

# 論文 円形フープと角フープ組合せ RC 柱の軸圧縮性状の検討

丸田 誠\*1・鈴木 紀雄\*2

要旨：円形補強筋と角形補強筋の各拘束効果について定量的に評価できる野口・飯塚の提案を見直し、最大圧縮強度算定法を提案した。また円形補強筋と角形補強筋を組み合わせたRC柱の横補強コンクリートの最大強度算出法の提案も行い実験結果との比較検討を通し、その有効性を検証した。円・角形組合せ横補強コンクリートの応力度-ひずみ関係は、最大強度に提案モデルを用いその形状については、崎野モデルを用いたもので最大強度までは、実験結果との対応をみた。それ以降の下り勾配では実験結果との一致は見られず今後の課題である。

キーワード：RC柱、拘束コンクリート、角形補強筋、円形補強筋、軸圧縮強度、 $\sigma-\epsilon$

## 1. はじめに

数多くの研究者によってRC柱の拘束効果に関する報告が行われている。特に近年、RC材料の高強度化に伴う多くの研究・開発が行われ、崎野らの研究<sup>1)・2)</sup>等で高強度材料を用いた正方形断面、円形断面高強度柱の軸方向性状についても明らかになってきている。拘束効果は円形補強筋（円形フープ）と角形補強筋（角フープ）では異なると言われているが、筆者等が対象としている高層RC柱の様に、円形補強筋と角形補強筋を組み合わせて用いた場合については検討例がない。本研究では野口・飯塚の提案<sup>3)</sup>を基に横補強コンクリートのモデルを開発し、昨年度報告した中心軸圧縮実験<sup>3)</sup>との適合性の検討を行った。

## 2. 横補強コンクリートの最大圧縮強度

横補強コンクリートの $\sigma-\epsilon$ モデル・最大強度についての数多くの研究者により提案がなされている。特にその最大圧縮強度の評価が、 $\sigma-\epsilon$ モデルの形状に与える影響が大きい場合が多い。そこで、円形及び角形補強筋の効果をそれぞれ定量的に評価できる野口・飯塚モデルの最大圧縮強度についてその考え方を見直した。また、円形補強筋と角形補強筋を組合せた場合の柱の最大圧縮強度を提案する。

### 2.1 野口・飯塚モデルの最大圧縮強度

野口・飯塚モデルの基本的考えを以下に示す。

コンクリートの最大圧縮強度  $f_{c \max}$  は、多軸応力状態での圧縮-圧縮応力下での割り増し係数または、圧縮-引張応力下の低減係数  $\beta_m$  と繰り返し荷重を受けるコンクリートの損傷係数  $\beta_d$  をブレンコンクリートの一軸強度  $f_c$  に乗じたものとしている。

$$f_{c \max} = f_c \cdot \beta_m \cdot \beta_d \quad \dots \dots (1)$$

多軸応力下の係数  $\beta_m$  は、圧縮-圧縮応力下では  $\beta_{m1}$ 、圧縮-引張応力下では  $\beta_{m2}$  とした。

$$\beta_m = (\beta_{m1}, \beta_{m2}) \quad \dots \dots (2)$$

圧縮-圧縮応力下では  $\beta_{m1}$  は、2軸応力下の破壊条件より求まる  $\beta_{m12}$  と低3軸圧縮拘束を受ける横補強コンクリートの最大耐力より求まる  $\beta_{m13}$  のいずれか小さい方の係数としている。

$$\beta_{m1} = \min(\beta_{m12}, \beta_{m13}) \quad \dots \dots (3)$$

$$\beta_{m12} : \text{Kuperの2軸応力下の破壊規準}^{5)} \text{から決まる値 } \beta_{m12} = (1+3.65\alpha) / (1+\alpha)^2$$

$$\alpha : \sigma_1 / \sigma_2 \text{ (1次、2次主応力の比)}$$

$\beta_{m13}$  : 低3軸圧縮拘束を受ける横補強コンクリートの圧縮強度係数

\*1 鹿島建設(株) 技術研究所(正会員)

\*2 鹿島建設(株) 小堀研究室・工博(正会員)

