

論文 中空断面 PC 柱部材の柱筋座屈特性と中間帯鉄筋の役割について

須田 久美子*1・新保 弘*2・増川 淳二*2・村山 八洲雄*3

要旨： RC 高橋脚や斜張橋の RC タワーを対象に、中間帯鉄筋のない中空断面 RC 柱部材の地震荷重を想定した交番加力実験を行った。その結果、フランジ部分に相当する壁の内外に配筋された柱筋は、まず外側の柱筋がかぶりコンクリートの剥離に伴って外側に座屈し、次に内側の柱筋が断面の内側に座屈することが分かった。これより、中空断面で中間帯鉄筋を配筋することによって柱筋の座屈を抑制できることが明らかになった。さらに、中間帯鉄筋の有る RC 柱部材を対象にかぶりコンクリートの剥離時期とその長さおよび柱筋座屈時期の判定に関する提案式を提案し、中空断面 RC 柱部材への適用性を確認した。

キーワード： 鉄筋コンクリート、橋脚、中空断面、中間帯鉄筋、柱筋、座屈、耐震性

1. はじめに

阪神・淡路大震災において、鉄筋コンクリート (RC) 橋脚が多大な被害を受けたことから、RC 橋脚などの柱状構造物における耐震性能が注目を浴びている。特に震災後に示された復旧仕様[1]では、断面寸法が1m以上の場合に中間帯鉄筋(建築の中子筋に相当する横拘束鉄筋)の配筋が義務づけられた。

一方、近年における橋梁構造物の大型化、長大化の趨勢に伴い、RC 高橋脚や斜張橋の RC 主塔などでは、自重の軽減を目的に中空断面の採用が見込まれる。中空断面の場合には、中実断面に比べてコンクリートの分担するせん断応力度が相対的に大きく、また、かぶりコンクリートなどの剥落による断面欠損が部材の変形性能に大きな影響を及ぼすことから、中空断面 RC 柱部材の耐震性能を確保するためには横拘束鉄筋(帯鉄筋および中間帯鉄筋)の配筋方法に十分な配慮をする必要がある。

しかし、中空断面 RC 柱部材の横拘束鉄筋の配筋方法に関する研究例は少なく、中間帯鉄筋の具体的な配筋方法についての議論はほとんどなされていないのが現状である。

ここでは、RC 高橋脚や RC 主塔など土木構造物としては比較的軸力が大きい中空断面 RC 柱部材を対象に、まず、多数本の柱筋(部材軸方向鉄筋)が壁の内外に配置されるという土木構造物の中空断面 RC 柱部材の配筋上の特徴を考慮した大型模型試験体により、中間帯鉄筋のない場合の破壊挙動を把握した。次に、既に中間帯鉄筋のない RC 柱部材を対象に提案した方法[2]を修正して、中間帯鉄筋を有する RC 柱部材のかぶりコンクリートの剥離時期とその長さおよび柱筋座屈時期の判定方法を提案し、中間帯鉄筋を有する中空断面 RC 柱部材への適用性を検討した。

2. 中空断面 RC 柱部材の模型実験

中間帯鉄筋が配置されていない中空断面 RC 柱部材の地震時における破壊挙動を把握するために、模型試験体による交番加力実験を行った。土木構造物では、断面寸法が大きいために、通常、断面の一辺に多数本の柱筋が配置される。また、中空断面の場合、壁の内外にそれぞれ柱筋が配置される。

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 第一研究部第1研究室 主任研究員 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 第一研究部第1研究室 研究員、工修 (正会員)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所 第一研究部 専門部長、工博 (正会員)

ここでは、こうした対象部材の配筋上の特徴に配慮して、模型試験体を設定した。

(1) 試験体及び使用材料

試験体の外形寸法及び断面の配筋状況を図-1に示す。断面は600mm×600mmの正方形で、壁厚が100mmである。断面寸法と壁厚の比が対象部材と同等になるように断面寸法を設定した。柱頭部に曲げモーメントとせん断力を任意の組合せて直接加力できる装置[3]を用いたため、試験体は柱基部のみを取り出した部分模型になっている。高橋脚やRC主塔を想定して、柱筋比(コンクリートの外形寸法から求めた面積に対する柱筋の全断面積の比率)を2.6%、帯鉄筋比を0.17%とした。使用材料の材料特性は表-1のとおりである。

