

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*1 同 吉富信太*2 同 辻聖晃*3 同 竹脇出*4

2. 構造—3. 応用力学・構造解析

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

本論文では, 座屈拘束ブレース (以後 BRB と呼称) を含む骨組モデルを等価せん断モデルよりも高精度なモデルに縮約する方法を提案する.

制振部材を含む縮約モデルとしては加村・井上ら¹⁾の方法があるが, 全体曲げ変形の影響を簡易的に評価しているためアスペクト比が大きい建物への適用には問題がある.

BRBを含む骨組は次のような特徴を有している.

- BRBが塑性化することによって主体骨組が弾性に留まる²⁾ことを目標に設計される場合が多い.
- ある層のBRBの塑性化の影響が他の層に与える影響が小さい.

本論文の目的は, 上記の BRB を含む骨組の特徴を利用して, 高精度かつ既往のモデルと自由度数が同等な簡易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

BRB 付骨組の復元力特性は, 主骨組を弾性に保つ範囲では, 他層の BRB の塑性化が当該層の復元力特性にほとんど影響を与えない. この性質を利用して, 本節では 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を提案する. また, 等価せん断モデルと自由度が同程度であり, かつ BRB 付骨組モデルの動的挙動を精度よくシミュレートできる縮約モデルを提案する.

提案する縮約モデルは, 主骨組を静的縮約³⁾して BRB をせん断バネで置換し, それぞれの縮約モデルを連結したもの (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.

次に, 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述べる.

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と仮定した状態を, 「状態 I」と称す. また, 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. 状態 II においては, BRB の降伏軸力と同等の一定外力が主骨組に作用している. 状態 I を表す直線は原点を通るため, ある静的水平荷重ベクトル $\mathbf{f}$ に対応した全節点変位ベクトル $\mathbf{u}$ (点 A) より復元力特性が得られる. 状態 II を表す直線はある静的水平荷重ベクトル $\mathbf{f}$ を与えたときの全節点変位ベクトル $\mathbf{u}$ (点 B) と水平荷重が作用しないとした場合の全節点変位ベクトル $\bar{\mathbf{u}}$ (点 C) の 2 点を結ぶことで得られる. ただし, 水平方向の自由度は剛床仮定を採用するため層毎に 1 つである. $\mathbf{f}$ と $\mathbf{u}$ は水平と鉛直・回転成分に分けられる.

$$\mathbf{f} = \{\mathbf{f}_H^T \mathbf{f}_R^T\}^T \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = \{\mathbf{u}_H^T \mathbf{u}_R^T\}^T \quad (3)$$

まず, 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 $\mathbf{K}_{BRB}$ の和である.

次に, 状態 II の点 B における変位を求める. $\bar{\mathbf{f}}$ を 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とすると状態 II の剛性方程式(6)式より, 点 B における変位 $\mathbf{u}$ は, (7)式のように表される.

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

Reduced Model for Earthquake Response Analysis of Building Frames with Buckling-restrained Braces based on Static Elastic Analysis under Constant Loads

KAWAKAMI Ryusuke, YOSHITOMI Shinta, TSUJI Masaaki and TAKEWAKI Izuru

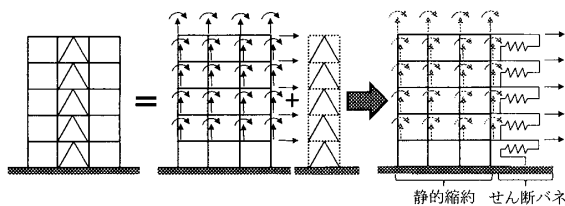
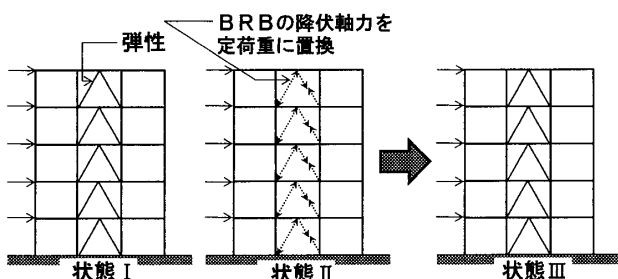
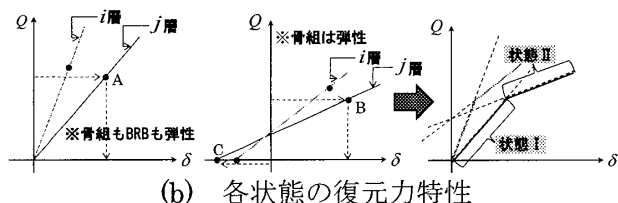


