

[109] X形配筋を用いた鉄筋コンクリート柱の耐震性能について

正会員 ○ 若林 実 (京都大学)

正会員 南 宏一 (大阪工業大学)

1. まえがき

中低層の鉄筋コンクリート造の建物の耐震安全性を確保するためには、鉄筋コンクリート短柱のぜい性的な破壊をとまなせん断破壊を防止し、柱材の耐震性能を向上させることが不可欠の条件である。国内、国外の最近の地震被害の教訓にもとづいて我が国の各研究機関において柱材の耐震性能を向上させるための有効な方法を確立するために、実大実験を含めた実験的研究が精力的に行なわれ数多くの貴重な研究成果が蓄積されてきた。

しかしながら、これらの研究のほとんどは耐震性能の向上のための研究と言っても、従来より慣用されてきた主筋を平行に配筋したいわゆる在来形の配筋法を用いた柱材のせん断破壊性状を検討することを基本としているもので、帯筋を溶接して完全な閉鎖形にするとか、帯筋にシングルあるいはダブルのスパイラル筋を用いるとか主に帯筋の量とか形状あるいは配筋法を変化させるなどの効果が検討され、ここで述べるような主筋の配筋法を従来のものと根本的に変えてみることによって柱材の耐震性能を向上させる試みはほとんどなされなかった。

2. X形配筋の適用

鉄筋コンクリート部材のせん断破壊によるぜい性的な破壊を主筋を筋違的に斜めに配筋(ここではX形配筋と¹⁾⁻⁴⁾称する)することによって防止しようとする試みは、1971年に Paulay らによって初めて示された。中廊下形式の並列連層耐震壁に設けられた境界りには強度のほかに十分なじん性をあたえることが必要である。これらの要求される性能を満たす構造法として境界りりの主筋を斜めに配筋することを提案し、実施設計において応用することを試みたものである。その後、この Paulay の着想にヒントを得て、はり部材のせん断抵抗にX形配筋^{5),6)}を応用する試みは Bertero らによってなされているが、筆者らはこのX形配筋を我が国で問題となっているせん断力の影響を著しく受ける鉄筋コンクリート短柱に適用して、その耐震性能を向上させることを考えいくつか⁷⁾⁻⁹⁾の基礎的な実験を行なった。その結果、X形配筋を施した鉄筋コンクリート短柱の耐震性能は、在来の平行配筋の柱に比して極めて優れていることが明らかにされたが、本論ではX形配筋を用いた鉄筋コンクリート柱のせん断抵抗性状に関する2、3の基本的な特性と、実施設計にX形配筋を適用する場合の問題点を述べる。

3. せん断実験法

鉄筋コンクリート造の建物において主筋を斜めに配筋する手法はコンクリート支承などに用いられ、従来主筋が交差する部分では基本的には曲げモーメントを伝達しないものとして取り扱われてきた。しかし、部材中間部に反曲点をもつ対称の曲げを受ける部材では、反曲点位置に主筋の交差部をあたえた場合には曲げモーメントの分布に対応して主筋間隔は保たれるので、地震力などの水平力による断面力が支配的となる柱材の配筋法として

は極めて合理的なものである。本実験ではX形配筋を用いた柱材の基本的な性状を検討するために全ての主筋が柱材の中央部で交差するようにX形配筋を施した試験体計画し、**図1**の実験装置を用いて、柱材の両端部に大きさの等しいくり返し曲げを、柱材の相対部材角 R を制御しながら負荷した(**図2**参照)。

4. 平行配筋とX形配筋のせん断破壊性状の比較

実験計画 従来より慣用されてきた平行配筋の柱とX形配筋の柱の破壊性状の基本的な相異点を検討するため

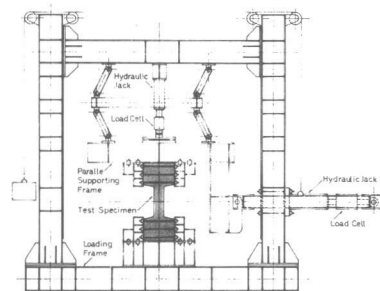


図1 実験装置

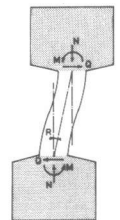


図2 変形の測定

に計画された試験体の形状寸法および配筋詳細の一例を 図 3 に示す。柱長さ h を 45 cm 柱せい D を 15 cm ($h/D=3$) とし平行配筋 (PA) と X 形配筋 (XA) の主筋量 ($r_{Pt} = 1.18\%$) および帯筋量 ($r_{Pw} = 0.42\%$) はともに等量として、主筋の配筋法のみを変化させたものである。なお、試験体 XA では 6 mm 筋を材軸方向に配置しているが、これは帯筋を固定するために設けられたもので曲げ抵抗に寄与しないように配筋されている。また、両試験体とも中心圧縮強度の 15% の圧縮力を負荷させている。

