

[28] 各種コンクリートの応力度-ひずみ度曲線に対する Endochronic theory の適用性

正会員 谷川 恭雄 (名古屋大学工学部)

正会員 ○山田 和夫 (名古屋大学工学部)

1. まえがき

Endochronic theory^{1)~3)}は、種々の荷重履歴を受けるコンクリートの応力度-ひずみ度曲線(以下、 $\sigma - \epsilon$ 曲線と略記)に適用可能な解析モデルとして、最近注目を集めている。筆者らも、コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線に対する Endochronic theory の適用性について若干の検討を行い、その汎用性を確かめたが、Bazant らが提案した理論式中の材料定数をそのまま用いた場合には、いくつかの不合理な点が生じることも指摘した⁴⁾。本報では、Endochronic theory を定量化するための第1段階として、まず一軸圧縮荷重を受ける各種コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状と理論式中の材料定数との相互関係について検討することにした。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

本研究では、 $\phi 10 \times 20$ cm 円柱試験体を用いて表-1に示すような2シリーズの実験を行った。実験-Iは、コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす水セメント比(W/C)、粗骨材容積比(V_a/V_c)および粗骨材の最大寸法(ϕ_a)の影響を調べたものであり、実験-IIは、水セメント比(W/C)、試験材令(Age)および養生条件の影響について調べたものである。

2.2 試験体の製作および養生方法

試験体の製作には、普通セメント、木曽川産の川砂(最大寸法:実験-I、実験-IIとも5mm未満)および天竜川産の川砂利(最大寸法:実験-Iは表-1に示す4種類、実験-IIは15mm)を使用した。試験体は、材令2日目に脱型後、実験-Iでは1週間標準水中養生を行った後に実験室内に放置したが、実験-IIでは脱型後直ちに所定の条件下で養生を行った。試験材令は、実験-Iはすべて4週とし、実験-IIは表-1に示す3種類とした。

2.3 測定方法

試験体の荷重には、100t高剛性圧縮試験機を使用し、ひずみ速度を約1,700 μ /min.の一定として、ひずみ度が10,000 μ に至るまでの $\sigma - \epsilon$ 曲線を測定した。 $\sigma - \epsilon$ 曲線の解析用データとしては、X-Yレコーダに自記記録させた $\sigma - \epsilon$ 曲線から、200 μ のひずみ度毎に読み取った応力度を用いた。

3. 解析方法

別報⁴⁾で示したように、Hysteretic fracturing endochronic theory³⁾における一軸応力場の増分 $\sigma - \epsilon$ 関係は、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_{11} &= E d\epsilon_{11} - \frac{2}{3}(1+\nu)\sigma_{11} d\zeta - \frac{2}{3}E(\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) d\eta - E(d\lambda + d\lambda' + d\lambda'') \\ d\epsilon_{22} &= -\nu d\epsilon_{11} - \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{3E}\sigma_{11} d\zeta - \frac{1}{3}(1-2\nu)(\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) d\eta + (1+\nu)(d\lambda + d\lambda' + d\lambda'') \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、E: 縦弾性係数、 ν : ポアソン比、 ζ および η : それぞれ塑性および微小破壊に関連する intrinsic time または endochronic time⁵⁾に相当する項、 λ : せん断応力によるダイラタンス、 λ' : 静水圧によるコンパクション、 λ'' : せん断応力によるコンパクション。Bazant らは、上式中の弾性係数は、主として試験体内部の微小破壊によって低下すると仮定して、 $dG = -G d\eta$ で表示し、このせん断弾性係数(G)と体積弾性係数(K)との関係はBudiansky らの解析結果⁶⁾に基づいて、

$$\frac{K}{K_0} = 0.46 \left(\frac{G}{G_0}\right) + 0.54 \left(\frac{G}{G_0}\right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

で近似表示している。ただし、添え字“0”は初期弾性係数を示し、

表-1 実験の概要

(a) 実験 - I

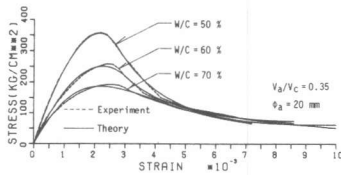
W/C (g)	ϕ_a (mm)	V_a/V_c	Curing condition	Age of concrete (weeks)
50	10, 15	0.35, 0.39	Air curing	4
60	20, 25	0.43		
70				

[Notes] W/C: Water-cement ratio, ϕ_a : Maximum size of coarse aggregate, V_a/V_c : Volume fraction of coarse aggregate.

