

## 変位制御型ブレースとオイルダンパーを用いた鋼構造骨組のロバスト設計

正会員 ○岸田 澄雄\* 同 山川 誠\*\*  
同 朝川 剛\*\*\* 同 永野 康行\*\*\*\*

PC 鋼棒 鋼構造骨組 ロバスト性  
地震応答制御 構造最適化

## 1. はじめに

想定を超える地震力が建物に作用した場合、特定層に過度な集中変形が生じる可能性がある。このような危険な崩壊メカニズムを防ぐために、降伏後の剛性を制御できる変位制御型PC鋼棒ブレース(DRB)が提案されている<sup>[1]</sup>。DRBは、ブレース端部を離間させることで、常時は弛緩しており、引張側にある程度の層間変形が生じた時に剛性材として作用するストッパー機構である。DRBにオイルダンパーを組み合わせた制振装置の耐震ロバスト性評価を目的として、1) 幅広い地盤特性に対する応答制御性能、2) 想定外の地震動として上町断層帯の予測地震動に対する応答制御性能の評価・分析を行う。

## 2. 最適化手法に基づく骨組モデルの応答制御

## 2.1 解析モデル概要

図1に示すような9層2スパンの鋼構造骨組を対象とする。各層質量 72 ton とし、梁はH形鋼、柱は角形鋼管とし、制振装置を図2に示すように配置する。DRBおよびオイルダンパーは図2に示すように配置し、1ヶ所あたり片側4本、計8本のPC鋼棒を用いる。柱梁断面を表1に示し、柱梁材にはSN490、DRBにはSBPR1080/1230を用いる。オイルダンパーは、バイリニア型減衰特性にモデル化し、リリース荷重  $F_r$  に対応する速度値を  $v_r = 32 \text{ mm/sec}$  に固定し、第一減衰係数  $C_d = F_r / v_r$ 、第二減衰係数  $0.068C_d$  を与える。

文献[2]に示されている設計用地震動3波を入力地震動とする。位相特性は、海洋型として1968年十勝沖地震の八戸港湾、1978年の宮城県沖地震の東北大学を、直下型として1995年の兵庫県南部地震の神戸海洋気象台を用いる。これらの地震動をPGV50cm/secとPGV100cm/secに基準化し、以降では、それぞれを告示波(PGV50)、告示波(PGV100)と参照する。告示波(PGV100)は想定を超える大地震と位置付ける。これらの設計用地震動に対し、有限要素解析ソフトウェアOpenSees<sup>[3]</sup>による時刻歴応答解析から応答値を評価する。

## 2.2 最適設計

設計用地震動に対する最大応答層間変形角  $\delta_{\max}$  を最小化するように制振装置の設計を行う。主架構のみのモデルをCase0、オイルダンパーを加えたモデルをCase1、さらにDRBを加えたモデルをCase2とする。各Caseの最適化における設計変数と設計用地震動のPGVを表2にまとめる。

