

2018/10/24

資料 3総5-(5)

地震本部 政策委員会  
第3期総合的かつ基本的な施策に関する専門委員会

(公社)地盤工学会 からの意見発表  
(presentation)

1. 長周期地震動に対する  
地盤工学分野での取り組みの現況
2. 地震本部への地盤工学会からの要望事項

元地盤工学会会長 浅岡 顕

# 1 長周期地震動に対する 地盤工学分野での取り組みの現況

$$\text{地震動特性} = \text{震源特性} \times \text{経路特性} \times \text{サイト特性}$$

地震の励起                      減衰・増幅と改質

地震本部の強震動研究では、上式により工学的基盤 ( $V_s=300\sim700\text{m/s}$ )での地震動を計算・出力している。

しかしその地震動が、工学的基盤から上の軟弱地盤や人の住む表層でどれほどの強震動を引き起こし、どのような地盤変状を発生させて、いかなる災害に結びつくのか？ それを解く地盤力学を抜きにしては、その街のどこをどう直せばいいのか、防災の課題解決には結びつかない！

# 表層堆積地盤の変状を解く地盤力学

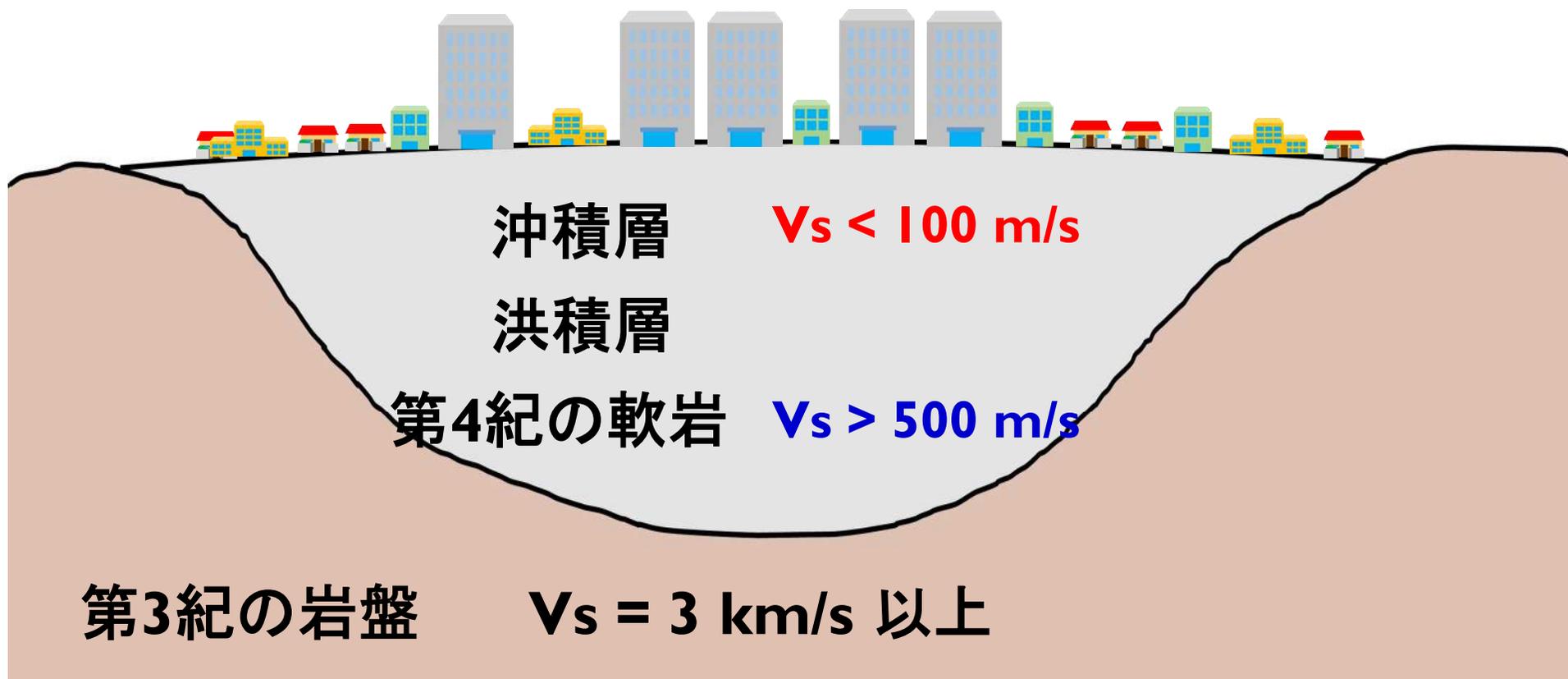
砂地盤の液状化や粘土地盤の流動、斜面の滑り破壊などの地盤変状は地盤の塑性変形の帰結であり、塑性変形のメカニズムは弾性（波動）理論の枠組みの外にある。

地盤変状の数値的実現には、地盤力学（弾塑性・間隙水～土骨格連成（多相混合体）の有限変形の時刻歴解析）による計算が必須

今日は**長周期地震動と大都市の防災問題**に絞ります。

# 東京・名古屋・大阪など・・・広大な堆積盆地に立地

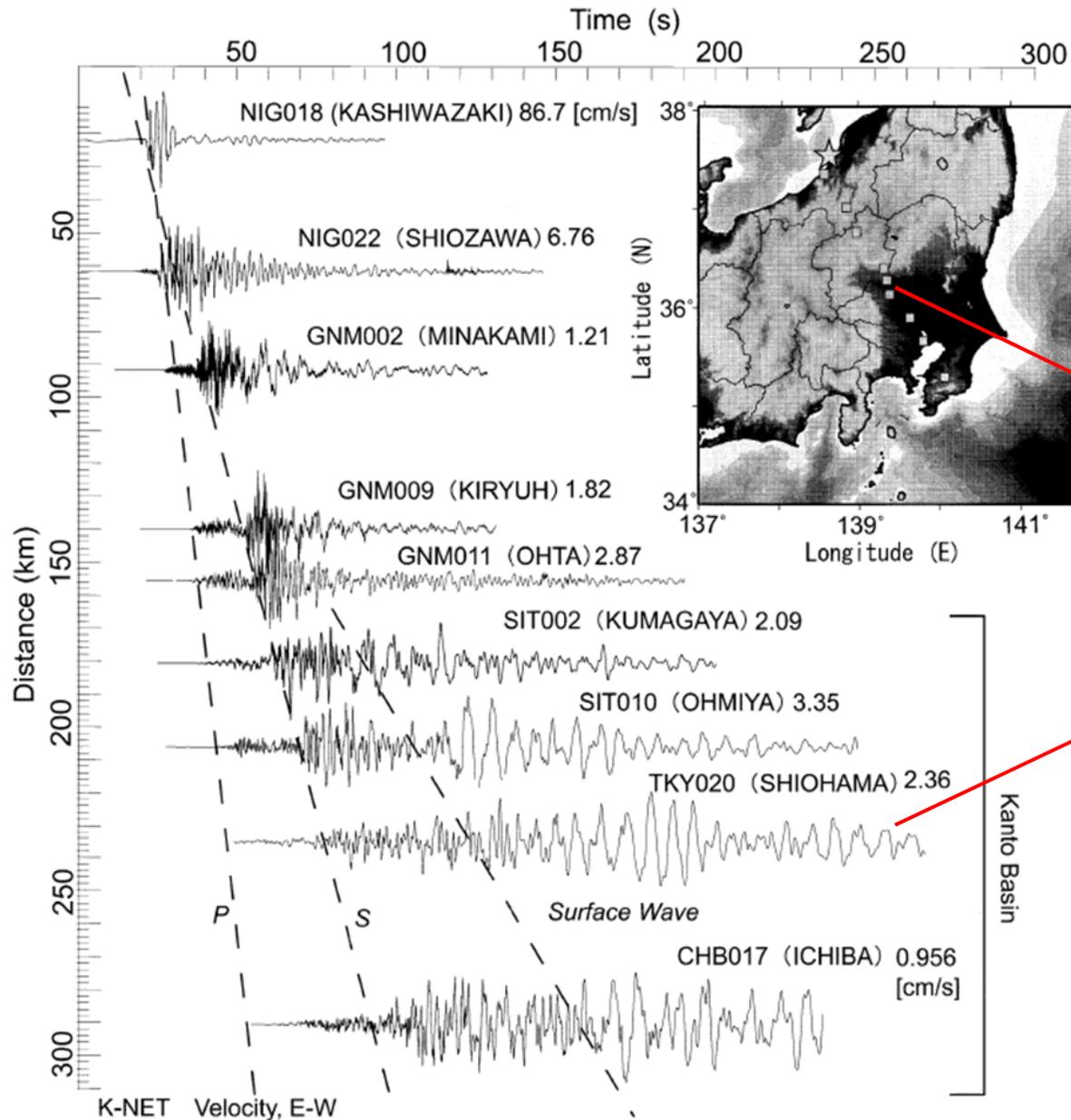
## 「お盆」とその中の堆積平野の速度コントラスト



東京・埼玉・千葉・神奈川の首都直下地震域は、差し渡し約150km程度、厚さは1km弱から数キロの、広く薄いお盆の中。

# 堆積盆地と言え、表面波！

## 中越沖地震(2007)における 関東平野での表面波(長周期地震動)の発達の様子



9観測点の速度波形東西成分は最大振幅で正規化し、最大速度を右上に表示している。右上の地図には観測点の位置を示す。

このあたりは荒川流域に沿って南下

東京(塩浜)  
震度3、周期7秒  
3分間継続

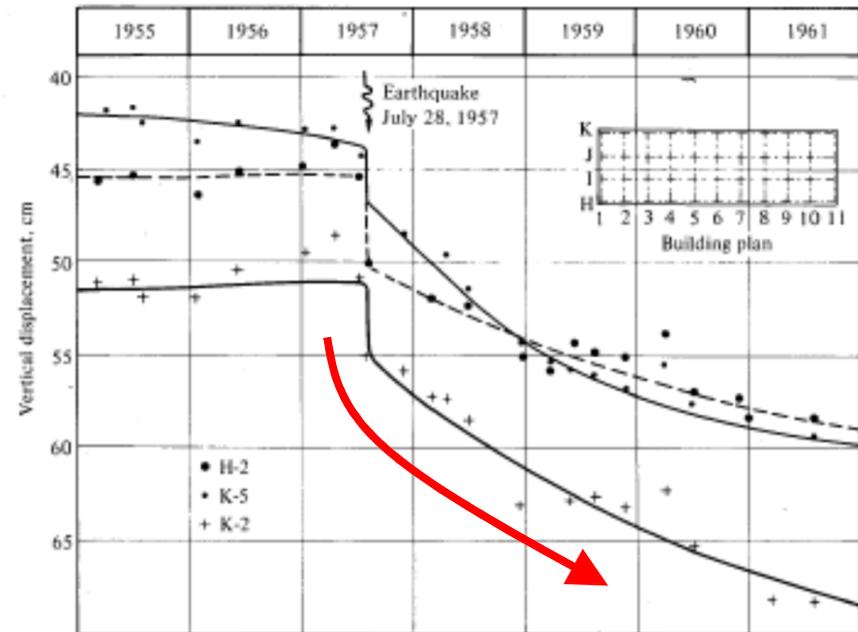
古村孝志, 武村俊介, 早川俊彦(2007):  
2007年新潟県中越沖地震(M6.8)による首都圏の長周期地震動, 地学雑誌,  
Vol.1, 16, No.3-4, pp.576-587.

長周期地震動は、これまで地震には「鈍感」と言われていた**粘土地盤**に大変状をもたらす！  
・・・**地盤力学の最新の知見**！



1985 Mexico City earthquake

粘性土地盤の支持力低下



1957 Mexico earthquake

粘性土地盤の沈下加速化

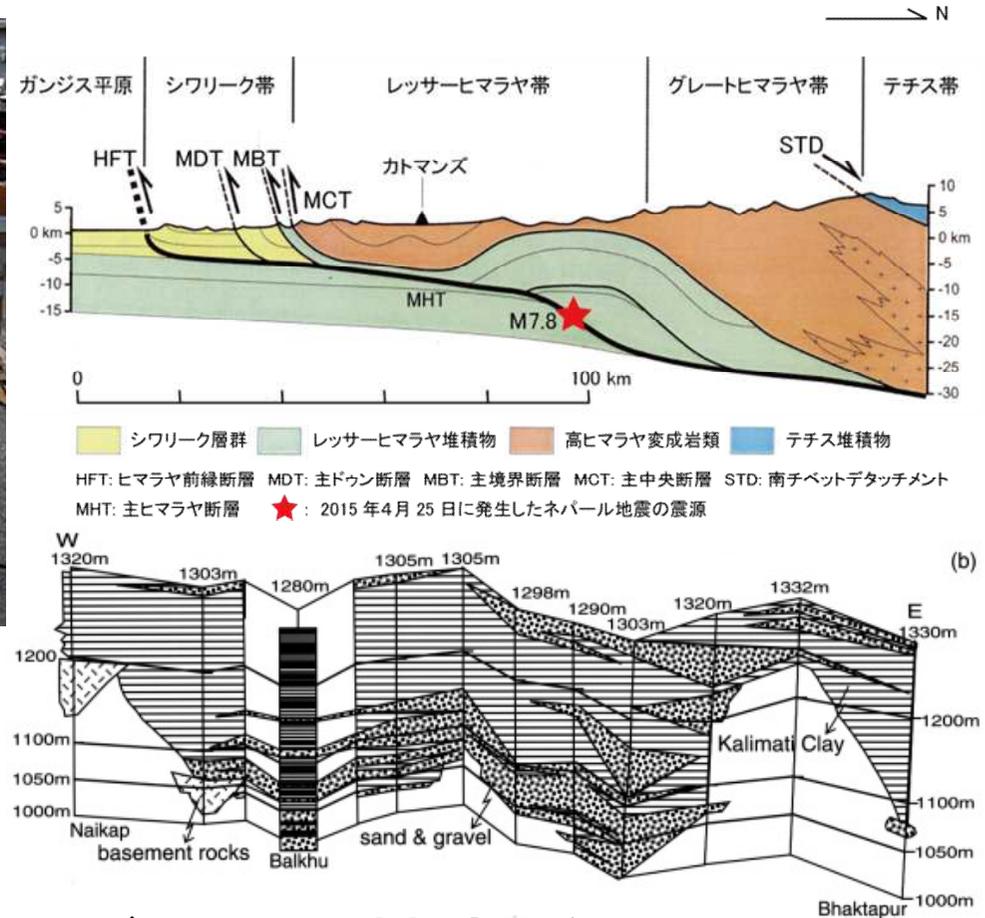
湖を埋め立てたメキシコ盆地は高含水比粘土が厚く堆積

長周期地震動は、これまで地震には「鈍感」と言われていた**粘土地盤**に大変状をもたらす！

…**地盤力学の最新の知見**！

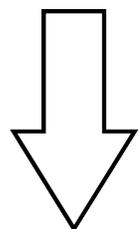


2015 Nepal earthquake



震源から離れたカトマンズ盆地に被害が集中。  
鋭敏な粘性土が厚く堆積

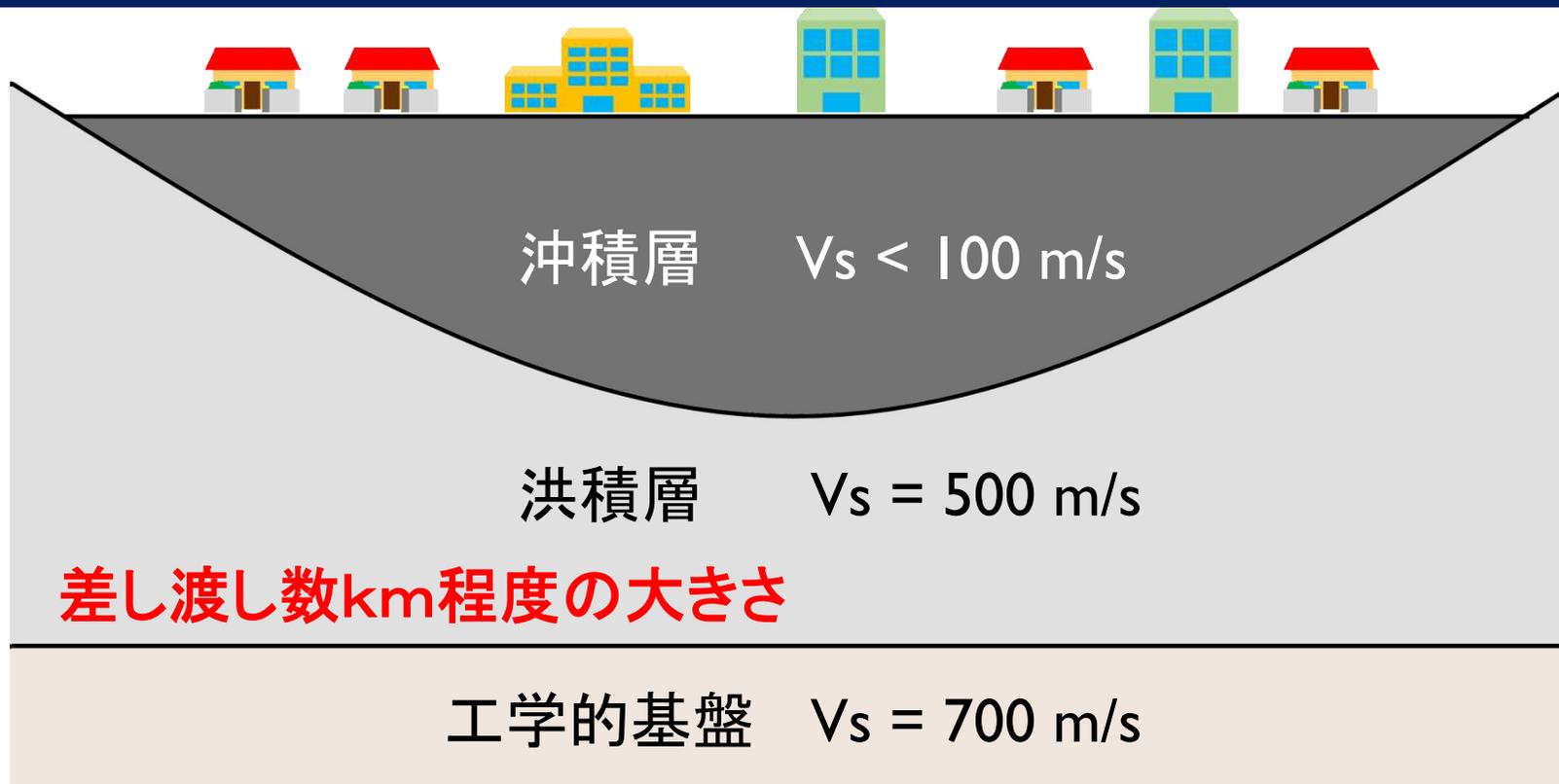
- ① 厚く堆積した軟弱粘土地盤では、入力地震動の長周期成分が増幅される。
- ② 地盤の不整形性(谷地形・盆地地形)から励起される長周期の表面波が、直達実体波と複雑に干渉する。



