

土木材料の軟化と破壊のメカニズムの解明

東北大学	学生員	○ 三上 英明
東北大学	正員	池田 清宏
長岡科学技術大学	正員	丸山 久一
長岡科学技術大学	正員	江本 雅樹

1. まえがき

本論文は、「分岐点探査法」により、コンクリート供試体の応力-ひずみ関係上の分岐点の位置を特定することにより、分岐がこの応力-ひずみ曲線の軟化の一因となっていることを検証するものである。この手法は、荷重-ひずみ関係図上で漸近則が最も成り立つ点として分岐点の位置を特定するものである。

2. 漸近近似法

ここでの理論展開は、単純対称分岐点に限定する。十分滑らかな非線形の釣合式を

$$F(P, u, \epsilon) = 0 \quad (1)$$

と表す。ここに P は荷重パラメータ、 $u = (u_1, \dots, u_n)^T$ は n 次元の変位ベクトル、 ϵ は初期不整変数である。

完全系 ($\epsilon = 0$) の安定な主経路上の最初の単純対称分岐点 (P_c^0, u_c^0) を考える。ここに、上付添字 (0) は完全系、下付添字 (c) は特異点での値を表す。

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

となる。ここに、 p と q は分岐方程式の展開係数をスケリングした定数であり、 $E = 1/r$ は完全系の主経路の傾きを表す定数である。

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、

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

により与えられる。Koiter 則を一般化するため、直線

$$\delta P + h\delta u = 0 \quad (4)$$

を考える (h は定数である)。式 (4) を式 (2) に代入し Koiter 則により ϵ を消去すると、

$$\delta P_c \sim -\eta^* \delta u|_{\delta P+h\delta u=0} \quad (5)$$

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。ここに η^* は定数である。

3. 分岐点探査法

式 (5) の漸近則を実験曲線に適用する際、分岐点 (P_c^0, u_c^0) の位置を決める必要がある。

漸近則 (5) は、分岐点近傍では、直線 (4) 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、

$$\left| \frac{\delta u|_{\delta P+h_i\delta u=0}}{\delta u|_{\delta P+h_j\delta u=0}} \right| = \left| \frac{\eta_j^*(p, E)}{\eta_i^*(p, E)} \right| \quad (6)$$

が導かれる。3 本の直線を下ろせば、それぞれに対する $\delta u|_{\delta P+h\delta u=0}$ から、式 (5) と (6) により、定数 p と E 、及びスケリングされた初期不整 $q\epsilon$ の値が求まる。

このように h の取り方に任意性があるが、本論文では 4 本の直線を用いる方法を提案する。4 本の内 3 本の直線を選ぶ 4 通りの組み合わせ (h_1, h_2, h_3), (h_2, h_3, h_4), (h_3, h_4, h_1), (h_4, h_1, h_2) それぞれに対して定数 p ($p_i \mid i = 1, \dots, 4$) の値が求まるが、これらの値は分岐点に対しては理論的には一致するはずである。そこでこれらの値 ($p_i \mid i = 1, \dots, 4$) の分散が極小となる点として分岐点の位置を定める。

4. モルタル供試体への分岐点探査法適用

サイズ $20 \times 10 \text{ cm}$ のモルタルコンクリート供試体の圧縮試験を JISA1180 に基づいて行った。水セメント比を押さえ供試体の初期不整を小さくするために高性能 AE 減水材を添加した。また、なめらかな応力-ひずみ曲線を得るためにビニロン短繊維を体積比で 0.5% 添加した。供試体の変形を見るために供試体の回りに 120 度ごと、12mm のひずみゲージを円周上に等間隔で 3 箇所に垂直に張り付けた。なお、試験の材齢は 14 日以上とし同一バッチから 30 本程度作成した。

図-1、図-2 に 3 箇所に張り付けた平均ひずみを用いて応力-ひずみ曲線を示す。

図-2 は、ケース A (図-3) のように、3 箇所のひずみの値が揃っている供試体のデータを集めたものである。図-1 は、ケース B (図-4) のように、3 箇所のひずみの値が異なっているものをまとめた図である。ケース A は、供試体が一樣に圧縮された場合で、ケース B は、供試体が倒れた場合に相当する。分岐点探査法を、ケース A、ケース B の各供試

