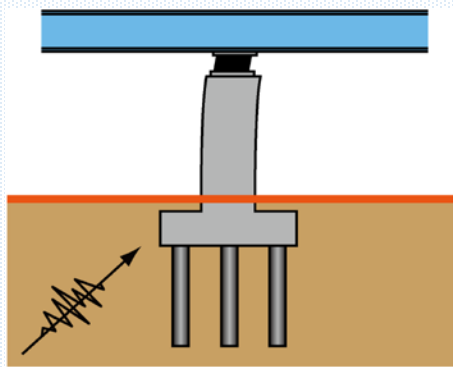


崩壊シナリオデザイン設計法の 実現に向けた耐力階層化鉄筋を 用いたR C橋脚の載荷実験

国立研究開発法人土木研究所 つくば中央研究所
研究員 横澤 直人

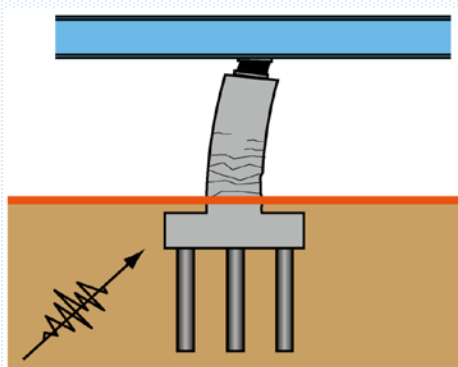
- 設計地震動を上回る規模の地震への対応の必要性
 - 道路橋示方書では、過去の地震被害や研究成果に基づいて、設計地震動を設定している
 - 万一、設計地震動を上回る規模の地震が発生した場合、橋脚の倒壊など、**致命的な被害**が生じる恐れがある

L1地震動



損傷は微小
(応急復旧不要)

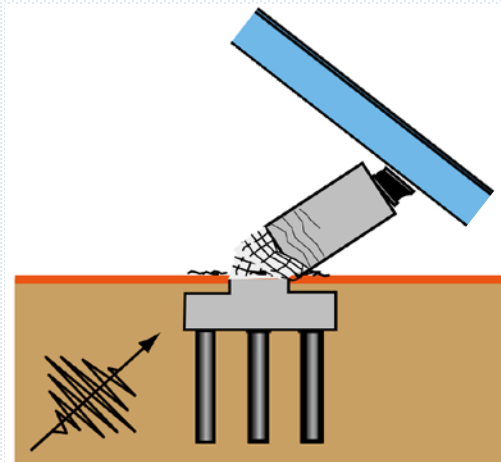
L2地震動



橋脚は一部損傷
(水平抵抗力保持)

道示の設計地震動

設計地震動を上回る地震動



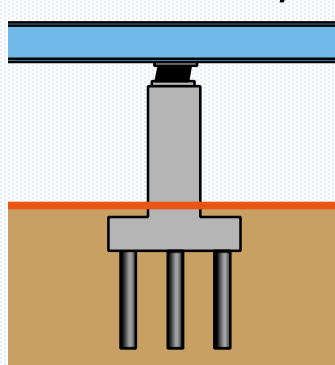
橋脚が倒壊
(致命的な被害)

実際に作用する可能性がある地震動

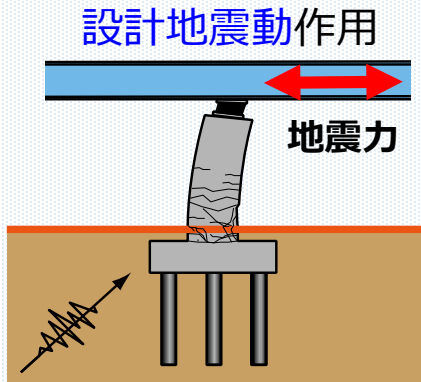
崩壊シナリオデザイン設計法の提案 大住ら(2021) *

橋が崩壊に至るまでのシナリオを想定し，損傷制御によって，致命的な被害に至りにくいシナリオを選定

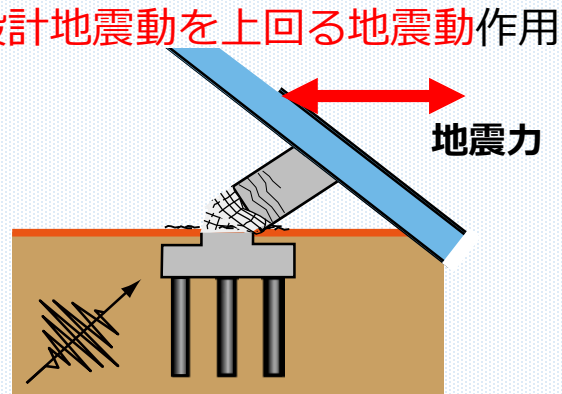
落橋に至るシナリオ



現行の設計法
で設計

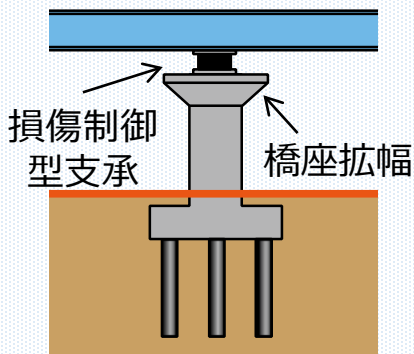


設計地震動作用
地震力
構造全体は維持
(橋脚の部分的な損傷)

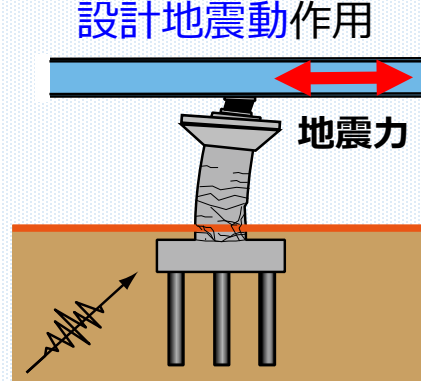


設計地震動を上回る地震動作用
地震力
橋脚の損傷が進展し，
橋全体が崩壊する恐れ

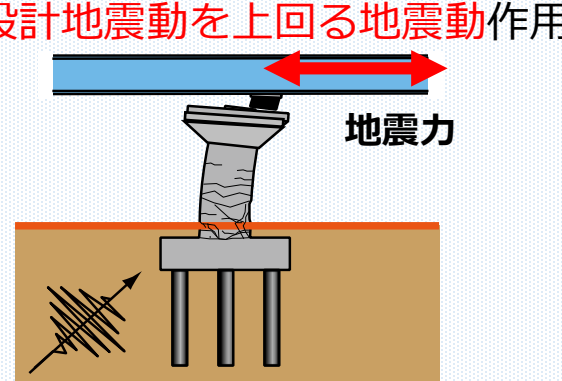
落橋に至らないシナリオ



損傷を制御する
設計法で設計



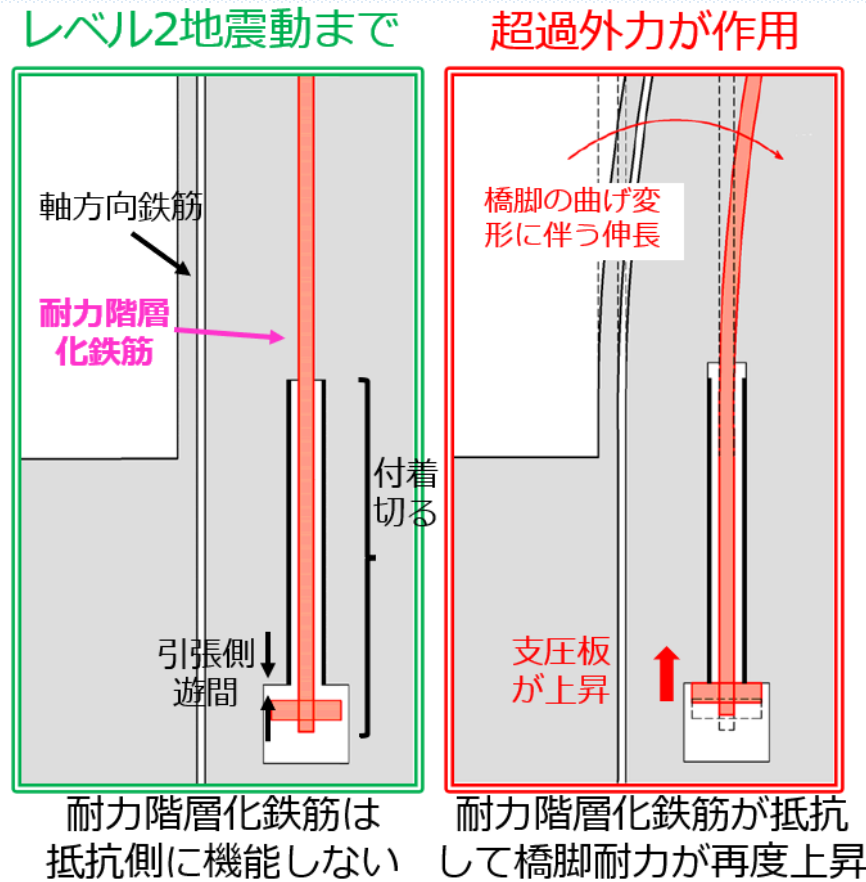
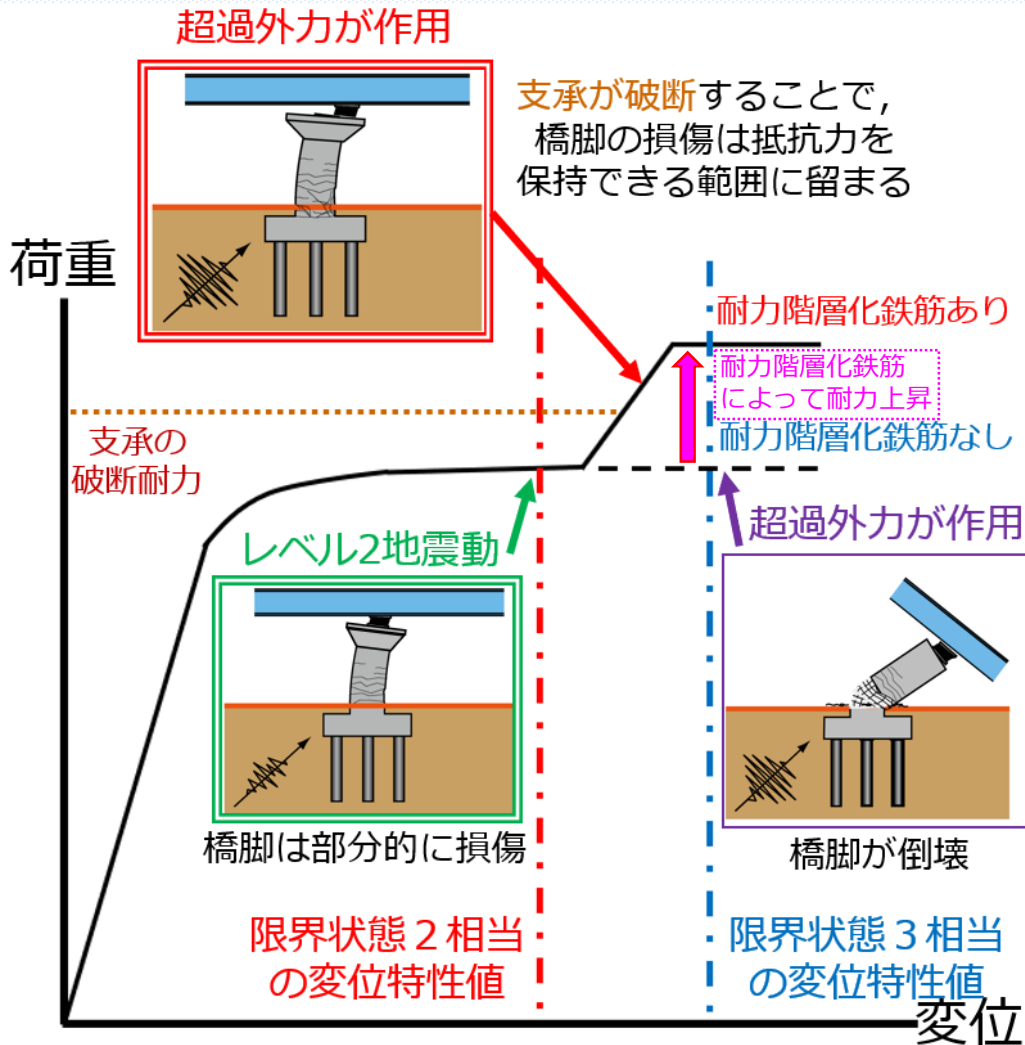
設計地震動作用
地震力
現行の設計法と同等の性能
(橋脚の部分的な損傷)



