

鉄筋コンクリート造柱はり接合部 に関する最近の研究

文献調査委員会

担当：北山和宏*

1. 背景

日本では、RC造柱はり接合部の地震被害例がほとんど見られなかったために、接合部に関する耐震設計規定が設けられていなかったが、1988年に日本建築学会から出された終局強度設計法にもとづく耐震設計指針(案)¹⁾において初めて明文化された。靱性に富んだ挙動を期待できるはり崩壊型の終局状態を確保するためには、柱はり接合部のせん断破壊や極端な付着破壊を防ぐことが不可欠である。接合部の耐震設計規定を作成するにあたっては日本での柱はり接合部に関する研究が反映された。その内容は以下の2点に大別される。

- 1) 接合部内のせん断力は対角方向に形成される斜めコンクリート・ストラットによって伝達されると考え、このストラットの圧壊を防止するために、入力せん断力をコンクリート圧縮強度の関数として制限する。接合部横補強筋によるせん断耐力への寄与は大きくないと考えられている。
- 2) 接合部内を通し配筋されるはり主筋の付着劣化によって顕著な剛性低下やスリップ性状が生ずることを防ぐために、主筋径と柱せいとの関係を制限する。

比較のため、アメリカおよびニュージーランドにおける接合部の耐震設計規定の概念について説明する。アメリカではACI-ASCE 352委員会の勧告²⁾において、はり部材が接合部を被覆する割合に応じて接合部入力せん断力を制限するとともに、主筋径と柱せいとの関係を定めている。接合部せん断抵抗機構についてはとくに述べていないが、日本と同様に、斜め圧縮ストラットによって伝達されると考えている。これに対しニュージーランドのNZS 3101:1982³⁾では、日本、アメリカの耐震設

計規定と考え方が大いに異なる。接合部せん断抵抗機構として、横補強筋の引張り力および柱中段筋の付着力に依存したトラス機構を主と考えており、接合部内に多量の横補強筋を配することを要求している。はり主筋径と柱せいとの関係も、鉄筋強度によって厳しく制限されている。このように柱はり接合部の耐震設計規定が国によって異なるのは、骨組に要求される性能、使用される材料、建設現場での慣例、などが異なるためと思われる。

ここでは、これらの耐震設計規定の基となった研究を紹介することはせず、これらの規定が提案された後の海外での研究(過去5年程度)について概観し、接合部の耐震性能について、現在どのような視点をもった研究が行われているのか調べることを目的とする。なお、国内での研究については、角・浅草による解説⁴⁾を参照されたい。

2. 研究のレビュー

[ニュージーランドでの研究]

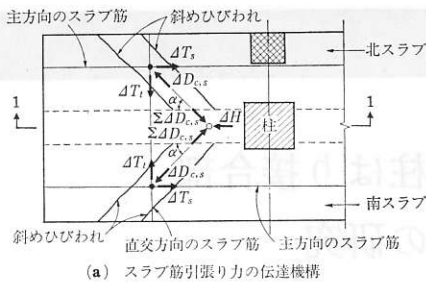
D. Ruitong and R. Park⁵⁾は、骨組に要求される靱性能として降伏変形にもとづく塑性率4および2.5を設定し、平面内柱はり接合部の繰返し載荷実験を行った。その結果から、NZS 3101の接合部横補強筋量の規定、および通し配筋される(はり主筋径/柱せい)比の制限を緩和できることを示した。具体的には、接合部せん断抵抗機構として斜めストラット・コンクリートによる寄与を大幅に考慮し、塑性率2.5を目標とする骨組においては、接合部に入力されるせん断力の60%を負担するとした。また、通し配筋される(はり主筋径/柱せい)比については、上端・下端の鉄筋量のちがいを考慮して、塑性率4の骨組における下式を提案した。

$$d_b/h_c \leq 2/(1+\beta)/20 \quad (1)$$

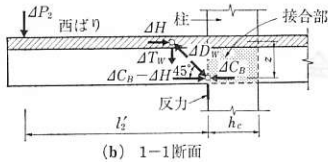
(鉄筋降伏強度 2750 kgf/cm²)

$$d_b/h_c \leq 2/(1+\beta)/28 \quad (2)$$

* きたやま・かずひろ/宇都宮大学助手 工学部建設学科 (正会員)



(a) スラブ筋引張り力の伝達機構



(b) 1-1断面

図-1 Cheung らのトラスモデル⁶⁾

(鉄筋降伏強度 3800 kgf/cm²)

