

(33) 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

ELASTIC-PLASTIC BEHAVIOR OF DIAGONALLY REINFORCED CONCRETE
COMPOSITE COLUMNS CONFINED BY SQUARE STEEL TUBES

山本裕康^{*1} 投野修美^{*2} 南 宏^{*3} 佐々木良一^{*4}
Hiroyasu YAMAMOTO, Shumi NAGENO, Koichi MINAMI, Ryoichi SASAKI

To improve the seismic performance of reinforced columns under high axial compression failing in shear, seismic behavior of diagonally reinforced concrete columns without shear reinforcement confined by square steel tubes is investigated. These columns have combined two effects that concrete confined by square steel tubes and shear resisted by diagonal main reinforcement without shear reinforcement. Test of 28 specimens is conducted. The variable chosen are the arrangement of main reinforcement, the thickness of square steel tubes, the column length ratio, and magnitude of axial compressive load. It is verified that the strength, ductility, and energy dissipation capacity increases more than ordinary reinforced concrete columns. It can be concluded that these composite columns confined by square steel tubes have high excellent seismic capacity.

1. まえがき

鉄筋コンクリート造柱の従来からの配筋は、主筋を材軸に平行に配筋したものに閉鎖形の帯筋を設けたものであるが、大地震による繰返し曲げ・せん断力を受けたとき、壊滅的なぜい性的せん断破壊が生じている。特に高圧縮力を受けている場合や、短柱の場合はそれが顕著である。

この鉄筋コンクリート造短柱のぜい性的な破壊を防止するために高密度配筋の帯筋をやめ、そのかわりに角形あるいは、円形の鋼管を外側に被覆する方法が、富井、崎野らによって提案され、そのような構造の柱は高せん断力に対して優れた性能を持つことを指摘している(1)-(3)。この構法の特徴は、被覆鋼管は柱体のみに設け、柱端からの圧縮・曲げ・せん断が直接鋼管に伝達されないように、鋼管部分を絶縁しているところにある。しかしながらこの方法は、森下らの実験で見られるように、繰返しによる最大耐力以後の耐力劣化は小さくなるが、鋼管で拘束されたコンクリートに配筋された主筋はすべりを生じ、そのために履歴曲線は逆S字形となり、安定した紡錘形に改善することは困難であることを示している(4)。また、高圧縮力を受ける鉄筋コンクリート部材の性能を改善するために、円形鋼管を用いてコンクリートを拘束する試みは、佐藤らによってもなされている(5)。この構法の特徴は、被覆鋼管に材軸方向の応力が生じて、鋼管の局部座屈が発生しないように、鋼管とコンクリートの境界面に0.2mm厚の分離材を介在させて、アンボンド状態にしていることである。

*1 大阪工業大学大学院 建築学専攻 *2 日本建設株式会社 技術研究室

*3 工博 大阪工業大学助教授 工学部建築学科 *4 摂南大学助教授 工学部建築学科

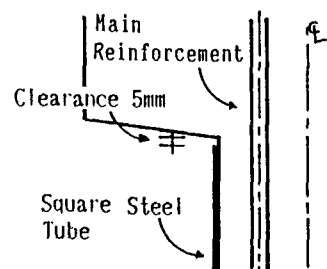
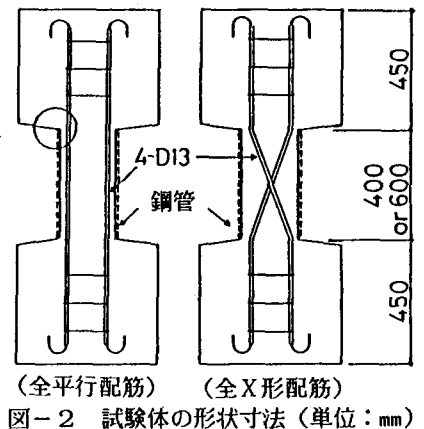
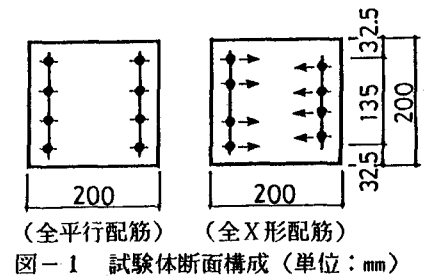
一方、このような試みに対して、通常の鉄筋コンクリート短柱のせん断破壊を防止する極めて有効な方法として、主筋の配筋をX形配筋とすることが筆者らによって提案され(6)、最近では、実用的な構法として普及する状況にある。この高せん断力に対して高性能をもつX形配筋柱を、高圧縮力を受ける部材に適用して必要な性能が得られるかどうかを実験的に検討したが、高圧縮力を受ける場合には、平行配筋の鉄筋コンクリート部分を帯筋によって拘束し、圧縮力に対するじん性を高めることによって高せん断に抵抗するX形配筋の特色が生かされることが明らかにされた(7)。

