

座屈拘束ブレースを含む骨組の定荷重弾性解析に基づく縮約モデル

正会員 ○川上 竜佑* 同 辻 聖晃**
同 吉富 信太** 同 竹脇 出**

座屈拘束ブレース 縮約モデル 制振
静的縮約 バイリニア近似

1. 序

本論文の目的は、座屈拘束ブレース（以後 BRB と呼称）を含む骨組の特徴を利用し、高精度かつ既往のモデルと自由度数が同等な縮約モデルを構築することである。

2. 座屈拘束ブレース付骨組の高精度縮約モデル

提案する縮約モデルは、主骨組を静的縮約¹⁾したモデルと BRB をせん断バネで置換したモデルを連結したものの（図 1）とする。これ以降、本論文で提案する縮約モデルを BRBF 縮約モデルと呼ぶ。BRBF 縮約モデルの剛性行列 $\mathbf{K}_{BRBF}$ は次式で表される。

$$\mathbf{K}_{BRBF} = \mathbf{K}_F^S + \mathbf{K}_S \quad (1)$$

ここで、主骨組を静的縮約した場合の剛性行列を $\mathbf{K}_F^S$ 、BRB せん断バネの剛性行列を $\mathbf{K}_S$ とする。本論文では、主骨組は弾性で、BRB のみ降伏する場合を扱う。剛床を仮定し水平方向の自由度は層毎に 1 つとし、BRBF 縮約モデルは層数の自由度を有する。

以下では、BRB せん断バネの復元力特性を求める際に、BRB 付骨組モデルの Pushover 解析を必要としない新バイリニア近似法について説明する。BRB 付骨組モデルにおいて想定する状態を図 2(a)に示す。主骨組と BRB が弾性範囲に留まる²⁾と仮定した状態を「状態 I」、主骨組が弾性範囲で BRB が全層で降伏している状態を「状態 II」と称す。 $\mathbf{f}$ と $\mathbf{u}$ は水平と鉛直・回転成分に分けられる。

$$\mathbf{f} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_H^T & \mathbf{f}_R^T \end{Bmatrix}^T \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_H^T & \mathbf{u}_R^T \end{Bmatrix}^T \quad (3)$$

まず、図 2(b)の状態 I の層としての荷重変形関係を表す原点を通る直線は、静的水平荷重 $\mathbf{f}$ を与えたときの変位 $\mathbf{u}$ (点 A)より得られる。状態 I の剛性方程式(4)式より、点 A の変位 $\mathbf{u}$ は(5)式のように表される。

$$\mathbf{f} = \mathbf{K} \mathbf{u} \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{f} \quad (5)$$

$\mathbf{K}$ は主骨組の剛性行列 $\mathbf{K}_F$ と BRB の剛性行列 $\mathbf{K}_{BRB}$ の和。

次に、図 2(b)の状態 II の層としての荷重変形関係を表す原点を通らない直線は、静的水平荷重 $\mathbf{f}$ を与えたときの変位 $\mathbf{u}$ (点 B)と、静的水平荷重を与えないときの変位 $\bar{\mathbf{u}}$ (点 C)の 2 点を結ぶことで得られる。状態 II においては、BRB の降伏軸力を水平・鉛直方向に変換した一定荷重ベクトル $\bar{\mathbf{f}}$ が主骨組に作用している。このとき状態 II の剛性方程式は(6)式となる。状態 II の点 B における変位 $\mathbf{u}$ は、

(7)式のように表される。

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}_F \mathbf{u} + \bar{\mathbf{f}} \quad (6)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}_F^{-1} \mathbf{f} - \mathbf{K}_F^{-1} \bar{\mathbf{f}} \quad (7)$$

また、静的な外力が作用していないとき ($\mathbf{f} = \mathbf{0}$) の点 C における変位 $\bar{\mathbf{u}}$ は、(8)式のように表される。

$$\bar{\mathbf{u}} = -\mathbf{K}_F^{-1} \bar{\mathbf{f}} \quad (8)$$

状態 I と状態 II を重ね合わせて下限をとると、主骨組は弾性とし、BRB は弾塑性状態を考慮した BRB 付骨組モデル（状態 III と称す）の単調載荷時の層としての復元力特性のバイリニア近似とすることができる（図 2(b)参照）。

