

# 道路橋基礎における 地震時被害等への対応

構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)

上席研究員 七澤 利明

# 本日の講演内容

- I. 道路橋基礎の不具合と要因
- II. 道路橋基礎の地震時被害への対応
  - ・近年の大地震における基礎の被災事例
  - ・基礎の地震時被害を防ぐためのCAESARの取組み
- III. 今後の取組みの方向性

# I. 道路橋基礎の不具合と要因

## II. 道路橋基礎の地震時被害への対応

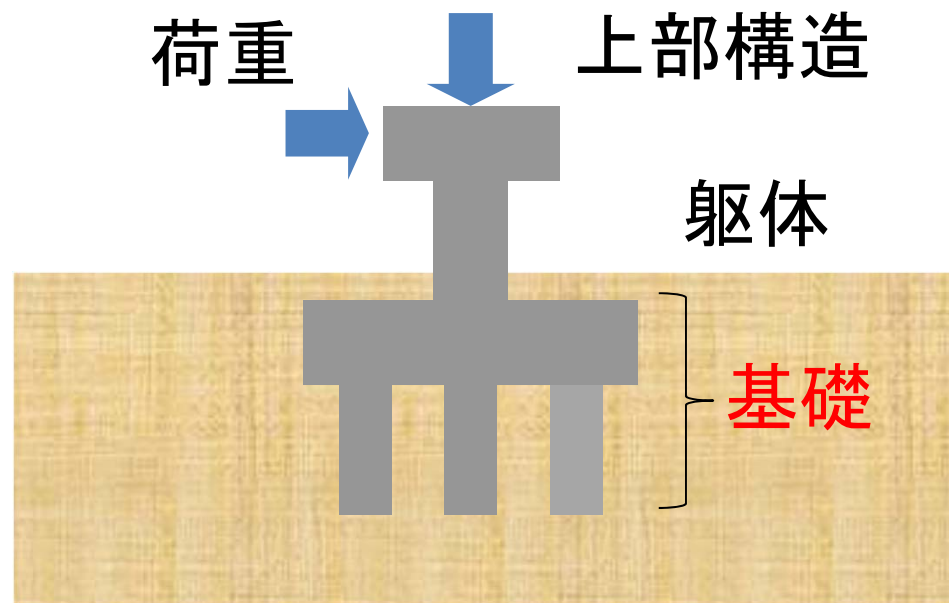
- ・近年の大地震における基礎の被災事例
- ・基礎の地震時被害を防ぐためのCAESARの取組み

## III. 今後の取組みの方向性

## 道路橋の基礎とは...

上部構造・下部構造躯体(橋脚/橋台)からの荷重を支え、支持地盤に伝達

⇒所要の強度, 剛性, 安定性が求められる



## 強度の不足

既製Co杭せん断破壊(下水処理施設)  
(1995年兵庫県南部地震)



## 安定性の不足

パイルベント橋の倒壊(昭和大橋)  
(1964年新潟地震)



# 基礎の特徴と留意点

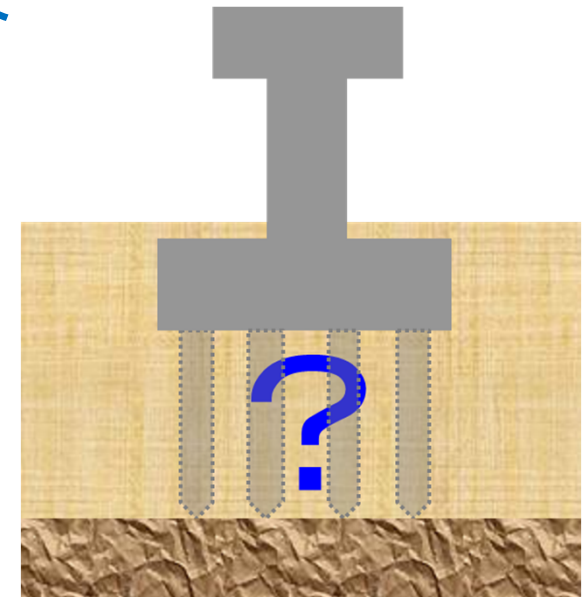
上部構造等と比較して、大きく異なる点として、

## 1. 自然の一部である地盤とともに機能

- 1-① 地盤の安定が機能に大きく影響（斜面，軟弱層，液状化）  
↑設置位置が悪ければ，地盤変状に伴い機能不全に
- 1-② 調査による地盤の性質把握が不可欠  
↑調査不足が，性能の不足に直結

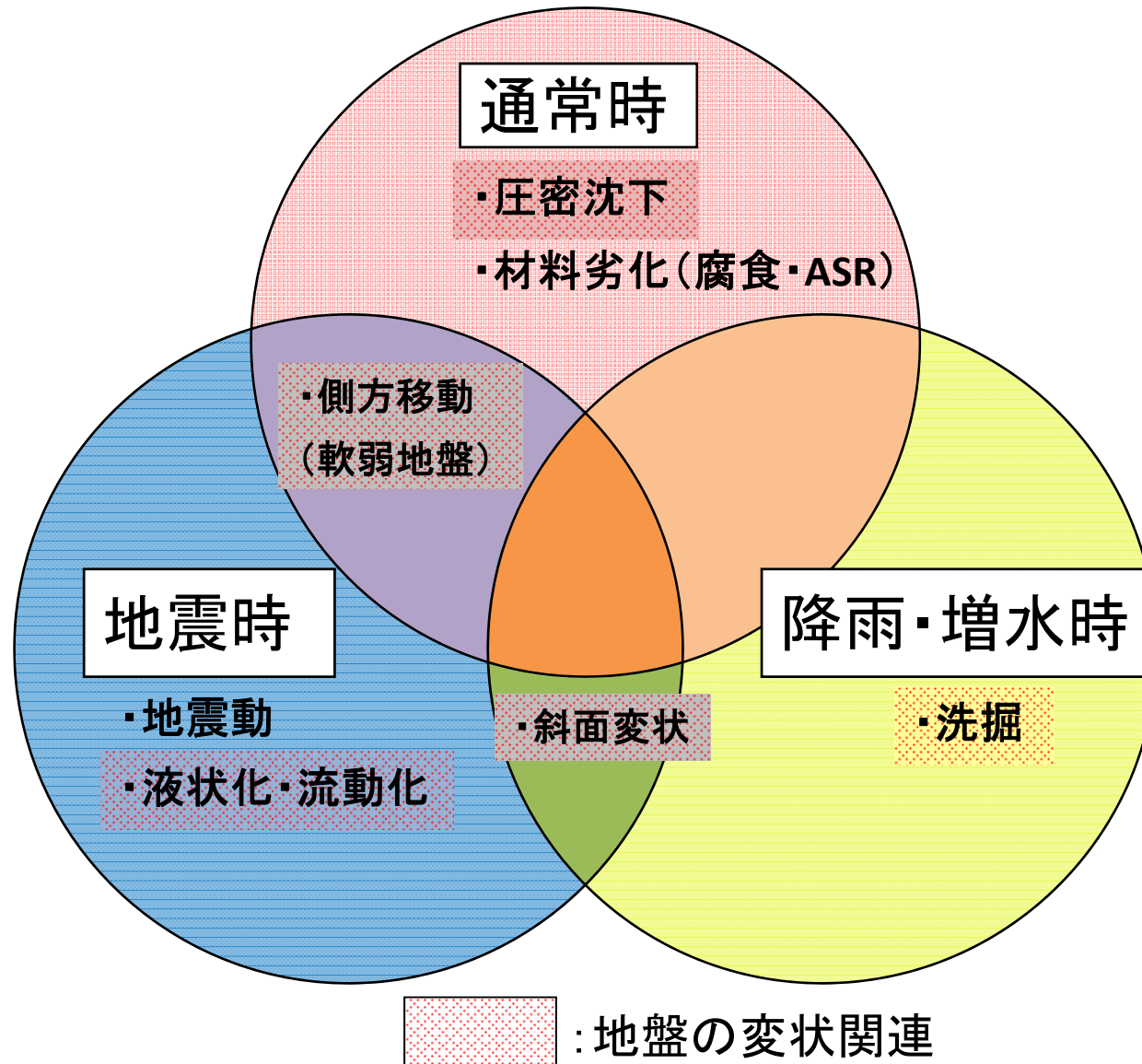
## 2. 地中に存在

- 2-① 施工時の品質管理が困難  
↑プロセス管理，記録などによる  
補完が必要
- 2-② 供用中の状態把握が困難  
↑安全余裕度を高めるなどの配慮が必要



