

## 入力地震波に対する座屈拘束ブレースの最適特性の感度に関する一検討

長崎大学 学生会員 ○池末 和隆 長崎大学 学生会員 FARHAT FADI  
 長崎大学 正会員 中村 聖三 長崎大学 フェロー 高橋 和雄

## 1. はじめに

座屈拘束ブレース(以後 BRB とする)は,適用が容易で安価であることから,建築構造物を中心に制震ダンパーとして多く用いられている.しかしながら,BRB の特性や設置場所をシステムティックに最適化する方法はまだ確立していない.そうした状況に対して,Farhat ら<sup>1)</sup>は既設構造物の耐震補強に用いる場合を対象に,遺伝的アルゴリズム(以後 GA とする)を用いて BRB の特性の最適解を決定する設計法を提案した.本研究は,その方法により決定される BRB の最適特性が,同種地盤の 3 波の入力地震波でどのように変化するかを検討するものである.

## 2. 検討概要

## 2.1 解析モデル

検討対象を図 - 1 に示すコンクリート無充填補剛箱形断面鋼製 3 層門形ラーメンとする.柱 - はり接合部と支点には特にせん断破壊が生じやすいため,図 - 1 で網掛けした領域で断面の板厚を 2 倍にして補強している.使用鋼材は主構造に対して SM490, BRB に対して SS400 を想定する.耐震補強に用いる BRB は,図 - 2 に示すような断面とし,その特性をコアプレートの板厚で代表させ,各層で異なってもよいものとする.

## 2.2 部材断面の設計

解析モデルは,レベル 2 地震動に対して耐震補強が必要となるように,地盤種ごとに主構造断面の厚みをパラメータとして,震度法(レベル 1 地震動の照査)で最大ひずみが降伏ひずみの 90% ~ 100% となるよう簡易的に設計する.

## 2.3 解析条件

汎用有限要素解析ソフトウェア MARC を用いて解析を行う.材料非線形はファイバーモデルにより考慮し,材料構成則はバイリニア型移動硬化則とする.2 次勾配は,主構造要素に対して  $E/100$ , BRB 要素に対して  $E/60$  とする.数値積分には Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta = 0.25$ ) を用い,応答計算の積分時間間隔は 0.01 秒とする.減衰はレーリー減衰とする.

## 2.4 入力地震波

入力地震波は,内陸直下型の大規模な地震を想定したタイプ のレベル 2 地震動を用い,解析モデルの面内方向に作用させる.入力地震動による BRB の最適断面の違いを見るため,種地盤,種地盤,種地盤のそれぞれにおいて 3 波ずつ,合計 9 波を用いる.

## 2.5 補強前の耐震性能

図 - 3 は耐震補強前の解析モデルで動的解析を行ったときの塑性化状況を表し,表 - 1 に主構造要素の最大ひずみを示す.紙面の制約から種地盤に対する結果のみ示している.いずれの地震波に対しても多くの部位で塑性化しており,最大発生ひずみは降伏ひずみの 10 倍を超えていた.他の地盤においても同様な結果であった.

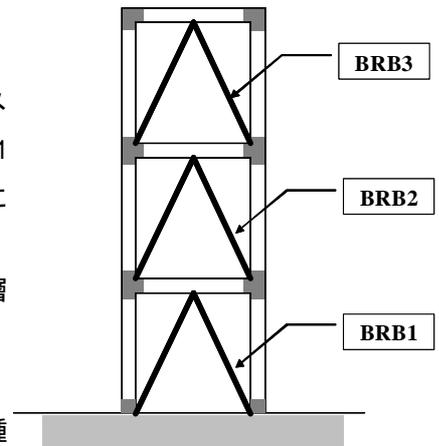


図 - 1 解析モデル

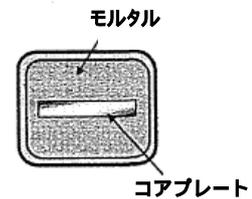


図 - 2 BRB 断面

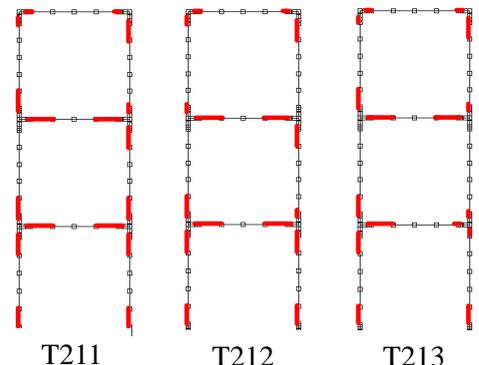


図 - 3 塑性化状況: 種地盤

表 - 1 最大ひずみ

地震波	T211	T212	T213
$\epsilon_{abs.max} / \epsilon_y$	12.9	10.1	16.9

キーワード 座屈拘束ブレース (BRB) 耐震補強 入力地震波 遺伝的アルゴリズム (GA) 最適化

連絡先 〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1 番 14 号 長崎大学工学部社会開発工学科 TEL095-819-2626

