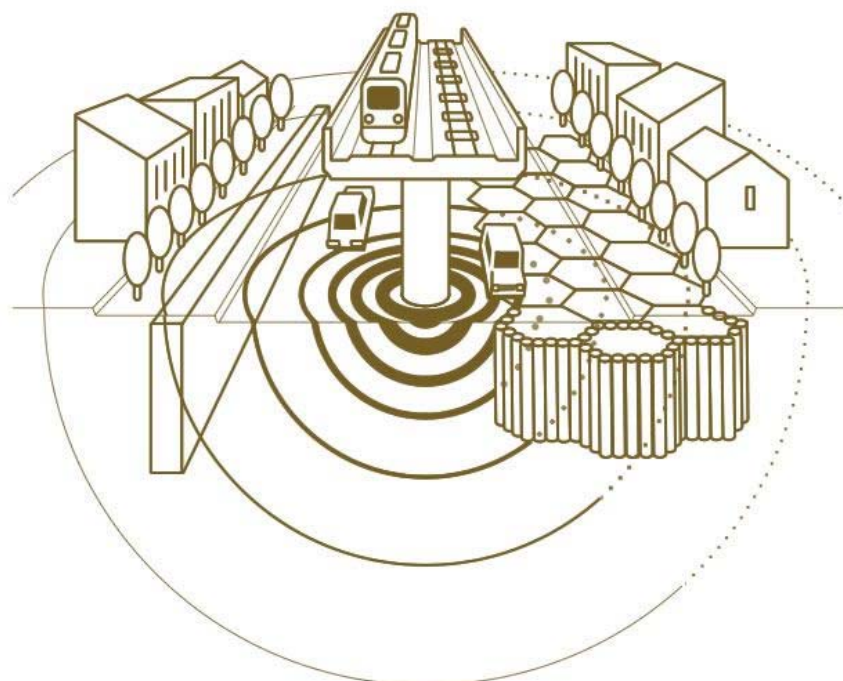


# 岡山の地盤と液状化対策



平成 24 年 5 月 25 日(岡山会場)・平成 24 年 5 月 28 日(倉敷会場)

## 主 催

### 岡山の地盤と液状化対策研究会

E&D テクノデザイン株式会社  
有限会社 コア構造設計  
株式会社 フジタ地質

## 後 援

社団法人岡山県建築士会・社団法人岡山県建築士事務所協会  
公益社団法人土木学会中国支部・公益社団法人地盤工学会 中国支部  
社団法人日本建築構造技術者協会(JSCA)中国支部岡山地区

# 講演プログラム

開会の辞 (13 : 30～13 : 40)

岡山の地盤と液状化対策研究会 代表  
岡山大学名誉教授 工学博士 竹宮宏和

講演 1 (13 : 40～14 : 20)

E&D テクノデザイン株式会社  
土木学会認定特別上級土木技術者  
岡山大学名誉教授 工学博士 竹宮宏和

「M9 に対する岡山県南部に想定される地震の特徴  
地盤と基礎の揺れ、建物の揺れ」

講演 2 (14 : 20～15 : 20)

株式会社フジタ地質 竹内 徹・川口浩史

「岡山県南部の地形、軟弱地盤の分布、液状化マップ  
液状化の判定方法と調査方法」

休憩 (15 : 20～15 : 30)

講演 3 (15 : 30～16 : 00)

有限会社 コア構造設計  
構造設計一級建築士 大垣克己

「液状化地盤に対する基礎設計  
地盤が液状化する場合の基礎と杭の構造設計方法について」

講演 4 (16 : 00～16 : 45)

岡山大学名誉教授 工学博士 竹宮宏和

「液状化対策の考え方と WIB 工法研究発表」

質疑応答 (16 : 45～17 : 00)

## 講演 1

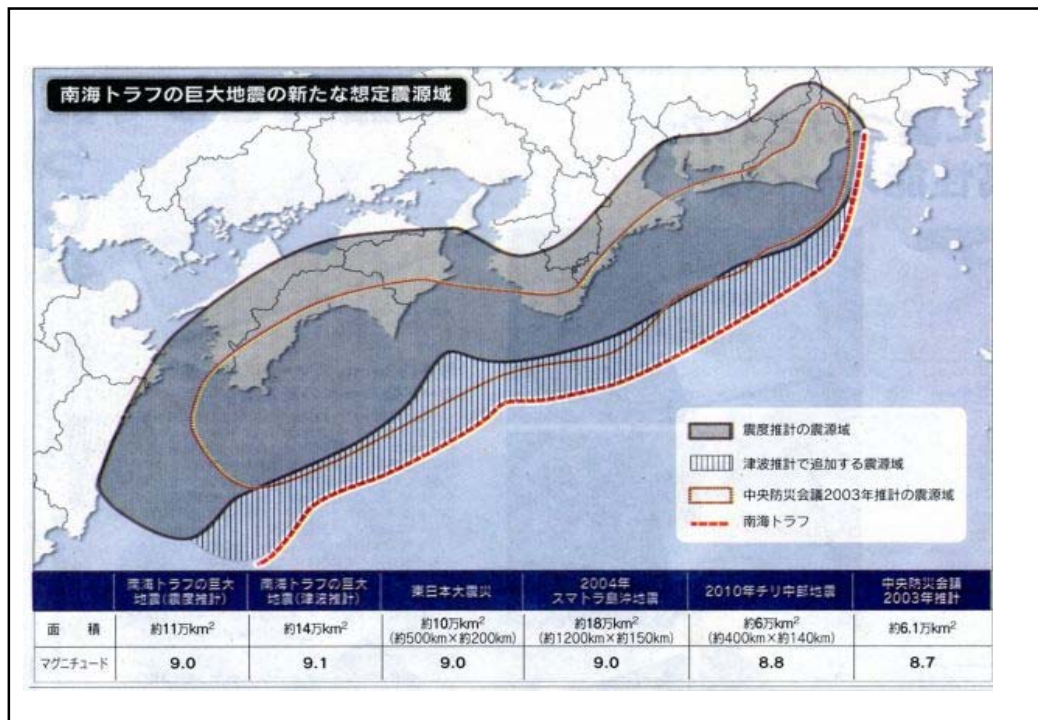
### M9 に対する岡山県南部に想定される地震の特徴

#### 地盤と基礎の揺れ、建物の揺れ

講師 E&D テクノデザイン株式会社  
土木学会認定特別上級土木技術者  
岡山大学名誉教授 工学博士 竹宮宏和

# M9に対する岡山県南部に想定される地震の特徴

岡山の地盤と液状化対策研究会代表  
 岡山大学名誉教授 竹宮宏和  
 E&Dテクノデザイン(株)



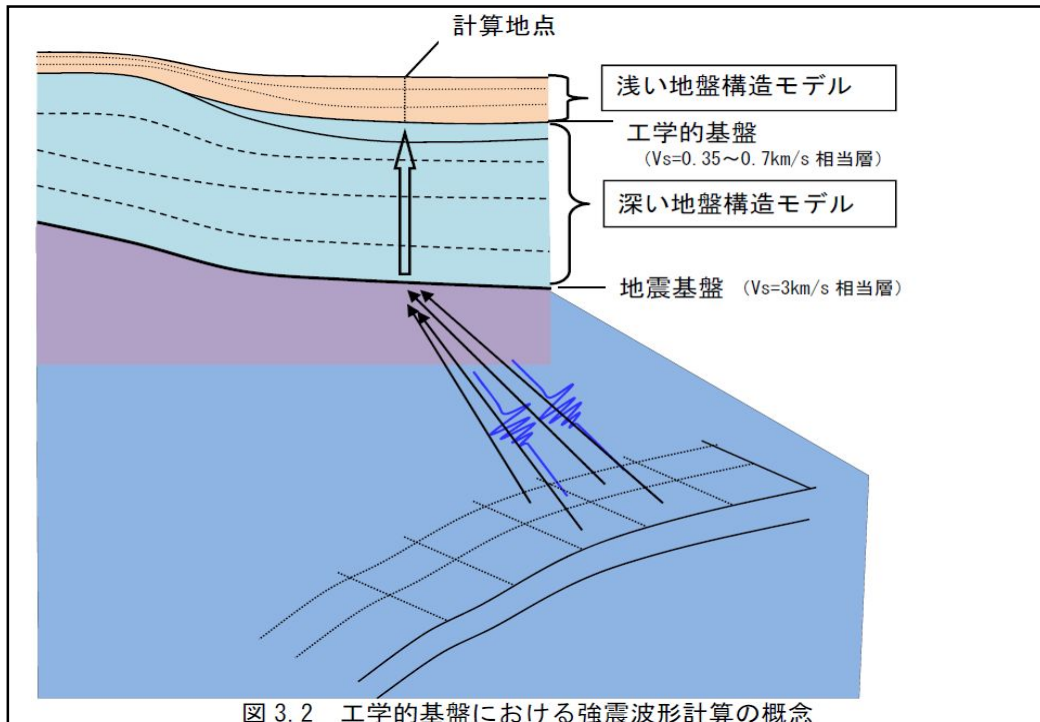
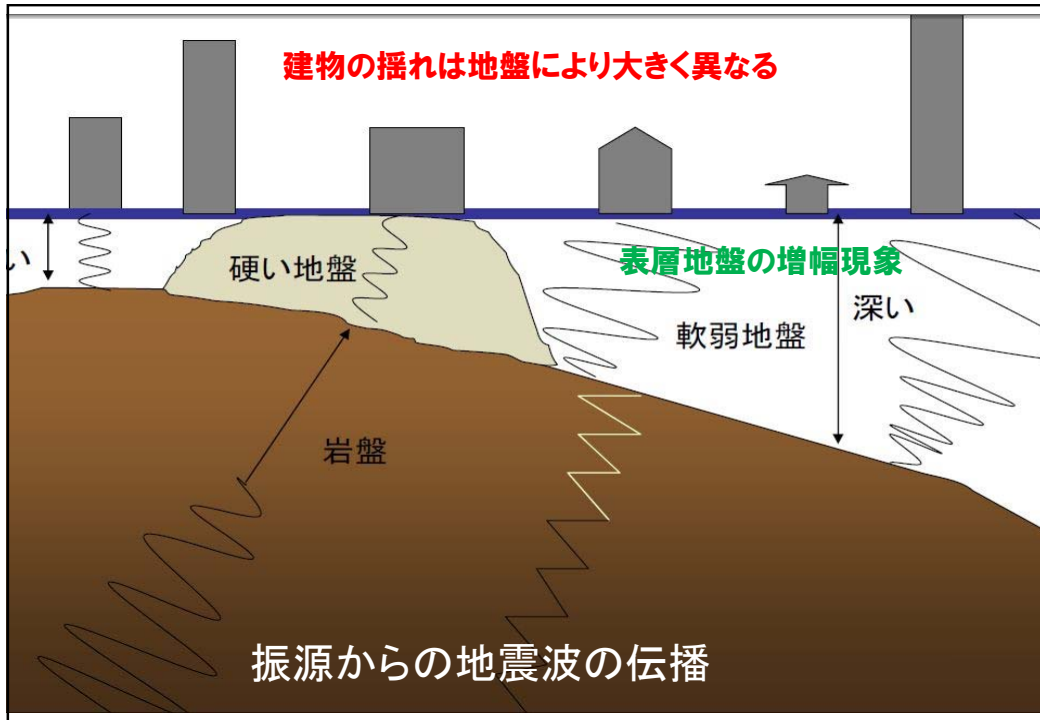
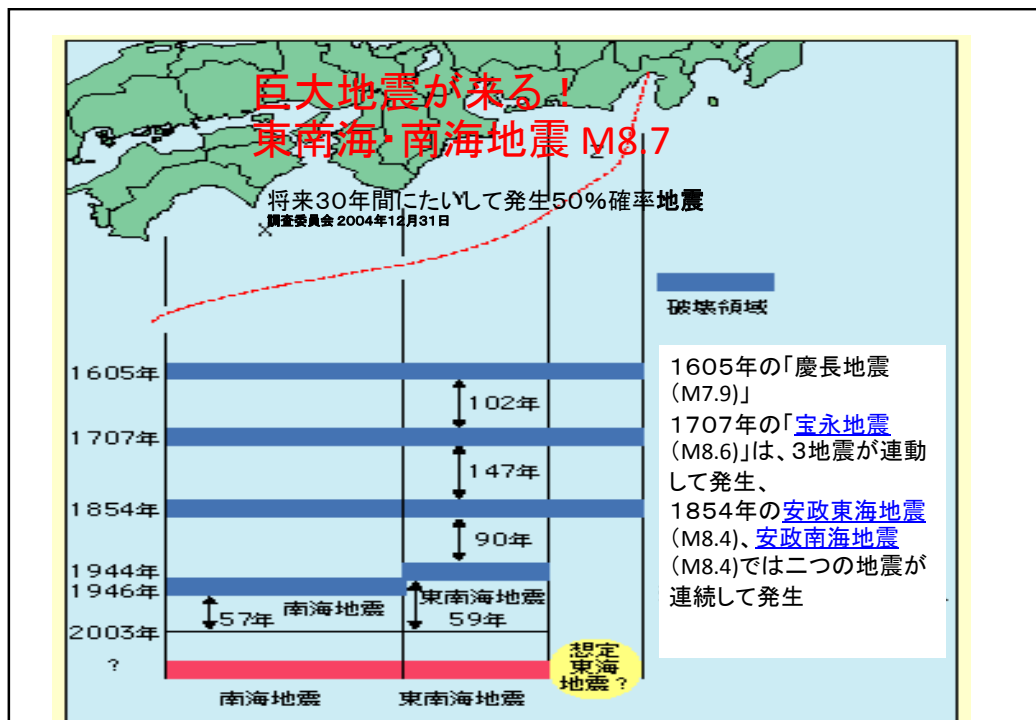


図 3.2 工学的基盤における強震波形計算の概念



## 昭和南海地震M8.1(1946年)

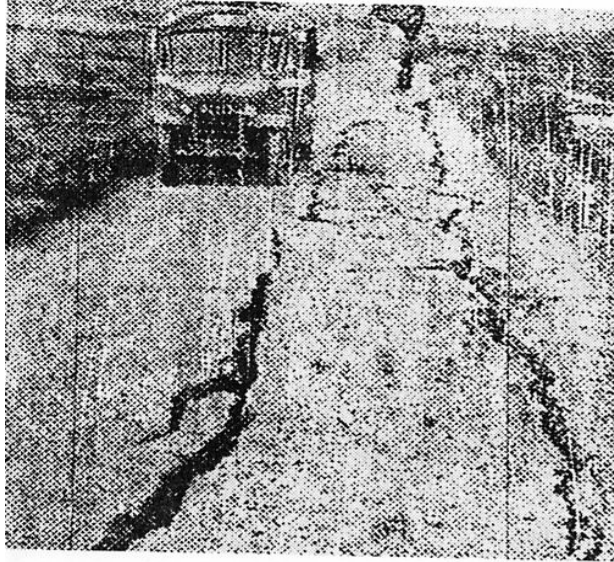
岡山県域において、震度5の強震、岡山市西大寺地区では震度6の烈震(震源地に近い高知県を上回る)であった。

- 死者52人、
- 負傷者162人、
- 全壊家屋1201棟
- 全半壊家屋3546棟

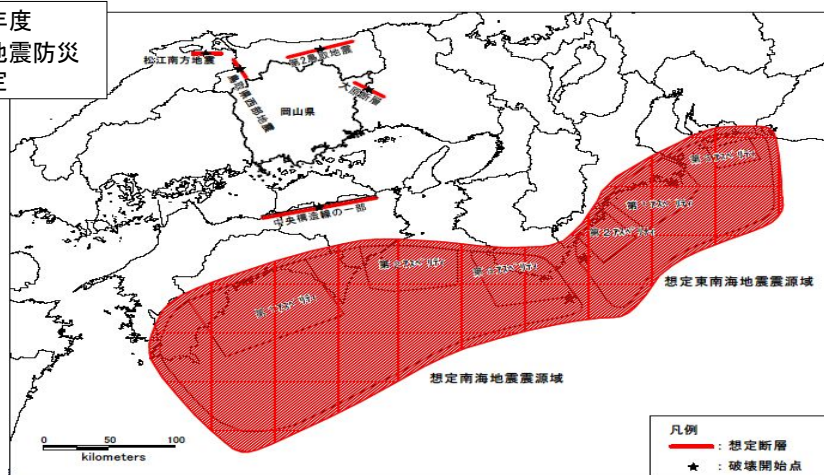
岡山南部の泥や砂の体積軟弱地盤が原因している。



## 南海地震(1946)で亀裂が生じた 岡山市平井の道路



平成17年度  
岡山県地震防災  
計画策定



特にすべり量大きいところである。

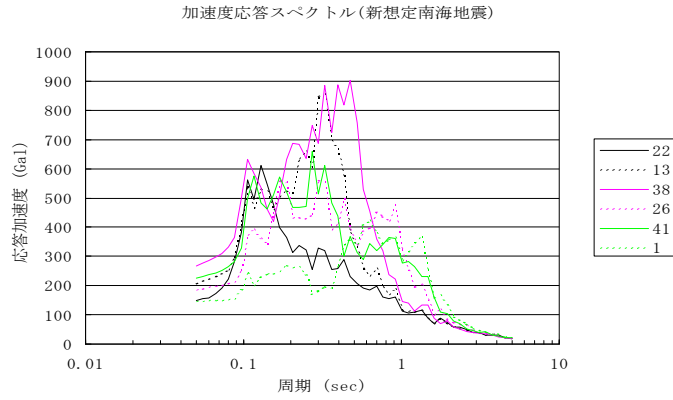
図-1 想定地震の震源域位置図 ③,④,⑤,⑥を引用

表-2 想定地震諸元

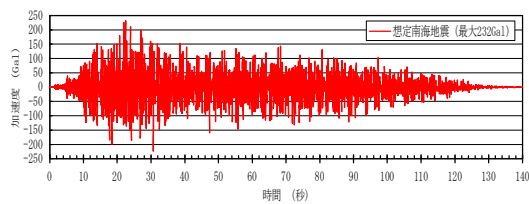
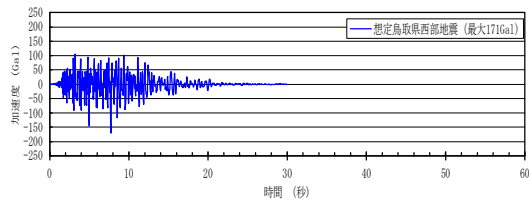
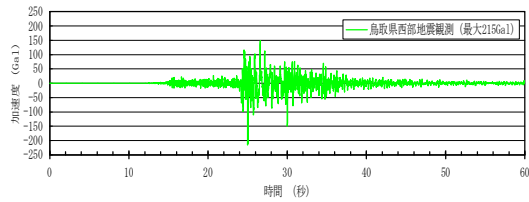
諸元	想定地震	鳥取系 西部地震	第2鳥取 地震	松江南方 地震	中央構造 線の一部	大原断層	南海トラフ の地震
断層延長(km)		20	50	20	87	25.8	約500
マグニチュード		7.3	7.2	7.0	8.0	7.2	8.6
断層上端深さ(km)		1	0	1	5	5	10



# 5%減衰の加速度応答スペクトル (想定南海地震)



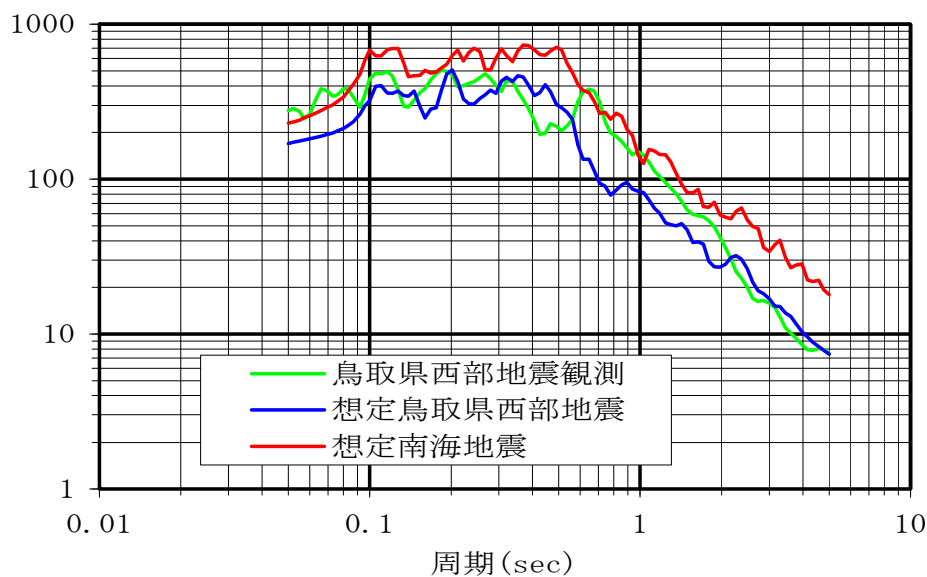
## 地震動(地表面) 加速度波形

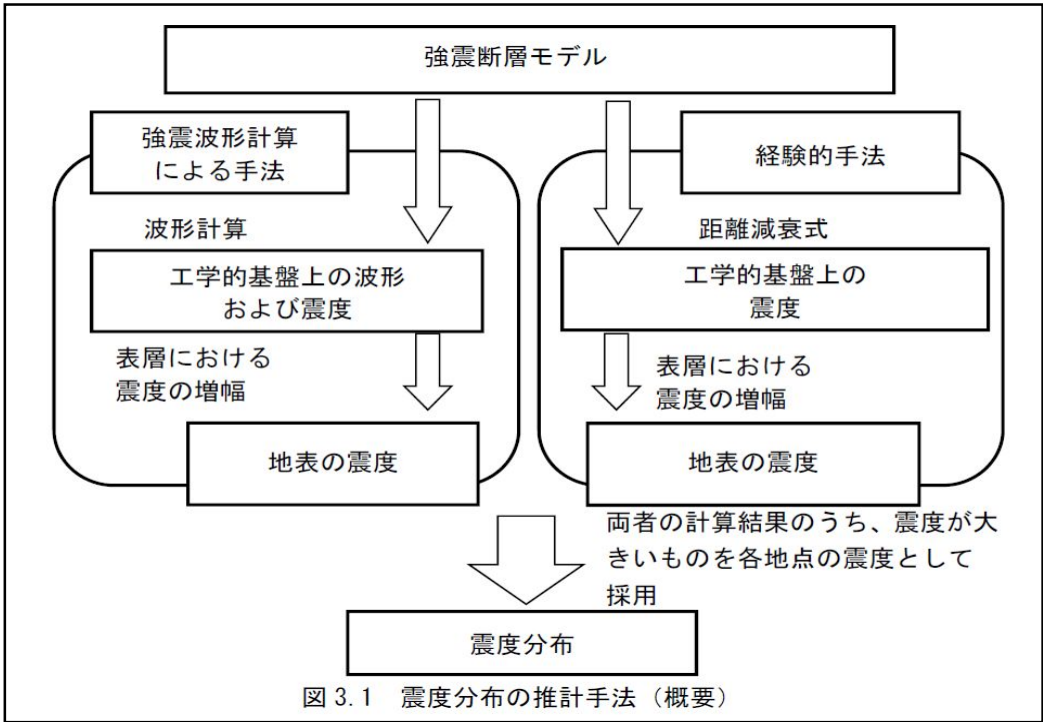
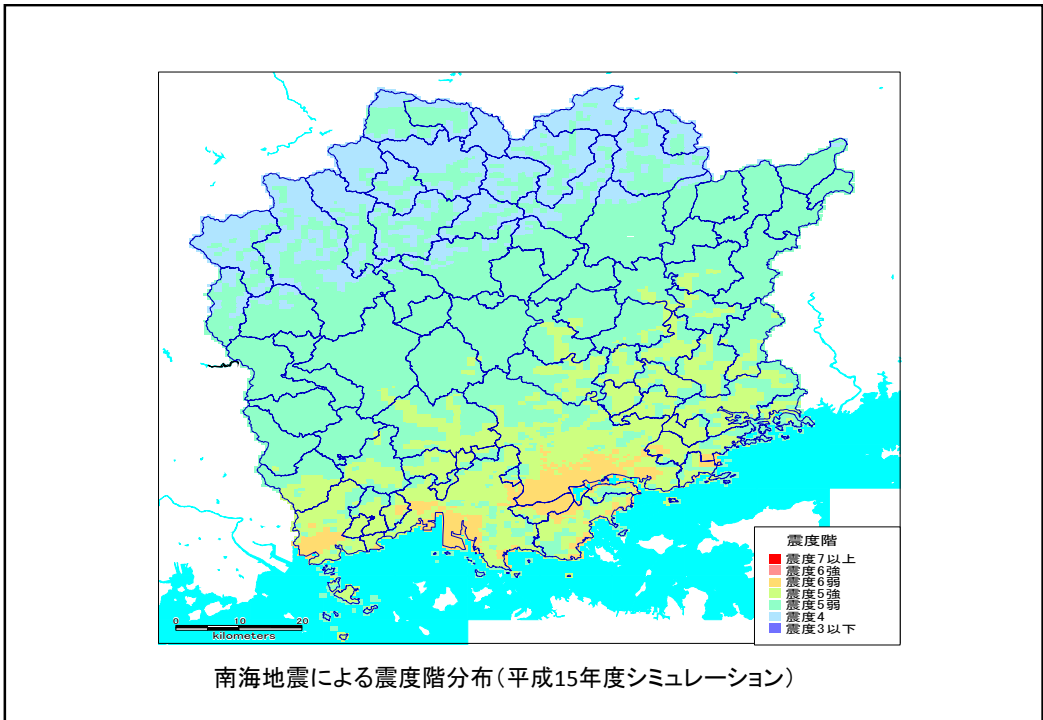


## 想定南海地震の影響評価

- 地表面最大加速度は、鳥取県西部地震に比べ大きく、地震動の継続時間が110秒程度と非常に長い。
- その結果、地盤内に発生する液状化の可能性が大である。
- 固有周期の長い構造物(燃料タンク、高層建物)が被害を受ける危険性が高い。
- 地震調査委員会が平成16年に公開予定の地震動予測地図においては、表層地盤の取り扱いが比較的ラフであると考えられ、岡山地盤研究会が作成したような4次メッシュに基づく詳細な地盤モデルを利用することにより、精度の高い地震動の評価が可能である。

加速度応答スペクトル (減衰5%)





# 地震波の伝播経路過程と増幅

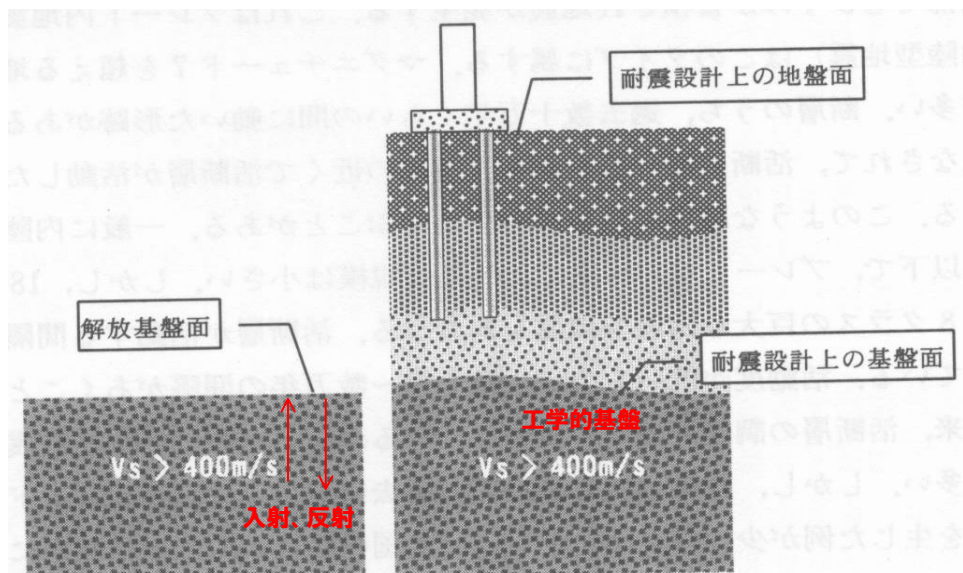
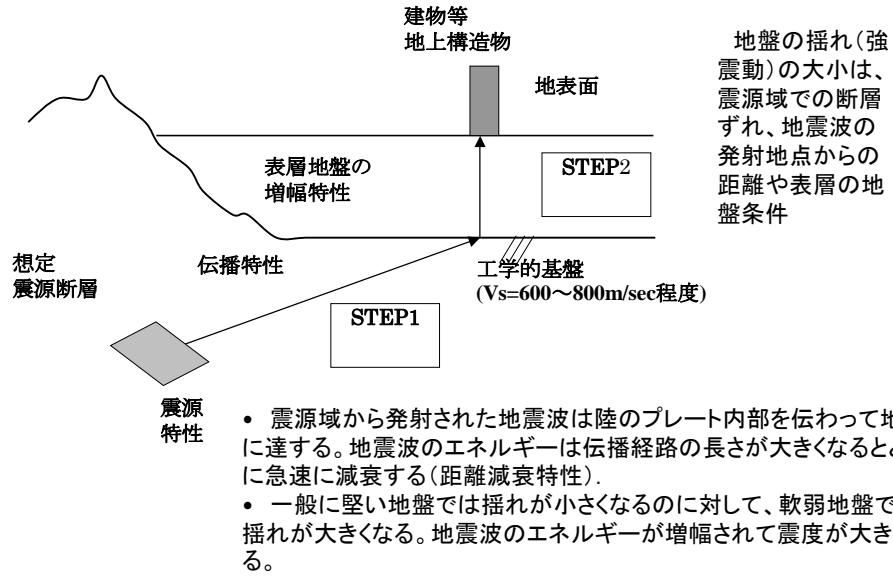
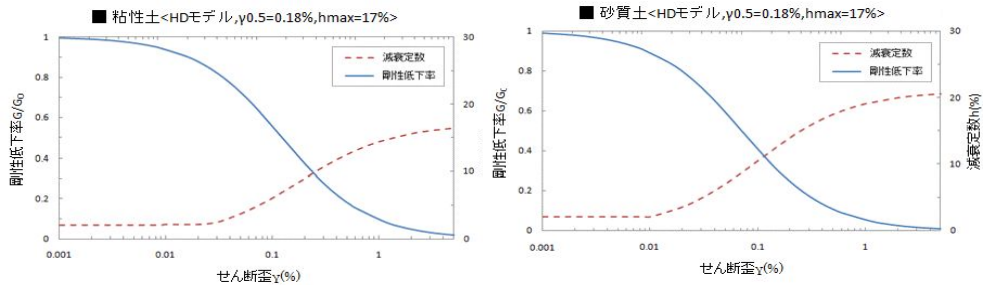


図 解放基盤面と地震地盤面

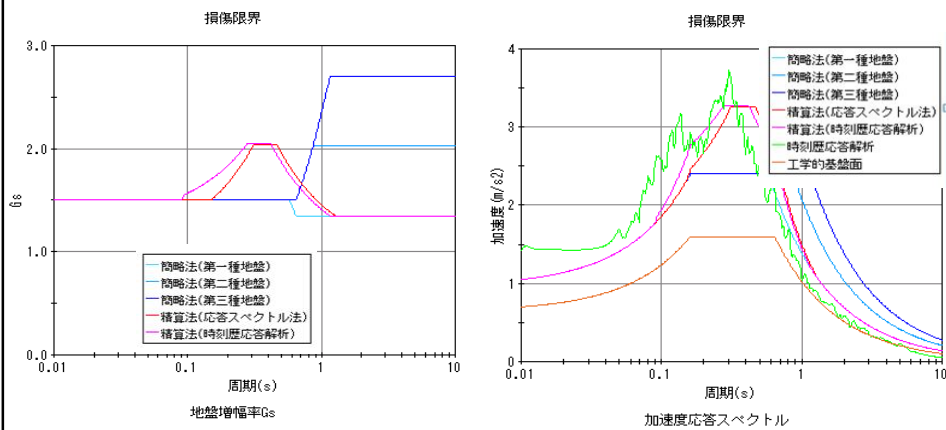
## 地盤の非線形性を等価線形化法により歪依存特性 ( $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ )を用いて評価

