

多列杭を有する既設フーチングの 耐震性に関する解析的検討

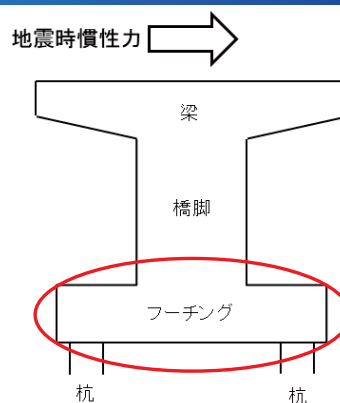
(一財)阪神高速道路技術センター 服部匡洋

目的

- 既設フーチングについて、現行の道路橋示方書(道示)による耐力評価を行うと、許容値を満足しないケースがある。
- 一方、兵庫県南部地震では、フーチングの致命的な損傷事例はなかった。

“道示による評価結果”と
“実現象”のギャップ

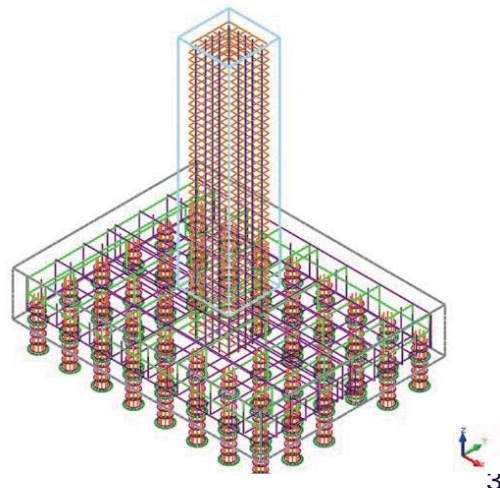
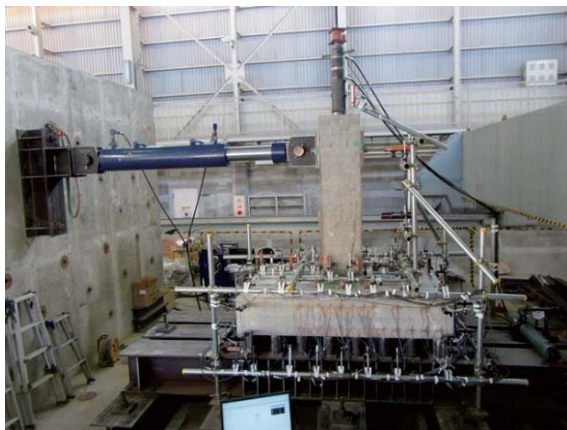
- ✓ “実現象”と“道示による評価結果”のギャップの要因を明らかにし、真の既設フーチングの耐力評価を試みる。
- ✓ 既設フーチングの補強の要否、優先順位などを判定するための耐震性評価手法を構築する。



本研究の内容

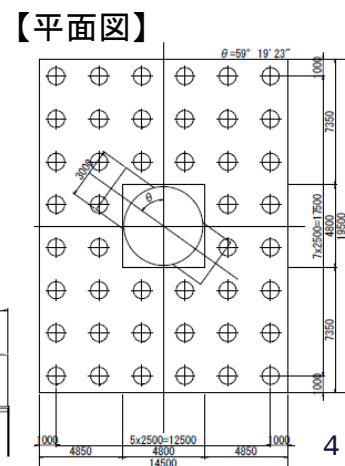
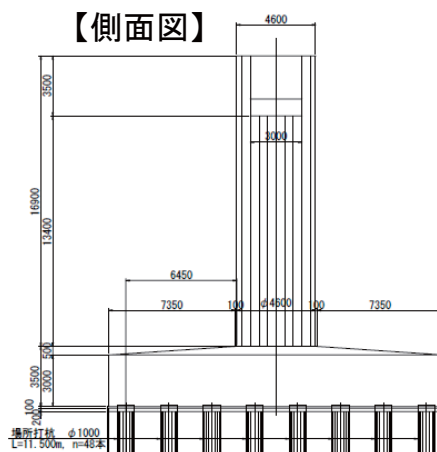
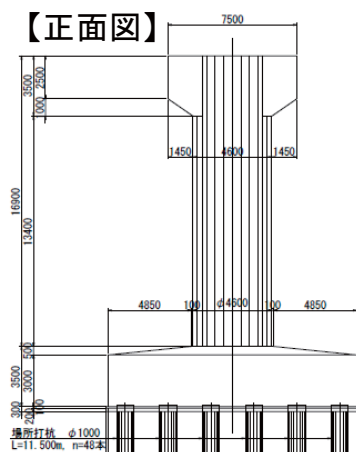
縮小模型試験体を用いた水平載荷実験の3次元弾塑性FEMを用いた再現実験による評価