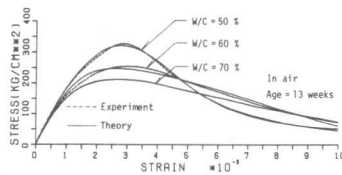
(b) 実験 - II

W/C (g)	ϕ_a (mm)	V_a/V_c	Curing condition	Age of concrete (weeks)
50	15	0.39	Water curing	4, 13, 26
60			Air curing	
70				

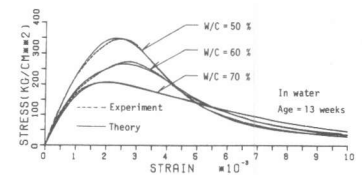
[Notes] W/C: Water-cement ratio, ϕ_a : Maximum size of coarse aggregate, V_a/V_c : Volume fraction of coarse aggregate.



(a) 実験 - I

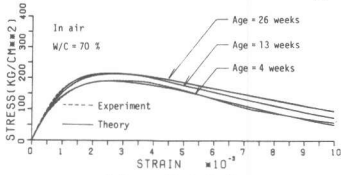


(b) 実験 - II (空中養生)

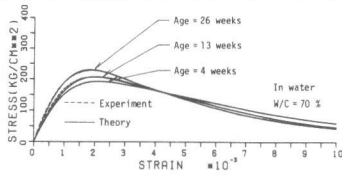


(c) 実験 - II (水中養生)

図 - 1 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす水セメント比の影響



(a) 空中養生



(b) 水中養生

図 - 2 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす試験材令の影響 (実験 - II)

$$E_0 = F_c \times 10^3 - 0.46 \times 10^5 \quad (kg/cm^2), \quad \nu_0 = 0.18 \quad \dots \dots \dots (3)$$

を用いて、 $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ および $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ の関係から計算される。ここに、 F_c : コンクリートの圧縮強度。

また、構成方程式中の各材料関数は、次のように表わされる。

$$d\zeta = \frac{g_1}{f_1} d\epsilon, \quad d\gamma = \frac{g_2}{f_2} d\epsilon, \quad d\lambda' = f_3 d\epsilon, \quad d\lambda'' = \frac{\sigma_{11} g_0}{9K f_0} d\epsilon, \quad d\lambda''' = f_4 d\epsilon \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $d\epsilon = \sqrt{\frac{1}{2} d\epsilon_{km} d\epsilon_{km}} = \frac{|d\epsilon_{11} - d\epsilon_{22}|}{\sqrt{3}}$, $d\epsilon'' = |d\epsilon_{kk}| = |d\epsilon_{11} + 2d\epsilon_{22}|$ 。さらに、一軸応力場における f_1 および g_1 は、それぞれ次のように表示される。