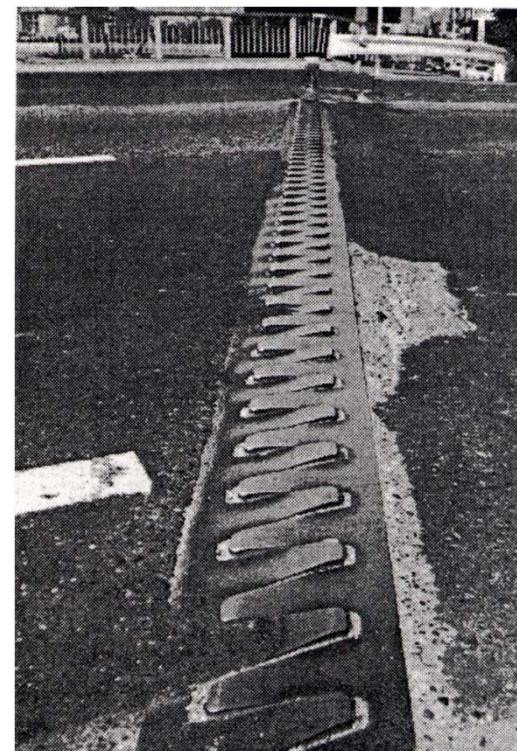
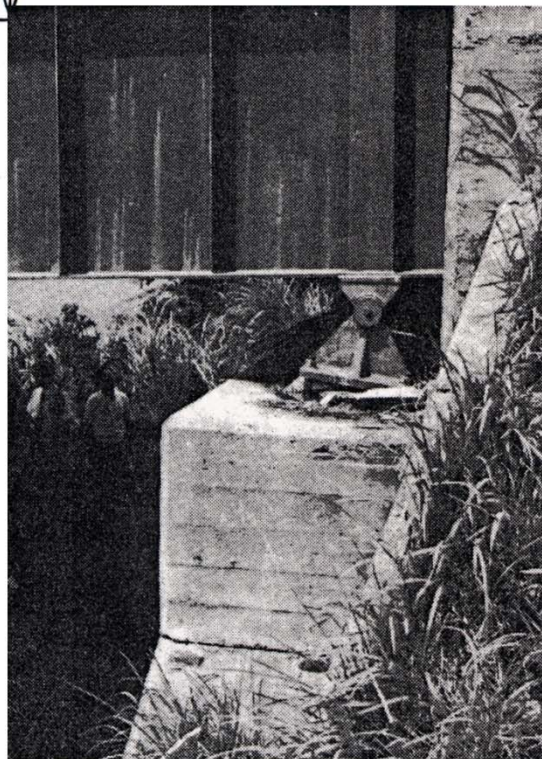
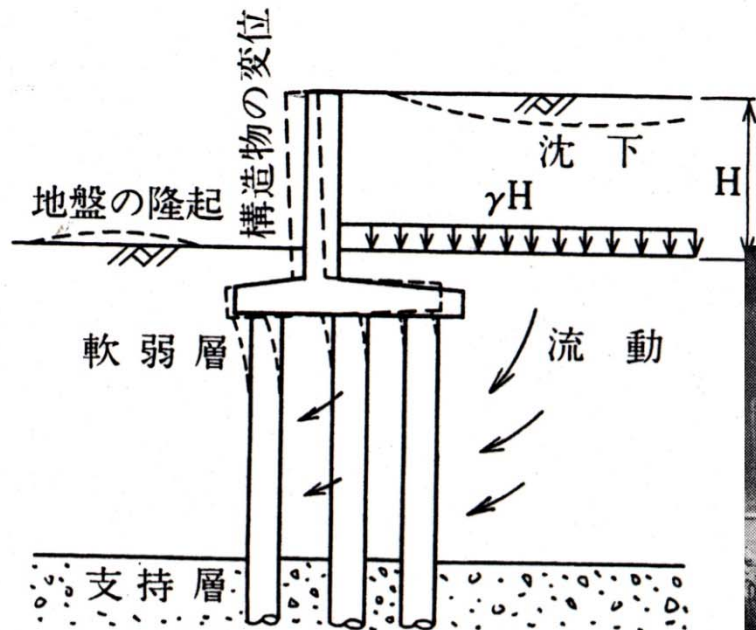
# 基礎の不具合の主な要因

