

# その橋、地震が来ても大丈夫ですか？ ～既設道路橋基礎の 耐震性能評価手法の開発～

国立研究開発法人 土木研究所  
構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)  
上席研究員 大住 道生

## 本日の内容



1. 背景・目的
2. 液状化地盤にある橋台基礎の評価(作用)
3. 古い既製杭の評価(抵抗)
4. 道路橋基礎の補強優先度の考え方

- 道路橋の耐震設計法の歴史 : 被災した部位を強化する
- **現在の耐震設計法** : **橋全体系として性能を確保する**
- 次世代の耐震設計法 : 設計地震動に対する性能を確保した上で、想定外にも対処

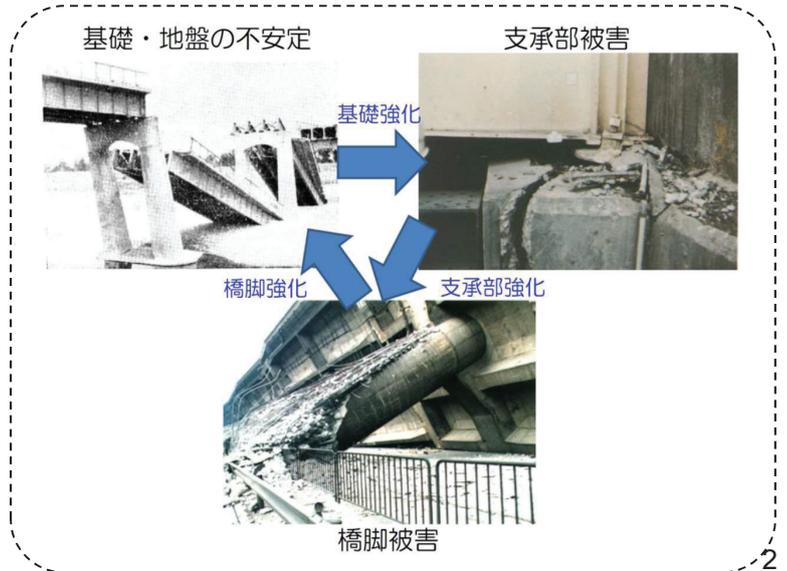
## シナリオデザイン設計法

<https://www.pwri.go.jp/caesar/technical-information/caesar-meeting/lecture/lecture14.html>

地震は、正確さをもって橋の中での**最弱点部位**を探し出し、そこに被害を発生させてきている！



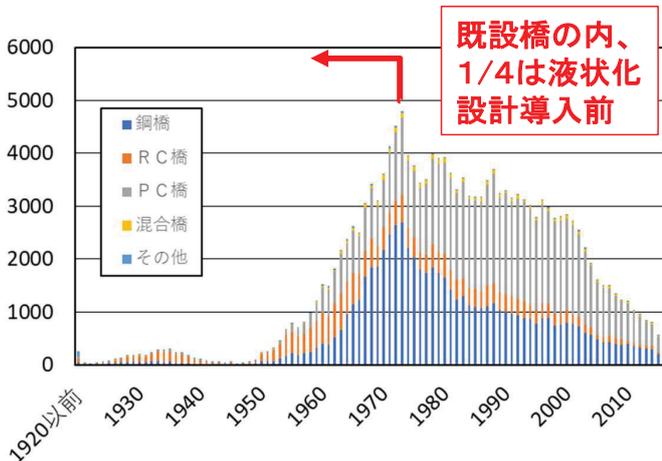
古い設計基準に基づいてつくられた橋も**全体系として性能確保が必要**



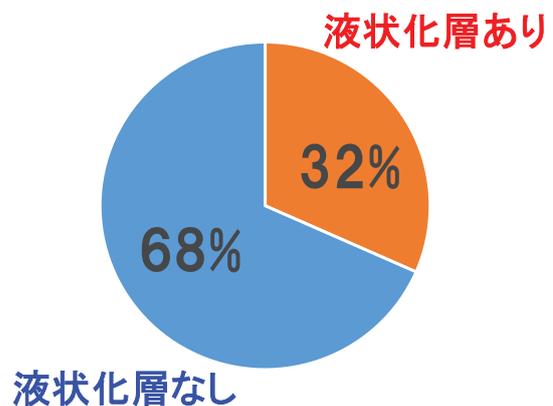
- 既設橋の4分の1は、液状化に対する設計がない時代に建設。
- 液状化地盤にある橋の割合を約3割と仮定すると、1割近い既設橋で地震時に液状化による被害等の影響が生じるおそれあり。
- 橋梁基礎は、一度被害を受けると復旧に多大な時間。一方で、補強工事には施工制約・費用大。

## （補強箇所選定のための）精度の高い耐震性能評価手法が必要

既設橋梁数の建設年分布



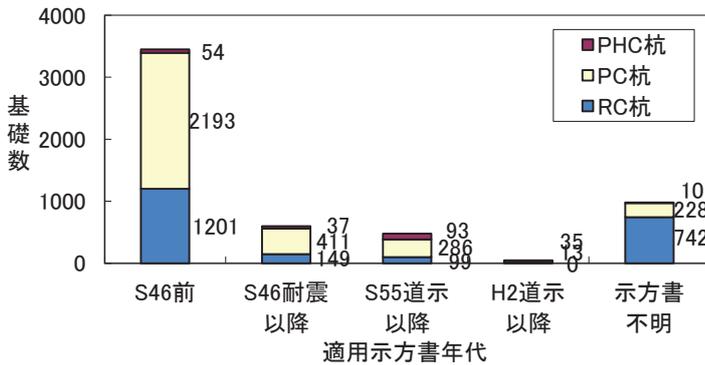
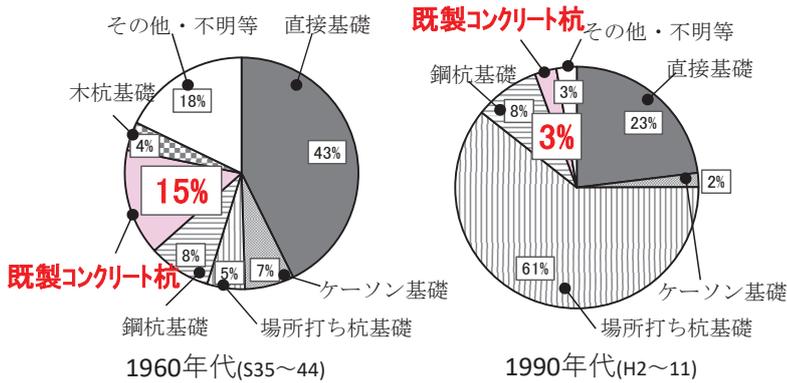
液状化層を有する基礎の割合



出典：国総研資料第1075号「平成30年度道路橋に関する基本データ集」、平成31年3月

※土研資料第350号(1996), 第4037号(2007), 第4339号(2016)「橋梁基礎形式の選定手法調査」を元に推計

## 直轄国道橋梁の基礎形式の割合



出典：(独)土木研究所：既設道路橋基礎の耐震性能簡易評価手法に関する研究、土木研究所資料、第4168号、pp.2~129、2010.5

## 既製コンクリート杭の地震被災例



【東北地方太平洋沖地震】

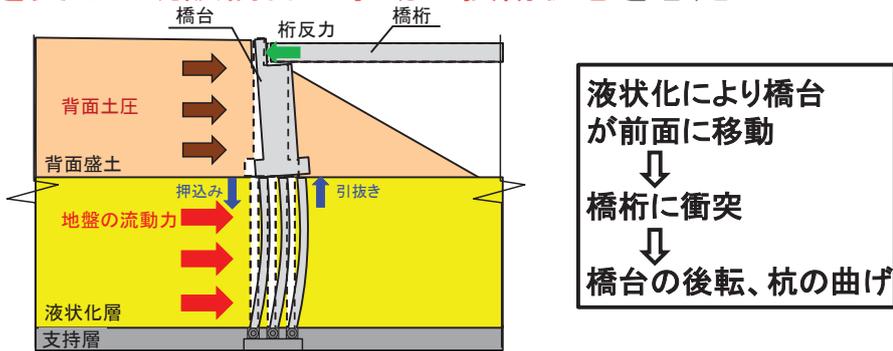


【熊本地震】

# 本日の内容

1. 背景・目的
2. 液状化地盤にある橋台基礎の評価(作用)
3. 古い既製杭の評価(抵抗)
4. 道路橋基礎の補強優先度の考え方

- 既往の被災事例に基づき、大規模地震発生時の液状化に伴う側方流動の影響を受けた既設橋台の挙動や損傷状態を想定



液状化地盤における既設橋台の地震時挙動(仮説)