破壊モードと履歴曲線

図 4 に破壊状況を示す。試験体 PA のひびわれの様相は、せん断破壊の一種である付着剥離破壊の様相を示しているのに対して、試験体 XA では斜めに配筋した主筋に沿ったひびわれが若干生じているものの柱材端における曲げ破壊の様相を示している。図 5 に履歴曲線を示す。縦軸は作用せん断力 Q を、横軸は相対部材角 R を示す。試験体 PA では最大強度以後変位振幅の漸増にもなって急激に保有強度が減少し、かつ同一変位振幅におけるくり返し载荷に対する強度低下率も大きい。しかし、試験体 XA では試験体 PA に比して最大強度が大きいこと、最大強度以後の強度低下がほとんど見られないこと、履歴曲線はエネルギー消費能力の極めて大きいほぼ紡錘形を示していること、また同一変位振幅におけるくり返し载荷に対する強度低下もほとんど生じないことなどが観察され、せん断破壊を生ずる部材の耐震性能の欠点がほぼ改善されていることが認められる。図 6 は履歴曲線より得られた第一サイクルに対する包絡線を比較したもので最大強度および最大強度以後の強度低下の度合の差が明確に示されている。

エネルギー消費能力

エネルギー消費能力を比較したものを 図 7 に示す。縦軸は履歴曲線より得られた累積エネルギー消費量を示し、横軸はくり返し回数の累積を示す。変位振幅の小さい範囲では両者にはほとんど差は見られないが、変位振幅が大きい範囲になると両者には著しい差がみられ、最終変位振幅時では X 形配筋の試験体 XA の累積エネルギー消費量は平行配筋の試験体 PA のほぼ 2 倍となっている。

5. X 形配筋を施した短柱の変形性能

実験計画

せん断スパン比を小さくし、かつ作用圧縮力を大きくしてせん断破壊に対してより厳しい条件のもとで、X 形配筋の柱材の変形性能を検討した試験体の形状寸法および配筋詳細を 図 8 に示す。主筋量および帯筋量は上述の X 形配筋の試験体 XA と同じとし、実験変数として柱長さ h と柱せい D との比 ($h/D=1$ および 2 の 2 種類) 作用圧縮力 N と中心圧縮強度 N_0 との比 ($N/N_0=0, 0.2$ および 0.4 の 3 種類、なお無次元圧縮応力度比 N/bDF_c では 0, 0.27 および 0.52) を選択した。

変形性能

図 9 に各試験体の履歴曲線を示す。縦軸は作用せん断力 Q を、横軸は相対部材角 R を示す。X 形配筋の場合でも強度および変形能力はせん断スパンおよび作用圧縮力の値によって著しく左右されることが観察される。しかし $N/N_0=0.4$ の高圧縮力の場合を除けば、いずれのせん断スパンの試験体においても、 $R=0.02$ rad.

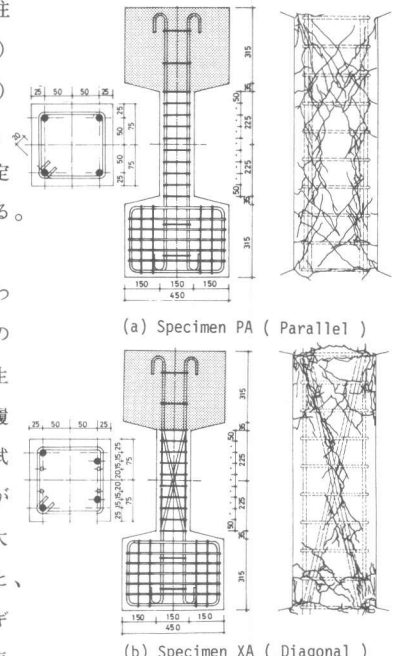


図 3 試験体 図 4 破壊モード (単位 mm)