(2) 計測方法

実験では主として次の計測を行った。

a) 柱基部測定区間 (図-1 参照) の相対変位

フーチング表面とフーチングから断面高さの1.5倍(900mm)の位置の相対変位を断面の隅角部4箇所計測した。これらの計測値から、柱基部部分の平均曲率及び断面各位置の平均ひずみを求めた。

b) 鉄筋のひずみ

鉄筋の塑性ひずみゲージは鉄筋軸方向の同じ断面内の両側(かぶり側と部材内側)に貼付けた。塑性ひずみゲージは、フランジ部分に相当する壁の幅の中心に近い柱筋(壁の内外それぞれ6本ずつ)に振り分けて、フーチング面から高さ約60cmまでの範囲に5cmおきに各高さ1箇所ずつ貼付した。

(3) 加力方法

加力は試験体の柱頭部に任意の組み合わせ加力が可能な装置[3]を用いて、柱基部における曲げモー

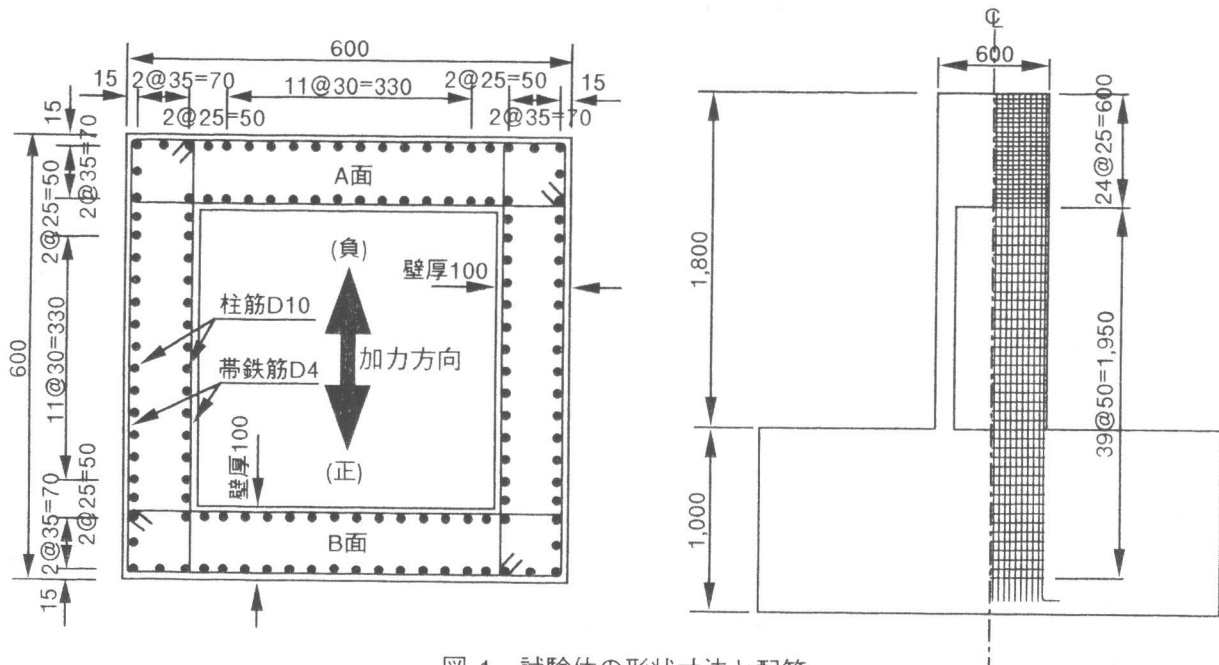


図-1 試験体の形状寸法と配筋

表-1 使用材料の材料特性

a) 鉄筋				b) コンクリート		
	鉄筋径	降伏点応力度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	実験時(材令72日)		
				骨材の 最大寸法	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
柱筋	D10	3,620	4,350	5mm	457	2.5×10 ⁵
帯鉄筋	D4	3,030	5,000			