## 損傷イメージ



- ① 桁端部の損傷
- ② 支承部の損傷
- ③ たて壁の損傷(せん断破壊)
- ④ フーチングの損傷
- ⑤ 杭基礎の損傷

→被災状況を再現させる実証実験の実施、解析モデルや耐震性能評価手法の開発

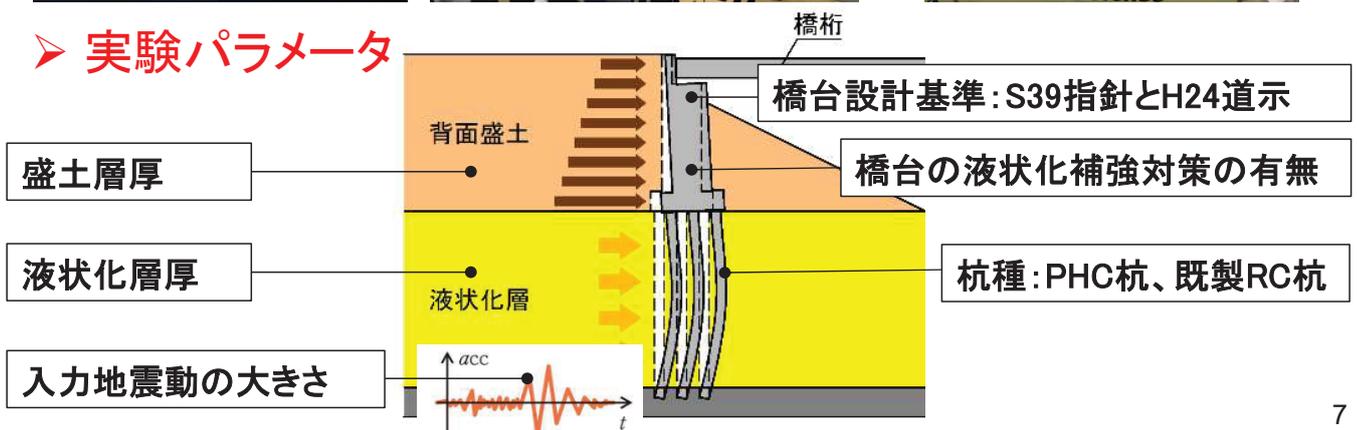
# 実験全体の概要

## ➤ 実験シリーズ

- シリーズ1: 土木研究所遠心実験(60G遠心場、1/60縮小モデル、計12ケース)
- シリーズ2: 土木研究所振動台実験(1G重力場、1/10縮小モデル、計6ケース)
- シリーズ3: E-ディフェンス大規模振動台実験(1G重力場、1/4.5縮小モデル、計2ケース)



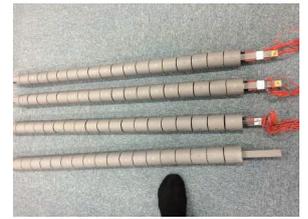
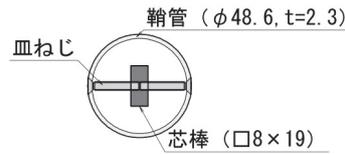
## ➤ 実験パラメータ



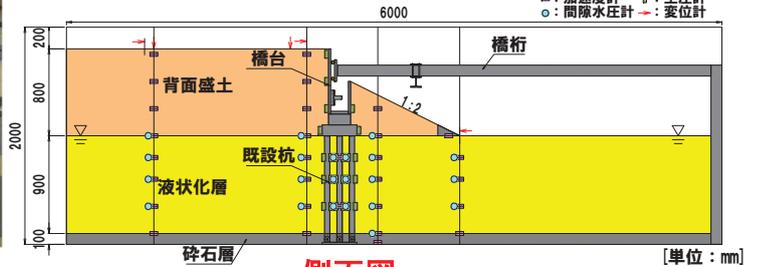
- 土木研究所の三次元大型振動台と大型剛土槽を用いた振動台実験を実施 (半断面模型)
- 既製RC杭に支持される可動支承側の橋台を対象(S39指針)
- 縮尺スケール : 1/10
- 鋼管矢板壁による前面分離型補強と側面一体型補強の効果を検証



三次元大型振動台と大型剛土槽

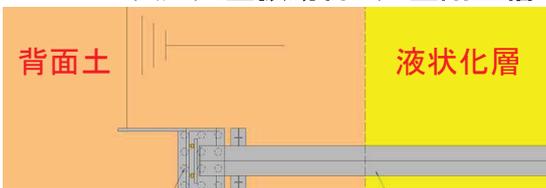


既設杭模型



側面図

[単位: mm]



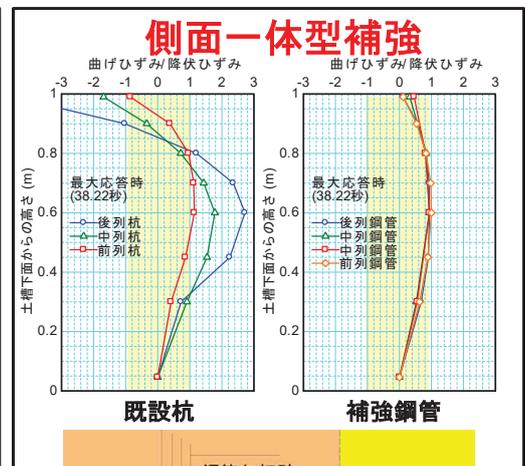
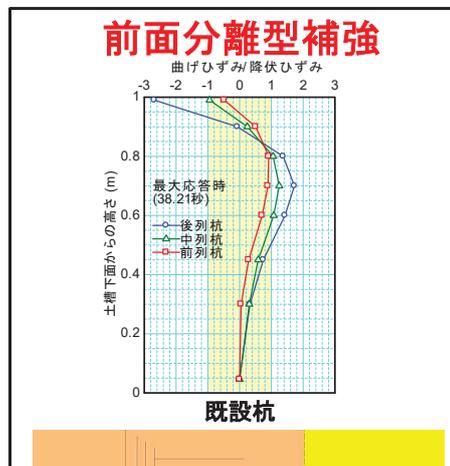
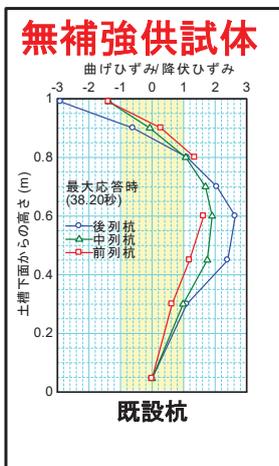
鋼管矢板壁(前面分離型)  
平面図



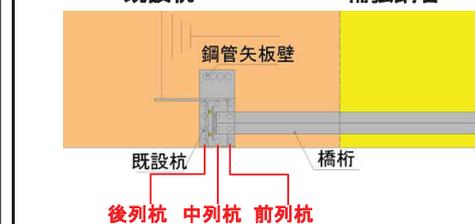
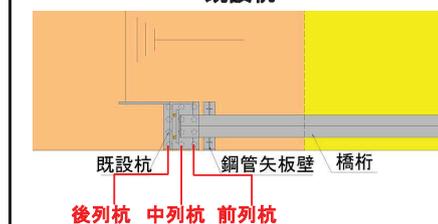
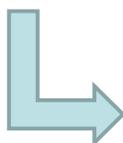
鋼管矢板壁(側面一体型)  
平面図

# 土木研究所振動台実験

- 前面分離型補強をした場合、杭の曲げひずみが小さい。前面矢板による液状化層の変形抑制効果を確認。ただし、降伏ひずみを超過。
- 側面一体型補強をした場合、既設杭は降伏ひずみを超過。一方で補強鋼管の曲げひずみは弾性範囲内にとどまり、かつ、せん断耐力は十分に大きい。→既設杭の損傷後も基礎全体の耐震性や鉛直支持力は確保。



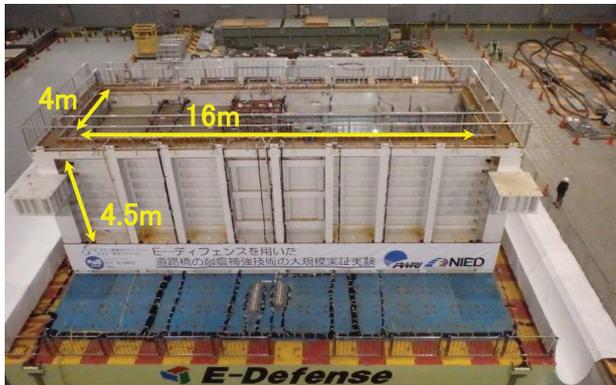
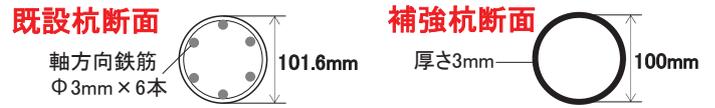
各補強工法との比較



