

鋼管・コンクリート複合構造橋脚の三次元非線形有限要素解析

加藤敏明* , 家村浩和**

* 工修 (株)大林組土木技術本部設計第一部課長 (〒113-0033 東京都文京区本郷2-2-9)

** 工博 京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻教授 (〒606-8317 京都府京都市左京区吉田本町)

鋼管・コンクリート複合構造橋脚は、断面内に配置した鋼管と帯鉄筋に高強度鋼より線を用いたR C構造から成る新形式の複合構造であり、高いじん性能と同時に大変形後においても残留変位が微小であることが、静的交番載荷実験およびハイブリッド地震応答実験で確認されてきている。またこれらの材料の組合せは、施工面でも省力化や急速施工等に寄与することが期待されており、主として高速道路の高橋脚に採用されつつある。しかしながら、本複合構造の力学的特性や耐震性能評価法に関する研究は、開発して間もないため未だ十分とはいえない。本論文では、三次元非線形有限要素解析により、付着を考慮した鋼管の累加強度、鋼管のじん性への寄与およびせん断力負担等、本複合構造の水平耐力・破壊メカニズムについて定量的に解明する。

Key Word : Composite bridge pier, Nonlinear analysis, High ductility

1. はじめに

阪神淡路大震災以降、鋼製橋脚及びRC橋脚ともに耐震性能向上をめざした研究が積極的に行われてきている。耐震性能には大別して大地震における変形性能と震災後の復旧性能があり、相方の性能を同時に満足する構造の開発が求められている。

鋼製橋脚の場合は、橋脚内へのコンクリート充填あるいは補剛版による変形性能の向上が図られ、一方RC橋脚の場合は、中間帯鉄筋による拘束効果により変形性能の向上が図られている。しかしながら大きな塑性変形を与える場合は、一般に残留変位が大きくなる傾向がある。震災で損傷を受けた橋脚で大きな残留変位のため、撤去再建を余儀なくされた橋脚が多数あったこともあり、変形性能の向上と同時に残留変位を小さくする新技術の開発も重要であると考えられる。

本研究対象の鋼管・コンクリート複合構造橋脚は、図-1に示すように断面内に配置した鋼管と外周の帯鉄筋に高強度鋼より線を組合わせた新しい構造形式である。鋼管は大口徑（外径1.0~1.5m程度）のものが通常複数本配置される。これは主として高橋脚を対象とした大断面であることおよび施工性・経済性を考慮したことによる。鋼管を断面内に配置することにより、曲げ耐力に対しては不利になるが、これを外周の縦鉄筋で補っている。一方利点としては、鋼管の防食のほか局部座屈の防止および後述するように残留変位を少なくする効果がある。高強度鋼より線は、らせん巻きによる補強効果、せん断耐力の向上および施工性の向上を意図している。

鋼管・コンクリート複合構造橋脚に関する研究は、開

発されて間もないことから、耐震性能や力学的特性の解明は十分とはいえない。本文では、模型静的載荷実験とこれに対する三次元有言要素解析を実施し、比較検討するとともに鋼管とコンクリートの付着の影響による力学的特性を定量的に示した。

