

### 【3.4.1 鋼製建物について】成果

## 損傷制御構造における座屈拘束ブレースの性能評価

岩田 衛<sup>\*1</sup>、加藤貴志<sup>\*2</sup>、和田 章<sup>\*3</sup>

(<sup>\*1</sup> 神奈川大学工学部、<sup>\*2</sup> アルファ構造デザイン、<sup>\*3</sup> 東京工業大学建築物理研究センター)

### 1. はじめに

損傷制御構造<sup>1)</sup>において、エネルギー吸収機構として用いるダンパーの一つに、座屈拘束ブレースがある。座屈拘束ブレースは、従来のブレースが圧縮力を受けた場合に座屈を生じるという欠点を軸力を受ける鋼材の周囲を鋼管等で補剛することにより座屈させないようにしたものである。従来のブレース構造の場合、座屈を防止するために細長比の小さなブレースが用いられ、構造物の剛性が大きくなり相対的に堅い建物になるため加速度応答が大きくなる傾向があったが、座屈拘束ブレースの場合、鋼管等で補剛されている部分はブレースの断面を小さくできるため、ブレース構造でも柔らかい建物にすることができる。このような特長から、日本では各開発者によって数種類の座屈拘束ブレースが開発され実用化されている。しかし、これらの座屈拘束ブレースが実際の建物に組み込まれたときにどの程度その性能を発揮するかについては不明確な点も多い。また、極めて稀に起こる地震動レベルまで考慮して損傷制御構造における座屈拘束ブレースの性能に着目して評価している例は既往の研究にはない。

本論では著者等が最も標準的と考える損傷制御構造モデルにおいて、精度の高い骨組み解析理論に基づいた数値解析を行い、各レベルの地震動を入力し、座屈拘束ブレースに要求される性能を明らかにする。また性能評価式に基づいた座屈拘束ブレースの設計法を提案する。

### 2. 数値解析手法

#### 2.1 解析モデルの設定

損傷制御構造として設計する骨組みの設定にあたって、建物の層数は、座屈拘束ブレースのダンパー効果が有効に発揮できるせん断変形が卓越し、柱の伸縮による全体曲げ変形を無視できる程度に抑えるという観点から10層とする。スパン数は、実験した座屈拘束ブレースがK型であることから、対称性およびフレームとの剛性バランスを考慮して、ブレース構面を中央に配置した3スパンが必要最小限度であると考え、これらの設定条件および座屈拘束ブレース本体の構造性能に基づいて、本論では、10層3スパンの平面骨組みを考える。部材断面は、各層とも第1層の降伏層せん断力係数( $D_s$ )を0.3として決定する。座屈拘束ブレースの剛性 $K_b$ と主架構の剛性 $K_f$ の比 $2K_b/K_f$ は、1.0~4.0程度まで設定が可能だが、2.0以上になると応答加速度が増加する傾向があり、2.0以下になると応答変位が増加する傾向があることから全層2.0を目標とする<sup>2)</sup>。各層のダンパーの降伏せん断力は、各層の保有水平耐力に対しておよそ1/10を目標にする。

このような10層3スパンの解析モデルは、世の中に現存するオフィスビルがこの程度であることを考えれば一般的なものである。数値の一般性という意味では、骨組み形式が異なっても本解析モデルと同等の剛性分布、固有周期、クライテリアを設定していれば、ダンパーの性能評価をするうえで一般性のある結果が得られるものとする。

#### 2.2 解析モデルの設計

解析モデルの設計にあたって、柱脚は固定とし階高は1層のみ3.8mで他の各層は3.0m、梁スパン

は 6.0m とする (図 1)。柱は角形鋼管、梁を H 形鋼 (降伏応力度  $\sigma_y = 323.4 \text{ N/mm}^2$ ) とする。座屈拘束ブレースは、ダンパー部とガセット部からなり (以下、単にダンパー、ガセットと記す)、解析モデルの中央スパンに全層 K 型に配置する。ダンパー ( $\sigma_y = 235.2 \text{ N/mm}^2$ ) は、平鋼を用いてブレース全体長さに対して塑性変形区間を 1/2 とする。ガセット ( $\sigma_y = 235.2 \text{ N/mm}^2$ ) はダンパーの断面積の 10 倍としてモデル化する。なお、座屈拘束の条件のため、ダンパーは曲げ変形を生じないものとする。解析モデル重量は、柱と梁の節点に層の重量の 1/4 を各々配分し、梁の中央にその 1/10 を配分する。層の重量は梁 1 m あたり 39.2 kN として概算し、10 層のみ他の 1/2 とする。静的増分解析にあたって、外力分布は告示に示されている  $A_1$  分布に従うものとする。

