

論文

[2163] 鋼管と帯筋で二重に横補強したRC短柱の弾塑性性状に関する研究

正会員○ 山川 哲雄 (琉球大学建設工学科)

正会員 山田 義智 (琉球大学建設工学科)

正会員 崎野 健治 (九州大学建築学科)

1. 序

構造部材として耐震的に望ましい部材は以下の条件を満足する部材である。

- 1) 耐力が大きい(ひずみができるだけ小さいレベルで)
- 2) ねばりがある(じん性が大きい)
- 3) エネルギー吸収量が多い
- 4) 剛性が大きい

上記の4条件を満足させる部材が耐震的に理想的な部材であるが、そのようなRC部材を設計するためにはせん断破壊(付着割裂破壊も含む)を防止し、曲げ破壊を先行させることがまず必要である。そのために、現行の鉄筋コンクリート構造設計法では主筋量を可能な限り少なくし、かつせん断スパン比をできるだけ大きくして曲げ強度にともなうせん断力をできるだけ小さくおさえた消極的な設計法を採用している。したがって、冒頭にかがげた4条件のうち、2)を除いて1)、4)がいづれも小さくなる。また、3)も変形が大きく増大しない限り期待できない。そこで、鉄筋コンクリート柱の積極的な設計法としてコンファインドコンクリートの強度とじん性に注目し、しかも曲げ破壊先行のもとで曲げ強度、じん性、エネルギー吸収能などの大幅な改善を意図して、富井・崎野らによってRC短柱の鋼管横補強法が提案された[1]。この鋼管横補強法は帯筋にかわって鋼管を横補強材として用いるので、鋼管、主筋及びコンクリートからなる一種の合成構造であり、従来の帯筋による横補強法ではせん断破壊を防ぐことが困難とされていたRC短柱や、RC耐震壁の周辺柱端部の補強法として有効であることが実験的に実証されている。特に円形断面の場合は極端に主筋量が多くなってもきわめて有効であることがすでに報告されている[1]。正方形断面でも主筋量が極端に多くない限り有効であるが、主筋量がきわめて多くなってくると、または鋼管の板厚が薄くなってくると付着強度の不足が生じ、上記の2)や3)の条件に大きな期待がもてなくなることが報告されている[1][2]。これは正方形鋼管壁の板としての面外曲げ剛性が不足するからである。この面外曲げ剛性の不足を補うために富井らによって折板鋼管横補強法が提案された[3]。本研究ではこの折板鋼管横補強法に対応する、より簡単な補強法として通常の正方形鋼管と直線型帯筋を併用した二重横補強法を提案する。

本研究の目的は次の3点に集約される。

- 1) RC短柱を正方形鋼管と直線型帯筋の併用により二重に横補強すれば多量の主筋を配筋しても、正方形鋼管のみで横補強したRC短柱よりもその弾塑性性状が改善され、しかも冒頭に掲げた条件を満足するような理想的な部材により近づくことができるかどうかを検討する。
- 2) 正方形鋼管と直線型帯筋で二重に横補強されたRC短柱断面の四隅はその拘束効果が一辺の中間部より大きい[4]。このことに注目するとともに、主筋の曲げ強度に関する断面効率をできるだけ高めるために、太径の鉄筋を四隅にしかも多量に配筋する。このような配筋が可能かどうかを実験的に検討する。
- 3) 正方形鋼管と直線型帯筋で二重に横補強することにより得られたコンファインドコンクリートの力学特性を、従来のプレーンコンクリートのそれと対比しながら理論的に検討する。これらの検討結果をふまえRC短柱の理論解析を行い、本実験結果などと比較検討する。

2. 実験概要

2. 1 試験体

試験体の断面サイズ（鋼管の外径で17.5cm×17.5cm），せん断スパン比（ $M/QD=1$ ），鋼管板厚（ $t=6\text{mm}$ ）は富井・崎野らの実験[1]と同じである。また，文献1)と同じようにコンクリートの圧縮強度は 390kg/cm^2 を目標としたが，表-1に示すように 381kg/cm^2 から 484kg/cm^2 の範囲でばらつき，平均 422kg/cm^2 である。主筋量も文献1)の $P_g=6.64\%$ に近い $P_g=6.71\%$ である。

