

論文

[2050] 角形鋼管でコンクリートを拘束した X 形配筋の合成柱の弾塑性性状

正会員 ○佐々木良一 (摂南大学工学部)

正会員 南 宏 (大阪工業大学工学部)

投野 修美 (日本建設技術研究室)

山本 裕康 (大阪工業大学大学院)

1. はじめに

鉄筋コンクリート短柱のぜい性的な破壊を防止するために、文献(1)に示されるように高圧縮力に対してコンクリートの外周を角形鋼管で被覆した拘束効果と、高せん断力に対して、せん断補強筋を必要としない X 形配筋のもつ効果を組み合わせて、高圧縮力と高せん断力に対して高性能をもつ構法を考案した。そして、この構法をもつ柱は、作用軸力比が $n=0.6 (=N/b \cdot D \cdot F_c)$ という高軸力に対して、柱の相対変位部材角が $R=5\%$ rad. の大変形振幅においても、極めて安定した曲げ破壊による紡錘形の履歴曲線が得られることが可能であり、最大耐力以後の耐力劣化も全くみられないことが確認され、また、角形鋼管で被覆された曲げ・せん断力を受ける終局耐力はアーチ機構を形成するコンクリートの局部支圧効果による耐力増加を考察することにおいてほぼ評価できることが示された。

しかしながら、この文献(1)に示された実験では、試験体の鋼管板厚が 4.5mm で柱せいに対する柱長さ比が $h/D=3$ のみで、実験変数としては配筋法と作用軸力であった。この研究結果から被覆角形鋼管 (鋼管の内側とコンクリートとの間は自然付着の状態) は、柱部材角が $R=5\%$ rad. の大変形振幅にもかかわらず鋼管壁の変形が極めて微少で、そのひずみ度も弾性範囲内であった。したがって、鋼管板厚を更に薄くし実用的に経済的效果を高める可能性を残し、また更に短柱とした場合の弾塑性性状を調べる必要があった。

そこで、筆者は、角形鋼管でコンクリートを被覆拘束した X 形配筋の合成柱の短柱において、鋼管板厚を 4.5mm より薄くし、また、柱長さ比を $h/D=3$ より小さくした場合について、この合成柱が予想する高性能を発揮するかどうか、22体の試験体を用いて実験的な検討を行なったが、本論文は、その内容を報告するものである。

2. 実験計画

鋼管でコンクリートを拘束した X 形配筋による合成柱の基本的な弾塑性性状を調べるために、シリーズ 1 として、柱長さ比 $h/D=2$ (h :柱長さ, D :柱全せい) に対して、実験変数を配筋法 (全平行配筋および全 X 形配筋の 2 種) 作用軸力比 $n (=N/b \cdot D \cdot F_c) = 0.2, 0.4$ および 0.6、被覆角形鋼管板厚 $t=1.6\text{mm}, 2.3\text{mm}$ および 4.5mm とし、また、シリーズ 2 として $h/D=3$ に対して、実験変数を配筋法 (全平行配筋および全 X 形配筋の 2 種) $n=0.2, 0.4$ および 0.6、 $t=1.6\text{mm}$ および 2.3mm として実験計画を立て、計 22 体の試験体を計画した。これらを表-1 に示すが、表中の試験体名の表示法は、SP は全平行配筋、SX は全 X 形配筋を示し、また、3 桁の数字のうち 3 桁目は柱長さ比 (3 : $h/D=3$ および 2 : $h/D=2$) を、2 桁目は鋼管板厚 (1 : 1.6mm , 2 : 2.3mm および 4 : 4.5mm) を、1 桁目は作用軸力比 (2 : $n=0.2$, 4 : $n=0.4$ および 6 : $n=0.6$) をそれぞれ示している。被覆鋼管としては角形鋼管を選び、板厚 4.5mm のものは公称寸法 $\square-200 \times 200 \times 4.5$ の市販品を用いたが、板厚が 1.6mm および 2.3mm については市販品の鋼管が無いので、鋼板を L 字形に曲げ加工し、これを 2 個合わせ

てその接点を溶接加工して □-200×200×1.6および □-200×200×2.3の角形鋼管とした。この被覆鋼管はコンクリートの拘束のみのために機能させることを目的とするために、図-3に示すように、鋼管と試験体定着部の材端部の間には5mmのクリアランスを設け、直接的に、軸方向応力が鋼管に作用しないようにした。また、鋼管の内側とコンクリートとの間は、自然付着の状態にし、文献(2)に示されるようなアンボンドの状態には、あえてしないことにした。

