

令和元年度土木学会功績賞 受賞講演

# 直下地震工学序説(第3話)

2021年2月3日(地震工学委員会)

東京工業大学 名誉教授

大 町 達 夫

# 令和元年度(2019年度) **土木学会功績賞**

**功績賞**は「本会会員であって、土木工学の進歩、土木事業の発達、土木学会の運営に顕著な貢献をなしたと認められたもの」に授与

## **授賞理由など**

推薦者：地震工学委員会委員長  
(表彰理由の要約)

強震記録が極めて限定的であった直下地震の震源近傍における地震動強さを物体の跳躍現象等から定量化し、1995年阪神淡路大震災後はレベル2(L2)地震動の概念や定義、設定方法等の明確化に尽力、土木学会提言の取りまとめに貢献した。

# 自己紹介(大町達夫)

- 1945年8月 広島生れ(10歳まで広島)
- 1969年5月 東京大学土木工学科卒業  
博論「ロックフィルダムの地震時の安定に関する基礎的研究」
- 1974年4月 電源開発株式会社入社  
業務内容:ダムの設計施工、JICA技術協力、環境影響評価等
- 1979年7月 東京工業大学 助教授  
所属:大学院総合理工学研究科 社会開発工学専攻(地震工学講座)
- 1987年7月 同上 教授
- 1995年1月 兵庫県南部地震以降は土木学会提言の取りまとめに従事
- 2010年7月 (財)ダム技術センター(JDEC)理事長(兼業、非常勤)
- 2011年3月 東京工業大学 定年退職、4月JDEC理事長(常勤)
- 退職記念講演(3/5/2011)「直下地震工学の提唱と推進」
- 2013年11月 土木学会地震工学委 地震防災技術普及小委  
講演「直下地震工学序説」(直下地震の特徴/課題、物体の跳躍等)
- 2016年5月 土木学会原子力土木委員会  
講演「直下地震工学序説(第2話)」(ダムと断層変位の事例、動的津波解析等)
- 2021年2月 土木学会地震工学委員会  
講演「直下地震工学序説(第3話)」(L2地震動、ダムの耐震性能等)

# 1995年阪神淡路大震災前の状況(1)

## 1) 土木学会耐震工学委員会(現 地震工学委員会の前身)

耐震工学委員会「動的解析とその適用に関する研究小委員会」(片山委員長)での議論(1985年7月) \* 「動的解析と耐震設計」(1989年6月)「序」から

- ・動的解析の結果の信頼性はどれくらいあるのか
- ・震度法による設計と動的解析はどんな関係にあるのか
- ・構造物別ではなく、一般的に土木構造物を対象とした耐震規定は考えられるか
- ・震度法は簡略計算、動的解析は精密計算と考えてよいのか、など

### その他FAQ

- ・設計震度(例えば0.2)はどのような設計地震動に相当するのか(例えば、最大加速度では?)  
=>設計震度は入力地震動か地震応答か、あいまい

耐震工学委員会「地震荷重小委員会」(伯野委員長)1992年6月設置

- ・4つの分科会構成、第2分科会は「極限地震動の評価」主査
- ・強大な強震記録が乏しく手探り状態、1994年1月ノースリッジ地震合同調査団

## 2) 建築分野

ビルディングレター(86年版) (= > 1996年5月に見直し)

- ・高層建築物(>60m)を対象
- ・L1とL2を導入
- ・複数の標準的波形を例示



# 1995年阪神淡路大震災前の状況(2)

## 1984年長野県西部地震(M6.8)



図 導水路トンネルの被害箇所と余震分布 (気象庁による)



- ・木曾の御嶽山の8合目付近で大規模な山崩れ
- ・震央付近で地上の石や倒木が飛んだ



# 1984年長野県西部地震 (M6.8)の震源域における 半埋没石の跳躍例

場所：震源直上の尾根部

石の寸法：直径1m弱

飛距離：約3m

状況証拠：

- 1) 地表に、石と同じ大きさの穴。
- 2) その穴と石の脇の灌木にすり傷。
- 3) 地表に、滑動の痕跡がない。

## 石の跳躍の特徴

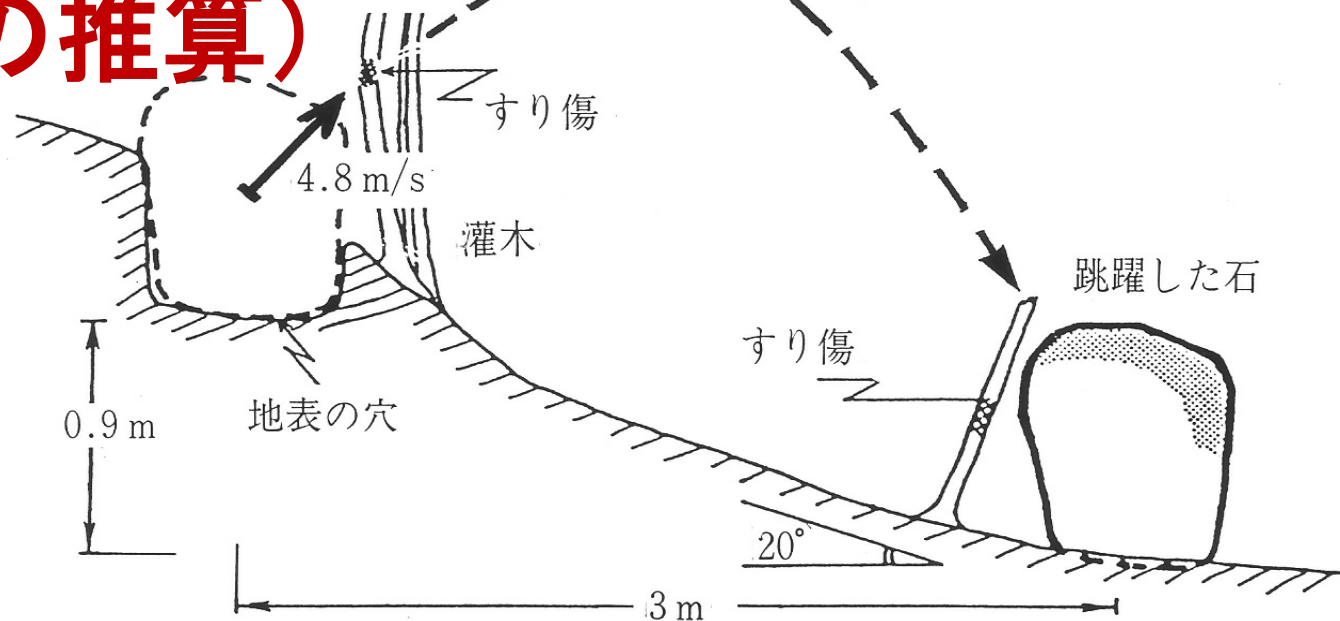
全般に、

- 4) 反転、非反転がさまざま。
- 5) 飛距離も、一定しない。
- 6) 飛ぶ方向は、ほぼ一定。

(梅田ら、1985)



# 半埋没石の跳躍 考察例 (PGAの推算)



(考察)

1) 初速度 $V=4.8\text{m/s}$ を、水平方向( $V_x$ )と鉛直方向( $V_z$ )に分解する。

$$V_x=3.4\text{m/s}、V_z=3.4\text{m/s}$$

2) 地面の水平方向と鉛直方向の動き(速度 $v$ )を正弦波形で近似する。

$$v=3.4 \times \sin(2\pi f)t \quad (\text{m/s})$$

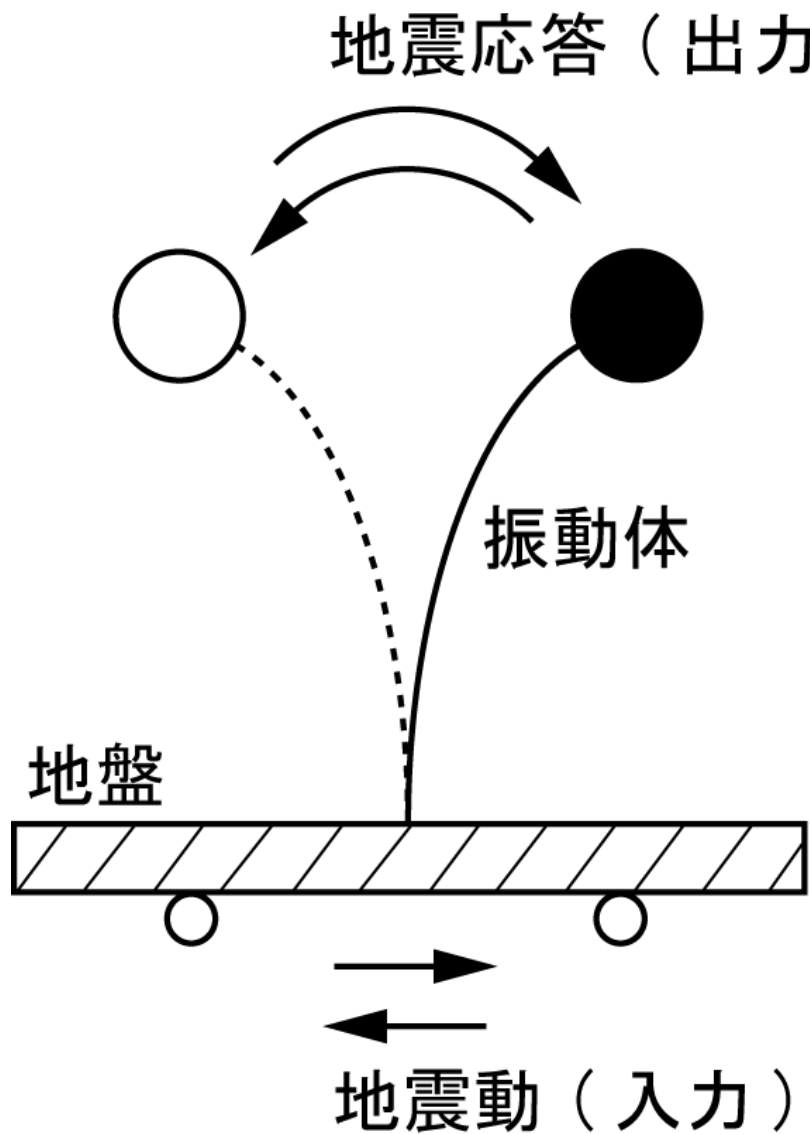
3) 加速度は、速度の微分だから、次のようになる。

$$a=3.4 \times 2\pi f \times \cos(2\pi f)t = A_0 \times \cos(2\pi f)t \quad (\text{m/s}^2)$$

4) 加速度振幅 $A_0$ の試算結果(**Gは重力加速度**)

f: 1Hzのとき      5Hzのとき      10Hzのとき

$A_0$ :  $21\text{m/s}^2 (=2.1\text{G})$     $107\text{m/s}^2 (=11\text{G})$     $214\text{m/s}^2 (=21\text{G})$



N.M.ニューマーク(1973)

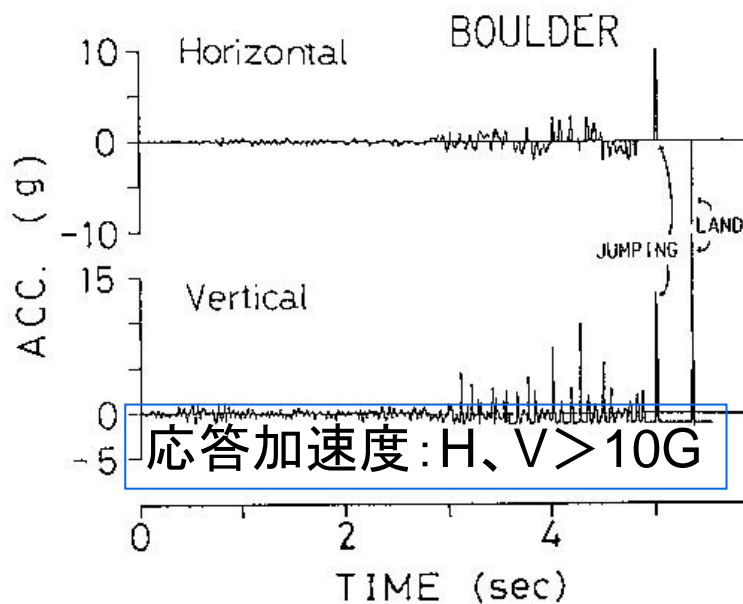
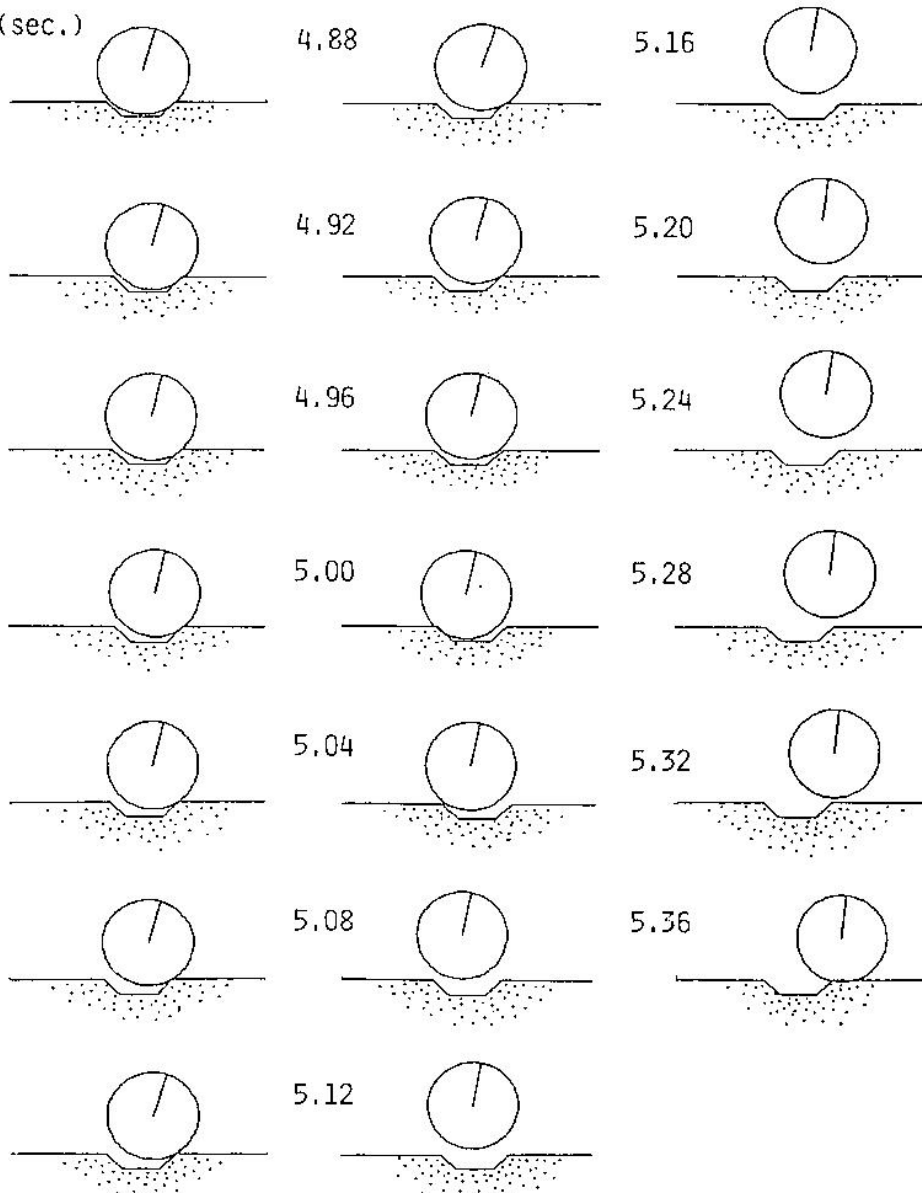
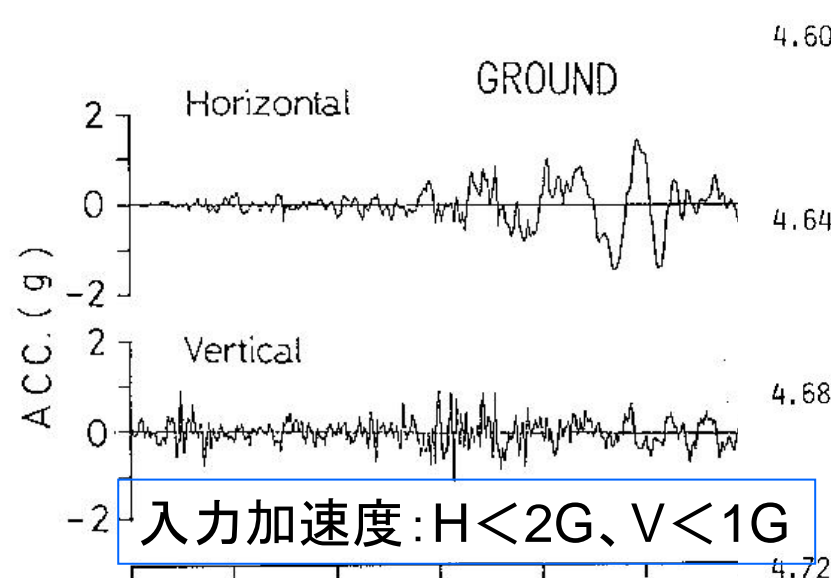
「地震による物体の跳躍は、物体と地盤とで構成される振動系の地震応答加速度が1Gを上回れば生じるので、必ずしも地震動の鉛直加速度が1Gを上回った証拠にならない。……」

