

復旧性を考慮した最適耐震設計法に関する手法の提案

北海学園大学 正会員 杉本 博之, 北海学園大学大学院 学生員 ○佐藤 直樹
北武コンサルタント(株) 正会員 渡邊 忠朋, 北武コンサルタント(株) 正会員 阿部 淳一

1. 研究目的 我が国の耐震設計法の現時点での通常の設計においては, 構造物の設計解は初期建設費にのみ着目され設計されている. しかし, 地震動によって生じる構造物の損傷の補修にかかる損失を考慮した設計が必要であると考えられる. 筆者の一部はすでに, 応答スペクトル法を用いて初期建設費だけでなく補修費も考慮した最適耐震設計を行い¹⁾, また時刻歴応答解析を必要とする構造による最適耐震設計も行った²⁾. そこでは, 目的関数を初期建設費のみとし, 制約条件に近似手法を用いて構造物の動的応答を推定し最適化が行われた.

これらを背景として本研究では, 時刻歴応答解析法を用いて, 目的関数に初期建設費のみならず復旧性も考慮した最適耐震設計を行うものとする. 上記の研究²⁾でも, RBF ネットワークによる近似手法は使用していたが, ここでは目的関数にも動的解析が含まれることにより, 目的関数, 制約条件の2つの関数を別々に近似する必要があり, 更なる近似精度の向上が要求される. そこで, 本研究では荒川ら³⁾により提案されたたたみ込み理論を RBF ネットワークへ導入し, 復旧性を考慮した構造物の最適耐震設計の手法を提案する.

2. RBF ネットワークとたたみ込み理論 本研究で近似手法として用いた RBF ネットワークとは, 階層型ニューラルネットワークの一種であり, 入力層, 中間層, 出力層の3層構造である. 入力層からのデータを中間層で基底関数により処理し, 出力層に送られる. 中間層における基底関数の式は以下に示す.

$$h_j(x) = \exp \left(- \sum_{p=1}^K \left(\frac{(x_{jp} - c_{jp})^2}{r_{jp}^2} \right) \right) \quad (j = 1 \sim m) \quad (1)$$

ここで, $h_j(x)$ は学習データ j に対する基底関数の出力値, K は1設計を構成する変数の数, x_{jp} は入力層素子からの入力データ, c_{jp} は基底関数の中心位置となる座標点, r_{jp} は基底関数の半径である. たたみ込み理論とは, 関数に関数を重ね合わせることである. たたみ込み理論を RBF ネットワークに導入することで近似精度の向上を図るものである. たたみ込み理論の導入については, 1変数問題を例にし説明する. まず, 図-1のように教師値 ● に対して赤線のような曲面を作成する. そして, 曲面から得られた近似値と教師値との誤差 E_1 , E_2 を算定する. 次に, 図-2のように誤差 E_1 , E_2 までの距離である ■ を教師値とし, 同じく赤線のような曲面を作成する. そこで, 得られた2つの曲面を重ね合わせ, 図-3の緑線のような教師値 ● に対して精度の高い近似結果を得るものである. 重ね合わせによる曲面の算定式を以下に示す.

$$y(x) = \sum_{j=1}^m \left(w_j^{(0)} \cdot h_j^{(0)}(x) + \sum_{i=1}^n w_j^{(i)} \cdot h_j^{(i)}(x) \right) \quad (2)$$

ここで, $y(x)$ は近似値, $w_j^{(0)}$ は初期の基底関数に対する重み係数, $w_j^{(i)}$ はたたみ込み回数 i 番目に対する重み係数, $h_j^{(0)}(x)$ は学習データ j に対する初期の基底関数の出力値, $h_j^{(i)}(x)$ は学習データ j に対する重ね合せ i 回目の基底関数の出力値である. また, m は基底関数の数, n はたたみ込みの回数である.

3. 一層門型ラーメン橋脚における計算例 本論文では, 近似精度の視覚的確認のため, 図-4に示す2変数問題である一層門型ラーメン橋脚を対象とした. 図の左は橋軸直角方向, 右は橋軸方向である. 目的関数は, 初期建設費 C_0 に地震による損傷の補修費 C_r を加えたトータルコストの最小化問題である. 初期建設費の算定式を以下に示す.