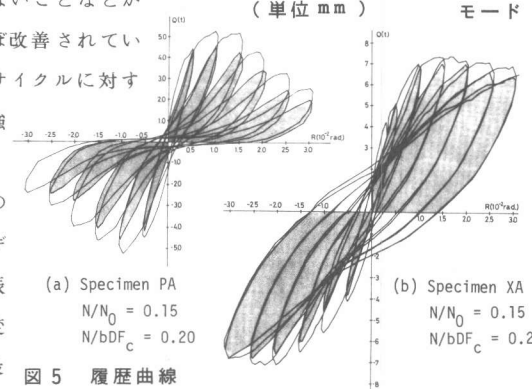


図 5 履歴曲線

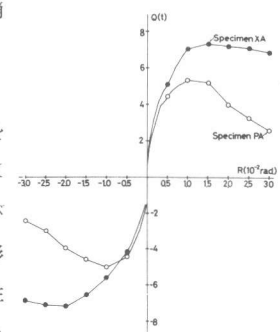


図 6 包絡線

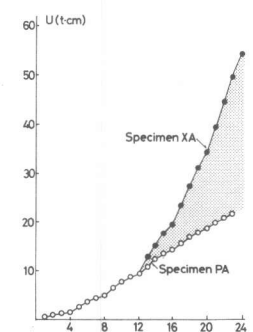


図 7 累積エネルギー消費量

程度の変形能力は期待でき、せん断スパンが極めて短い場合でも、X形配筋を施すことによってその耐震性能を向上させることが可能であることが推測される。

しかし、主筋の材端部の折れ曲がり部での応力伝達の良否および圧縮主筋の局部座屈に対する拘束状況は柱材の変形性能に著しい影響をあたえるので、その構造詳細については十分な考慮を払う必要があり、またX形配筋を用いた場合でも変形能力を確保するためには作用圧縮力に対してある限度を設けることが必要であることが本実験結果より推察される。

6. X形配筋の柱材の終局せん断強度

せん断抵抗機構 図10は圧縮、曲げおよびせん断を受けて終局状態になっているX形配筋を施した柱材の抵抗機構を示したものである。柱材の抵抗力は無筋コンクリートの抵抗力とX形配筋の主筋の抵抗力の和によってあたえられる。無筋コンクリートは斜めに作用する圧縮力を支える機能と圧縮鉄筋の座屈を抑える機能しか持っていないと考えられるから、したがって無筋コンクリートには偏心圧縮破壊は生ずるが、せん断破壊は生じない。また、主筋は一方が均等圧縮で他方は均等引張りで降伏して塑性変形が進行し、抵抗機構として主筋とコンクリートとの付着力は基本的には必要でないから、鉄筋コンクリート部材として付着破壊も生じない。

静的許容解析 無筋コンクリートと主筋の抵抗力を 図10の単純な静的な許容応力場にもとづくモデルによって求め、さらにそれぞれの抵抗力から拡張累加強度理論(図11 参照)にしたがって鉄筋コンクリート部材としての抵抗力を求めると、無次元化圧縮力 $n (=N/bDF_c)$ の大きさに応じて無次元化終局せん断強度 $q (=Q/bDF_c)$ は下記のようにあたえられる。

$$(a) \quad n_1 \leq n < n_2 \quad q = \frac{1}{2} \cdot \{ \sqrt{\eta^2 + 4 \cdot (n - n_1)} - 4 \cdot (n - n_1)^2 - n \} \quad (1)$$

$$(b) \quad n_2 \leq n < n_3 \quad q = (n - n_3) \cdot \tan \phi + 2 \cdot \mu_t \cdot \sin \phi + q_3 \quad (2)$$

$$(c) \quad n_3 \leq n < n_4 \quad q = 2 \cdot \mu_t \cdot \cos \phi + \frac{1}{2} \cdot \{ \sqrt{\eta^2 + 4 \cdot n - 4 \cdot n^2} - n \} \quad (3)$$

$$(d) \quad n_4 \leq n < n_5 \quad q = - (n - n_4) \cdot \tan \phi + 2 \cdot \mu_t \cdot \sin \phi + q_3 \quad (4)$$

$$(e) \quad n_5 \leq n \leq n_6 \quad q = \frac{1}{2} \cdot \{ \sqrt{\eta^2 + 4 \cdot (n + n_1)} - 4 \cdot (n + n_1)^2 - n \} \quad (5)$$