## 2.3 解析理論

本論では、有限要素法に基づく非線形平面骨組動的応答解析プログラムを用いて解析を行う。

基本的な仮定条件、理論を次に示す<sup>3)</sup>。

- ①部材は全て線材として扱う。
- ②一つの部材を部材方向に 3 つの小要素に分割し (柱、ブレースは等分割し、梁は、梁端から梁せいの 1/4 までは塑性化領域として分割し、その他は等分割する)、部材断面方向について層状に 20 の小要素に等分割する。
- ③断面内の応力度、歪度分布は単位分割中では一定とする。
- ④小要素各々について部材方向に 1 次の増分変位関数、部材方向に対する法線方向について 3 次の増分変位関数を多項式として設定する。
- ⑤非線形解析法は、ポテンシャルエネルギー増分の停留原理に基づいた増分法である。
- ⑥時刻歴応答解析手法は、Newmark  $\beta$  法 ( $\beta = 1/4$ ) による直接積分法を用いる。

## 2.4 解析条件

解析にあたって、以下の条件を設ける。

- ①鋼材のヤング係数は  $205 \text{ kN/mm}^2$  とし、ヤング係数に対する塑性勾配を 1/50 とし、歪硬化を考慮する係数は、ヤング係数の 1/200 に設定する。
- ②減衰は瞬間剛性比例型とし、1 次固有周期に対する減衰定数を 2% とする。
- ③採用する地震動は観測地震動として、El centro NS、神戸海洋気象台 NS、Taft EW、八戸 EW、および日本建築センター作成による模擬地震動 (センター波) を用いる。
- ④地震動のレベル設定は、レベル 1、レベル 2 は通常の設計で検討されるレベルであり、レベル 3、レベル 4 はダンパーの限界性能を把握するための余裕度検討用とする。
- ⑤観測地震動について、地動最大速度で 4 つのレベル (0.25、0.5、0.75、1.0 m/s) に基準化し、模擬地震動についてはレベル 3 とレベル 4 をレベル 2 の加速度の各々 1.5 倍、2 倍として作成する。
- ⑥地震動の継続時間は、観測地震動のピークが全ての地震動において 30 秒以内に現れることから 30 秒とする。
- ⑦時間積分間隔は、0.002 秒とする。
- ⑧上記の時間積分間隔を用いた場合、内部節点力ベクトルと外力ベクトルの釣り合い誤差が十分に小さいと判断できるため収束計算は行わず、次の時間ステップで誤差を解消する方法を用いる。

## 2.5 固有値解析

初期剛性を用いた固有値解析の結果、1 次固有周期は 1.1 秒、2 次固有周期は 0.4 秒、ブレースを取り除いた主架構のみの 1 次固有周期は 1.7 秒、2 次固有周期 0.6 秒である。

## 3. 解析結果

### 3.1 入力レベルに対する最大応答

本論で用いたレベル1～レベル4の入力に対して、各レベルで応答が比較的大きかった kobens（神戸海洋気象台 NS）の場合、最大層間変形角分布において、本解析モデルではおおよそレベル1で層間変形角 1/200、レベル2で 1/100、レベル3で 1/75、レベル4で 1/50 である。なお、最大応答時ににおける柱の伸縮による全体曲げ変形は、最上階の水平軸に対する梁の部材角がおおよそ 1/3000（ブレース構面のみではおおよそ 1/1500）程度であり、極めて小さい値である。

### 3.2 入力レベルに対する梁端部の歪

kobens の場合、入力レベルに対する梁端部の歪は、レベル1とレベル2では全ての地震動において弾性範囲内である。レベル3とレベル4では全ての地震動で塑性化が認められるが、レベル3までは塑性率が 1.5 以内に収まっている。

### 3.3 ダンパーの最大塑性変形能力

各レベルのダンパーの最大塑性率  $\mu$ 、累積塑性率  $\eta$  の平均値をみると、 $\eta$  は、 $\mu$  に対して 15 倍程度の値になる。また、center（センター波）の  $\eta$  は、速度応答スペクトルが長周期領域においてフラットになる特性を有しているため、他の地震動と比較して大きくなっている。

### 3.4 ダンパーの累積塑性歪エネルギー吸収能力

ダンパーの累積塑性歪エネルギー吸収量を、ダンパーの降伏荷重と弾性限界変形量を乗じて算出した値で除して無次元化したパラメータをエネルギー吸収率（ $\omega$ ）と定義する。全ての入力レベルにおいて、エネルギー吸収率分布は累積塑性率分布と相似性があるが、ダンパーの履歴特性において軸力の増加傾向も考慮できるため、累積塑性率分布と比較して、より正確にダンパーの損傷程度を把握できる。

### 3.5 座屈拘束ブレースの要求性能

レベル2およびレベル4入力時における  $\eta$  と  $\omega$  それぞれの平均値を丸めると、「100」と「300」となる。これをレベル2およびレベル4地震動における座屈拘束ブレースに対する要求性能とする。