- ・ フーチングの3次元的な破壊メカニズムの評価
- ・ 耐震性評価手法の検討

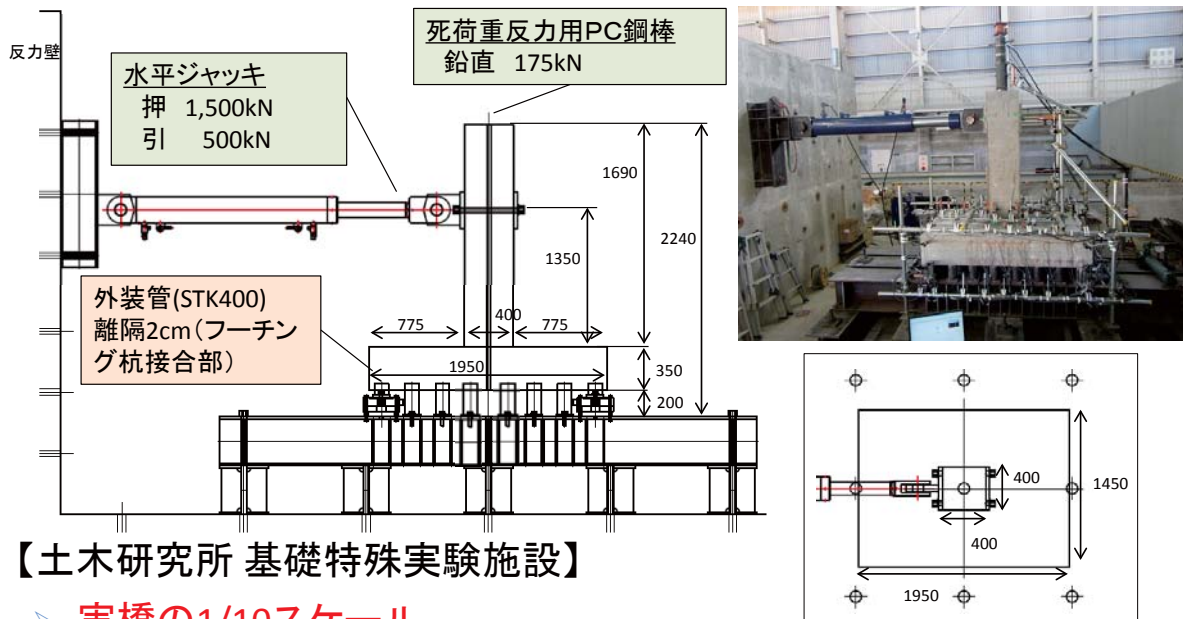


実験対象フーチング

- 適用された設計基準が古い(昭和54年より前)
- 曲げ, せん断ともに道示が規定する耐力を超過する
- 実験事例の少ない多列杭を有する
 - ⇒ 昭和49年竣工の既設フーチングを選定
 - ⇒ 杭本数44本・せん断スパン比が大きい(最外縁杭位置で2.4)
 - ⇒ フーチング引張鉄筋量が少ない 上面0.14% 下面0.25%



実験セットアップ・載荷方法

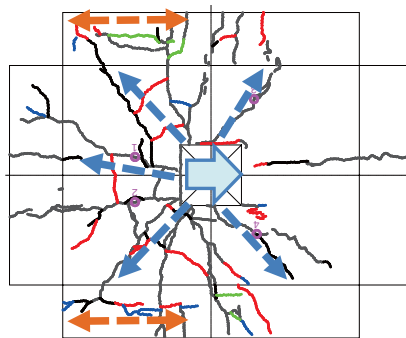


【土木研究所 基礎特殊実験施設】

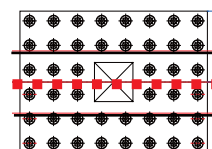
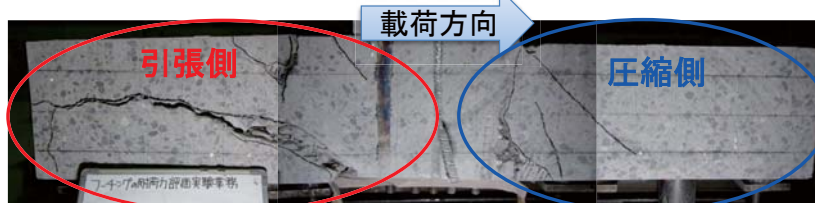
- **実橋の1/10スケール**
- 載荷方法は、死荷重(175kN)をPC鋼棒による載荷とし、地震力を水平方向ジャッキによる一方向多サイクル載荷とした
- フーチングの破壊形態を明確にするため橋脚・杭は補強等を実施

フーチングの損傷状況

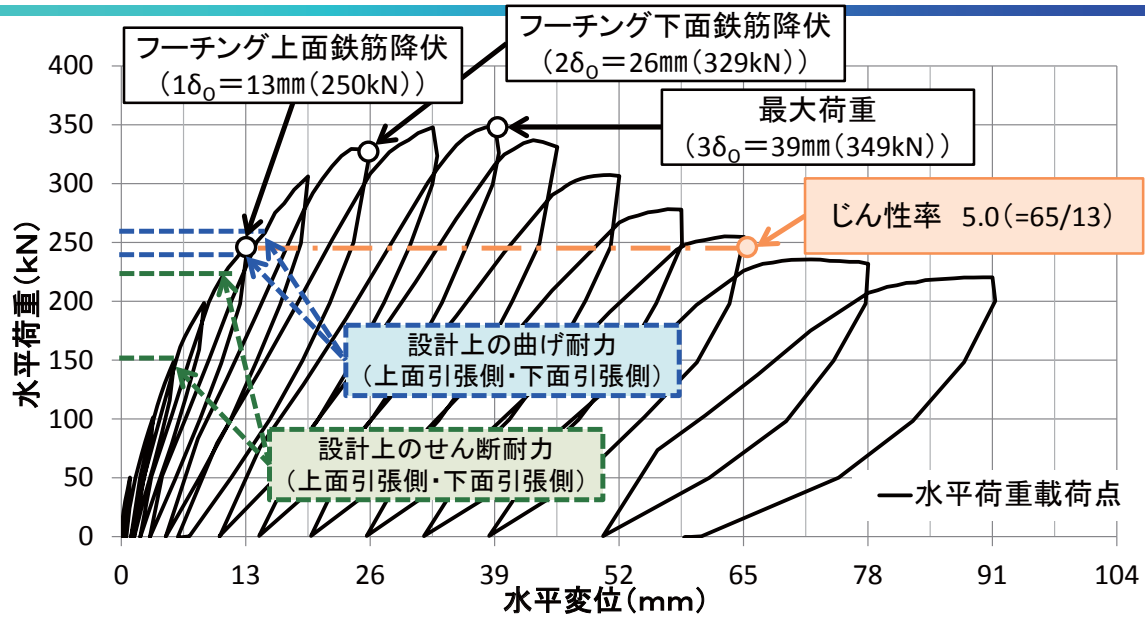
- フーチング上面(実験終了時($7\delta_0=150\text{mm}$))
 - 放射状のひび割れが発生し、側面には水平方向ひび割れが発生