ここに $n_1 = -2 \cdot \mu_t \cdot \cos \phi$, $n_2 = -2 \mu_t \cdot \cos \phi + (1 - \lambda) / 2$,
 $n_3 = (1 - \lambda) / 2$ かつ ≥ 0 , $n_4 = (1 + \lambda) / 2$ かつ ≤ 1 ,
 $n_5 = 2 \cdot \mu_t + \cos \phi + (1 + \lambda) / 2$, $n_6 = 1 + 2 \cdot \mu_t \cos \phi = 1 - n_1$,
 および $q_3 = \frac{1}{2} \cdot \{ \sqrt{\eta^2 + 4 \cdot n_3 - 4 \cdot n_3^2} - n \}$

記号 $n = N / bDF_c$ (圧縮力を正とする), $q = Q / bDF_c$ N : 圧縮力 Q : 終局せん断強度
 $\mu_t = T_o / bDF_c$, $\lambda = \sqrt{\tan^2 \phi \cdot (1 + \eta^2) / (1 + \tan^2 \phi)}$, $\eta = h / D$, b : 柱幅 D : 柱せい h : 柱長さ
 F_c : コンクリートの圧縮強度 T_o : 片側主筋の降伏引張力 ϕ : 主筋と材軸のなす角度

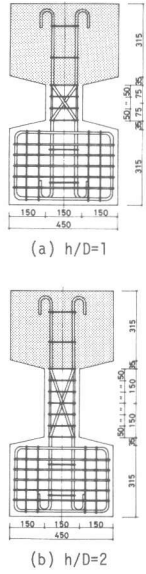


図8. 試験体 (単位 mm)

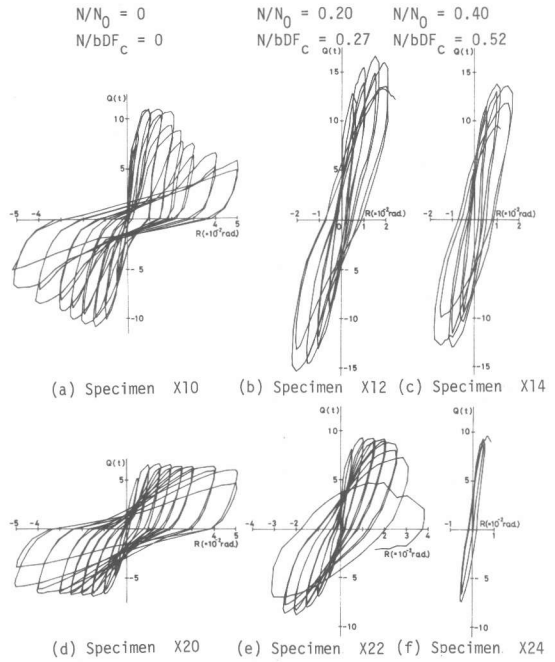


図9 履歴曲線

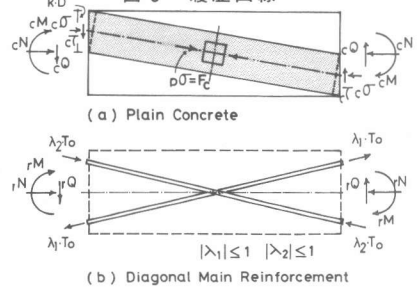


図10 静的許容解析

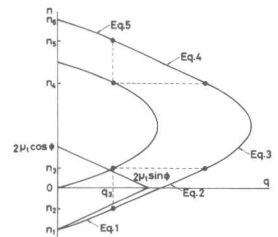


図11 拡張累加強度理論

表1 最大強度

Specimens	Measured Strength		Calculated Strength
	Positive Loading	Negative Loading	
XA	7.70	7.18	6.26
X10	10.92	10.79	9.83
X12	16.92	15.51	16.81
X14	14.12	13.30	18.79
X20	6.68	6.85	5.66
X22	9.37	9.03	8.93
X24	9.74	7.45	10.97

4節および5節におけるX形配筋の試験体の終局せん断強度に対する測定値と計算値を 表1 に示す。高圧縮力を受ける試験体X14、X24を除いて計算値はほぼ満足する結果をあたえ、ここに述べた単純な力学モデルによってX形配筋を施した鉄筋コンクリート部材のせん断強度を推定することが可能であることが示される。なお本解析には帯筋の効果は含まれていないが、コンクリートの圧縮変形性能を確保するにはある程度の帯筋量を配筋することは必要である。