メント M とせん断力 S がせん断スパン比 $M/(S \cdot h) = 10$ (h は断面高さ) になるように交番加力した。軸圧縮応力度は 60 kgf/cm^2 とした。

加力制御は、断面計算によりあらかじめ求めた柱筋降伏時の荷重をもとに、これ以前は荷重制御、これ以降はこのときの測定区間 (900mm) における平均曲率の整数倍の曲率で変形制御とした。各荷重および変位での繰り返し数は1回とした。

(4) 実験結果

図-2 に柱基部の曲げモーメントと平均曲率の関係を示す。外側の柱筋が降伏した時の曲率を 1ϕ と定義すると、正加力および負加力ともに 2ϕ で外側柱筋に沿った縦ひびわれが観察され、 3ϕ では約 60cm ほど進展した。 3ϕ の負加力が終了して 4ϕ への正加力の途中で正加力時に圧縮側になる面 (B 面; 図-1 参照) のかぶりコンクリートが大きく剥離し、外側の柱筋が座屈しているのが観察された。 5ϕ への正加力の途中で曲げモーメントが著しく低下し、 5ϕ への負加力の途中で負加力時に圧縮側になる面 (A 面) のコンクリートが大きく剥離し、最終的には軸力を保持できなくなって実験を終了した。

曲げモーメントの増加に対して柱筋の軸ひずみが増加しなくなる点で柱筋の座屈が開始している (図-3 参照) と考え、柱筋のひずみ測定値をもとに座屈開始点を推定し [4]、●印で示した。外側の柱筋における座屈開始点の推定点は、目視観察の結果と一致した。B 面の柱筋座屈は、まず、かぶりコンクリートの剥離とともに外側柱筋が壁の外側に座屈し、その1サイクル後に内側柱筋が座屈したと考えられる。実験終了後に試験体を切断し、断面内部の観察を行った。その結果、内側の柱筋は断面の内部に座屈していることが分かった。