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= a_0 \sqrt{r}, \quad f_1 = z_1 (1 + \beta_1 \xi + \beta_2 \xi^2) \\ g_2 &= \left\{ \frac{a_2 \bar{r}}{a_{13} (1 + a_{14} I_1^2) + \bar{r}} \right\}^2, \quad f_2 = z_3 (1 + \beta_5 \xi + \beta_6 \xi^2) \\ f_3 &= \frac{c_0}{1 - c_1 I_1} \left(1 - \frac{\lambda'}{\lambda_0} \right) \left\{ \left(\frac{\lambda'}{\lambda_0} \right)^2 + \left\{ \frac{c_2 \bar{r}^2}{c_3 (1 + c_4 |I_1|) + \bar{r}} \right\}^2 \right\} \\ g_0 &= \left(\frac{1}{b_1 - I_1} \right)^2 \frac{b_0}{1 + b_2 \bar{r}^2}, \quad f_0 = z_2 (1 + \beta_3 \xi + \beta_4 \xi^2), \quad \xi'' = \int g_0 d\epsilon' \\ f_4 &= \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda''}{\lambda_0} \right)^2 \right\} \frac{g_6 c_1 I_1}{1 + c_7 g_6^2}, \quad g_6 = c_6 \bar{r} - c_8 |I_1| \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $r = \sqrt{\frac{1}{2} e_{km} e_{km}} = \frac{|e_{11} - e_{22}|}{\sqrt{3}}$, $I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = \sigma_{11}$ 。また、 $a_i, b_i, c_i, z_i, \beta_i, \lambda_0, \lambda_0''$: 材料定数。

本研究では、Fletcher の修正 Marquardt 法を用いて、一軸応力場の $\sigma - \epsilon$ 曲線に関連する上記の材料定数を本実験結果に対して最適化した。ただし、

予備解析の結果、ほとんど変化しない材料定数については、Bazant らが提案した値³⁾をそのまま使用した。最適化の対象とした材料定数は、 $a_{13}, b_2, c_0, c_2, c_7, z_1, z_2, z_3, \beta_2, \beta_4$ および β_6 の 11 個である。

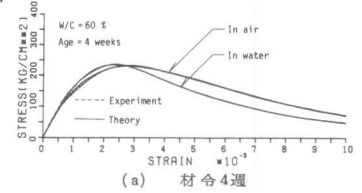
4 結果とその考察

図 - 1 ~ 図 - 5 は、本実験によって得られた $\sigma - \epsilon$ 曲線の実測値と材料定数を最適化した場合の解析値との比較を示した一例である。図によれば、両者の間には比較的よい近似がみられる。

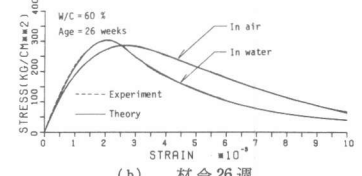
4.1 $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状に及ぼす各種実験要因の影響

(1) 水セメント比の影響: コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線は、一般に水セメント比が小さいほど、初期弾性係数、圧縮強度および最大負剛性が大きく、脆性的な形状となる。また、図 - 1 によれば、水中養生および初期材令時に水中養生を行った試験体の $\sigma - \epsilon$ 曲線は、4,000 ~ 6,000 μ のひずみレベルで交わり、その後の形状は水セメント比の影響をそれほど受けないが、空中養生時のそれは、水セメント比によってかなり相違する。

(2) 試験材令および養生条件の影響: 図 - 2 から明らかなように、水中養生時のコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす試験材令の影響は、前述の水セメント比の影響とほぼ同様の傾向であるが、空中養生時では、応力下降域の $\sigma - \epsilon$ 曲線は試験材令にほとんど影響されず、この領域の耐荷能力の相違は、主として圧縮強度の違いに依存している。また、養生条件の影響を示した図 - 3 によれば、コンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線は、一般に水中養生時より



(a) 材令4週



(b) 材令26週

図 - 3 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす養生条件の影響 (実験 - II)

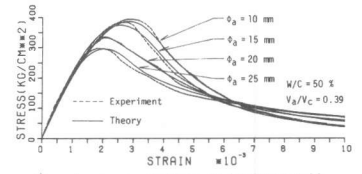


図 - 4 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす粗骨材寸法の影響 (実験 - I)

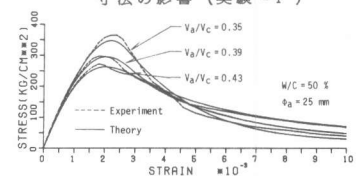


図 - 5 $\sigma - \epsilon$ 曲線に及ぼす粗骨材容積比の影響 (実験 - I)