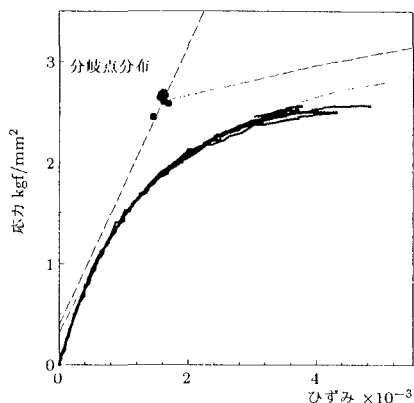


図-1 Mode - 1

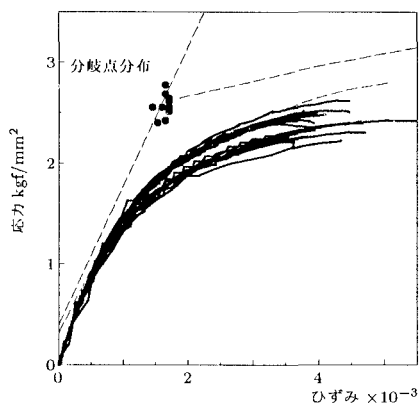


図-2 Mode - 2

体に対して行った。図-1、図-2中の黒丸は、各供試体ごとの応力 ひずみ曲線における分岐点であり、全ての供試体の分岐点は、比較的良好に一致していることが分かる。点線は、分岐点探索法で得られたパラメータを用いてシミュレーションした完全系分岐経路を表して、図-1のケース A、図-2のケース B の両方でほぼ同じ経路をたどることが分かる。

このことから、応力ひずみ曲線の変動は、初期不整の変動として理解できた。同様に、ケース B の場合もケース A のパラメータを用いて初期不整の値を変化させるだけで、精度よくシミュレーションできた。

5. 結論

本報告では、コンクリート供試体の応力 ひずみ曲線の軟化メカニズムを分岐理論により説明できた。ゆえに、各供試体間の応力-ひずみ曲線の変動は初期不整の値の確率変動としてとらえることができる。

参考文献

- 1) Ikeda, K., Murota, K., Yamakawa, Y. and Yanagisawa, E. (1997): Mode switching and recursive bifurcation in granular materials, *J. Mech. Phys. Solids*.
- 2) 山川優樹, 池田清宏, 柳澤栄司, 米原久人, (1997): Bifurcation Point Search Technique And Its Application To Materials And Structures 構造工学論文集 43A, pp. 423-430, 1997, Vol.43A
- 3) Honma (1997): 繊維補強コンクリートの分岐挙動の記述 東北大学卒業論文

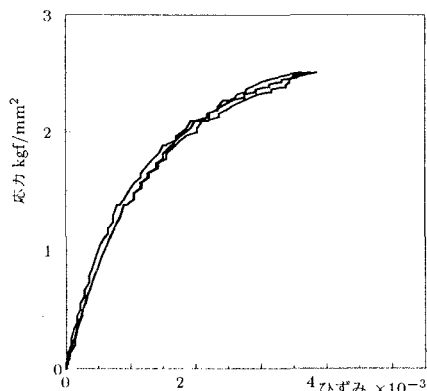


図-3 ケース A

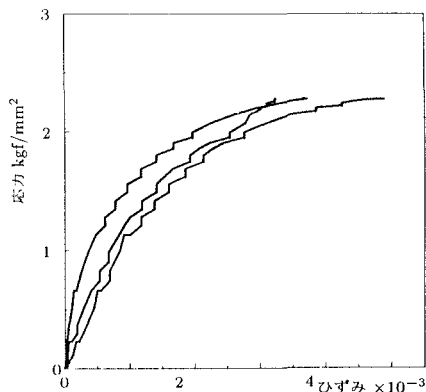


図-4 ケース B