

委員会報告

「コンクリート構造物の靱性部材配筋詳細研究委員会報告」

幹事 加藤 大介 (新潟大学)

委員長	滝口 克己 (東京工業大学)	
幹事	丸山 久一 (長岡技術科学大学)	加藤 大介 (新潟大学)
委員	市之瀬敏勝 (名古屋工業大学)	運上 茂樹 (建設省土木研究所)
	遠藤 達巳 (電力中央研究所)	上之園隆志 (建設省建築研究所)
	北山 和宏 (宇都宮大学)	津村 浩三 (東京都立大学)
	徳山 清治 (鹿島建設技術研究所)	中塚 侑 (大阪大学)
	中村 光 (名古屋大学大学院)	長嶋 俊雄 (竹中工務店技術研究所)
	二羽淳一郎 (名古屋大学)	前川 宏一 (東京大学)
	松本 信之 (鉄道総合技術研究所)	

(勤務先は委員会開催時のものを示した)

1. はじめに

鉄筋コンクリート造構造物において終局強度型設計を行う場合には、非破壊領域において十分な強度を保有させることと、破壊領域において十分な靱性能を与えることが重要である。現在、この観点に立って、はり、柱、橋脚および壁などの鉄筋コンクリート造部材の強度評価式および靱性評価式が提案されつつあるが、それらの評価式は部材における補強領域の平均的な値、すなわち、帯筋比や主筋比等により評価されることが多い。一方、既往の実験結果をみると主筋の座屈や定着部からの抜け出し、柱危険断面における曲げ圧縮領域のコンクリートの拘束方法、付着破壊、および、継手長さ、途中定着等が部材としての耐力および靱性能に大きく影響している場合が多い。そこで、終局強度型設計を念頭におき、これらの配筋詳細が強度あるいは靱性能に及ぼす影響を解明することを目的として、1988年7月に靱性部材配筋詳細研究委員会（以下、本委員会と略す）が発足し、1990年3月に終了した。本委員会では2年間にわたる活動の成果をまとめ、報告書 [1] をとりまとめた。報告書の内容は以下の通りである。

- (1) 曲げ挙動に対する配筋詳細の影響 [圧縮部コンクリートの横拘束、主筋の座屈、はり柱接合部からの主筋の抜け出し、橋脚からの主筋の抜け出し]
- (2) せん断と付着に対する配筋詳細の影響 [部材のせん断と付着、接合部内のせん断と付着、橋脚の付着・割裂破壊、途中定着]
- (3) 部材の靱性に対する配筋詳細の影響 [はり柱部材の靱性、耐震壁の靱性、橋脚の靱性]
- (4) 材料強度と靱性および寸法効果 [寸法効果、土木構造物のコンクリート強度と軸力、建築構造物のコンクリート強度、建築構造物の鉄筋強度]

さらに、本委員会では、研究を進めてきたコンクリート構造物の靱性と配筋方法に係わる問題について一般に広く討論を行う機会を得るために、1990年5月30日に「コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関する J C I シンポジウム」を、東京・飯田橋の家の光ビルにおいて開催し、280名を越す参加人数を得た。本シンポジウムには圧縮コンクリートの拘束、主筋の座屈、主筋の抜け

出し、せん断補強、付着・割裂、途中定着、靱性評価、等の内容に関する論文が応募され、最終的に当委員会により査読を経た27編の論文が発表された [2]。

以下に、本委員会でもとめた委員会報告の概要を紹介するが、靱性部材の配筋詳細に的を絞ったとはいえ、その内容は非常に多岐にわたっており、本報告ではその一部しか紹介できない。詳細は文献 [1,2] を参照されたい。

2. 曲げ挙動に対する配筋詳細の影響

帯筋比や主筋比などの量が等しくとも、その配筋法（径、間隔等）が異なると横拘束された圧縮コンクリート、主筋の座屈、はり柱接合部からの主筋の抜け出し、橋脚からの主筋の抜け出しの挙動に直接的に影響を及ぼす。例えば、圧縮力を受けるコンクリートが横拘束を受けるとその軸応力度-軸歪度関係における変形特性が著しく改善されることはよく知られているが、同じ帯筋比であっても、その径と間隔が異なると改善効果は著しく異なってくる。同様に、帯筋により拘束された主筋の座屈を扱う場合にも、その拘束方法が座屈荷重、座屈長さに大きく影響を与える。本節では、配筋詳細の影響が明瞭に表れる拘束コンクリート、主筋の座屈、はり柱接合部からの主筋の抜け出し、橋脚からの主筋の抜け出しを対象にし、配筋詳細の影響を検討した。

