高軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の曲げ靱性改善手法に 関する一提案

A PROPOSAL OF A NEW METHOD TO IMPROVE FLEXURAL DUCTILITY FOR REINFORCED CONCRETE COLUMN SUBJECT TO HIGH AXIAL LOAD

堀田 久人*, 滝口 克己**

Hisato HOTTA and Katsuki TAKIGUCHI

In this paper, a new method to improve flexural ductility of reinforced concrete column is proposed. This new method is to add peculiar longitudinal bars symmetrically wrought so as to be effective against compression but not effective against tension. The members with those additional bars may have the same performance as the ones in which the longitudinal bars are arranged eccentrically presented in the previous paper ¹⁾ while they keep symmetrical section required to the interior column. Their seismic performance was investigated empirically as they were compared with the ordinary members'. According to the authors' expectation, the proposed method greatly improves the ductility of the members.

Keywords: reinforced concrete, interior column, high axial load,
flexural ductility, severed reinforcing bar

鉄筋コンクリート, 内柱, 高軸力, 曲げ靱性, 切断鉄筋

1. 序

鉄筋コンクリート構造は、極言すれば、脆性材料であるコンクリートを破壊させず、鉄筋を破壊（塑性化）させることで靱性能を確保した構造である。梁部材では、引張り鉄筋比を釣り合い鉄筋比以下に制限することで、比較的容易に上述の事柄を実現し得ているが、柱部材では、軸力比によっては必ずしも引張り鉄筋の塑性化によるエネルギー吸収能力を十分発揮させているとは言い難く、軸力比が大きくなる程、変形能力が乏しくなるという欠点を有している。しかしながら、現行の粘りに期待した設計法では、激震時に最下層の柱脚の曲げ降伏を許容していることから、この部位の軸力保持能力まで含めた靱性能が建物全体の変形能力を規定しているといっても過言ではなく、柱の靱性能を十分確保する意義は大きい。

柱の曲げ変形能力を確保する手段としては、従来は専ら、いわゆるコンファインドコンクリートといった圧縮側のコンクリート自体の圧縮靱性を高める手法が採られてきた。¹⁾ これに対し、曲げを一方向に限定して考えれば、圧縮側の鉄筋のみを増加させ、断面を偏断面とすることも、コンクリートの圧縮力負担を圧縮鉄筋で低減し得るので、有効な靱性能改善手法になり得る。偏心配筋した柱の曲げ靱性改善効果については、筆者らの既応の研究²⁾において、断面解析及び、定軸力下における曲げ試験により確認済みである。

もっとも、「曲げを一方向に限定して考えれば」と断り書きしたように、柱、特に内柱は正負交番の曲げに抵抗しなければならないので、断面には対称性が要求されるのが一般である。しかし、ここで仮に「圧縮力には抵抗するが、引張り力を負担しない鉄筋」が存在すれば、話は変わってくる。即ち、通常の鉄筋に加え、この特殊筋を断面对称配筋することで、任意方向の曲げに対して断面对称性を保持しつつ、偏心配筋の効果が狙えることになる。以上が、本研究の発想の背景である。

具体的には、Fig. 1に示すように一部の鉄筋を危険断面近傍で切

Fig. 1 Outline of proposed method

* 東京工業大学工学部建築学科 助教授・博士(工学)

** 東京工業大学工学部建築学科 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Faculty of Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Faculty of Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

断し、圧縮力は切断された鉄筋同士の接触面圧によって伝達されることを目論んでいる。実際には、施工性を考慮し、一度切断した面を旋盤で切削加工した後、リブ部の点溶接により再度接合したものをを用いる。こうして加工した鉄筋は、点溶接部の冷却収縮により接触面に圧縮応力が、溶着部に引張り応力が作用しており、引張り力に対して早期に破断することが期待される。問題は、目論見どおり、偏心配筋の効果が現れるまで、即ち、塑性流れが生じるまでの圧縮力伝達能力があるかどうか、及び、切断位置で鉄筋の太柄作用がなくなること、あるいは、断面性能が急変することの悪影響がないかどうか等である。本論文は、上記の事柄を実験的に検討するとともに、通常配筋の柱モデルとの比較実験を通して提案手法の有効性について論じたものである。