3. 実験

試験体の断面構成および形状寸法を図-1、図-2に示す。全主筋量としては8-D13を用い、全平行配筋のみのものは、 $P_t = 1.49\%$ とした。柱体部には帯筋は一切設けていないが、定着部では平行主筋、およびX形主筋の定着を確実にするために、4.5φの補強筋を100mm間隔で配筋した。柱体部の長さはシリーズ1では400mm、シリーズ2では600mmであるが、図-3に示すように鋼管と柱端部との間に5mmのクリアランスを設けるために、鋼管の長さは390mmおよび590mmとした。柱端部には鉄筋コンクリート製の定着ブロックを設け、そのブロックに、鋼製の載荷用治具を取り付けて逆対称の繰返し曲げ・せん断力を加力した。表-1に素材の諸元と作用軸力および実験結果を示す。

4. 破壊状況

被覆鋼管板厚が4.5mmの試験体では、柱部材角 $R=5\%$ rad.まで加力できたが、板厚が1.6mmおよび2.3mmの試験体では、加力中に柱頭または柱脚部分の鋼管溶接部分が破断し、実験を中断したものが数体生じた。これを表-1中に○印で示すが、これはいずれも $R=2.5\%$ rad.~ 4.0% rad.(SX216のみ $R=1.0\%$ rad.)で生じており、これらの試験体の最大耐力は、 $R=1.0\%$ rad.~ 2.0% rad.であることから、最大耐力以後の破断である。なお、表-1中の●印試験体は、 $R=4.0\%$ rad.を加力中に載荷用治具の破損により、この時点で実験を中断した。

被覆鋼管の管壁の座屈状況は、板厚が4.5mmでは全く観察されなかったが、板厚が薄くなるにしたがい、また、作用軸力が増加するにしたがい、柱頭部、中央部および柱脚部に最大耐力以後から局部座屈が発生し、最終的にはこの座屈がかなり大きく発展していることが観察された。内部のコンクリートの破壊状況は、試験体の柱体部が鋼管で被覆されているので、外観から観察できなかった。そこで、実験終了後、被覆鋼管をガス切断により取り除いた後、コンクリートの損傷の程度を観察した。図-4にその数例を示すが、全般的にみて、被覆鋼管の板厚が4.5mmでは、主筋の配筋法および作用軸力の大きさにかかわらず、材端部の曲げひび割れは大きく、コンクリートの損傷も大きい。平行あるいはX形主筋に沿う付着割裂によるひび割れは、微細なひび割れ幅をもつ程度でコンクリートの圧壊は認められなかった。これに対して、被覆鋼管の板厚が薄くなるにしたがい、管壁に局部座屈が発生している部分のコンクリートに圧壊が認められたが、この傾向は、主筋の配筋法では平行配筋に、作用軸力では高圧縮力を受ける試験体に顕著になることが認められた。

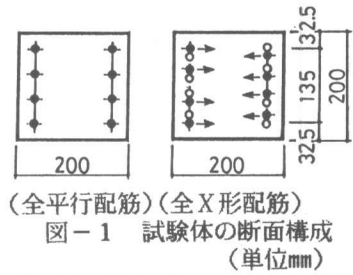


図-1 試験体の断面構成 (単位mm)

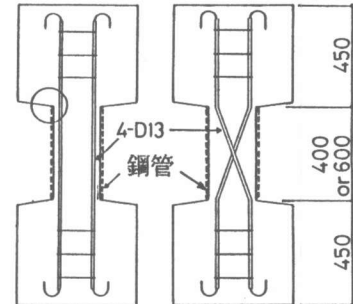


図-2 試験体の形状寸法 (単位mm)