- フーチング内部(実験終了後の中央切断面)
 - **引張側のフーチング内部に大きな水平方向のひび割れを確認**
 - 圧縮側のフーチングに顕著なひび割れは見られなかった



水平荷重－水平変位関係（水平荷重載荷位置）



- 設計上のせん断耐力では、せん断破壊は確認されなかった
- フーチング上面鉄筋降伏後、下面鉄筋、せん断方向鉄筋が降伏し、最大荷重に達した。その後、荷重がなだらかに低下したが、**急激な荷重低下は見られず、一定のじん性性能が確認された。**

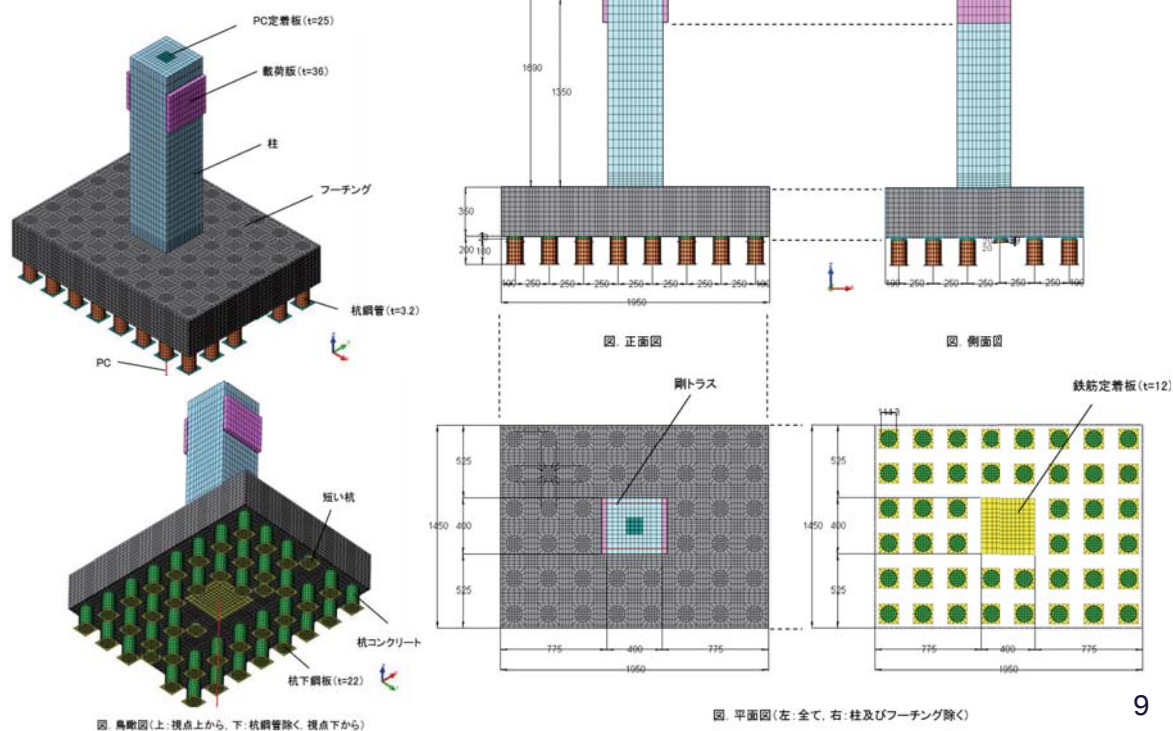
7

FEMによる実験再現解析の目的

- 実験で確認されたフーチングの破壊形態について以下の観点から評価するため、3次元弾塑性FEMによる再現解析を実施
- ① 設計上のせん断耐力を超えても、せん断破壊が生じない理由
 - ② フーチング鉄筋が降伏した以降においても、水平耐力が増加する理由
 - ③ 水平荷重が最大荷重に達した後、荷重がじん性的に低下している理由

FEM解析モデル(試験体)

