

構造ヘルスマモニタリングの開発に向けた鋼構造骨組みによる振動台実験

Shaking Table Test of Steel Structural Frames for the Development of Structural Health Monitoring

山崎 康雄*

金川 基**

Yasuo Yamasaki

Motoi Kanagawa

要 約

近い将来に発生が予想される首都直下型地震や南海トラフ地震など大地震に対し、BCP（事業継続性）の観点から、構造物に設置したセンサからの情報に基づいてその構造健全性を診断する構造ヘルスマモニタリング技術への関心が高まっており、その適用数は年々増加傾向にある。本報では、構造ヘルスマモニタリングの課題点の抽出を目的に、実建物に相似則を適用した鋼構造骨組みによる振動台実験を実施し、得られた結果について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 試験体の概要
- § 3. 振動台実験の概要
- § 4. 振動台実験の結果
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

近い将来に発生が予想される首都直下型地震や南海トラフ地震など大地震に対し、BCP（事業継続性）の観点から、構造物に設置したセンサからの情報に基づいてその構造健全性を診断する構造ヘルスマモニタリング技術への関心が高まっており、その適用数は年々増加傾向にある。構造ヘルスマモニタリングとは、地震被災後の構造物の健全性を判定することを目的に、加速度計などのセンサを構造物の適所に設置し、地震被災時などの構造物の揺れを計測することで、これは人間の定期健診に例えられる。著者らも構造ヘルスマモニタリングに着目し研究開発を行っており、都内の建物を対象に加速度計を設置して地震被災時の各階の振動データを取得してきた。今現在は幸いにも大地震に被災しておらず、小地震時のデータのみが取得できている。本報では、構造ヘルスマモニタリングの課題点の抽出を目的に、実建物に相似則を適用した鋼構造骨組みによる振動台実験を実施し、得られた結果について報告する。

§ 2. 試験体の概要

2-1 相似則の誘導

想定建物は、都市部に建つ中規模の鋼構造建物とし、総重量が約 20,000 kN、床面積 506 m² (22.5 m × 22.5 m) の 6 層鋼構造の事務所ビルとした。平面形状は 1 スパンを 7.5 m とした 3 × 3 の長方形であり、基準階階高は 4.0 m、建物高さは 24.8 m とした。自社で保有する振動台（テーブル面積 30.3 m² : 5.5 m × 5.5 m）にて想定建物の地震時の挙動を確認するため、相似則^{1,2)}を適用した。

基本相似則として、長さ、時間、単位面積質量の縮尺をそれぞれ、 $1/\lambda$ 、 $1/\beta$ 、 $1/\rho$ とする。これらより、本実験で用いる各物理量に対する相似則を導いたものを、表一の A 欄に示す。記号は、m を試験体、p を想定建物とする。想定建物と試験体で水平応力度、ひずみ、ヤング係数および加速度を一定とすると、 $\beta = \sqrt{\lambda}$ 、 $\rho = 1$ となり、これらを代入して整理したものが B 欄である。

誘導した B 欄の相似則を適用すると、振動台の大きさから $\lambda = 5$ （縮尺 1/5）となり、試験体は振動台上に設置可能となる。ここで、加振時の転倒モーメントによる影響を抑制するため、質量を 1/n 倍する。質量を 1/n 倍としたときの相似則は式(1)となる。

$$M_m = 1/\lambda^2 \cdot 1/n \cdot M_p = 1/(n \cdot \lambda^2) \cdot M_p \quad (1)$$

また、周期は $T = 2\pi\sqrt{(m/k)}$ から算出できるので、式(1)の相似則と B 欄に示すばね定数の相似則を用いて、質量を 1/n 倍したときの周期の相似則は式(2)となる。