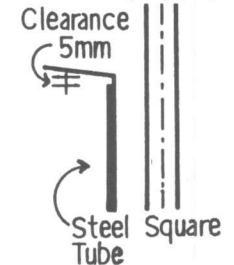


図-3 柱端部の状況

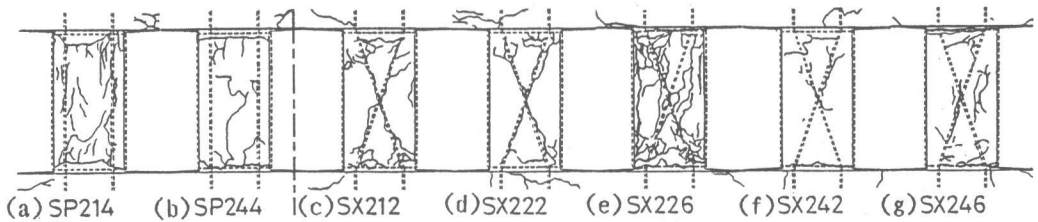


図-4 実験終了後の内部コンクリート損傷の数例

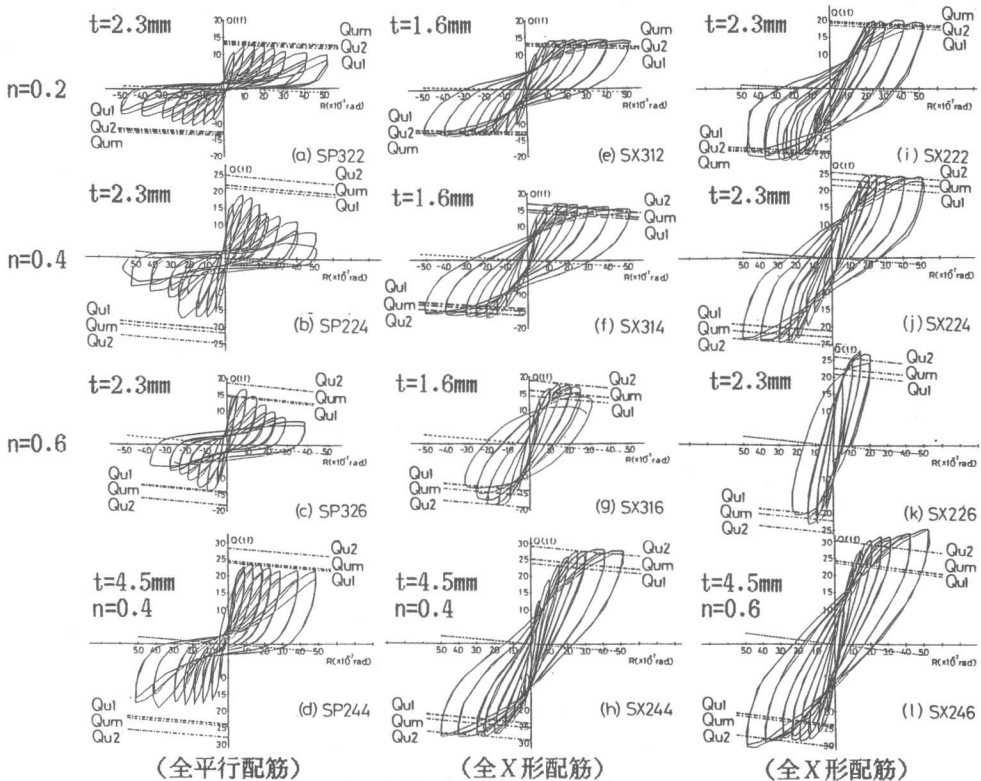


図-5 履歴曲線の数例

5. 履歴曲線

各試験体の履歴曲線の数例を図-5に示す。縦軸はせん断力 Q (単位 tf)、横軸は柱部材角 R (単位 $10^{-2} rad.$)を表す。図中の点線は $P-\Delta$ 効果の影響を表し、 Q_{u1} 、 Q_{u2} 、 Q_{um} は後述の理論耐力を示す。この履歴曲線に示される差異は、被覆鋼管の板厚と主筋の配筋法および作用軸力による影響が大きい。

文献(1)にも示すように板厚が $4.5mm$ の場合、主筋の配筋法および作用軸力の大きいかんにかかわらず本実験の最終変位振幅である $R=5\% rad.$ に達しても、その耐力低下がみられず、また、作用軸力が $n=0.6$ の範囲であれば、主筋の配筋法のいかんにかかわらず作用軸力の増加に伴い耐力も増加する傾向を示している。しかし、主筋が全平行配筋の場合では、作用軸力の大きいかんにかかわらず、エネルギー消費量の小さい逆S字形の履歴曲線を示しているが、全X形配筋の場合では、作用軸力の大きいかんにかかわらず、その履歴曲線は、紡錘形の安定した形状を示し、この傾向は作用軸力の増加に伴い向上し、 $n=0.6$ の試験体の履歴性状が最も秀れている。

