

投稿論文(和文)

PAPERS

鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係

星隈順一¹・川島一彦²・長屋和宏³

¹正会員 工修 建設省土木研究所 耐震研究室研究員 (〒305 つくば市旭1番地)

²フェロー会員 工博 東京工業大学 土木工学科教授 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 建設省土木研究所 耐震研究室 (〒305 つくば市旭1番地)

鉄筋コンクリート橋脚の変形性能を適切に評価するために、地震時保有水平耐力の照査に適用可能な、帯鉄筋による拘束を考慮したコンクリートの応力-ひずみ曲線モデルの検討を行った。拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験の結果、応力-ひずみ曲線に支配的な特性値に対して、設計として取り扱いやすい簡易な評価式を提案することができた。さらに、指数曲線と直線を組み合わせた応力-ひずみ曲線モデルにより、実験結果をよく推定できることを確認した。

Key Words : seismic design, reinforced concrete bridge piers, stress-strain relation, hoop reinforcement, confinement effect

1. まえがき

道路橋示方書V耐震設計編では、鉄筋コンクリート橋脚のねばりのない破壊を防止するために、震度法による耐震設計に加えて、地震時保有水平耐力の照査を行うのが望ましいと規定されている。ここでは、橋が弾性的に振動するとすれば上部構造の慣性力の作用位置に生じる弾性応答震度にエネルギー一定則を適用し、じん性を見込んだ地震力と鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力を比較することにより、じん性の照査を行っている。

地震時保有水平耐力レベルの地震力を受けた場合には、鉄筋コンクリート橋脚は弾性域を超えて非線形挙動を示すが、帯鉄筋で軸方向鉄筋に囲まれたコアコンクリートを十分に拘束すれば、変形性能が向上し、エネルギー吸収容量が増大する。

道路橋示方書V耐震設計編では、コンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係を仮定して断面の曲げモーメント-曲率関係を求め、これに基づいて橋脚の耐力やじん性率を算出することが規定されている。しかしながら、規定に適用されているコンクリートの応力-ひずみ関係では、帯鉄筋量に関わらず終局ひずみを一律に0.0035としているため、計算されるじん性率には、帯鉄筋による拘束効果が反映されて

いない。このため、鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査では、帯鉄筋によるコンクリートの拘束効果を適切に評価することが重要である。

本研究は、こうした背景から、帯鉄筋で横拘束されたコンクリートの応力-ひずみ曲線モデルを、鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計に取り入れられるように開発することを目的とするものである。帯鉄筋で拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係式に関しては、これまでに多くのモデル式が提案されており、まず、これらと本研究との位置づけについて述べる。そして、拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験を行い、コンクリートの変形性能に及ぼす横拘束の影響について定量的に分析するとともに、拘束効果を取り入れたコンクリートの応力-ひずみ関係式の提案を行う。

2. 本研究の背景

(1) 横拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係式に関する既往の研究

地震時に橋脚天端に正負交番の水平力が繰り返して作用した場合には、主として橋脚基部の縁部において、コンクリート、軸方向鉄筋、帯鉄筋の複合体に圧縮、引張の繰返しを受ける状態が生じる。帯鉄

Table 1 Review of Stress-Strain Model for Confined Concrete

Researcher	Stress-Strain Model for Confined Concrete			Applicable Cross Sectional Shape
	Ascending Branch	Falling Branch	Residual Stress	
Kent and Park	$f_c = K f_{co} \left\{ \frac{2 \epsilon_c}{0.002K} - \left(\frac{\epsilon_c}{0.002K} \right)^2 \right\}$	$f_c = K f_{co} \{1 - Z_m(\epsilon_c - 0.002K)\}$	20% of $K f_{co}$	Square
Sheikh et al.	$f_c = K f_{co} \left\{ \frac{2 \epsilon_c}{\epsilon_{s1}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{s1}} \right)^2 \right\}$	$f_c = f_{cc} \{1 - Z(\epsilon_c - \epsilon_{cc})\}$	30% of f_{cc}	Square
Mander et al.	$f_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r}$ where $x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}$, $r = \frac{E_c}{E_c - E_{scc}}$			Circle Square Wall-type
Muguruma et al.	$f_c = E_1 \epsilon_c + \frac{f_{co} - E_1 \epsilon_m}{\epsilon_m^2} \epsilon_c^2$ and $f_c = \frac{f_{co} - f_{cc}}{(\epsilon_{co} - \epsilon_{cc})^2} (\epsilon_c - \epsilon_{cc})^2 + f_{cc}$	$f_c = \frac{f_{cu} - f_{cc}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{cc}} (\epsilon_c - \epsilon_{cc}) + f_{cc}$	—	Circle Square
Fujii et al.	$f_c = E_1 \epsilon_c + \frac{f_{co} - E_1 \epsilon_{co}}{\epsilon_{co}^2} \epsilon_c^2$ and $f_c = \frac{f_{co} - f_{cc}}{(\epsilon_{co} - \epsilon_{cc})^3} (\epsilon_c - \epsilon_{cc})^3 + f_{cc}$	$f_c = f_{cc} - E_{ds} (\epsilon_c - \epsilon_{cc})$	20% of f_{cc}	Circle Square

筋の拘束効果は、こうした複合体に圧縮力が作用する場合に効くが、こうした効果を定量化するために、現在までにニュージーランド・カンタベリー大学のParkらの研究をはじめとして国内外で多数の研究が行われている。こうした研究では、コンクリート、軸方向鉄筋、帯鉄筋から成る供試体を作り、これに静的に一方に圧縮力を加えて、帯鉄筋の拘束効果を調べている。もちろん、こうした実験では、圧縮と引張を交互に受ける効果や、実際の橋脚では一般的な圧縮、引張応力状態になる訳ではない等の違いがあるが、実験の制約のために、こうした手法が用いられている。本研究においても、こうした従来の手法に従うこととする。

Table1は、各研究者によって提案された拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線モデルをまとめて示したものである。以下に、各提案式の特徴を示すことにする。

