

(I-25) 延性・脆性の二材料を用いた構造形式決定方法の提案

○東京大学 学生員 海老澤 健正
東京大学 正 員 松 本 高 志
東京大学 正 員 堀 井 秀 之

1. はじめに

近年開発された繊維補強セメント系材料(ECC)は、従来の脆性的で低靱性なコンクリートに比べて延性的で高靱性な性質を獲得するに至った。その性質を活用したコンクリートとの複合構造形式がいくつか提案されているが¹⁾、それらの構造形式は必ずしも ECC の材料特性を十分に引き出してはいないのが現状である。したがって、このような複合構造物の形状、材料配置を定量的に決定する方法が必要とされる。

一方、さまざまな分野においてシステム制御理論として自律分散システムが注目されている。自律分散システムとは、システムを構成する各要素が自律的に行動しながら互いに協調を取り、全体として大域的秩序を形成あるいは維持するシステムのことをいい、この概念は構造物の形状最適化問題にも応用されている²⁾。

本研究では延性・脆性材料の二材料を用いた複合構造物の形状、材料配置を自律分散システムに基づいた局所ルールにより決定する方法を提案している。また、最適化手法の一つであるシプレックス法との比較を行ない局所ルールの妥当性を検討した。

2. 材料特性および設計変数の設定

本研究では各材料とも単純化し、降伏条件は von Mises の降伏条件とした。延性材料は降伏強度に達した後は塑性ひずみが限界値になるまでその強度を保つが、脆性材料は降伏強度に達した後は強度が0になるものとする。それぞれの応力-ひずみ曲線を図1に示す。なお、コンクリートとECCを想定しているためヤング率を等しくし、 $\sigma_{b0} > \sigma_{dy}$ とした。

各要素*i*に対し延性・脆性の各材料の有無を示す変数としてそれぞれ d_i, b_i を定義し、それぞれ値が0の時は材料なし、1の時は材料ありを示すものとした。これらの変数を最適化問題の設計変数とし、 $0 \leq d_i \leq 1, 0 \leq b_i \leq 1, 0 \leq d_i + b_i \leq 1$ を満たす連続変数とした。そして、連続化した材料配置状態 (b_i, d_i) に対して、各材料の応力-ひずみ関係を線形結合することにより応力-ひずみ関係(式1)を定義した。

$$\sigma(\epsilon, d_i, b_i) = d_i \sigma_d(\epsilon) + b_i \sigma_b(\epsilon) \quad (1)$$

$\sigma_d(\epsilon), \sigma_b(\epsilon)$ はそれぞれ延性、脆性材料の応力-ひずみ関係である。また、制約条件として構造物全体での各材料の体積を一定とした。

$$\sum_i d_i = v_d, \quad \sum_i b_i = v_b \quad (2)$$

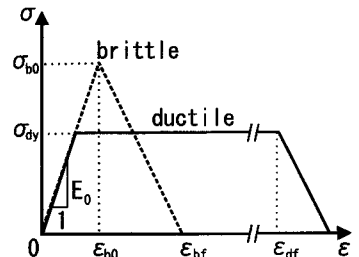


図1 延性・脆性材料の応力-ひずみ関係

3. 構造形式の自律的決定方法

構造形式の決定プロセスとしては、まず材料配置領域および境界条件を設定し、材料配置の初期値を与える。そして、有限要素法による静的応力解析と局所ルールに基づく材料配置の再評価を繰り返すことにより、構造全体の合目的な構造形式を得る。このプロセスでは各有限要素をサブシステムとみなし、その中で局所ルールを適用する。

サブシステムである有限要素に対し適用する局所ルールでは、要素図心位置での応力、ひずみ状態を要素の特性値とし、その値と設定した目標との差に応じて材料配置状態を変化させる。具体的には、以下の漸化式により材料配置の再評価を行なう。最終載荷時の相当応力 σ と現在の材料強度 σ_c との相対的な差により材料量、すなわち両材料の和 $v_i (= d_i + b_i)$ を決定する。

$$v_i^{n+1} = \{1 + \alpha_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} - 1 \right)\} v_i^n \quad (3)$$

キーワード：複合構造、構造最適化、自律分散システム

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL:03-3812-2111 FAX:03-3812-4977

最終荷荷時のひずみと各材料のひずみの目標値との相対的な差により延性、脆性材料の比 (r_d, r_b) を求める。ひずみの目標値は延性材料は最終ひずみ ϵ_{df} とした。脆性材料は最大強度時のひずみ ϵ_{b0} である。なお、脆性材料の最大強度時のひずみエネルギーに相当する延性材料のひずみ ϵ_e 以上のひずみが発生している場合には、延性材料のほうが有利であると判断し脆性材料の割合を減らすようにしている (式 5)。

$$r_d^{n+1} = \{1 + \alpha_2(\frac{\epsilon}{\epsilon_{dc}} - 1)\} d_i^n \dots\dots\dots (4)$$

$$r_b^{n+1} = \begin{cases} \{1 + \alpha_3(\frac{\epsilon}{\epsilon_{bc}} - 1)\} b_i^n & (\epsilon \leq \epsilon_e) \\ \{1 - \alpha_3\} b_i^n & (\epsilon > \epsilon_e) \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

