

土 木 研 究 所 資 料

鉄筋コンクリート橋脚のじん性率 算定に及ぼす拘束の影響に関する研究

(その2) 拘束コンクリートの応力—ひずみ関係に関する文献調査

平成5年7月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

Copyright © (1992) by P. W. R. I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

鉄筋コンクリート橋脚のじん性率 算定に及ぼす拘束の影響に関する研究

(その2)拘束コンクリートの応力-ひずみ関係に関する文献調査

土木研究所地震防災部

耐震研究室 室長 川島 一彦

研究員 星隈 順一

長屋 和宏

要 旨

現行の道路橋示方書Ⅴ耐震設計編によると、鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の算定に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係の規定においては、橋脚のじん性に大きな影響を及ぼす横拘束鉄筋に関する因子がなく、その拘束効果が耐震設計に反映されていない状況にある。そこで、本研究では、鉄筋コンクリート橋脚のじん性に及ぼす横拘束鉄筋の影響の評価手法を開発することを目標とするものであり、まずその基礎となる横拘束を受ける鉄筋コンクリートの構成則について、既往の研究の文献調査を行った。そして、各提案式により定量化される応力-ひずみ曲線の試算を行い、別途実施した拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験の結果と比較した。

キーワード：鉄筋コンクリート橋脚、じん性、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係

目 次

1. まえがき	1
2. コンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化に関する既往の研究	2
2.1 道路橋示方書Ⅴ耐震設計編の規定	2
2.2 土木学会コンクリート標準示方書設計編(平成3年度)の規定	2
2.3 Popovics による研究	3
2.4 Wang らによる研究	5
2.5 Sargin による研究	5
3. 拘束コンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化に関する既往の研究	7
3.1 Kent, Park による研究	7
3.2 Sheikh, Uzumeri らによる研究	9
3.3 Mander による研究	14
3.4 六車らの研究	19
3.5 中塚らによる研究	22
3.6 藤井らによる研究	24
4. 既往の応力-ひずみモデルの試算例	26
5. まとめ	39
参考文献	40

1. まえがき

平成2年の道路橋示方書耐震設計編の改訂において、鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査についての規定が取り入れられた。そのポイントは、関東地震級の大規模地震が生じた場合に、最大耐力付近で安定していた水平耐力が低下し始める程度の変形までに、橋脚基部の損傷を止めようとするにあり、震度法によって耐震設計された断面について、必要なじん性が確保されるコンクリート断面、または配筋であることを照査するものである。すなわち、震度法の設計で要求される「強度」と、本照査法で要求される「ねばり」をバランスよく持たせようというコンセプトである。このように、耐震設計においてねばりが求められるのは、鉄筋コンクリート橋脚が非線形域に入ることにより、振動エネルギーを吸収するとともに、著しい耐力の低下を生じることなく、ねばりを発揮し得るためである。

一般に、コンクリート構造物のじん性を改善するための手法として、コンクリートを帯鉄筋等の横拘束筋により拘束する方法が採られる。これは、軸圧縮力が加わるような場合に、内部コンクリートを三軸応力状態にすることによってコンクリートの強度および終局ひずみを改善しようとするものである。こうした帯鉄筋によるじん性の確保という設計手法は、米国やニュージーランドでは従来から行われており、小断面でかつ帯鉄筋を高密度に配した橋脚が数多く建設されている。一方、我国では、これまで大断面で帯鉄筋比の低い橋脚が採用されることが多く、今回取り入れられた地震時保有水平耐力の照査においても、横拘束の影響は考慮されていない。しかし、じん性率の解析において、帯鉄筋による拘束の影響が考慮されないのは、設計上不合理であること、また近年、都市域の高架橋のように橋脚の設置スペースや美観上の配慮等から、断面を絞った橋脚が採用される事例が増えてきており、こうした場合、帯鉄筋による十分な拘束がないと所要のじん性が得られないこと等から、設計方法の見直し、特に帯鉄筋に対する十分な配慮が必要と考えられる。

こうした背景から、本研究では、帯鉄筋によるコンクリートの拘束効果を考慮した鉄筋コンクリート橋脚のじん性率計算法の確立を目的とし、その重要なポイントとなる横拘束したコンクリート(以下、拘束コンクリートと呼ぶ)の応力-ひずみ関係について、耐震設計用の提案式を開発していくものである。

拘束コンクリートの応力-ひずみ関係の定量化に関しては、これまでに、建築分野を中心に、国内外で多くの研究が行われており、拘束効果に影響を及ぼす要因の検討とともに、拘束効果の定量化、応力-ひずみ曲線のモデル化等についてそれぞれ提案がなされている。そこで、まず提案式を開発するための基礎的資料を得るために、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係について、既往の提案式に関する文献調査を行った。本資料は、その代表的な提案式の概要を示すとともに、その試算結果と土木研究所で別途行った実験結果との比較を行ったものである。

2. プレーンコンクリートに対する応力-ひずみ関係のモデル化に関する既往の研究

2.1 道路橋示方書V耐震設計編の規定

道路橋示方書V耐震設計編¹⁾では、鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査において、設計上コンクリートの応力-ひずみ関係は図-2.1に示すようにモデル化されている。ここでは、設計用として最大圧縮応力を85%に低減するとともに、最大圧縮応力時のひずみを0.002、終局ひずみを0.0035と定義し、応力-ひずみ関係は、式(2-1)のように与えた。すなわち、最大応力までは二次曲線で、その後終局ひずみまでは応力が最大圧縮応力(設計基準強度)の85%で一定のもとひずみが進展するものと仮定した。

$$f_c = \begin{cases} 0.85 f_{ck} \times \frac{\epsilon_c}{0.002} \left(2 - \frac{\epsilon_c}{0.002} \right) & (\epsilon_c < 0.002) \\ 0.85 f_{ck} & (0.002 \leq \epsilon_c \leq 0.0035) \end{cases} \quad (2-1)$$

ここで、 f_c : コンクリート応力(kgf/cm²)

f_{ck} : コンクリート最大圧縮応力(kgf/cm²)

ϵ_c : コンクリートひずみ

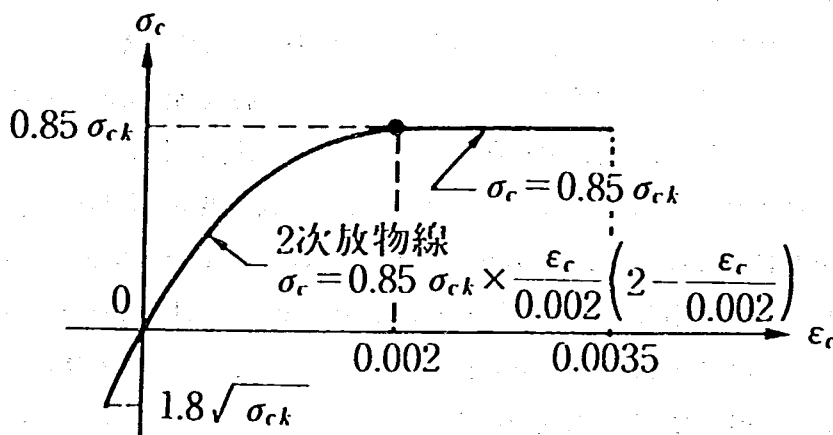


図-2.1 道路橋示方書V耐震設計編の規定

2.2 土木学会コンクリート標準示方書設計編(平成3年度)の規定

土木学会コンクリート標準示方書²⁾では、コンクリートの応力-ひずみ曲線は、検討の目的に応じて、適切な形を仮定するものとする規定されている。そして、曲げモーメント及び曲げモーメントと軸方向力を受ける部材の断面破壊の終局限界状態に対する検討においては、図-2.2に示す応力-ひずみ曲線を用いてよいとされている。このモデルは、式(2-1)に示した道路橋示方書V耐震設計編のモデルと同一のものである。

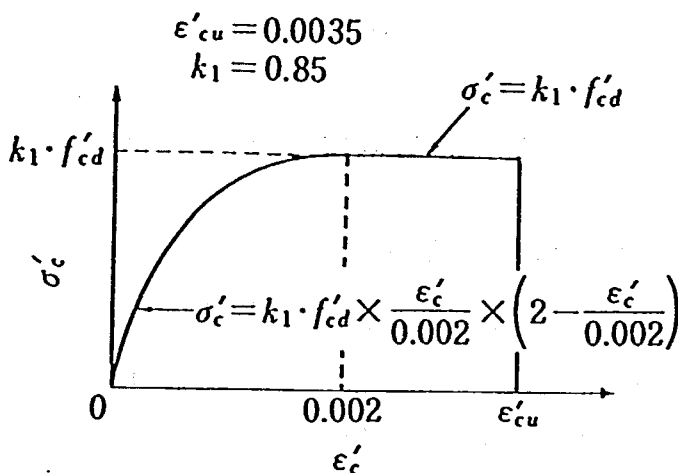


図-2.2 コンクリート標準示方書の規定

2.3 Popovics による研究

Popovics は、コンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化について調査を行い、表-2.1 に示すようにまとめている³⁾。これによれば、最初に構成式を提案したのは、Bach であり、単純なべき乗関数としてモデル化している。Walker は、円柱模型の圧縮試験からべき乗係数 n の平均値が 0.8 ~ 0.9 であることを示した。一方、Smith らはコンクリートの圧縮強度の増加(210 ~ 420kgf/cm²)と共に、べき乗係数 n も増加する(0.45 ~ 0.7)ことを示した。Popovics は、Bach の式は実験結果と広く一致するが、べき乗関数のため原点における初期勾配(初期弾性係数)が無大になること、最大応力を示さないなどの矛盾点を有することを指摘している。

一方、Saenz は、上記の応力上昇域における境界条件を満たした式(表中の式(2)及び(3))を提案している。そしてさらに応力下降域の挙動も表現するには、ひずみの3次の項を追加すればよいとしている。表中の式(4)及び(6)は、式(2)及び(3)の特別なケースである。式(5)は式(4)を、また、式(7)は式(6)を一般化したものである。Sturman らは、式(5)の係数 n に関して、集中載荷した場合には $n=1.9$ 、偏心載荷した場合には $n=1.6$ と定義している。

以上のような調査結果をもとに、Popovics は、式(2-2)に示されるように、コンクリートの圧縮強度 f'_{co} のみにより定義される簡便で汎用性のある応力-ひずみ関係式を提案した⁴⁾。

$$\eta = \frac{n \xi}{n-1+\xi^n} \quad (2-2)$$

ここで、 $\eta = f_c / f_{co}$ 、 $\xi = \epsilon_c / \epsilon_o$ 。

n, ϵ_o : 実験により決定される定数でコンクリートの圧縮強度 f_{co} により次式で定式化した。

$$n = 0.00571 f_{co} + 1$$

$$\epsilon_o = 4.29 \cdot \sqrt[4]{f_{co}} \times 10^{-4}$$

図-2.3は、 f_{co} を200, 300, 400(kgf/cm²)とした場合のPopovicsの式による試算結果を示したものである。これより、応力下降域も含んだ応力-ひずみ曲線の全域にわたるモデル化が可能であることがわかる。

表-2.1 応力-ひずみ曲線の提案モデル

提案式	応力-ひずみモデル	式	備考
Bach	$C_1 \epsilon^n$	(1)	$E = \infty$
Saenz	$E \epsilon \{1 + (3E_o/E - 2)(\epsilon/\epsilon_o) + (1 - 2E_o/E)(\epsilon/\epsilon_o)^2\}$	(2)	
Saenz	$\frac{E \epsilon}{1 + (E/E_o - 2)(\epsilon/\epsilon_o) + (\epsilon/\epsilon_o)^2}$	(3)	
European Concrete Committee	$E \epsilon (1 - \epsilon/2\epsilon_o)$	(4)	$E/E_o = 2$
Sturman ら	$C_2 \epsilon (1 + C_3 \epsilon^{n-1})$	(5)	$E/E_o = n/(n-1)$
Desay and Krishnan	$\frac{E \epsilon}{1 + (\epsilon/\epsilon_o)^2}$	(6)	$E/E_o = 2$
Turin and Gerstle	$\frac{E \epsilon}{C_4 + (\epsilon/\epsilon_o)^n}$	(7)	$E/E_o = C_4 + 1$
Smith and Young	$E \epsilon e^{-\epsilon/\epsilon_o}$	(8)	$E/E_o = e$

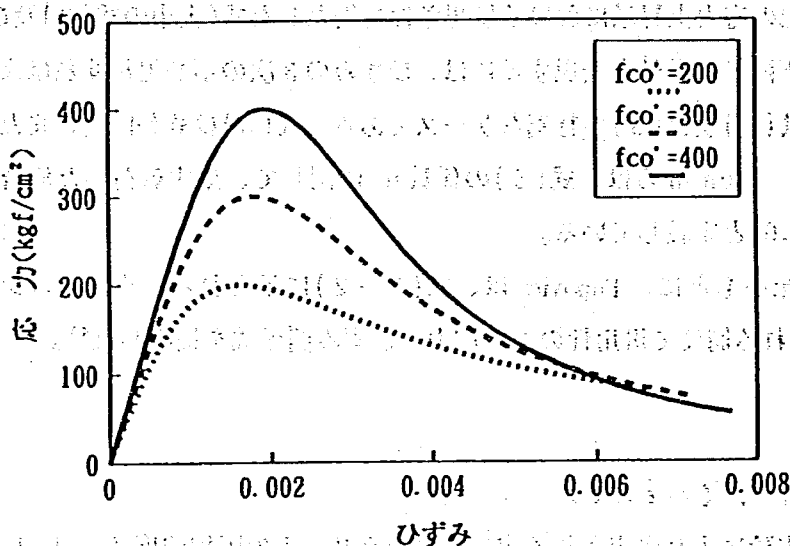


図-2.3 Popovicsの提案式による試算例

2.4 Wang らによる研究

Wang らは、コンクリートの応力-ひずみ関係として、4つの実験定数を用いた次式を提案している⁵⁾。

$$Y = \frac{AX + BX^2}{1 + CX + DX^2} \quad (2-3)$$

ここで、 $Y = f_c / f_{co}$ 、 $X = \epsilon_c / \epsilon_o$ 。

A, B, C, D : 応力上昇域、応力下降域それぞれの最大応力点ならびに変曲点等における境界条件から定まる定数

このように、Wang の式では4つの境界条件より応力-ひずみ曲線がモデル化され、さらに応力上昇域と応力下降域で定数 A, B, C, D が異なるため、曲線をフレキシブルに定義することが可能であるが、逆に境界条件の設定において、応力下降域での変曲点等、取扱いが煩雑な点もある。図-2.4は、Wang により実施された圧縮载荷試験の計測結果と、式(2-3)による解析結果を比較して示したものであり、両者は非常によく一致していることがわかる。

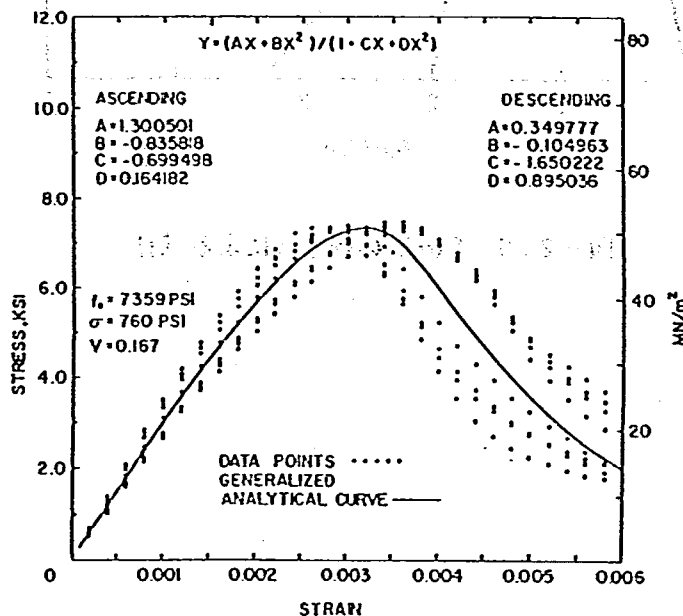


図-2.4 Wang の提案式と実験結果との比較

2.5 Sargin による研究

Sargin は、Wang の提案した式(2-3)を基本として、応力上昇域、応力下降域を一つの連続した式で表現し得る次の式を提案した⁶⁾。

$$Y = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2} \quad (2-4)$$

ここでは、実験により定められている係数が A （応力上昇域の条件より決定）、 D （応力下降域の条件より決定）の2つで、その取扱いが容易となる。図-2.5は $A=2.0$ で一定として $D=0, 0.4, 1.0$ としたときの式(2-4)の概形を比較して示したものであり、応力上昇域の曲線に大きな変更をきたすことなく、応力下降域の表現を様々に変化できていることがわかる。