さらに、状態 III の復元力特性から BRB を含まない骨組の弾性解析によって求められる復元力特性を差し引くことで、BRBF 縮約モデルにおけるせん断バネの復元力特性を決定することができる（図 2(c)参照）。

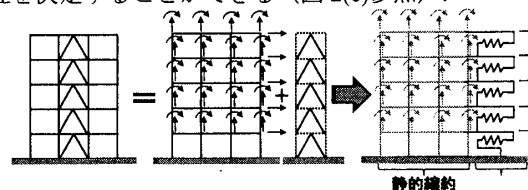
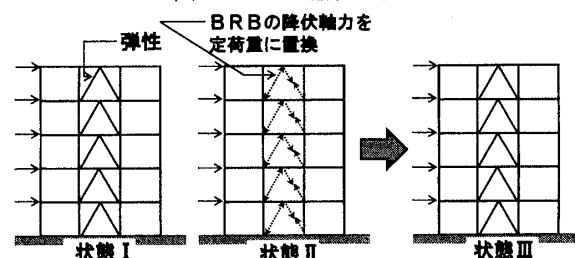
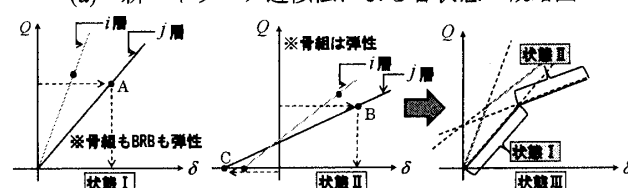


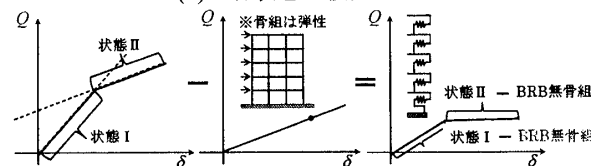
図 1 BRBF 縮約モデル



(a) 新バイリニア近似法による各状態の概略図



(b) 各状態の復元力特性



(c) せん断バネの復元力特性決定の手順

図 2 縮約法の概要

3. 高精度縮約モデルと既提案簡易モデルの精度

本節では、BRBF 縮約モデルの妥当性を検証するために、詳細骨組モデルと BRBF 縮約モデル及び静的等価せん断モデルの比較を行う。

対象骨組を図3に示す。各スパン長は7mとする。柱、梁の材料は高張力鋼（第1, 2層には790N級、その他の層には490N級）を用い、BRBにはLYP100（ $\sigma_y = 100\text{N/mm}^2$ ）を用いる。対象骨組における主骨組はLv1の入力地震動に対して、層間変形角が1/200以内に留まるように設計した。ここでは断面諸元は省略する。各層の質量は120tonとし、構造減衰は0.02としている。解析に用いた入力地震動はTaft 1952 (EW), El Centro 1940 (NS), Hachinohe 1968 (NS), BCJ波の4波であり、地動最大速度を25cm/s, 75cm/sに規準化したものをLv1, Lv3と呼ぶ。

図4に各モデルの第1層、第10層及び第20層の復元力特性を示す。図4より、全てのモデルの復元力特性がほぼ一致していることがわかる。

表1に各モデルの初期剛性に対する固有周期を示す。1次では3モデルの差は0.1%以下となっている。2次では静的等価せん断モデルと詳細骨組モデルの差が約20%であるのに対して、BRBF縮約モデルと詳細骨組モデルの差は約12%となっている。3次においても2次の場合と同様にBRBF縮約モデルは、詳細骨組モデルと静的等価せん断モデルの中間の値を示している。

図5に各地震波の詳細骨組モデルと静的等価せん断モデル及びBRBF縮約モデルの層間変位の高さ方向分布を示す。○は各層のBRBの降伏層間変位を示している。

図5から、静的等価せん断モデルと詳細骨組モデルの差よりもBRBF縮約モデルと詳細骨組モデルの差の方が小さいことがわかる。また、入力地震動のレベルが大きくなるに伴いBRBF縮約モデルの精度が向上することがわかる。これは入力地震動のレベルが大きくなると中層部から上層部にかけてBRBが降伏し、BRBF縮約モデル作成時に仮定した全層のBRBが降伏している状態に近くなるためだと考えられる。特にTaft波では静的等価せん断モデルよりもBRBF縮約モデルの方が高精度である。

