

論文 円形鋼管横拘束高強度コンクリートの応力-ひずみ関係

孫 玉平^{*1}・池之野陽一^{*2}・崎野健治^{*3}

要旨：4種類の径厚比を有する円形鋼管により横拘束された、圧縮強度 60MPa と 100MPa の高強度コンクリート円柱の中心圧縮実験を行い、円形鋼管の径厚比が高強度コンクリートの圧縮性状に及ぼす影響を実験的に調べた。また、中心圧縮試験の実験結果に基づき、圧縮強度 100MPa までの高強度コンクリートへ適用できる、円形鋼管により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係を提案した。

キーワード：円形鋼管横拘束、高強度コンクリート、拘束効果、応力-ひずみ関係

1. はじめに

高強度コンクリートは、耐荷能力と耐久性に優れている反面、脆い破壊性質を示す。したがって、高強度コンクリートを高層鉄筋コンクリート構造に有効に活用するためには、その脆い破壊性質を改善する方法を確立する必要がある。高強度コンクリートの脆い材質を改善するための有効な方法の一つとして、鋼管横拘束法がある。通常の帯筋横拘束法と比べて、鋼管横拘束法は大量の横拘束材を施工上無理なく配置できるほか、鋼管が鉄筋コンクリート部材の型枠を兼ねることができるといような利点があるので、高強度コンクリートを用いた部材の靱性改善に適した拘束法であると言える。

鋼管横拘束法を高強度コンクリート部材へ本格的に展開するには、拘束された部材の構造性能を正確に評価する必要がある。そのためには、鋼管により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ性状を的確に捉えることが重要である。著者らはこれまでに正方形鋼管により横拘束された（圧縮強度 68MPa までの）高強度コンクリートの圧縮性状を実験的に調べたうえ、正方形鋼管横拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を提案してきた¹⁾。一方、円形鋼管横拘束コンクリートの圧縮性状については肖らの研究と佐藤の研究があるが、それら

の研究^{2),3)}は圧縮強度 45MPa までのコンクリートに限定されており、60MPa 以上の高強度コンクリートに対する円形鋼管の拘束効果については検討されておらず、円形鉄筋コンクリート部材の終局性能を評価するうえで必要不可欠な、円形鋼管により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係の提案に至っていない。

このような背景の下で、本論は以下の2点を研究の目的とする。1)円形鋼管により拘束された（設計強度 60MPa 以上の）高強度コンクリート柱の中心圧縮実験を行い、円形鋼管の径厚比が高強度コンクリートの圧縮性状に及ぼす影響を実験的に調べる。2)実験結果に基づいて、60MPa 以上の高強度コンクリートに適用できる、円形鋼管横拘束コンクリートの応力-ひずみ関係の提案を行う。

2. 実験概要

鋼管の径厚比 (D/t) とコンクリートの圧縮強度を実験変数に取り実験を計画した。試験体は内径 200mm の円形鋼管により横拘束された短柱（高さ 500mm）である。鋼管は、平鋼板を機械で円形に成形した後継ぎ目を溶接して製作したものであり、鋼材の力学的性状を Table.1 に示す。鋼管の径厚比は、50,67,93 と 176 の 4 種類である。鋼管に軸力を負担させないため、試験体中央において鋼管を二つに分けて上下鋼管の間に 10mm の隙間を設

*1 九州大学助教授 大学院人間環境学研究科 工学博士（正会員）

*2 ㈱三菱重工業（元九州大学大学院生）

*3 九州大学教授 大学院人間環境学研究科 工学博士（正会員）

Table.1 Mechanical properties of steels

公称板厚 (mm)	実測板厚 (mm)	降伏点 f_{yt} (MPa)	ヤング係数 E_s (10^5 MPa)	伸び率 ϕ (%)
1.2	1.15	297	2.24	38.0
2.3	2.2	308	2.21	38.0
3.2	3.1	304	2.22	39.5
4.5	4.3	375	2.25	33.7

Table2. Outlines of test columns

試験体名	鋼管			シリンダー強度 f'_c (MPa)
	内径 (mm)	D/t	f_{yt} (MPa)	
CCT12F60-1	200	169	297	61.6
CCT23F60-1,2		93	308	
CCT32F60-1,2		67	304	
CCT12F100-1,2		169	297	95.2
CCT23F100-1,2		93	308	
CCT32F100-1,2		67	304	
CCT45F100-1,2		50	375	