低3軸圧縮拘束を受ける横補強コンクリートの圧縮強度係数  $\beta_{m13}$  の算出法

横補強コンクリートの概要を図-1に示す。拘束コンクリートと非拘束コンクリートの圧縮特性の和を、横補強筋によるRC断面の有効拘束比を用いて  $\beta_{m13}$  を算出している。横補強筋断面の非拘束部分の面積及び横補強筋間の非拘束部分の面積は、横補強筋位置に横補強筋の降伏応力を作用させたFEM解析に基づき近似的に表現している(図-2参照)。

$$A_{uc1} = 0.1C^2 \quad A_{uc2} = 0.2S^2 \quad \dots (4)$$

$A_{uc1}$ : 横補強筋断面の非拘束部分の面積

$A_{uc2}$ : 横補強筋間の非拘束部分の面積

横補強コンクリートの有効拘束面積  $A_{cn}$  は以下の様に決定されている。

$$A_{cn} = \min(A_{c1}, A_{c2}) \dots (5)$$

$A_{c1}$ : 横補強筋断面の有効拘束面積(水平断面)       $A_{c2}$ : 横補強筋間有効拘束面積(鉛直断面)

<横補強筋断面の有効拘束面積(水平断面)>

[円形補強筋]

$$A_{c1} = \pi (d - 0.2d)^2 / 4$$

[角形補強筋]

$$A_{c1} = (B - 0.2B)(H - 0.2H) \dots (6)$$

<横補強筋間有効拘束面積(鉛直断面)>

[円形補強筋]

$$A_{c2} = S(d - 0.4S)$$

[角形補強筋]

$$A_{c2} = S(H - 0.4S) \dots (7)$$

横補強筋によるコンクリートへの拘束効果現象を表すために、等価均等側圧  $f_e$  を考えている。

$f_e$  = 横補強筋の降伏応力 / 横補強筋によるコンクリートの有効拘束面積

$$[\text{円形補強筋}] \quad f_e = 2A_w \cdot f_y / A_{cn} \quad [\text{角形補強筋}] \quad f_e = A_w \cdot f_y / A_{cn} \dots (8)$$