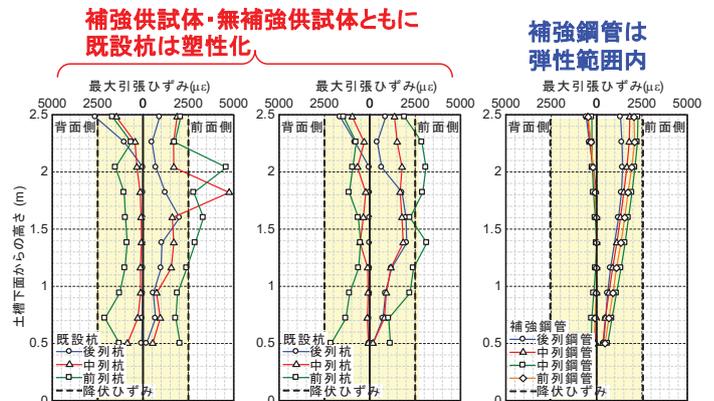
# E-ディフェンスによる大規模振動台実験



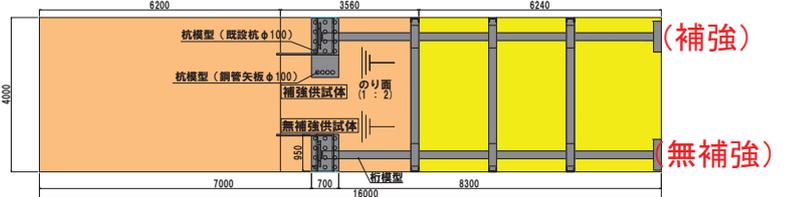
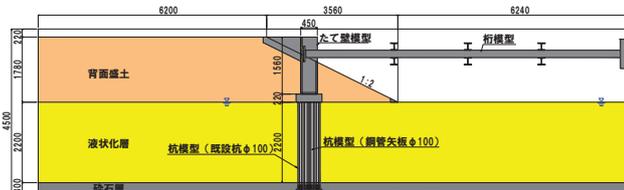
- 基礎構造の塑性化後の挙動を把握するため、防災科学技術研究所の実大三次元震動破壊実験施設(E-ディフェンス)による大規模振動台実験を実施(半断面模型)
- 既製RC杭に支持される可動支承側の既設橋台を対象(S39)
- 縮尺スケール : 1/4.5
- 側面一体型補強の効果を確認



E-ディフェンス実験状況



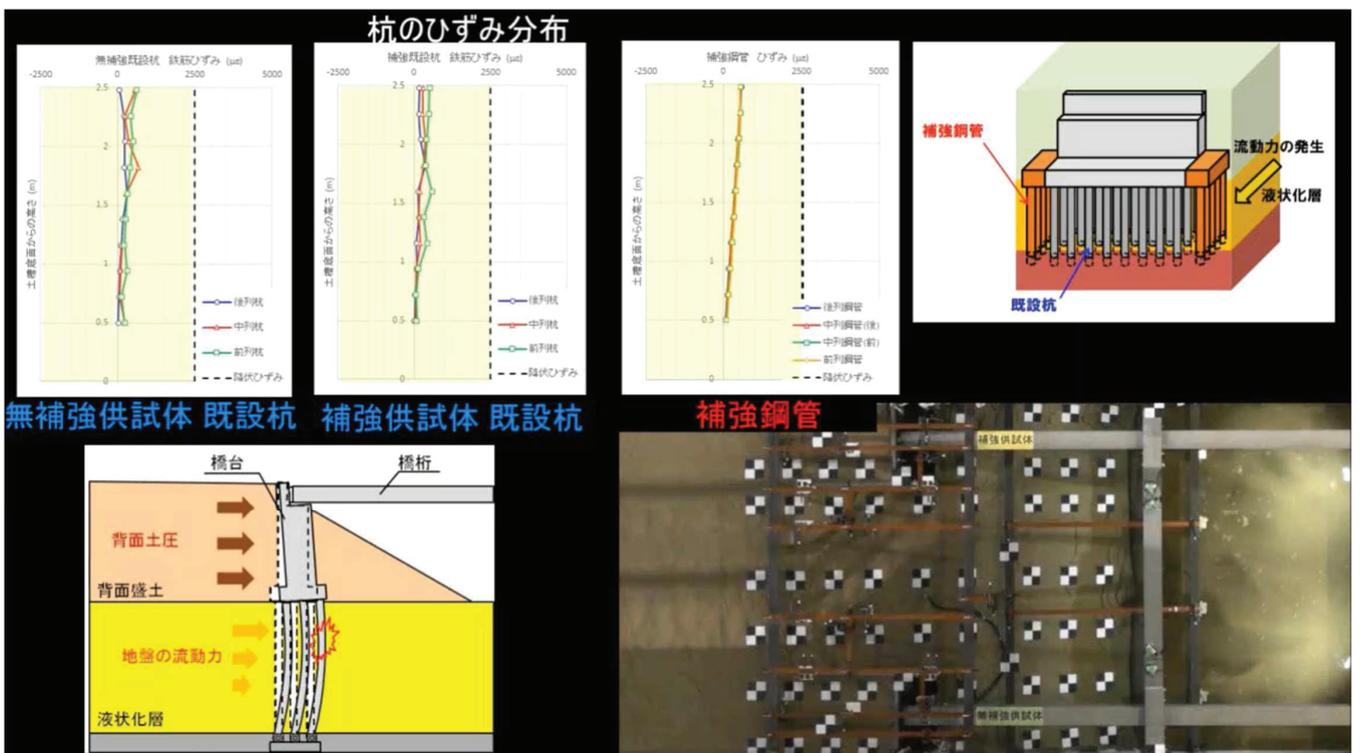
無補強供試体既設杭 補強供試体既設杭 補強鋼管



E-ディフェンス実験模型

10

# E-ディフェンスによる大規模振動台実験



E-ディフェンス実験動画

11

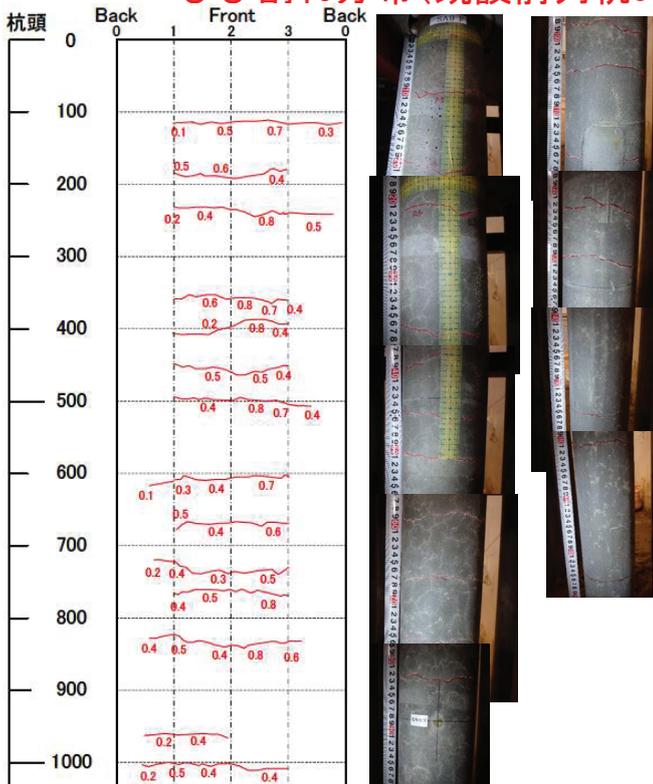


12

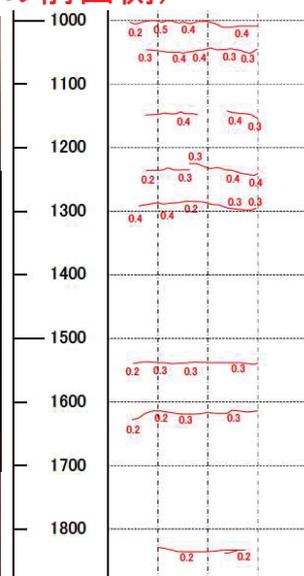
## E-ディフェンスによる大規模振動台実験

- 無補強供試体、補強供試体ともに、既設前列杭の前面側の広い範囲で水平方向のひび割れが発生していた(杭頭-0.1m~-1.8mの範囲)。
- 補強鋼管杭に損傷は確認されなかった。