**跳躍は地震応答！**

cf. BSSA(1992)82-1

**入力地震動と地震応答の違い**





鉛直応答加速度波形

の特徴にも注目！

石の跳躍数値シミュレーション

# 直下地震による鐘楼の跳躍



1909年姉川地震(M6.8)で倒壊した称名寺本堂と跳んだ鐘楼

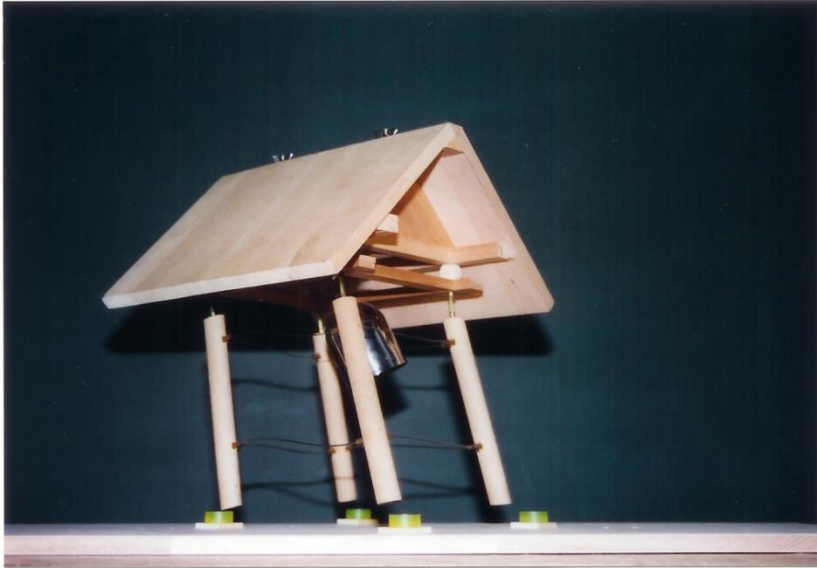
## 鐘楼模型実験からの知見

1. 鐘楼は水平動だけでも跳ぶ。
2. 強烈な地震動が急激に対角線方向へ作用すると跳びやすい。
3. 跳ぶ前に、後ろへ大きくのけぞり、後ろ足で全重量を支える。
4. 柱と梁の枠組みはパンタグラフのように大きく変形する。
5. 変形の反動により、4つ足動物のように後ろ足で地面を蹴って飛ぶ。
6. 後ろ足から着地することが多い。

## 物体の跳躍から、わかること

7. 上下動が1Gを越えたとはいえない。
8. 突然、非常に強い揺れが襲う。
9. 物体が跳躍した方向に強い揺れ。

cf.EESD(1997)vol.26.



(a)



(b)



# 魚雷の擦痕から推定された 1930年北伊豆地震の震源域での強震動特性

土学論No.507/I-30

219-229、1995.1

## 北伊豆地震

1930年11月26日

M7.3、 $d=0.5\text{km}$

左横ずれ断層

工事中の丹那トンネルで  
南北2.4mの食い違い

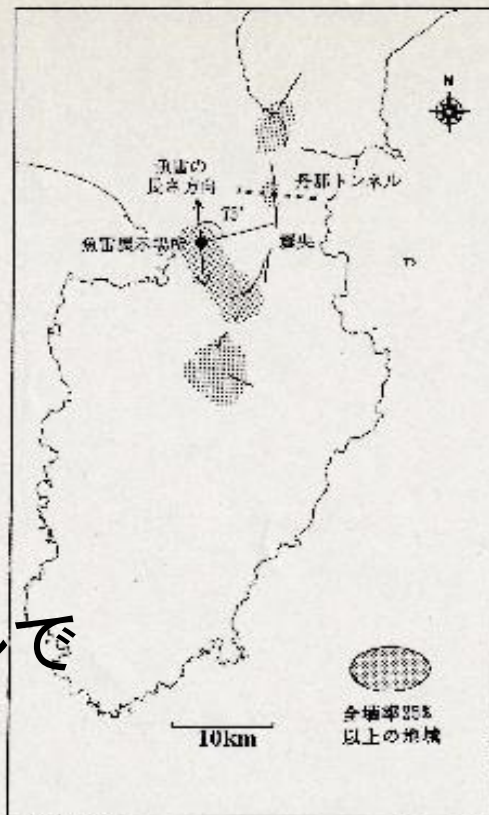


図1 北伊豆地震の震源域地図

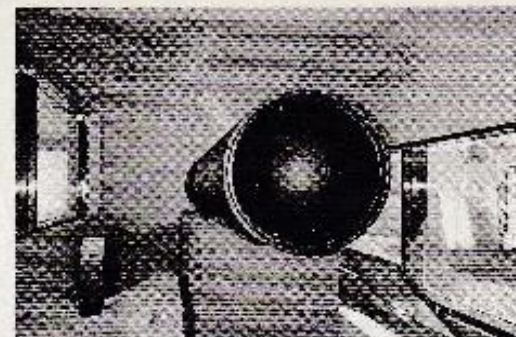


写真1 現在展示されている魚雷は地震時に魚雷庫の破損していた  
首尾(左首の右下)

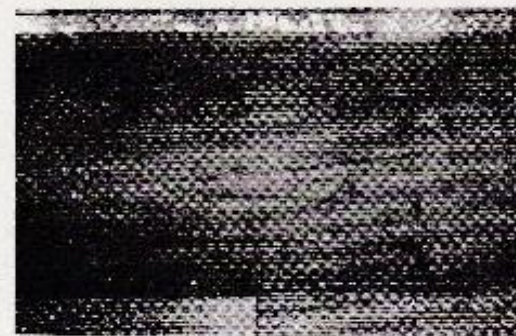


図2 展示されている魚雷の尾翼

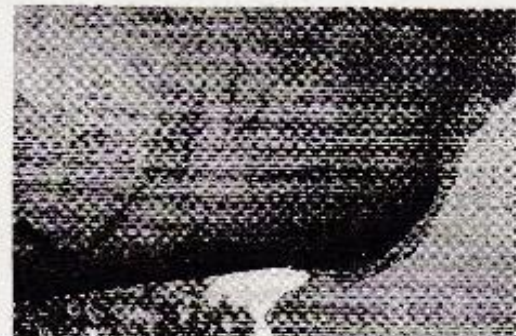


図3 魚雷庫の破損  
写真2 魚雷の破損

## 展示魚雷(天然記念物)

震央から西へ7.5km、

旧江間小学校校庭

頭部、気室、機関室

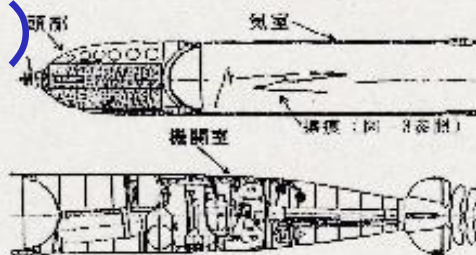


図2 魚雷の全体図

(2) 魚雷に搭載された機関

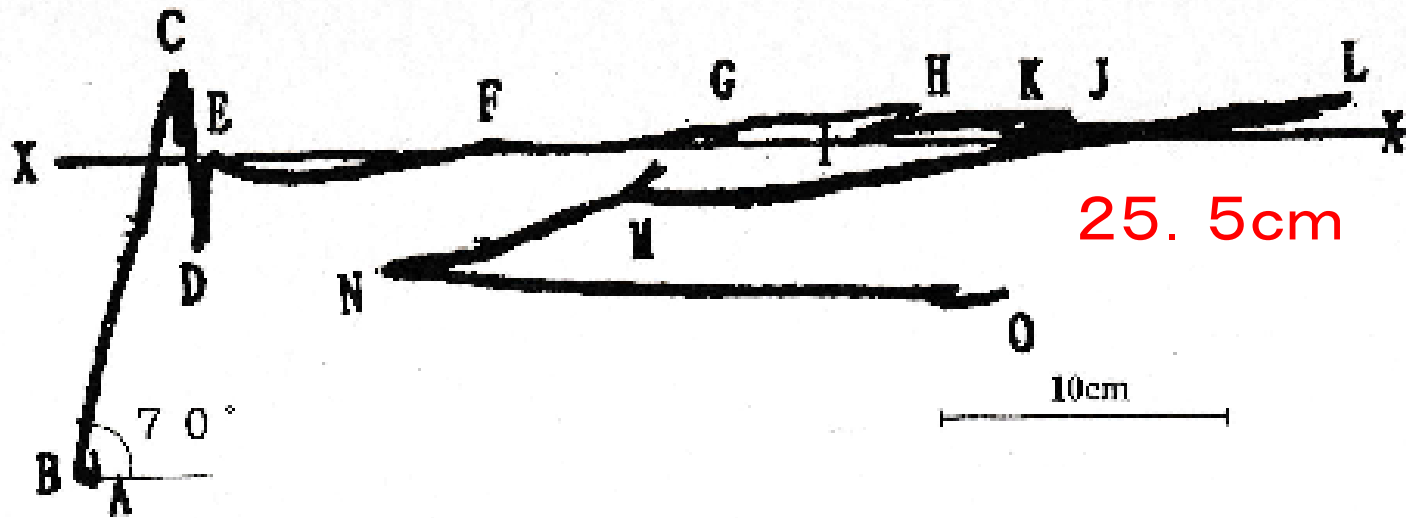
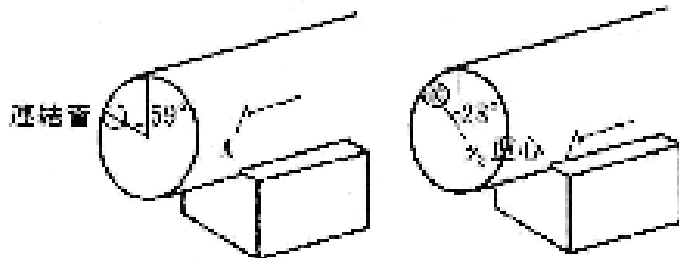


図-3 魚軍用機された模型

表-1 区間ごとの線長の長さ (図-3 参照)

単位: cm			
A→B	1.0	E→F	10.5
B→C	15.0	F→G	8.5
C→D	6.0	G→H	7.0
D→E	3.5	H→I	2.0
I→J	8.0	J→K	2.5
K→L	12.5	L→M	25.5
M→N	9.5	N→O	22.0



(a)現在の展示状況

(b)地震前の展示状況

図-4 魚軍の展示状況

## 模型振動実験や数値解析から 主要動の特性を推定

ピーク速度(Pv)1.2~1.7m/s

ピーク加速度(Pa)1.3~2.0g

継続時間 約10秒のうちに

Pv>0.7m/s、Pa>0.8gが

少なくとも 8回出現





高速道路 地下鉄

# 1995年 阪神淡路大震災での被害例

木造家屋 鉄筋コンクリートビル





# 1995年阪神淡路大震災後の状況

- 1995年1月17日未明 兵庫県南部地震(M7.2)発生
- 同年3月 土木学会「耐震基準等基本問題検討会議」設置、委員議論の概要

## 1. 目的:耐震設計の今後の基本方針を検討

兵庫県南部地震のような直下地震は、極めてまれに起こる特殊な地震ではないと評価、活断層に起因する内陸直下地震を耐震設計の対象に含めることとした。各種構造物の共通事項を重点的に議論

## 2. 同年 5月 土木構造物の耐震基準等に関する提言(第一次提言)

- 骨子1) 構造物の耐震性能はL1とL2の2段階の地震動強さで照査
- 2) 構造物の性能は重要度(人命や経済への影響等)を考慮
- 3) 現行の耐震基準の見直し
- 4) 既存構造物に必要な耐震補強を実施
- 5) 上記に必要な研究開発を促進

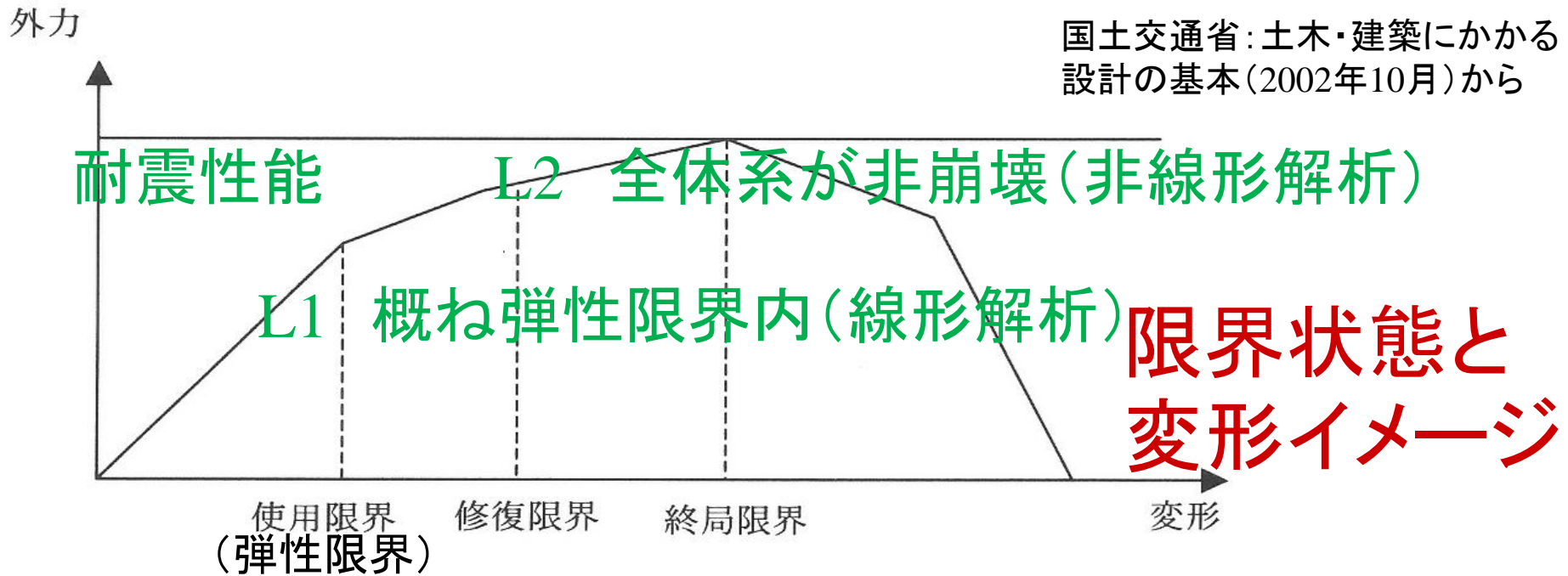
→地震動、耐震設計等4分科会を設置し検討継続、全体調整幹事

# 土木学会提言のレベル2地震動について(1)

•第1次提言(1995年5月)耐震基準等基本問題検討会議

1) 構造物の耐震性能はレベル1(L1)とレベル2(L2)の2段階の地震動に対して照査する => 多段階設計、性能設計、限界状態設計の導入

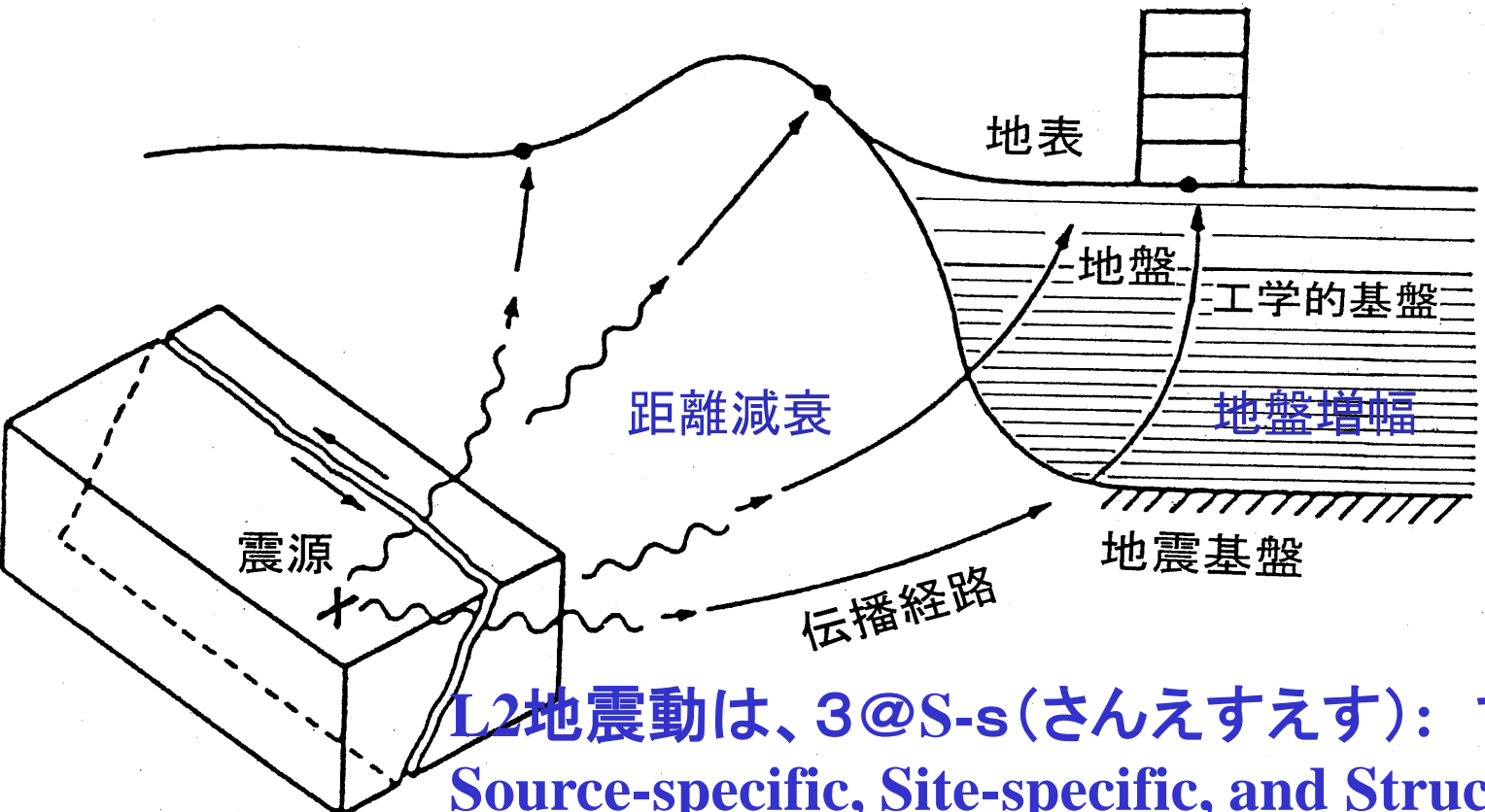
2) レベル2地震動は、直下地震による地震動のように、供用期間中の発生確率は低いが極めて強い地震動 => レベルは、強さ/頻度?