まず、Parkは1971年に、最大圧縮応力点を頂点とする二次曲線と直線の組み合わせによる応力-ひずみ曲線モデルを提案した。このモデルでは、帯鉄筋による拘束効果は、ひずみ軟化域での応力の下降勾配特性のみに考慮され、拘束効果のモデル化は、Soliman, Roy, Berteroらが行った実験の結果に基づいて行われている¹⁾。さらに、その11年後には、拘束効果により最大圧縮応力と最大圧縮応力に達する時のひずみが向上するという実験事実をふまえ、この拘束効果は、帯鉄筋比と帯鉄筋の降伏強度に比例し、プレーンコンクリートの強度に反比例すると仮

定した修正モデルを提案した²⁾。

Sheikhは、最大応力を保持したまま変形が進行する領域を有する応力-ひずみ曲線モデルの提案を行った^{3), 4)}。最大圧縮応力に対する拘束効果の評価については、帯鉄筋の配筋条件により定義される有効拘束係数を用いた実験式が提案されている。ただし、応力の下降勾配については、Parkの提案した評価式を基本とした手法が適用されている。

Manderは、分数関数の適用により、応力の上昇域と下降域を一つの式で評価できるモデルを提案した⁵⁾。最大圧縮応力に対する拘束効果の評価では、Sheikhと同様な手法に基づき、円形、正方形、壁式の各断面形状に対して有効拘束係数を定義するとともに、多軸圧縮理論を適用することにより、他の研究に見られるような実験結果の統計的分析に依存しない理論的な検討に基づいた評価式を提案している。そして、別途実施した圧縮載荷実験⁶⁾により、本モデルの適用性を実証している。

国内では、六車は、応力上昇域を2つの二次曲線でモデル化するとともに、拘束効果の評価では、帯鉄筋間に生じる非拘束域を考慮に入れた横拘束係数を定義した⁷⁾。そして、圧縮載荷実験⁸⁾の結果をもとに、最大応力点や終局応力点に対して、横拘束係数を用いた評価式が提案されている。

藤井は、応力上昇域を二次曲線と三次曲線を組み合わせたモデルを提案している⁹⁾。最大圧縮応力点やひずみ軟化域での応力の下降勾配の各特性値については、Parkや六車の拘束効果の評価方法を参考と

Table 2 Test Specimens in Previous Research

Researcher	Cross Sectional Shape	Size of the Section in Specimen (cm)	Volumetric Ratio of Hoop Reinforcement(%)
Kent and Park	Rectangle	10×15	0.35~1.87
	Square	12.8×12.8	2.07~2.39
		10×10	1.09~1.81
Sheikh et al.	Square	30×30	0.76~2.40
Mander et al.	Circle	φ 50	0.60~2.50 (Spiral)
	Square	45×45	1.86~1.97
	Wall-type	15×70	1.62~7.87
Muguruma et al.	Circle	φ 15	0.76~2.79 (Spiral)
	Square	19.4×19.4	0.40~3.13
Fujii et al.	Circle	φ 15	0.62~4.02
	Square	15×15	0.62~2.50

Table 3 Requirement of Hoop Reinforcement

Ratio of Longitudinal Reinforcement p_t (%)	$0 < p_t \leq 0.5$	$0.5 < p_t \leq 1.0$	$1.0 < p_t$
Ratio of Hoop Reinforcement ρ_s (%)	0.3	0.4	0.5

Table 4 Test Specimens

Specimen	Dimension of Section and Height (mm)	Strength of Unconfined Concrete (MPa)	Longitudinal Reinforcement Ratio (%)	Hoop Reinforcement			Anchorage Type	
				Material / Diameter(mm)	Spacing (cm)	Volumetric Ratio (%)		
S	C	φ 200 h=600	18.5	0	SR235 φ6	—	—	Weld
						15	0.39	
						10	0.58	
						5	1.17	
						2.5	2.33	
	1.25	4.66						
	S	200 × 200 h=600	23.2	0	SR235 φ6	—	—	Weld
						15	0.39	
						10	0.58	
						5	1.17	
2.5						2.33		
1.25	4.66							
L	C	φ 500 h=1500	28.8	1.01	—	—	Weld	
					30	0.19		
					15	0.39		
					10	0.58		
					5	1.16		
					SD295 D13	30		0.34
					SD295 D16	30		0.54
					SD295 D10	10		0.58
	90° Hook							
	135° Hook							
	180° Hook							
	S	500 × 500 h=1000	24.3	0.95	—	—	Weld	
					SD295 D13	6		1.73
					SD295 D16	7.5		2.19
SD295 D13					4	2.60		
SD295 D16					4	4.10		

した拘束係数を定義し、実験結果の回帰分析により拘束係数の一次関数として提案した。

(2) 本研究の位置づけ

前節に示したとおり、帯鉄筋による拘束を考慮し

たコンクリートの応力-ひずみ曲線モデルとしては、既に幾つかの提案が行われており、鉄筋コンクリート橋脚の非線形解析にも、これらの既往の提案モデルを適用する研究が多い。しかし、我国の鉄筋コンクリート橋脚は、建築物の柱部材やニュージーラン

