

論文

[2059] 正方形鋼管と帯筋で二重に横拘束したコンクリートの
中心圧縮性状に関する実験的研究

正会員○山川哲雄 (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

著者らは、正方形鋼管と帯筋で二重に横補強した鉄筋コンクリート短柱に関して、一定軸圧縮力下の繰返し曲げせん断弾塑性挙動を検討するためのパイロット実験を行い、これらの実験結果と解析結果を文献 [1][2][3]等に発表した。これらの文献では、鋼管と帯筋によるコンファインド効果に関する累加強度が成立し、さらに多量の主筋に対する付着強度の劣化を防止できれば、理論的には大きな曲げ強度を期待できる可能性を示唆した。

本研究では正方形鋼管と直線型帯筋で二重に横拘束したコンクリートの圧縮強度に関して、コンファインド効果を考慮した累加強度が成立するか否かを実験的に検証することが主なる研究目的である。鋼管のみまたは帯筋のみで拘束したコンクリートや柱の実験は数多く見られる。また、これらの実験結果に基づいたコンファインドコンクリートの圧縮強度式や応力-ひずみ関係式などが多くの研究者によって提案されている。本研究では正方形鋼管と直線型帯筋で二重に横拘束したコンファインドコンクリートの構成則に Manderらの構成則を利用し、直線型帯筋に対する Manderらの強度式 [4]と正方形鋼管に対する松村らの強度式 [5]をそれぞれ単純累加して用いる。さらに崎野・孫によって Manderらの構成則と松村らの強度式にかわるコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係式が最近提案されている [6]。したがって、崎野・孫式も含めてこれらの式に基づいた累加強度式が本実験結果を説明しうるかどうかを検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の断面形状は 25cm×25cm の正方形とし、全高さは 75cmである。ただし、変位計による検長部分は中央部の約 50cmである (図-1, 2 参照)。本研究では序でも述べたように、正方形鋼管と直線型帯筋によるコンファインドコンクリートの横拘束効果を実験的に検証することが主なる目的であるがゆえに主筋を配筋していない。ただし、帯筋には D6 の鉄筋を用い、その間隔を一定に保つために、補助筋として帯筋と同じ D6 を 4 隅に一本ずつ合計 4 本配筋している (図-1 参照)。これらの補助筋全断面積が試験体の全断面積 (25cm×25cm) に占める割合、すなわち主筋比 ρ_r は 0.2% である。主筋も帯筋とともにコアコンクリートを立体的にかつ、より有効的に横拘束する役割が一部あると考えられるが、本実験ではこれらの立体的な拘束効果を期待できないことになる。

試験体は表-1 に示すように、コンクリートのみの試験体、直線型帯筋のみで横拘束した試験体、正方形鋼管のみで横拘束した試験体、帯筋と鋼管で二重に横拘束した試験体の 4 種類を計画した。実験変数としてコンクリート強度 (コンクリートの設計基準強度 $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ と 390 kg/cm^2)、帯筋比 $\rho_s = 1.5\%$ (D6 を 8cm ピッチで $\rho_r = 0.64\%$)、 $\rho_s = 3\%$ (D6 を 4cm ピッチで $\rho_r = 1.28\%$)、と正方形鋼管の幅厚比 ($B/t = 250/3.2 \approx 78$ と $B/t = 250/6 \approx 42$) を採用した。各試験体とも一体ずつを計画し、帯筋なし鋼管なしのプレーンコンクリート試験体のみ二体ずつ計画し、合計 20 体の試験体を用意した。試験体に用いた鋼管、鉄筋の引張試験結果を表-2 に整理して示す。