# 土木学会提言のレベル2地震動について(2)

## 第2次提言(1996年1月)耐震基準等基本問題検討会議

- 1)レベル2地震動は脅威となる活断層を同定しその破壊過程を想定して評価する => 断層破壊過程、地盤構造など不明では？
- 2)評価手法は経験的、半経験的、理論的の3種類、入倉レシピ、DB等



L2地震動は、3@S-s(さんえすえす): すなわち、  
Source-specific, Site-specific, and Structure-specific



# 土木学会提言のレベル2地震動について(3)

## 第3次提言(2000年6月)土木建造物の・・・特別委員会

1) レベル2(L2)地震動とは、当該地点で考えられる最大級の強さをもつ設計用入力地震動である。=>発生確率ぬきの最大級強さ

2) M6.5程度の直下地震に配慮することとし、これによる地震動をL2地震動の下限とする。=>伏在断層による地震は予測不可能

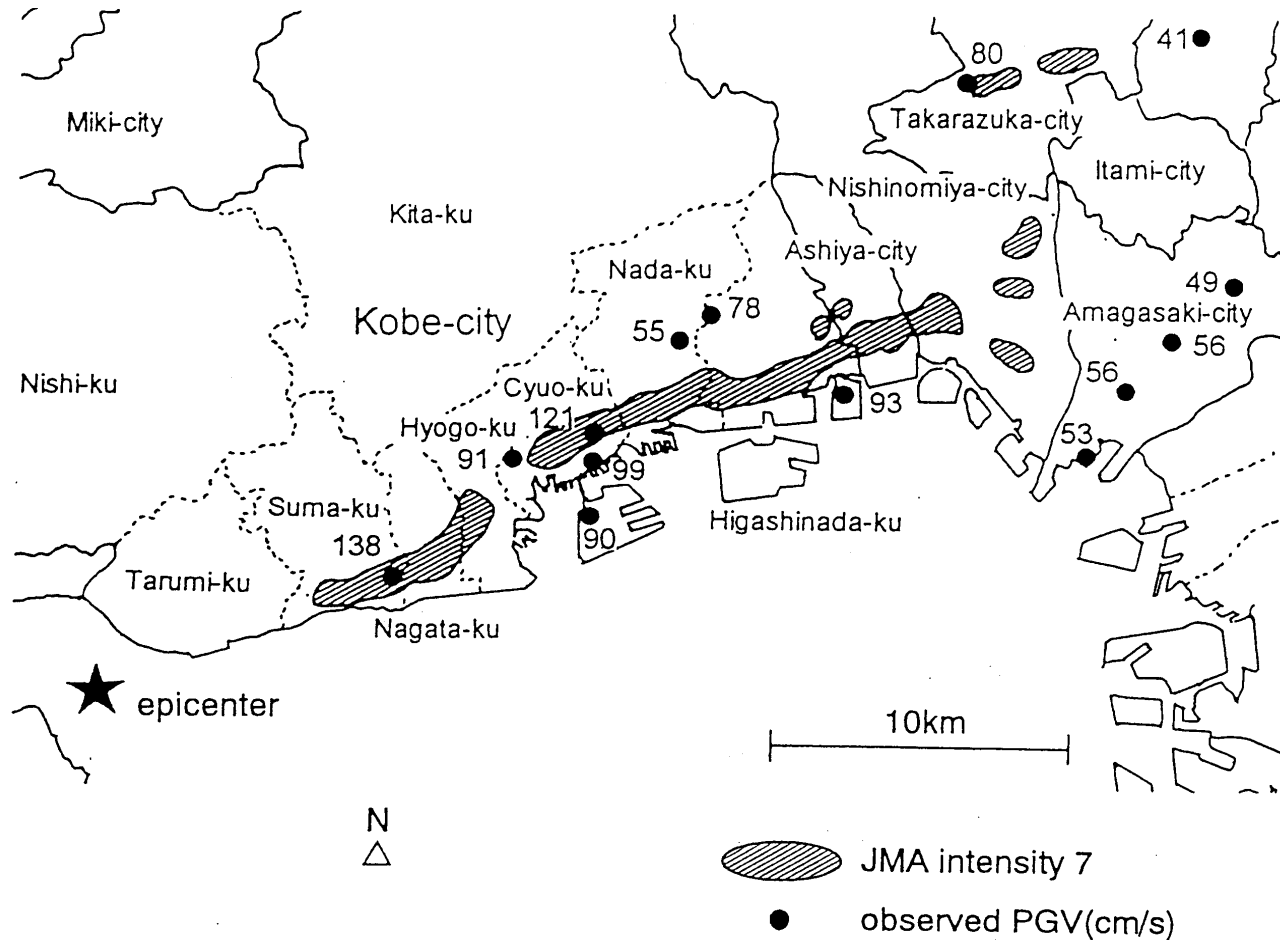
今後30年以内の地震発生確率 (地震調査研究推進本部)

断層	評価時点	発生確率 (%程度)	地震の発生年と M
阿寺	1586年	6.5	1586年 M7.8
丹那	1930年	2.8	1930年 M7.3
野島	1995年	0.4~8	1995年 M7.2

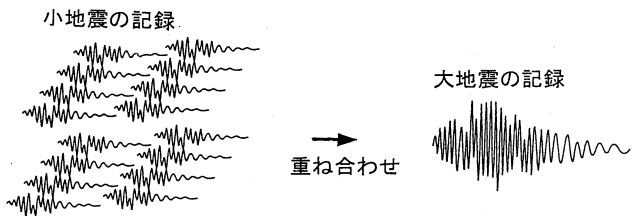
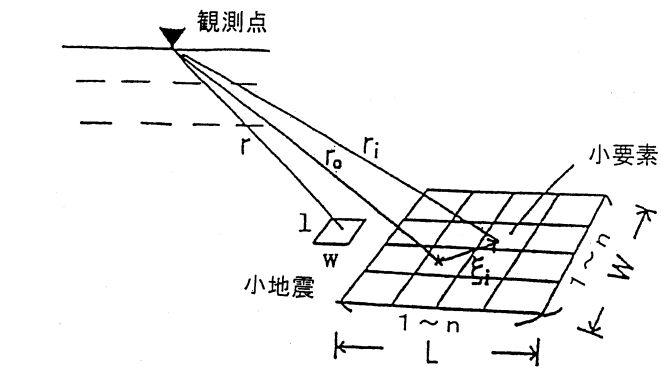
### 参考資料

- 1) 土木学会: 土木学会耐震基準等に関する提言集(1996年5月)
- 2) 土木学会: 土木建造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説(2000年6月)

# 震源断層と地盤構造の三次元モデルを用いた 地震動シミュレーション(1996年6月)片岡正次郎博士論文から

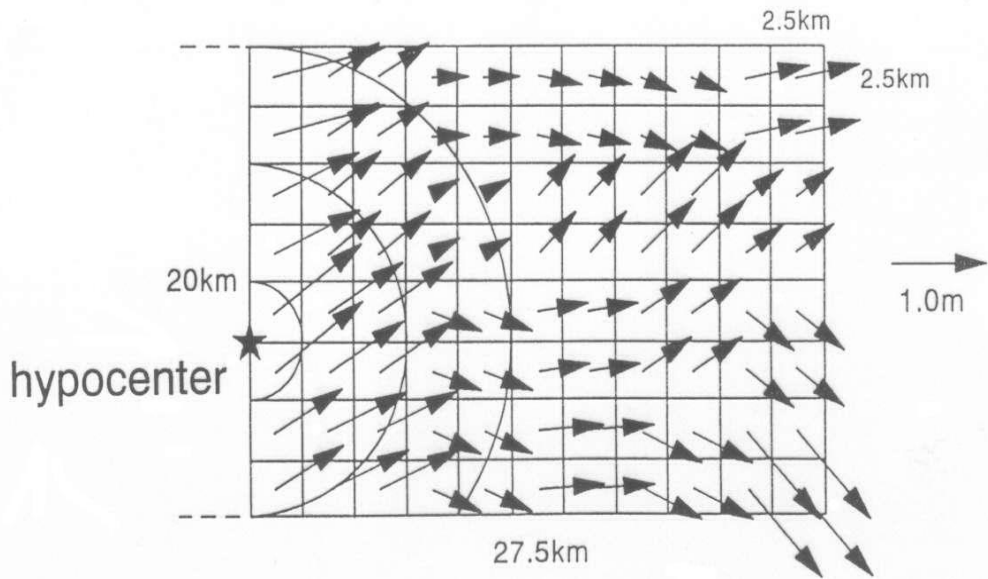
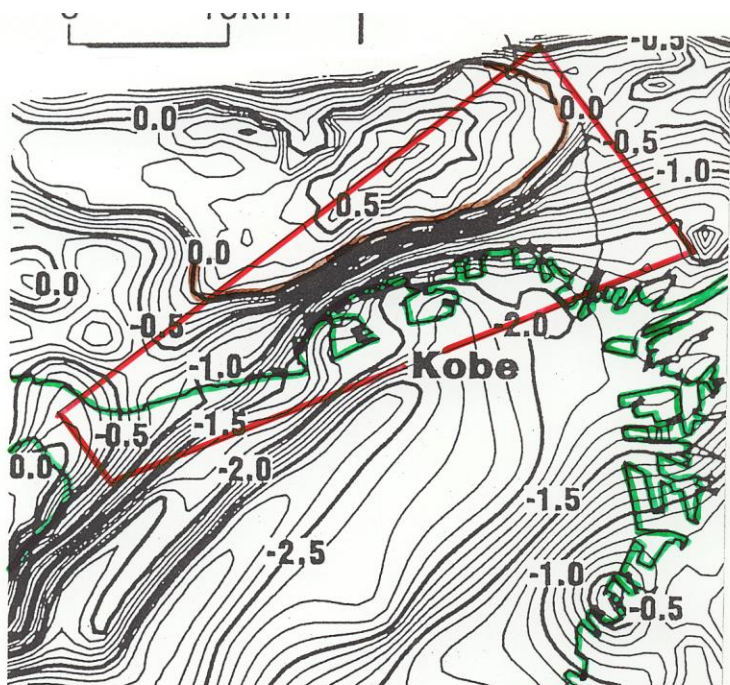
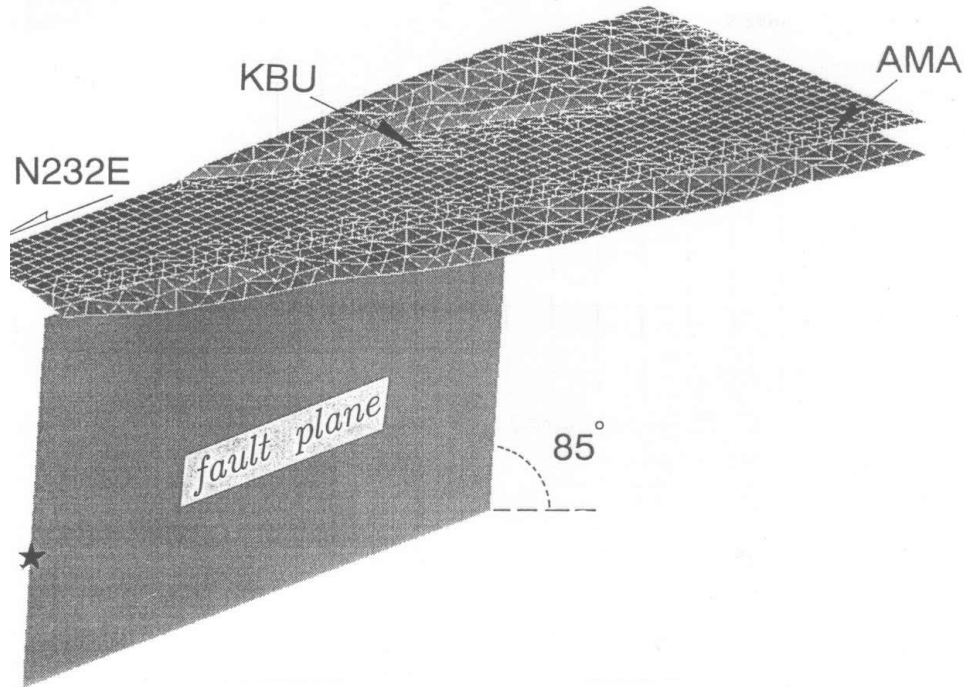


