論文 横拘束を受けるコンクリートの応カーひずみ関係の定式化

伊藤 誠*1·伊藤 睦*2·水野英二*3·志知昌人*4

要旨:本研究では、塑性理論に基づいたひずみ軟化型構成モデルにより数値解析的に求めた 横拘束を受けるコンクリートの応力--ひずみ関係の定式化を試みた。ここでは、一定拘束圧 (0 MPa~30 MPa)下にて圧縮強度が 20 MPa~70 MPa の範囲にあるコンクリートを対象と した。応力--ひずみ曲線の定式化にあたっては、上昇域では修正 Iyenger 式、下降域では Ahmad 式を使用し、それら関数のパラメータの同定を行った。従来までのコンファインドコ ンクリートに対する応力--ひずみ式との比較・考察を通して、本提案式の意義について検証 した。

キーワード:応力-ひずみ関係、コンファインドコンクリート、ひずみ軟化型構成モデル

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)柱のように、横拘束 されたコンクリートの圧縮特性はその横拘束状 態に応じて強度と靭性が大きく改善されること が一般に知られており、このような三軸圧縮下 のコンクリートの応力-ひずみ関係を明らかに することは、部材の耐力や変形性能を評価する 上で有益である。

塑性理論に基づく筆者らのひずみ軟化型コン クリート構成モデルは,三軸圧縮下でのコンク リート供試体の挙動を三次元有限要素解析によ りかなりの精度で再現できることが分かってい る¹⁾。しかしながら,鉄筋コンクリート橋脚の耐 震設計など実際の設計業務に対し,これら先進 的な構成モデルを組み込んだ三次元有限要素解 析を実施することは数値解析上の問題および計 算時間などの問題から未だ一般的ではない。道 路橋示方書 V・耐震設計編では,鉄筋コンクリ ート断面の曲げモーメント(M) ー曲率(ϕ)関 係を求め,これに基づいて耐力や靱性率を算出 することが規定されているが,M- ϕ 関係を求め るためには陽な形での簡素化された各種拘束圧 下でのコンクリートの応力-ひずみ関係式が不 可欠となる。

本研究では、まず、ひずみ軟化型構成モデル による各種拘束圧下での応力-ひずみ関係を既 存の実験データと比較し、軟化型構成モデルの 予測性能ならびに汎用性について検討を行った。 続いて、一定拘束圧 (0 MPa~30 MPa)下にて圧 縮強度が 20 MPa~70 MPa の範囲にあるコンク リートを対象として、軟化型構成モデルにより 求めた、三軸圧縮下でのコンクリートの応力-ひずみ関係の定式化を試みた。なお、応力-ひ ずみ関係の定式化にあたっては、上昇域では修 正 Iyenger 式、下降域では Ahmad 式を使用し、 それら式中のパラメータの同定を行った。さら に、既往のコンファインドコンクリートに対す る応力-ひずみ式との比較・考察を通して、本 提案式の意義について検証した。

2. ひずみ軟化型構成モデルの適用性の検討

筆者らのひずみ軟化型構成モデルは、コンク リートの一軸圧縮強度が20~30MPa, 横拘束圧が 0 MPa~1.3MPaの範囲で行われた三軸圧縮実験 結果に基づいて開発された。本研究では、一軸 圧縮強度が20MPa~70MPa, 拘束圧が0MPa~

*1	東急建設	(株)技術本部土木エンジニアリング部 工修 (正会員)	
*2	中部大学	工学部都市建設工学科 講師 工博 (正会員)	
*3	中部大学	工学部都市建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)	
*4	中部大学	工学部都市建設工学科 学部生	



図-2 各種コンクリート強度への適用性の検証(高拘束圧作用時)

30MPaの範囲にあるコンクリートを対象として 応力-ひずみ関係の定式化を試みることを目的 としているため、本節では高強度コンクリート および高拘束圧下でのコンクリートに対するひ ずみ軟化型構成モデルの適用性を検証する。

2.1 高強度コンクリートへの適用性

畑中ら²⁾による普通強度コンクリートおよび 高強度コンクリートの三軸圧縮実験結果を用い て比較・検討する。

実験供試体は1辺の長さD=10 cmの角形柱で 高さ辺長比(H/D)が1である。拘束圧として 0.0 MPa, 0.7 MPa, および1.4 MPaを能動的に作 用させている。解析結果と実験結果との比較を 図-1に示す。図から分かるように、コンクリー ト強度に拘わらず、最大応力は若干小さめだが、 ピークひずみは実験結果と良い一致が見られる。 また、解析から得られるポストピーク領域での 応カーひずみ曲線は実験結果のそれよりも緩や かな(高め)の傾向を示しているが,全体的に 良好な予測結果を示しており,一軸圧縮強度が 70MPa 程度のコンクリートに対してもひずみ軟 化型構成モデルは概ね適用可能である思われる。

