

論文

[2011] エンドクロニック理論の高強度コンクリートへの適用

前中敏伸*1・白井伸明*2・佐藤稔雄*3・岡崎真大*4

1. はじめに

エンドクロニック理論[1]はパラメータが多く複雑であるが、パラメータの同定に成功すれば、コンクリートの巨視的な非線形構成関係を適切に記述し、また数値的にも安定した応答を再現し得る汎用性のあるモデルである。特に、本モデルは除荷や再負荷を区別することがなく連続的に繰り返し挙動を追跡できる能力を有し、その有効性は、例えば、ファイバー法による高軸力を受けるRC柱の繰返し解析によって確認されている[2]。しかし、近年活発に研究・開発が進められている高強度コンクリートへの適用性に関しては問題が残されている[3]。本研究の目的は、本モデルを高強度コンクリートにも適用できるように拡張することである。このため、まず、本モデルに含まれるパラメータの感度解析を行い、それらの特性を把握する。次いで、既往の実験結果を用いてパラメータの同定を行う。さらに、同定パラメータを用いた修正モデルによる計算値を実験値と比較することにより、その有効性について検討する。

2. エンドクロニック理論の概要[1, 4]

本理論は増分応力(σ) - ひずみ(ε) 関係を偏差成分と体積成分に分解し、各増分ひずみを弾性成分と非弾性成分の和として表している。

$$d\epsilon_{ij} = \frac{dS_{ij}}{2G} + d\epsilon_{ij}'' \quad d\epsilon = \frac{d\sigma}{3K} + d\epsilon'' \quad (1)$$

ここに、 $d\epsilon_{ij}$: 増分偏差ひずみ、 $d\epsilon$: 増分体積ひずみ、 dS_{ij} : 増分偏差応力、 $d\sigma$: 増分体積応力、 G : 接線せん断弾性係数、 K : 接線体積弾性係数、 $d\epsilon_{ij}''$: 増分非弾性偏差ひずみ、 $d\epsilon''$: 増分非弾性体積ひずみ。増分非弾性ひずみ($d\epsilon_{ij}''$, $d\epsilon''$)は温度およびクリープの効果を無視すると、次式で定義される。

$$d\epsilon_{ij}'' = \frac{S_{ij}}{2G} dZ \quad d\epsilon'' = d\lambda \quad (2)$$

ここに、 dZ : 増分イントリンシック時間、 $d\lambda$: 増分非弾性膨張。

本理論の特徴は、増分非弾性ひずみが次式のように、損傷量(η)の関数であるイントリンシック時間(Z)と関連づけられている点である。

$$dZ = \frac{d\zeta}{Z_1}, \quad d\zeta = \frac{d\eta}{f(\eta, \epsilon)}, \quad d\eta = F(\epsilon, \sigma) \cdot d\xi \quad (3)$$

ここに、 $f(\eta, \epsilon)$: ひずみ硬化関数、 $F(\epsilon, \sigma)$: ひずみ軟化関数、 $d\xi = \sqrt{J_2(d\epsilon)}$ 、 Z_1 : 定数、 σ : 応力テンソル、 ϵ : ひずみテンソル。本理論による計算の流れ図を図1に示す。

*1 (株)竹中工務店 工修(正会員)
 *2 日本大学助教授 理工学部建築学科、工博(正会員)
 *3 日本大学 教授 理工学部建築学科、工博
 *4 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻

3. パラメータの感度解析

本節では、モデルを構成するパラメータのうち、①初期ヤング係数 E_0 、②イントリンシック時間(Z)に含まれる定数 Z_1 、③ひずみ軟化関数 $F(\sigma, \epsilon)$ に含まれる関数 F_1 、④ひずみ硬化関数 $f(\eta, \epsilon)$ に含まれる係数 a_7 を取り挙げ、これらのパラメータが応力-ひずみ応答に及ぼす影響について感度解析を行った。図2に、初期ヤング係数 E_0 を変化させたときの一軸圧縮応力-ひずみ関係を示す。式(1)から分かるように、増分応力-ひずみ関係は接線弾性係数 G および K の関数であり、 G および K は非弾性膨張 λ 、 E_0 およびポアソン比 ν によって次式のように定義されている。

$$\left. \begin{aligned} G &= G_0 \left(1 - 0.25 \frac{\lambda}{\lambda_0} \right), & G_0 &= \frac{E_0}{2(1+\nu)} \\ K &= K_0 \left(1 - 0.25 \frac{\lambda}{\lambda_0} \right), & K_0 &= \frac{E_0}{3(1-2\nu)} \end{aligned} \right\} (4)$$