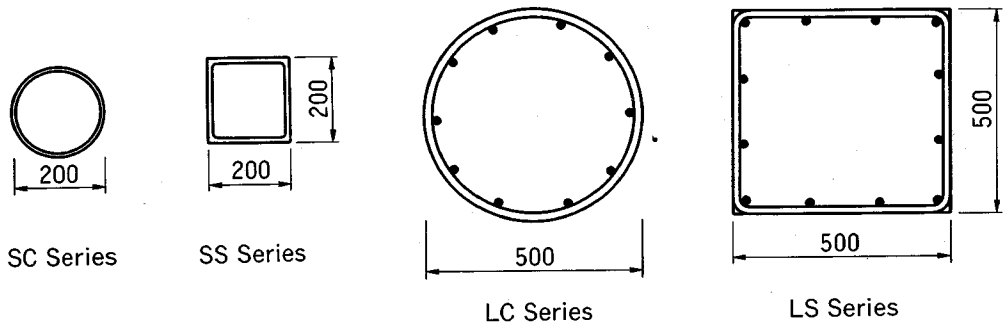


Fig. 1 Cross Sections of Specimens

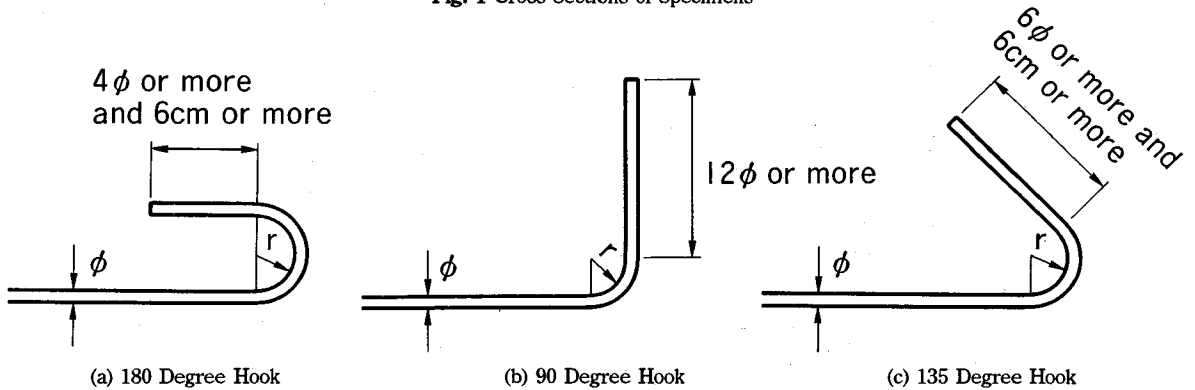


Fig. 2 Hook Configurations of Hoop Reinforcement

ド、米国の鉄筋コンクリート橋脚と比較するとコンクリート断面が大きく、帯鉄筋比が低い構造が多い点に注意しなければならない。ここで、Table2は、既往の研究の中で、拘束効果のモデル化に対する検討の目的で行われた拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験の実験供試体の概要を、Table3は、我国の道路橋示方書に示される帯鉄筋比の目安を示したものである。これより、我国の鉄筋コンクリート橋脚は、帯鉄筋比(体積比)が0.3~0.5%程度で設計されるのに対して、既往の研究では、いずれもこれ以上の帯鉄筋を配した供試体に集中した実験が行われていることがわかる。なお、Parkと六車の研究の中では、帯鉄筋比が0.5%以下と比較的小さい供試体もあるが、これらは、偏心圧縮を受けたり、帯鉄筋に高張力鋼が用いられた供試体である等、実験条件が特殊なものと言える。したがって、これらの提案モデルは、低帯鉄筋比に対する配慮が十分とは言えず、このまま低帯鉄筋比のコンクリートに適用した場合、拘束効果を誤って評価する危険性がある。

こうした背景から、本研究では、①帯鉄筋比、②帯鉄筋の配置条件、③帯鉄筋の定着条件、等の帯鉄筋に関する設計条件を考慮した拘束コンクリート柱橋脚の圧縮載荷実験を行い、鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いる応力-ひずみ

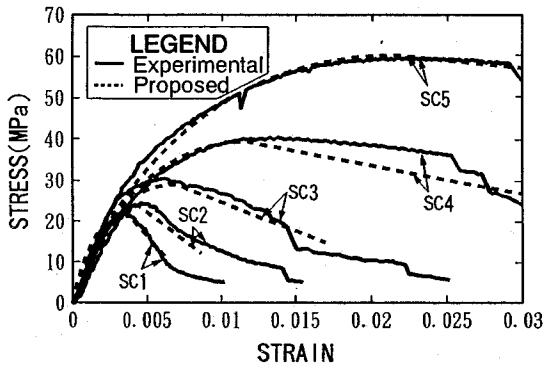
曲線モデルを提案する事に主眼をおくものである。

3. 拘束コンクリート柱載荷実験

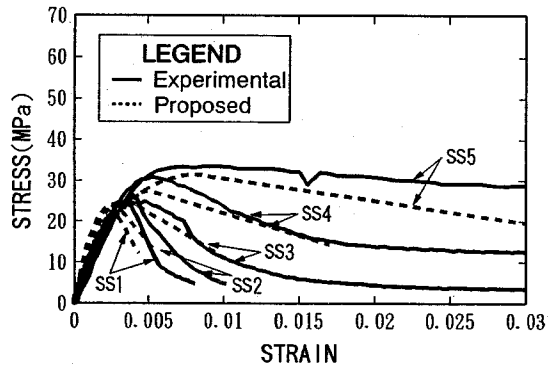
(1) 実験供試体及び実験の概要

実験に用いた供試体の諸元をTable4に、供試体断面をFig.1に示す。供試体は、小型供試体(SC, SSシリーズ)と大型供試体(LC, LSシリーズ)の2種類があり、帯鉄筋による拘束効果を、帯鉄筋比、帯鉄筋形状、帯鉄筋の設置間隔及び定着条件等の観点から定量的に評価できるように実験ケースを設定した。ここで、断面形状は、円形断面と正方形断面である。また、帯鉄筋の定着条件として、溶接の他、Fig.2に示す直角フック、鋭角フック、半円形フックの供試体(LC7~LC9)を用意した。帯鉄筋のフックの曲げ形状については、道路橋示方書IV下部構造編の規定に従った。Table2からわかるように、本研究に用いた大型供試体は、現在までに行われたこの種の実験としては世界最大の模型である。

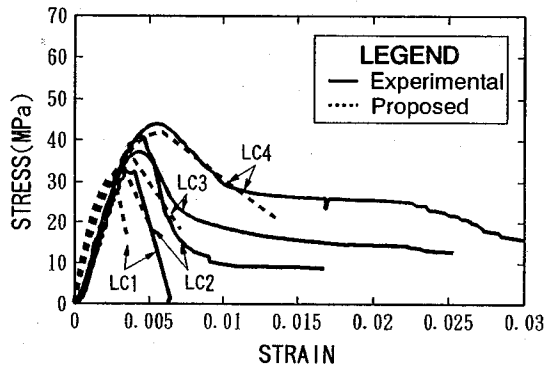
Photo1は実験の状況を示したものである。載荷は変位制御による単調一軸圧縮載荷とし、載荷速度は毎分1mmとした。また、軸方向ひずみは、供試体上下間の変位を変位計によって計測し、これを高さで割って求めた。なお、コンクリートに生じる荷