そこで、筆者らは、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、帯筋を必要としない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として、「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」を考案した。そして、この構法をもつ柱は、作用軸力比が $n=0.6(=N/b \cdot D \cdot F_c)$ という高圧縮力に対して、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、28体の試験体による実験結果より確認された(8)、(9)。本論文は、この実験結果により、この合成柱が如何に高性能を発揮するかということについてまとめたものである。

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)について、また、シリーズ2として $h/D=3$ について、このそれぞれに対して、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 $n(=N/b \cdot D \cdot F_c, N$:作用軸力、 b :柱幅、 F_c :コンクリート圧縮強度) $=0.2, 0.4$ 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 として実験計画をたて、計28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 $\square$ -200x200x4.5(STKR41)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ないため、鋼板(SS41)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 $\square$ -200x200x1.6および $\square$ -200x200x2.3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、鋼管端部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(5)に示されるようなアンボンドの状態にはあえてしていないことを計画の基本とした。



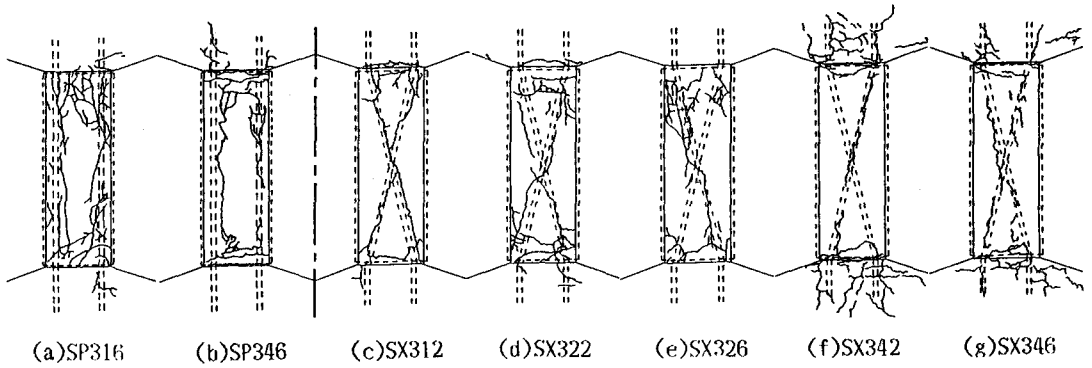


図-4 実験終了後の内部コンクリート損傷の数例

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、引張鉄筋比 $P_t=1.49\%$ ($=a_t/b \cdot D$, a_t :引張主筋断面積)とした。柱体部には帯筋は一切設けておらず、これにかわるものとして被覆角形鋼管を設けているが、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、一定軸力下において逆対称の繰返し曲げ・せん断力を加力した。加力方法は、柱体部の変位振幅部材角を $R=0.5\%$ rad. ずつ $R=3.0\%$ rad. まで漸増させ、それ以後は $R=1.0\%$ rad. ずつ最終部材角である $R=5\%$ rad. まで漸増させた。いずれも同一変位振幅部材角において2回の繰返し加力を行った。表-1に各素材の諸元、材料強度と作用軸力および実験結果の最大耐力を示す。