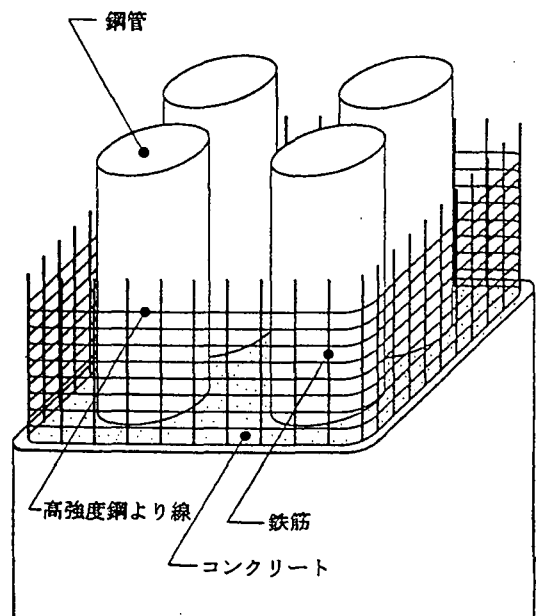


図-1 鋼管・コンクリート複合構造

2. 静的交番模型載荷実験

2.1 供試体の諸元

実験に用いた供試体の諸元を図-2～3ならびに表-1に示す。せん断スパンは1200mm、せん断スパン比が4.0である。

図-3に示すように、断面内には外径76.3mm、板厚2.8mmの鋼管 STK400 を4本(鋼材比2.53%)と鉄筋 SD295 を8本(鉄筋比0.56%)配置した。帯鉄筋にはP C鋼線φ2.0を使用し、50mmの間隔でらせん巻付けした。P C鋼線の帯鉄筋比は0.04% (SD345 に対する降伏強度換算帯鉄筋比0.18%)となる。使用鋼材およびコンクリートの強度をそれぞれ表-2、表-3に示す。

2.2 実験システム

実験システム全体図を図-4に示す。載荷方法は軸力一定下の水平一軸載荷とした。載荷点では水平移動および回転が自由となる構造を採用した。

2.3 載荷方法

せん断スパンの1%の変位を基準として、この整数倍の変位振幅で正負2回ずつ、一定軸力(294kN)のもと軸力を負担できなくなる終局状態まで漸増載荷した。

2.4 実験結果

供試体の荷重-変位関係を図-5に示す。履歴特性をみると最大荷重に達した後徐々に耐力低下しながら終局にいたる課程となっている。最大耐力時以降基部での帯鉄筋破断、軸方向鉄筋座屈が発生した後もかなり大きな残存耐力を保有している。

表-1 鋼管供試体諸量

実験タイプ	a/d	軸力 (N/mm ²)	鋼管比 Pt (%)	軸方向鉄筋比 Pr (%)	せん断補筋 間隔(mm)	帯鉄筋比 P (%)
動的曲げ破壊型	4.0	3.7	2.53	0.56	50	0.04

表-2 使用鋼材の強度

鉄筋の規格	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
軸方向鉄筋 SD295 D10	373	545
鋼管 (STK400) φ76.3, +2.8	235	402
P C 鋼棒 φ2.0	1600	1909