地盤の変位を大きく、  
繰返しの回数も多くなる。

もともと地震に対して「鈍感」と言われていた粘土地盤だが、偏荷重を受ける場所(例:堤防と盛土直下、斜面など)では大きな揺れによって攪乱され(乱され)、また、乱れによって地盤の固有周期がさらに長周期化することでいっそう揺れが大きくなり、沈下や滑り、側方流動などの大変状をもたらす。粘土地盤の変状は、地震後も長く進展して、継続する。

このとき一番問題なのが、堆積盆地内に無数に存在する、  
規模の小さな沖積谷などの **不整形地盤**



規模は小さく、速度コントラストも低く、卓越周期は少し短くなる。  
しかしなお、表面波の発生、S波との干渉は同じように起こる。  
防災上はこれが恐怖

## その典型事例が3. 11での**浦安の液状化**

実体波の入力地震動は50ガル以下と小さかった。  
(計測地表最大も150ガルにも届かなかった。)

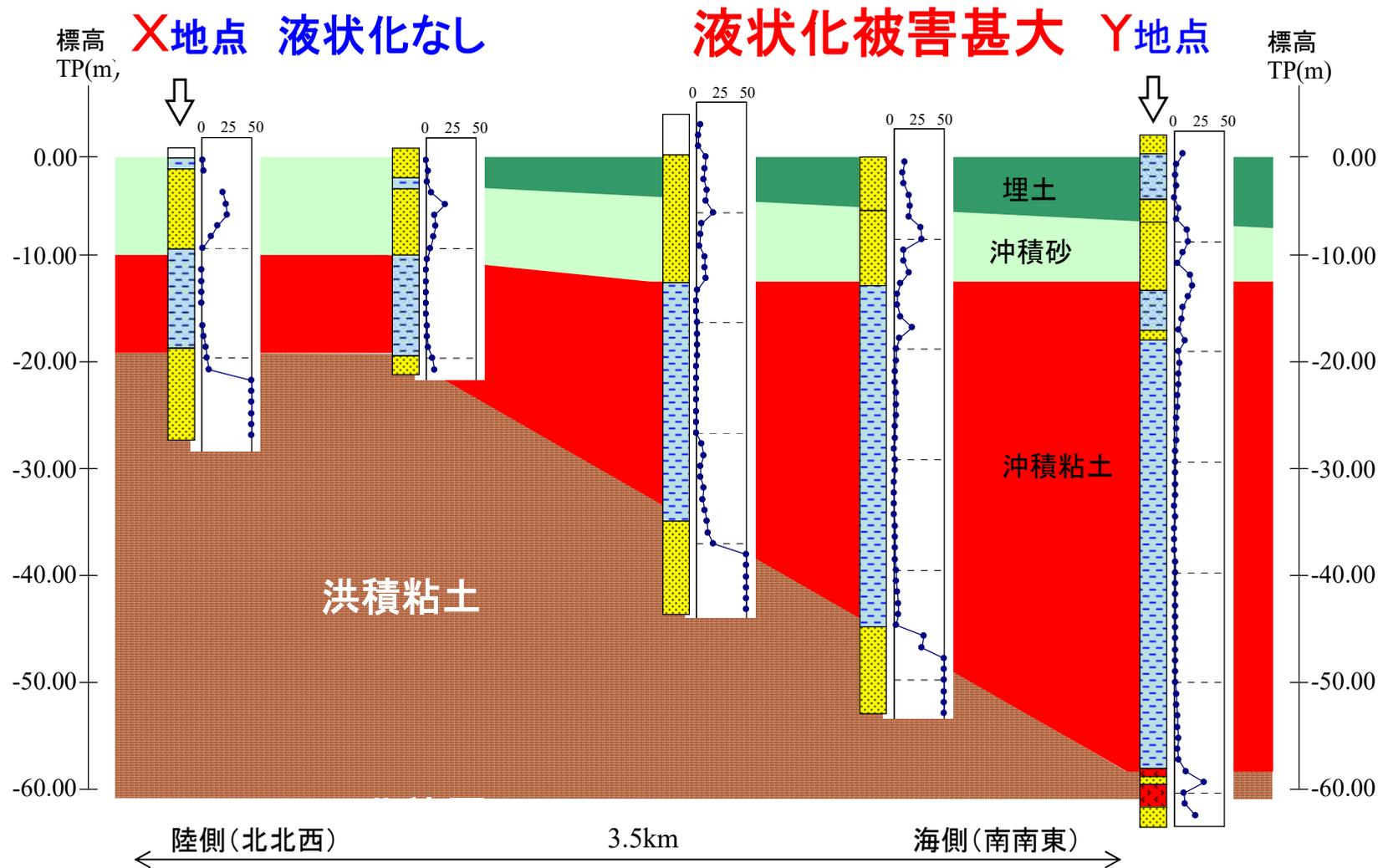
それでも、細粒分(粘土分)を多く含むドロドロの  
ヘドロのような砂までが広範に液状化した！

それは何故か？

# 浦安市の地層断面は、横から見ると

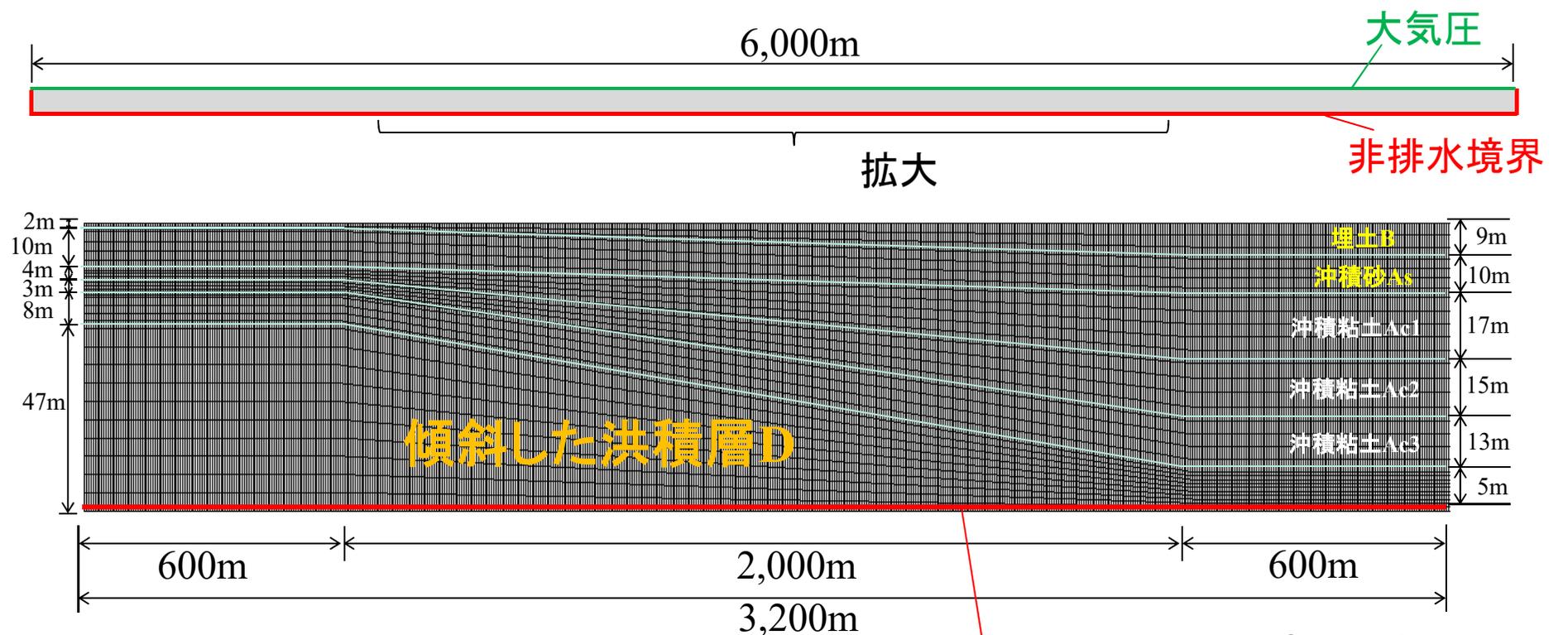


# こうなっていて、（縦横比は誇張）



液状化被害が軽微なXから甚大なYに向かって基盤が傾斜した不整形な地層構成。陸側は粘土層厚10mだが、海側は50m以上と厚い。

# 地層傾斜は僅か3度.....浦安地盤の2次元地震応答解析



※鉛直方向に9倍に拡大して表示

## 水理境界

上端は大気圧境界

下端および両側面は非排水境界

## 地震動

13 下端節点に等しく加速度を入力

## 粘性境界条件

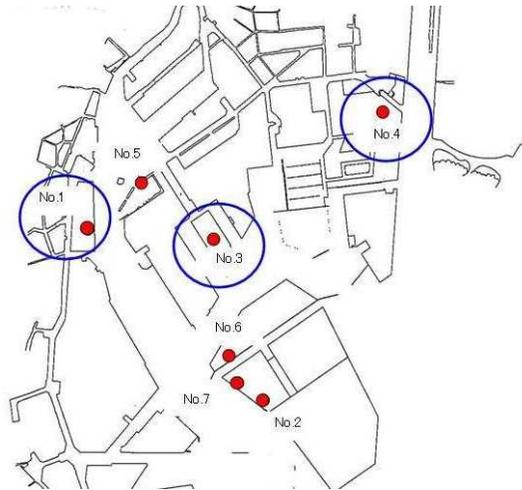
エネルギーの散逸を表現

$V_s = 400\text{m/s}$ を仮定

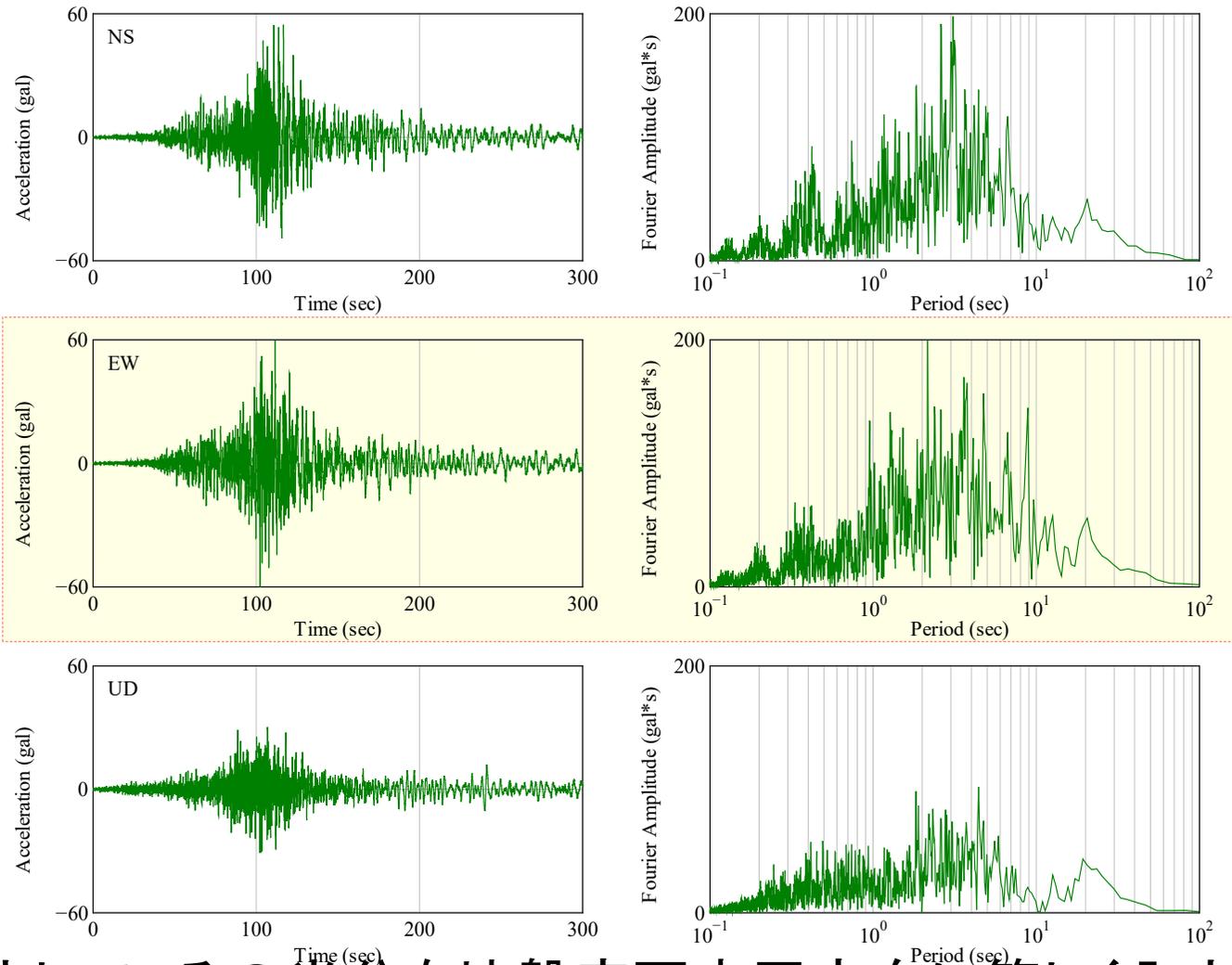
側方境界要素単純せん断変形境界

# 届いた地震動は小さいが長周期成分を含み継続時間も長かった

## 品川地震観測所



## GL-36m 本震



**2E波**として、その半分を地盤底面水平方向に等しく入力

# 地表K-netの**実測値**と**応答計算**はかなり一致したので

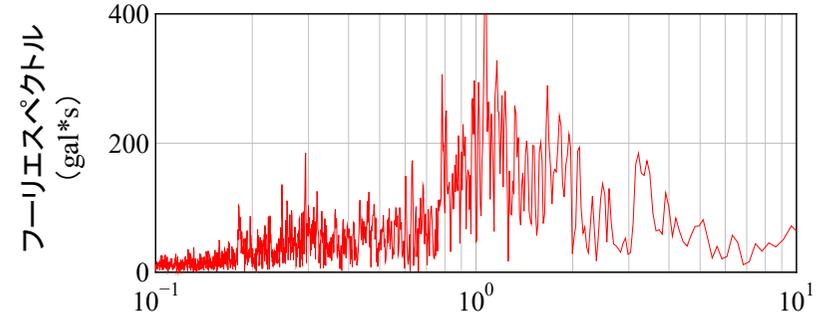
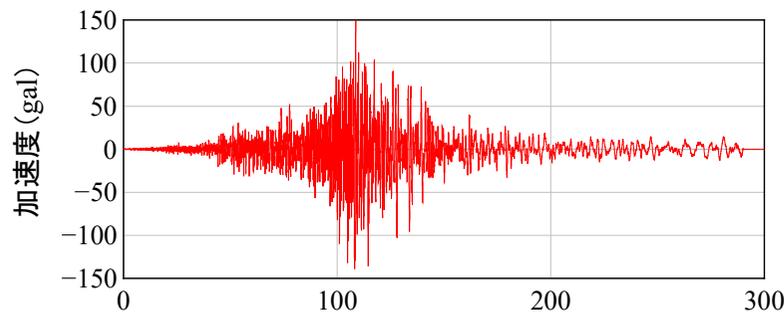


入力地震動の妥当性には  
今はこれ以上問わないで、

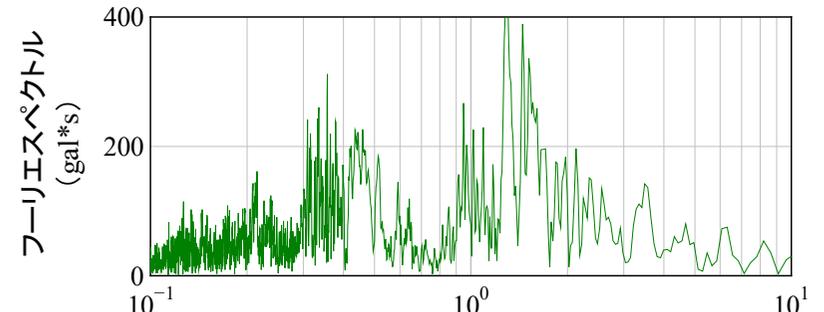
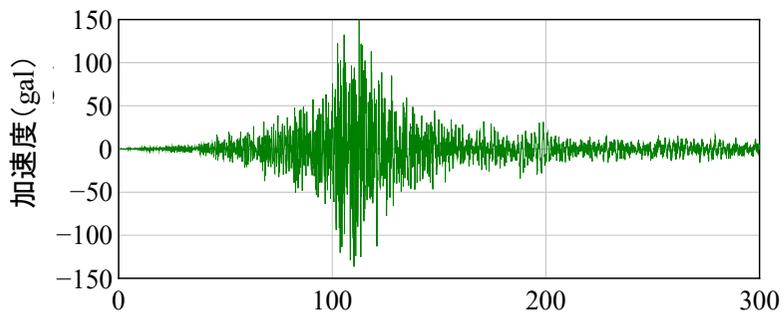
1~10秒が卓越



