

論文

[2069] 曲げ圧縮破壊する高強度コンクリートを用いたRC柱の変形性能

正会員 ○小谷俊介 (東京大学建築学科)

正会員 境 有紀 (東京大学地震研究所)

正会員 青山博之 (東京大学建築学科)

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造建物の高層化に対する要求が高まっているが、高層建物の下層階の柱には高軸力がかかるため、柱断面寸法を現実的な大きさに留めるためには、高強度コンクリートを用いることが必要となってくる。高強度コンクリートを用いたRC柱部材は、高強度コンクリートの脆性的な性質により靱性確保が難しいと言われており、高強度かつ高配筋の横補強筋で横拘束された時の効果は、定量化されていない。

そこで本研究では、高強度コンクリートを用いた柱の曲げせん断実験、コアコンクリートの中心圧縮実験を行ない、その結果に基づき、曲げせん断力と軸力を受け、曲げ圧縮破壊する柱の変形性能を定量的に評価する方法について検討した。

表1 曲げせん断試験体一覧

試験体	横補強筋				σ_B
	配筋	DW	σ_{wy}	DW σ_{wy}	
B1	4-5 ϕ @60	0.50	7892	39.5	1020
B2	4-5 ϕ @40	0.75	7892	59.2	1043
B3	4-5.5 ϕ @60	0.61	3507	21.2	1018
B4	4-5 ϕ @60	0.50	11482	57.4	1018
B5	2-5 ϕ @30	0.50	7892	39.5	1017

DW: 横補強筋比(%), σ_{wy} : 横補強筋降伏強度(kgf/cm²)
 σ_B : コンクリート圧縮強度(kgf/cm²)

2. 高強度コンクリート柱の実験[1]

2.1 曲げせん断実験 試験体は超高層建物の1階柱を想定した。固定因子は、断面寸法(25×25cm)、せん断スパン比(2.0)、コンクリート圧縮強度(1000kgf/cm²)、主筋配筋(12-D13)、軸力比(0.35=軸力/柱全断面積/コンクリート圧縮強度)とした。変動因子は、部材の変形性能に影響を与える因子、横補強筋量($p_w \sigma_{wy}$)、横補強筋降伏強度 σ_{wy} 、中子の有無とした。主筋にはSD35~SD40相当の異形鉄筋、横補強筋には丸鋼溶接

