

論文 中空式二重鋼管合成柱の繰り返し挙動

柳下 文夫^{*1}・谷平 勉^{*2}・鬼頭 宏明^{*3}・園田 恵一郎^{*4}

要旨：本研究は、同心に配置された外側鋼管と内側鋼管を有し、両鋼管間にコンクリートを充填して一体化されたセグメント形式の中空式二重鋼管合成柱に関する耐震安全性を鋼管間コンクリートの厚さに重点を置いて実験的に検討したものである。実験の結果、二重鋼管合成柱の変形性能に関して、鋼管断面の破断による耐力低下が顕著になる高じん性域に至るまで、コンクリート厚低減の影響は軽微であることが分かった。さらに、コンクリート厚の低減が及ぼす耐荷力への影響や最終破壊形態の違いとその推移を確認できた。

キーワード：二重鋼管，合成構造，柱，じん性，耐震性，コンクリート

1. はじめに

近年の高速道路網整備において、特に地理的条件の制約により、路線計画高さが50mを越える高橋脚橋梁の建設が必要とされる場合が少なくない。同心に配置された外側鋼管と内側鋼管を有し、両鋼管間にコンクリートを充填して一体化された中空式二重鋼管合成柱は、その基本特性として、自重の軽減を主たる要因とした高耐震性構造物の構築の可能性はもとより、施工性の向上が生み出す工期の短縮や省力化といった経済性能を具備するなど多くの優位点を有し、適用の拡大が期待できる構造形式といえる。しかし、同構造形式の力学的特性は、鋼管とコンクリートの材料特性に支配されるのみでなく、鋼管と充填コンクリートとの相互作用、充填コンクリートの厚さ¹⁾、柱脚における中込コンクリートの有無と打設範囲、基礎中の鋼管の定着方法、外側および内側鋼管の座屈挙動、鋼管の亀裂の発生等数多くの要因に影響を受けることから、より広範な検討が必要と思われる。

そこで本研究では、充填コンクリートの厚さに着目し、3体の中空式二重鋼管合成柱試験体に対する正負交番繰り返し載荷実験を行い、耐荷力と変形性能等について比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1に試験体形状とその一覧を示す。試験体は、想定した直径4.5mの円形断面を有する橋脚に対して1/10モデルとし、充填コンクリート厚75mm(Unit-1)、57.5mm(Unit-2)、40mm(Unit-3)を設定した3試験体を作製した。また試験体は、柱部において鉄筋およびダイヤフラムを一切使用することなく、鋼管とコンクリートとの付着を確保する措置もとっていない極めてシンプルな断面形態を有している。なお、同構造形式における高橋脚の建設に際し、要求項目の選択肢の一つとなるセグメント化に関しても、柱を

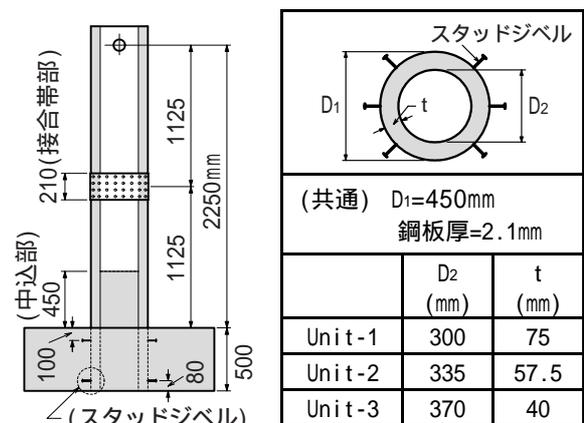


図-1 試験体一覧

*1 近畿大学助教授 理工学部社会環境工学科 工博 (正会員)
 *2 近畿大学教授 理工学部社会環境工学科 工博 (正会員)
 *3 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科 博士(工学) (正会員)
 *4 大阪工業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