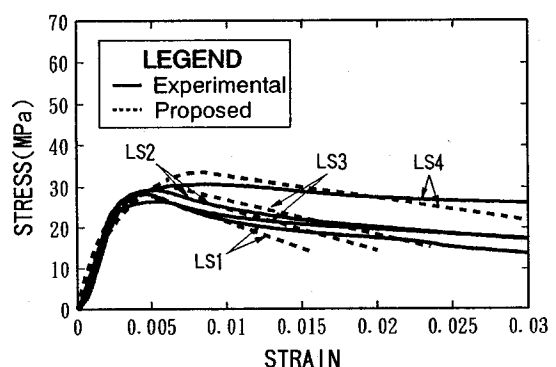
(a)SC Series



(b)SS Series



(c)LC Series



(d)LS Series

Fig. 3 Stress-Strain Curve

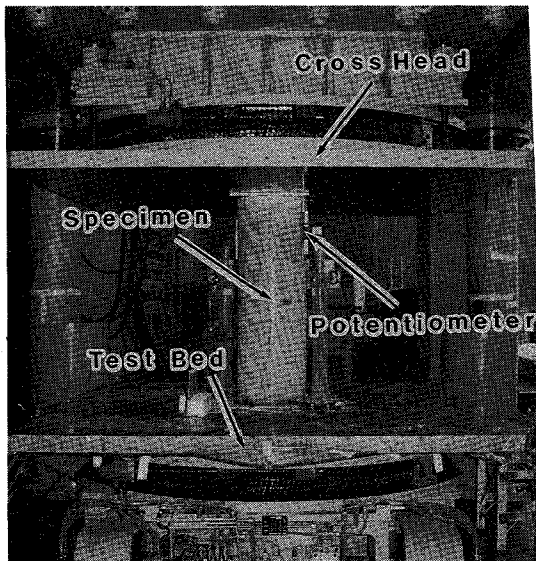


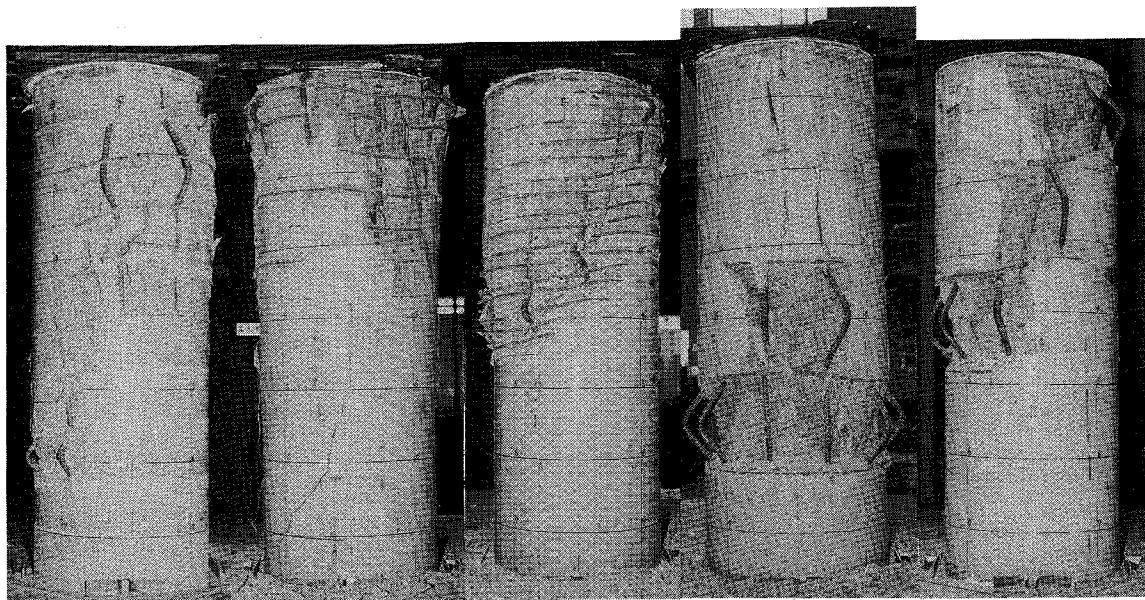
Photo 1 Experimental Set-up with 30MN Universal Testing Machine

重があるレベルを超え破壊が生じるようになると、その後の変形は供試体全長にわたって生じるのではなく、ある領域に局部的に生じるようになる。したがって、軸方向ひずみの計測においては、その計測

長をどのように設定するかが重要である。コンクリートが局部的に破壊する領域の長さをもとに軸方向ひずみを計測することも考えられるが、破壊領域を定めることは個人の判断が入るため簡単ではない。また、コンクリートが損傷し始めるまでは、コンクリートの圧縮変形は供試体全長にわたって生じるため、コンクリートが破壊し始めてから急に局所的な領域だけに注目すると、結果として求められる応力-ひずみ関係が連続しなくなるという問題もある。このような考察を基に、本実験では、供試体に生じた変位を全長で割って軸方向ひずみを算出することとした。

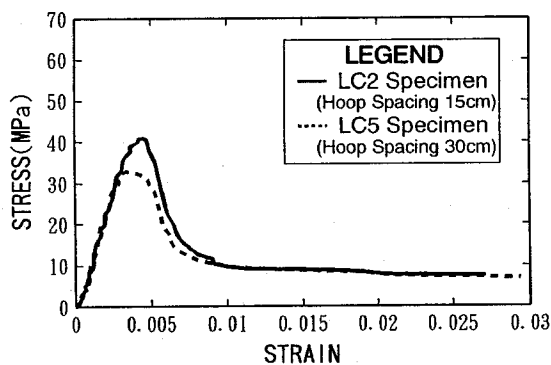
(2) 帯鉄筋比の影響

Fig.3は、帯鉄筋比をパラメータとして断面形状別に応力-ひずみ関係を示したものである。図中には、後述する提案式による解析結果も比較のために示している。これより、初期剛性はいずれの供試体もほぼ一定であるが、帯鉄筋比の増大とともに、最大圧縮応力、最大圧縮応力時のひずみは向上し、最大応力後の急激な応力低下が抑制されることがわかる。また、帯鉄筋でコンクリートを拘束することに