キーワード 復旧性, RBF ネットワーク, たたみ込み理論, 時刻歴応答解析, 最適耐震設計

連絡先 〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目 北海学園大学大学院 TEL(011)841-1161

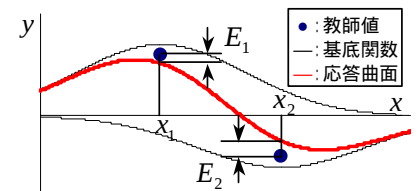


図-1 応答曲面作成

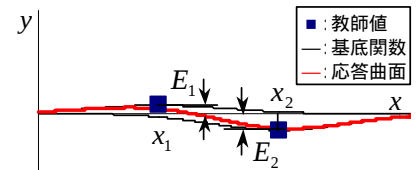


図-2 誤差に対する応答曲面

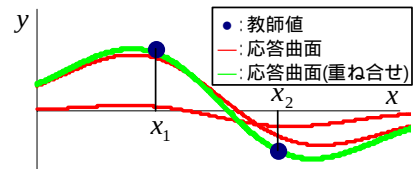


図-3 重ね合わせた応答曲面

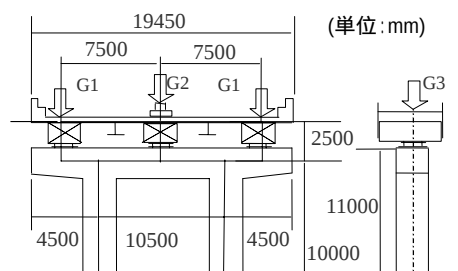


図-4 対象構造

$$C_0 = \alpha_c \cdot K_c \cdot V_c + \alpha_s \cdot K_s \cdot V_s \cdot G_s \quad (3)$$

ここで、 α_c はコンクリートの単価補正係数、 K_c はコンクリート単位容積当たりのコスト(=65.1unit/m³)、 V_c はコンクリート量(m³)、 α_s は鉄筋の単価補正係数、 K_s は鉄筋単位重量当たりのコスト(=9.1unit/m³)、 V_s は鉄筋量(m³)、 G_s は鉄筋の単位重量(=77kN/m³)である。なお、本研究においては α_c 、 α_s を共に1.0と設定し解析を行っている。補修費 C_r は、図-5のような骨格曲線⁴⁾より部材端部の応答回転角によって各部材端部の損傷度が算定され、部材別に損傷度に応じた補修工法が得られ補修費が算定される。また、本研究では両側の柱の基部が損傷度4の場合を崩壊と定義した。断面構成は、断面幅Bと断面高さHが等しい正方形断面とした。なお、使用材料は設計基準強度24N/mm²のコンクリートとSD345の鉄筋とした。制約条件は、曲げ破壊に対する照査とせん断破壊に対する照査とし、以下にそれぞれの算定式を示す。

$$g^{PM}_j = \theta_{dik} / \theta_{aik} - 1 \leq 0 \quad (i=1 \sim N_m) (k=1 \sim 2) \quad (4)$$

$$g^{PS}_j = V_{di} / V_{ai} - 1 \leq 0 \quad (i=1 \sim N_m) \quad (5)$$

ここで、 N_m は部材数、 θ_{dik} は*i*番目の橋脚における部材端部の応答部材角(rad)、 θ_{aik} は*i*番目の橋脚における部材端部の許容部材角(rad)、 V_{di} は*i*番目の橋脚の応答せん断力(kN)、 V_{ai} は*i*番目の橋脚の許容せん断力(kN)である。なお、 θ_{dik} 、 V_{di} は動的解析を必要とする項目である。設計変数は、断面幅B、軸方向鉄筋本数Nの2変数とした。断面幅Bは、1000～2500mmで100mm間隔の16種類とし、軸方向鉄筋本数Nは、断面幅により異なる8種類とした。