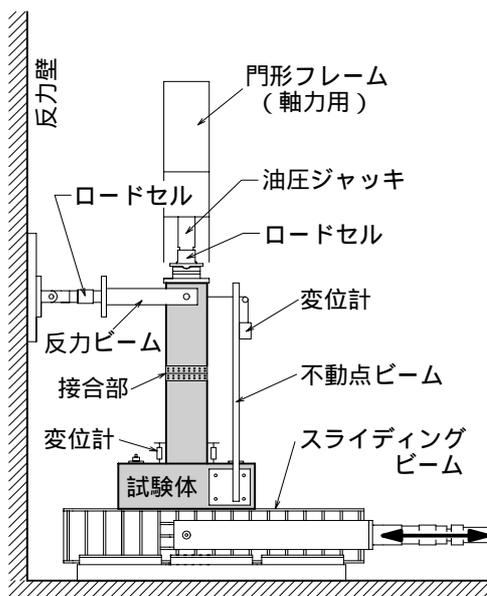


図 - 2 荷重装置と試験体

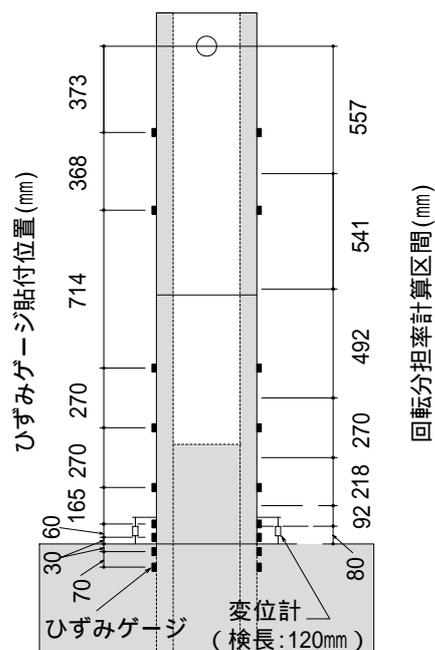


図 - 3 ひずみゲージ貼付 & 変位計位置

高さ方向に2分割する形で対応した。セグメントの結合は、4mm厚の鋼板結合帯を用いてハイテンボルトによる締め付けと隅肉溶接により行った。さらに、基部内における鋼管の定着は、外側鋼管に放射状（各段45°方向に6本）に溶着した13mm頭付きスタッドジベルにより行った。溶着位置は、基部上面から下方に100mmおよび基部下面から上方に80mmの2カ所である。なお、二重鋼管間に対するコンクリートの打設は、専用ホッパーを使用し、棒状バイブレーターでその投入を補助する形で行った。また、柱基部では、外側鋼管直径分の高さまで中込めコンクリートを打設した。

柱部に打設されたコンクリートは早強セメントを使用したレディーミクストコンクリートであり、実圧縮強度は21N/mm²である。また、鋼管は材質SS400の平鋼板を造管して使用した。その機械的性質は、実降伏点強度259N/mm²、実破断強度445N/mm²である。

2.2 荷重方法と荷重スケジュール

図 - 2 に試荷重方法を示す。試験体はフラットローラー（摩擦係数 $\mu = 0.002$ ）で上下を拘束して浮き上がりを防止したスライディングビーム上に固定し、反力壁と試験体頂部を両端ピン支持の反力ビームで連結した。荷重は、複動式油圧ジャック

を用い、一定軸方向応力下（中込めコンクリート位置断面に対して0.98N/mm²）において、スライディングビームを直接水平滑動させる方法で正負交番繰り返し荷重を行った。

荷重は水平方向の変位制御で、柱頂部の部材角1/200、1/100、1/67、1/50、1/40、1/33、1/29、1/25で各3回の正負繰り返し荷重を行い、以後、鋼管の破断による耐力低下が著しくなるまで漸増による繰り返し荷重を行い実験を終了した。

2.3 測定項目

測定項目は、荷重荷重、試験体の頂部に取り付けた不動点ビームを介して計測した柱頭水平変位、鋼管基部近傍の座屈の状況と材軸方向の曲率分布（回転分担率）を調べる目的で計測した脚部の平均ひずみ量（検長120mm）、定着部内を含む鋼管表面の軸方向ひずみ（塑性ひずみゲージ使用）等である。図 - 3 にひずみゲージの貼付位置および回転分担率を求めた各区間長を示す。なお、鋼管座屈の発現やその進行状況の確認は、基部近傍の鋼管表面に水性白色ペンキを塗布し、さらに、描いたグリッドを通して目視で行った。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重 - 変形関係と破壊過程