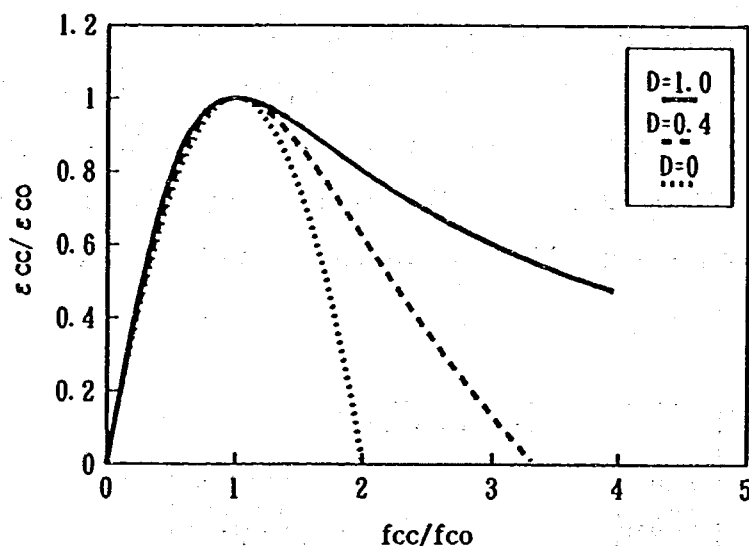


図-2.5 Sarginの提案式による試算

3. 拘束コンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化に関する既往の研究

3.1 Kent, Park による研究

Kent, Park は、矩形断面の拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験の結果に基づき、帯鉄筋で拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係を、式(3-1)に示す通り3区間に分割してモデル化した¹⁾。そのモデルを示すと図-3.1の通りである。

$$\left. \begin{array}{ll} \varepsilon_c \leq 0.002 & f_c = f_{co} \left\{ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right\} \\ 0.002 < \varepsilon_c & f_c = f_{co} \{ 1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_{co}) \} \\ & \geq 0.2 f_{co} \end{array} \right\} \quad (3-1)$$

・応力上昇域(区間 AB)

応力上昇域は Hognestad らにより提案され、一般に用いられている二次放物線でモデル化している。最大圧縮応力は、拘束、非拘束コンクリートとも円柱プレーン試験体の圧縮強度 f_{co} と同一である(Hognestad は、曲げ圧縮を受ける場合の最大圧縮応力は f'_{co} の 0.85 倍度とすることを提案している)。また、最大圧縮応力時のひずみ ε_{co} は 0.002 である。

・応力下降域(区間 BC)

応力下降域は直線で仮定するものとし、その勾配は応力が最大圧縮応力の 50% に低減した時のひずみ ε_{50c} により決定している。すなわち、応力下降係数 Z を次式で定義した。

$$Z = \frac{0.5}{\varepsilon_{50A} + \varepsilon_{50w} - \varepsilon_{co}} \quad (3-2)$$

ここで、応力下降係数 Z に関するパラメータとして、次の定義を行っている。

(1) パラメータ ε_{50w}

非拘束コンクリートにおいて応力が最大圧縮応力の 50% に低減した時のひずみであり、多数の実験結果をもとに圧縮強度 f_{co} との関係を表す次式で提案している。

$$\varepsilon_{50w} = \frac{3 + 0.029 f_{co}}{14.482 f_{co} - 1000} \quad (f_{co} \text{ の単位は } \text{kgf/cm}^2) \quad (3-3)$$

(2) パラメータ ε_{50A}

拘束効果による応力 50% 低減時ひずみの増分値であり、帯鉄筋比 ρ 、帯鉄筋による拘束幅 B と帯鉄筋間隔 s の比の関数として与えられ、多数の実験結果をもとに次式で提案されている。

$$\varepsilon_{50A} = \frac{3}{4} \rho \sqrt{\frac{B}{s}} \quad (3-4)$$

ここに、拘束効果のパラメータとして、拘束幅と帯鉄筋間隔の比 (B/s) を取り入れたのは、同一帯鉄筋比であっても、図-3.2 に示すように、帯鉄筋間隔により斜線で示される非拘束域が異なる場合もあり、この影響を反映させるためである。

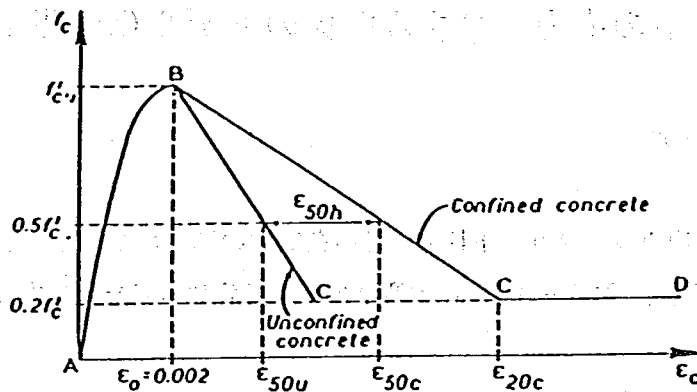


図-3.1 Kent, Park のモデル化

ところで、Kent, Park は、拘束効果により最大圧縮応力ならびにその時のひずみの値が向上するという実験事実をふまえ、これを拘束効果係数 K としてモデルに取り入れた修正 Kent, Park 式を再提案した。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_c \leq 0.002K & \quad f_c = K f_{co} \left\{ \frac{2\epsilon_c}{0.002K} - \left(\frac{\epsilon_c}{0.002K} \right)^2 \right\} \\ 0.002K < \epsilon_c & \quad f_c = K f_{co} \{ 1 - Z_\pi (\epsilon_c - 0.002K) \} \\ & \quad \geq 0.2K f_{co} \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

ここに、 $K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}}$

$$Z_\pi = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.029 f_{co}}{14.482 f_{co} - 1000} + \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{B}{s}} - 0.002K}$$

修正 Kent, Park 式では、最大圧縮応力及び最大圧縮応力時のひずみの値に及ぼす拘束効果の影響は、拘束効果係数 K により同等に評価されている。

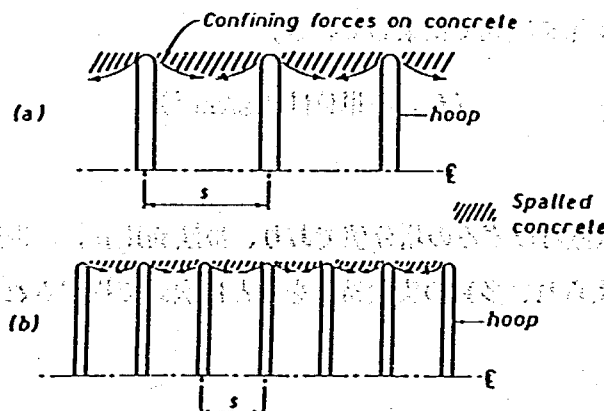


図-3.2 帯鉄筋の拘束効果

3.2 Sheikh, Uzumeri による研究

Sheikh, Uzumeri は、矩形断面の柱部材を対象とした拘束コンクリートの応力-ひずみ関係についてモデル化を行ってた⁹⁾。これによると、図-3.3に示すように、①応力上昇域、②応力一定域、③応力下降域、④応力残留域の4区間に分割され、次式に示すように、応力上昇域は Kent, Park による提案式にも用いられている一般的な二次放物線で、応力下降域は直線でモデル化されている。なお、残留応力は、最大圧縮応力の30%で定義している。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{区間 OA} & f_c = K f_{cc} \left\{ \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{s1}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{s1}} \right)^2 \right\} \\ \text{区間 OB} & f_c = f_{cc} \\ \text{区間 BC} & f_c = f_{cc} \{ 1 - Z(\epsilon_c - \epsilon_{s2}) \} \\ \text{区間 CD} & f_c = 0.3 f_{cc} \end{array} \right\} \quad (3-6)$$

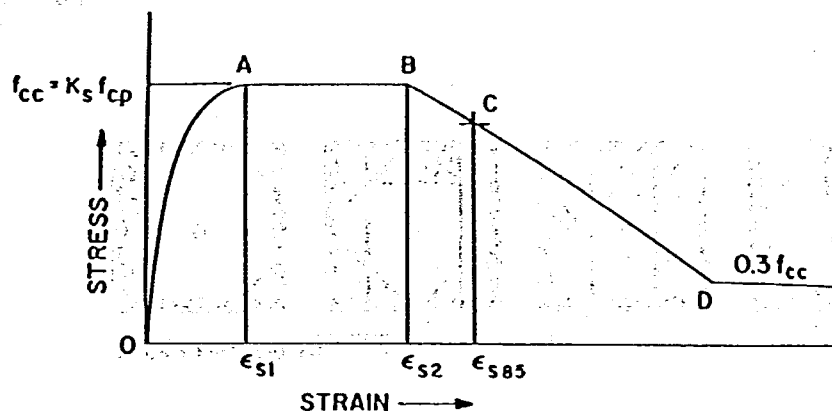


図-3.3 Sheikh, Uzumeri のモデル化

モデル化において新たに定義された特性値について、その評価方法を以下に示す。

(1) 拘束効果係数 K

Sheikh, Uzumeri は、コンクリートの最大圧縮応力に及ぼす拘束の影響について、①数多くの研究者によりその効果は帯鉄筋比 ρ の平方根に比例すること、② Richart らや Balmer により、その効果は帯鉄筋に生じ得る応力 f_{yk} に対して比例すること等を鑑み、 $(\rho, f_{yk})^r$ に比例するものと仮定し、拘束効果係数を次式で定義した。

$$K = 1 + \frac{A_c}{P_{ccc}} \beta (\rho_s f_{yk})^r \quad (3-7)$$

ここで、 β, r : 比例定数

A_c : コンクリートの有効拘束断面積

P_{ccc} : 拘束コンクリートの最大耐力、 $P_{ccc} = 0.85 f_{cc} (A_c - A_s)$

A_c, A_s : 拘束コンクリート、軸方向鉄筋の断面積

コンクリートの有効拘束断面積 A_c は、帯鉄筋の形状、設置間隔の影響により生じるコンクリートの非拘束域が控除されるように定義された値であり、その算定手法を示すと以下の通りである。

① 帯鉄筋の形状の影響

帯鉄筋の配置される断面位置における非拘束域の面内分布は、帯鉄筋により囲まれた軸方向鉄筋の間隔に依存される。図-3.4は、矩形拘束コンクリートの各種帯鉄筋形状における非拘束域の分布を示したものであり、このように非拘束域は、隣接する軸方向鉄筋間の中間点で最も大きく、軸方向鉄筋位置で完全拘束となる分布を示す。ここで、拘束域と非拘束域の境界曲線については、厳密な形状を解析的に定義するのは難しいため、図-3.5に示すとおり、軸方向鉄筋位置における接線角が θ の二次放物線(非拘束断面積 $c^2 \cot \theta / 6$)と、底角を θ とする二等辺三角形(同 $c^2 \cot \theta / 4$)との間に境界曲線の解があると推定している。また、接線角 θ については、コンクリートに拘束力を伝える力学的条件が、ポストテンション方式によるプレストレストコンクリート桁の定着部近傍のそれと似ていることから、これらに関する既往の研究をもとに、次の通り仮定した。

$$\theta = 45^\circ$$

(3-8)

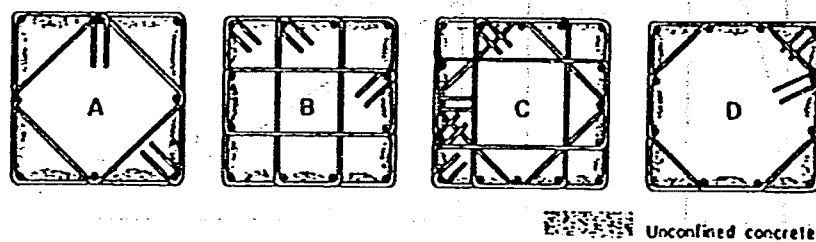


図-3.4 矩形断面拘束コンクリート柱の非拘束域(面内分布)

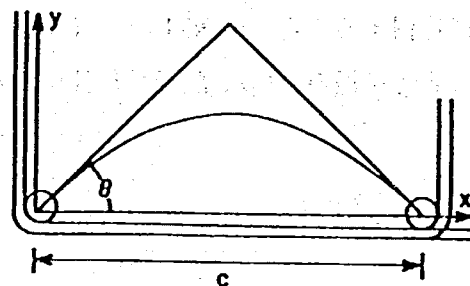


図-3.5 非拘束域の定量化

以上より、ある一つの隣接する軸方向鉄筋間において生じる非拘束断面積 ΔA_i は、次式の通りである。

$$\Delta A_i = \frac{c_i^2}{\alpha} \quad (3-9)$$

ここで、 c_i : ある一つの軸方向鉄筋間距離

α : 境界曲線の形状により決定される係数($4 \leq \alpha \leq 6$)

したがって、帯鉄筋の形状の影響を評価するための有効拘束断面積比 λ_c が次の通り定義される。

$$\lambda_c = 1 - \frac{\sum c_i^2}{\alpha A_c} \quad (3-10)$$

ここで、 n : 生じる境界曲線の本数

②帯鉄筋の設置間隔の影響

帯鉄筋は、柱鉛直方向にある間隔をもって設置されるため、図-3.6に示すとおり、(a)と同様な非拘束域を生じる。したがって、拘束域と非拘束域の境界曲線は、初期接線角 θ の二次放物線で仮定され、帯鉄筋の設置間隔が大きいほどコンクリートの拘束効果が小さく評価される。しかし、この場合図-3.7に示すように、柱鉛直方向に拘束断面積が非線形に変化することになり、モデル化を行うに当たり繁雑となってしまう。そこで、本モデルでは、拘束断面積を帯鉄筋間の中間点における最小値で全断面一定なものとして仮定することにし、拘束断面寸法 B, H をそれぞれ低減させることでモデルの簡便化を図っている。したがって、帯鉄筋の設置間隔の影響を評価するための有効拘束断面積比 λ_s が次の通り定義される。

$$\lambda_s = \left(1 - \frac{2y_m}{B}\right) \left(1 - \frac{2y_m}{H}\right) \quad (3-11)$$

ここで、 y_m は仮定した境界曲線における非拘束長の最大値であり、この場合次式で与えられる。

$$y_m = 0.25 s \tan \theta \quad (3-12)$$

s : 帯鉄筋間隔

以上の帯鉄筋の形状ならびに設置間隔の影響を合成することにより、コンクリートの有効拘束断面積 A_e は次の通り導かれる。

$$A_e = \lambda_c \lambda_s A_c \quad (3-13)$$

$$= \left(1 - \frac{\sum c_i^2}{\alpha A_c}\right) \left(1 - \frac{s}{2B} \tan \theta\right) \left(1 - \frac{s}{2H} \tan \theta\right) B H$$

式(3-7)、式(3-13)より、拘束効果係数 K は次式で表される。

$$K = 1 + \frac{1}{P_{scc}} \left(1 - \frac{\sum c_i^2}{\alpha A_c}\right) \left(1 - \frac{s}{2B} \tan \theta\right) \left(1 - \frac{s}{2H} \tan \theta\right) B H \beta (\rho_s f_{yk})' \quad (3-14)$$

特に、整列した軸方向鉄筋を有する正方形断面の拘束コンクリート柱の場合、式(3-14)は次のように簡易化される。

$$K = 1 + \frac{1}{P_{scc}} \left(1 - \frac{n c^2}{\alpha B^2}\right) \left(1 - \frac{s}{2B} \tan \theta\right)^2 B^2 \beta (\rho_s f_{yk})' \quad (3-15)$$