本論文では、設計空間内の全設計点に対して厳密な解析を行っており、この曲面を示したのが図-6である。これを実曲面とする。図-6の右は、これを等値線図にしたものであり、図中の○は大域的最適解である。また、図中の●は局所的最適解である。本研究では、初期学習データ10点からスタートし、更新毎に最適化によって得られる最適解と疎なデータの2点ずつを追加していき、この更新を繰り返して解析を行っている。なお、以下に示す計算結果は、更新回数15回、データ数40点での結果である。まずは、たたみ込み理論を導入しなかった場合の曲面と等値線図を図-7に示す。得られた最適解は大域的最適解が得られた。しかし、図の右に示した等値線図で実曲面の等値線図と比較すると局所的最適解が得られていないのがわかる。次に、たたみ込み理論を導入した場合の曲面と等値線図を図-8に示す。得られた最適解は大域的最適解が得られた。上記のたたみ込み理論を用いなかった場合では局所的最適解が得られなかったが、たたみ込み理論を用いることで局所的最適解も得られており、比較的精度の高い近似結果が得られたと言える。

4. まとめ 本論文では、視覚的な精度の確認のために設計空間内の応答を予め確認し解析を行ったが、実際の設計問題では最適解が何処に存在するかわからない問題であるため、最適解の探索はもちろんであるが局所解の近似精度の向上も必要であると考えられる。そのため、たたみ込み理論を用いた結果は有効な手法であると考えられる。

参考文献 1) 渡邊忠朋, 杉本博之, 朝日啓太: 補修費用を考慮した耐震設計に関する一考察, 土木学会論文集, No.718/V-57, pp.81-93, 2002. 2) 阿部淳一, 渡邊忠朋, 杉本博之: RBF ネットワークによる設計条件近似とRC橋脚の最適耐震設計に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.2, pp405-418, 2006. 3) Masao Arakawa and Aki ra Andatsu: Development of Convolute Approximation, The 7th International Conference on Optimization Techniques and Applications (ICOTA7), 2007. 4) 土木学会: コンクリート標準示方書・耐震性能照査編, 丸善株式会社, 2005.

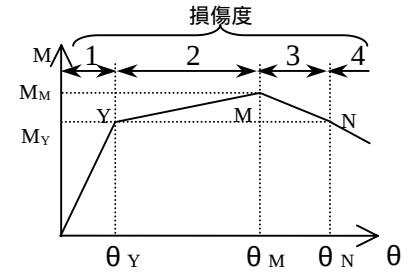


図-5 構造の非線形性能

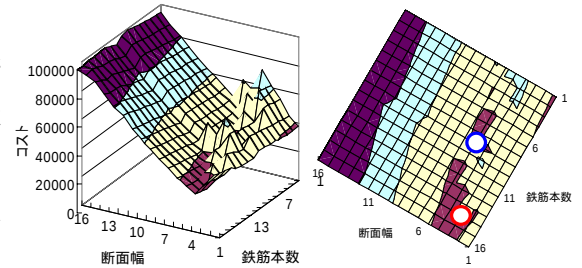


図-6 目的関数実曲面

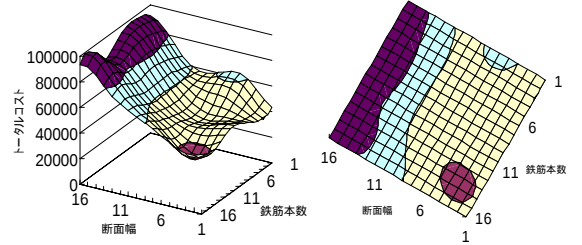


図-7 応答曲面（たたみ込み理論導入前）

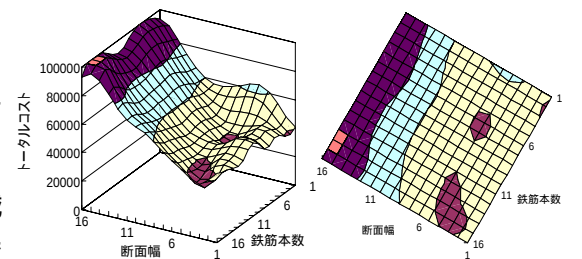


図-8 応答曲面（たたみ込み理論導入後）