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. 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、いずれも最大耐力以後の破断である。なお、表-1中の●印の試験体は、 $R=4.0\%$ 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1.6mmおよび2.3mmの試験体では、作用軸力が増加するにしたがって、柱頭部、中央部および柱脚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のいかんにかかわらず、内部のコンクリートには、材端部の大きな曲げひび割れと、平行あるいはX形主筋に沿う付着割裂による微細なひび割れ幅をもつひび割れが生じているだけで、高圧縮力を受ける $n=0.6$ の試験体でも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2.3mm, 1.6mmと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。

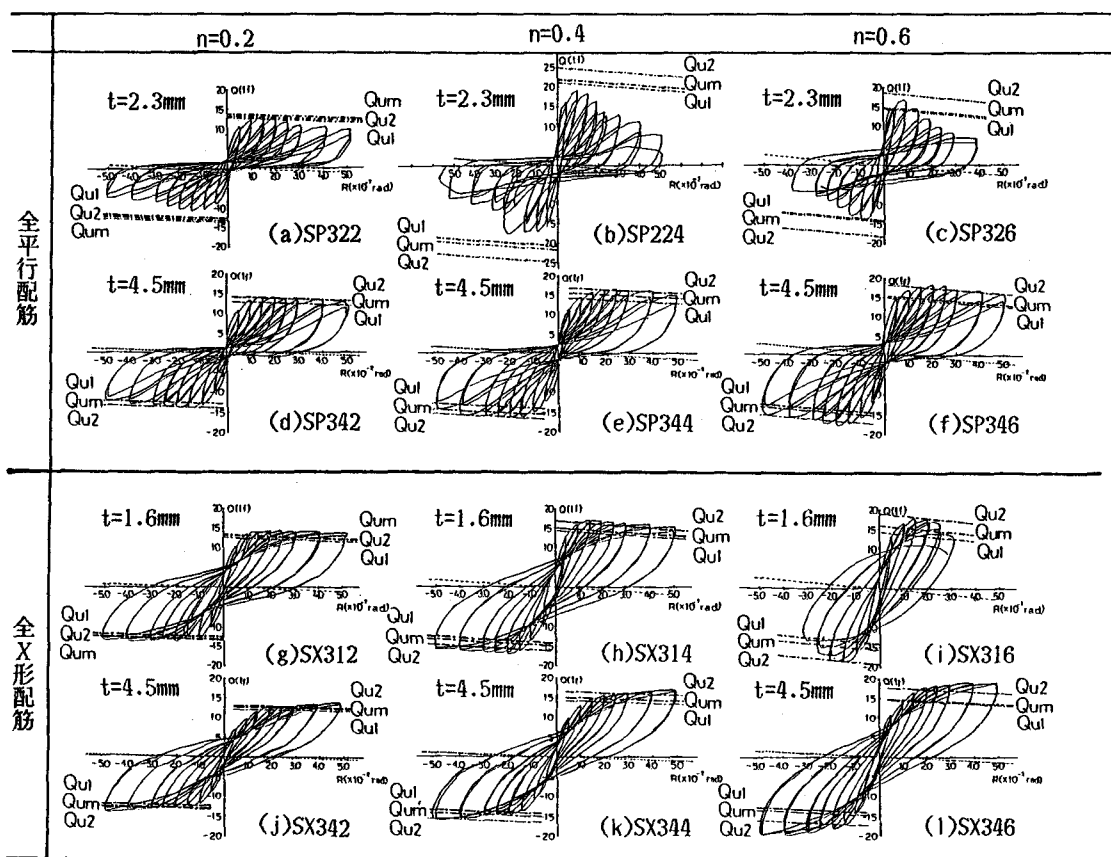


図-5 履歴曲線の数例

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。

被覆鋼管の板厚が $t=4.5mm$ の場合、主筋の配筋法および作用軸力の大きさいかにかかわらず、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。しかしながら、主筋が全平行配筋の場合では、作用軸力の大きさに関係なく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、作用軸力の大きさに関係なく、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優れている。この被覆鋼管を帯筋の代わりに使用した柱がじん性に優れていることは、富井、崎野らによって指摘されているところであり、このような補強法は、高じん性を必要とする柱に用いることは有効である。しかし主筋が全平行配筋法では、いかに高密度にコンクリートの拘束を行っても、その履歴曲線の形状を紡錘形に改善することは、極めて難しいことを示している。これは、図-4に示したように内部コンクリートが主筋に沿ってひび割れをもち、そのために主筋がすべりやすくなることに原因がある。

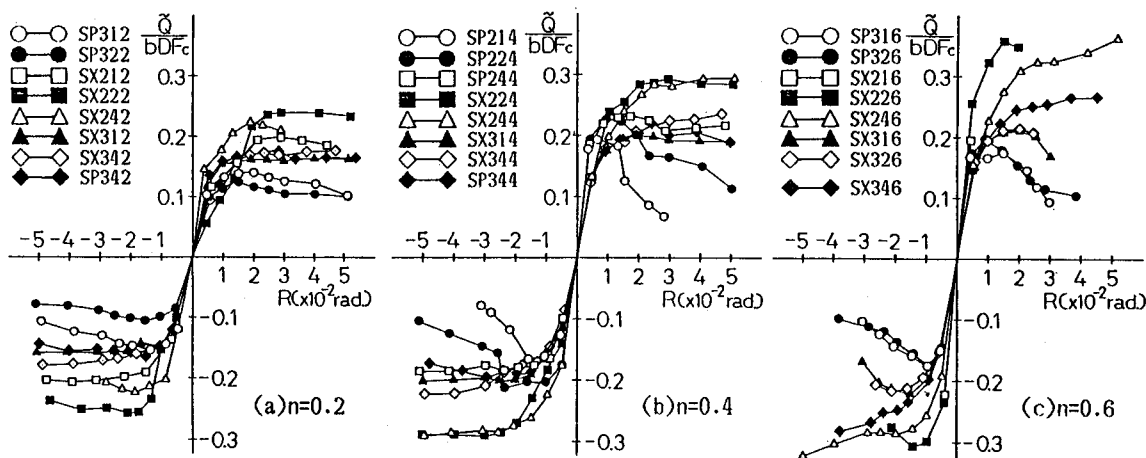


図-6 除荷点連結曲線