設計地震動を上回る地震動作用
地震力
支承部に損傷を誘導して
橋全体の崩壊回避

*大住道生，中尾尚史，石崎寛史，庄司学：破壊尤度の制御による道路橋の崩壊シナリオデザイン設計法の提案，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.77，No.4（地震工学論文集第40巻），pp.I_360-I_372，2021.

シナリオ転換を実現する耐力階層化鉄筋 大住ら(2021)



超過外力が作用した時に、**耐力階層化鉄筋**により橋脚の耐力が増加し、**支承に損傷を誘導**することで、**致命的な被害を回避**する

□シナリオ転換を実現する耐力階層化鉄筋 大住ら(2021)

超過外力が作用

レベル2地震動まで

超過外力が作用

支承が破断することで、

これまでのところ、耐力階層化鉄筋の効果は
解析上においてのみ確認 (大住ら2021)

本研究の目的

実設計での適用に向けて、**載荷実験**及び**再現解析**を通じて、耐力階層化鉄筋を用いたRC橋脚の**応答**や**設計時の留意点**を検証する

の変位特性値

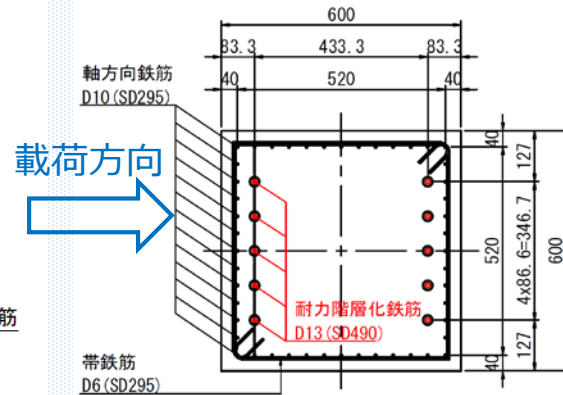
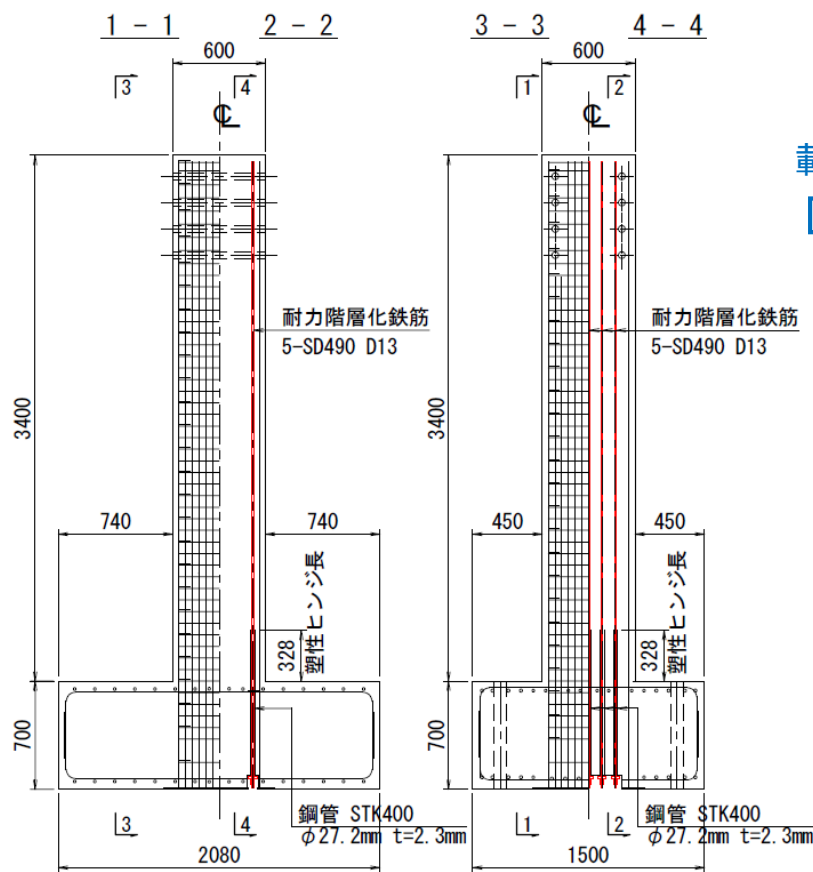
の変位特性値

変位

により橋脚の耐力が増加し、**外力に誘導**することで、**致命的な被害を回避**する

□ 載荷実験で使用した供試体の配筋図，概要

- 実橋の1/6縮小模型を作成し，耐力階層化鉄筋を導入
- 材料諸元や配筋は，既往の実験*や事前解析から決定



○ 耐力階層化鉄筋

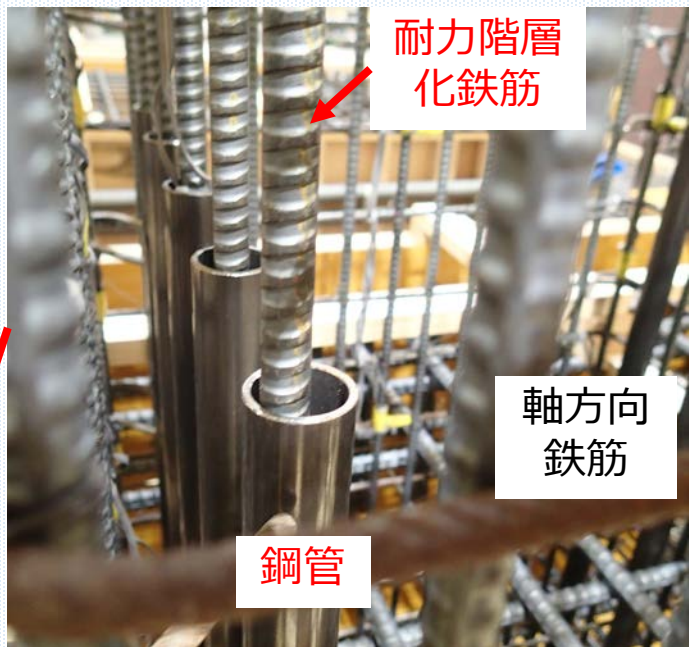
- ・ 曲げを受ける面に各5本配置
- ・ 過密配筋とならないように高強度鉄筋 (SD490) を使用

材料	諸元・配置
コンクリート	設計基準強度 27N/mm ² 粗骨材寸法 最大13mm
軸方向鉄筋	D10(SD295)@43.3mm
帯鉄筋	D6(SD295)@75mm
耐力階層化鉄筋	D13(SD490)@86.7mm

*星隈順一， 運上茂樹， 長屋和宏：載荷繰り返し回数の影響を考慮した鉄筋コンクリート橋脚の変形性能評価法， 土木技術資料， Vol.39， No.2， pp.32-37， 1997.