$$T_m = \sqrt{(1/(n \cdot \lambda))} \cdot T_p \quad (2)$$

* 技術研究所建築技術グループ

** 技術研究所

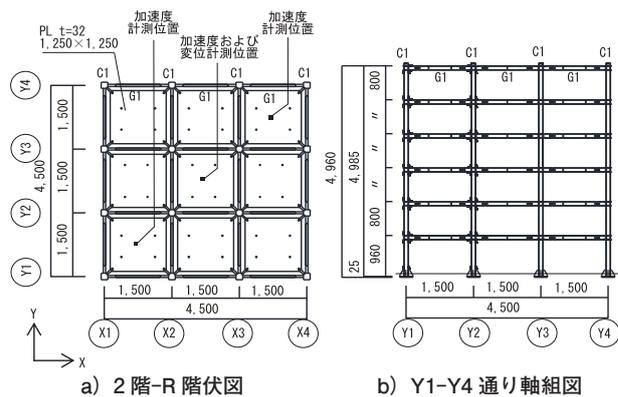
表一 各物理量の相似則

	A	B	C
変位： δ	$\delta_m = 1/\lambda \cdot \delta_p$	$\delta_m = 1/\lambda \cdot \delta_p$	$\delta_m = 1/\lambda \cdot \delta_p$
質量： M	$M_m = 1/(\rho \cdot \lambda^2) \cdot M_p$	$M_m = 1/\lambda^2 \cdot M_p$	$M_m = 1/(n \cdot \lambda^2) \cdot M_p$
速度： V	$V_m = \beta/\lambda \cdot V_p$	$V_m = 1/\sqrt{\lambda} \cdot V_p$	$V_m = 1/\sqrt{(n/\lambda)} \cdot V_p$
水平加速度： α	$\alpha_m = \beta^2/\lambda \cdot \alpha_p$	$\alpha_m = \alpha_p$	$\alpha_m = n \cdot \alpha_p$
慣性力： F	$F_m = \beta^2/(\rho \cdot \lambda^3) \cdot F_p$	$F_m = 1/\lambda^2 \cdot F_p$	$F_m = 1/\lambda^2 \cdot F_p$
ヤング率： E	$E_m = \beta^2/(\rho \cdot \lambda) \cdot E_p$	$E_m = E_p$	$E_m = E_p$
応力： σ	$\sigma_m = \beta^2/(\rho \cdot \lambda) \cdot \sigma_p$	$\sigma_m = \sigma_p$	$\sigma_m = \sigma_p$
ひずみ： ϵ	$\epsilon_m = \epsilon_p$	$\epsilon_m = \epsilon_p$	$\epsilon_m = \epsilon_p$
ばね定数： K	$K_m = \beta^2/(\rho \cdot \lambda^2) \cdot K_p$	$K_m = 1/\lambda \cdot K_p$	$K_m = 1/\lambda \cdot K_p$
周期： T	$T_m = 1/\beta \cdot T_p$	$T_m = 1/\sqrt{\lambda} \cdot T_p$	$T_m = 1/\sqrt{(n/\lambda)} \cdot T_p$

なお、質量を 1/n 倍したことにより、応力度の相似比を 1.0 とするには、水平加速度を n 倍する必要がある。以上より、振動台実験で用いる各物理量の相似則は C 欄である。

2-2 試験体の形状

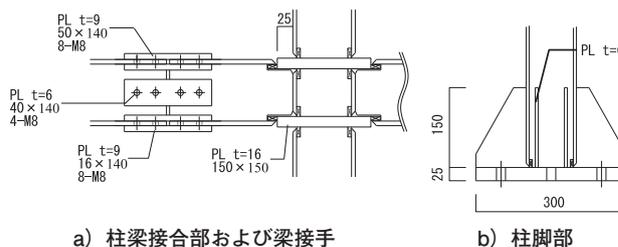
想定建物に相似則 ($\lambda = 5, n = 3$) を適用すると、試験体の高さは 4.96 m, 幅 4.5 m, 総重量は 274 kN となる。試験体の全景を写真一1, 試験体の基準階伏図および軸組図を図一1, 主要部材リストを表一2 に示す。また、柱梁接合部および梁接手部の詳細を図一2 a) に、柱脚部を図一2 b) に示す。試験体の柱は角形鋼管、梁は H 形鋼、床荷重として鋼板、柱梁接合部は通しダイヤフラム形式、柱脚部は固定端となるようにリブプレートを設けた。柱梁接合部は早期破断を避けるため、ノンスカラップ工法を採用した。梁接手部は M8 ボルトによるボルト接合とした。床は 1,250 mm × 1,250 mm, t = 32 mm の鋼板 (重量 3.9 kN) を錘と兼用し、各スパン間に配置した。各溶接部は UT 検査を実施し、溶接部の内部欠陥が無いことを確認した。



図一 試験体の基準階伏図および軸組図

表一2 主要部材リスト

階	部材	符号	断面形状	材質
2~R	梁	G1	H - 100 × 50 × 5 × 7	SS400
2~R	柱	C1	□ - 100 × 100 × 6	STKR400
2~R	床 (錘)	PL	1250 × 1250 t = 32	SS400