$A_w$ : 横補強筋断面積       $f_y$ : 横補強筋降伏強度       $A_{cn}$ : 横補強コンクリートの有効拘束面積

ここで、角形補強筋の拘束効果は円形補強筋の1/2としている。

横補強筋による低3軸圧縮拘束コンクリートの最大圧縮強度  $f_{c2}$  は等価均等側圧想定での簡略Ottosen

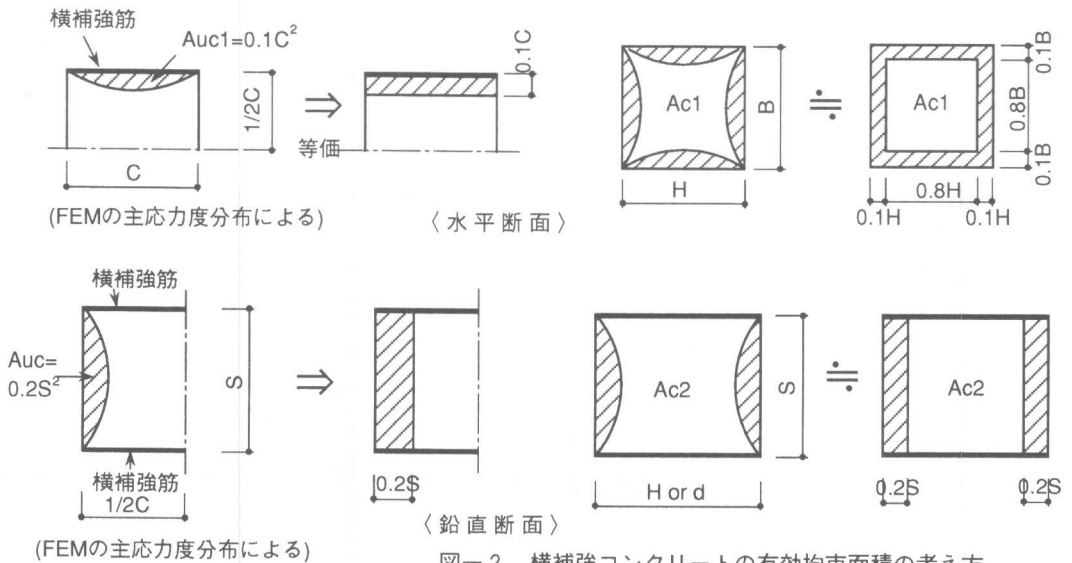


図-2 横補強コンクリートの有効拘束面積の考え方

破壊規準式<sup>5)</sup>より求めている。

$$f_{c2} = f_c \cdot \exp(a (f_e / f_c)^b) \quad \dots \dots (9)$$

ここで  $a = 3.3$ ,  $b = 0.8$ ,  $0 \leq \sigma_2 = \sigma_3 = f_e / f_c \leq 0.15$ ,  $200 \leq f_c \leq 1000$  (kgf/cm<sup>2</sup>)

横補強コンクリートの最大圧縮強度  $\sigma_{cf}$  は、RC断面の有効拘束比  $\beta$  を用いた無補強コンクリートの最大圧縮強度  $f_c$  と拘束コンクリートの最大圧縮強度  $f_{c2}$  の累加として表している。

$$\sigma_{cf} = f_{c2} \cdot \beta + f_c (1 - \beta) \quad \dots \dots (10)$$

[円形補強筋]  $\beta = A_{cn} / (\pi d^2 / 4)$       [角形補強筋]  $\beta = A_{cn} / (B \cdot H)$        $\dots (11)$

低3軸圧縮拘束を受ける横補強コンクリートの圧縮強度係数  $\beta_{m13}$  は、横補強コンクリートの最大圧縮強度をシリンダーの一軸圧縮強度で除して求められている。

$$\beta_{m13} = \sigma_{cf} / f_c \quad \dots \dots (12)$$

## 2.2 修正モデルの最大圧縮強度

2.1 で示した野口・飯塚モデルの修正を行い、次いで円形・角形補強筋の混在した柱への適用を考える。ここで修正を考える部分は低3軸圧縮拘束コンクリートの強度係数を求める際に用いる有効拘束面積、及び拘束部分と非拘束部分を足し合わせる際の断面の決め方の部分である。概要は図-3参照。

[共通]

①等価均等側圧  $f_e$  を求めるための有効拘束断面は、鉛直断面で行う。

②拘束部分と非拘束部分を足し合わせる際に用いる  $\beta$  (式(11)) の算定は水平断面で行う。

[円形補強筋]

野口・飯塚のFEM解析によると、鉛直断面の横補強筋間の中間部分の非拘束部分は  $0.2 S^2$  である。従って鉛直方向の有効拘束面積  $A_c$  と  $f_e$  は次式となる。

$$A_c = S d - 0.4 S^2 \quad \dots \dots (13)$$

$$f_e = 2 A_w \cdot f_y / A_c \quad \dots \dots (14)$$

軸方向耐力が最小となるのは、拘束部分が最小の横補強筋間の中間水平断面なので、この断面で有効拘束比を求める。

$$A_{cn} = (d - 0.6 S)^2 \pi / 4 \quad \beta = A_{cn} / (\pi d^2 / 4) \quad \dots \dots (15)$$

[角形補強筋]

有効断面積は野口・飯塚のFEM解析を基本に図-3に示す様に定める。

鉛直方向の有効拘束面積を  $A_c$  とし  $f_e$  を求める。

$$A_c = (B - 0.3 B) S - 0.4 S^2 \quad \dots \dots (16)$$

$$f_e = A_w \cdot f_y / A_c \quad \dots \dots (17)$$

横補強筋の中間部分の水平断面は

$$A_{cn} = B \cdot H - 4 (0.15 B + 0.3 S) B / \pi - 4 (0.15 H + 0.3 S) H / \pi \quad \beta = A_{cn} / (B H) \quad \dots (18)$$

[丸フープと角フープを併用した場合]