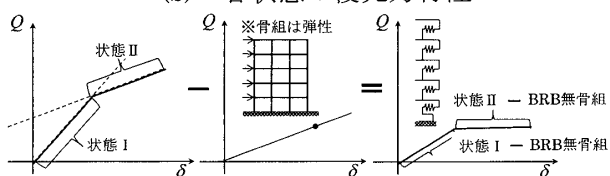
図1 BRBF 縮約モデル



(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) セン断バネの復元力特性決定の手順

図2 縮約法の概要

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

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 $\mathbf{u}$ 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減じることで、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)。

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。

表 1 各モデルの固有周期

	詳細骨組モデル	静的等価せん断モデル	BRBF 縮約モデル
1 次	1.7075	1.7047	1.7036
2 次	0.5324	0.6688	0.6050
3 次	0.2795	0.4199	0.3565

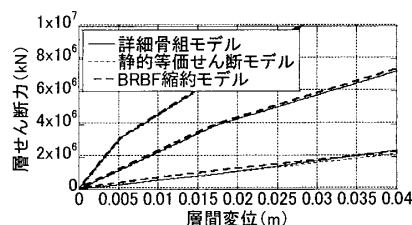


図4 復元力特性

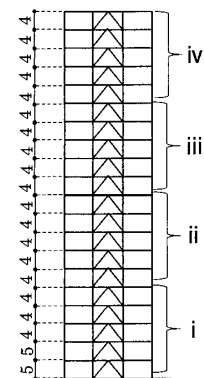


図3 解析モデル

解析骨組を図 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。解析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。ただし、BRB の断面積は、BRB の負担せん断力の割合 (BRB を含む骨組全体に作用する層せん断力に対する BRB 部分が負担するせん断力の割合) が第 1 層において約 50% になるように決定している。

3. 1 静的解析による比較

本節では、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静的解析結果を比較する。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。

3. 2 動的解析による比較

本節では、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動的応答の比較を行う。解析に用いた入力地震動 (Taft 1952 (EW), El Centro 1940 (NS), Hachinohe 1968 (NS), BCJ

波)とその地動最大加速度を表2に示す.ただし,地動最大速度を25cm/s, 50cm/s, 75cm/sに規準化したものをLv1, Lv2, Lv3として用いている.図5に各地震波(Lv1~Lv3)における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BRBF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BRBFが降伏しBRBF縮約モデル作成時に導入した仮定に近づくためであると考えられる.特にTaft波で

表2 入力地震動

入力地震動	最大加速度(gal)	最大速度(kine)
Taft 1952 (EW)	175.9	17.71
El Centro 1940 (NS)	341.7	33.45
Hachinohe 1968 (NS)	225.0	34.08
BCJ(Lv1)	207.3	30.32

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.

3. 3 座屈拘束ブレースの配置位置等の影響

本節では, BRBF 配置位置,配置タイプ,層全体の層せん断力に対するBRBF負担せん断力の割合,鋼種の変化による建物の動的応答への影響を検討する. BRBFのスパン方向の配置位置(中央,両端),配置タイプ(K型,千鳥型),負担せん断力の割合