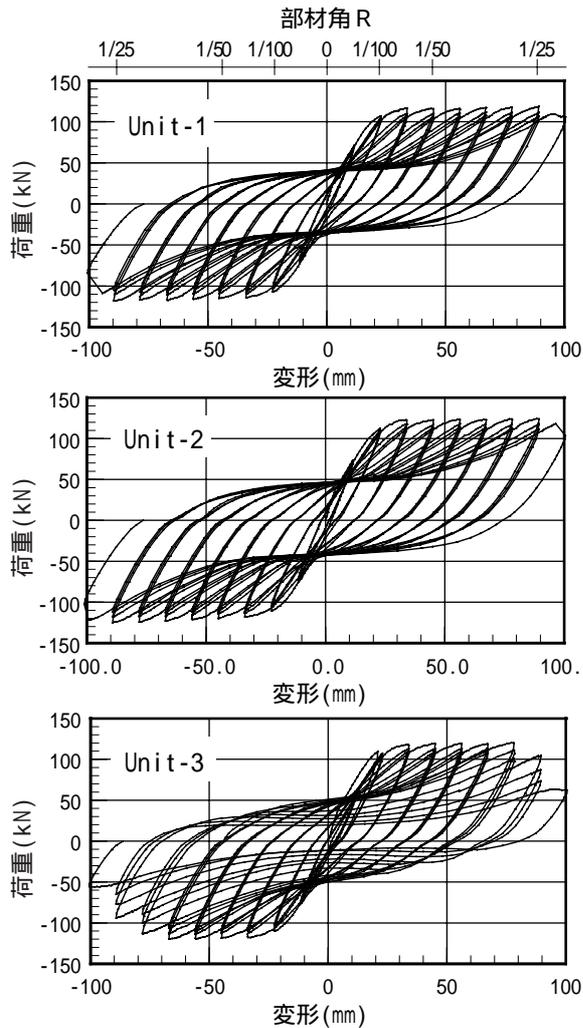
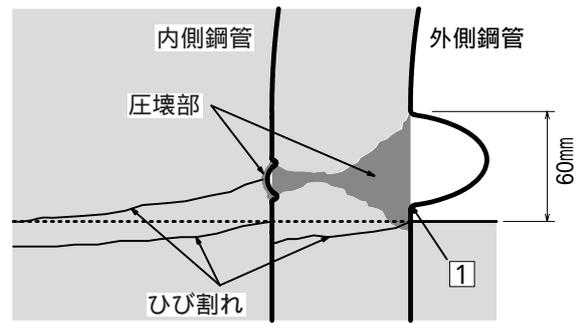
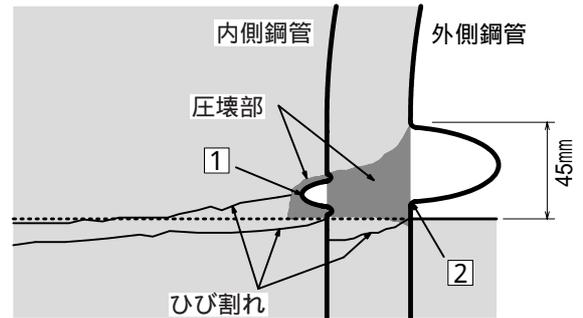


図 - 4 各試験体の荷重 - 変形関係

図 - 4 に各試験体の荷重 - 変形関係を示す。荷重 - 変形関係から見た各試験体の破壊進行状況は次の通りである。Unit-1およびUnit-2の場合、部材角 $R=1/25$ の大変形に至るまで耐力低下を起こさず、極めて安定した挙動を示した。その後、 $R=1/22.5$ で鋼材の破断による耐力低下が生じた。また、Unit-3の場合も、部材角 $R=1/29$ の大変形に至るまで耐力低下を起こさず、同様に安定した挙動を示した。履歴ループの形状において、3試験体とも部材角 $R=1/67$ までは紡錘形を示した。その後、逆S字型に移行している。実験時の観察によると、 $R=1/67 \sim R=1/50$ にかけて柱最下部の外側鋼管に座屈現象が現れたことから、外側鋼管の座屈および内部コンクリートの圧壊の顕在化がこのループ形状の移行に起因していると思われる。また、全ての試験体の最終的な耐力低下は、外側