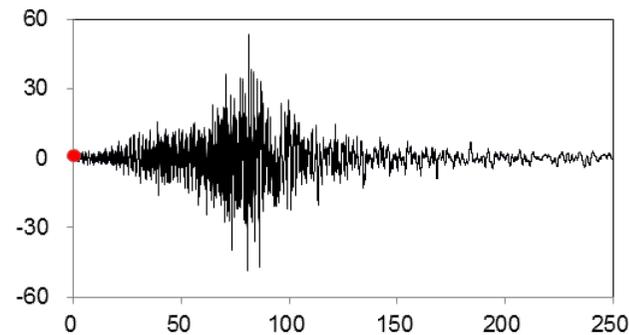
実測値  
K-net



計算結果  
X地点

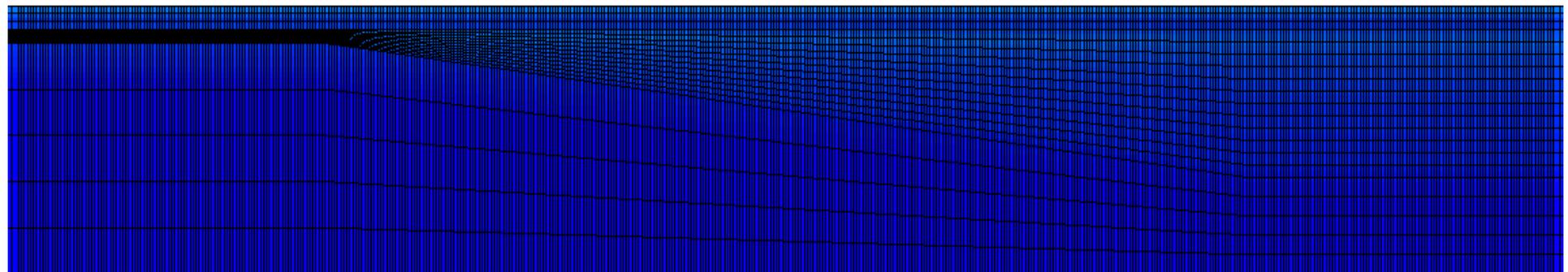


# 地盤のせん断ひずみのアウトプット・・・地層傾斜の影響



～地震中は下からの直達S波と表面波が重なってひずみを大きくし、  
地震後も表面波がいつまでも行ったり来たりして被害を拡大～

0y. 0d. 0h. 0m. 0.00999sec. -- 1010step



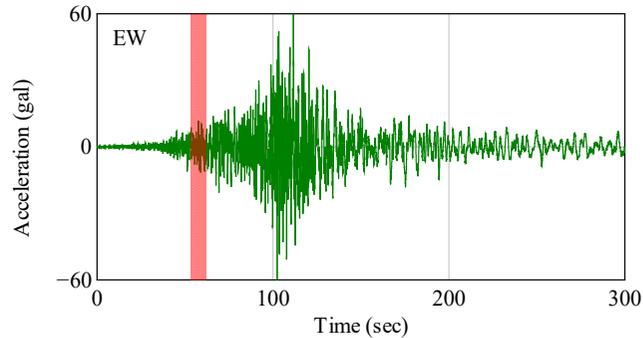
せん断ひずみ分布

地層傾斜の真上あたりで大きな液状化被害があった。

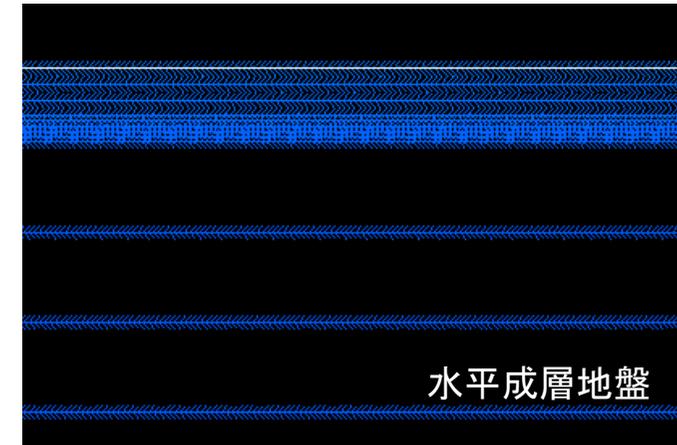
速度ベクトルを出力すれば  
表面波が  
よく見える

# 地層傾斜により**表面波**が発生 ～速度ベクトルの縦成分を着色～

細かく出力 50秒～60秒



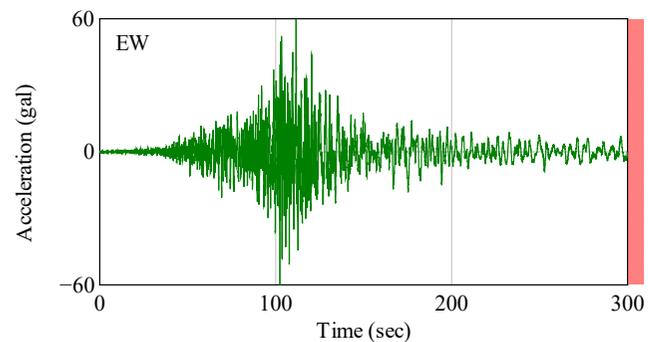
水平成層では地表での液状化なし



表層で反時計回りに巻き上げるような表面波(Rayleigh波)が発生。  
Rayleigh波は傾斜基端部で発生し、図中の右側へ進行していく。  
水平成層地盤では発生しない。

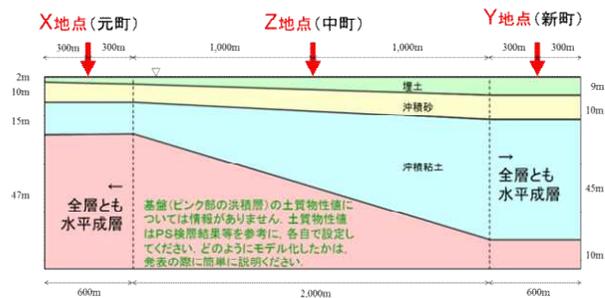
# なかなか減衰しない

細かく出力 300秒～310秒



なかなか減衰せずに、表層を滞留する。

二次元モデル

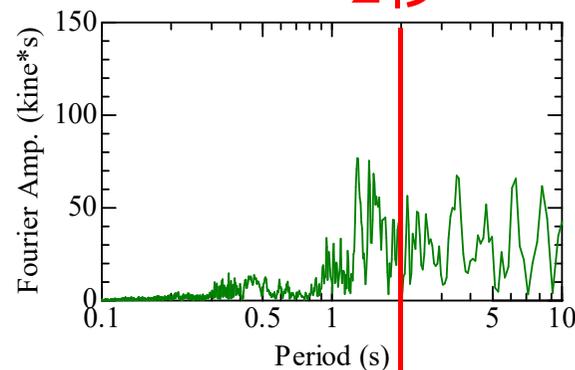
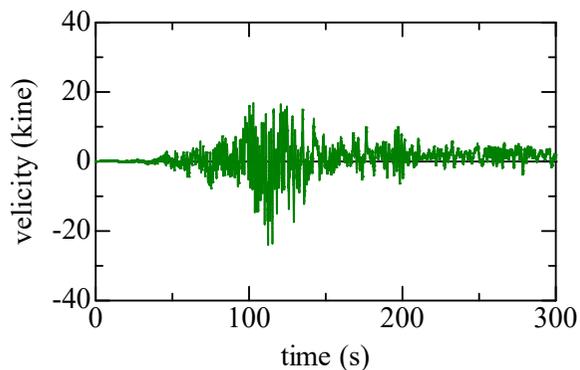


# 地表面の速度応答

2秒

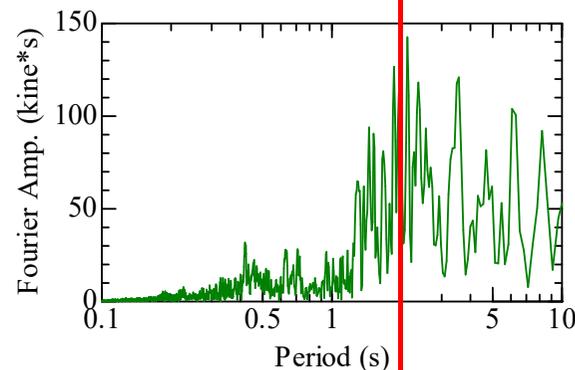
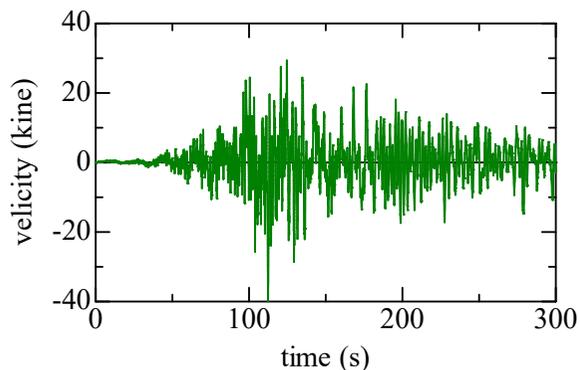
最大20kine程度

X地点



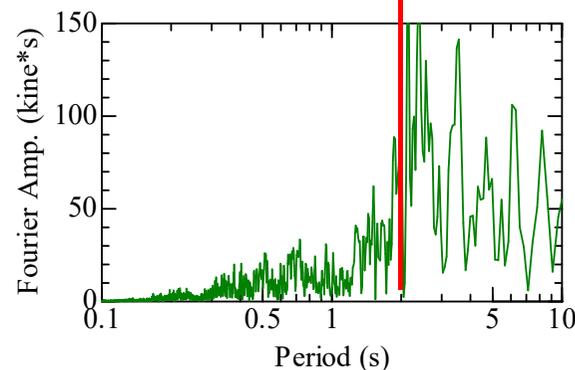
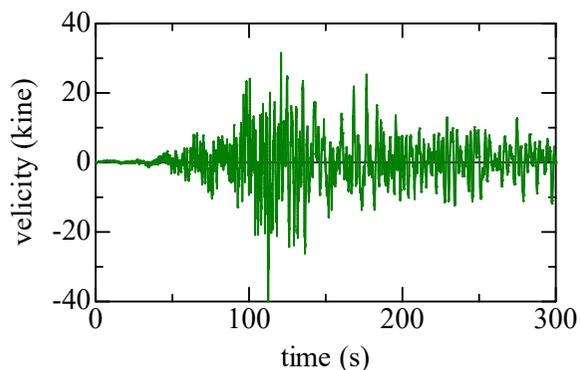
最大30kine程度

Y地点

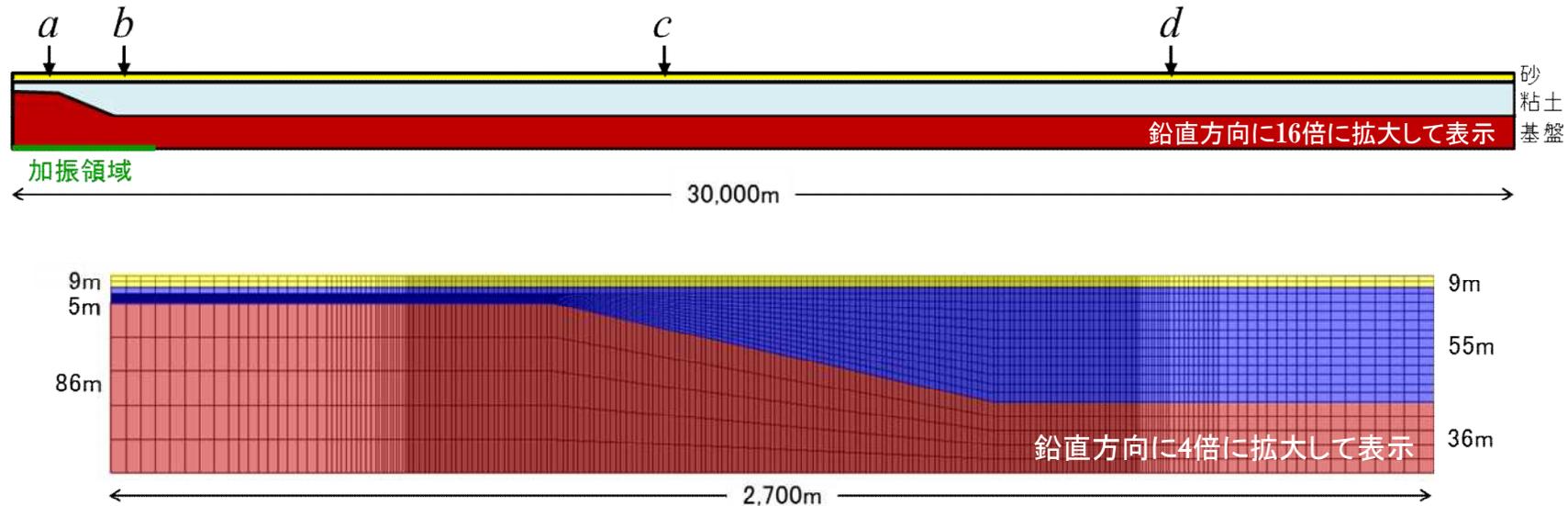


最大40kine程度

Z地点



# 縦断的に長く(30km)見ると



## 水理条件, 境界条件

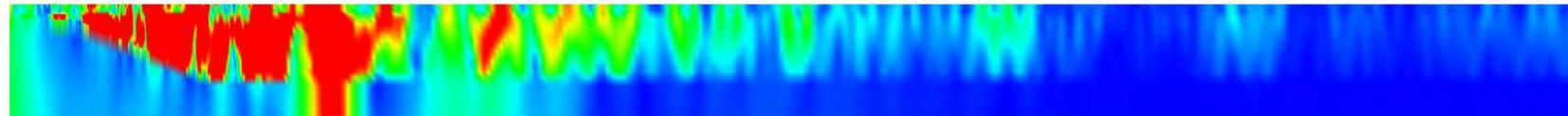
- 水理境界は, 地表面が水位面と一致するよう水圧を常にゼロとし, 下端と両側面は非排水とした.
- 境界両側端で側方境界要素単純せん断変形境界を設定. 同時に, 右端で反射波が生じないように, 端部から幅1,000mの領域で, 躍度, 加速度, 速度の値を1秒毎に強制的にゼロにした.
- 加振領域を含む地盤底面全節点に  $V_s=400\text{m/s}$  に相当する粘性境界.

# 縦断面に沿い、地盤変状が不均一に発現！

## せん断ひずみの経時変化

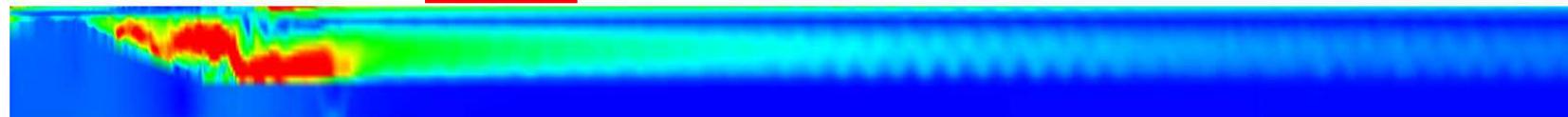


地震入力から100秒後



地震入力から200秒後

 **e地点**



地震入力から800秒後

0%  0.1%

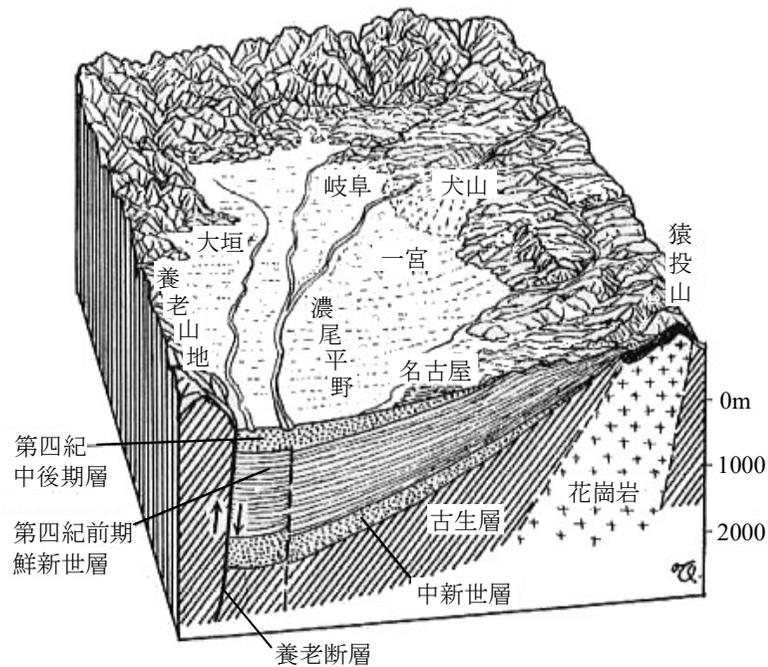
表層砂のひずみ発生の様子は非一様であり、特に傾斜部より右側の一部で局所的に大きい(e地点)

均質一様な砂質地盤を想定したが、非一様な被害が発生

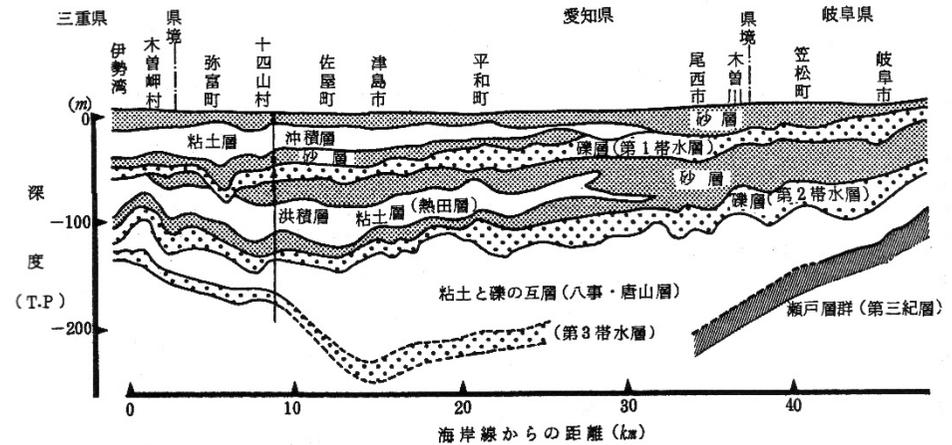
浦安のような地形は、  
特殊ではなく、実は  
東京、大阪、名古屋どこでも**無数**に見られる