耐力階層化鉄筋の外観

柱基部



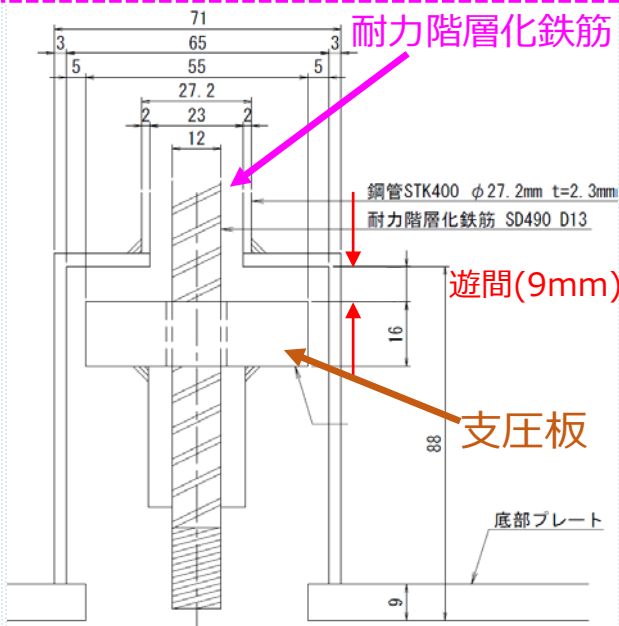
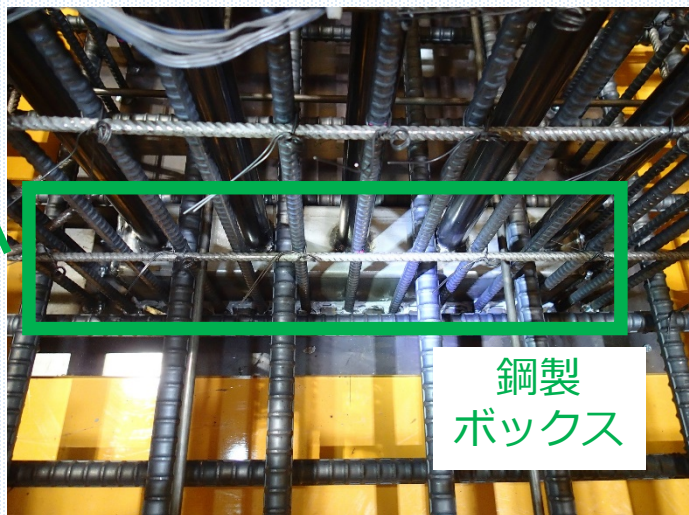
- フーチング下面から塑性ヒンジ領域（柱下端から328mm）まで鋼管で被覆
- 鋼管表面にグリース材を塗布し、周囲のコンクリートとの付着回避

遊間長 dx の算出式（橋脚の曲げ変形）

$$dx = \phi'_{ls} y'_{ls} L_p$$

- ϕ'_{ls} : 耐力階層化鉄筋が機能し始める変位における曲率
- y'_{ls} : 耐力階層化鉄筋が機能し始める変位における曲率時点の耐力階層化鉄筋から中立軸までの距離
- L_p : 塑性ヒンジ長

フーチング下面



曲率にはばらつきがあり、道示では安全余裕も含めて一定とみなしている

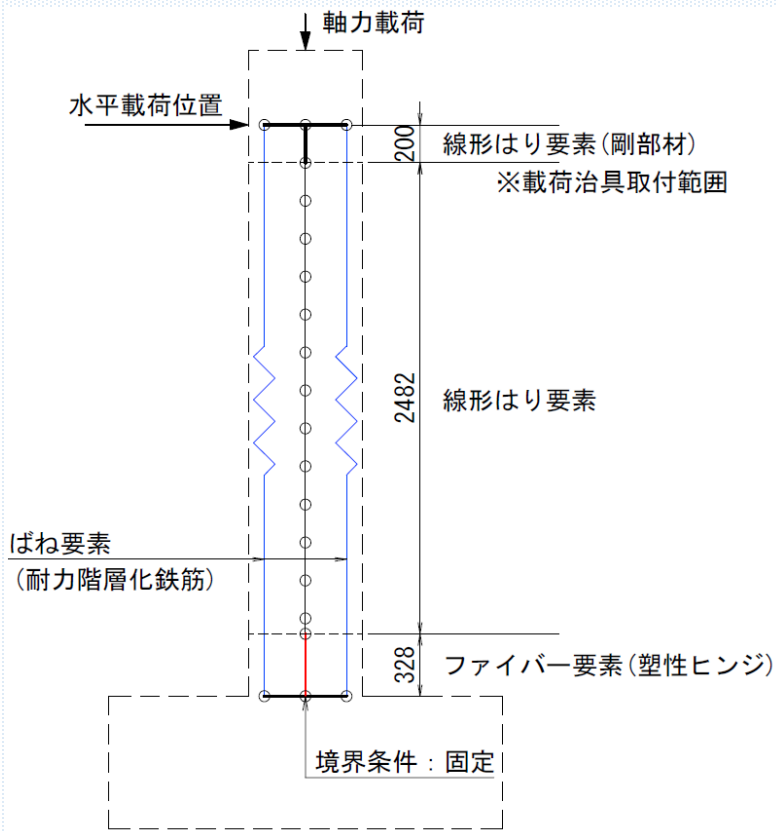


本研究では、遊間長を事前解析から決定

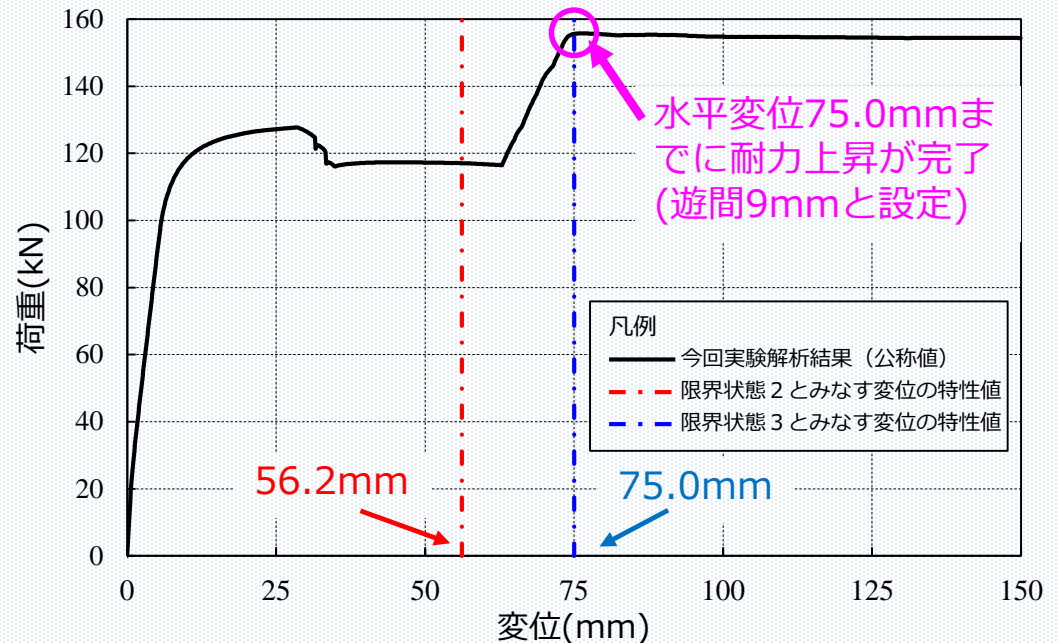
鋼製ボックスの断面

- 製作する供試体を対象とした事前解析を実施
 - 荷重実験に先立って、配筋や遊間長等の設定を目的に実施

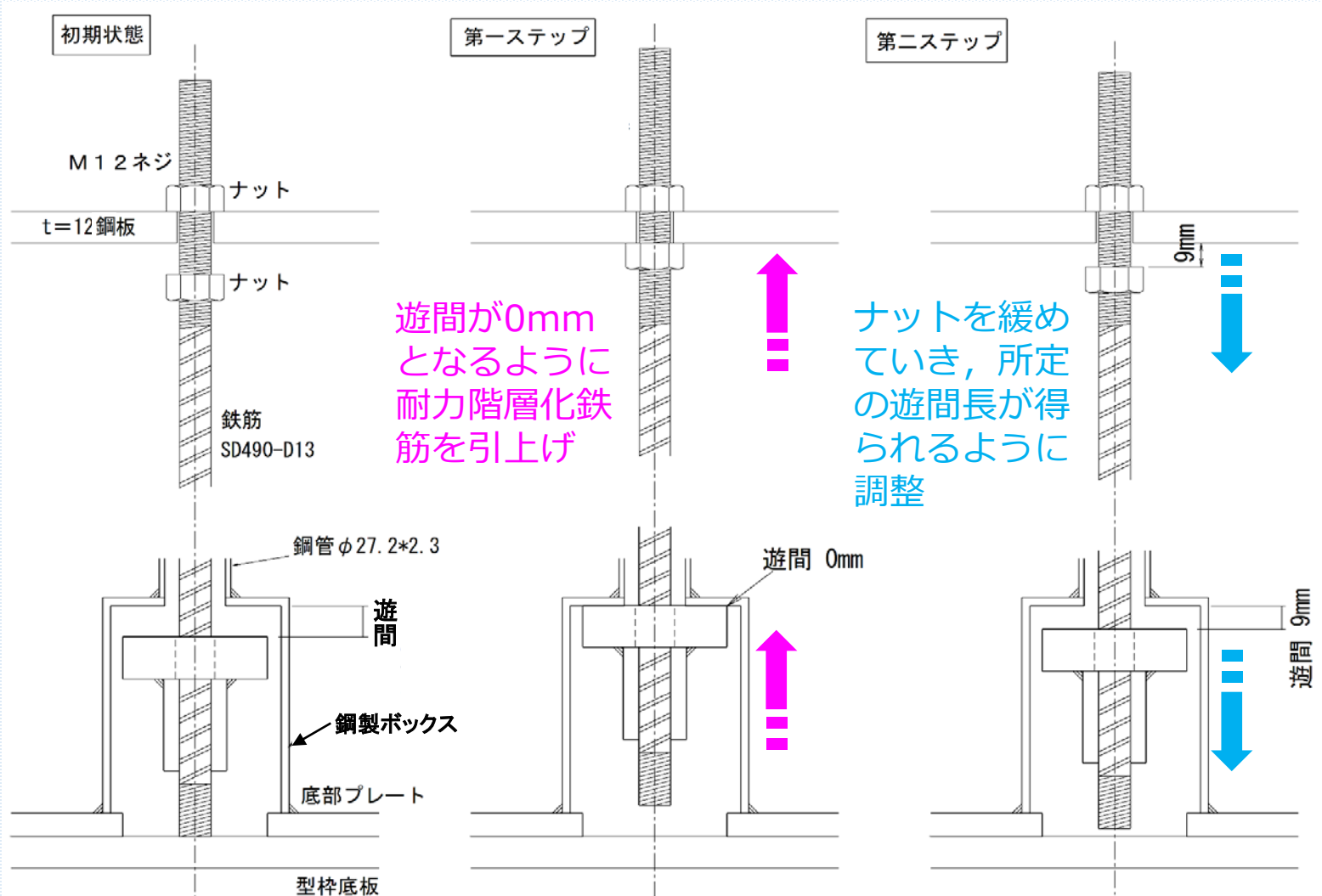
- 橋脚の骨組みモデルを構築し、プッシュオーバー解析を実施
- 材料強度は公称値を使用



供試体のP- δ (解析結果)

