トンネル法による複合構造物の構造形式決定

名古屋工業大学　正会員　海老澤 健正
東京大学大学院　正会員　松 本　高 志
東京大学大学院　正会員　堀 井　秀 之

1.　はじめに

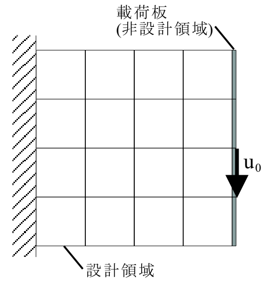
現在，延性的な材料と脆性的な材料を用いた複合構造物の性能向上は各部材の寸法最適化によるものが一般的である．しかし，部材寸法だけでなく材料配置すなわち構造形式を含めて定量的に決定しうる方法の構築がより本質的であると考えられる．本研究では特にECC[1)]と呼ばれる高靱性で延性的な繊維補強セメント系材料と低靱性で脆性的なコンクリートによる複合構造物を取り上げ，ECCの優れたエネルギー吸収能を利用した耐震部材の構造最適化を行う．その際，材料の軟化による変形の局所化に起因する目的関数の多峰性と不連続性に対して大域的最適化手法であるトンネル法[2)]を適用しその妥当性を検討する．

2.　最適化問題

構造物の形状および材料配置の決定を設計領域に一定量の材料を最適に配置することと考え，**図–1** に示すように設計領域 Ω を分割した各有限要素 i に配置される延性・脆性材料の量 x_{2i-1}, x_{2i} を設計変数とする．設計変数は $x_i \geq 0, x_{2i-1} + x_{2i} \leq 1$ を満たす連続変数とし，その値が 1 の時は要素 i に材料が配置された状態を表し 0 の時は配置されていない状態を表す．各要素 i の応力–ひずみ関係 $\sigma_i(\varepsilon; x_{2i-1}, x_{2i})$ は各材料の応力–ひずみ関係 $\sigma_d(\varepsilon), \sigma_b(\varepsilon)$ の線形結合により定義する．

$$\sigma_i(\varepsilon; x_{2i-1}, x_{2i}) = x_{2i-1}\sigma_d(\varepsilon) + x_{2i}\sigma_b(\varepsilon) \tag{1}$$

また，最適化問題における目的関数 $G(\boldsymbol{x})$ には構造物の耐震性能の指標として一定変位時までのエネルギー吸収量を用いる．



図–1　設計領域

3.　トンネル法による最適化

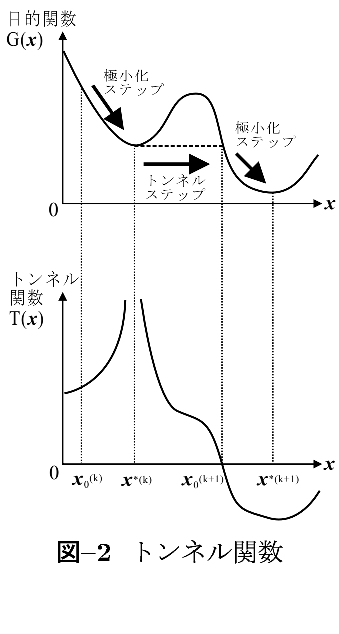
一般に設計変数の微小変化に対する塑性変形の履歴依存性は小さいため，目的関数の感度は解析的に求めることが可能である．しかし，軟化材料において変形の局所化の起こる部分が変化する場合には履歴依存性は無視できず目的関数が不連続となるため，目的関数は多数の局所解を持つと考えられる．そこで，本研究では大域的最小化手法であるトンネル法を適用する．本手法では，**図–2** に示すような多峰性を有する連続な目的関数 $G(\boldsymbol{x})$ に対し以下の 2 つのステップを繰り返すことにより順次より良い極小解を探索する．

1. 極小化ステップでは初期点 $\boldsymbol{x}_0^{(k)}$ から極小点 $\boldsymbol{x}^{*(k)}$ を求める (k は極小化の繰り返し回数)．本ステップでは，許容方向法により計算効率の向上を図る．
2. トンネルステップでは極小点 $\boldsymbol{x}^{*(k)}$ に対して式 (2) を満たす点 $\boldsymbol{x}_0^{(k+1)}$ を求める．

$$G(\boldsymbol{x}_0^{(k+1)}) \leq G(\boldsymbol{x}^{*(k)}) \quad (\boldsymbol{x}_0^{(k+1)} \neq \boldsymbol{x}^{*(k)}) \tag{2}$$

ここで，原目的関数 $G(\boldsymbol{x})$ を変換したトンネル関数 $T(\boldsymbol{x})$(式 (3)) を導入し，極小点 $\boldsymbol{x}_0^{*(k)}$ の近傍において降下特性が得られるように極の強さ λ を設定する．これにより，一般の数理計画法を用いて点 $\boldsymbol{x}_0^{(k+1)}$ を得ることが可能となる．

$$T(\boldsymbol{x}) = \frac{G(\boldsymbol{x}) - G(\boldsymbol{x}^{*(k)})}{\left\{(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}^{*(k)})^T(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}^{*(k)})\right\}^{\lambda}} \tag{3}$$



図–2　トンネル関数

キーワード: 構造最適化，複合構造，トンネル法

〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学社会開発工学科 TEL/FAX:052-735-5563