平成19年国土交通省告示第1230号(精算法)または平成12年建設省告示第1457号(簡略法)における地盤増幅率 $G_s$ (表層地盤による加速度の増幅率 $G_s$ )の計算



各層のせん断弾性係数及び減衰定数の歪依存特性を等価線形化法(Idriss and Seed,1968 Seed and Idriss,1970)

## 地盤増幅度

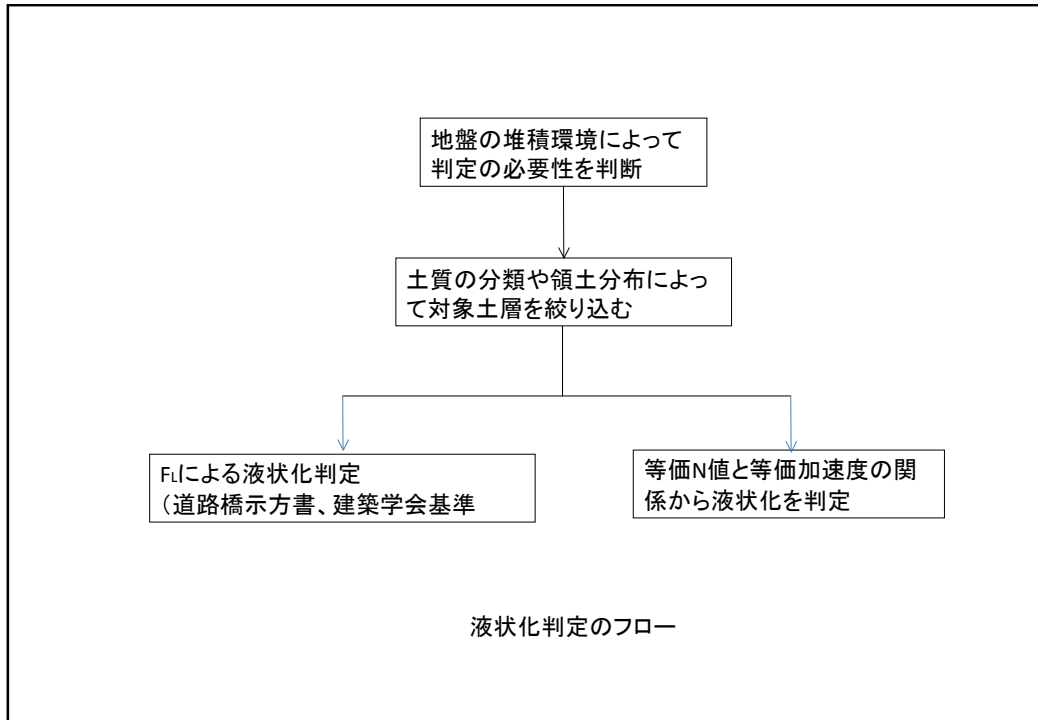


## 地盤と基礎の地震時の揺れ、建物の揺れ

- 地盤
  - 地盤増幅
  - 液状化
- 基礎構造と地盤
  - 地盤支持力
  - 基礎の支持力
- 建物の揺れと地盤
  - 地盤の卓越周期
  - 建物の周期

### 液状化が発生しやすい要因

	液状化しやすい	液状化しにくい
地震力の大きさ	大きな地震力	小さな地震力
地震の継続時間	長い	短い
土質	砂質土	粘性土、礫質土
粒度分布	粒度分布が狭い	粒度分布が広い
透水性	低い	高い
密度	小さい	大きい
地下水位	高い	低い
有効拘束圧	低い	高い
飽和度	高い	低い



**液状化対策の原理**

分類		原理	手法
液状化の発生を 防ぐ対策	土の性質の 改良	密度の増大	締め固める
		固結	薬液注入、固化材による地盤改良
		粒度の改良	土質材料の置き換え
		飽和度の低下	地下水位を低下
	応力条件や 変形、間隙 水圧に關する 改良	有効応力の増大	地下水位の低下、プレロード
		間隙水圧の消散	ドレーン工法
		遮断	地中壁、矢板
液状化の発生は許容 構造被害を防止、軽減	せん断変形の抑制	地盤の拘束	
	堅固な地盤に支持	杭基礎	
	基礎の強化	増し杭、布基礎の強化	
		地盤変位への追従	フレキシブルジョイント

## 講演 2

# 岡山県南部の地形、軟弱地盤の分布、液状化マップ 液状化の判定方法と調査方法

講師 株式会社 フジタ地質  
竹内 徹・川口浩史



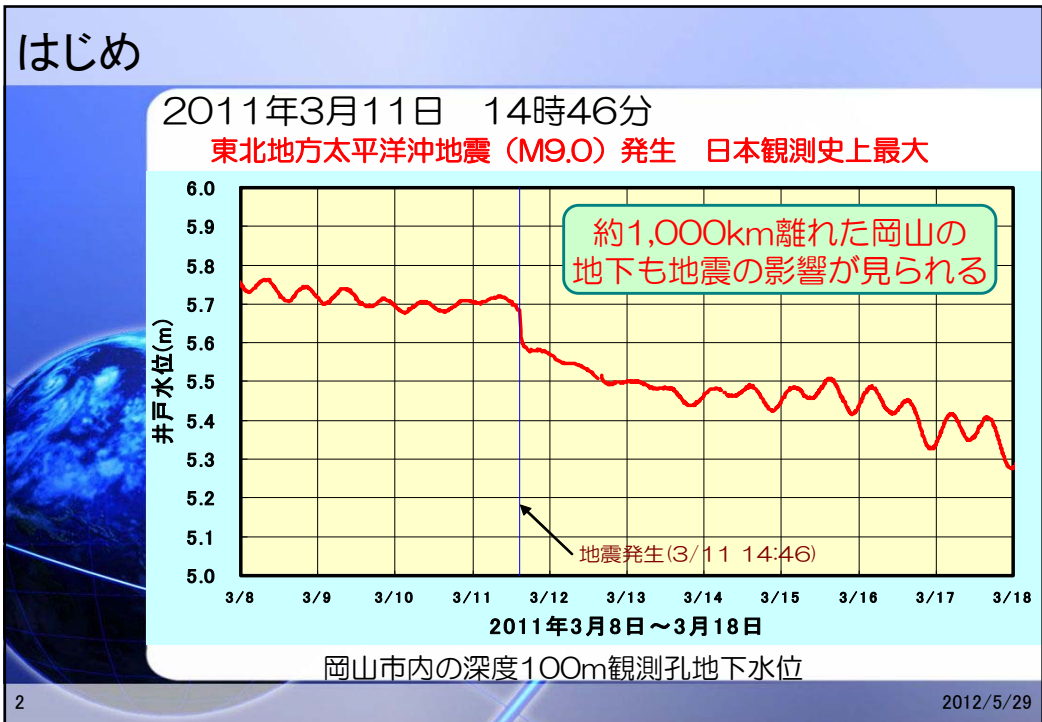


# 岡山の地盤と液状化対策

岡山県南部の地形, 軟弱地盤の分布,  
液状化マップ、液状化判定法

株式会社 フジタ地質  
竹内 徹・川口浩史

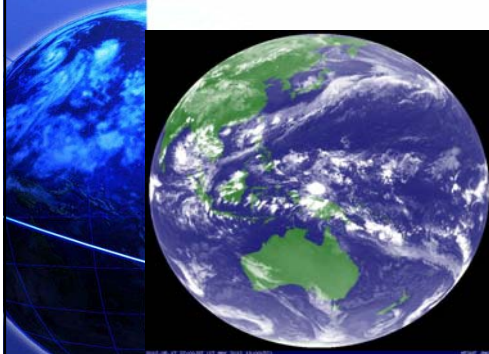
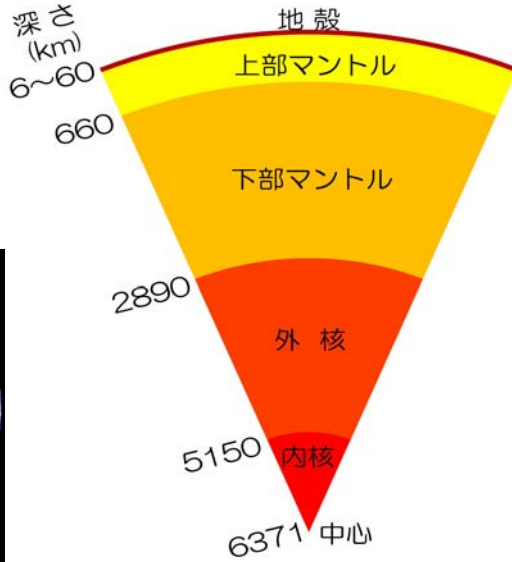
1 2012/5/29



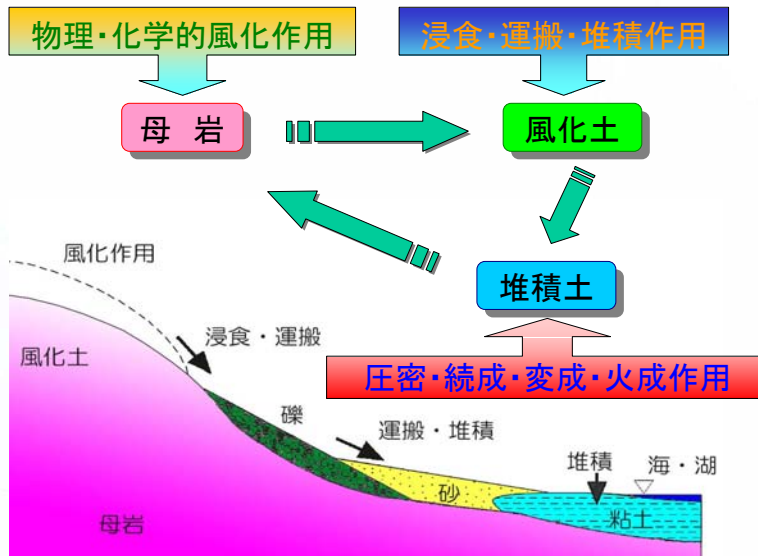
# 地殻

地殻

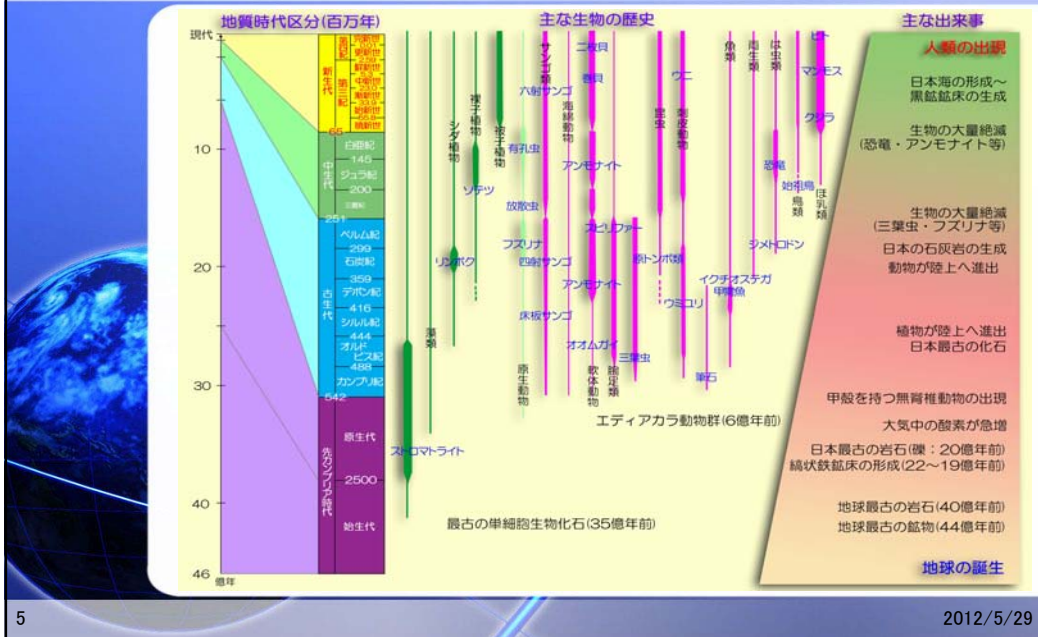
- 大陸部で60km
- 海洋部で6km



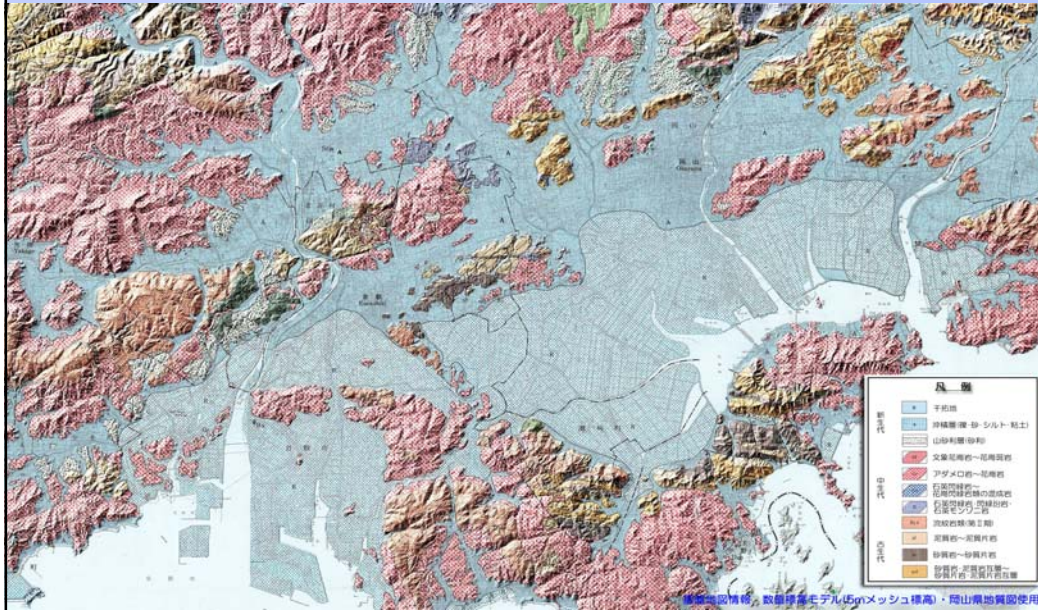
# 土の生成と地層の形成



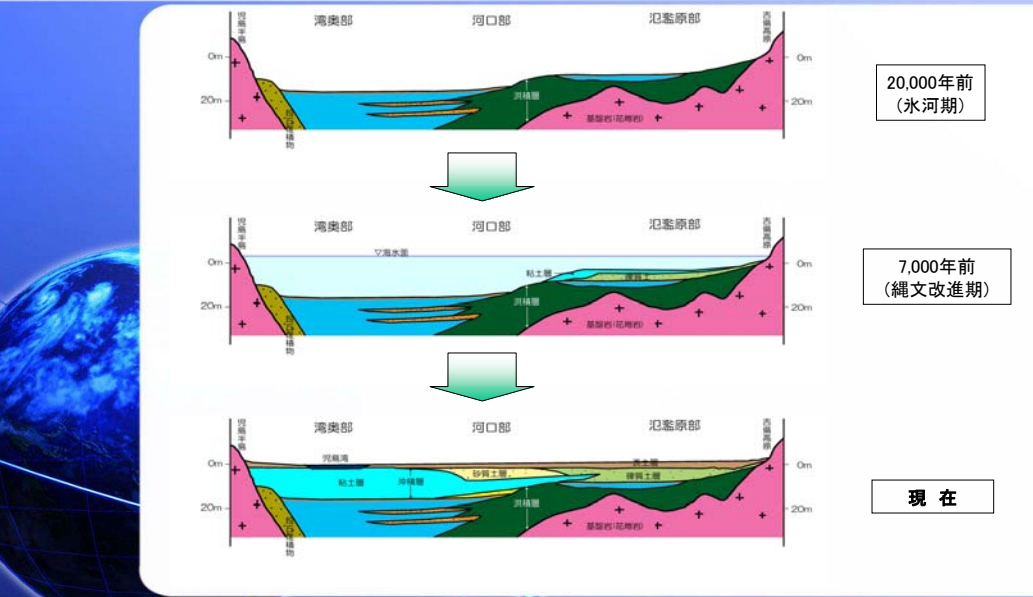
## 地質時代の区分と地層



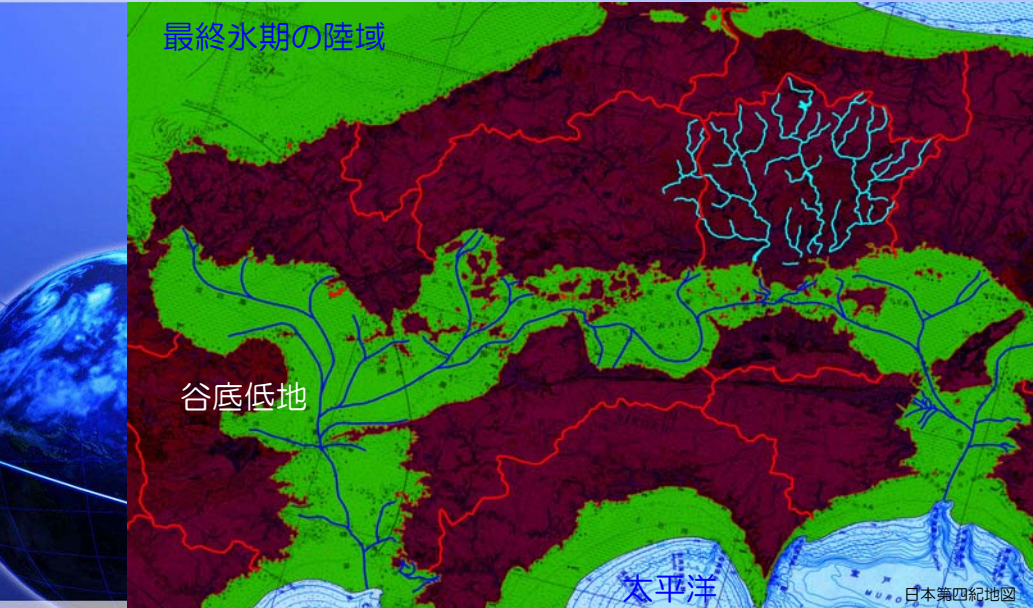
## 岡山県南部の地盤



# 岡山県南部の地盤形成モデル



# 最終氷期(20,000年前)の西日本



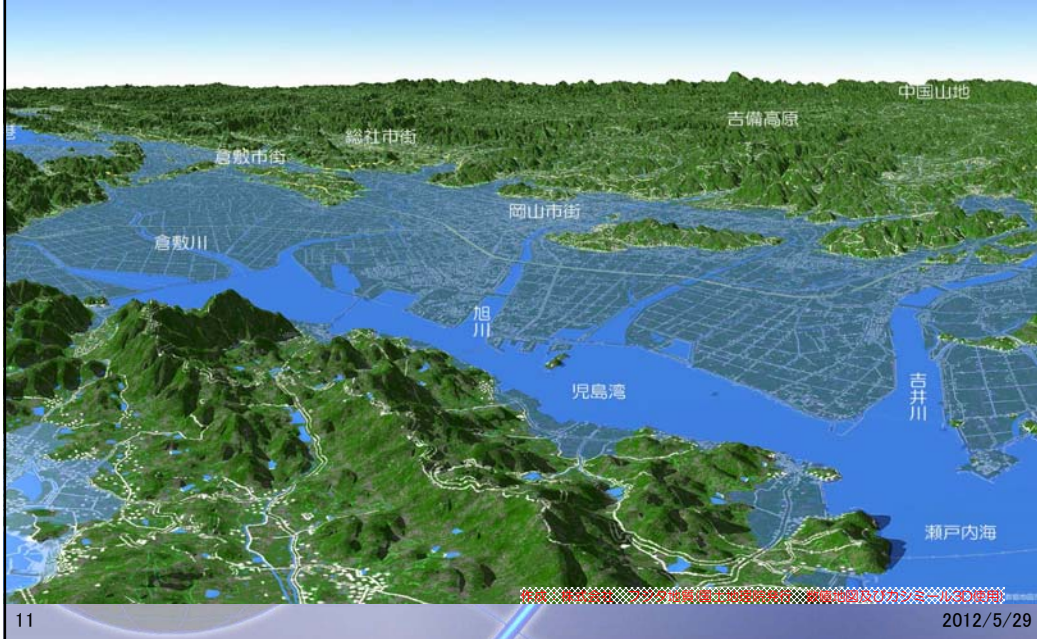
7,000年前 縄文時代の岡山



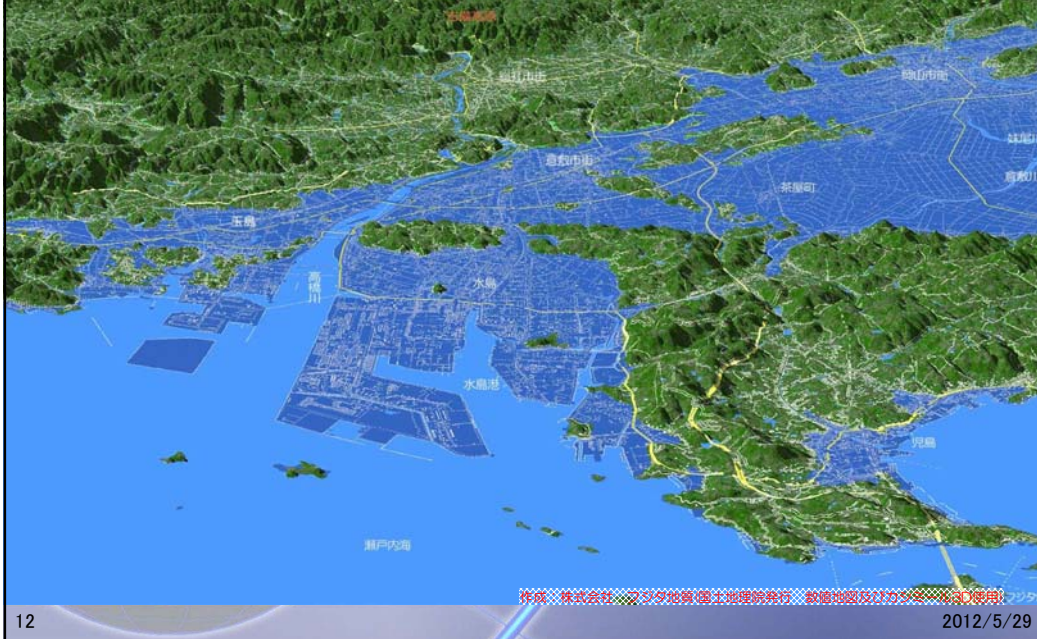
吉備の穴海と貝塚



# 吉備の穴海(7,000年前の縄文改進黨頃)



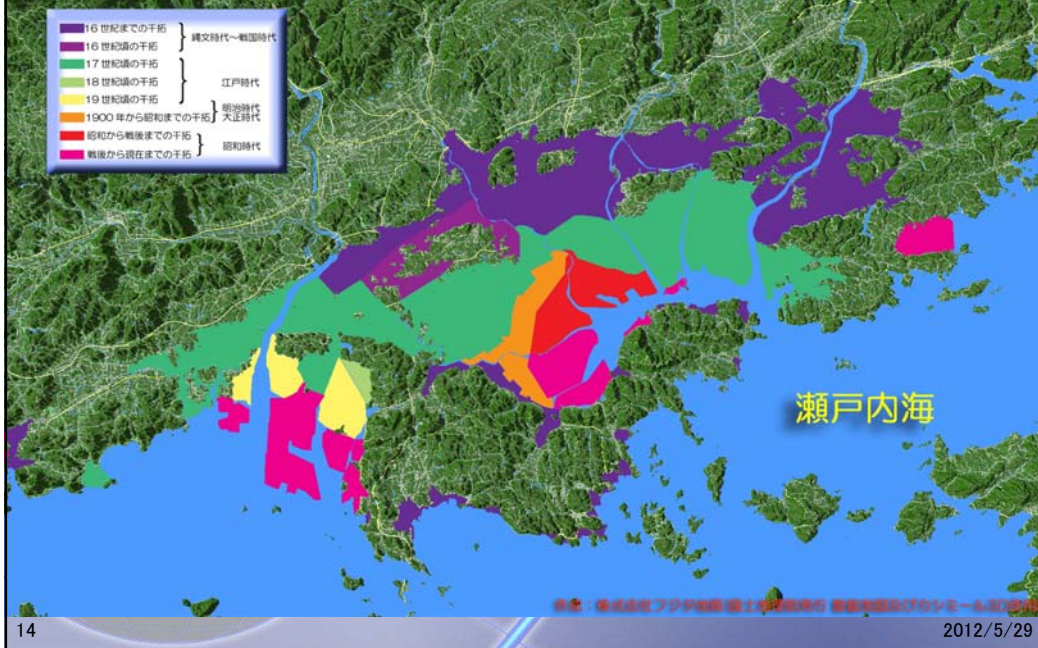
# 吉備の穴海(7,000年前の縄文改進黨頃)



## 中世(戦国時代)の古城と岡山



## 岡山平野の干拓史

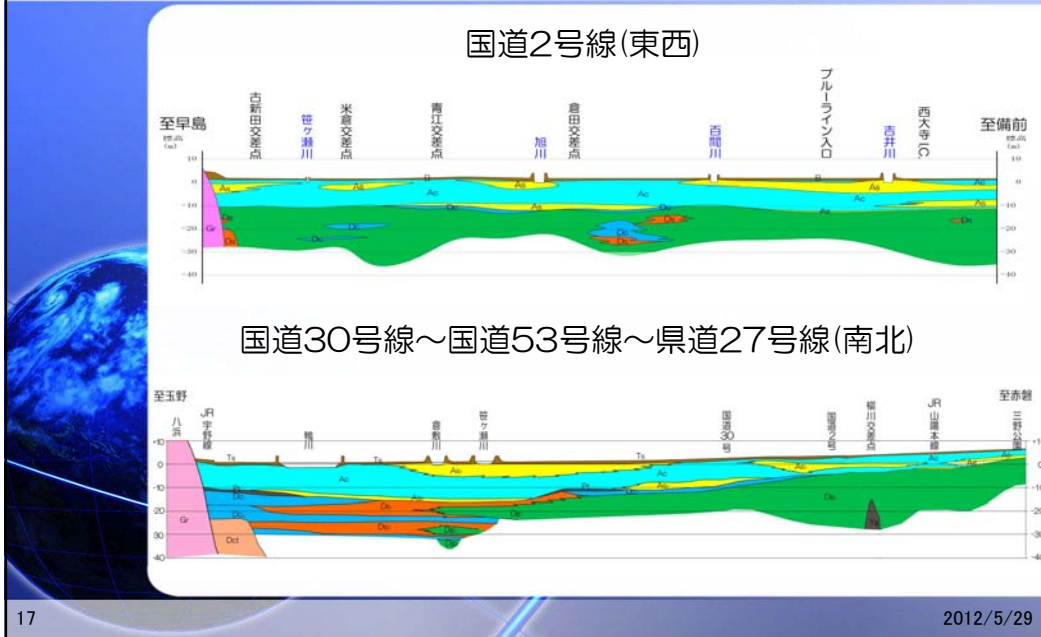


明治21年の岡山平野(20万分1地形図)





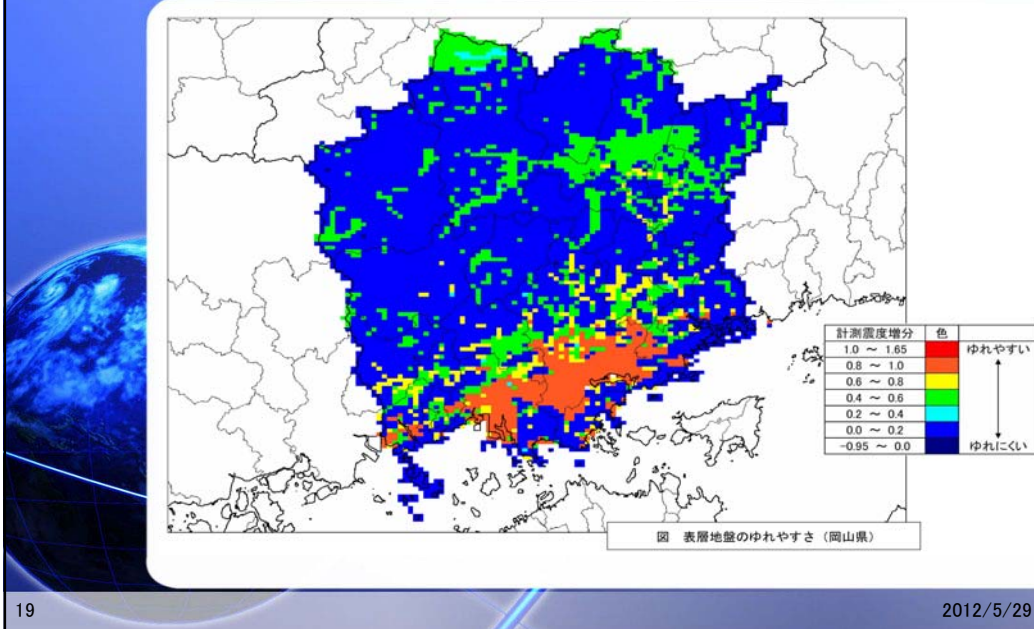
# 岡山平野断面図



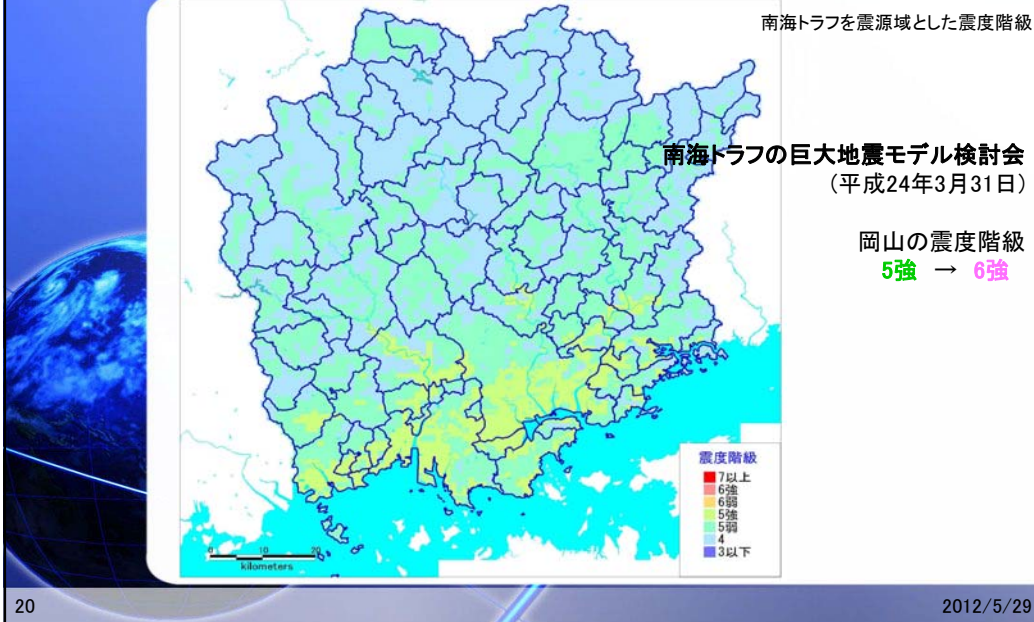
# 岡山の主な地層区分

時代区分	地層名	記号	備考	N値(平均)	
現世	表土層	T	耕作土、盛土、埋土	0~3(0)	
新生代	沖積世	第1砂質土層	As <sub>1</sub>	表層に分布する緩い層	0~2(0)
		礫質土層	Ag	表層付近に分布する扇状地性の層	3(3)
		粘性土層	Ac	海性の起源の非常に緩い層	0~2(0)
		第2砂質土層	As <sub>2</sub>	沖積層の底部に分布する層	5~30(10)
	洪積世	第1砂質土層	Ds <sub>1</sub>	洪積礫質土層上部に分布する層	10~25(15)
		第1粘性土層	Dc <sub>1</sub>	洪積礫質土層上部に分布する有機物や火山灰を含む層	5~20(8)
		礫質土層	Dg	洪積層の	20~50以上(40)
		第2砂質土層	Ds <sub>2</sub>	礫質土層下部や児島湾周辺に分布する層	20~50(35)
	第2粘性土層	Dc <sub>2</sub>	礫質土層下部や児島湾周辺に砂質土と互層状に分布する層、	10~50(20)	
第三紀	山砂利層	Yg	洪積礫質土層下部や丘陵地を形成する層	50以上(50)	
中生代	花崗岩類	Gr	岡山南部の基盤岩	50以上(50)	
	流紋岩類	Ry	岡山南東部に分布する基盤岩	50以上(50)	
古生代	堆積岩類	Pls	花崗岩類の上部に分布する基盤岩	50以上(50)	