### ひび割れ分布(既設前列杭9の前面側)

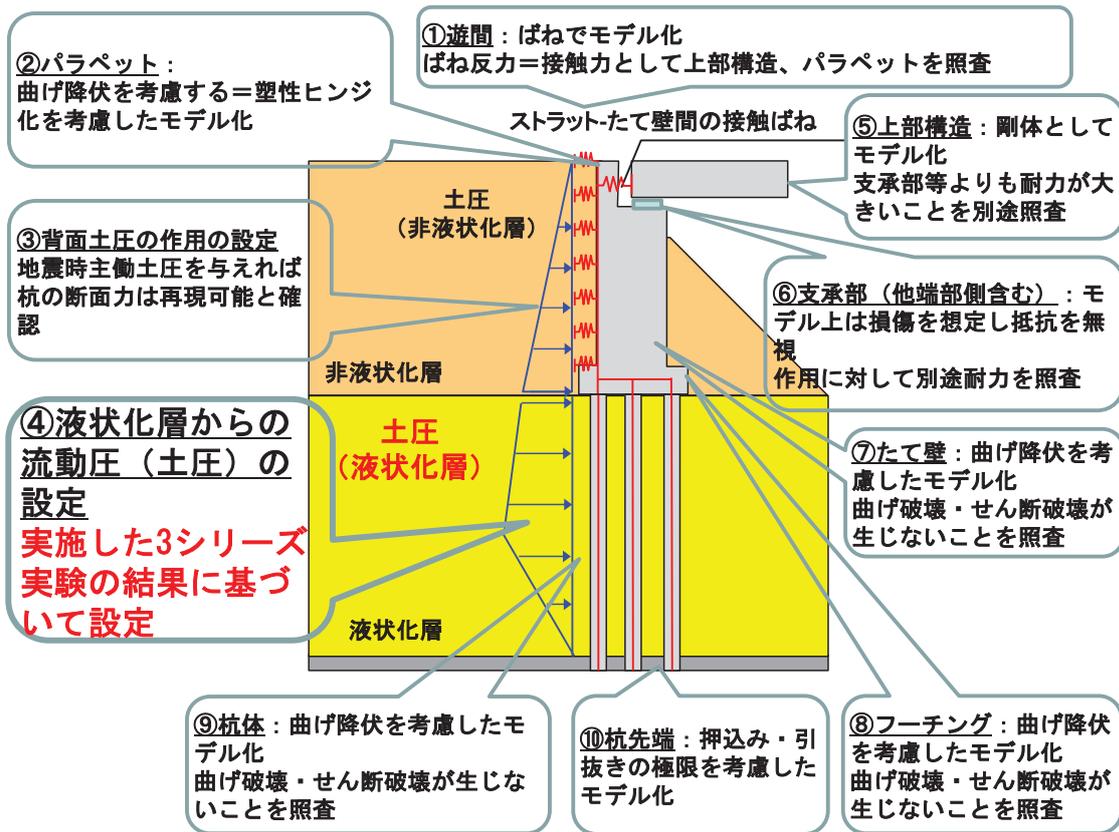


### 補強供試体の杭列配置



無損傷 フーチング底面より  
-0.3m  
(補強鋼管杭16の前面側)3

## 橋台～基礎の耐震性評価モデル



14

## 液状化層からの流動圧(土圧)の設定

- 想定した完全に液状化した地盤の応力状態において、杭の作用土圧の特徴(深さ方向の分布、杭配置位置の影響、液状化程度  $FL$  の影響)を考慮した上で、土圧  $EP$  の定式化を行う。

$$EP = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot q$$

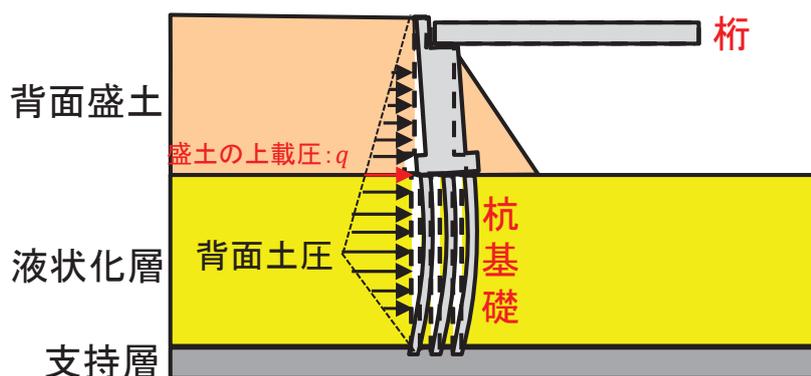
ここに、

$C_1$ : 深さ方向の分布の補正係数

$C_2$ : 杭配置位置の影響の補正係数

$C_3$ : 液状化の程度  $FL$  の補正係数

$q$ : 盛土の上載圧



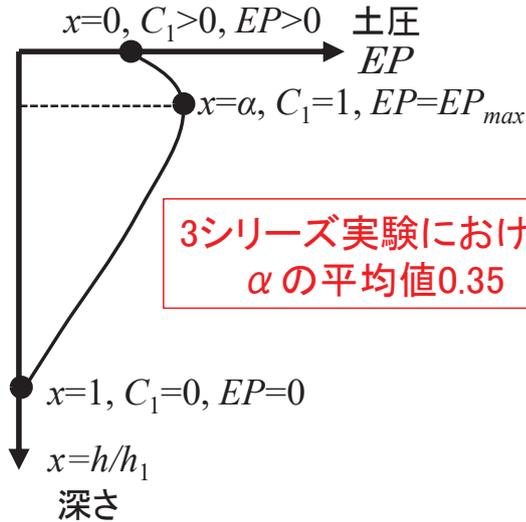
15

# 液状化層からの流動圧(土圧)の設定

## ➤ 深さ方向の分布の補正係数 $C_1$

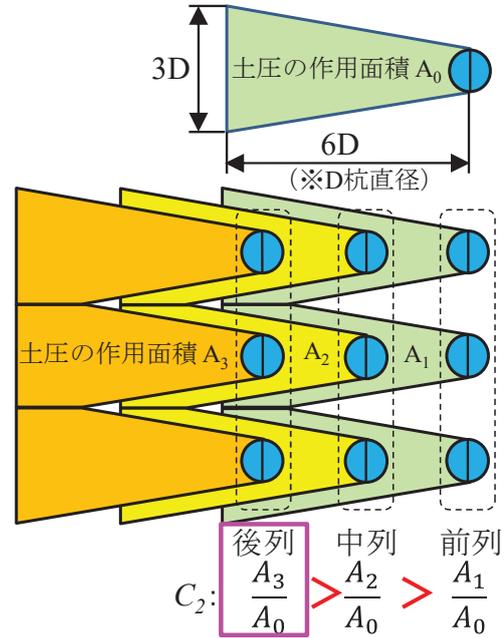
$$C_1 = 1 - \frac{(x-\alpha)^2}{(1-\alpha)^2} \quad (a < 0.5)$$

ここに、  
 $x$ は正規化された液状化層上面からの深さ  
 $\alpha$ は作用土圧の極大点に関するパラメータ  
 (実験結果をフィッティングすることにより求める)



