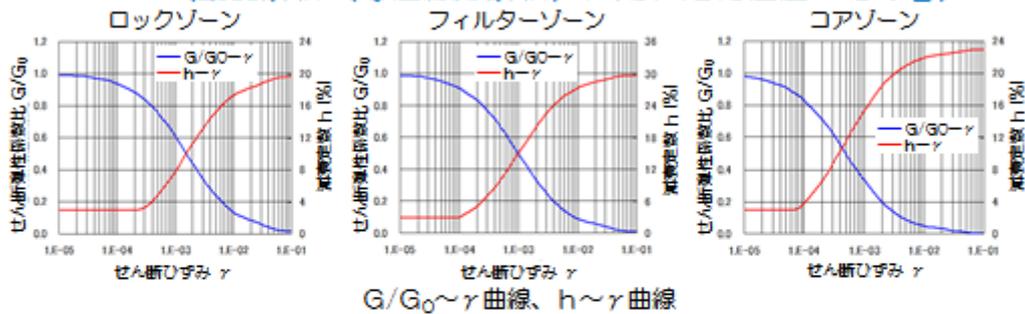
© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

19

3-2-19. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

4. 地震応答解析

(動的解析(等価線形解析)に用いた物性値 その②)



- なお、物性値の妥当性は、固有値解析と岡本式⁶⁾との比較により確認しました。
(※ダムの1次固有周期：固有値解析0.67秒、岡本式0.66秒)

【参考文献】

- Sawada, Y. and F.E. Takahashi : Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dams. 第4回日本地震工学シンポジウム講演集, 696-702, 1975
- Baba, K., Watanabe, H. : On a Consideration for an Earthquake-resistant Design Method for Rockfill Dams. 13th Congress on Large Dams, New Delhi, Q51, P15, 1979
- 上村洋吾, 大本家正, 安貴寺学 : 短周期成分の卓越する地震動におけるロックフィルダムの挙動解析例, 土と基礎, 34-8(343), pp27-33, 1986
- 安田正幸, 袴方徳英, 嶋田光明 : 振動三軸試験によるコア材の動的変形特性, 第14回土質工学研究発表会, 1980
- 岡本英三 : 耐震工学, オーム社, 1971

© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

20

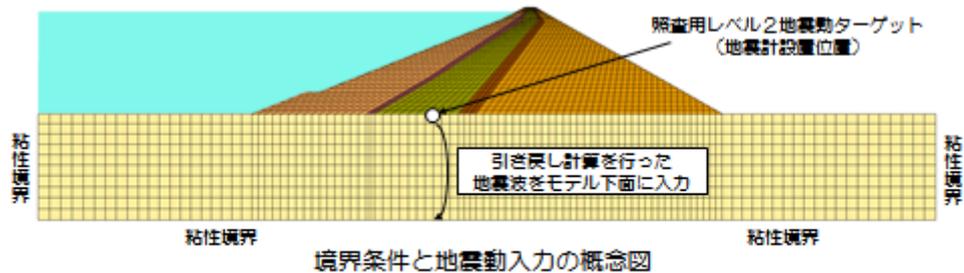
<<参考資料>>

3-2-20. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

4. 地震応答解析

(解析モデルの境界条件と地震動の入力方法)

- 解析モデルの境界条件は、ダム基礎岩盤の下方、側方とも、下記参考文献7)に基づく、粘性境界としました。
- 照査用レベル2地震動は、ダム監査廊の地震記録から半経験的手法(経験的グリーン関数法)で求めたことから、E+F波として扱い、下記解析モデルで引き戻し計算を行った波を、モデル最下面に入力しました。



【参考文献】
7) 三浦博紀、沖中宏志：反復仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物-地盤系の動的解析手法、土木学会論文、第404巻/1-11、395-404、1989

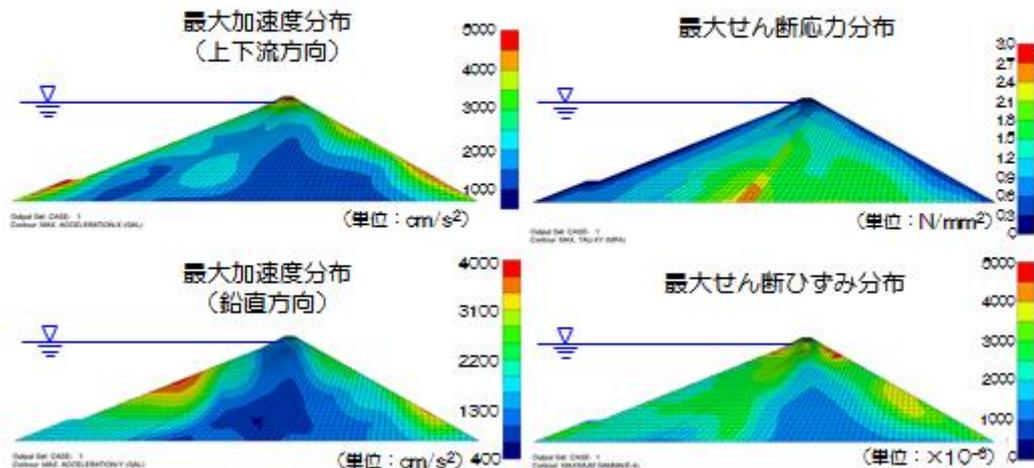
© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