4. 結論

- 1) BRBを含む骨組の動的弾塑性応答解析を行う場合に用いる高精度縮約モデルを提案した。主骨組部分は弾性を仮定して静的縮約を行い、BRBを弾塑性せん断バネに置換する。その際に、全BRBが塑性化した状態を仮定することにより、pushover解析を用いずにBRBせん断バネの復元力特性を決定する方法を提案した。
- 2) BRBを含むアスペクト比が4程度の平面骨組を対象に、

BRBF縮約モデルと詳細骨組モデル及び等価せん断モデルの弾塑性時刻歴応答解析を行い、多くの場合等価せん断モデルよりも精度が良い（特に入力地震動のレベルが大きい場合）ことを明らかにした。

参考文献

- 1) 中村恒善 著：建築骨組の最適設計，丸善株式会社，pp.309-315, 1980.
- 2) A. DUTTA, R. O. HAMBURGER: CASE STUDY OF A 40-STORY BUCKLING-RESTRAINED BRACED FRAME BUILDING LOCATED IN LOS ANGELES, *Struct. Design Tall Spec. Build.* 19, 77-93, 2010.

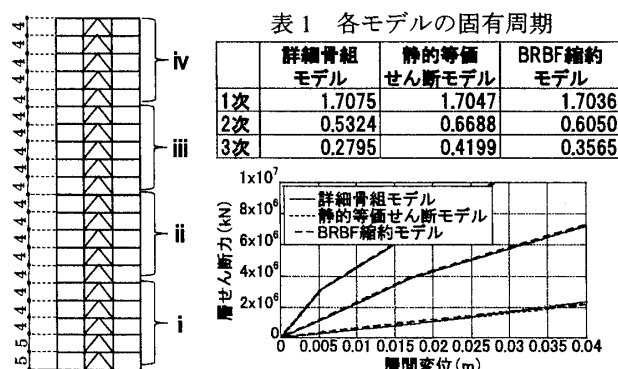


図3 解析モデル

図4 復元力特性

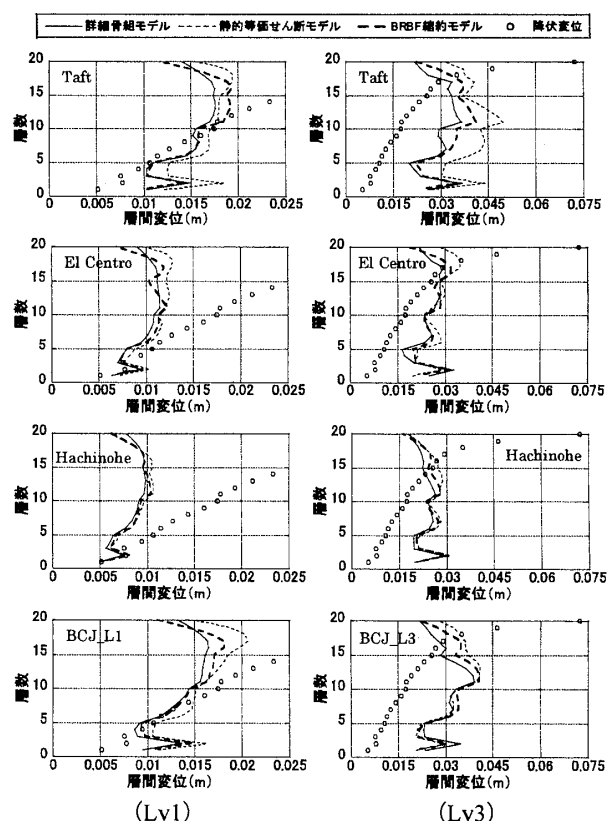


図5 入力レベルを調整した各地震波に対する層間変位

* 京都大学工学研究科都市環境工学専攻

** 京都大学工学研究科建築学専攻

* Dept. of Urban & Environ. Eng., Kyoto Univ.

** Dept. of Architecture & Architectural Eng., Kyoto Univ.