表-3 コンクリートの強度

圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
30.3	2.9	4.8

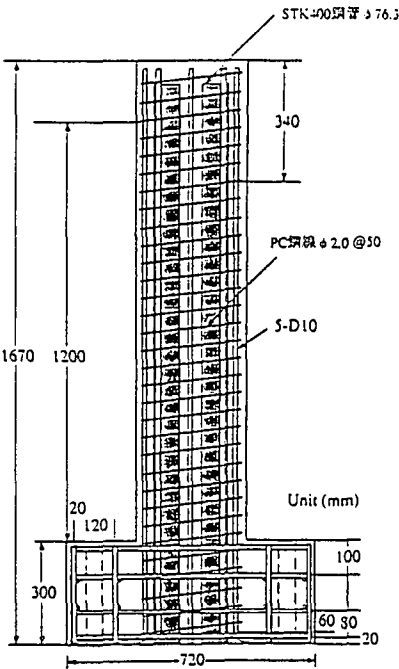


図-2 載荷実験供試体

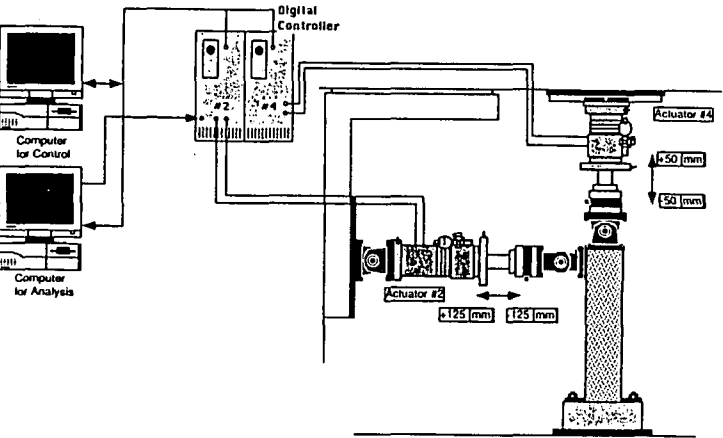


図-4 実験システム

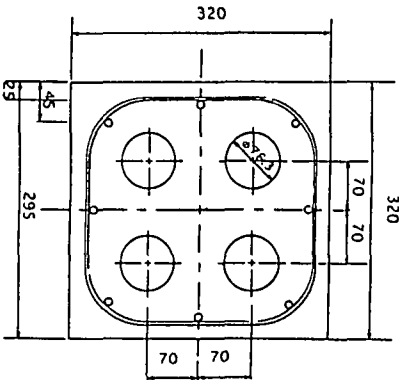


図-3 断面図

3. 三次元非線形有限要素解析

3.1 解析モデル

解析対象は鋼管・コンクリート複合構造橋脚の載荷実験供試体であり、材料の実強度を採用した。要素分割モデルを図-6 に示す。解析モデルは、フーチングを有する1/2対称断面モデルでフーチング下端を完全拘束した。モデル化に用いた要素は以下である。

- ・鋼管：4節点シェル要素
- ・コンクリート：8節点六面体要素
- ・鉄筋および鋼より線：トラス／はり要素
- ・鋼管とコンクリート間：フィルム要素

3.2 解析手法

解析には、鋼・コンクリート材料の材料非線形および幾何非線形を考慮した三次元非線形解析プログラム（F I N A L：大林組技術研究所）を用いた。

3.3 材料特性

(1) 鋼材

図-7 に示すようにバイリニア型の非線形モデルとした。

(2) コンクリート

①圧縮応力～ひずみ特性

鋼管・コンクリート複合構造橋脚のように、鋼材により拘束された部材のコンクリートの圧縮特性は、拘束応力に応じて強度とじん性が大きく変化する。このようなコンクリートは一般には三軸応力状態にあり、その応力～ひずみ関係は一軸圧縮試験から得られるものとはかなり異なる。そこで本解析では、長沼が提案する Ahmad らの修正モデルを適用し、鋼管と高強度鋼より線で拘束される部材の耐力・変形性能を評価した。¹⁾

②引張応力～ひずみ関係

コンクリートのテンションステフニングは考慮せず、Tension-cut-off モデルを適用した。

③ポアソン比

コンクリートのポアソン比は、非線形性を考慮した。

3.4 載荷方法

一定軸力 $3.7\text{N}/\text{mm}^2$ のもと、載荷実験と同様のせん断スパン 1.2m 位置で、水平一方向に増分値 0.8mm により単調載荷した。

表-4 解析ケース一覧表

解 析 ケース	実 験 タイプ	せん断 スパン	鋼管コンクリートの 付着特性
			付着強度 (kgf/cm^2)
p4-f-2	曲 げ 破壊型	1200mm	1.0
p4-f-3			5.0
p4-f-4			10.0

3.5 解析ケース

本複合構造の場合、鋼管とコンクリートの付着特性が破壊メカニズムに影響すると考えられるため、付着強度をパラメーターとして解析を行った。鋼管とコンクリートの付着特性は、フィルム要素によりモデル化し、表-4 に示すように、すべり変位量 1cm に対するせん断応力 $1.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、 $10.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、 $5.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ の3ケースをパラメーターとして解析した。