注: D = 鋼管の外径, t = 鋼管の板厚

f_{yt} = 鋼管の降伏点応力 (加工前周方向)

試験体名凡例

C C T12 F60 -1 T12: 鋼管の公称板厚

F60: コンクリートの設計強度

-1: 同じ試験条件の試験体番号

けた。また、鋼管と充填したコンクリートの間の付着応力をできるだけ小さくするため鋼管の内面にはグリース膜を塗布した。

設計圧縮強度が 60MPa と 100MPa の 2 種類のレディミックスコンクリートを用いて、コンクリート強度別にそれぞれ 5 体と 8 体の試験体を製作した。実験時材令でのコンクリートシリンダー強度は試験体一覧とともに Table.2 に示す。

加力は Fig.1 に示すように、試験体両端の回転を拘束する材端条件で、試験体の上下端に鋼管の内法断面よりやや小さい円形断面の荷重ブロックを通じて中心圧縮力を 5MN 試験機で荷重した。また、試験体の軸方向縮みは、Fig.1 に示すような位置に設けた計 8 つの変位計を用いて測定した。なお、試験体中央部分 (検長 300mm) の軸方向縮みを測るための 4 つの変形計は鋼管表面に開けた

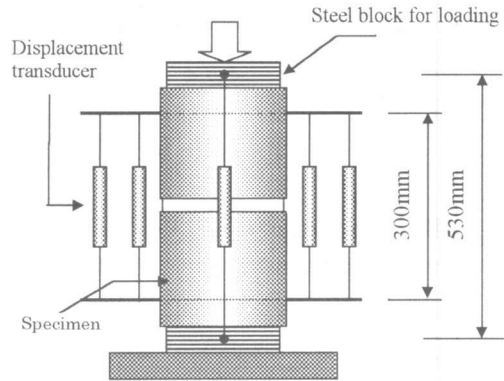


Fig.1 Test set-up and measurement

穴に通したボルトに取付けていた。

3. 実験結果

拘束コンクリートの最大応力 f_{cc} に関する実験結果を計算結果と合わせて Table.3 に示す。 f_{cc} の計算結果の算定方法については次節で述べる。また、Fig.2 と Fig.3 には各試験体の軸方向応力とひずみ関係の実験結果をコンクリート強度別に示す。応力は軸力をコンクリート断面積で割って求めた。

軸方向ひずみとしては、柱が最大耐力に達する前まで埋め込みボルトに取付けた 4 個の変位計で測定した値を用いたが、その後は、最大耐力時のひずみ測定値を ϵ_m とし、荷重ブロックに取付けた変位計で測定した、 ϵ_m からのひずみの増分 ($\delta\epsilon$) を足した値 ($\epsilon_m + \delta\epsilon$) を用いた。また、応力-ひずみ関係の実験結果が途中でできている点は鋼管の継ぎ目溶接部が切れて耐力が急激に低下し始め、ひずみ測定が不可能になった時点を表す。

試験体 CCT32F100 を除けば、同じ実験条件を有する試験体はほぼ同じ実験結果を示していることが Fig.2 と Fig.3 より分かる。試験体 CCT32F100-1 では、軸ひずみ 0.8% 前後の時点で上部鋼管の継ぎ目溶接部が柱中央付近約 10mm の範囲内で切れて耐力の低下を招いたが、亀裂の範囲が荷重終了まで進展しなかった。それに対して、試験体 CCT32F100-2 では、軸ひずみが 1.8% 前後になった時点で上部鋼管の溶接部の切れが約 200mm の範囲にわたって生じ、耐力が急激に低下した。

円形鋼管により拘束されたコンクリートの強度

Table.3 Experimental and theoretical strength of the confined concrete

Specimen	Steel tube			concrete		test	Richart		肖		Mander	
	t(mm)	D/t	f_{yt}	f'_c	f_p	f'_{cc}	f_{cc}	ratio	f'_{cc}	ratio	f'_{cc}	ratio
CCT12F60-1	1.15	169	297	61.6	57.1	79	72	1.09	74	1.06	79	0.99
CCT23F60-1	2.20	93	308			100	85	1.17	85	1.17	95	1.06
CCT23F60-2	2.20	93	308			94	85	1.11	85	1.11	95	1.00
CCT32F60-1	3.10	67	304			106	96	1.10	95	1.12	106	1.00
CCT32F60-2	3.10	67	304			103	96	1.07	95	1.09	106	0.98
CCT12F100-1	1.15	169	297	95.2	89.2	97	103	0.94	108	0.90	111	0.87
CCT12F100-2	1.15	169	297			96	103	0.92	108	0.89	111	0.86
CCT23F100-1	2.20	93	308			125	117	1.07	119	1.05	129	0.97
CCT23F100-2	2.20	93	308			121	117	1.04	119	1.02	129	0.94
CCT32F100-1	3.10	67	304			117	127	0.92	128	0.92	142	0.83
CCT32F100-2	3.10	67	304			129	127	1.01	128	1.00	142	0.91
CCT45F100-1	4.20	50	375			154	153	1.00	150	1.02	168	0.92
CCT45F100-2	4.20	50	375			154	153	1.00	150	1.02	168	0.92
						平均	1.04	平均	1.03	平均	0.94	
						偏差	0.08	偏差	0.09	偏差	0.07	

