

長岡技術科学大学 江本 雅樹
 東北大学工学部 本間 紀雄
 東北大学工学部 池田 清宏
 長岡技術科学大学 丸山 久一

1. はじめに

分岐理論では、強度変動を引き起こす要因として初期不整という1次元量として解釈する手法が採られている。初期不整を用いた理論としては強度の低下量が初期不整の大きさの2/3乗に比例するというKoiterの法則¹⁾が有名である。また池田等は単一の初期不整に対する漸近理論を有限次元へと一般化し、土・コンクリート等の土木材料に関して一連の研究を行っており、強度変動に分岐が関与していることを明らかにしている^{2) 3) 4)}。本研究では、ひび割れの影響をおさえることにより典型的な分岐挙動を得ることを目指し、繊維補強コンクリートを使用し、一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線が、分岐理論によってどの程度支配されているかを調べることで、分岐が破壊の一因となっていることを検証する。さらに漸近近似則を適用し、分岐による破壊の場合と割れによる破壊の場合の応力-ひずみ曲線の近似シミュレーションを行った。

2. 理論

2.1 初期不整感度則

池田等は非線形の釣合い式から分岐現象の釣合い経路を表わす分岐方程式(1)

$$\left| \delta u - \frac{\delta P}{E} \right|^{1/2} \delta P + p \left| \delta u - \frac{\delta P}{E} \right|^{3/2} + q\epsilon + \text{h.o.t.} = 0 \quad (1)$$

を誘導している³⁾。ここに、 P は軸方向荷重、 u は軸方向変位、 ϵ は初期不整変数をそれぞれ表わす。また、 p, q, E はパラメータである。ところで、分岐する系の初期不整による強度の低下量 δP_c に関するKoiterの2/3乗則は¹⁾,

$$\delta P_c \equiv P_c - P_c^0 \sim -\frac{3p^{1/3}q^{2/3}}{2^{2/3}}\epsilon^{2/3} \quad (2)$$

により与えられる。Koiter則を一般化するため、直線

$$\delta P + h_i \delta u = 0 \quad (3)$$

を考える(h_i は定数である)。式(3)を式(1)に代入すると、変位に関する初期不整の2/3乗則

$$\delta u|_{\delta P + h_i \delta u = 0} \sim \frac{\text{sign}(\delta u) q^{2/3} \epsilon^{2/3}}{A_{h_i}} \quad (4)$$

が求まる。 $\delta u|_{\delta P + h_i \delta u = 0}$ は、直線と解曲線との交点における変位と分岐点の変位との差を表し、 $\text{sign}(\delta u)$ は、その符号である。ただし、

$$A_{h_i} = \left[\text{sign}(\delta u) h_i \left| 1 + \frac{h_i}{E} \right|^{1/2} - p \left| 1 + \frac{h_i}{E} \right|^{3/2} \right]^{2/3}$$

式(2)と(4)から ϵ を消去すると、

$$\delta P_c \sim -\frac{3 \text{sign}(\delta u)}{2^{2/3}} p^{1/3} A_{h_i} \delta u|_{\delta P + h_i \delta u = 0} \quad (5)$$

という変位と荷重という2つの物理量の間の漸近則が求まる。実験で得られた荷重-変位曲線について、式(5)が表わす比例関係の成否を確かめることにより、分岐の介在の有無を検証できる。

2.2 分岐点探査法

漸近則(5)は、分岐点近傍では、直線(3)の任意の勾配 h 、つまり h_i ($i = 1, 2, \dots$) についても成り立つ。例えば、勾配 h_i と h_j の2本の直線を下ろした場合、式(5)より、下記の式が求まる。

$$\frac{\delta u|_{\delta P + h_i \delta u = 0}}{\delta u|_{\delta P + h_j \delta u = 0}} = \frac{A_{h_j}}{A_{h_i}} \quad (6)$$

3本の直線を下ろせば、 $h = h_1, h_2, h_3$ それぞれに対する $\delta u|_{\delta P + h_i \delta u = 0}$ から、式(4)と(6)により、定数 p と E 、及び初期不整変数 $q\epsilon$ の値が求まる。