2.2 高拘束圧作用時への適用性

次に,畑中ら³⁾による高拘束圧下での三軸圧縮 実験結果と比較し,適用性について考察する。

実験供試体は直径(ϕ) 10 cm の円柱で高さ径 比(H/ϕ) = 1 である。本実験では鋼輪の拘束を 用いた三軸圧縮実験であるため、実験供試体に 作用する拘束圧は受動型のものである。また、 鋼輪は離散化して配置されているため、必ずし も一様に拘束圧が作用しているとはいえない。 それに対し、解析では能動的に拘束圧を作用さ せるため、厳密には実験とは同じではないが、 実験結果における応力-ひずみ曲線のピーク応

コンクリート	弾性係数	拘束圧
強度 f_c'(MPa)	E_i (MPa)	σ_L (MPa)
20	22,384	00020406
30	27,415	0.8.1.0.1.5.2.0.
40	31,656	2.5,3.0,3.5,4.0,
50	35,392	5.0,6.0,8.0,
60	38,771	10.0,15.0,20.0,
70	41,877	50.0

表-1 解析ケース

力時に作用している拘束圧を,解析では初期状 態から作用させて計算した。

解析結果と実験結果との結果を図-2 に示す。 作用させた拘束圧は図中に示した通りである。

コンクリート供試体 (f_c'=34.5MPa) に高拘束 圧が作用する場合には,解析結果は最大応力, ピークひずみ,およびポストピーク領域での応 カーひずみ曲線について精度よく実験結果を再 現していることが分かる。一方,高強度コンク リート供試体 (f_c'=56.1,70.5 MPa) に高拘束圧が 作用する場合に対しても,解析結果の最大応力 は実験結果と良い一致を示しており,またポス トピーク領域での応力–ひずみ曲線の再現性は 2.1節の結果 (図–1) と同様,実験結果より緩 やかな傾向を示しているが全体的に良好な予測 結果を示している。結果として,拘束圧が5.5 MPa 程度までの高レベルの拘束圧下でもひずみ軟化 型構成モデルは適用可能であることが分かる。

3. 横拘束を受ける応カーひずみ曲線の定式化

3.1 応カーひずみ曲線の定式化

本研究では、図-3に示すような応力-ひずみ



図-3 応カーひずみ曲線の定式化に用いる式

曲線に対して,横拘束筋量やコンクリート強度 を影響因子として作成された実験式(上昇域で は Iyenger 式,下降域では Ahmad 式)を基本と して,これらの式を修正することにより,各式 に含まれるパラメータの同定を試みた。

ひずみ軟化型構成モデルを用いた解析ケース としては, **表**-1 に示すようにコンクリートの強 度 f_c 'を6水準, 拘束圧 σ_L を19水準, 計114 ケースの解析を行った。10 MPa 以上の拘束圧が 一般に作用するケースは希ではあるが, コンク リート構造物の解析では局所的に大きな拘束圧 が作用する場合も考えられるため,本研究では 拘束圧 σ_L を30MPa のレベルまで考慮した。コ ンクリートの弾性係数 E_i については,日本建築 学会の鉄筋コンクリート構造計算基準による関 係式を用いて算定した。ポアソン比ッはコンク リート強度によらず 0.2 とした。

(1) 上昇域での定式化

Iyenger 式を修正し, 次式(1)を採用した。

$$y = \frac{\alpha \cdot x + (a + 2 \cdot b - 1) \cdot x^2}{1 + (b + \alpha - 2) \cdot x + a \cdot x^2 + b \cdot x^3}$$
(1)

ここで,y は圧縮強度比 $\sigma / \sigma_f(\sigma: 軸応力, \sigma_f: 最大圧縮強度), <math>x$ はピーク軸ひずみ比 ϵ



図-4 上昇域でのパラメータ





図-5 下降域でのパラメータ

 $/ \epsilon_a^p (\epsilon: 軸ひずみ, \epsilon_a^p: ピーク軸ひずみ),$ また, a は $E_i / E_{sec} (E_i: 初期接線弾性係数,$ $E_{sec}: ピーク点での割線弾性係数) である。パラ$ メータ <math>a, b は上昇域の勾配に関係し, コンクリ ート強度および拘束圧の影響を含んだ定数であ る。応力ーひずみ曲線の上昇域の形状としては, パラメータ a, b 値が大きいほど上昇勾配は急に なる傾向を示す。