図-4 にフランジ部分に相当する壁の破壊状況についての模式図を示す。壁厚が更に薄くなった場合には、壁自体が局部座屈を起こすような破壊モ

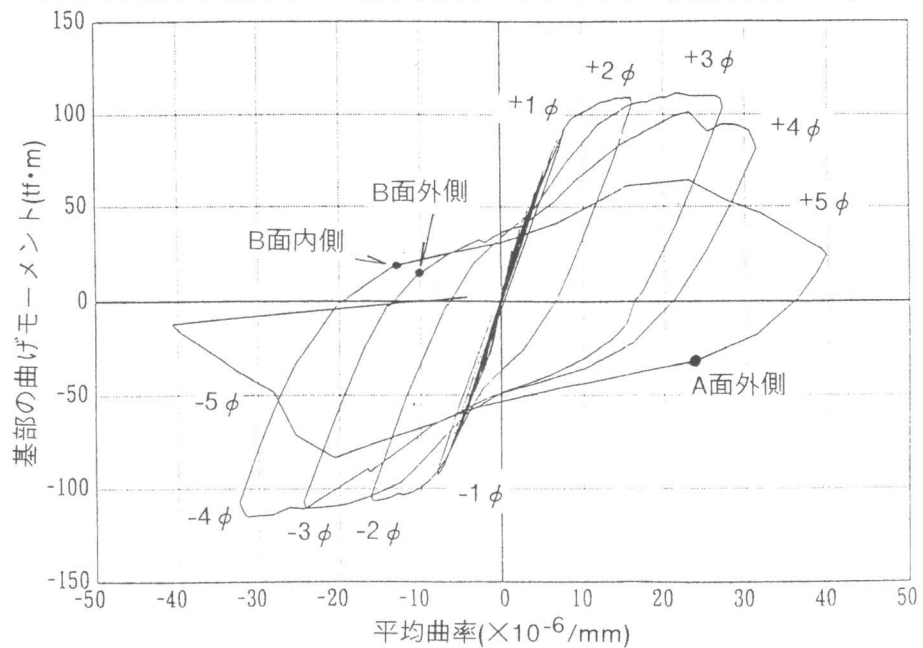


図-2 基部の曲げモーメントと平均曲率の関係

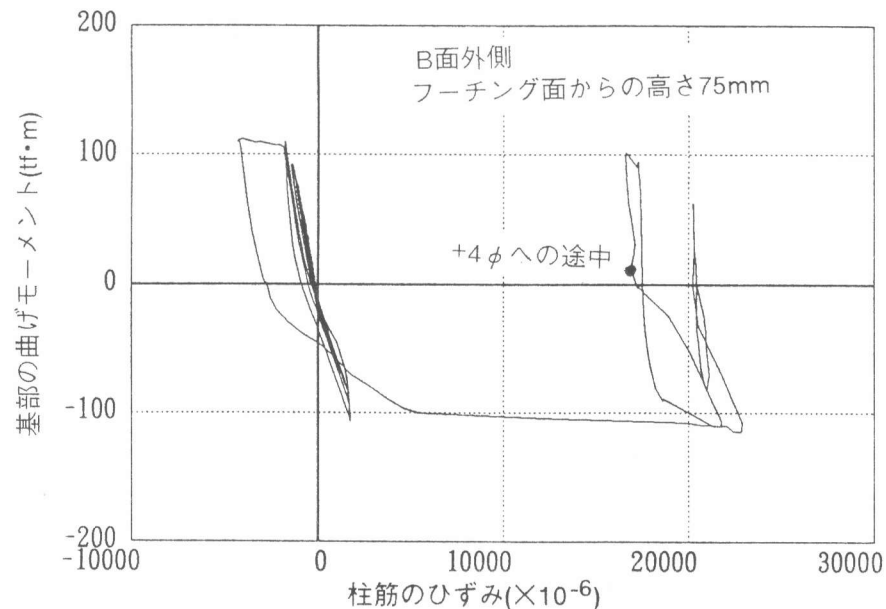


図-3 基部の曲げモーメントと柱筋ひずみの関係の測定例

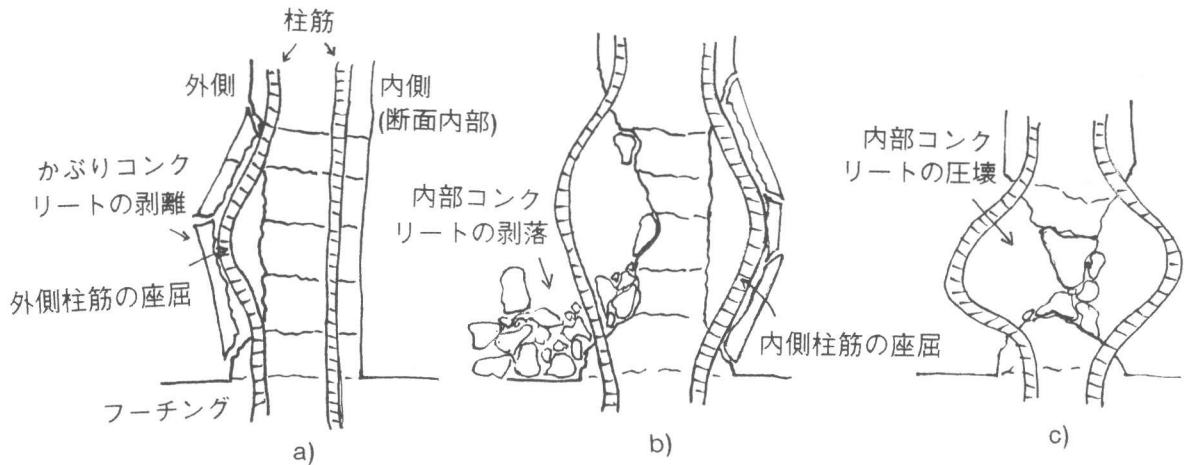


図-4 中空断面フランジ壁部の破壊進行状況の模式図

ードも懸念されるが、今回対象とした部材の壁厚比と同等な本試験体では、外側柱筋は外に、内側柱筋は内側に座屈して破壊し、壁の局部座屈は起こらなかった。コンクリートの引張を無視したRC断面計算によれば終局時の中立軸位置はフランジに相当する壁の中にあり、このことから壁の局部座屈を起こしにくいことが分かる。このような破壊モードの中空断面部材では、壁の内外の帯鉄筋を結ぶように中間帯鉄筋を配筋することによって、コンクリートを拘束する効果だけでなく、柱筋の座屈を抑制する効果も期待できると考えられる。

4. 柱筋の弾性座屈モデルと中間帯鉄筋の拘束効果

柱筋の座屈挙動を支配する主要な要因として次の3つが考えられる。

- イ) 柱筋周辺のコンクリートの割裂強度
- ロ) 帯鉄筋の曲げ剛性
- ハ) 柱筋自身の曲げ剛性