角形補強筋と円形補強筋で囲まれた部分は、図-4に示す様に円・角補強筋間で2軸応力状態となる。つまり、軸方向力と一方向水平力の2軸状態なのでKupferの2軸応力下の破壊規準<sup>5)</sup>から

$$f_{c2} = f_c \cdot (1 + 3.65 f_e / f_{c2}) / \{ (1 + f_e / f_{c2})^2 \} \quad \text{よって}$$

$$f_{c2} = 0.5 \cdot \{ (f_c - 2 f_e) + \sqrt{(f_c - 2 f_e)^2 - 4 (f_e^2 - 3.65 f_c \cdot f_e)} \} \quad \dots (19)$$

野口・飯塚の提案では、円・角形補強筋ともKupferの2軸圧縮強度と簡略化Ottosenの低3軸圧縮強度の小さい方を最大強度としているが、ここでは円形補強筋で囲まれた部分は低3軸圧縮強度を採用し、角形補強筋と円形補強筋の間は2軸圧縮強度を採用する。基本的に同径・同強度・同ピッチで配筋された柱で円形補強筋・角形補強筋並用の場合、拘束力は円形補強筋の方が角形補強筋より大きい。円

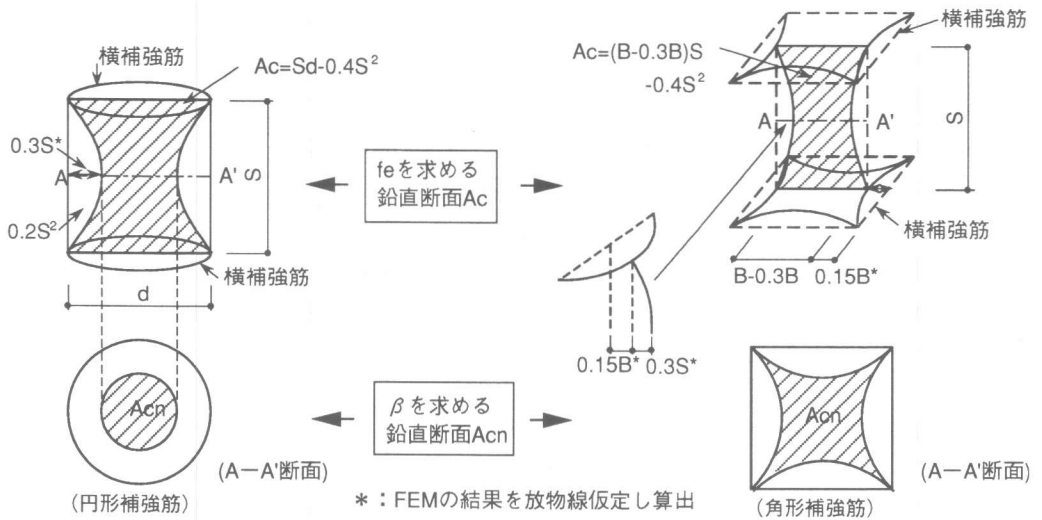


図-3 修正モデルの有効拘束面積の考え方

形補強筋と角形強筋を併用した場合の柱の軸耐力は円形補強筋による拘束強度と角形補強筋・円形補強筋間の囲われた部分の拘束強度の和として表す。ただし、角形補強筋で囲まれた円形補強筋では、その拘束効果は円形補強筋のみの場合より上昇することも考えられるので、等価均等側圧  $f_e$  を円形補強筋のみの  $f_e$  の1.5倍と仮定する場合式(20)と式(14) [ $f_e = 2 A_w \cdot f_y / A_c$ ] で評価する場合の両方で実験結果と比較検討する。

$$f_e = 3 A_w \cdot f_y / A_c \quad \dots \dots (20)$$

ここで、円形補強筋で囲まれた部分と角形補強筋と円形補強筋の間の部分では図-5に示すようにその各部分の最大強度  $\sigma_{cf}$  時のひずみ  $\kappa \epsilon_0$  は若干異なっていると考えられる。ファイバーモデルの様な断面解析を実施する場合はそれぞれの位置に横補強コンクリートの  $\sigma - \epsilon$  モデルとして与えればよい。今回、中心軸圧縮実験との対応を行うため、円形補強筋で囲まれた部分と角形補強筋と円形補強筋の間の部分の最大強度をそれぞれ求め平均化して最大強度を算出したが、ひずみの適合性は図られてはいない。今後の課題である。