2. 1 圧縮部コンクリートの横拘束

単軸圧縮応力下における拘束コンクリートの圧縮強度、および圧縮強度点以降の応力度-歪度特性も含む強度・変形特性は、部材設計が終局強度設計法によって行われはじめたころから研究されだし、同特性の推定式が種々提案されてきた。提案式には例えば次のようなものがある。(i)横補強筋の太さ、強さ、配筋間隔、形状およびコンクリート強度などを変量とした実験の結果に対する直感的な考察、あるいは統計的な整理から誘導されたもの [3~5]。(ii)拘束コンクリートの強度は横補強筋が拘束する有効な断面積に関係するという考え方に基づいたもの [6]、(iii)横補強筋の拘束作用の構成要因である拘束応力指標、拘束応力分布指標およびコンクリート強度を変量とする実験研究から誘導されたもの [7]。ならびに、(iv)構成則として拘束コンクリートの応力度-歪度を示そうというもの [8]。

図1は代表的な拘束コンクリートのモデルについて最大応力度の推定値と実験値を比較したものである。Parkのモデル [3] では横補強筋体積比と補強筋の強度のみが考慮されており、ピッチと形状は考慮されていない (図1 (a))。Iyenger [4] と六車 [5] のモデルでは帯筋の間隔が考慮されており (図1 (b)(c))、さらに、Sheikh [6] と鈴木 [7] のモデルではこの他に帯筋の形状すなわち口、田、囲等の形状が考慮できる (図1 (d)(e))。これらの結果を見ると配筋の詳細を考慮するほど、より現実を評価し得るモデルとなることが分かる。

一方、横補強筋の配筋詳細を論ずる場合に、その補強筋が標準フック付き帯筋なのか、あるいは、溶接帯筋やスパイラルなのかという点も重要である。また、各研究者が独自に開発した特殊な配筋法なども評価しなければならない場合もありうる。現状では、これらの配筋詳細は標準的なものに対してどの程度の性能を保有しているか、という観点で評価されている。例えば、図2は形状がほぼ同じで溶接帯筋を用いた場合と135度標準フック付きの帯筋を用いた場合の軸力-軸歪度関係を比較したものであるが [9]、ほぼ同程度の性能を有していることが分かる。このように、特殊な配筋等の配筋詳細は最も基本的な性質である軸応力度-軸歪度関係で評価し、モデルに取り入れてゆくべきものであろう。

2. 2 主筋の座屈

地震被害を受けたはり・柱部材、あるいは、実験で荷重された部材を観察すると、軸方向主筋が座屈していることが多く、部材の終局状態を評価する際に主筋の座屈の挙動を把握する必要がある。しかしながら、鉄筋コンクリート部材の靱性という観点からは主筋の座屈が必ずしも最も重要な因子と考えられておらず、現在のところ直接に研究の対象になることは少ないようである。その中で、実験的研究としては、文献 [10, 11] 等があるが、各研究者で対象としている試験体の形状・寸法、あるいは荷重方式等が異なっており、着眼点およびデータの処理方法も違っている。また、データ数も少ないので、これらの研究結果から一般的な主筋の座屈防止法を確立するまでには至っていない。一方、解析的な研究としては、文献 [12] 等がある。これらは、帯筋をコアコンクリート側への変位が拘束されたばねにモデル化して、このばねに支持されている主筋の座屈問題を扱っており、主筋と帯筋