一方、被覆鋼管の板厚が $1.6mm$ および $2.3mm$ の場合では、主筋の配筋法によりその性状に大きな

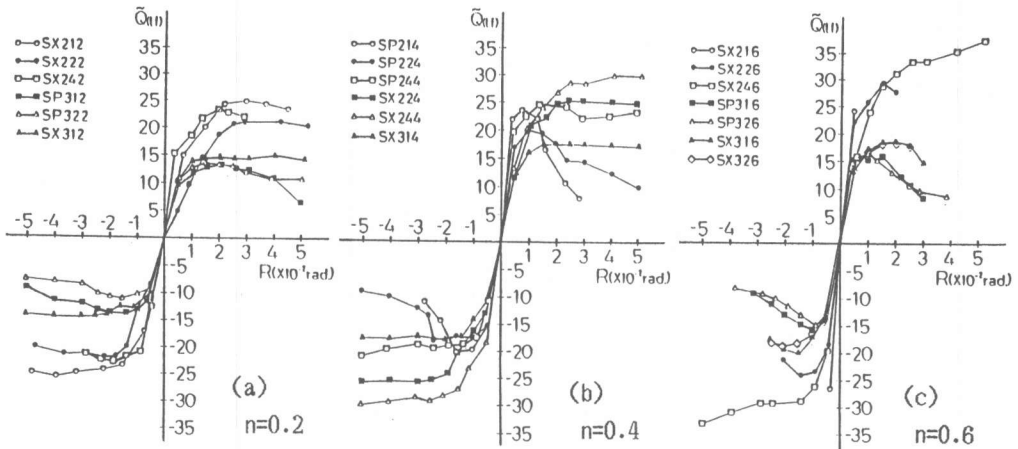


図-6 除荷点連結曲線

差異が認められる。すなわち、主筋が全平行配筋では、作用軸力の大きいかんにかかわらず逆S字形の履歴曲線を示し、かつ、作用軸力の増加に伴い最大耐力以後の耐力低下も急激となる。これは、図-3に示したように内部のコンクリートが主筋に沿って、ひび割れを持ち、そのために主筋がすべりやすくなることと、被覆鋼管の板厚が薄くなることにより、内部のコンクリートを拘束する性能が劣化することに原因がある。これに対し、全X形配筋では、板厚に支配されることなく、作用軸力が $n=0.6$ までの範囲であれば、作用軸力が増加するにしたがって耐力は増加する傾向を示しており、また、X形主筋そのものには付着力を必要としないので⁽³⁾、その履歴曲線は紡錘形の安定した形状を示している。なお、被覆鋼管の管壁の溶接部分が破断した試験体については、鋼管の製作方法を改良して、再度実験を行なう予定である。

6. 除荷点連結曲線

図-6に各試験体の履歴曲線上の第1ループの除荷点連結曲線を用作用軸力比 n 別に示す。縦軸は $P-\Delta$ 効果の影響を考慮したせん断耐力 \bar{Q} (単位tf)、横軸は柱部材角 R (単位 10^{-2} rad.)を表す。全般的な傾向として、柱長さ比 h/D を変数とした場合、 h/D が小さくなればせん断耐力が増加するのみで、その他の実験変数に関する挙動に対して殆ど影響をあたえていない。また、作用軸力を変数とした場合は、作用軸力が増加するにしたがって、せん断耐力も増加している。

一方、作用軸力別に示した被覆鋼管の板厚を変数とした場合、全平行配筋では、板厚が4.5mmとそれ以下の板厚の試験体とでは差異が生じている。すなわち板厚が1.6mmおよび2.3mmでは、板厚4.5mmの試験体と比較して最大耐力は低く、かつ最大耐力以後の耐力低下も大きい。板厚が1.6mmおよび、2.3mm試験体の挙動は殆ど同一の様相を呈している。これに対して、全X形配筋では、文献(1)を参考にして比較した結果、管壁の溶接部破断の試験体を除いて、本実験の範囲内では板厚に関係なく、殆ど同一の挙動を示している。

7. 終局耐力の評価

被覆鋼管を用いた全平行配筋あるいは全X形配筋をもつ柱が、曲げ・せん断を受けるときの終局耐力を検討するために、逆対称加力を受けるコンクリートの耐力に対して、文献(1)に示すようなモデルを考え、このような構造のコンクリート部分のせん断伝達機構の大部分は、アーチ機構と考える。そのアーチ機構による耐力の評価に対して、従来のアーチ機構に用いられる、一般的な圧縮場に対するモデルにおけるコンクリート部分のアーチ機構による耐力を o_{q1} とする。また、アーチ機構による耐力の評価に対して、対角線状にコンクリートが直接圧縮される場合に、局部