阪神淡路大震災の「震災の帯」と地動最大速度値

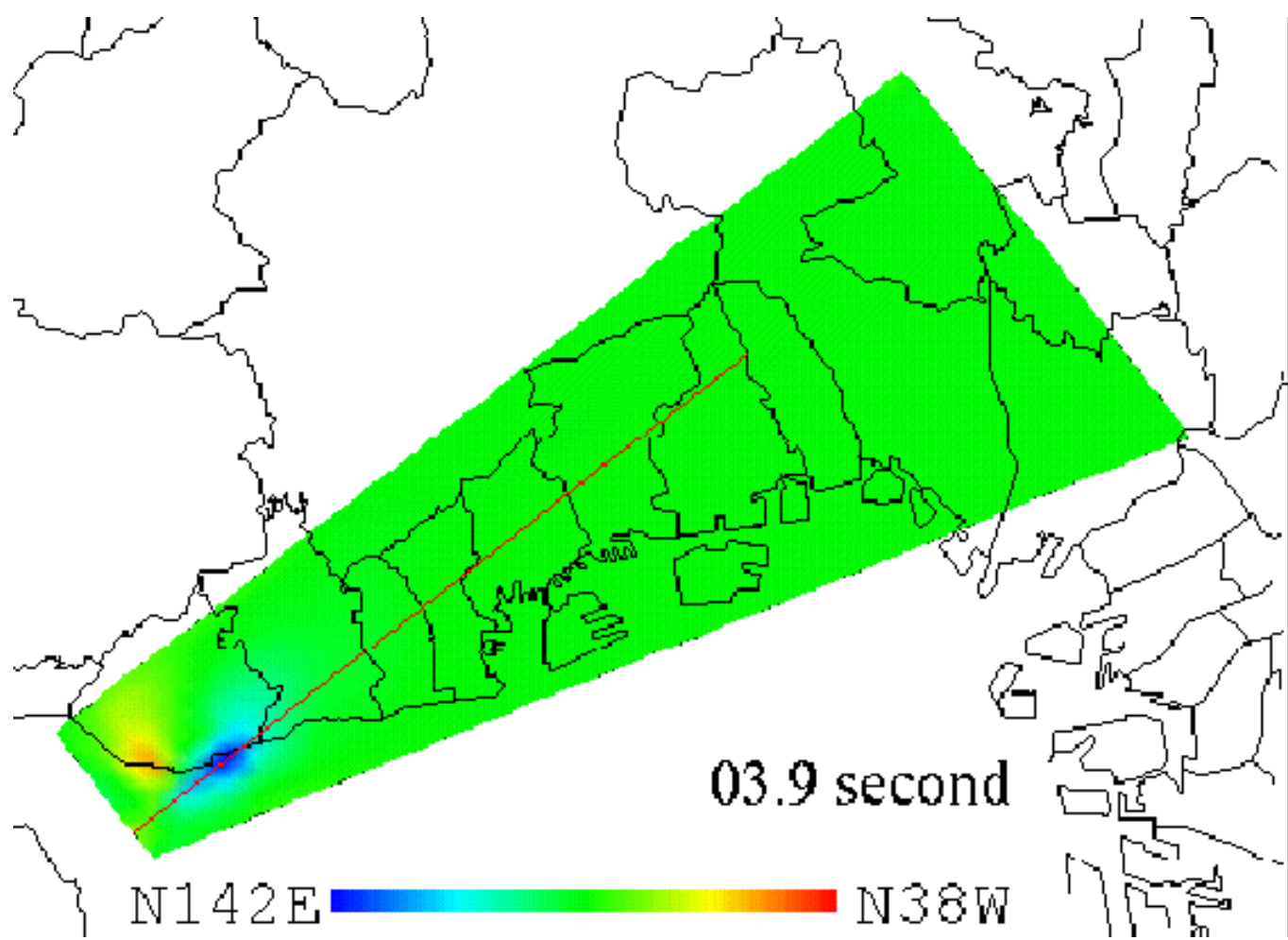


## 断層モデルを用いる強震動予測の説明図

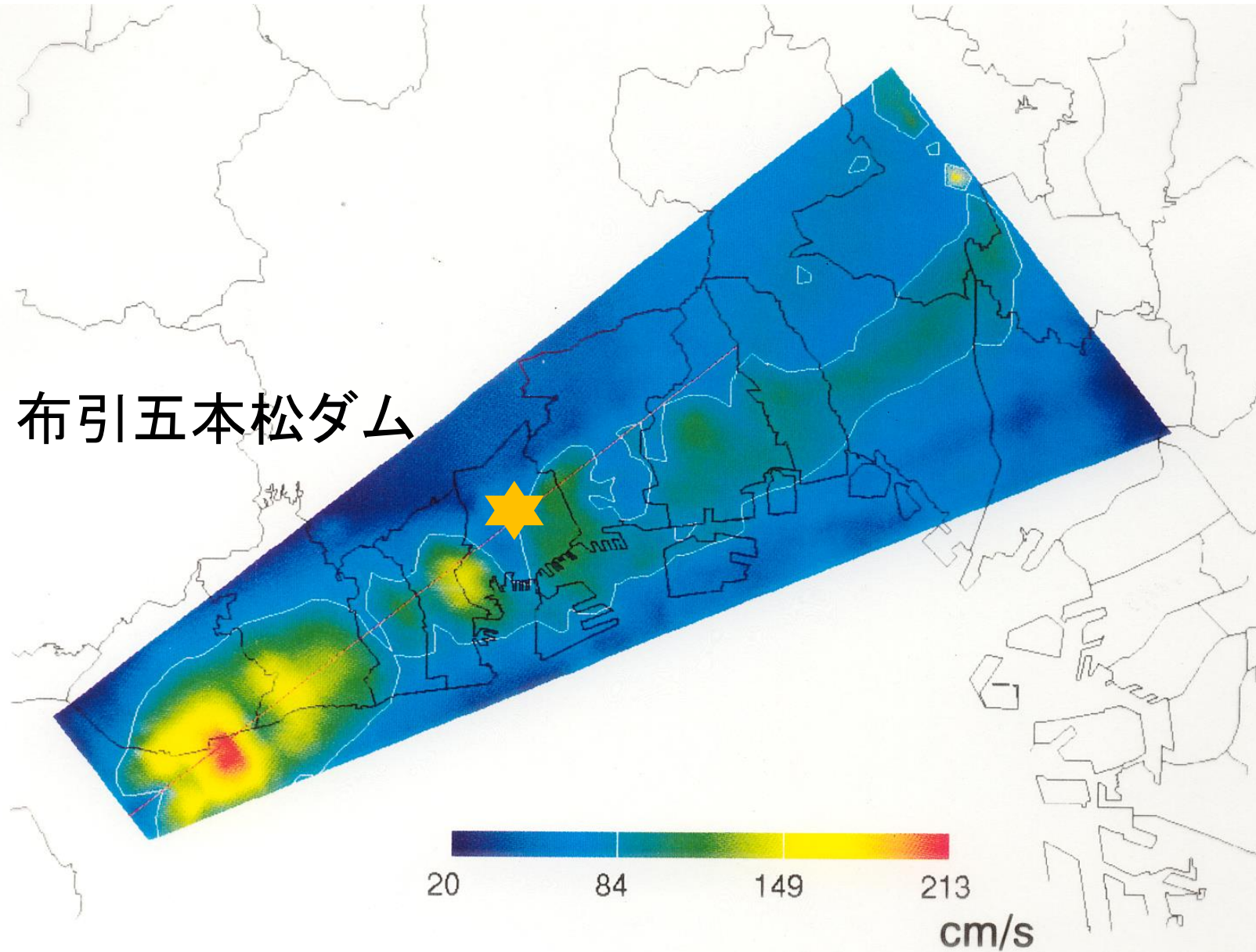
bsurface :  $V_P = 2.5 \text{ km/s}$ ,  $V_S = 1.0 \text{ km/s}$ ,  $\rho = 2.1 \text{ t/m}^3$  1276nodes  
 isement :  $V_P = 5.4 \text{ km/s}$ ,  $V_S = 3.2 \text{ km/s}$ ,  $\rho = 2.7 \text{ t/m}^3$  513nodes







# 布引五本松ダム



最大速度分布図 (ライズタイム1.0s, 白線は80cm/s)



# 布引五本松ダム

H=33.3m、L=110.3m

重力式コンクリートダム

1900年3月完成(日本最古)

佐野震度の提唱は1916年

新幹線新神戸駅近くに所在

震災後、漏水対策と堆砂除去のため  
上流面腹付けなど耐震補強実施



2003年6月撮影



1997年5月撮影

# 各種構造物の設計基準への レベル2地震動導入状況

1. 道路橋設計示方書(V耐震設計編)・同解説(1996)
2. 下水道の耐震対策指針と解説(1997)
3. 水道施設耐震工法指針・解説(1997)
4. 高圧ガス設備等耐震設計基準(1997)
5. 鉄道構造物等設計基準・同解説(1999)
6. 港湾の施設の技術上の基準・同解説(1999)
7. LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針(1999)
8. 大規模地震に対するダムの耐震性能照査指針(案)  
国土交通省河川局治水課(2005年3月)通達



# レベル2地震動とダムの耐震性能

## 要求性能

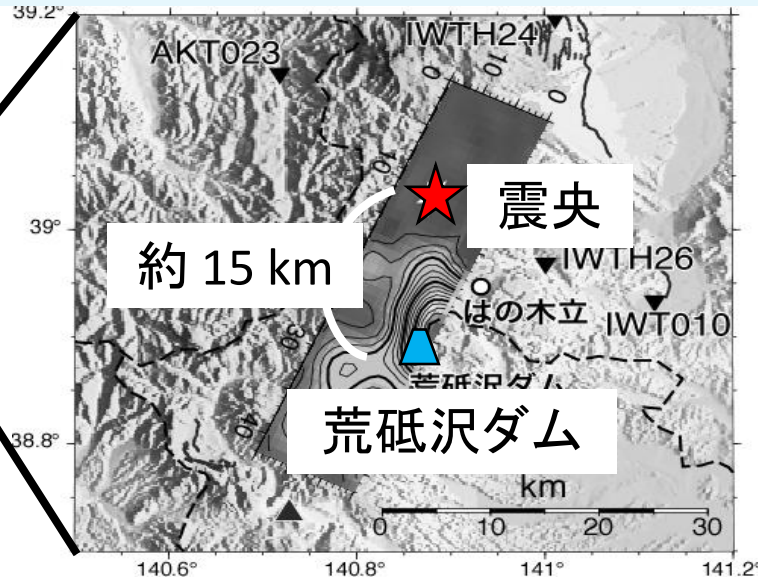
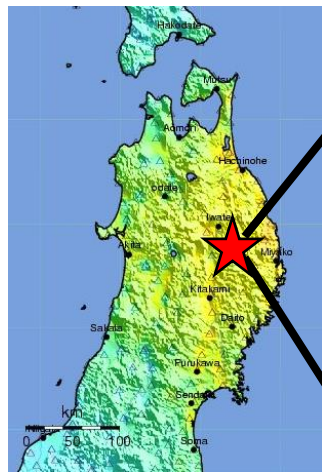
地震時に損傷が生じたとしても、1)貯水機能が維持されるとともに2)生じた損傷が修復可能な範囲にとどまることである。

水門、洪水吐などの付属施設に対して1)は、3)制御できない貯水の放流が生じないこと、と言い換えられる。(指針(案))

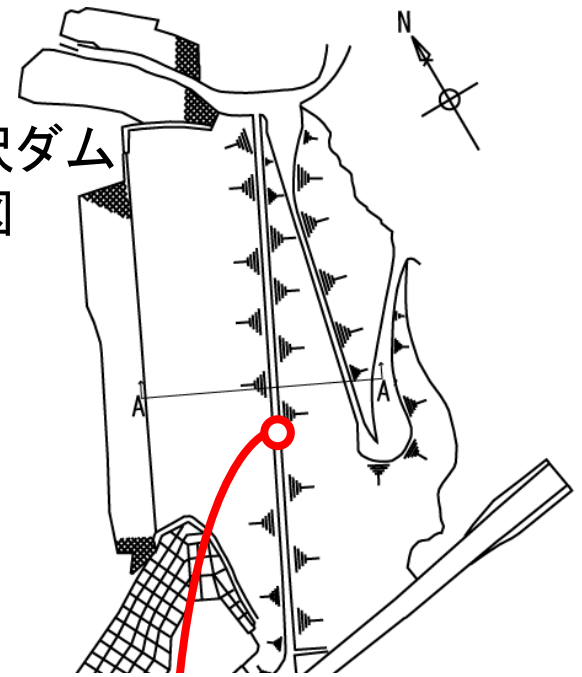
## 地震被害からの知見

- ①1999年台湾集集地震ではコンクリートダムが決壊、2013年東日本大震災では藤沼ダム(フィルダム)が決壊し犠牲者がでた。2004年新潟県中越地震ほかでもダムの地震被害が発生した。これらは耐震補強の必要なダムが現存することを実証している。
- ②上記の要求性能は主に下流域の二次災害を防止するために満たすべき最低限の必要条件である。ダムが保有すべき耐震性能レベルを検討する際には、補強や操業停止に伴う調査復旧経費、社会的影響など社会経済的要因も勘案する必要がある。
- ③貯水池やダムの日頃のメンテナンスや監視が最も重要である。

# 中央土質コア型ロックフィルダムの地震による沈下の定量評価



荒砥沢ダム  
平面図



沈下 約40cm  
(層別沈下計)



## 背景

## 岩手・宮城内陸地震

発生日時 2008年6月14日 (M7.2)

KiK-net一関西 (IWTH25) で上下動4G観測?

## 荒砥沢ダム

竣工: 1998年

型式: 中央土質コア型ロックフィルダム

堤高: 74.4m

## 被害

上流の山腹が大崩壊、ダムの貯水機能は維持。

堤頂の沈下は最大約40cm (右写真参照)





水たまり

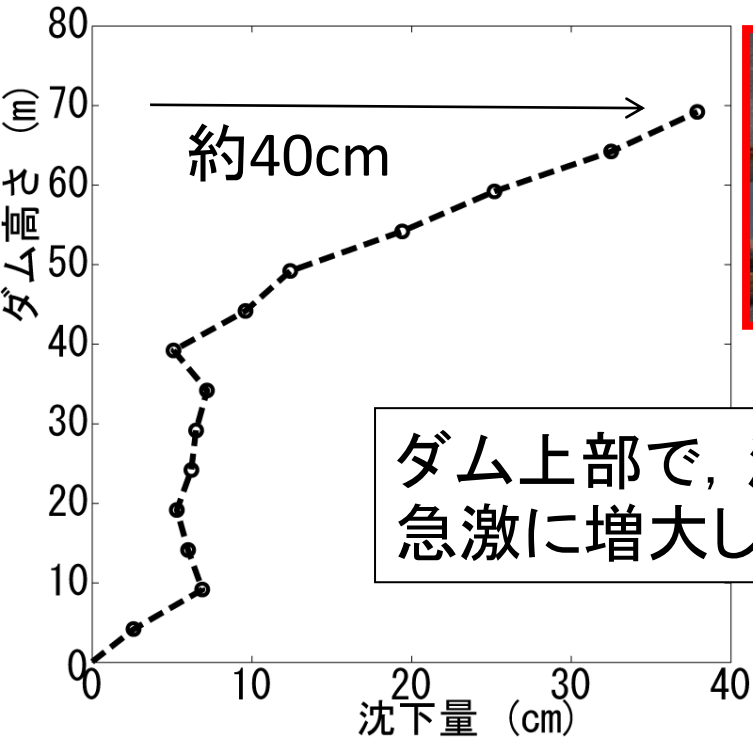
残留変形は、  
天端上流側法肩で沈下198mm、  
上流側へ43mm、左岸側へ60mm  
層別沈下計の上端は約40cm突出  
以下、田原徹也修士論文(2011.3)より



