

[98] X形配筋を用いた鉄筋コンクリート構造の耐震設計

正会員 ○ 南 宏一(大阪工業大学工学部)

正会員 若林 實(京都大学防災研究所)

1. はじめに

筆者らは、従来より慣習とされている平行配筋法にかわつて、主筋の一部ないしは全てを材の対角線方向にトラス状に配筋するX形配筋法によつて、鉄筋コンクリート部材の耐震性能を材料コストの増加をともなわずに向上させることが可能であることを指摘した¹⁾。その後、X形配筋を用いた部材の弾塑性性状および耐震性能に関する基礎資料を蓄積し、ほぼ、X形配筋に関する基本的な問題点を解決できる状況に至っている。一方、住宅・都市整備公団関西支社では、このX形配筋を大阪市内に建設される5階建の集合住宅に応用することが計画され、我国で最初のX形配筋による鉄筋コンクリート造建物が建設されることになった。本論はX形配筋柱の設計法の概要と、その設計式によつて求められた構造諸元を持つX形配筋柱およびX形配筋柱を含む架構の耐震性能を検討するために行なわれた2, 3の実験結果の概要を示し、X形配筋柱の耐震設計資料を提供するものである。

2. 平行配筋とX形配筋を併用した柱材の実用設計式試案

日本建築学会・鉄筋コンクリート構造計算規準(RC規準と称する)に準拠した、平行配筋をX形配筋と併用する柱材の実用設計式試案とその補足説明を示す。ここで取り扱うX形配筋の主筋は両対角方向とも等量で、かつ、材長にわたつて一定の断面積を有するように配筋されているものとする。なお、はり材についても同様の設計式が考えられているが、今回、実用化された部材は柱材であるので、ここでは柱材に関して示すことにする。

2.1 曲げに対する算定 : 平行配筋とX形配筋を併用した曲げ材は、X形配筋の主筋の有効断面積をRC規準12条(4)によつて求め、15条によつて算定する。ただし、長期荷重時の算定にはX形配筋を無視する。

[補足説明] X形配筋の主筋は材軸と傾斜角 θ を持っているので、断面積の $\cos\theta$ 倍を有効断面積として曲げの検定を行なう。有効断面に置換したX形配筋の断面積と平行配筋の断面積の和が存在するものとして取り扱う。なお、部材の内部の断面を検定する場合には、多段配筋の断面検定となるので、簡単化のために、X形配筋の主筋を鉄骨のように考えて、累加さ式で許容耐力を求めるのも一方法であろう。

2.2 せん断補強に対する算定 : 平行配筋とX形配筋を併用した柱材の短期許容せん断力 Q_{AS} は(A)式により、また、それ以外については、RC規準16条による。

$$Q_{AS} = b \cdot j \cdot \{ f_s + 0.5 \cdot f_t (P_w - 0.002) \} + 2 \cdot d_t^{a_t} \cdot d_t^{f_t} \cdot \sin \theta \quad (A)$$

ここに、 $d_t^{a_t}$ および $d_t^{f_t}$ はX形配筋の引張鉄筋の断面積および短期許容引張応力度である。

[補足説明] 柱材に施こされたX形配筋は、長期のせん断力に対しても寄与すると考えられるが、簡単化のために安全側に見て無視する。一方、短期許容せん断力は平行配筋を有する鉄筋コンクリート部分による負担せん断力とX形配筋の主筋の軸方向力の材軸直角方向の成分との和に等しいという考えから、(A)式が導かれた。なお設計式試案では、帯筋に関する構造規定については、RC規準に準ずるものとしている。しかし、X形配筋のみの場合には、せん断補強筋は原則的には不要になると考えられるので、たとえば $\epsilon = 1 - d_t^{p_t} / 2 (p_t^{p_t} + d_t^{p_t})$ ($p_t^{p_t}$, $d_t^{p_t}$: 平行およびX形配筋のそれぞれの引張鉄筋比) のような変数を用いて、最小せん断補強筋比は、 ϵ を乗じた数値に、また、帯筋の最大間隔を規定する数値は、 ϵ を除した値をそれぞれ用いてせん断補強筋に関する構造規定を若干緩和することも可能と思われるが、これらの取り扱いについては、今後、更に検討したい。