21

3-2-21. ロックフィルダム耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

4. 地震応答解析

(動的解析(等価線形解析)の結果)



(注) 上記は、全加振時間における要素毎の最大値のコンター表示

© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

22

<<参考資料>>

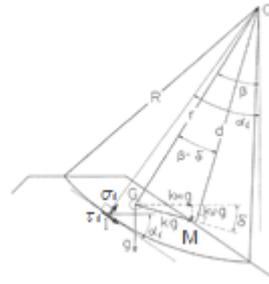
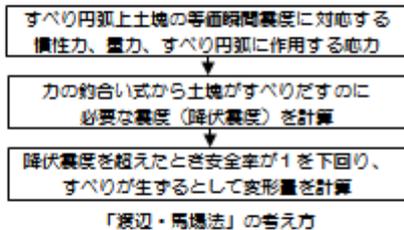
3-2-22. ロックフィルダム の耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

5. 耐震性能照査

(1) 照査の方法

① 越流の有無に関する検討 (すべり安定性の検討)

- ・ 検討は、参考文献8)に示されている「渡辺・馬場法」⁹⁾を用いて行いました。



R: 滑り円弧の半径
 O: 滑り円弧上土地の重心点と円弧中心点を結ぶ直線の距離
 M: 土地の質量
 P: 上記Oの直線が鉛直線とすす角
 k_h, k_v : 地盤動揺度の水平、鉛直成分
 S: 等価瞬間震度の全震度
 S: Sが水平とすす角(=180°- k_v/k_h)
 R: 円弧中心から4の作用線への距離
 r_1, r_2 : 震度Sにおける動的応力と地盤応答力の中心力の円弧距離、直線成分

【地質特性】	※建設時の実績値
○粘着力	コア: 0.028 N/mm ²
○内部摩擦角	コア・フィルタ: 35° ロック: 38.5°

② 浸透破壊に関する検討

- ・ すべり線沿いの浸透破壊に関する検討は、参考文献10)に示されているJustinの提唱式を用いて行いました。

【参考文献】

- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 大規模地震に対するダム の耐震性能照査に関する資料、国研研資料第244号、2005
 9) (財)電力中央研究所: フィルダムの動的解析に基づくすべり安定評価手法の一考察、電力中央研究所報告、昭和56年12月
 10) 日本ダム会誌: 第二次改訂ダム設計基準、1977

© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

23

3-2-23. ロックフィルダム の耐性評価の事例【電源開発(株)の例】

5. 耐震性能照査

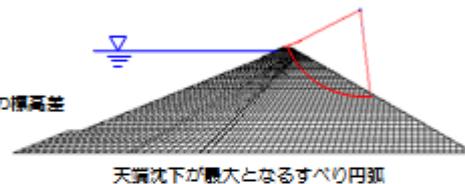
(2) 検討結果

① 越流の有無に関する検討結果 (すべり安定性の検討結果)

予想される天端沈下量 1.37m < 常時満水位～天端の標高差 6.00m

② 浸透破壊に関する検討結果

浸透流速 0.00064 (cm/sec) < 限界流速 (土粒子径: 0.001mmの場合) 0.32 (cm/sec)



(3) 照査結果

大規模地震(レベル2地震動)に対する当該ダムの耐震性能照査を行ったところ、以下に示すとおり所定の耐震性能を有していることを確認しました。

- ①ダム本体は若干の変形(沈下)を伴うものの、地震後のダム天端標高は常時満水位より十分高く、越流は生じないこと。
- ②すべり線沿いに浸み込む貯水(浸透流)により、堤体材料が流出しないこと。

© 2014 Electric Power Development Co.Ltd. All rights reserved.