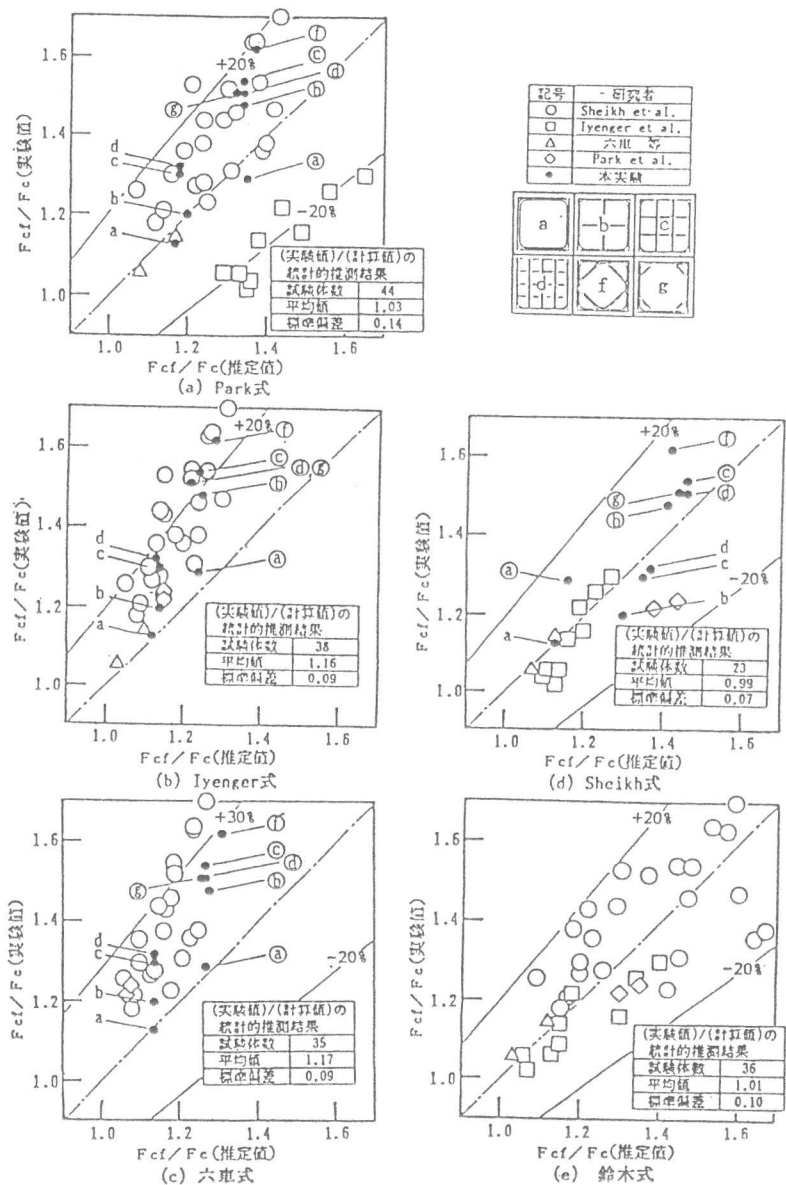


図1 拘束コンクリートの圧縮強度比の実験値と推定値の比較

試験体名	横拘束配筋法	横拘束筋強度 (kg/cm ²)	p v · σ _{sy} (kg/cm ²)	備考
No.1	—	—	—	—
No.2	—	—	—	—
No.3	□	8027	31.3	閉鎖型溶接フープ
No.4	□	8027	63.4	閉鎖型溶接フープ
No.5	■	8027	63.4	閉鎖型溶接フープおよびサブフープ
No.6	■	8027	90.7	閉鎖型溶接フープおよびサブフープ
No.7	■	4236	54.2	135°フック付き閉鎖型溶接フープおよびサブフープ
No.8	■	4236	97.0	閉鎖型溶接フープ
No.9	■	8027	63.4	閉鎖型溶接フープ
No.10	■	8027	63.4	およびサブフープ

(共通事項) 断面: 20×20cm, Fc=419(kg/cm²)
軸筋: 12-D10(σy=4200kg/cm²)