- 地盤変状が基礎の安定に大きく影響





## 供用中の不具合(側方移動)

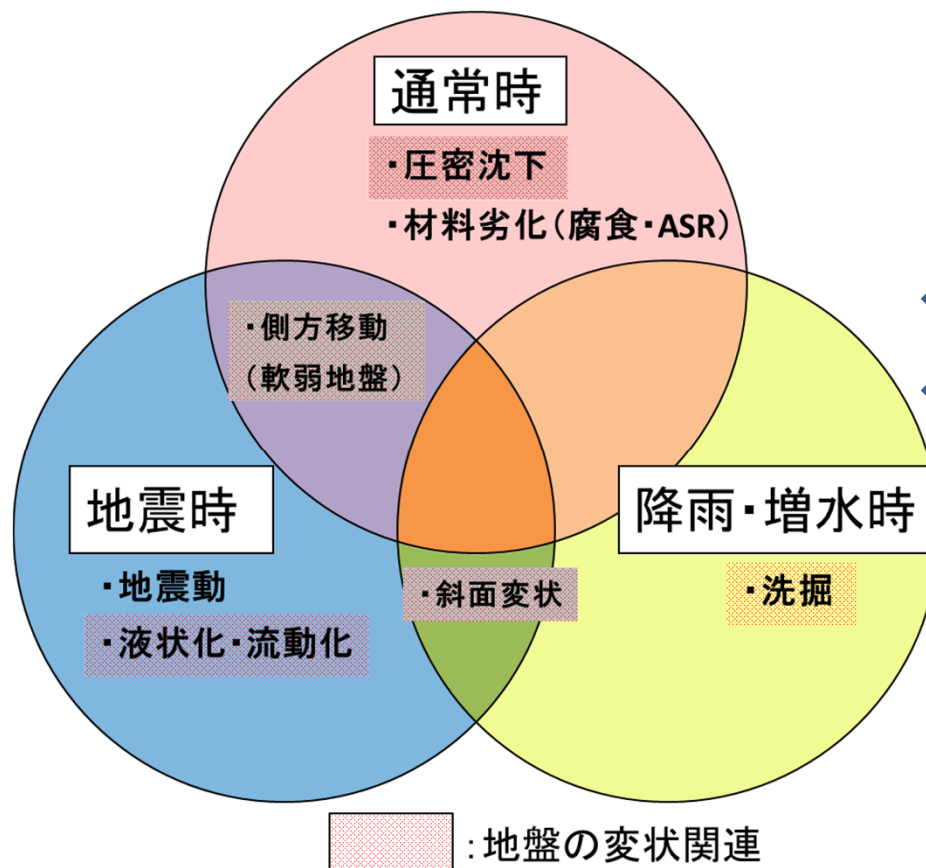




# 基礎の不具合に影響する調査・設計・施工上の問題

- 地盤変状などの不具合要因に調査・設計・施工上の問題が絡んで不具合が発生

## 基礎の不具合の主な要因



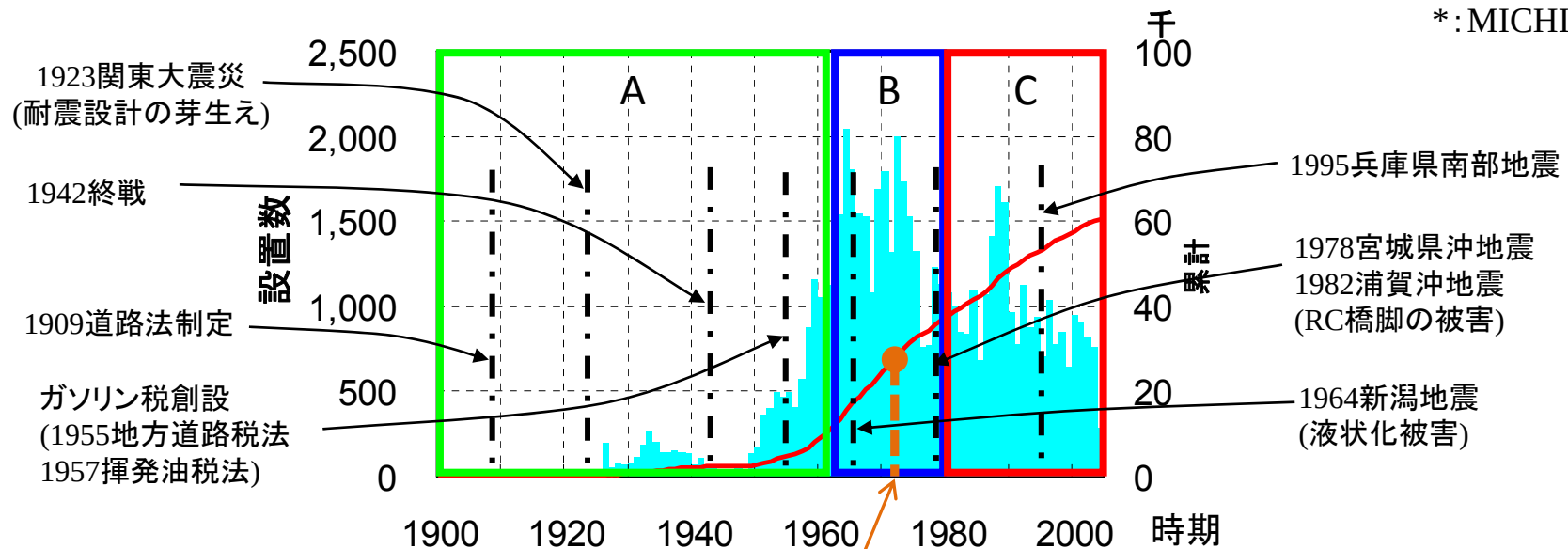
## 調査・設計・施工上の問題

- **液状化設計の未実施**
  - ・基準の未整備 (S46指針以前)
  - ・調査の不足 (基礎位置での未実施など)
- **支持層への未到達**
  - ・調査の不足 (支持層傾斜の把握不足)
  - ・施工管理の不備
  - ・施工能力の不足 (古い年代の基礎)
- **構造上のぜい弱性**
  - ・基準の未整備・不足
  - ・設計・施工ミス

○...

# 道路橋基礎の数量\*と主な基準の変遷

\*:MICHIデータ



## A: 基準のない時代(~1964)

- 1923(T12) : 関東大震災によりRC構造に脚光
- 1931(S 6) : 鉄筋コンクリート標準示方書

## B: 下部構造指針の時代(1964~1980)

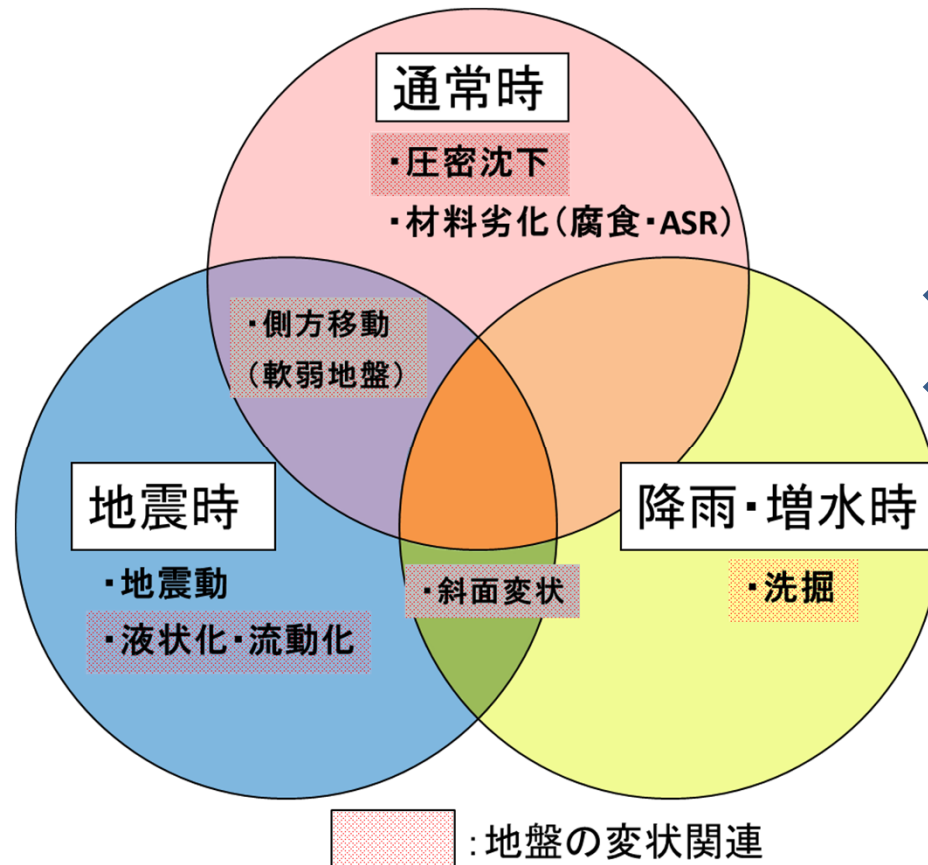
- 1964(S39) : <い基礎の設計篇(慣用法)
- 1964(S39) : 新潟地震(液状化被害)
- 1971(S46) : 道路橋耐震設計指針(液状化に対する設計法導入)
- 1976(S51) : <い基礎の設計篇(支持力推定式、変位法の導入)

## C: 道路橋示方書の時代(1980~)

- 1980(S55): 下部構造編(8篇の指針を統合、中掘り杭に関する規定、コンクリートの許容せん断応力低減)
- 1990(H 2): 下部構造編: 限界状態設計法(弾性限界)の導入、耐震設計編: RC橋脚の地震時保有水平耐力法導入
- 1995(H 7): 兵庫県南部地震
- 1996(H 8): 耐震性向上(L2地震時の照査)
- 2001(H13): 性能規定化
- 2012(H24): 維持管理性向上、新たな知見・技術の反映

# 基礎の不具合に影響する調査・設計・施工上の問題

## 基礎の不具合の主な要因



## 調査・設計・施工上の問題

### ○液状化設計の未実施

- ・基準の未整備(S46指針以前)
- ・調査の不足(基礎位置での未実施など)

### ○支持層への未到達

- ・調査の不足(支持層傾斜の把握不足)
- ・施工管理の不備
- ・施工能力の不足(古い年代の基礎)

### ○構造上のぜい弱性

- ・基準の未整備・不足
- ・設計・施工ミス

○...