本実験の唯一の特色は文献1)をはじめ富井・崎野らの一連の実験と異なり，序で述べたように帯筋を現行RC規準のほぼ上限値いっぱい（体積比で2.1%）配筋していることである。試験体の作製に使用したコンクリート，鋼管および鉄筋の力学的性質を表-1,2に示す。試験体の配筋図と試験体名の凡例を図-1,2にそれぞれ示す。

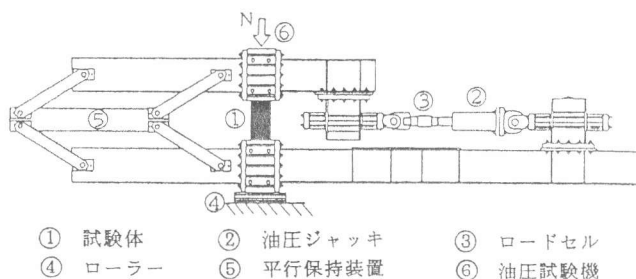
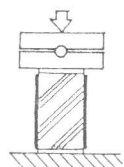
2. 2 実験方法

中心圧縮実験：文献1)と同様に一端固定他端ピンの材端条件で，500ton試験機を使用して中心圧縮荷重を載荷した（図-3(a)参照）。材端においてはコンクリートだけを圧縮し，材全長の軸方向の縮み量を4個の変位計を用いて測定した。

一定軸力下における繰返し曲げせん断実験：

文献1)と同様に図-3(b)に示す建研式加力装置を用い，一定軸圧縮荷重を500ton試験機で載荷する一方，柱の材端回転角を零に拘束したまま逆対称の強制水平変形を与えた。なお，一定軸圧縮荷重は全試験体（3体）とも

$0.35bD \sigma_B$ で同じとした。載荷プログラムは変位制御により変位振幅を部材角で $\pm 0.5\%$ づつ $\pm 3\%$ まで増加させ，同一振幅で3サイクルづつ，合計18サイクルの正負交番繰返し載荷を行った。



（a）中心圧縮実験 （b）一定軸力下における繰返し曲げせん断実験

表- 1 コンクリートの力学的性質（ ϵ_1 は σ_B 時のひずみ）

試験体名	$\sigma_B(\text{kg/cm}^2)$	$\epsilon_1(\%)$	$E(10^5\text{kg/cm}^2)$
中心圧縮			
RC-6.7-2.1	397	0.242	3.28
T6-0-0	424	0.234	3.32
T6-6.7-0	397	0.242	3.28
T6-6.7-2.1	424	0.234	3.32
曲げせん断			
RC-6.7-2.1-.35N	446	0.218	3.47
T6-6.7-0-.35N	381	0.210	3.33
T6-6.7-2.1-.35N	484	0.247	3.45

表- 2 鋼管および鉄筋の力学的性質

鋼管，鉄筋の種類	$\sigma_y(\text{kg/cm}^2)$	$\epsilon_y(\%)$	$E(10^6\text{kg/cm}^2)$
鋼管(175×175×6)	3188	0.160	1.99
D6(帯筋)	3455	0.174	1.99
D13(主筋)	3528	0.192	1.84
D22(主筋)	3449	0.165	1.99

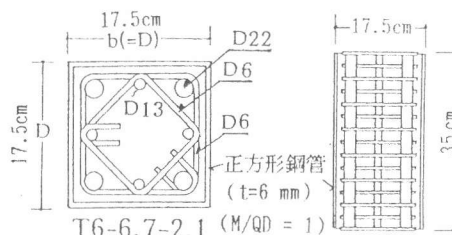


図- 1 試験体の配筋図と寸法

T6-6.7-2.1-.35N

T6 : 鋼管板厚6mm (RC:鉄筋コンクリート)

6.7 : 主筋比(%)

2.1 : 帯筋の体積比(%)

.35N: 軸圧縮力 ($.35N=0.35 \sigma_B \cdot b \cdot D$)

図- 2 試験体名の凡例

3. 実験結果

3. 1 中心圧縮実験

中心圧縮荷重と軸方向平均ひずみに関する実験結果を図-4に示す。ひずみが増大するにつれて鋼管と帯筋で二重に横補強した試験体”T6-6.7-2.1”の中心圧縮荷重が最も大きくなり，その拘束効果が表れている。図-4のC，C_{sc}，C_{wc}，Sはそれぞれブレンコンクリート，鋼管のみで横補強したコンファインドコンクリート，鋼管と帯筋で二重に横補強したコンファインドコンク