たとえば  
濃尾平野の**名古屋市西郊**

濃尾堆積盆地は北東から南西に向けて傾斜。  
 この中に無数の、危険な**不整形**の微地形が存在する。



浅岡美穂, 井関弘太郎(1966): 愛知県の地理 日本地理集成, 光文館

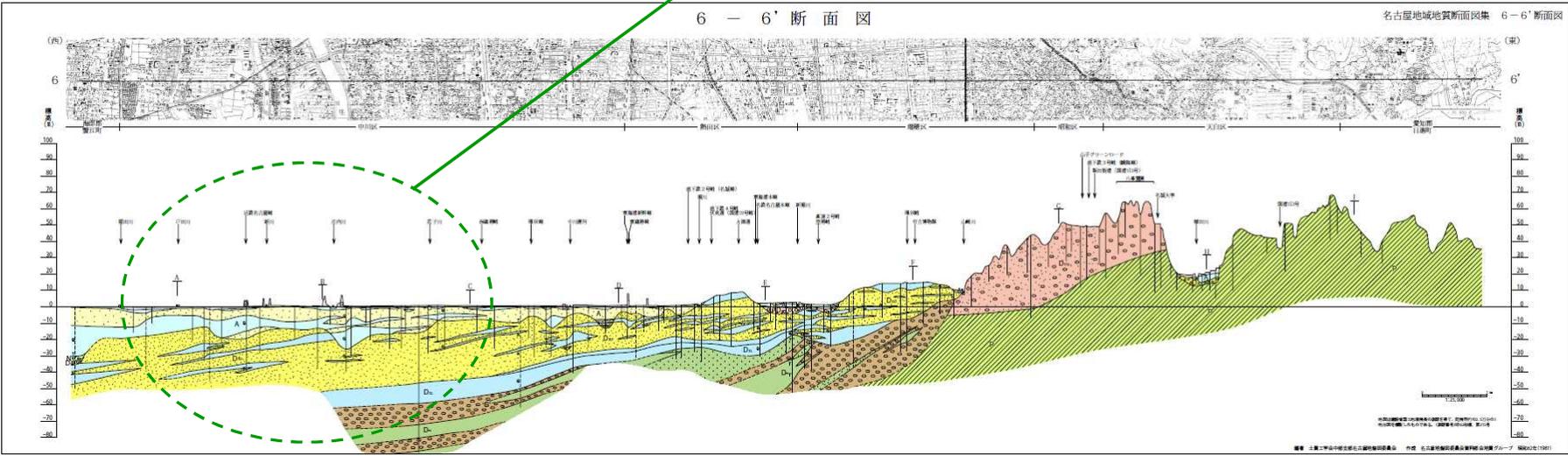
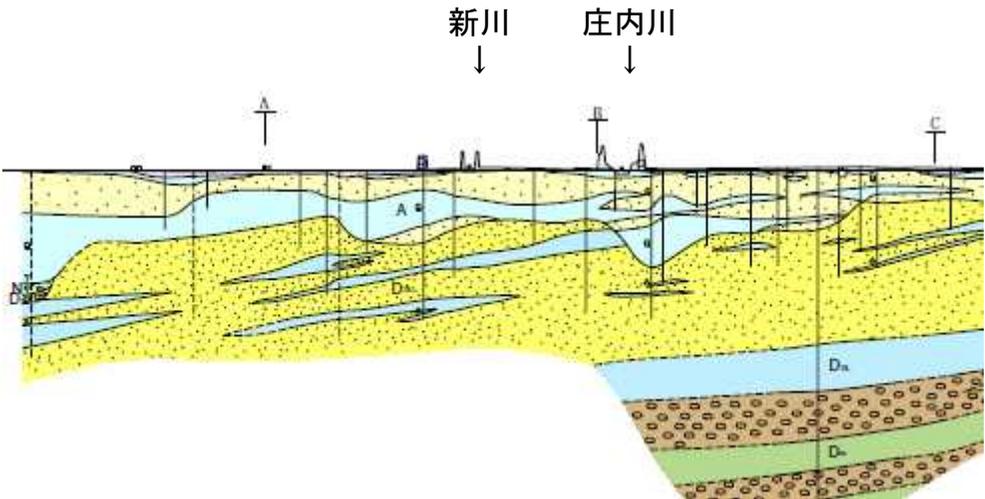
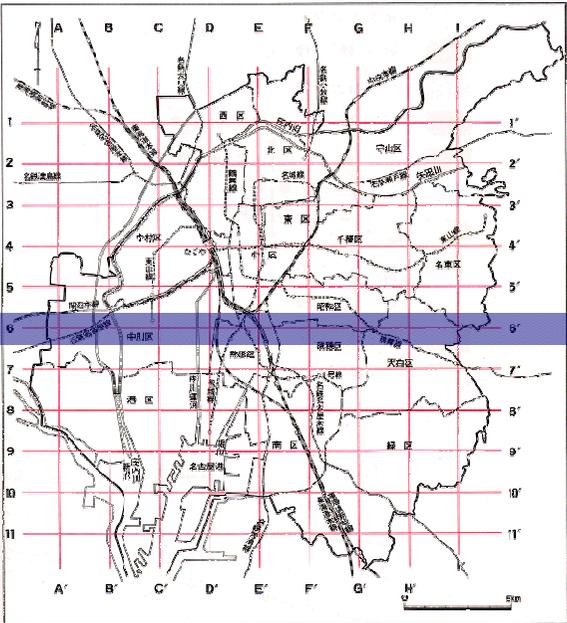


東海三県地盤沈下調査会編 (1978): 昭和52年における濃尾平野の地盤沈下の状況



# 沖積層が軟弱で

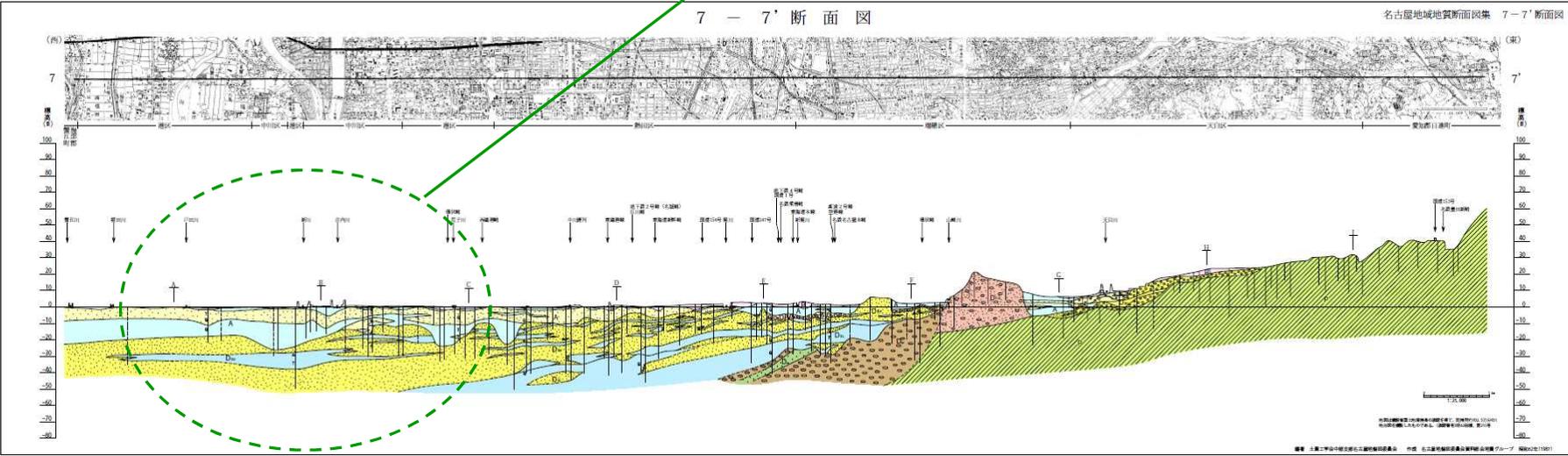
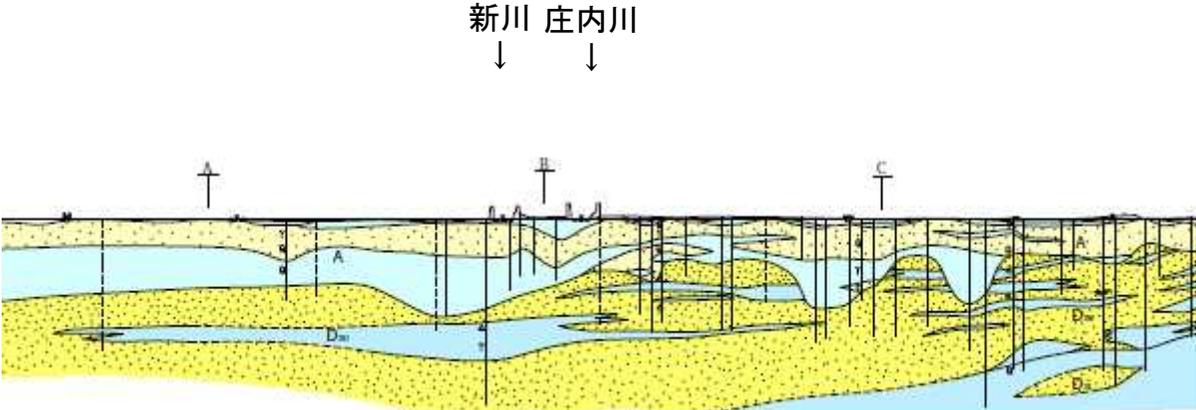
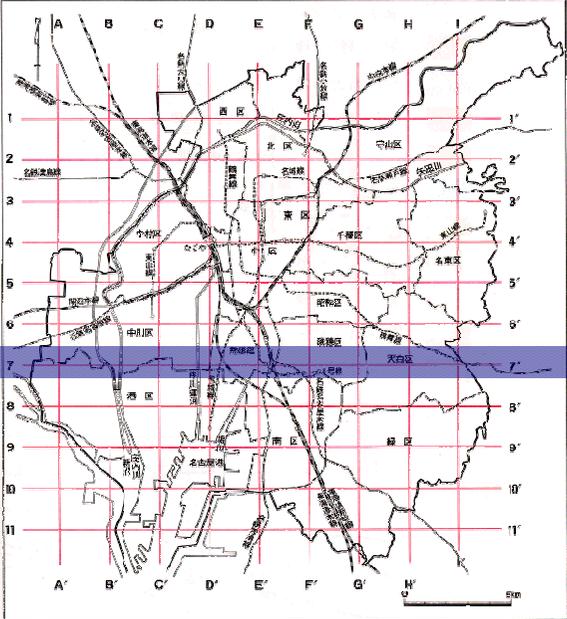
最新名古屋地盤図(土質工学会中部支部)



編集 土質工学会中部支部名古屋地盤図編集委員会 作成 名古屋地質調査会 地盤図集 6-6' 断面図(1987)

# 地下水位は高く

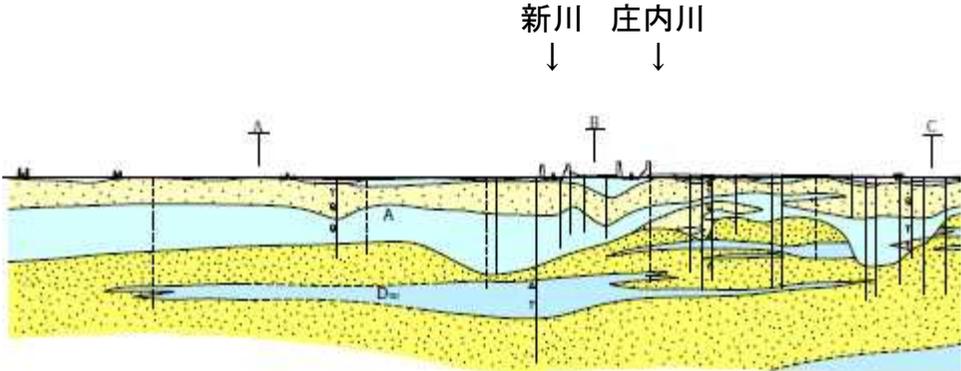
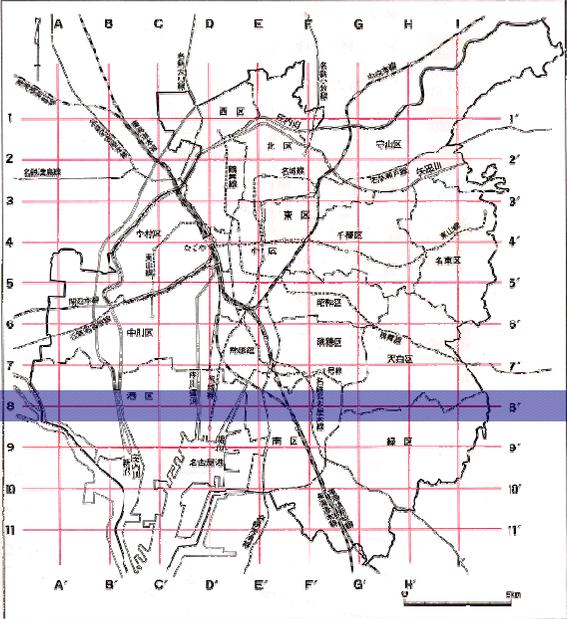
最新名古屋地盤図(土質工学会中部支部)



最新名古屋地盤図(土質工学会中部支部) 作成 名古屋地盤図集編纂委員会 編纂 1991年12月 発行 1992年12月 改訂 2011年12月 改訂 2011年12月

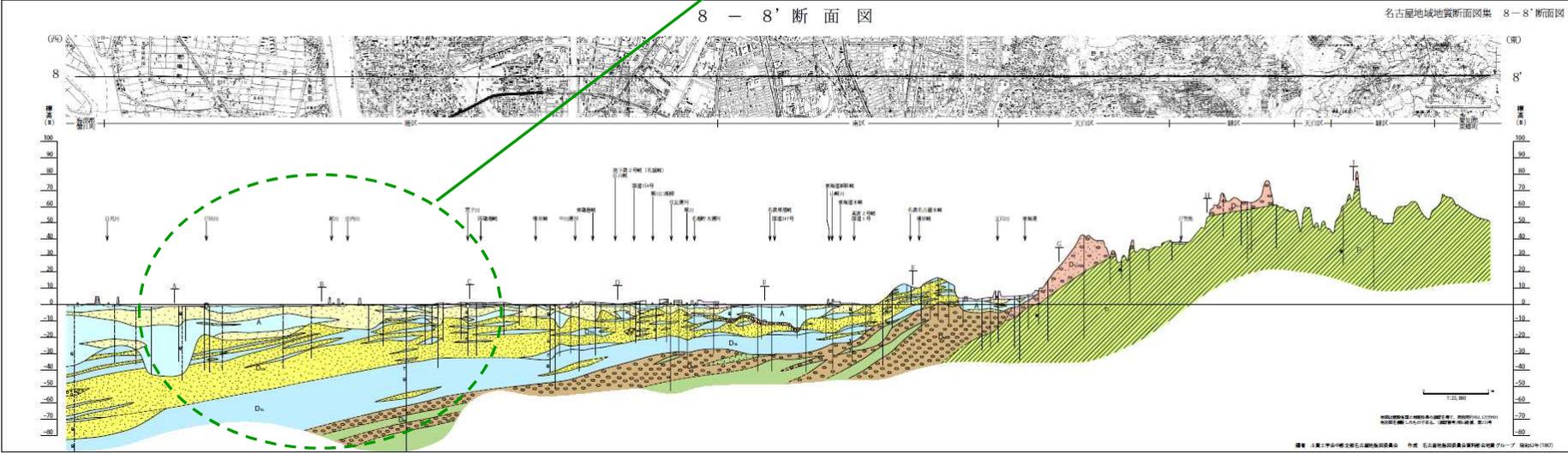
# 地層傾斜もあり

最新名古屋地盤図(土質工学会中部支部)



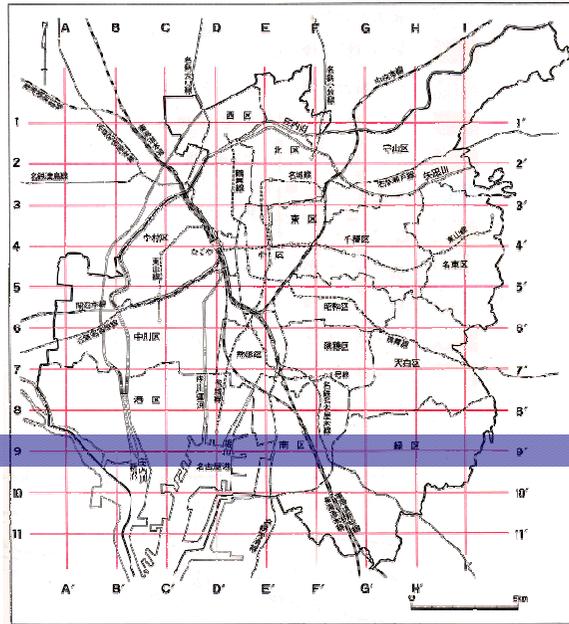
8 - 8' 断面図

名古屋地域地質断面図集 8-8'断面図

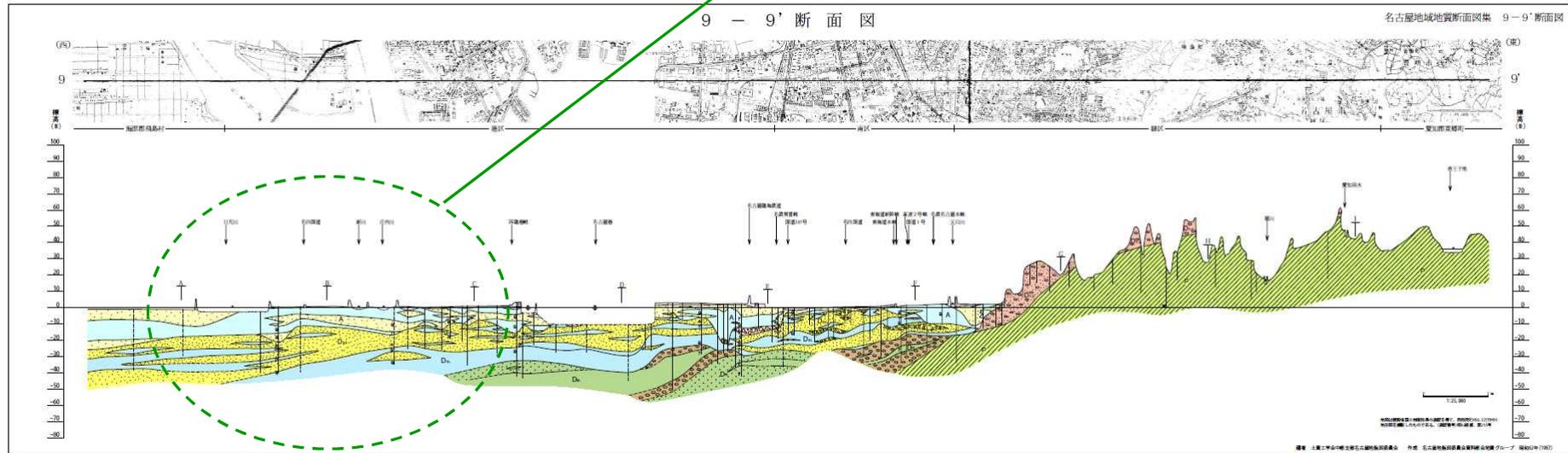
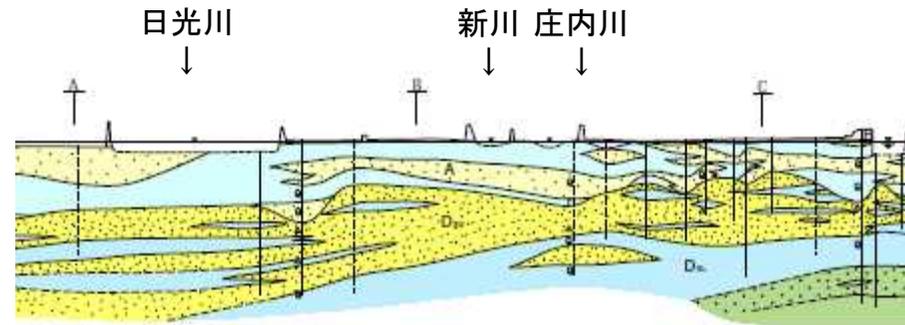