平成17年10月 「表層地盤のゆれやすさ全国マップについて」  
内閣府政策統括官 各自治体防災情報

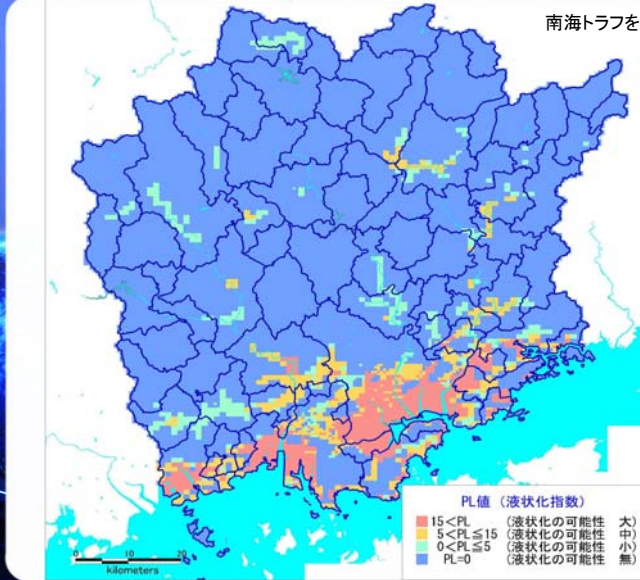


平成22年6月 内閣府(防災担当)  
都道府県別地震被害想定概要集

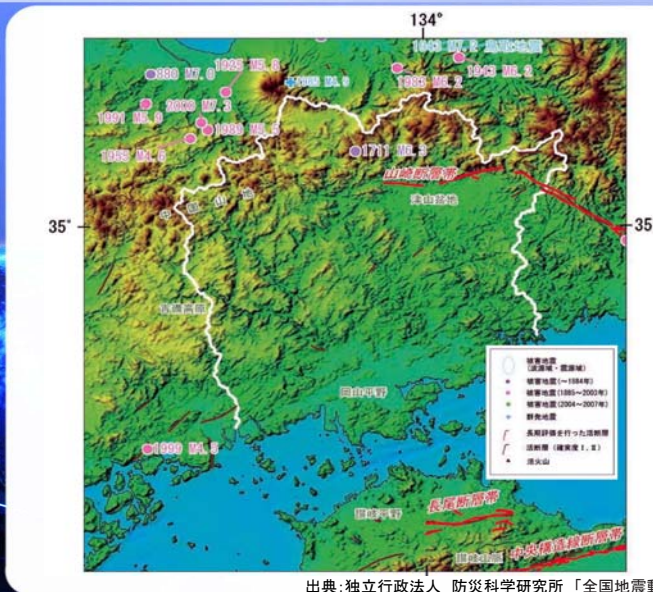


# 平成22年6月 内閣府(防災担当) 都道府県別地震被害想定概要集

南海トラフを震源域とした場合の液状化指数



# 岡山平野の主な地震履歴



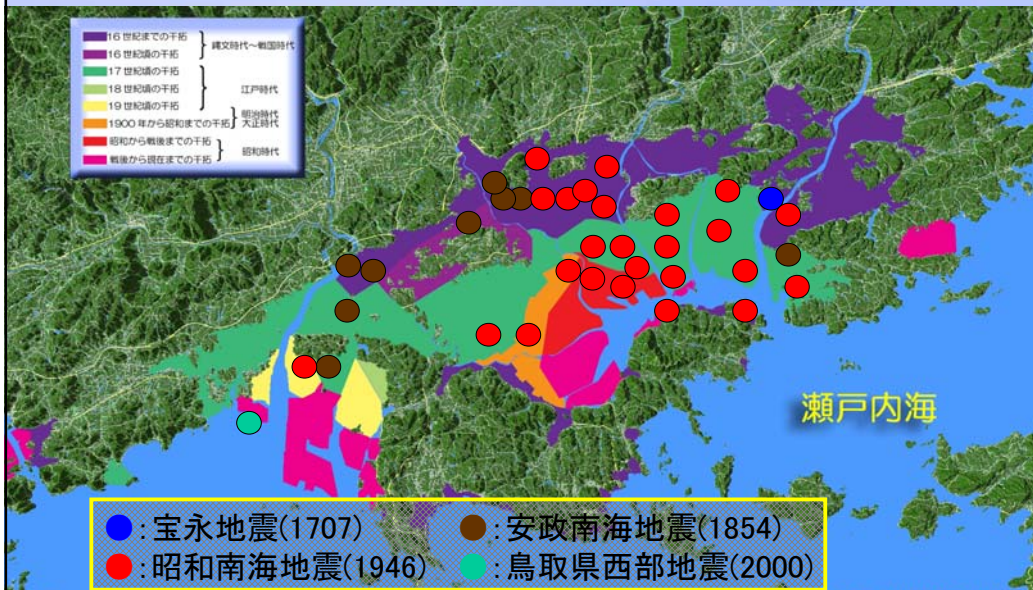
# 岡山平野の主な地震履歴

液状化が確認  
（宝永の被害）

西暦 (和暦)	地域(名称)	M	被害
868.8.3 (貞観10)	播磨・山城	7.1	(播磨諸群の官舎・諸定額寺の堂塔ことごとく崩れ倒れた。)
1707.10.28 (宝永 4)	南海トラフ(宝永地震)	8.6	大地震と大津波あり。家屋全半壊27棟。死者多数。
1710.10.3 (宝永 7)	伯耆・美作	6.5	美作で死者2人、住宅倒壊200棟余。
1711.2.1 (正徳 1)	美作(大庭地震)	—	家屋全壊118棟、半壊141棟、社寺半壊18棟。
1711.3.19 (正徳 1)	因幡・伯耆藩	6 ¼	因伯両国で死者4人、家屋倒壊380棟。
1854.12.24 (安政 1)	南海トラフ(安政南海地震)	8.4	大地震と大津波あり。家屋全半壊2,600棟。死傷者多数。
1946.12.21 (昭和21)	南海トラフ(昭和南海地震)	8.0	岡山平野で被害が大。死者51人、負傷者187人、建物全壊1,200棟、建物半壊2,346棟。
1995.1.17 (平成 7)	(平成7年兵庫県南部地震)	7.2	負傷者1人。
2000.10.6 (平成12)	(平成12年鳥取県西部地震)	7.3	負傷者18人、住宅全壊7棟、住宅半壊31棟。
2001.3.24 (平成13)	(平成13年芸予地震)	6.7	負傷者1人、住家一部損壊18棟。

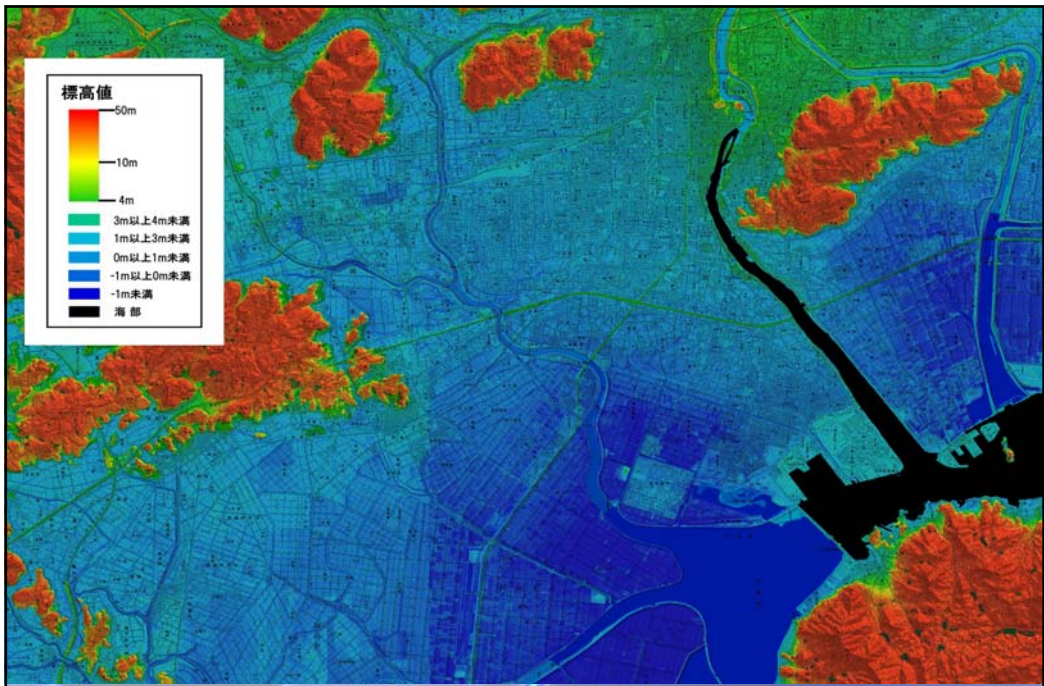
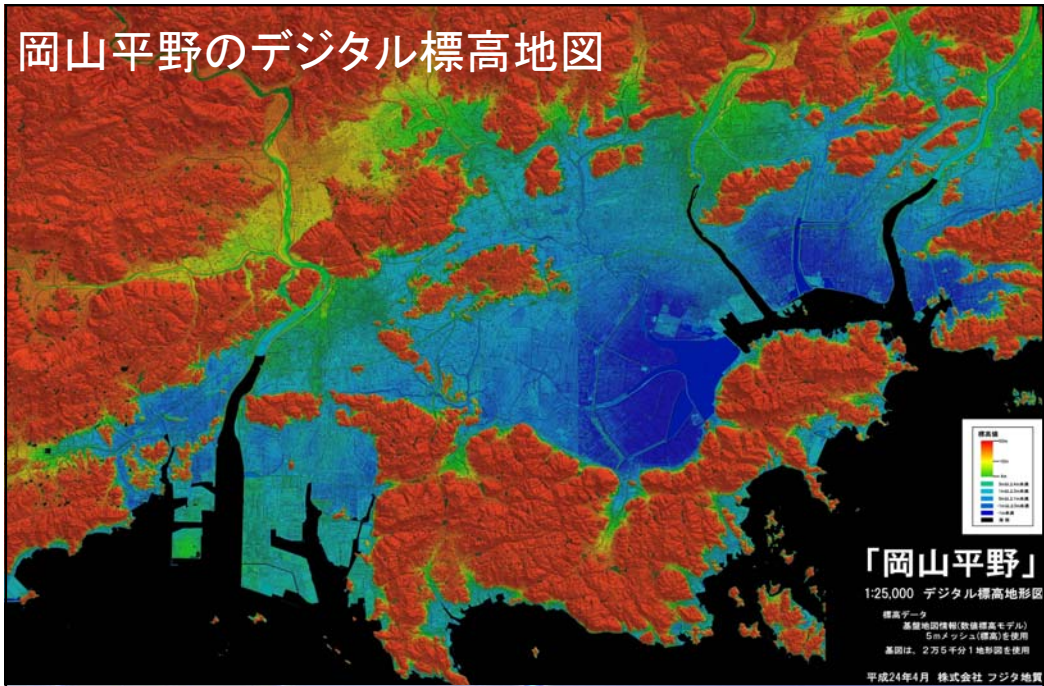
出典：独立行政法人 防災科学研究所 「全国地震動予測地図」作成手法の検討

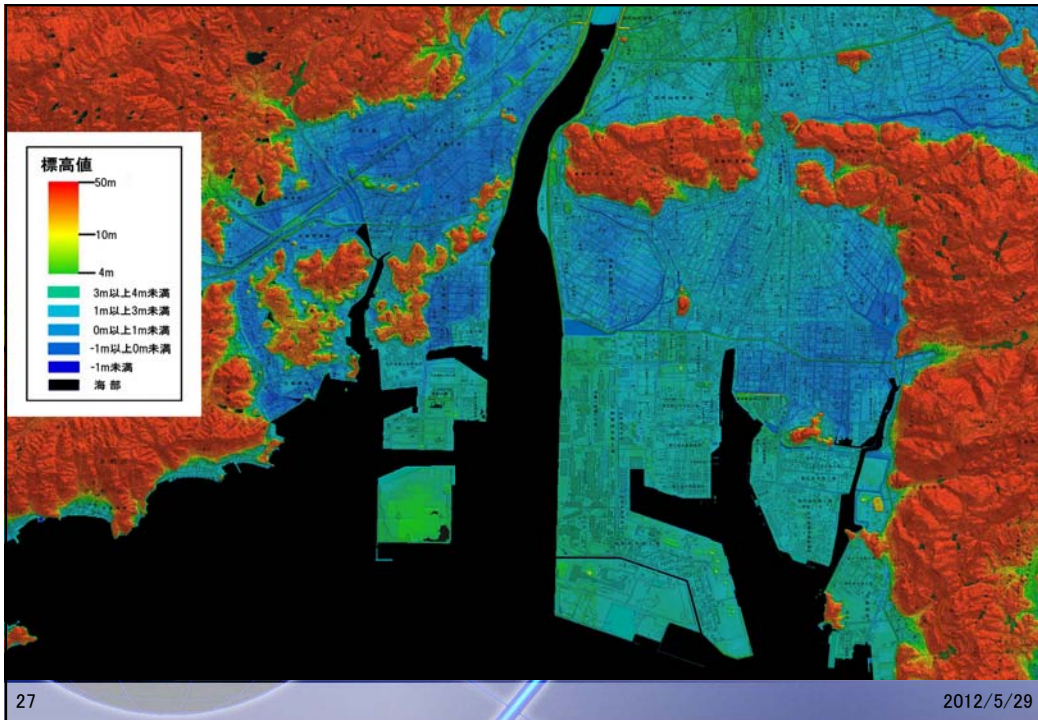
# 岡山平野の干拓地域と液状化履歴



- : 宝永地震(1707)
- : 安政南海地震(1854)
- : 昭和南海地震(1946)
- : 鳥取県西部地震(2000)

# 岡山平野のデジタル標高地図

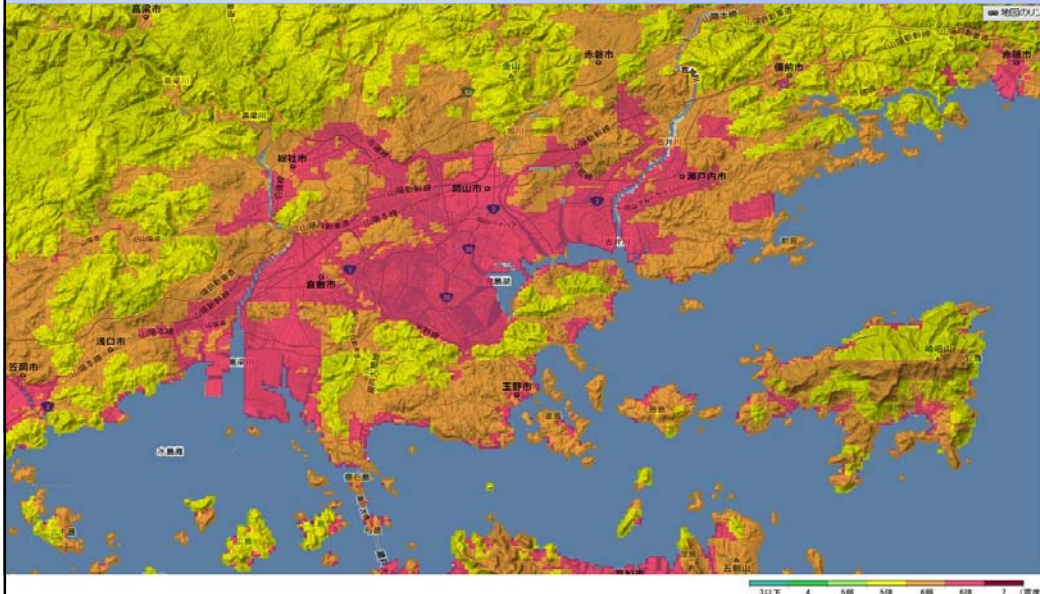




## 独立行政法人防災科学技術研究所(NIED)

28 2012/5/29

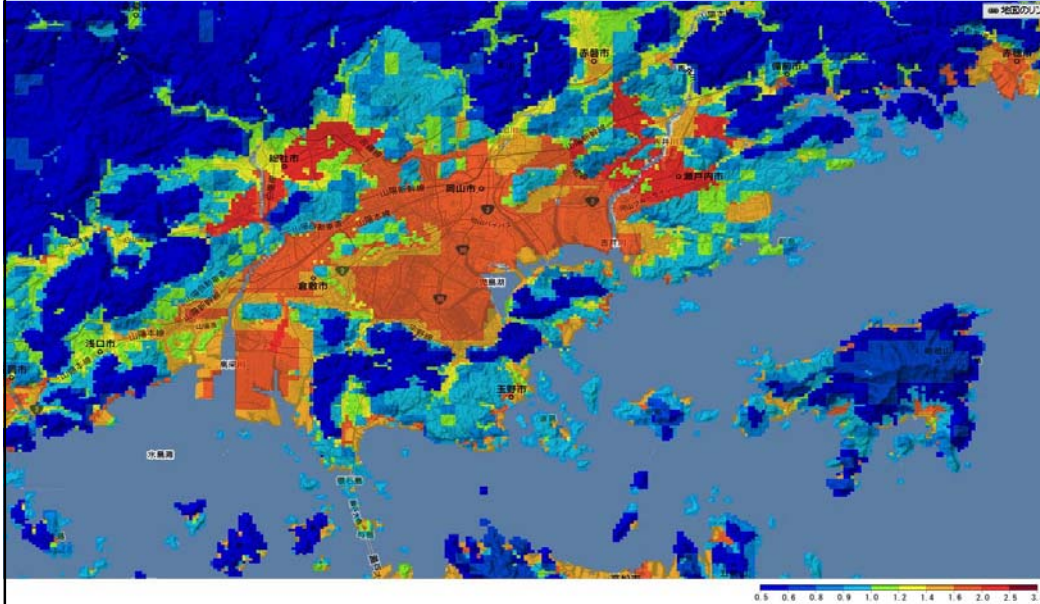
## 地震ハザードステーション(震度階級)



29

2012/5/29

## 地震ハザードステーション(揺れやすさ)



30

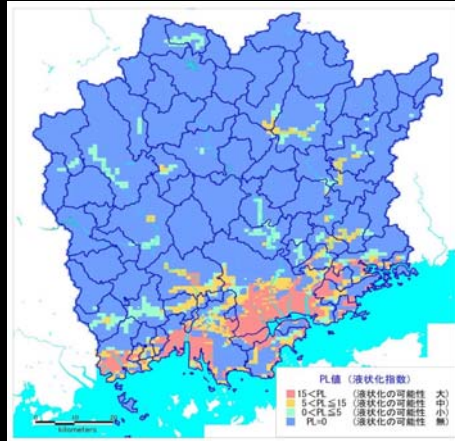
2012/5/29

## 参考Web

- ◆ 地震ハザードステーション 独立行政法人 防災科学技術研究所
- ◆ ハザードマップポータルサイト 国土交通省
  - ・洪水ハザードマップ
  - ・内水ハザードマップ
  - ・高潮ハザードマップ
  - ・津波ハザードマップ
  - ・土砂災害ハザードマップ
  - ・火山ハザードマップ各市町村が公開しているハザードマップのリンクを掲載。
- ◆ 地震の揺れやすさ全国マップ 内閣府 各自治体防災情報
- ◆ 都道府県別地震被害想定概要集 内閣府(防災担当)
- ◆ 統合地質図データベース 独立行政法人 産業総合研究所
- ◆ 電子国土ポータル 国土交通省 国土地理院
- ◆ 基盤地図情報 数値標高モデル(5mメッシュ標高)・縮尺レベル25000  
国土交通省 国土地理院
- ◆ 国土地盤情報検索サイト“KuniJiban” 独立行政法人 土木研究所
- ◆ 岡山県地盤情報 岡山地質情報活用協議会



## 2.液状化の判定方法と調査方法



液状化危険度 (PL値) 分布図 (南海トラフの地震)

出典：岡山県総務部危機管理課HP おかやま防災ナビ

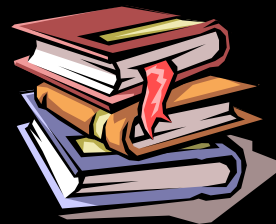
## 2.液状化の判定方法と調査方法

### 2-1. 液状化のメカニズム

### 2-2. 液状化判定の基準

### 2-3. 液状化判定に必要な地質調査

### 2-4. 簡易液状化判定の結果例



## 2-1. 液状化のメカニズム

### ○液状化現象による被害



支持力が低下し、建物や塀等に沈下・傾きが生じる



浮力が生じ、マンホール等が浮き上がる。



噴砂現象により通行や排水に支障が出る



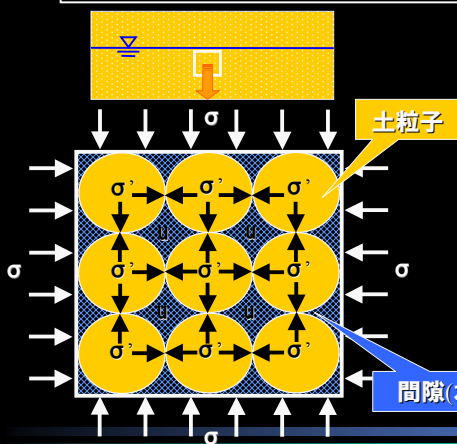
引用：吉嶺充俊, 地震被害写真集, 首都大学東京 土質研究室, 2001-2011  
<http://geot.civil.ues.tmu.ac.jp/archives/eq/index-j.html>

## 2-1. 液状化のメカニズム

○地盤とは、土粒子・間隙(水・空気)で構成されている。

○液状化しやすい地盤とは、

粒径が均一な中粒砂からなる砂質土・緩い状態・地下水面以下の飽和土

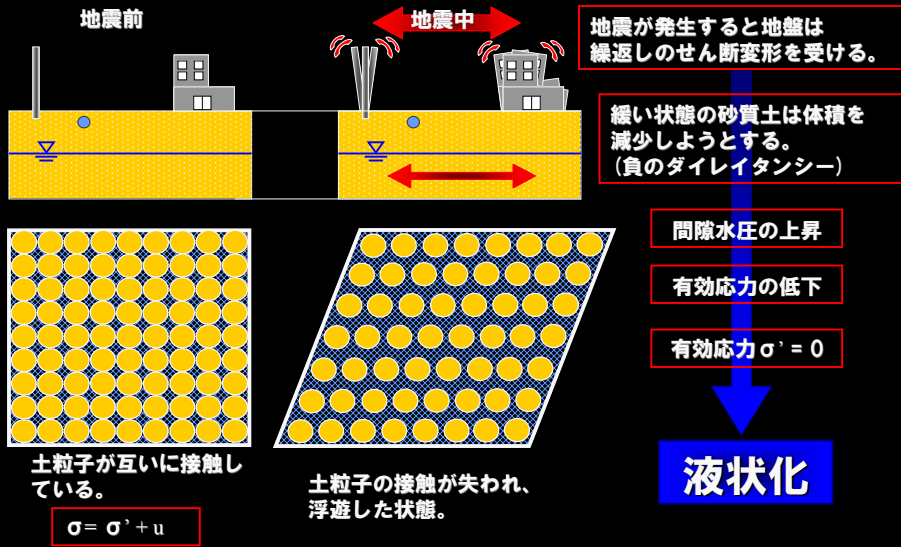


通常の地盤中では砂粒(土粒子)同士が接しており、この接点を通じて作用する支えあう力と間隙内に生じる水圧とが、周囲の圧力とつり合うことにより安定な状態を保っている。

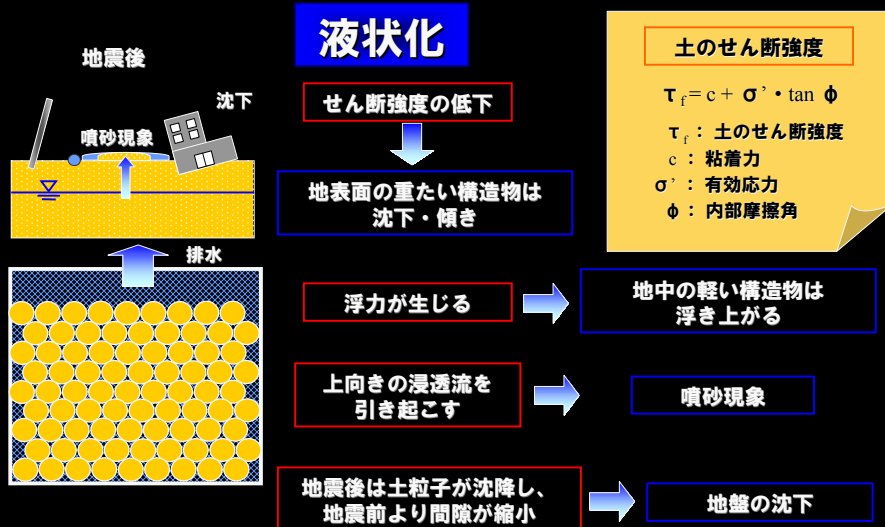
$$\sigma = \sigma' + u$$

- σ: 全応力  
(土粒子に作用する全圧力)
- σ': 有効応力  
(土粒子相互に作用する力)
- u: 間隙水圧  
(土粒子間隙の圧力)

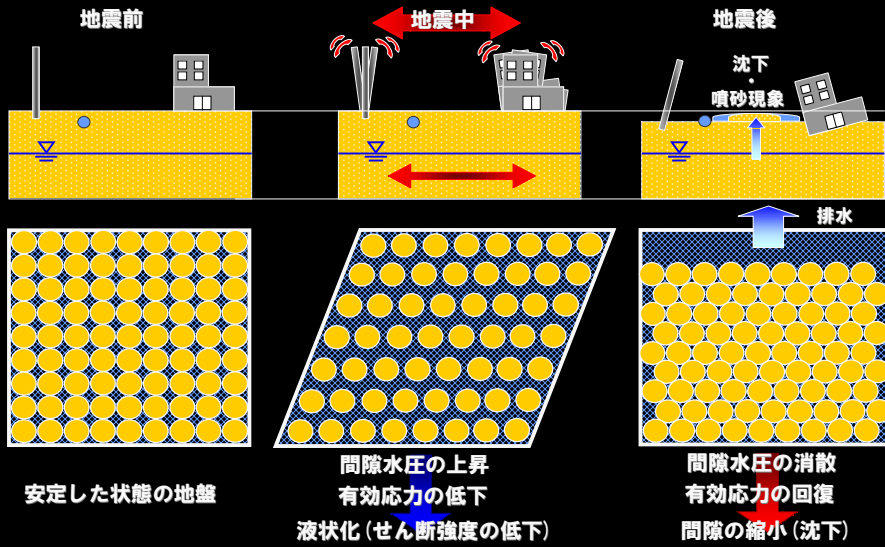
## 2-1. 液状化のメカニズム



## 2-1. 液状化のメカニズム



## 2-1. 液状化のメカニズム



## 2-1. 液状化のメカニズム

○液状化しやすい地盤とは、

粒径が均一な中粒砂からなる砂質土・緩い状態・地下水面以下の飽和土

粒径が均一な中粒砂からなる砂質土・緩い状態

砂質土は透水層であるが、粒径が均一な中粒砂を主体とする土は地震時には非排水条件になりやすい。  
緩い状態の土とは、間隙が大きい。



地震が起きた際に体積が減少しやすく、間隙水が排水されず、間隙水圧が上昇。

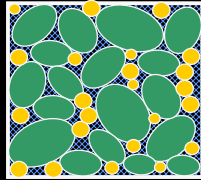
地下水面以下の飽和土

液状化とは、土粒子が水の中に浮遊した状態のことを言うため、水の存在は不可欠である。

## 2-1. 液状化のメカニズム

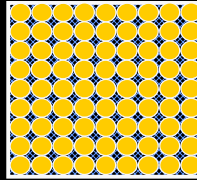
土は大きく分けると **礫質土**・**砂質土**・**粘性土** に区分される。

**礫質土**

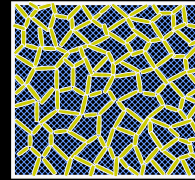


単粒構造

**砂質土**



**粘性土**



蜂の巣構造

**礫質土**は**砂質土**と同様に土粒子が認識でき、この土粒子が互いに接触し合った単粒構造となっている。

- 単粒構造 →地震時に有効応力がなくなれば粒子がばらけやすい。
- 間隙が大きい→地震時に間隙水圧が上昇しやすい。
- 透水性が高い→地震時に**非排水条件**になりにくい。

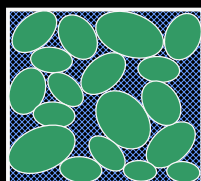
ただし、土は礫のみで構成されていることは希であり、礫の間には砂や粘土も含むため、**非排水条件**となる場合がある。

**礫質土は液状化する可能性がある土**

## 2-1. 液状化のメカニズム

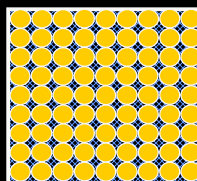
土は大きく分けると **礫質土**・**砂質土**・**粘性土** に区分される。