リート、及び主筋の各圧縮強度時の中心圧縮荷重である。 $c\sigma_B$ には表-1の中心圧縮試験体の平均圧縮強度 410kg/cm^2 を採用し、コンファインドコンクリートの強度は式(2),(3)から求めた。これらの累加強度は実験値をほぼとらえている。

3. 2 一定軸力下における繰り返し曲げせん断実験

一定軸圧縮荷重下 ($0.35 b D c\sigma_B$) における繰り返し曲げせん断実験から得られた、横補強鉄筋コンクリート短柱のせん断力 Q と部材角 R の関係を図-5に示す。これらの処女載荷時のスケルトンカーブの比較を図-6に示す。これらの図-5,6より正方形鋼管に加えてさらに帯筋で二重に横補強すると、強度が約25%程度増加するほか、じん性とエネルギー吸収能も若干改善させられていることがわかる。

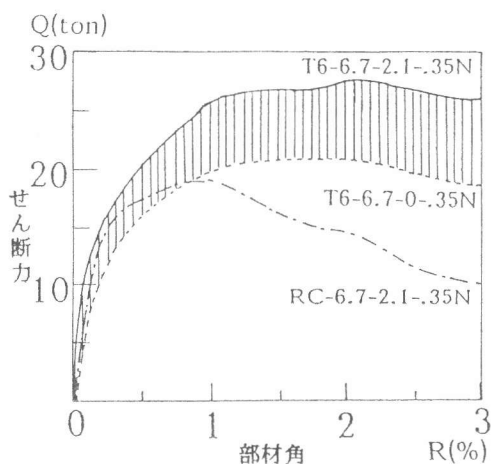


図-6 短柱の処女載荷時のスケルトンカーブに関する実験結果の比較

4. 理論解析

4. 1 中心圧縮強度の理論解析

Manderらはプレーンコンクリートをも含んだコンファインドコンクリートの一般的な構成則を式(1)で与えた (図-7参照) [5].

$$f_c = \frac{f'_{cc} Xr}{r - 1 + Xr} \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{ここに,} \quad X = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad \epsilon_{cc} = c\epsilon_1 \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{c\sigma_B} - 1 \right) \right]$$

$$r = \frac{E_c}{(E_c - E_{sec})} \quad E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}}$$