2. 切断筋の引張り及び圧縮性能

Fig. 2 に切断鉄筋の加工手順を示す。鉄筋は電動のこぎりで材軸にほぼ垂直に切断した後、切断面ができるだけ平滑になるように旋盤で切削処理を施す。切断面を再び突き合わせ、万力で固定し、リブ部2箇所を点溶接により再び接合する。切断面の面仕上げは、鏡面加工からは程遠い程度の粗い仕上がりである。

再接合した鉄筋の引張り試験結果を Table 1 に示す。鉄筋は、後述の曲げせん断実験の柱の主筋にも用いるSD390規格のD10異形棒鋼である。試験片数は5本で、その見かけの破断強度（破断荷重を公称断面積で除したもの）は、1.23～1.70tf/cm²であり、D10 自体の降伏応力度の1/3程度である。実験室の溶接機とつたない技術で自作した割には、破断強度は比較的安定したものとなっている。

次に、切断鉄筋の圧縮力伝達能力を調べることを目的に行った単筋柱の圧縮試験結果について述べる。試験体図を Fig. 3 に示す。試験体は12×12×24cmの直方体形状で、中心にD13異形棒鋼が埋め込まれている。鉄筋は中央部で切断処理を施したものと通常のものの2通りで、これら2体の圧縮時の挙動を比較し、切断鉄筋の圧縮性能を調べようとしたものである。測定項目は、荷重、中央部20cm区間の変位、コンクリート表面の軸歪み、及び切断位置から6

cm離れた箇所の鉄筋の歪みである。当然の事ながら試験体は同一パッチで練られたコンクリートを用いて作成されている。荷重変位関係を Fig. 4 に、コンクリートと鉄筋の歪みの関係を Fig. 5 に、変位と鉄筋の歪みの関係を Fig. 6 に示す。実線が通常の鉄筋を内蔵した試験体の、点線が切断鉄筋の結果である。また、Fig. 5,6中の破線は、平面保持が成立し、付着が完全の場合の縦軸と横軸の関係を示している。Fig. 4 より、若干剛性が異なるものの最大耐力、その後の耐力低下の様子に至るまで、通常と切断の両試験体に有意差は認められない。また、最大耐力を迎える手前では、付着の劣化により、鉄筋の歪みが、コンクリートの歪みに追従できない現象が共に認められる（Fig. 5）が、ほぼ最大耐力時には両鉄筋ともに圧縮降伏し、変位の増大とともに1.8%程度まで塑性流れを起こしていることが Fig. 6 より認められる。本実験より、切断鉄筋は、剛性、圧縮力伝達能力とともに、通常の鉄筋と変わらない性能を有しているといえる。

3. 通常の鉄筋コンクリート柱との比較実験

3.1 試験体及び実験方法

試験体リストを Table 2 に、試験体の形状及び配筋の詳細を Fig. 7 に示す。実験は、主筋の配筋を通常の平行配筋としたNシリーズと、一部の主筋をX形配筋としたXシリーズの2つで構成されている。Nシリーズは、通常の鉄筋を4隅に平行配筋（全主筋比1.11%）したNN試験体と、NN試験体にさらに同量の、柱の両端部近傍で切断処理した切断鉄筋を付加配筋したNS試験体の比較実験である。またXシリーズは、4隅の平行配筋に加え、4本の通常の鉄筋をX形に配筋した、即ち全主筋比が2.22%のXN試験体と、X形に配筋

Fig. 2 Making process of severed bar

Table 1 Mechanical properties of severed bar

Deformed Bar D10	Normal Bar	Severed Bar				
		1	2	3	4	5
Yield Strength (tonf/cm ²)	4.72	---				
Tensile Strength (tonf/cm ²)	6.22	1.53	1.23	1.70	1.43	1.68