そして、Sheikh, Uzumeriは別途実施した正方形断面の拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験結果をもとに、

式(3-15)中の定数 α, β, γ について重回帰分析を行い、その値を次のように提案した。

$$\alpha = 5.5 \quad \beta = 22.9 \quad \gamma = 0.5 \quad \theta = 45^\circ$$

したがって、正方形断面の拘束コンクリートにおける拘束効果係数は、次式で与えられる。

$$K = 1 + \frac{22.9 B^2}{P_{ccc}} \left(1 - \frac{n c^2}{5.5 B^2} \right) \left(1 - \frac{s}{2B} \right)^2 \sqrt{\rho_s f_{yk}} \quad (3-16)$$

ただし単位は、 P_{ccc} (kgf); B, c, s (cm); f_{yk} (kgf/cm²)である。

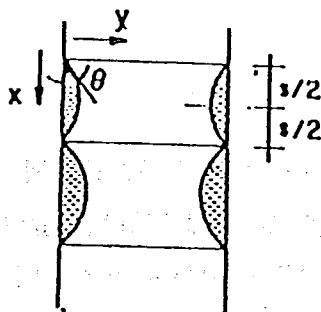


図-3.6 拘束コンクリートの非拘束域(鉛直方向分布)

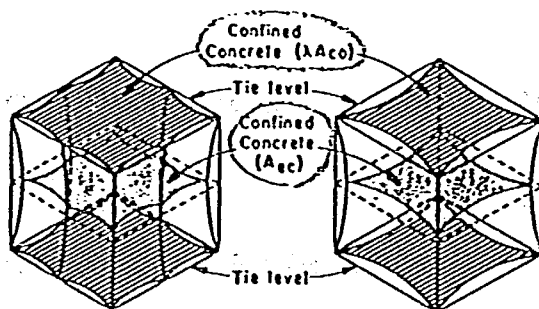


図-3.7 非拘束域の立体図

(2) パラメータ ϵ_{cc1}

最大応力に達した時のひずみ ϵ_{cc1} は、Soliman, Yu により提案された式に拘束効果の影響を加味した次式を適用している。

$$\epsilon_{cc1} = 7.83 K f_{cc} \times 10^{-6} \quad (3-17)$$

(3) パラメータ ϵ_{cc2}

ϵ_{cc2} は、最大応力を維持する最大のひずみ値と定義され、この評価式として、帯鉄筋の形状、設置間隔、材料特性が考慮された Sargin の式を基本とした次式を提案した。

$$\epsilon_{cc2} = \left\{ 1 + \frac{7.84}{c} \left(1 - 5.0 \frac{s^2}{B^2} \right) \frac{\rho_s f_{yh}}{\sqrt{f_{co}}} \right\} \epsilon_{co} \quad (3-18)$$

ここで、 ϵ_{co} : プレーンコンクリートの最大応力時ひずみで 0.0022 とする

ただし単位は、 B, c, s (cm); f_{yh}, f_{co} (kg/cm²)である。

(4) パラメータ ϵ_{c85}

ϵ_{c85} は、応力が最大圧縮応力の 85% に低減したときのひずみ値であり、線形でモデル化された応力下降域がこの値により決定される。本パラメータの評価において、Sheikh, Uzumeri は、Kent, Park の提案した応力下降係数 Z を用いた次式を導いている。ただし、応力下降係数の評価式は Kent, Park のそれと若干異なっている。

$$\begin{aligned} \epsilon_{c85} &= \frac{0.15}{Z} + \epsilon_{cc2} \\ &= 0.225 \rho_s \sqrt{\frac{B}{S}} + \epsilon_{cc2} \quad \left(\because Z = \frac{0.5}{\frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{B}{S}}} \right) \end{aligned} \quad (3-19)$$

3.3 Mander らによる研究

Mander らは、帯鉄筋の形状が円形、矩形のいずれの場合にも適用可能な拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を、全区間連続した式(3-20)で提案した⁹⁾。図-3.8は、そのモデルを示したものであり、これは先述の Popovics の提案式を基本としたものである。

$$f_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (3-20)$$

$$\text{ここに、} x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{scc}}$$

$$\text{ただし、} E_c = 16000\sqrt{f_{co}} \quad E_{scc} = \frac{f_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (f_{co}, f_{cc} \text{ の単位は } (\text{kgf/cm}^2) \text{ である})$$

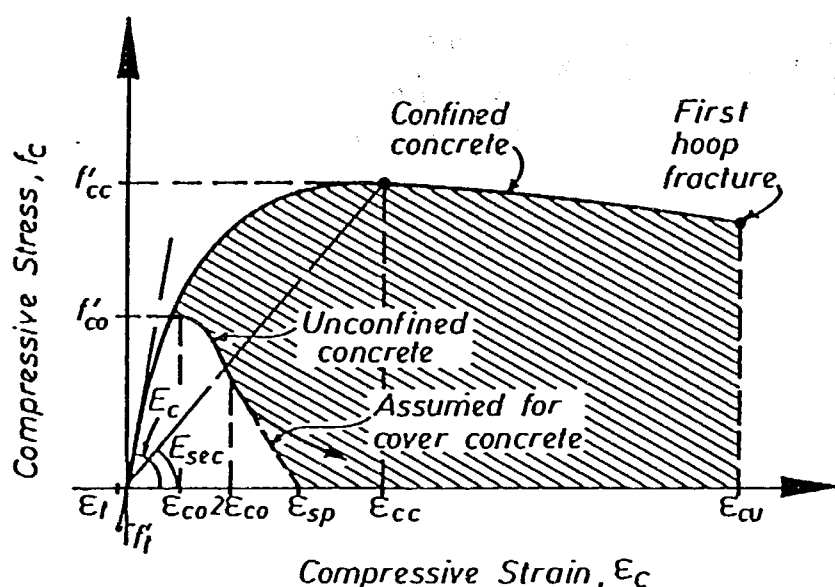


図-3.8 Mander らのモデル化

本提案モデルの各特性値に対する評価方法を以下に示す。

(1) 最大圧縮応力 f_{cc}

最大圧縮応力は、William, Warnke により提唱された多軸応力下における材料構成モデルを適用し、Schickert, Winkler の行ったコンクリートの三軸圧縮試験結果をもとに推定されている。その結果、一般に2方向からの有効拘束圧 f_{i1}, f_{i2} (ただし $f_{i1} < f_{i2}$) を受ける時の最大圧縮応力の推定値は図-3.9に示すとおりである。特に、帯鉄筋が円形あるいは正方形の場合は、2方向に生じる有効拘束圧 f_i が等しくなるため、最大圧縮応力 f_{cc} は次式で与えられる。

$$f_{cc} = f_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_i}{f_{co}}} - 2 \frac{f_i}{f_{co}} \right) \quad (3-21)$$

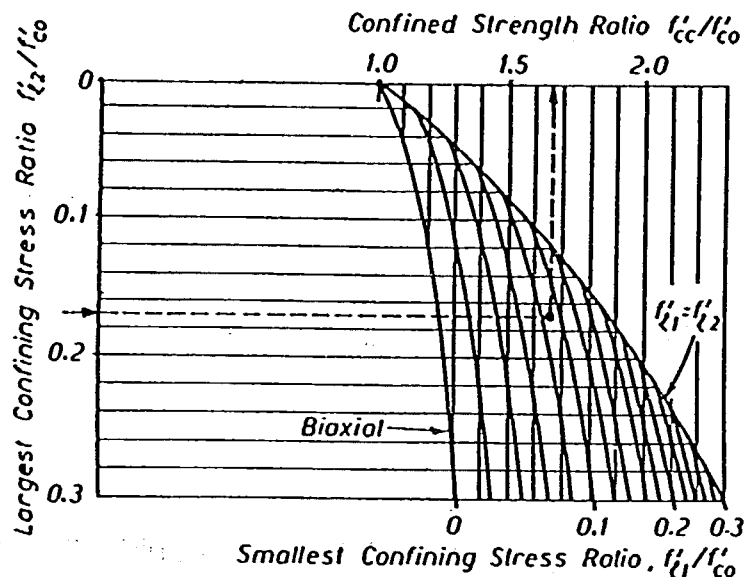


図-3.9 横拘束圧と最大圧縮強度の関係

(2)有効拘束圧 f'_i

拘束コンクリートに生じる有効拘束圧の評価法は、基本的に3.2で示したSheikh, Uzumeriの手法と同様である。しかし、Manderらは、拘束効果の影響を有効拘束圧 f'_i を用いて定式化している点がポイントである。この有効拘束圧は、帯鉄筋がコンクリートに伝える拘束圧 f_r と、有効拘束断面積により定義される拘束効果係数 k_e との積として、次式で与えられる。

$$f'_i = f_r k_e \quad (3-22)$$

$$\text{ただし: } k_e = \frac{A_e}{A_c(1-\rho_{cc})} \quad (3-23)$$

(A_e : 有効拘束断面積、 ρ_{cc} : 軸方向鉄筋比)

ここで、Manderらの定義する拘束効果係数の評価法について以下に示すことにする。

(3)円形帯鉄筋の拘束効果係数

図-3.10は、円形帯鉄筋において生じる有効拘束域ならびに非拘束域をモデル化して示したものであり、その境界曲線は、初期接線勾配 45° の二次放物線で仮定されている。円形帯鉄筋の場合、その周長方向においては全域にわたり拘束が有効となるが、柱鉛直方向には図に示すような非拘束域を生じる。そこでManderらは、有効拘束断面積 A_e を、拘束域が最小値となる帯鉄筋間の中間点における値で定義しており、次式で与えられる。

$$A_e = \frac{\pi}{4} \left(d_s - \frac{s'}{2} \right)^2 \quad (3-24)$$

ここで、 d_s : 帯鉄筋巻径

s' : 帯鉄筋純間隔

式(3-24)を式(3-23)に代入し、円形帯鉄筋の拘束効果係数が次式で与えられる。

$$k_s = \frac{\frac{\pi}{4} \left(d_s - \frac{s'}{2} \right)^2}{\frac{\pi}{4} d_s^2 (1 - \rho_{cc})} = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s} \right)^2}{1 - \rho_{cc}} \quad (3-25)$$

なお、円形帯鉄筋がコンクリートに伝える拘束圧 f_i は、断面のつりあい式から帯鉄筋比 ρ_s を用いて表すと次の通りである。

$$f_i = \frac{2 f_{yh} A_h}{s d_s} = \frac{1}{2} \rho_s f_{yh} \quad \left(\text{ただし } \rho_s = \frac{4 A_h}{d_s s} \right) \quad (3-26)$$

したがって、有効拘束圧 f_i' は次式で与えられる。

$$f_i' = \frac{1}{2} k_s \rho_s f_{yh} \quad (3-27)$$

また、横拘束筋としてスパイラル筋を用いた場合、柱鉛直方向の非拘束域が生じなくなるため、円形帯鉄筋より優れた拘束効果が得られる。したがって、スパイラル筋に対する拘束効果係数が、同様な手法により次式で与えられる。

$$k_s = \frac{1 - \frac{s'}{2d_s}}{1 - \rho_{cc}} \quad (3-28)$$

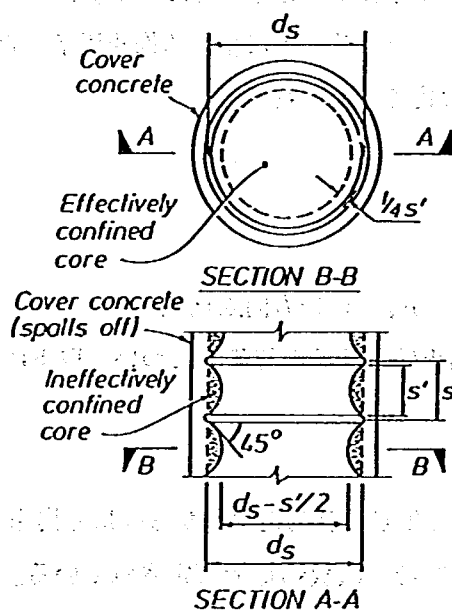


図-3.10 有効拘束域のモデル化(円形帯鉄筋の場合)

(4) 角形帯鉄筋の拘束効果係数

図-3.11は、矩形帯鉄筋に生じる有効拘束域ならびに非拘束域をモデル化して示したものであり、その境界曲線は、円形帯鉄筋の時と同様に初期接線勾配 45° の二次放物線で仮定されている。矩形帯鉄筋の場合、鉛直方向のみならず、帯鉄筋の周長方向にも非拘束域を生じる。そこでまず、帯鉄筋周長方向内に生

じる非拘束域 A_i は、二次放物線で囲まれた部分を積分することにより次のとおり求められる。

$$A_i = \sum_{i=1}^n \frac{w_i^2}{6} \quad (n : \text{軸方向鉄筋本数}) \quad (3-29)$$

また、鉛直方向の非拘束域の影響は、Sheikh, Uzumeri の手法と同様に拘束断面 ($b_c \times d_c$) を低減させて考慮するものとし、これらを合成することで、有効拘束断面積 A_e を次のように定義している。

$$A_e \left(b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{w_i^2}{6} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right) \quad (3-30)$$

式 (3-30) を式 (3-23) に代入し、矩形帯鉄筋の拘束効果係数が次式で与えられる。

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum \frac{w_i^2}{6b_c d_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right)}{1 - \rho_{cc}} \quad (3-31)$$

なお、矩形帯鉄筋の場合、一般に図-3.11に示すように断面 x 方向と y 方向で帯鉄筋量が異なる。そのため、コンクリートに生じる拘束圧も、次のようにそれぞれ両方向 f'_{ix}, f'_{iy} 個別に定義する必要がある。

$$f'_{ix} = \frac{A_{sx}}{s d_c} f_{yh} = \rho_x f_{yh} ; f'_{iy} = \frac{A_{sy}}{s b_c} f_{xh} = \rho_y f_{xh} \quad (3-32)$$

ここで、 ρ_x, ρ_y : x, y 方向の帯鉄筋比

A_{sx}, A_{sy} : x, y 方向に配置される帯鉄筋の総断面積

この時、有効拘束圧 f'_{ix}, f'_{iy} はそれぞれ次式で与えられる。

$$f'_{ix} = k_e \rho_x f_{yh} ; f'_{iy} = k_e \rho_y f_{xh} \quad (3-33)$$

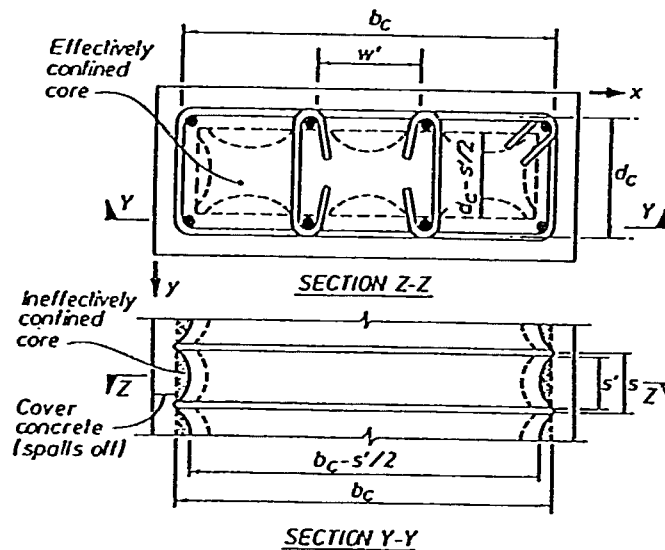


図-3.11 有効拘束域のモデル化(矩形帯鉄筋の場合)

(5)最大圧縮応力時のひずみ ϵ_{cc}

最大圧縮応力時のひずみの評価式は、Richart らにより提案された次式を適用している。

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left\{ 1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right\} \quad (3-34)$$

ただし、 f_{co}, ϵ_{co} : プレーンコンクリートの最大圧縮強度とその時のひずみ ($\epsilon_{co}=0.002$ とする)