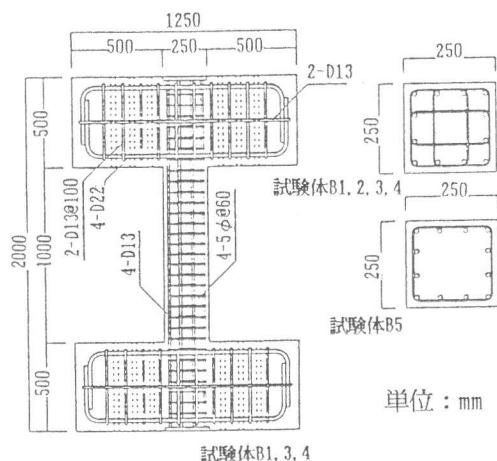


図1 曲げせん断試験体配筋図

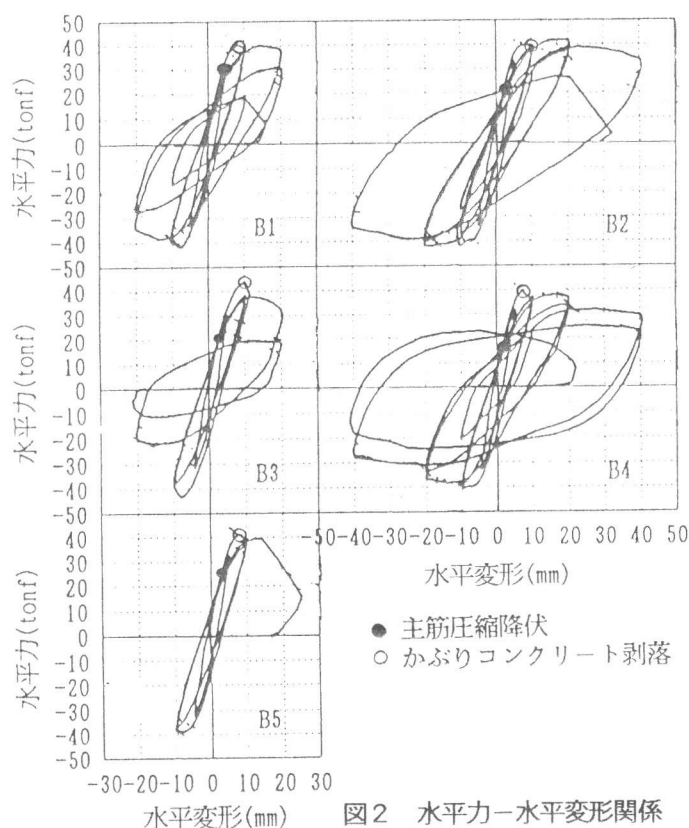


図2 水平力-水平変形関係

フープを使用した。試験体の一覧を表1に、配筋図を図1に示す。加力は、一定軸力をかけた状態で、上スタブと下スタブの平行を維持し、正負交番繰り返し加力を行なった。試験体は、いずれも主筋の圧縮降伏、コンクリートの圧壊が主筋の引張降伏より先行し、曲げ圧縮破壊した。水平力-水平変形関係を図2に示す。高強度コンクリートを用いたRC柱の靱性確保は難しいとされるが、高強度の横補強筋を高配筋すれば十分な変形性能を確保することができること、同じ横補強筋量でも、中子を配筋することが変形性能の向上に有効であることがわかる。

2.2 中心圧縮実験 曲げせん断試験体の

コアコンクリートの軸応力度-軸歪度関係を得るために、コアコンクリートの中心圧縮実験を行なった。試験体は、曲げせん断試験体から主筋、かぶりコンクリートを取り除いたものとした。試験体の一覧を表2に、配筋図を図3に示す。対応する曲げせん断試験体と番号が同じになっている（例

：B1とC1）。加力は、最大耐力点以降の下り勾配の情報を得るために、加力ヘッドを4本のジャッキで支えて、試験体の急速な変形増大に抵抗する方式とし、変形を徐々に増大させる载荷とした。実験結果（軸応力度-軸歪度関係）を図4に示す。軸応力度は、プレートの試験体と10φ×20cmの円柱体の材料試験結果を基にスケール効果を10φ×20cmの円柱体相当に補正した。

また軸歪度は、破壊の不均等性[2]を考慮して、部材せいに等しいとする破壊領域を想定し、最大耐力後は破壊領域外では除荷されるとして破壊領域内の軸歪度を求めた。曲げせん断試験体が変形性能に優れるものほど、対応する中心圧縮試験体の強度が高くなる傾向を示した。

3. 曲げ圧縮破壊する柱の変形性能の評価

3.1 曲げせん断実験の軸歪度の考察 曲げせん断実

験の試験体の軸歪度を検討するため、水平変形角の絶対値を累積した累積水平変形角と軸歪度の関係および、累積水平変形角と水平力の関係を図5に示す。

軸歪度は水平変形とともに増減するが、その平均的な値は、○印で示した点まではほぼ一定の割合で増加する。しかし、○印で示した点を境に急増することがわかる（以後この点を軸歪度急増点と呼ぶ）。水平力を見ると、変形が増大するにも拘らず、この点において耐力低下が始まっている。この軸歪度急増点は、柱の軸力と水平力に対する抵抗力が明確に低下する点と考えられ、柱の変形

表2 中心圧縮試験体一覧

試験体	横補強筋				σ_B
	配筋	DW	σ_{wy}	DW σ_{wy}	
C1	4-5φ@60	0.58	7892	45.8	1021
C2	4-5φ@40	0.86	7892	67.9	1050
C3	4-5.5φ@60	0.70	3507	24.5	1012
C4	4-5φ@60	0.58	11482	66.6	1005
C5	2-5φ@30	0.62	7892	48.9	984
CP	-	-	-	-	993
CPS	-	-	-	-	989

pw: 横補強筋比(%), σ_{wy} : 横補強筋降伏強度(kgf/cm²)