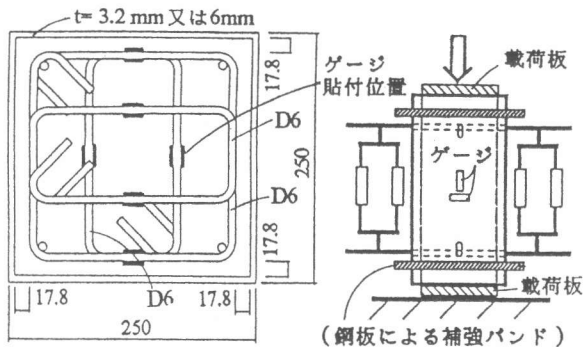


図-1 試験体の断面詳細図，帯筋のひずみゲージ貼付位置，載荷及び測定方法

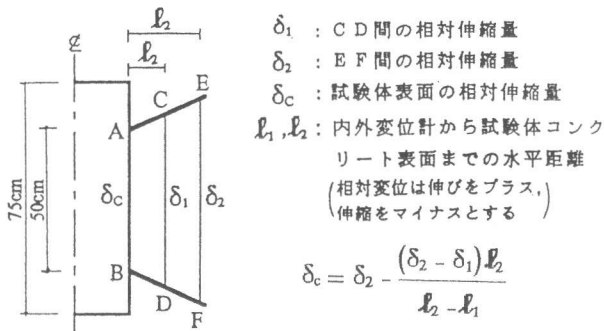


図-2 2台の変位計で測定された相対伸縮量と測定位置の関係

コンクリート ($\phi = 10 \times 20\text{cm}$ の円柱試験体) の圧縮試験結果 (平均値) を表-3 に示す。

2. 2 載荷及び測定方法

図-1 に示すように載荷はコンクリート部分のみの単調載荷で，端固定の材端条件で 500 ton 試験機を使用して行った。試験体中央部におけるコンクリートの軸方向ひずみを，試験体に東西方向と南北方向に串刺にして埋め込んだボルトに取り付けた 8 台の変位計で測定した。そのために，鋼管に長さ 4cm，幅 1.5cm 程度の長方形の穴を設けた (図-1 参照)。この結果，鋼管に断面欠損を生じることになるので，穴近傍でかつ検長区間外を帯筋でさらに補強するとともに，図-1 に示すように検長区間外に補強鋼板をとりつけた。試験体の軸方向変位が大きくなったとき，変位計取り付け棒として埋め込んだボルトが図-2 に示すように傾くことが考えられる。そうであっても，試験体のコンクリート表面位置における軸方向変位を正確に測定できるように，各面に 2 台ずつ計 8 台の変位計を用いた (図-1 参照)。試験体のコンクリート表面の相対軸方向伸縮量 δ_c は図-2 に示した式で求め，これからコンクリートの平均圧縮ひずみを求めた。

3. 実験結果とその考察

図-3 に上から順に鋼管なしの試験体，鋼管板厚が小さい方 ($t = 3.2\text{mm}$) の試験体，及び鋼管板厚が大きい方 ($t = 6\text{mm}$) の試験体の各応力-ひずみ曲線に関する実験結果をそれぞれ示す。鋼

表-1 試験体の断面一覧表

	帯筋なし	帯筋あり	
		$\rho_s = 1.5\%$ ($\phi 80, p_w = 0.64\%$)	$\rho_s = 3.0\%$ ($\phi 40, p_w = 1.28\%$)
鋼管なし	RCL-0	RCL-1.5	RCL-3
鋼管あり	T3 L-0	T3 L-1.5	T3 L-3
	t = 3.2 (mm)		
	T6 L-0	T6 L-1.5	T6 L-3
	t = 6 (mm)		
備考	RC : 鋼管なし T3 : 正方形鋼管 □ - 250 × 250 × 3.2 T6 : 正方形鋼管 □ - 250 × 250 × 6 L : 低強度のコンクリート $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ ($c\sigma_s = 253 \text{ kg/cm}^2$) H : 高強度のコンクリート $F_c = 390 \text{ kg/cm}^2$ ($c\sigma_s = 443 \text{ kg/cm}^2$) 1.5 : 帯筋量 $\rho_s = 1.5\%$ 3 : 帯筋量 $\rho_s = 3.0\%$		

表-2 鋼管及び鉄筋の力学的性質

鋼管の種類	B/t	$s\sigma_y$ (kg/cm ²)	$s\epsilon_y$ (%)	sE (10 ⁴ kg/cm ²)
鋼管 (250 × 250 × 3.2)	78	3084	0.152	2.07
鋼管 (250 × 250 × 6)	42	3215	0.153	2.12
帯筋 (D6)	—	3455	0.174	1.99

表-3 コンクリートの力学的性質

設計基準強度 F_c (kg/cm ²)	$c\sigma_s$ (kg/cm ²)	$c\epsilon_s$ (%)	cE (10 ⁴ kg/cm ²)
210	253	0.196	2.67
390	443	0.194	3.31