## 4. 設計法の提案

座屈拘束ブレースの設計にあたっては、より正確に塑性変形能力を把握できる  $\omega$  指標を用い、レベル2を基本とすると、次式になる。

$$y = \frac{3}{4}x \quad (y: \omega \text{ 指標}, x: P_E/P_y)$$

設計式は  $\omega$  指標にレベル2入力時の平均値「100」を乗じた、エネルギー吸収率  $\omega$  を用い次式とする。

$$Y = \frac{300}{4}x \quad (Y: \omega, x: P_E/P_y)$$

以下、この設計式を用いた設計手順を記す。図2に概要を示す。

まず、適用する建築物の用途、骨組形式、階高、スパンが決まると、それに伴い構造物全体に要求される性能（剛性、耐力）が設定される。構造物にかかるせん断力について、構造設計者の判断により、柱と梁からなる主架構とブレース材それぞれに分担させる割合が決定される。ここではブレース材が塑性化しても、主架構のみの剛性で構造物が成り立たつよう、ブレース材に対して過度に分担させないように留意する。主架構である柱と梁の寸法が確定すると、ガセット部等の継手部の形状、ブレース材の寸法  $b_b$ 、鋼モルタル板長さ  $l_{mp}$  を決定することができる。縮み量  $\delta$  は地震時に想定される層間変形角により決定する。

次に、ブレース材について鋼種と断面積を決定する。鋼種の計算に関しては設計基準強度（F 値）を用いる。ブレース材が分担するせん断力の値が確定しているため、鋼種すなわち F 値と、断面積 A を決定することができる。A の値から、芯材の幅  $b_{cp}$ 、厚さ  $t_{cp}$  が決まる。ここで  $b_{cp}$  及び  $t_{cp}$  の値はガセット部の寸法及び芯材幅厚比の値に留意して決定する。芯材の降伏荷重  $P_y$  は  $F \times A$  となる。

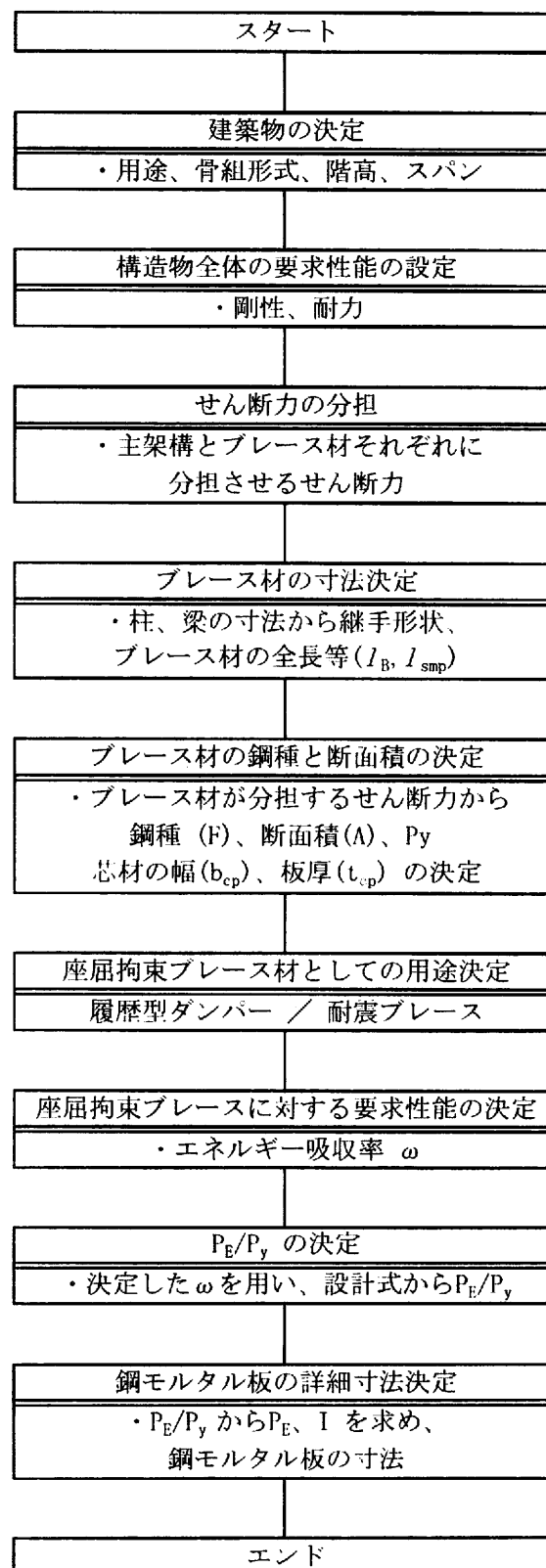


図2 設計手順