(6)終局ひずみ ϵ_{cu}

Mander らは、拘束コンクリートの終局ひずみを、帯鉄筋が破断するときの軸方向ひずみと定義し、その推定法として、ひずみエネルギー保存則を提案している。すなわち、図-3.8中の斜線部で示されるプレーンコンクリートに対する拘束コンクリートのひずみエネルギーの増分は、帯鉄筋により与えられるものであり、帯鉄筋が破断するまでのひずみエネルギーが拘束コンクリートのひずみエネルギーの増分と軸方向鉄筋に生じるひずみエネルギーの和と等価となるように、終局ひずみを決定する手法である。これを数式で示すと、次の通りである。

$$\rho_s A_{cc} \int_0^{\epsilon_{sf}} f_s d\epsilon_s = A_{cc} \int_0^{\epsilon_{cu}} f_c d\epsilon_c + \rho_{cc} A_{cc} \int_0^{\epsilon_{cu}} f_{s1} d\epsilon_c - A_{cc} \int_0^{\epsilon_{sp}} f_c d\epsilon_c \quad (3-35)$$

ただし、 f_s, f_{s1} : 帯鉄筋ならびに軸方向鉄筋に生じる応力

ϵ_{sf} : 帯鉄筋の破断ひずみ

ϵ_{sp} : プレーンコンクリートの終局ひずみ

3.4 六車らによる研究

六車らは、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係について、プレーンコンクリートと比較すると、一般的に最大圧縮応力やその時のひずみなどが大きく、応力-ひずみ曲線のひずみ軟化域の勾配も小さくなる、等の実験事実をもとに、図-3.12に示すようなモデル化を行っている¹⁰⁾。その具体的な内容を、プレーンコンクリート、拘束コンクリートそれぞれについて以下に示すものとする。

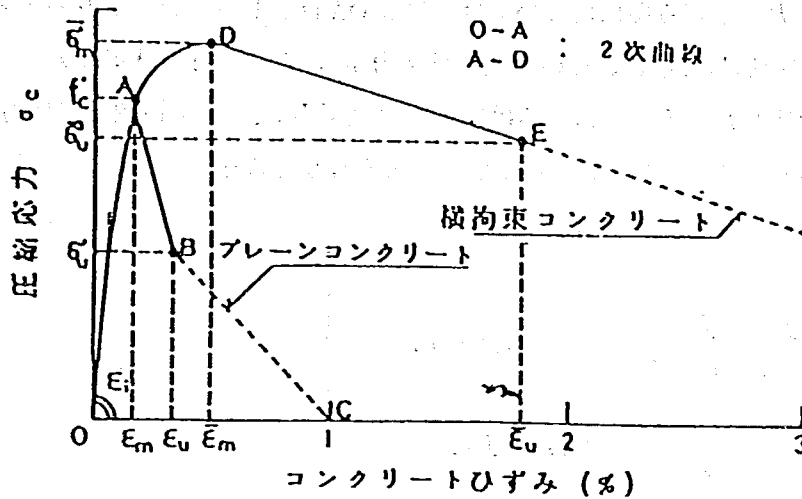


図-3.12 六車らのモデル化

(1) プレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線のモデル化

応力上昇域は、原点における接線弾性係数が E_1 で、かつ点A(プレーンコンクリートの最大圧縮応力 f_{c0} とその時のひずみ ϵ_{c0} で与えられる点)を通る二次放物線とする。そして、点Bで与えられる曲げ圧縮限界ひずみ ϵ_v まで直線的に応力が減少し、さらに応力が0となるひずみ0.01の点Cと直線で結ばれるものと定義した。モデル化された応力-ひずみ曲線を数式で示すと次の通りである。

$$\left. \begin{array}{l} \text{区間 OA} \quad f_c = E_1 \epsilon_c + \frac{f_{c0} - E_1 \epsilon_{c0}}{\epsilon_{c0}^2} \epsilon_c^2 \\ \text{区間 AB} \quad f_c = \frac{f_v - f_{c0}}{\epsilon_v - \epsilon_{c0}} (\epsilon_c - \epsilon_{c0}) + f_{c0} \\ \text{区間 BC} \quad f_c = \frac{f_v}{\epsilon_v - 0.01} (\epsilon_c - 0.01) \end{array} \right\} \quad (3-36)$$

ここに、プレーンコンクリートの各物性定数については、六車らの行った多数の実験結果に基づき、その最大圧縮強度 f_{c0} との関係について次の実験式を示している。

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon_{c0} = 0.0013(1 + f_{c0}/1000) \\ \epsilon_v = 0.00413(1 + f_{c0}/2000) \\ E_1 = 231000 \sqrt{f_{c0}/200} \quad (\text{kgf/cm}^2) \end{array} \right\} \quad (3-37)$$

また、曲げ圧縮限界ひずみ ϵ_u に達するときの応力 f_u は、区間 AB の任意のひずみ ϵ_c までの応力-ひずみ曲線の平均応力が最大となる位置の応力で、次式で与えられる。

$$f_u = \frac{2(A_o - f_{co}\epsilon_{co})}{\epsilon_u + \epsilon_{co}} + f_{co} \quad (3-38)$$

ここで、 A_o : 点 A までの応力-ひずみ曲線の囲む面積

(2) 拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線のモデル化

拘束コンクリートの応力-ひずみ関係については、区間 OA はプレーンコンクリートと同一の定義とし、点 A 以降もさらに応力が増加してゆき、その最大圧縮応力 f_{cc} とその時のひずみ ϵ_{cc} で示される点 D までの間を二次放物線で仮定した。その後は、曲げ圧縮限界ひずみ ϵ_u まで直線的に応力が減少するものとした。モデル化された応力-ひずみ曲線を数式で示すと次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} \text{区間 OA} \quad f_c &= E_c \epsilon_c + \frac{f_{co} - E_c \epsilon_m}{\epsilon_m^2} \epsilon_c^2 \\ \text{区間 AD} \quad f_c &= \frac{f_{co} - f_{cc}}{(\epsilon_{co} - \epsilon_{cc})^2} (\epsilon_c - \epsilon_{cc})^2 + f_{cc} \\ \text{区間 DE} \quad f_c &= \frac{f_{cu} - f_{cc}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{cc}} (\epsilon_c - \epsilon_{cc}) + f_{cc} \end{aligned} \right\} \quad (3-39)$$

ここに、拘束コンクリートの各特性値については、新たに定義する横拘束係数 C_c とプレーンコンクリートの各特性値との関数であると仮定し、六車らや Iyenger らの行った実験結果をもとに次のような実験式を提案している。

・円スパイラル筋で横拘束した円柱供試体

$$\left. \begin{aligned} f_{cc} &= (1 + 150 C_c) f_{co} \\ \epsilon_{cc} &= (1 + 1460 C_c) \epsilon_{co} \\ \epsilon_{cu} &= (1 + 990 C_c) \epsilon_u \end{aligned} \right\} \quad (3-40)$$

・角スパイラル筋で横拘束した角柱供試体

$$\left. \begin{aligned} f_{cc} &= (1 + 50 C_c) f_{co} \\ \epsilon_{cc} &= (1 + 450 C_c) \epsilon_{co} \\ \epsilon_{cu} &= (1 + 450 C_c) \epsilon_u \end{aligned} \right\} \quad (3-41)$$

また f_{co} の値については、 A_{oo} を最大耐力までの横拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線が囲む面積と定義すると、プレーンコンクリートの場合と同様に、 ϵ_{co} の定義より次の式で表される。

$$f_{co} = \frac{2(A_{oo} - f_{cc}\epsilon_{cc})}{\epsilon_{co} + \epsilon_{cc}} + f_{cc} \quad (3-42)$$

なお、六車らは、横拘束係数 C_c の定義について、その横拘束の程度に関与する因子として、横拘束鉄筋の体積比 ρ_s 、配筋ピッチ s 、降伏強度 f_{ys} 、コンクリートの最大圧縮強度 f_{co} 、および拘束される断面の形状や寸法などを挙げ、これらの諸因子と拘束効果との関係を過去の実験結果や報告等をもとに検討し

ている。その結果、次式を提案した。

$$C_c = \rho_s \frac{\sqrt{f_{yh}}}{f_{co}} \left(1 - 0.5 \frac{s}{W} \right) \quad (3-43)$$

この提案式には、①横拘束効果が横拘束鉄筋の体積比に比例すること、②横拘束鉄筋の降伏強度の平方根に比例すること、③コンクリート強度が高くなるにつれて横拘束効果が直線的に減少すること、④横拘束鉄筋による横拘束応力がコンクリートにアーチ状に伝わるため、一部非拘束域を生じること、が考慮して定義された。

3.5 中塚らによる研究

中塚らは、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を定量的に把握するため、拘束力の大きさ及びその与え方、すなわち平均周圧 $\rho_s f_{yh}$ と横拘束鉄筋の設置間隔 s という物理的な意味の明確な要因を変量とする実験的研究を行っている¹¹⁾。実験は、拘束効果が明瞭に得られる円形帯鉄筋を用いた供試体により実施され、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を特徴づける最大圧縮応力 f_{cc} 、最大応力時のひずみ ϵ_{cc} 及び最大応力以降での下降勾配 E_{cs} の各特性値について検討がなされた。その結果、以下の考察ならびに提案式を示している。

(1) 最大圧縮応力 f_{cc}

最大圧縮応力の定式化にあたり、まず最大圧縮応力比 f_{cc}/f_{co} に及ぼす横拘束鉄筋の配置間隔比 s/D の影響に着眼し、最大圧縮応力比は、配置間隔が広くなるに従って直線的に減少することを実験結果をもとに示し、その両者の関係を次式で近似した。

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = \beta_1 - \alpha_1 \left(\frac{s}{D} \right) \quad (3-44)$$

ここで、 β_1 及び α_1 はそれぞれ一様周圧を受ける場合の強度増加率及び拘束力の与え方による強度低減率を表すが、これらは平均周圧 $\rho_s f_{yh}$ 及びコンクリート強度 f_{co} の影響を受ける。実験結果を回帰分析した結果、両係数とこれらとの関係を次のように得ている。

$$\alpha_1 = 5.48 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}} \quad \beta_1 = 1 + 4.41 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}} \quad (3-45)$$

したがって、式(3-45)を式(3-44)に代入し、最大圧縮応力の推定式として次式を提案している。

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 4.40 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}} \left(1 - 1.21 \frac{s}{D} \right) \quad (3-46)$$

(2) 最大応力時のひずみ ϵ_{cc}

最大応力時のひずみ値は、帯鉄筋の設置間隔が狭くなり拘束力がより連続的に与えられるほど大きくなる。そこで、実験結果をもとに、最大応力時のひずみと横拘束鉄筋の設置間隔との関係を線形で仮定し、最大圧縮応力の推定法と同様な手法により、次の推定式を提案している。

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1 + 10000 \frac{\rho_s f_{yh}}{f_{co}^2} \left(1 - 1.11 \frac{s}{D} \right) \quad (3-47)$$

(3) 下降勾配 E_{cs}

応力下降勾配 E_{cs} は、ひずみが $\epsilon_{cc} \sim 2\epsilon_{cc}$ 区間の下降域を最小自乗法により直線近似することで定義し、拘束による下降勾配の改善率 (E_{cs}/E_{co} 、 E_{co} : プレーンコンクリートの下降勾配) に及ぼす帯鉄筋の設置間隔比 s/D の影響を検討している。その結果、下降勾配の改善率と帯鉄筋の設置間隔比との間には

2次曲線的な関係が見られること等を考慮し、次の推定式を提案している。

$$\frac{E_{444}}{E_{co}} = 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{\left(\frac{163}{f_{co}} \right)^2 \rho_{,f_{44}+1}} \right\} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{s}{2D} \right)^2 \right\} \quad (3-48)$$

3.6 藤井らによる研究

藤井らは、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係に関する多くの既往の研究報告の調査を行い、それをもとに、拘束効果の指標となる拘束係数を強度及び変形に対して定義した¹²⁾。そして、この拘束係数を用いて、拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線の定量化を行っている。

(1) 拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線のモデル化

後述する拘束係数を用いて図-3.13に示すような拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線のモデル化を行っている。

- ・ 区間 OA: 原点 O における接線弾性係数が E_i であり、かつ点 A (プレーンコンクリートの最大応力点) を通る二次曲線
 - ・ 区間 AB: 点 A と拘束コンクリートの最大圧縮応力点 B を結ぶ三次曲線とする。
 - ・ 区間 BC: 直線とする。ただし、点 C は圧縮応力が最大値の 20% に低下した時 ($f_c = 0.2 f_{cc}$) の点である。
- 上記のことを数式で示すと次の通りである。

$$\begin{aligned}
 \text{区間 OA} \quad f_c &= E_i \varepsilon_c + \frac{f_{co} - E_i \varepsilon_{co}}{\varepsilon_{co}^2} \varepsilon_c^2 \\
 \text{区間 AB} \quad f_c &= \frac{f_{co} - f_{cc}}{(\varepsilon_{co} - \varepsilon_{cc})^3} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})^3 + f_{cc} \\
 \text{区間 BC} \quad f_c &= f_{cc} - E_{ccc} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \\
 \text{区間 CD} \quad f_c &= 0.2 f_{cc}
 \end{aligned}
 \tag{3-49}$$

ここに、 ε_{co} は 0.0022 とし、 E_i は建築学会の基準の 0.9 倍とし、次式で与えられるものとした。

$$E_i = 189000 \times \sqrt{f_{co}/200} \quad (\text{kgf/cm}^2) \tag{3-50}$$

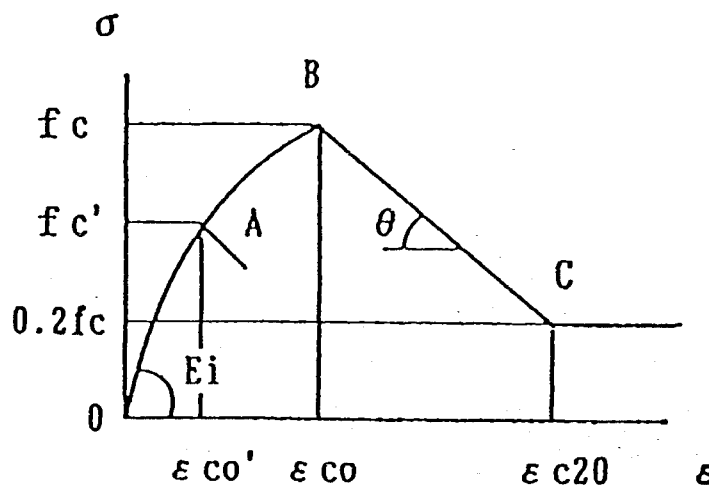


図-3.13 藤井らのモデル化

(2) 拘束係数の定義

拘束コンクリートの拘束効果に影響を及ぼす要因の主なものとして、帯鉄筋の体積比 ρ_s 、間隔 s 、降伏強度 f_{yh} 、プレーンコンクリート強度 f_{co} 、拘束筋形状(円形あるいは角形)、拘束筋の種類(フープあるいはスパイラル)等が挙げられる。そこで、藤井らは、円柱拘束コンクリート及び角柱拘束コンクリートそれぞれに関して、プレーンコンクリートに対する最大圧縮応力の増加率を示す C_f 、最大圧縮応力時のひずみの増加率を示す C_{ϵ} 、圧縮限界ひずみの増加率を示す $C_{\epsilon u}$ の3種類の拘束係数を定義するものとした。そして、既往の研究により提案された式等を参考にしながら、拘束係数を次式で定義した。

・円柱供試体

$$\left. \begin{aligned} C_f &= \rho_s \left(1 - \frac{s}{0.51D} \right) \frac{\sqrt{f_{yh}}}{f_{co}} \\ C_{\epsilon} &= \rho_s \left(1 - \frac{s}{0.95D} \right) \frac{f_{yh}}{f_{co}^2} \\ C_{\epsilon u} &= \frac{f_{co}^2}{\rho_s f_{yh}} \end{aligned} \right\} \quad (3-51)$$

・角柱供試体

$$\left. \begin{aligned} C_f &= \rho_s \left(1 - \frac{s}{D} \right) \\ C_{\epsilon} &= \rho_s \left(1 - \frac{s}{D} \right) \frac{\sqrt{f_{yh}}}{f_{co}^2} \\ C_{\epsilon u} &= \frac{f_{co}^2}{\rho_s f_{yh}} \end{aligned} \right\} \quad (3-52)$$