注：ratioは実験値と計算値の比を表す。応力単位：MPa

f_p = 式(7)により求めた無拘束コンクリートの強度

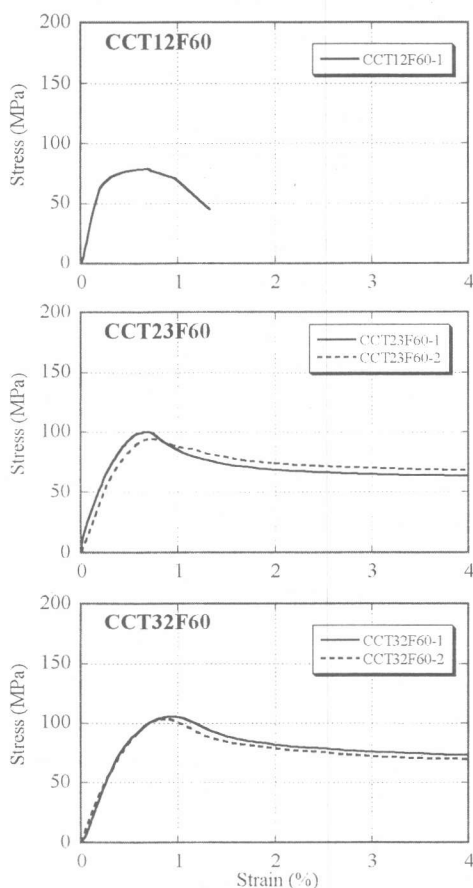


Fig.2 Stress-strain curves (FC=60 MPa)

は、鋼管の径厚比が小さくなるにつれて大きくなる。Table.2より分かる。径厚比 $D/t=169$ と非常に薄い円形鋼管で拘束された 100MPa 級の高強度コンクリートにも鋼管の拘束による強度上昇効果が見られた。

また、Fig.2と Fig.3より分かるように、拘束コンクリートの最大耐力後の変形能力は鋼管の板厚が厚くなるに従い上昇して行く。径厚比 $D/t=93$ と $D/t=67$ の円形鋼管を用いれば、設計強度 60MPa と 100MPa 級の高強度コンクリートに十分な変形能力をもたらすことができる。

4. 拘束コンクリートの応力-ひずみ関係

4.1 応力-ひずみ関係の詳細

崎野・孫は、正方形鋼管により横拘束された高強度コンクリート短柱の圧縮実験結果に基づいて、正方形鋼管横拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を文献1にて提案した。本論では、崎野・孫により提案された応力-ひずみ関係モデルを円形鋼管により拘束された、圧縮強度 100MPa までの高強度コンクリートの圧縮性状の予測に用いることにする。