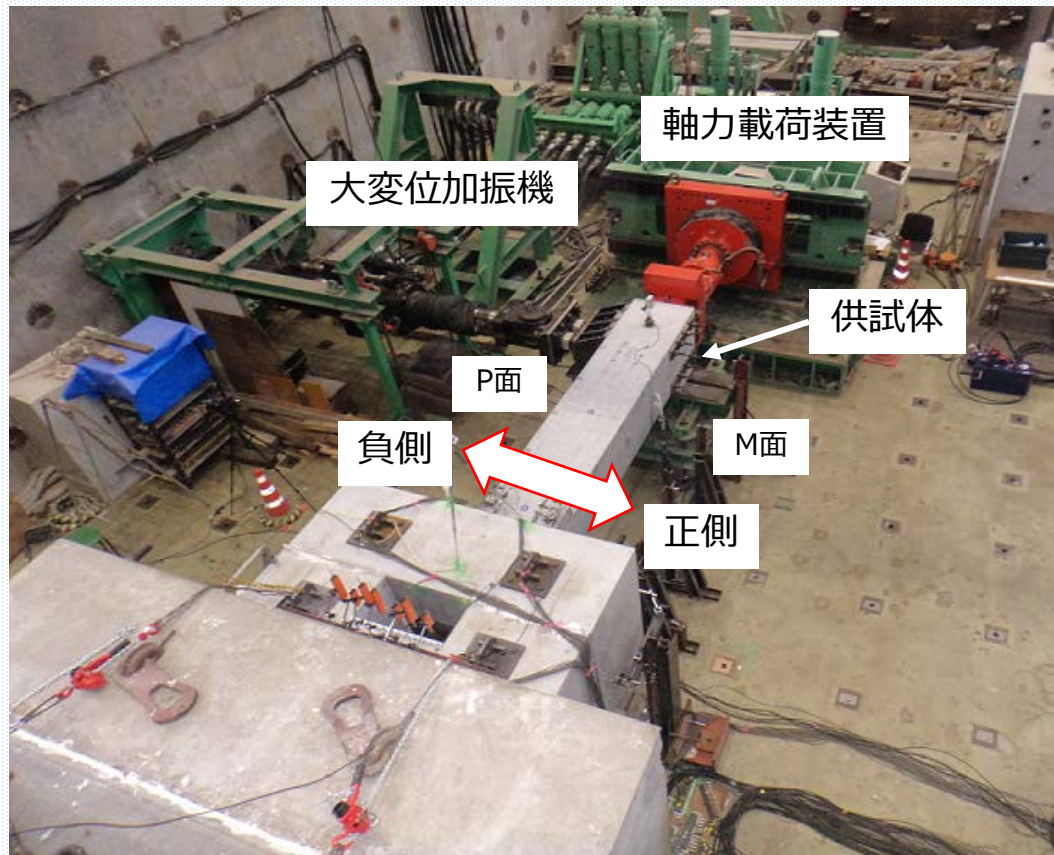


- 柱天端の型枠上に設置した鋼板のナットを利用
- コンクリート打設前に実施

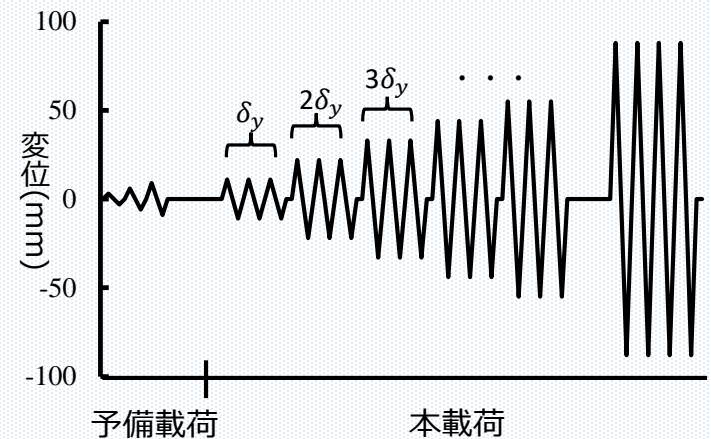


□ 正負交番繰返し載荷試験

- 基準変位を整数倍した水平変位を各3回作用



- 基準変位 δ_y : 11mm
- 載荷最大変位 : $11 \delta_y$ (121mm)
- 軸力 : 360kN (1N/mm²)
(上部構造の死荷重に相当)



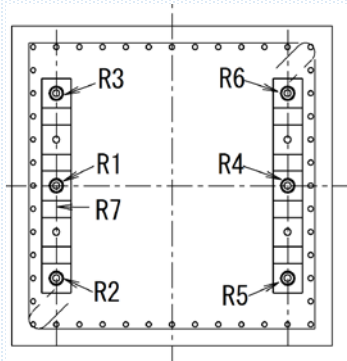
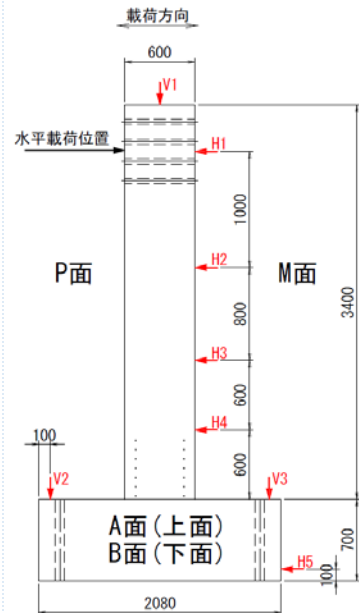
載荷イメージ

荷重

- 軸力
- 水平荷重 (加振機)

変位

- 水平変位
- 軸力載荷方向変位
- 柱基部曲率 (80mm間隔)
- 支圧板 など

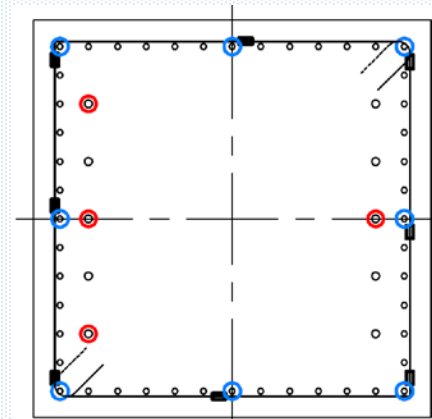


耐力階層化鉄筋
計測位置

ひずみ (鉄筋)

○一定の間隔で各鉄筋のひずみ計測

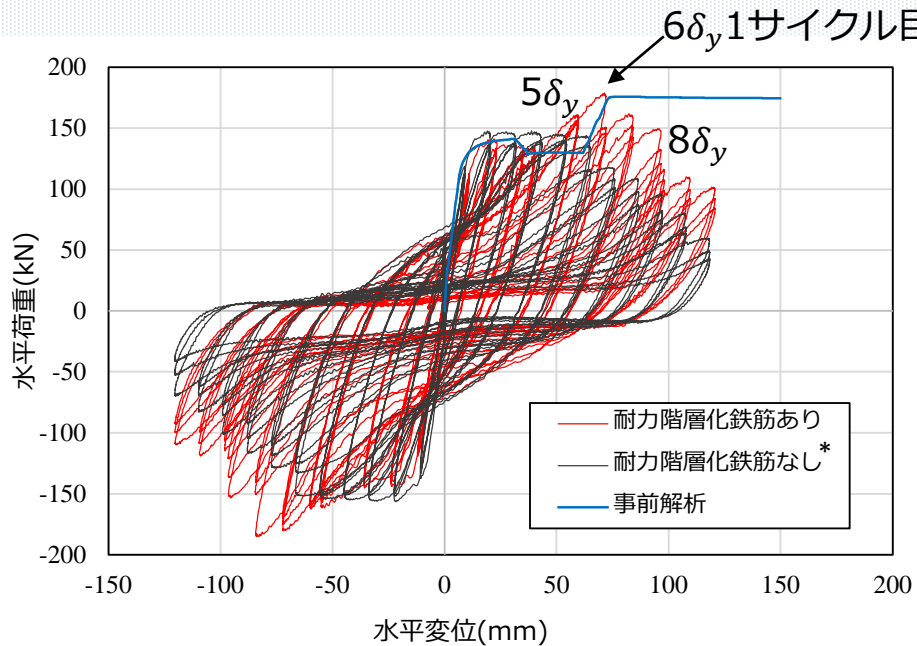
鉄筋	柱基部からの高さ(mm)
軸方向鉄筋	-300, -150, 10, 160, 310, 610, 910, 1210
帯鉄筋	10, 310, 610, 910
耐力階層化鉄筋	-700, 10, 310, 610, 910



- 軸方向鉄筋
- 帯鉄筋
- 耐力階層化鉄筋

各鉄筋の計測位置 (柱断面)

供試体変位計測位置



- 5 δ_y から耐力階層化鉄筋が作動開始
- 6 δ_y の1サイクル目で最大耐力(175.9kN)
- 8 δ_y から耐力が大幅に低下(65%程度)
- 耐力階層化鉄筋がない場合と比較して,
 - ✓最大耐力は約20%増加
(事前解析では22%増加)
 - ✓11 δ_y 載荷時の耐力は約70%増加