(a) Unit-1,2の内部破壊状況



(b) Unit-3の内部破壊状況

図 - 5 鋼管およびコンクリートの破壊状況

および内側鋼管の破断による。

次に、実験終了後に試験体を切断・解体することにより観察された内部の破壊状況（図 - 5 参照）を考察する。Unit-1およびUnit-2について、外側鋼管の座屈は基礎上面から約60mmの範囲で提灯形を呈した。Unit-3の場合は同形状で約45mmであった。すなわち、外側充填コンクリート厚が薄いほど鋼管の座屈位置が下がる傾向が示された。また、外側充填コンクリートの圧壊は、その厚さが薄いほど顕著であった。Unit-1およびUnit-2の内側鋼管の座屈の程度は軽微であり、部材角 $R=1/22.5$ の段階でも破断しなかった。一方、Unit-3の内側鋼管は、周辺コンクリートの圧壊に伴う座屈が生じた。外側鋼管に比して座屈長さが短く、その形状も鋭角であったことから、外側鋼管に先んじて内側鋼管が破断（図中の①②は破断の箇所とその順序を示す）した原因を示したものである。全ての試験体のコンクリートに生じた引張りひび割れは、柱最下端近傍に2本、中込上面位置に1本の計3本とその数は極めて少なく、集中する傾向が示された。