注) $c\epsilon_s$ は $c\sigma_s$ 時のひずみである。

管と帯筋に関する横拘束鋼材量が増加すればするほど、一般的な傾向として圧縮強度が大きくなり、かつねばりが改善されている様子が図-3よりわかる。特に、低強度のコンクリートでは、じん性の改善が著しい。ただし、図-3(b)より試験体 "T3H-1.5" の圧縮強度と試験体 "T3H-3" のそれとが逆転している。試験体 "T3H-3" の製作になんらかの欠陥が生じたものと推定される。

鋼管と帯筋で二重に横補強した試験体において、各横補強材の横拘束状況を把握するために、各横補強材の引張ひずみとコンファインドコンクリートの圧縮ひずみとの関係を図-4に示す。なお、図中の縦線はコンファインドコンクリートが圧縮強度に達した時を示す。図-4より、横拘束に最も寄与している横拘束材は中子筋であり、外周筋と鋼管はそれより低いレベルで、しかもほぼ同じ程度の横拘束効果しか期待できないのではないかと推定される。

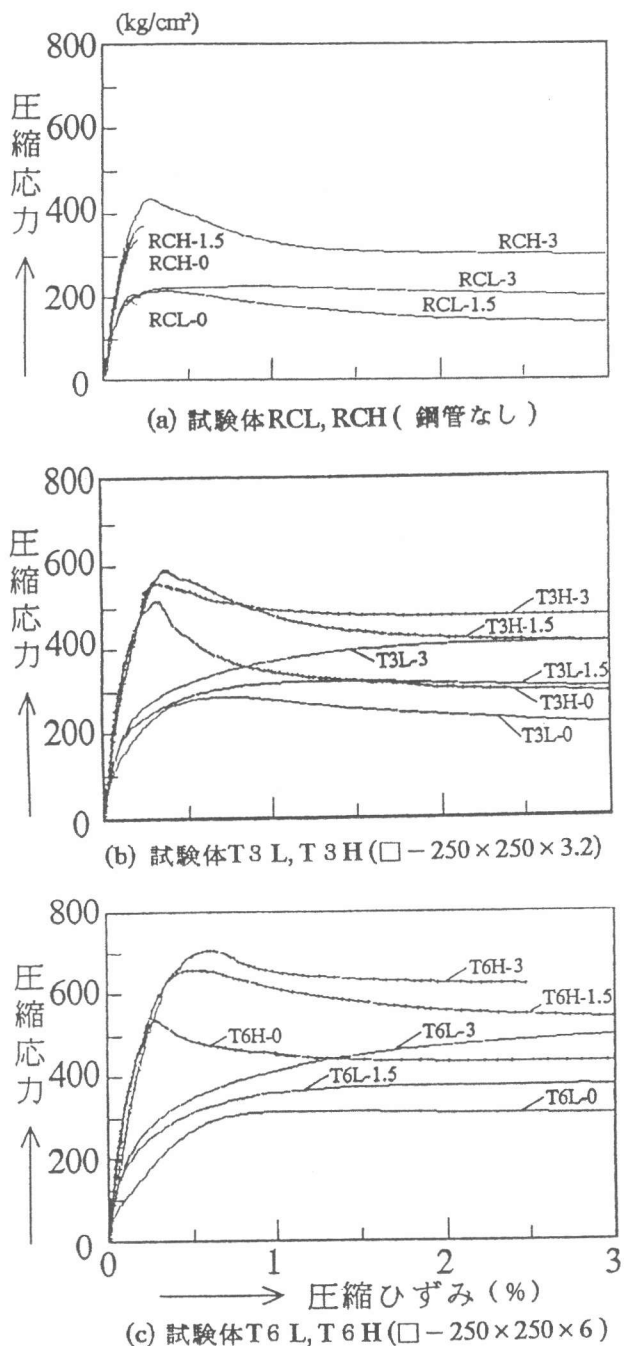


図-3 変位計で測定された試験体の応力-ひずみ曲線に関する実験結果

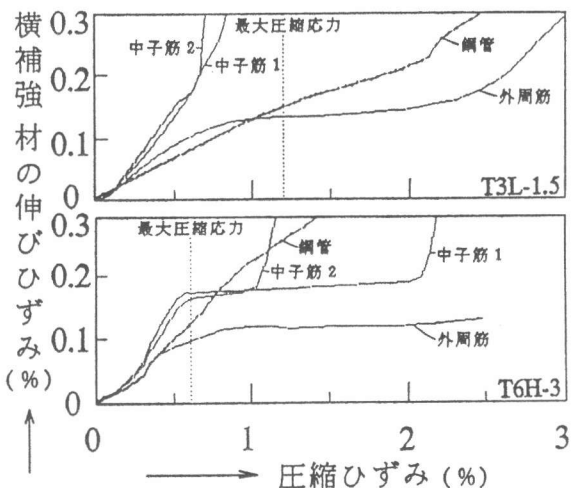
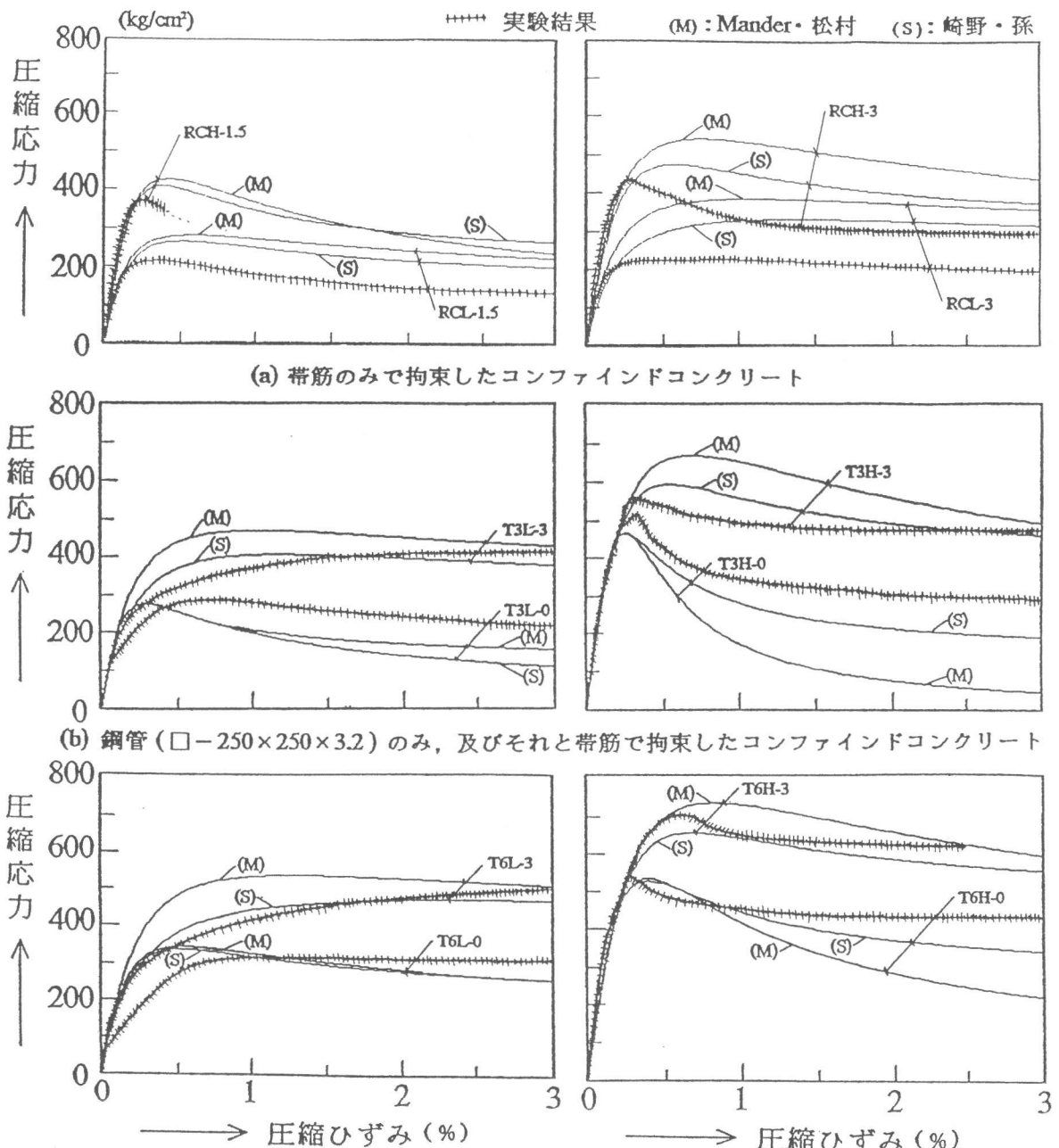