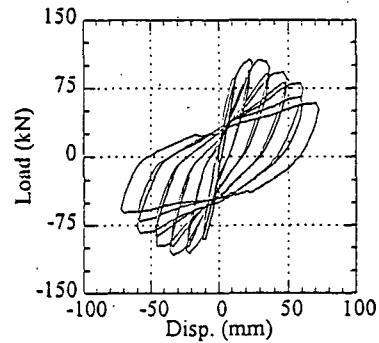


図-5 実験結果（変位－荷重曲線）

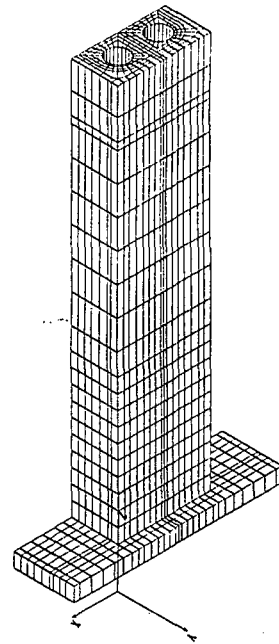


図-6 解析モデル

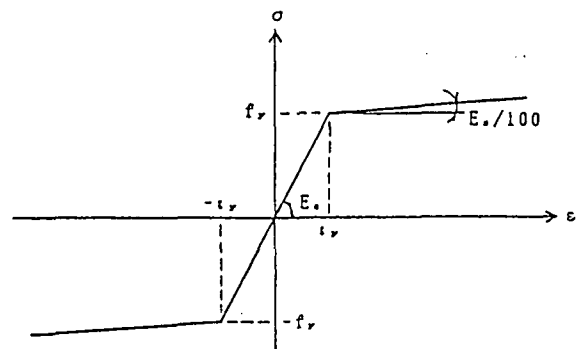


図-7 鋼材のモデル化

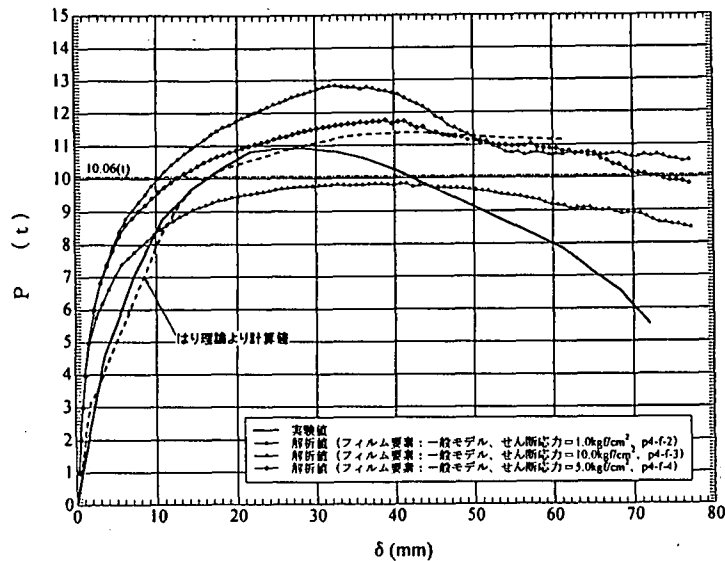


図-8 実験結果と解析結果の比較 (変位-荷重関係)

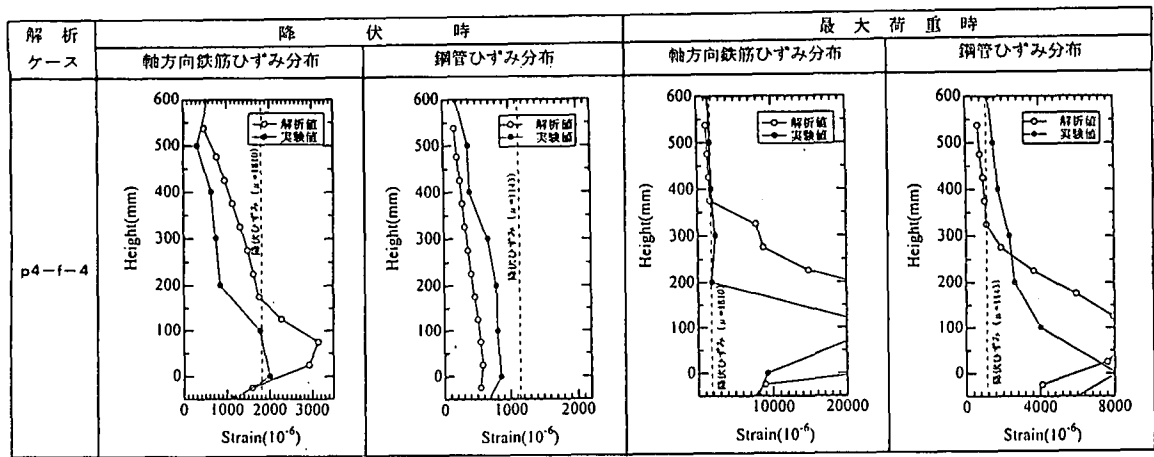


図-9 鋼材の軸方向ひずみ分布

4. 解析結果

4.1 荷重-変位関係

実験結果と解析結果の比較を図-8に示す。実験結果は、繰返し载荷履歴曲線の包絡線を示している。実験結果は、繰返し载荷の影響により、最大耐力後変位の増加に対して耐力低下が見られる。本複合構造の場合終局状態近辺でも急激な耐力低下が見られず、徐々に耐力低下していく点の特徴である。また同図には、RC理論式 (はり理論) による計算値を点線で示している。実験値と比較すると最大耐力までよく一致しているが、それ以降の耐力低下は異なっている。