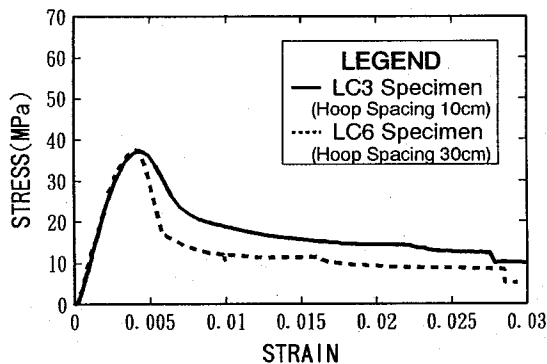


(a)LC2 Specimen (b)LC3 Specimen (c)LC4 Specimen (d)LC5 Specimen (e)LC6 Specimen

Photo 2 Failure Mode of Specimens



(a)Hoop Reinforcement Ratio Approximately 0.35%



(b)Hoop Reinforcement Ratio Approximately 0.55%

Fig. 4 Effect of Pitch of Hoop Reinforcement

より、道路橋示方書で定義される終局ひずみ0.35%の圧縮変形を受けても、コンクリート柱には大きな損傷が生じず、変形性能が改善されている。一方、同一帯鉄筋比であっても、円形拘束と正方形拘束では拘束効果が大きく異なっており、その評価に際しては、断面形状の影響に対して配慮が必要である。

応力-ひずみ曲線は、概ね応力上昇域、応力下降域、応力収束域の3区間に分割して解釈される。応力収束域が生じるのは、拘束コンクリートでは、軸方向鉄筋のはらみ出し等ある程度の損傷が生じて、コアコンクリートが健全である限り、圧縮耐力が完全には失われないためである。コンクリートの剥落、軸方向鉄筋の座屈、帯鉄筋の破断等の損傷は、主としてこの応力収束域で発生し進展した。Photo2に、供試体(LC2~LC6)の最終的な損傷状況を示す。こ

れより、帯鉄筋比の増大とともに、コアコンクリートの損傷が小さくなっていることがわかる。

(3) 帯鉄筋間隔の影響

Fig.4は、帯鉄筋比はほぼ等しいが、帯鉄筋の設置間隔を変化させた場合の影響を、応力-ひずみ関係として示したものである。これより、LC3供試体とLC6供試体の比較からわかるように、帯鉄筋比としては同等であっても、帯鉄筋の間隔が大きくなると、ひずみ軟化域で急激に応力が低下し、軸方向鉄筋の著しい座屈に伴う脆性的な破壊が発生する可能性があることがわかる。Photo2に示す損傷状況に着目すると、LC2~LC4供試体と比較して、LC5及びLC6供試体では、主鉄筋の著しい座屈と、それに伴うコアコンクリートの剥落が生じている。したが

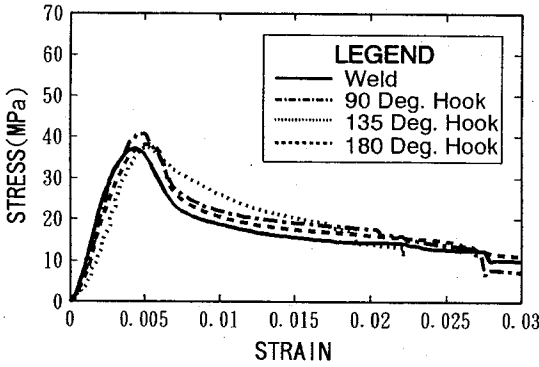


Fig. 5 Effect of Hoop Reinforcement Joint

って、耐震設計としては、同じ量の帯鉄筋を入れるのであれば、帯鉄筋の断面積を大きくするよりも、その設置間隔を密にする方が有利である。

(4) 帯鉄筋の定着条件の影響

Fig.5は、帯鉄筋の定着条件が拘束効果に及ぼす影響を、応力-ひずみ関係として示したものである。いずれも最大圧縮応力は概ね等しいが、ひずみ軟化域での下降勾配は、鋭角フックのLC8供試体のみ他と比較して若干緩やかになっている。この明確な理由についてはよくわからないが、鋭角フックよりもフックの角度を大きくした半円形フックのLC9供試体やそれを小さくした直角フックのLC7供試体では、溶接した場合のLC3供試体とほぼ同様な応力-ひずみ関係を示していることから、これを特に有意な変化とは解釈すべきでないと考えられる。また、いずれの供試体も、最終的には定着部とは別の箇所帯鉄筋が破断しており、道路橋示方書に規定されるフックの形状を適用すれば、溶接した場合と同程度の拘束効果が得られている。したがって、拘束効果に及ぼす帯鉄筋の定着条件は顕著ではないと言える。

4. 応力-ひずみ曲線のモデル化

既往の応力-ひずみ曲線モデルは、応力上昇域については、Table1に示すとおり二次曲線を基本としたものが多い。これは、二次曲線が曲線式の中でもシンプルであり、かつ曲線の概形がコンクリートの圧縮変形特性と似ているためである。そこで、拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線モデルとして、まず式(1)が提案される。

$$f_c = f_{cc} \left\{ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここで式(1)は、ParkやShiekhの提案式と同一の形式である。しかしながら、コンクリートの応力-ひずみ曲線モデルには次の4つの境界条件が要求され

るのに対し、式(1)に示すような二次曲線の場合、未定係数が3つであるため、境界条件が3点に限定されている点に注意しなければならない。

- ①初期条件($\varepsilon_c=0$ で $f_c=0$)
- ②初期勾配条件($\varepsilon_c=0$ で $df_c/d\varepsilon_c=E_c$)
- ③終点条件($\varepsilon_c=\varepsilon_{cc}$ で $f_c=f_{cc}$)
- ④極限条件($\varepsilon_c=\varepsilon_{cc}$ で $df_c/d\varepsilon_c=0$)