文献1によれば、横拘束材の形態（円形又は正方形）に関わらず、拘束コンクリートの応力-ひ

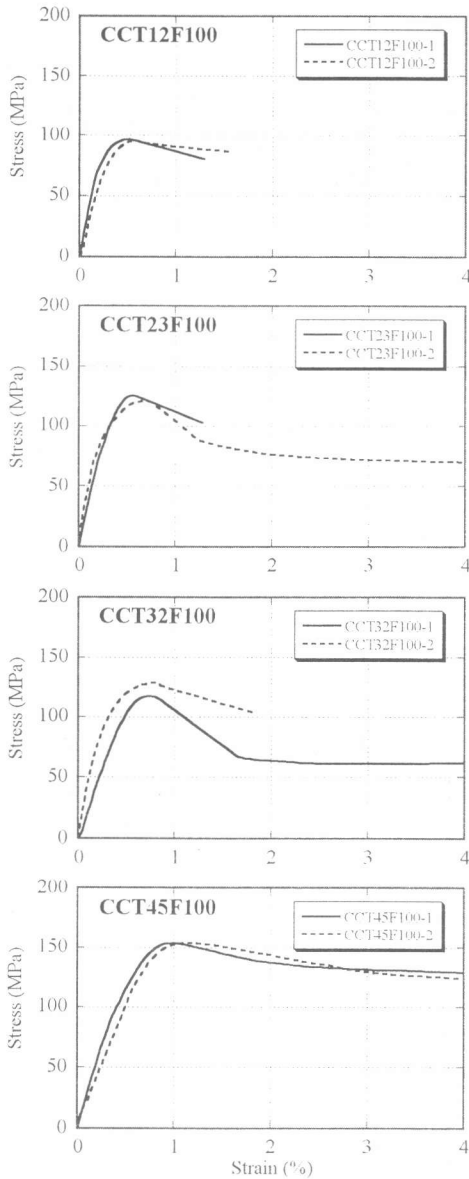


Fig.3 Stress-strain curves (FC=100 MPa)

ずみ関係は式に(1)により与えられる。

$$f_c = Kf_p \frac{aX + (b-1)X^2}{1 + (a-2)X + bX^2} \quad (1)$$

式(1)中においては、拘束コンクリートの強度時ひずみ ε_o 、応力-ひずみ関係の応力上昇部分と応力下降部分の形状をそれぞれ制御するパラメーターである a および b の値は次のように算定することができる。

$$\frac{\varepsilon_{co}}{\varepsilon_o} = \begin{cases} 1 + 4.7(K-1), & K \leq 1.5 \\ 3.35 + 20(K-1.5), & K > 1.5 \end{cases} \quad (2)$$

$$a = \frac{E_c}{E_{sec}} = \frac{E_c \varepsilon_{co}}{Kf_p} \quad (3)$$

$$b = 1.5 - 0.017f_p + 2.4\sqrt{\frac{(K-1)f_p}{23}} \quad (4)$$

ここで、 ε_o と E_c はそれぞれ無拘束コンクリートの強度時ひずみと初期剛性であり、それぞれ式(5)と式(6)により決められる。

$$\varepsilon_o = 0.94(f_p)^{1/4} 10^{-3} \quad (5)$$

$$E_c = (0.69 + 0.332\sqrt{f_p}) \times 10^4 \quad (\text{in MPa}) \quad (6)$$

すなわち、式(1)～式(6)からも分かるように、崎野・孫の応力-ひずみ関係モデルを円形鋼管により拘束されたコンクリートに適用する場合、円形断面柱における無拘束コンクリートの強度 f_p (正方形断面柱の場合はシリンダー強度とする) および鋼管の拘束によるコンクリートの強度上昇率 K (拘束コンクリート強度と無拘束コンクリート強度との比) の値を適切に決めれば良い。

4.2 円形断面柱における無拘束コンクリートの強度

円形断面柱における無拘束コンクリートの圧縮強度は一般に断面寸法の増大に伴い低くなる傾向にあることが知られている。このような無拘束コンクリートの強度に影響を及ぼす所謂「寸法効果」については、Blanksら⁴⁾の実験研究を始め、Neville⁵⁾による解析的検討および中村ら⁶⁾による実験研究などがなされている。それらの研究によれば、円形断面柱における無拘束コンクリートの強度 f_p はおおよそ式(7)によって評価できる。

$$\frac{f_p}{f_c'} = 1.61(d)^{-0.1} \quad (7)$$

ここで、 f_c' はシリンダー ($\phi=100\text{mm}$) 強度で、 d はコンクリート断面の直径 (mm) である。式(7)により得られた、本論で述べた試験体 ($\phi=200\text{mm}$) の f_p を Table.3 に示しており、その値がシリンダー強度の約 95% となっていることが分かる。

4.3 拘束コンクリートの強度上昇率 K

円形帯筋または円形鋼管により拘束されたコン

クリートの強度上昇率に関しては、Richart の算定式⁷⁾の他、肖らの提案式²⁾や Mander らの提案式⁸⁾がある。これらの算定式はそれぞれ式(8)、式(9)と式(10)で表される。

$$K = \frac{f_{cc}'}{f_p} = 1 + 4.1 \frac{f_r}{f_p} \quad (8)$$

$$K = \frac{f_{cc}'}{f_c} = 1 + 3.5 \frac{f_r}{f_c} \quad (9)$$

$$K = \frac{f_{cc}'}{f_p} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_r}{f_p} - 1.254 - 2 \frac{f_r}{f_p}} \quad (10)$$