5 δ_y 載荷後



- ✓限界状態 2 直前
- ✓柱基部に多数のひび割れ

6 δ_y 載荷後



- ✓最大耐力発揮
- ✓ひび割れの進展は微小

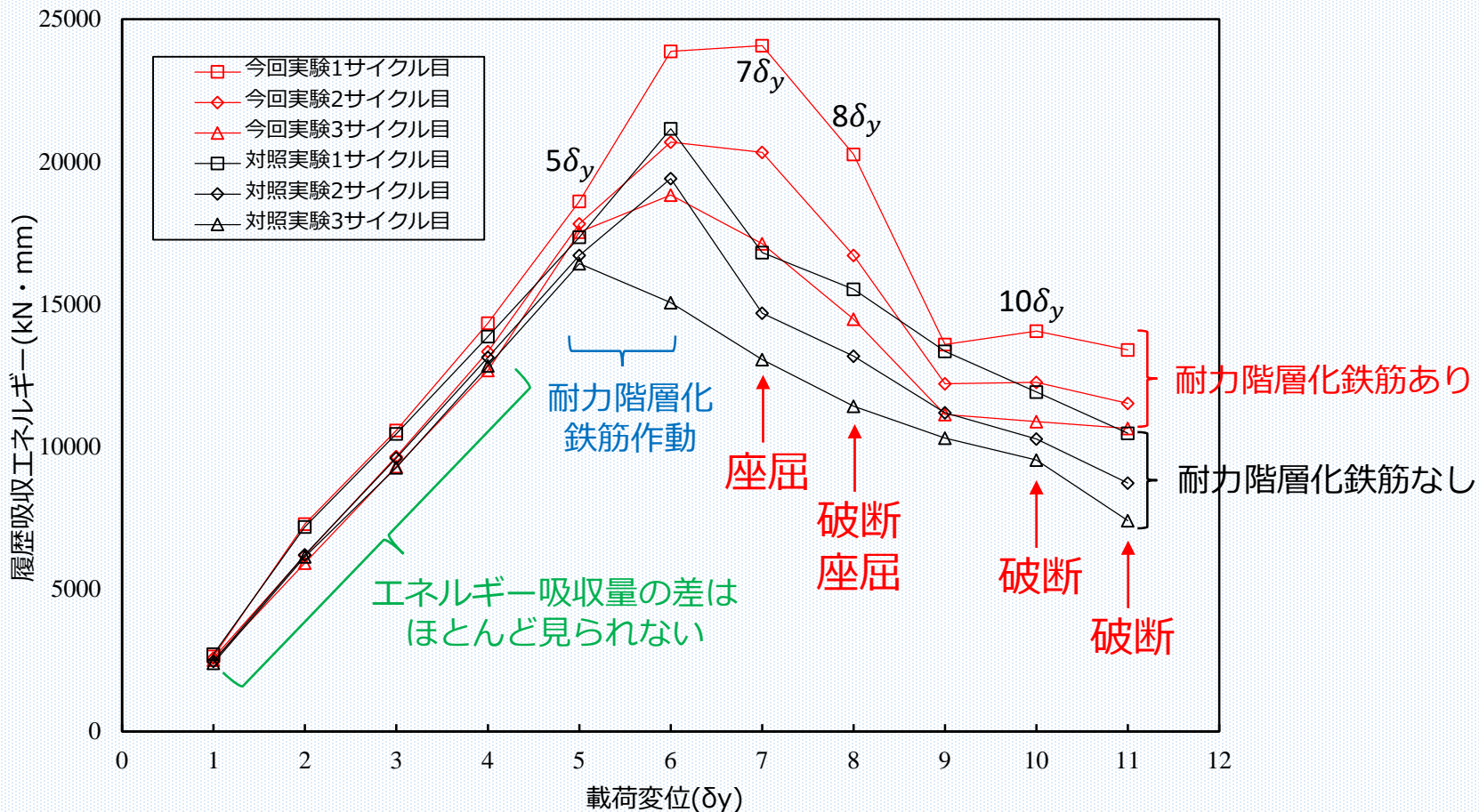
7 δ_y 載荷後



- ✓限界状態 3 に至る
- ✓かぶりコンクリート剥落

履歴吸収エネルギーの推移と鋼管の影響

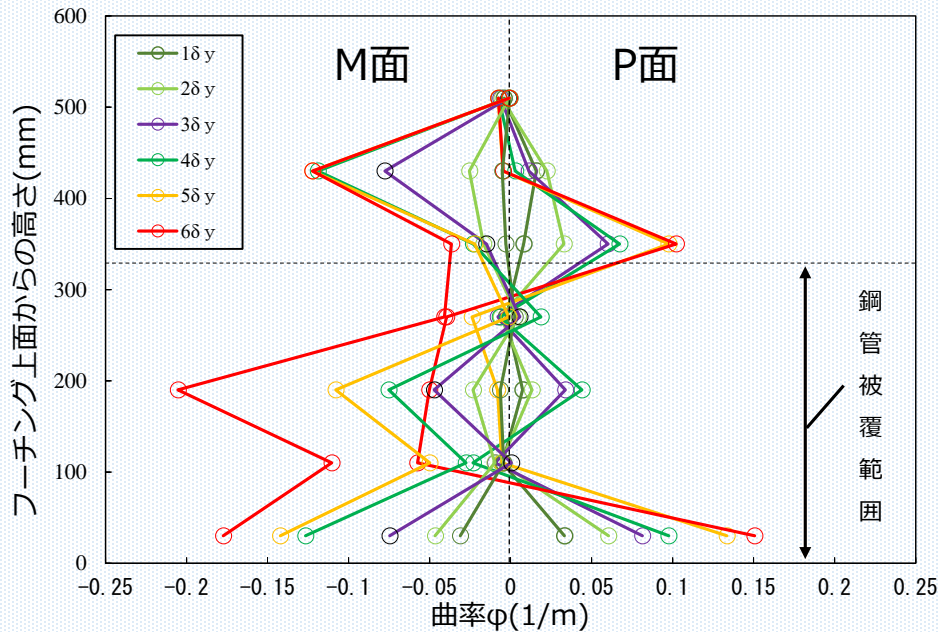
- 7 δ_y の1サイクル目まで吸収エネルギー量が増加
- 軸方向鉄筋の座屈や破断による吸収エネルギー量の低下
- 耐力階層化鉄筋を被覆する鋼管の橋脚への影響は小さい