**礫質土**

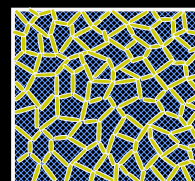


単粒構造

**砂質土**



**粘性土**



蜂の巣構造

**粘性土**は**礫質土**や**砂質土**とは構造が大きく異なっている。

土粒子が非常に小さく、表面に電荷を帯び、水分子やイオンを吸着するので、土粒子間の接触には、粘着力が働き、蜂の巣構造を形成して安定な状態を保つ。

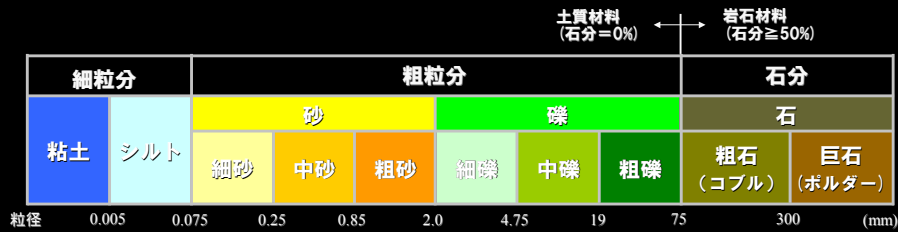
粘性土は間隙は礫質土や砂質土より大きく、地震時には間隙水圧の上昇が見られ、有効応力が低下するが、土粒子間に働く粘着力により互いにばらけることがないため、土粒子が水の中に浮遊した状態にはならない。

**粘性土は液状化する可能性がない土**

## 2-1. 液状化のメカニズム

土は大きく分けると **礫質土**・**砂質土**・**粘性土** に区分される。

土を構成する土粒子はその粒径によって礫・砂・シルト・粘土に区分される。  
土は、これらの土粒子が種々の割合で混じり合っている。



土粒子の粒径による区分とその呼び名

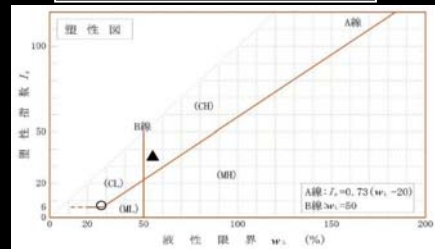
## 2-1. 液状化のメカニズム

### 地盤材料の工学的分類方法



### 補助となる土質

分類記号	質量構成比
〇〇質	15%以上50%未満
〇〇混り	5%以上15%未満
特になし	5%未満



## 2-1. 液状化のメカニズム

### 地盤材料の工学的分類方法

#### 基本となる土質

粗粒土  
(粗粒分>50%)

細粒土  
(細粒分>50%)

礫質土  
(礫分>砂分)

砂質土  
(砂分>礫分)

### 補助となる土質

分類記号	質量構成比
○○質	15%以上50%未満
○○混り	5%以上15%未満
特になし	5%未満

細粒土		粗粒土		工学的分類
粘土	シルト	砂	礫	
8%	12%	75%	5%	
細粒分 20%		粗粒分 80%		

## 2-2. 液状化判定の基準

液状化の判定方法は、各機関から指針及び基準が出されている。

指針・基準名		備考
建築基礎構造設計指針	日本建築学会	
道路橋示方書・同解説 耐震設計編	日本道路協会	
港湾の施設の技術上の基準・同解説	日本港湾協会	
鉄道構造物等設計標準・同解説	国土交通省鉄道局	
水道施設耐震工法指針・同解説	日本水道協会	
下水道施設の耐震対策指針と解説	日本下水道協会	道路橋示方書と同様
共同溝設計指針	日本道路協会	道路橋示方書(S.55)と同様
危険物の規制に関する技術上の規準の細目を定める告示	総務省	道路橋示方書(H.2)と同様
埋立地の液状化対策ハンドブック	国土交通省港湾局	
高圧ガス設備等耐震設計指針	高圧ガス保安協会	

## 2-2.液状化判定の基準

### 建築基礎構造設計指針

#### 液状化判定方法( $F_L$ 法)

$F_L$ 値とは、ある地点での計算深度毎の液状化発生に対する安全率であり、  
 $F_L$ 値 $>1.0$ ：液状化する可能性なし  
 $F_L$ 値 $\leq 1.0$ ：液状化する可能性あり

$$F_L = R / L$$

R：液状化抵抗比

L：等価な繰返しせん断応力比

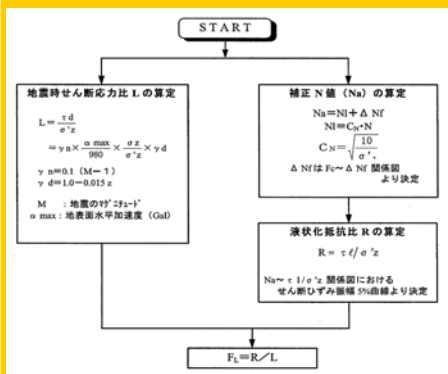
#### 対象とすべき土層

- 飽和土層。
- 地表面から20m程度以浅の沖積層。
- 細粒分含有率が35%以下の土。  
 ただし、細粒分含有率が35%以上でも粘土分(0.005mm以下の粒径を持つ土粒子)含有率が10%以下、または塑性指数が15%以下の埋立あるいは盛土 地盤は液状化の検討を行う。

※細粒土を含む礫や透水性の低い土層に囲まれた礫は液状化の検討を行う。

## 2-2.液状化判定の基準

### 建築基礎構造設計指針



$\tau_d$ ：水平面に生じる等価な一定繰返しせん断応力振幅 (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma'_z$ ：検討深さにおける有効土被り圧 (鉛直有効応力) (kN//m<sup>2</sup>)

$\gamma_n$ ：等価な繰返し回数に関する補正係数  
 $\gamma_n = 0.1 (M-1)$ 、Mは地震のマグニチュード

$\alpha_{max}$ ：地表面における設計用水平加速度 (Gal)

g：重力加速度 (980Gal)

$\sigma_z$ ：検討深さにおける全土被り圧 (鉛直全応力) (kN//m<sup>2</sup>)

$\gamma_d$ ：地盤が剛体でないことによる低減係数  
 $(1-0.015z)$

zはメートル単位で表した地表面からの検討深さNa：補正/値

$N_1$ ：換算/値

$\Delta Nf$ ：細粒土含有率に応じた補正/値増分

$C_N$ ：拘束圧に関する換算係数

N：トンビ法または自動落下による実測/値



## 2-2.液状化判定の基準

### 建築基礎構造設計指針

#### L: 等価な繰返しせん断応力比

$$L = \frac{\tau_d}{\sigma_z} = r_n \frac{\alpha_{\max}}{g} \frac{\sigma_z'}{\sigma_z} r_d$$

$\tau_d$ : 水平面に生じる等価な一定繰返しせん断応力振幅 (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_z'$ : 検討深度における有効土被り圧 (鉛直有効応力) (kN/m<sup>2</sup>)

$r_n$ : 等価な繰返し回数に関する補正係数

$$r_n = 0.1(M-1): M(\text{マグニチュード})$$

$\alpha_{\max}$ : 地表面における設計用水平加速度 (cm/s<sup>2</sup>)

- ・ 損傷限界検討用 150~200 (cm/s<sup>2</sup>)
- ・ 終局限界検討用 350 (cm/s<sup>2</sup>)

$g$ : 重力加速度 (980 cm/s<sup>2</sup>)

$\sigma_z$ : 検討深度における全土被り圧 (鉛直全応力) (kN/m<sup>2</sup>)

$r_d$ : 地盤が剛体でないことによる低減係数

$$r_d = 1 - 0.015z$$

:  $z$ (メートル単位で表した地表面からの検討深さ)

## 2-2.液状化判定の基準

### 建築基礎構造設計指針

#### L: 等価な繰返しせん断応力比

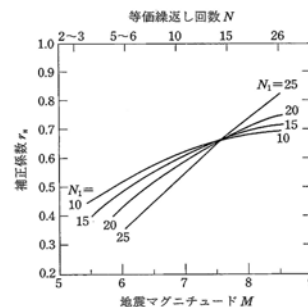
$$L = \frac{\tau_d}{\sigma_z} = r_n \frac{\alpha_{\max}}{g} \frac{\sigma_z'}{\sigma_z} r_d$$

$\tau_d$ : 水平面に生じる等価な一定繰返しせん断応力振幅 (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_z'$ : 検討深度における有効土被り圧 (鉛直有効応力) (kN/m<sup>2</sup>)

$r_n$ : 等価な繰返し回数に関する補正係数

$$r_n = 0.1(M-1): M(\text{マグニチュード})$$



補正  $N$  値、マグニチュード、繰返し回数と補正係数の関係<sup>4.4.3)</sup>

$M(\text{マグニチュード}) = 7.5$

## 2-2.液状化判定の基準

### 建築基礎構造設計指針

#### 補正N値( $N_a$ )

$$N_a = N_1 + \Delta N_f$$

$$N_1 = C_N \cdot N$$

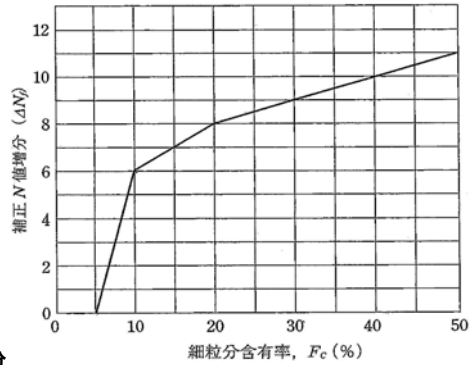
$$C_N = \sqrt{98 / \sigma'_z}$$

$N_1$  : 換算N値

$C_N$  : 拘束圧に関する換算係数

$\Delta N_f$  : 細粒分含有率 $F_c$ に応じた補正N値増分

$N$  : トンビ法又は自動落下法による実測N値



細粒分含有率とN値の補正係数<sup>4.5.3)</sup>

## 2-2.液状化判定の基準

### 建築基礎構造設計指針

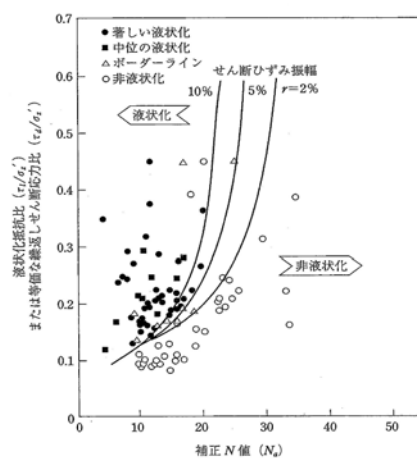
#### R: 液状化抵抗比

$$R = \frac{\tau_l}{\sigma'_z}$$

補正N値と液状化抵抗、動的せん断ひずみの関係より限界せん断ひずみ曲線5%を用いて求める。

$\tau_l$  : 水平面における液状化抵抗

$\sigma'_z$  : 検討深度における有効土被り圧 (鉛直有効応力) (kN/m<sup>2</sup>)



補正N値と液状化抵抗、動的せん断ひずみの関係<sup>4.5.3)</sup>

## 2-2.液状化判定の基準

### 道路橋示方書

#### 液状化判定方法( $F_L$ 法)

$F_L$ 値とは、ある地点での計算深度毎の液状化発生に対する抵抗率であり、  
 $F_L > 1.0$  : 液状化する可能性なし  
 $F_L \leq 1.0$  : 液状化する可能性あり

$$F_L = R / L$$

$R$  : 動的せん断強度比

$L$  : 地震時せん断応力比

#### 対象とすべき土層

沖積砂質土層で以下の3つの条件すべてに該当する場合

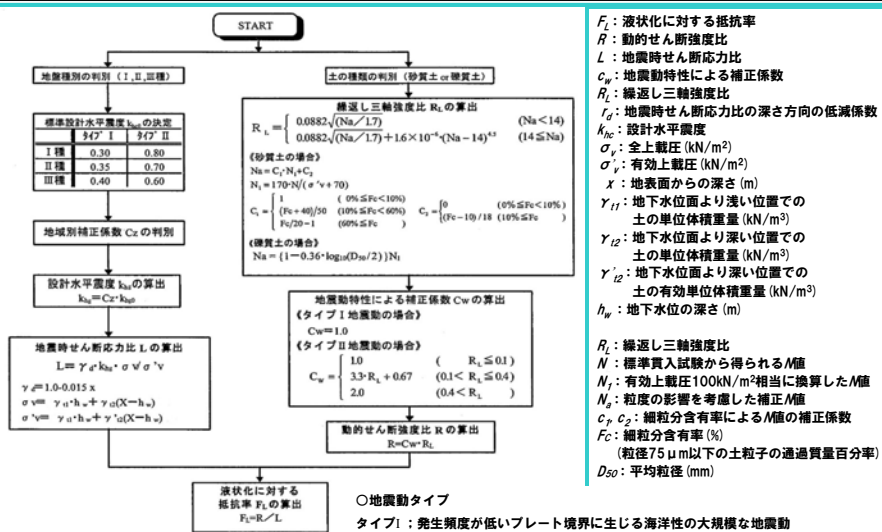
○地下水位は現地盤面から10m以内にあり、かつ、現地盤面から20m程度以内の深さに存在する飽和土層。

○細粒分含有率 $F_c$ が35%以下の土、又は $F_c$ が35%を超えても塑性指数 $I_p$ が15以下の土層。

○平均粒径 $D_{50}$ が10mm以下で、かつ、10%粒径 $D_{10}$ が1mm以下である土層。

## 2-2.液状化判定の基準

### 道路橋示方書



$F_L$  : 液状化に対する抵抗率

$R$  : 動的せん断強度比

$L$  : 地震時せん断応力比

$C_w$  : 地震動特性による補正係数

$R_e$  : 繰返し三軸強度比

$k_{hs}$  : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

$k_{hp}$  : 設計水平震度

$\sigma'_v$  : 全上載圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma'_v'$  : 有効上載圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$x$  : 地表面からの深さ (m)

$\gamma'_{1f}$  : 地下水位面より浅い位置での

土の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma'_{12}$  : 地下水位面より深い位置での

土の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma'_{12}$  : 地下水位面より深い位置での

土の有効単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$h_w$  : 地下水位の深さ (m)

$R_e$  : 繰返し三軸強度比

$N$  : 標準貫入試験から得られるM値

$N_1$  : 有効上載圧100kN/m<sup>2</sup>相当に換算したM値

$N_2$  : 粒度の影響を考慮した補正M値

$C_1, C_2$  : 細粒分含有率によるM値の補正係数

$F_c$  : 細粒分含有率 (%)

(粒径75 $\mu$ m以下の土粒子の通過質量百分率)

$D_{50}$  : 平均粒径 (mm)

## 2-2.液状化判定の基準

### 道路橋示方書

耐震設計上の地盤種別は、原則として式(4.5.1)により算出する地盤の特性値  $T_0$  をもとに、表-4.5.1により区別するものとする。地表面が耐震設計上の基盤面と一致する場合はI種地盤とする。

$$T_0 = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (4.5.1)$$

ここに、

$T_0$ : 地盤の特性値 (s)

$H_i$ :  $i$  番目の地層の厚さ (m)

$V_{si}$ :  $i$  番目の地層の平均せん断弾性波速度 (m/s)

$i$ : 当該地盤が地表面から耐震設計上の基盤面まで  $n$  層に区分される  
ときの地表面から  $i$  番目の地層の番号

表-4.5.1 耐震設計上の地盤種別

地盤種別	地盤の特性値 $T_0$ (s)
I種	$T_0 < 0.2$
II種	$0.2 \leq T_0 < 0.6$
III種	$0.6 \leq T_0$

粘性土層の場合

$$V_{si} = 100 N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 25)$$

砂質土層の場合

$$V_{si} = 80 N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 50)$$

$N_i$ : 標準貫入試験による  $i$  番目の地層の平均  $N$  値

### ○耐震設計上の基盤面

対象地点に共通する広がりを持つ、  
十分堅固な地盤の上面

十分堅固な地盤とは、  
せん断弾性波速度 300 m/s 程度より

粘性土層では  $N$  値 25  
砂質土層では  $N$  値 50

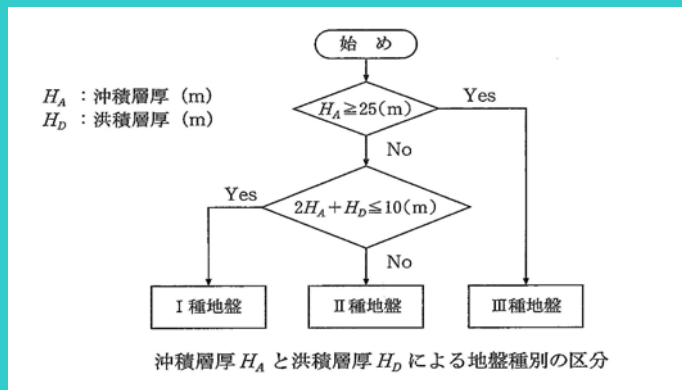
- I種地盤 良好な洪積地盤及び岩盤
- III種地盤 沖積地盤のうち軟弱地盤
- II種地盤 I種・III種地盤のいずれにも属さない洪積地盤及び沖積地盤

$V_{si}$  は弾性波探査やPS検層によって測定するのが望ましいが、実測値がない場合は  $N$  値から推定してもよい。

## 2-2.液状化判定の基準

### 道路橋示方書

相当深く調査をしても耐震設計上の基盤面が現れない場合は、  
洪積層と沖積層の層厚より地盤種別の分類を行ってもよい。



## 2-2.液状化判定の基準

道路橋示方書

### ○地震動タイプ

タイプI；発生頻度が低いプレート境界に生じる海洋性の大規模な地震動

タイプII；平成7年 兵庫県南部地震のような内陸直下型地震による地震動

#### タイプI

標準加速度応答スペクトル  $S_{10}$

地盤種別	地震名	マグニチュード $M$	記録場所
I種地盤	1978年宮城県沖地震	7.4	開北橋周辺地盤上
	1993年北海道南西沖地震	7.8	七峰橋周辺地盤上
II種地盤	1968年日向灘沖地震	7.5	板島橋周辺地盤上
	1994年北海道東方沖地震	8.2	温根沼大橋周辺地盤上
III種地盤	1983年日本海中部地震	7.7	津軽大橋周辺地盤上
	1994年北海道東方沖地震	8.2	銅路川堤防周辺地盤上

#### タイプII

標準加速度応答スペクトル  $S_{20}$

地盤種別	地震名	マグニチュード $M$	記録場所
I種地盤	1995年兵庫県南部地震	7.3	神戸海洋気象台地盤上
			猪名川架橋予定地点周辺地盤上
JR西日本慶取駅構内地盤上			
大阪ガス糞合供給所構内地盤上			
II種地盤			東神戸大橋周辺地盤上
III種地盤			ポートアイランド内地盤上

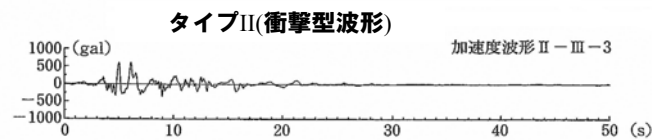
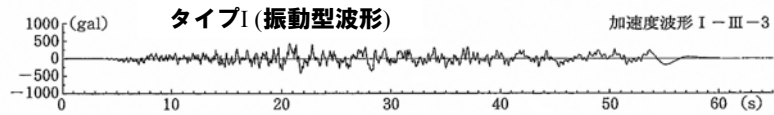
## 2-2.液状化判定の基準

道路橋示方書

### ○地震動タイプ

タイプI；発生頻度が低いプレート境界に生じる海洋性の大規模な地震動

タイプII；平成7年 兵庫県南部地震のような内陸直下型地震による地震動



III種地盤  
動的解析に用いる地震動の例

## 2-2.液状化判定の基準

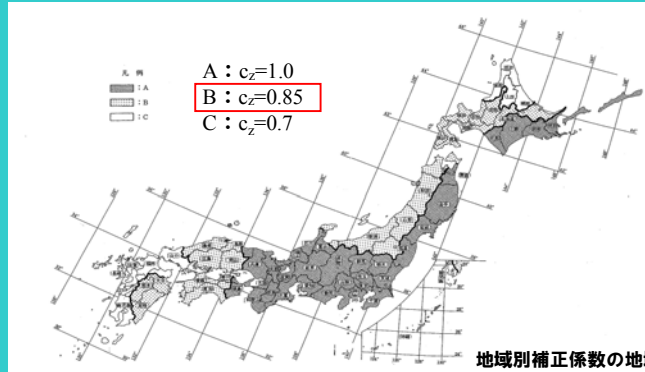
### 道路橋示方書

$k_{hg}$  : レベル2地震動の地盤面における  
設計水平震度

$$k_{hg} = c_z k_{hg0}$$

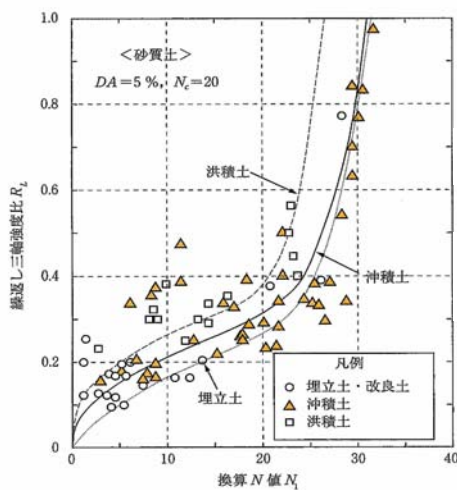
$c_z$  : 地域別補正係数

$k_{hg0}$  : レベル2地震動(タイプI・タイプII)  
の地表面における設計水平震度の  
標準値(地盤種別により設定)



## 2-2.液状化判定の基準

### 道路橋示方書

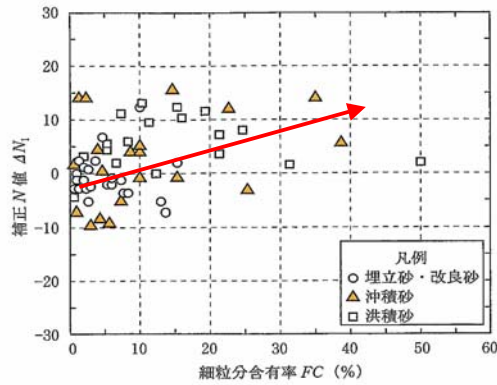


$R_L$  : 繰返し三軸強度比  
 $N_r$  : 有効上載圧100kN/m<sup>2</sup>相当に換算した  $N$  値

$R_L$  は繰返し回数20回で軸ひずみ両振幅が5%に達するに要するせん断応力片振幅を初期有効拘束圧で除した比である。

## 2-2.液状化判定の基準

道路橋示方書



同図に示す補正値  $\Delta N_1$  は、同じ  $R_L$  値を有する細粒分の少ない砂質土の  $N_1$  値と細粒分を含む砂質土の  $N_1$  値との差である

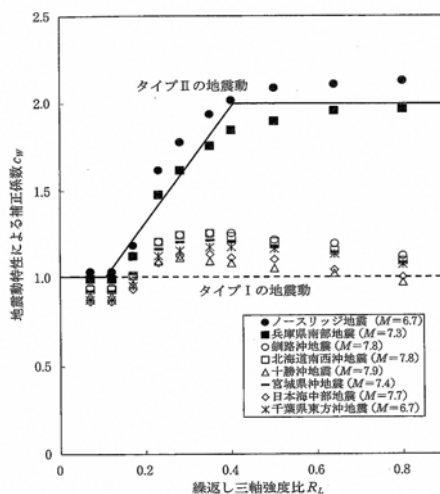
データにバラツキが大きいものの、右上がりの傾向であることがわかる。

つまり、同じ  $N_1$  値であれば、細粒分を多く含む砂質土の  $R_L$  値は細粒分の少ない砂質土に比べて大きい、あるいは、同じ  $R_L$  値であれば、細粒分を多く含む砂質土の  $N_1$  値は細粒分の少ない砂質土に比べて小さい

図-参 6.5 砂質土の細粒分含有率と補正項  $\Delta N_1$  の関係

## 2-2.液状化判定の基準

道路橋示方書



地盤の液状化の発生の有無、あるいは液状化の程度は地震動の大きさだけではなく、地震動の繰返し特性に強く支配される。

地震動波形に最大振幅に近い大きな振幅の波が多く含まれている。

振動型波形(タイプ I)

最大振幅が衝撃的に発生する衝撃型波形(タイプ II)

振動型波形(タイプ I)の方が液状化が発生しやすい。

同図よりタイプ II の地震動では  $R_L$  値が大きいかほど  $C_p$  の値が大きくなっていることが分かる。

言い換えれば、衝撃型波形(タイプ II)に対して、 $R_L$  値が大きな土では、液状化に対するねばりがある。

図-参 6.9 地震動特性による補正係数

## 2-2.液状化判定の基準

### 液状化指数 PL値

液状化に対する抵抗率 $F_L$ は、ある地点での計算深度毎の液状化の程度を示す指数であるのに対し、計算深度ではなく、計算地点(地盤全体として)での液状化の程度を示す指数として、液状化指数 $P_L$ 値が提案されている。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L) (10 - 0.5x) dx$$

### 建築物の構造関係技術基準解説書

液状化の影響度を示す指標。  
 $P_L$ 値と液状化の危険度の関係が示されている

$P_L$  値と液状化の危険度の関係

$P_L$	液状化の危険度
0	かなり低い
5 以下	低い
5 を超え15以下	高い
15 を超える	極めて高い

### 道路橋示方書

基礎の耐震設計で流動化の影響を考慮する場合に用いられる。

## 2-3.液状化判定に必要な地質調査

地層構成、 $N$ 値、地下水位、湿潤密度試験(単位体積重量)

### 道路橋示方書

- 地下水位は現地盤面から10m以内。
- 現地盤面から20m程度以内の深さに存在する飽和土層。
- 細粒分含有率 $F_c$ が35%以下の土、又は $F_c$ が35%を超えても塑性指数 $I_p$ が15以下の土層。
- 平均粒径 $D_{50}$ が10mm以下で、かつ、10%粒径 $D_{10}$ が1mm以下である土層。

### 建築基礎構造設計指針

- 飽和土層。
- 地表面から20m程度以浅の沖積層。
- 細粒分含有率が35%以下の土。ただし、細粒分含有率が35%以上でも粘土分(0.005mm以下の粒径を持つ土粒子)含有率が10%以下、または塑性指数が15%以下の埋立あるいは盛土 地盤は液状化の検討を行う。

粒度試験、液性限界・塑性限界試験



## 2-3.液状化判定に必要な地質調査

### ボーリング調査



軟弱～硬質な地層の掘削が可能で、掘削孔を利用し、原位置試験・試料採取を行い、**地層構成、地盤のN値、地下水位**を調べます。

- 標準貫入試験  
地盤のN値を測定、採取した試料より地層構成の把握を行う。
- PS検層・密度検層  
地盤の弾性波速度(P波速度・S波速度)、密度を求める。
- サンプリング  
室内土質試験用の乱れの少ない試料採取を行う。  
土質やN値により様々な採取方法がある。

## 2-3.液状化判定に必要な地質調査

### 標準貫入試験



地盤の強度を判定するためのN値を求めるとともに、試料を採取する。

#### 試験方法

63.5±0.5kgのドライハンマーを76±1cmの高さから落下

標準貫入試験用サンプラーを地盤に30cm打ち込むのに要する**打撃回数 (○回/30cm)**を求める。

標準貫入試験用サンプラー

試料採取

地層構成の把握  
室内土質試験

打撃回数

N値

地盤の強度

## 2-3.液状化判定に必要な地質調査

### ボーリング調査結果より作成される土質柱状図



地層構成  
深さ・層厚  
土質名  
色調・観察記事

標準貫入試験  
試験深度  
N値

採取試料  
採取深度  
試験位置・内容

## 2-3.液状化判定に必要な地質調査

### 室内土質試験

試験項目	規格・基準	試験の目的	結果から得られる主な値	
物理試験	土の粒度試験	JIS A 1204 JGS 0131	土の粒度を求める	最大粒径 (mm) 粒径加積曲線と各粒径 均等係数 $U_c$ 曲率係数 $U_c'$
	土の液性限界・塑性限界試験	JIS A 1205 JGS 0141	土の液性限界、塑性限界、塑性指数を求める	コンシステンシー指数 $I_c$ 液性限界 $w_L$ (%) 流動曲線 (流動指数 $I_f$ ) 塑性限界 $w_p$ (%) 塑性指数 $I_p$
	土の湿潤密度試験	JIS A 1225 JGS 0191	土の湿潤密度を求める	湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> ) 乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )

## 2-3.液状化判定に必要な地質調査

### 土の粒度試験

#### ふるい分析

礫・砂分を対象

75~0.075mmの13種類のふるいを通過させ、各ふるいに残った試料の質量を測定する。



#### 沈降分析

粘土・シルト分を対象

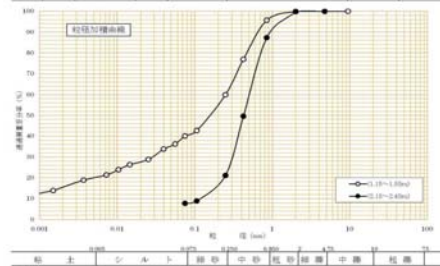
0.075mmの試料を対象とし、水を加えた懸濁液の比重を所定時間毎に測定(粒径の大きな土粒子から早く沈んでいき、懸濁水の比重は徐々に小さくなる)、この比重の経時変化より懸濁水に含まれる土粒子の粒径とその割合を求める。



## 2-3.液状化判定に必要な地質調査

### 土の粒度試験

試験番号 (標記)	B-No.1 (1.15~1.55mm)		B-No.1 (2.15~2.45mm)		試料番号 (標記)		B-No.1 (1.15~1.55mm)		B-No.1 (2.15~2.45mm)	
	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %	種類	層	粒径 mm	通過質量百分率 %	粒径 mm	通過質量百分率 %
10	75	75	75	75	砂	砂	0.1	*	*	*
11	50	50	50	50	砂	砂	0.1	0.1		
12	37.5	37.5	37.5	37.5	砂	砂	0.1	0.1	12.6	
13	25.0	26.3	25.0	26.3	砂	砂	25.8	46.2		
14	19	19	19	19	砂	砂	19.9	33.4		
15	0.5	100.0	0.5	0.5	シルト	シルト	19.7	1.7		
16	4.75	99.9	4.75	100.0	粘土	粘土	20.3			
17	2	99.8	2	99.9	200μm以下の通過質量百分率 %		99.9	99.9		
18	0.850	99.1	0.850	97.3	100μm以下の通過質量百分率 %		78.9	49.6		
19	0.425	76.9	0.425	49.6	75μm以下の通過質量百分率 %		40.0	7.7		
20	0.250	19.9	0.250	21.1	最大粒径 $d_{max}$ mm		9.5	4.75		
21	0.150	42.6	0.150	8.9	30% 粒径 $d_{30}$ mm		0.250	0.1033		
22	0.075	40.9	0.075	1.7	50% 粒径 $d_{50}$ mm		0.170	0.1274		
23	0.050	36.2			70% 粒径 $d_{70}$ mm		0.0763	0.3039		
24	0.030	33.8			90% 粒径 $d_{90}$ mm		*	0.1390		
25	0.020	29.8			標準偏差 $\sigma$		*	2.62		
26	0.015	26.3			標準偏差 $\sigma$		*	1.32		
27	0.010	21.9			土粒子の質量 $m$ g/mm <sup>3</sup>		2.613	*		
28	0.0075	21.4			液状化判定用 標準偏差、標準偏差		100	*		
29	0.005	18.9								
30	0.003	13.9			30% 粒径 $d_{30}$ mm		0.0947	0.2421		