3.2 鋼管表面に生じる軸方向ひずみ

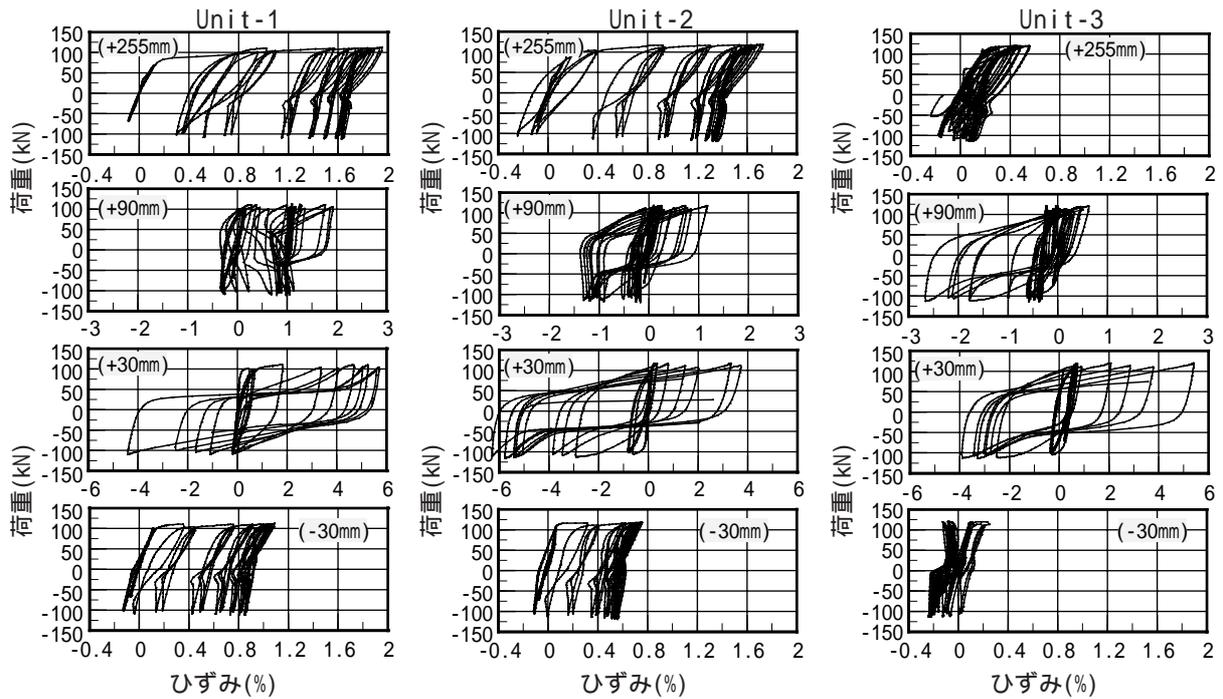


図 - 6 外側鋼管に生じたひずみ（基盤部上面から，-30mm，+30mm，+90mm，+225mm の位置）

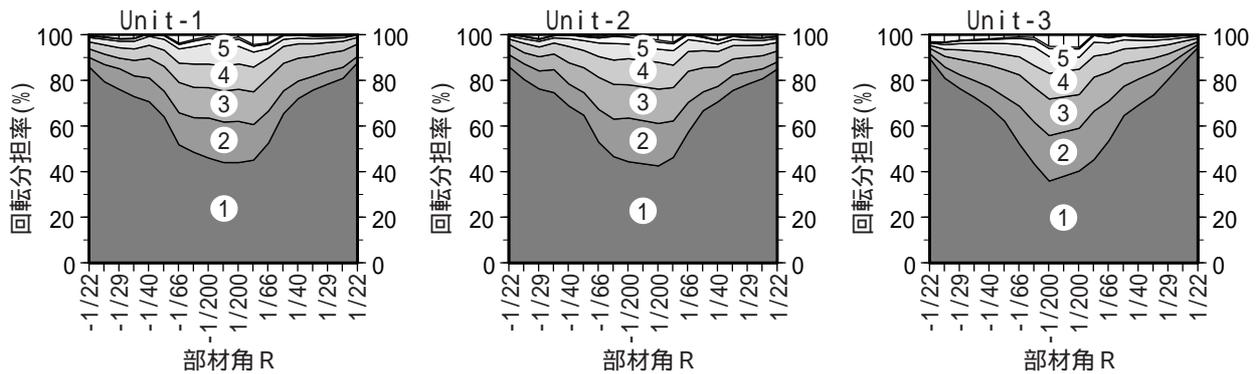


図 - 7 全変形量に対する材軸方向の回転分担率

図 - 6 に各試験体の鋼管表面に貼付した塑性ひずみゲージより得られたデータを抜粋して示す。基礎中（基礎上面から下方に 30mm の位置）については、充填コンクリートの厚さを増すほど大きな引張ひずみが生じた。基礎上面から上方に 30mm の位置は、すべての試験体に対してほぼ座屈頂部にあたるため、圧縮・引張ともに極めて大きなひずみが生じた。座屈直上（同 90mm の位置）では、充填コンクリート厚が大きいほど引張側にシフトしたひずみの発生状況が示され、同厚を薄くした Unit-3 では、逆に圧縮側にシフトする傾向が見られた。さらに、中込コンクリートの中間高さの位置では、そのほとんどが引張域で推移したが、Unit-3 のみ他の 2 つの試験体と比して小さなひずみを示した。これらの傾向のうち、特に、ひずみ

が圧縮域に戻らなかったのは、鋼管と充填コンクリートの付着切れや肌離れに起因する現象と考えられる。これらのことから、ひずみ分布の推移と座屈に代表される損傷の範囲とは密接な関係があると言える。

3.3 材軸方向の回転分担率

試験体頂部に水平力を载荷したときに生じる変形は、その破壊過程から、鋼管の抜け出しや基部近傍に生じる鋼管座屈にその多くが起因するものと思われる。本項では、それらの成分の増加の推移を含む回転分担率の分布状況から、充填コンクリート厚と破壊モードとの関係を中心にその特徴を述べる。回転分担率は次のように算出した。すなわち、柱付け根の部分においては、まず、座屈部分（Unit-1, 2 では下端から 80mm，Unit-3 では

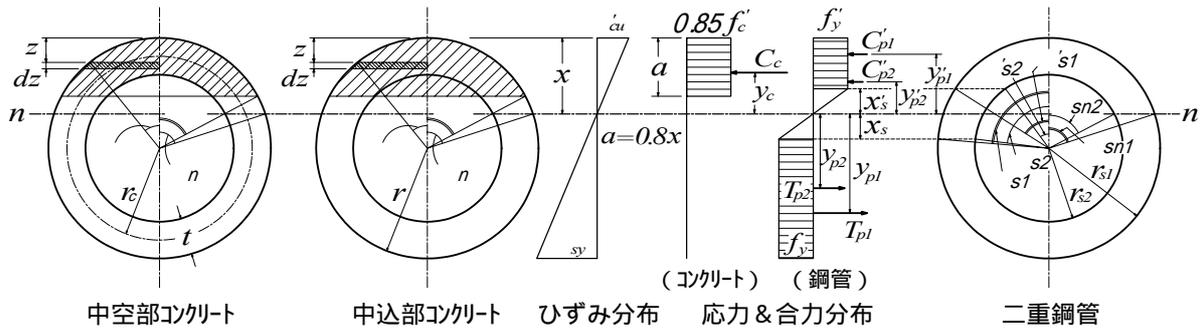


図 - 8 曲げ耐力を求めるために仮定した応力分布 (鋼材の弾性域は無視)