## ➤ 杭配置位置の影響の補正係数 $C_2$

各列杭の土圧の作用面積と単杭の土圧の作用面積の比率



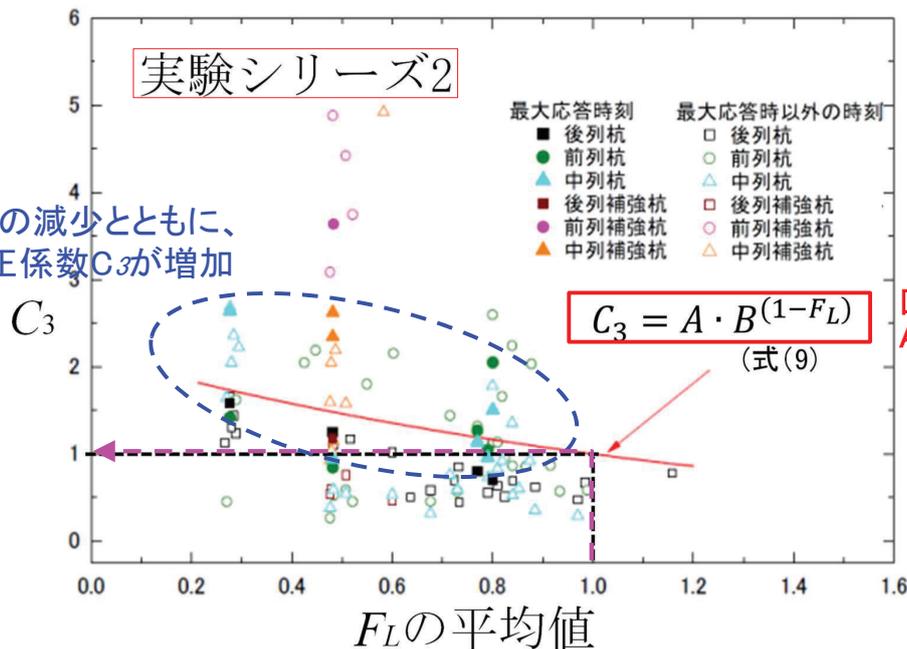
後列杭における $C_2$ が最も大きいので、  
実験結果と対応

# 液状化層からの流動圧(土圧)の設定

## ➤ 液状化の程度 $FL$ の補正係数 $C_3$

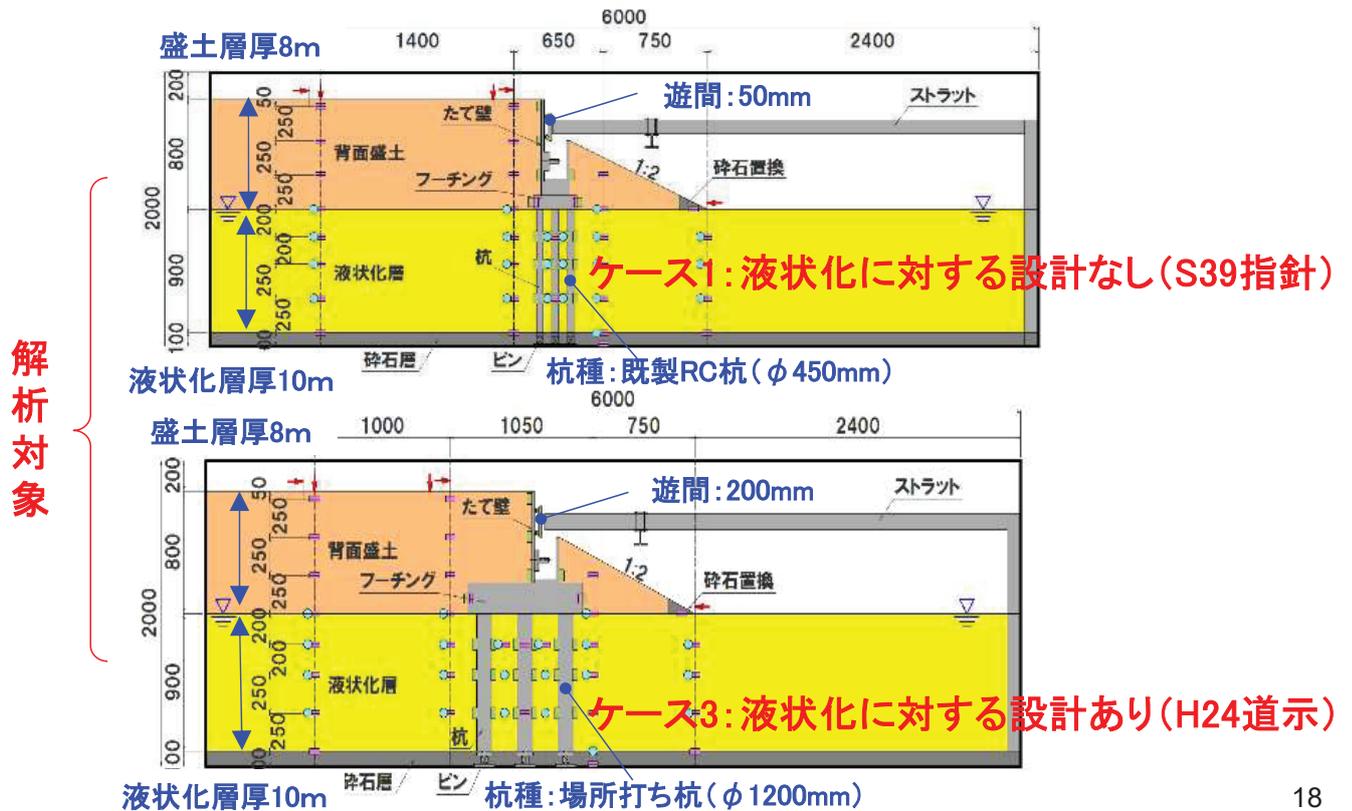
求めた補正係数 $C_3$ と液状化抵抗率 $F_L$ との相関関係を分析した上で、補正係数 $C_3$ の回帰式を求める。

液状化抵抗率 $F_L$ の減少とともに、  
補正係数 $C_3$ が増加



## 【解析対象】液状化の影響を設計に反映しているかをパラメータとした2ケース

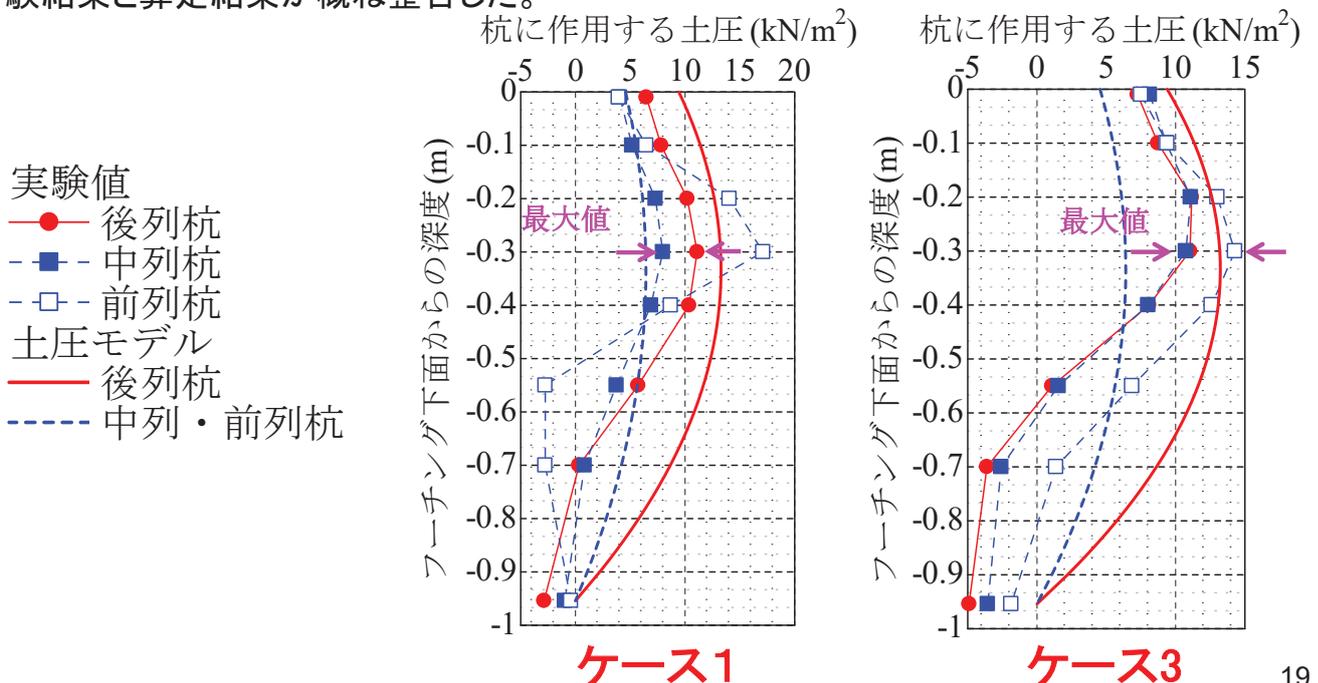
- シリーズ2のケース1: S39指針に基づいて設計された可動支承側の橋台
- シリーズ2のケース3: H24道示に基づいて設計された可動支承側の橋台



18

## 【杭の作用土圧の実験結果と算定結果の比較】

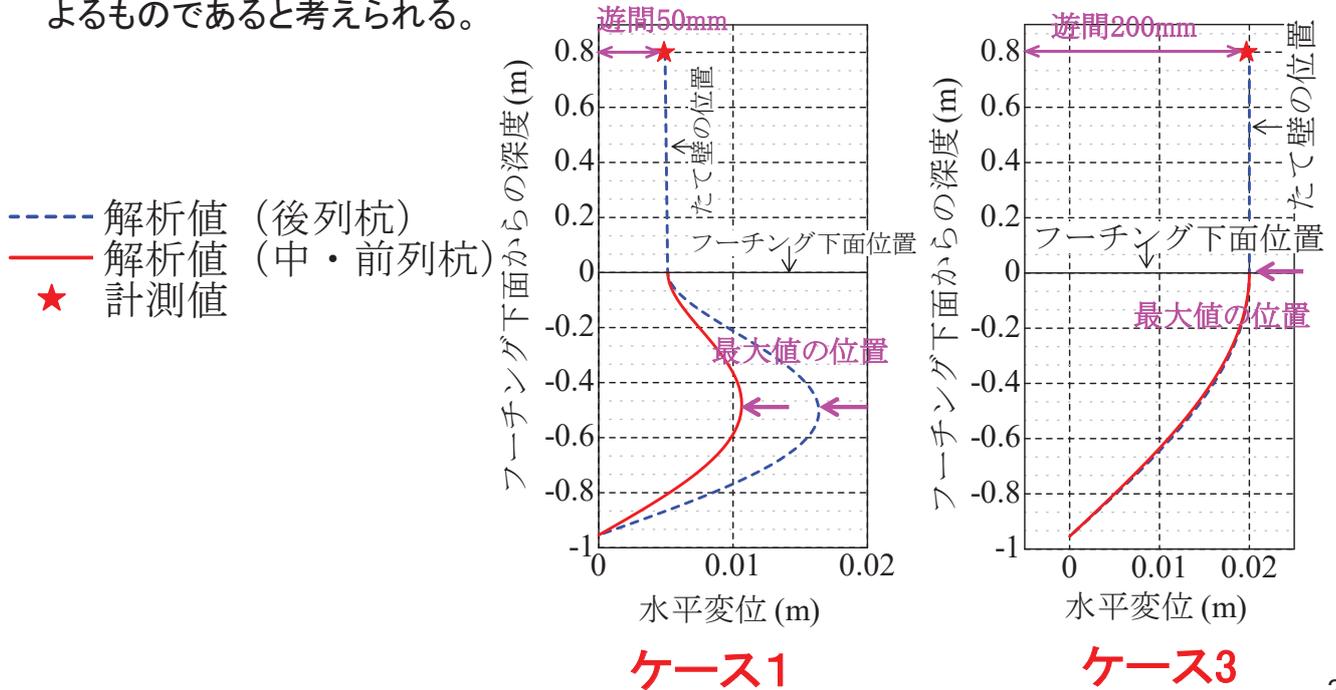
- ケース1: 後列及び中列杭では、土圧の算定結果と実験結果の土圧分布形状や土圧最大値が概ね整合する。
- ケース3: 各列杭の土圧分布形状は、実験結果と算定結果が概ね再現できている。土圧最大値は、前列杭と中列杭において実験結果が大きい、後列杭において実験結果と算定結果が概ね整合した。