資料：土質工学会中部支部名古屋地盤図委員会 作成 名古屋地質調査会資料館公開データ 図録219(1997)  
 編者：土質工学会中部支部名古屋地盤図委員会 作成 名古屋地質調査会資料館公開データ 図録219(1997)

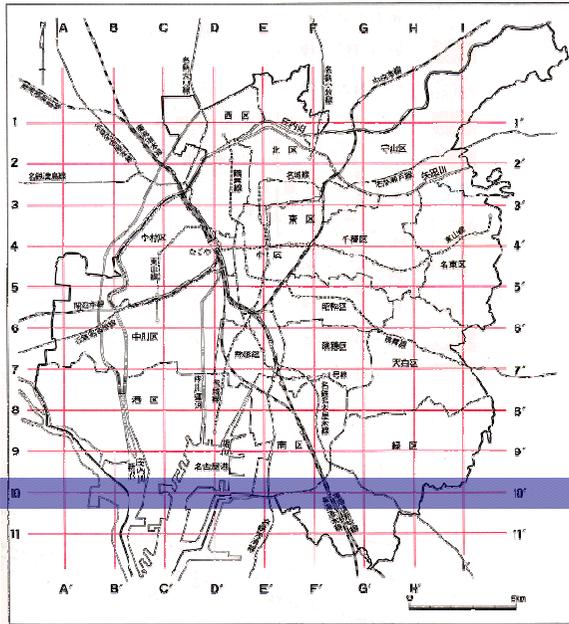
最新名古屋地盤図(土質工学会中部支部)



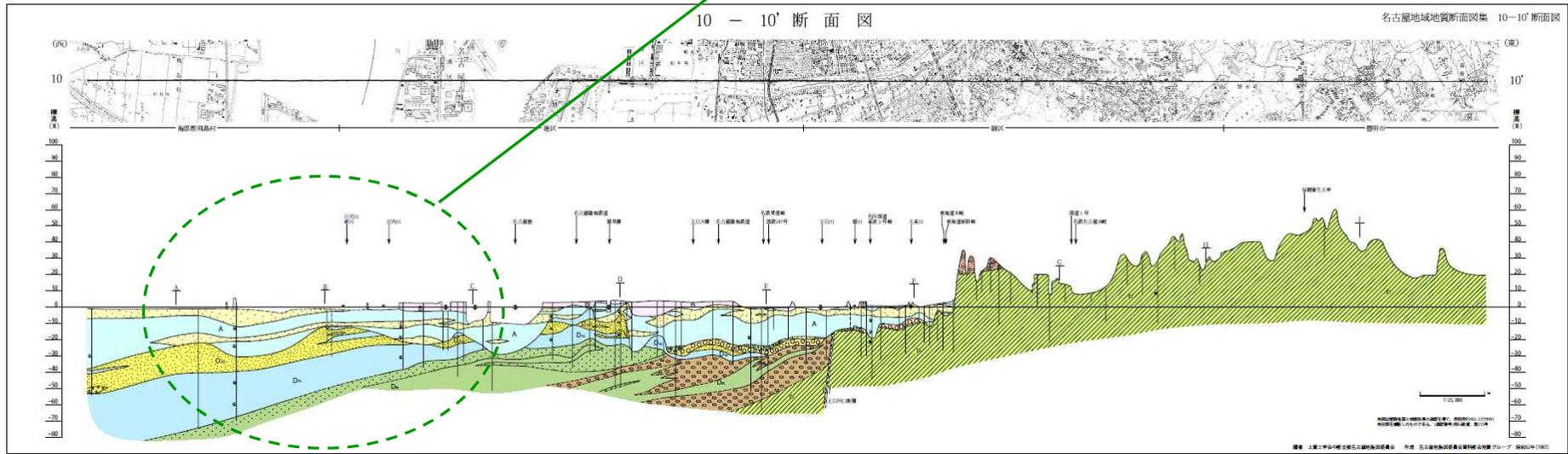
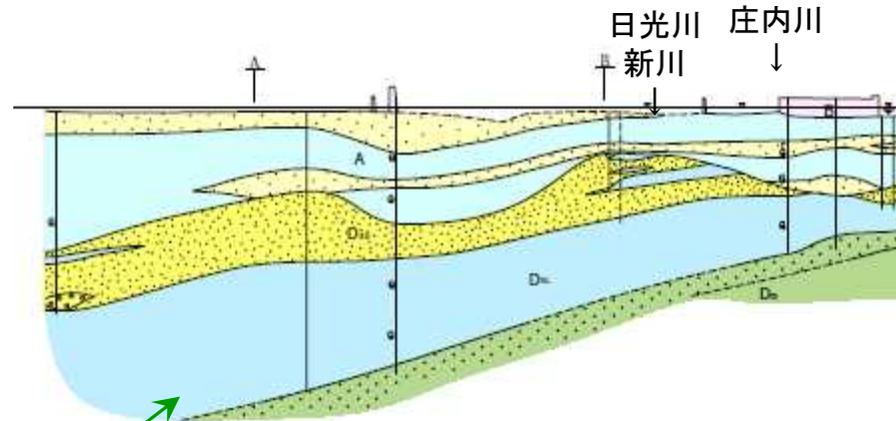
だから、次の大地震では、沖積の砂～粘土互層地盤には、液状化・地盤流動など大変状が出る。



最新名古屋地盤図(土質工学会中部支部)



さらに**ゼロメートル地帯**であることが被害を拡大する。



# 海拔ゼロメートル地帯！

東京・名古屋・大阪

3都市には共通して、

広大な**ゼロメートル地帯**がある。

**長周期・長時間地震動**により、

**沖積表層の軟弱粘土/砂互層地盤**に変状

が発生して、その上の**堤防**等が

**大規模に被災する！**

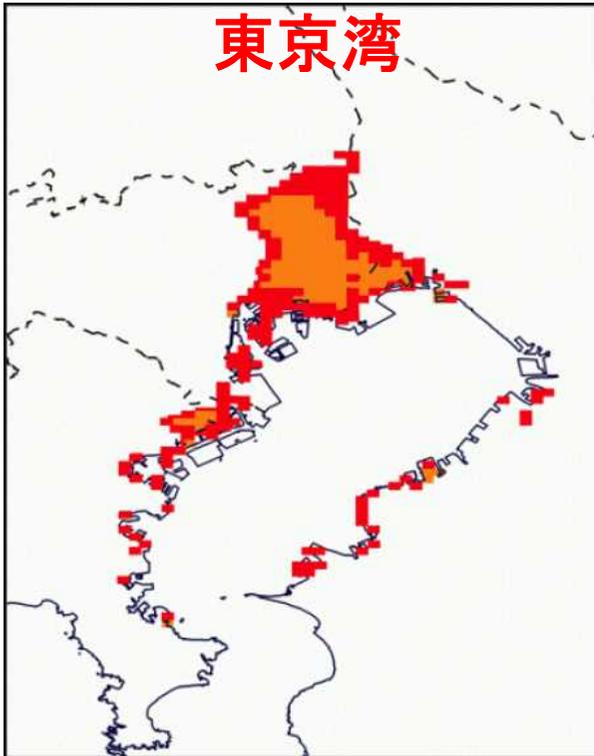
# 日本はゼロメートル地帯に**400万人**が住む！

東京**176万人**

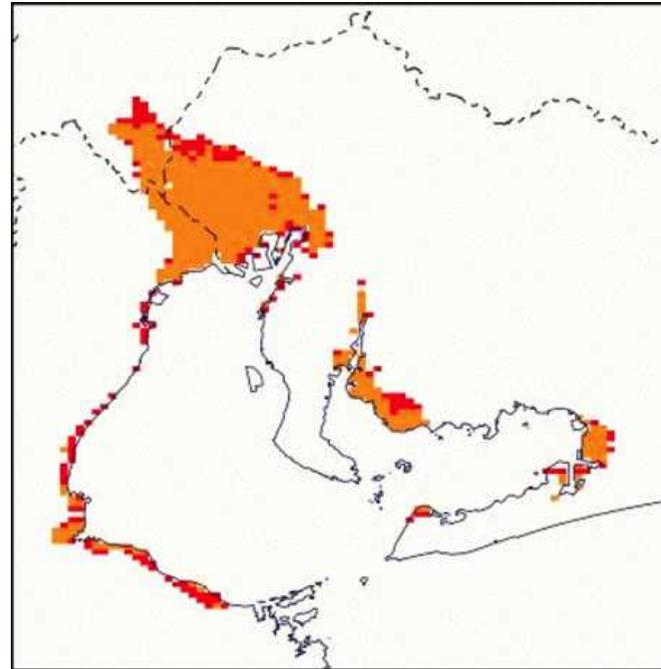
名古屋**90万人**

大阪**138万人**

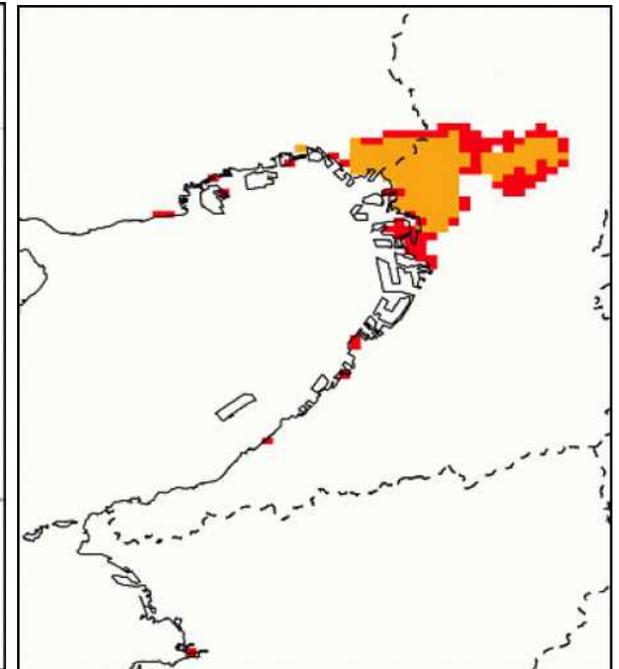
東京湾



伊勢湾



大阪湾



**116km<sup>2</sup>**

荒川・隅田川など

**336km<sup>2</sup>**

木曾三川・庄内川

**124km<sup>2</sup>**

淀川水系

ゼロメートル地帯の堤防は  
「揺れ」で、本当に大丈夫か？

名古屋圏での解析事例から

名古屋では、

① **名古屋港高潮防波堤**

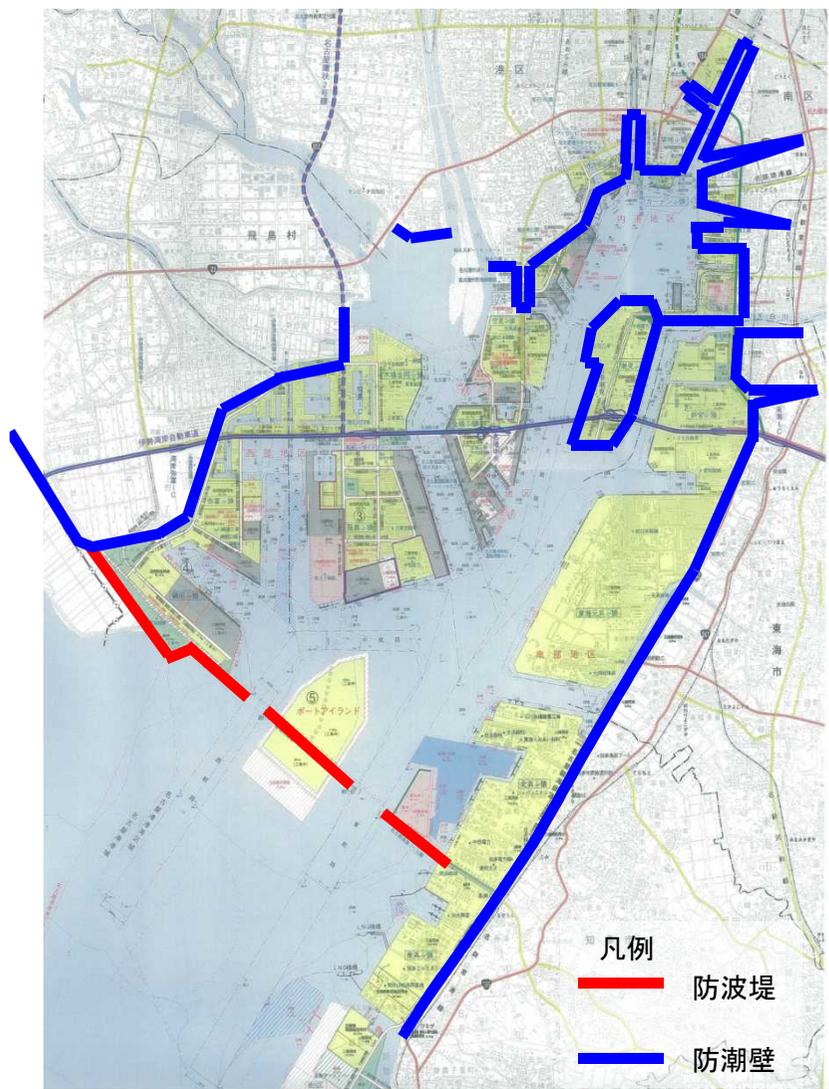
と

② **海岸堤防/河川堤防**

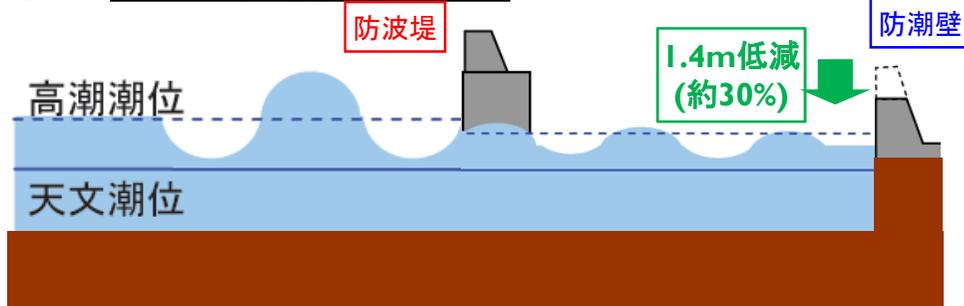
の二重の防護で

**ゼロメートル地帯を守る計画**

# 名古屋港周辺の **高潮防波堤と海岸/河川堤防**

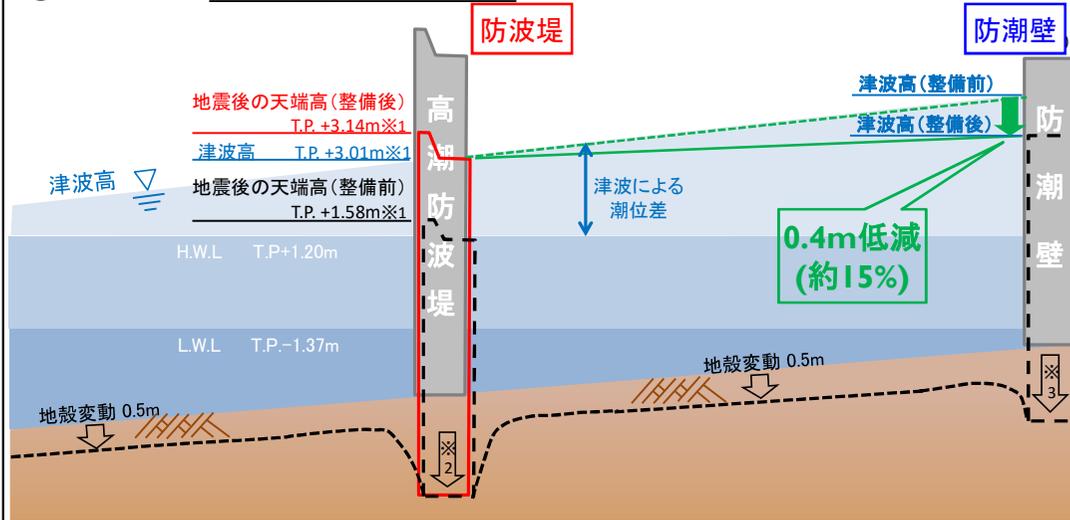


①堤内の高潮・波高を約30%低減



出典: 伊勢湾等高潮対策協議会(S35.10)

②湾奥部の津波を約15%低減 ※最大クラスの地震・津波



※1: 防波堤全体の平均値

※2: 地震動・液状化・地殻変動による沈下

※3: 海岸保全施設の沈下については別途検討(海岸管理者)