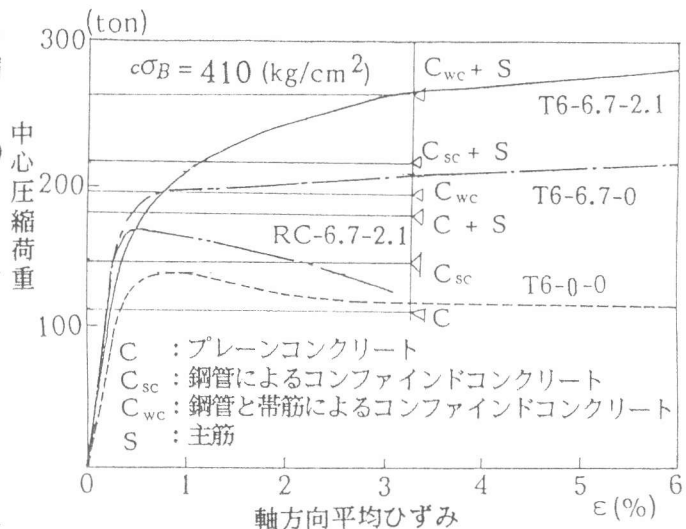


図-4 中心圧縮荷重と軸方向平均ひずみの関係に関する実験結果

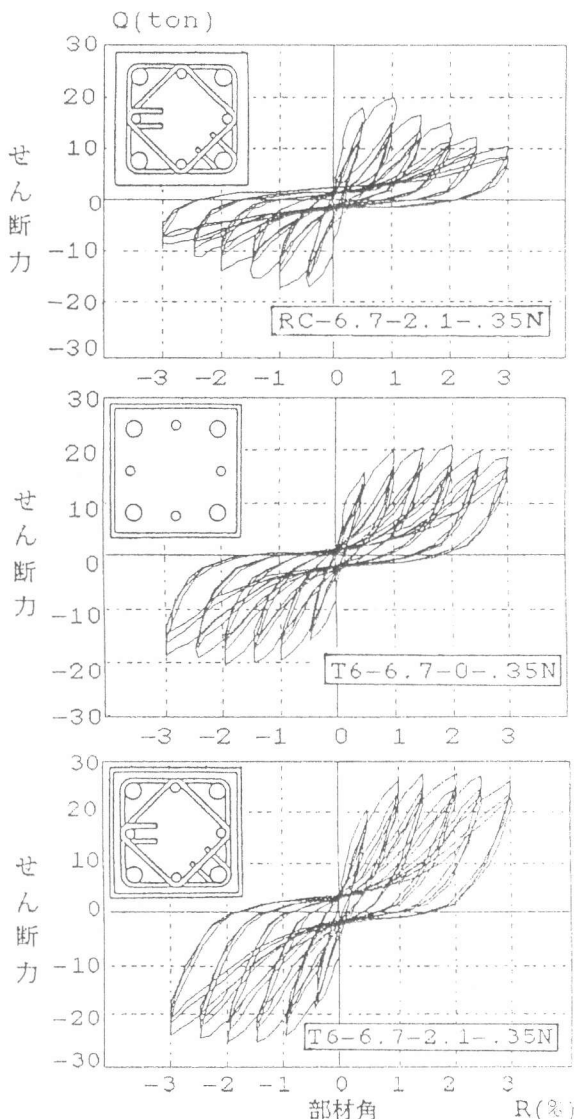


図-5 横補強した鉄筋コンクリート短柱のせん断力 Q と部材角 R に関する実験結果

$$E_c = 16000\sqrt{c\sigma_B} \text{ kg/cm}^2$$

$c\sigma_B$: プレーンコンクリートの圧縮強度

正方形断面柱の直線型帯筋に関してはManderらの算定図表[5]から、近似式を式(2)のように作成した(図-8参照)。なお、式(2)を用いるために副帯筋を図-8に示すような等価なタイに置き換えた。

$$\frac{f'_{cc}}{c\sigma_B} = -5.17 \left(\frac{f'_l}{c\sigma_B} \right)^2 + 5.88 \left(\frac{f'_l}{c\sigma_B} \right) + 1 \quad \dots\dots(2)$$

$$\text{ここに, } f'_l = k_e \rho_w s \sigma_y \quad \rho_w = \frac{a_w}{s d_c}$$

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6d_c^2} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right)^2}{(1 - \rho_g)} \quad \rho_g = \frac{a_g}{d_c^2}$$

一方、正方形鋼管で横補強されたコンファインドコンクリートの強度式に関しては松村らの提案式である式(3)を用いた[6]。

$$\frac{f'_{cc}}{c\sigma_B} = 1 + k \frac{4\sigma_y \left(\frac{t}{B} \right)^2}{c\sigma_B} \quad \dots\dots(3) \quad (\text{kg/cm}^2)$$

ここに、
 B : 正方形鋼管の外径
 σ_y : 正方形鋼管の降伏点強度
 t : 板厚
 k : 12.2

正方形鋼管と帯筋で二重に横補強した場合のコンファインドコンクリートの圧縮強度 f'_{cc} は、 f'_c 式(2)と式(3)を累加して用いる。こうして得られたコンファインドコンクリートの構成則を、試験体" T6-6.7-2.1-35N" をモデルに $c\sigma_B = 390 \text{ kg/cm}^2$ のもとで計算する。この結果を図-9に示す。

試験体" T6-0-0" の $c\sigma_B$ は 424 kg/cm^2 (表-1参照) にもかかわらず、実験結果が理論線より若干低い、大体の性状はとらえているようである。

理論式を用いると帯筋の体積比が鋼管の体積比の約1/6にもかかわらず、帯筋の拘束効果が鋼管のそれより等しいか、やや大きいことが注目される。

4. 2 曲げ強度の理論解析

図-9のコンクリートの応力とひずみの関係を横補強されたRC短柱の圧縮側コンクリートに適用し、図-9と同一のモデルに通常の仮定と断面分割法を用いて計算した[7]。鉄筋コンクリート断面(以後RCの断面と呼称する)の曲げモーメント M と圧縮縁コンクリートのひずみ ϵ_c の関係、及び同じ M と曲率 ϕ に柱の全せい D を乗じた $\phi \cdot D$ の関係を図-10にまとめて示す。