19

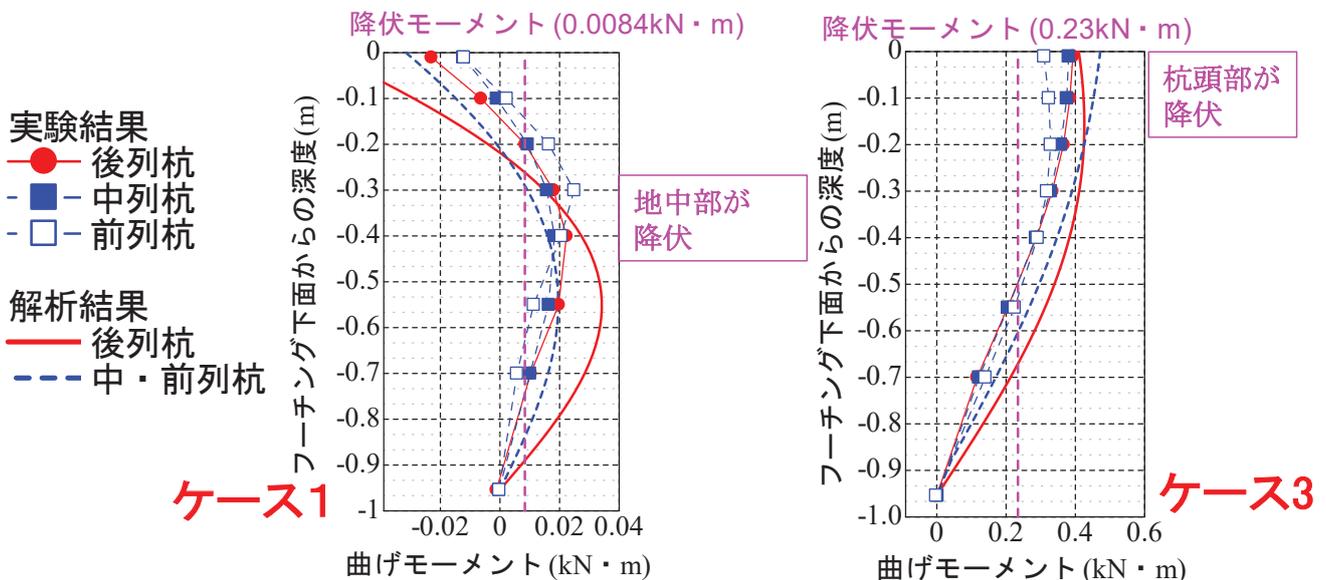
## 【橋台・杭の変位の比較】

- 両ケースともに、橋台躯体では、桁の遊間が詰まり、桁とパラペットが衝突するまで変位が生じる。
- ケース1の各列杭の変位最大値の位置は、液状化層の中央付近であり、ケース3の変位最大値の位置は、杭頭付近であった。これは設計基準における遊間の違いによるものであると考えられる。



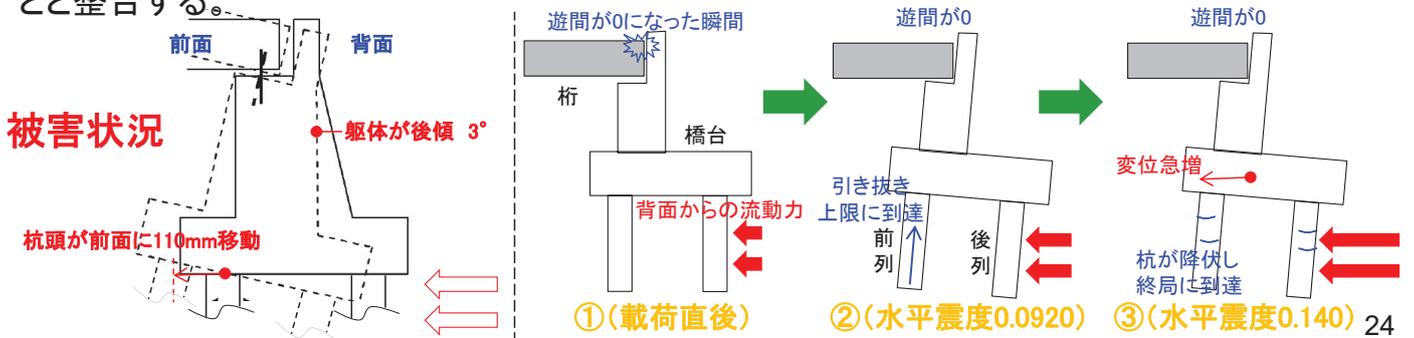
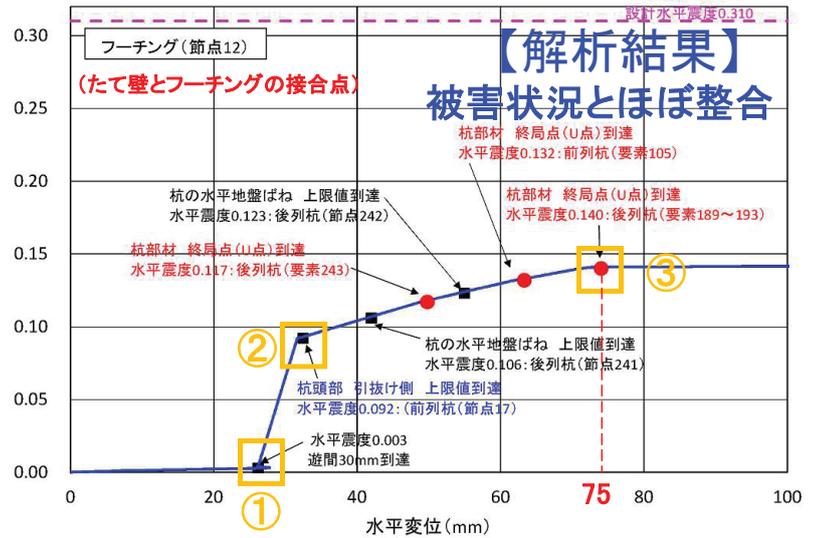
## 【杭の曲げモーメントの比較】

- ケース1: 各杭列の曲げモーメントの分布形状は、実験結果と解析結果が概ね整合する。曲げモーメントの最大値は、前列杭において最大となる深度が異なるが、中・後列杭において両者が概ね整合する。
- ケース3: 各杭列の曲げモーメントの分布形状は、実験結果と解析結果が概ね整合する。曲げモーメントの最大値は、中・前列杭において解析結果が大きい、後列杭において両者が概ね一致する。
- 両ケースとも、地中部あるいは杭頭での降伏状態は再現できた。





- 実橋Dの被災状況は、桁とたて壁が衝突し、背面土に押し出され、橋台が背面側に回転し、杭頭が前面側に大きく移動したと考えられる。
- 解析結果では、載荷直後に桁とパラペット間の遊間がゼロとなり(①)、水平震度0.092の時に前列杭が引き抜きの上限值に到達し(②)、水平震度0.140の時に杭が終局点に到達する。その後、橋台はそれ以上の荷重が負担できず、変位のみが急に増加する(③)。
- 解析において水平変位が75mmで杭の終局を超えた結果は、実被災において杭頭が前面に110mm移動したと整合する。



## 本日の内容

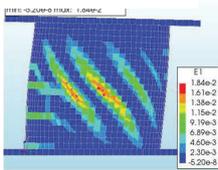
1. 背景・目的
2. 液状化地盤にある橋台基礎の評価(作用)
3. 古い既製杭の評価(抵抗)
4. 道路橋基礎の補強優先度の考え方

	H8道示	H24道示	H29道示
PC杭	道示記載なし		PHC杭式を適用できないか？
RC杭	はりのせん断耐力評価式に基づく評価	道示記載なし	
PHC杭	はりのせん断耐力評価式に基づく評価		PHC杭独自のせん断耐力評価式に基づく評価

## 載荷実験



## FEM解析



適用性の検証

### はり式

$$P_s = S_s + S_c$$

$$S_c = 1.5 \cdot c_N \cdot \tau_c \cdot b \cdot d$$

$$S_s = \frac{A_w \cdot \sigma_{sy} \cdot d \cdot (\sin\theta + \cos\theta)}{1.15 \cdot s}$$