(3) 拘束効果の定量化

式(3-51)より得られる拘束効果係数と、実験により得られた f_{cc}/f_{co} 、 $\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$ 、 ϵ_{cu}/ϵ_u それぞれとの関係を検討した結果、いずれもほぼ直線関係にあることから、次の実験式を提案した。

・円柱拘束コンクリート

$$\left. \begin{aligned} f_{cc}/f_{co} &= 1.75C_f + 1.02 \\ \epsilon_{cc}/\epsilon_{co} &= 50.0C_{\epsilon} + 1.25 \\ E_{scc} &= 417C_{\epsilon u} - 574 \end{aligned} \right\} \quad (3-53)$$

・角柱拘束コンクリート

$$\left. \begin{aligned} f_{cc}/f_{co} &= 0.065C_f + 1.06 \\ \epsilon_{cc}/\epsilon_{co} &= 702C_{\epsilon} + 1.23 \\ E_{scc} &= 1240C_{\epsilon u} - 2720 \end{aligned} \right\} \quad (3-54)$$

4. 既往の応力-ひずみモデルの試算例

本章では、3章に示した拘束コンクリートの応力-ひずみモデルについて、それぞれのモデルの特性を定量的に比較するために、応力-ひずみ関係の試算を行った。解析条件は表-4.1に示すとおりである。これは、別途実施した拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験¹³⁾に用いた供試体諸元であり、各モデルの試算結果に加え、実験により得られた応力-ひずみ関係とも比較ができるようにした。

表-4.1 解析条件

解 析 条 件		モデル 形状 (mm)	フ ^レ ンク リ ^ー ト強度 (kgf/cm ²)	帯鉄筋			帯鉄筋比 (体積比) (%)
				材質	径	間隔(cm)	
円 形 拘 束	S1	φ 200 h=600	189	SR235	φ 6	15	0.39
	S2					10	0.58
	S3					5	1.17
	S4					2.5	2.33
	S5					1.25	4.66
矩 形 拘 束	S6	200 × 200 h=600	237	SR235	φ 6	15	0.39
	S7					10	0.58
	S8					5	1.17
	S9					2.5	2.33
	S10					1.25	4.66

表-4.2は、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係に支配的な最大圧縮強度、最大圧縮応力時のひずみ、ひずみ軟化域での下降係数の各特性値の計算結果を、断面形状ごとに示したものである。なお、ここで下降係数の実験値は、圧縮応力が最大値からその50%に低減するまでの区間を直線回帰し、その傾きとして定義したものである。

円拘束に対する拘束効果のモデル式として、Manderの式、六車らの式、中塚らの式、藤井らの式の4提案式により試算を行った。これより、最大圧縮応力は、帯鉄筋比の増大とともに、各提案式による評価値間のばらつきが大きくなる傾向がある。また、実験値と比較すると、六車らの式による評価値とよく一致しており、いずれの帯鉄筋比においても、その誤差は10%前後であった。最大圧縮応力時のひずみは、提案式により評価値に大きなばらつきがある。帯鉄筋比の増大に対する変形の向上効果は、特に中塚らの式では大きく評価されていることがわかる。また、実験により得られた最大圧縮応力時のひずみは、Manderの式による評価値と比較すると20~30%程度大きく、他の提案式による評価値に対しては小さくなっており、実験結果をよく推定できていない。下降勾配は、実験値と比較するといずれも評価値は小さいことがわかる。

特に、中塚らの式では、実験値の約1/10であり、これは設計としては危険側の評価である。

矩形拘束に対する拘束効果のモデル式として、修正 Kent 式、Shiekh の式、Mander の式、六車らの式、藤井らの式の5提案式により試算を行った。これより、最大圧縮応力は、いずれの提案式もほぼ同等な評価値を与えており、また、実験値ともよく一致していることがわかる。最大圧縮応力時のひずみは、修正 Kent 式と Shiekh の式は同等の評価値となっており、また、Mander の式と六車らの式の評価値もほぼ等しいことがわかる。各提案式の評価値は、実験値と比較するといずれも小さいが、藤井らの式による評価値と概ね一致している。下降勾配は、提案式により評価値にばらつきがあり、帯鉄筋比の影響の評価も異なっている。また、実験値と比較すると、藤井らの式とよく一致することがわかる。

図-4.1は、応力-ひずみ曲線に及ぼす帯鉄筋比の影響を、各提案式別に示したものである。また、図-4.2は、解析条件別に、各提案式及び実験結果により得られた応力-ひずみ関係を比較して示したものである。これらより、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を精度よく推定するためには、最大圧縮応力及びその時のひずみ、ひずみ軟化域での下降勾配等の特性値を、正しく評価することが重要なポイントと考えられる。

表-4.2 (a) 拘束コンクリートの特性値の試算結果と実験値(円形帯鉄筋)

$f_{co}=189$ (kgf/cm ²)		最大圧縮応力 f_{cc} (kgf/cm ²)			最大圧縮応力時のひずみ ϵ_{cc}			下降勾配 E_{ccc} (kgf/cm ²)			終局ひずみ ϵ_{cu}
解析条件	提案式	実験値 (1)	解析値 (2)	(1)/(2)	実験値 (3)	解析値 (4)	(3)/(4)	実験値 (5)	解析値 (6)	(5)/(6)	解析値 (7)
S1 ($\rho_s = 0.39\%$)	Mander の式	226	202	1.12	0.00331	0.00266	1.24	44646	-	-	0.01340
	六車らの式		207	1.09		0.00294	1.13		10156	4.25	0.00603
	中塚らの式		192	1.18		0.00292	1.13		4314	10.35	-
	藤井らの式		176	1.28		0.00328	1.01		15404	2.90	-
S2 ($\rho_s = 0.58\%$)	Mander の式	249	215	1.16	0.00458	0.00340	1.35	29194	-	-	0.01705
	六車らの式		221	1.13		0.00408	1.12		7942	3.68	0.00789
	中塚らの式		218	1.14		0.00619	0.74		2418	12.07	-
	藤井らの式		192	1.30		0.00472	0.97		10078	2.90	-
S3 ($\rho_s = 1.17\%$)	Mander の式	311	256	1.21	0.00586	0.00555	1.06	10060	-	-	0.02564
	六車らの式		264	1.18		0.00748	0.78		5858	1.72	0.01348
	中塚らの式		295	1.05		0.01597	0.37		963	10.45	-
	藤井らの式		242	1.29		0.0090	0.65		4752	2.12	-
S4 ($\rho_s = 2.33\%$)	Mander の式	413	324	1.27	0.01303	0.00916	1.42	4012	-	-	0.00492
	六車らの式		349	1.18		0.01430	0.91		5122	7.83	0.02467
	中塚らの式		449	0.92		0.03555	0.37		417	9.62	-
	藤井らの式		342	1.21		0.01764	0.74		2089	1.92	-
S5 ($\rho_s = 4.66\%$)	Mander の式	611	425	1.44	0.02184	0.01451	1.51	-	-	-	0.05410
	六車らの式		521	1.17		0.02793	0.78		4936	-	0.04703
	中塚らの式		756	0.81		0.0747	0.29		192	-	-
	藤井らの式		542	1.13		0.03486	0.63		757	-	-

表-4.2 (b) 拘束コンクリートの特性値の試算結果と実験値(矩形帯鉄筋)

$f_{co}=237$ (kgf/cm ²)		最大圧縮応力 f_{cc} (kgf/cm ²)			最大圧縮応力時のひずみ ϵ_{cc}			下降勾配 E_{cc} (kgf/cm ²)			終局ひずみ ϵ_{cu}
解析条件	提案式	実験値 (1)	解析値 (2)	(1)/(2)	実験値 (3)	解析値 (4)	(3)/(4)	実験値 (5)	解析値 (6)	(5)/(6)	解析値 (7)
S6 ($\rho_s = 0.39\%$)	修正 Kent 式	249	246	1.01	0.00336	0.00298	1.13	62658	23265	2.69	—
	Shiekh の式		245	1.02		0.00192	1.75		37039	1.69	—
	Mander の式		241	1.03		0.00218	1.54		—	—	0.01160
	六車らの式		243	1.02		0.00196	1.71		19569	3.20	0.00448
	藤井らの式		253	0.98		0.00282	1.19		71988	0.87	—
S7 ($\rho_s = 0.58\%$)	修正 Kent 式	251	251	1.00	0.00387	0.00212	1.83	43095	15632	2.76	—
	Shiekh の式		252	1.00		0.00197	1.99		20712	2.08	—
	Mander の式		246	1.02		0.00239	1.62		—	—	0.01624
	六車らの式		248	1.01		0.00226	1.71		15733	2.74	0.00511
	藤井らの式		256	0.98		0.00309	1.25		47085	0.92	—
S8 ($\rho_s = 1.17\%$)	修正 Kent 式	264	265	1.00	0.00397	0.00224	1.77	19968	6958	2.87	—
	Shiekh の式		266	0.99		0.00209	1.90		7739	2.58	—
	Mander の式		262	1.01		0.00303	1.31		—	—	0.02734
	六車らの式		262	1.01		0.00313	1.27		9833	2.03	0.00708
	藤井らの式		265	1.00		0.00387	1.03		22183	0.90	—
S9 ($\rho_s = 2.33\%$)	修正 Kent 式	315	293	1.08	0.00514	0.00247	2.08	15551	2913	5.34	—
	Shiekh の式		285	1.11		0.00223	2.30		2927	5.31	—
	Mander の式		291	1.08		0.00427	1.20		—	—	0.03846
	六車らの式		290	1.09		0.00487	1.06		5922	2.63	0.01102
	藤井らの式		282	1.12		0.00544	0.94		9731	1.60	—
S10 ($\rho_s = 4.66\%$)	修正 Kent 式	344	349	0.99	0.00881	0.00294	3.00	2477	1256	1.97	—
	Shiekh の式		310	1.11		0.00243	3.63		1125	2.20	—
	Mander の式		346	0.99		0.00662	1.33		—	—	0.06062
	六車らの式		348	0.99		0.00836	1.05		3971	0.62	0.01892
	藤井らの式		318	1.08		0.00858	1.03		3506	0.71	—

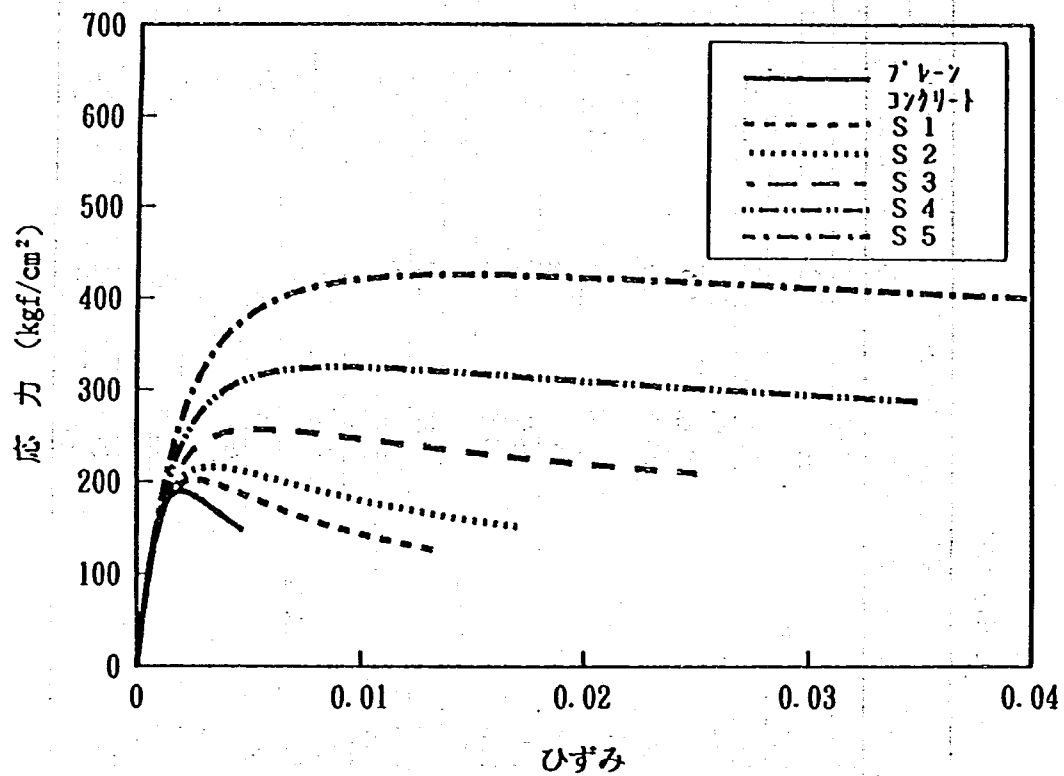


図-4.1 (a) Mander の式による試算結果(円形帯鉄筋)

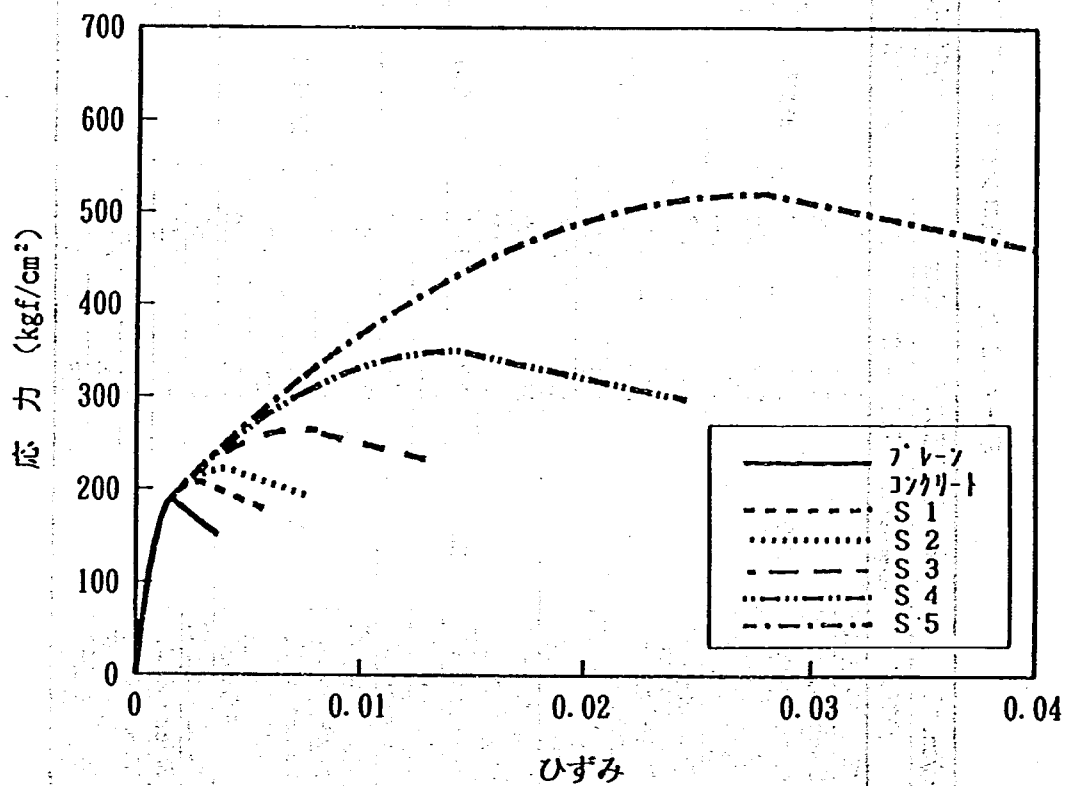


図-4.1 (b) 六車らの式による試算結果(円形帯鉄筋)