2.3 付着に対する算定 : RC規準17条1項において、曲げ材の引張鉄筋は、平行配筋を施した引張鉄筋とし、短期設計用せん断力は、16条3.(2)による値から $2 \cdot d_t^{a_t} \cdot d_t^{f_t} \cdot \sin \theta$ を差引いた値を用い、それ以外については、RC規準17条1項による。

3. 平行配筋とX形配筋を併用した柱材の終局せん断強度の評価

今回の実施設計の建物については、参考のために保有水平耐力の検討が行なわれたが、その際の柱材の終局せん断強度は、文献2などに示された内容に準拠した手法によって評価された。図-1に、平行配筋とX形配筋さらに中間主筋を有する柱材の圧縮、曲げ、せん断に対する抵抗機構の模式図を示す。この柱材の抵抗機構は、平行配筋によるはり機構(a)、無筋コンクリートのアーチ機構(b)、X形配筋によるトラス機構(c)および中間主筋の弦機構(d)によって構成されるものとし、それぞれの機構によって発揮される強度にもとづいた拡張累加強度理論によって柱材の終局せん断強度を求めるもので、その強度は解析解によって与えることができる。なお、実施設計においては中間主筋の効果は、簡単化のために安全側のみで無視された。

4. X形配筋を適用した建物の設計概要

前述の設計式試案にもとづいて得られた1層および2層内柱の構造諸元を表-1に示す。この建物の1層および2層内柱部分の架構配筋詳細図を図-2に、施工時の配筋状況を図-3にそれぞれ示す。当初、X形配筋の活用は、はりおよび柱の両部材について計画されたが、はり部材は曲げ破壊が支配的となるのに対し、柱部材では、柱長さ比 n ($=h/D$, h :柱長さ、 D :柱せい)が3.33~3.08と短柱化し、せん断破壊を生じやすいと考えられるので、この建物では柱材のみにX形配筋を行なうことになった。一方、柱材のX形配筋の活用は、両主軸について行なうことも考えられたが、この建物ではスパン方向に壁量が確保され、十分な強度が期待できるので、このような構造には純骨組架構を構成する桁方向にのみX形配筋を活用することが適切なものであると判断された。なお、柱の基本的断面構成は四隅の主筋のみを平行配筋とし、その他の必要な主筋は全てX形配筋とするものである。

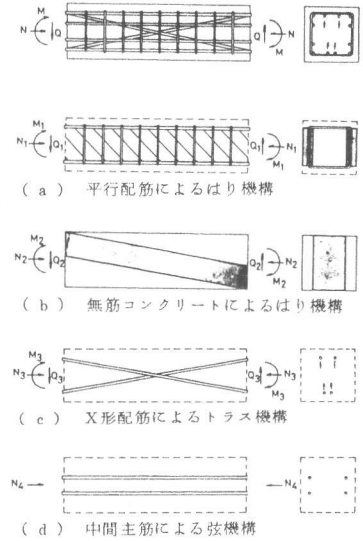


図-1 せん断抵抗機構

表-1 内柱の構造諸元

	1層柱	2層柱
断面	$b \times D$	750×750
柱長さ比	n	3.33
作用軸力比	n	0.083 ~ 0.266
全主筋量		20 - D29
引張側平行主筋量		4 - D29
引張側X形主筋量		5 - D29
中間主筋量		2 - D29
$\beta = d_t^{p_t} / (d_t^{p_t} + d_t^{m_t})$		0.58
帯筋量		2 - D13 100 a

$p_t^{p_t}$: 平行主筋比 $d_t^{p_t}$: X形主筋比 $m_t^{p_t}$: 中間主筋比
 $r_W^{p_t}$: 帯筋比 $n = N/bDF_c$: 作用軸力比 (N: 作用軸力)