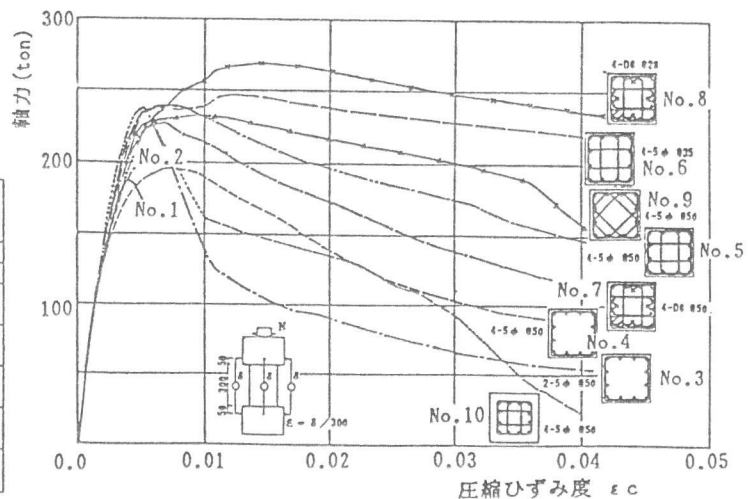


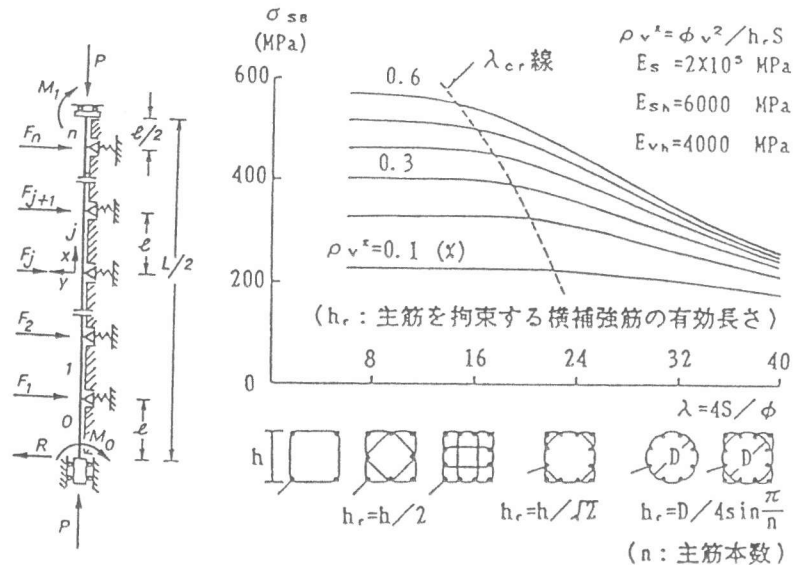
図2 各種の横補強筋を有する拘束コンクリートの軸力-ひずみ関係 [9]

の径、帯筋間隔、鉄筋の材料定数等が解析で考慮しうる。従って、配筋詳細と主筋座屈という点から、各要因相互の影響をパラメトリックに検討するのに適している。

図3(a)はPapiaによる主筋の座屈モデルであるが[12]、このモデルを用い、異なる配筋詳細を持つ部材に適用し、主筋の座屈応力(σ_{SB})に及ぼす主筋の細長比(λ)と横補強筋量($\rho_v = \phi_v^2 / h_r S$)の相互関係を整理したものが同図(b)である。主筋の細長比が小さくなると座屈応力は大きくなるが、その増加率はフープ筋量大きいほど顕著になっている。しかし、細長比を小さくしても殆ど座屈応力が増加しない限界があり、その値は図中に λ_{cr} で示してある。図4(a)(b)はモデルと実験から得られた座屈応力と座屈長さを比較したものであり、適用性は高い。

2. 3 主筋の抜け出し

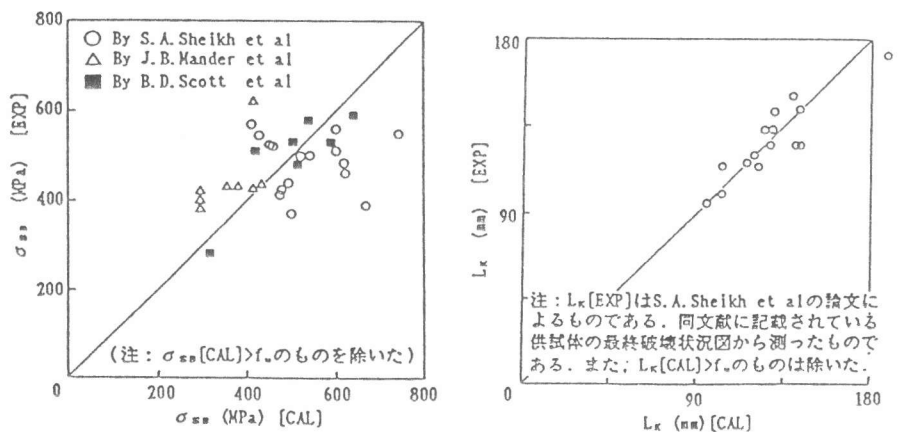
はり降伏が先行する鉄筋コンクリート骨組においては、はりの両端に設定するヒンジの変形能の評価が重要となる。接合部内に定着された主筋は一端で圧縮、他端で引張を受けるために、付着劣化が避けられず、結果としてはりのヒンジの回転量に占める主筋の抜け出し分は非常に大きくなる。例えば、降伏時に30~50%、塑性率3の時に約20%を占めるという報告もある。主筋の抜け出しは本質的に配筋の詳細(断面積と表面積の関係)と係わる問題であり、はりの降伏変形や降伏以降の変形性状を評価する際には、はりの配筋法、さらには接合部内の横補強筋の配筋法をも考慮すべきものであろう。接合部からの主筋の抜け出し量は、コンクリートのひずみを無視しはり主筋の歪分布を知ることにより計算することができる。接合部内でのはり主筋の平均付着応力度を引張側の危険断面でのひずみの関数として求め、ひずみ分布を仮定することにより抜け出しを定量化した研究に、文献[13]等がある。また、はり主筋に沿った付着応力度-すべり関係を設定することにより抜け出し量を求めることも可能であり、この方法には文献[14]がある。