Fig. 3 Dimension and detail of specimen for compression test

Fig. 4 Load - axial displacement curves

Fig. 5 Strain of steel - strain of concrete relations

Fig. 6 Strain of steel - axial displacement relations

Table 2 List of specimens for bending test with axial compression

Specimen		NN	NS	XN	XS
b×D×h (mm)		160×160×640			
Longitudinal Reinforcing Bars	Normal Bars	4-D10 (1.11%)			
	Additional Bars	Severed Parallel Bars		Diagonal Bars	Severed Diagonal Bars
Hoop Reinforcing Bars		2-6 ϕ @30 (1.17%)		2-6 ϕ @40 (0.88%)	
Compressive Strength of Concrete σ_B (kgf/cm ²)		270	270	315	310
Axial Force (tf)		32 (0.46bD σ_B)		40 (0.50bD σ_B)

Fig. 7 Dimension and detail of specimens for bending test with axial compression

した鉄筋を切断鉄筋に置き換えたXS試験体の比較実験である。配筋をX形とした理由は、コンクリート強度に比して主筋が比較的高強度のSD390規格（降伏応力度4.72tf/cm²，Table 1参照）であったことと、16cm角の柱断面に対して、D10という太径の主筋を用いたため付着に対する条件が厳しく、平行配筋では、付着割裂破壊を起こす恐れがあったためのみで、他意はない。表に示したコンクリート強度は、いずれも加力実験直後に行った試験体と同一養生条件のシリンダー強度である。全ての試験体に対して、定軸力下の繰返し逆対称曲げせん断試験を実施した。試験体のシェアスパン比はいずれも2.0で同一で、導入定軸力は、Nシリーズでは0.46bD σ_B 、Xシリーズでは0.50bD σ_B である。また、せん断補強筋比はNシリーズでは1.17%、Xシリーズでは0.88%である。

Fig. 8に切断鉄筋の詳細図を示す。切断位置は、NS試験体では、危険断面より柱側5mmの位置、XS試験体では危険断面とした。歪みゲージ貼付位置は、危険断面より20mm柱側に入ったところで、これは切断鉄筋に限らず同様である。また、切断位置で柱の断面性能が急変することから、変形が切断位置に集中し、付着の程度によっては引張り鉄筋が破断する恐れがあることから、NS試験体では切断位置から両端30mm、計60mmの範囲にパラフィンワックスを塗付し、付着を除去している。XS試験体では特に付着除去処理を施していないが、歪みゲージ保護のための自己癒着ビニルテープ（VMテープ）が、ゲージ周辺の約30mmの範囲に巻かれており、そ

Fig. 8 Dimension and detail of severed bars

Fig. 9 Loading schedule

の範囲の付着はないものと考えられる。これは、切断鉄筋に限らず他の鉄筋についてもいえることである。

荷重は、変形角制御の正負交番であり、制御変形角はFig. 9に示す通りである。但し、履歴性状が不安定となり、設定軸力を保持できなくなった場合は、その時点で加力を終了している。測定項目は、軸力、材端モーメント、材端の回転量、軸方向変位、及び、主筋の危険断面近傍での軸歪みである。

3.2 実験結果及び考察

Fig. 10に、両端の材端モーメントの平均値と部材角の関係を示す。材端モーメントは、部材座標系で定義されたモーメントであり、P- Δ 効果はない。図中の破線は、コンクリートを引張り強度が0、

Fig. 10 End moment - end rotation curves

Fig. 11 Axial displacement - end rotation relations

圧縮強度が σ_B の剛塑性体、鉄筋を強度が降伏応力度 σ_y の剛塑性体、切断鉄筋を引張り強度が0、圧縮強度が降伏応力度 σ_y の剛塑性体と仮定したときの断面の曲げ強度の計算値を示している。