図-4 試験体 T3L-1.5, T6H-3 の横補強材の伸びひずみ-コンクリートの圧縮ひずみに関する実験結果

4. 応力-ひずみ曲線、及び圧縮強度に関する実験結果と各提案式の比較検討

本研究では従来の Mander や松村らの提案式 [4][5]に加えて、崎野・孫の提案式 [6] に関しても実験結果と比較検証し、考察する。図-5は帯筋、鋼管をそれぞれ単独で、または併用して横拘束したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に関して、これらの実験結果と各提案式の比較を行ったものである。ただし、各提案式を適用するにあたり、鋼管で横拘束した試験体 (Tで始まる試験体名) に対しては帯筋の有無にかかわらず、表-3に示したシリンダー強度 σ_B を用いた。したがって、鋼管と帯筋で二重に横拘束した試験体の圧縮強度はその σ_B を用いて単純累

加で算定した。一方、帯筋のみで横拘束した試験体(RCで始まる試験体名)は Manderらの提案 [4] にしたがって、プレーンコンクリート (RCL-0とRCH-0) の圧縮強度(各2体のそれぞれの平均値)を用いた。コンファインドコンクリートの圧縮強度に関する実験結果と、各提案式による計算結果の差異、及びこれらのばらつき状況をそれぞれ図-6に整理する。その中で、特に鋼管と帯筋による横拘束効果がコンファインドコンクリートの圧縮強度を単純累加の形で、上昇せしめることが可能かどうかを検証することが本項の目的である。もし、単純累加が成立すれば、正方形鋼管と直線型帯筋で二重に横拘束したコンファインドコンクリートの圧縮強度を求めるために、鋼管と帯筋の所要量を単純累加の形で提案された各圧縮強度式に代入すればよいことになる。コンク



(a) 帯筋のみで拘束したコンファインドコンクリート
 (b) 鋼管(□-250×250×3.2)のみ、及びそれと帯筋で拘束したコンファインドコンクリート
 (c) 鋼管(□-250×250×6)のみ、及びそれと帯筋で拘束したコンファインドコンクリート
 図-5 コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に関する実験結果と各提案式の比較

表-4 横拘束鋼材によるコンファインドコンクリートの圧縮強度上昇分に関する実験値と計算値の比較

	実験値	ブレンコンクリートの 圧縮強度	帯筋	帯筋	鋼管	鋼管
		($\rho_s=1.5\%$)	($\rho_s=3.0\%$)	($t=3.2$)	($t=6.0$)	
$F_c=210$	Mander・松村	201(1)	36(0.18)	128(0.64)	84(0.42)	114(0.57)
	崎野・孫	253(1.26)	83(0.41)	191(0.95)	26(0.13)	91(0.45)
	崎野・孫	253(1.26)	66(0.33)	130(0.65)	22(0.11)	84(0.42)
$F_c=390$	Mander・松村	343(1)	121(0.60)	167(0.83)	172(0.50)	193(0.56)
	崎野・孫	443(1.29)	87(0.25)	205(0.60)	27(0.08)	93(0.27)
	崎野・孫	443(1.29)	65(0.19)	130(0.38)	23(0.07)	85(0.25)

- 注1) ブレンコンクリート (RCL-0, RCH-0) の圧縮強度は各2体分の平均値を用いた。
 注2) () 値はブレンコンクリートの圧縮強度に関する実験値を1にした時の比率である。
 注3) 帯筋による圧縮強度上昇分は帯筋鋼管コンクリートの圧縮強度から鋼管コンクリートのそれを差引いた分である。
 注4) 鋼管による圧縮強度上昇分は鋼管コンクリートの圧縮強度からブレンコンクリートのそれを差引いた分である。