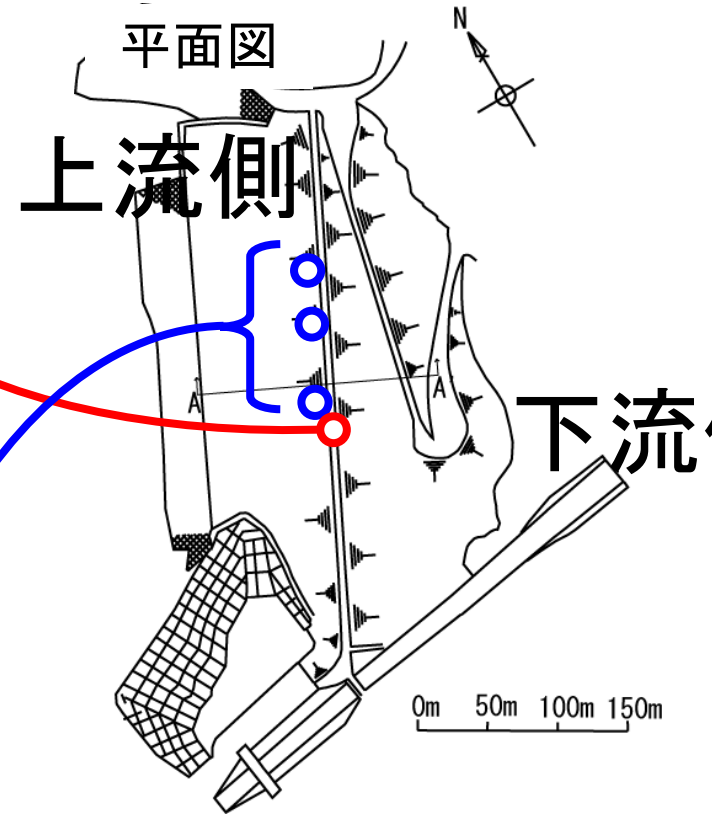
# 得られた層別沈下記録及び表面変位記録

すべりを伴わない沈下

層別沈下記録(コア部): 沈下量約40cm



ダム上部で、沈下量が急激に増大している。



約20cm

約40cm

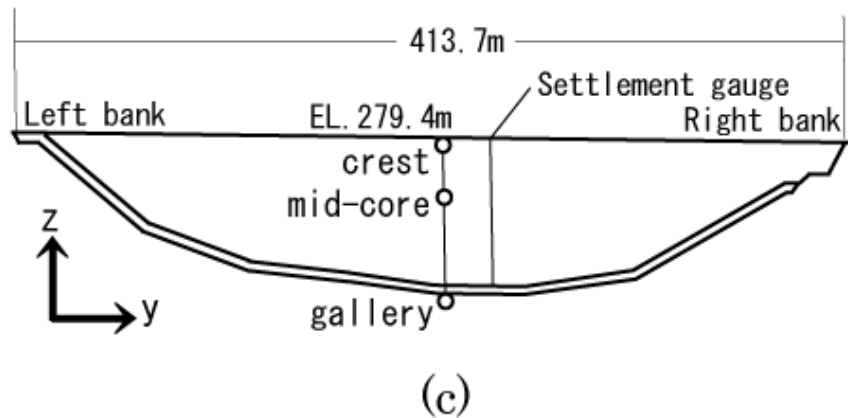
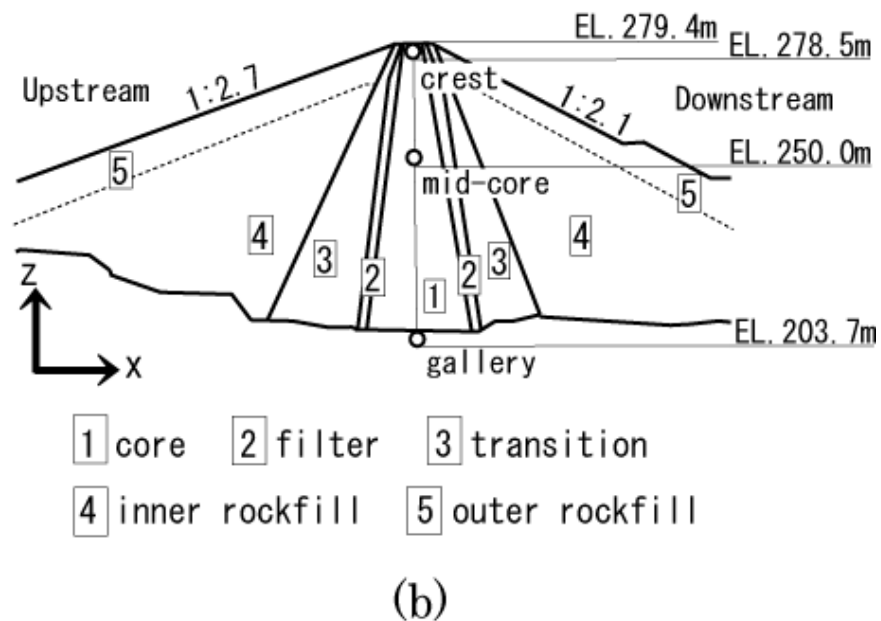
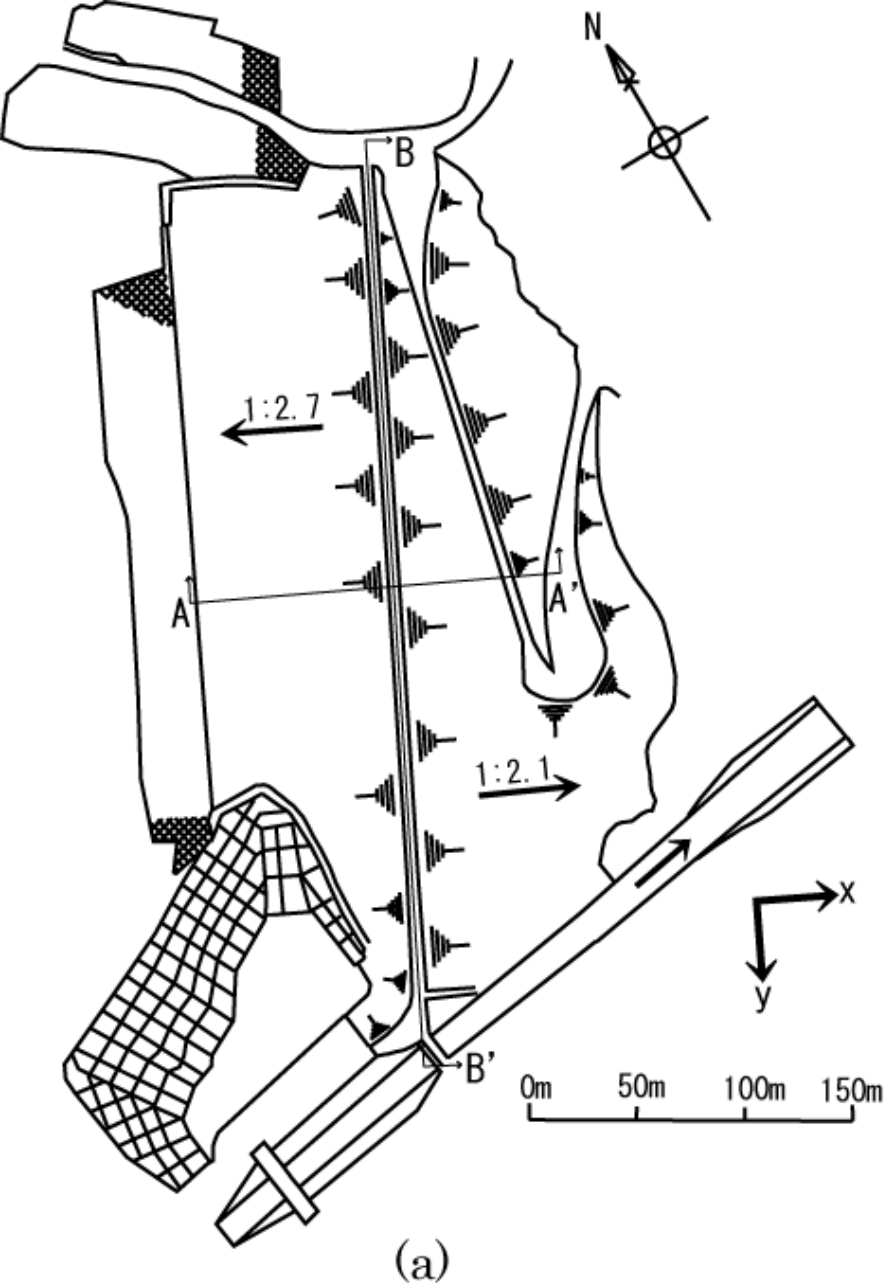
表面水準測量(フィルタ部): 沈下量約20cm

フィルタ

コア

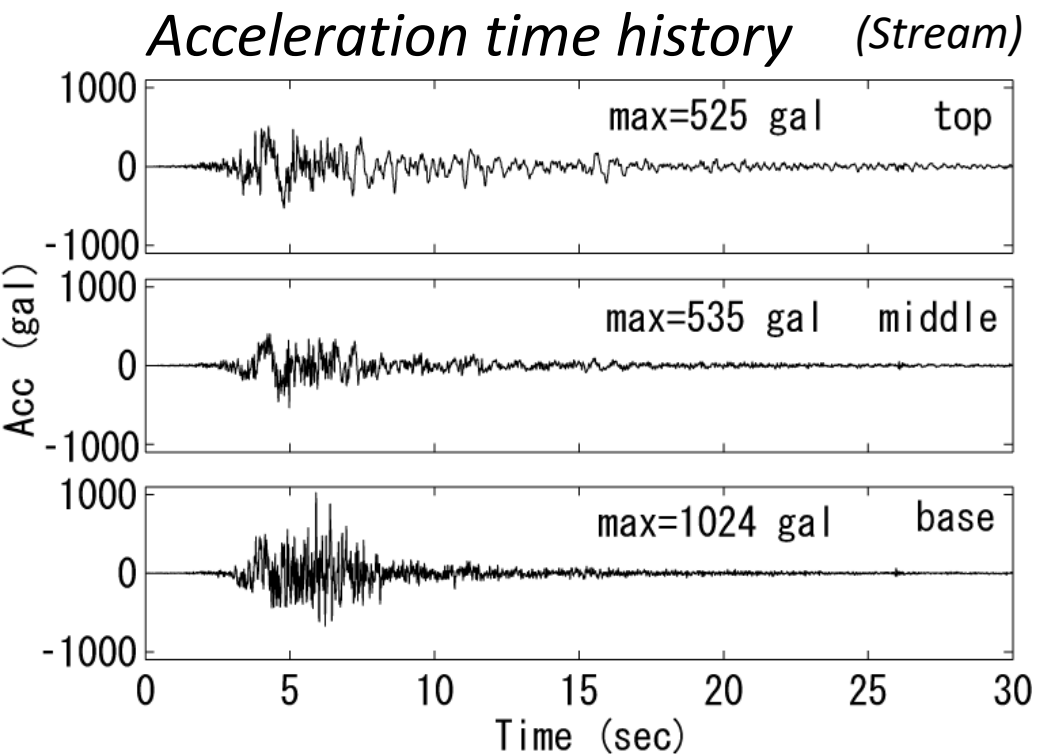
フィルタ部: 約20cm < コア部: 約40cm



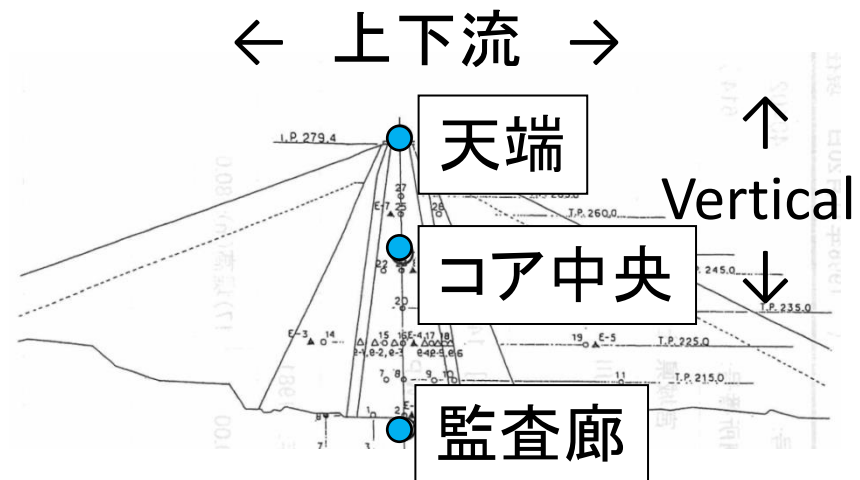


荒砥沢ダム の 平面図 と 断面図 (S&F, Vol.51, No.2, 2011)

# 荒砥沢ダムでの本震の加速度記録

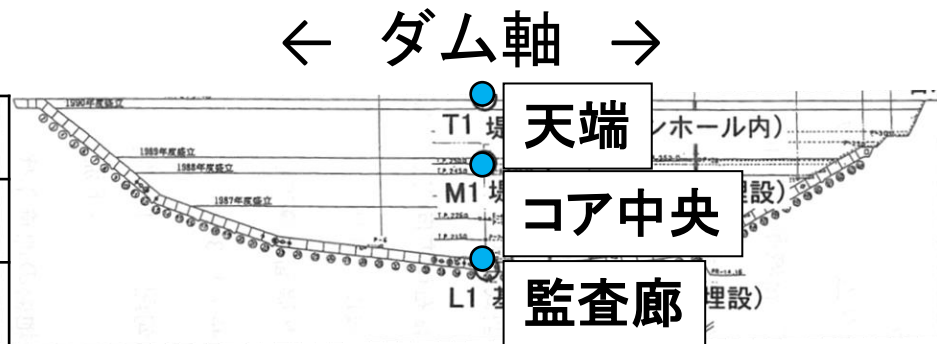


3成分加速度計  
(100Hzサンプリング)



## 最大加速度PGA(gal)

	上下流	ダム軸	鉛直
天端	525	455	622
コア中央	535	478	470
監査廊	1024	899	691



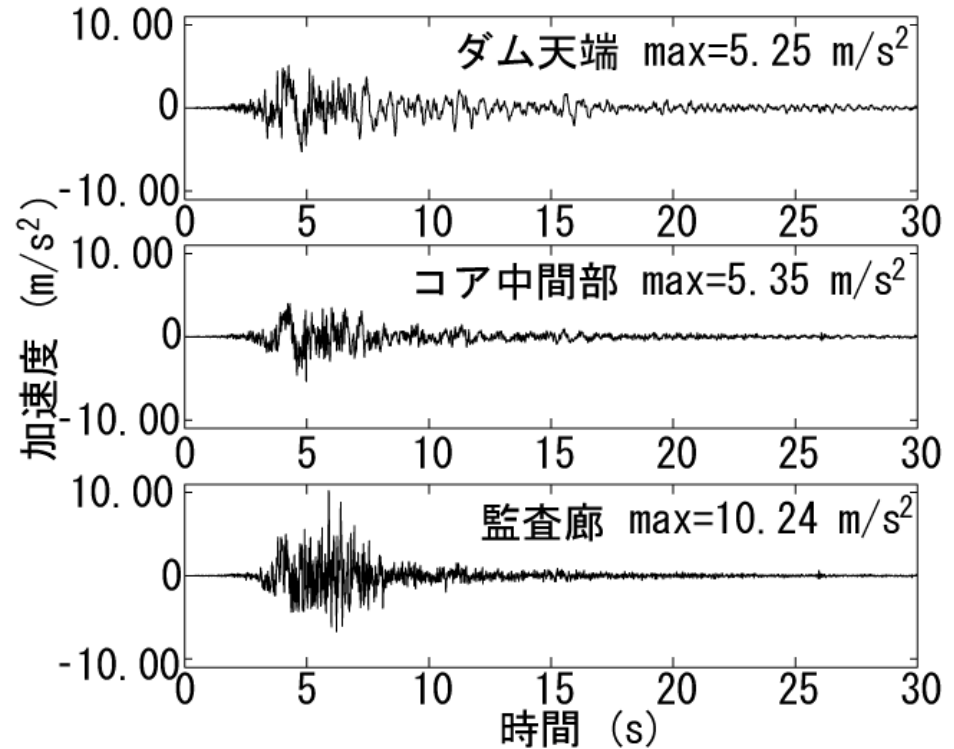
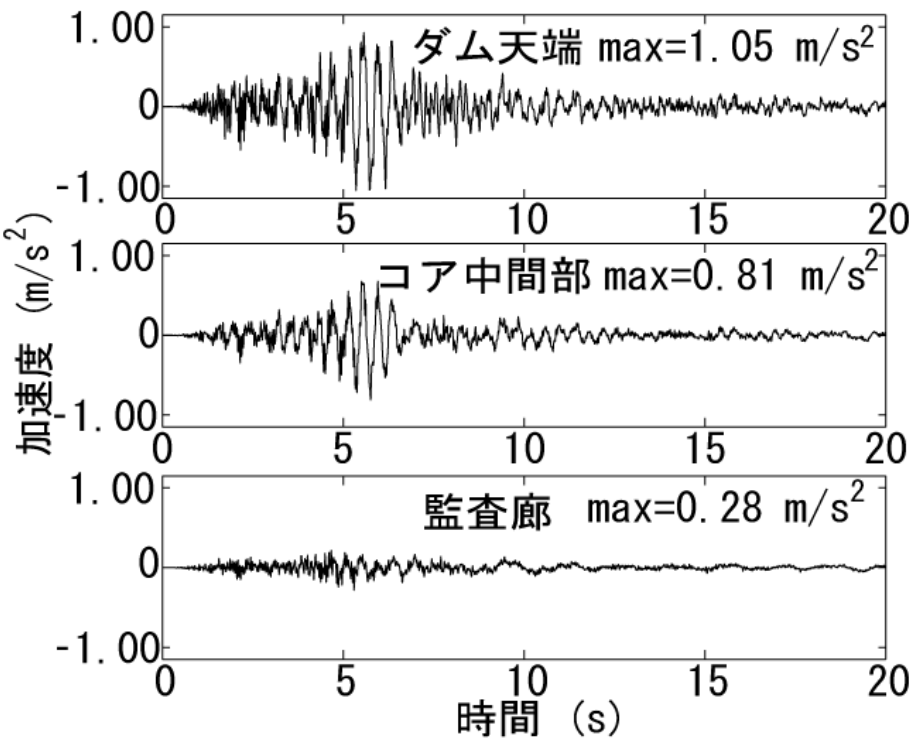
\* 振り切れなし(JCOLD作業部会)

# 加速度時刻歴波形(上下流方向)

1996年(線形応答特性)

比較

本震(非線形応答特性)

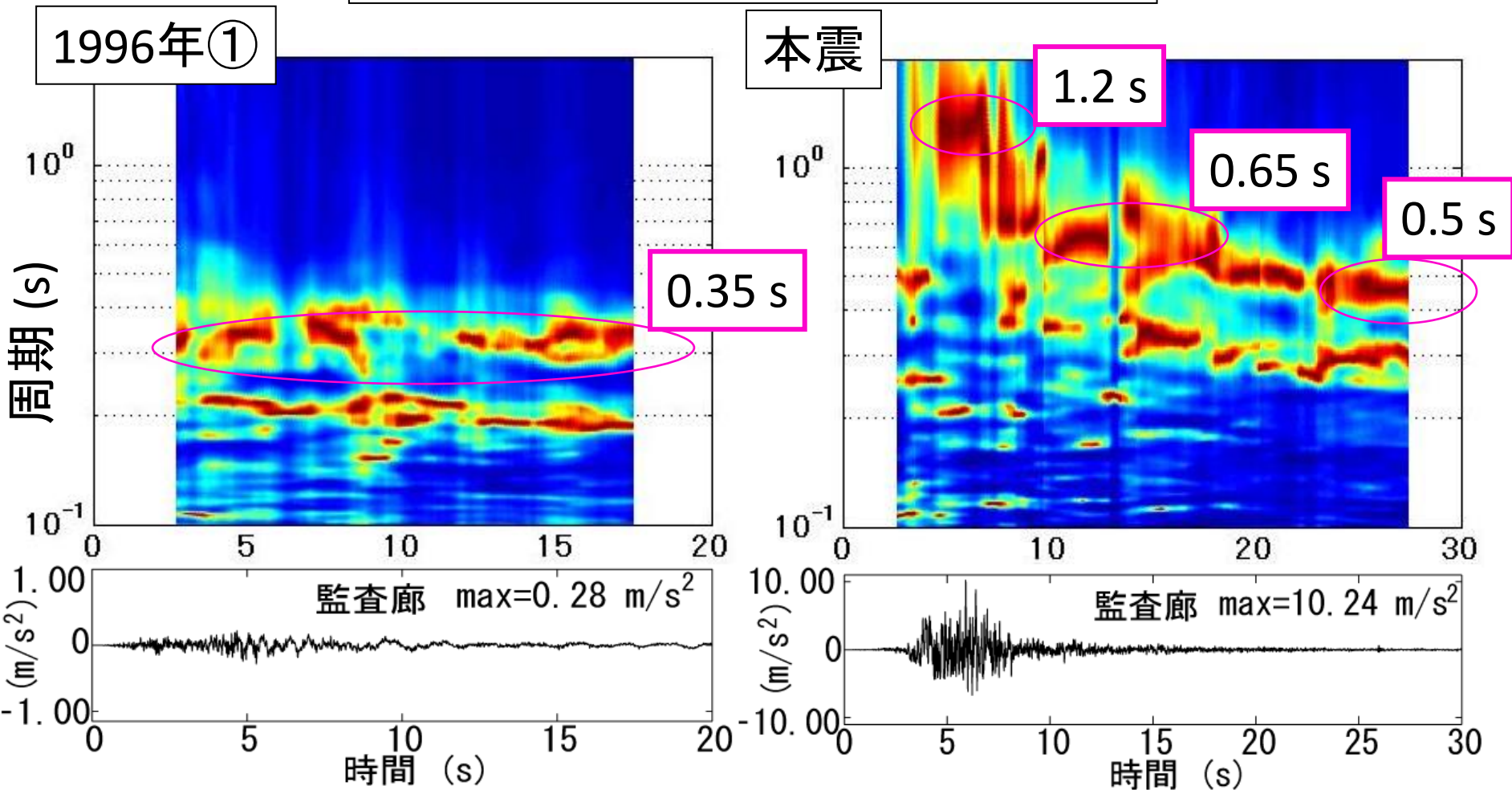


[本研究で使用した地震記録]