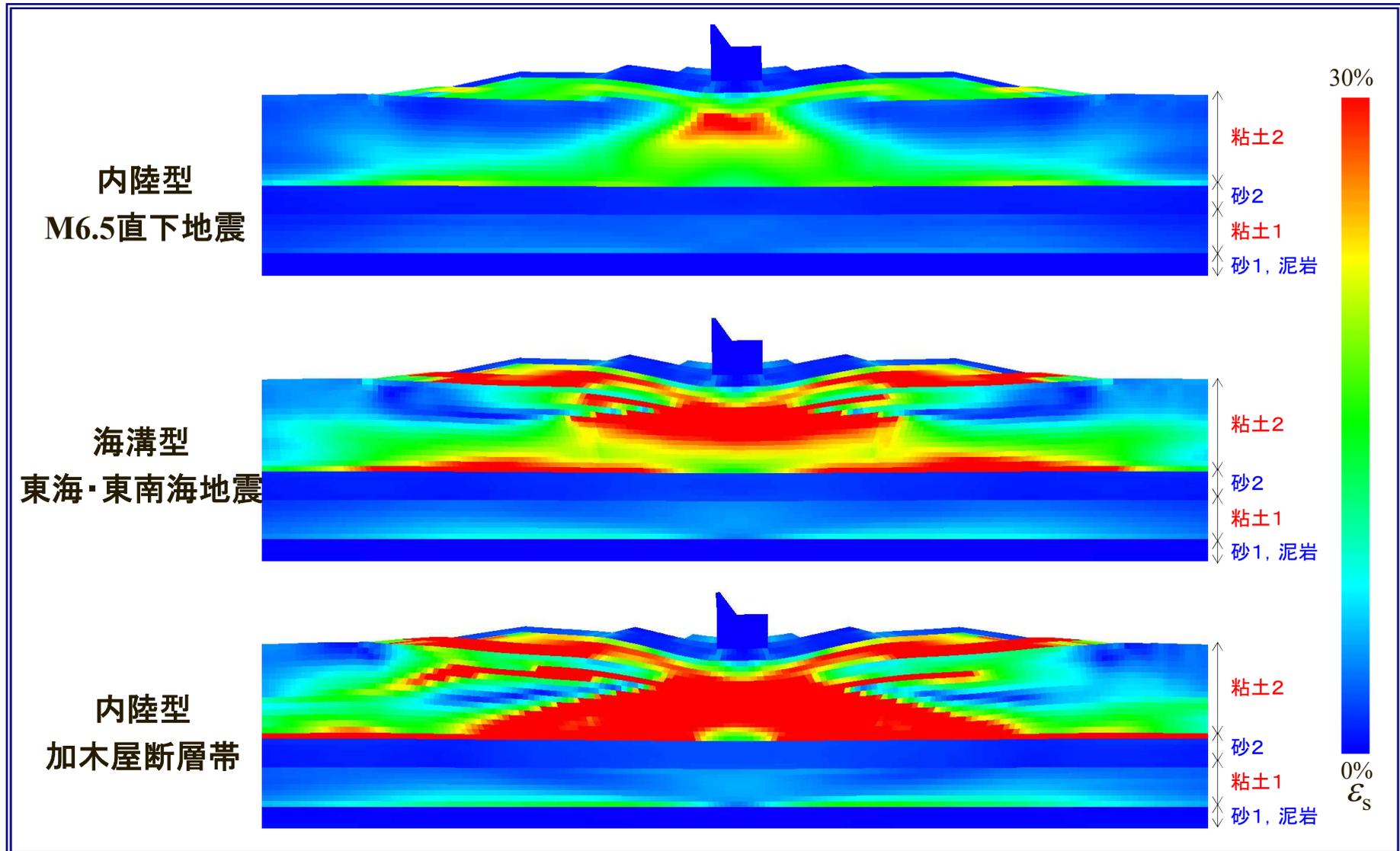
出典: 中部地整(H24)

# 名古屋港の高潮防波堤の 被災シミュレーション

今日は省略しますが、

# 南海トラフ地震には抵抗できません！

仮に津波で倒れなくても、最大2.5mを超えて沈下する。



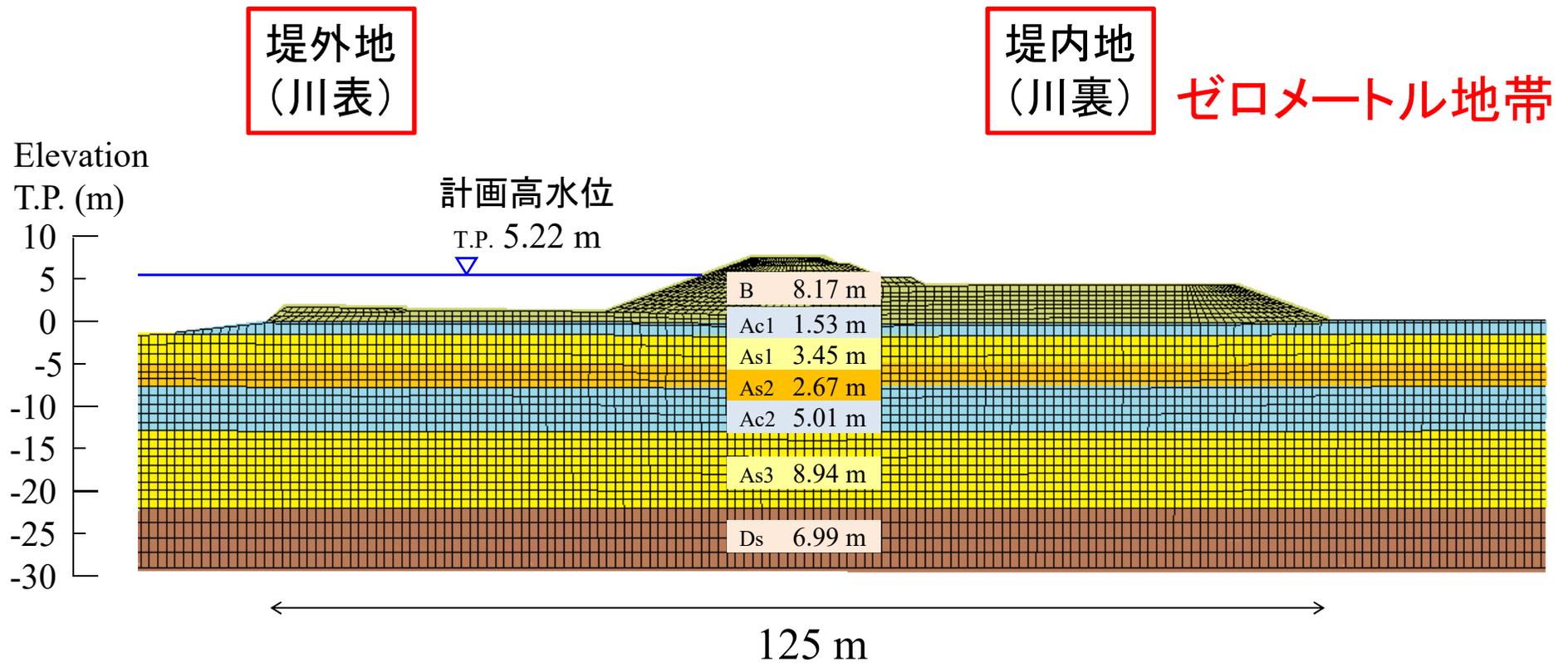
つぎに  
**海岸/河川堤防**の地震時挙動

その1 庄内川

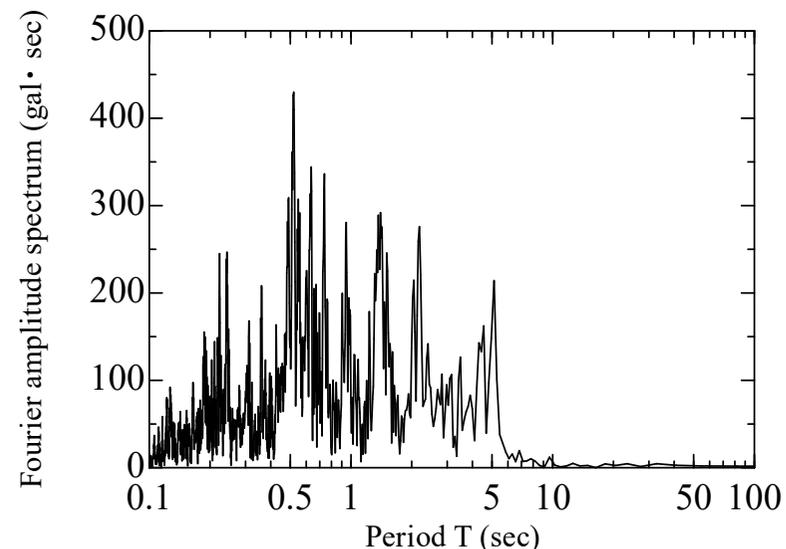
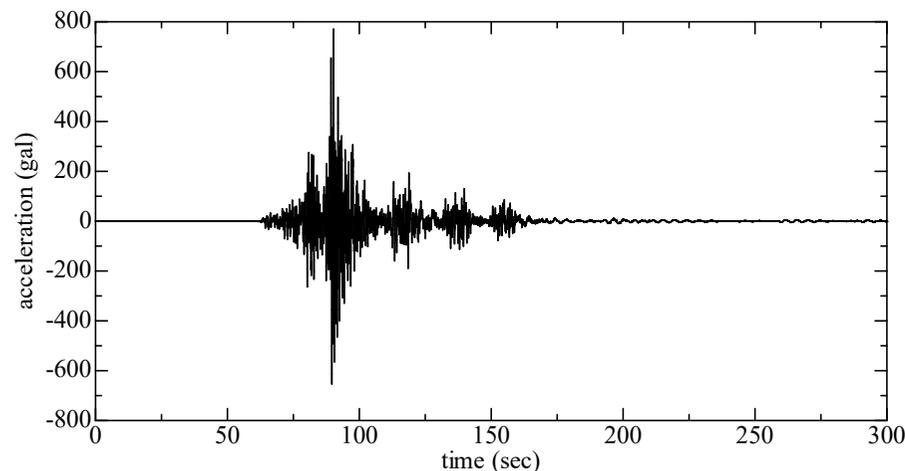
# 庄内川の地層構成

## 庄内川の右岸堤防

河口から6km位置、砂と粘土の互層地盤.



# 入力地震動

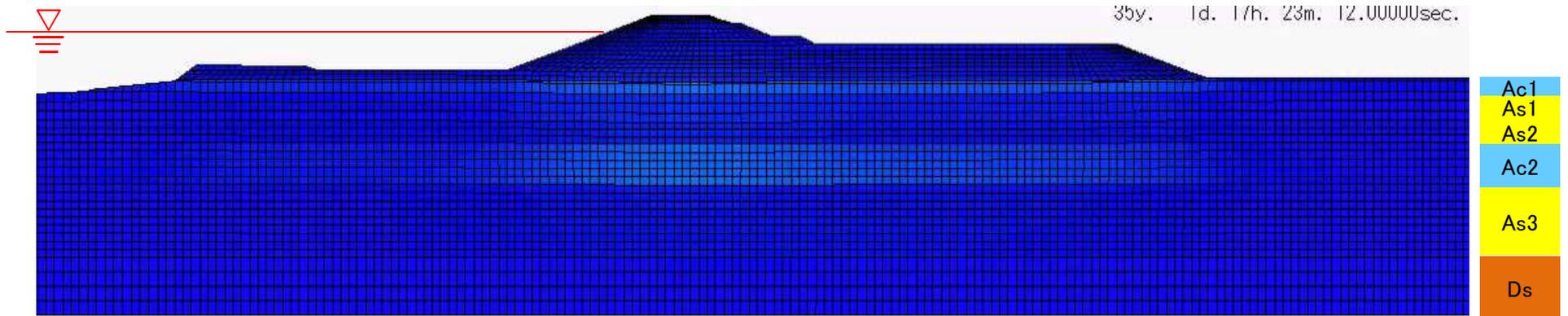


庄内川下流の堤防に、もし1~5秒の長周期成分を含む地震の揺れが来たら？

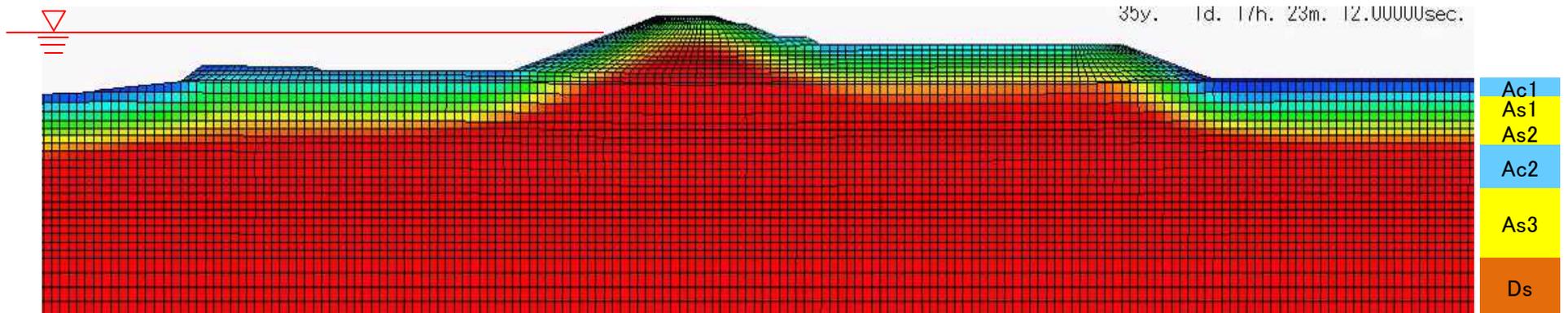
南海トラフ5連動地震(陸側ケース)のNS成分を入力

# 地震時挙動

せん断ひずみ 0  25%以上



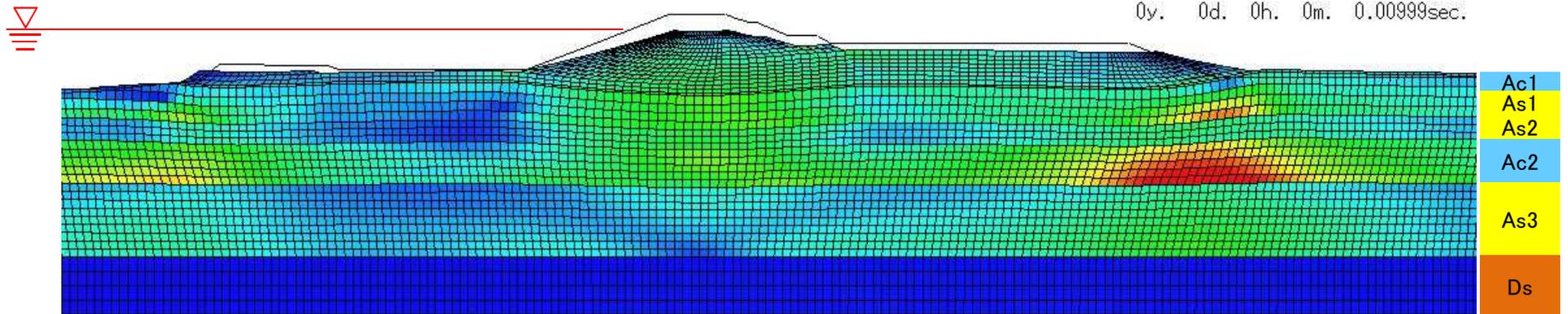
平均有効応力 0  50kPa以上



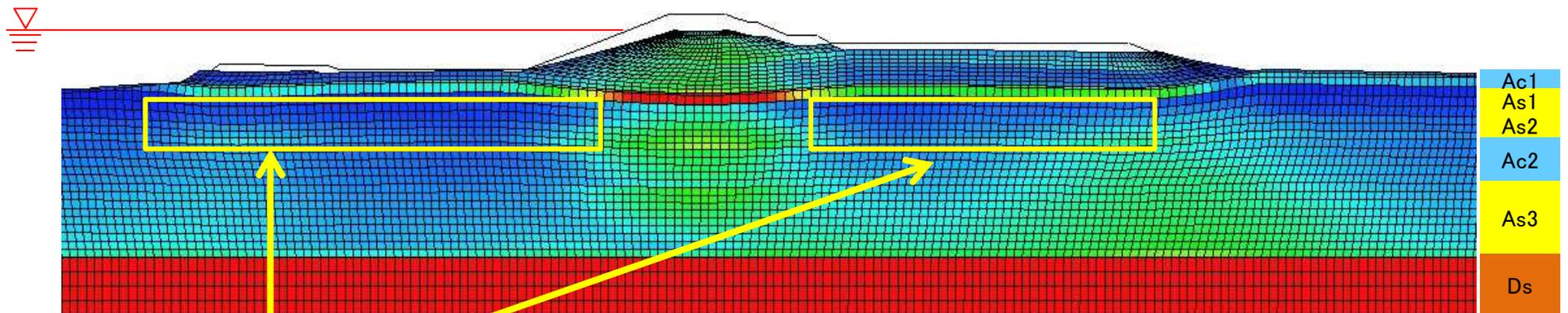
# 地震時挙動

せん断ひずみ 0  25%以上

0y. 0d. 0h. 0m. 0.00999sec.