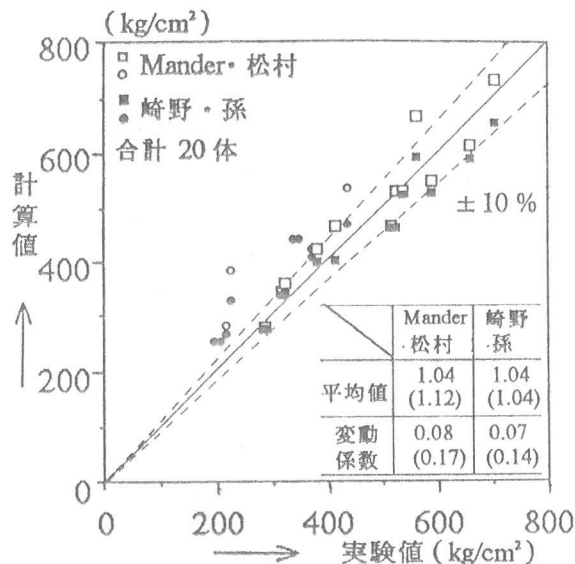
リートシリンダー強度の高低にかかわらず、崎野・孫による提案式とMander・松村らの提案式の間には顕著な差異は認められないが、全体的に崎野・孫式が実験結果をややよく説明しているようである。特に、コンファインドコンクリートの圧縮強度に達した後の応力-ひずみ曲線に関する下り勾配を、崎野・孫式はMander・松村式より比較的良好に表現していることが図-5よりわかる。

横拘束鋼材ごとのコンファインドコンクリートの実験値による圧縮強度上昇負担分は、どの試験体を基準値に設定するかによって異なる。表-4は実験値が計算値にできるだけ一致するように選択した一例である。表-5には鋼管と帯筋で二重に横拘束した全試験体について、累加強度に関する実験値と計算値の比較を示す。表-4の実験値を用いて計算した累加強度と提案式によるそれは、両者ともコンファインドコンクリートの圧縮強度に関する実験結果を、比較的精度よく表現していることがわかる。これらのことは、図-6に示したコンファインドコンクリートの圧縮強度に関する計算値と実験値のばらつき状況にも反映されている。図-6で正方形印によるプロットが鋼管のみ、及び鋼管と帯筋で二重に横拘束した試験体であり、これらの計算値と実験値の差異はほぼ10%以内におさまっているようである。しかし、鋼管による横拘束のない試験体の計算値と実験値の差異はこれらより大きい(図-6の丸印参照)。

これらの結果をふまえて、横拘束鋼材量(体積比)を同じにしたコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の比較を図-7に示す。 $t=6\text{ mm}$ の鋼管($\rho_s=9.4\%$ で試験体名" T6L-0", " T6H-0")と同じ鋼材量に相当する $t=3.2\text{ mm}$ の鋼管と3丁掛の中子筋を有する帯筋をピッチ37 mmごとに配筋した試験体(たとえば $\rho_s=9.4\%$ で試験体名" T3L-4.5", " T3H-4.5")の応力

表-5 コンファインドコンクリートの圧縮強度に関する累加強度の比較

試験体	実験値 (kg/cm^2)	表-4の実験値による 累加強度 実験値	計算値		
			Mander・松村 実験値	崎野・孫 実験値	
$F_c=210$ (kg/cm^2)	T3L-1.5	321	1	1.121	1.059
	T3L-3	413	1	1.131	0.978
	T6L-1.5	381	0.921	1.118	1.052
	T6L-3	523	0.847	1.019	0.891
$F_c=390$ (kg/cm^2)	T3H-1.5	587	1.083	0.940	0.903
	T3H-3	561	1.216	1.193	1.059
	T6H-1.5	657	1	0.939	0.900
	T6H-3	703	1	1.046	0.933