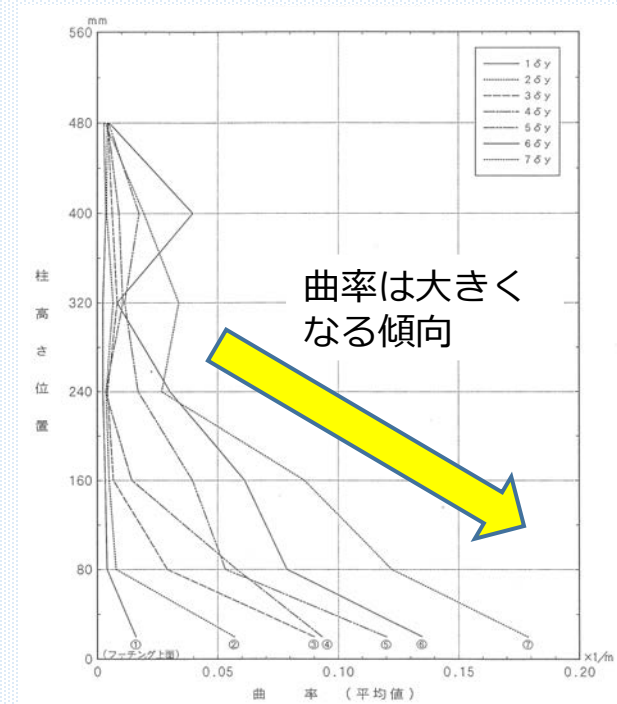
橋脚高さ方向の曲率分布

鋼管被覆範囲の曲率が小さくなっている

荷重変位関係の結果には顕著な影響は見られないことから、鋼管は橋脚の性能を阻害していないものと考えられる



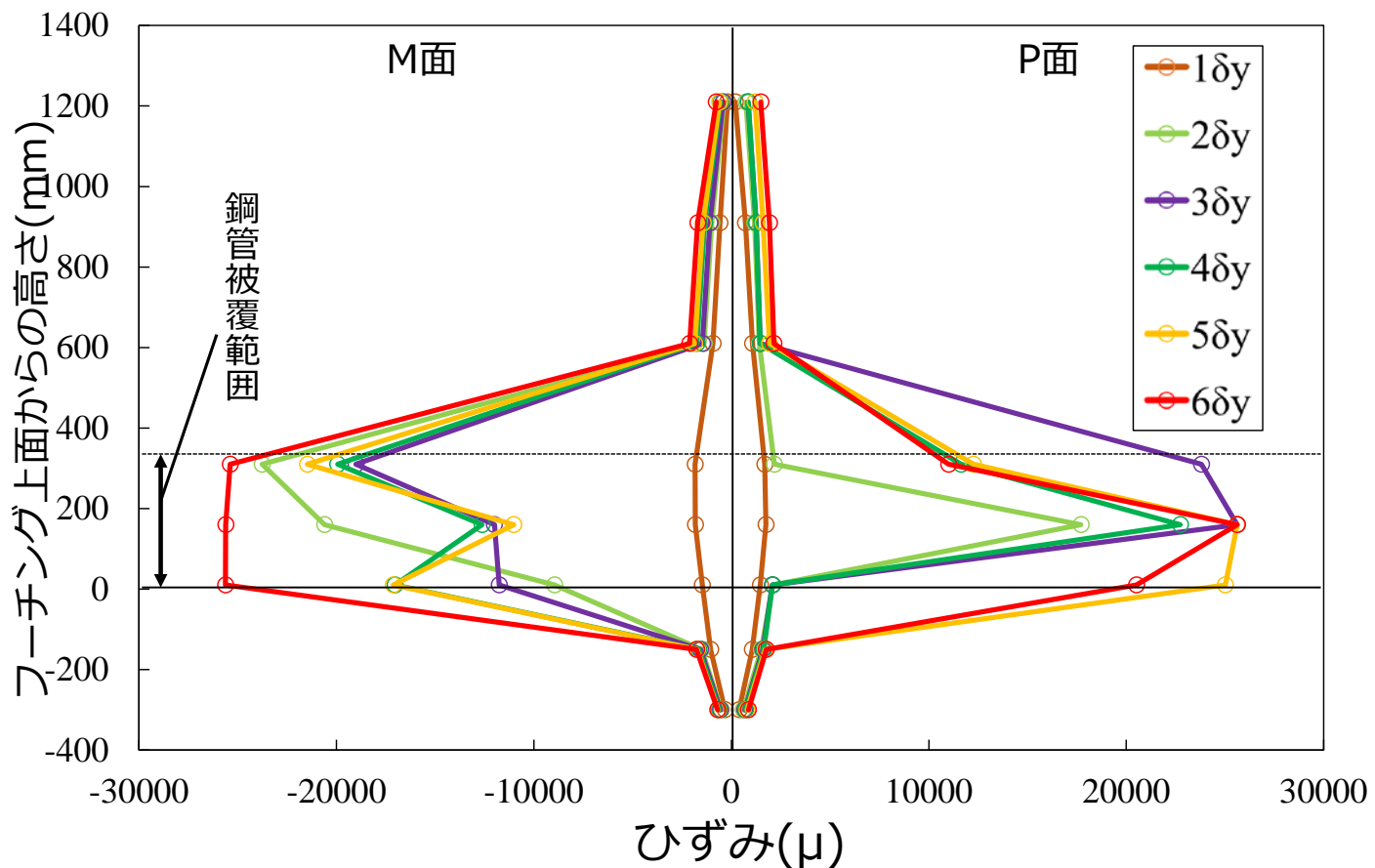
耐力階層化鉄筋を用いた場合



耐力階層化鉄筋を用いていない場合

軸方向鉄筋のひずみ分布

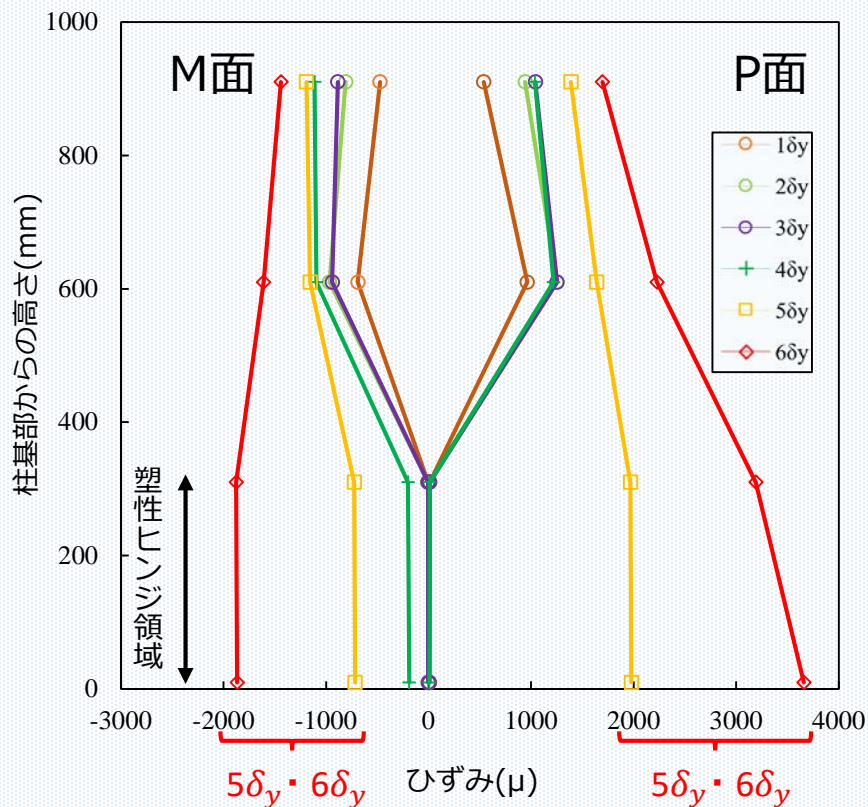
- 2 δ_y から鋼管被覆範囲のひずみが増加
- フーチング内部の鉄筋の付着は確保



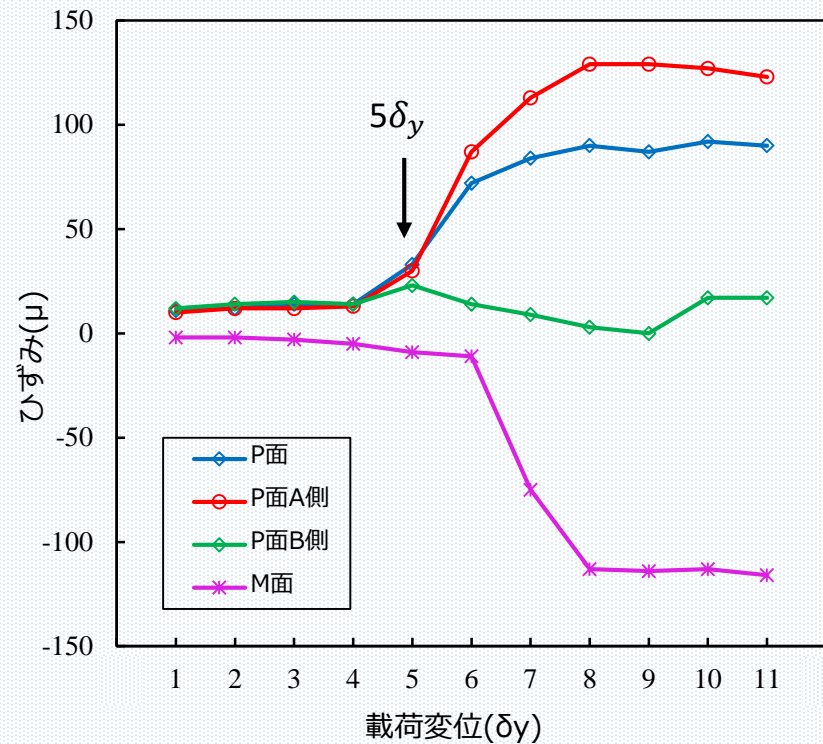
耐力階層化鉄筋のひずみ分布

耐力階層化鉄筋が作動し始める $5\delta_y$ から鉄筋と支圧板のひずみ増加

支圧板は載荷実験中、降伏に至らなかった



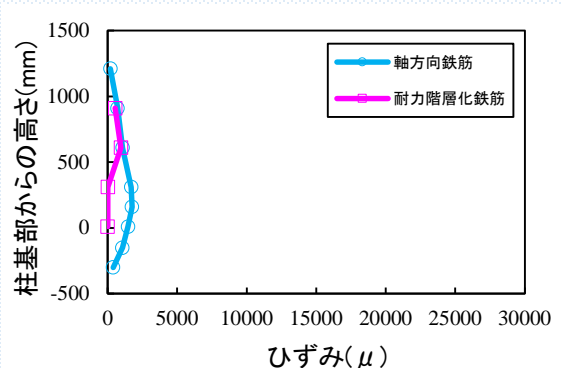
耐力階層化鉄筋のひずみ分布



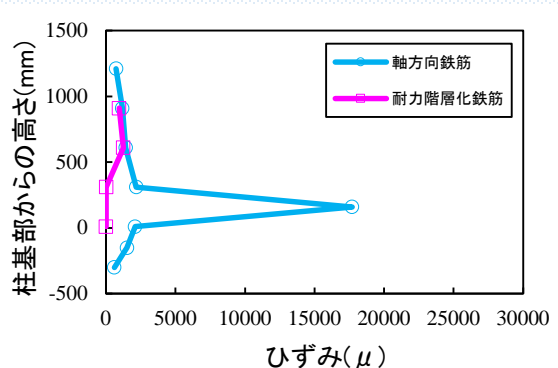
支圧板のひずみの推移

軸方向鉄筋・耐力階層化鉄筋のひずみ 16

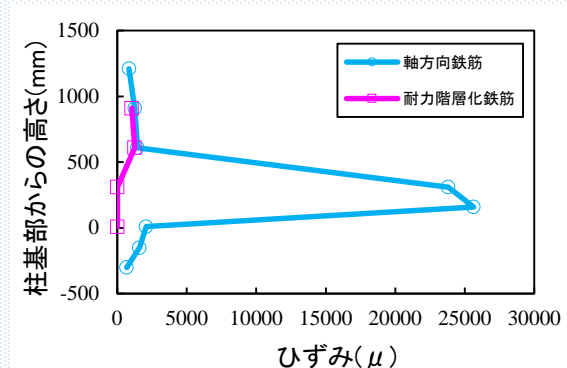
□ 載荷当初は軸方向鉄筋のみが機能し，橋脚変位が一定以上になると耐力階層化鉄筋が作動した



