

変位制御型ブレース付き鋼構造骨組の順序統計量に基づくロバスト最適設計

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

地震応答制御 ロバスト性 順序統計量
PC 鋼棒 最適設計

1. はじめに

建築構造設計においても不確実性への配慮が求められる。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) は耐震ロバスト性向上に有効であることが知られている¹⁾。本研究では、DRB の設計に順序統計量に基づくロバスト設計法²⁾を適用する。建設省告示第1461号に定められた地震動 (告示波) を設計用地震動と与えて設計し、耐震ロバスト性の検証として上町断層帯の予測地震動 (上町波) に対する応答制御性能を評価・分析する。

2. 順序統計量に基づくロバスト設計

設計変数ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d)$ および不確定変動パラメータ $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_r)$ に対する建物応答を $g = g(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta})$ と表し、ロバスト最適設計問題を

$$\text{minimize } \max_{\boldsymbol{\theta} \in \Omega} \{g(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta})\}, \text{ s.t. } x_i \in \mathcal{X} (i=1, \dots, d) \quad (1)$$

と与える。ここで、 $\max_{\boldsymbol{\theta} \in \Omega} \{g(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta})\}$ は最悪応答値、 \mathcal{X} は設計変数の許容領域、 Ω はパラメータの変動領域を表す。領域 Ω 上で一様に分布する確率変数列 $\theta_1, \dots, \theta_n$ を考えると、対応する建物応答 $g(\mathbf{x}; \theta_1), \dots, g(\mathbf{x}; \theta_n)$ は確率変数となる。この確率変数を降順に並べ替えたものを

$$Y_{1,n} \geq \dots \geq Y_{k,n} \geq \dots \geq Y_{n,n} \quad (2)$$

と表す。 $Y_{k,n} (1 \leq k \leq n)$ は第 k 順序統計量と呼ばれ、第 k 順序統計量を最小化するロバスト最適設計問題

$$\text{minimize } Y_{k,n}(\mathbf{x}), \text{ s.t. } x_i \in \mathcal{X} (i=1, \dots, d) \quad (3)$$

を考える。ある k, α, β について $n = n(k)$ の標本数があれば、

$$\Pr\{\Pr\{Y \leq Y_{k,n}\} \geq \beta\} \geq \alpha \quad (4)$$

が成り立ち、 $\alpha = \beta = 0.9$ の場合、 $k = 5, n = 78$ とすれば、「 $Y_{5,78}$ が上位10%以内の最悪応答値となる確率は90%以上」である。

3. 解析モデル概要

3.1 構造物モデル

PGV 50 cm/sec 相当の設計用地震動 (告示波) に対してはオイルダンパーで入力エネルギーを吸収させ、その想定を超える高レベル地震動 (上町波) に対しては、DRB がストッパー機構の役割を果たすことを想定する。図1に示すように、1ヶ所あたり片側4本、計8本の PC 鋼棒を DRB に用い、ブレース端部を離間させることで常時は弛緩させ、引張側にある程度の層間変形が生じたときに剛性材として作用させる。建物モデルは9層2スパンのオイルダンパー付き鋼構造骨組を対象とし、各層質量72 ton、梁は H 形鋼、柱は角形鋼管、DRB とオイルダンパーを図2に示すように配置する。柱梁断面を表1に示し、柱梁材には SN490、DRB には SBPR 1080/1230を用いる。各層に配

表 1 柱梁断面

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

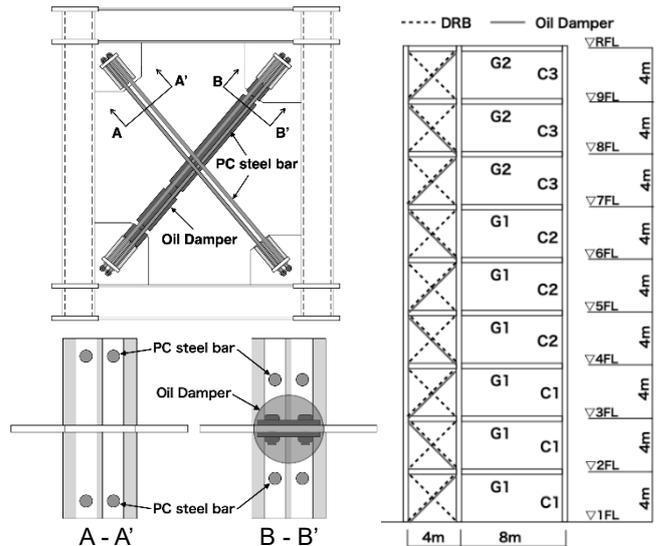


図 1 DRB とオイルダンパー

図 2 解析モデル

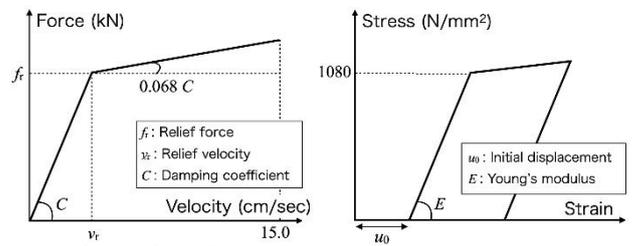


図 3 オイルダンパーと DRB の特性

表 2 オイルダンパーのパラメータ (単位: kN, cm/sec)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_r	800	1200	800	800	800	400	400	200	—
v_r	3.2	4.3	2.6	2.6	3.2	1.8	3.2	6.4	—

置したオイルダンパーの減衰特性のリリーフ荷重 f_r とリリーフ速度 v_r を表2に示す。数値解析にて、DRB の初期変位 u_0 と PC 鋼棒の直径 d を設計変数にとり、それぞれの候補解を表3に示す。有限要素解析ソフトウェア OpenSees³⁾ により時刻歴応答解析を行う。