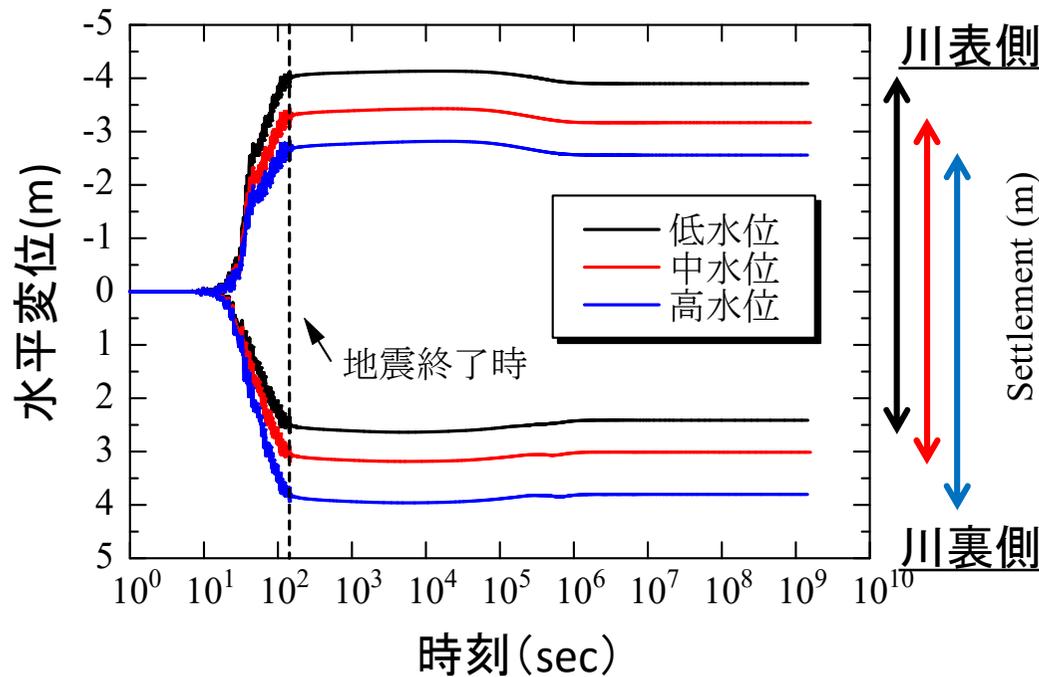


平均有効応力 0  50kPa以上

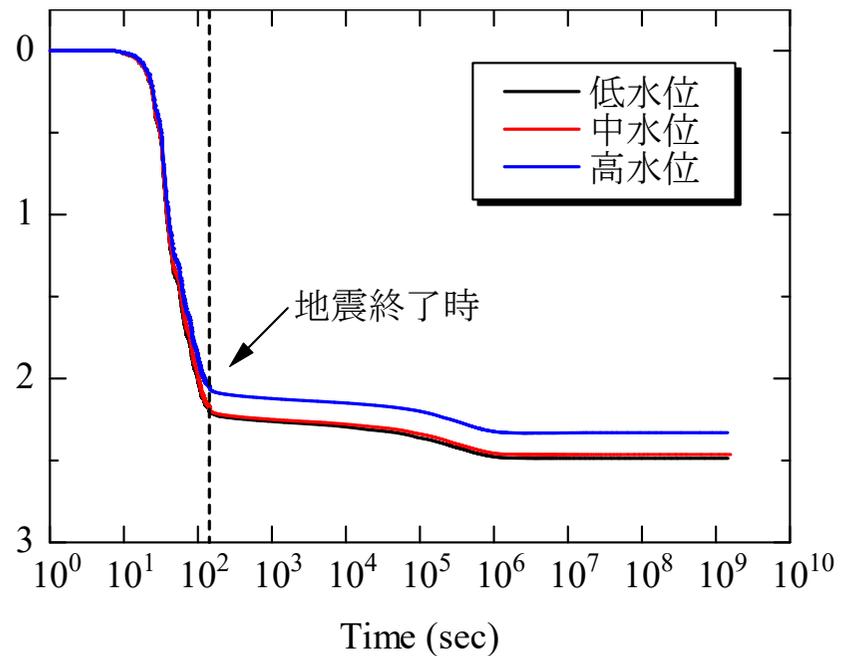


盛土両側の砂層が液状化し、河川堤防が沈下・流動する。

## 法尻の水平変位



## 天端沈下量



地震時の河川水位の高低に関わらず、  
堤防は横幅が**6~7m**広がり、約**2.5m**沈下。

津波が来れば越水して地震直後に破堤、  
津波が来なくても、高潮・高水位時には越水して破堤

現在の堤防ではゼロメートル地帯は守れない！

# 粘土地盤が危ない

## ゼロメートル地帯の 粘性土地盤上の河川堤防の 地震時照査事例、その2

### 山崎川

名古屋市千種区、昭和区、瑞穂区、  
港区を経て名古屋港に至る

延長13.6kmの

名古屋市中心を貫流する人工河川(運河)

# 粘土地盤が危ない

山崎川下流域付近は**海拔ゼロメートル地帯**(**瑞穂区・港区**)の住宅密集地。

南海トラフ地震の発生時には最大**2.9m**の津波が予想されている。

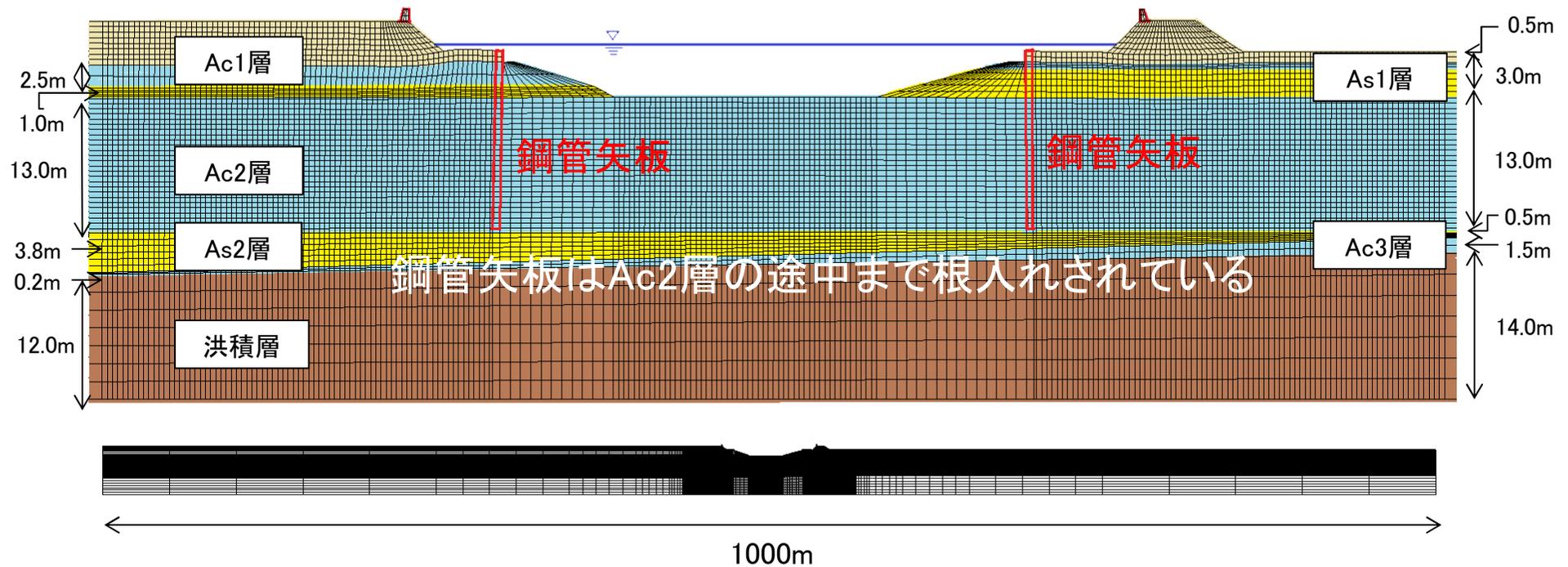
パラペットを嵩上げて対応



築堤後50年の圧密で、下流域では堤防はすでに60cm沈下している。

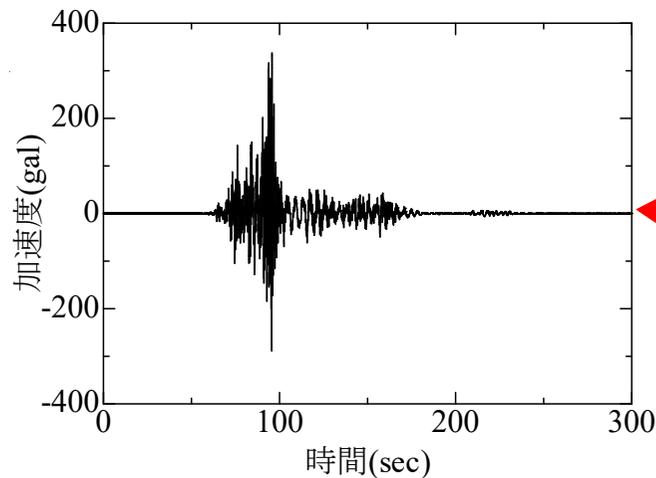
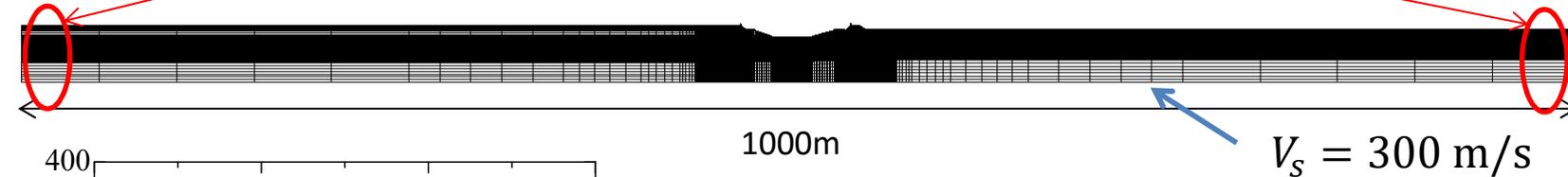
# 山崎川の地層構成と堤防断面

N値0～3程度の軟弱な沖積層が20m程度堆積している。



# 入力地震波と境界条件

側方境界要素単純せん断変形境界

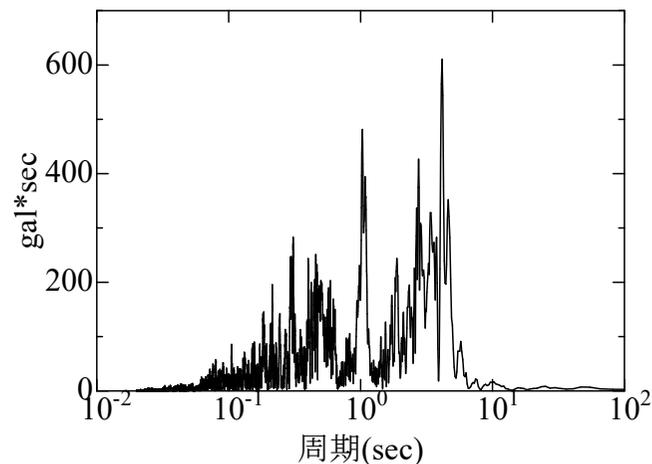


中央防災会議(平成16年)の東海・東南海・南海の三連動地震波を翠川の式を用いて増幅させて入力

$V_s = 300 \text{ m/s}$ を地震基盤とした時の最大速度振幅の増幅度 $A_v$ :

$$A_v = 170 \cdot V_s^{-0.6} \quad (V_s < 1100 \text{ m/s})$$

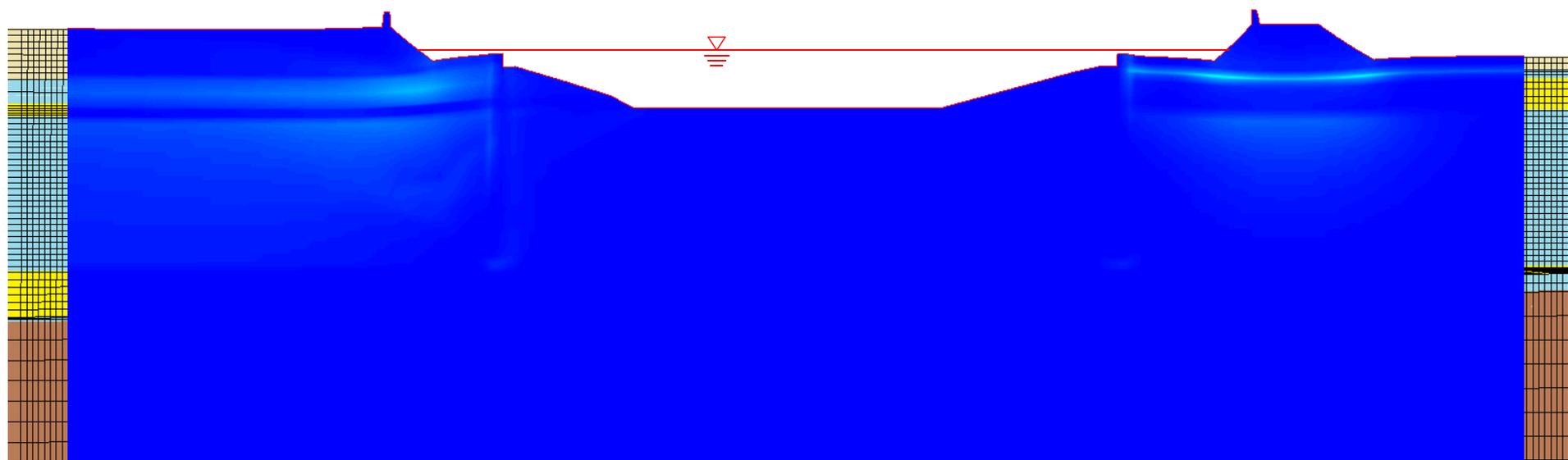
$$A_v = 2.5 \quad (V_s \geq 1100 \text{ m/s})$$



3.11前の南海トラフ想定地震

# 現状の堤防に**地震**が来たら? ～せん断ひずみ～

地震中～地震後



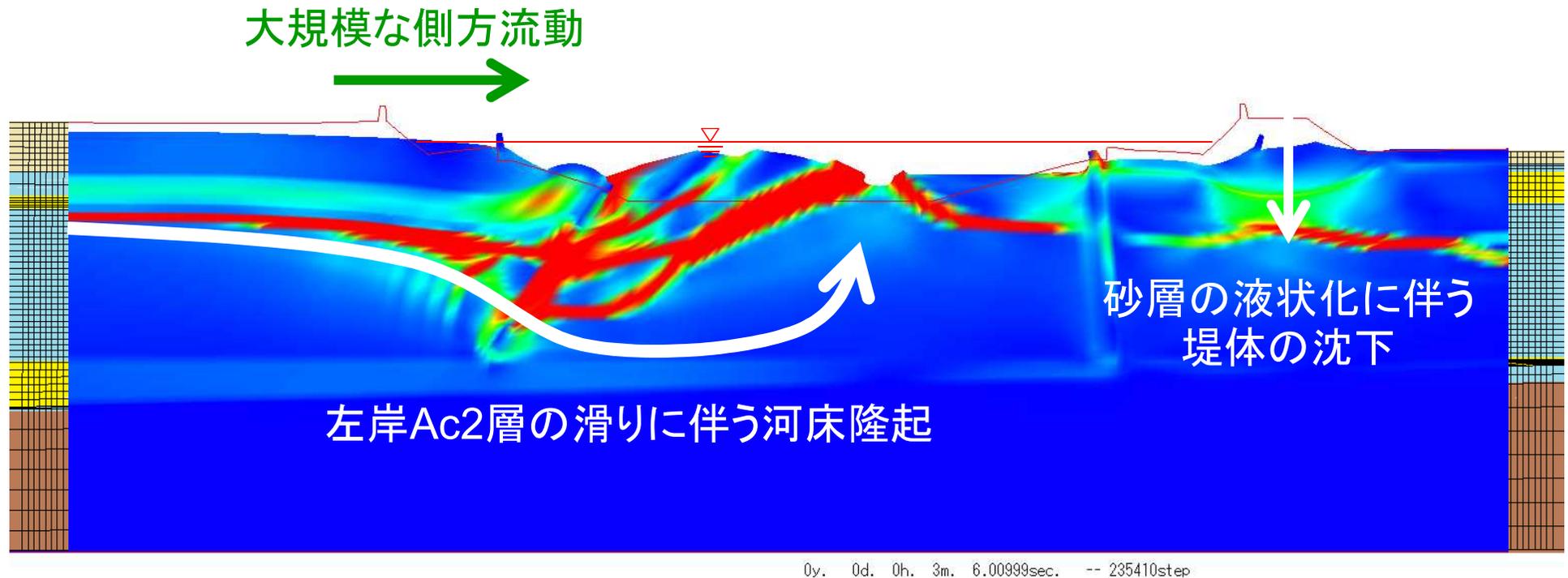
52y. 336d. 2h. 48m. 37.00000sec. -- 49310step