断面寸法に対して相対的に鉄筋径が小さく、中間帯鉄筋がない場合は、中実断面においてもロ)およびハ)による影響はイ)に比べて小さかった[2]。ここでは、弾性座屈モデルを用いて、中間帯鉄筋が有る場合の座屈荷重と座屈長さを試算し、ロ)およびハ)による影響がイ)に比べてどのような関係にあるかを考察した。

(1) 中間帯鉄筋を考慮した柱筋の弾性座屈モデル

中間帯鉄筋を考慮した柱筋の座屈荷重 P_{cr} と座屈長さ L_{cr} を試算するために、図-5に示すような弾性座屈モデルを考えた。すなわち、a)のように端部を回転拘束され、弾性支承上に配置された直棒部材が半波形で座屈する場合である。弾性支承のバネ定数は中間帯鉄筋の軸剛性と帯鉄筋の曲げ剛性を考慮してb)に示す算定式で評価した。

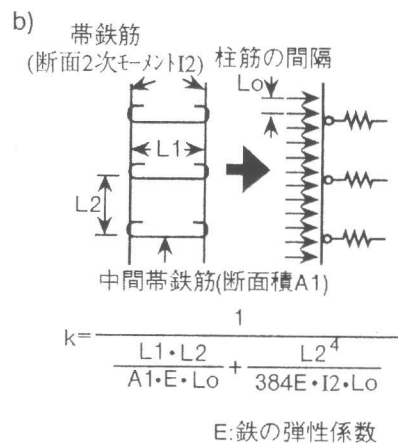
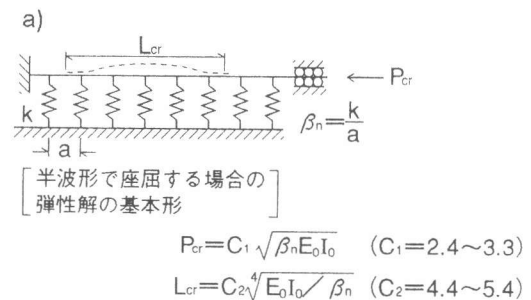


図-5 弾性座屈モデル

柱筋の弾性係数には、既往の鉄筋履歴モデル[5]を参考に、柱筋圧縮時の累積塑性ひずみを考慮した軟化曲線の割線弾性係数(1式参照)を用いた。

$$\dots\dots(1)$$

柱筋圧縮時の累積塑性ひずみ ϵ_s は部材の軸圧縮応力度の大きさによって異なるが、柱筋の応力ひずみ関係の測定例[2]から逆算して、軸力が比較的大きい場合は通常の鉄筋のひずみ硬化点ひずみに相当する2%と設定した。