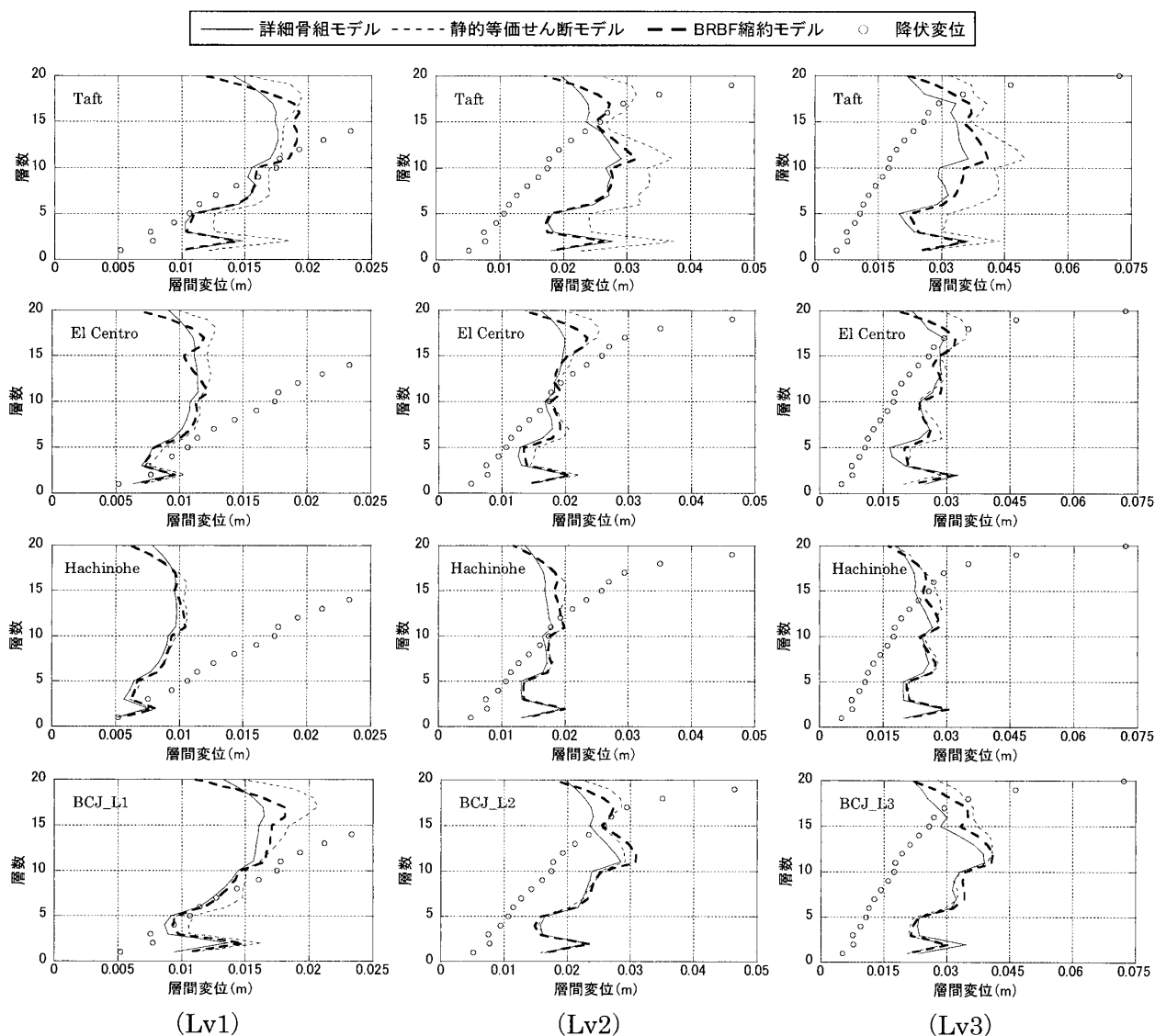


図5 入力レベルを調整した各地震波に対する層間変位の層方向分布

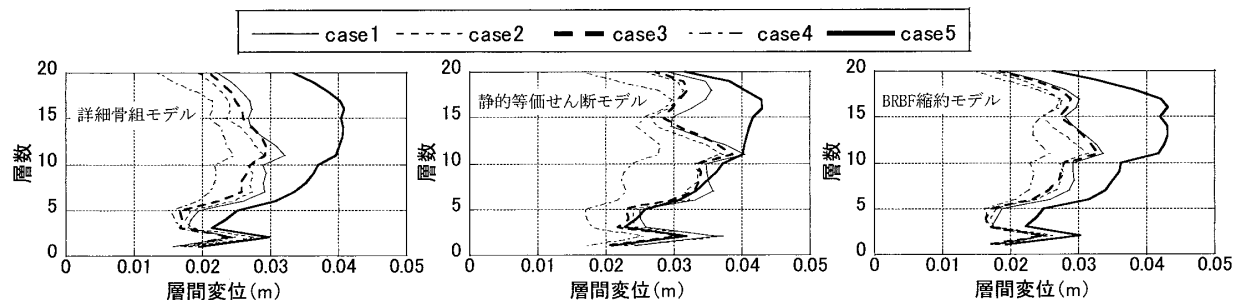


図7 各ケースにおける層間変位の層方向分布

(20%, 50%), 鋼種 (LYP100, LYP225) をパラメーターとし, BRBF 縮約モデルと詳細骨組モデル及び静的等価せん断モデルの弾塑性時刻歴解析を行う。表 3 に解析ケースを示す。解析に用いる骨組の主骨組部分は 3 節で用いた解析骨組の主骨組部分と同一とする。本論文で用いる千鳥型は図 6 の配置を指す。BRBF を両端スパンに配置した時の BRBF 断面積は, 節点の鉛直変位を拘束した時に BRBF を中央スパンに配置したモデルの水平剛性と等価となるように決定した。また, 入力地震動は Taft 1952 (EW) (Lv2) を用いている。

図 7 に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層方向分布を示す。全ての解析ケースで静的等価せん断モデルよりも BRBF 縮約モデルの方が詳細骨組モデルの結果に近い値を示している。つまり, BRBF 縮約モデルが BRBF の配置位置等の影響を精度よく考慮できているといえる。

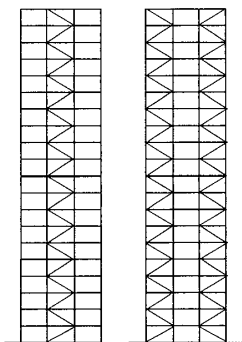


図6 千鳥配置

表3 解析ケース

	BRBF配置タイプ		BRBF配置位置		BRBF負担せん断力比		BRBF鋼種	
	K型	千鳥型	中央	両端	20%	50%	LYP100	LYP225
case1		○	○			○	○	
case2	○		○			○	○	
case3		○		○		○	○	
case4		○	○		○		○	
case5		○	○			○		○

*1 京都大学工学研究科都市環境工学専攻 大学院生

*2 京都大学工学研究科建築学専攻 助教・博士(工学)

*3 京都大学工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)

*4 京都大学工学研究科建築学専攻 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Urban & Environ. Eng., Kyoto Univ.