## 2-3.液状化判定に必要な地質調査

### 土の液性限界・塑性限界試験

#### 液性限界試験

液性限界とは土が塑性状態から液状に移る時の含水比をいい、試験方法では流動曲線において、黄銅皿の溝が合流する時の落下回数が25回に相当する含水比と規定している。



#### 塑性限界試験

塑性限界とは土が塑性状態から半固結状に移る時の含水比をいい、試験方法では土のひもが直径3mmになった段階で、ひもが切れ切れになったときの含水比と規定している。

含水比	土の状態	コンシステンシー限界
高い ↑ ↓ 低い	液状 (ドロドロ)	液性限界 $W_L$
	塑性状 (ベトベト)	塑性指数 $I_p = W_L - W_p$
	半固結状 (バサバサ)	
	固体状 (カチカチ)	

## 2-3.液状化判定に必要な地質調査

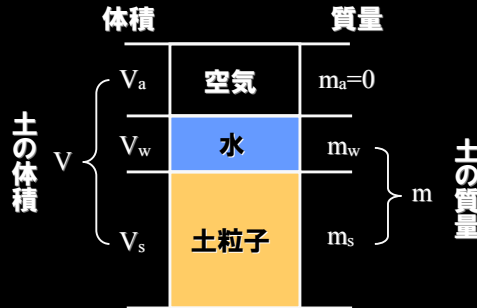
### 土の液性限界・塑性限界試験

JIS A 1205 JGS 0141		土の液性限界・塑性限界試験(測定)		試験年月日 年 月 日	
調査件名				試験者	
試料番号(深さ)	B-No. 1 (1.15~1.55m)				
液性限界試験					
落下回数	40	30	22		
容器No.	479	439	467		
含水	$m_s$ %	23.33	23.38	24.90	
水	$m_s$ g	19.64	20.49	22.09	
比	$m_s$ g	5.76	9.86	12.01	
	$w$ %	26.6	27.2	27.9	
塑性限界試験					
落下回数	17	12	8		
容器No.	406	488	435		
含水	$m_s$ %	24.21	27.34	30.09	
水	$m_s$ g	21.43	23.76	26.02	
比	$m_s$ g	11.67	11.53	12.54	
	$w$ %	28.5	29.3	30.2	
塑性限界	$w_p$ %	19.2	19.2	19.4	
液性限界	$w_L$ %	27.6	27.6	27.6	
塑性指数	$I_p$	8.3	8.3	8.3	

## 2-3.液状化判定に必要な地質調査

### 土の湿潤密度試験 (土の単位体積重量)

土の湿潤密度  $\rho_t$  とは、土全体の単位体積 ( $1\text{cm}^3$ ) あたりの質量である。



$$\text{土の湿潤密度 } \rho_t = \frac{m}{V} \quad (\text{g/cm}^3)$$

乱れの少ない試料が必要



土の単位重量 ( $\text{kN/m}^3$ ) (道路橋示方書)

地盤	土質	ゆるいもの	密なもの
自然地盤	砂及び砂れき	18	20
	砂質土	17	19
	粘性土	14	18
盛土	砂及び砂れき	20	
	砂質土	19	
	粘性土	18	

- (注) (1) 地下水位以下にある土の単位重量は、それぞれの表中の値から 9 を差し引いた値としてよい。  
 (2) 砕石は砂利と同じ値とする。また、ずり、岩塊等の場合は種類、形状、大きさ及び間隙等を考慮して定める必要がある。  
 (3) 砂利まじり砂質土、あるいは砂利まじり粘性土にあっては、混合割合及び状態に応じて適当な値を定める。  
 (4) 地下水位は施工後における平均値を考える。

## 2-3.液状化判定に必要な地質調査

### 室内土質試験

試験項目	規格・基準	主な利用法	結果から得られる主な値
土の繰返し非排水三軸試験	JGS 0541-2000	砂の液状化強度特性	繰返し回数 軸ひずみ、間隙水圧曲線 液状化応力比 $R$
地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験	JGS 0542-2000	土の動的変形特性 地震応答解析	応力-ひずみ履歴曲線 せん断ひずみ-せん断弾性係数 減衰定数関係
土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験	JGS 0543-2000	土の動的変形特性 地震応答解析	応力-ひずみ履歴曲線 せん断ひずみ-せん断弾性係数 減衰定数関係

## 2-4. 簡易液状化判定の結果例

標高 m	深さ m	厚さ m	土質記号	土質名	色	記号	標準貫入試験 N値	採取試料・原位直試験	試験方法
1.10	1.10	0.30	SC	盛土(礫混り砂)	黄褐色		10		
1.40	1.40	1.00	SC	盛土(砂質シルト)	褐色		15		
2.40	2.40	2.10	SC	シルト混り砂	褐色		15		
4.50	4.50	2.10	SC	シルト質砂	褐色		15		
6.60	6.60	1.10	SC	シルト質粘土	褐色		15		
7.70	7.70	1.10	SC	粘土質砂	褐色		15		
8.80	8.80	1.10	SC	砂	褐色		15		
11.00	11.00	1.10	SC	砂礫	褐色		15		

簡易液状化判定の結果例に用いる基準

- 建築基礎構造設計指針と道路橋示方書
- 判定には中央開発(株)の液状化判定プログラムを用いた

標高 m	深さ m	厚さ m	土質記号	土質名	色	記号	標準貫入試験 N値	採取試料・原位直試験	試験方法
1.10	1.10	0.30	SC	盛土(礫混り砂)	黄褐色		10		
1.40	1.40	1.00	SC	盛土(砂質シルト)	褐色		15		

## 2-4. 簡易液状化判定の結果例

標高 m	深さ m	厚さ m	土質記号	土質名	色	記号	標準貫入試験 N値	採取試料・原位直試験	試験方法
1.10	1.10	0.30	SC	盛土(礫混り砂)	黄褐色		10		
1.40	1.40	1.00	SC	盛土(砂質シルト)	褐色		15		
2.40	2.40	2.10	SC	シルト混り砂	褐色		15		
4.50	4.50	2.10	SC	シルト質砂	褐色		15		
6.60	6.60	1.10	SC	シルト質粘土	褐色		15		
7.70	7.70	1.10	SC	粘土質砂	褐色		15		
8.80	8.80	1.10	SC	砂	褐色		15		
11.00	11.00	1.10	SC	砂礫	褐色		15		

地層構成	地盤定数
盛土(礫混り砂)	$\gamma_t = 19.0 \text{ kNm}^3$
盛土(砂質シルト)	$\gamma_t = 18.0 \text{ kNm}^3$ $F_c = 40.0\%$ (粘土分20.3%) $D_{50} = 0.171 \text{ mm}$ , $I_p = 8.3$
シルト混り砂	$\gamma_t = 17.0 \text{ kNm}^3$ $F_c = 7.7\%$ $D_{50} = 0.428 \text{ mm}$ $D_{10} = 0.139 \text{ mm}$
シルト質砂	$\gamma_t = 17.0 \text{ kNm}^3$ $F_c = 33.1\%$ $D_{50} = 0.1579 \text{ mm}$
シルト質粘土	$\gamma_t = 14.0 \text{ kNm}^3$ $F_c = 86.0\%$ (粘土分44.5%) $D_{50} = 0.009 \text{ mm}$ $I_p = 34.4$
粘土質砂	$\gamma_t = 17.0 \text{ kNm}^3$ $F_c = 25.8 \sim 26.9\%$ $D_{50} = 0.188 \sim 0.258 \text{ mm}$
砂	$\gamma_t = 19.0 \text{ kNm}^3$ $F_c = 6.6\%$ $D_{50} = 0.450 \text{ mm}$ $D_{10} = 0.130 \text{ mm}$
砂礫	$\gamma_t = 20.0 \text{ kNm}^3$ $F_c = 9.7\%$ $D_{50} = 1.620 \text{ mm}$ $D_{10} = 0.081 \text{ mm}$

地下水位 G.L.-0.30m

建築基礎構造設計指針

マグニチュード  $M=7.5$

設計用水平加速度  
 損傷限界検討用  $150 \text{ (cm/s}^2\text{)}$   
 終局限界検討用  $350 \text{ (cm/s}^2\text{)}$

道路橋示方書

地域別補正係数  $C_z=0.85$

地盤種別 III種地盤

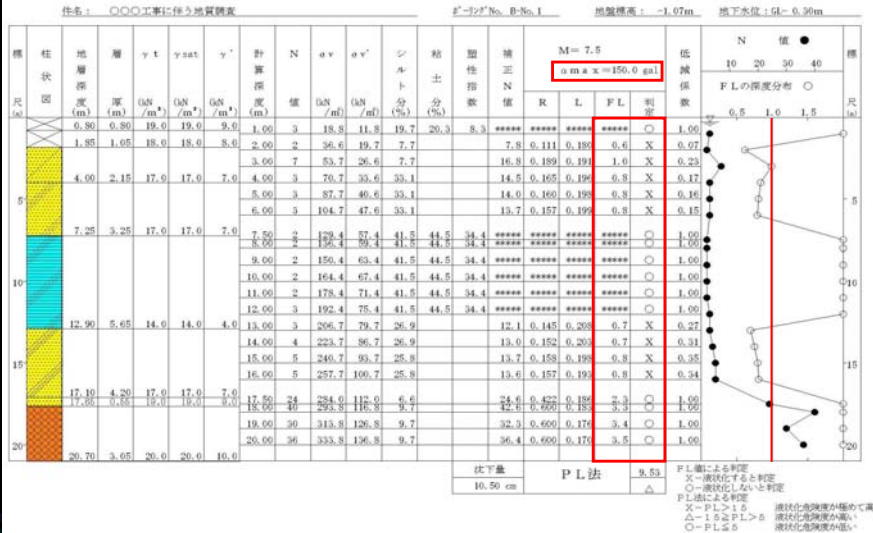
設計水平震度の標準値  $K_{hg0}$   
 タイプ I : 0.40  
 タイプ II : 0.60

設計水平震度  $K_{hg}$   
 タイプ I : 0.34  
 タイプ II : 0.51

# 2-4.簡易液状化判定の結果例

建築基礎構造設計指針

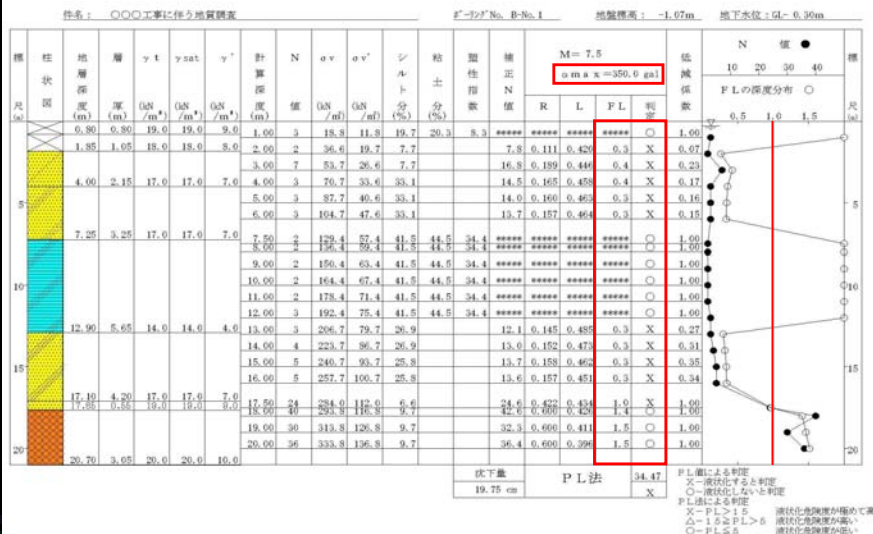
液状化簡易判定結果（建築基礎構造設計指針（新））



# 2-4.簡易液状化判定の結果例

建築基礎構造設計指針

液状化簡易判定結果（建築基礎構造設計指針（新））



# 2-4.簡易液状化判定の結果例

## 道路橋示方書

道路橋示方書 V耐震設計編に基づく液状化判定結果(平成14年度基準LEVEL2)

件名: ○○○工事に伴う地質調査

ボーリングNo.: B-No.1

地盤標高: -1.07 m

地下水位: GL-0.3 m

標尺	柱状図	地層深度 m	層厚 m	$\gamma_t$	$\gamma_{sat}$	$\gamma'$	計算深度 m	N 値	$\alpha_v$	$\alpha_v'$	$F_c$	$P_c$	$I_p$	$D_{50}$	$D_{10}$	タイプ1地震動			タイプ2地震動			低減係数	N値の深度分布	標尺			
																$C_u$	$K_{sat}$	$K_{sat0}$	$C_u$	$K_{sat}$	$K_{sat0}$				R	L	$F_L$
		0.80	0.80	18.00	18.00	9.00	1.00	3	18.80	11.80	40.0	20.3	8.3	0.171			0.201	0.534	<b>0.433</b>	1/3	0.280	0.800	<b>0.410</b>	2/2			
		1.85	1.06	18.00	18.00	8.00	3.00	7	38.85	18.85	7.7			0.438	0.138		0.132	0.615	<b>0.214</b>	0	0.148	0.800	<b>0.158</b>	0			
		4.00	3.18	17.00	17.00	7.00	3.00	7	33.85	28.85	7.7			0.438	0.138		0.227	0.654	<b>0.363</b>	1/3	0.345	0.880	<b>0.352</b>	2/2			
		7.00	3.35	17.00	17.00	7.00	4.00	3	70.85	33.85	33.1			0.188			0.187	0.671	<b>0.294</b>	0	0.280	1.037	<b>0.258</b>	0			
		10.00	3.00	17.00	17.00	7.00	5.00	3	87.85	40.85	33.1			0.188			0.186	0.678	<b>0.283</b>	0	0.280	1.037	<b>0.245</b>	0			
		13.00	3.00	17.00	17.00	7.00	6.00	3	104.85	47.85	33.1			0.188			0.187	0.680	<b>0.275</b>	0	0.280	1.038	<b>0.236</b>	0			
		16.00	3.00	17.00	17.00	7.00	7.00	3	128.40	67.40	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		19.00	3.00	17.00	17.00	7.00	8.00	3	150.40	89.40	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		22.00	3.00	17.00	17.00	7.00	9.00	3	178.40	117.40	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		25.00	3.00	17.00	17.00	7.00	10.00	3	208.40	147.40	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		28.00	3.00	17.00	17.00	7.00	11.00	3	240.70	179.70	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		31.00	3.00	17.00	17.00	7.00	12.00	3	276.70	215.70	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		34.00	3.00	17.00	17.00	7.00	13.00	3	316.70	255.70	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		37.00	3.00	17.00	17.00	7.00	14.00	4	360.70	299.70	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		40.00	3.00	17.00	17.00	7.00	15.00	5	408.70	347.70	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		43.00	3.00	17.00	17.00	7.00	16.00	5	460.70	400.70	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		46.00	3.00	17.00	17.00	7.00	17.00	5	516.70	458.70	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		49.00	3.00	17.00	17.00	7.00	18.00	5	576.70	521.70	33.0	44.5	34.4	0.030			S	****	****	****	1	****	****	****	1		
		52.00	3.00	17.00	17.00	7.00	19.00	30	313.85	128.85	9.7			1.820	0.081	Cl	0.500	0.693	<b>0.834</b>	1	1.000	0.800	1.111	1			
		55.00	3.00	17.00	17.00	7.00	20.00	38	338.85	138.85	9.7			1.820	0.081	Cl	0.894	0.581	<b>1.488</b>	1	1.738	0.871	1.894	1			

対象土層条件  $F_c \leq 30kPa$  または  $F_c > 30kPa$  の場合  $1/3 \leq 15$   
 $D_{50} \leq 10mm$  かつ  $20 \leq D_{10} \leq 1mm$

式の種別  
 S:砂質土  
 G:砂質土

地質時代・断面力比の深さ方向の連続性判定  $\gamma_d = 1.0 - 0.015X$

$P_L$  48.60  
 $C_{sc}$  1.00  
 沈下量 0.58 m

$P_L$  48.60  
 $C_{sc}$  1.00  
 沈下量 0.54 m

$P_L$  による補正係数  $C_L$   
 $P_L \leq 5$   $C_L = 0$   
 $5 < P_L \leq 20$   $C_L = (0.2 P_L - 1) / 3$   
 $20 < P_L$   $C_L = 1$



## 講演 3

### 液状化地盤に対する基礎設計

地盤が液状化する場合の基礎と杭の構造設計方法について

講師 有限会社 コア構造設計  
構造設計一級建築士 大垣克己

# 液状化地盤に対する基礎設計

## 地盤が液状化する場合の基礎と杭の構造設計方法について

有限会社 コア構造設計  
構造設計一級建築士 大垣克己

## 0.液状化地盤に対する基礎設計

- 1.0 液状化発生が危惧される地盤での実務基礎設計の現状
- 1.1 液状化地盤における地盤変形と杭・建物の相互作用
- 1.2 杭頭応力の算定式
  
- 2.1 液状化判定結果の見方
- 2.2 FL値1.0以下の場合の水平地盤反力係数  
低減率 $\beta$ の求め方
  
3. サンプル建物に対する液状化による採用杭の違い  
(液状化低減率  $\beta=1.0, 0.5, 0.1$  の3 CASE)
  - 鉄骨造3階事務所ビル
  - 鉄筋コンクリート造6階事務所ビル
  
4. 杭種の違いによるコスト比較
  
5. 液状化地盤に対して杭以外の対応
  
6. まとめ

# 1. 液状化の発生が危惧される地盤における実務基礎設計の現状

## ■ 基礎形式

- a)地盤改良+直接基礎
- b)地盤改良+杭基礎
- c)地盤改良なし+杭基礎

## ■ 液状化層に対する構造的対策

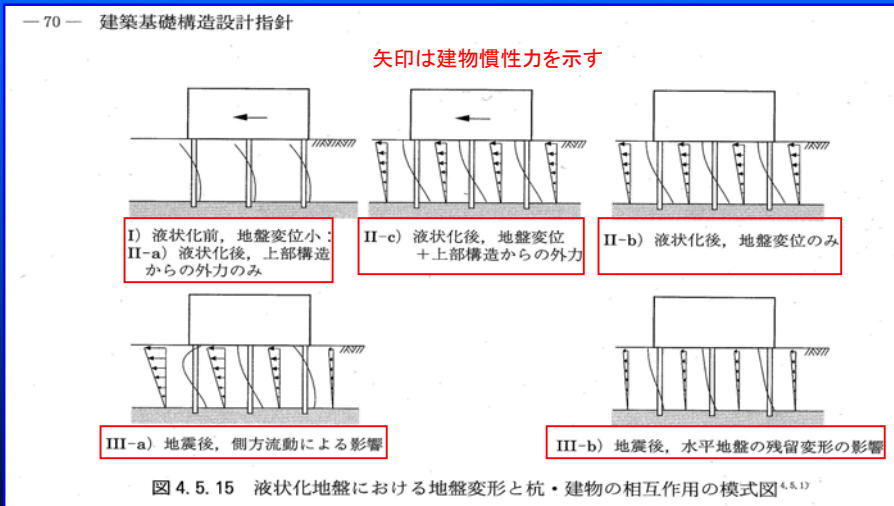
- 1)地盤変形追従型 → PRC杭、SC杭、鋼管杭
  - ※PRC杭：せん断補強筋を付与した高い曲げ耐力変形能力、せん断耐力を有する杭
  - ※SC杭：鋼管を外殻とする既製コンクリート杭
- 2)地盤変形抵抗型 → 壁杭、連壁

3

- 直接基礎は原則採用不可
- 基礎の沈下、傾斜、損壊を低減する対策を行うことで採用可。
- 液状化層が浅い場合は表層地盤改良で液状化対策となる。
- 杭基礎採用での液状化を抑える対策は現状では実例が少ない。
- 杭基礎設計では、地盤の水平抵抗の低減を行い、杭材料によるせん断・曲げ抵抗で対応する。

4

## 1.1 液状化地盤における地盤変形と杭・建物の相互作用



5

液状化発生→地盤の特性、地盤構造物の  
応答性状が急変する。

- 1.地盤支持力・水平地盤反力係数が激減する
- 2.側方流動が発生する

6

## 1.2 杭頭応力の算定式

### 杭基礎の水平抵抗

#### a) 弾性支承梁理論 (Changの式)

①弾性地盤上のはりの曲げ変形に関する基本方程式:

$$\frac{d}{dx^2} \left( EI \frac{d^2 y}{dx^2} \right) + p(x) = 0$$

②地盤の単位深さでの反力を以下と仮定:  $p(x) = k_n B y$

③弾性支承梁方程式:  $EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_n B y = 0$

④EI及び $k_n B$ は、一定と仮定して求められる一般解、杭頭固定及び回転自由 & 杭長を無限長として解くと次頁の変位、応力に関する計算式が得られる。

$$y = e^{\alpha x} (A \sin \beta x + B \cos \beta x) + e^{-\alpha x} (C \sin \beta x + D \cos \beta x)$$

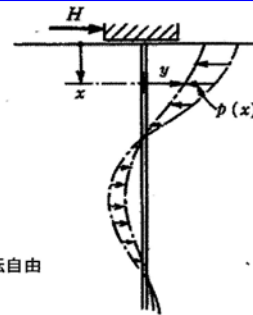
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_n B}{4 EI}}$$

$$\theta = \frac{dy}{dx}, \quad M = -EI \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right), \quad Q = -EI \left( \frac{d^3 y}{dx^3} \right)$$

※Y.H.changは、第1不動点(次頁参照)深さの $E_s$ の1/3を値を、深さ方向に一定として求めると、杭の水平荷重試験結果と良く合うとしている。

※適用範囲: 長い杭 →  $\beta L \geq 2.25$ 。この値を確認する必要あり

範囲外の場合には、別途、マトリックス計算により作成した図表(次次頁)が用意されている



7

#### c) 基準水平地盤反力係数

$$k_{ho} = \alpha \cdot \xi \cdot E_o \cdot B^{-3/4}$$

$\alpha = E_o$ の評価法によって決まる係数

$E_o =$ 変形係数 (kN/m<sup>2</sup>) 変形係数の設定方法により $\alpha$ は下記による

- 1) ボーリング孔内で測定 : 粘性土  $\alpha=80$ , 砂質土  $\alpha=80$
- 2) 一軸又は三軸圧縮試験 : 粘性土  $\alpha=80$
- 3) N値より推定 ( $E_o=700N$ ): 粘性土  $\alpha=60$ , 砂質土  $\alpha=80$

$\xi =$ 群杭の影響を考慮した係数(1.0以下、単杭の場合:  $\xi=1.0$ )

B = 無次元化杭径 (杭径をcmで表した数値: 杭径50cmは50とする)

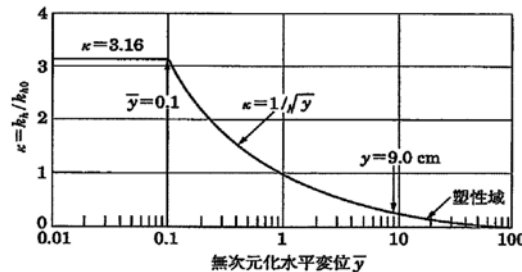
#### d) 水平地盤反力係数の変位依存性

杭頭水平変位 $y$ に応じて

$$0.0 \leq y \leq 0.1 \text{ cm} : kh = 3.16 \cdot k_{ho}$$

$$0.1 < y : kh = k_{ho} / \sqrt{y}$$

$k_{ho}$ : 変位1.0cm時の反力係数  
(基準反力係数)



杭頭変位が1cmを超える場合は、反力係数を補正して繰り返し計算を行う。

8

長い杭の応力と変位の計算式 ( $\beta L \geq 2.25$ ) (一様地盤として)

杭頭条件	杭頭回転自由(ピン)	杭頭回転拘束(固定)	
$\beta = \sqrt{\frac{k_n B}{4 EI}} [p(x) = k_n B y]$ $\eta = \sqrt{\frac{n_n}{EI}} [p(x) = n_n x y]$ $k_n, n_n$ : 水平地盤反力係数 $B$ : 杭幅 $EI$ : 杭の曲げ剛性			
$p(x) = k_n B y$	杭頭の曲げモーメント $M_0$	0	$\frac{H}{2\beta}$
	地中部の最大曲げモーメント $M_{max}$	$-0.3224 \frac{H}{\beta}$	$-0.104 \frac{H}{\beta}$
	$M_{max}$ の発生深さ $L_m$	$\frac{\pi}{4\beta} = \frac{0.785}{\beta}$	$\frac{\pi}{2\beta} = \frac{1.571}{\beta}$
	杭頭の変位 $y_0$	$\frac{H}{2 EI \beta^3} = \frac{2 H \beta}{k_n B}$	$\frac{H}{4 EI \beta^3} = \frac{H \beta}{k_n B}$
	第1不動点深さ $L_0$	$\frac{\pi}{2\beta} = \frac{1.571}{\beta}$	$\frac{3\pi}{4\beta} = \frac{2.356}{\beta}$

( $\beta L < 2.25$ )の場合は別途短杭としての応力検討が必要

- ・上式は杭頭より周辺地盤が一定(通常 $1/\beta$ までの深さ)である条件で対応できる
- ・しかし、液状化する地盤では深さ方向に変化させる必要があり多層地盤として検討する。

## 2.1 液状化簡易判定結果表

液状化簡易判定結果 (建築基礎構造設計指針 (新))

B-127 No. 2 地盤標高: -1.03m 地下水位: GL-0.00m

標尺 (m)	柱状図	地層	層厚 (m)	$\gamma t$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma'$ (kN/m <sup>2</sup> )	計算値	N	$\sigma_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_v'$ (kN/m <sup>2</sup> )	シルト分 (%)	粘土指数 (%)	補正値	M=7.5 $\sigma_{max}=150.0$ gal			低減係数	判定	N値 ●	F Lの深度分布 ○
														R	L	FL				
0.80			0.80	17.0	19.0	9.0	1.35	3	25.6	12.1	19.7	20.3	8.3	*****	*****	*****	*****	○	1.00	
1.85			1.05	16.9	18.9	8.9	3.30	2	44.3	31.3	7.7			7.6	0.110	0.200	0.0	X	0.06	
3.30			1.25	16.9	18.9	8.9	3.30	2	44.3	31.3	7.7			15.7	0.176	0.193	0.9	X	0.20	
4.30			1.00	16.9	18.9	8.9	5.33	3	106.3	53.0	33.1			13.9	0.159	0.188	0.8	X	0.16	
5.33			1.03	16.9	18.9	8.9	6.33	3	126.8	63.5	33.1			13.4	0.156	0.183	0.8	X	0.15	
7.25			1.92	16.9	18.9	8.9	7.35	3	147.6	74.1	39.2	57.8	43.6	*****	*****	*****	*****	○	1.00	
8.33			1.08	16.9	18.9	8.9	9.30	2	183.9	90.9	39.2	57.8	43.6	*****	*****	*****	*****	○	1.00	
9.20			0.87	16.9	18.9	8.9	10.30	2	202.5	99.5	39.2	57.8	43.6	*****	*****	*****	*****	○	1.00	
11.30			2.10	16.9	18.9	8.9	11.30	2	221.1	108.1	39.2	57.8	43.6	*****	*****	*****	*****	○	1.00	
13.30			2.00	16.9	18.9	8.9	13.30	3	258.9	125.9	26.9			11.4	0.139	0.164	0.9	X	0.25	
14.30			1.00	16.9	18.9	8.9	14.30	4	279.0	136.0	26.9			12.1	0.145	0.160	0.9	X	0.28	
15.30			1.00	16.9	18.9	8.9	15.30	5	299.8	146.8	25.8			12.7	0.150	0.157	1.0	X	0.30	
16.30			1.00	16.9	18.9	8.9	16.30	5	320.9	157.9	25.8			12.6	0.149	0.153	1.0	X	0.29	
17.30			1.00	16.9	18.9	8.9	17.30	24	341.9	168.9	18.0			26.1	0.609	0.149	4.1	○	1.00	
18.30			1.00	16.9	18.9	8.9	18.30	40	363.5	180.5	9.0			34.6	1.800	0.145	12.4	○	1.00	
19.30			1.00	16.9	18.9	8.9	19.30	30	385.5	192.5	9.0			26.4	0.659	0.142	4.7	○	1.00	
20.30			1.00	16.9	18.9	8.9	20.30	36	0.0	0.0	9.0			*****	*****	*****	*****	*		

沈下量: 8.42 cm P L法 9.18  
 F L値による判定: X-液状化する判定, ○-液状化しない判定  
 P L値による判定: X-P L > 1.5 液状化危険度が極めて高い, △-1.5 > P L > 5 液状化危険度が高い, ○-P L ≤ 5 液状化危険度が低い

## 2.2 水平地盤反力係数の低減率( $\beta$ )

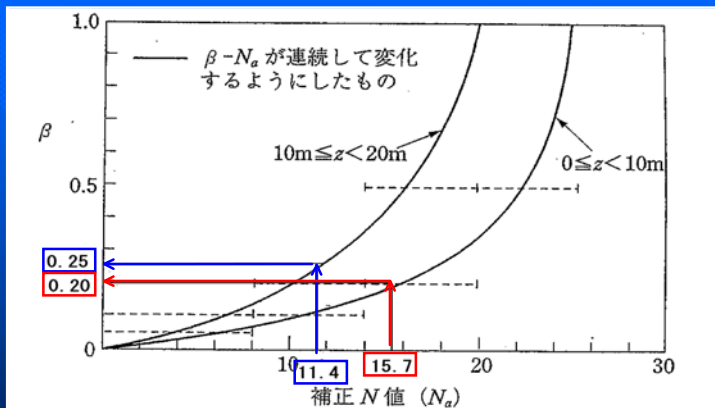
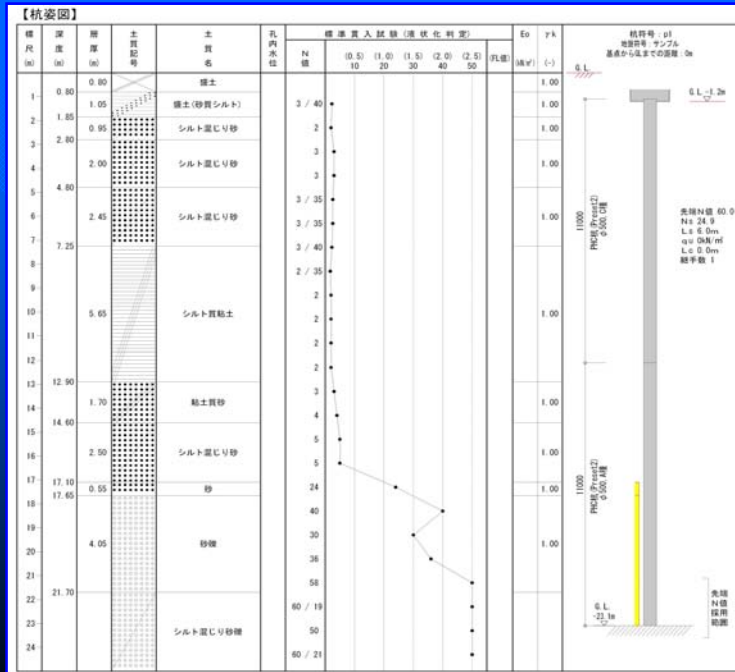