(a)Papiaによるモデル [12] (b)座屈応力と細長比およびフープ筋比
図3 主筋の座屈モデルとその適用例

め、ひずみ分布を仮定することにより抜け出しを定量化した研究に、文献[13]等がある。また、はり主筋に沿った付着応力度-すべり関係を設定することにより抜け出し量を求めることも可能であり、この方法には文献[14]がある。

図5(a)(b)は主筋の



(a)座屈応力度 (b)座屈長さ
図4 主筋の座屈モデルと実験値の比較

接合部からの抜け出しを配筋法を考慮して求めることにより降伏変形を計算し、実験と比較した例である。本手法は基本的には文献 [13] と同様の手法であるが、はり主筋降伏時の接合部内での平均付着応力度を実験的に求め、これをはり主筋径、降伏強度、柱せいの関数となる付着指標とコンクリート圧縮強度を用いて評価している。

部材の変形はせん断変形を無視し曲げモーメントによる曲率を積分して求めている。結果をみると上端引張、下端引張ともに実験値を過小評価する結果となったが、既往の実験式に比べ精度が向上した。また下端引張で精度が悪かったが、この理由として下端筋の平均付着応力度が実験で高く評価されたこと等があげられている。

3. せん断と付着に対する配筋詳細の影響

本節では、部材のせん断と付着、接合部内のせん断と付着、橋脚の付着・割裂破壊、途中定着の問題を扱った。これまで、鉄筋コンクリート部材のせん断設計は実験式によることが多かったが、日本建築学会の鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説(以下、指針案) [15] にも示されているように、2次元的な力の釣合を考慮したせん断設計式が用いられるようになってきている。しかし、設計式の中に配筋詳細を考慮するまでにいたっておらず、今後の重要な検討課題と