(2) 柱筋の座屈応力度 P_{cr}

中間帯鉄筋の有無に着目した既往の実験[6]では、中間帯鉄筋のない場合([6]No.1)にはかぶりコンクリートの剥離と同時に柱筋が座屈し、中間帯鉄筋の有る場合([6]No.2,3)にはかぶりコンクリートの剥離・剥落後も柱筋の座屈が見られなかった。既往の実験[6]の各試験体の弾性解による座屈応力度とかぶりコンクリートの剥離と同時に柱筋が座屈した場合の柱筋応力度の実測例[2]を対比して図-6に示す。

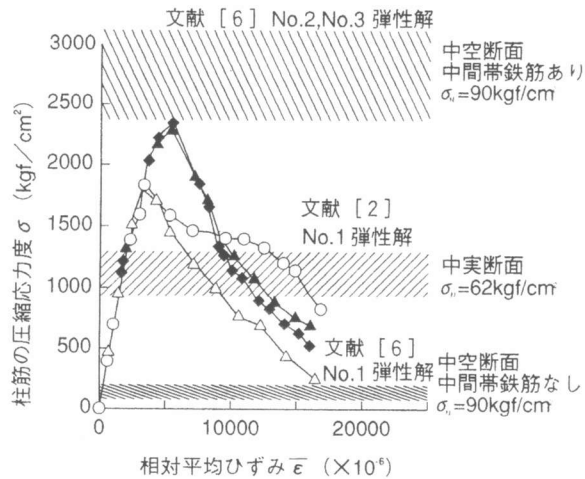


図-6 座屈応力度の測定例と弾性理論解の比較

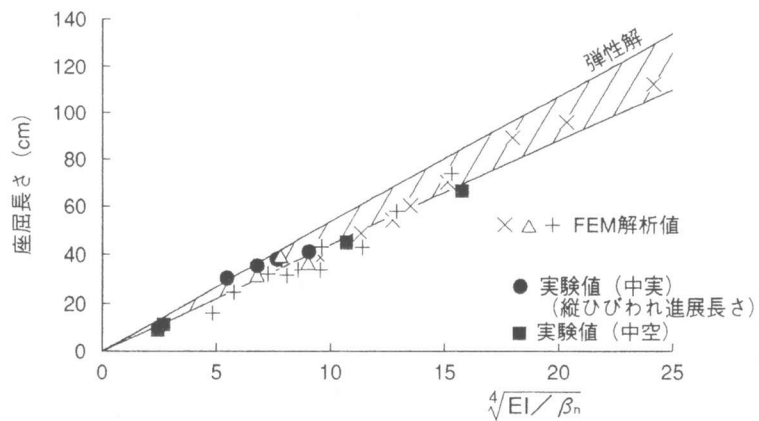


図-7 柱筋の座屈長さ

弾性解は、解を導く際の近似方法の違いによって係数 C_1 の値が異なるので、その上限値と下限値の幅で示した(図中網掛け部分)。部材の変形が大きくなると、曲率による初期不整が大きくなるので、弾性解より小さな荷重で座屈を起こすことが見込まれるが、弾性解がかぶりコンクリートの剥離によって柱筋の座屈がおこる場合の実測値よりも大きい場合はかぶりコンクリートの剥離後も柱筋の座屈が起っていないことが分かる。

(3) 柱筋の座屈長さ L_{cr}

弾性解による座屈長さと模型実験結果との関係を図-7に示す。実験結果としては、柱筋に沿った縦ひびわれが進展した長さを示した。座屈長さに関しては、両者は比較的良好一致を示しており、今回の実験の範囲では弾性座屈理論により座屈長さが推定できると言える。

(4) かぶりコンクリートの剥離時期

中間帯鉄筋が配筋されている場合のかぶりコンクリートの剥離時期については、厳密には中間帯鉄筋の存在によって多少遅れることが、筆者らの模型実験[6]からも明らかである。しかし、図-8に示すように中間帯鉄筋を有する中空断面RC柱部材の実験結果[6]と、そのシミュレーション解析結果が一致していることから、既に提案した、コンクリートの圧縮ひずみ履歴を考慮した柱筋周辺コンクリートの割裂強度をもとに推定する方法[2]によりかぶりコンクリートの剥離時期が比較的良好に評価できると考えられる。さらに多くの実験例との比較を行って詳細な検討を実施しておく必要があると思われるが、実用