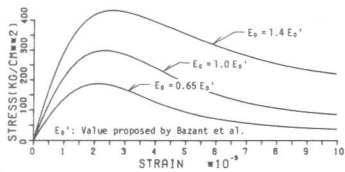


図-6 $\sigma - \epsilon$ 曲線の解析値に及ぼす初期弾性係数の影響

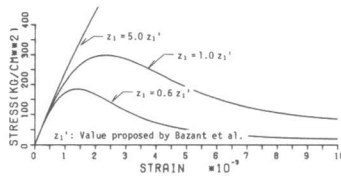
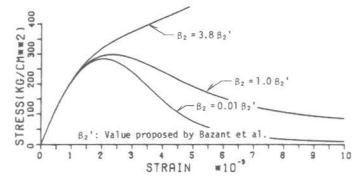
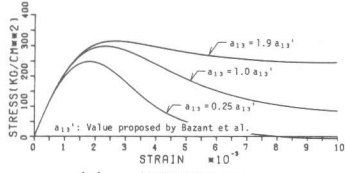


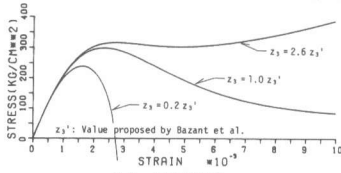
図-7 (a) 材料定数 z_1



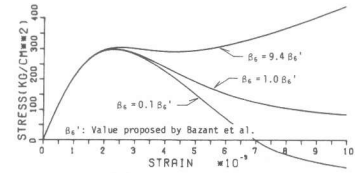
(b) 材料定数 β_2



(a) 材料定数 a_{13}



(b) 材料定数 z_3



(c) 材料定数 β_6

図-8 $\sigma - \epsilon$ 曲線の解析値に及ぼす微小破壊成分の影響

も空中養生時の方が初期弾性係数および最大負剛性は小さく、圧縮強度時のひずみ度（以下、最大ひずみ度と略記）は大きくなり、延性的な形状を示す。この傾向は試験材寸が大きく水セメント比が小さいほど顕著である。

(3) 粗骨材の影響：図-4によれば、粗骨材の最大寸法が大きいくほど、圧縮強度、最大ひずみ度および最大負剛性が小さくなり、 $\sigma - \epsilon$ 曲線の全体の形状は滑らかとなるが、この傾向は、一般に水セメント比が小さいほど顕著である。また、図-5によれば、粗骨材容積比が大きいくほど $\sigma - \epsilon$ 曲線は滑らかとなる。

4.2 $\sigma - \epsilon$ 曲線の解析値に及ぼす初期弾性係数および各種材料定数の影響

図-6～図-8は、初期弾性係数および最適化の対象とした材料定数を変化させた場合の $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状を示している。ただし、各定数の値としては、Bazantらが提案した値と本解析で得られた上・下限値を与えてある。

(1) 初期弾性係数の影響：図-6によれば、初期弾性係数 (E_0) の値は、主として応力上昇域の形状を支配し、 E_0 が大きいほど圧縮強度および最大ひずみ度は増大するが、応力下降域の形状にはそれほど影響を及ぼさない。

(2) 各種材料定数の影響：図には示していないが、本解析結果によれば、 b_2 、 c_0 、 c_2 、 c_7 、 β_4 および z_2 の値は、 $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状にそれほど大きな影響を与えない。しかし、その他の材料定数は、 $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状に顕著な影響を及ぼす。図-7に示した z_1 および β_2 は、ともに塑性性質に基づく硬化関数 f_1 中の定数である。ただし、 z_1 は、本解析ではひずみ軟化関数 g_1 中の a_0 と明確に分離することはできず、見掛け上は、塑性成分に及ぼす関数 f_1 と g_1 の寄与率を決定する定数とみなすことができる。図によれば、 z_1 は、その値が大きくなるほど圧縮強度および最大ひずみ度を増大させるが、応力下降域における $\sigma - \epsilon$ 曲線の形状にはそれほど大きな影響を及ぼさない。これに対して、 β_2 は、 $\sigma - \epsilon$ 曲線が下降形状を示す場合には圧縮強度に顕著な影響を及ぼさず、主として応力下降域の形状を支配する。一方、図-8に示した a_{13} および β_6 は、それぞれ微小破壊に基づくひずみ軟化関数 g_2 および硬化関数 f_2 中の定数であり、 z_3 は、微小破壊成分に対して z_1 と同様な働きを有する定数である。図によれば、 a_{13} は主として応力変化の大きい最大応力度前後の形状を支配し、その値が大きいくほど圧縮強度は増大し、 $\sigma - \epsilon$ 曲線は延性的となる。また、 z_3 は、とくに脆的な挙動を示すコンクリートの最大負剛性に至るまでの応力下降域の形状を支配していると考えられる。なお、 β_0 の影響は、前述の β_2 の傾向とほぼ同様である。