そして、新たな材料配置 (d_i^{n+1}, b_i^{n+1}) を式 6、式 7 により求め、最後に制約条件を満たすように調整する。

$$d_i^{n+1} = \frac{r_d^{n+1}}{r_d^{n+1} + r_b^{n+1}} v_i^{n+1} \dots\dots\dots (6)$$

$$b_i^{n+1} = \frac{r_b^{n+1}}{r_d^{n+1} + r_b^{n+1}} v_i^{n+1} \dots\dots\dots (7)$$

4. 構造形式計算例

図 2 に示すような縦 1m×横 1m の片持ち梁を縦 4×横 4、合計 16 個の有限要素に分割した材料配置領域について解析した。載荷点での過度の応力集中を避けるため鉄板を自由端全面に剛結し、その中央に鉛直変位 $\delta = 0.02m$ を与えた。本解析に用いた物性値を表 1 に示す。

表 1 材料物性値

E_0	30GPa
σ_{dy}	3MPa
σ_{b0}	5MPa
ϵ_{df}	2×10^{-2}
ϵ_{bf}	4.17×10^{-4}

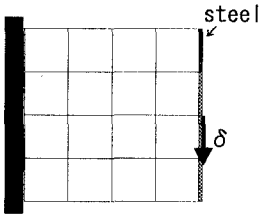


図 2 材料配置領域および境界条件

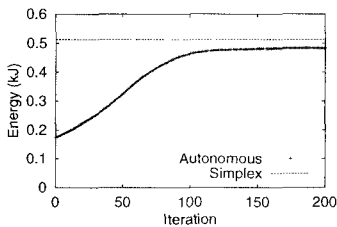


図 3 再評価に伴うエネルギー吸収能の変化

自律的手法により求められた材料配置を図 4～図 6 に示す。これらはそれぞれ両材料の和 $d_i + b_i$ 、延性材料 d_i 、脆性材料 b_i の分布を表している。延性材料は最も変形を要求される固定端上下縁の要素に入り、脆性材料はそこから載荷点を結ぶように V 字状に配置されており、力の流れに沿った構造形式が得られている。

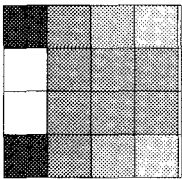


図 4 延性+脆性材料 (自律的手法)

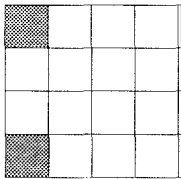


図 5 延性材料 (自律的手法)

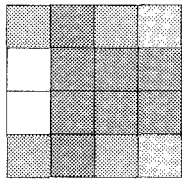


図 6 脆性材料 (自律的手法)

また、最適化手法の一つであるシンプレックス法を用いて材料配置を決定した。目的関数を構造物全体のエネルギー吸収能として配置を求めたものが図 7～図 9 である。脆性材料を破壊してエネルギー吸収能を上げているため自律的手法の場合と配置が多少異なるが、エネルギー吸収能は図 3 にあるように最終的にはその差は 6%程度に収まっている。

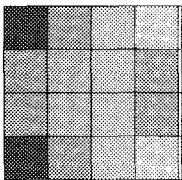


図 7 延性+脆性材料 (シンプレックス法)

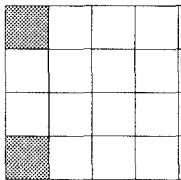


図 8 延性材料 (シンプレックス法)

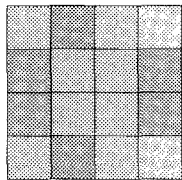


図 9 脆性材料 (シンプレックス法)

5. まとめ

本研究で用いた自律的手法の局所ルールは、最終荷荷時に最大強度、最終ひずみを発生する方向へ材料配置を変化させるものである。つまり、最終荷荷時に各要素において材料の性能を十分に利用している配置を求めている。以上の解析から、複合構造物の全体性能を向上させる形状・配置を求める際に、このような各要素ごとの材料の効率的利用に着目した自律的手法が有効であることを示せた。

参考文献

1) Dhanada K. Mishra and Victor C. Li: Performance of a Ductile Plastic Hinge Designed with an Engineered Cementitious Composite, Submitted to ACI Structures Journal, 1995.
2) Norio INOU, Takefumi UESUGI and Sadayuki UJIHASHI: Autonomous Formation of Biomimetic Structures by Cellular Automaton, Proc. 4th Japan International SAMPE Symposium, pp.621-626, 1995.