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差異が認められる。すなわち、主筋が全平行配筋では、全般的に逆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が急激となる。これは、前述のように内部のコンクリートが主筋に沿って、ひび割れをもち、そのために主筋がすべりやすくなることと、被覆鋼管が薄くなることにより、管壁の局部座屈に伴って、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(6)、その履歴曲線は紡錘形の安定した形状を示しており、最大耐力以後の耐力低下も殆どみられない。したがって、この高圧縮力下において繰り返し曲げ・せん断を受ける、被覆鋼管を用いたX形配筋柱の特色がみられる。

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作用軸力比別に示す。縦軸は $P-\Delta$ 効果の影響を考慮したせん断耐力 $\bar{Q}$ を $b \cdot D \cdot F_c$ で無次元化したものを、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、柱長さ比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与えていない。すなわち、より短柱になっても他の実験変数が同一であれば、柱長さ比いかにかわらず、類似の挙動を示している。

一方、作用軸力比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、同一作用軸力下において板厚が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と2.3mmの試験体とでは、そ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、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おり、作用軸力が増加するに伴いせん断耐力も増加する傾向を示している。

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部分の終局耐力に対して、こ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2種のモデルを考える。その1つのモデルは、従来のアーチ機構に用いられる一様な圧縮場に対するモデルとして、このモデルにおけるコンクリート部分のアーチ機構による終局耐力を Q_{u1} とする。他のモデルは、コンクリートのアーチ機構による終局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、被覆鋼管がコンクリートを拘束する効果として、局部支圧としての効果を発揮できるように、その被覆鋼管が機能するものとするモデルを考える。このモデルにおけるコンクリート部分の終局耐力を Q_{u2} 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終局耐力 Q_{u1} 、 Q_{u2} に、主筋部分の終局耐力を累加してその終局耐力を求めたのが Q_{u1} 、 Q_{u2} である。