載荷計画通りの加力が行えたのはNS試験体のみで、NN試験体は9サイクル目の負方向載荷中に、XN試験体は7サイクル負側でXS試験体は最終サイクルでそれぞれ設定軸力を維持できなくなり、載荷を終了した。しかしながら、Nシリーズ、Xシリーズ共に、切断鉄筋を用いたNS、XS試験体の方が、明らかに軸方向力に対する安定性が優れているといえる。Fig. 11は、各試験体の軸方向縮みの推移を部材角との関係で示したものである。切断鉄筋を用いた試験体は、導入軸力比が $0.46bD\sigma_B$ 、あるいは $0.50bD\sigma_B$ と大きいにも関わらず、各半サイクルで復元力が安定している間は、端部の曲げ降伏後に軸方向に伸びる挙動を示しており、通常の鉄筋コンクリート柱試験体に比べ、中立軸深さが浅くなっていることが伺える。これは、曲げを受けたときに、断面が圧縮鉄筋量が多い偏心断面となっていることの効果である。曲げを受けているときの切断鉄筋の圧縮軸力負担分は、鉄筋が圧縮降伏しているとすれば約 $6.7tf$ で、これはNシリーズでは約 $0.1bD\sigma_B$ 、Xシリーズでは約 $0.09bD\sigma_B$ の軸力比に相当する。この曲げを受けるときのコンクリートの軸力負担の軽減が、靱性改善効果をもたらしたものと考えられる。

Fig. 12に、各半サイクルでの曲げ変形による塑性エネルギー吸収量の累積値を示す。実線が、通常の鉄筋コンクリート柱試験体を、点線が切断鉄筋を用いた試験体を表わしている。同サイクルでのエネルギー累積値は、曲げ耐力自体が切断鉄筋を用いた試験体の方が小さいXシリーズでは当然のことではあるが、Nシリーズでは切断鉄筋を付加した試験体の方が曲げ耐力が高いにも関わらず、いずれも通常の鉄筋コンクリート試験体の方が高い値を示している。復元力特性 (Fig. 10) を見ても、切断鉄筋を用いた場合、履歴ループの形状が通常の鉄筋コンクリート柱に比べやせている、特に除荷、再載荷域が直線的で、膨らみがないことが伺える。これは、通常の鉄筋コンクリート柱試験体がコンクリートの圧縮塑性化で相当のエネ

Fig. 12 Accumulated energy absorbed due to bending during each half hysteresis loop

ルギーを吸収しているのに対し、切断鉄筋を用いた場合には鉄筋による仕事为主になるためと考えられる。復元力特性は、エネルギーの面から見れば、通常の鉄筋コンクリート柱に比して良好とは言えないが、柱に求められる最も重要な性能は軸力を安定的に保持することであり、エネルギー吸収は他の梁端の塑性ヒンジにまかせてしまえばよいので、大きな欠点とはならない。

Xシリーズの試験体の主筋の歪み履歴の一例をFig. 13に示す。左より、順にXN試験体の平行配筋の主筋、X形配筋の主筋、XS試験体の平行配筋の主筋、X形配筋の切断鉄筋の歪み履歴である。切断鉄筋は、制御変形角 $0.01rad$ の載荷中に引張り側で破断後、再圧縮時には降伏歪みを上回っており、十分な圧縮力伝達能力があることが認められる。また、引張りと圧縮の繰り返しの中でも、圧縮時の性能に劣化は認められず、少なくとも本実験に関しては、例えば鉄筋の軸芯がずれるというような鉄筋の太柄作用がなくなることの悪影響は見られなかった。XN試験体では主筋は平行配筋のものも、X形配筋のものも材端ではほとんど圧縮歪みの領域でほぼ同様な挙動をしているのに対して、XS試験体の平行配筋の鉄筋、即ち切断されていない鉄筋は、引張り域から圧縮域までかなり大きな歪み変動をしており、大きな塑性仕事を為していることが伺える。また本実験に関する限り、鉄筋に大きな引張り歪み集中は認められなかった。

Fig. 13 Several examples of strain of bars - end rotation relations

Fig. 14 Stress - strain curves of the bars calculated using the strain histories in Fig. 13