表 3 設計変数

装置	設計変数	標準規格 \mathcal{X}
DRB	u_0 (mm)	{0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28}
	d (mm)	{9.2, 11, 13, 17, 23, 26, 32, 36, 40}

3.2 表層地盤増幅を考慮した地震動

十勝沖地震の八戸港湾(EW 成分)と宮城県沖地震の東北大学(NS 成分), 兵庫県南部沖地震の神戸海洋気象台(NS 成分), 乱数位相7波からなる計10波の位相特性を p と表す。位相特性 p に対し, 建設省告示第1461号に規定される解放工学的基盤での加速度スペクトルに適合する地震動を作成し, PGV 50 cm/sec に基準化したものを「告示基盤波」とよぶ。表4に示す2層地盤を考え, 表層地盤の層厚 H とせん断波速度 V_s を不確定変動パラメータに加え, 不確定変動領域 Ω を次式で与える。基盤波に対し, これらの不確定変動を与えたものを「告示表層波」とよぶ。

$$\Omega = \left\{ (p, H, V) \left\{ \begin{array}{l} p \in \{\text{八戸港湾, 東北大学, 神戸海洋気象台,} \\ \text{乱数位相1, \dots, 乱数位相7}\} \\ 40\text{m} \leq H \leq 60\text{m}, 125\text{m/sec} \leq V_s \leq 400\text{m/sec} \end{array} \right. \right\} \quad (5)$$

表4 地盤特性

層	土質	層厚 (m)	質量密度 (t/m ³)	せん断波速度 (m/sec)
1	砂	40 ≤ H ≤ 60	1.85	125 ≤ V _s ≤ 400
2	工学的基盤		1.95	400

4. 解析結果

4.1 数値解析

提案手法の応答低減効果について数値解析例を通じて調べる。表5に示すように, DRB の初期変位 u_0 と PC 鋼棒の直径 d の設計について, 以下の2ケースを行う。

[Case 1] 告示基盤波 (PGV 50 cm/sec に基準化した10波) を入力地震動に与えて問題(1)を解く。

[Case 2] 告示表層波 (告示基盤波をランダムに増幅させた78波) を入力地震動に与えて問題(3)を解く。

これらの設計問題に対し, 局所探索法⁹⁾を用いて得られた DRB の最適解を表6に示す。不確定変動を考慮しない Case 1では, DRB は上層部にのみ配置される結果となった。オイルダンパーにより十分な応答低減がなされているためと考えられる。一方, 不確定変動を考慮した Case 2では, 下層部の DRB の初期変位および直径が大きくなるよう設計されている。不確定変動の影響の低減には, 下層部への DRB 配置が有効であることが示唆されている。

表5 最適設計

	問題	不確定変動	入力地震動
Case 1	(1)	考慮なし	告示基盤波 (10 波)
Case 2	(3)	考慮あり	告示表層波 (78 波)

表6 最適解 (DRB, 単位: mm)

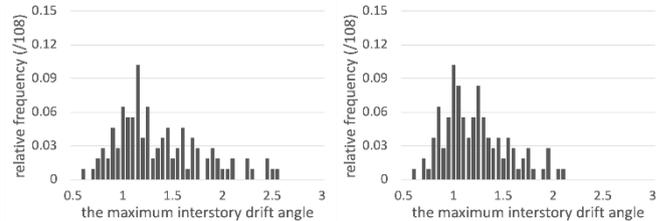
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Case 1	u_0	—	—	—	—	—	4	4	4	0
	d	—	—	—	—	—	17	23	40	40
Case 2	u_0	24	12	12	8	8	4	12	—	—
	d	40	26	36	26	23	17	36	—	—

4.2 耐震ロバスト性評価

PGV 50 cm/sec のレベルを超える地震動に対する評価を耐震ロバスト性評価と位置づける。文献5)では, 大阪市域で想定されている上町断層帯の予測地震動が, PGV に応じて整理されている。その中で, PGV 75, 100, 125 cm/sec 相当の地震動をそれぞれ36波, 計108波をロバスト性評価に用い, 以降では「上町波」と参照する。Case 1と Case 2 の設計解に上町波を与え, 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図4に示す。表7および図4において, Case 2は Case 1に比べ, すなわち不確定変動を考慮することにより, 最大応答層間変形角が最大値で18%, 平均値で11%, 標準偏差で25%低減され, 建物のロバスト性が向上されていることが確認できる。

表7 最大応答層間変形角 (単位: 0.01 rad)

	最大値	平均値	標準偏差	90 パーセント タイル値
Case 1	2.534	1.339	0.433	1.937
Case 2	2.083	1.193	0.321	1.651



Case 1 (不確定変動考慮なし) Case 2 (不確定変動考慮あり)
図4 最大応答層間変形角の相対度数分布 (単位: 0.01 rad)

5. まとめ

順序統計量に基づくロバスト最適設計を行い, 上町断層帯の予測地震動に対するロバスト性を評価した。

- 1) 不確定変動を考慮することにより, 想定を超える PGV レベルの地震動に対しても, 最大応答層間変形角が最大値で約18%, 標準偏差で約25%低減される。
- 2) 耐震ロバスト性の高い設計解では, 下層のブレースの初期変位が大きく, 直径が大きくなる。

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) 山川誠, 大崎純: 順序統計量を用いて地震動特性のパラメータ変動を考慮したロバスト最適設計, 構造工学論文集, Vol.62B, pp.381-386, 2016
- 3) Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees), PEERC, UC Berkeley, <https://opensees.berkeley.edu/>
- 4) Ohsaki M: Optimization of finite dimensional structures, CRC Press, 2010
- 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設計法に関する研究会: 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, M. Eng.

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