## 2.6 最適化

耐震性能が不足する構造物に BRB を用いて耐震補強する際、所要の安全性を満たし、BRB の材料コストをできるだけ安くすることが望ましい。そこで本研究では、設計変数を BRB のコアプレート断面積、目的関数を BRB の材料コスト、制約条件を構造物の安全性とする。ただし、材料コストは使用鋼材量に比例すると考えられるので、材料コストに代わって全 BRB の鋼材使用量を目的関数とする。構造物の安全性は、最大ひずみが部材ごとに設定される表 - 2 に示す終局ひずみ以下であるか否かで照査する。探索範囲をできるだけ小さくするため、地盤種ごとに BRB 設置後の解析モデルを震度法で簡易的に設計して(2.2 を参照)得られた BRB 断面積を最小断面積とし、現実的にありえる範囲を考慮して最大断面積を設定した。最適化は MATLAB の Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox を用い、GA により行う。すべての最適化に用いた GA パラメータを表 - 3 に示す。最適化の詳しい手法については文献 1) を参照されたい。

## 3. 検討結果

### 3.1 最適化結果

3 種類の地盤における BRB の最適化結果を表 - 4 に示す。地盤、種地盤それぞれの 3 波を比べると、目的関数である BRB の体積  $V$ 、および BRB1 ~ 3 の最適断面の大小関係が異なっていることがわかる。T221, T223 に対しては、最大ひずみが設定した終局ひずみを大きく超え、最適解を得ることができなかった。

### 3.2 最適断面時の塑性化状況

解析モデルの BRB が最適断面の際に、レベル 2 地震動を作用させて動的解析を行ったときの塑性化状況を、種地盤のみに関して図 - 4 に、最大ひずみを表 - 5 に示す。塑性化の位置は類似しているが、範囲と場所が地震波により異なっていることがわかる。図 - 3、表 - 1 と比べると、降伏した主構造要素が減少し最大ひずみも大幅に減少できたことから、BRB による耐震補強の有効性がわかる。

## 4. 結論

3 種類すべての地盤で BRB の最適特性は地震波に対して感度を有するという結果が得られた。今後の課題として、複数の入力地震波から得られた最適解の中から、最も妥当性のある最適解を決定する方法の開発が考えられる。また、複数の入力地震波を用いた動的解析で最適化を行う場合には非常に計算時間がかかることが想定されるため、レベル 2 地震動に対する耐震性能の照査を静的解析で行う手法の適用も考えられる。

### 参考文献

- 1) F. Farhat, S. Nakamura, K. Takahashi : A Multi-Objective Genetic Algorithm for Optimizing Seismic Upgrading of structures using Buckling Restrained Braces, 4th International Symposium on Steel Structures, 2006.11.

表 - 2 終局ひずみ

地盤種	主構造要素 $\epsilon_u$	BRB $\epsilon_u$
種	$3\epsilon_y$	$20\epsilon_y$
種	$3\epsilon_y$	$20\epsilon_y$
種	$6\epsilon_y$	$20\epsilon_y$

表 - 3 GA パラメータ

項目	パラメータの値, 手法
個体数	40
世代数	50
選択手法	エリート保存方式 (適合度上位 20%)
交叉率	64%
突然変異率	16%
終了条件	世代間の変化の差 $1 \times 10^{-6}$

表 - 4 最適化結果

地盤種	地震波	BRB1(m <sup>2</sup> )	BRB2(m <sup>2</sup> )	BRB3(m <sup>2</sup> )	V (m <sup>3</sup> )
種	T211	0.030	0.020	0.010	1.61
	T212	0.020	0.020	0.035	2.01
	T213	0.020	0.025	0.010	1.48
種	T221				
	T222	0.030	0.025	0.010	1.74
	T223				
種	T231	0.056	0.049	0.007	3.01
	T232	0.049	0.035	0.007	2.44
	T233	0.035	0.049	0.007	2.44

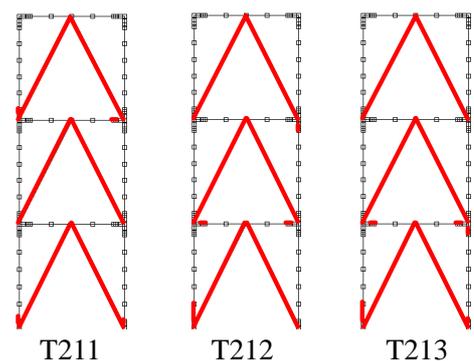


図 - 4 塑性化状況：種地盤

表 - 5 最大ひずみ

地震波	T211	T212	T213
主構造要素 $\epsilon_{abs.max} / \epsilon_y$	2.21	2.99	2.54
BRB $\epsilon_{abs.max} / \epsilon_y$	6.38	6.39	5.41