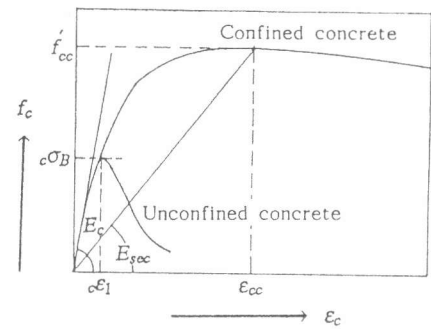
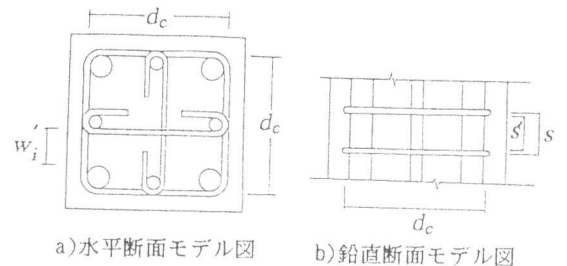


図-7 コンファインドコンクリートとプレーンコンクリートに関する応力とひずみの関係



s : 帯筋間隔
 s' : 帯筋内のり間隔
 w'_i : 主筋間の内り間隔
 d_c : 帯筋で囲まれたコアコンクリートの一辺の長さ
 a_w : 1組の帯筋の断面積
 a_g : 主筋の総断面積
 $s\sigma_y$: 帯筋の降伏点強度