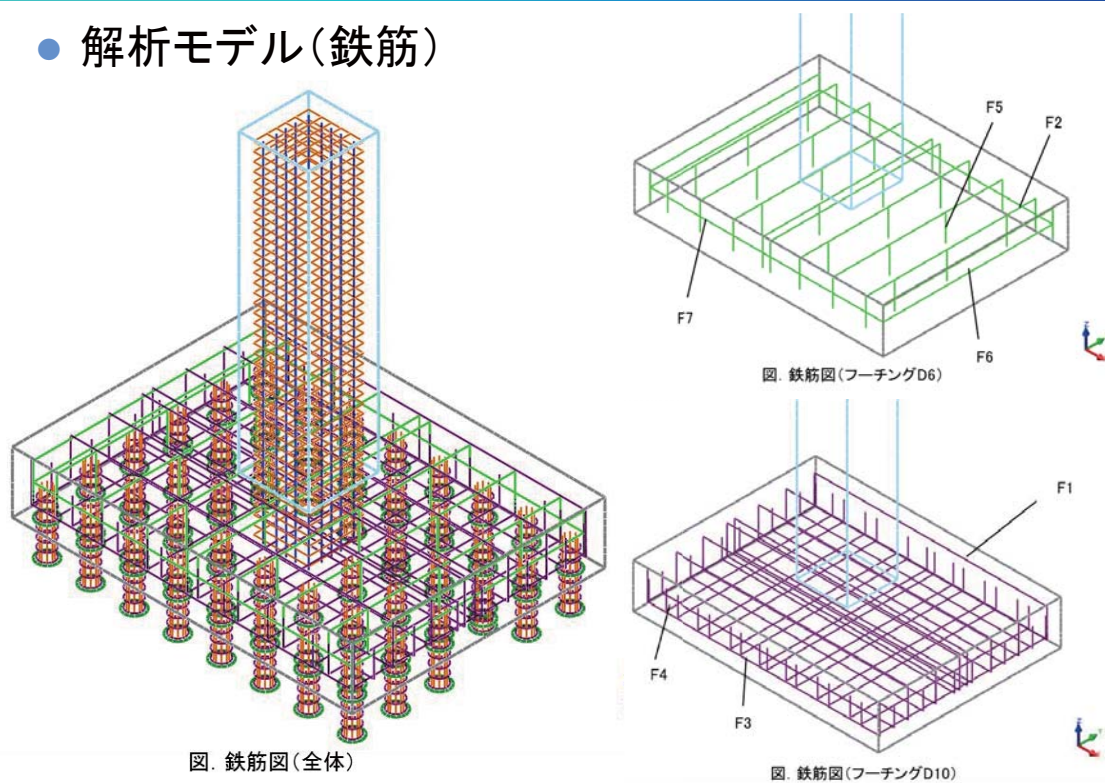
● 解析モデル(試験体)



9

FEM解析モデル(鉄筋)

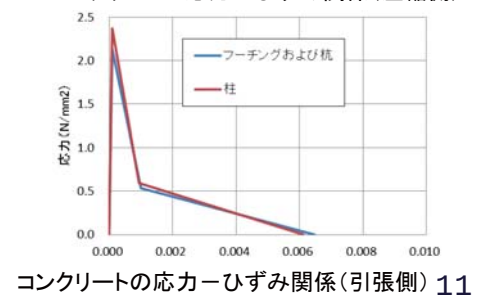
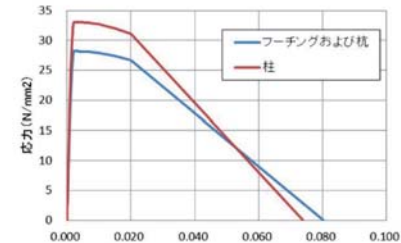
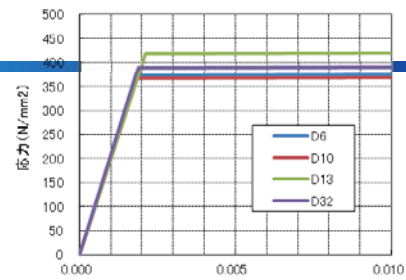
● 解析モデル(鉄筋)