4.3 初期弾性係数および各種材料定数に及ぼす本実験要因の影響

図-9～図-14は、初期弾性係数および本解析によって得られた各種材料定数と本実験要因との関係を示した一例である。ただし、各材料定数は、いずれもBazantらが提案した値³⁾で除して無次元化してある。

(1) 初期弾性係数： 図-9によれば、一般に

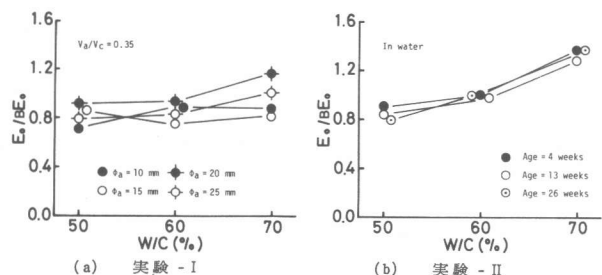


図-9 初期弾性係数に及ぼす本実験要因の影響

Bazant らが提案した初期弾性係数 ($B E_0$, 式(3)を参照)は、水セメント比(W/C)が小さいコンクリートに対しては大きく、またW/Cが大きいものに対しては小さく評価している。これは、式(3)が圧縮強度の一次式であることによるが、前掲の図-6から明らかなように、強度の解析値は E_0 の値と直接関係するため、理論式中の定数は、いずれも E_0 の値に大きく影響される。したがって、初期弾性係数の定量化に際しては、さらに詳細な検討が必要と思われる。

(2)各種材料定数：図-10によれば、 z_1 の値は水セメント比の増加とともに低下する傾向を示している。前掲の図-7(a)から明らかなように、 z_1 は、主として応力上昇域の形状を支配するパラメータである。したがって、各種要因による z_1 の変化は、主に前述の E_0 の値と圧縮強度との関係を調整するために生じるとと思われる。図-11に示した β_2 および図-14に示した β_6 は、前掲の図-7(b)および図-8(c)に示したように、主として応力下降域の形状を支配する。また、 β_2 よりも β_6 の方がより高ひずみ領域の形状に影響を及ぼす。図-11および図-14によれば、 β_2 および β_6 の値は、それぞれ水セメント比の増加に伴って増大および低下する傾向を示している。これは、前掲の図-1から明らかなように、水セメント比が小さい場合には、最大荷重直後の挙動は脆性的であるが、高ひずみ領域では、ひずみ度の増大に伴う応力度の低下が小さくなるのに対して、水セメント比が大きい場合には応力下降域全域で比較的安定した応力度の低下が認められるためと思われる。材料

定数 a_{13} および z_3 は、前述したように、それぞれ最大荷重以前および応力下降域の挙動に影響を及ぼすが、図-13によれば、ともに水セメント比の減少とともに低下しており、W/C=50%のコンクリートでは、Bazant らが提案した値の約0.5倍程度となっている。これは、本実験で用いたコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 曲線が、Bazant らの定量化した解析モデルよりも、はるかに脆性的な挙動を示すためと考えられる。

