

# 繊維補強材でできた社会基盤構造の簡易な最適化

A simplified optimized design method of composites for infrastructures

河原佳武\*

Yoshitake KAWARA

\*構造強度学研究室(指導教官:岩熊哲夫 教授)

複合材料の微視構造を設計する際には、材料と境界値の両レベルにおいて、実験程度の精度でかつ簡便に平均挙動を推測できる手法が望ましい。森・田中理論では、Eshelbyの方法を通して介在物の形状や向き、大きさを陽な形で表現することが可能である。

本研究では、平均弾性係数  $\bar{C}$  を有限要素に組み込み、繊維補強材の分布と崖の補強時のロックボルト密度について、比較的簡単に最適化することができた。

**Key Words :** Mori-Tanaka Theory, Finite Element Method, Optimal Design

## 1. はじめに

高強度で軽量な材料は構造形式の長大化を目指す上で必要不可欠である。そういった材料のひとつの候補として、近年、繊維補強材を使った複合材料が注目されている。こういった複合材料の平均挙動を予測する手法として森・田中理論<sup>1)</sup>や均質化法、混合理論などが挙げられる。森・田中の手法は、介在物の形状と向きをEshelbyのテンソル<sup>2)</sup>を通して各相の挙動に組み込み平均挙動を得る手法である。

そこで本研究では、森・田中理論において、介在物の向きと形状比、体積比率が陽な形で表現できることに着目し、平均弾性係数  $\bar{C}$  を有限要素に組み込むことで、歩道橋を例にした繊維補強材の最適分布、ロックボルトによる崖の補強時のボルト密度の最適化を試みるものとする。

## 2. 構成モデル

文献<sup>1)</sup>にあるように、森・田中理論によると、等方弾性体中に回転楕円体の介在物がランダムに存在している場合、複合材料全体の平均弾性テンソルは最終的に、

$$\bar{C} = C_M \{C_M - (1 - f)(C_M - C_I)S\}^{-1} \times [C_M - (C_M - C_I)]\{S - f(S - I)\}$$

と求まる。本研究では、平面ひずみ問題として、この平均挙動を定ひずみ三角形要素に組み込んだ有限要素法を用いて解析を行った。各係数は文献<sup>2)3)</sup>参照のこと。

## 3. 解析結果

### (1) 2径間連続梁の場合

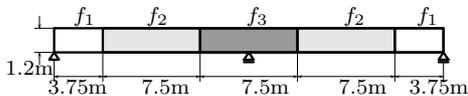


図-1 2径間連続梁

図-1のような各スパンが15mで桁高が1.2mの2径間連続梁を、8層200列の6400要素にメッシュ分割し解析を行った。介在物は半径比  $a_1/a_2=1:50$  の  $x_3$  軸方向に無限に長い楕円柱とし、繊維補強材配置の最適化を念頭に置いているため、両端で  $f_1$ 、スパン中央部で  $f_2$ 、中央支承部分で  $f_3$  とした。鋼繊維は乱数によりランダムな向きに設定している。 $p_1 = 4.0$  MPa,  $p_2 = 2.0$  MPa の等分布荷重を三つの断面で影響線載荷し、 $f_1 = 0.005$ ,  $f_2 = 0.200$  と固定して  $f_3$  のみを変化させた時の  $\Sigma\sqrt{J_2}$  を図-2に示した。 $\Sigma\sqrt{J_2}$  は、梁端部から同距離にある8層32要素の  $\sqrt{J_2}$  の総和である。ここでは、断面間の応力レベルの平滑化を目的関数とし、スパン中央部分と中央支承部分の最大値の差  $x$  をできる限り小さくすることを最適化とする。 $f_3 = 0.300$  とした場合に  $x \approx 0$  になり、最適解を得ることができた。

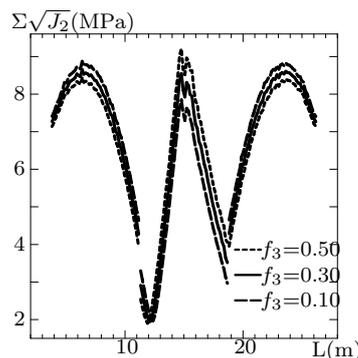


図-2  $f_1 = 0.005$ ,  $f_2 = 0.20$

次に、鋼繊維の使用量に制限を設けて、現実的な範囲での最適化の可能性を調べた。制約条件を  $2f_2 + f_3 = 0.20$  とした時の  $x$  を図-3に示した。 $f_3$  の増加に対する単調減少を示しており、いわゆる非線形の最適化にはならない。 $f_1$  を変化させてみると、 $x$  に非常に小さいながら若干の変化の影響は見られた。したがって、この制約条件の下では  $f_1$  をできる限り少なくする必要がある