$$M_u = C_c \times y_c + C'_p \times y'_p + T_p \times y_p \quad (1)$$

ただし, $C + C'_p - T_p = 0$ より α を求める。

ここで,

$$z = r(1 - \cos \alpha), \quad x = r(1 - \cos \alpha_n)$$

$$r \cdot \cos \alpha_n = r_s \cdot \cos \alpha_{sn}, \quad x_s = x'_s = \frac{x \cdot f'_y}{\epsilon'_{cu} \cdot E_s}$$

$$\cos \alpha_n = (\cos \alpha - 0.2) / 0.8$$

$$\cos \alpha_s = (r \cdot \cos \alpha_n - x_s) / r_s, \quad \cos \alpha'_s = \cos \alpha_{sn} + x'_s / r_s$$

$$A_c = r^2 (\alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha) \quad (\text{中込部})$$

$$G_c = \frac{r^3}{3} \{ \sin \alpha (2 + \cos^2 \alpha) - 3 \alpha \cdot \cos \alpha \}$$

$$A_c = \left\{ \pi \cdot r^2 - \pi (r - t)^2 \right\} \frac{\alpha}{\pi} \quad (\text{中空部})$$

$$G_c = 2r^2 t (\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha)$$

$$C_c = 0.85 \times f'_c \times A_c, \quad y_c = G_c / A_c$$

$$C'_p = f'_y \frac{\alpha'_s}{\pi} A_s, \quad y'_p = r_s \left(\frac{\sin \alpha'_s}{\alpha'_s} - \cos \alpha_{sn} \right)$$

$$T_p = f_y \frac{\pi - \alpha_s}{\pi} A_s, \quad y_p = r_s \left(\frac{\sin \alpha_s}{\pi - \alpha_s} + \cos \alpha_{sn} \right)$$

G_c : コンクリート有効断面の中立軸に関する断面一次モーメント

f'_c : コンクリートの圧縮強度

ϵ'_{cu} : コンクリートの終局圧縮ひずみ

E_s : 鋼材のヤング係数

f_y, f'_y : 鋼材の降伏強度

下端から 60mm とそれぞれ仮定) の回転成分を独立して取り出すために, 検長 120mm で取り付けた変位計により得られた変形成分をひずみ量に換算し, 同直上 (柱下端から上方 90mm の位置に貼付) のひずみゲージで検出されたひずみ量を減ずることにより, 座屈区間の平均ひずみ量とした。なお, 鋼管の抜け出しについては, その値を独立して計測できなかったため, 上記座屈部分に合算する形で処理した。以下, 図 - 3 に示す各ひずみゲージ貼付位置の中心間を計算区間として各ひずみ量が

表 - 1 断面耐力の比較

Unit No.	柱最下部位置		
	Mu·exp (kN·m)	Mu·cal (kN·m)	Mu·exp Mu·cal
1	266.6	267.7	1.00
2	280.6	279.5	1.00
3	270.3	295.1	0.92
Unit No.	中込コンクリート上面位置		
	Mu·exp (kN·m)	Mu·cal (kN·m)	Mu·exp Mu·cal
1	213.3	234.1	0.91
2	224.5	234.6	0.97
3	216.2	237.0	0.91

ら平均ひずみ・平均曲率・回転角を求め, それを用いて計算した変形を柱頭実測水平変位で除することにより算出した。算出された各試験体の回転分担率を図 - 7 に示す。なお, 図中の丸抜きの数字は, 図 - 3 に示す回転分担率計算区間に対応する。その結果, 各試験体の座屈部分での回転分担率は, 部材角 $R=1/200$ では 40% ~ 45% であったが, $R=1/22$ では 85% ~ 90% とその回転成分のほとんどを占めた形になった。一方, 座屈部分より上方の分担率については, 変形の増加と共にその分担率は減ずる傾向があるものの, 概ねモーメント勾配に添った形で推移した。充填コンクリート厚との関係については, 前述の試験体についての損傷過程と整合する傾向が示されたが, 全般的な傾向として大きな差は生じなかった。

3.4 終局曲げ耐力 (Mu)

表 - 1 に実験で得られた Mu·exp と計算で求めた Mu·cal の比較を示す。計算値は図 - 8 および式(1)に示すような, 一般的な曲げ理論に基づく強度式による。なお, コンクリートの最大圧縮強