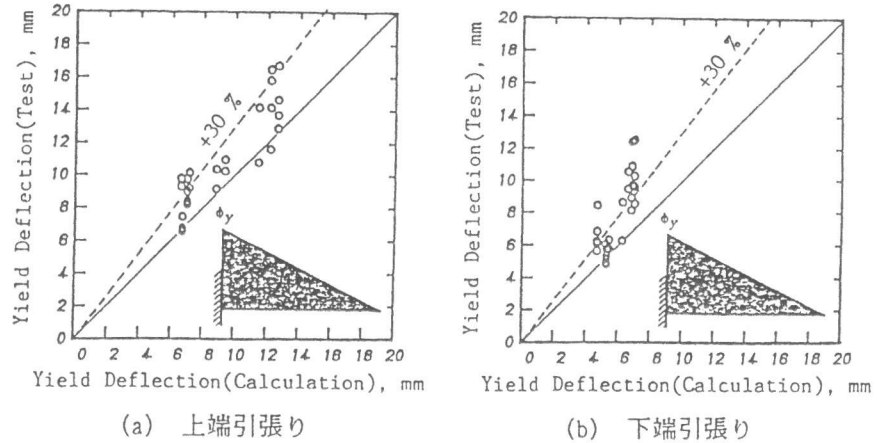


図5 はり柱試験体の降伏変形の計算値と実験値の比較

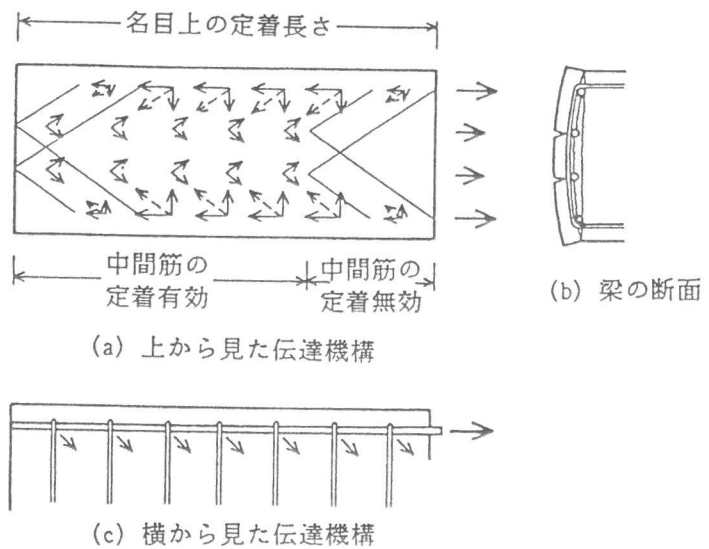


図6 中子筋の内梁主筋の付着伝達機構

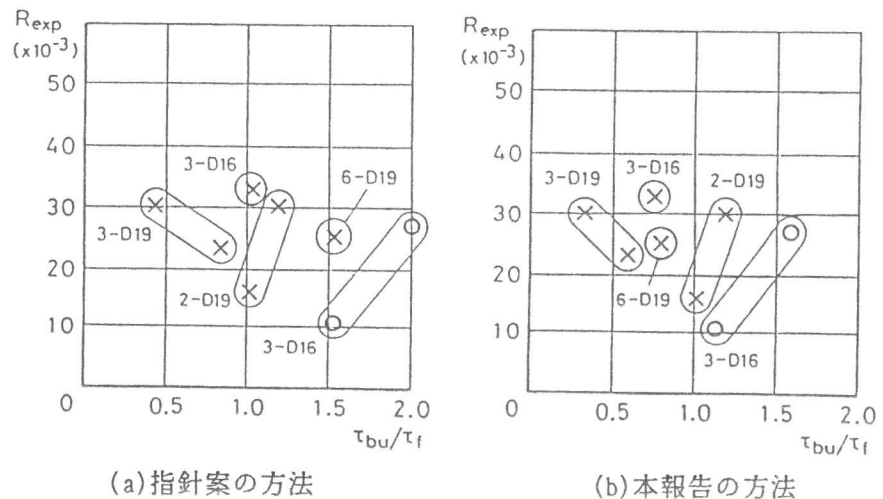


図7 副帯筋のない試験体の付着破壊の予測

言える。配筋詳細に関しての問題点としては以下の点があげられる。i) ひびわれのあるコンクリートに対する横補強筋の拘束効果を考慮したコンクリートの有効圧縮強度の評価。ii) セン断補強筋の間隔が広すぎるとトラス機構が成立しなくなる危険があり、間隔に対する制限の必要性。ii i) 部材内で配筋量が異なる場合の適用法。

指針案における付着割裂設計法においても配筋詳細の観点からの問題がある。図6は中子筋の無い場合の梁主筋の付着伝達機構を示したものである。既往の実験のひびわれ状態から考えると副帯筋のかからない主筋の付着力は、一旦、隅の主筋に伝達された後に、横補強筋に伝達されると考えられる。このモデルによると副帯筋のかからないすべての主筋の付着割裂強度の横補強筋負担分は主筋の数によらず一定となる。さらに、指針案では付着強度として全主筋の平均としているが、最も強度の弱い主筋の強度を採用する方が合理的であろう。図7(a)は副帯筋が無い試験体を対象にし付着強度を指針案に従い求めた場合の付着指標と実験で得られた変形能力を示したものである。図中の数字は主筋を表し、記号は最終破壊形式で、○が曲げ破壊、×が付着破壊を表す。一方、図7(b)は本報告の評価法を用いた場合であり、破壊形式の推定の精度が上昇している。

4. 部材の靱性に対する配筋詳細の影響

本節では、はり柱部材、耐震壁および橋脚の靱性の評価法およびその評価法の中での配筋詳細の扱い方を検討している。本報告でははり柱部材において配筋詳細を考慮して変形能を評価した例について示す。既往の靱性評価法は大別すると、曲げ圧縮領域により靱性が決まる部材の靱性評価法 [16, 17 など] と、文献

[18] に代表される曲げ降伏後にせん断破壊する部材の靱性評価法とに分離できる。曲げ靱性は基本的には平面保持を仮定した解析法により評価しうる。この手法によると、コアコンクリートとかぶりコンクリートのモデルを変えたり、複雑な拘束効果を取り入