また、対称配筋をもつ断面が、軸方向力と曲げモーメントを受ける部材において、終局曲げ耐力時におけるコンクリートの圧縮応力度分布を長方形と仮定した場合の、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を Q_{um} とする。これら、 Q_{u1} 、 Q_{u2} 、 Q_{um} の計算結果を表-1および図-5の履歴曲線中に示している。なお、表-1中の実験値である Q_{max} は、P- Δ 効果の影響を考慮して求められた最大せん断耐力である。

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	鋼管	コンクリート	鋼管降伏	作用	鋼管の 破断 状況	実験値		計算値		
	板厚 t(mm)	外径 D(mm)	強度 F _c	応力度 σ _y	軸力 N(kf)		Q _{max} (tf)	正荷重	負荷重	Q _{u1} (tf)	Q _{u2} (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
SP342	4.10	200.5	233	3600	17.2		14.3	14.1	12.8	13.4	13.4
SP344	4.11	200.4	203	3600	34.0		17.5	16.9	14.3	17.0	15.5
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
SP346	4.11	200.4	225	3600	49.9		19.5	18.6	14.8	18.1	15.4
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
SX342	4.08	200.4	211	3600	15.6		14.9	14.7	12.4	13.3	13.0
SX344	4.10	200.3	212	3600	31.3		18.3	17.2	14.4	16.8	15.1
SX346	4.10	200.4	205	3600	45.8		21.0	22.1	14.2	17.6	14.9

主筋 引張降伏応力度 $\sigma_y=3636\text{kgf/cm}^2$ ，引張強度 $\sigma_u=4200\text{kgf/cm}^2$ ， $\epsilon_y=0.2 \times 10^{-2}$
 F_c, σ_y の単位=kgf/cm²，○:実験途中で鋼管溶接部破断，●:載荷治具の破損