0%  100%以上

# 現状の堤防に**地震**が来たら? ~せん断ひずみ~

地震中～地震後



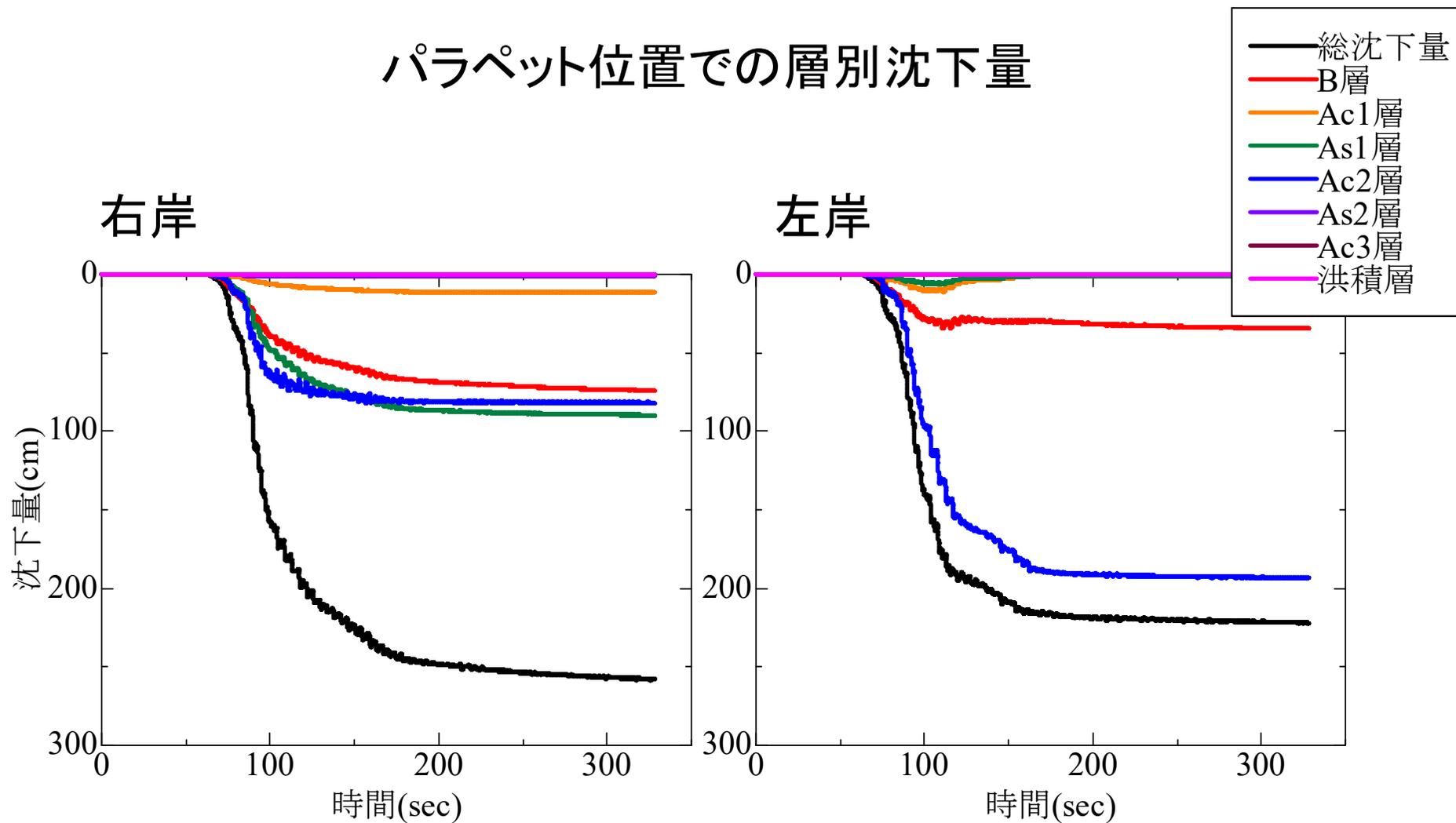
0%  100%以上

軟弱粘性土の滑りが起点となって生じる, 大規模崩壊

# 2mを超える沈下と河床の「喪失」

地震後の津波/高潮による堤内地浸水は必至

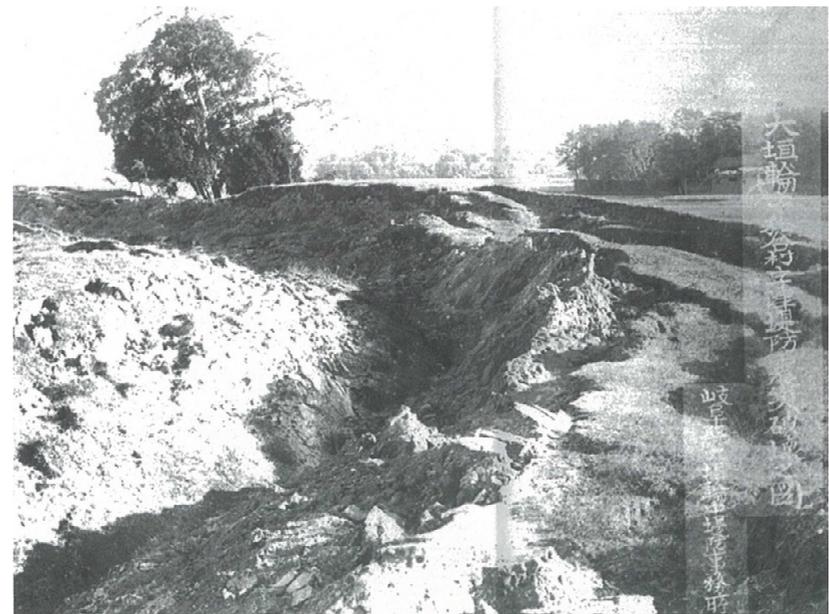
パラペット位置での層別沈下量



# 濃尾地震の時の堤防の被災写真



木曽川堤防破壊



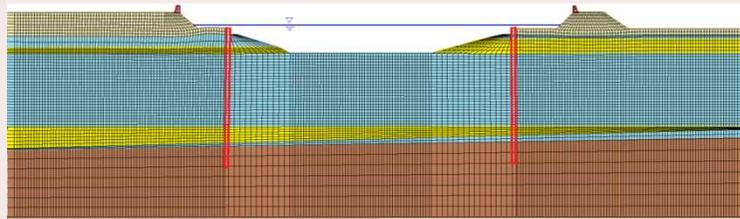
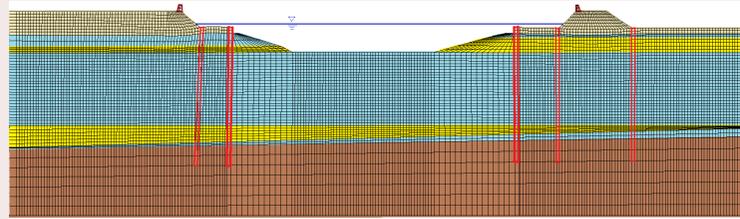
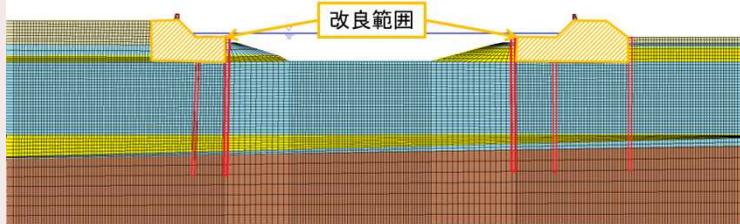
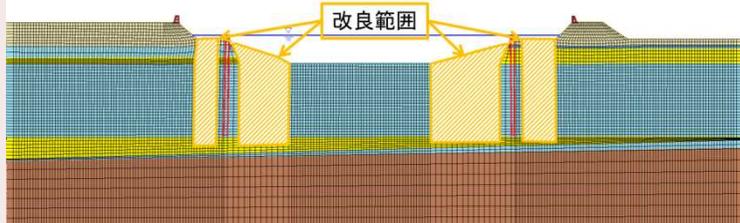
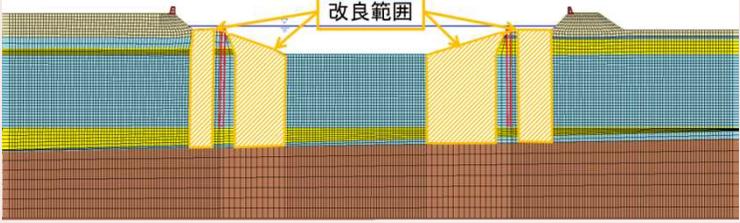
揖斐川大垣輪中堤防破壊

今も生きる, 濃尾地震(2013): 社団法人中部建設協会から

法面の崩壊や河床の隆起が見られる.

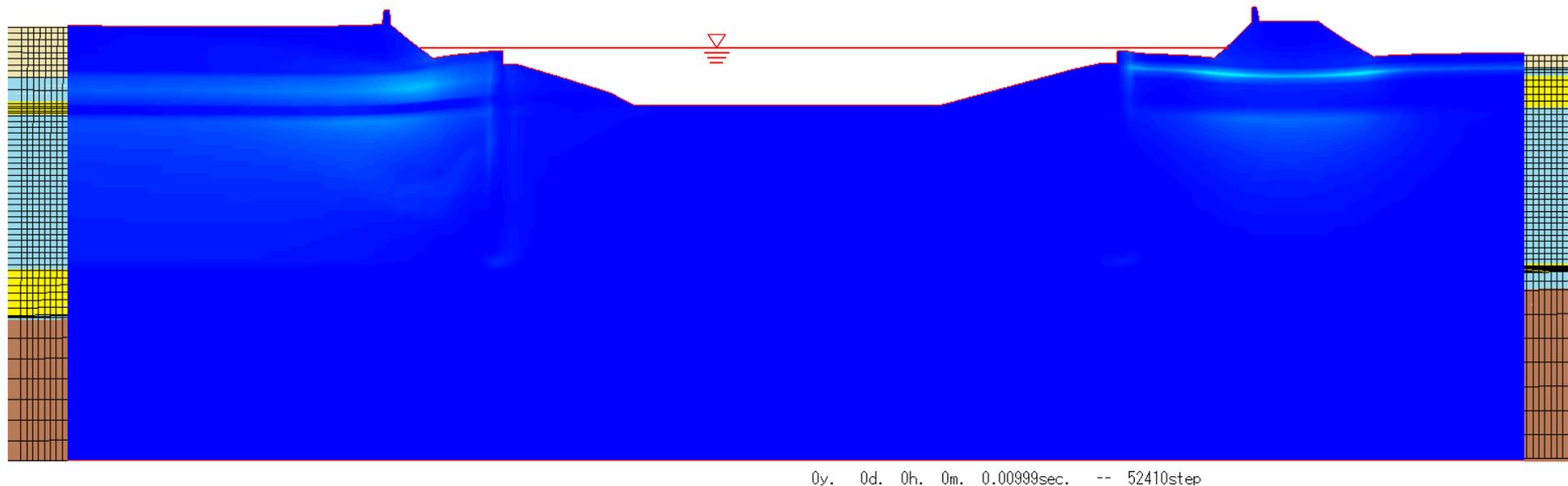
# 危険なら前もって直す！

# 耐震対策工の検討

Case1	既存の鋼管矢板を延長した場合	×	
Case2	鋼管矢板を盛土法尻に増設した場合	×	
Case3	鋼管矢板を増設し、堤体を地盤改良した場合	◎	
Case4	堤防前面の沖積層を途中まで地盤改良した場合	○	
Case5	堤防前面の沖積層を全て地盤改良した場合	○	

# 山崎川では、すでに多くがなされている！

地震中～地震後



0%  100%以上

側方流動，河床の隆起，堤防の沈下を著しく抑制.

河川**横断面**ばかりを紹介したが  
ほとんどは「水平成層」が前提となりがち。

**ゼロメートル地帯**の  
海に注ぐ河川**最下流域**では、実は  
浦安の様に表層で表面波が現れる  
河川**縦断面**に沿う解析が  
極めて重要になる！

しかしこれは、**手つかずの状態**のまま  
放置されている！

1. 長周期地震動に対する  
地盤力学/地盤工学分野での取り組み状況

2. 地震本部への  
地盤工学会からの要望事項

5点にわたって述べる。

## 要望事項① 入力地震動

ゼロメートル地帯の堤防など、地盤変状が出れば大災害につながる都市部の重要構造物の多くは、沖積地盤上に立地していて、**長周期の大きな揺れは、沖積粘性土地盤にも大きな変状をもたらす。**

地震本部の強震動研究では、1秒から10秒の長周期成分を含む、**高精度かつ長時間の工学的基盤での地震動の解析結果を出力している。**地盤工学ではこれを入力地震動として使うが、工学的基盤以浅の沖積・洪積地盤の地震時弾塑性応答の解析結果のフィードバックを通じて、入力した地震動の適否を協働して検討する。

## 要望事項② 地震被害予測

工学的基盤以浅の不整形性を考慮した正確な地盤モデルを用いた弾塑性解析に基づく被害予測は喫緊の課題である。

関東平野で進められている「浅部・深部統合地盤構造モデル」などの知見を基礎に、沖積・洪積層地盤の弾塑性材料としての地盤力学的情報が書き加えられた地盤構造モデルを作成し、大規模な縦断面解析を含め、弾塑性地盤の2・3次元での変状解析と、それに基づく地震被害予測を協働で進める。

## 要望事項③ 強震動記録

1次元問題ではあっても、**弾性波動論では解釈不可能な表層地盤の強震動記録**、あるいは、1次元等価線形解析による解釈が意味をなさないような**多次元弾塑性地盤応答の帰結としての強震動記録**について、**地盤力学/地盤工学分野と協働の解析を進める。**

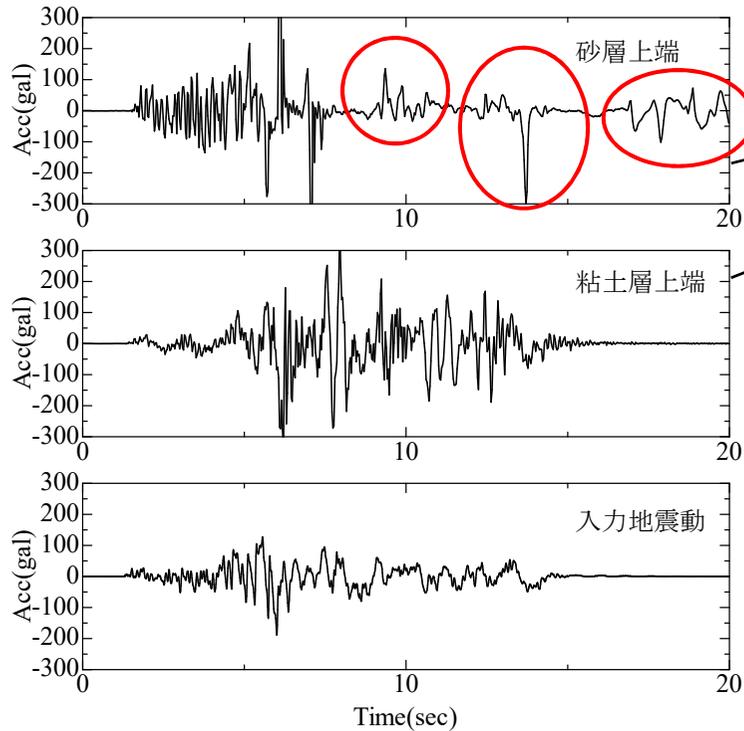
## 要望事項④ 海底地震計

海底での地震動と水圧の計測、海底地盤内の間隙水圧の計測等が広まっている。

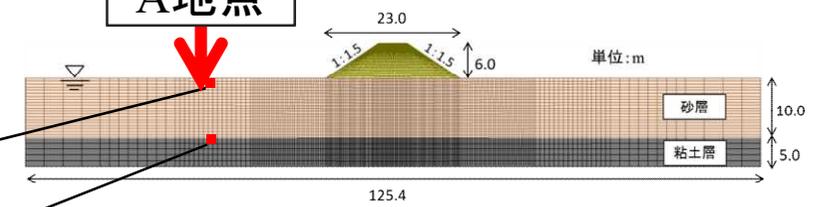
海底地盤の調査やケーブルも含む設置機器の安定化の工法、得られた地震記録の逆解析などともに、将来、**海底地滑り等の地盤安定解析**も協働して進める。

# 地盤力学による液状化解析と海底地盤で観測された液状化現象

## A地点応答加速度 (GEOASIA)

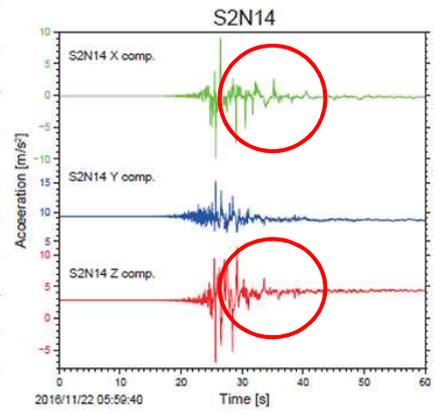
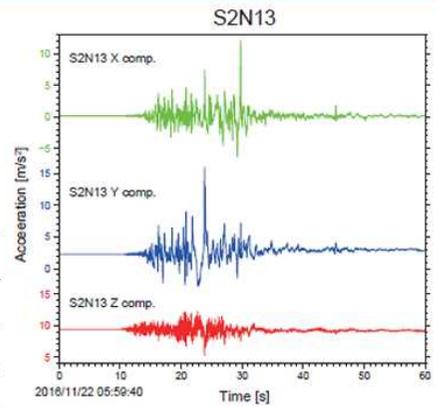
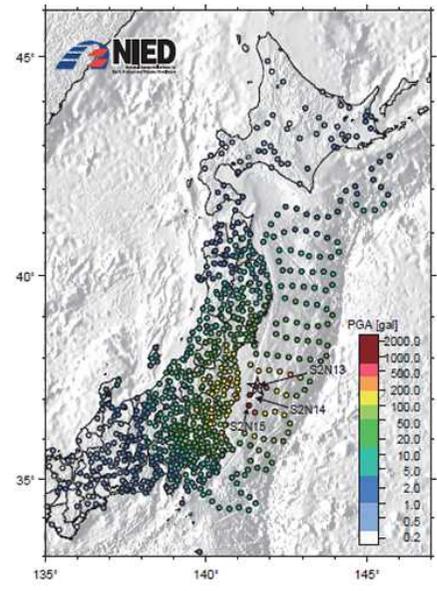


A地点

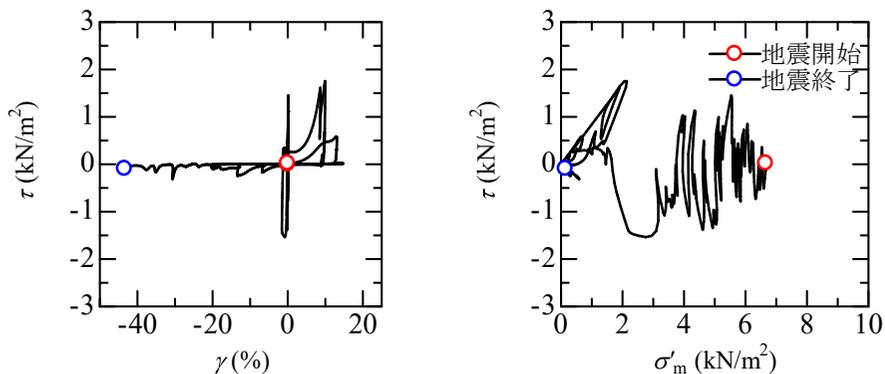


2016年11月22日福島県沖の地震による海域・陸域における強震動  
防災科学技術研究所 NIED

震源のほぼ直上に位置する S2N13 観測点及びその南南西に位置する 2 つの S-net 観測点 (S2N14, S2N15) にて 1,000 gal (10 m/s<sup>2</sup>) 以上の最大加速度を記録し、その加速度波形にはスパイク状のフェイズが見られる。



## A地点要素挙動(砂層上端) (GEOASIA)



## 要望事項⑤ 社会への提言

ハードで防ぐという防災の課題を、減災、つまり、逃げるにばかり丸投げさせては、いけない。

地震本部は、自治体や国交省へは、どこがどのように危険か、防災事業推進に資する

**正確で総合的な情報の発信**をいっそう進める。

ご清聴を感謝します。 地盤工学会