- ・ では, このような問題にどのように対処するか?  
⇒以降では, 地震時被害への対応について説明。

## I. 道路橋基礎の不具合と要因

## II. 道路橋基礎の地震時被害への対応

- ・近年の大地震における基礎の被災事例
- ・基礎の地震時被害を防ぐためのCAESARの取組み

## III. 今後の取組みの方向性

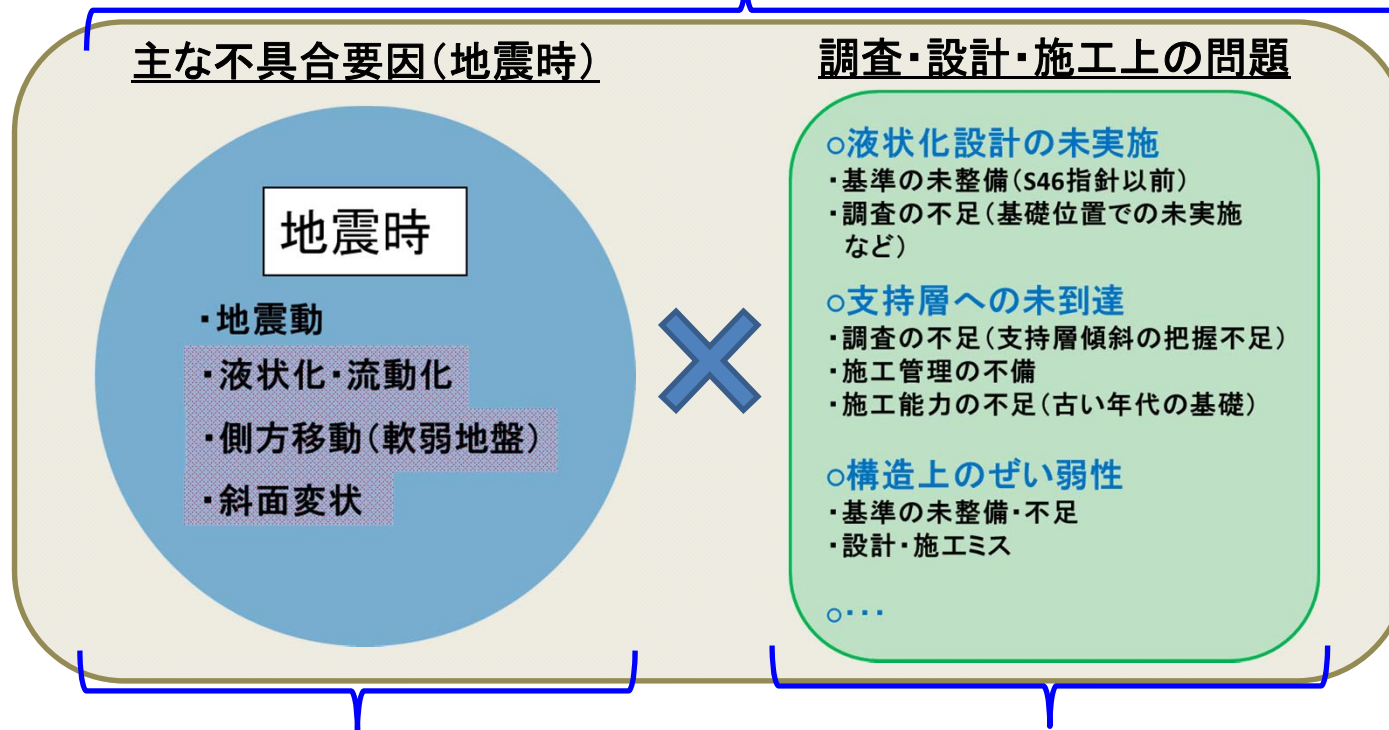


# 基礎の地震時被害を防ぐためのCAESARの取組み

## 取組み①: 既設基礎の耐震性評価の合理化

→膨大な数の既設基礎の耐震補強優先度を明確化

## 取組み②: 既設基礎の耐震補強技術の開発



## 取組み③: 地盤変状への対応

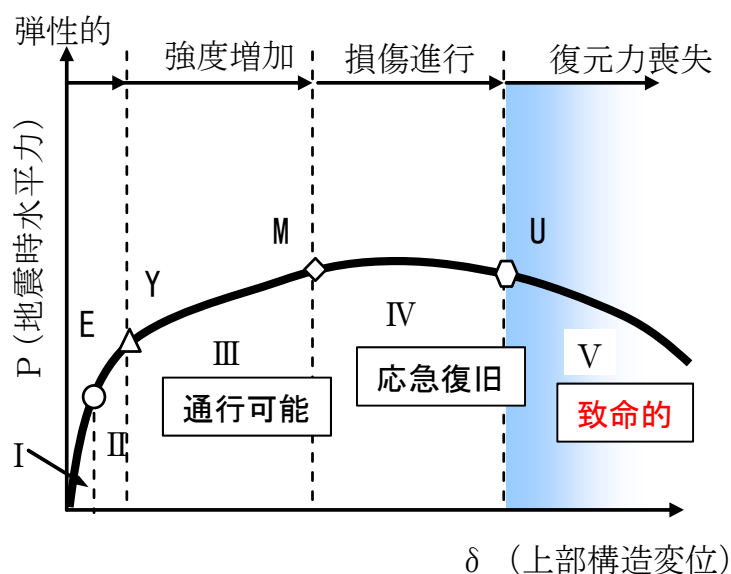
- ・液状化・流動化
- ・側方移動(軟弱地盤)
- ・斜面変状

## 取組み④: 調査・設計・施工上の問題への対応

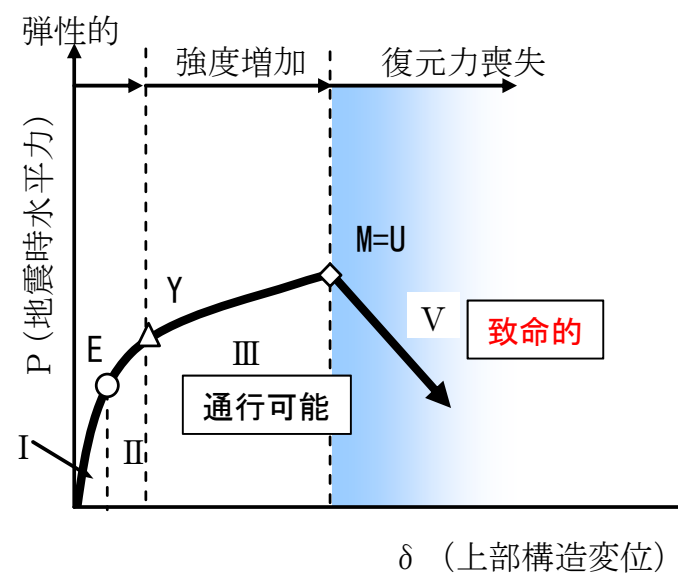
# 取組み①: 既設基礎の耐震性評価の合理化 ～耐震性能の簡易評価手法の開発～

- 地震時の基礎の損傷度を安全性・供用性・修復性の観点から定義 (I ～ V)。
- 被災事例分析, 既設構造の解析・実験および液状化推定手法の検討結果に基づき, 基礎の耐震性簡易判定フローを作成。  
⇒ 既設基礎耐震補強の優先順位付けに活用。