図 4.5.14 地盤反力係数の低減率<sup>4.5.3)</sup>

$$k_{hl} = \beta k_{h0} \cdot y_r^{-1/2}$$

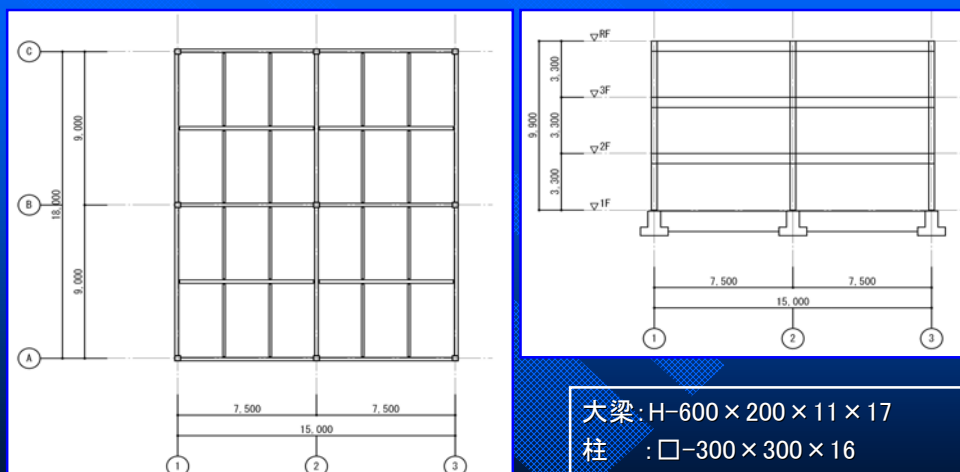
## 3. サンプルケースによる比較

標高	深層	土質記号	土質名	色調	記号	標準貫入試験	N 値		
							10	20	
1.0	0.0	8.00	硬土(硬質砂)	暗褐色	0.30m以下の垂直層が多く重なる硬質土。貫入抵抗が高い。	11.4	15.7	19	23
2.0	1.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
3.0	2.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂を基盤として、その上に硬質土と不均一な硬砂が重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
4.0	3.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
5.0	4.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
6.0	5.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
7.0	6.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
8.0	7.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
9.0	8.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
10.0	9.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
11.0	10.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
12.0	11.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
13.0	12.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
14.0	13.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
15.0	14.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
16.0	15.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
17.0	16.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
18.0	17.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
19.0	18.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
20.0	19.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
21.0	20.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
22.0	21.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
23.0	22.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
24.0	23.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23
25.0	24.0	1.50	硬土(硬質シルト)	暗褐色	均一な硬砂がやや不均一な硬質土と重なり、貫入抵抗も高く硬質土と類似している。	11.4	15.7	19	23



13

### 3.1 鉄骨造3階事務所ビル



14



3.7 建物重量・設計用層せん断力

Z : 地域係数  
 T : 一次固有周期 (sec)  
 Rt : 振動特性係数  
 Wi : その階の建物重量 (kN)  
 ΣWi : その階より上部の建物重量の和 (kN)  
 αi : Wi/ΣWi  
 Ai : 分布係数  
 Ci : 層せん断力係数  
 K : 震度 (地下階・塔屋階のみ)  
 I : 用途係数

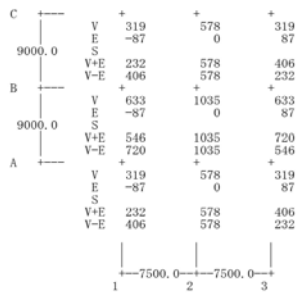
Qi : 地震時層せん断力 (Qi=CixΣWi) (kN)  
 CiIN : 層せん断力係数の直接指定  
 QiIN : 層せん断力の直接指定 (kN)  
 Fi : 剛床の外力直接指定 (kN)  
 Qid : 剛床の設計用層せん断力 (\*付は部分地下の部分) (kN)  
 Wi/A : 単位面積当り建物重量 (Wi/Aの算定時のWiには積雪の重量を含まない) (kN/m2)  
 CE : 第二剛床層せん断力計算法の指定  
 = 1 : 節点重量比で計算 = 2 : Ai分布で計算  
 Co : 標準層せん断力係数

Z = 1.00 第2種地盤 (Tc = 0.600 sec) 建物の高さ 10.00(m) I = 1.00 CE = 1

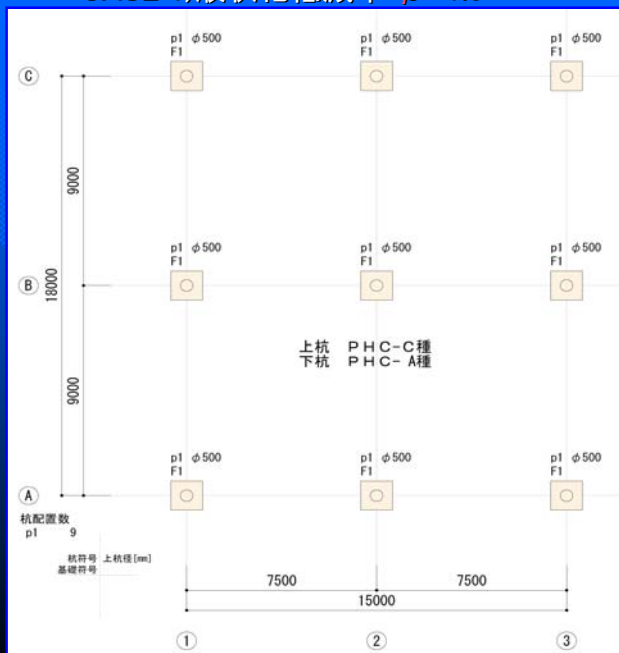
X方向 T = 0.300(sec) Rt = 1.000 Co = 0.200

階	Wi	ΣWi	αi	Ai	Ci	K	Qi	CiIN	QiIN	Pi	Qid	Wi/A
3F	271	271	0.085	2.058	0.412	0.000	112	(0.000)	0	0	112	1.0
2F	1455	1726	0.540	1.259	0.252	0.000	435	(0.000)	0	0	435	5.3
1F	1471	3197	1.000	1.000	0.200	0.000	639	(0.000)	0	0	639	5.4
基礎	980	4177										

4.6 支点反力図



CASE 1)液状化低減率 β=1.0



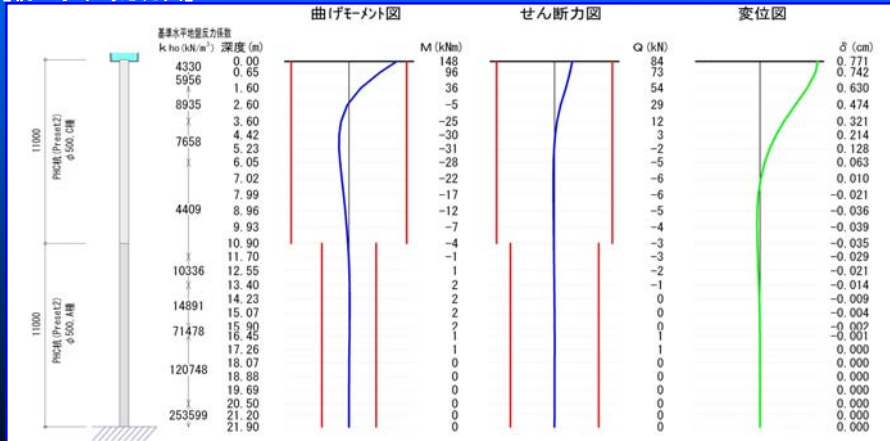
## CASE 1)液状化低減率 $\beta=1.0$

杭の水平時応力一覧

杭符号	地盤符号	杭頭固定度	支点位置	杭径 (mm)	杭長 L (m)	杭頭変位 yo (cm)	最大せん断力 Q (kN/本)	杭頭部最大モーメントM1 (kNm)	杭中間部最大モーメントM2 (kNm)
p1	サンプル	1.00	1-A	500	21.90	0.771	84	148	4

杭長は、基礎底面から支持層までの長さです

【杭の水平時応力図】

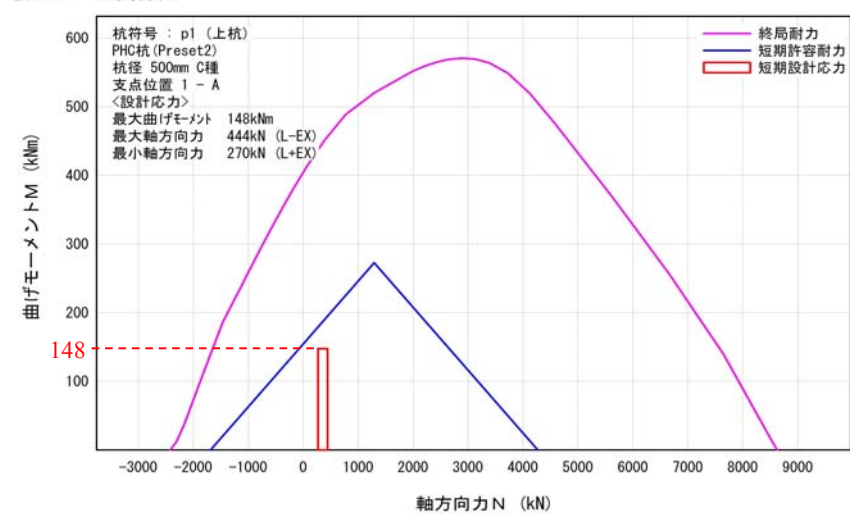


17

## CASE 1)液状化低減率 $\beta=1.0$

【M-N図】  
<上杭>

杭のM-N関係図

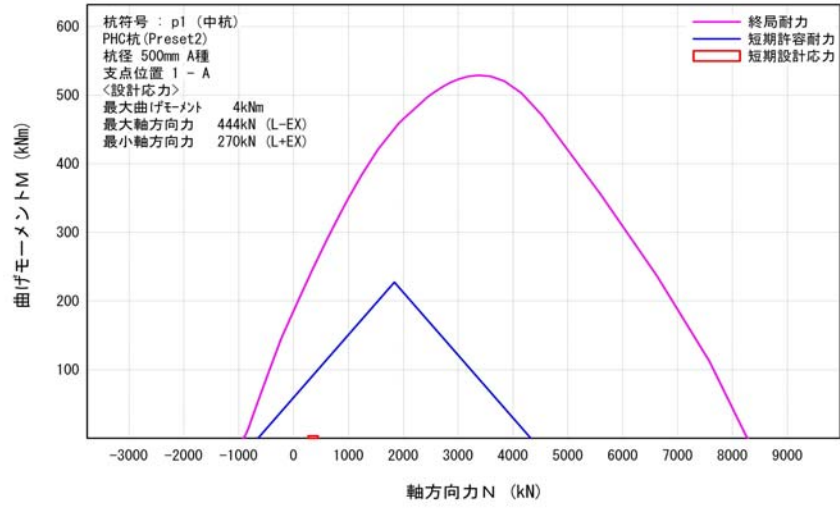


18

## CASE 1)液状化低減率 $\beta=1.0$

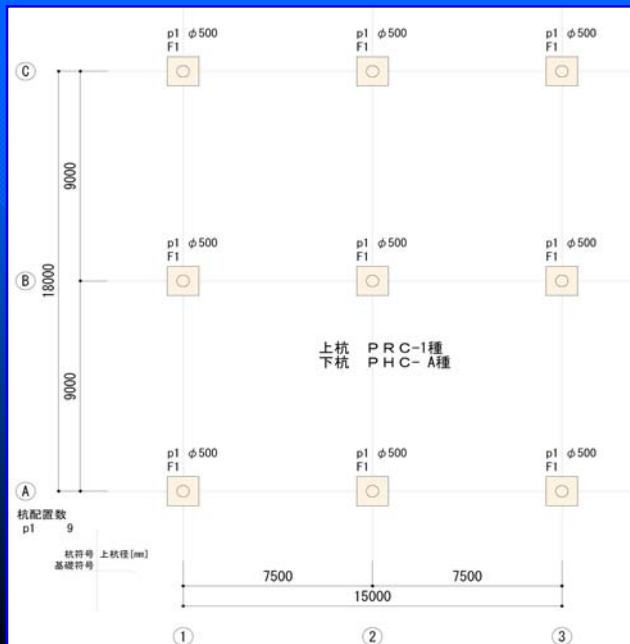
【M-N図】  
 <中杭>

杭のM-N関係図



19

## CASE 2)液状化低減率 $\beta=0.5$



20

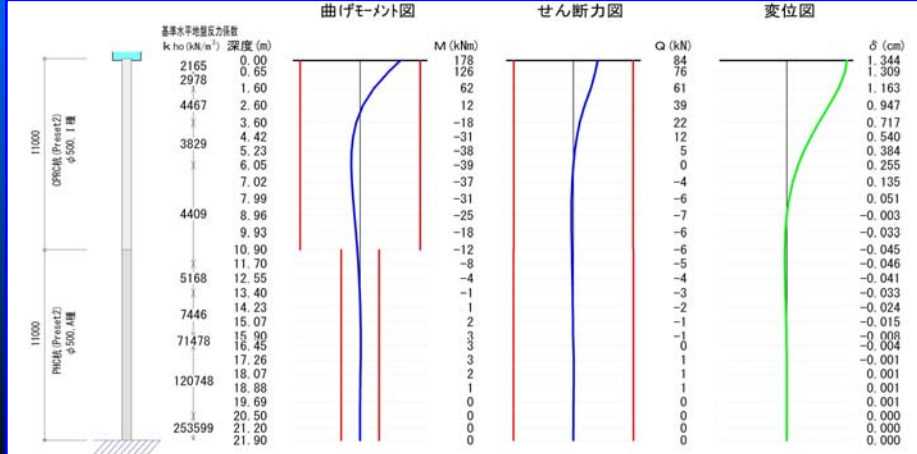
## CASE 2)液状化低減率 $\beta=0.5$

杭の水平時応力一覧

杭符号	地盤符号	杭頭固定度	支点位置	杭径 (mm)	杭長 L (m)	杭頭変位 yo (cm)	最大せん断力 0 (kN/本)	杭頭部最大モーメントM1 (kNm)	杭中間部最大モーメントM2 (kNm)
p1	サンプル	1.00	1-A	500	21.90	1.344	84	178	12

杭長は、基礎底面から支持層までの長さです

【杭の水平時応力図】

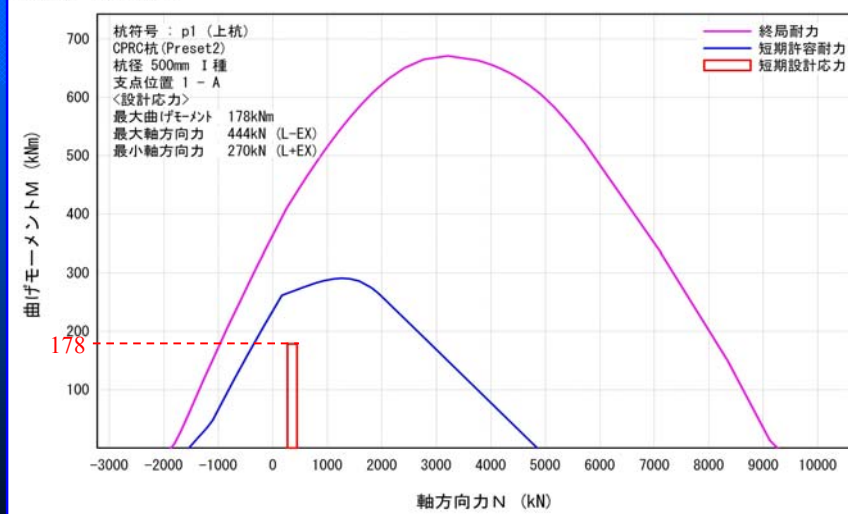


21

## CASE 2)液状化低減率 $\beta=0.5$

【M-N図】  
＜上杭＞

杭のM-N関係図

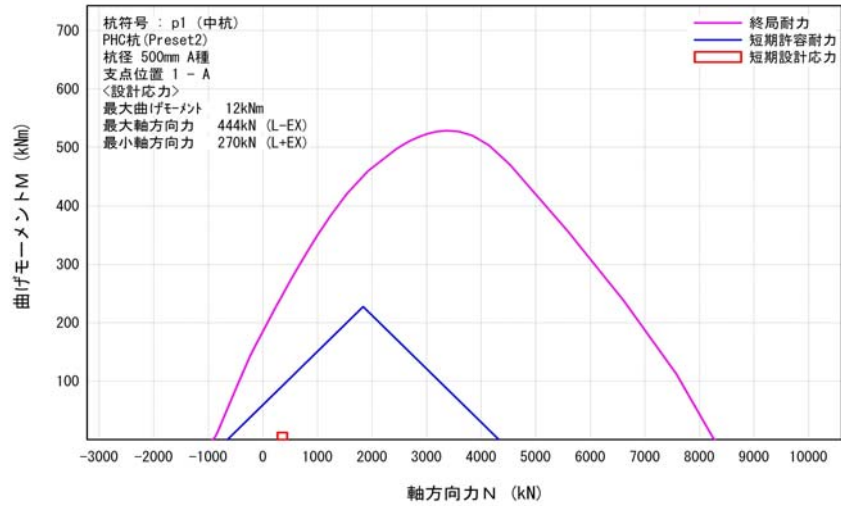


22

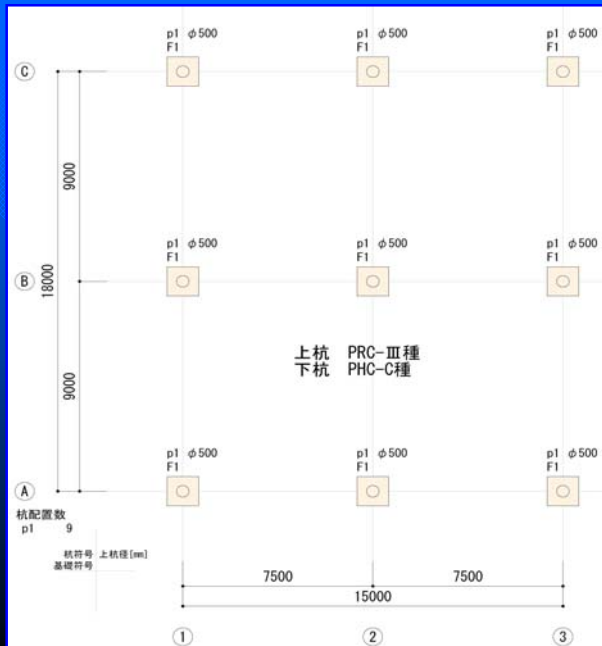
### CASE 2)液状化低減率 $\beta=0.5$

【M-N図】  
 <中杭>

杭のM-N関係図



### CASE 3)液状化低減率 $\beta=0.1$



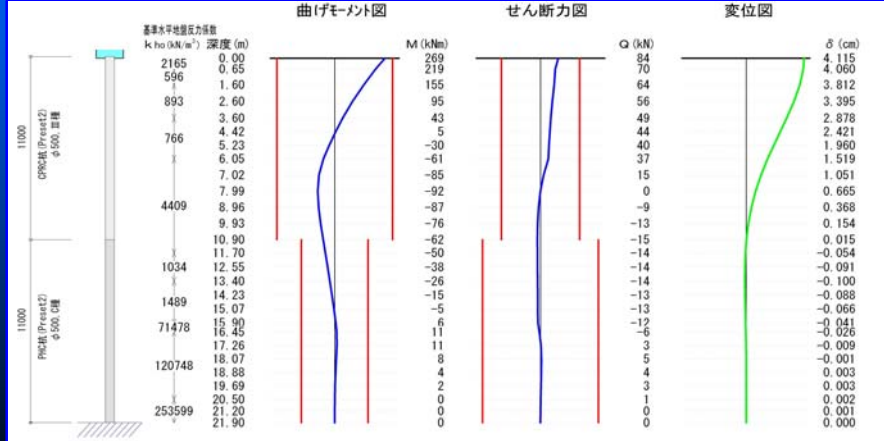
### CASE 3)液状化低減率 $\beta=0.1$

杭の水平時応力一覧

杭符号	地盤符号	杭頭固定度	支点位置	杭径 (mm)	杭長 L (m)	杭頭変位 yo (cm)	最大せん断力 Q (kN/本)	杭頭部最大モーメント M1 (kNm)	杭中間部最大モーメント M2 (kNm)
p1	サンプル	1.00	1-A	500	21.90	4.115	84	269	62

杭長は、基礎底面から支持層までの長さです

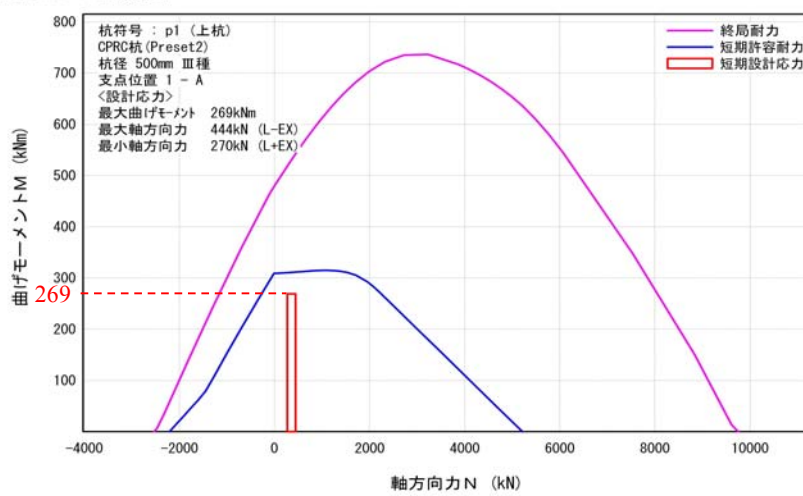
【杭の水平時応力図】



### CASE 3)液状化低減率 $\beta=0.1$

【M-N図】  
<上杭>

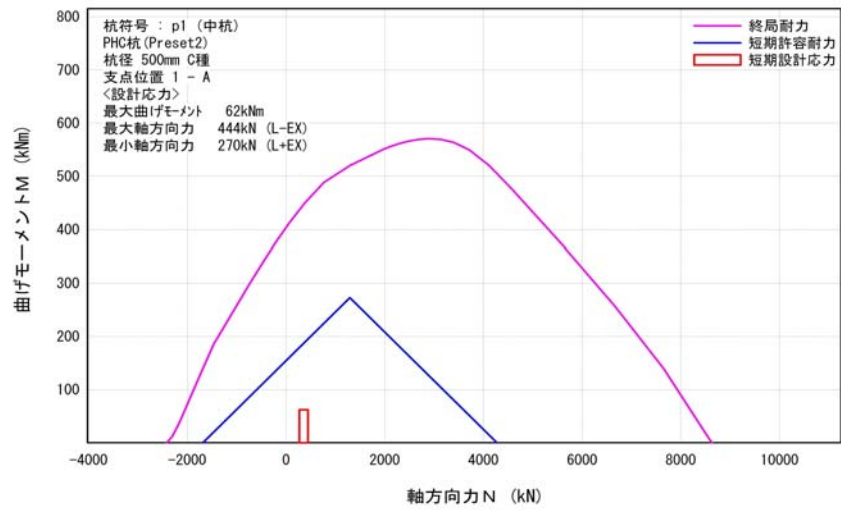
杭のM-N関係図



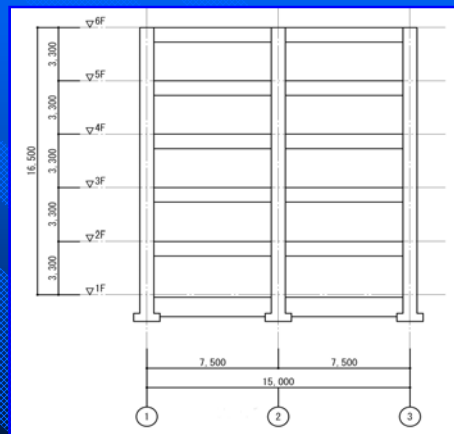
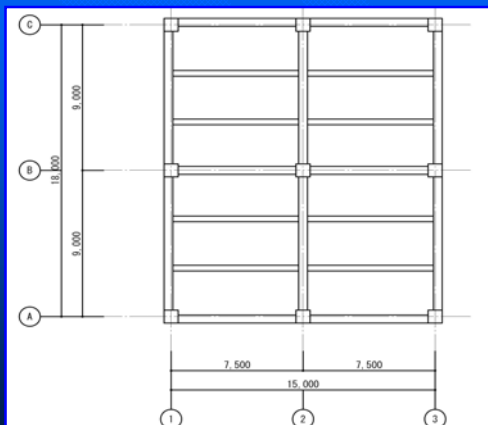
### CASE 3)液状化低減率 $\beta=0.1$

【M-N図】  
<中杭>

杭のM-N関係図



### 3.2 RC造6階事務所ビル



大梁 : BD-500 × 900  
 柱 : BD-800 × 800

3.7 建物重量・設計用層せん断力

Z : 地域係数  
 T : 一次固有周期 (sec)  
 Rt : 振動特性係数  
 Wi : その階の建物重量 (kN)  
 $\Sigma Wi$  : その階より上部の建物重量の和 (kN)  
 $\alpha_i$  :  $Wi/\Sigma Wi$   
 Ai : 分布係数  
 Ci : 層せん断力係数  
 K : 震度 (地下階・塔屋階のみ)

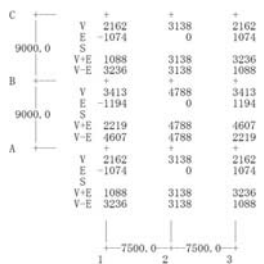
Qi : 地震時層せん断力 ( $Qi=Ci \times \Sigma Wi$ ) (kN)  
 CiIN : 層せん断力係数の直接指定 (kN)  
 QiIN : 層せん断力の直接指定 (kN)  
 Pi : 剛床の外力直接指定 (kN)  
 Qid : 剛床の設計用層せん断力 (\*付は部分地下の部分) (kN)  
 Wi/A : 単位面積当り建物重量 (Wi/Aの算定時のWiには積雪の重量を含まない) (kN/m2)  
 CE : 第二剛床層せん断力計算法の指定 = 1 : 節点重量比で計算 = 2 : Ai分布で計算  
 Co : 標準層せん断力係数

Z = 0.90 第2種地盤 (Tc = 0.600 sec) 建物の高さ 19.80(m) CE = 1

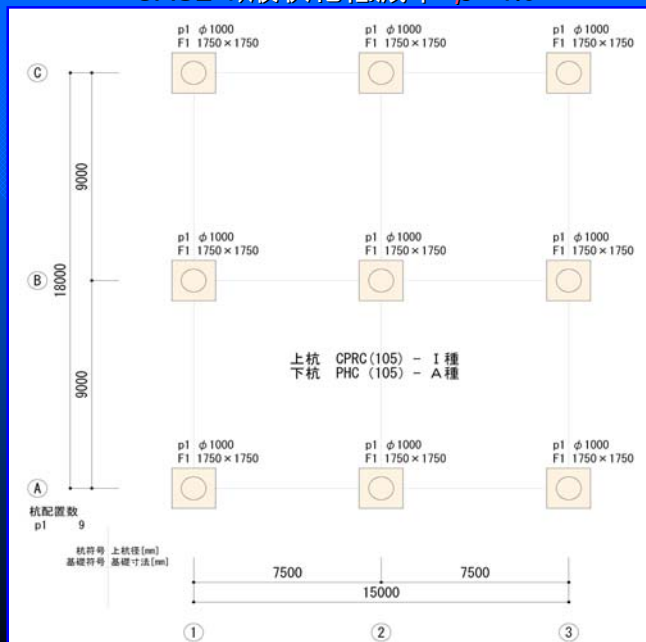
X方向 T = 0.396(sec) Rt = 1.000 Co = 0.200

階	Wi	$\Sigma Wi$	$\alpha_i$	Ai	Ci	K	Qi	CiIN	QiIN	Pi	Qid	Wi/A
6F	2830	2830	0.137	1.928	0.347	0.000	982 (0.000)		0	0	982	10.0
5F	3560	6390	0.310	1.538	0.277	0.000	1769 (0.000)		0	0	1769	12.5
4F	3560	9949	0.482	1.347	0.242	0.000	2412 (0.000)		0	0	2412	12.5
3F	3560	13509	0.655	1.210	0.218	0.000	2943 (0.000)		0	0	2943	12.5
2F	3560	17069	0.827	1.098	0.198	0.000	3375 (0.000)		0	0	3375	12.5
1F	3560	20629	1.000	1.000	0.180	0.000	3713 (0.000)		0	0	3713	12.5
基礎		4133		24762								

地震時X方向L加力



CASE 1)液状化低減率  $\beta=1.0$





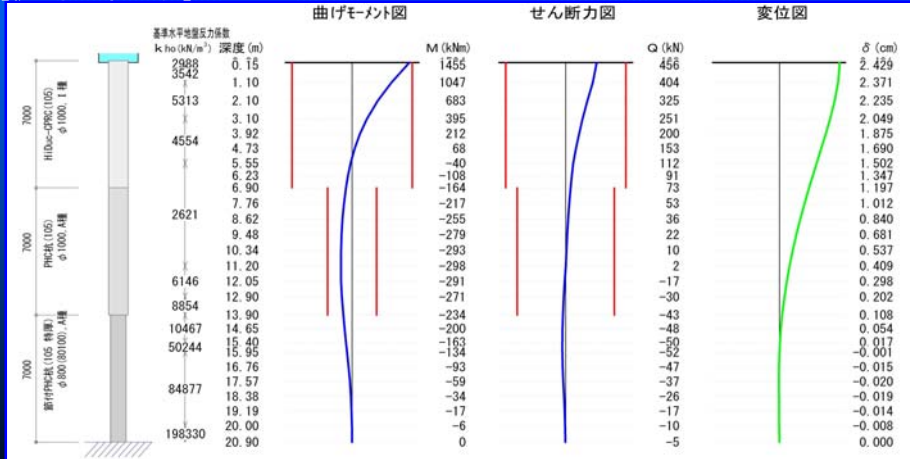
### CASE 1)液状化低減率 $\beta=1.0$

杭の水平時応力一覧

杭符号	地盤符号	杭頭固定度	支点位置	杭径 (mm)	杭長 L (m)	杭頭変位 yo (cm)	最大せん断力 Q (kN/本)	杭頭部最大モーメント M1 (kNm)	杭中間部最大モーメント M2 (kNm)
p1	サンプル	1.00	1-A	1000	20.90	2.431	463	1524	298