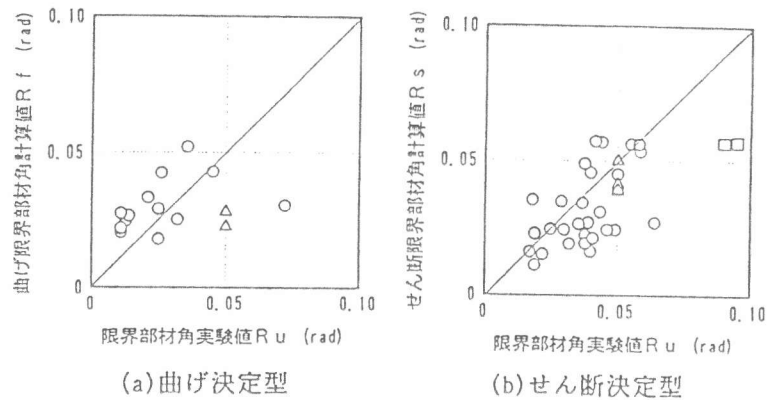


図8 曲げとせん断決定型別の $\min(R_f, R_p)$ による限界部材角

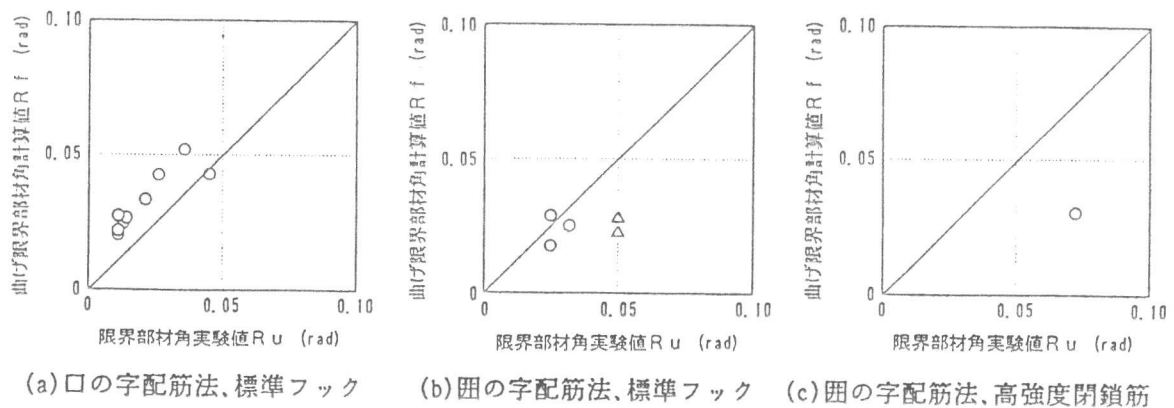


図9 曲げ決定型の試験体の限界部材角の評価 (R_f)

れたコンクリートモデルを用いたりすることが可能で、配筋詳細の効果を取り入れてより現実的な評価ができる。しかしながら、靱性は曲げ圧縮部のコンクリートの挙動のみから決定される場合以外に、部材のせん断抵抗機構が低下することにより靱性が決まる場合があり、これらの区別を明確にしない限り、評価式の精度は上昇しない。そこで、既往の実験の評価法として両者を併用する方法を試みた。曲げ挙動で靱性が決定される試験体（以下、曲げ決定型と呼ぶ）の靱性評価は通常の平面保持を仮定した曲げ解析を用いた。一方、せん断挙動で靱性が決まる場合にもその配筋詳細の影響は大きいが、この評価法は現在のところ配筋詳細を考慮するまでに至っていない。そこで、せん断挙動で靱性が決定される試験体（以下、せん断決定型と呼ぶ）の靱性評価は指針案の方法を用いた。

図8 (a)(b)に、曲げ決定型とせん断決定型に分離して評価した靱性計算値と実験値の比較を示す。図中の△、□はそれぞれ実験値、計算値で実際にはこれ以上の値をとることを示している。このように両者の最小値をとることにより、試験体の靱性能をより精度よく評価し得ることが分かる。帯筋のコンクリートに対する拘束効果はコンクリートモデルを介して評価法で考慮が可能である。そこで、曲げ決定型の試験体について、平面保持を仮定した曲げ解析から得られた靱性計算値と実験の限界部材角との比較を配筋詳細別に検討した。図9は曲げ決定型の試験体の、(a)口の字配筋法で標準フックを持つもの、(b)囲の字配筋法で標準フックを持つもの、(c)囲の字配筋法で高強度閉鎖筋を持つものの実験値と計算値の比較である。口の字配筋法で標準フックを持つものはやや危険側、囲の字配筋法で標準フックを持つものはやや安全側、囲の字配筋法で高強度閉鎖筋を持つものはそれより安全側に評価しているが、配筋詳細を考慮しない場合に比べ精度は向上した。

5. 材料強度と靱性および寸法効果

部材の耐力と変形能を論ずる際に念頭におかなければならない項目として寸法効果がある。本節では、靱性に及ぼす寸法効果として、i)材料の軟化挙動に起因する効果、ii)部材相互および接合部の靱性への貢献度が寸法で異なる効果、iii)部材・構造に実現される材料特性の均質性に関する効果、を取り上げて検討している。