## 地震時の基礎の耐力～水平変位関係と損傷度 (I ～ V)



(a) 変形能が大きい場合



(b) 変形能が乏しい場合



# 被災事例からみた注意すべき基礎

## ①落橋事例がある基礎

- ・パイルベント橋脚・基礎
- ・液状化・流動化地盤中にあり、支持層に達していない基礎

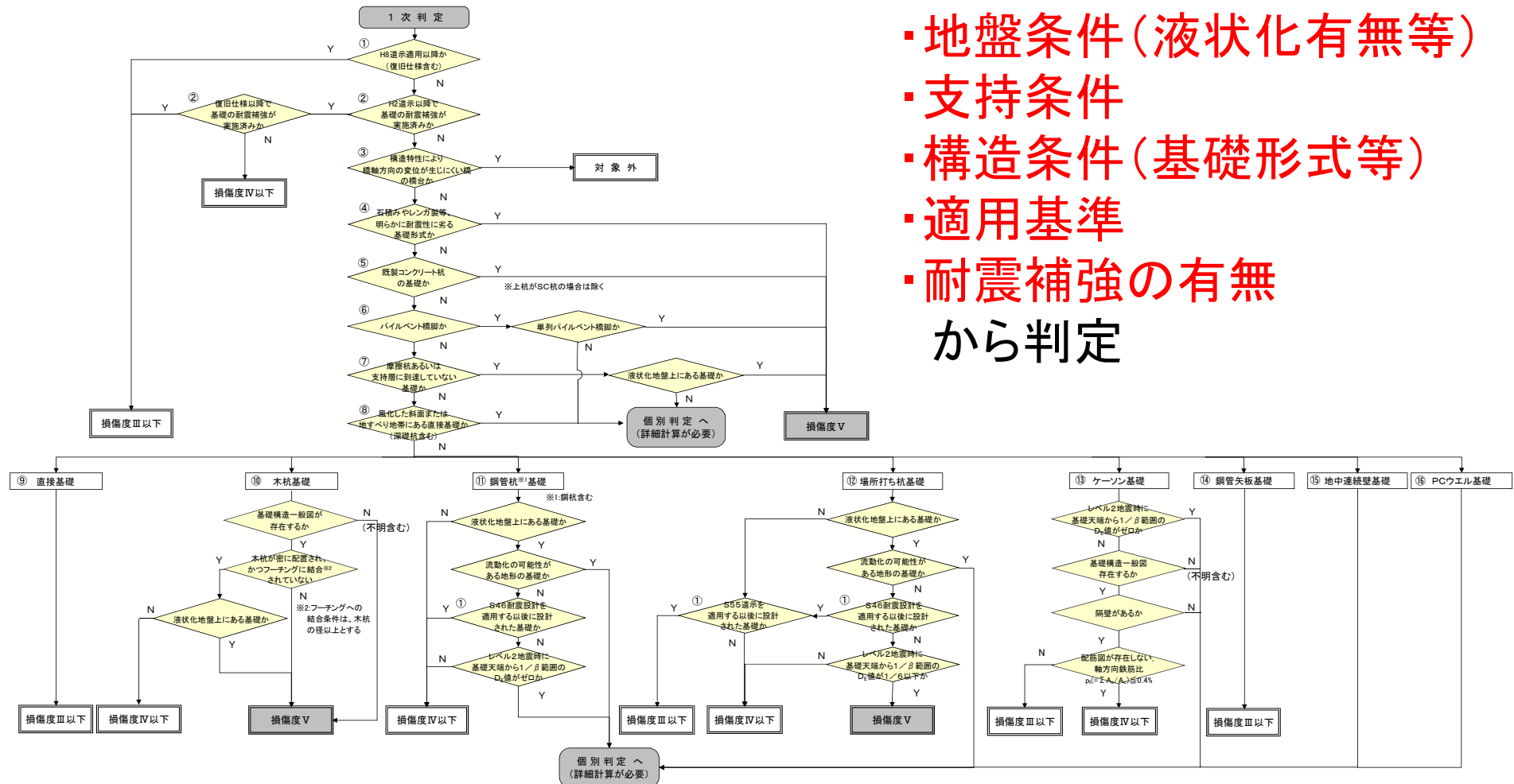
## ②通行止めなど致命的な損傷を生じた事例がある基礎

- ・軟弱地盤中の古い既製コンクリート杭基礎
- ・その他（頂版と本体の接合が不十分なケーソン基礎）



# 既設道路橋基礎の耐震性簡易判定フロー

- ・地盤条件(液状化有無等)
- ・支持条件
- ・構造条件(基礎形式等)
- ・適用基準
- ・耐震補強の有無から判定



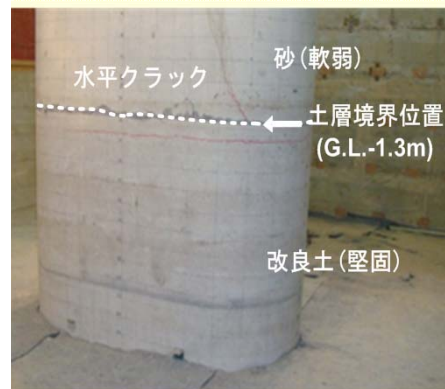
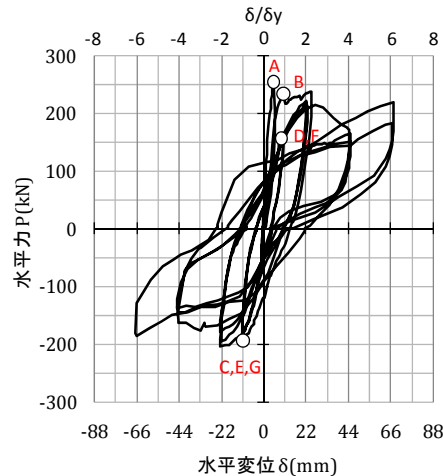
↑ 詳細については、[土研資料第4168号「既設道路橋基礎の耐震性能簡易評価手法に関する研究」](#)(平成22年5月)をご覧ください。

# 取組み①: 既設基礎の耐震性評価の合理化 ～耐震性能が不明な古い基礎の評価～

- 古いケーソン基礎, 木杭基礎など, 大地震時の耐震性が不明な基礎の実験・解析等を行い, 耐震性を評価。

## 古いケーソン基礎の耐震性 (H8道示以前は軸方向鉄筋が少)

### ・地盤中模型の水平載荷実験・再現解析

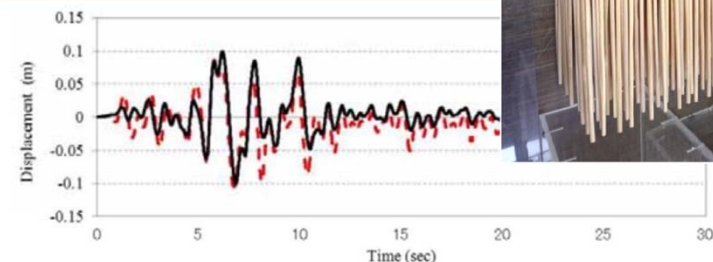


試験後の損傷状況

⇒ひび割れ断面で変位するものの、地震後は変位が戻るため、鉛直荷重を保持。  
(せん断破壊先行の場合は要検討)

## 木杭基礎の耐震性

- 過去の設計事例の  
収集・分析
- 模型実験・再現解析



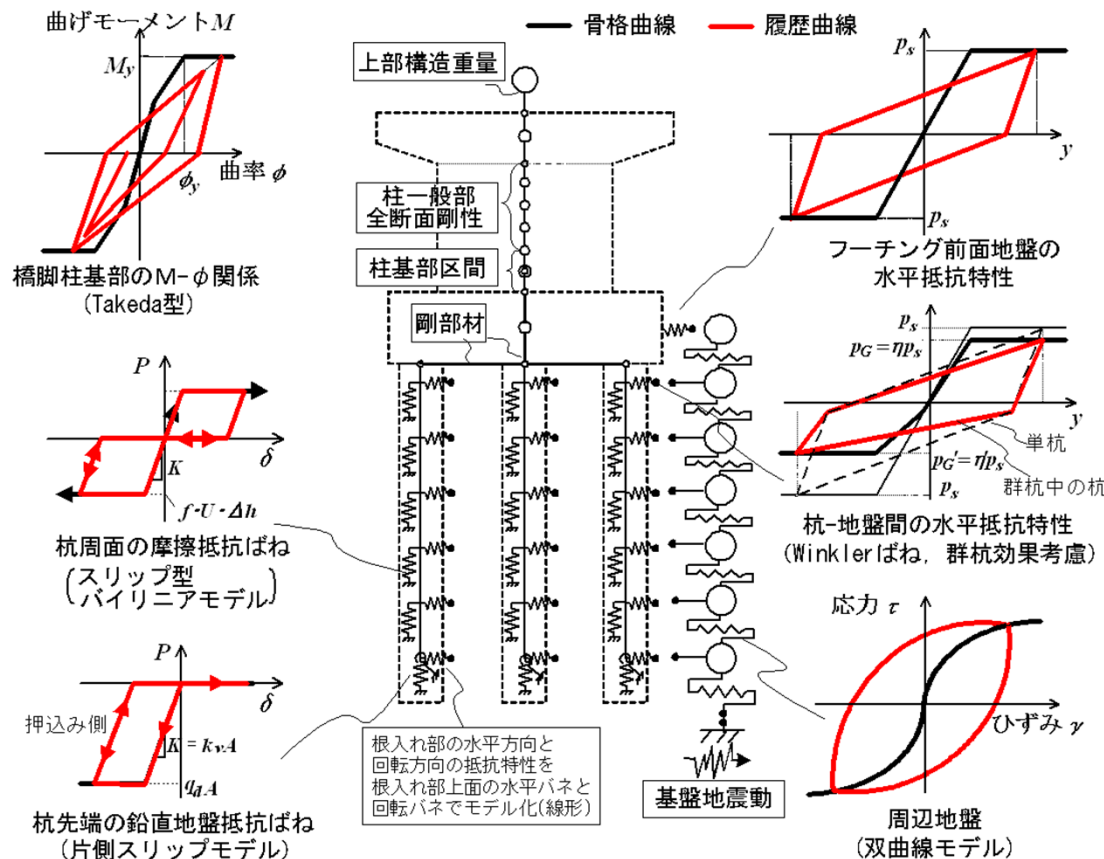
実験結果と解析結果の比較

⇒木杭基礎の構造特性を反映した動的FEM解析手法を開発。地震時の性能評価が可能に。

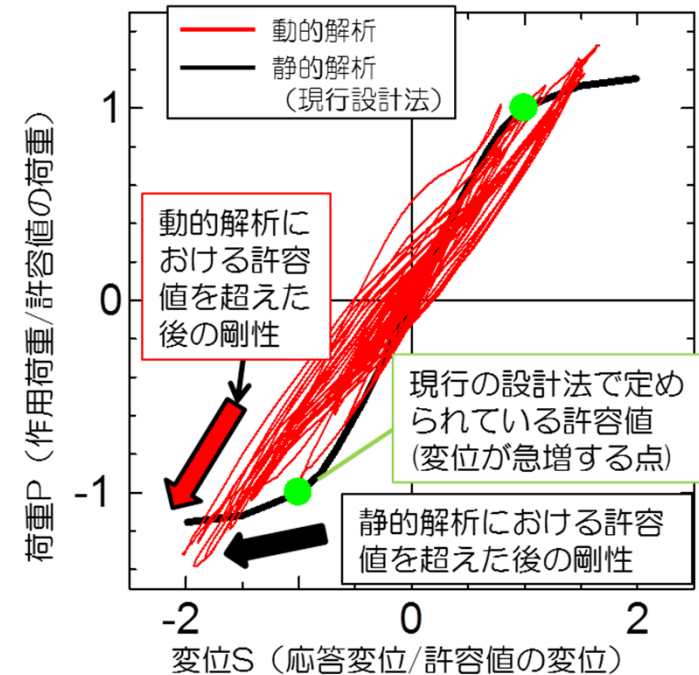
# 取組み①: 既設基礎の耐震性評価の合理化 ～動的解析による耐震性能評価手法の開発～