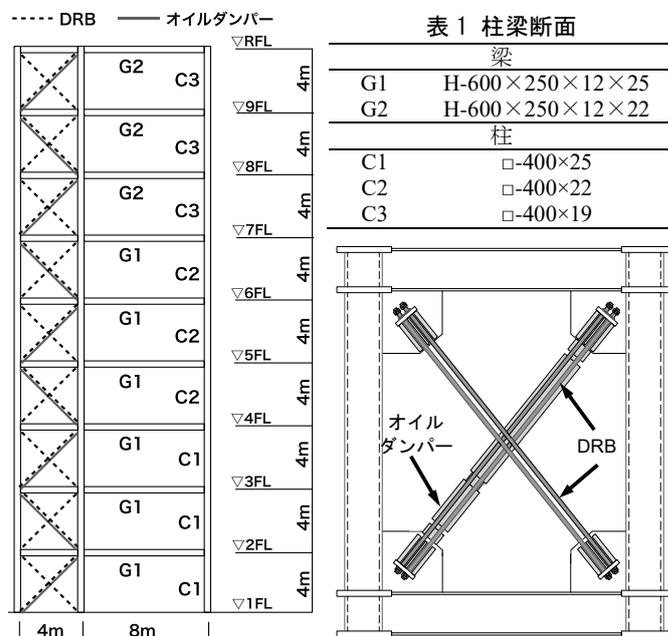


図1 解析モデル

表1 柱梁断面

梁	
G1	H-600×250×12×25
G2	H-600×250×12×22
柱	
C1	□-400×25
C2	□-400×22
C3	□-400×19

図2 制振機構

(Case1) 告示波(PGV50)に対してオイルダンパーを設計し、次の最適化からリリース荷重を定める。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find} \quad \mathbf{x} = (F_{r1}, \dots, F_{r9}) \\ \text{to minimize} \quad \delta_{\max}(\mathbf{x}; A_{\text{PGV50}}) = \max_{i,j} \delta_i(\mathbf{x}; \mathbf{a}_j^{\text{PGV50}}) \\ \text{subject to} \quad 200 \text{ kN} \leq F_{ri} \leq 1600 \text{ kN} \quad (i=1, \dots, 9) \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}$  はリリース荷重  $F_{ri}$  ( $i=1, \dots, 9$ ) を要素に持つベクトル、 $A_{\text{PGV50}}$  は告示波(PGV50)を表す集合、 $\mathbf{a}_j^{\text{PGV50}}$  ( $j=1, 2, 3$ ) は第  $j$  番目の告示波(PGV50)の加速度時刻歴、 $\delta_i$  は第  $i$  層の最大応答層間変形角とする。

(Case2) オイルダンパーは問題(1)で決定したパラメータに固定し、告示波(PGV100)の地震動に対するストッパー機構として、DRBのパラメータを次の最適化から定める。

$$\left. \begin{array}{l} \text{find} \quad \mathbf{y} = (u_{01}, \dots, u_{09}, d_1, \dots, d_9) \\ \text{to minimize} \quad \delta_{\max}(\mathbf{y}; A_{\text{PGV100}}) = \max_{i,j} \delta_i(\mathbf{y}; \mathbf{x}, \mathbf{a}_j^{\text{PGV100}}) \\ \text{subject to} \quad 0 \leq u_{0i} \leq 57 \text{ mm}, 0 \leq d_i \leq 40 \text{ mm} \quad (i=1, \dots, 9) \end{array} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{y}$  は DRB の初期変位  $u_{0i}$  と直径  $d_i$  を要素に持つベクトル、 $A_{\text{PGV100}}$  は告示波(PGV100)を表す集合、 $\mathbf{a}_j^{\text{PGV100}}$  ( $j=1, 2, 3$ ) は第  $j$  番目の告示波(PGV100)の加速度時刻歴とする。問題(1),(2)に対し、内点法と直接探索法<sup>[4]</sup>を併用して求められた最適解を表3、表4に示す。変形が大きくなりやすい1層から4層にDRBを配置する結果となった。

表2 最適設計

	制振機構	設計	入力地震動 A
Case0	—	—	—
Case1	オイルダンパー	$\{F_{vi}\}$	告示波(PGV50)
Case2	オイルダンパー, DRB	$\{F_{vi}\}, \{u_{0i}\}, \{d_i\}$	告示波(PGV100)

表3 オイルダンパーリリーフ荷重の最適解 (単位: kN)

層	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$F_{vi}$	900	1052	982	1150	926	854	609	342	209

表4 DRBの最適解 (単位: mm)

層	1	2	3	4	5	6	7	8	9
初期変位 $u_{0i}$	19	10	11	11	-	-	-	-	-
直径 $d_i$	14	23	24	22	-	-	-	-	-

### 3. 耐震ロバスト性評価

#### 3.1 不確定変動モデル

表3, 表4のように得られた制振装置の設計に対し, 耐震ロバスト性を評価する。幅広い地盤特性に対する応答制御性能を評価するために, 2層地盤を考え, 表層地盤の層厚  $H$  とせん断波速度  $V_s$  に表5で示す範囲の不確定変動を与える。告示波(PGV50)を工学的基盤に入力し, ランダムに増幅させた90波の地震動を作成し, 以降では不確定地震動と参照する。不確定地震動90波のPGVの平均値は65cm/secである。各Caseの設計解に不確定地震動を与え, 時刻歴応答解析により得られる最大応答層間変形角の統計量を表6に示す。Case0とCase1の比較から, オイルダンパーを付与することで最大応答層間変形角の平均値が約50%低減される。さらにDRBを加えたCase2では, Case1と比べ最大値が15%低減され, DRBによる耐震ロバスト性の向上と理解される。