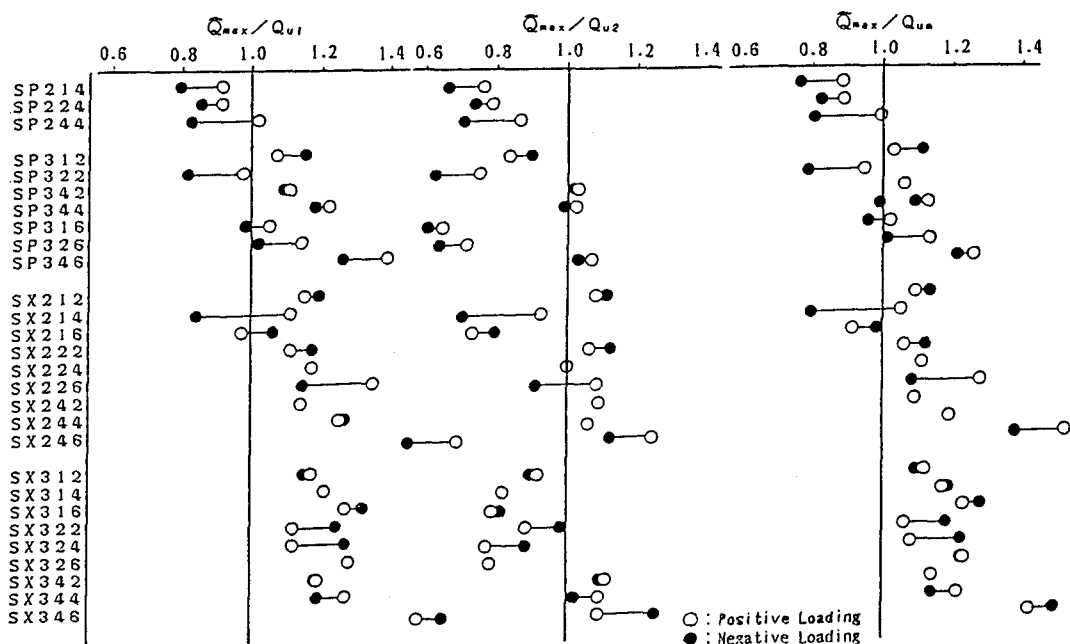


図-7 実験値と計算値の比較

これらの計算値と実験値の比較を図-7に示す。これらを、作用軸力および鋼管板厚の変数に関係なく、配筋法別に定量的に示すと、全X形配筋の計算値に対する実験値の比率は、 Q_{u1} は、正荷重で 0.97~1.59 平均値 1.22、負荷重で 0.85~1.55、平均値 1.21、 Q_{u2} では、正荷重で 0.73~1.24、平均値 0.97、負荷重で、0.70~1.25、平均値 0.97となり、 Q_{um} では、正荷重で 0.91~1.52、平均値 1.16、負荷重で 0.80~1.49、平均値 1.16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。

一方、全平行配筋の計算値に対する実験値の比率は、 Q_{u1} では、正荷重で 0.91~1.39、平均値 1.08、負荷重で、0.79~1.26、平均値 1.00、 Q_{u2} では、正荷重で 0.65~1.07、平均値 0.85、負荷重で 0.60~1.03、平均値 0.79、 Q_{um} では、正荷重で 0.88~1.26、平均値 1.03、負荷重で 0.76~1.21、平均値 0.96となり、 Q_{u1} および Q_{um} での評価が最も実験値に近い値を示しており、この両者で評価できると思われる。

8. 結び

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、被覆角形鋼管と主筋のX形配筋を組み合わせた合成柱を提案しているが、本論文は、柱長さ比と作用軸力比および、被覆鋼管の板厚を実験変数として実験を行い、この構法をもつ柱は、作用軸力比が $n=0.6$ という高圧縮力に対して、また、柱部材角が $R=5\%$ rad. の大変形振幅においても、極めて安定した紡錘形の履歴曲線が得られることを示した。特に、被覆鋼管の板厚のあたえる影響は、全平行配筋の場合、板厚が薄くなるにしたがって、最大耐力以後の耐力低下が高圧縮力になるにしたがい急激となり、剛性が維持できないが、全X形配筋では、板厚が薄い場合でも高圧縮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、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と、累加強度理論に基づく終局曲げ耐力から決ま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。

謝辞

本研究の実施においては、日本建設株式会社より多大なる御援助をいただきました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- (1) 富井政英、崎野健治、渡辺宏一、肖 岩：鉄筋コンクリート短柱のせん断破壊を鋼管補強により防止する設計法に関する実験的な研究（その1－その4）、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和60年10月、pp.413-420
- (2) 肖 岩、富井政英、崎野健治：円形断面鉄筋コンクリート短柱のせん断破壊を鋼管補強により防止する設計法に関する実験的研究、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986年6月、pp.517-520
- (3) 肖 岩、崎野健治、富井政英：円形断面鋼管補強鉄筋コンクリート短柱の曲げ耐力および変形性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、9-2、1987年6月、pp.549-534
- (4) 森下陽一、富井政英、崎野健治：鋼管で被覆補強されたコンクリートと異形鉄筋の間の付着性状、コンクリート工学年次論文報告集、9-2、1987年6月、pp.365-370
- (5) 佐藤孝典、下戸芳寛、渡辺泰志：アンボンド型充填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
- (6) 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、コンクリート工学年次論文報告集、1986年6月、pp.433-436
- (7) 倉本 洋、宮井清志、南 宏一、若林 実：高圧縮力を受けるX形配筋柱の耐力とじん性、第8回コンクリート工学年次論報告文集、1986年6月、pp.821-824
- (8) 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報告文集、1988年6月、pp.245-250
- (9) 佐々木良一、南 宏一、投野修美、山本裕康：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、第11回コンクリート工学年次論報告文集、1989年7月、pp.305-310