- 地盤の動的挙動・相互作用を評価できる解析モデルを提案。  
⇒ 従来の手法よりも合理的な評価が可能に。 (検討中)

## 動的解析モデル



## 既製コンクリート杭基礎の解析



- 静的解析での許容値を超えても剛性低下せず。
- ⇒ より大きな許容値も可能に。

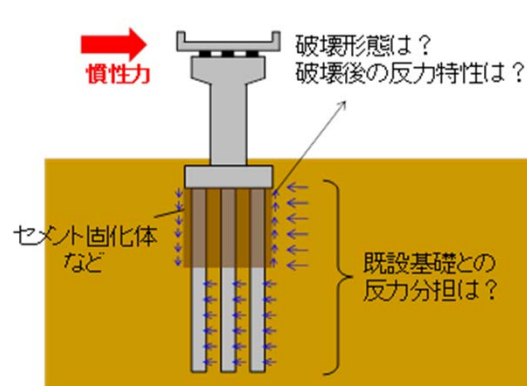


# 取組み②: 既設基礎の耐震補強技術の開発 ～補強工法の選定・性能評価手法～

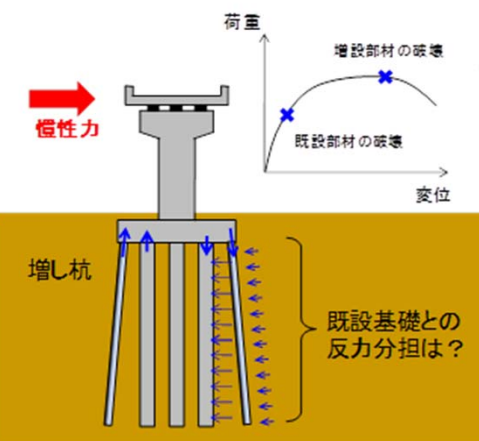
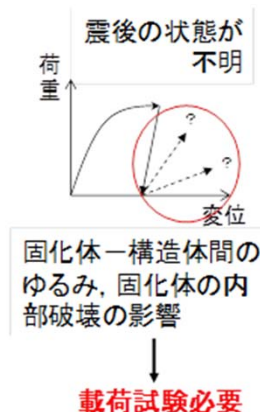
- 補強工法を工学的観点から分類のうえ、各工法で求められる検証項目や適用性等を整理。(検討中)

## 補強工法の分類と検証項目

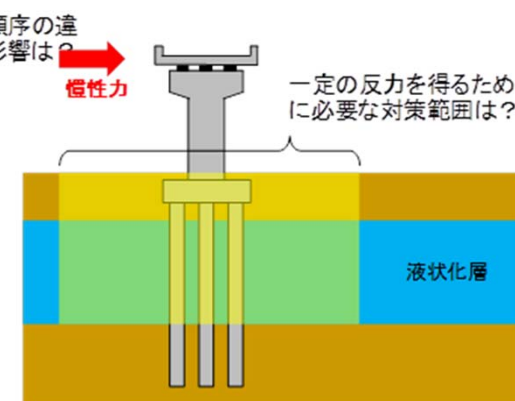
| 大分類         | 中分類           | 小分類             |
|-------------|---------------|-----------------|
| 構造系<br>補強工法 | (a) 構造部材の追加   | 杭の増設<br>アンカーの増設 |
|             | (b) 部材補強      | 拘束圧入            |
|             | (c) 仮想ケーソンの構築 | 矢板              |
|             |               | 矢板+固化           |
| 地盤系<br>補強工法 | (d) 地盤強化      | 固化              |
|             | (e) 液状化対策     | 締固め             |
|             |               | せん断変形抑制         |
|             |               | 排水              |
|             |               | 注入固化            |



仮想ケーソンの構築



構造部材の追加



液状化の防止・抑制

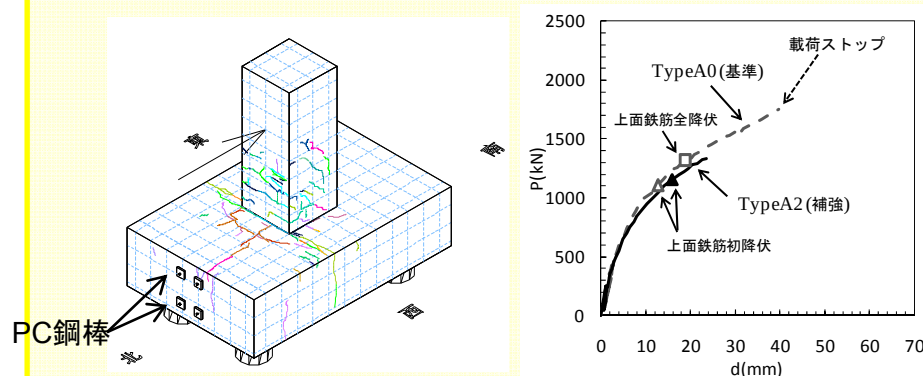


## 取組み②: 既設基礎の耐震補強技術の開発 ～合理的な補強技術の開発・評価～

- 従来の補強工法では適用できない条件での、あるいは従来より合理的・経済的な補強技術の開発・評価を実施。

### フーチングの補強技術

- フーチングの寸法拡大が困難な条件での補強技術(繊維シート接着, 水平プレストレス導入, 鉛直プレストレス導入)の補強効果を載荷実験で検証。

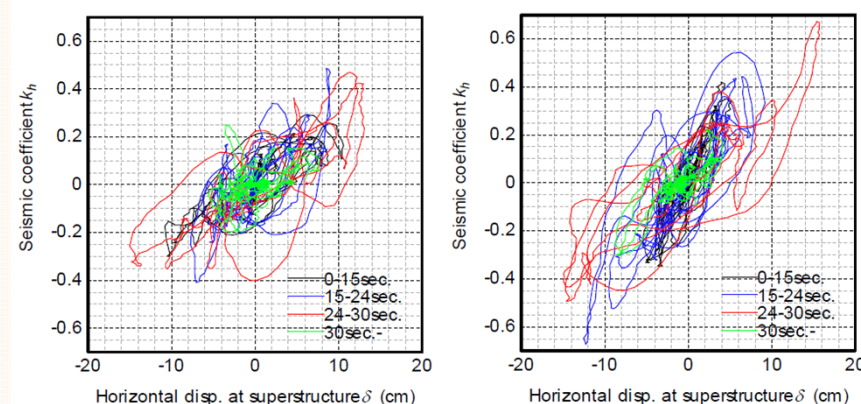


水平プレストレスを導入した供試体の載荷試験( $P \sim \delta$ 関係)

⇒ 耐力や変形能の向上を確認。また, 施工時の留意点を整理。

### 液状化地盤対策(検討中)

- 杭基礎模型の動的遠心載荷実験により, 液状化地盤対策(締固め)の効果を検証。



(a) 液状化対策なし

(b) 液状化対策あり(全域)