支圧としての効果を発揮できるように、その被覆鋼管は機能するものとするモデルにおけるコンクリート部分の終局耐力を q_2 とする。そして、一般化累加強度理論を適用して、このコンクリート部分の耐力 q_1 、 q_2 に、主筋部分の耐力を累加してその耐力を求めたのが Q_{u1} 、 Q_{u2} であり、計算結果を表-1 に示す。

対称配筋の累加強度理論による柱体部の終局曲げ耐力から決まる終局せん断耐力は、今回の実験の作用軸力が、 $n_u = N/b \cdot D \cdot F_c = 0.2, 0.4$ および 0.6 であるので、作用軸力の範囲が

$$\frac{1}{2} (1 - r D_1) \leq n_u \leq \frac{1}{2} (1 + r D_1)$$

となり、これに対する鉄筋コンクリートの相関関係より、その終局曲げ耐力は、

$$m_u = \frac{1}{2} n_u (1 - n_u) + \Phi \cdot r D_1$$

であたえられる。ここに、 $m_u = M/b \cdot D^2 \cdot F_c$ 、 $r D_1 = r D/D$ 、 $\Phi = r a_t \cdot r \sigma_y / b \cdot D \cdot F_c = P_t \cdot r \sigma_y / F_c$ 、 $r D$: 主筋の中心間距離、である。これより、その終局せん断耐力は、

$$q_{um} = \frac{Q_{um}}{b \cdot D \cdot F_c} = 2 \cdot m_u \frac{D}{h} \quad h: \text{柱長さ}$$

によって求めるものとする。この Q_{um} の計算結果をも表-1 に示す。なお、同表の実験値である

表-1 素材諸元および終局耐力に関する実験値と計算値

試験体	鋼管 板厚 t(mm)	鋼管 外径 D(mm)	コンクリート 強度 F_c	鋼管降伏 応力度 $r \sigma_y$	作用 軸力 N(kf)	鋼管の 破断 状況	実験値		計算値		
							$Q_{max}(tf)$		正荷重	負荷重	$Q_{u1}(tf)$
SP214	1.49	199.4	313	3000	48.3	○	23.4	20.3	25.6	30.4	26.5
SP224	2.08	199.3	225	2860	34.4		19.5	18.2	21.3	24.7	22.0
SP244	4.18	200.3	287	3160	42.2		24.4	19.8	24.0	28.2	24.5
SP312	1.48	200.6	325	3000	18.3		13.0	14.0	12.2	12.4	12.6
SP322	2.10	200.2	281	2700	21.5		13.3	11.1	13.6	13.8	14.1
SP316	1.49	200.2	231	3000	53.9	○	15.6	14.6	14.9	19.4	15.3
SP326	2.10	199.2	223	2860	50.8		16.7	14.9	14.6	18.5	14.8
SX212	1.49	199.2	321	3000	24.7		24.7	25.5	21.5	22.8	22.6
SX214	1.49	199.5	330	3000	51.0	○	29.1	22.1	26.1	31.2	27.8
SX216	1.50	199.3	312	3000	72.0	○	24.7	26.8	25.4	31.4	27.1
SX222	2.08	199.2	226	2860	17.2		20.7	21.9	18.7	19.1	19.5
SX224	2.08	199.3	231	2860	35.2		25.6	25.6	21.9	25.4	23.1
SX226	2.04	199.0	207	2860	47.2	○	28.3	23.9	20.9	26.3	22.1
SX242	4.17	200.2	281	3160	20.7	●	23.1	22.9	20.2	20.7	21.1
SX244	4.21	200.4	276	3160	42.7		29.9	29.8	23.9	28.2	25.1
SX246	4.16	200.2	280	3160	61.7		37.3	33.9	23.4	30.1	24.5
SX312	1.49	200.6	228	3000	17.8		14.5	14.2	12.4	12.6	13.0
SX314	1.54	199.4	232	3000	35.7		17.6	17.9	14.6	16.8	15.0
SX316	1.51	200.0	278	3000	52.8	○	18.7	19.4	14.7	19.6	15.2
SX322	2.09	199.3	214	2860	16.4	○	13.5	15.0	12.1	12.3	12.7
SX324	2.05	199.4	218	2860	33.3	○	16.0	18.1	14.3	16.6	14.8
SX326	2.10	199.4	226	2860	51.6	○	18.5	18.6	14.5	18.4	15.0