### 3. 実験結果との対応

#### 3.1 中心軸圧縮実験<sup>3)</sup>の概要

パラメータを表-1に、試験体の形状配筋を図-6に示す。試験体は実物の約1/2.6縮尺模型12体であり、この試験体の他に無筋コンクリートの試験体3体を加えた15体について中心軸圧縮実験を実施した。

主筋はSD490を16本、横補強筋（溶接による閉鎖型フープ）にはUSD785を標準とした。ただし、No.10,11の横補強筋（溶接による閉鎖型フープ）にはSD390、No.5,6の芯筋にはUSD685,8本を用いた。粗骨材は最大粒径が10mmの豆砂利で、シリンダー強度は試験時現場封緘養生で  $\sigma_B = 505 \sim 535 \text{ kgf/cm}^2$  となった。横補強コンクリート（応力度）は、以下の条件で算出した。

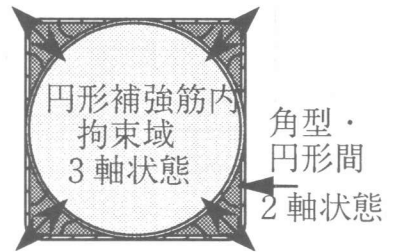


図-4 設定拘束域

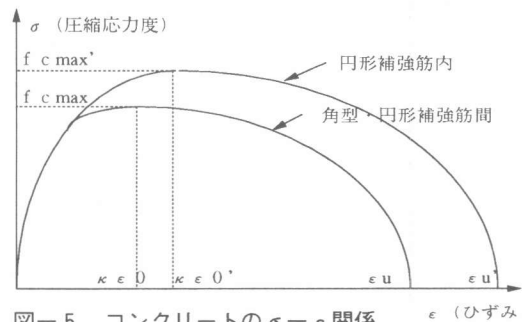


図-5 コンクリートの  $\sigma - \epsilon$  関係

- 1) 主筋は完全弾塑性のバイリニア型と仮定し、拘束コンクリートの負担分を評価する。すなわち、最大強度算定には、最大荷重より鉄筋負担分 ( $A_g \times \sigma_{gy}$ ) を差引き評価した。
- 2) 1)で求めた荷重から、コア部分の面積で応力度を算出した。
- 3) コンクリート強度はシリンダー強度  $\times$  (無筋試験体強度 / 無筋試験体シリンダー強度) とした。

### 3.2 最大圧縮強度の検討

2章で規定した最大圧縮強度について横軸を実験値、縦軸を計算値として図-7に示す。参考として、円形補強筋を中子筋とみなした崎野モデル<sup>1), 2)</sup>による結果も同図中に示す。

ここで、角形補強筋に囲まれた円形補強筋の等価均等側圧  $f_e$  を円形補強筋のみの1.5倍と仮定する式(20)と、円形補強筋のみの式(14)で評価する場合の両方で実験結果と比較検討した。この結果より、崎野モデルでは実験結果より低めの計算結果となったが、 $f_e$  を1.5倍と仮定する式(20)で算定した場合は、かなり過大評価となった。 $f_e$  を円形補強筋のみの式(14)で評価した場合は、実験結果と良好な対応が得られた。

### 3.3 応力度-ひずみ関係

横補強コンクリートの応力度-ひずみ関係を野口・飯塚モデルと崎野モデルで比較する。ただし最大強度は、3.2の結果より、 $f_e$  を円形補強筋のみの式(14)で評価した計算結果を用いることとする。応力度-ひずみ関係の形状は野口・飯塚モデルの場合、上昇域は最大強度までFafitis-Shah式<sup>7)</sup>、ひずみ軟化域では終局ひずみまで2次曲線としている。崎野モデルでは上昇域から下降まで同じ式(Sarginの提案に基づく)で形状を決定している。これらの結果を実験結果と比較検討し図-8に示す。最大強度までは、いずれの方法でも実験値と良好な一致が見られた。下り勾配は高補強な試験体を除き対応していない。崎野モデルでは、最大圧縮強度のみ提案式と変え、最大強度が上昇したた