式(1)は、このうちの初期勾配条件以外の3つの境界条件を用いてモデル化されたものである。しかしながら、帯鉄筋で拘束した場合、先述の通り最大圧縮応力 f_{cc} やそれに達するときのひずみ ε_{cc} が向上するため、最大応力点を頂点とする二次曲線では、帯鉄筋比によって初期勾配の値($2f_{cc}/\varepsilon_{cc}$)が大きくなるときが生じてしまう。この点は、先に示した帯鉄筋比によらず初期勾配が一定という実験結果と矛盾する。

一方、六車や藤井は、初期勾配を境界条件として組み入れた二次曲線を提案しているが、当然のことながら一組の式で応力上昇域を完全にモデル化することができないため、二組の曲線を組み合わせたモデルとなっている。

そこで、こうした問題を解決する関数形として、式(2)に示す $C_1 \sim C_3$ 及び n を未定係数とする指数関数を基本形として検討を行った。

$$f_c = C_1 \varepsilon_c^n + C_2 \varepsilon_c + C_3 \quad (2)$$

これは、4つの境界条件に対して、式の項数を増やした多項式とするのではなく、指数関数とすることで式形の簡易化をねらったものである。その結果、次式に示す比較的簡易な関数を導くことができた。

・応力上昇域($0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc}$)

$$f_c = E_c \varepsilon_{cc} \left[1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right] \quad (3)$$

$$\text{ただし } n = \frac{E_c \varepsilon_{cc}}{E_c \varepsilon_{cc} - f_{cc}}$$

ここに、

f_{cc} : 最大圧縮応力(MPa)

ε_{cc} : 最大圧縮応力時のひずみ

ε_{cu} : 終局ひずみ

E_c : 初期弾性係数(MPa)

E_{des} : 下降勾配(MPa)

また、応力下降域については、実験結果をもとに、次式に示す一次直線でのモデル化で十分であると判断した。

・応力下降域($\varepsilon_{cc} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}$)

$$f_c = f_{cc} - E_{des}(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \quad (4)$$

$$\text{ただし } \varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} + \frac{f_{cc}}{2E_{des}}$$

なお、応力収束域については、Park, Sheikh, 藤井

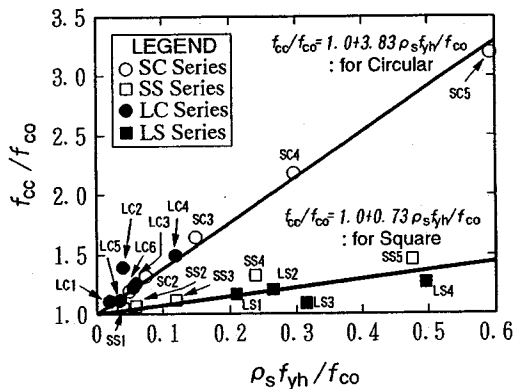


Fig. 6 Relation between Confinement Effectiveness and Maximum Compressive Strength

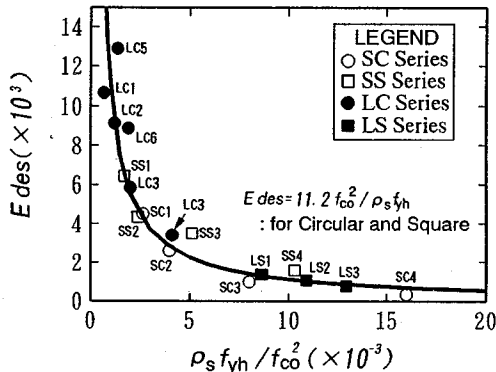


Fig. 8 Relation between Confinement Effectiveness and Strength Descending Gradient

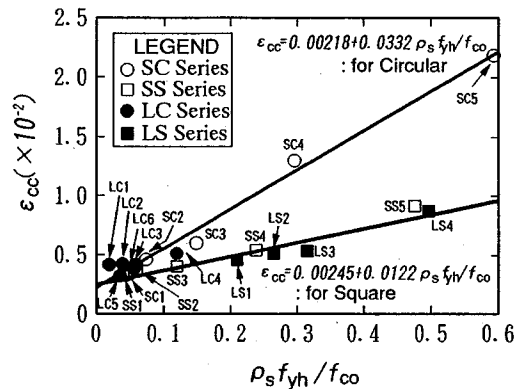


Fig. 7 Relation between Confinement Effectiveness and Strain at Maximum Stress

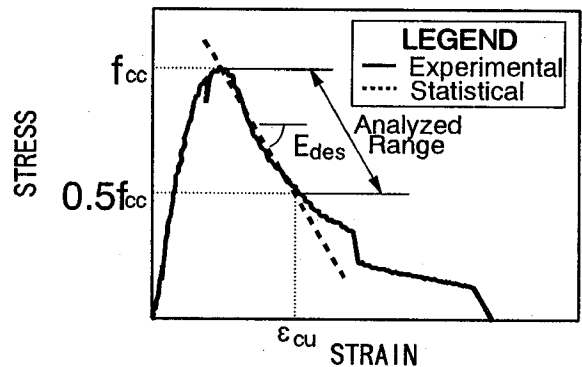


Fig. 9 Definition of Stress Descending Gradient

の各提案式では、最大圧縮応力の20~30%となりひずみの増加に対して応力があまり大きく低下しなくなるような領域までも考慮しているが、本提案では、ここまでをモデル化の対象としなかった。これは、この程度の変形を受けると、いずれの供試体も帯鉄筋の破断や軸方向鉄筋の座屈等の大きな損傷が生じており、もはや橋脚の耐震設計で考慮すべき領域ではないと考えたためである。したがって、終局ひずみは応力が最大圧縮応力の50%に低減した時と定義することとした。

5. 拘束効果の定量化

本提案式(3), (4)の中で、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係に支配的な影響を与える特性値は、最大圧縮応力 f_{cc} 、最大圧縮応力時のひずみ ϵ_{cc} 、ひずみ軟化域での下降勾配 E_{des} である。そこで、これらの各特性値に影響を及ぼす因子について、実験結果をもとに分析する。