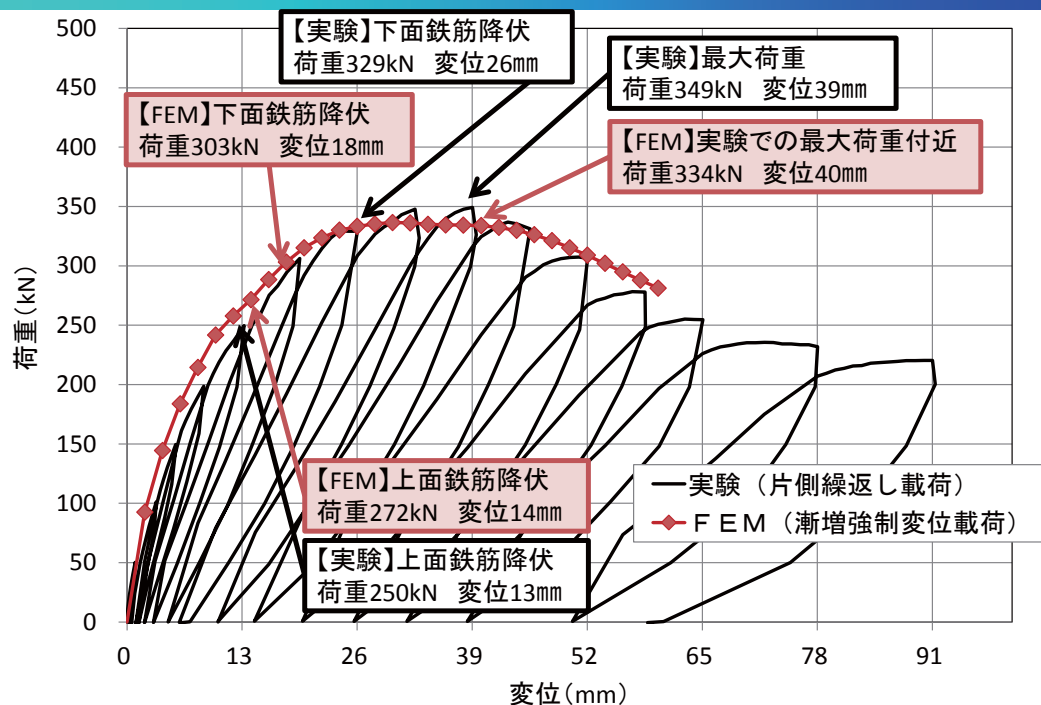
10

FEM解析条件

- 3次元弾塑性FEM
 - 汎用ソフト DIANA_10.2
 - 回転ひび割れモデル
 - 鉛直荷重:一定
 - 水平荷重:変位制御(除荷なし)
- 鉄筋の材料モデル
 - 圧縮側・引張側:Von-mises
 - 応力-ひずみ関係:バイリニアモデル
(2次勾配 $E/1000$)
- コンクリート材料モデル
 - 圧縮側:PARABO(放物線モデル)
 - 引張側:コンシ_引張軟化モデル



水平荷重-水平変位関係 (水平荷重載荷位置)

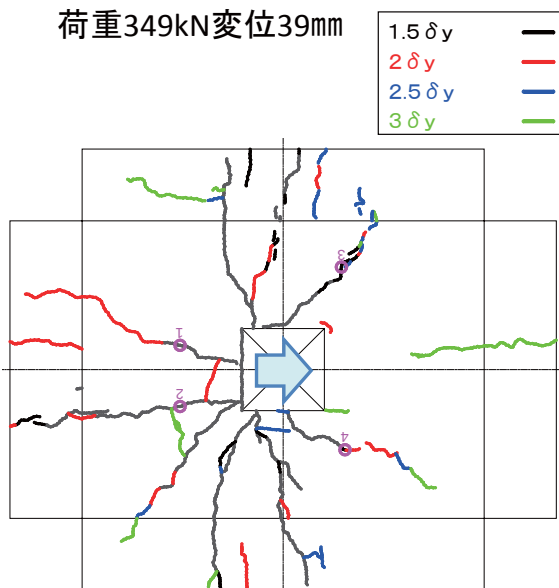


- FEMにおいて実験と同様の鉄筋降伏状況、荷重-変位関係を再現
⇒ FEMにより損傷過程の詳細な分析を実施

最大主ひずみ(引張)(フーチング上面)

【実験】最大荷重

荷重349kN変位39mm

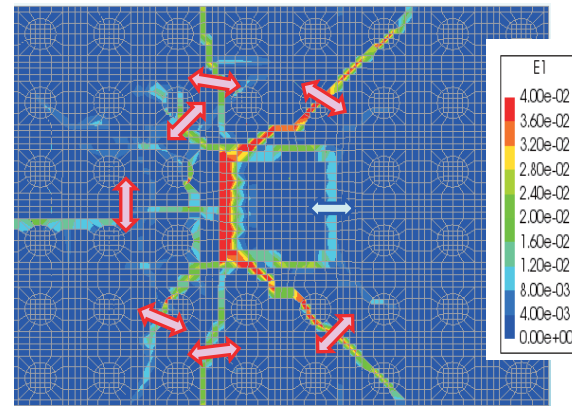


【FEM】実験最大荷重付近

荷重334kN変位40mm

引張ひずみ分布

引張主ひずみ0.04
≒ 1.0mmひび割れ相当
(要素サイズ約25mm)



引張ひずみ発生方向 $\leftrightarrow$
圧縮ひずみ発生方向 $\leftrightarrow$

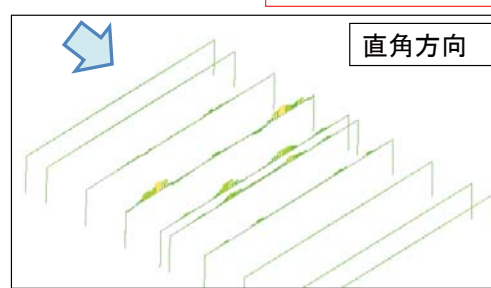
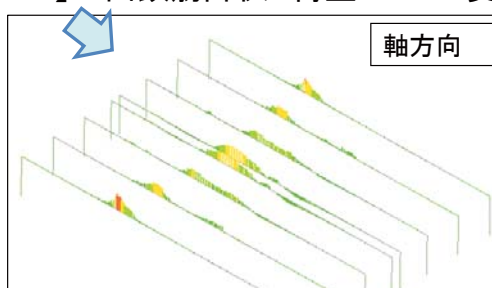
- FEMにおいて、実験での放射状のひび割れに相当する引張ひずみの発生が確認された

13

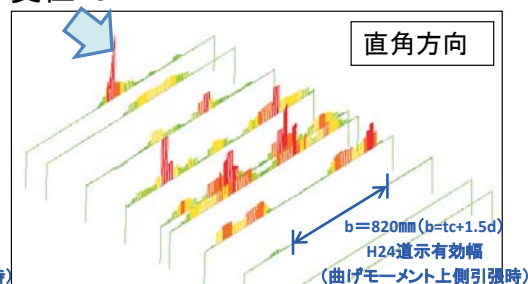
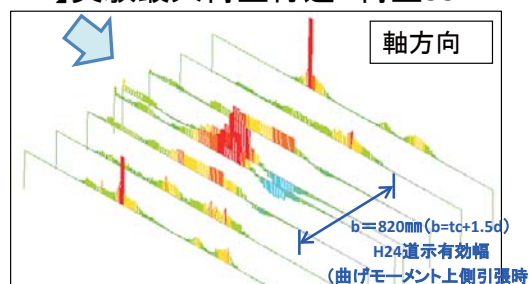
鉄筋ひずみ(フーチング上面)