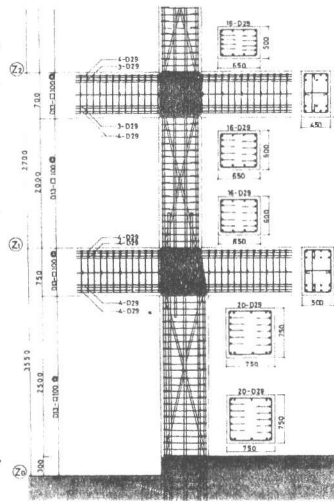


図-2 架構配筋詳細図

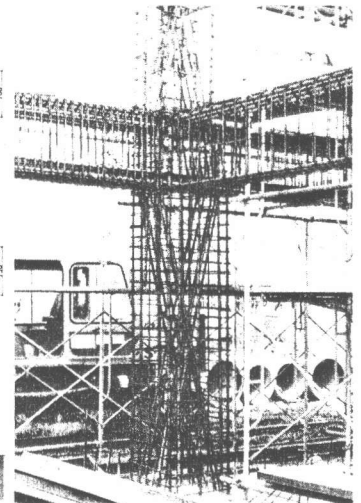


図-3 施工時の配筋状況

5. 1層および2層内柱の1/2モデルによる載荷実験

内柱の1層および2層の柱材の曲げせん断に対する力学的性状および耐震性能を調らべるために、ほぼ相似則を満足する1/2モデルを用いて一定軸力($n = 0.2$)下のくり返し載荷実験を行なった。1層柱に対応する試験体C1、2層柱に対応する試験体C2の2体を計画した。主筋にはD16(降伏応力度 σ_y : 3630 kg/cm²)帯筋にはD6(σ_y : 3480 kg/cm²)を用い、コンクリート圧縮強度 F_c は、C1では264 kg/cm²、C2では216 kg/cm²であった。図-4および図-5に試験体の形状・寸法、断面構成、最終変位振幅時における破壊状況および履歴曲線をそれぞれ示す。履歴曲線図における縦軸は作用せん断力 Q を横軸は柱部材角 R を表わし、点

線は転倒モーメントの影響を、一点鎖線は初期剛性をそれぞれ表わす。また Q_{AS} および Q_U は前述の手法による短期許容せん断力(ただし許容応力度は材料強度にもとづいて算定)および終局せん断強度に関する計算値を示す。C 1 は斜張力ひび割れが形成されるにもかかわらず、材端部における主筋の局部座屈をとまらぬ曲げ圧縮破壊を示した。一方C 2 の最終破壊状況は曲げ圧縮破壊の様相を呈したが斜張力ひび割れによるせん断変形は、C 1 に比して卓越することが観察された。しかしながら両試験体ともせん断付着割裂破壊などのせん断破壊は見られず提案の設計式によって求められた構造諸元を有するX形配筋併用の柱材の履歴曲線は、エネルギー散逸量の大きい安定した紡錘形を示すことが確認された。また、いずれの試験体においても、短期許容せん断力は、測定された最大強度に対してほぼ 1.5 の安全率をあたえるが、終局せん断強度は、実験値と良好な対応を示し、平行主筋、X形主筋および中間主筋で構成される柱材の終局せん断強度は、4 章で述べた手法によってほぼ評価できることが示された。なお、C 1 では $R = 3\% \text{ rad.}$ 、C 2 では $R = 2.5\% \text{ rad.}$ の変形振幅で履歴曲線の安定性が失われているが、その主原因は、材端部における平行およびX形主筋の局部座屈によるものである。

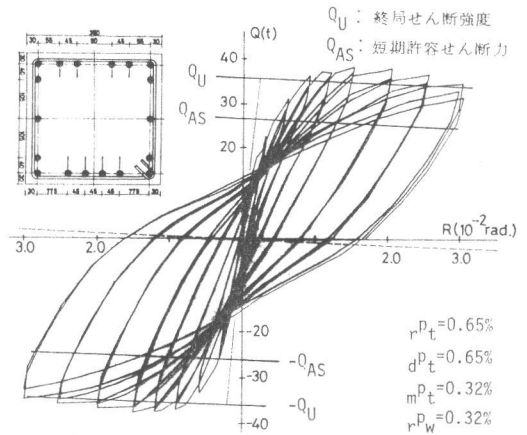
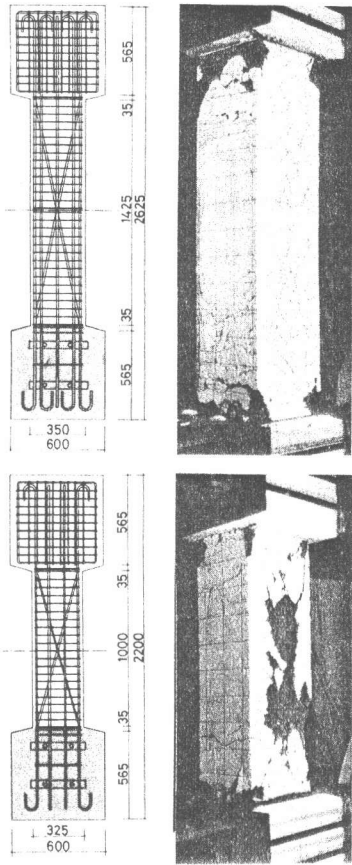