24

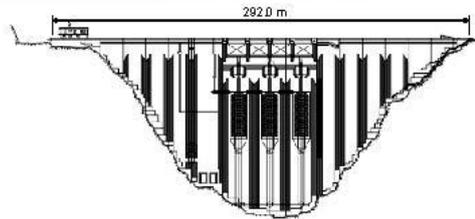
<<参考資料>>

3-3-1. コンクリート中空重力ダムの耐性評価の事例【中部電力(株)の例】

対象ダムの概要



ダム全景

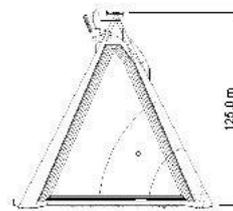


ダム上流面図



ダム諸元

河川名	大井川水系大井川
型式	中空重力式コンクリートダム
堤高	125.0m
堤頂長	292.0m
竣工年	1962年



ダム断面図

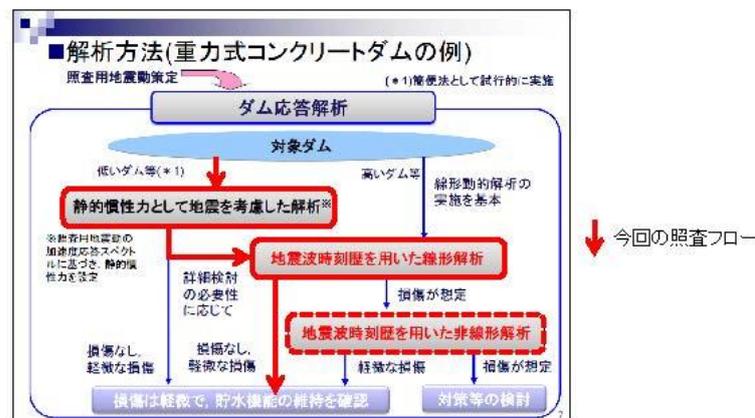
©2014 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved. 1

3-3-2. コンクリート中空重力ダムの耐性評価の事例【中部電力(株)の例】

耐震性能照査の進め方



- ▶ 対象ダムの耐震性能照査にあたっては、静的慣性力として地震を考慮した解析(静的解析)を実施する。(簡便法として試行的に実施)
- ▶ 静的解析による裕度が小さい場合、地震波時刻歴を用いた線形解析・非線形解析(動的解析)を実施する。



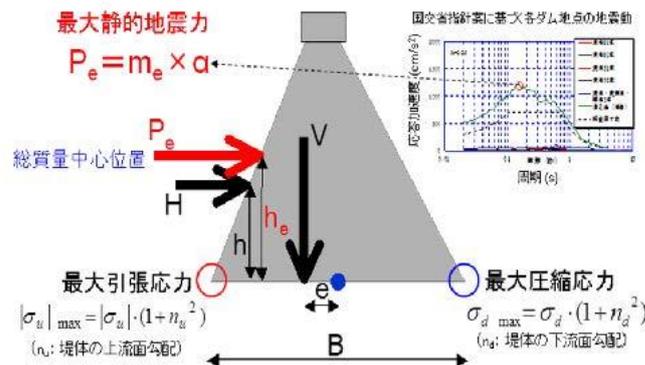
<<参考資料>>

3-3-3. コンクリート中空重力ダムの耐性評価の事例【中部電力(株)の例】

静的解析について



- ▶ 静的解析では、ダムの形状等の諸元をモデル化した剛体計算を行い、ダム堤体に発生する内部応力(引張応力・圧縮応力)に対する照査を行う。
- ▶ 対象ダムの固有周期に関する情報を得られていないため、静的地震力には、レベル2地震動による加速度応答スペクトルの最大値を用いる。



©2014 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved. 3

3-3-4. コンクリート中空重力ダムの耐性評価の事例【中部電力(株)の例】

地震力の設定(1)



- ▶ 対象ダムのレベル2地震動の設定にあたっては、下記①～③を考慮する。
 - ①プレート境界地震(中央防災会議による地震動)
想定東海地震、想定東海・東南海・南海地震
 - ②内陸活断層(国交省指針案の距離減衰式に基づき算定した地震動)
中央構造線赤石山地西縁断層帯、畑薙山断層、富士川河口断層帯、他
 - ③照査用下限加速度応答スペクトル(国交省指針案)
- ▶ 上記について、ダム基礎位置($V_s=1400\text{m/s}$)における加速度応答スペクトル(水平動)を算定し、その最大値を静的地震力(水平震度)として設定する。
- ▶ プレート境界地震については、中央防災会議から公開されている工学的基盤波を用いて算定したダム基礎位置での加速度応答スペクトルを用いる。また、内陸活断層については、国交省の距離減衰式(H20式)、回帰係数、地震タイプ別補正係数(標準+ σ)を用いて算定した加速度応答スペクトルを用いる。