【FEM】上面鉄筋降伏 荷重272kN 変位14mm

鉄筋降伏ひずみ(1,845 μ)



【FEM】実験最大荷重付近 荷重334kN 変位40mm

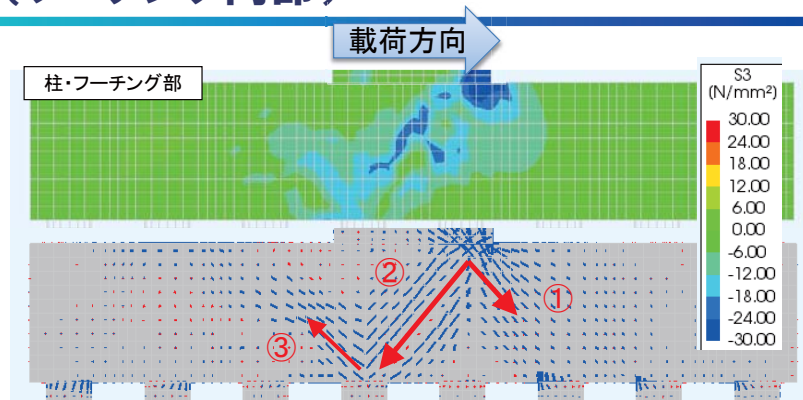


- フーチング上面鉄筋降伏後、降伏の範囲は面的に広がっている。
- 直角方向鉄筋についても、鉄筋の降伏が面的に生じている。
- フーチング下面鉄筋についても同様の発生状況であった。

14

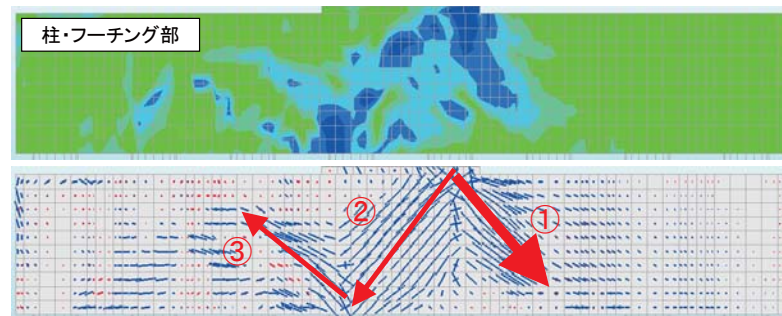
最小主応力(圧縮)(フーチング内部)

【FEM】上面鉄筋降伏
荷重272kN 変位14mm



【FEM】実験最大荷重付近
荷重334kN 変位40mm

圧縮力の発生方向
←

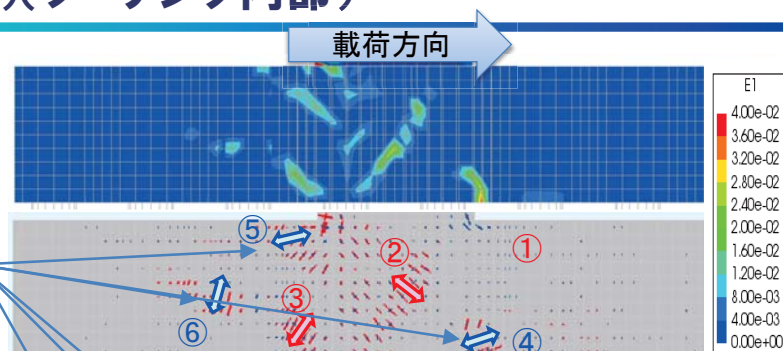


- 水平荷重により、押込側に圧縮ストラットが形成が確認されたため、**押込側では大きなせん断耐力が期待**できると考えられる。 15

最大主ひずみ(引張)(フーチング内部)

【FEM】上面鉄筋降伏
荷重272kN 変位14mm

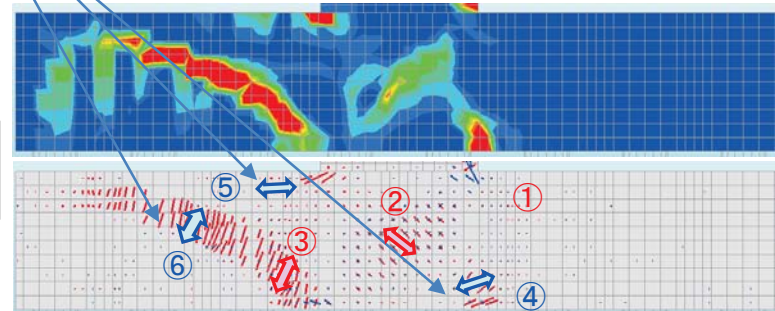
最小主応力(圧縮応力)
が発生していない箇所
で最大主ひずみ(引張
ひずみ)が発生



【FEM】実験最大荷重付近
荷重334kN 変位40mm

引張主ひずみの発生方向
圧縮力発生箇所①②③
圧縮力発生していない箇所④⑤⑥

引張主ひずみ0.04≒1.0mmひび割れ相当
(要素サイズ約25mm)