5. むすび

本研究では、Endochronic theory をコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係式として適用するうえでの基礎的な検討を行った。今後、応力度-横ひずみ度曲線および多軸応力場の $\sigma - \epsilon$ 曲線の定量化の方法について検討する予定である。

〔謝辞〕本研究に際して御指導・御援助を戴きました名大・小阪義夫教授およびNorthwestern大学・Z.P.Bazant教授、並びにデータ整理と数値解析に御協力を戴きました名大学生・堀田隆夫君に謝意を表します。

〔文献〕1) Z.P.Bazant and P.D.Bhat, Jour. of EM-Div., Proc. of ASCE, Vol. 102, No. EM4, August 1976, pp. 701~722. 2) Z.P.Bazant and C.L.Shieh, Nuclear Engng. and Design, Vol. 47, 1978, pp. 305~315. 3) Z.P.Bazant and C.L.Shieh, Jour. of EM-Div., Proc. of ASCE, Vol. 105, No. EM5, Oct. 1980, pp. 929~950. 4) 山田・谷川・小阪, 日本建築学会学術講演集(近畿), 昭55.9, pp. 121~122. 5) W.F.Chen and E.C.Ting, Jour. of EM-Div., Proc. of ASCE, Vol. 106, No. EM1, Feb. 1980, pp. 1~19. 6) B.Budiansky and R.J.O'Connell, International Jour. of Solids and Structure, Vol. 12, 1976, pp. 81~97.

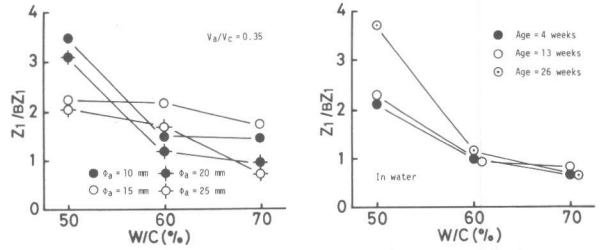


図-10 材料定数 z_1 に及ぼす本実験要因の影響

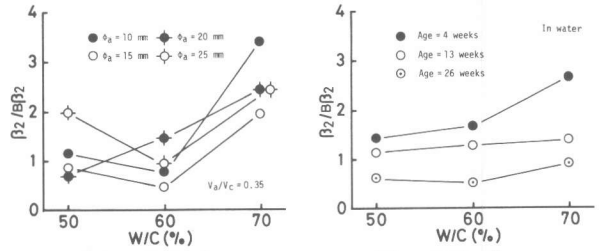


図-11 材料定数 β_2 に及ぼす本実験要因の影響

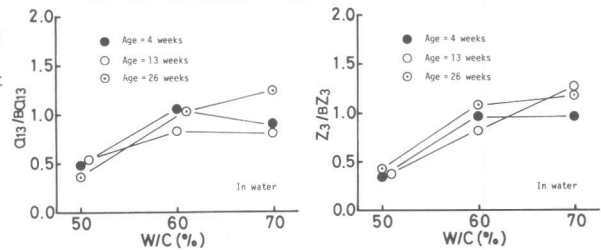


図-12 材料定数 a_{13} に及ぼす本実験要因の影響 (実験-II)

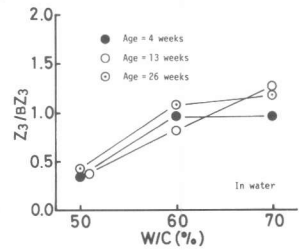


図-13 材料定数 z_3 に及ぼす本実験要因の影響 (実験-II)

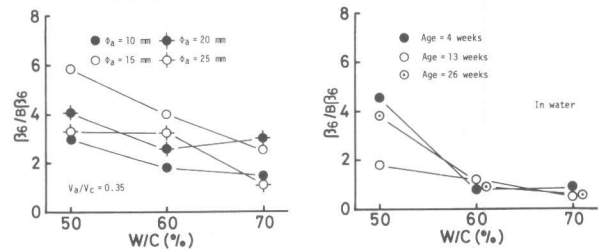


図-14 材料定数 β_6 に及ぼす本実験要因の影響