応力-ひずみ応答は E_0 値に依存して大きく変化しており、 E_0 は全体挙動を支配する重要なパラメータである。図3に、定数 Z_1 を変化させたときの一軸圧縮応力-ひずみ応答の比較を示す。 Z_1 はイントリンシック時間を定義する式(3)に含まれ、非弾性偏差ひずみに影響を及ぼすパラメータである。つまり、 Z_1 が小さくなると、非弾性ひずみが早期に増大し、低ひずみ領域から非弾性挙動が始まる。一方、 Z_1 を大きくすると、比例限界[5]およびピーク応力が上昇する傾向にある。

次に、軟化関数に含まれる関数 F_1 の影響について検討する。図4に、 F_1 を一定値と仮定したときの一軸圧縮応力-ひずみ応答の比較を示す。本来、関数 F_1 は引張破壊を表現するために導入されたものであるが、圧縮応答にも大きな影響を及ぼす。つまり、 F_1 は、その値が大きくなると、応答を早期にピーク応力値に至らしめ、応力の上昇を頭打ちにする役割がある。

エンドクロニック理論は、高ひずみ領域におけるひずみ硬化の影響を低減するため、ひずみ硬化関数の中に、ひずみ軟化関数に含まれる関数 F_1 を導入している。その結果、低拘束圧下における軟化挙動が適切に再現できないことが判った。図5は、関数 F_1 にかかる係数 a_7 を変化させたときの一軸圧縮応力-ひずみ応答の比較を示す。 a_7 を小さくすると、関数 F_1 の硬化低減効果は緩和され、軟化域の収束応力が上昇する。