図-8 直線型帯筋で横補強したRC正方形断面柱の断面モデル図

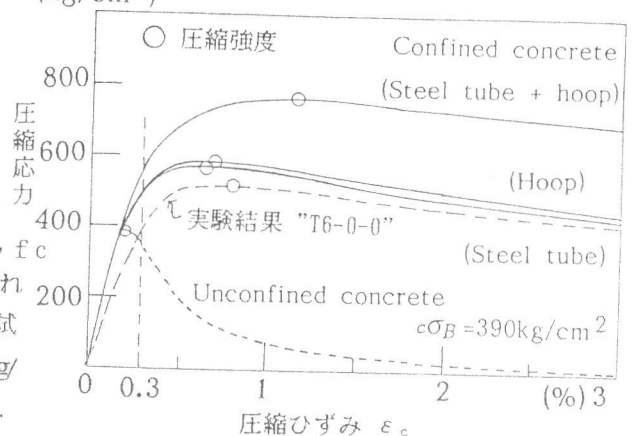


図-9 Manderらの構成則、強度式及び松村らの強度式を本実験の試験体モデルに適用して計算したコンクリートの応力とひずみの関係

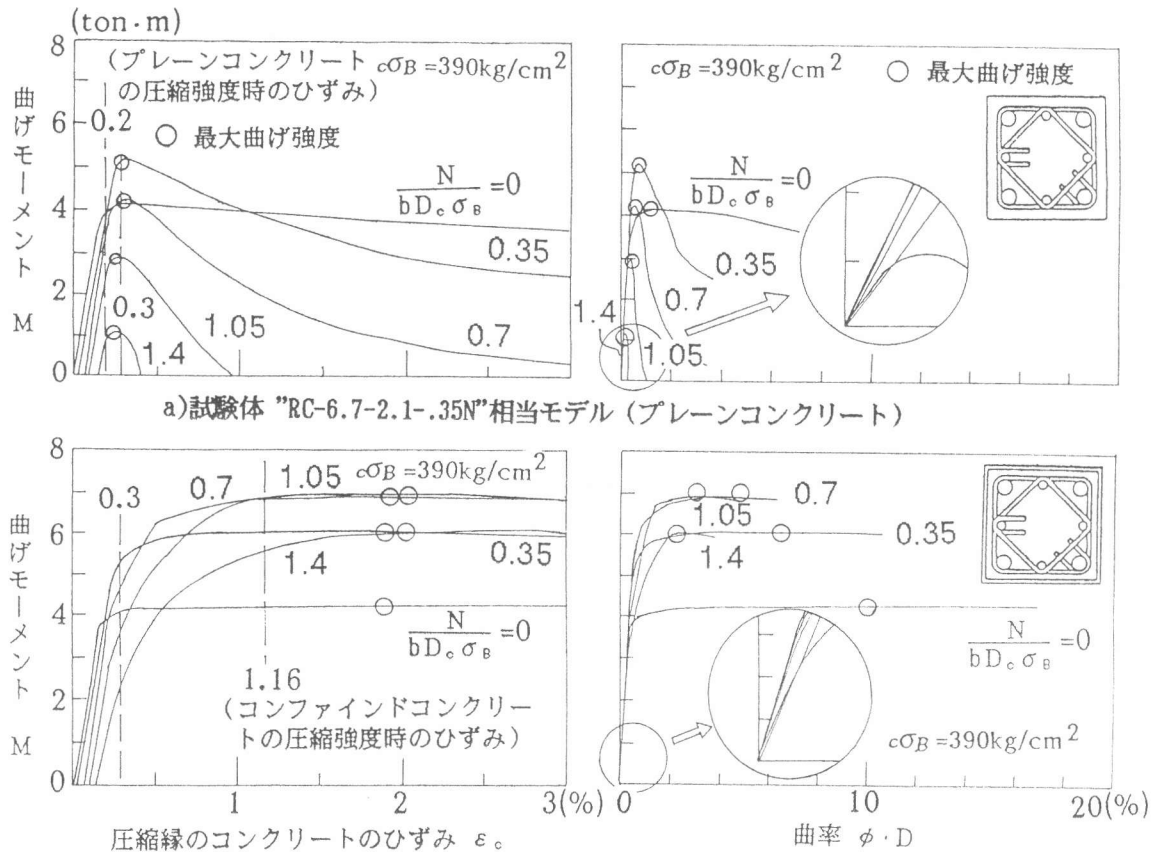


図-10 図-9のコンクリートの応力とひずみの関係を用いて計算したRC断面の曲げモーメント M と圧縮縁コンクリートのひずみ ϵ_c の関係、及び M と曲率 ϕ に全せい D を乗じた $\phi \cdot D$ の関係

コンファインドコンクリートを用いたRC断面の最大曲げ強度 (図-10における○印) は圧縮縁コンクリートのひずみが約2%近傍になったとき最大になり、しかもねばりがあることがわかる。プレーンコンクリートを用いた場合はほぼ0.3%前後でRC断面の最大曲げ強度に達し、軸力の増大とともにねばりが急激に失われていることがわかる (図-10参照)。このことを明示するために図-10から求めた圧縮縁コンクリートのひずみが0.1, 0.3, 1%時点におけるRC断面の各曲げ強度と、最大曲げ強度の比較を図-11に示す。

図-10から曲げ強度の最大値を各軸圧縮力ごとに求めた $N-M$ 曲線 (実線と点線) と、一定軸力下における繰返し曲げせん断実験から求められた処女載荷時の最大曲げ強度の比較を図-12に示す。なお、実験結果のみ図-5から得られた最大曲げ強度に、その強度時の部材角と一定軸力から得られる偏心曲げモーメントが付加されている。一方、図-9から理論解として求めた $N-M$ 曲線には、付着強度の劣化は一切無視されている。図-12において実験結果がこれらの当該理論値よりいずれも小さい。この主な原因は純RC断面におけるせん断破壊を除いて断面サイズに比較してきわめて大きい太径の主筋を用いたために、付着強度が不足したからであると思われる。このことは、最大曲げ強度時に材端の主筋は降伏していなかった実験結果からも推定される。し

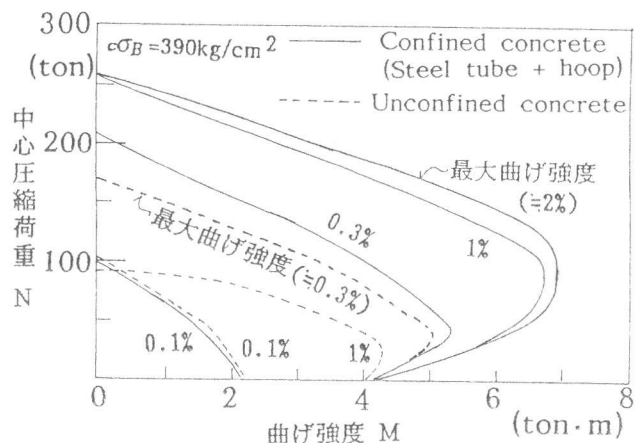


図-11 圧縮縁コンクリートの限界ひずみの差異による曲げ強度に関する理論曲線の比較

かし、正方形鋼管のほかに帯筋で二重に横補強した効果は図-12においても明白である。図-12において圧縮強度とじん性が異なるプレーンコンクリートとコンファインドコンクリートでは、軸力の増大とともに曲げ強度に大きな差異が生じている。すなわち、付着強度の劣化を防止できればコンファインドコンクリートの有効性がますますきわだってくる。