拘束効果の要因としては、帯鉄筋比の他、帯鉄筋の巻径、拘束形状、降伏強度、配置間隔、また素材としてのプレーンコンクリートの強度等が考えられ

る。しかし、これらの要因全てをモデルに反映させることは、モデル式があまりにも煩雑になる。そこで、設計用としてのシンプルモデル化を図るため、拘束効果の要因として、帯鉄筋比(体積比) ρ_s 、帯鉄筋の降伏強度 f_{yh} 、プレーンコンクリート強度 f_{co} 、及び拘束形状の4項目に絞り込んだ。これは、他の要因については、別途構造細目により規定し得る事項であり、耐震設計の中で拘束効果として特に考慮すべき影響ではないと判断したためである。この結果、拘束効果と拘束コンクリートの各特性値の関係は、以下のように整理することができた。

まず、Fig.6は、拘束効果と最大圧縮応力について示したものである。これは、最大圧縮応力が帯鉄筋比と帯鉄筋の降伏強度に比例し、プレーンコンクリート強度に反比例するという一般的な仮定のもとに、縦軸を圧縮強度比(f_{cc}/f_{co})、横軸を($\rho_s f_{yh}/f_{co}$)として実験結果を整理したものである。このようにすると、両者は概ね線形関係にあること、またその線形の傾きは断面形状によって大きく異なることが確認された。そこで、断面形状別に回帰分析を行った結果、次の関係式が得られた。

$$\text{円形拘束} : \frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1.0 + 3.83 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}} \quad (5)$$

$$\text{正方形拘束} : \frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1.0 + 0.73 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}} \quad (6)$$

式(5),(6)を比較すると、角柱供試体に対する回帰直線の傾きは、円柱供試体のその約20%となっている。これは、拘束断面形状が拘束効果に及ぼす影響が大きいことを意味しており、最大圧縮応力に関しては、正方形拘束の場合、円形拘束で得られる拘束効果の20%程度となることがわかる。

Fig.7は、拘束効果と最大圧縮応力時のひずみの関係について検討した結果を示したものである。これより、拘束効果の小さい供試体において、最大圧縮応力時のひずみがやや大きいものもあるが、 ϵ_{cc} は最大圧縮応力の時と同様に $(\rho_s f_{yh}/f_{co})$ と線形関係にあることがわかる。そして、回帰分析を行った結果、断面形状別に次の関係式が得られた。

$$\text{円形拘束} : \epsilon_{cc} = 0.00218 + 0.0332 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}} \quad (7)$$

$$\text{正方形拘束} : \epsilon_{cc} = 0.00245 + 0.0122 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}} \quad (8)$$

先と同様に考察すると、最大圧縮応力時のひずみに対する角柱供試体の拘束効果は、円柱供試体の拘束効果の40%程度となる。

Fig.8は、拘束効果と下降勾配の関係について検討した結果を示したものである。ここで縦軸に示す下降勾配 E_{des} とは、Fig.9に示すように、応力下降域、すなわち先に定義したように応力が最大値からその50%に低減する終局点までの区間を最小自乗法によって直線近似し、その勾配として定義した値である。これより、 E_{des} は $(\rho_s f_{yh}/f_{co}^2)$ と概ね反比例の関係にあることがわかる。また、下降勾配 E_{des} に対しては、断面形状による影響は小さいことがわかる。そこで、拘束断面形状による区別をせずに回帰分析した結果、次の関係式が得られた。

$$E_{des} = \frac{11.2}{\rho_s f_{yh}/f_{co}^2} \quad (9)$$

以上の分析結果をもとに、拘束コンクリートの各特性値の評価式として次式を提案する。ここで、 α 、 β は特性値に対する断面補正係数である。

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.80\alpha \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}} \quad (10)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1.0(\text{円形拘束}) \\ 0.2(\text{正方形拘束}) \end{cases}$$

$$\epsilon_{cc} = 0.002 + 0.033\beta \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}} \quad (11)$$

$$\beta = \begin{cases} 1.0(\text{円形拘束}) \\ 0.4(\text{正方形拘束}) \end{cases}$$

$$E_{des} = 11.2 \frac{f_{co}^2}{\rho_s f_{yh}} \quad (12)$$

式(10)~(12)に示した拘束効果の評価式は、設計として取り扱いやすい帯鉄筋比、帯鉄筋の降伏強度、プレーンコンクリート強度の各定数をパラメータとした簡易な式であること、また断面形状の変化に対しても、式の形を大きく変更することなく、断面補正係数を新たに導入することでこれに対応している点がポイントである。

なお、Fig.6~Fig.8のように実験結果を整理した場合、SシリーズとLシリーズを比較してみると、いずれも回帰式とよく近似した結果を得ている。これより、本実験の範囲内においては、帯鉄筋比の小さい領域も含めて、上述の拘束効果の評価式により各特性値を推定することができるものと考えられる。

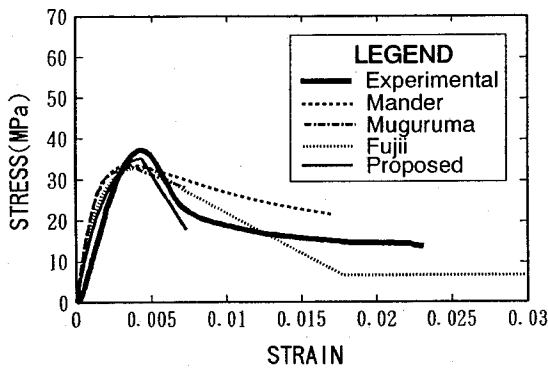
Table4に示す実験条件に対し、上述の提案式(3)、(4)、(10)~(12)を適用して定量化される応力-ひずみ関係をFig.3中に併記した。これより、本提案モデルにより、実験結果の傾向をよく推定できることがわかる。