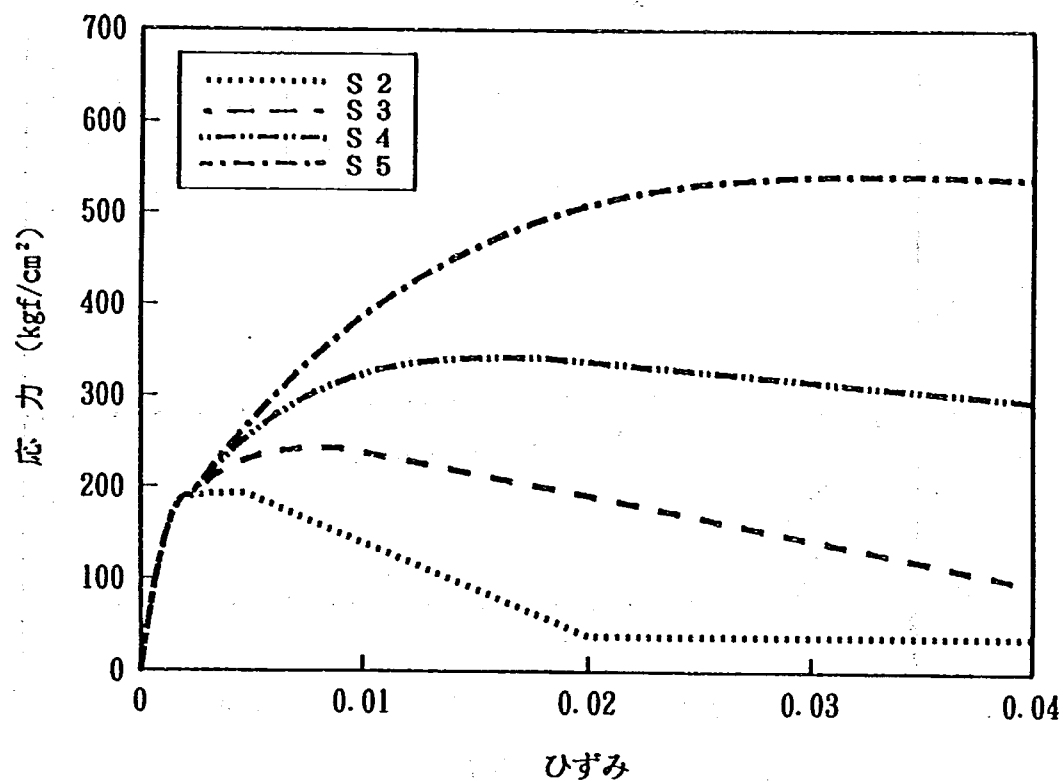


図-4.1 (c) 藤井らの式による試算結果(円形帯鉄筋)

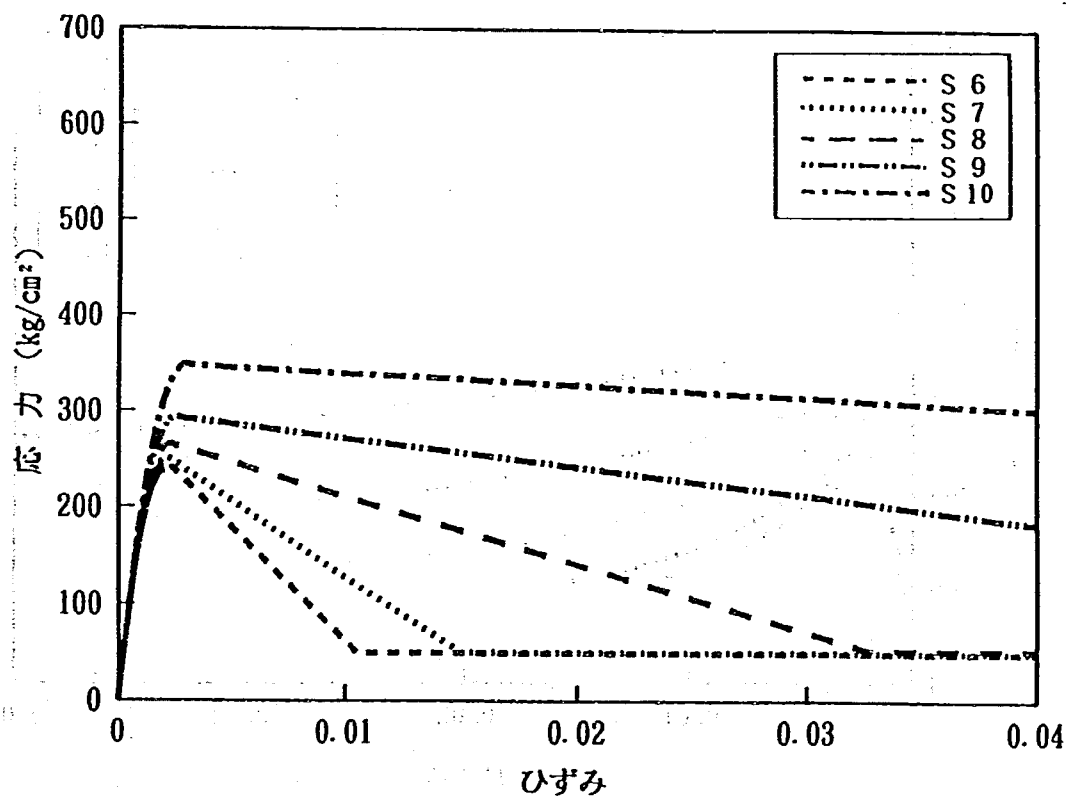


図-4.1 (d) 修正 Kent, Park の式による試算結果(矩形帯鉄筋)

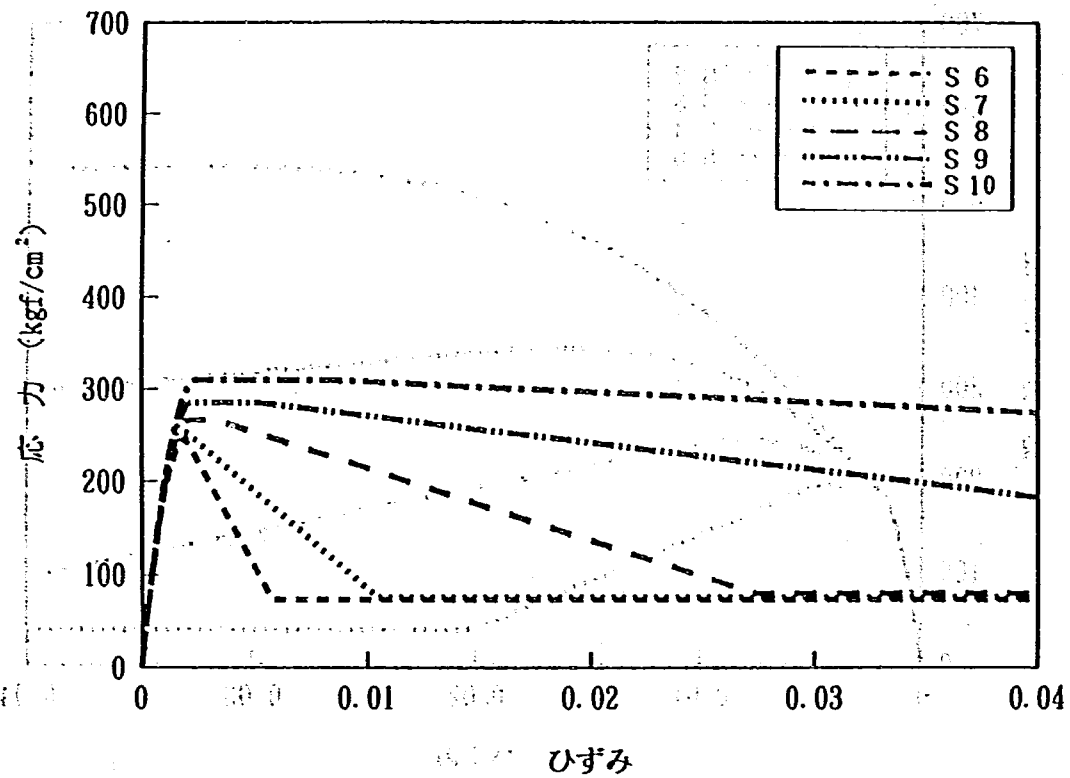


図-4.1 (e) Sheikh の式による試算結果(矩形帯鉄筋)

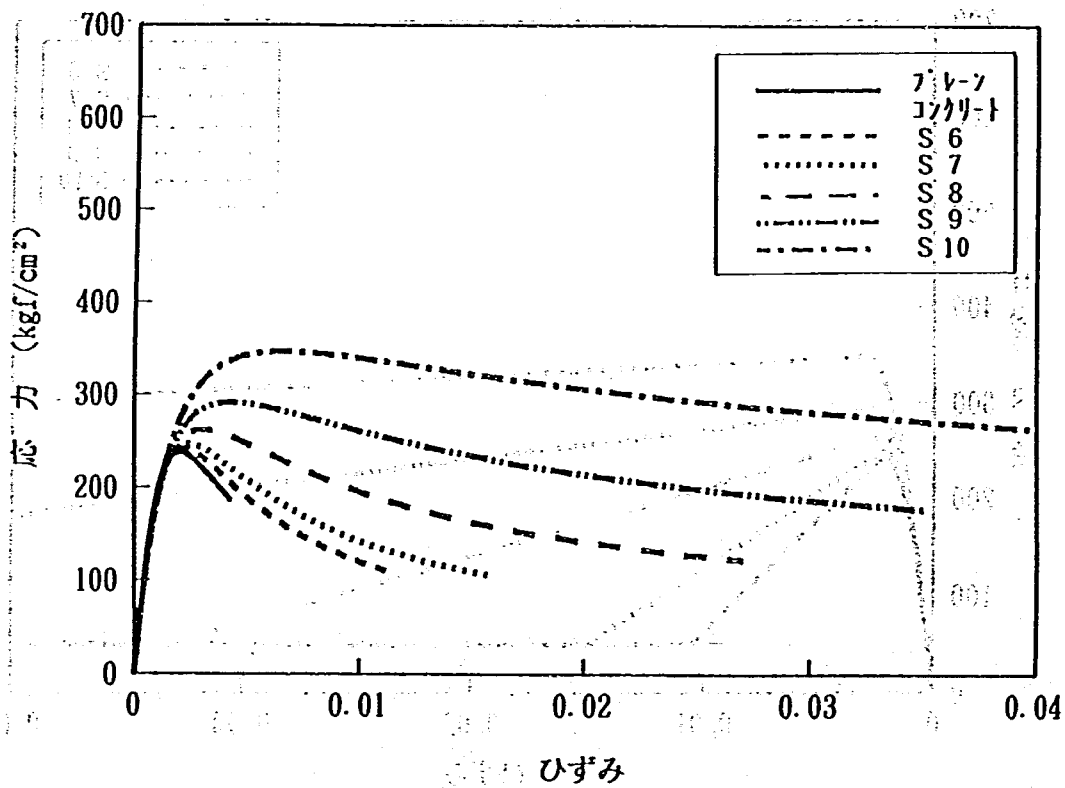


図-4.1 (f) Mander の式による試算結果(矩形帯鉄筋)

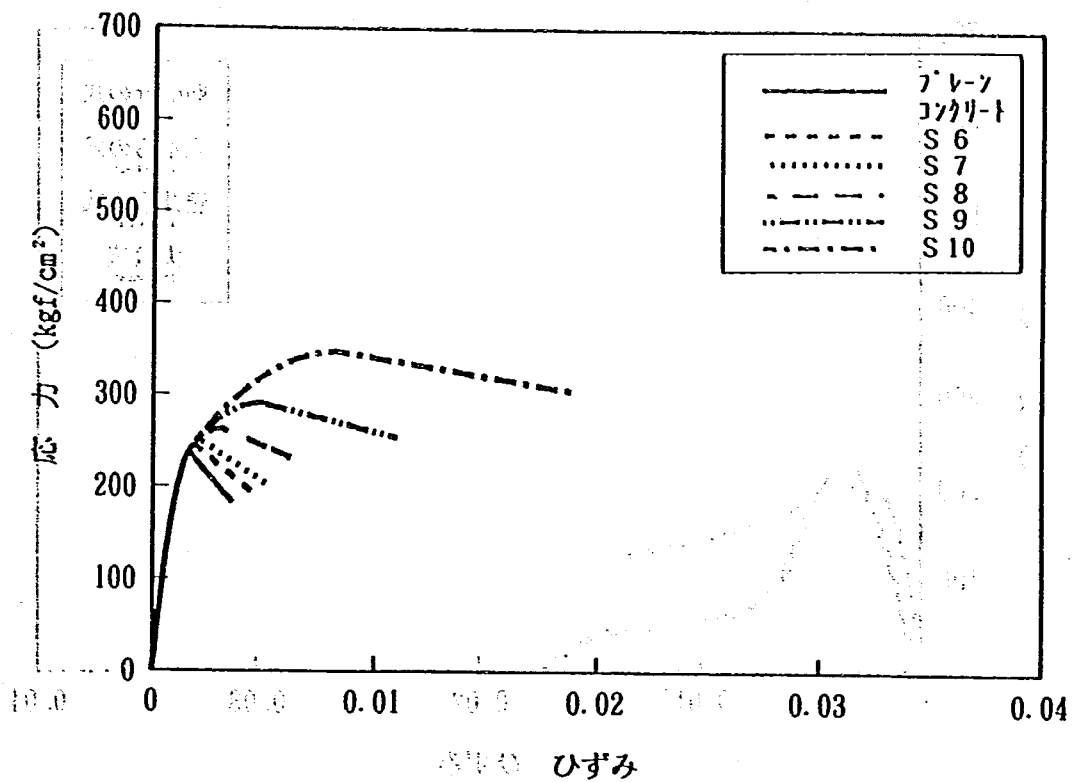


図4.1 (g) 六車らの式による試算結果(矩形帯鉄筋)

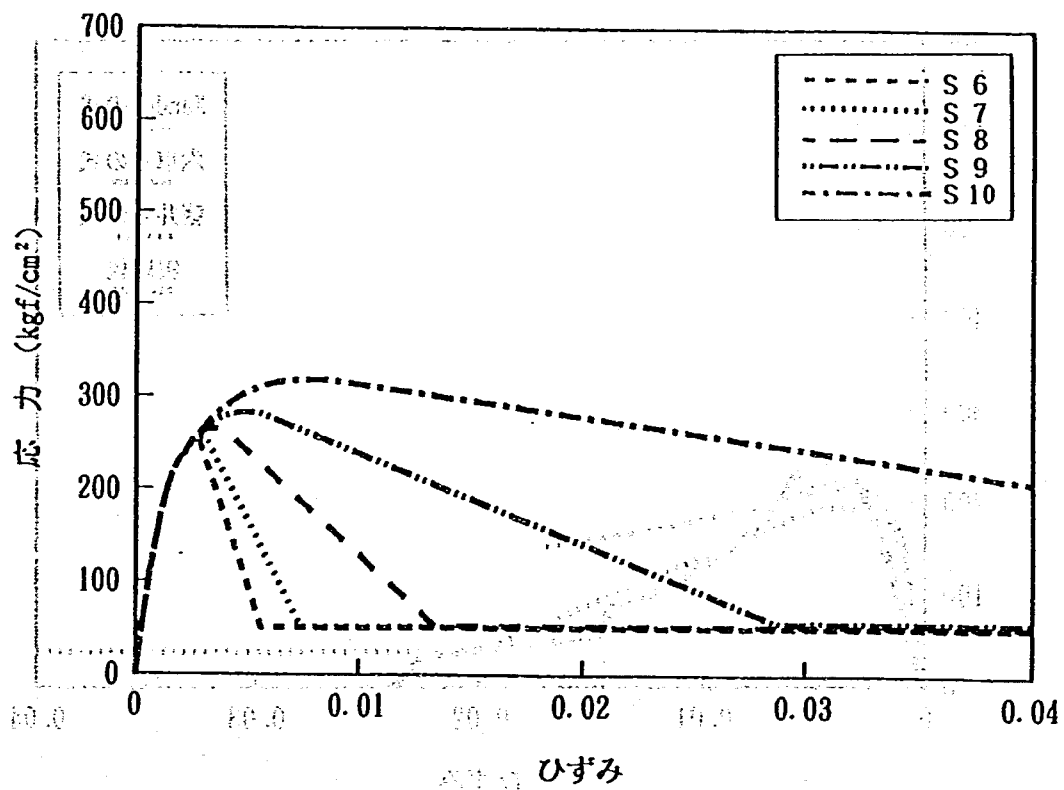


図4.1 (h) 藤井らの式による試算結果(矩形帯鉄筋)