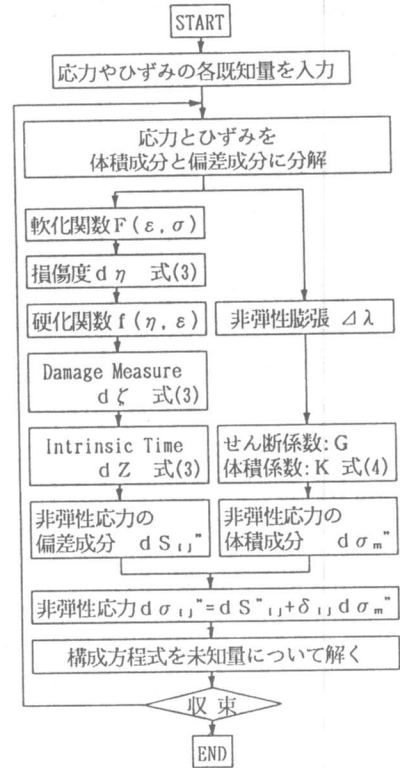


図1 計算の流れ図

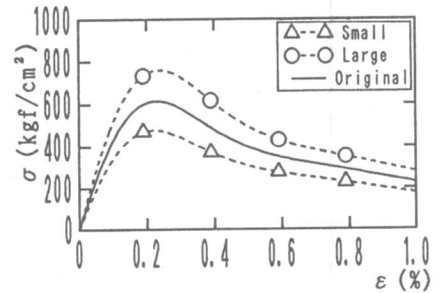


図2 E_0 の感度解析結果

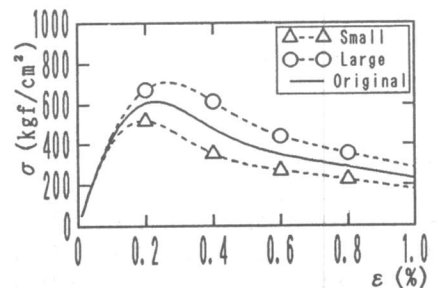


図3 Z_1 の感度解析結果

4. パラメータの同定

本節では、修正マルカート法[6]を適用して求めたパラメータの同定結果について述べる。同定に用いた実験データは、①白井らの円柱供試体 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$) に関する一軸圧縮試験の結果[7]、②Kupferらおよび野口らの平板 ($200 \times 200 \times 50\text{mm}$) に関する二軸圧縮試験の結果[8, 9]、および③谷川らの立方体 ($100 \times 100 \times 100\text{mm}$) に関する低側圧を受ける三軸圧縮試験の結果[10]である。白井らの実験では簡易高剛性試験装置、谷川らの実験では高剛性実験装置が使われ、ピーク応力後の軟化域のデータも得られている。しかし、ピーク後の挙動は、van Mierが指摘するように[11]、破壊の局所化が支配的となり、ひずみ応答は載荷装置、破壊様式、変位測定区間等によって大きく異なると考えられる。従って、本研究ではピーク応力までの応答を精度よく推定しうるパラメータの同定を行うことを基本方針とし、ピーク後については、むしろ定性的な評価にとどめることにした。同定したパラメータは Z_1 , F_3 , a_7 , a_8 , a_9 , E_0 , ν の7個であり、その他のパラメータはオリジナルの値を用いた。

(1) Z_1 の同定：コンクリートの圧縮応答は、圧縮強度が高くなる程、剛性が高くなり、比例限界も上昇する。この応答の変化を考慮するため、パラメータ Z_1 を次式のように圧縮強度の関数と仮定し、係数を同定した。

$$Z_1 = \{b_1 + b_2(f'_c / \bar{f}'_c)^{-1}\}^2 \quad (5)$$

ここに、 $b_1 = 0.082$, $b_2 = -0.037$, f'_c : シリンダーの圧縮強度、 \bar{f}'_c : 基準強度 ($= 300\text{kgf/cm}^2$)

(2) F_3 の同定：高強度コンクリートに関する二軸圧縮試験では、主応力比の違いにより、面内あるいは面外の引張ひずみが破壊を支配する場合があることが報告されている[5, 9]。こうした引張ひずみが応答に及ぼす影響を考慮するため、パラメータ F_3 を次式のように仮定し、係数を同定した。

$$F_3 = b_3 + \{b_4(1 - \epsilon_{\max} / \epsilon_u)\}^{-1} \leq F_{3u} \quad (6)$$

ここに、 $b_3 = 1.5$, $b_4 = 4.2$, ϵ_{\max} : 最大引張ひずみ、 $\epsilon_u = 0.3w_c / 3d_s$: 限界ひずみ、 w_c : 限界開口変位[12]、 d_s : 最大骨材寸法、 F_{3u} : F_3 の限界値。ピーク後の軟化挙動は圧縮強度が高くなるほど下降勾配は急激となり、逆に、横拘束圧が大きくなるほど、勾配は緩やかとなり延性的な挙動に近づくことが知られている。本研究では、こうした効果を考慮するため、限界値 F_{3u} を圧縮強度 f'_c および応力の第3不変量 $I_3(\sigma)$ の関数として次式のように仮定した。

$$F_{3u} = \frac{2.64(f'_c / \bar{f}'_c) - 1.22}{1 + 15\{I_3(\sigma) / f'_c{}^3\}^{1/3}} \quad (7)$$

(3) a_7 の同定：横拘束圧を受ける場合のピーク後の応答の違いを考慮するため、パラメータ a_7 を次式のように圧縮強度 f'_c と応力の第3不変量 $I_3(\sigma)$ の関数として仮定し、係数を同定した。

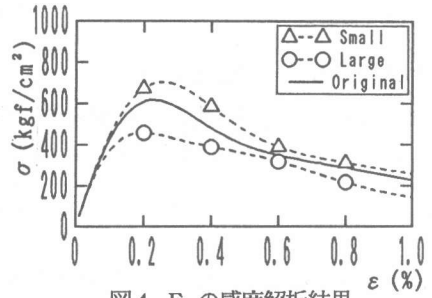


図4 F_3 の感度解析結果

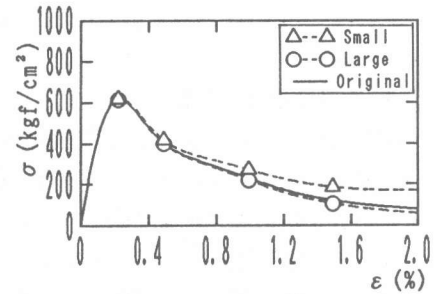


図5 a_7 の感度解析結果

$$a_7 = \frac{b_5}{1 + b_6 \{ I_3(\sigma) / f_c'^3 \}^{1/3}} \quad (8)$$

ここに、 $b_5 = 100$ 、 $b_6 = 100$ 。

(4) a_8 および a_9 の同定： 繰返し載荷に対する応答を制御するため、ひずみ硬化関数に含まれるパラメータ a_8 および a_9 を次のように同定した。

$$a_8 = 1.5 \times 10^{-5} \quad , \quad a_9 = 0.6 \times 10^{-3} \quad (9)$$

(5) E_0 および ν の同定： 圧縮強度の違いによる影響を考慮するため、 E_0 および ν を次式のように同定した。

$$E_0 = 533.4 f_c' + 107000 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad , \quad \nu = 0.166 + 0.015 f_c' / \sqrt{f_c'} \quad (10)$$