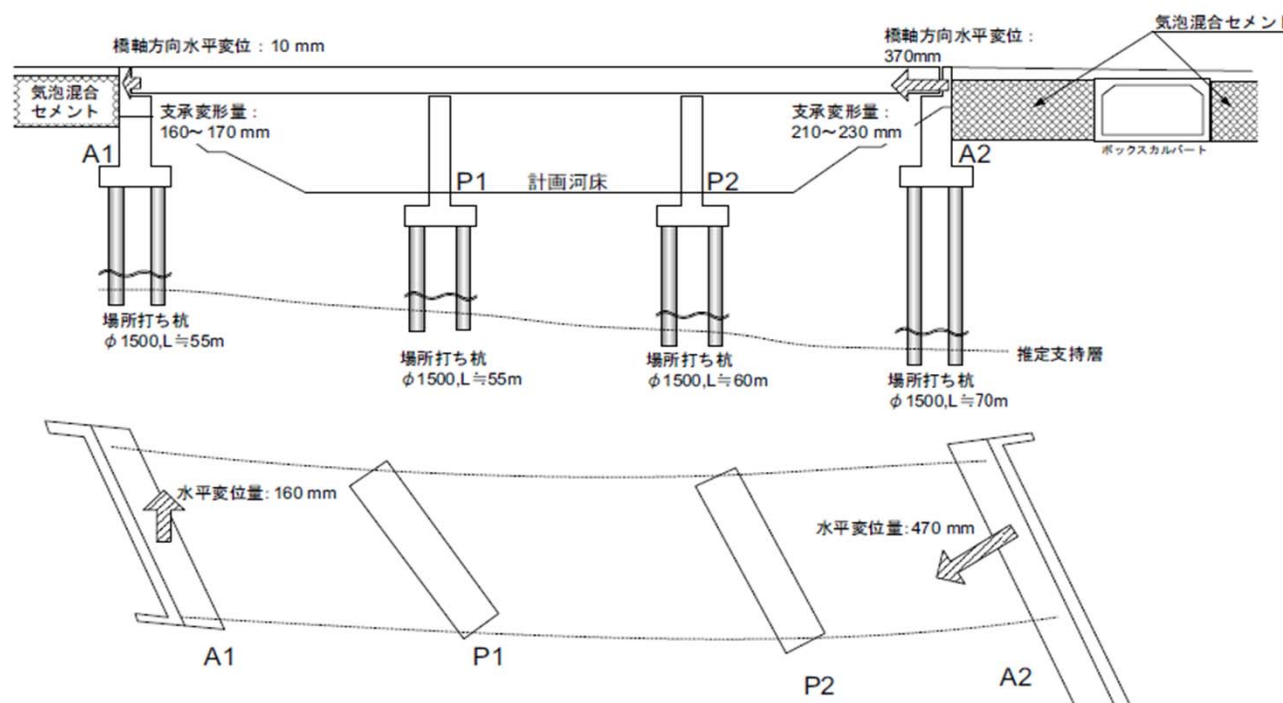
水平震度 $k_h \sim$ 水平変位 $\delta$ 関係の比較例

⇒ 地盤条件・対策範囲によっては, 対策前よりも大きな加速度や地盤反力を受ける可能性あり。

## 取組み③：地盤変状への対応 ～橋台の側方移動対策ガイドラインの策定～

- 軟弱地盤上の側方移動事例や対策事例を収集・分析し、側方移動判定や対策の考え方等をガイドラインにとりまとめ。

ガイドライン記載例：地震時に橋台の移動が確認された事例



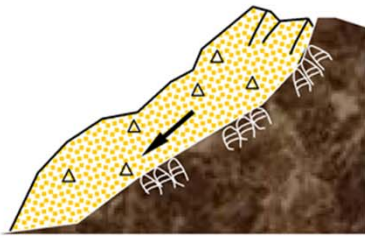
土木研究所資料第4174号「橋台の側方移動対策ガイドライン策定に関する検討(その2)」(平成22年6月)より

⇒設計地盤面の取り扱い，背面に軽量材料を用いた場合の留意点を整理。

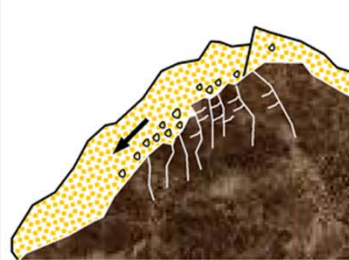
## 取組み③：地盤変状への対応 ～斜面変状への対応～

- 傾斜地等の下部構造が地盤変状に伴い移動する事象に対し、①地震時に不安定となる地盤条件、②地盤変状が橋の安全性に及ぼす影響を明確化し、対応策を提示。（検討中）

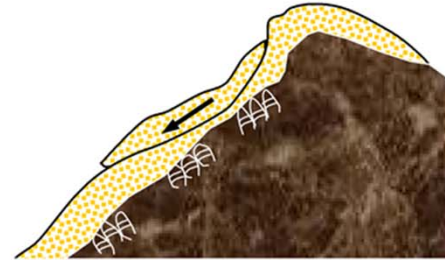
・地震による斜面地盤変状事例を分析し、変状パターンを特定。（地質T）



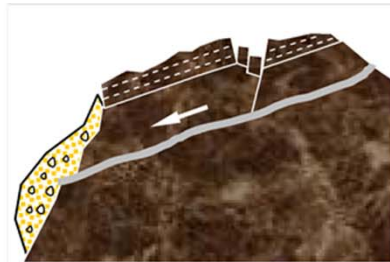
崩壊土のすべり・崩壊



風化層のすべり・崩壊



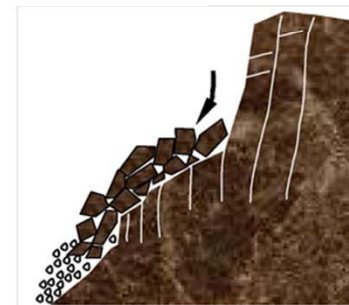
未固結層のすべり・崩壊



流れ盤の層理面・節理面・  
断層面・薄い脆弱層による  
すべり・崩壊



下部の脆弱層の変形による  
岩盤の変形・崩壊



柱状節理面からの  
変状・崩壊

## 取組み④：調査・設計・施工上の問題への対応 ～技術基準類の改定・策定～

- 調査・設計・施工上の問題に対応するため、基準類の規定・解説等の記述を見直し・充実。

### ○道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編（平成24年3月改定）

～地震時の不具合対応など，調査から設計・施工まで全般にわたり改定

### ○斜面上の深礎基礎設計施工便覧（平成24年4月策定）

～地震時の斜面変状等に対応するための調査・設計の考え方を提示





# H24道路橋示方書の改定例

## 斜面上の基礎の変状への対応



橋台周辺の土塊の沈下と橋台等の傾斜



斜面上の基礎における前面地盤の流出

- ⇒ ・山地部で**地盤変状が生じる地形地質に対する調査**に関する記載の充実（2章）
- ・斜面上の基礎は，十分な調査の結果をふまえて**安定した地盤に設置，根入れ**させることを基本とするとともに，その他対策や配慮に関する記載を充実（9. 3, 9. 4）



# 既設基礎の耐震性に関する研究成果の公表

| 文献名                                                                           | 書籍名                                                            | 巻号・ページ                    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 既設道路橋基礎の耐震性簡易判定フローの開発                                                         | 第28回日本道路会議論文集                                                  | 40051                     |
| 既設ケーソン基礎の耐震性能評価(その1)                                                          | 日本地震工学会大会2009                                                  | pp.352-353                |
| 既設ケーソン基礎の耐震性能評価(その2)                                                          | 日本地震工学会大会2009                                                  | pp.354-355                |
| 既設ケーソン基礎の耐震性能評価(その3)                                                          | 日本地震工学会大会2009                                                  | pp.356-357                |
| 大型模型載荷実験による既設ケーソン基礎の耐震性能評価                                                    | 第13回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集                      | pp.267-274                |
| 地盤の層構成の違いが群杭基礎の地震時挙動に与える影響に着目した加振実験                                           | 第13回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集                      | pp.325-332                |
| 場所打ち杭を用いた道路橋基礎への動的照査法の適用に関する基礎的検討                                             | 第13回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集                      | pp.315-324                |
| 既設ケーソン基礎の耐荷力に関する模型実験                                                          | 土木技術資料                                                         | 第52巻第5号,<br>pp.34-37      |
| 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4151号                    |
| 基礎の耐震補強法の性能検証に関する課題                                                           | 土木技術資料                                                         | 第52巻第7号,<br>pp.34-37      |
| 道路橋基礎の耐震性簡易判定法に関する研究                                                          | 土木技術資料                                                         | 第52巻第7号,<br>pp.38-41      |
| 低鉄筋既設ケーソン基礎の耐力・変形能評価におけるファイバー解析の適用性                                           | 土木学会第65回年次学術講演会概要集                                             | I-678 pp.1355-1356        |
| SEISMIC PERFORMANCE ASSESSMENT METHOD FOR EXISTING HIGHWAY BRIDGE FOUNDATIONS | PROCEEDINGS OF THE 26th U.S.-JAPAN BRIDGE ENGINEERING WORKSHOP | pp61-74                   |
| 既設木杭基礎の非破壊検査による諸元探査事例                                                         | 土木技術資料                                                         | Vol. 53, No. 12, pp.56-57 |
| RC杭を有する既設道路橋基礎の動的照査における照査項目に関する一検討                                            | 第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集                              | pp.413-418                |
| 動的解析による既設道路橋の既製コンクリート杭基礎の耐震性に関する一検討                                           | 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集                                           | I-136 pp.751-752          |
| 既設木杭基礎の遠心場における加振実験                                                            | 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集                                           | Ⅲ-037 pp.73-74            |
| 既設フーチングに対する補強効果の確認実験                                                          | 第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集                              | pp.371-376                |
| 動的解析による既製コンクリート杭を有する既設道路橋基礎の耐震性評価に関する検討                                       | 構造工学論文集                                                        | Vol.59A pp.504-515        |
| 既設道路橋基礎の耐震性                                                                   | 橋梁と基礎                                                          | Vol.47 No.8<br>pp.60-62   |