5. 結論

本実験は過補強と考えられるほどの鋼管と帯筋で二重横補強したRC短柱に、多量の太径の主筋(D22)を配筋した極限状態の実験に相当する。その結果、次の結論が得られた。

- 1) 正方形鋼管と直線型帯筋で二重に横補強したRC短柱の中心圧縮強度及び曲げ強度は、正方形鋼管のみで横補強したRC短柱のそれよりも大きく、二重横補強の拘束効果は実験的にも理論的にも確認された。そのほか、じん性やエネルギー吸収能に関しても、さらに若干の改善が実験的にみられた。
- 2) 実験に際して断面の四隅とはいえ、試験体の断面サイズのわりにはきわめて大きい太径の鉄筋を主筋として配筋したので、付着強度の劣化が避けられず、曲げ応力が主筋の降伏点強度まで達していない。その結果、実験結果が理論的に求められた曲げ強度を下まわっている。
- 3) コンファインドコンクリートを用いたRC断面の曲げ強度は、プレーンコンクリートと異なりその拘束効果が大きければ大きいほど圧縮縁コンクリートのひずみが0.3%を越え、約2%になって最大に達している。

[謝辞] 試験体製作から実験に至るまでご協力をいただいた九州大学文部技官藤原文夫氏をはじめ、九州大学工学部建築学教室の多くの職員の皆様に厚くお礼を申し上げます。また、本研究を平成2年度の卒業研究として取り組んだ九州大学学生・高岡洋平、長谷川和夫の両君に感謝します。

[参考文献]

- 1) 富井政英：“鉄筋コンクリート短柱のせん断破壊を鋼管補強により阻止する設計法に関する実験的研究”，昭和62年度科学研究費(総合研究A)研究成果報告書，1988.3
- 2) 富井政英，崎野健治，孫玉平，仲紀龍：“薄肉鋼管で横補強した鉄筋コンクリート短柱の繰返し曲げせん断性状に関する実験的研究”，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11, No2, pp.513-518, 1989.6
- 3) 富井政英，崎野健治，林博之：“折板正方形鋼管で横補強された鉄筋コンクリート短柱の弾塑性性状に関する実験的研究”，日本建築学会研究報告九州支部第31号，pp.313-316, 1989.3
- 4) Y.Morishita, M.Tomii and K.Sakino: "EXPERIMENTAL STUDIES ON BOND BEHAVIOR BETWEEN DEFORMED REINFORCING BARS AND CONCRETE CONFINED IN SQUARE STEEL TUBE", Transactions of the JCI, Vol. 9, No. 2, pp.335-342, 1987.6
- 5) J.B.Mander, M.J.N.Priestley and R.Park: "THEORETICAL STRESS-STRAIN MODEL FOR CONFINED CONCRETE", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, 1988.8
- 6) 松村弘道，伊藤茂樹：“角鋼管に充填されたコンクリートの圧縮強度”，日本建築学会大会学術講演梗概集C(熊本)，pp.1627-1628, 1989.10
- 7) 孫玉平，崎野健治：“正方形鋼管横補強RC短柱の曲げ耐力に関する研究”：日本建築学会大会学術講演梗概集C(広島)，pp.797-798, 1990.10

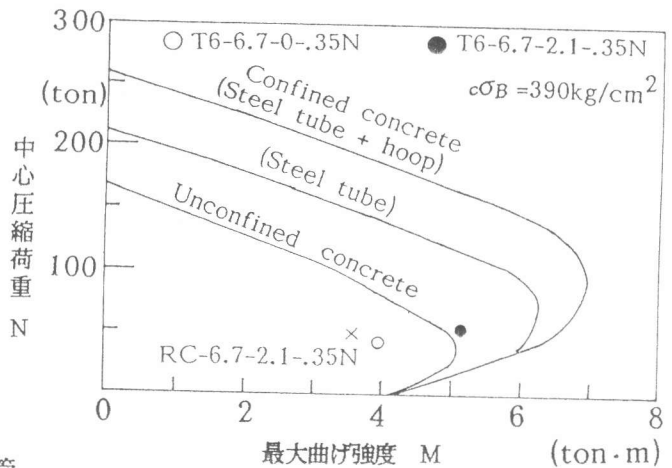


図-12 最大曲げ強度に関する理論曲線と実験から求められた処女載荷時の最大曲げ強度の比較