式(1)を用いて回帰分析を実施した結果,同 定された各パラメータ値の変動を図-4に示す。

図-4 をみると、20,30 MPa の場合、パラメータの値は他の強度と比較して大きな値となっており、変動も大きい。しかし、 f_c '=40 MPa 以上ではパラメータの値は小さく変動も少ない。

つまり, コンクリート強度が小さい場合(f_c ' = 20,30 MPa), 応力ーひずみ曲線の上昇域の形状は 拘束圧の影響を受けやすいが, コンクリート強 度が大きい場合(f_c ' = 40 MPa 以上), 上昇域では 拘束圧の影響は大きくないといえる。

(2) 下降域での定式化

Ahmad 式を基本とし、式中に含まれるパラメ ータについて検討した。



$$y = \frac{c \cdot x + (d-1) \cdot x^2}{1 + (c-2) \cdot x + d \cdot x^2}$$
(2)

上昇域と同様に,式(2)を用いて,回帰分析 を実施し,下降域におけるパラメータの同定を 試みた。同定された各パラメータ値の変動を図 -5に示す。パラメータ c, d は下降域の勾配に 関係し,コンクリート強度および拘束圧の影響 を含んだ定数である。応力-ひずみ曲線の下降 域の形状としては,パラメータ c, d 値が大きい ほど下降勾配は緩やかになる傾向を示す。

図-5をみると、パラメータ c の値は拘束圧が 大きいほど、また、コンクリート強度が小さい ほど大きくなる傾向を示している。つまり、応 カーひずみ曲線の下降域の形状は、拘束圧が大 きいほど下降勾配は緩やかになり、拘束効果が 現れた形となる。また、パラメータ d は 0.85~ 1.15 と変動は小さく、下降勾配に与える影響は 小さいことが分かる。

3.2 最大圧縮強度と最大圧縮強度時のひずみの 定式化

解析結果より得られた最大圧縮強度 σ_f を一軸 圧縮強度 f_c 、で無次元化した値を縦軸,拘束圧 σ_L



を横軸として解析結果をプロッ トした結果を図ー6 に示す。ま た,解析結果より得られたピー ク軸ひずみ ϵ_a^P を縦軸,拘束圧 σ_L を横軸として解析結果をプ ロットした結果を図ー7 に示す。 拘束圧が大きくなると,圧縮強

度比・ピーク軸ひずみが大きくなる傾向にある が、線形関係にないことが図から分かる。また、 コンクリート強度が小さい場合には、圧縮強度 比およびピーク軸ひずみは大きくなる傾向にあ り、一軸圧縮強度 f_c 'もその傾向に影響を与えて いる。

そこで,最大圧縮強度と拘束圧の関係および ピーク軸ひずみと拘束圧の関係をそれぞれ次式 (3)および(4)により仮定した。

$$\sigma_f = f_c' + g \cdot (\sigma_L)^h \tag{3}$$

$$\mathcal{E}_{a}^{p} = \mathcal{E}_{0} + i \cdot \sigma_{L} + j \cdot (\sigma_{L})^{m}$$
(4)

式(4)において ϵ_0 は拘束圧が 0 MPa(プレー ンコンクリート)時の最大応力に対する軸ひず み(ピークひずみ)であり、パラメータ g, h, i, j, kおよび ϵ_0 は一軸圧縮強度 f_c 'の関数とした。 式(3)および式(4)を用いてそれぞれ回帰分 析を行い、 f_c 'ごとに各パラメータを決定した。ま た、各パラメータと一軸圧縮強度 f_c 'の関数につ いても回帰分析を行い、**表**-2 に示す式により、 それらパラメータを表現した。

4. 既往の応カーひずみ関係式との比較・考察

本提案式と星隈ら⁴⁾,中塚ら⁵⁾および Mander ら⁶⁾による既往の提案式との比較を行った。既往 の提案式は,面積帯鉄筋比 p_s および帯鉄筋の降 伏強度 σ_y をパラメータとしており,断面形状が 円形・角形の双方に適用可能である。これら提 案式では,円形帯鉄筋の場合の式を基本として, 角形帯鉄筋では横拘束力が一様に加わらないこ とを考慮し, $p_s \times \sigma_y$ の項に係数を乗じて角形帯 鉄筋を用いた場合の式としている。円形断面の 場合,拘束圧が一様に作用するので帯鉄筋降伏