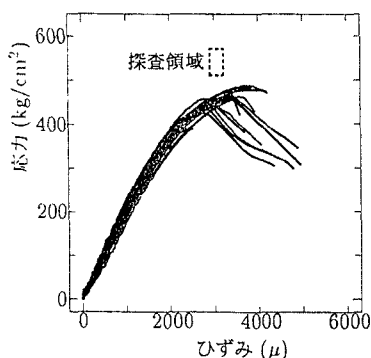


図-1 応力ひずみ曲線(鋼繊維量 0.5%)

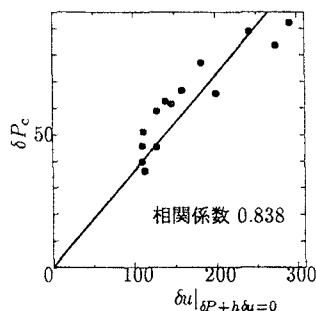


図-2 鋼繊維量 0.5% の初期不整感度則の適合性(h=0.1)

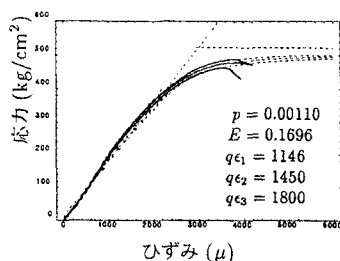


図-3 鋼繊維量 0.5% シミュレーション例(分岐)

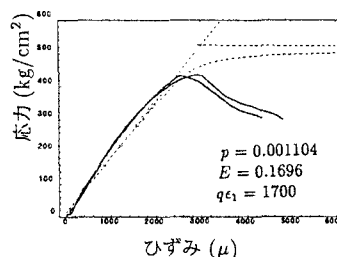


図-4 鋼繊維量 0.5% シミュレーション例(割裂)

3. 実験と解析

試験は、JIS A 1108 圧縮強度試験に基づいて行う。軸ひずみは3個の変位計の読みの平均値を用いて求める。本実験では分岐現象に粗骨材の影響を与えないようにするためモルタルを対象とし、供試体の割裂等の影響による適用限界が問題となっているため鋼繊維を添加する。鋼繊維の添加量はセメント量に対し、0.5、1.0、2.0%とする。なお、試験は材齢28日以上とし、同一バッチから高さ20cm、直径10cmの円柱供試体を作成する。実験で得られた応力-ひずみ曲線を図-1に示す。この鋼繊維量0.5%の応力-ひずみ曲線に対し、式(5)の関係を適用した結果を図-2に示す。また、漸近近似式(1)によるシミュレーションを図-3,4に示す。

今回の実験では鋼繊維の増加は圧縮強度の増加につながらなかった。本来、鋼繊維補強により応力のピーク点が上昇し、極大点後の挙動も得られるはずであったが、今回の配合では水量が多く、モルタルの粘性が少ないため鋼繊維の分散が不均一となっていると考えられる。鋼繊維が供試体内においてモルタルの材料粒度に比べ大きいため、ある種の初期不整となり、鋼繊維量の増加が初期不整の増大につながり、これが割れへと移行する要因となっていると考えられる。このことは初期不整感度則の適合性が鋼繊維量が多くなると低下することからも裏付けられる。鋼繊維補強コンクリートの破壊を考えた場合、図-3に示すような分岐による破壊と割裂による破壊が起こっていると考えられる。分岐から割裂への移行は初期不整の大きさに左右されるものと考えられ、初期不整が分岐理論の適用範囲を越えてしまうほど大きい場合、図-4に示すような割裂へと移行するものと考えられる。

4. 結論

本研究では鋼繊維補強コンクリートの破壊メカニズムに分岐が関与していることが明らかにできた。分岐という新しい視点に基づく材料強度試験が望まれる。

参考文献

- 1) Koiter, W.T. (1945): On the stability of elastic equilibrium, *Ph. D. Dissertation*, Delft, holland, (English translation: NASA Tech. Trans. F10, 1967).
- 2) Ikeda, K. and Goto, S. (1993): Imperfection sensitivity for size effect of granular materials, *Soils and Foundations* 33, 157-170.
- 3) Ikeda, K., Chida, T. and Yanagisawa, E. (1996): Imperfection sensitive strength variation of soil specimens, To appear in *J. Mech. Phys. Solids*.
- 4) Ikeda, K., Maruyama, K., Isida, H. and kagawa, S. (1996): Bifurcation in compressive behavior of concrete, To appear in *ACI Structure Journal*.