5. 実験結果との比較

図6はシリンダーの一軸圧縮試験の結果と計算結果を比較したものである。オリジナル理論を高強度コンクリートに適用した場合、剛性を高く評価し、軟化域の応力を過大評価する傾向にある。一方、修正モデルは全体的に良好な一致を示し、特に、普通強度コンクリートと高強度コンクリートの軟化域での性状の差異を明確に表現している。

図7は一軸圧縮繰返し載荷に対するの圧縮応力-ひずみ関係の計算値を実験値と比較したものである。エンドクロニック理論の欠点として繰返し載荷でのヒステリシスループが小さいという欠点はあるものの、修正モデルは繰返し載荷時に対する全体応答についても比較的良好に追跡している。

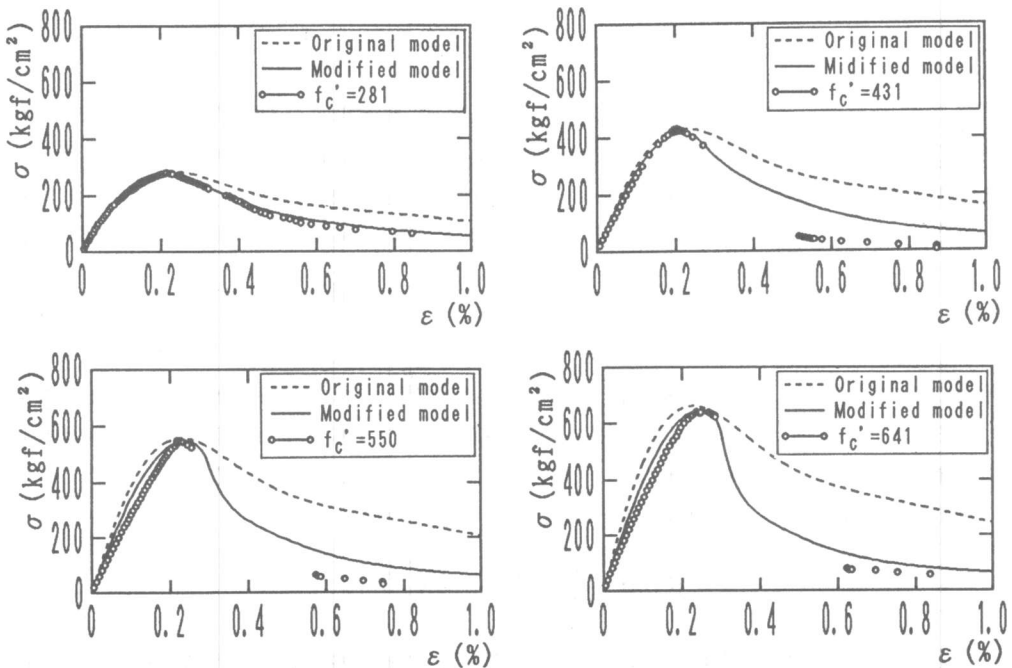


図6 一軸圧縮実験との比較[7]

図8は普通強度と高強度コンクリートの平板に関する二軸圧縮試験の結果を計算結果と比較したものである。いずれの場合も、修正モデルの方が適合性は良い。特に、応力比 (σ_2/σ_1) が1.0の高強度の試験体の場合、耐力が試験体の面外に分離する引張破壊によって決まっており、修正モデルはこの現象をよくとらえている。

図9は低拘束圧 (σ_L) を受ける三軸圧縮実験の結果と解析結果とを比較したものである。修正モデルの計算値は、いずれの場合も、ピーク後の高ひずみ領域を除くと実験値とよく一致している。軟化域の挙動予測に関しては、実験値の妥当性も含め今後検討する余地があるが、拘束圧が圧縮応答に及ぼす定性的な傾向は良好にとらえている。