表5 地盤特性

層	土質	層厚[m]	質量密度[t/m <sup>3</sup> ]	せん断波速度[m/s]
1	砂	$40 \leq H \leq 60$	1.85	$125 \leq V_s \leq 400$
2	工学的基盤		1.95	500

表6 最大応答層間変形角(不確定地震動) (単位: 0.01rad)

	最小値	最大値	平均値	中央値	標準偏差
Case0	1.204	2.483	1.566	1.499	0.301
Case1	0.490	1.240	0.737	0.702	0.170
Case2	0.490	1.048	0.714	0.682	0.135

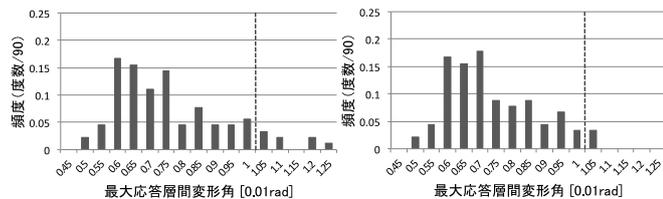


図3 最大応答層間変形角の相対度数分布(不確定地震動)

#### 3.2 上町断層帯地震に対する大阪市域の設計用地震動

PGV50cm/secのレベルを超える大地震動に対する評価として, 大阪市域で想定されている上町断層帯の予測地震動を対象とする<sup>[1]</sup>。文献[5]では, PGVに応じて予測地震動が整理されており, その中で平均的なレベルとして示されたPGV75cm/sec相当の地震動36波を用いる。以降では, これらを上町地震動と参照する。前節と同様の時刻歴応答解析を実施し, 最大応答層間変形角を表7に, 相対度数分布を図4に示す。図4において, 最大応答層間変形角が1/100を超える地震動の発生数が50%低減され, DRBの効果が確認される。また, Case2ではDRBを配置していない第5層の変形が大きくなっている。最適化段階における設計用地震動の選定の影響と考えられる。

表7 最大応答層間変形角(上町地震動) (単位: 0.01rad)

	最小値	最大値	平均値	中央値	標準偏差
Case1	0.555	1.128	0.916	0.940	0.154
Case2	0.544	1.151	0.891	0.926	0.147

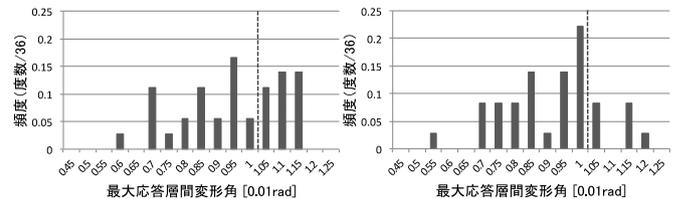


図4 最大応答層間変形角の相対度数分布(上町地震動)

### 4. まとめ

DRBにオイルダンパーを組み合わせた制振装置の耐震ロバスト性の評価・分析を行った。

- 1) 制振装置の設計を最適化問題として定式化し, DRBによる応答制御性能の有効性を確認した。
- 2) オイルダンパーにDRBを加えることにより, 表層地盤増幅の不確実性を考慮した地震動に対し, 最大応答層間変形角の最大値が約15%, 標準偏差が20%低減する。
- 3) PGV75cm/sec相当の上町地震動に対して, DRBを付与することで最大応答層間変形角が1/100を超える地震動の発生数が50%低減される。

#### 参考文献

- [1] 渡邊佳菜, 山川誠, 朝川剛: 変位制御型ブレースと制振機構を用いた鋼構造骨組の応答制御設計, 構造工学論文集, Vol.66B, 2020.3
- [2] 日本建築構造技術者協会: 建築構造の計算と監理, 2002.9
- [3] Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees), PEERC, UC Berkeley, <https://opensees.berkeley.edu/>
- [4] 山川誠, 大崎純, 満田衛資: 弾塑性時刻歴応答の鋼構造建物の設計問題の為の部分的感度情報を用いた最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第683号, 2013.1
- [5] 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針, 2015

\*東京理科大学大学院 大学院生

\*\*東京理科大学 教授 博士(工学)

\*\*\*東京電機大学 准教授 修士(工学)

\*\*\*\*兵庫県立大学 教授 博士(工学)

\*Graduate School, Tokyo University of Science.

\*\*Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.

\*\*\*Assoc. Prof., Tokyo Denki University.

\*\*\*\*Prof., University of Hyogo, Dr. Eng.