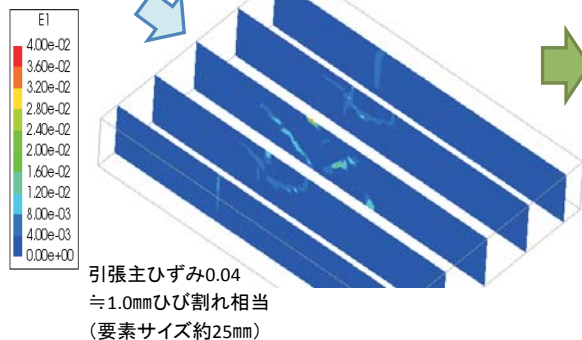


- 最大荷重付近では、圧縮力が発生していない⑥において、大きな引張ひずみが確認された。これは水平荷重による柱の回転挙動と杭の拘束に伴う引張力により生じる引張ひずみであると考えられる。

最大主ひずみ(引張)(フーチング内部)

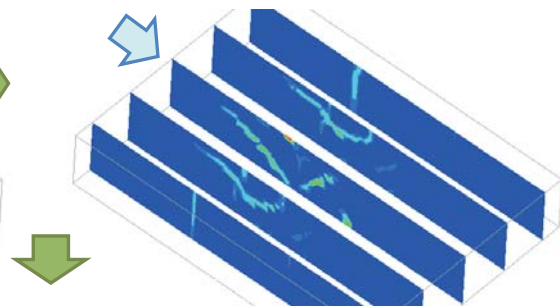
【FEM】上面鉄筋降伏

荷重272kN変位14mm



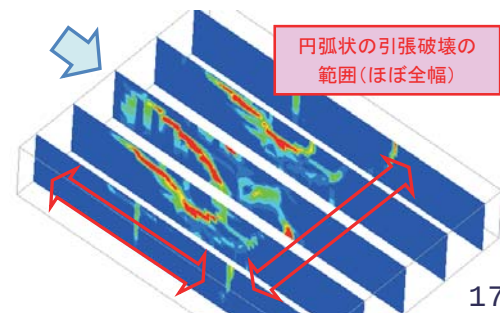
【FEM】下面鉄筋降伏

荷重303kN変位18mm



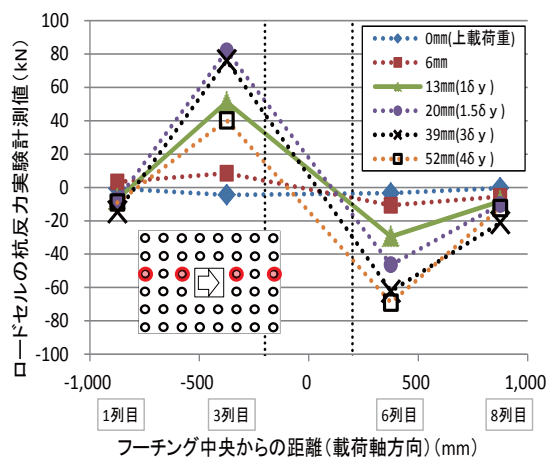
【FEM】実験最大荷重

荷重334kN変位40mm

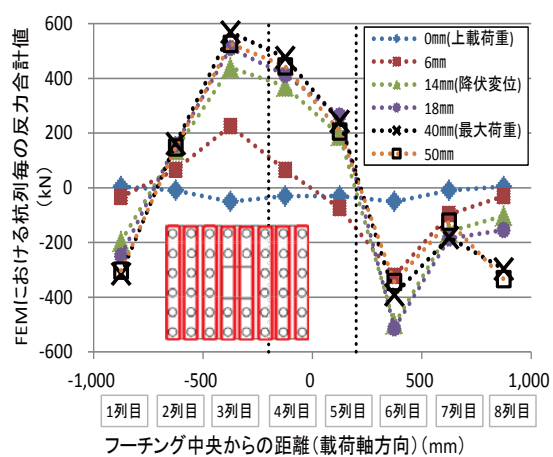


- 引張側のフーチング内部に発生する引張ひずみは水平荷重の進展に伴い有効幅方向及び載荷幅方向に広がる。
- 「円弧状の引張破壊」は面的に生じ、実験最大荷重時には、ほぼ全幅に広がっている。

杭の鉛直反力発生状況



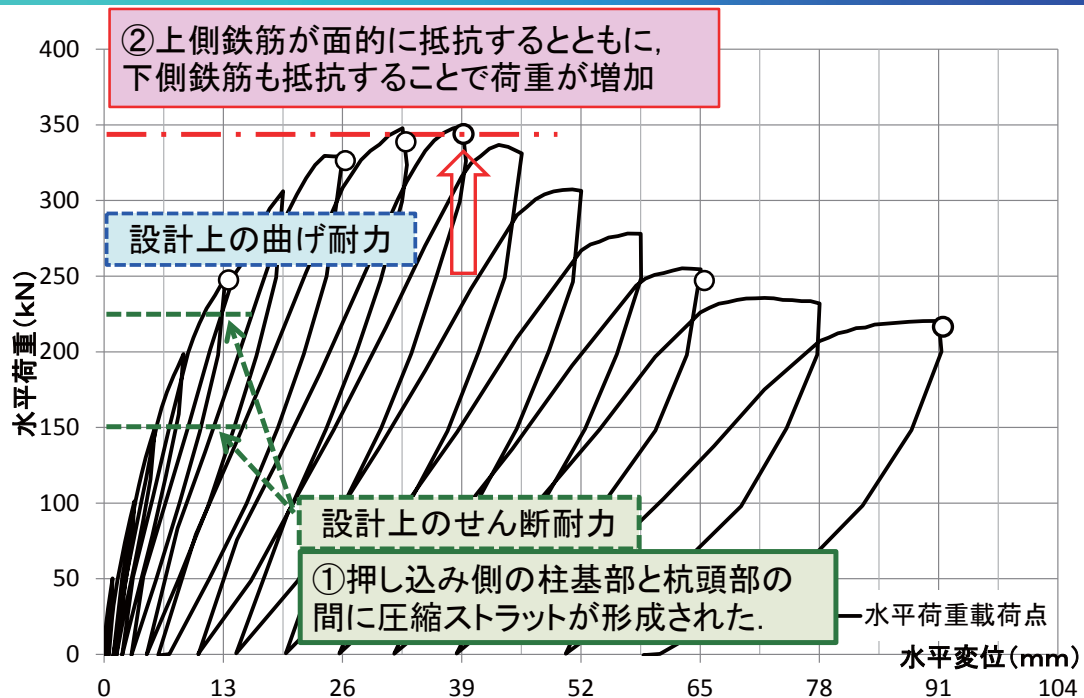
【実験】杭反力(ロードセル設置位置)