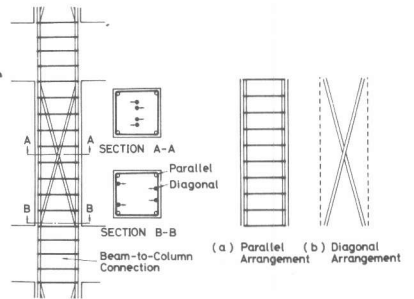


図12 X形配筋の応用

7. X形配筋の具体的方法と問題点

本論で述べたX形配筋が最も要求され、また配筋も容易であるのは学校建築や集合住宅のようにスパン方向に耐震壁があり、架構としての保有強度に余裕があるが、桁行方向は骨組架構のみで保有強度に対してあまり余裕がなく、しかも短柱が多い場合がある。図12はそのような建物の柱材の配筋例で平行配筋とX形配筋の組み合わせとなっている。種々の荷重条件下では柱材の反曲点は必ずしも柱材の中央部に来ないから平行配筋は必要である。通常の場合、必要な平行配筋の量(柱材の中央部の曲げモーメントに抵抗できる量)は多くないから、その量は施工に無理のない量の帯筋で曲げ破壊先行となる程度に抑えておき、残りの必要な主筋をX形配筋とすれば主筋量が増しても鉄筋コンクリート柱としてせん断破壊を生ずる心配はないと推測される。

このように実際の設計では平行配筋とX形配筋が併用される場合が一般的であると思われるが、平行配筋とX形配筋と併用した場合のせん断抵抗性状についてはほとんど実験例がない。現在、筆者のところでも実験を行っているが、X形配筋の具体的な適用にあたっては、これらの問題に関する実験資料の蓄積が望まれる。

8. 結 語

耐震構造としての鉄筋コンクリート造建物の問題点は短柱のせん断破壊による脆さがある。この脆い破壊を起こさせないようにすることができれば鉄筋コンクリート造建物の耐震安全性を飛躍的に向上させることができる。そのために従来の主筋を平行に配筋する構法では、相当の量の帯筋を配筋することが必要であるが、本論で示した主筋を斜めに配筋する構法ではそれほど多くの帯筋を配筋しなくても、短柱のせん断破壊を防止し、かつ柱材としての耐震性能を確保することが可能である。したがって、この構法は鉄筋コンクリート造の建物を耐震的なものとするための有効な一方法として考えられるので、今後のX形配筋に関する基礎的応用的な研究が望まれる。

謝 辞

本実験を行なうにあたり多大な御便宜をいただいた摂南大学佐々木良一助教授に深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) Paulay, T., "Simulated Seismic Loading of Spandrel Beams", Journal of the Structural Division, Vol.97, No.ST9, Sept., 1971, pp.2407-2419.
- 2) Paulay, T., "Some Seismic Aspects of Coupled Shear Walls", Proc. of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Vol.2, 1974, pp.2005-2008.
- 3) Park, R. and Paulay, T., "Reinforced Concrete Structures", A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1975, pp.650-658.
- 4) Paulay, T., "Some Design Considerations of Earthquake Resistant Reinforced Concrete Shear Walls", Proc. of the International Symposium on Earthquake Structural Engineering, St. Louis, Missouri, U.S.A., Aug. 1976, pp.669-679.
- 5) Bertero, V. V. and Popov, E. P., "Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Flexural Members with Special Web Reinforcement", Proc. of the U.S. national Conference on Earthquake Engineering, June, 1975, pp.316-326.
- 6) Popov, E. P. and Bertero, V. V., "Repaired R/C Members Under Cyclic Loading", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.4, 1975, pp.129-144.
- 7) 若林実、南宏一、"鉄筋コンクリート柱のせん断破壊防止法に関する実験的研究", 京都大学防災研究所年報第22号B-1、1979年4月、P.P.295-316.
- 8) 若林実、佐々木良一、南宏一、浅井泰男、"鉄筋コンクリート柱のせん断破壊防止法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(北海道)、1978年9月、P.P.1775-1776.
- 9) 若林実、南宏一、西村泰志、久木幸雄、岡雅司、"X形配筋を施したRC構造の弾塑性性状に関する基礎的研究(その2)", 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、1979年9月、P.P.1243-1244.
- 10) 吉岡研三、武田寿一、"特殊配筋柱及び円形に関する実験的研究", 第26回構造工学シンポジウム(東京)、1980年2月、P.P.1-8.