6. 既往の提案式との比較

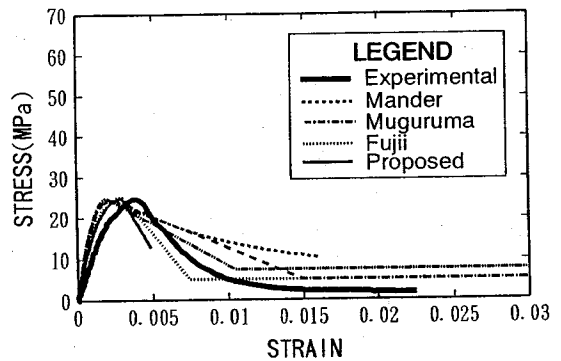
本提案モデルと、既往の提案モデルの違いを比較するために、帯鉄筋比が0.58%であるLC3供試体(円形拘束)とSS2供試体(正方形拘束)の条件を適用して、応力-ひずみ曲線の試算を行った。既往の提案式としては、Table1に示した5つのモデルを解析対象としたが、Parkの式及びSheikhの式については、円形拘束の断面には適用できないため除外している。

解析結果をFig.10に示す。これより、ひずみ軟化域での応力の下降勾配に着目すると、本提案モデルが最も大きくなっていることがわかる。これは、他の提案モデルが帯鉄筋比で1~2%程度の供試体を中心とした実験結果に基づいて定式化されたために、0.58%程度の低帯鉄筋比に対しては適用性がよくないことを意味している。このことは、耐震設計上重要な点であり、我国の鉄筋コンクリート橋脚のように帯鉄筋の比較的少ない構造に対して、既往の提案モデルを適用して非線形解析を行った場合には、設計としては危険側に評価されることになる。したがって、鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査では、低帯鉄筋比の影響をも考慮した本提案モデルの適用が望ましいと考えられる。

なお、前述したように、本提案モデルは現在までに行われたこの種の実験としては世界最大の模型を含む一連の実験結果に基づくものである。それでも、実橋脚はこうした模型よりもさらに寸法が大きく、



(a)Circular Cross Section (LC3)



(b)Square Cross Section (SS2)

Fig. 10 Comparison of Stress-Strain Curve between Proposed Model and Previous

このため、当然寸法効果に関する疑問は残る。しかしながら、Table 2 に示したように、本実験よりもはるかに小さな模型を用いた実験から求められた経験式が実務設計で用いられていることに比較すれば、将来に向けての一つの前進であると考えられる。

7. まとめ

鉄筋コンクリート橋脚の非線形域での変形性能を適切に評価するために、我国流の帯鉄筋に関する設計条件下でのコンクリートの応力-ひずみ関係式を開発することを目的として、本文では、拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験を行い、拘束効果の評価手法の検討を行った。本検討の結果をまとめると、以下の通りである。

- 1)帯鉄筋比が増大すると、初期剛性は変わらないが、コンクリートの最大圧縮応力及び最大圧縮ひずみに達する時のひずみが向上するとともに、その後の急激な応力低下が抑制される。また、拘束効果は帯鉄筋形状の影響を大きく受ける。
- 2)同量の帯鉄筋を配した場合、帯鉄筋の断面積を大きくするよりも、設置間隔を密にした方が軸方向鉄筋の著しい座屈を防止でき、コアコンクリートを効果的に拘束できる。
- 3)円形断面のコンクリート柱では、帯鉄筋のフックの定着条件が拘束効果に及ぼす有意な影響は認められない。
- 4)鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に適用するコンクリートの応力-ひずみ曲線モデルとして、応力上昇域については、式(3)に示した初期勾配を考慮した曲線モデルを、また、応力下降域については、式(4)に示した一次直線を提案した。そして、本モデルの特性値である最大圧縮応力、最大圧縮ひずみ時のひずみ、下降勾配に

ついて、実験結果をもとに、帯鉄筋比、帯鉄筋の降伏強度、プレーンコンクリートの強度の3定数より定義される簡易な評価式(10)~(12)を提案した。また、帯鉄筋形状の影響を取り入れるため、断面補正係数を新たに導入した。

- 5)本提案モデルにより定量化された応力-ひずみ関係は、実験結果の傾向をよく推定できることを確認した。
- 6)本提案モデルで定量化されるひずみ軟化域での応力の下降勾配は、他の提案モデルと比較して大きな値になった。これは、耐震設計上重要な点であり、我国のように米国やニュージーランドと比較して帯鉄筋の少ない鉄筋コンクリート橋脚に対する地震時保有水平耐力やじん性率の解析では、既往の提案モデルより、低帯鉄筋の影響を考慮に入れた本提案モデルを適用する方が望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) Kent, D.C. and Park, R.: Flexural members with confined concrete, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.97, No.ST7, pp.1969-1990, Jul. 1971.
- 2) Park, R. et al.: Ductility of square-confined concrete columns, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.108, No.ST4, pp.929-950, Apr. 1982.
- 3) Sheikh, S.A. and Uzumeri, S.M.: Strength and ductility of tied concrete columns, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.106, No.ST5, pp.1079-1102, May 1980.
- 4) Sheikh, S.A. and Uzumeri, S.M.: Analytical model for concrete confinement in tied columns, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.108, No.ST12, pp.2703-2722, Dec. 1982.
- 5) Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.: Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.114, No.ST8, pp.1804-1826, Aug. 1988.
- 6) Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.: Observed stress-strain behavior of confined concrete, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.114, No.ST8,

pp.1827-1849, Aug. 1988.

- 7) 六車熙他: 横拘束コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化, セメント技術年報, Vol34, pp.429-432, 1980年.
- 8) 六車熙他: コンクリートの曲げ圧縮限界歪の改善に関する研究, 第24回構造工学シンポジウム, pp.109-116, 1978年.
- 9) 藤井学他: 横拘束コンクリートの応力-ひずみ関係の適

用に関する検討, セメント技術年報, Vol.42, pp.311-314, 1988年.

(1993.10.15 受付)

A STRESS-STRAIN MODEL FOR REINFORCED CONCRETE COLUMNS CONFINED BY LATERAL REINFORCEMENT

Jun-ichi HOSHIKUMA, Kazuhiko KAWASHIMA and Kazuhiro NAGAYA

In this paper, a stress-strain relationship of concrete which takes account of confinement effectiveness is proposed based on a series of loading tests for reinforced concrete column specimens. Reinforced concrete column specimens, with circular and square cross section, including various hoop reinforcement, were loaded. Predominant factors for controlling the stress-strain relation of the concrete columns were examined, and stress-strain model consisting of exponential function and straight line is proposed. The predicted relation agreed quite well with the test results.