図-4 試験体 C 1 の載荷実験

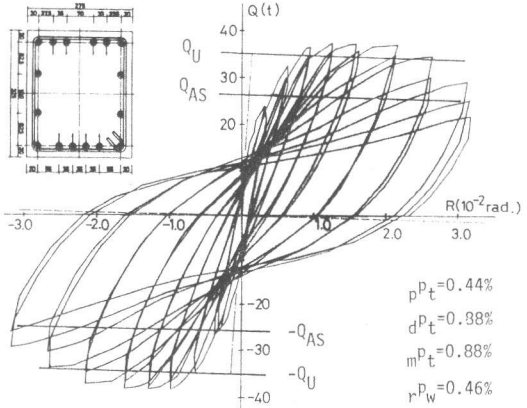


図-5 試験体 C 2 の載荷実験

6. 1層内柱を含む 1/4モデルによる部分架構の載荷実験

さらに、X形配筋を併用した柱材を含む架構の耐震性能を検討するために、1層内柱を含む1/4モデルの変則な十字形の部分架構のくり返し水平載荷実験を計画した。計画された試験体は、AXおよびSXの2体である。図-6および図-7にそれぞれの試験体の形状・寸法、柱材の層間部材角 $R = 2\% \text{ rad.}$ における破壊状況および履歴曲線をそれぞれ示す。使用材料は、はりおよび柱の主筋には D10 ($\sigma_y : 35.90 \text{ kg/cm}^2$) あばら筋、帯筋およびスラブ筋には 4.5ϕ ($\sigma_y : 30.80 \text{ kg/cm}^2$) 壁筋には 3ϕ ($\sigma_y : 22.48 \text{ kg/cm}^2$) を使い、コンクリート圧縮強度は 28.1 kg/cm^2 であった。AXは柱およびはり材のみによって構成される純骨組架構で柱材の反曲点位置とX形配筋の交差位置のずれが柱材および架構にあたえる影響を検討することを主眼において計画されたものである。一方SXは、より実際の架構(桁方向にはスリット入りのそで壁が併設されている)の挙動を把握することに主眼において計画され、はりおよび柱の形状・寸法および配筋はAXと同一とし、はり材に片側スラブと、柱材にスリット入りのそで壁を併設したものである。はり材の外端部に移動支承を設け、柱材に一定の軸力 ($n = 0.2$) を載荷し、2層柱の反曲点位置にくり返し水平力 H (図中の白矢印は正荷重、黒矢印は負荷重の作用方向を示す) を載荷するものである。AXは左右のはり材端部および柱脚部に塑性関節を生ずる曲げ破壊系の崩壊機構を形成した。一方、SXでは $R = 1\% \text{ rad.}$ で主架構とそで壁の一体性は失われ、主架構の破壊性はAXとほぼ類似することが観察された。履歴曲線図に示されるようにAXは安定したエネルギー散逸量の