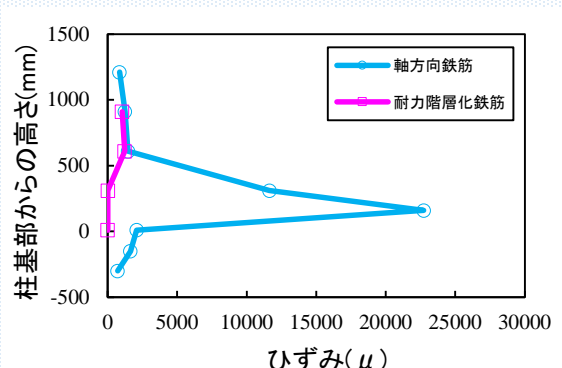
1 δ_y 載荷時



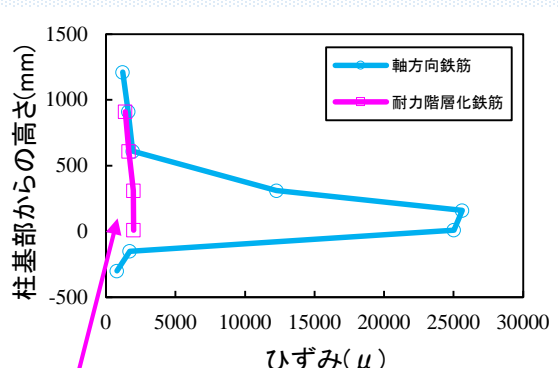
2 δ_y 載荷時



3 δ_y 載荷時

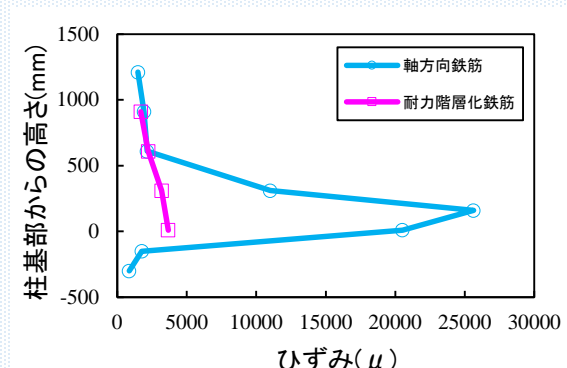


4 δ_y 載荷時



5 δ_y 載荷時

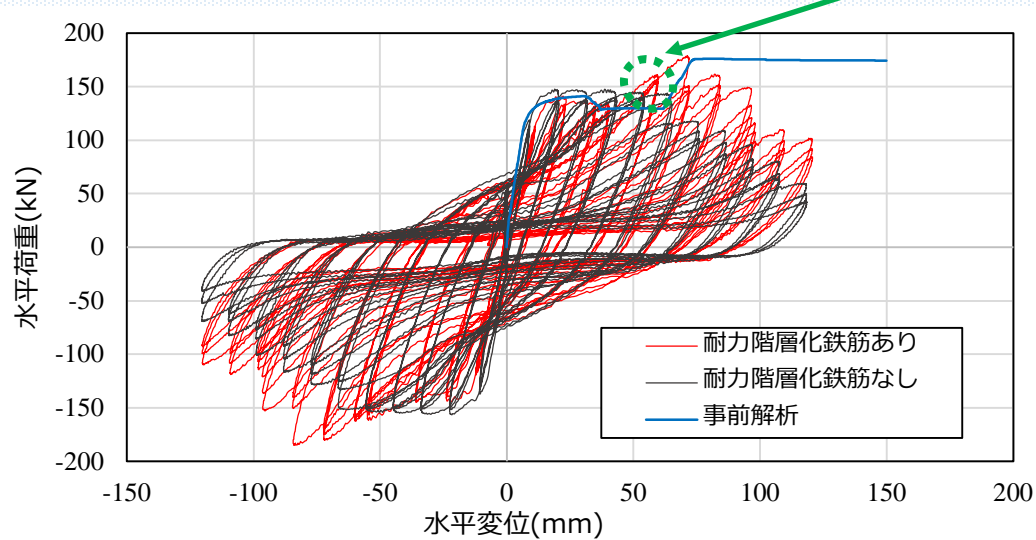
耐力階層化鉄筋
が作動開始



6 δ_y 載荷時

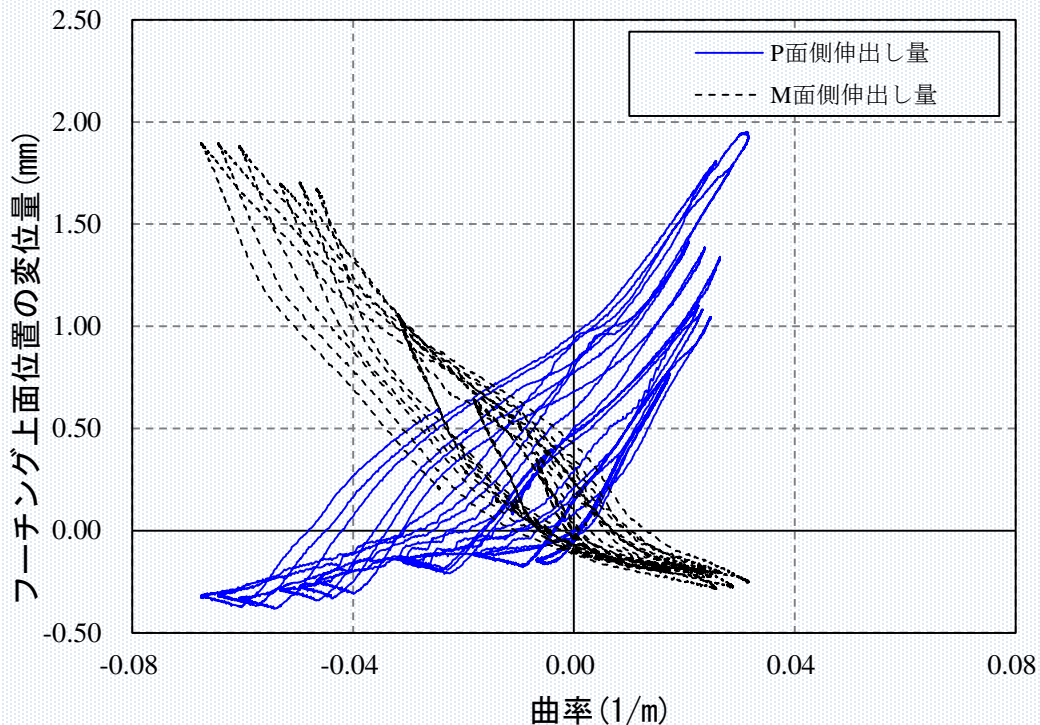
※P面側のひずみを示す

- 想定よりも早い段階で耐力階層化鉄筋が作動
 - 供試体の設計段階では、水平変位が63mmから耐力階層化鉄筋が作動するはずが、実験では $5\delta_y$ (55mm) から作動を開始したことが確認



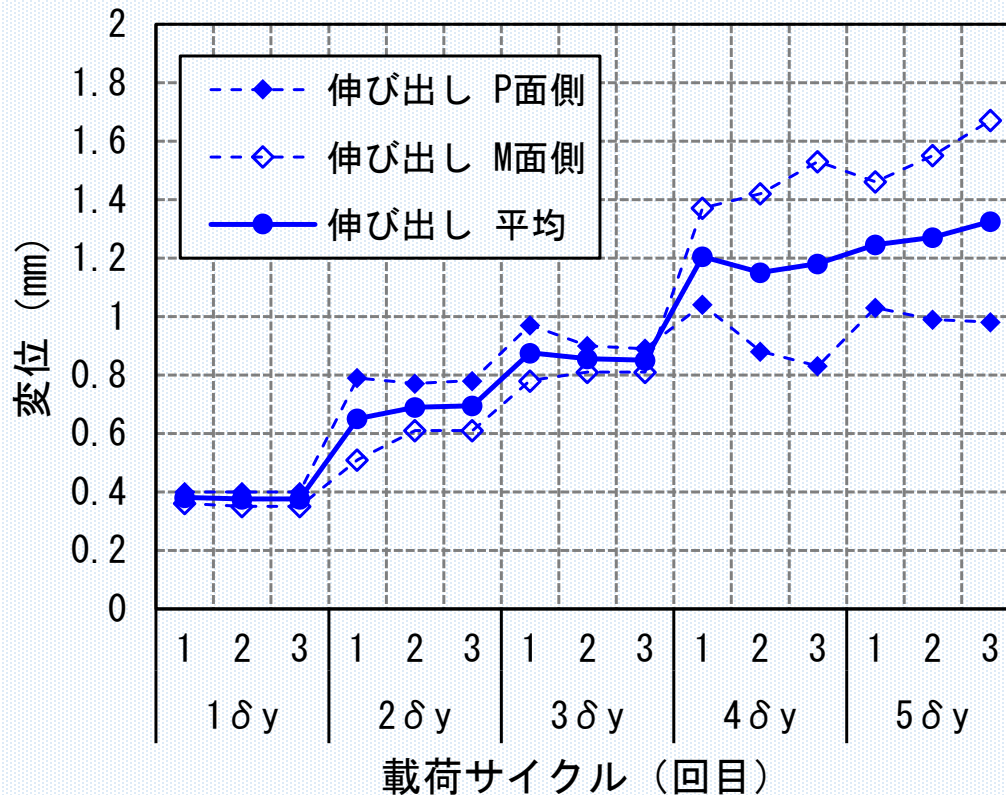
- 耐力階層化鉄筋の作動変位に影響を与えた要因
 - フーチング内部における柱の軸方向鉄筋の伸び出し (弾性変形) に着目

- 柱のフーチング上面位置の変位量と曲率の関係
 - 載荷変位が増加し，曲率が大きくなるにつれて，変位量も増加していることが確認
 - 曲率が0の時の変位量の結果から，変位が残留しており，橋脚の残留伸びの発生が確認された
 - フーチング内部の軸方向鉄筋の塑性変形が発生

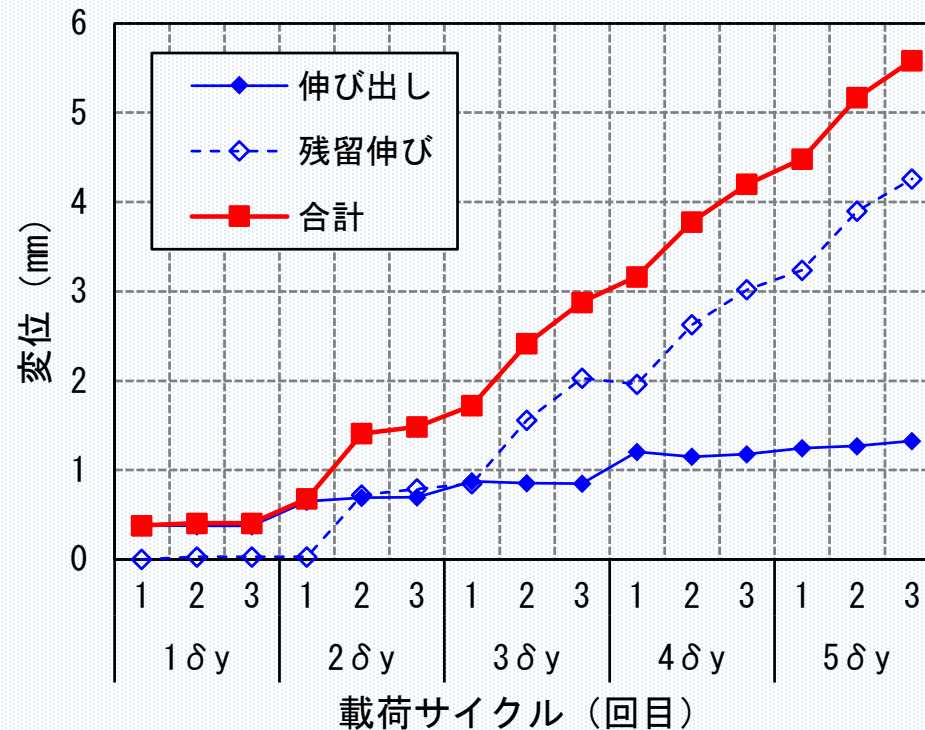


軸方向鉄筋の伸び出し量の推移

- 耐力階層化鉄筋が作動開始した $5\delta_y$ 載荷時には、P面側、M面側平均して1.33mmの伸び出しが発生
- 耐力階層化鉄筋の遊間を減少させた可能性が示唆



- 載荷荷重の増大に伴う橋脚の残留伸びの発生
 - 引張側の開口ひび割れの挙動によってフーチング上面位置に変形が残留したものと推測される
 - 橋脚の残留伸びによって、耐力階層化鉄筋が上方に移動し、遊間を減少させた可能性があると考えられる