注) □, ●, 数字はTで始まる試験体(鋼管あり), ○, ●はその他の試験体(鋼管なし)であり, () 値は全試験体である。

図-6 コンファインドコンクリートの圧縮強度に関する計算値/実験値のばらつき状況

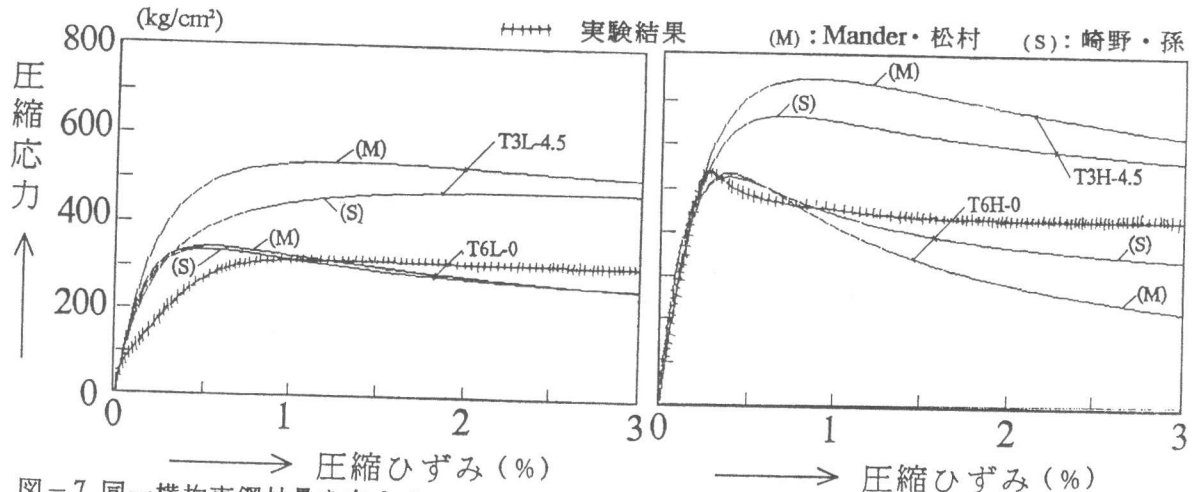


図-7 同一横拘束鋼材量を有するコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に関する比較

ひずみ曲線を計算する。図-7でも Mander・松村式と崎野・孫式の間には、圧縮強度に差異が生じていることがわかる。しかし、いづれにしても計算結果から予測できることは同じ横拘束鋼材量であれば、鋼管と帯筋を併用した方が鋼管のみより、強度もねばりも改善されていることがわかる。これらのことはいづれ実験で検証する予定である。

5. 結論

正方形鋼管と帯筋で二重に横拘束したコンファインドコンクリートの圧縮強度は、横拘束鋼材の単純累加で既存の各提案式によりほぼ計算できることがわかった。各提案式の中では崎野・孫式が Mander・松村式より、全般的にやや精度よく実験結果を表現できるようである。

謝辞：本研究を琉球大学工学部建設工学科の1991年度の卒業研究として、真剣に取り組んでくれた琉球大学4年生・野元秀一、田中瑞史の両君、及び実験に協力いただいた同・玉城康哉君に感謝の意を表します。また、本実験は九州大学の500 ton 構造実験室でとり行ったものであり、試験体製作から実験に至るまで多大なご協力をいただいた九州大学文部技官・藤原文夫、川口晃、青木治、久島昭久、津賀山健次の皆様に心から厚くお礼を申し上げます。さらに、試験体に用いた正方形鋼管は日本鋼管株式会社より提供していただいたものであり、ここに記して深い感謝の意を表する次第です。

参考文献：

- 1) Y.Yamakawa, K.Sakino, and Y.Yamada: "A Study on Elastoplastic of R/C Short Columns Doubly Confined in Steel Tube and Hoops", Proc. of the 3rd International Conference on Steel-Concrete Composite Structures, pp.665-670, Fukuoka, Japan, Sept.1991
- 2) 山川哲雄, 山田義智: "正方形鋼管と帯筋で二重に横補強した鉄筋コンクリート短柱の弾塑性性状に関する実験と理論解析", 琉球大学工学部紀要, 第42号, pp.45-59, 1991.9
- 3) 山川哲雄, 山田義智, 崎野健治: "鋼管と帯筋で二重に横補強したR/C短柱の弾塑性性状に関する研究", コンクリート工学年次論文報告集, 第13巻第2号, pp.957-962, 1991.6
- 4) 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, Aug.1988
- 5) 松村弘造, 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
- 6) 崎野健治, 孫玉平: "正方形鋼管で横補強されたコンクリートの中心圧縮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, 第13巻第2号, pp.945-950, 1991.6