主筋 引張降伏応力度 $r \sigma_y = 3636 \text{ kgf/cm}^2$, 引張強度 $r \sigma_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$ $r \epsilon_y = 0.2 \times 10^{-2}$
 $F_c, r \sigma_y$ の単位 = kgf/cm^2 , ○: 実験途中で鋼管溶接部破断, ●: 載荷治具の破損

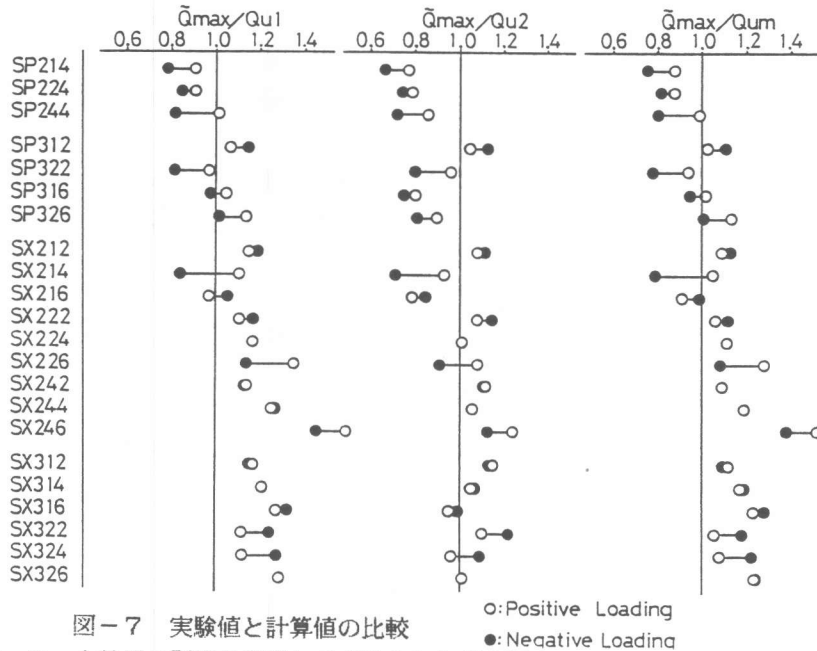


図-7 実験値と計算値の比較

\bar{Q}_{max} は、P- Δ 効果の影響を考慮して求められた最大耐力である。

これらの計算値と実験値の比較を図-7に示す。この図より、作用軸力のいかんにかかわらず、全X形配筋の計算値に対する実験値の比率の平均値は、 Q_{u1} は、正荷重で1.20、負荷重で1.19となり、 Q_{u2} では、正荷重で1.04、負荷重で1.04となり、 Q_{um} では、正荷重で1.15、負荷重で1.14である。これによれば、 Q_{u2} での評価が最も実験値に近いが、 Q_{um} での評価が実験値に近い試験体も含まれている。それでこの両者の小さい方の値で、被覆鋼管を用いたX形配筋柱の終局耐力を評価できることを示しているおり、また、全平行配筋では、 Q_{u1} では正荷重で1.01、負荷重で0.92となり、これで評価できると思われる。

8. むすび

高圧縮力と高せん断力を受ける鉄筋コンクリート柱に高性能をあたえる構法として、角形被覆鋼管と主筋のX配筋を組み合わせることを提案しているが、本論文は、柱長さ比と被覆鋼管の板厚を主たる実験変数とした。特に鋼管の板厚のあたえる影響は、平行配筋の場合、板厚が薄くなるにしたがって、最大耐力以後の耐力低下は急激となり剛性が維持できないが、X形配筋では、板厚が薄い場合でも高軸力下における大変形振幅に対しても、極めて安定した紡錘形の履歴曲線が得られる。また、このような構法のX形配筋柱の曲げ・せん断を受けるときの終局せん断耐力は、累加強度理論に基づく終局曲げ耐力から決まる耐力と、アーチ機構を形成するコンクリートの局部支圧効果による耐力増加を考慮する耐力のいずれか小さい方で、ほぼ評価できることが示された。

9. 参考文献

- [1] 南 宏一、佐々木良一、若林 実：被覆角形鋼管でコンクリートを拘束したX形配筋の合成柱の耐力とじん性、第10回コンクリート工学年次論文報告集、1988年6月、PP.245-250
- [2] 佐藤孝典、下戸芳寛、渡辺泰志：アンボンド型充填鋼管コンクリート構造のせん断伝達機構、コンクリート工学年次論文報告集、9-2、1987年6月、PP.555-560
- [3] 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8回コンクリート工学年次論文報告集、1986年6月、PP.433-436