σ_B : コンクリート圧縮強度(kgf/cm²)

※ CP、CPSは、プレートの試験体

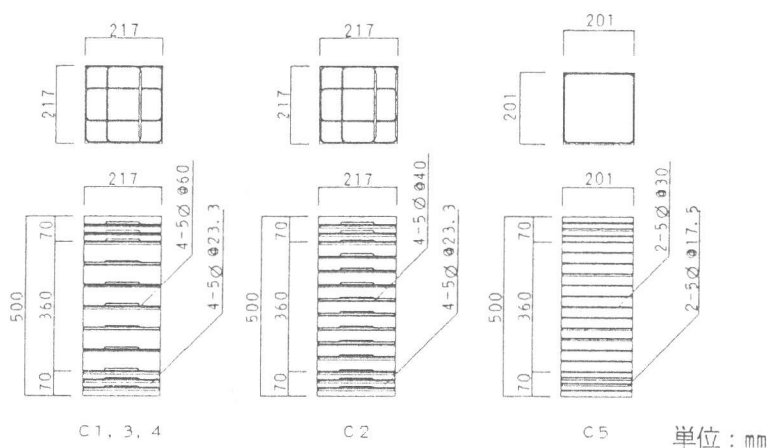


図3 中心圧縮試験体配筋図

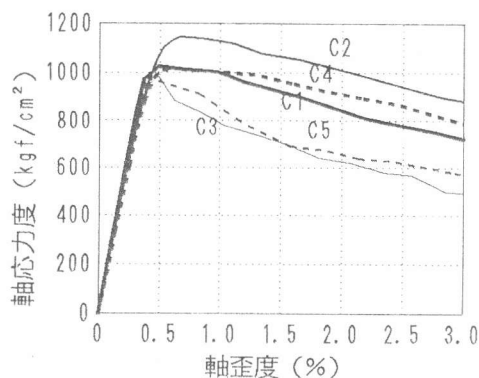


図4 軸応力度-軸歪度関係

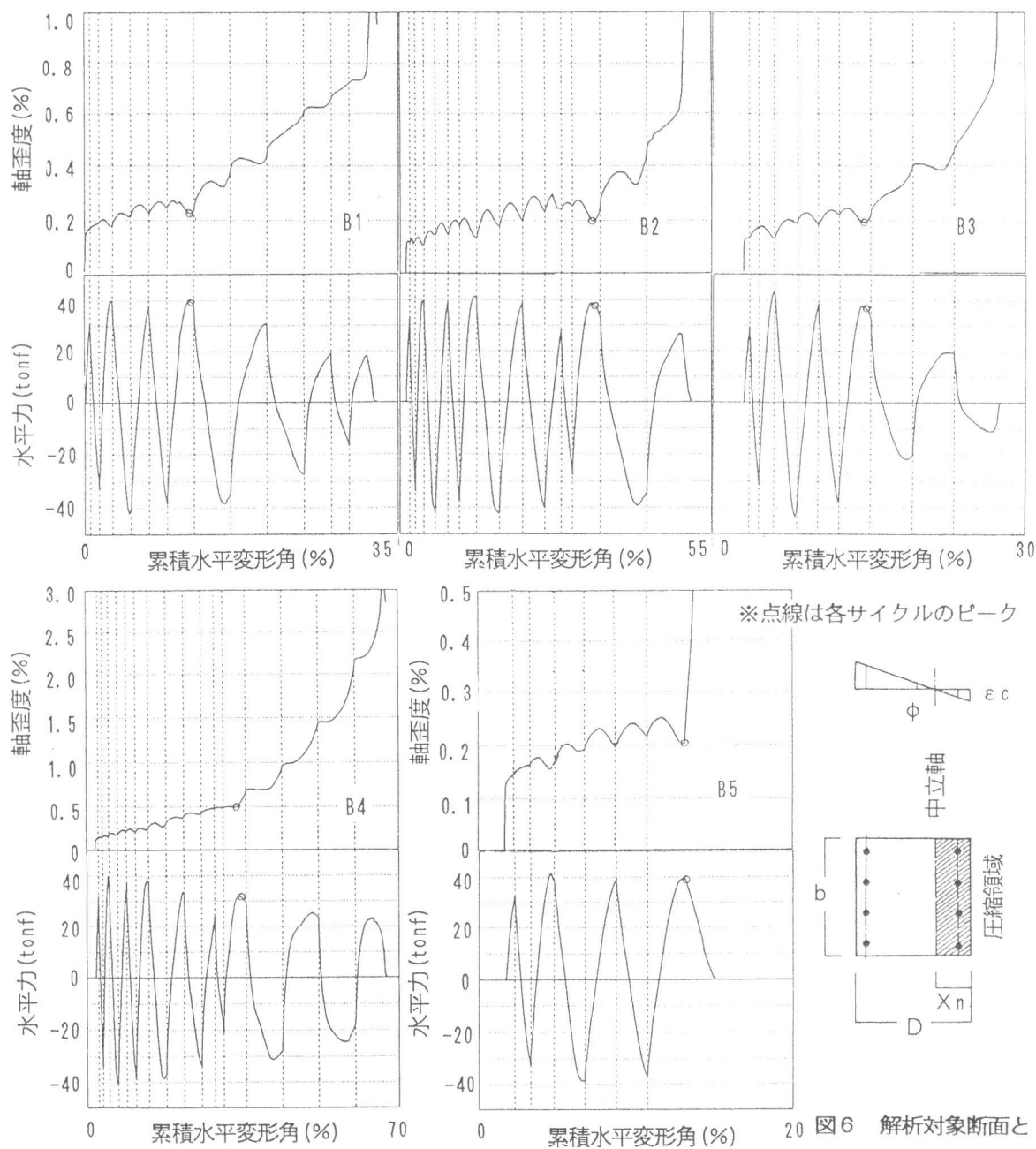


図5 軸歪度、水平力-累積水平変形角関係

図6 解析対象断面と断面の歪分布

性能を定量的に評価する限界変形点として適切と考えられるが、これを正確に定義するには、その物理的意味を探る必要がある。

3.2 軸歪度急増点の解析的検討 そこで、軸歪度急増点の物理的な意味を解析的に検討するために図6に示す左右対称な柱断面が一定軸力下で単調水平変形を受ける場合を考える。

まず、軸力の釣り合いより式(1)が成立する。

$$\frac{b X_n F(\varepsilon_c)}{\varepsilon_c} + b D p c \sigma_{sc} - b D p t \sigma_{st} = \sigma_o b D \quad (1)$$

$$\text{ただし、} F(\varepsilon_c) = \int_0^{\varepsilon_c} f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

b : 柱幅、 D : 柱せい、 X_n : 中立軸深さ、
 p_t : 引張鉄筋比 ($= a_t / b D$)、
 p_c : 圧縮鉄筋比 ($= a_c / b D$)
 a_t : 引張鉄筋断面積、 a_c : 圧縮鉄筋断面積 ($= p_t$)、
 σ_{st} : 引張鉄筋の応力度、 σ_{sc} : 圧縮鉄筋の応力度、
 ε_c : コンクリート圧縮縁軸歪度、
 σ_o : 軸力 / $b D$
 $f(\varepsilon)$: コンクリートの軸応力度、
 ε : コンクリートの軸歪度
 ※ σ_{st} は引張を正、
 σ_{sc} 、 ε_c 、 $f(\varepsilon)$ 、 $F(\varepsilon)$ 、 ε は圧縮を正とする