【FEM】杭反力(各杭列の合計値)

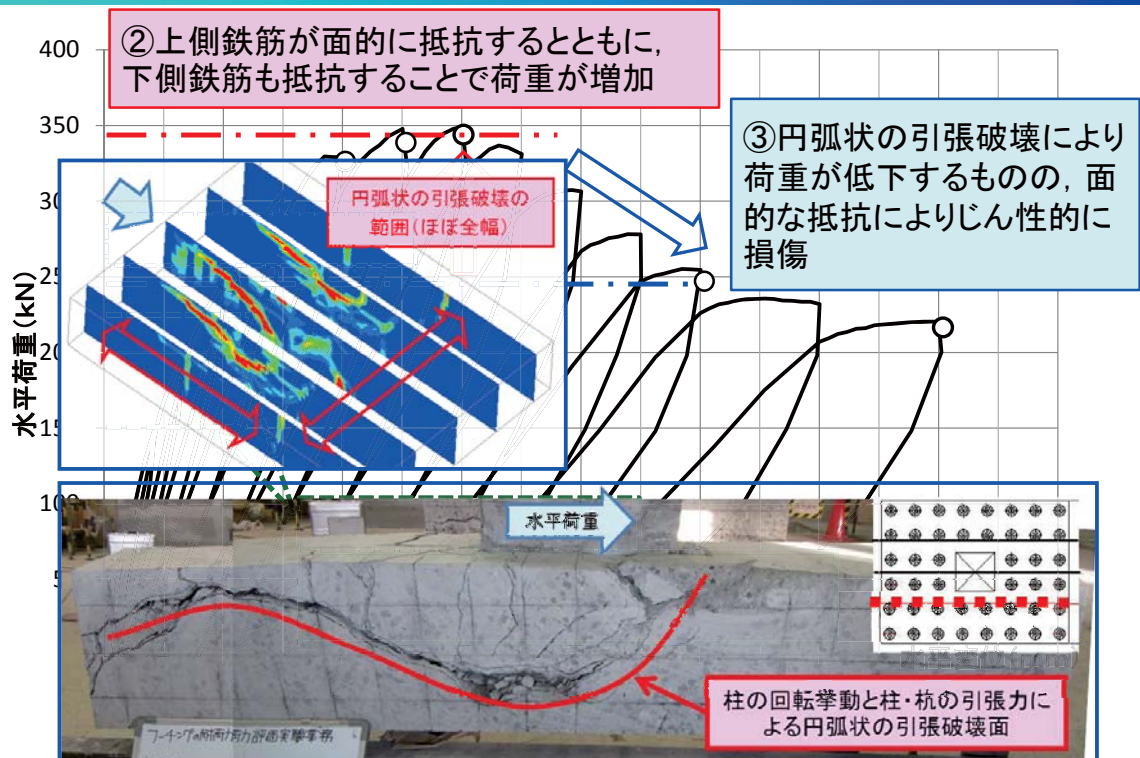
- 実験、FEMともにフーチング中央部付近の杭に大きな反力が生じ、最外縁杭では押込側、引張側ともに大きな反力は生じなかった。また、FEMでは引張力の範囲が押込側柱部まで生じている。
- 杭反力の発生状況より、地震時におけるフーチングの挙動は剛体挙動ではなく非線形挙動であると考えられる。

今回の実験試験体の破壊過程



19

今回の実験試験体の破壊過程



20

今回の実験試験体の破壊過程

①設計上のせん断耐力を超えた後も、せん断破壊が生じない理由

- 設計上のせん断耐力付近(150～250kN)において、柱押込側の柱基部と最近部の杭の間に圧縮ストラットが形成されたため、せん断耐力が上昇したと考えられる。

②フーチング鉄筋が降伏した後も、水平耐力が増加する理由

- 上面鉄筋降伏後の鉄筋の抵抗(降伏)範囲が面的に広がっており、また、直角方向鉄筋及び下面鉄筋の抵抗により、軸方向鉄筋降伏後も耐力が増加したと考えられる。

③水平荷重が最大荷重に達した後、荷重がじん性的に低下する理由

- 抵抗面が引張側フーチングの全幅と面的に広いため、荷重は面的な荷重分配を伴いながら低下し、じん性的な破壊が生じたと考えられる。

⇒ 今回の実験・FEMにより確認されたフーチングの保有耐力及びじん性性能について、他の実験結果の評価・分析などを踏まえ、既設フーチングの補強の要否、優先順位などを判定するための耐震性評価手法を引き続き検討する。