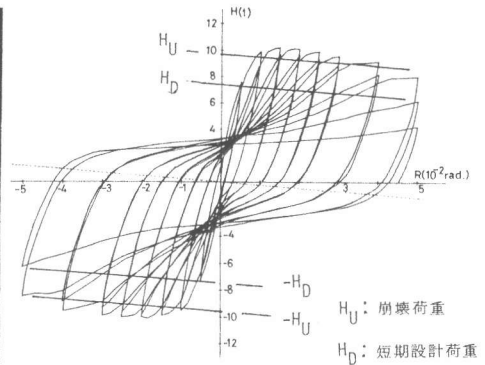
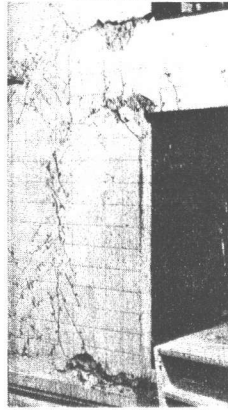
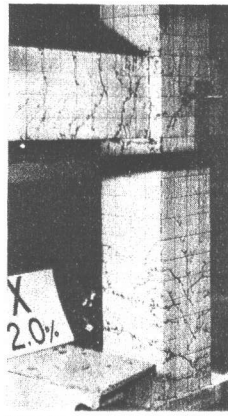
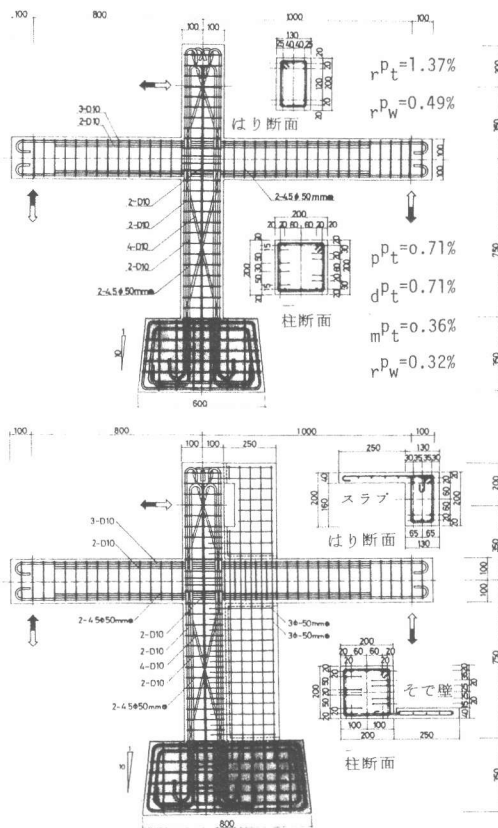


図-6 試験体 AX の載荷実験

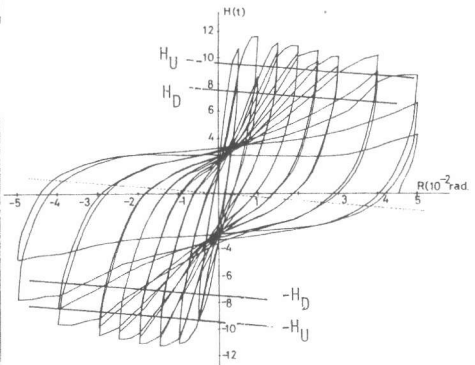


図-7 試験体 SX の載荷実験

きいほぼ紡錘形の履歴曲線を示し、極めて変形能力に富むことが示される。SX は初期剛性および最大強度は AX に比して増加しているが、最大強度以後の履歴特性は、AX の履歴特性にほぼ収束することが認められる。なお同図の点線は転倒モーメントの影響を示し、 H_D および H_U は、はり材および柱材のみによる主架構の短期設計荷重および崩壊荷重をそれぞれ示す。崩壊荷重に対する計算値は実験値に対してほぼ妥当な値をあたえ、短期設計荷重は実験値に対して 1.2 程度の安全率をあたえることが示された。スリット入りのそで壁の有無にかかわらず、X 形配筋を併用した柱材を含む架構は、曲げ破壊系の崩壊モードを示し、 $R = 4\%$ 程度の変形能力を有し、エネルギー散逸量の大きい安定した紡錘形の履歴特性を有することが認められた。

7. 結論

X 形配筋柱の実用設計式試案によって設計された X 形配筋を併用した柱材を含む架構は、曲げ破壊系の崩壊モードを示し、かつ優れた耐震性能を有することが、相似則を満足する柱材および部分架構に関する載荷実験によって確認された。また、提案の実用設計式試案および終局せん断強度評価の手法は、妥当かつ合理的な内容をもつことが検証された。なお、X 形配筋を併用した柱材の崩壊は、材端部における主筋の局部座屈およびコンクリートの圧壊によって支配されるので、補助帯筋などを用いて適切な補強を行なうことが望まれる。

8. 謝辞

本論で引用された実験結果は、昭和 56 年度の住宅・都市整備公団の委託研究で行なわれた実験の一部から抜粋されたものである。また、X 形配筋の実用化は、小堀隆治（住宅・都市整備公団関西支社）および中東達男（株式会社ジャス）の両氏の御尽力によって可能になったものである。ここに記して深甚の謝意を表します。

9. 参考文献

- 1) たとえば 若林実, 南宏一; 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、第 2 回コンクリート工学年次講演会講演論文集 (1980)、昭和 55 年 6 月、PP. 433-436.
- 2) たとえば 若林実, 南宏一他; せん断力を受ける鉄筋コンクリート柱に対する X 形配筋の有用性について、第 3 回コンクリート工学年次講演会講演論文集 (1981)、昭和 56 年 6 月、PP. 445-448.