ここで、

$$f_r = \frac{2t}{D - 2t} f_{yt} \quad (11)$$

上式においては、 t と D はそれぞれ鋼管の肉厚と外径であり、 f_{yt} は鋼管の降伏点応力である。

本論第2節で述べた各試験体における拘束コンクリートの強度 f_{cc}' について、上記の諸提案式を用いて求めた計算結果と実験結果との比較を Fig.4 と Table.3 に示す。ただし、式(9)を用いて f_{cc}' を算定する際に、肖らの提案($f_p=f_c$)に従い f_p としてシリンダー強度 f_c を用いた。

Fig.4 と Table.3 に示す比較から分かるように、式(10) (Mander 式) による計算値は 60MPa 級のコンクリートの実験結果を精度良く評価しているが、100MPa 級のコンクリートの実験結果を過大評価する傾向にある。一方、式(8) (Richart 式) と式(9) (肖式) による計算結果は 60MPa 級のコンクリートの実験結果をやや低めに評価する傾向が見られるものの、100MPa 級のコンクリートの実験結果を精度良く評価している。Table.3 に示されている実験値と計算値の比に関する統計結果と、無拘束コンクリートの圧縮強度に対する「寸法効果」の考慮の有無など面から見ると、Richart 式は円形鋼管横拘束コンクリートの強度予測により適していると言っても良い。

上記の考察結果を踏まえて、本論では、式(1)に示す応力—ひずみ関係式を(8)と組み合わせることによって、円形鋼管横拘束コンクリートの応力—ひずみ関係を解析的に求めることにする。

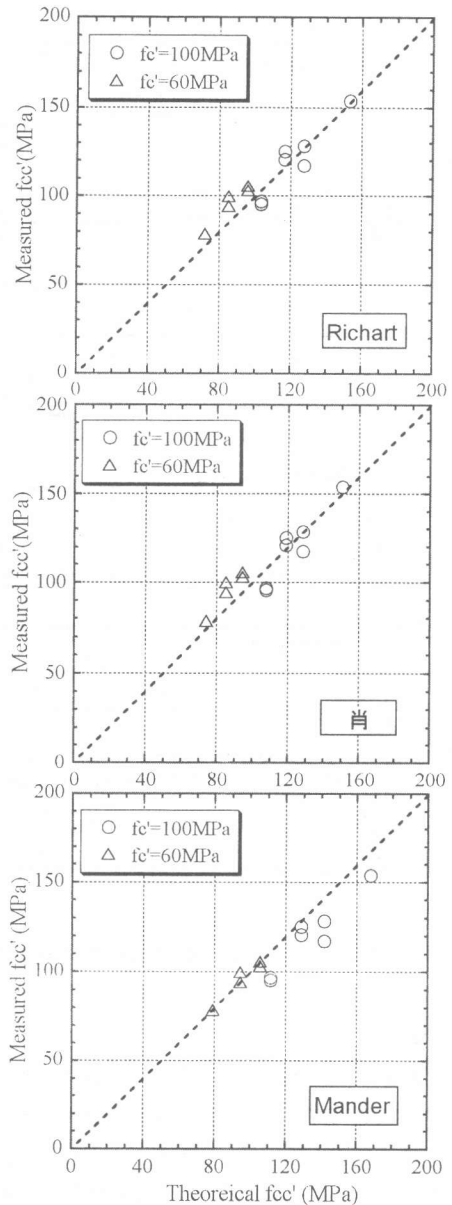


Fig.4 Comparison of confined concrete strength

4.4 提案した応力—ひずみ関係式の妥当性

式(1)～式(8)により得られた拘束コンクリートの応力—ひずみ関係の計算結果と実験結果との比較を Fig.5 に示す。Fig.5 より分かるように、本論で提案した応力—ひずみ関係モデルを用いれば、円形鋼管により拘束された高強度コンクリートの圧縮性状を鋼管溶接継ぎ目が切れるまで比較的精度よく評価することができる。