©2014 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved. 4

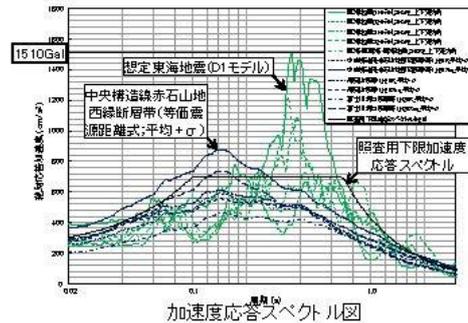
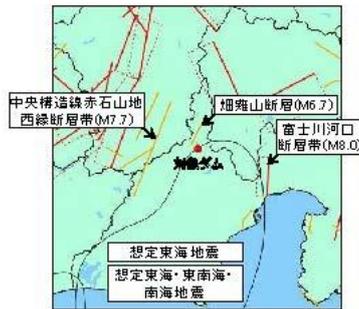
<<参考資料>>

3-3-5. コンクリート中空重力ダムの耐性評価の事例【中部電力(株)の例】

地震力の設定(2)



- 対象ダムでは、ダム基礎位置における加速度応答スペクトルのうち、想定東海地震(D1モデル)による加速度応答スペクトルの最大値(1510Gal)を静的地震力として設定する。



©2014 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved. 5

3-3-6. コンクリート中空重力ダムの耐性評価の事例【中部電力(株)の例】

解析条件(静的解析)



- 諸定数の設定

コンクリート強度

- 建設時の記録が残っている場合には、建設時の記録を用いる。
- 建設年代が古く、建設時の記録が残っていない場合は、同年代のダムの記録を参照する。(必要に応じて現地コア試験を行う。)
- ⇒今回の事例では、建設時の品質管理試験結果に基づき設定する。

コンクリート	圧縮強度	48.5N/mm ²	建設時の品質管理試験結果に基づく強度に地震時の割り増し(×1.3)を考慮した値
	引張強度	4.8N/mm ²	圧縮強度(地震時の割り増し考慮)の1/10

荷重

- 常時荷重 : 自重, 機器荷重, 静水圧, 泥圧および揚圧力を考慮する。(貯水位はHWL, 堆砂面はLWLに設定する。)
- 地震時荷重: 慣性力および動水圧を考慮する。(動水圧はWestergaardの式を用いて算定する。)



- 照査基準

- 堤体コンクリートに発生する応力(引張・圧縮)が、堤体コンクリートの強度を十分下回ることを確認する。
- 静的解析による裕度が小さい※場合、動的解析による詳細検討を実施する。(※静的解析と動的解析の両方を実施した複数のダムの解析結果から発生応力を比較し裕度の目安を設定している。)

©2014 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved. 6

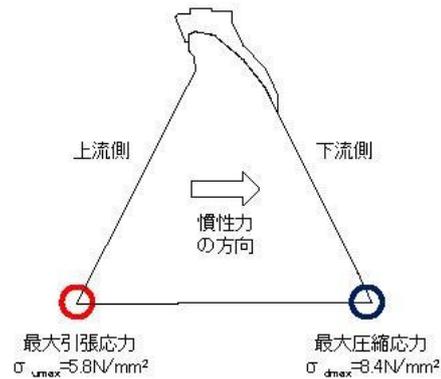
<<参考資料>>

3-3-7. コンクリート中空重力ダムの耐性評価の事例【中部電力(株)の例】

静的解析による照査結果



- 静的解析の結果、対象ダムでは、堤体コンクリートに発生する引張応力に対する裕度が小さいことから、動的解析による詳細検討を実施する。



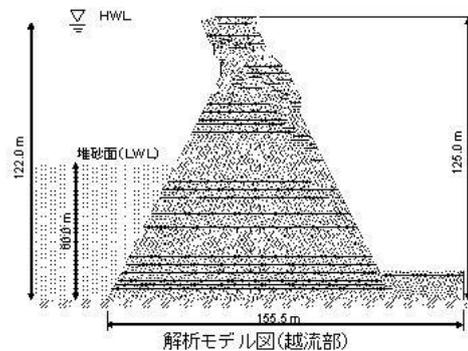
©2014 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved. 7

3-3-8. コンクリート中空重力ダムの耐性評価の事例【中部電力(株)の例】

動的解析について



- 対象ダムの動的解析では、ダム堤体(越流部・非越流部)をモデル化した二次元FEM解析(線形解析)を行い、ダム堤体に発生する応力に対する照査を行う。
- 線形解析によってダム堤体に引張クラックが発生する場合には、二次元FEM解析(非線形解析)による詳細検討を行う。



©2014 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved. 8

<<参考資料>>