記号	年月日	M	震央距離	最大加速度値(監査廊)
①	1996.8.11 (03:12)	5.9	19km	0.28m/s <sup>2</sup>
②	1996.8.11 (08:10)	5.7	16km	0.33m/s <sup>2</sup>
③	1996.8.11 (15:01)	4.8	15km	0.30m/s <sup>2</sup>
本震	2008.6.14 (08:43)	7.2	15km	10.24m/s <sup>2</sup>

# 得られた強震記録から分かったこと

ランニングスペクトル比(ダム天端/監査廊)

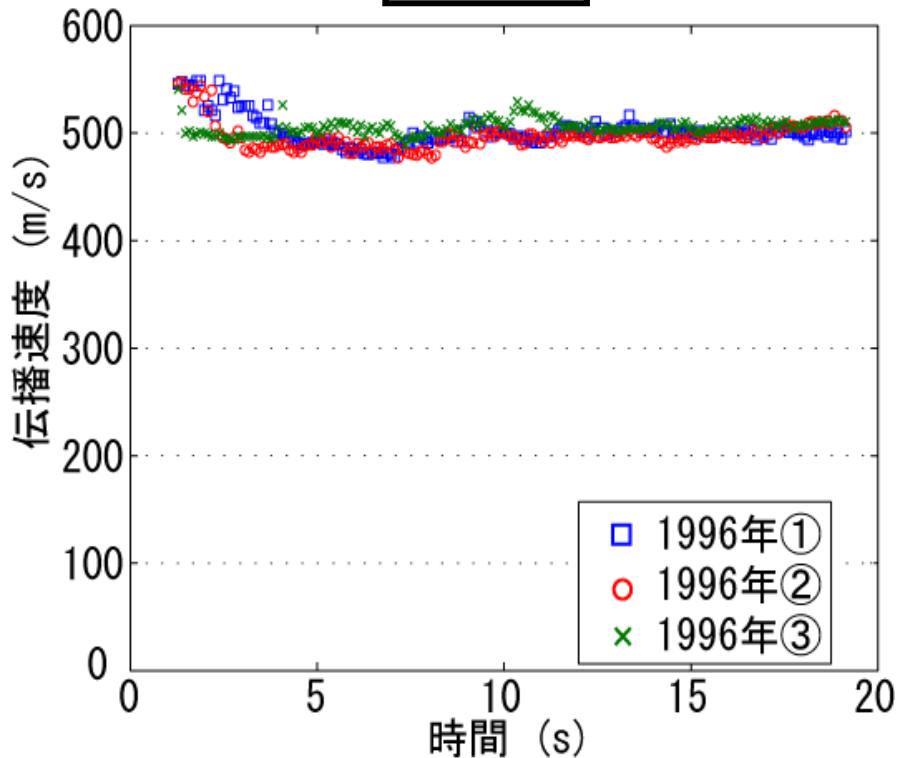


ダムの卓越周期は左図で0.35秒、右図の本震主要動で1.2秒に伸びた後0.65秒を維持し最終的に0.5秒に収束

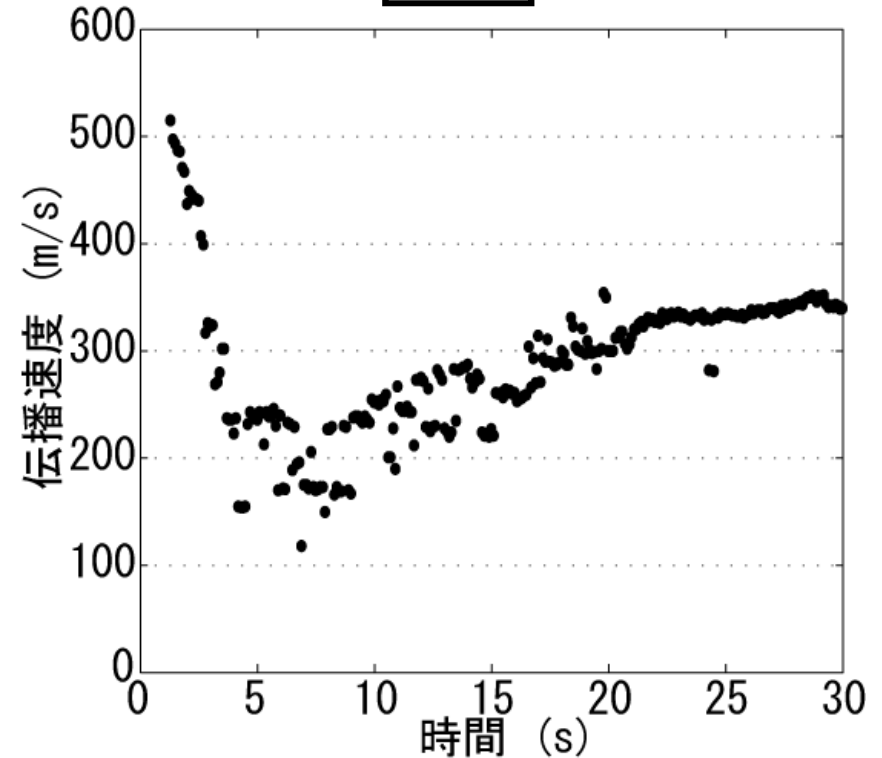


# 伝播速度の時間変化(監査廊～天端, 上下流方向)

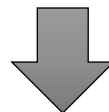
1996年



本震

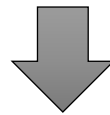
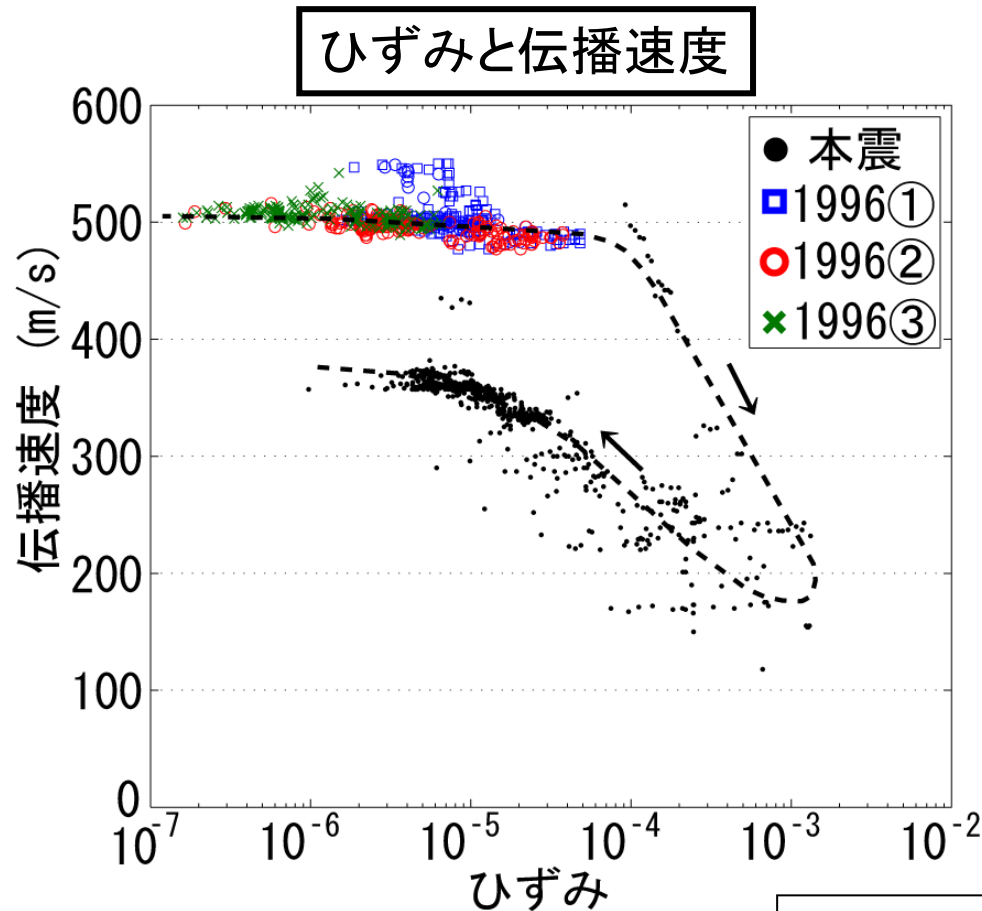


最初500m/s程度だったが主要動時に200m/s以下にまで急低下し、その後徐々に増加に転じて、最終的に350m/s程度に収束



伝播速度と動的ひずみの関連性

# 動的ひずみと伝播速度の関係(監査廊～天端, 上下流方向)

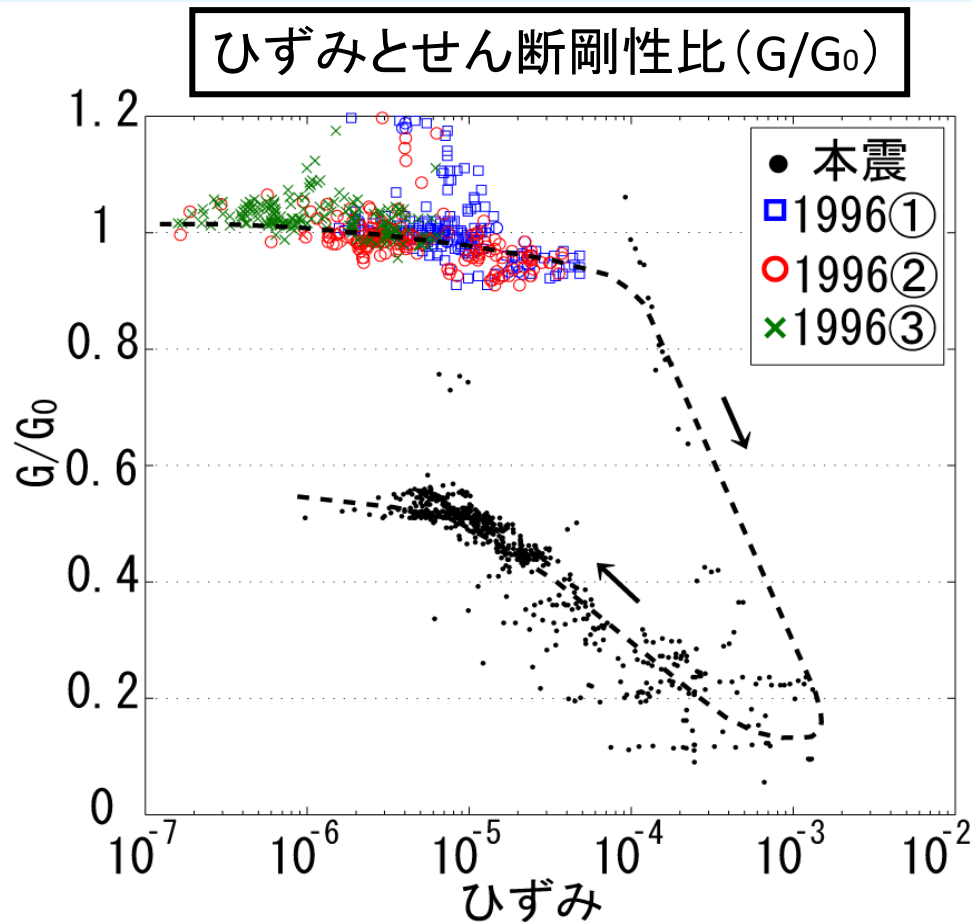


$$G = \frac{V_s^2}{\rho}$$

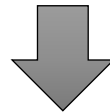
G: せん断剛性  
Vs: 伝播速度  
ρ: 密度

ひずみとせん断剛性比 $G/G_0$ の関係

# 動的ひずみとせん断剛性Gの関係(監査廊～天端, 上下流方向)



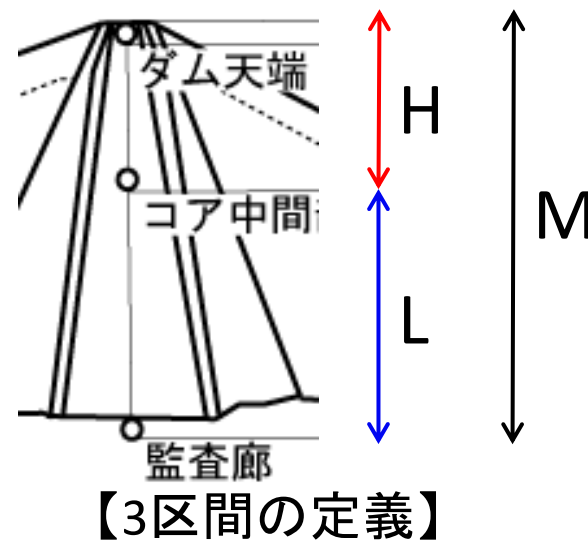
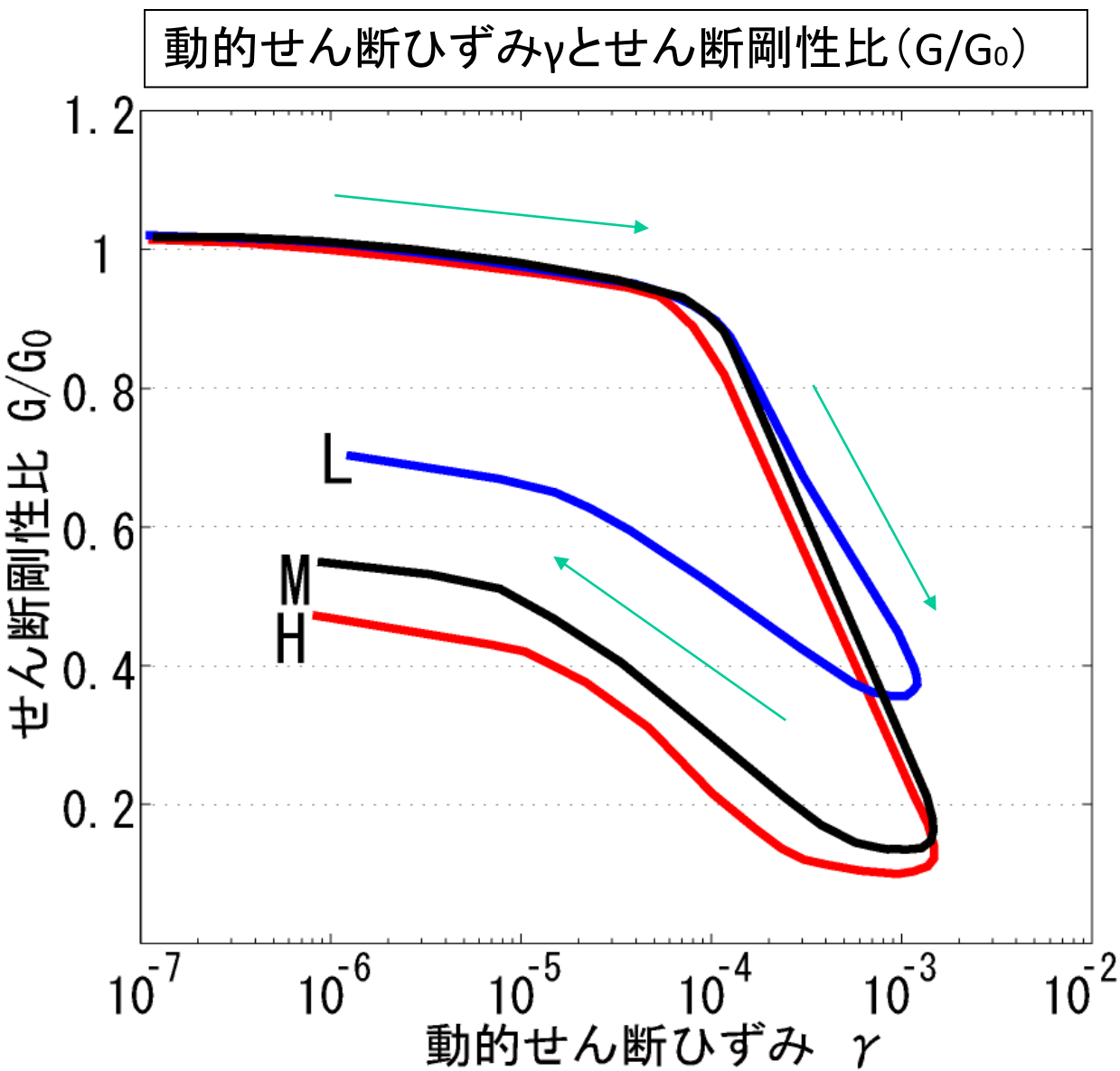
$10^{-3}$ を超えるひずみにより, せん断剛性Gは当初の約10%にまで減少  
その後, 回復するも本震終了時では, 当初の剛性に戻らない