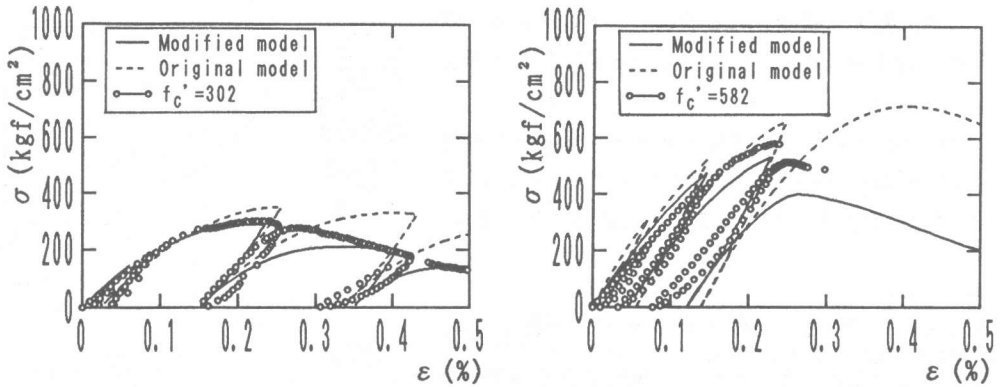


図7 一軸圧縮繰返し実験との比較[7]

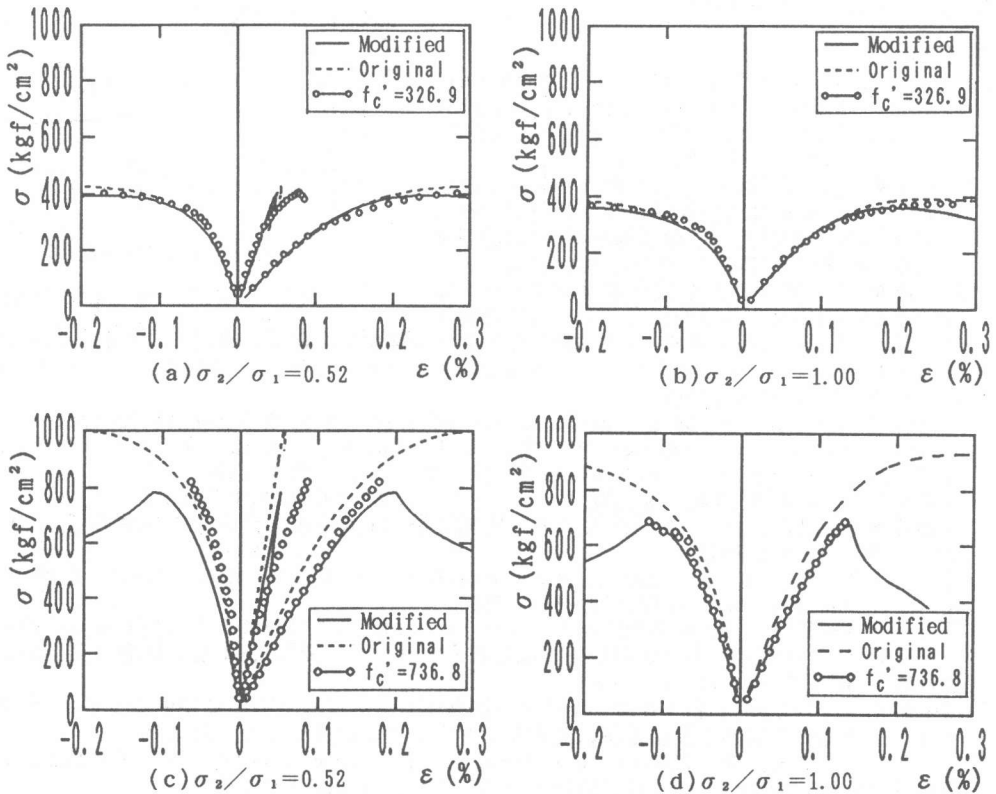


図8 二軸圧縮実験との比較[9]