解析結果からは、以下の点がまとめられる。

- ①せん断応力を 10.0 kgf/cm^2 (ケース p4-f-3) とした場合は、最大耐力が実験値の 18% 増の値を、せん断応力 1.0 kgf/cm^2 (ケース p4-f-2) は、 10% 下回る値を示した。中間の 5.0 kgf/cm^2 (ケース p4-f-4) が実験値と比較的近い値を示している。この結果から、付着強度 $3.0 \sim 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ 程度が、実験値と解析値の整合性が良いと考えられる。

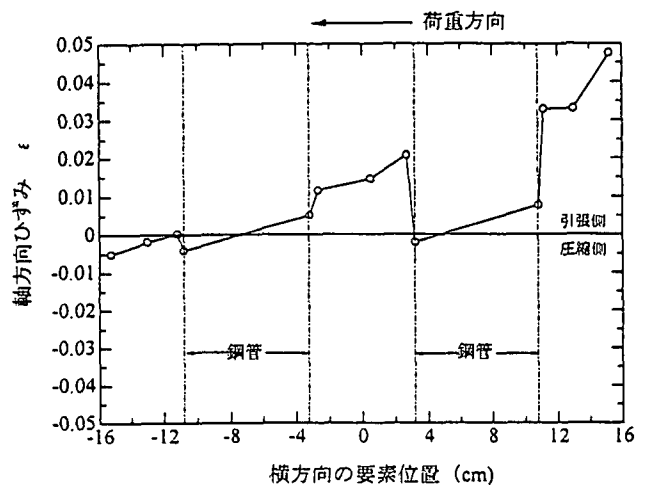


図-10 断面方向ひずみ分布

②解析値は、p4-f-3 を除き最大耐力後、耐力が安定している。一方実験値の耐力低下は、主として繰返し載荷によるコンクリート部分の強度低下に起因するものと考えられる。

③初期剛性については、解析値が実験値よりも大きくなっている。これはフーチングのモデル化が実験と異なっているためと考えられる。この点については、解析モデルを改良する必要がある。

4.2 鋼材の軸方向ひずみ分布

各ケースほぼ同様の傾向のため、一例として図-9にケース p4-f-4 を示す。軸方向鉄筋降伏時は、鋼管がまだ降伏点に達していない点および最大荷重時における塑性ヒンジ部の鋼材ひずみ量が良好に解析できている。

4.3 断面方向ひずみ分布

破壊メカニズムを明確にするため、図-10 にケース p4-f-4 最大荷重時の断面方向ひずみ分布を示す。コンクリートのひずみがほぼ平面保持されているのに対し、鋼管部分は、付着特性の影響を受けて単独のひずみ分布となっている。図-11 は、鋼管の応力分布の詳細を示している。これらの結果を以下にまとめる。