ここで、 d_b : はり主筋径、 h_c : 柱せい、 β : 上端筋量に対する下端筋量の比で 1 以下、である。また塑性率 2.5 の骨組では、(はり主筋径/柱せい) 比の制限は必要ないとした。

P. Cheung, T. Paulay and R. Park⁶⁾ は、スラブが付く平面内柱はり接合部の繰返し載荷実験を行い、スラブ筋引張り力が接合部に導入される機構を検討した。すなわち、図-1 のように、主方向および直交方向のスラブ筋の付着力によって、スラブ面内に斜め圧縮ストラットが形成され、この圧縮力が主方向はりを介して接合部に伝達されるとした。また、スラブによる接合部の拘束効果は期待できないと述べた。

[アメリカでの研究]

M.S. Al-Haddad and J.K. Wight⁷⁾ は、接合部の損傷をさけるために、はり端塑性ヒンジを柱面よりはりの内側に移動させる方法 (relocated hinge, 図-2 を参照) を採用した場合の建物の耐震性能を、地震応答解析によって検討した。その結果、普通のせん断スパン比をもつはりでは、ヒンジ領域を移動させることによる耐震性能の低下はほとんど生じないこと、せん断スパン比が 3.5 未満のはりでは、ヒンジ領域での回転変形が大きくなるため適切な配筋を施す必要があること、を明らかにした。

Y. Kurose ら⁸⁾ は、スラブ付き平面内柱はり接合部の繰返し載荷実験およびスラブ付き立体柱はり接合部の 2 方向載荷実験を行い、はり降伏後の層間部材角 1/25 rad で接合部せん断破壊が生じたこと、立体になることにより接合部せん断耐力が上昇したこと、上端引張り時のはり曲げ耐力に有効なスラブ筋量は全スラブ筋の 60% であったこと、などを示した。

A.J. Durrani and H.E. Zerbe⁹⁾ は、外柱はり接合部

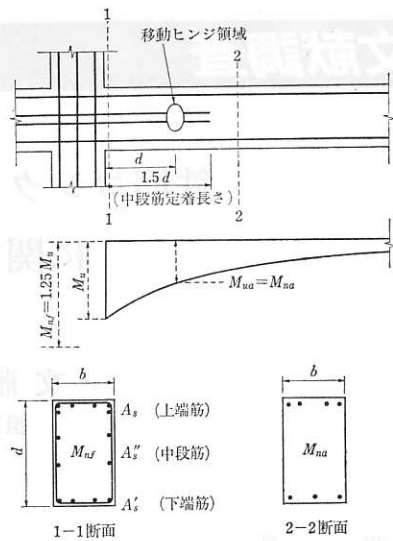


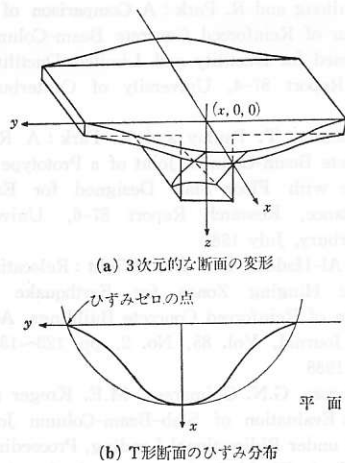
図-2 Relocated hinge の設計例⁷⁾

の地震時挙動に対するスラブの影響および直交ばりによる拘束効果を調べるため、スラブ幅および直交ばりの有無を変数とした実験を行った。直交ばりの接合部に対する拘束効果は、直交ばりにねじれひびわれが発生した後は期待できないこと、直交ばりにねじれひびわれが生じた後のスラブ有効幅は(柱幅)+(直交ばりのせいの 2 倍)と表せたこと、直交ばりのねじれによって接合部にせん断応力が伝達されること、などを示した。

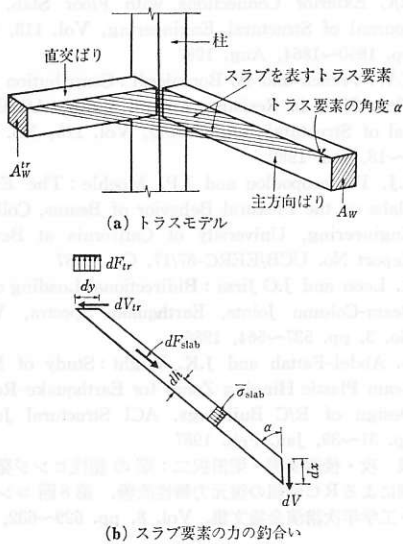
C.W. French and A. Boroojerdi¹⁰⁾ は、直交ばりのねじれ剛性がスラブ有効幅を介してはりの曲げ耐力に及ぼす影響を調べるため、スラブ付き立体内柱はり接合部の直交ばりのせいを変数として 1 方向繰返し載荷実験を行った。直交ばりのせいが大きくなりねじれ剛性が増大するほどスラブ有効幅は拡大したが、その差は変形が小さい時に顕著であり、大変形時の耐力の差は 10% 以内であったことを示した。