### PHC杭式

$$S_d = \xi_1 \xi_2 \Phi_u (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) b_{ej}$$

$$\tau_1 = \frac{0.115 k_u k_p (\sigma_{ck} + 17.7)}{a/d + 0.115}$$

$$\tau_2 = 0.516 P_w \sigma_y$$

$$\tau_3 = 0.102 \left( \sigma_{ce} + \frac{N}{b_{ej}} \right)$$

[有効性の検証]

どれくらい合理化されるか

[適用性の検証]

どれくらい精度を有するか

既製RC・PC杭のせん断照査フローの提案

## 実験による検証(PC杭)

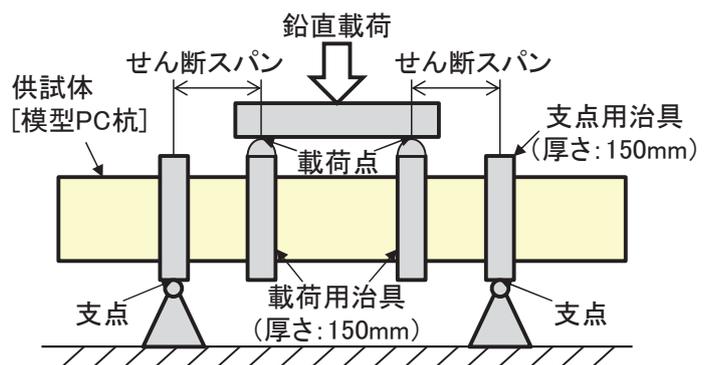
- 載荷方法 : 単純ばり形式による二点載荷
- 載荷パターン : 単調増加方式による漸増載荷, 破壊に至るまで載荷
- 載荷制御 : 変位急増点まで荷重制御, それ以降は変位制御
- 実験ケース

Case	杭径	せん断スパン比	PC鋼材	スパイラル筋
1	500mm	1.0	φ9mm × 24本 (有効プレストレス量: 10N/mm <sup>2</sup> )	φ6mm
2		1.5		
3		2.0		
4		2.5		

### 載荷試験状況



※模型杭



# 実験による検証(PC杭)

- CASE-1,2,3でせん断破壊を確認
- CASE-1では, 斜めせん断ひび割れ位置においてスパイラル鉄筋の破断を確認
- CASE-2,3では, 斜めせん断ひび割れの延長線上にある荷点付近のコンクリートが圧壊
- 実験値/はり式による推定値 = **3.25~3.47**  
 実験値/PHC杭式による推定値 = **1.60~1.81**

※1:はり式:フーチング式のせん断スパン比による補正係数を流用して算出  
 ※2:PHC杭式:安全係数を考慮せず算出 (生値[特性値]を示す)

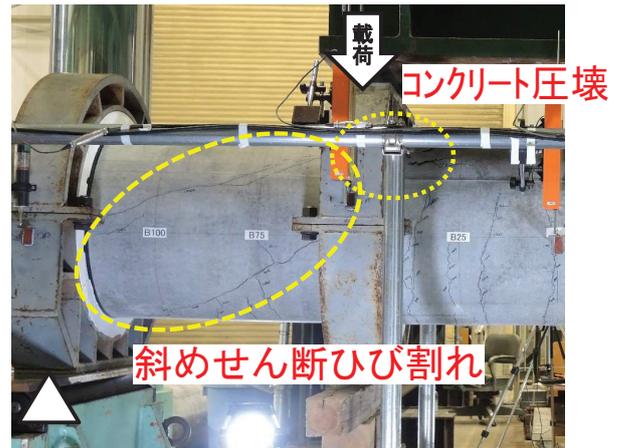
## 実験結果及びせん断耐力推定比

ケース名	破壊形態	実験値	推定比 (実験値/推定値)	
			はり式	PHC杭式
CASE-1	せん断	882.5	3.47	1.81
CASE-2	せん断	696.5	3.67	1.80
CASE-3	せん断	517.5	3.25	1.60
CASE-4	曲げ	393.5	---	---

### CASE-1 荷終了後における損傷状況



### CASE-2 荷終了後における損傷状況



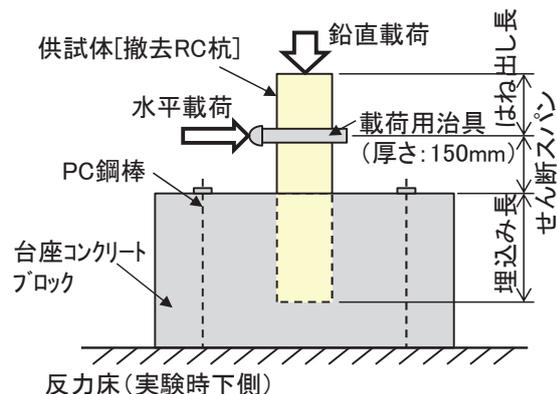
# 実験による検証(RC杭)

- 荷方法 : 片持ちばり形式による一点荷
- 荷パターン : 単調増加方式による漸増荷, 破壊に至るまで荷
- 荷制御 : 変位急増点まで荷重制御, それ以降は変位制御
- 試験ケース

Case	杭径	せん断スパン比	軸力	軸方向鉄筋	スパイラル筋
1	300mm	1.0	なし	丸鋼φ9mm×7本 (0.98%)	φ4mm
2	300mm	1.5	なし	丸鋼φ19mm×16本 (4.88%)	φ6mm
3	450mm	1.0	なし	丸鋼φ9mm×8本 (1.12%)	φ3.2mm
4	450mm	1.5	なし		
5	300mm	1.0	300kN		
6	300mm	1.0	400kN		

※実橋の撤去杭

### 荷試験状況



- CASE-3, CASE-5でせん断破壊を確認
- 載荷側の治具下面と圧縮側下端を結ぶような斜め方向のせん断ひび割れが進展
- ひび割れ位置においてスパイラル鉄筋が破断
- 実験値/はり式による推定値 = **3.02~3.15**  
 実験値/PHC杭式による推定値 = **1.16~1.56**

※1:はり式:フーチング式のせん断スパン比による補正係数を流用して算出  
 ※2:PHC杭式:安全係数を考慮せず算出 (生値[特性値]を示す)

## 実験結果及びせん断耐力推定比

ケース名	破壊形態	実験値	推定比(実験値/推定値)	
			はり式	PHC杭式
CASE-1	曲げ	86.0	---	---
CASE-2	曲げ	61.1	---	---
CASE-3	せん断	532.9	3.02	1.16
CASE-4	曲げ	329.0	---	---
CASE-5	せん断	268.2	3.15	1.56
CASE-6	曲げ	280.4	---	---

CASE-3載荷終了後における損傷状況



CASE-5載荷終了後における損傷状況

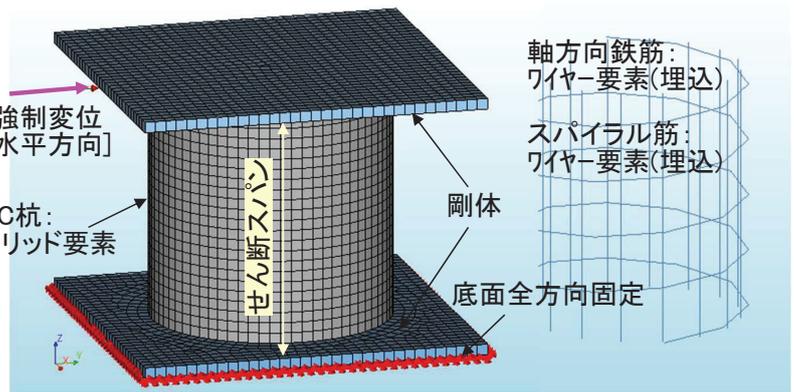


30

# 解析による検証(RC杭):パラメトリックスタディ

実験の再現解析により、一定の妥当性が確認されたFEM解析モデルを用いて、パラメトリックスタディを実施

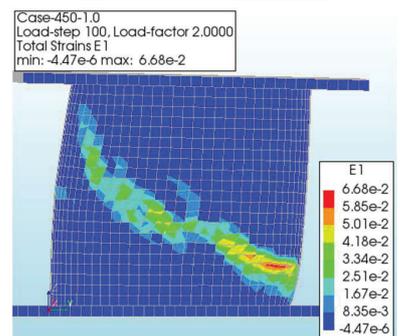
- 各パラメータがせん断耐力に及ぼす影響の確認
- 各せん断耐力評価式の適用性検証



## 検証対象パラメータ

- ①杭径 ⇒ 300, 450, 600 (mm)
- ②せん断スパン比 ⇒ 0.5, 1.0, 1.5, 2.5
- ③コンクリート強度 ⇒ 27, 35, 45, 50 (N/mm<sup>2</sup>)
- ④軸方向鉄筋比 ⇒ 2.7, 4.0, 5.4 (%)
- ⑤スパイラル鉄筋量 ⇒ 無し, Φ4, Φ6, Φ9, Φ12 (mm)  
 ※鉄筋ピッチは100mm固定
- ⑥スパイラル鉄筋材料 ⇒ SWM-B, SR235, SD295, SD345
- ⑦軸力 ⇒ 0, 200, 400, 600 (kN)