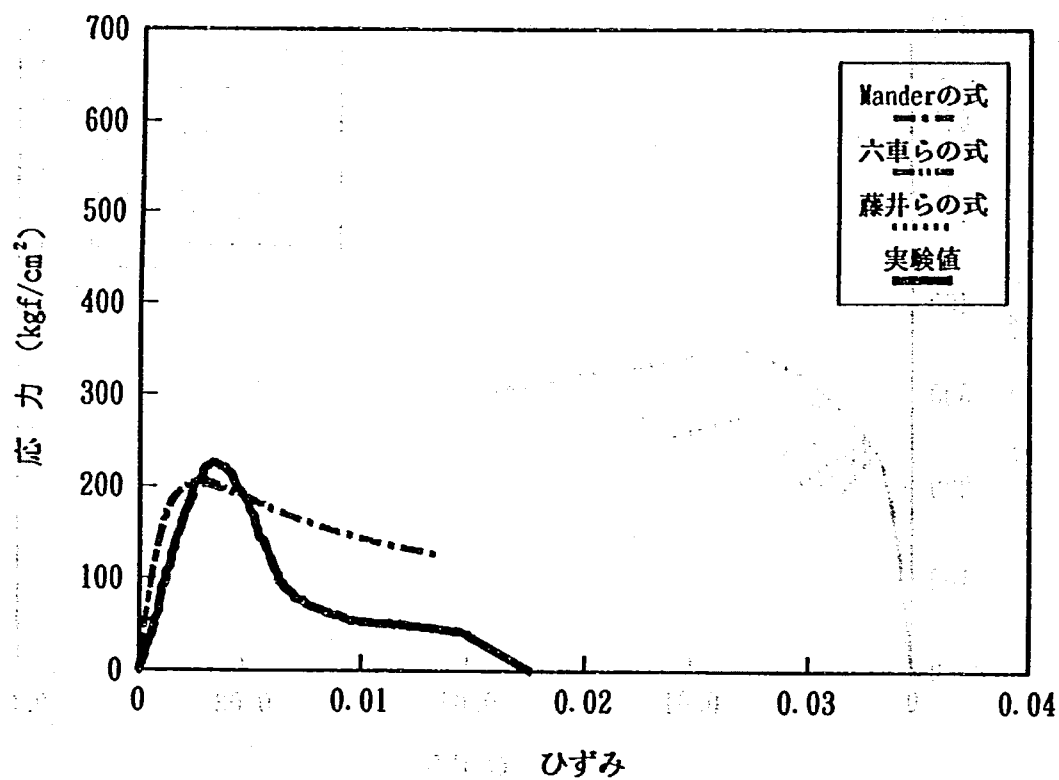


図-4.2 (a) 解析条件 S1 に対する各試算結果と実験結果

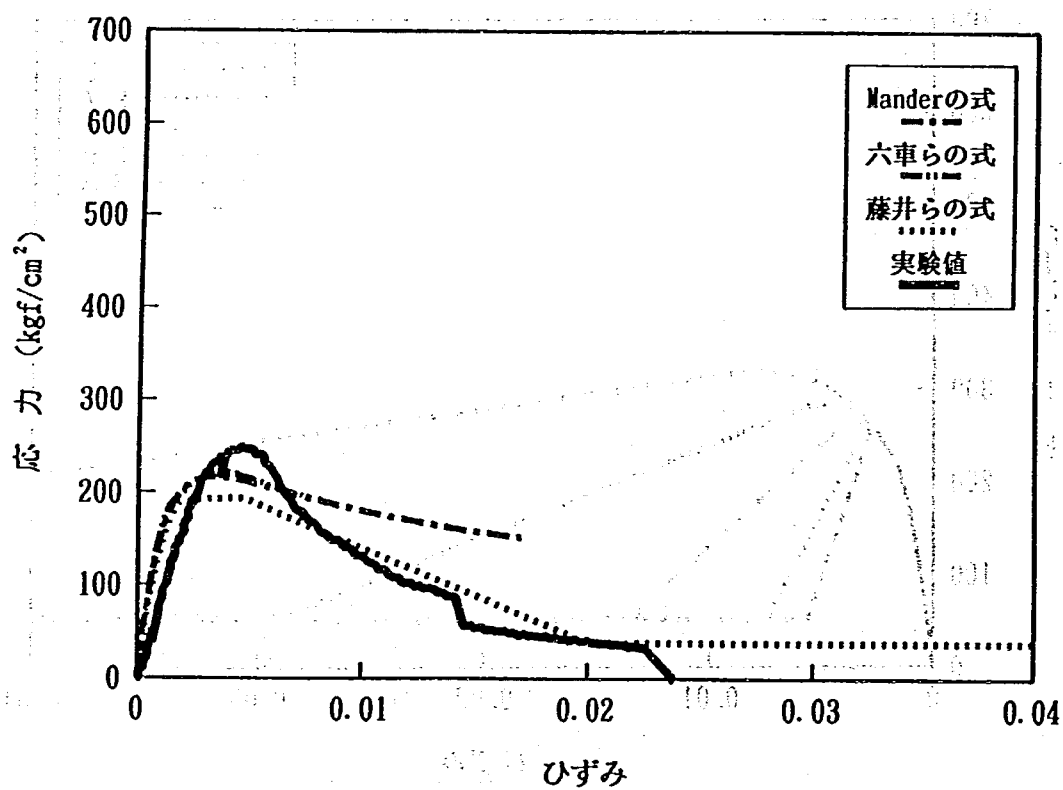


図-4.2 (b) 解析条件 S2 に対する各試算結果と実験結果

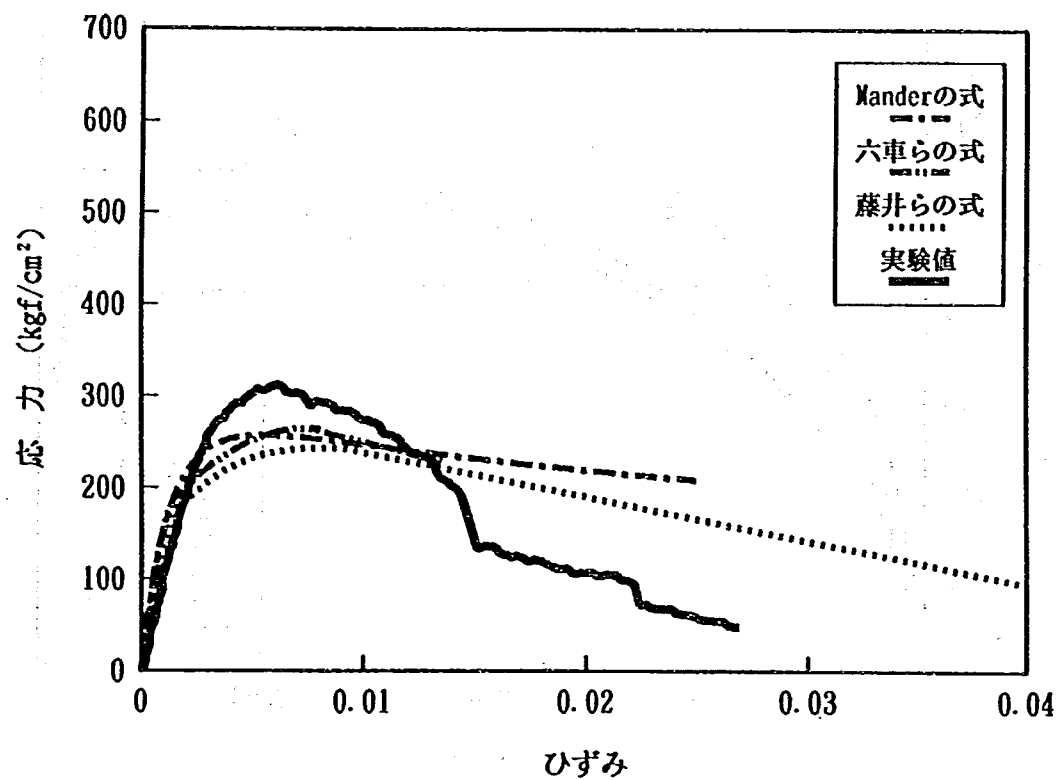


図-4.2 (c) 解析条件 S3 に対する各試算結果と実験結果

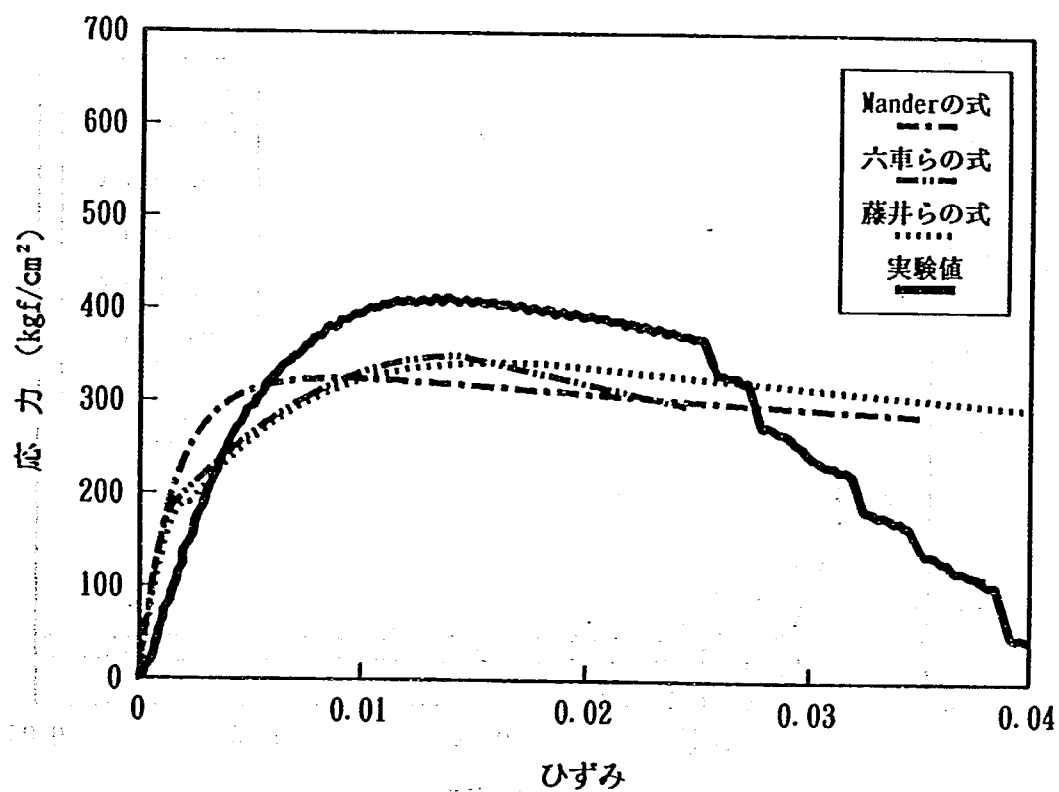


図-4.2 (d) 解析条件 S4 に対する各試算結果と実験結果

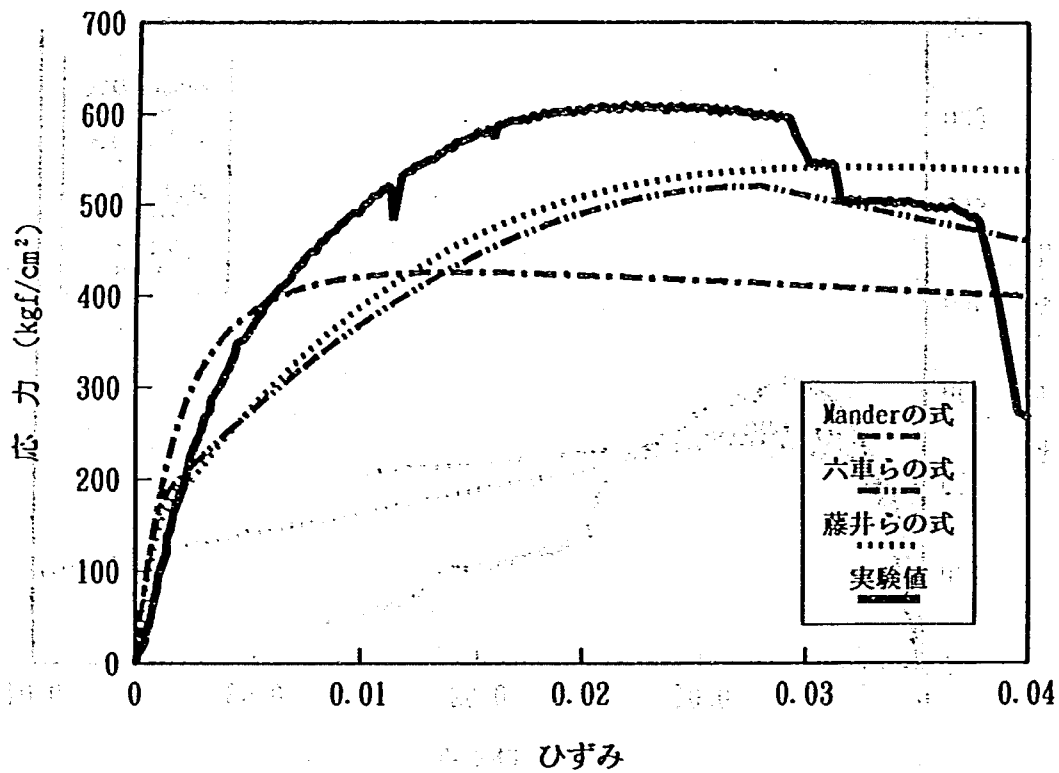


図-4.2 (e) 解析条件 S5 に対する各試算結果と実験結果

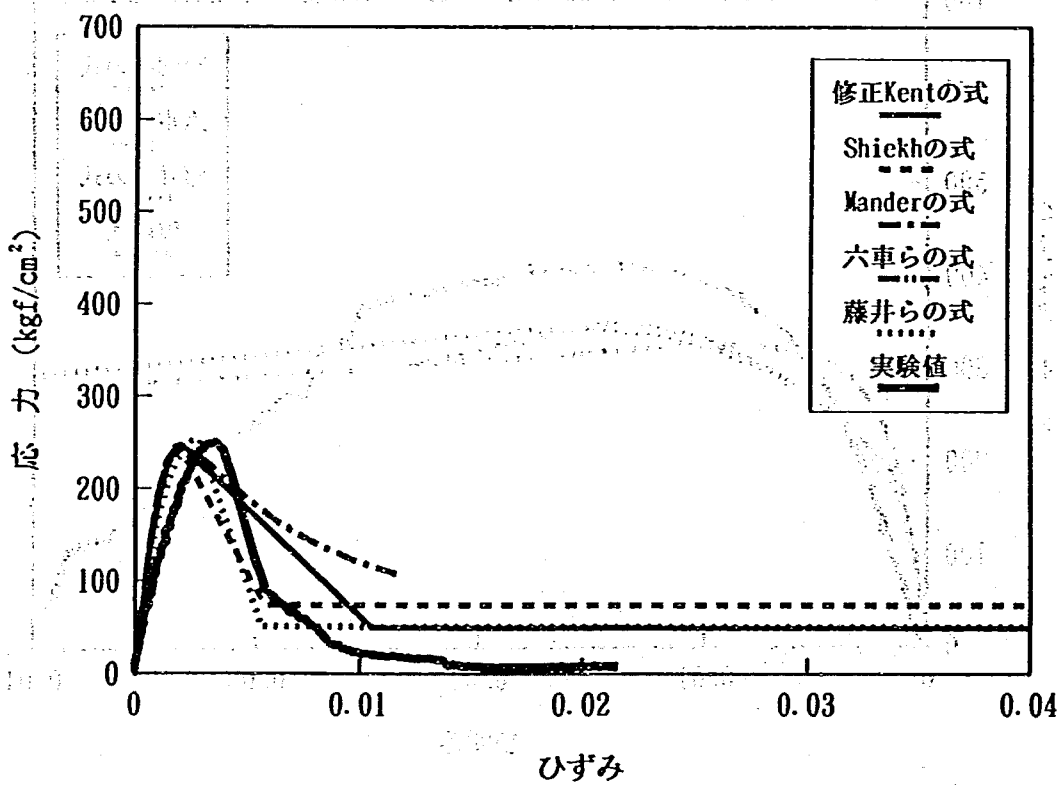


図-4.2 (f) 解析条件 S6 に対する各試算結果と実験結果

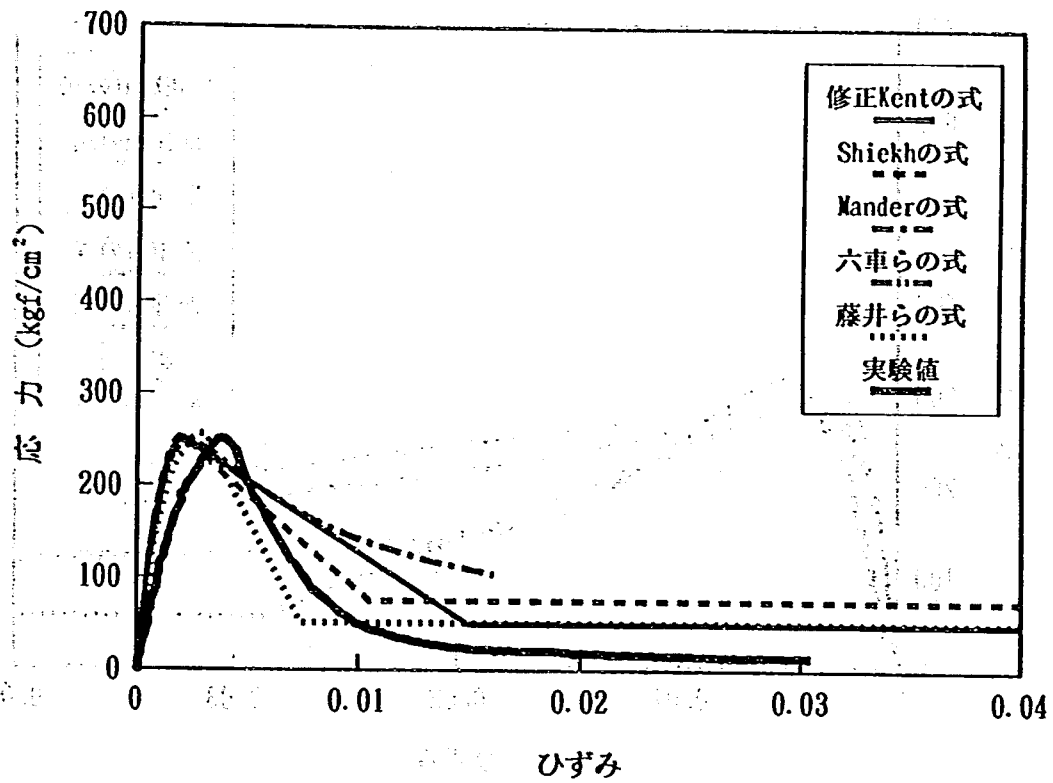


図-4.2 (g) 解析条件 S7 に対する各試算結果と実験結果

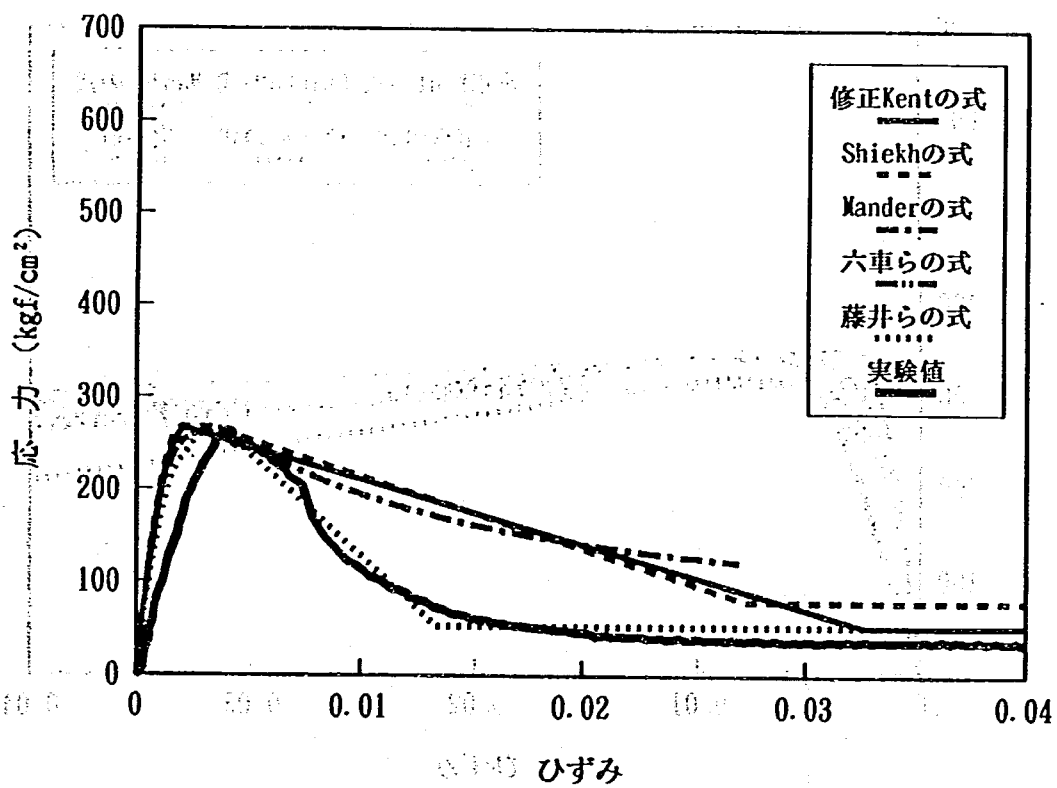


図-4.2 (h) 解析条件 S8 に対する各試算結果と実験結果

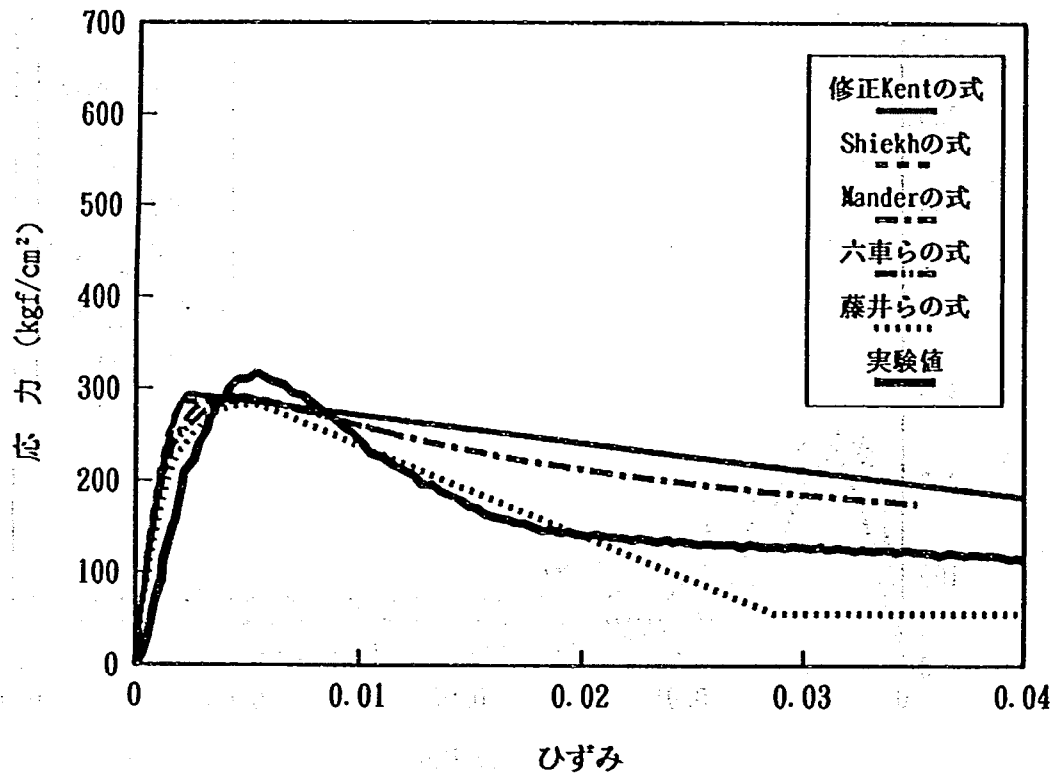


図-4.2 (i) 解析条件 S9 に対する各試算結果と実験結果

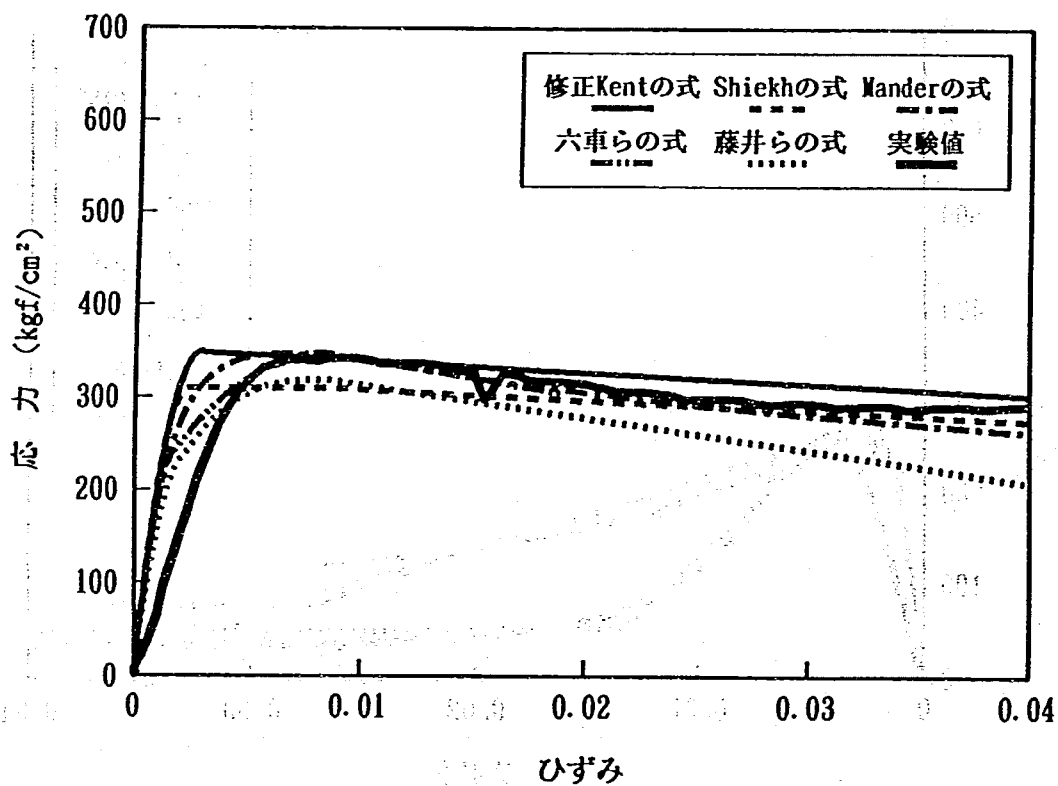


図-4.2 (j) 解析条件 S10 に対する各試算結果と実験結果

5. まとめ

本研究では、帯鉄筋によるコンクリートの拘束効果を考慮した鉄筋コンクリート橋脚のじん性率計算法の確立を目的として、その重要なポイントとなる拘束コンクリートの応力-ひずみ関係について、耐震設計用の提案式を開発していくものであり、まずその基礎的資料を得るために、国内外の既往の提案式に関する文献調査を行い、その概要を示したものである。調査結果をまとめると、次の通りである。

(1) 応力-ひずみ曲線のモデルとしては、二次曲線と直線を組み合わせた Kent, Park 式タイプのものと、分数関数を用いた Popovics 式タイプの 2 つに大きく分けられる。

(2) 拘束効果に影響を及ぼす帯鉄筋に関する代表的な要因を列举すると、次の通りである。

① 帯鉄筋比、② 帯鉄筋の降伏強度、③ プレーンコンクリート強度、④ 帯鉄筋の設置間隔、⑤ 帯鉄筋の巻径、⑥ 帯鉄筋の形状

(3) 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、最大圧縮応力時のひずみ、応力低下域での下降勾配、応力低下後の残存耐力である。そして、これらの特性値に対する各提案式の評価方法まとめると表-5.1 の通りである。

(4) 各提案式を適用して定量化される応力-ひずみ曲線と、小型模型供試体による拘束コンクリートの圧縮載荷実験の結果を比較すると、いずれの提案式も、全ての拘束条件下において、実験結果をよく推定できているとは言い難い。拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を精度よく推定するためには、上述の特性値を正しく評価することが重要なポイントと考えられる。

表-5.1 拘束コンクリートに対する応力-ひずみモデル

提案式	応力-ひずみモデル			対象断面形状	拘束効果の特性値
	応力上昇域	応力下降域	残存応力		
Kent, Park	二次放物線	直線	最大応力の 20%	矩形	f_{cc}, ϵ_{cc}, Z
Sheikh	二次放物線 (応力一定域有)	直線	最大応力の 30%	矩形	$f_{cc}, \epsilon_{cc1}, \epsilon_{cc2}, Z$
Mander	分数関数			円形、矩形、壁式	$f_{cc}, \epsilon_{cc}, \epsilon_{cu}$
六車	二次放物線 + 二次放物線	直線	——	円形、矩形	$f_{cc}, \epsilon_{cc}, f_{cu}, \epsilon_{cu}$
中塚	——	——	——	円形	$f_{cc}, \epsilon_{cc}, E_{des}$
藤井	二次放物線 + 三次放物線	直線	最大応力の 20%	円形、矩形	$f_{cc}, \epsilon_{cc}, E_{des}$

注) f_{cc} : 最大圧縮応力