図一2 試験体の各部詳細



写真一1 試験体の全景

2-3 試験体の事前解析

試験体の構造性能の把握および適用した相似則の妥当性を、静的荷重増分解析および時刻歴応答解析により確認した。解析ソフトは RESP-D (ver.3.22.0.0)³⁾ を用いた。解析モデルは柱および梁を線材置換した 3 次元立体モデルとし、荷重は床に配置した錘の重量の負担面積分を節点荷重として割り振った。使用した鋼材の材料特性を表一3 に示す。復元力特性はひずみ硬化係数を 1/100 としたバイリニアとした。試験体はスラブを設けていないため、梁の曲げ剛性および耐力の割り増しは行っていない。柱梁接合部はパネル要素として考慮し、柱脚部の固

定条件は固定とした。

静的荷重増分解析において試験体と想定建物では重量比が異なるため、外力分布を想定建物はAi分布に基づく外力分布とし、試験体は想定建物と層せん断力係数が等しい外力分布とした。静的荷重増分解析結果から荷重-変形関係を図-3に示す。試験体の結果を黒線、想定建物に相似比を考慮した結果を赤線で示す。試験体のY1フレームのヒンジ発生状況を図-4に示す。図-3より、試験体および相似比を考慮した想定建物において変形が先行する2階が1/100 radに到達したとき $C_B=0.51$ 、1/75 rad時は $C_B=0.68$ 、1/50 rad時は $C_B=0.76$ であった。図-4 a), b)より、試験体は1/75 radで2階および3階側柱の梁にヒンジが生じ、梁曲げ降伏先行型であることが確認できる。1/50 radでは2階から4階全ての梁にヒンジが生じた。試験体と想定建物の荷重-変形関係は一致しており、誘導した相似則の妥当性が確認できる。

時刻歴応答解析は、静的荷重増分解析と同じ3次元立休モデルを用いて実施した。減衰は初期剛性比例型で2%、入力地震動は日本建築センター模擬波 (BCJ-L2)⁴⁾を採用した。入力波の概要を表-4に、その形状を図-5に示す。想定建物に原波を入力した解析は、試験体では相似則により入力波の最大加速度が原波の3倍、時間軸は1/√15倍となる。解析の入力倍率は、想定建物で原波の0.3倍、1倍、1.5倍、試験体は相似則より原波の1

倍、3倍、4.5倍とした。時刻歴応答解析結果の最大応答層間変位を図-6に示す。また、相似比を考慮した想定建物の結果を図中に赤線にて併記する。試験体と想定建物の結果は一致しており、誘導した相似則の妥当性が時刻歴応答解析においても確認できる。図-7 a), b)には、時刻歴応答解析の結果から得られたY1フレームのヒンジ発生状況を示す。入力倍率を3倍にすると、2階、3階の全ての梁が他の階に比べ降伏が進み、4.5倍で2階、3階、4階全ての梁の降伏が進んでいることがわかる。

表-4 入力波の概要

入力対象	時間刻み [s]	継続時間 [s]	最大加速度 [cm/s ²]	備考
想定建物	0.01	120.0	356	原波
試験体	0.00258	30.98	1,067	相似則を適用

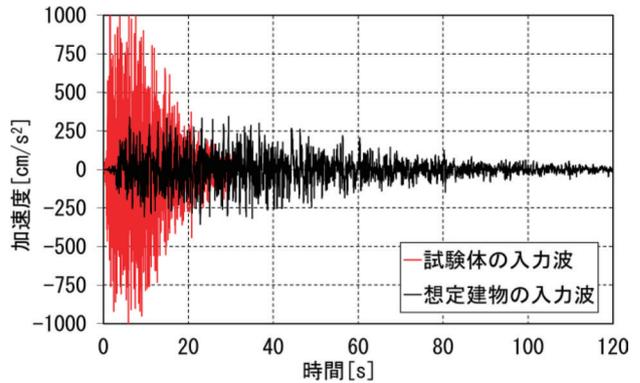


図-5 入力波の形状

表-3 鋼材の材料特性

部材	符号	σ_y [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]
梁	G1	362	461
柱	C1	396	450