表-1 パラメーター一覧

試験体名	横筋Pw(%) [ヒッチ]	軸筋比Pg(%)	特徴	備考
No.1	0.6 [ @71 ]	3.54	標準	
No.2	1.2 [ @36 ]	3.54	高補強	
No.3	0.6 [ @71 ]	3.54	かぶりなし	
No.4		—	かぶり主筋なし	
No.5		5.31	芯筋あり	
No.6		5.31	芯筋+芯筋フープ	
No.7	0.3 [ @71 ]	3.54	配筋組み合わせ	
No.8	0.6 [ @36 ]	3.54	丸フープと角フープの交互配筋	
No.9	1.2 [ @18 ]	3.54	(みかけ@の減少)	
No.10	0.6 [ @71 ]	3.54	横筋 SD390	Pw・σy=24 S D390 … 0.6% USD785 … 0.3%
No.11	1.2 [ @36 ]	3.54	横筋 SD390	
No.12	0.3 [ @142 ]	3.54	低補強	Pw・σy=48 S D390 … 1.2% USD785 … 0.6%
No.13'15	—	—	無筋試験体	シリンダーとの比較

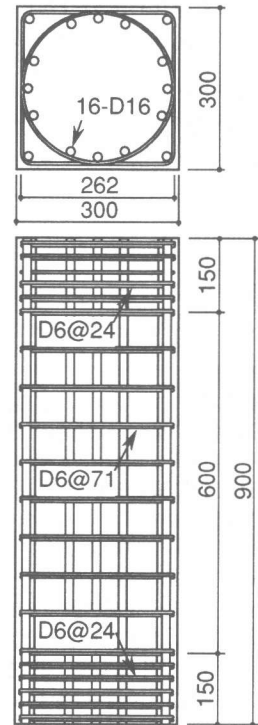


図-6 試験体形状・配筋

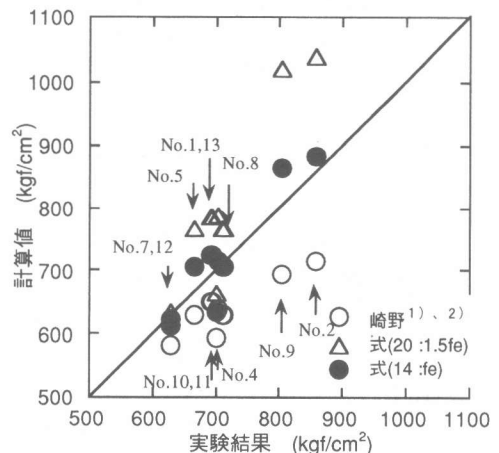


図-7 最大強度比較 (実験値と計算値)

めり勾配でも拘束力が大きめに算定された。下り勾配については、最大強度との相関関係も含め今後の課題である。

#### 4. まとめ

円形補強筋及び角形補強筋のそれぞれの拘束効果について検討し、各横補強コンクリートの最大強度に関する提案を行った。また、円形補強筋と角形補強筋を組み合わせた柱の最大強度を提案し実験結果との比較を行った。

- 1) 最大圧縮強度は、円形補強筋で囲われた部分(3軸拘束)と円・角形補強筋間(2軸拘束)の強度の和で実験値との良好な対応をみた。
- 2) 横補強コンクリートの応力度-ひずみ関係は、最大強度を本提案によるものとし、そのカーブ形状を既提案モデルとした場合、上昇曲線は良好な一致をみたが下り勾配は一致せず、下り勾配の評価は今後の課題である。