Assist. Prof., Dept. of Architecture & Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture & Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

Prof. Dept. of Architecture & Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

4. 結論

本論文では座屈拘束ブレース (BRB) を含む骨組を少ない自由度でかつ高精度に縮約する方法を提案した。得られた主な成果を以下に纏める。

- 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。ただし, 主骨組部分は弾性と仮定している。
- 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。
- 3) BRB を含むアスペクト比が 4 程度の平面骨組について, BRB の配置位置, 配置タイプ, 負担せん断力の割合, 鋼種をパラメーターとして変動させた場合に, 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った。その結果, BRBF 縮約モデルが BRB の配置位置等の影響を精度よく考慮できることを明らかにした。

参考文献

- 1) 加村久哉, 井上一朗, 桑原進, 小川厚治: 履歴型ダンパー付鋼構造ラーメン骨組の魚骨形地震応答解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, No.562, pp.151-158, 2002, 12.
- 2) A. DUTTA, R. O. HAMBURGER: CASE STUDY OF A 40-STOREY BUCKLING-RESTRAINED BRACED FRAME BUILDING LOCATED IN LOS ANGELES, *Struct. Design Tall Spec. Build.* 19, 77-93 (2010)
- 3) 中村恒善 著: 建築骨組の最適設計, 丸善株式会社, pp.309-315, 1980.