せん断剛性Gのひずみ依存性



動的せん断ひずみ $\gamma$ とせん断剛性比 $G/G_0$ の関係(各区分, 上下流方向)



深度により違いがみられる

せん断剛性比 $G/G_0$ の減少過程はほぼ同一ルート。

$G/G_0$ の最小値は, コアの上部(H)が下部(L)よりも小さい。

その結果, 本震終了時に,  $G/G_0$ はコアの上部(H)が下部(L)よりも小さい。

本震時における非線形地震応答特性  
(得られた強震記録より解析)

基本振動周期

線形応答時  
0.35 s

伸長

本震主要動時  
1.2 s

せん断ひずみレベル

本震主要動時  
最大： $1.5 \times 10^{-3}$

せん断剛性比

$G/G_0$ : 100%

低下

本震主要動時  
約10%

# 強震動による沈下の定量的評価①

## ①強震動によるダム堤体の剛性低下

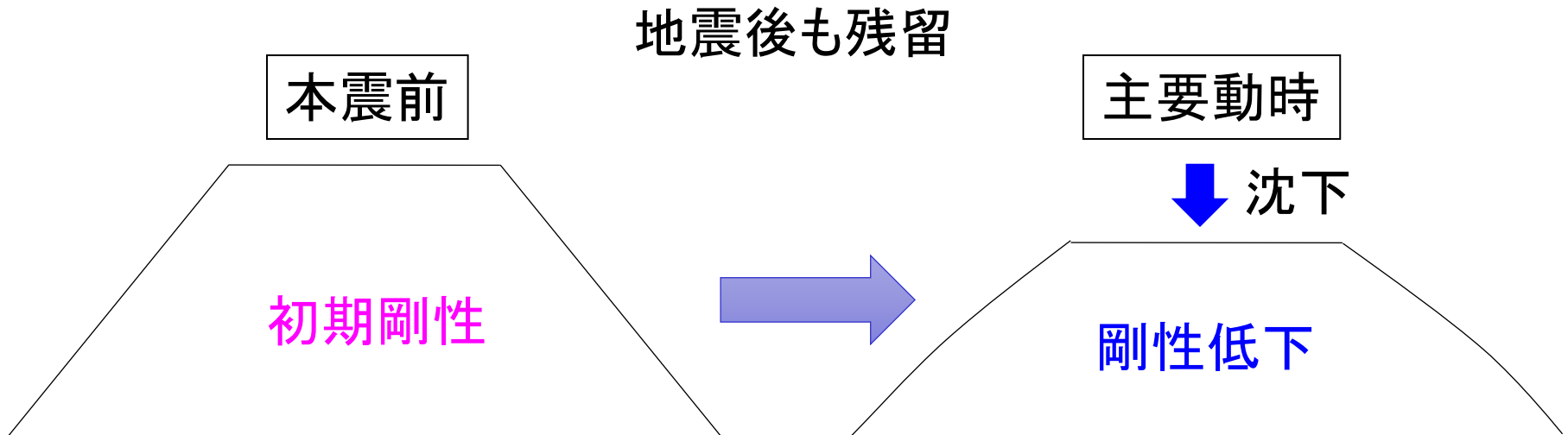
既往研究では累積損傷解析法(山口ら(2010), 島本ら(2007))の提案など



荒砥沢ダムでの実測剛性を使用し静的解析

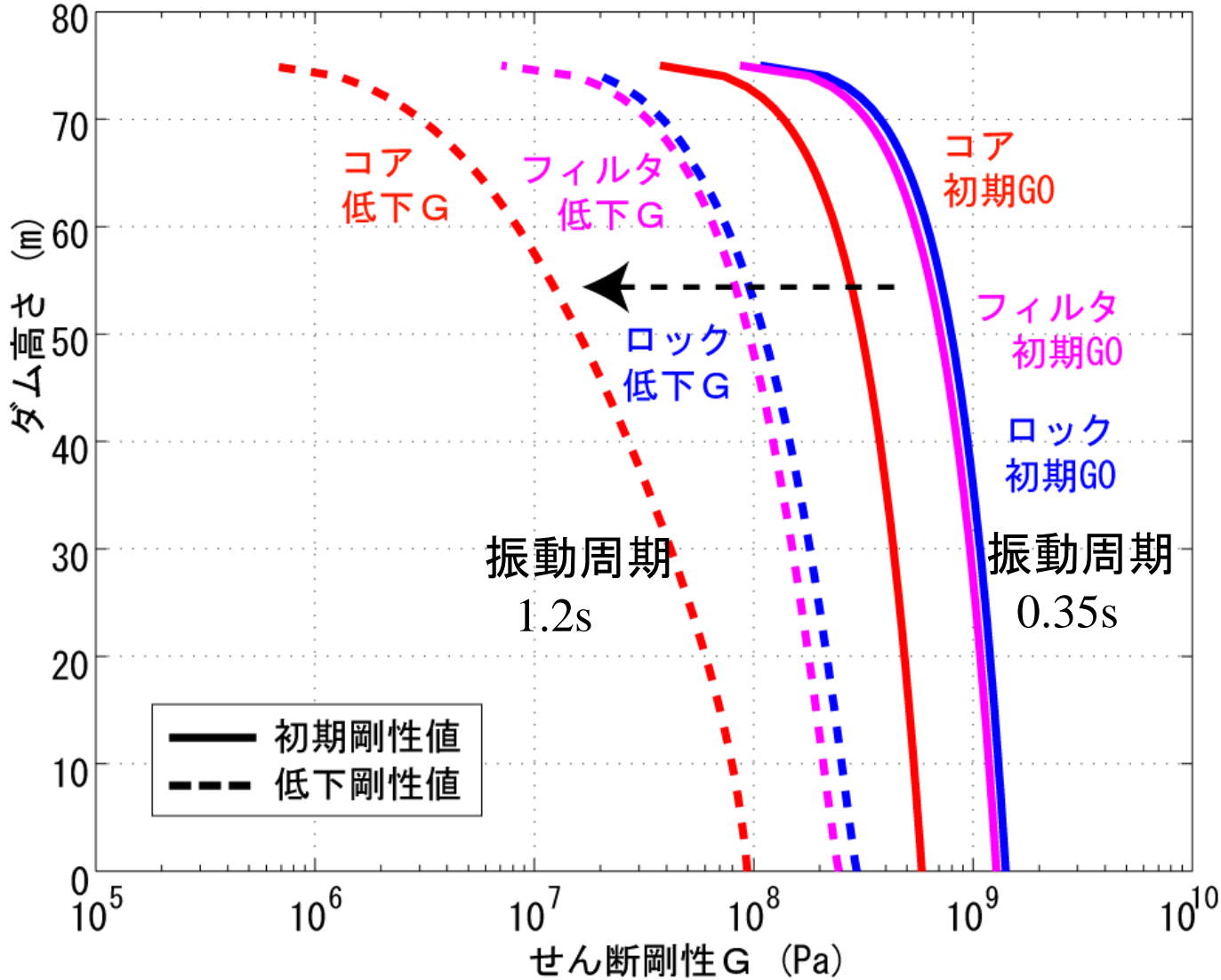


実測沈下量と比較





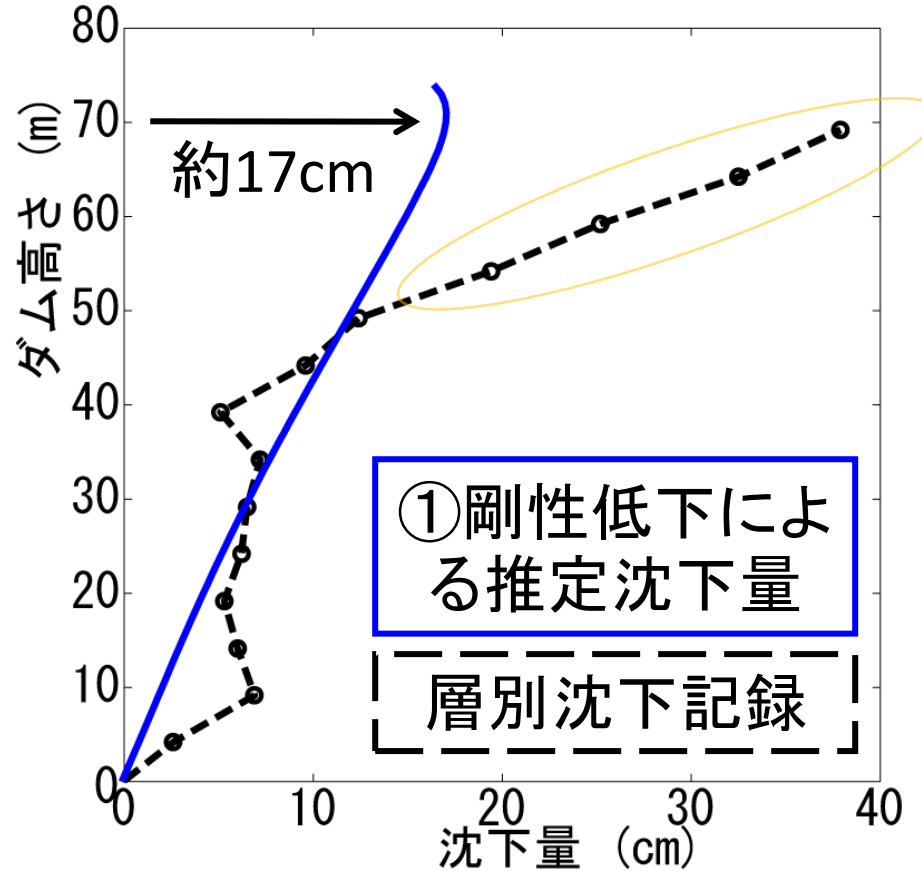
# 決定した初期剛性値 $G_0$ 分布と低下剛性値 $G$ 分布 (Iteration結果)



(ICOLD Proc. vol. 1, 2018)

# 解析結果：①剛性低下による沈下量分布

層別沈下記録とFEM計算結果の比較



- 剛性低下による沈下量はダム天端で約17cm.
- 層別沈下記録のダム上部における沈下量の増大が再現できていない.

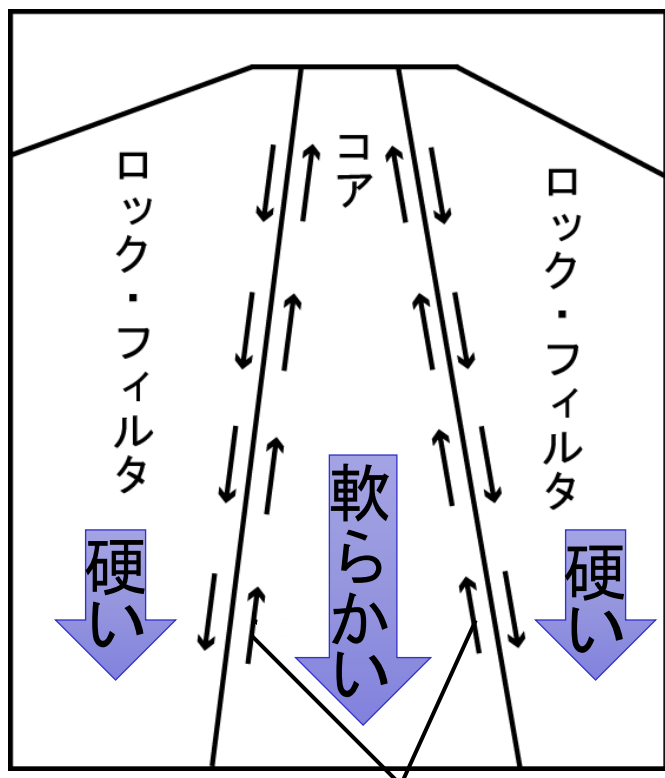
→さらに他の要因(コア側面のアーチ作用)を検討

# 地震時沈下要因の検討

## 着目点

- ダム上部での沈下量が増大
- フィルタ部に対してコア部がより大きく沈下

## ②強震時におけるアーチ作用(サイロ現象)の消失



拘束摩擦力

アーチ作用

コアG < ロック・フィルタG

コア部がコア側方の拘束摩擦によって宙吊り状態となり、鉛直応力が減少

強震時のダム堤体の大変形

コア-フィルタ間の拘束摩擦力が減少

コア部沈下の促進  
(揺すり込み沈下)