①左右それぞれの鋼管は、降伏応力に達している。
②本複合構造は、鋼管の付着切れにより RC 部分と鋼管部分の累加強度となっている。

③解析結果より、RC 部分と鋼管部分の累加強度式により、部材の水平耐力を算定すると以下のようになる。

RC 部分の水平耐力 P_{ru} は、はり理論により、

$$P_{ru} = 6.88 \text{ tf}$$

鋼管の累加水平耐力 P_{tu} は、以下で与えられるとする。

$$P_{tu} = P_{tu1} + P_{tu2}$$

$$P_{tu1} = \sum (A_s \cdot \sigma_z \cdot e_i) / L$$

$$P_{tu2} = \sum (A_s \cdot \sigma_z \cdot e_j) / L$$

ここに、

P_{tu1} : 断面中立軸位置に対する鋼管の水平耐力

P_{tu2} : 鋼管の中立軸に対する水平耐力

A_s : 鋼管の応力 σ_z に対する各要素断面積

σ_z : 鋼管の各要素の応力度

e_i : 断面中立軸から鋼管断面までの偏心距離

e_j : 鋼管の中立軸から鋼管断面までの偏心距離

L : せん断スパン

以上より、

$$P_{tu1} = 1.97 \text{ tf}$$

$$P_{tu2} = 1.21 \text{ tf}$$

$$P_{tu} = 1.97 + 1.21 = 3.18 \text{ tf}$$

よって、累加強度式による水平耐力 P_s は、

$$P_s = P_{ru} + P_{tu} = 6.88 + 3.18$$

$$= 10.06 \text{ tf}$$

この P_s は、実験値の最大水平耐力 10.9tf に対し 8 %

小さいが、この差は RC 部分のコンクリート強度の推定精度に起因しているものと考えられる。したがって、本複合構造の水平耐力の算定には、上記の累加強度式が適用できるものと考えられる。

④静的交番載荷実験と合わせて実施したハイブリッド地震応答実験では最大応答塑性率 9.5 に対して残留変位が 1/100 以下と小さい値となった。残留変位が小さいという本複合構造の特徴は、解析結果から次のように推定される。すなわち図-11 に示すように鋼管がコンクリートのひずみと分離して弾塑性ひずみ分布を有するため、大変形時においても塑性変形量に依存しない鋼管による復元力が発生するメカニズムを仮定できる。

4.4 コンクリートの応力-ひずみ関係

図-12 に解析結果と鋼より線帯鉄筋の断面積から求めた道路橋示方書の式との比較を示す。

両者はよく一致しており、三軸応力下のコンクリート拘束は、道路橋示方書の式に準じてよい。通常の RC 橋脚では、帯鉄筋による拘束度が弱い場合、部材終局状態には比較的早い段階で至るが、本複合構造の場合は、帯鉄筋量が最低レベル（鉄筋比 0.04%）にもかかわらず、

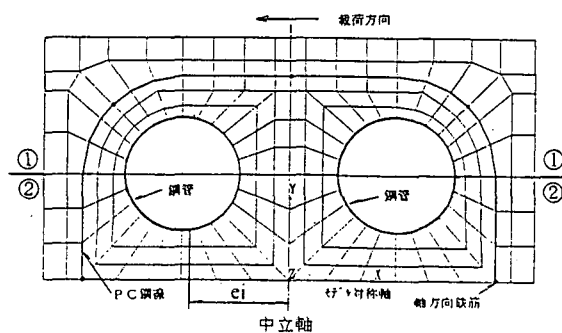
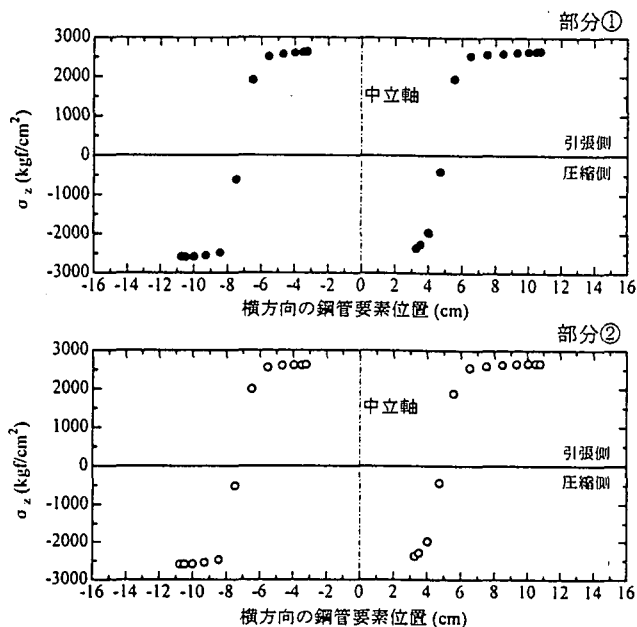


図-11 鋼管の応答分布

水平耐力を保持している。これは鋼管の存在による効果と考えられる。一つには、4.3 で述べたように鋼管の累加強度が保持されること。二つには、次節 4.5 で述べるように、鋼管のせん断力負担とひびわれ分散によりコンクリートの損傷を遅らせる効果が考えられる。