杭長は、基礎底面から支持層までの長さです

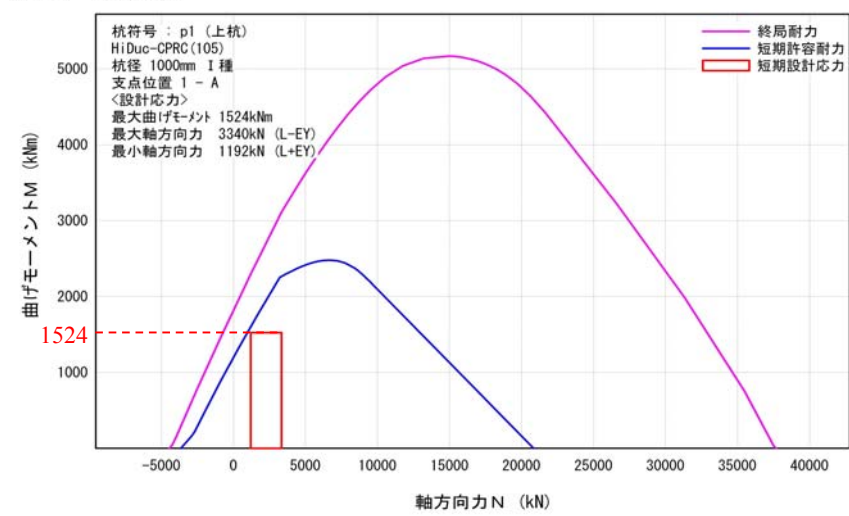
【杭の水平時応力図】



### CASE 1)液状化低減率 $\beta=1.0$

【M-N図】  
＜上杭＞

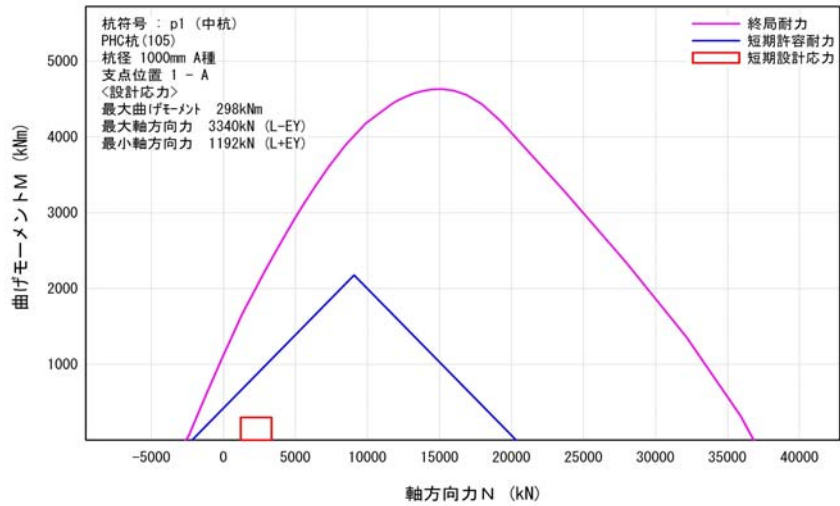
杭のM-N関係図



## CASE 1)液状化低減率 $\beta=1.0$

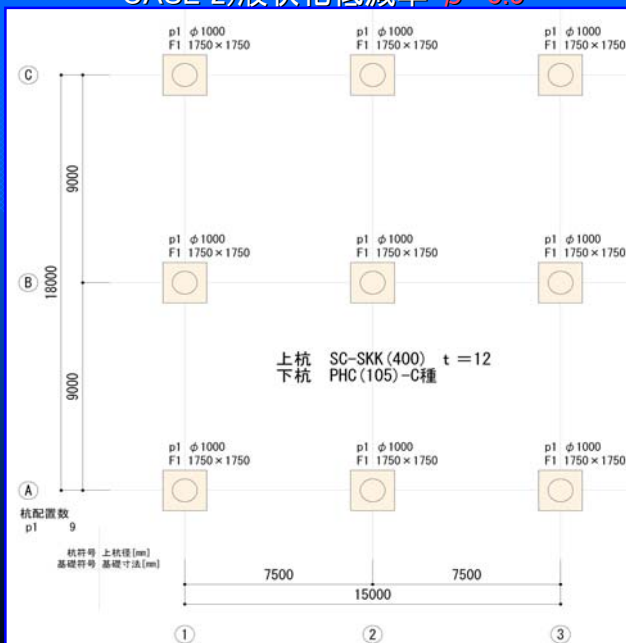
【M-N図】  
 <中杭>

杭のM-N関係図



33

## CASE 2)液状化低減率 $\beta=0.5$



34

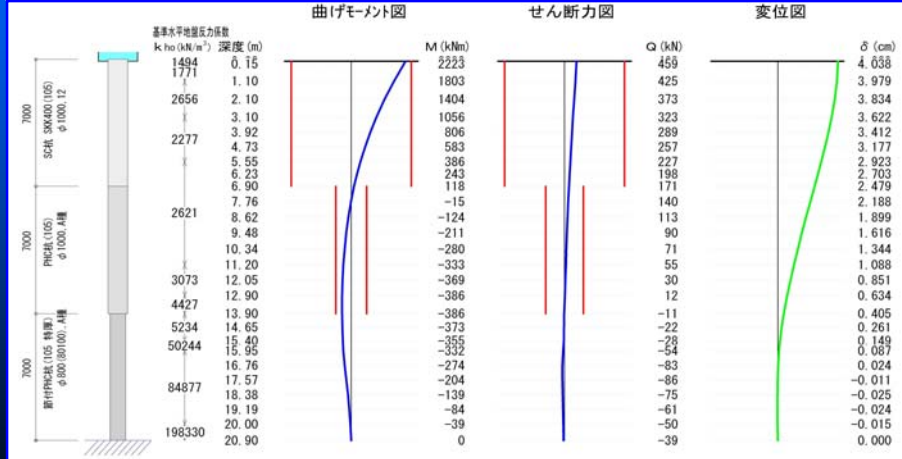
## CASE 2)液状化低減率 $\beta=0.5$

杭の水平時応力一覧

杭符号	地盤符号	杭頭固定度	支点位置	杭径 (mm)	杭長 L (m)	杭頭変位 yo (cm)	最大せん断力 Q (kN/本)	杭頭部最大モーメント M1 (kNm)	杭中間部最大モーメント M2 (kNm)
p1	サンプル	1.00	1-A	1000	20.90	4.039	463	2292	386

杭長は、基礎底面から支持層までの長さです

【杭の水平時応力図】

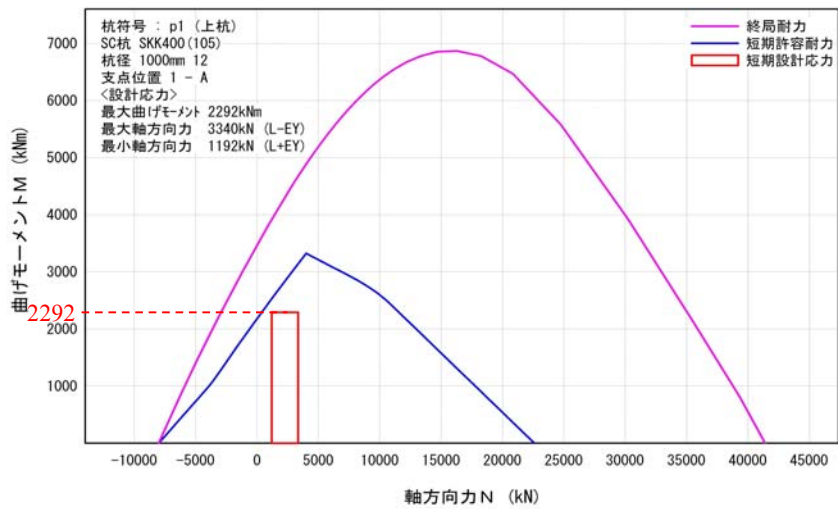


35

## CASE 2)液状化低減率 $\beta=0.5$

【M-N図】  
〈上杭〉

杭のM-N関係図

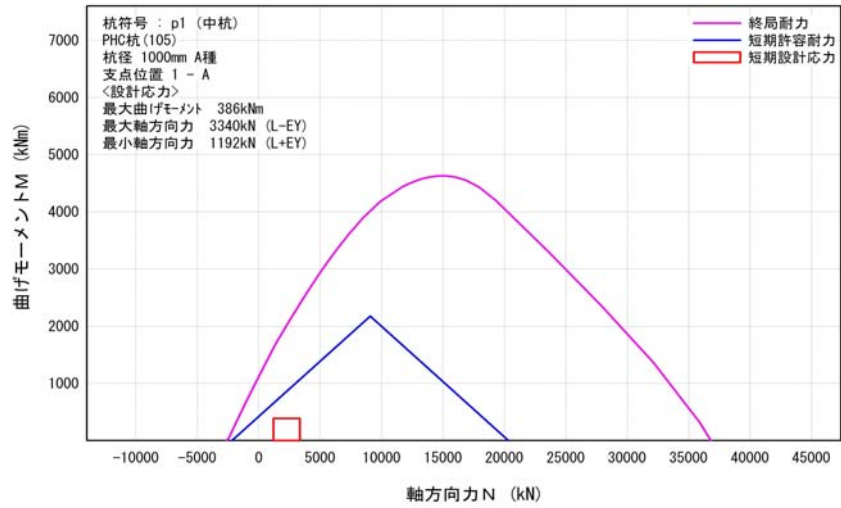


36

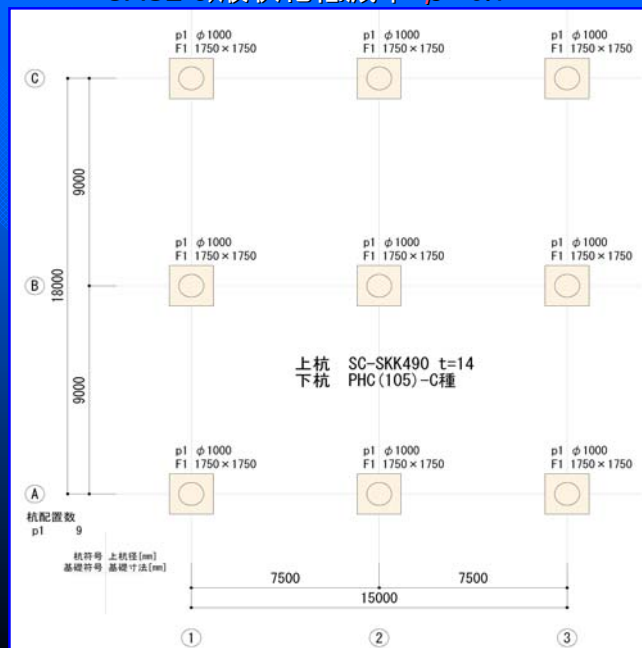
### CASE 2)液状化低減率 $\beta=0.5$

【M-N図】  
 <中杭>

杭のM-N関係図



### CASE 3)液状化低減率 $\beta=0.1$



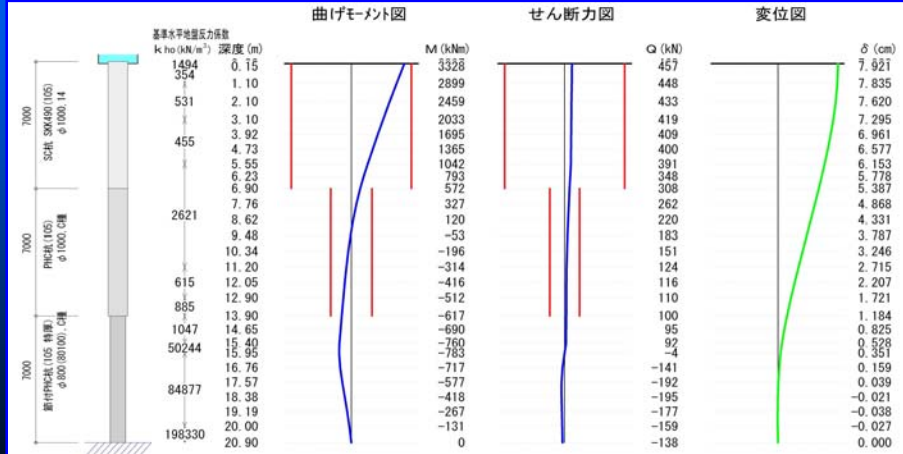
### CASE 3)液状化低減率 $\beta=0.1$

杭の水平時応力一覧

杭符号	地盤符号	杭頭固定度	支点位置	杭径 (mm)	杭長 L (m)	杭頭変位 yo (cm)	最大せん断力 Q (kN/本)	杭頭部最大モーメント M1 (kNm)	杭中間部最大モーメント M2 (kNm)
p1	サンプル	1.00	1-A	1000	20.90	7.922	463	3397	617

杭長は、基礎底面から支持層までの長さです

#### 【杭の水平時応力図】

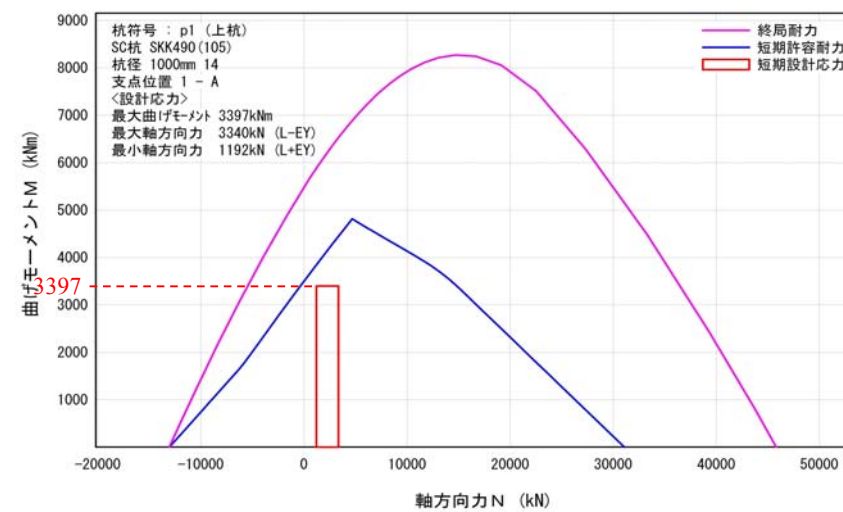


39

### CASE 3)液状化低減率 $\beta=0.1$

#### 【M-N図】 <上部>

杭のM-N関係図

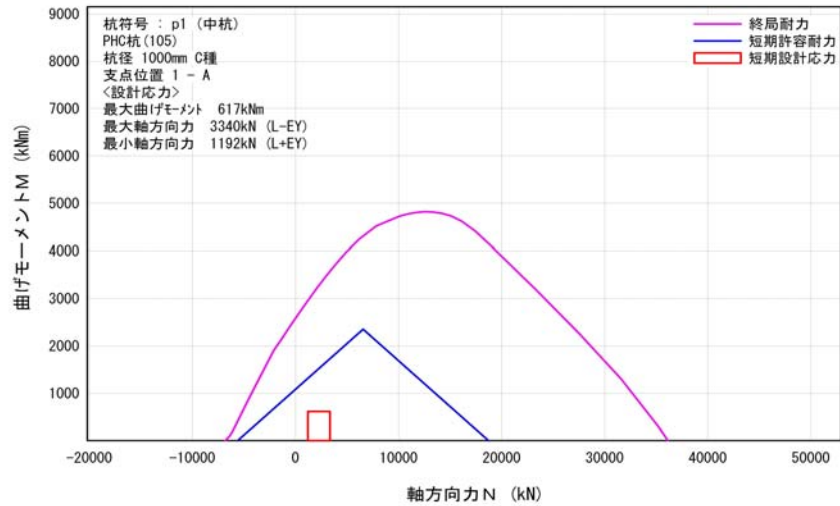


40

### CASE 3)液状化低減率 $\beta=0.1$

【M-N図】  
 <中杭>

杭のM-N関係図



## 4. 杭種の違いによるコスト比較

➤ 杭材価格比較表(参考)

杭種	PHC杭			PRC杭			SC杭(SKK490)		
	A種	B種	C種	I種	II種	III種	t=9mm	t=12mm	t=14mm
価格比率 ( $\phi$ 500)	1.0	1.2	1.3	1.6	1.7	1.8	2.6	3.2	3.6
価格比率 ( $\phi$ 1000)	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.7	2.0	2.3

☆比較条件

- ・PHC杭 杭長10m、A種を1.0とした際の金額比較。
- ・施工条件が同じ場合の材料費(定価)による比較。

➤ 鉄骨造3階事務所ビルによるコスト比較表

S造3階	使用杭(φ500)	セット数	工事費用	増加率
$\beta=1.0$	L=11.0m(C種) + 11.0m(A種)	9	¥6,520,000	1.00
$\beta=0.5$	L=11.0m(PRC-I種) + 11.0m(A種)	9	¥6,990,000	1.07
$\beta=0.1$	L=11.0m(PRC-III種) + 11.0m(A種)	9	¥7,650,000	1.17

➤ 鉄筋コンクリート造6階事務所ビルによるコスト比較表

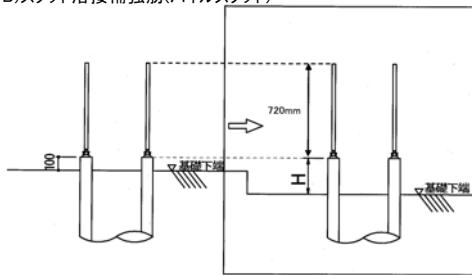
RC造6階	使用杭(φ1000) (Fc=105 N/mm <sup>2</sup> ) ※下杭は節杭	セット数	工事費用	増加率
$\beta=1.0$	L=7.0m(PRC-I種) + 7.0m(A種) + 7.0m(A種)	9	¥23,390,000	1.00
$\beta=0.5$	L=7.0m(SC SKK400 t=12) + 7.0m(A種) + 7.0m(A種)	9	¥26,760,000	1.14
$\beta=0.1$	L=7.0m(SC SKK490 t=14) + 7.0m(C種) + 7.0m(A種)	9	¥29,980,000	1.28

43

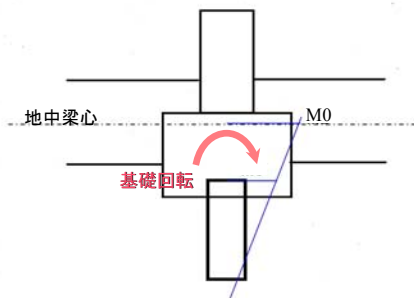
## 5. 液状化地盤に対して杭以外の対応

杭頭補強の一般図-- (既製品対応が一般)

- 杭頭端板へ  
A)ねじ式補強筋(NCPアンカー)  
B)スタッド溶接補強筋(パイルスタッド)



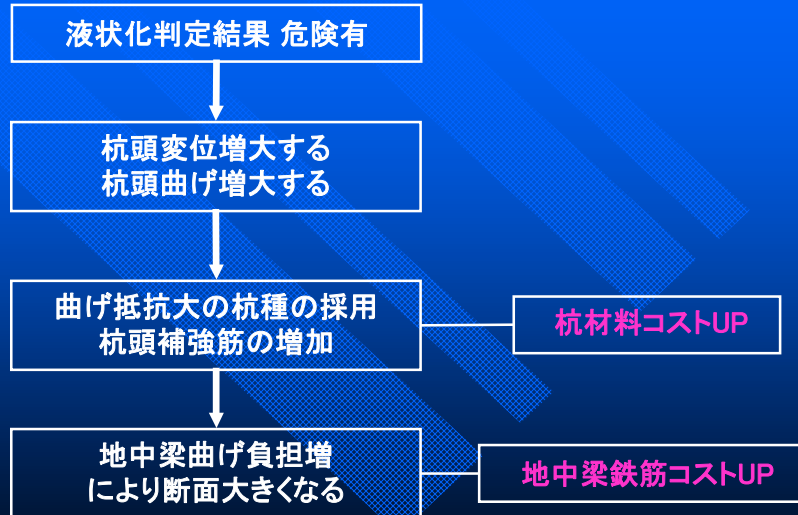
地中梁設計用付加曲げモーメント(MD)



$$MD = ML + ME + M0$$

44

## 6. まとめ



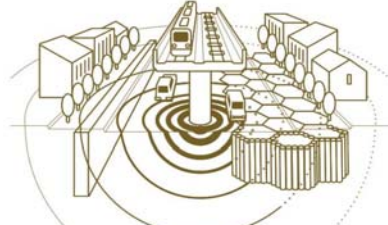


## 講演 4

### 液状化対策の考え方と WIB 工法研究発表

講師 E&D テクノデザイン株式会社  
土木学会認定特別上級土木技術者  
岡山大学名誉教授 工学博士 竹宮宏和

## 液状化対策の考え方とWIB工法研究



E&Dテクノデザイン 榊竹宮宏和  
(岡山大学名誉教授)工博, 土木学会認定特別上級技術者

Q1: 液状化対策工法として、WIB工法のどこが応用されているのですか？

Q2: 液状化あるいは非液状化をどのように判定するのですか？  
WIB工法では、非液状化対域をどの深さまで設計しますか？

Q3: WIB工法で液状化対策をすると、基礎設計は合理化できますか？  
従来工法よりコストは縮減しますか？

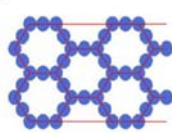
## 液状化 減震地盤改良 WIB 工法

WIB(Wave Impeding Barrier)は、振動を遮断する構造体を指します。WIB工法は、建物の真下や周囲の地中に、硬い物質と振動を吸収しやすい物質を使ってWIB工を構築し、地震や交通・工場振動・工事振動を低減する画期的な液状化対策工法です。(特許取得,商標登録済み)

連続ハニカム構成



側面図



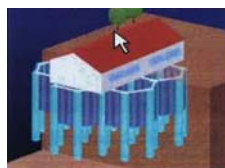
平面図

土木学会・地盤工学会賞受賞  
文部科学大臣表彰  
(科学技術開発部門)

- ① 地震動の低減
- ② 地盤の拘束効果

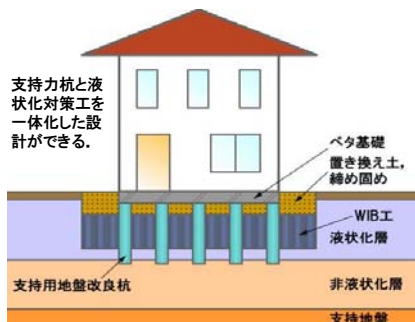


WIB工法



理論・実績のある  
最新工法

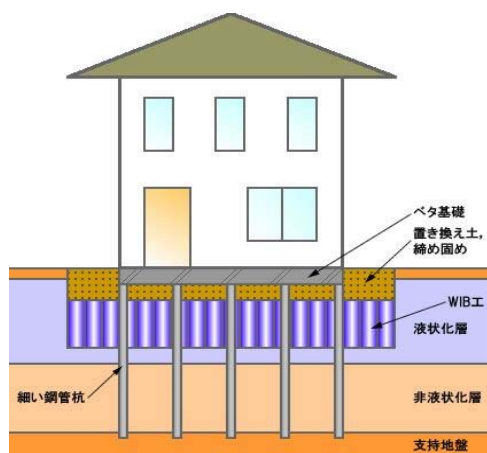
## WIB工法による液状化対策1



支持力杭と液状化対策工を一体化した設計ができる。

- WIB工によりN値を高めて強く安定した複合地盤を作り、FL値が1より大きくなるように設計をする。すなわち、WIB工により、液状化の可能性のある原地盤を非液状化層とする。(左図参照)
- セル構造は地盤を拘束して、地震時の地盤の歪みを抑制する。
- 非液状化層セル版構造は、その下層の液状化が上昇するのを遮断する。
- 版状のWIB工は高い剛性で水平保有耐力を有する。
- 水平方向に版状をなしているので、建物荷重を地盤内で均等に分散する。
- 充填材のタイヤシュレッドは、間隙水圧の上昇を下げる。

## WIB工法による液状化対策2

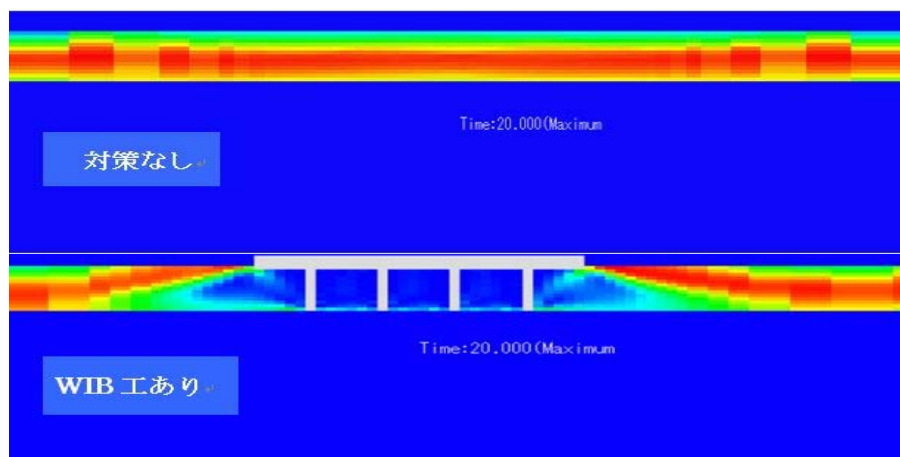


- 鉛直支持力杭において、 $1/\beta$  の範囲で杭体を補強し、杭あるいは杭本数を合理化する。
- 液状化時に水平抵抗が下がるのを防ぐ。
- 基礎設計の耐震化コストを縮減する。

## 液状化対策2



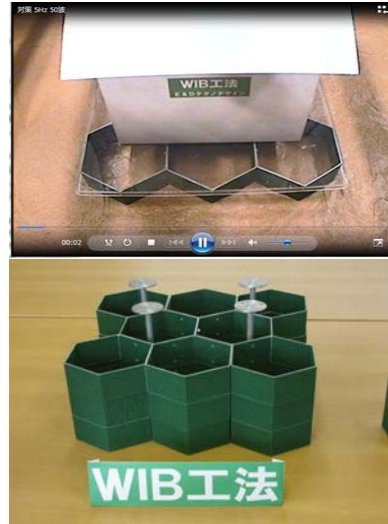
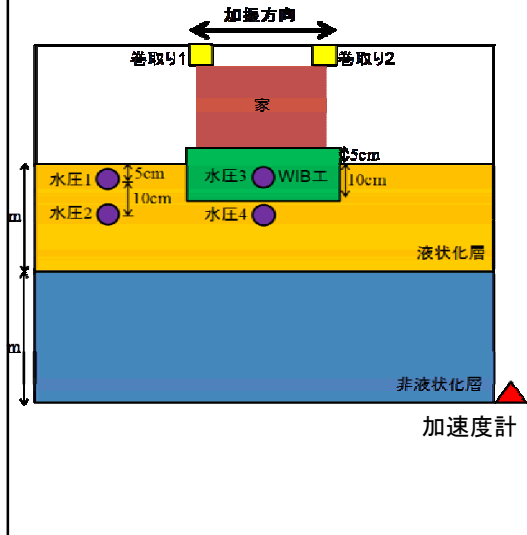
### WIB工法の液状化防止効果（赤=液状化ゾーン）



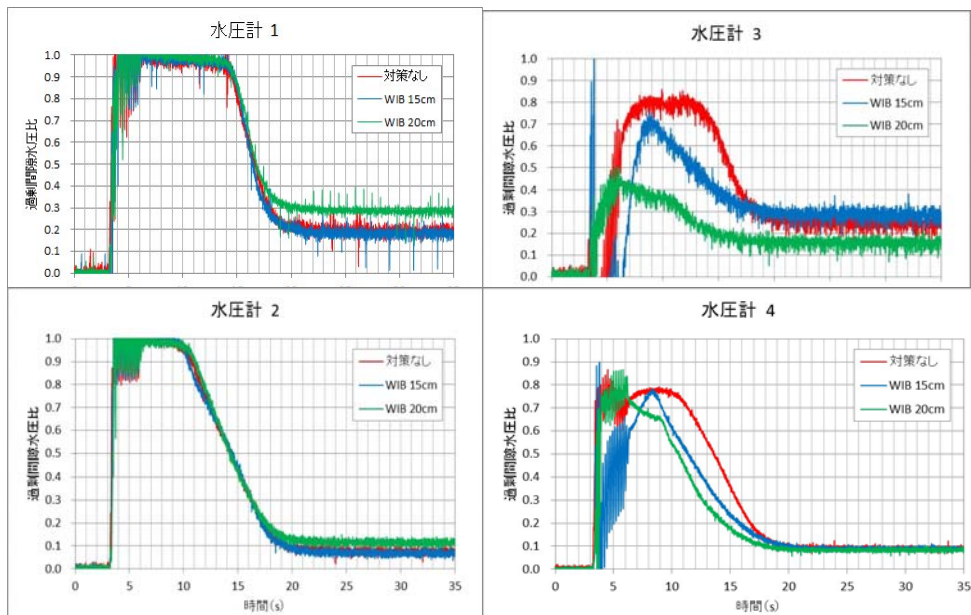
コンピュータ・シミュレーション（FLIP使用）

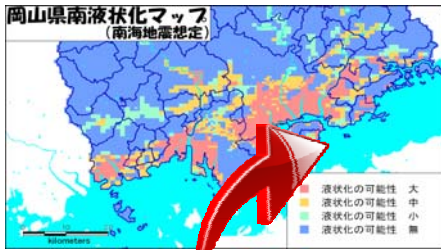
# 振動台装置を使った液状化実験 WIB工のセル構造による土の拘束効果の検証

(ゼネコン会社と共同開発)



実験8 振動台加速度100gal 5Hz 50波





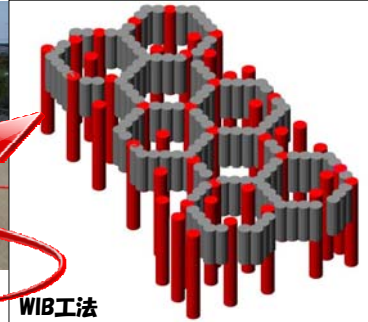
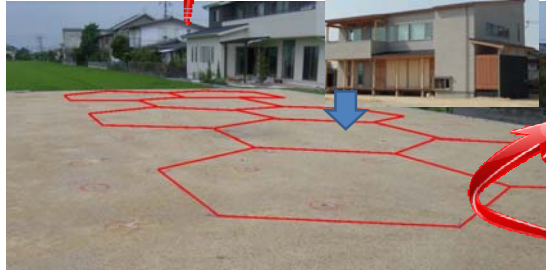
海洋型巨大地震に備える！！  
(施工事例：岡山市南部)

## WIB工法で液状化対策

セル構造は、軟弱地盤の  
**不同沈下、振動を抑える**

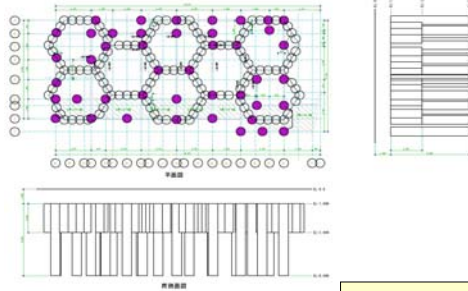
WIB施工実施地

出典：地震の被害想定について－岡山防災ナビ  
<http://kikikanri.pref.okayama.jp/goon/bo33gnnakai.id.html>