S.J. Pantazopoulou and J.P. Moehle¹¹⁾ は、はりの曲げ耐力に協力するスラブの効果を説明するために 3 つの方法で解析を行い、実験結果と比較した。以下にそれぞれの方法を示す。

- 1) T形断面モデル (図-3): 平面保持の仮定を用いず、T 形断面の横方向のひずみ分布を e 関数で表現した。
- 2) トラス・モデル (図-4): 外柱はり接合部に取付く直交ばりがスラブ筋の引張り力により水平面内変形し、かつ、ねじれを生ずる場合のスラブの挙動を説明するために、スラブ面内において主方向ばりと直交ばりとを結び、斜め引張りトラスを考案した。主方向ばりに対するスラブの効果は、圧縮軸力を主方向ばりに導入することによって表現された。



図—3 Pantazopoulou らのT形断面モデル¹¹⁾



図—4 Pantazopoulou らのトラスモデル¹¹⁾

3) 簡易モデル： はり主筋とスラブ筋とを斜め方向のばねで結び、変形の適合条件からスラブ筋のひずみを求めた。

これらの解析にもとづいて、直交ばりが水平面内変形やねじれ変形を受けるとスラブの有効幅は減少することを示し、この時の有効幅として(はり幅)+(はりせいの3倍)を推奨した。また、内柱はり接合部や剛強な直交ばりをもつ外柱はり接合部における上端引張り時のスラブ有効幅として、以下の値を示した。

- a. 降伏前 (はり幅)+(はりせいの3倍)
- b. 降伏後 (はり幅)+(はりせいの4倍)
- c. 大変形時 (はり幅)+(はりせいの5~6倍)

R. Leon and J.O. Jirsa¹²⁾ は、立体内柱および外柱はり接合部の1方向あるいは2方向の繰返し載荷実験を

行った。柱およびはりの曲げ耐力が接近していたために2方向加力時に柱の損傷が顕著になったこと、柱軸力が接合部の挙動に与える影響はほとんどなかったこと、はり幅が小さいと柱隅部のコンクリートの剥落が早期に生じ、柱端部にヒンジが発生したこと、などを指摘した。また、直交ばりとスラブは接合部内の斜め圧縮ストラットの維持に貢献するが、スラブが拘束するのは接合部の上部だけであるので、接合部の耐力増大に寄与することは考え難いと述べた。接合部を健全に保つために、以下のような提案を行った。

- 1) 接合部入力せん断応力度を $4\sqrt{f_c'}$ (単位: kgf/cm²) 以下に制限する。接合部せん断抵抗面積は $b \times d$ (論文中に定義はないが、 b : 柱幅、 d : 柱有効せい、と思われる) とする。
- 2) 柱部材には、はり部材の少なくとも1.3倍の二軸曲げ超過強度を与える。
- 3) 接合部横補強筋や大きなはり断面が接合部を適切に拘束する。
- 4) 定着を得るためには、鉄筋径の24倍以上の長さが必要である。

3. ま と め

ここ数年の日本における柱はり接合部に関する研究は、接合部パネル内のせん断抵抗機構に関するものが多く、はり主筋の付着性状による影響、接合部横補強筋の役割、柱中段筋の役割などが、実験および有限要素解析によって検討されている。また、力の釣合いにもとづくマクロ・モデルの提案も行われている。そのほかにも、骨組の変形性能と接合部せん断挙動との関係、2方向地震力を受ける接合部の挙動など幅広く研究されている。

一方、上述した外国の研究には、スラブ筋の引張り力がはり曲げ耐力に寄与する機構や、スラブ有効幅と直交ばりのねじれ剛性との関係など、立体骨組として柱はり接合部をとらえた研究が多く、日本とは多少視点が異なると思われる。日本では、スラブの付く内柱はり接合部では、直交ばりの両側でスラブ筋が引張り力を負担するので、直交ばりに生ずるねじれは小さいと考えられており、直交ばりのねじれ剛性とスラブ有効幅とを検討した研究はなかった。また、外柱はり接合部では、スラブが片側にしかないため、直交ばりにねじれは生ずるが、実際にねじれひびわれが生じ、スラブ有効幅に影響を与えたような実験例は少なかった。スラブの有効幅が、日本でははりスパンの関数として表現されるのに対して、アメリカでははりせいの関数で表されている点も異なる。スパンとはりせいとは密接に関係しているが、どちらがより合理的にスラブ有効幅を表現するか、検討する必要がある。