4. 解析条件

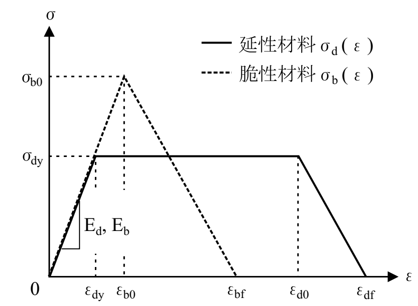
最適化問題の設計領域として**図–1** に示すような縦 1m× 横 1m の片持ち梁を縦 4× 横 4 計 16 の有限要素に分割したものを考え，その自由端中央に鉛直変位 $u_0 = 2$mm を与える．延性・脆性両材料の材料特性には ECC とコンクリートの材料特性を単純化した**表–1**，**図–3** に示す応力–ひずみ関係を適用し，降伏条件は両材料とも von Mises の降伏条件を用い，降伏後は等方硬化とする．また，最適化問題の制約条件である構造物全体での材料体積ついては，構造物との体積比で延性材料 6%，脆性材料 24%のケース a と延性材料 10%，脆性材料 20%のケース b について解析を行う．

表–1 延性・脆性材料の諸物性値

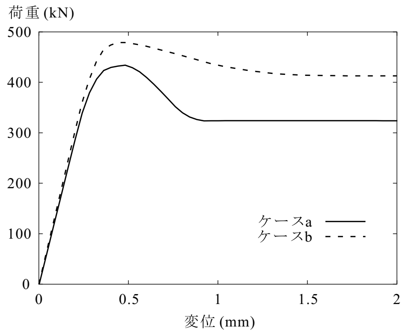
延性材料	脆性材料
$E_d =$ 30GPa	$E_b =$ 30GPa
$\sigma_{dy} =$ 3MPa	$\sigma_{b0} =$ 5MPa
$\varepsilon_{dy} =$ 0.010%	$\varepsilon_{b0} =$ 0.0167%
$\varepsilon_{d0} =$ 2.010%	—
$\varepsilon_{df} =$ 2.025%	$\varepsilon_{bf} =$ 0.1167%

5. 解析結果

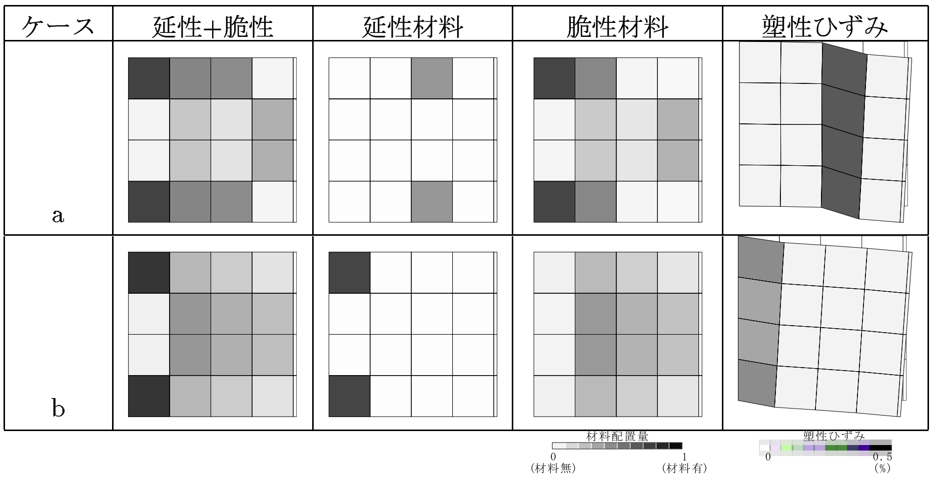
両ケースの最適解の荷重–変位関係，材料配置と塑性ひずみ分布を示したのが**図–4**，**図–5** である．延性材料の少ないケース a では固定端上下縁と載荷点を U 字状に結ぶような形状において自由端側 2 列目の上下縁の要素に延性材料が配置される．この構造形式の特徴は，曲げ変形により塑性モーメント近くまで構造物の耐力が増加した後，延性材料にせん断ひずみが集中することによりその高いエネルギー吸収能を引き出す点である．一方，延性材料の多いケース b では V 字状の形状の固定端側上下縁の要素に延性材料が配置される．この構造形式では最終変位時まで延性材料に曲げ変形が集中し，ピーク後の耐力低下は小さく高いエネルギー吸収量を示す．



図–3 延性・脆性材料の応力–ひずみ関係



図–4 荷重–変位関係



図–5 材料配置と塑性ひずみ分布

両ケースの最適解が異なる理由として，延性材料の配置される要素での降伏強度の違いが挙げられる．最適解では延性材料の配置される要素にひずみが集中するため最初に降伏する必要がある．延性材料が増加とともにその降伏強度が高くなるため，ケース b では延性材料の配置される要素が曲げモーメントの大きい固定端側となったと考えられる．

6. まとめ

材料の軟化に起因する目的関数の多峰性に対してトンネル法を適用することにより，延性・脆性の二材料を用いた複合構造物の構造形式最適化を行った．片持ち梁を設計領域とした解析例では，二種類の制約条件下において，最適解としてそれぞれ合理的な構造形式が得られた．今後は，これらの制約条件を含めた決定方法についての検討が必要であると思われる．

参考文献

1) 閑田徹志, Li,V.C., 浜田敏裕：ビニロン繊維を用いた高靭性 FRC の材料設計と開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.229-234, 1998.
2) 日本機械学会編：工学問題を解決する適応化・知能化・最適化法, 技報堂出版, 1996.