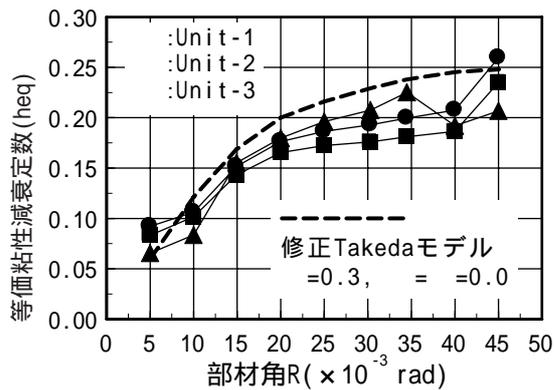


図 - 9 各試験体の等価粘性減衰定数 heq

度は、道路橋示方書²⁾にある「コンクリートを充填した鋼製橋脚」で示された $2 \cdot c_k$ を用いた。比較の結果、Unit-1とUnit-2については、実験値と計算値が良く一致した。しかし、Unit-3では実験値が計算値を8%程度下回った。これに関しては、上記 $2 \cdot c_k$ を $1.5 \cdot c_k$ とすると両者の間に良い一致が見られることから、中込コンクリートが存在する部分においても最大拘束力が発揮でき得るコンクリート厚が存在することを示す結果となった。なお、この傾向については更なる検討が必要と考える。また、中込コンクリート上面位置においては、全て実験値が計算値を下回った。この結果、 $1.0 \times D$ (D : 外側鋼管の直径)の中込コンクリート高さは適切であるということが分かった。

3.5 等価粘性減衰定数 (heq)

実験で得られた各試験体の等価粘性減衰定数 heq を図 - 9 に示す。全体的な傾向として、部材角 $R = 15 \times 10^{-3} \text{ rad}$ ($1/67$) 以降は内側鋼管の有効深さの大きい順 (Unit-3 > Unit-2 > Unit-1) にエネルギー吸収能が大きくなり、内側鋼管の位置関係が鋼材によるエネルギーの吸収負担分に影響したものと考えられる。この傾向は終局域まで継続したが、その差は5%~10%以下と小さかった。なお、いずれの試験体も終局域に至るまで heq の値は上昇傾向にあり、総じて安定したエネルギー吸収能を有することが確認された。また、図中に示した修正 Takeda モデルによる一般的な RC 部材の算定値と比較すると2%~5%低い値を示した。

3.6 初期弾性剛性 (K_0)

図 - 10 に各試験体の $(M/\delta)/K_0$ と δ/u (ここで、

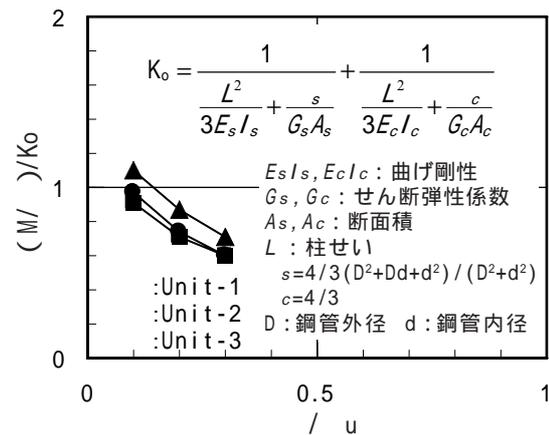


図 - 10 初期弾性剛性の比較(計算値と実験値)

$u = Mu/K_0$) の関係を示す。同図より、変形の増加とともに顕著な剛性低下の傾向が見られる。なお、 $\delta/u = 0.1$ 程度の微小変形域の初期弾性剛性に限れば、3試験体とも図中の式の値 (K_0) に近い値を示している。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートを充填した中空式二重鋼管合成柱は、高じん性域まで耐力低下をすることなく、十分な変形能力を有している。
- (2) 本実験に使用した試験体のように、中込コンクリートが存在する部分においても、二重鋼管間に充填されるコンクリートの厚さは、コンクリートの拘束効果に影響することが分かった。
- (3) 二重鋼管合成柱の最終破壊形態は、柱脚近傍のごく狭い範囲の鋼管座屈に集約される。なお、内部コンクリートの圧壊域は小さく、引張りひび割れも集中する傾向が示された。
- (4) 耐荷力は一般的な曲げ理論で十分評価できる。しかし、充填コンクリート厚と拘束効果の関係については今後課題が残る。

参考文献

- 1) 松井千秋, 津田恵吾, 森 武史: 被覆形鋼管コンクリート柱材における鋼管と幅厚比・径厚比の制限値, 日本建築学会構造系論文集, 第503号, pp.157-163, 1998.1
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 1996