しかしながら、本実験では、使用した鉄筋が断面に対して比較的高強度であることから付着に厳しい条件になっていること、軸力が相当高軸力であることと載荷が正負交番で制御変形角も正負で等しいことから圧縮時に付着劣化が著しいであろうこと、及び主筋の歪み測定のために、若干ではあるがあらかじめ付着がきれている部位が存在すること等、多くの条件が鉄筋の歪み集中に対しては楽な方向に作用しており、この件については今後も詳細な検討を要する。その結果、やはり引張り鉄筋への歪み集中が厳しいのであれば、その解決策として、NS試験体で施したように主筋の付着を一部除去する方法、あるいは、切断筋を多数配する場合には、切断位置を塑性ヒンジ領域内に複数設ける方法を考えている。

Fig. 14は、Fig. 13で示した鉄筋の歪み履歴より計算した鉄筋の応力-歪み曲線である。鉄筋の応力-歪み履歴は、渡辺⁴⁾らと同様に、横尾、中村⁵⁾のモデルに基づいて、Ramberg-Osgood型の関数で与えた。ただし、渡辺⁴⁾らと異なり、降伏棚は考えず、2次勾配をもつBi-linear型の応力-歪み関数とし、2次勾配は、加藤⁶⁾の研究に基づいて与えている。切断鉄筋の挙動について見てみると、各サイクルの負方向載荷時にほぼ0近傍まで応力が低下しており、計算結果は信用し得るものと考えられる。本図からも、切断鉄筋を用いた試験体の平行配筋した鉄筋が大きな塑性仕事をしているといえる。

4. 結論

鉄筋コンクリート柱、特に内柱の曲げ靱性を改善する方法として、危険断面近傍で切断した切断鉄筋を断面に対称付加配筋する手法を考案し、その有効性を従前の鉄筋コンクリート柱との比較実験により検討した。その結果、以下の知見を得た。

1) 本提案手法で加工した鉄筋は、目論見どおり、引張りに弱く、圧縮力伝達能力は、通常のそれと変わらない鉄筋となっており、この鉄筋を対称付加配筋した柱は、曲げに対し圧縮鉄筋量の多い(複

筋比が1より大きい) 偏心配筋断面を有する柱となる。

2) 本提案柱は、エネルギー吸収能力という面からみた水平力に対する復元力特性は、通常の鉄筋コンクリート柱に劣るが、偏心配筋の効果により、軸方向力の支持に関する安定性は格段に向上し、その結果、変形能力(軸力を安定して保持し得る繰り返しの累積変位)は改善される。

ただし、前章末でも述べたが、鉄筋を切断したことによる通常の鉄筋への引張り歪み集中の問題は未解決であり、今後の課題とした。また、本論文で掲げた試験体では、試験方法が逆対称の曲げせん断実験であったため、切断鉄筋も柱の全長にわたる通し配筋としたが、実際には塑性ヒンジを計画する部位のみに、必要な付着長さ、定着長さをとって配筋すれば十分であり、付加鉄筋量の多さの面は、ハンドリングが通常の主筋と変わらず、せん断補強筋に比べればはるかに簡便であろうことを考え合わせれば、それ程大きなハンディキャップとはならないであろうと考えている。

参考文献

- 1) 例えば、六車 熙、渡辺史夫、他：横補強による高強度コンクリートの靱性改善に関する研究、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp.317~320、1983。
- 2) 堀田久人、安藤秀樹：変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱における偏心配筋の有効性に関する研究、日本建築学会大会(北海道)学術講演梗概集(C-2分冊) pp.413~414、1995.8。
- 3) 倉本 洋、宮井清忠、南 宏一、若林 実：高圧縮力を受けるX形配筋柱の強度と靱性、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.821~824、1986。
- 4) 渡辺史夫、大住和正、六車 熙：異種強度軸筋の混使用によるRC柱断面曲げ性能の改善、日本建築学会構造系論文報告集、第430号、pp.41~49、1991.12。
- 5) 横尾義貫、中村恒善、小宮山俊朗、河田康夫：Non-stationary hysteretic uniaxial stress-strain relations of a wide-flange steel、日本建築学会論文報告集、第259号、pp.53~66、1977.9。
- 6) 加藤大介：配筋法を考慮した鉄筋コンクリート造柱の変形能の評価法、日本建築学会構造系論文報告集、第450号、pp.81~88、1993.8。

(1996年11月10日原稿受理、1997年1月10日採用決定)