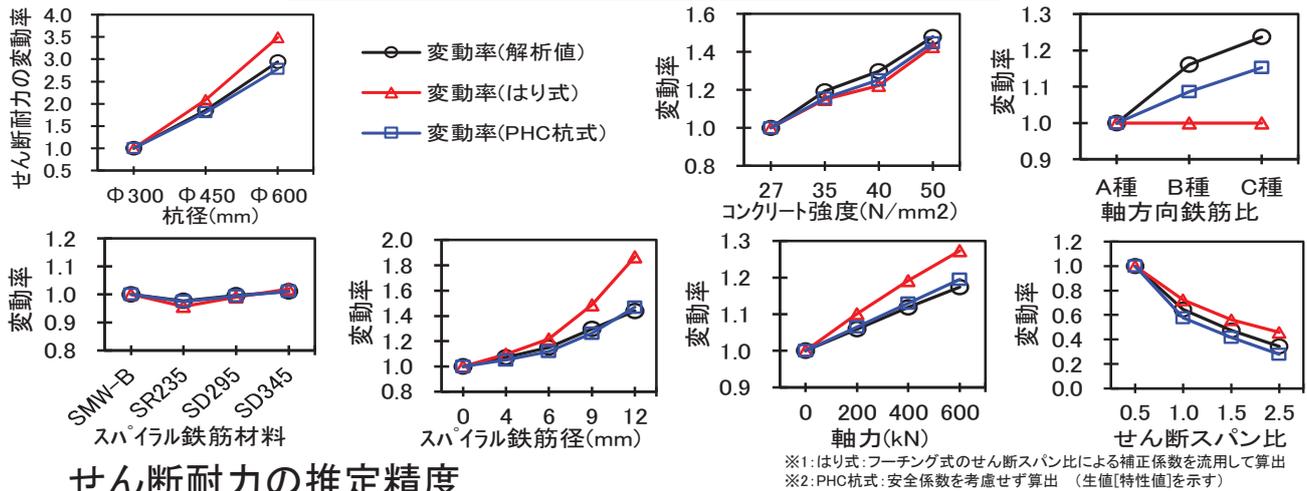
## 解析結果の一例



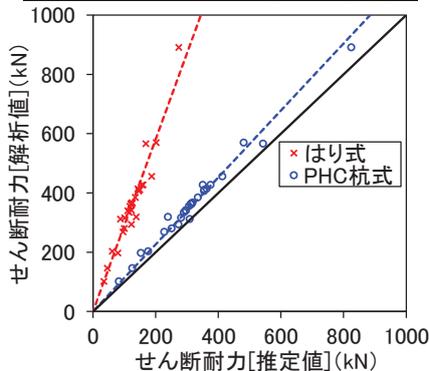
※杭径450mm, せん断スパン比1.0 (③~⑦)における基準ケース

31

## 各パラメータに対するせん断耐力の変動率



## せん断耐力の推定精度

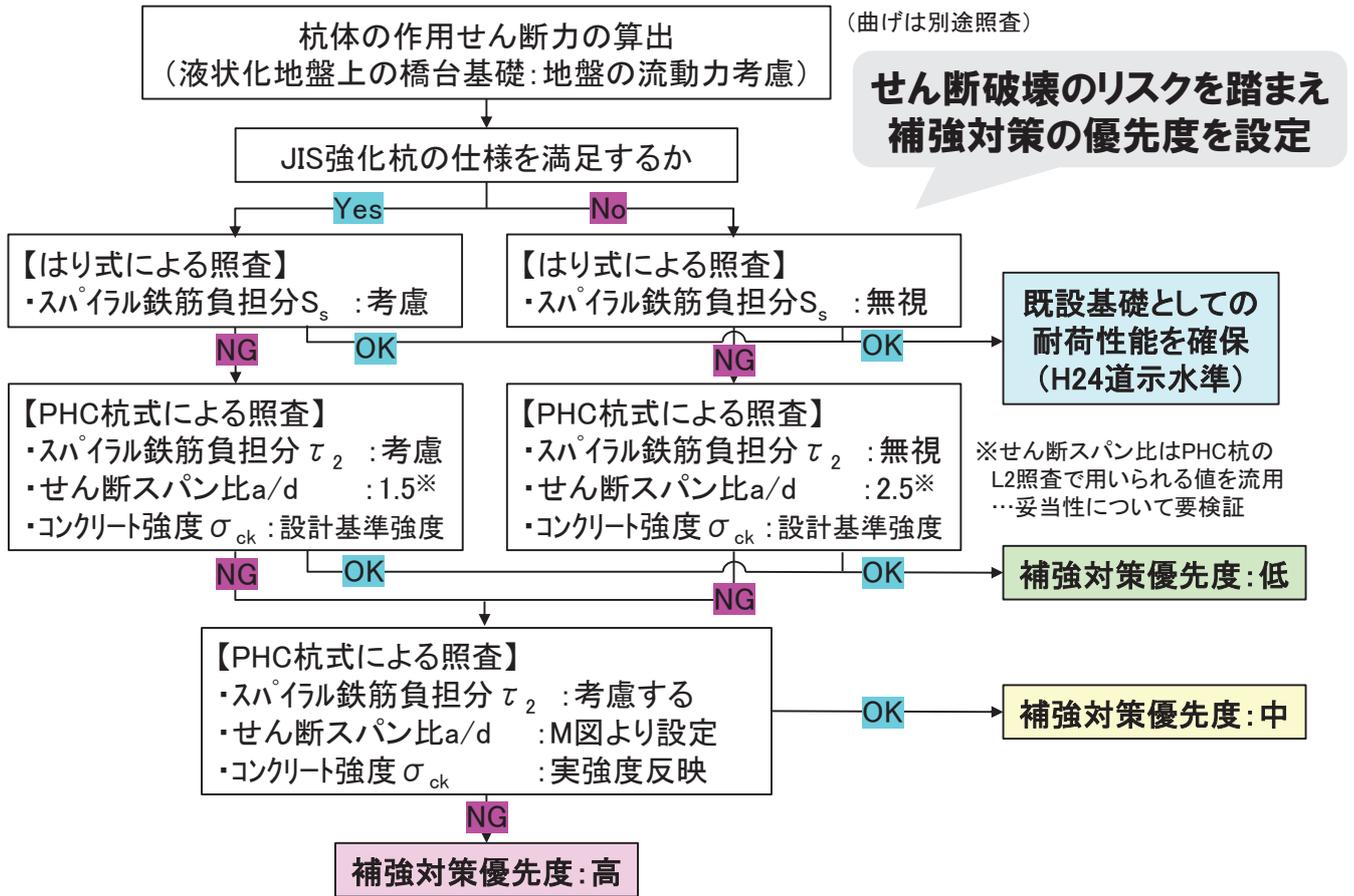


➤各パラメータに対するせん断耐力の変動率  
 杭径, せん断スパン比, 軸方向鉄筋比, スパイラル鉄筋径、軸力の影響に対して, **PHC杭式**による推定値の方が解析値と近い変動率

➤せん断耐力の推定比(全ケースの平均値)  
 はり式による推定値/解析値 = **2.91**  
 PHC杭式による推定値/解析値 = **1.15**

## 本日の内容

1. 背景・目的
2. 液状化地盤にある橋台基礎の評価(作用)
3. 古い既製杭の評価(抵抗)
4. 道路橋基礎の補強優先度の考え方



## 謝辞

液状化地盤にある橋台基礎の評価の元になった研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人:JST)の一環として実施したものです。また、東京工業大学高橋章浩教授、ならびに、(一社)鋼管杭・鋼矢板技術協会との共同研究として実施したものです。

古い既製杭の評価の元になった研究は、(株)高速道路総合技術研究所、首都高速道路(株)との共同研究として実施したものです。

ここに記して謝意を表します。

**ご清聴ありがとうございました！**

## <液状化地盤上にある橋台基礎の評価(作用)>

- 1) 土木研究所、東京工業大学、鋼管杭・鋼矢板技術協会：橋梁基礎の液状化に対する耐震性評価手法と耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書、第506号、2019.3

## <古い既製杭の評価(抵抗)>

- 2) 河口大輔、澤田守、大住道生：PC模型杭載荷試験におけるせん断耐力の解析的検討、土木学会第75回年次学術講演会講演概要集、2020.8
- 3) 有馬俊、江口康平、大住道生：PC杭に対するPHC杭のせん断耐力算定式の適用性の検討、土木学会第76回年次学術講演会講演概要集、2021.8
- 4) 藤岡健祐、江口康平、大住道生：既製鉄筋コンクリート杭のせん断耐力評価式に関する一考察～載荷実験およびFEM解析によるPHC杭式の適用性の検証～、土木技術資料、第64巻、第3号、pp.8-11、2022.3