□ 耐力階層化鉄筋の遊間長の設定

- 遊間長の設定にあたっては、橋脚の曲げ変形の影響に加えて、軸方向鉄筋の伸び出し及び橋脚の残留伸びの影響を考慮する必要があると考えられる

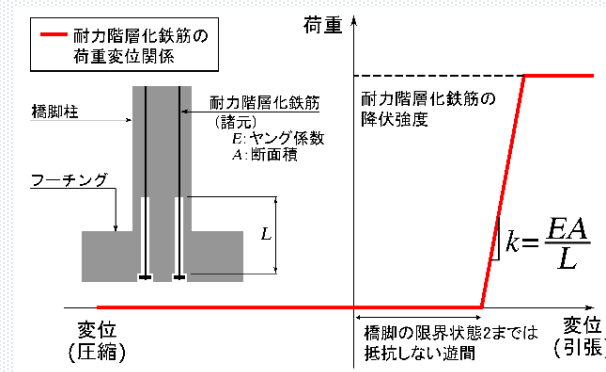
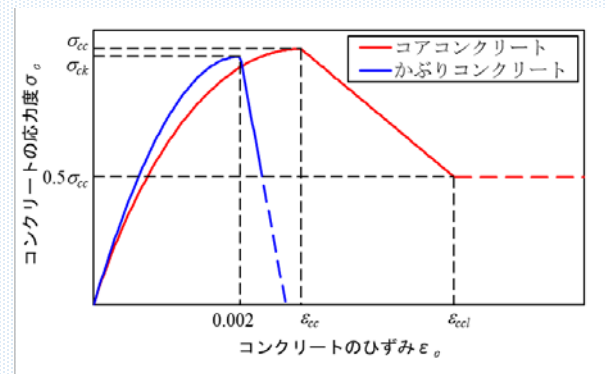
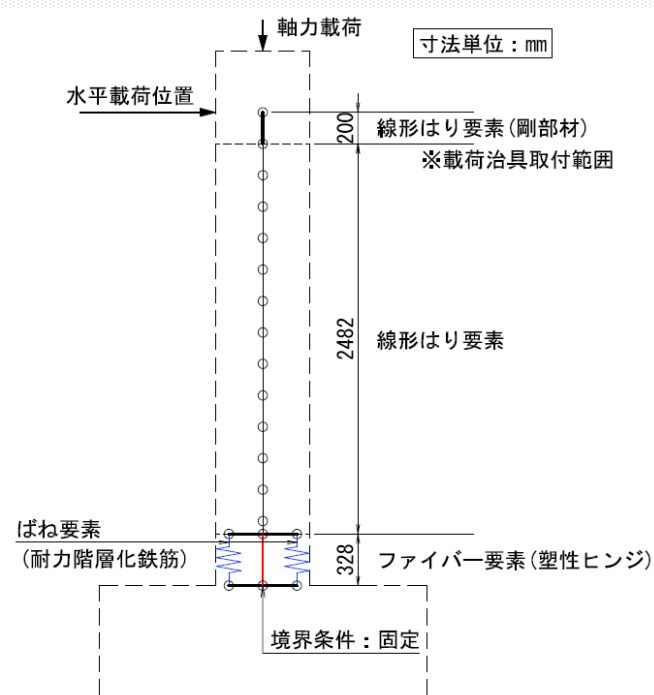
$$dx = \phi'_{is} \gamma'_{is} L_P + L_{enl} + L_{res}$$

□ 載荷実験の時と同様の橋脚の水平変位に対して耐力階層化鉄筋が作動するよう再現解析を実施

- 載荷実験と同様の水平変位で耐力階層化鉄筋が作動開始する場合の遊間長を推定
- その時の軸方向鉄筋の伸び出し及び橋脚の残留伸びに伴う耐力階層化鉄筋の変位量を実験結果から推定

再現解析で使用した骨組みモデル

- 供試体作成時に使用した骨組みモデルを一部改変し、プッシュオーバー解析を行った

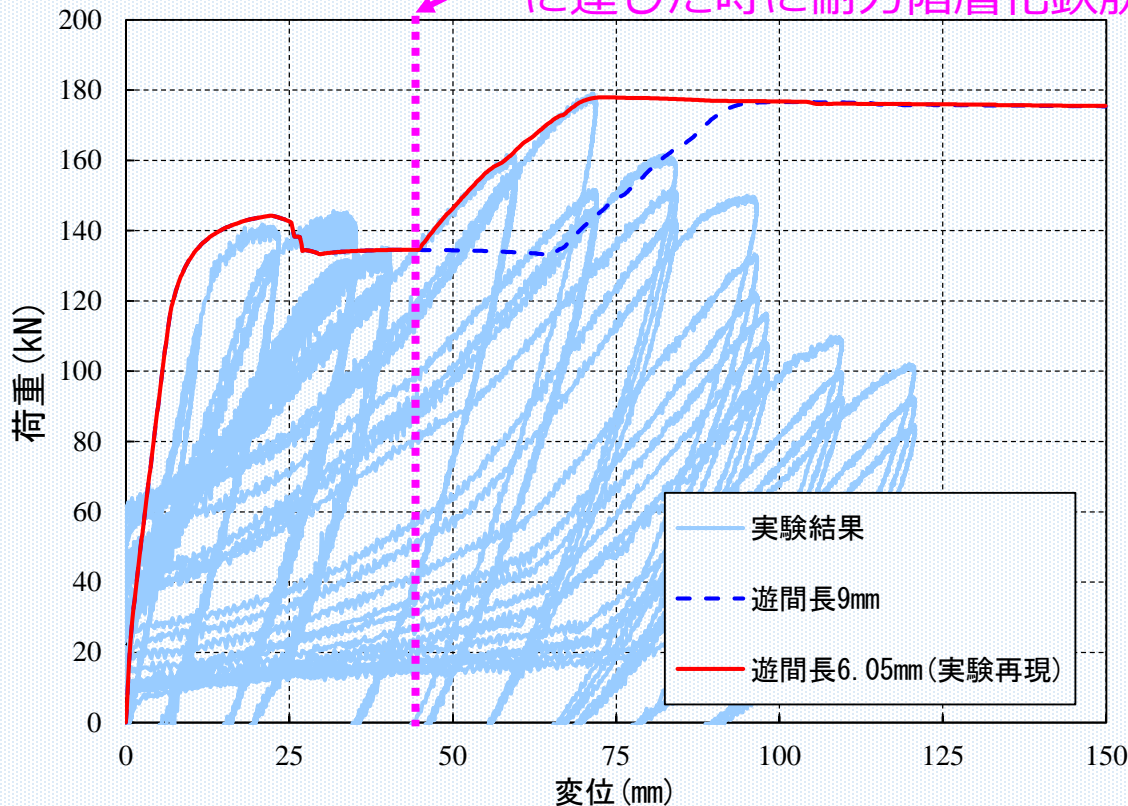


- 材料物性値は供試体作成時の材料試験の結果を適用
- 軸方向鉄筋は修正Menegotto-Pintoモデルを使用*

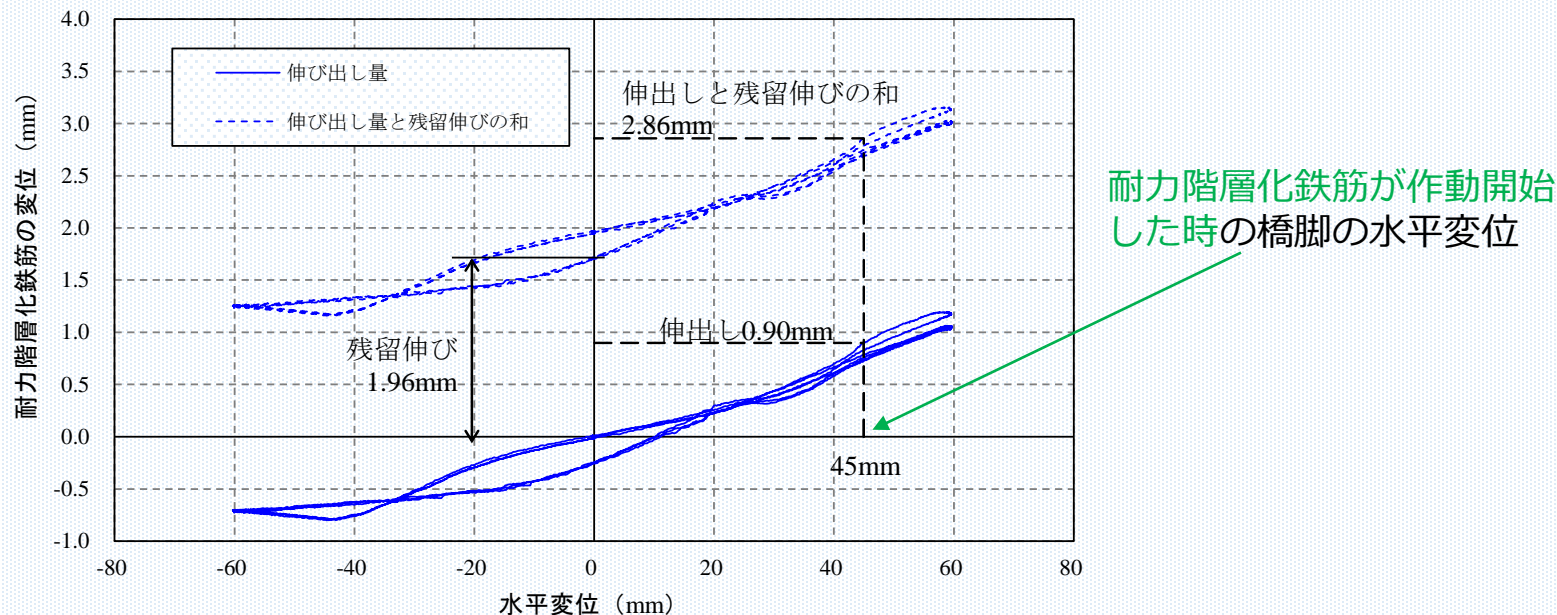
*堺淳一, 川島一彦: 部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正Menegotto-Pintoモデルの提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.159-169, 2003.

- 再現解析の結果，耐力階層化鉄筋の遊間長を6.05mmと設定した場合に実験結果と整合
- 設計遊間長は9mmであることから，2.95mm分遊間が減少していたことになる

載荷実験では，橋脚の水平変位が45mmに達した時に耐力階層化鉄筋が作動開始



- ❑ 載荷実験の結果に基づき，耐力階層化鉄筋の作動開始時の伸び出し，残留伸びの影響を推定
- ❑ 耐力階層化鉄筋位置での変位は2.86mmであり，再現解析で推定された遊間長の減少分とほぼ一致 (2.95mm)



耐力階層化鉄筋を用いた構造の検討にあたっては，軸方向鉄筋の伸び出しと橋脚の残留伸びの影響を考慮する必要性が確認された

- 耐力階層化鉄筋を用いたRC橋脚の応答評価
 - 載荷実験を通じて、従来は数値解析での評価に留まっていた**新たな橋脚構造の実現可能性**を確認
 - 設計上の想定どおり、耐力階層化鉄筋が**橋脚耐力を再度上昇させる効果を有することが**確認された
 - 橋脚の耐力に対する鋼管の影響は小さく、鋼管を用いた**構造の妥当性**が確認された

- 耐力階層化鉄筋を用いた構造の設計時の留意点
 - 再現解析を通じて、軸方向鉄筋の伸び出し及び橋脚の残留伸びが遊間長に影響を及ぼすことを明らかにし、**設計時の留意点に関する知見を得た**

- 耐力階層化鉄筋を用いた新たな橋脚構造の実装に向けた検討
 - 部材耐力のばらつきを考慮した検討 (小林ら(2023)*)
 - 軸方向鉄筋の伸び出し及び橋脚の残留のびの推定方法に関する検討
 - 伸び出しについては推定方法ごとの結果のばらつきがあり、残留のびについては定式化された手法は提案されていない
 - 超過外力が作用した場合を想定した耐力階層化鉄筋の点検・復旧方法に関する検討

- 崩壊シナリオデザイン設計法の実現に向けた検討
 - 橋脚だけでなく、上部構造や基礎などを含む橋全体を対象とした耐力階層化による損傷制御に関する検討