#### <参考文献>

- 1) 崎野、孫「コンファインド高強度コンクリートの中心圧縮性状に関する実験的研究」
- 2) 孫、崎野「高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の靱性改善に関する実験的研究」  
JCI年報15-2 '93, 1) PP713~718 2) PP719~724
- 3) 丸田、別所「高強度材料を使用したRC柱の中心軸圧縮実験」JCI年報16-2 '94, PP665~670
- 4) 飯塚、野口「普通強度から高強度コンクリートまでを対象とした圧縮特性の定式化」  
AIJ 構造工学論文集, Vol.37B '91 pp329~338
- 5) Kufper, H., 「Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses」 ACI Journal 1969, pp656~666
- 6) Ottosen, N.S., 「A Failure Criterion for Concrete」 Proceedings ASCE, Vol.103, No.EM.4, Aug 1977, PP527~535
- 7) Fafitis, A., Shah, S.P. 「Lateral Reinforcement for High Strength Concrete Columns」 ACI SP-87-12, 1985, PP213~233

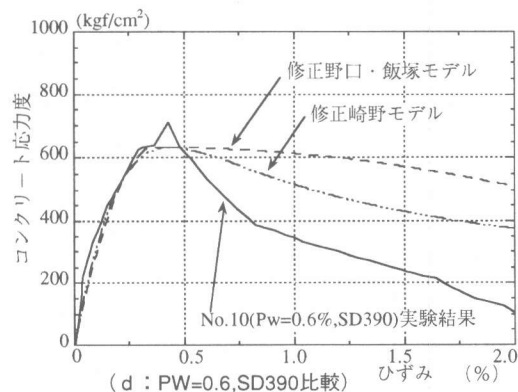
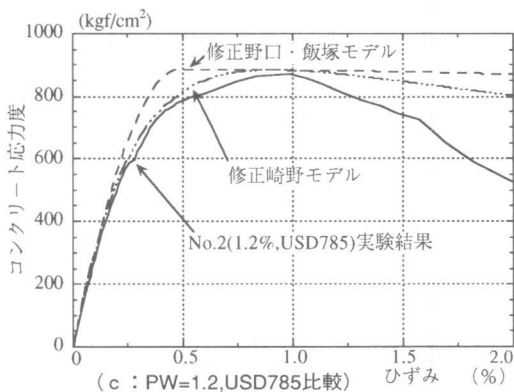
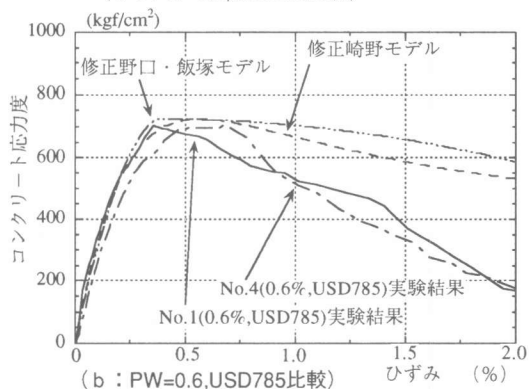
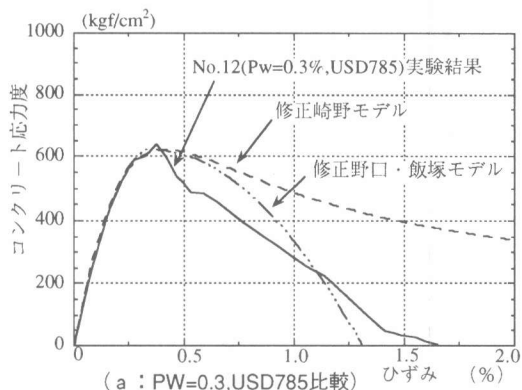
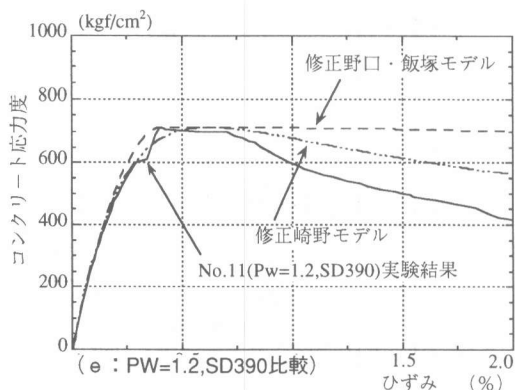


図-8 コンクリートの  $\sigma - \epsilon$  関係