さらに、近年、鉄筋コンクリートの材料強度が高くなってきており、普通強度の材料を用いた実験結果を参考に構築してきた既往の理論が対応できるのかどうかという点に関心が集まっている。そこで、このような観点から、土木構造物のコンクリート強度と軸力、建築構造物のコンクリート強度、建築構造物の鉄筋強度が変形能に及ぼす影響について検討している。

6. おわりに

構造物の靱性に依存する終局強度型設計法においては、部材の配筋の詳細を考慮して強度と変形能を評価することが重要となる。当委員会では終局強度型設計法の体系の中で配筋詳細を考慮する手法を開発することを目標として2年間の活動を行ったが、その問題点および今後の展望がようやくみえた段階で活動を終了することとなった。現在、拘束コンクリート、主筋の座屈、主筋の抜け出し、および付着割裂破壊などの問題においては部材の配筋詳細をある程度合理的に考慮することができると考えられる。しかし、軸力、曲げおよびせん断を受ける部材レベルにおいて、特に、せん断強度の算定法の問題においては、配筋詳細の問題はほとんど未解決といってよく、今後の研究に期待するところが大きい。

本委員会は靱性部材の配筋詳細に的を絞ったとはいえ、その内容は非常に多岐にわたっている。本報告で紹介できたのは、その極一部であり、委員会報告書およびシンポジウム論文集を参照し利用されることを重ねてお願いして、結語に代えさせていただく。

[参考文献]

- [1] 靱性部材配筋詳細研究委員会・報告書、(社)日本コンクリート工学協会、1990年5月
- [2] コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集、(社)日本コンクリート工学協会・靱性部材配筋詳細研究委員会、1990年5月30日
- [3] B. D. Scott, R. park and M. J. N. Priestley : Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops and High Strain Rates, Journal of ACI, pp. 13-27, 1982. 1-2
- [4] S. R. Iyenger, P. Desayi and K. N. Reddy : Stress-Strain Characteristics of Concrete Confined in Steel Binders, Magazine of Concrete Research, Vol. 22, No. 72, 1970. 9
- [5] 六車、渡辺史夫、他：横拘束筋によるプレストレストコンクリート梁の曲げ靱性改善に関する研究、第2回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 377-380
- [6] S. A. Sheikh and S. M. Uzumeri : Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns, Journal of Structural Division, ASCE ST12, pp. 2703-2722
- [7] 鈴木計夫、中塚信、他：角形補強筋によるコンファインドコンクリートの拘束機構と変形特性、コンクリート工学年次論文報告集、1989、pp. 449-454
- [8] 鈴木計夫、中塚信、他：角形補強筋によるコンファインドコンクリートの拘束機構と応力・ひずみ特性(その1、2)、日本建築学会近畿支部研究報告集、1989、pp. 728-742
- [9] 東端康夫、山口育雄、他：高靱性壁柱に関する実験的研究(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1988年、pp. 613-614
- [10] 鈴木計夫、中塚信、他：円形補強筋を用いたコンファインドコンクリートの応力・ひずみ特性および同コンクリート内に配筋された圧縮軸筋の座屈性状、コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集、J C I、pp. II 21-32、1988. 3.
- [11] 小柳、六郷、山本、他：圧縮を受けるコンクリート中の鉄筋の座屈性状、土木学会第44回年次学術講演梗概集、第5部、pp. 502-503、1989. 10.
- [12] Maurizio Papia, Gaetano Russo, Gaetano Zingone, "Instability of longitudinal Bars in RC Columns," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 2, 1988
- [13] 森田司郎、角徹三：鉄筋コンクリート柱・はり接合部におけるはり軸筋の接合部からの抜け出しについて、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和47年、pp. 1099-1100
- [14] 多田利正、武田寿一：鉄筋コンクリート造柱はり接合部補強法に関する実験的研究(その2、異形鉄筋の付着実験とその解析)、日本建築学会論文報告集、第363号、1986、5月
- [15] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説、1988
- [16] Park, R., et. : Ductility of Reinforced Concrete Column Sections in Seismic Design, Journal of ACI, Vol. 69, No. 9, September 1972, PP. 543-551
- [17] 平石久廣、稲井栄一、他：変形機構に基づくR/C柱の曲げ靱性能に関する研究、コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム 第II編 論文集、1988、3、pp. 217-228
- [18] 青山博之、他：靱性に依存する鉄筋コンクリート造建築物の耐震設計法の開発に関する研究、昭和60年度科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書、同別冊、昭和61年3月