# I. 道路橋基礎の不具合と要因

## II. 道路橋基礎の地震時被害への対応

- ・近年の大地震における基礎の被災事例
- ・基礎の地震時被害を防ぐためのCAESARの取組み

## III. 今後の取組みの方向性

# 今後の取組みの方向性

## ①土研での今後の取組み

- ・既設基礎の耐震性能評価法・補強設計法の開発
  - 動的解析による耐震性能評価手法の確立
    - 地盤特性に係るモデル化の精査
    - 被災事例の再現解析等による提案モデルの検証
  - 信頼性・部分係数に基づく既設基礎評価法の開発  
など

## ②産学に求められる技術開発

- ・不明基礎の調査技術の開発
- ・合理的・経済的な補強技術の開発  
など

# ①土研での今後の取組み

## 信頼性・部分係数に基づく既設基礎評価法の開発

- 信頼性理論に基づき、既設基礎をより合理的に評価するための部分係数設計法を検討。
  - 既設橋に対する調査を実施し、性能に影響するパラメータを確定値として扱うことなどにより、新設時の設計と部分係数等を差別化して合理的に性能を評価。

### [パラメータの例]

材料強度：コア抜きした供試体の強度試験等により設定

地盤定数：載荷試験・室内試験など精度の高い調査に基づき設定

### 部分係数書式のイメージ

$$(\psi_1 \cdot \boxed{\psi_2} \cdot \psi_3 \cdot Q) \leq (\phi_1 \cdot \boxed{\phi_2} \cdot \phi_3 \cdot R)$$

Q: 荷重(応答値)

$\psi_1$ : 下記以外の要因による荷重係数

$\psi_2$ : 調査法の精度に応じた荷重係数

$\psi_3$ : 施工法の精度に応じた荷重係数

R: 耐力

$\phi_1$ : 下記以外の要因による抵抗係数

$\phi_2$ : 調査法の精度に応じた抵抗係数

$\phi_3$ : 施工法の精度に応じた抵抗係数



## ②産学に求められる技術開発 不明基礎の調査技術の開発

- 古い年代の基礎では、基礎形式が不明であることが多い。
  - 図面に推定で示している場合でも、調査に基づかないものも。
- ⇒不明基礎の種類や諸元(幅, 長さなど)を合理的に把握する技術が必要(非破壊検査技術等)。

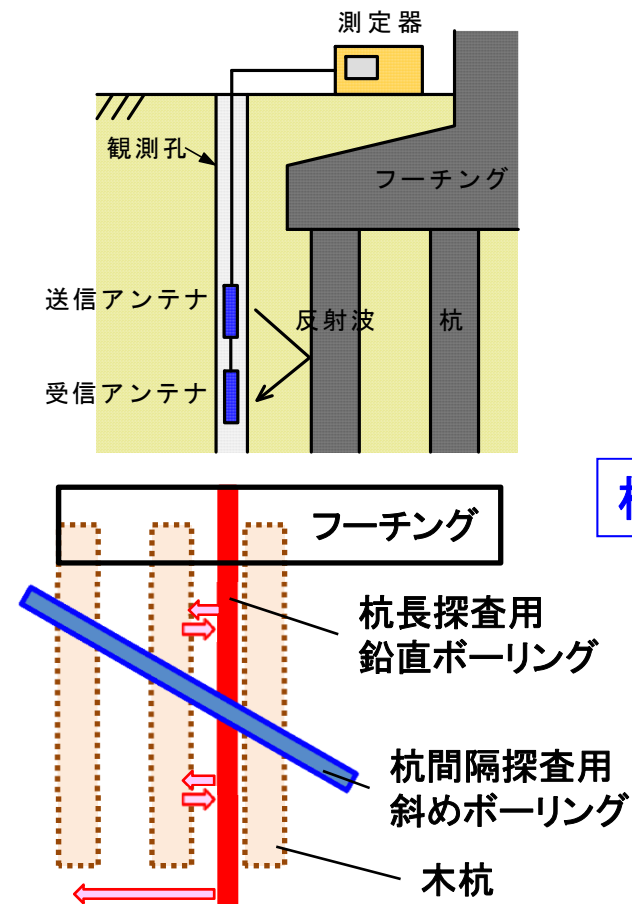


# 非破壊検査の適用性検証の例(杭基礎)

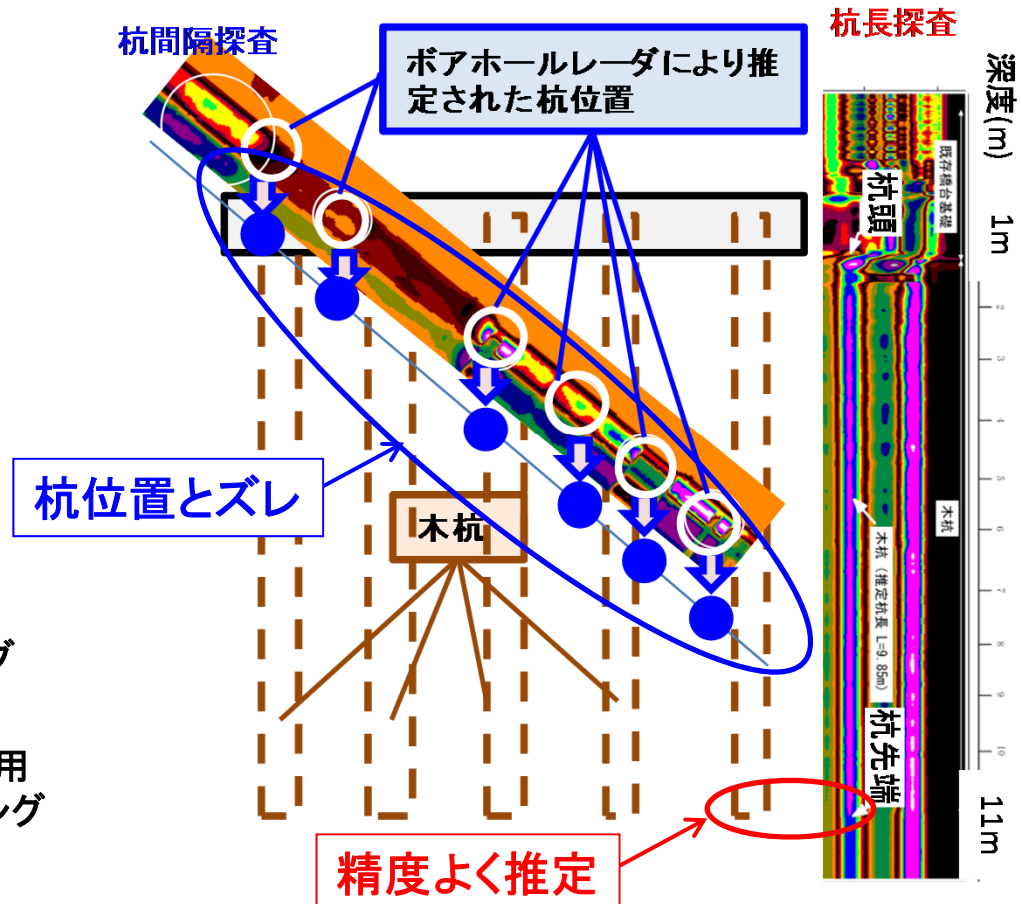
- ・既設木杭基礎に対して非破壊検査法を適用

⇒杭長の推定は可能, 杭間隔・本数の推定は困難。  
(杭間隔・本数はフーチング下まで掘削して確認)

調査方法(ボアホールレーダ)



調査結果(コンター図)



## ②産学に求められる技術開発 合理的・経済的な補強技術の開発

- 一般に基礎の補強は高価であるため，基礎の耐震補強を迅速に進める上での障害（数億円/基となる場合も）。
- ⇒ 合理的・経済的な補強技術の開発が急務。
- ⇒ 管理者や土研等による技術評価や基準化を経て普及へ。

### 一般的な補強工法の例（杭基礎）

|              | マイクロパイル以外による増杭 | マイクロパイルによる増杭 |
|--------------|----------------|--------------|
| 概要図<br>(河川内) |                |              |

より合理的・安価な補強工法は？

管理者・土研等による技術評価

# さいごに 技術開発の構図