ことを示している．

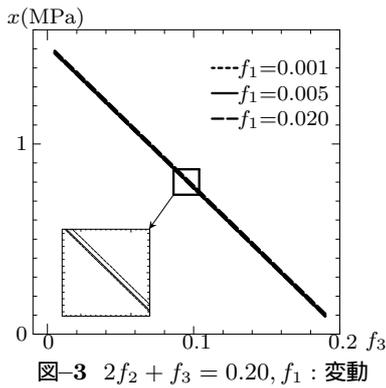


図-3  $2f_2 + f_3 = 0.20$ ,  $f_1$ : 変動

## (2) ロックボルト打設密度の最適化

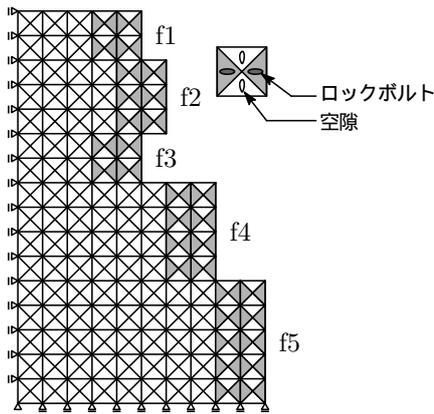


図-4 メッシュ図

図-4のようにメッシュ分割した高さ8mの張り出し部がある斜面岩盤に、ロックボルトを打設する場合の最適ボルト密度を考える．図-4の各三角形要素のうち、網掛けされていないものには、鉛直方向に半径比  $a_1/a_2=1:50$  の空隙が1%含まれている．また、網掛けした要素にはある体積比率で半径比1:30のロックボルトが水平方向に含めてある．材料定数は文献<sup>4)</sup>を参考にした．ロックボルトの打設密度は5つの各領域ごとに一定とし、天端から第1層から第2層のボルトの体積比率を  $f_1$ 、第3層から第5層を  $f_2$ 、第6層から第7層を  $f_3$ 、第8層から第11層を  $f_4$ 、第12層から第16層を  $f_5$  とする．载荷条件は、15 kNの上载荷重の他に岩盤の自重を全接点に载荷した．最適化の目的関数は  $\sqrt{J_2}/\bar{\sigma}_Y$  とする．平均降伏応力  $\bar{\sigma}_Y$  は Voigt の解から求められる値を使った．

最初に、 $f = 0.10$  としてロックボルトを均等に打設した場合の法面に位置するロックボルトを含む要素の  $\sqrt{J_2}/\bar{\sigma}_Y$  を図-5に鎖線で示した．図-5から明らかなように、上から3層目が最も危険となっている．そこで、ロックボルトの総使用量は、 $f = 0.10$  の場合

$$2f_1 + 3f_2 + 2f_3 + 4f_4 + 5f_5 = 1.60$$

という制約条件の下で、危険度の小さな箇所から大きな箇所へロックボルトを移していった結果、 $f_1 = 0.1655$ 、

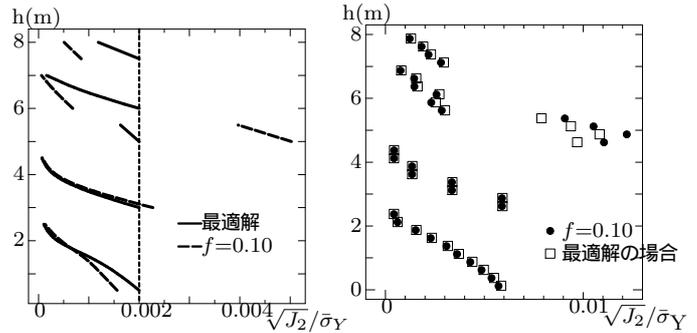


図-5 最適解 法面要素(左)、法面要素に隣接する要素(右)

$f_2 = 0.0072$ ,  $f_3 = 0.36245$ ,  $f_4 = 0.1231$ ,  $f_5 = 0.0656$  の時、図-5の実線で示すようになり、危険度  $\sqrt{J_2}/\bar{\sigma}_Y$  は、ほぼ0.002にそろうため目的の均等化ができたと考える．

また、法面要素に隣接するロックボルトが含まれていない要素の危険度の分布を、 $f = 0.10$  として均等に配置した場合と法面要素が最適解となった場合について図-5の右側に示した．ロックボルトの体積比率が  $f = 0.10$  の初期状態と比べて、3層目では危険度が軽減され、補強された要素に隣接する要素でも危険度がある改善されていることがわかる．

## 4. まとめ

陽な形で介在物の形状や向き、体積比率を解析的に表現できるという森・田中理論の利点を利用し、比較的簡単に複合材料の最適設計を行うことを試みた．

- 2 径間連続梁の場合には、影響線载荷の下での体積比率の組み合わせを  $f_1 = 0.005$ ,  $f_2 = 0.20$ ,  $f_3 = 0.30$  としたときに、全断面の降伏を同レベルにそろえるような最適化することができた．
- ロックボルト打設密度の最適化の場合には、危険度を均等化し最適解を得ることができた．

以上は、網羅的に計算を行い得られた結果であり、より効率的な最適化方法については今後の課題である．

## 参考文献

- 1) Mori, T. and Tanaka, K.: Average stress in matrix and average energy of materials with misfitting inclusions, *Act. Metall.*, Vol.21, pp.571-574, 1973.
- 2) Eshelby, J.D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proc. Roy. Soc. London*, Vol.A241, pp.376-396, 1957.
- 3) 岩熊哲夫, 堀宗朗, 森勉, 村外志夫: 複合材料の平均的な硬化係数と遠征の評価, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.435-442, 1991.
- 4) 京谷孝史, 谷宗行: 均質化法を応用したロックボルト打設間隔の最適化, 応用力学論文集, Vol.6, pp159-166, 2003.

(2004年2月16日提出)