ϵ_{cc} : 最大圧縮応力時のひずみ、 $\epsilon_{cc1}, \epsilon_{cc2}$: 最大圧縮応力時の最小及び最大ひずみ

Z : 下降勾配係数、 E_{des} : 下降勾配

参 考 文 献

- 1)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、平成2年2月
- 2)土木学会：コンクリート標準示方書設計編、平成3年版
- 3)Popovics, S.: A Review of Stress-Strain Relationships for Concrete, ACI Journal, Proceedings V.67, Mar. 1970
- 4)Popovics, S.: A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, 3-4, Sep., 1973
- 5)Wang, P.T., Shah, S.P., Naaman, A.E.: Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression, ACI Journal V.75, Nov. 1978
- 6)Sargin, M.: Stress-Strain Relationships for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1971
- 7)Kent, D.C. and Park, R.: Flexural Members with Confined Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.97, No.ST7, Jul. 1971
- 8)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, Dec. 1982
- 9)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, Aug. 1988
- 10)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、Vol.34、昭和55年
- 11)中塚佳他：円形補強筋をもつコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係について、セメント技術年報、Vol.36、昭和57年
- 12)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、昭和63年
- 13)川島一彦、運上茂樹、飯田寛之：鉄筋コンクリート橋脚のじん性率算定に及ぼす拘束の影響に関する研究(その1)小型拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験、土木研究所資料第3208号、平成5年6月

鉄筋コンクリート橋脚のじん性率算
定に及ぼす拘束の影響に関する研究

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3209号
平成5年7月 (1993)

川島 一彦
星隅 順一
長屋 和宏

要旨： 現行の道路橋示方書V耐震設計編によると、鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の算定に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係の規程においては、橋脚のじん性に大きな影響を及ぼす横拘束鉄筋に関する因子がなく、その拘束効果が耐震設計に反映されていない状況にある。そこで、本研究では、鉄筋コンクリート橋脚のじん性に及ぼす横拘束鉄筋の影響の評価手法を開発することを目標とするものであり、まずその基礎となる横拘束を受ける鉄筋コンクリートの構成則について、既往の研究の文献調査を行った。そして、各提案式により定量化される応力-ひずみ曲線の試算を行い、別途実施した拘束コンクリート柱の圧縮積荷実験の結果と比較した。

キーワード：鉄筋コンクリート橋脚、じん性、拘束コンクリートの応力-ひずみ関係

郵便はがき

切手
はって
下さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

地震防災部耐震研究室

行

No. 029

No. 029

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3209号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印