また、 ϕ を曲率とすると、断面の平面保持の仮定より式(3)が成立する。

$$X_n = \frac{\varepsilon_c}{\phi} \quad (3)$$

式(3)を式(1)に代入し、簡単のため、引張鉄筋は引張降伏、圧縮鉄筋は圧縮降伏しているとする、式(4)を得る。

$$\phi D \sigma_o = F(\varepsilon_c)$$

ここで、圧縮コンクリートの平均軸応力度 $E(\varepsilon_c)$ を

$$E(\varepsilon_c) = \frac{F(\varepsilon_c)}{\varepsilon_c} \quad (5)$$

と定義すると式(6)を得る。

$$\frac{\phi}{\varepsilon_c} = \frac{E(\varepsilon_c)}{\sigma_o D} \quad (6)$$

式(6)は、圧縮コンクリートの平均軸応力度が最大となる時、 $\phi - \varepsilon_c$ 関係の割線係数が最大となる、即ち、この点を境に曲率 ϕ の変化に対する圧縮歪度 ε_c の変化率が増加することを表わしている (図7)。圧縮歪度 ε_c と軸歪度は、断面の平面保持を仮定すると線形な関係にあり、曲率 ϕ と柱の水平変形も互いにはほぼ単調増加な関係にあることを考えると、ヒンジ領域の圧縮コンクリートの平均軸応力度が最大となる時が軸歪度急増点に対応する。そこでこれを実験的に検証する。

3.3 中心圧縮実験との対応 中心圧縮実験から得られた軸応力度-軸歪度関係 (図4) を基に、圧縮コンクリートの平均軸応力度-軸歪度関係を求め、曲げせん断実験の軸歪度急増点におけるヒンジ領域 (端部から部材せいの範囲) の拘束コンクリート圧縮縁軸歪度の測定値をプロット (○印)

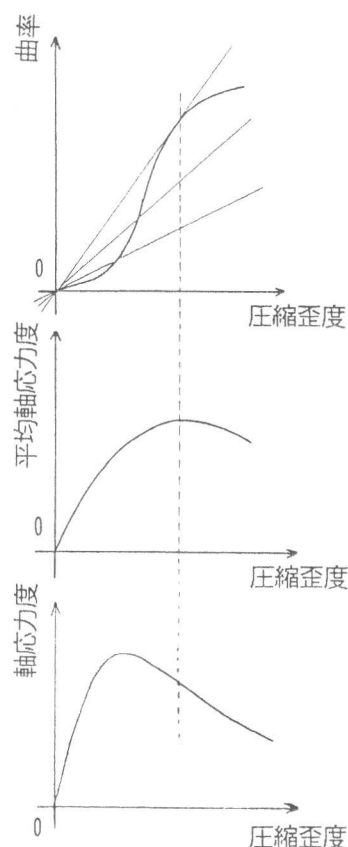


図7 曲率-圧縮歪度関係と平均軸応力度の対応

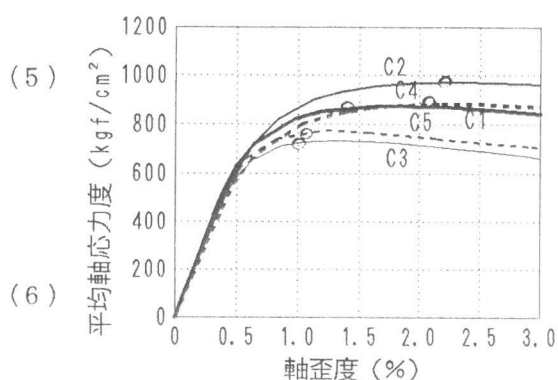


図8 平均軸応力度-軸歪度関係

して図8に示す。軸歪度急増点におけるヒンジ領域の拘束コンクリート圧縮縁軸歪度は、いずれの場合も、ほぼ圧縮コンクリートの平均軸応力度が最大となる時であることがわかる。

3.4 限界変形の定義 よって、曲げ圧縮破壊するRC部材の限界変形を、ヒンジ領域のコアコンクリートにおいて式(5)で定義される圧縮コンクリートの平均軸応力度が最大となる時と定義する。そこで、圧縮コンクリートの軸応力度-軸歪度関係(構成則)を定めることが必要となる。

3.5 圧縮コンクリートの構成則 ここでは、文献[3]で提案された圧縮コンクリートの構成則を示す(表3)。これは、円形拘束コンクリートの中心圧縮実験結果を基に、横補強筋の横拘束性能をその剛性と耐力から、また、コンクリートの横はらみ性状をコンクリート圧縮強度によって評価し、更に、任意の形状をもつ横補強筋の横拘束性能をその剛性が低下するという形で解析的に評価してモデル化されたものである。