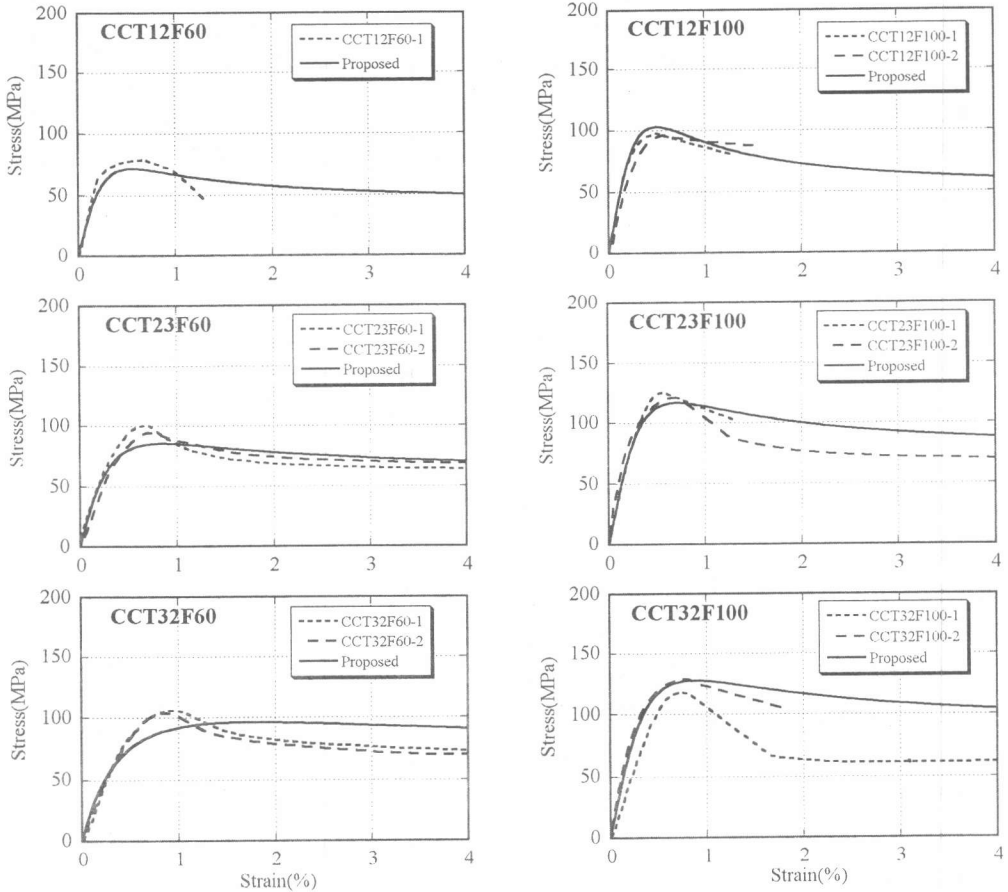


Fig. 5 Comparison of the theoretical and the measured stress-strain curves of the confined concrete

5. 結論

- 1) 径厚比 $D/t=169$ と非常に薄い円形鋼管を用いても圧縮強度 100MPa 級の高強度コンクリートに強度の上昇効果をもたらせる。
- 2) 拘束コンクリートの最大耐力後の変形能力は鋼管の板厚が厚くなるに従い上昇して行く。設計強度 60MPa と 100MPa 級の高強度コンクリートに十分な変形能力をもたらすには、それぞれ径厚比 $D/t=93$ と $D/t=67$ の円形鋼管を用いればよい。
- 3) 円形鋼管横拘束高強度コンクリートの圧縮強度は Richart らの算定式により精度良く評価できる。また、式(1)を Richart らの強度式と組合せば、100MPa までの拘束高強度コンクリートの応力-ひずみ性状を比較的精度

よく評価できる。

【謝辞】本論実験の実施に際し、九州大学技官川口氏を始めとする多くの方の協力に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 崎野健治, 孫玉平: 日本建築学会構造系論文集, No. 461, pp. 95-104, 1994.7
- 2) 肖岩, 富井政英, 崎野健治: コンクリート工学論文集, Vol.2, No. 1, pp. 1-14, 1991.1
- 3) Sato, T.: Transactions of the JCI, Vol. 10, pp. 337-344, 1988
- 4) R. F. Blanks, Journal of the American Concrete Institute, pp. 280-303, Jan. - Feb., 1935
- 5) A. M., Neville, Journal of the American Concrete Institute, pp.1095-1109, October, 1966
- 6) 中村敏治, 他: 日本建築学会大会学術講演懇談集, 構造 C, pp. 883-884, 1997年9月
- 7) Richart, F.E., et al., Bulletin No.190, University of Illinois, Urbana, April 1929
- 8) Mander, J.B., et al., ASCE, Vol.114, No.ST8, 1988.