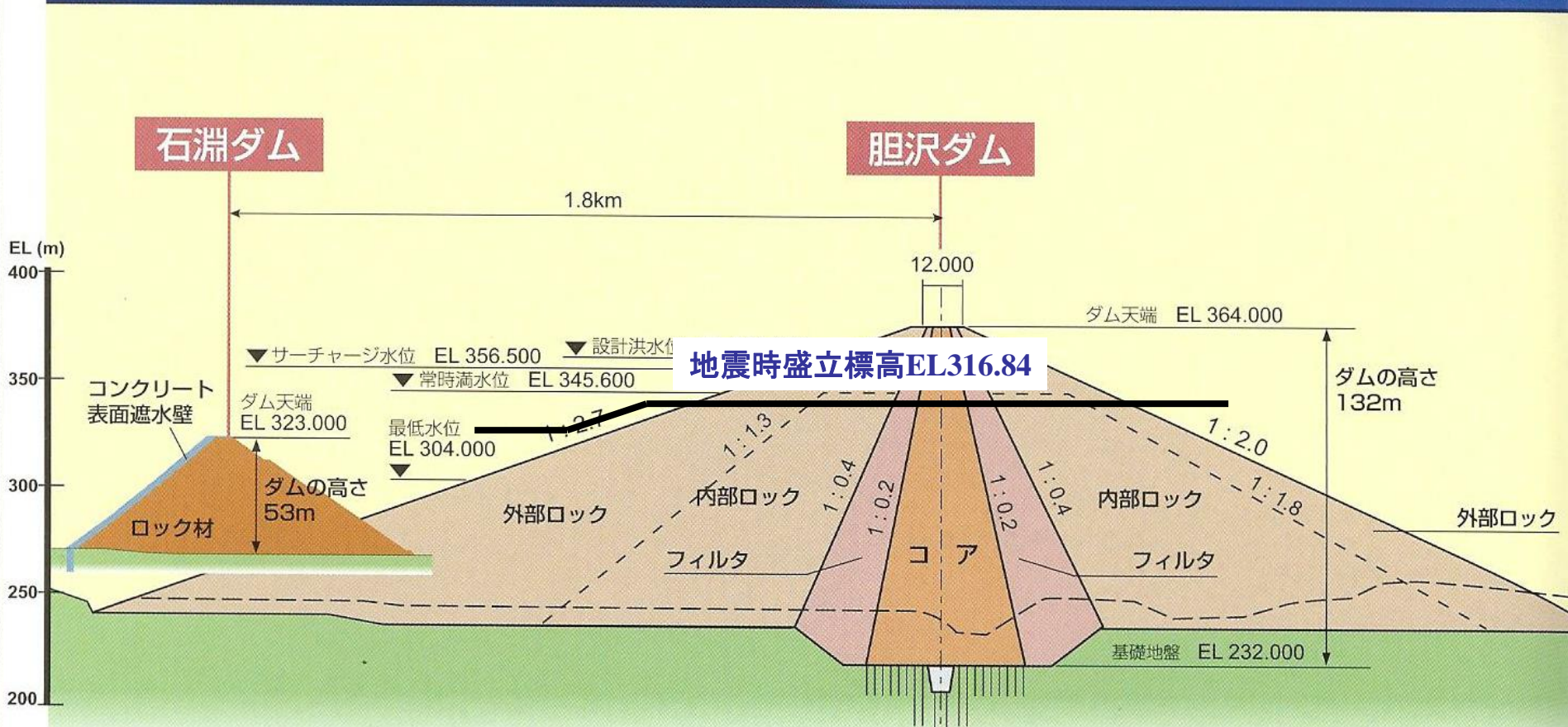
# 強震動によるコア側面でのアーチ作用消失について

ロックフィルダム(胆沢ダム、石淵ダム)の標準断面図

両ダムとも2008年岩手宮城内陸地震の震源域に所在

標準断面図

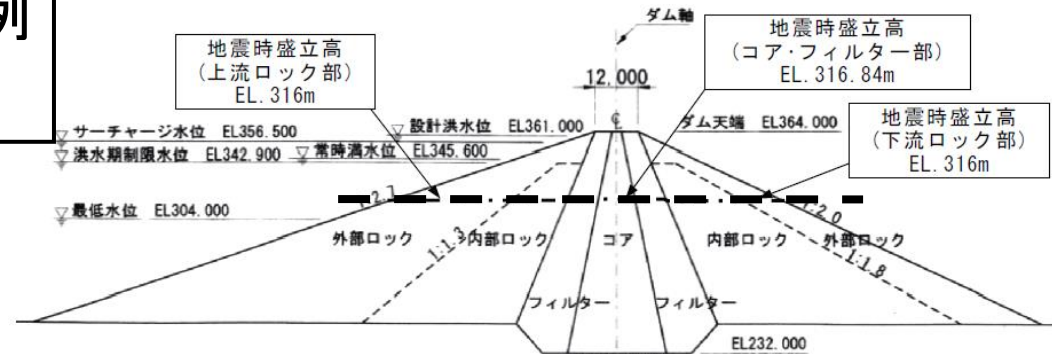
0.5/2.5



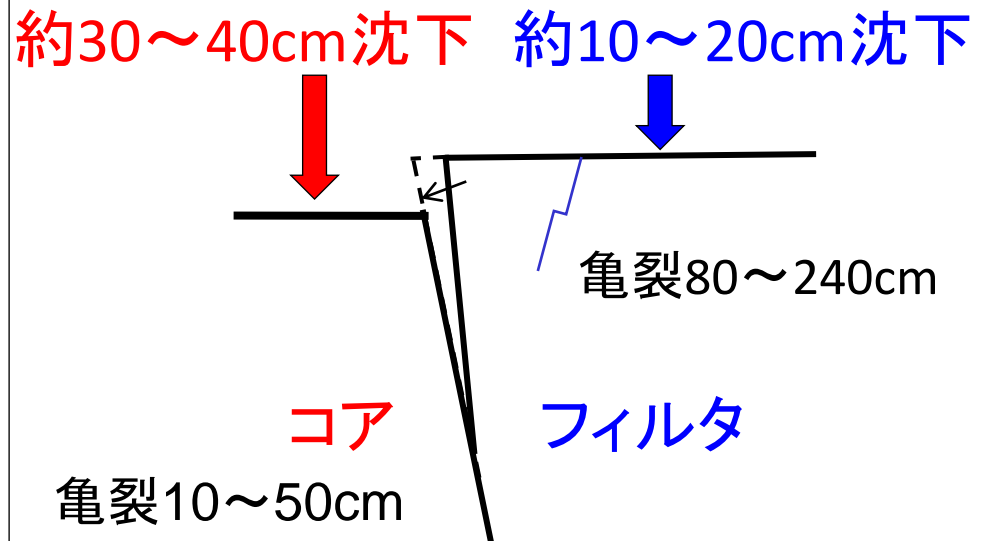
石淵ダム(H-53m)は胆沢ダム(H=132m)完成(2013年11月)後、水没

# 強震時におけるアーチ作用(サイロ現象)の消失

胆沢ダム(建設中)の沈下事例  
(H=132m、地震時84.8m)



胆沢ダム標準断面図



他の中央コア型ロックフィルダムにおいても、フィルタ部に対してコア部がより大きく沈下するという事例が確認されている

# 解析方法：2次元FEM

## ①剛性低下

初期剛性値 $G_0$   
(線形地震応答)



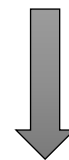
低下剛性値  
(本震主要動時の地震応答)

各物性値で静的な自重解析  $\longrightarrow$  各沈下量の差を推定沈下量

## ②アーチ作用の消失

コア-フィルタ境界部を分離したモデル

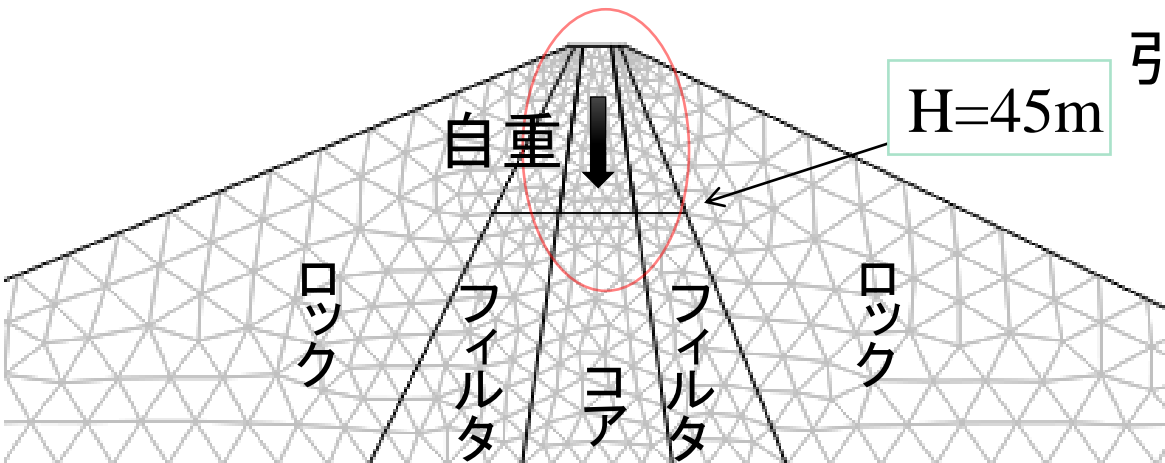
(FEM動的解析より)  
コア-フィルタ境界部の  
引張ひずみが増大する箇所



拘束摩擦力の減少

H=45m以上を分離

H=45m以上の境界条件  
コア側：フリー  
フィルタ側：ローラ



荒砥沢ダム2次元FEMモデル

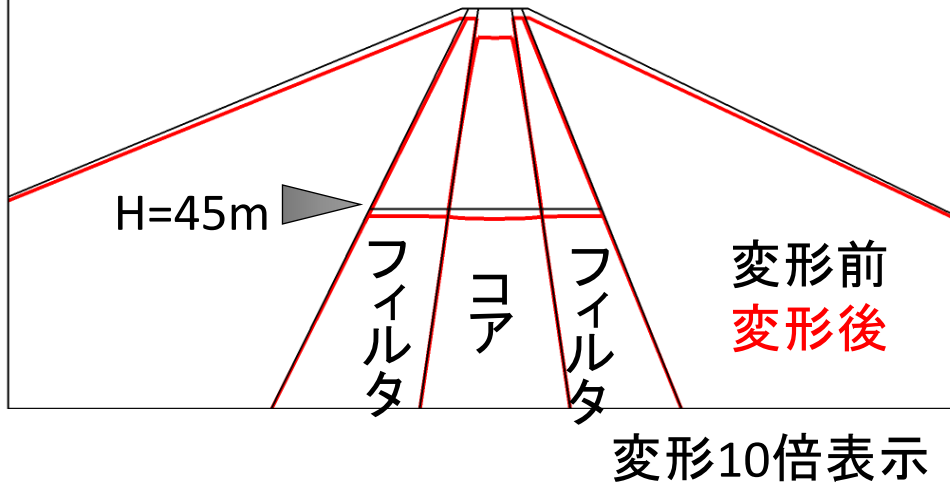
(底面を固定境界とし、堤体のみをモデル化した)



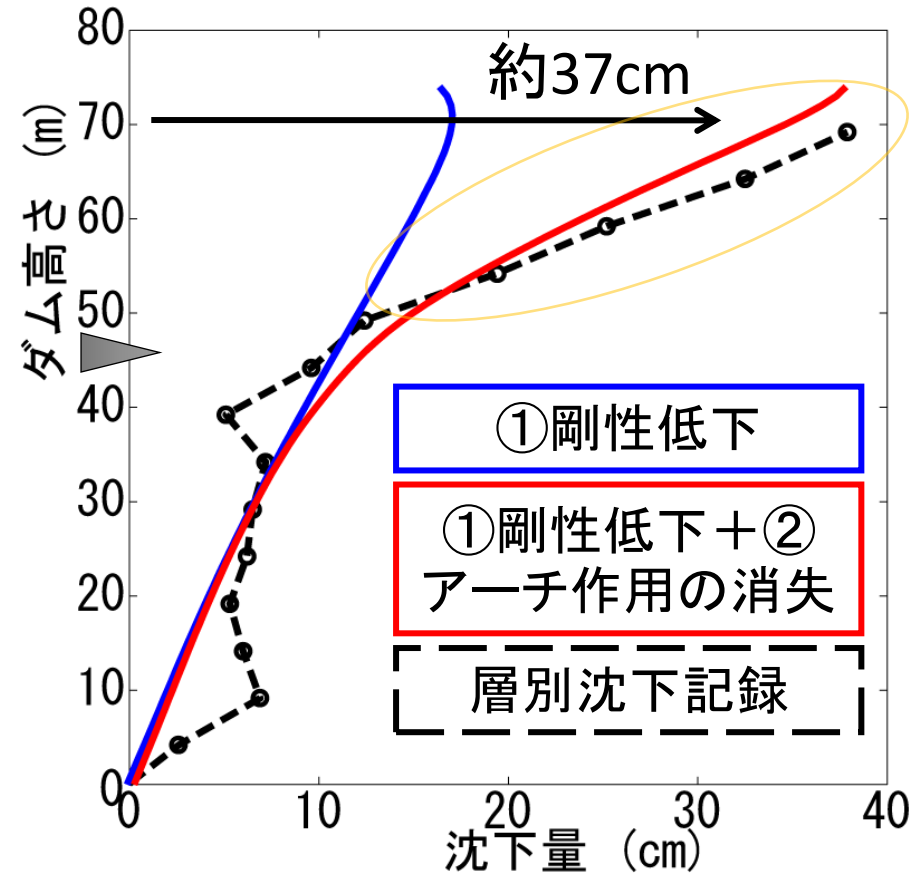
# 解析結果：沈下量分布

FEM計算結果：変形図

①剛性低下 + ②アーチ作用の消失



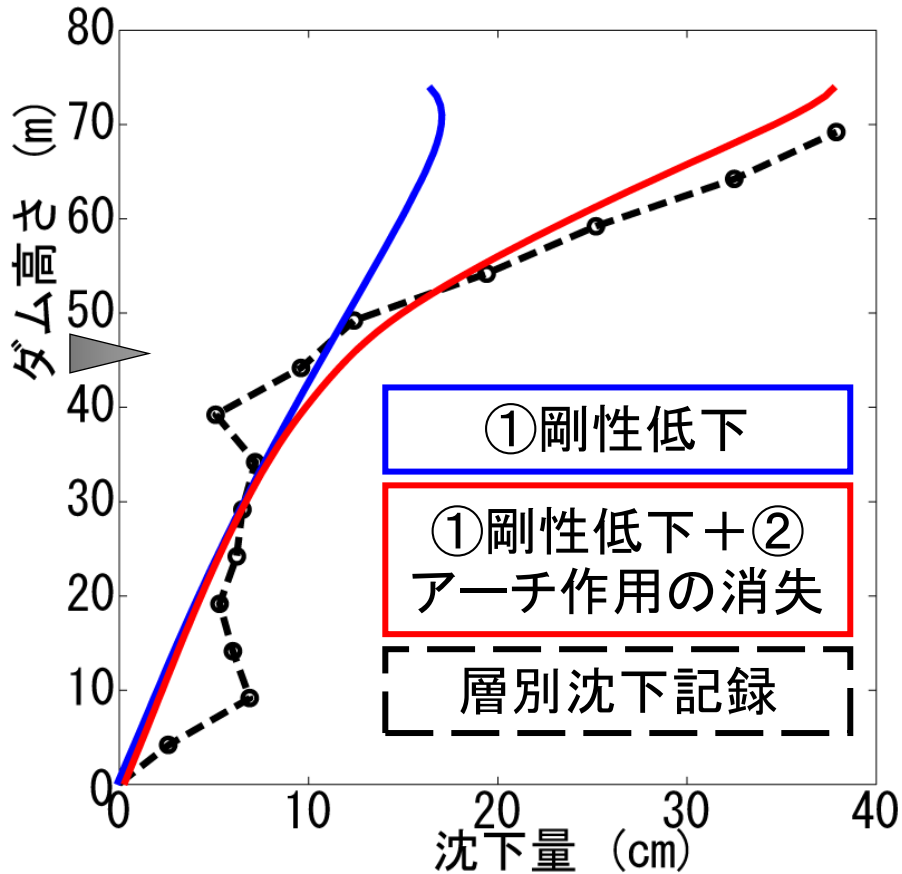
層別沈下記録とFEM計算結果



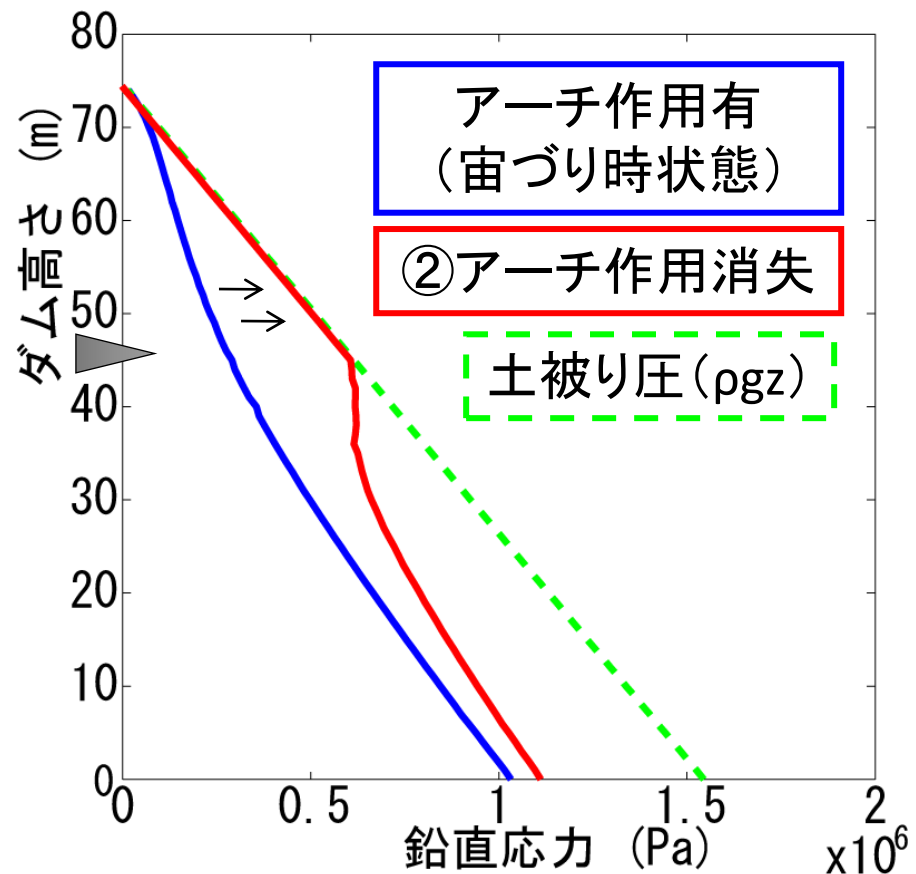
- アーチ作用の消失を考慮したモデルでの沈下量は約37cm
- ダム上部の沈下量の増大も概ね再現できた。

# 解析結果:鉛直応力分布

## 層別沈下記録とFEM計算結果



## コア内鉛直応力分布(FEM計算結果)



通常状態のコア内鉛直応力はアーチ作用により土被り圧の50~70%. アーチ作用が消失した箇所では土被り圧と等しくなり、それ以深でも鉛直応力(拘束圧)が増加した結果、強震動に耐えた.

## まとめ

令和元年度土木学会功績賞受賞に謝意表明し関連話題を提供した

(1)直下地震の震源近傍における地震動強さに関する研究成果や1995年阪神・淡路大震災後に発表された土木学会提言におけるレベル2(L2)地震動などについて、簡単に解説。関連して、以下を紹介

(2)2008年岩手・宮城内陸地震時、荒砥沢ダムで観測された強震動や沈下量から、周期延伸と揺すり込み沈下により耐震性能が増強

1. 本震時、監査廊で1024gal、ダム天端で525galの地震動加速度が、ダム天端コア部で約40cm、フィルター一部で約20cmの沈下量が観測

2. 観測の非線形地震応答から揺すり込み沈下の発生過程が判明

1)本震時、ダムの振動周期は0.35秒から1.2秒に伸長

2)コアの平均せん断ひずみは、 $1.5 \times 10^{-3}$ まで増加

3)コアのG~ $\gamma$ 関係は、 $\gamma$ の増大時と減少時で異なり、Gの減少は地震後も残留（SHAKEなどの等価線形解析のG~ $\gamma$ 関係とは相違）

4)ダム上部でコア・フィルター間のアーチ作用が消失し、沈下と鉛直応力が急増したことも、ダムの耐震性能維持に寄与と推定



**ご清聴ありがとうございました**