6. まとめ

エンドクロニック理論を普通強度コンクリートから高強度コンクリートにまで適用できるよう拡張し検討した結果、以下のことが明らかになった。

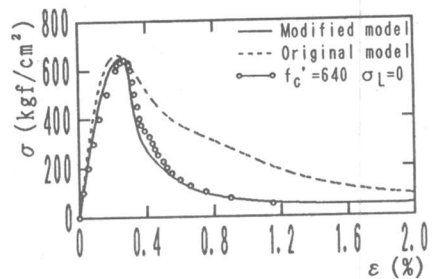
- ① コンクリート強度の違いが応力上昇域に及ぼす影響はパラメータ Z_1 を、また下降域の性状の違いは軟化関数に含まれる関数 F_3 に限界値を設定する事により表現できる。
- ② 二軸圧縮下で観測される破壊モードの違いは、軟化関数に含まれる関数 F_3 を修正する事により表現できる。
- ③ 三軸圧縮下における拘束圧がピーク後の軟化挙動に及ぼす影響は、硬化関数に含まれるパラメータ a_7 を応力の第3不変量の関数にすることにより表現できる。

【謝辞】

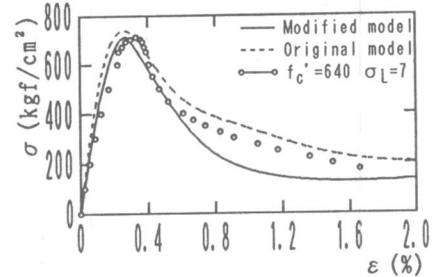
本研究の一部は建設省総プロ New RC (委員長: 青山博之 東大教授、高強度鉄筋分科会主査: 森田司朗 京大教授) の一貫として、また、一部は文部省科学研究費補助金総合研究A (代表: 野口博 千葉大教授) の分担研究として行ったものである。

【参考文献】

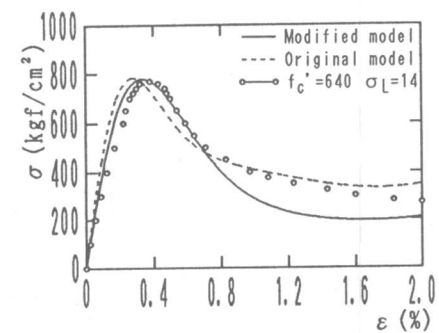
- [1] Bazant, Z. P. and P. D. Bhat : "Endochronic Theory of Inelasticity and Failure of Concrete" Jour. of EMDIV., Proc. of ASCE, vol. 102, No. EM4, PP. 701-722, 1976
- [2] 阿満重幸、白井伸明他6名: 変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状に関する研究 (その2) 変形性状の検討及び曲げ挙動解析, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, PP. 509-510, 1989
- [3] 前中敏伸、白井伸明他3名: 高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究 (その2) 材料物性及び応力-ひずみ関係の検討, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 構造II, PP. 467-468, 1991
- [4] 谷川恭雄、山田和夫: エンドクロニック理論のコンクリート工学への適用, コンクリート工学, Vol. 21, No. 1, PP. 31-43, 1983
- [5] Robert C. Chen and Ramon L. Carrasquillo: Behavior of High-Strength Concrete under Uniaxial and Biaxial Compression, ACI, SP-87, "High-Strength Concrete", PP. 251-273
- [6] 渡部力他2名監修: Fortran77による数値計算ソフトウェア, 丸善, 1990
- [7] 森泉和人、白井伸明他3名: 高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究 (その1) 圧縮強度を変動因子とした円柱供試体の圧縮実験, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 構造II, PP. 465-466, 1991
- [8] Kupfer, H. B., Hilsdorf, H. K. and Rusch, H.: Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, ACI Journal, Vol. 66, No. 8, PP. 656~665, 1969
- [9] 二村有則、野口博他1名: 超高強度コンクリートの二軸応力下の破壊条件に関する実験的研究 (その3) 二軸圧縮、引張-圧縮の実験概要と応力-ひずみ関係, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 構造II, PP. 473-474, 1991
- [10] 畑中重光、谷川恭雄他2名: コンファインド高強度コンクリートの圧縮塑性とその評価, コンクリート構造物の塑性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, PP. 1-20, 1990
- [11] van Mier, J. G. M.: Multiaxial strain-softening of concrete; Part I: Fracture, Materials and Structures, 111(19): vol. 19, No11, 1986, PP179-200
- [12] CEB-FIP MODEL CODE 1990 : Final Draft, Bulletin D' Information No. 203, July, 1991, PP. 2-14~2-16



(a) $\sigma_L = 0.00$ (kgf/cm²)



(b) $\sigma_L = 7.00$ (kgf/cm²)



(c) $\sigma_L = 14.0$ (kgf/cm²)

図9 三軸圧縮実験との比較[10]