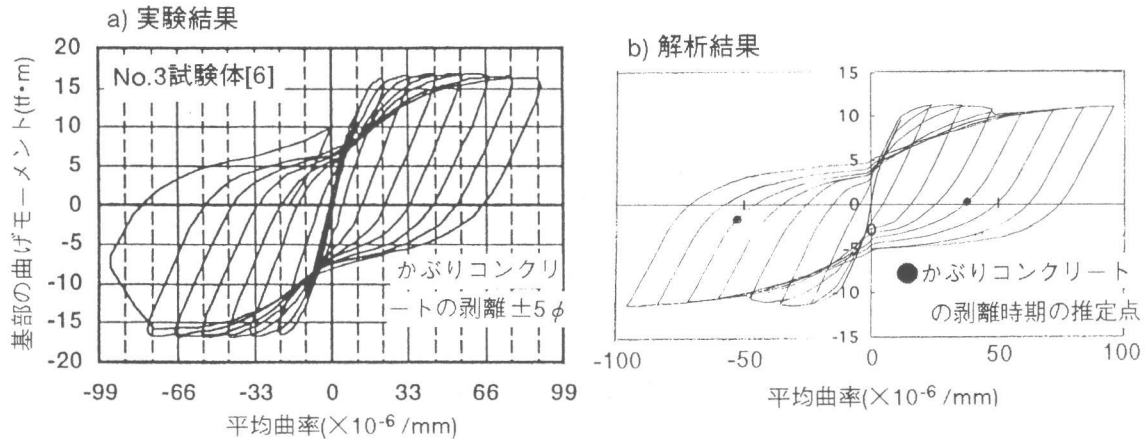


図-8 中間帯鉄筋を有する中空RC柱部材の実験結果と解析結果の比較

上は当該推定法が適用できると考えられる。

5.まとめ

高橋脚や斜張橋のRCタワーを対象に、中空断面RC柱部材に中間帯鉄筋を配筋した場合の破壊挙動を明らかにすることを目的に行った以上の検討結果をまとめると次のとおりである。

- a) 中間帯鉄筋のない中空断面RC柱部材の地震時における破壊挙動を、土木構造物の配筋上の特徴に配慮した試験体の交番加力実験により確認した。対象部材の壁厚比では、壁自体が局部的に座屈を起こすことはなく、フランジ部分に相当する壁の内外に配筋された柱筋は、まず外側の柱筋がかぶりコンクリートの剥離に伴って外側に座屈し、次に内側の柱筋が断面の内側に座屈することが分かった。
- b) 壁の内外の帯鉄筋を結ぶように中間帯鉄筋を配筋することによって、コンクリートを拘束する効果だけでなく、柱筋の座屈を抑制する効果が期待できることが明らかになった。
- c) 中間帯鉄筋のないRC柱部材を対象に提案した塑性ヒンジ長さおよび柱筋座屈判定に関する提案式の修正を試み、中空断面RC柱部材への適用性を確認した。
- d) 中間帯鉄筋を十分配筋した場合には、かぶりコンクリートの剥落後もある程度の曲率までは柱筋が十分な圧縮応力を分担できることがわかった。

【参考文献】

- [1] 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」の準用に関する参考資料(案)、1995.6
- [2] 須田ほか：交番繰返し荷重下における柱筋の座屈挙動、コンクリート工学年次論文集、Vol.16、No.2、1994
- [3] 新保ほか：6自由度加力装置を用いたRC柱部材実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.14、No.2、pp.815-818、1992
- [4] 新保ほか：RC柱の柱筋座屈挙動に関する実験的検討、土木学会年次学術講演会概要集、1994.9
- [5] Kato, B. et al: Predictable Properties of Materials under Incremental Cyclic Loading, IABSE Reports, Vol.13, Lisbon, pp.119-124, 1973
- [6] 須田ほか：RC中空断面柱部材の柱筋座屈抑制配筋法、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp.579-582、1996.1