表--2 ピーク点パラメータ式

${\sigma}_{\scriptscriptstyle f}$	$g = 6.080 \cdot (f_c')^{0.05922}$			
(MPa)	$h = -0.3832 + (f_c')^{0.04893}$			
	$\varepsilon_{0} = -0.02042 \cdot (f_{c})^{0.06371} + 3.286 \times 10^{5} \times f_{c} + 0.02663$			
c p	$i = -5.973 \times 10^{-4} \cdot (f_c - 20)^{0.35} + 0.0419$			
Ca	$j = -5.241 \times 10^{-4} \cdot (f_c - 20)^{0.3636} - 0.03668$			
	$m = -6.259 \times 10^{-3} \cdot (f_c - 20)^{0.3544} + 1.028$			

時の拘束圧 σ_L (平均周圧)は $p_s \times \sigma_y$ で計算する ことができる。本提案式は、拘束圧を直接代入 する式であり、拘束圧が一様でない角形断面に は対応していないため、以下では円形断面の場 合について既往の提案式と比較することにした。

図-2 で示した H/φ=1 の円柱供試体を用いた 三軸圧縮実験結果³⁾を対象に,本提案式および既 往の提案式による応力-ひずみ曲線の予測を比 較した。低拘束圧の場合および高拘束圧の場合 の比較結果をそれぞれ図-8 および図-9 に示す。

図-8より低拘束圧の場合,コンクリート強度 に拘わらず, 星隈らの式, Mander らの式および 本提案式は最大圧縮応力ならびにピーク軸ひず みにて良い一致を示している。また、中塚らの 式は最大圧縮応力を小さめの値を予測する傾向 にある。一方、下降域を比較すると、星隈らの 式および中塚らの式では下降勾配が急となって いる。これは,破壊領域が局所化する供試体(H/D =2)の実験結果を基に両式が定式化されている ことに起因する。このような式を用いて M- 関係を求めた場合,変形性能を低く評価する傾 向になると思われる。また, Mander らの式も H/D=2 の供試体の実験結果を基に定式化されて いるが,実験結果と同程度の下降勾配となって おり拘束効果を高く見込んだ式となっており、 逆に,変形性能を高く評価する傾向になると思 われる。次に、図-9から分かるように、高拘束 圧の場合, 星隈らの式は最大圧縮応力を大きめ に、一方、Mander らの式は小さめに予測する傾 向にある。また、両式ともピーク軸ひずみは大 きく予測する傾向にあり,低拘束圧の場合に比 べ精度は劣る。それに対し、本提案式は既往の 式に比べ、最大圧縮応力・ピーク軸ひずみを精 度良く予測できていると思われる。







図-9 応カーひずみ曲線の比較(高拘束圧の場合)

5. まとめ

本研究をまとめると以下のようである。

- (1) ひずみ軟化型構成モデルによる解析結果より一定拘束下(0 MPa ~ 30 MPa)にて圧縮 強度が 20 MPa ~ 70 MPa の範囲にあるコン クリートの応力-ひずみ関係を定式化した。
- (2) 拘束圧が 0.8MPa ~ 5.5MPa で圧縮強度が 34.5MPa ~ 70.5MPa の範囲の実験結果に対 し,本提案式と既往の提案式での再現性を比 較した結果,本提案式はこれらの範囲内では 精度良い予測をすることが分かった。
- (3) 星隈らの式および中塚らの式では,破壊の局 所化の影響が含まれており,変形性能を実験 結果と比較して,低く評価する傾向がある。
- (4) Mander らの式は拘束効果を大きく見込んで おり、変形性能を実験結果と比較して、高く 評価する傾向がある。

参考文献

1) 水野英二,畑中重光:コンクリートのひずみ軟化型モ デルの開発とコンファインドコンクリートの三次元 有限要素解析, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.185-197, 1997.8

- 2) 畑中重光,服部宏己,吉田徳雄,谷川恭雄:低側圧軸 圧縮下の高強度コンクリートの塑性変形挙動,コンク リート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.719-724, 1990.6
- 3)畑中重光,服部宏己,近藤洋右,谷川恭雄:3軸圧縮下の普通・高強度コンクリートの応力-ひずみモデル, コンクリート工学年次論文報告集,Vol.13,No.2, pp.31-36,1991.6
- 4) 星隈順一,川島一彦,長屋和宏: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,土木学会論文集,No.520/V-28, pp.1-11,1995.8
- 5) 中塚佶,阪井由尚,中川裕史:コンファインドコンク リートの強度・変形特性推定式-コンファインドコン クリートの強度・変形特性に関する研究(その 2),日 本建築学会構造系論文集,第 505 号, pp.93-99, 1998.3
- 6) J. B .Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park : Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concere, Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.8, Aug.1988