3.6 限界変形の推定 3.4の限界変形の定義と3.5の圧縮コンクリートの構成則から、曲げせん断力と軸力を受け、曲げ圧縮破壊する柱部材の限界変形を推定する方法を示すと次のようになる。

① コンクリート圧縮強度、横補強筋の配筋からプレーンコンクリート、拘束コンクリートの構成則を定める

② 拘束コンクリートの平均軸応力度が最大となる軸歪度(終局軸歪度)を求める

③ かぶりコンクリートはプレーンコンクリートの、コアコンクリートは拘束コンクリートの構成則に従うとし、平面保持を仮定して、コアコンクリートの圧縮縁が終局軸歪度となる時の曲率(限界曲率)を軸力の釣り合いから求める

④ 限界曲率に対応する部材変形を求め、限界変形とする

表3 圧縮コンクリートの構成則[3]

(1) プレーンコンクリート

$$\begin{aligned} & 0 < \varepsilon_Z \leq \varepsilon_m \\ & \sigma_Z = E_c \varepsilon_Z + \frac{\sigma_B - E_c \varepsilon_m}{\varepsilon_m^2} \varepsilon_Z^2 \quad \dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_m < \varepsilon_Z \leq \varepsilon_u \\ & \sigma_Z = \frac{\sigma_B - \sigma_u}{\varepsilon_m - \varepsilon_u} (\varepsilon_Z - \varepsilon_m) + \sigma_B \quad \dots (8) \end{aligned}$$

(2) 拘束コンクリート

$$\begin{aligned} & 0 < \varepsilon_Z \leq \varepsilon_m \text{ (プレーンコンクリートに同じ)} \\ & \sigma_Z = E_c \varepsilon_Z + \frac{\sigma_B - E_c \varepsilon_m}{\varepsilon_m^2} \varepsilon_Z^2 \quad \dots (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_m < \varepsilon_Z \leq \varepsilon_{cm} \\ & \sigma_Z = \frac{\sigma_B - \sigma_{cm}}{(\varepsilon_m - \varepsilon_{cm})^2} (\varepsilon_Z - \varepsilon_{cm})^2 + \sigma_{cm} \quad \dots (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{cm} < \varepsilon_Z \leq \varepsilon_{cu} \\ & \sigma_Z = \frac{\sigma_{cm} - \sigma_{cu}}{\varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cu}} (\varepsilon_Z - \varepsilon_{cm}) + \sigma_{cm} \quad \dots (11) \end{aligned}$$

(3) 諸特性値

$$E_c = 9200 \sigma_B^{0.3} w_c^2 \quad \dots (12)$$

$$\varepsilon_m = 2.0 \times 10^{-6} \sigma_B + 0.0012 \quad \dots (13)$$

$$\sigma_u = 2.1 \sigma_B^{0.83} \quad \dots (14)$$

$$\varepsilon_u = 0.005 \quad \dots (15)$$

$$\sigma_{cm} = \left(1 + 20 \frac{\sigma_{rm}}{\sigma_B}\right)^{0.6} \sigma_B \quad \dots (16)$$

$$\varepsilon_{cm} = \left(1 + 25 \frac{\sigma_{rm}}{\sigma_B}\right) \varepsilon_m \quad \dots (17)$$

$$\sigma_{cu} = \left(1 + 20 \frac{\sigma_{ru}}{\sigma_B}\right)^{0.6} \sigma_u \quad \dots (18)$$

$$\varepsilon_{cu} = \left(1 + 40 \frac{\sigma_{ru}}{\sigma_B}\right) \varepsilon_u \quad \dots (19)$$

$$\sigma_r = 0.7 E_r (\varepsilon_Z - \varepsilon_{zs}) \quad \dots (20)$$

ただし、 $0 < \sigma_r < \alpha p_w \sigma_{wy}$

$$\alpha = 1 - \frac{S}{D} \quad (> 0) \quad \dots (21)$$

$$\varepsilon_{zs} = 1 \times 10^{-6} \sigma_B + 0.001 \quad \dots (22)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{1}{1150} \left[\frac{\ell}{r}\right]^2} \quad \dots (23)$$