ニュージーランドでは、骨組に要求する変形性能によって接合部の耐震性能を設定する方法を検討し、接合部せん断抵抗機構として斜め圧縮ストラットの寄与分を大きく認めたこと、および、一部で(はり主筋径/柱せい)比の制限をなくしたことが注目される。ただし、(はり主筋径/柱せい)比を式(1)、(2)のように定めるにあたっての、接合部に要求される耐震性能の判断基準を明らかにすることが望まれる。また、設計法として使用するためには、接合部架構の塑性率と地震応答との対応関係や、塑性率と配筋詳細との関係を定める必要がある。

接合部内を通し配筋されるはり主筋の付着劣化の制限に関しては、(はり主筋径/柱せい)比だけで表現するのは適切でなく、日本の終局強度型耐震設計指針(案)¹⁾の解説に示されているように、さらに鉄筋強度およびコンクリート強度の関数として表現するのが合理的であると考える。

はり端塑性ヒンジの移動(relocated hinge)について、その有用性を地震応答解析をもとに指摘したことは評価できる。ヒンジ域を移動させた平面柱はり接合部については Wight¹³⁾らや城¹⁴⁾らによって実験が行われており、この場合、はり端塑性ヒンジの回転量が増大し、はりせん断力も増加することから、適切なヒンジ位置と配筋詳細とが要求される。

参 考 文 献

- 1) 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，1988.10
- 2) ACI-ASCE Committee 352：Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures, ACI Journal, Vol. 82, No. 3, pp. 266~283, 1985
- 3) Standards Association of New Zealand：New Zealand Standard Code of Practice for the Design of Concrete Structures, NZS 3101, 1982
- 4) 角 徹三・浅草 肇：鉄筋コンクリート柱はり接合部の研究の動向，コンクリート工学，Vol. 26, No. 10, pp. 14~22, 1988.10

- 5) D. Ruitong and R. Park：A Comparison of the Behaviour of Reinforced Concrete Beam-Column Joints Designed for Ductility and Limited Ductility, Research Report 87-4, University of Canterbury, June 1987
- 6) P. Cheung, T. Paulay and R. Park：A Reinforced Concrete Beam-Column Joint of a Prototype One-way Frame with Floor Slab Designed for Earthquake Resistance, Research Report 87-6, University of Canterbury, July 1987
- 7) M.S. Al-Haddad and J.K. Wight：Relocating Beam Plastic Hinging Zones for Earthquake Resistant Design of Reinforced Concrete Buildings, ACI Structural Journal, Vol. 85, No. 2, pp. 123~133, Mar.-Apr. 1988
- 8) Y. Kurose, G.N. Guimaraes, M.E. Kreger and J.O. Jirsa：Evaluation of Slab-Beam-Column Joint Response under Bidirectional Loading, Proceedings, Vol. VIII, Ninth World Conference on Earthquake Engineering, pp. 569~574, Aug. 1988
- 9) A.J. Durrani and H.E. Zerbe：Seismic Resistance of R/C Exterior Connections with Floor Slab, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 113, No. 8, pp. 1850~1864, Aug. 1987
- 10) C.W. French and A. Boroojerdi：Contribution of R/C Floor Slabs in Resisting Lateral Loads, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 1, pp. 1~18, Jan. 1989
- 11) S.J. Pantazopoulos and J.P. Moehle：The Effect of Slabs on the Flexural Behavior of Beams, College of Engineering, University of California at Berkeley, Report No. UCB/EERC-87/17, Oct. 1987
- 12) R. Leon and J.O. Jirsa：Bidirectional Loading of R.C. Beam-Column Joints, Earthquake Spectra, Vol. 2, No. 3, pp. 537~564, 1986
- 13) B. Abdel-Fattah and J.K. Wight：Study of Moving Beam Plastic Hinging Zones for Earthquake-Resistant Design of R/C Buildings, ACI Structural Journal, pp. 31~39, Jan.-Feb. 1987
- 14) 城 攻・後藤康明・柴田 択二：梁の塑性ヒンジ発生域制御によるRC骨組の復元力特性改善，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，Vol. 8, pp. 629~632, 1986