E&Dテク/デザイン(株) URL : <http://www.ed-techno.org/>

### WIB工設計



### 信頼性



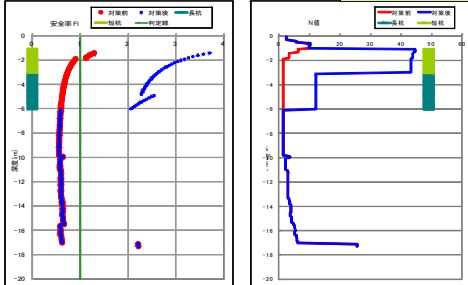
### 改良柱打設・性能確認

### 施工管理



### 液状化解析

### 専門技術

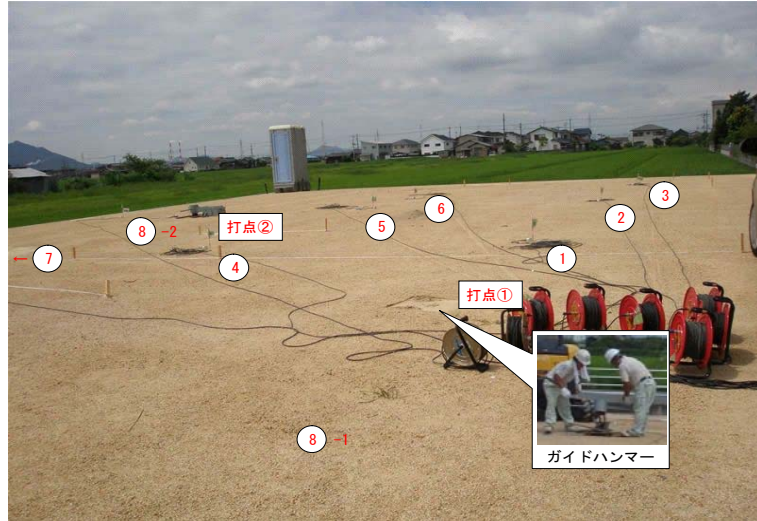


地震時の安全  
安心をまず地盤か  
ら！！

E&Dテク/デザイン(株) URL : <http://www.ed-techno.org/>

## 藤崎フィールド実験

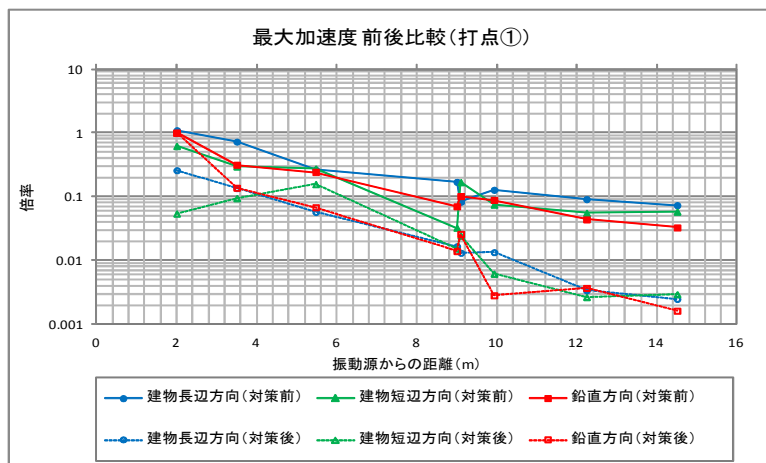
### ■現地測点 (WIB施工前)



### ■距離別・WIB施工前後加速度比較

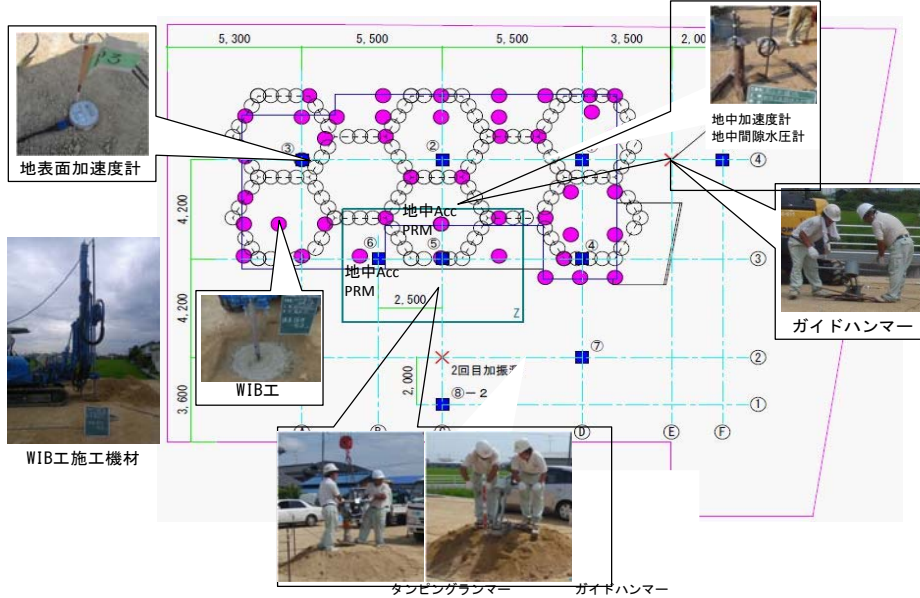
加振条件：ガイドハンマー

※基準点（測点⑧）の鉛直方向の値に対する倍率を示す。表層部の地盤改良効果を評価



## ■WIB施工後振動実験配置図

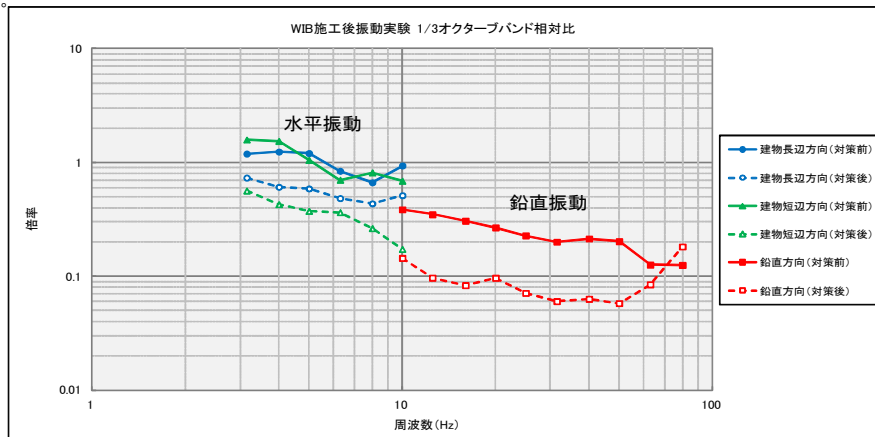
(WIB工法契約施工業者の協力を得た)



## ■WIB施工前後1/3オクターブバンド相対比(加振源E-4)

加振条件：ガイドハンマー

※基準点(測点⑧)の値に対する倍率を示す。水平、鉛直振動の距離減衰効果から表層改良層の等価弾性係数を推定する。

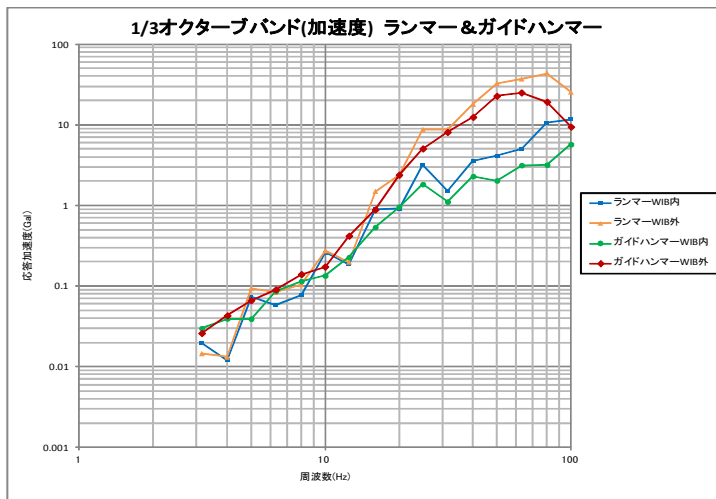




■振動実験加速度1/3オクターブバンド値(加振源C'-3')

加振条件：タンピングランマー・ガイドハンマー

※鉛直振動の1/3オクターブ特性から表層改良層の等価弾性係数を推定

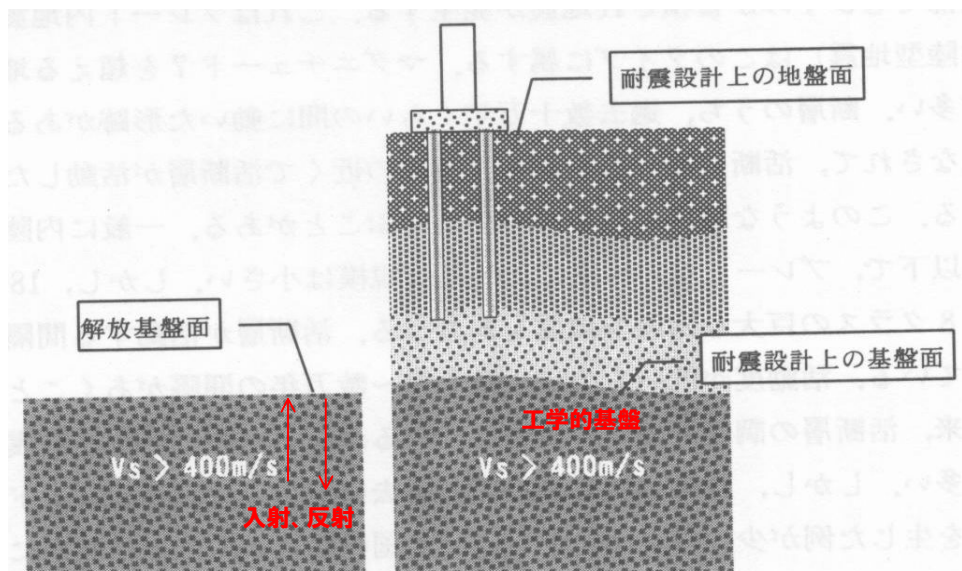


## 液状化対策2

分類	原理	手法
液状化の発生は許容 構造被害を防止、軽減	堅固な地盤に支持	杭基礎
	基礎の強化	増し杭、布基礎の強化

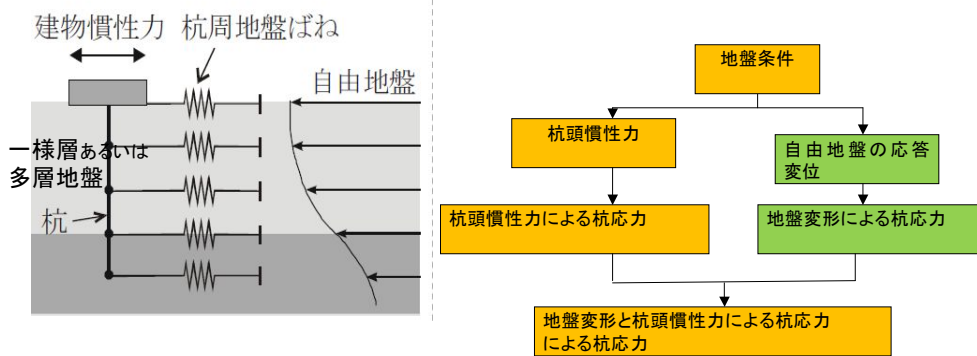
# 杭基礎の目標性能

	目標性能	
	地盤	基礎
損傷限界状態	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭への作用荷重&lt;損傷限界状態検証用支持力</li> <li>沈下量、変形角&lt;規定値</li> <li>引き抜き力&lt;損傷限界状態検証用引き抜き力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭基礎各部に生じる応力&lt;損傷限界強度</li> </ul>
安全限界状態	<ul style="list-style-type: none"> <li>地盤に作用する荷重&lt;極限支持力</li> <li>沈下量、傾斜角&lt;規定値</li> <li>杭に作用する引き抜き力&lt;杭の極限支持力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>杭基礎に作用するせん断力&lt;杭基礎の保有水平耐力</li> </ul>



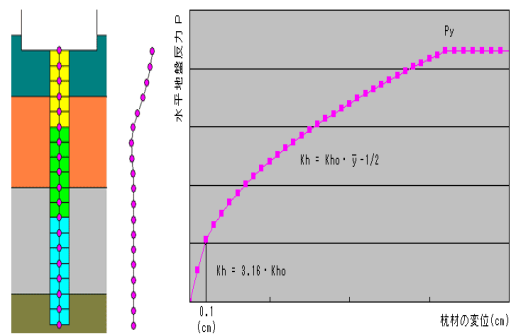
解説図3.1.1 解放基盤面と地震地盤面

## 地震時の杭応答



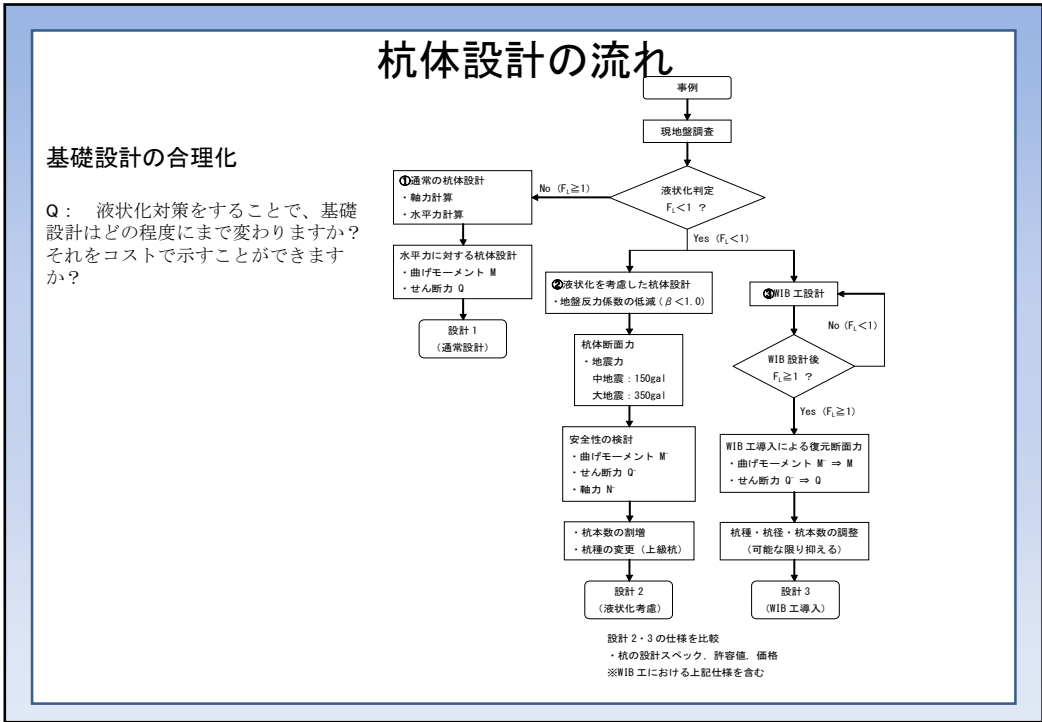
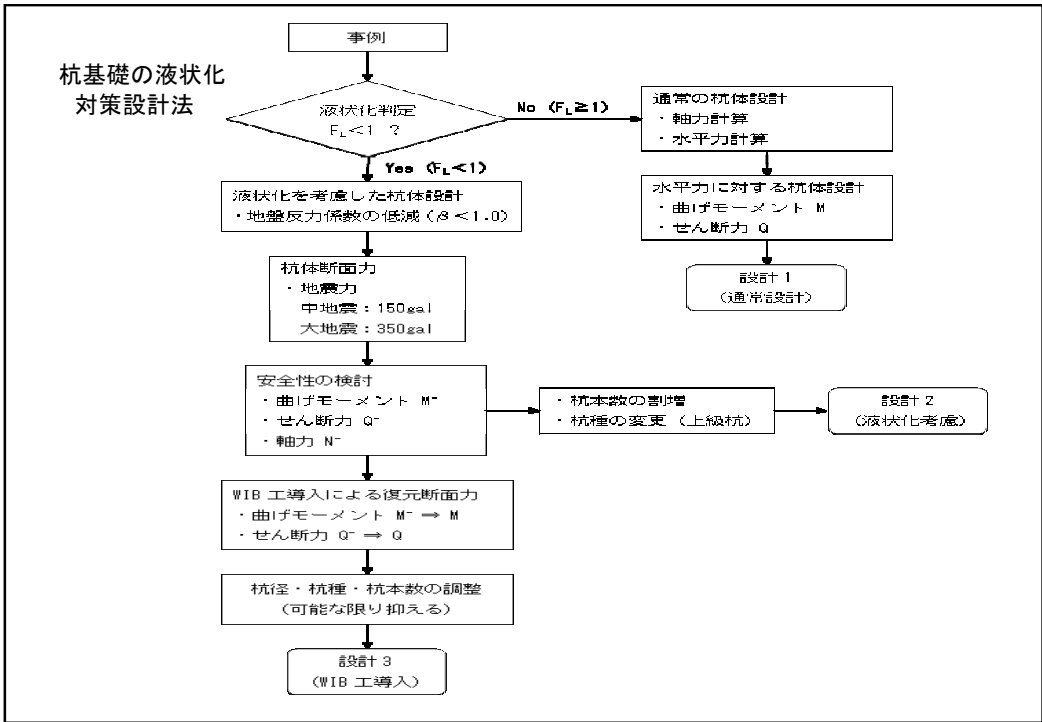
## 杭体の断面設計

- 損傷限界強度
  - 引張り側コンクリートのひび割れ強度
- 安全限界強度
  - 終局曲げ強度: 軸力と曲げモーメント (N-M関係)
  - 終局せん断強度

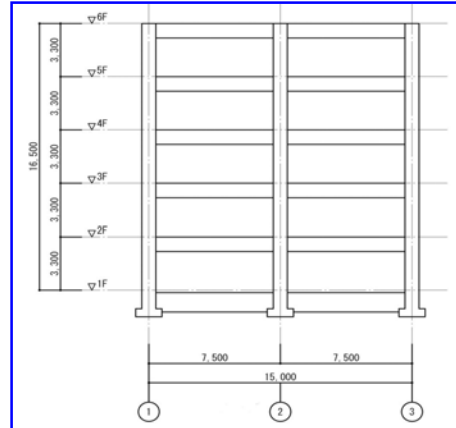
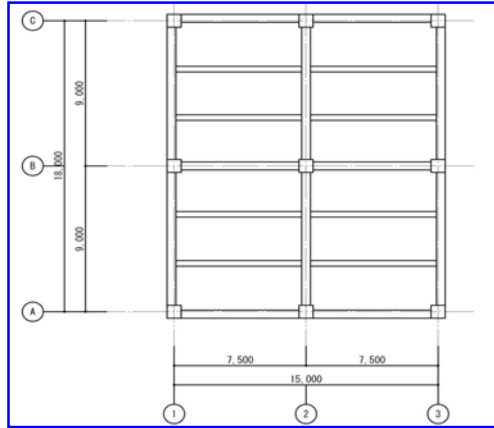


▲杭頭の変位と地盤反力の関係

非線形地盤反力

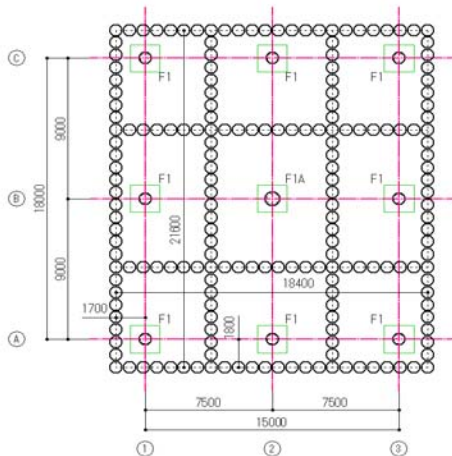


## 3.2 RC造6階事務所ビル

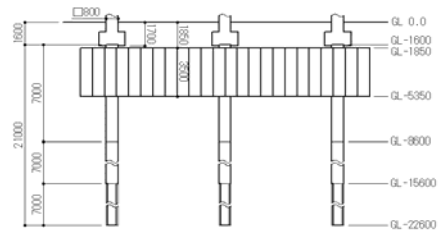


大梁: BD-500 × 900  
柱 : BD-800 × 800

### WIB工併用時の杭基礎設計例 RC造6F



平面図



断面図

#### 支持杭諸元

フーチング	F1			F1A	
	上杭	中杭	下杭	上杭	下杭
杭種類	上杭	中杭	下杭	上杭	下杭
コラム径 (mm)	800	800	600/800	900	900
杭長 (m)	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
杭天端 (m)	GL-1.60	GL-8.60	GL-15.60	GL-1.60	GL-8.60
杭先端 (m)	GL-8.60	GL-15.60	GL-22.60	GL-8.60	GL-15.60
杭本数 (本)	8			1	
設計基準強度 (kN/m <sup>2</sup> )	85000	80000	105000	85000	105000

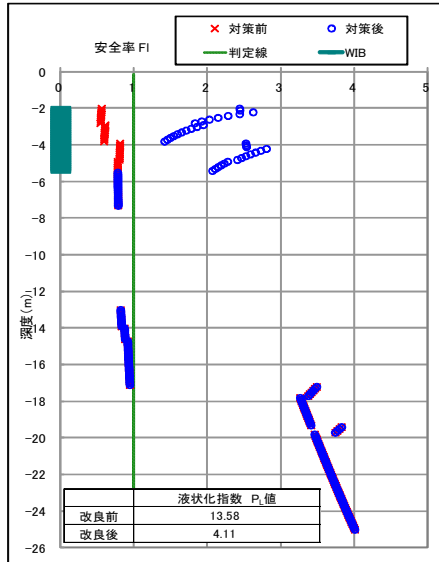
※ 断面図は概略図です。

#### WIB工諸元

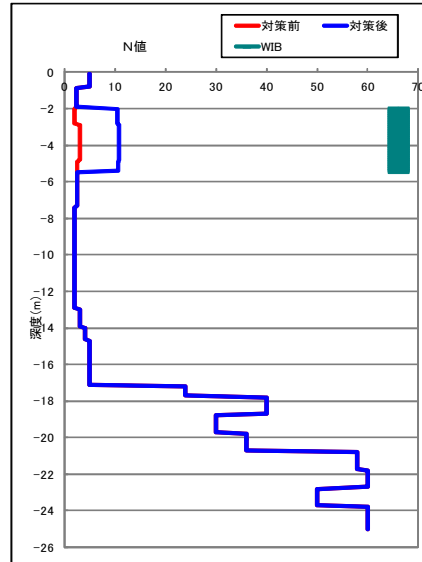
コラム径 (mm)	800
改良長 (m)	3.5
杭天端 (m)	GL-1.85
杭先端 (m)	GL-5.35
杭本数 (本)	192
改良率 (%)	16.8
全長 (m)	672.0
全体積 (m <sup>3</sup> )	337.8
設計基準強度 (kN/m <sup>2</sup> )	700

## 液状化判定

■安全率 FL値・PL値

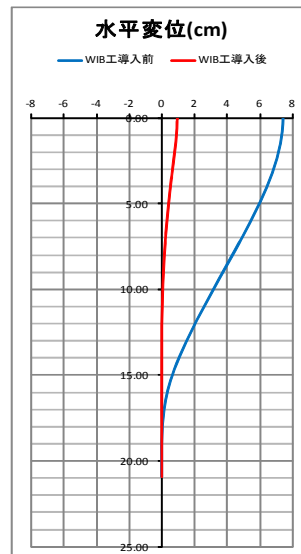
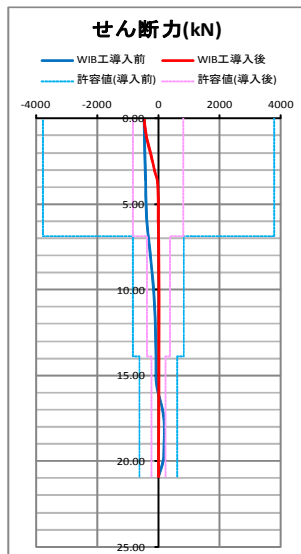
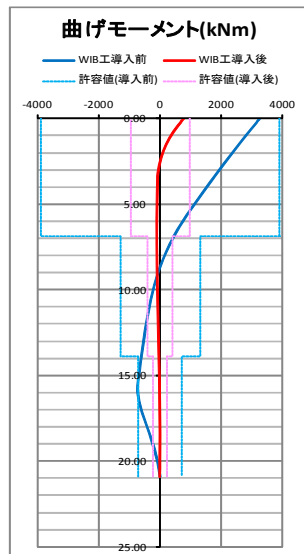


■N値



## 杭解析結果比較 (WIB施工前後)

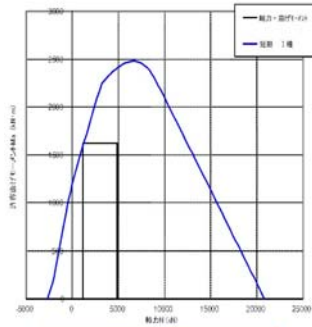
※弊社作成プログラムによる結果, WIB工導入前は液状化考慮時 ( $\beta = 0.1$ )



# M-N曲線

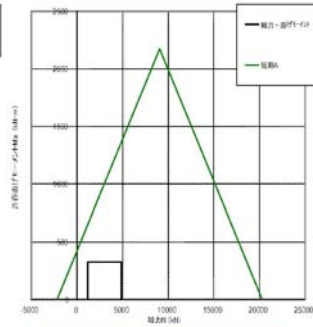
## ■通常設計 ( $\beta = 1.0$ )

・上杭: CPRC杭(105) I種  $\phi 1000$



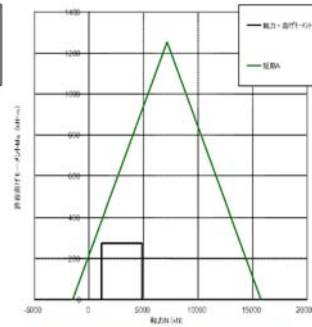
杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
1192	4892	1622

・中杭: PHC杭(105)A種  $\phi 1000$



杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
1192	4892	325

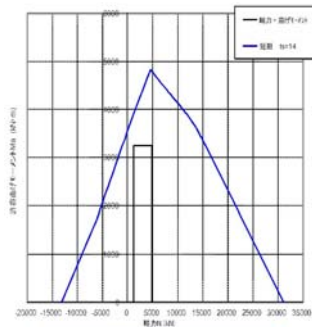
・下杭: 節付PHC杭(105 特厚)A種  $\phi 1000-800$



杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
1192	4892	273

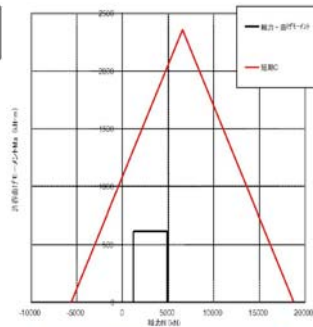
## ■液状化考慮 ( $\beta = 0.1$ )

・上杭: HSC杭SKK490(105) $t_s=14$   $\phi 1000$



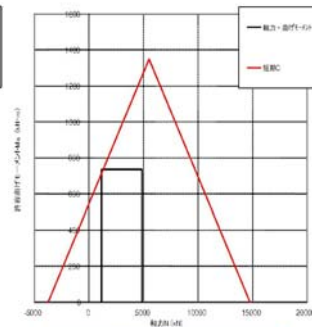
杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
1192	4892	3252

・中杭: PHC杭(105)C種  $\phi 1000$



杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
1192	4892	615

・下杭: 節付PHC杭(105 特厚)C種  $\phi 1000-800$



杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
1192	4892	734

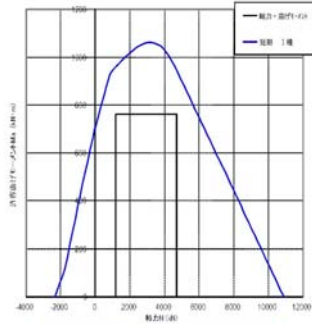
■ WIB工施工時 ( $\beta = 0.1$ , WIB天端GL-1.85m, 改良長3.50m)

<外周部>

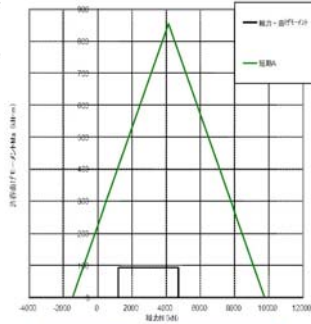
・上杭:CPRC杭(85)I種φ800

・中杭:PHC杭(80)A種φ800

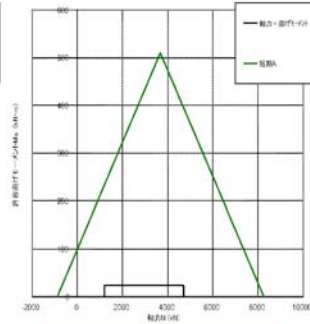
・下杭:節付PHC杭(105 通常)A種φ800-600



杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
1192	4711	761



杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
1192	4711	93



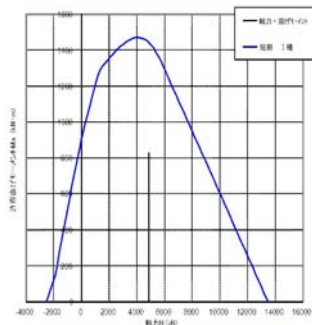
杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
1192	4711	24

<中心部>

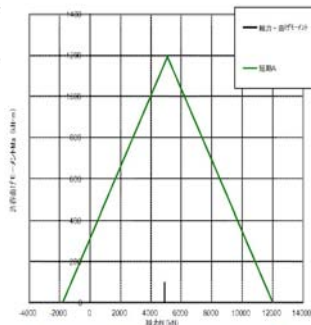
・上杭:CPRC杭(85)I種φ900

・中杭:PHC杭(80)A種φ900

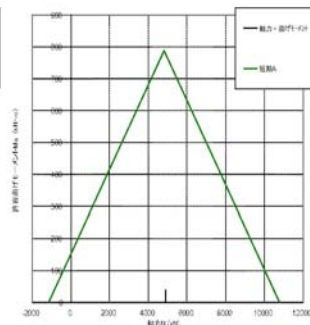
・下杭:節付PHC杭(105 通常)A種φ900-700



杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
4992	4992	925



杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
4992	4992	99



杭に作用する軸力・曲げモーメント		
最大軸力 (kN)	最大軸力 (kN)	曲げモーメント (kNm)
4992	4992	39



## 地震時の杭基礎設計における比較

検討項目	杭基礎のみ (A)	杭基礎とWIB工の複合 (B)	比率 (A : B)
1. 沈下計算	最大沈下量 3.7mm 最大傾斜 1/20713	最大沈下量 1.5mm 最大傾斜 1/41456	最大沈下量 3:1 最大傾斜 2:1
2. 杭体応力	杭頭曲げモーメント 3252kNm 杭頭せん断力 463kN	杭頭曲げモーメント 761kNm 杭頭せん断力 463kN	杭頭曲げモーメント 4:1 杭頭せん断力 1:1
3. 断面算定	換算断面2次モーメント 0.01679~0.05410m <sup>4</sup>	換算断面2次モーメント 0.004936~0.01552m <sup>4</sup> (0.008902~0.02427m <sup>4</sup> ) ※()内は中央の1本	換算断面2次モーメント 4:1 ※中央の1本の比率は2:1
4. 水平保有耐力	杭頭変位 7.4cm	杭頭変位 0.9cm	杭頭変位 8:1
5. 使用杭	支持杭 下記各9本、各7m長 SC杭SKK490 φ1000 鋼管厚14mm PHC杭 105 φ1000 C種 節付PHC杭 105 特厚 80100 C種	支持杭 下記各9本、各7m長 (内1本の径は0値) CPRC杭 85 φ800(900) I種 PHC杭 80 φ800(900) A種 節付PHC杭 105 標準 6080(7090)A種	杭径 5:4 (-200mm) ※中央の1本の比率は10:9 (-100mm)
	WIB工無し	WIB工 φ800@3.5m 192本 設計基準強度 700kN/m <sup>2</sup> (使用固化材 250kg/m <sup>3</sup> )	-
6. コスト	約3,000万円	約2,500万円	6.5 (差額は約500万円)

●E&D テクノデザイン株式会社

岡山市北区芳賀 5303

TEL・FAX 086-286-8519

URL <http://www.ed-techno.org>

E-mail [takemiya@ed-techno.org](mailto:takemiya@ed-techno.org)

●有限会社 コア構造設計

岡山市北区今 2 丁目 6 番 10 号 内田ビル 3 階

TEL 086-243-5271 FAX 086-243-5648

E-mail [core-k@par.odn.ne.jp](mailto:core-k@par.odn.ne.jp)

●株式会社 フジタ地質

岡山市中区雄町 425 番地 1

TEL 086-208-3950 FAX 086-208-3951

URL <http://www.geo-fujita.jp>

E-mail [info@geo-fujita.jp](mailto:info@geo-fujita.jp)