4.5 鋼管のせん断力負担

本複合構造の破壊メカニズムを推定する上で、RC部分と鋼管部分でどのようにせん断力を負担しているかを追跡することは重要である。

現段階では、せん断力に対するデータ整理が十分でないため、図-13 に鋼管のせん断力負担の一例のみを示す。

ケース p4-f-4 において最大で $800\sim 900\text{kgf/cm}^2$ のせん断応力負担が得られた。今後は、鋼より線帯鉄筋のせん断力負担、コンクリートのせん断力負担と合わせてせん断力負担のメカニズムを示したい。

5. まとめ

- (1) 鋼管・コンクリート複合構造橋脚に対して材料非線形モデルおよび付着モデルを有する三次元有限要素解析を適用することで実験では不明であった鋼管のメカニズムを定量的に評価することができた。解析手法の妥当性は、実験結果との比較により示した。ただし、境界条件の設定方法など解析技術は改良する必要がある。
- (2) 鋼管の付着強度は、 $3.0\sim 4.0\text{kgf/cm}^2$ と推定される。
- (3) 鋼管の付着切れにより、RC部分と鋼管部分で累加強度のメカニズムとなることが示された。
- (4) 鋼管に対するコンクリートの外部拘束により、鋼管の座屈が防止されるため、安定した水平耐力を保持する。
- (5) 上記 (3)、(4) の特性により、本複合構造のじん性能および残留変位の減少が説明できる。
- (6) 鋼管のせん断負担が 800kgf/cm^2 以上期待できることを示した。

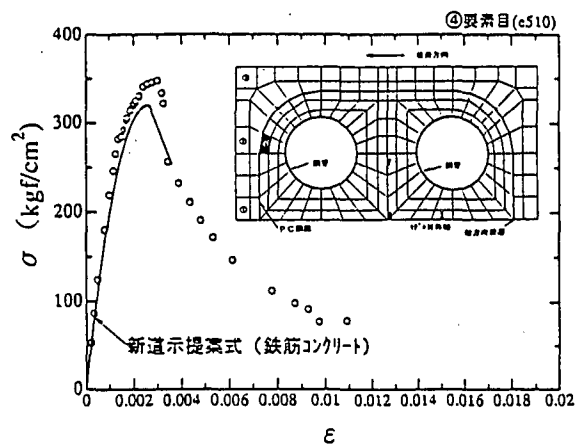


図-12 コンクリートの応力-ひずみ関係

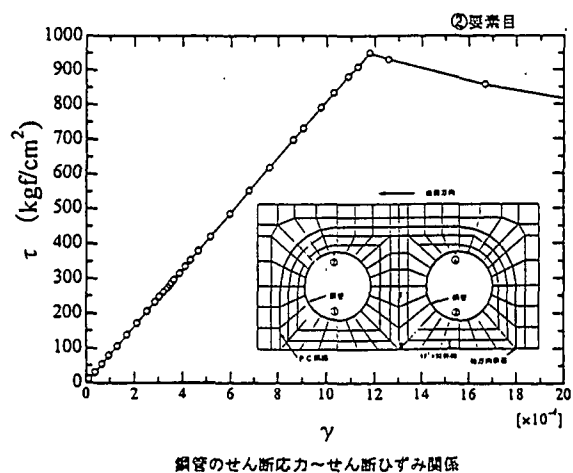


図-13 鋼管のせん断応力-せん断ひずみ関係

参考文献

- 1) 長沼：三軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第474回，163-170，1995年8月
- 2) 宇佐美：ハイダクティリティ鋼製橋脚，橋梁と基礎，97-6

(1998年8月17日受付)

A THREE DIMENSIONAL NONLINEAR ANALYSIS OF STEEL PILE-CONCRETE COMPOSITE BRIDGE PIER

Toshiaki KATO, Hirokazu IEMURA

The steel pipe-concrete composite pier exhibits not only high seismic resistance in effect of ductile steel pipe and spiral high strength strand, but also an advanced construction method.

In this paper the result of static lateral loading test for scaled model and three dimensional nonlinear FEM analysis are described. The composite pier provides high ductility and also minimum residual deformation after strong earthquake motion in this simulation.