ただし、円形の場合は、 $\gamma = 1$

σ_Z : 軸応力度、 ε_Z : 軸歪度
 E_c : コンクリート初期剛性(kgf/cm²)
 w_c : 気乾単位容積重量(ton/m³)
 σ_B : コンクリート圧縮強度(kgf/cm²)
 ε_m : プレーンコンクリート最大軸応力度時の軸歪度
 σ_u : プレーンコンクリート終局軸応力度
 ε_u : プレーンコンクリート終局軸歪度
 σ_{cm} : 拘束コンクリート最大軸応力度
 ε_{cm} : 拘束コンクリート最大軸応力度時の軸歪度
 σ_{cu} : 拘束コンクリート終局軸応力度
 ε_{cu} : 拘束コンクリート終局軸歪度
 E_r : 横拘束剛性(= $\alpha p_w E_s$)
 p_w : 横補強筋比(= $2 A_w / S D$)
 A_w : 横補強筋断面積
 S : 横補強筋間隔、 D : 試験体せい
 ℓ : 角形フープ一辺の長さ(中子がある場合は中子によって区切られた部分の長さ)
 E_s : フープの弾性剛性、 r : フープ断面の直径

この方法を用いて、曲げせん断試験体の限界変形角を解析的に求めた。圧縮コンクリートの構成則は、文献[3]で提案されたものを用い、曲率から部材変形を求める方法は、平石等[4]の提案する式(24)を用いた。

$$R = \phi \cdot D \left(\frac{3}{4} - \frac{2}{3} \frac{D}{h} \right) \quad \cdots (24)$$

R：部材変形角、 ϕ ：危険断面位置の曲率、D：部材せい、h：部材高さ

解析結果を実験値と比較して表4に示す。両者はよく対応している。

4. まとめ

曲げせん断力と軸力を受け、曲げ圧縮破壊する高強度コンクリートを用いた柱部材の曲げせん断実験、コアコンクリートの中心圧縮実験を行ない、その結果を基に、柱の変形性能を定量的に評価する方法について検討した。柱の軸歪度が急増し、水平耐力が明確に低下する点が存在し、その時、ヒンジ領域の圧縮コンクリートの平均軸応力度が最大となることを解析的に、かつ実験結果から示した。そして、ヒンジ領域の圧縮コンクリートの平均軸応力度が最大となる時を曲げ圧縮破壊する柱の限界変形点と定義し、圧縮コンクリートの構成則を用いて、限界変形を推定する方法を示した。

謝辞

高強度コンクリート柱の実験において、曲げせん断実験は、建設省New RC総プロの一環として行なわれ、中心圧縮実験は、文部省科学研究費補助金・総合研究（研究代表者：青山博之）の助成を受けた。なお、鉄筋の入手に際し東部大和電機製鋼、鮎子多氏をはじめとする住友電工、試験体の製作に当たり勝俣氏をはじめとする大林組技術研究所、実験を行なう際に細川助手はじめ東京大学工学部建築学科青山・小谷研究室の皆さん、東京大学工学部総合試験所大型構造物試験室の技官の方々、田中氏をはじめとするフジタ工業の技術研究所にお世話になった。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 境有紀、日比純一、小谷俊介、青山博之：高強度コンクリートを用いたRC柱に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集C構造Ⅱ、1990
- [2] 加藤大介、羽廣重夫：鉄筋コンクリート造角柱試験体の軸方向圧縮実験の評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、1989
- [3] 境有紀：横拘束された高強度コンクリートの構成則、コンクリート工学年次論文報告集第13巻第2号、1991、投稿中
- [4] 吉川真次、平石久廣他：高軸力を受ける壁柱の面外方向の挙動に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集C構造Ⅱ、1988

表4 曲げせん断試験体の限界変形角の実験値と解析値の比較

試験体	実験値 (%)	解析値
B1	1.61	1.68
B2	2.53	2.35
B3	1.41	1.18
B4	2.26	2.16
B5	1.43	1.28