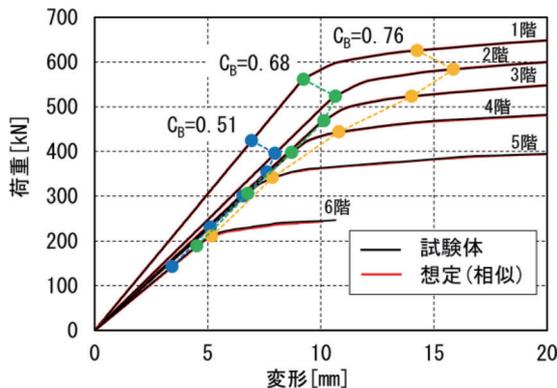


図-3 荷重-変形関係

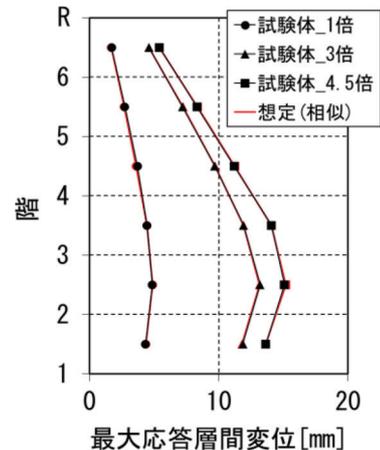


図-6 最大応答層間変位

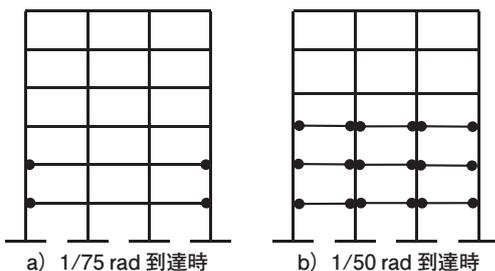


図-4 試験体のY1フレームのヒンジ発生状況 (静的荷重増分解析結果)

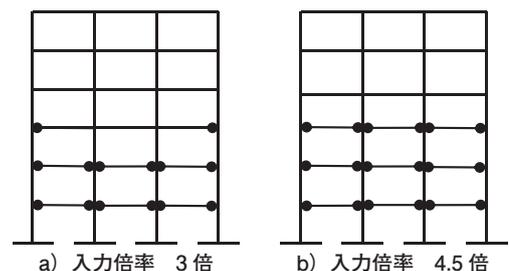


図-7 試験体のY1フレームのヒンジ発生状況 (時刻歴応答解析結果)

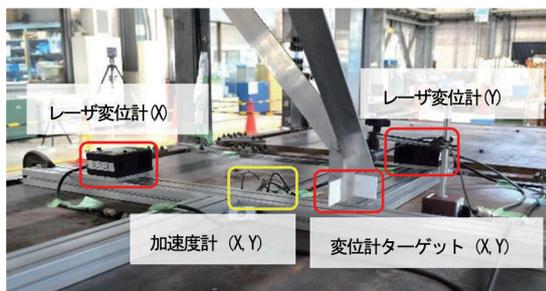
§3. 振動台実験の概要

3-1 計測計画

計測の対象は加速度，層間変位，ひずみとした。計測項目一覧を表一5に示す。計測の対象方向は，試験体のX方向およびY方向とした。加速度は，定格容量±980 cm/s²の1軸のひずみゲージ式加速度計を用いて計測した。X・Yの2方向を計測するために，加速度計を図一1に記した計測位置にそれぞれ2つ設置した。層間変位の計測状況を写真一2に示す。層間変位は，基準距離が最大500 mmのレーザー変位計を採用し，ターゲットを2方向に取付けたアルミアングルの計測治具を，各層の試験体中央の錘から吊下げて計測した。ひずみは，ゲージを貼付けて計測した。各計測機器は，加振による応答のみを計測するため，試験体の組立後に設置した。サンプリング振動数は500 Hzとし，実験結果の検討では9点の移動平均をかけて使用した。本報の加速度記録は中央のスパンに配置した加速度計での記録とする。

表一5 計測項目一覧

計測機器	位置	点数	方向	備考
加速度計	振動台	2	X, Y	テーブル上面
	各層床上	36	X, Y	各層3カ所
レーザー変位計	各層床上	12	X, Y	各層2点
ひずみゲージ	柱, 梁, BPL	196	X, Y	X3-X4 全層 Y1-Y2 全層



写真一2 計測状況 (PL 中央部)

3-2 加振計画

入力波形は，ホワイトノイズ波，試験体の1次固有振動数による正弦波および日本建築センター模擬波（BCJ-L2）の3波とした。加振方向はY方向1軸とした。加振の順番および入力波形の概要を，表一6に示す。ホワイトノイズ波は目標最大加速度50 cm/s²，振動数の範囲は0.5 Hzから20.0 Hzとした。正弦波は最大加速度100 cm/s²，110 cm/s²，120 cm/s²を一定の振幅でそれぞれ10秒間ほど加振した。BCJ-L2は，事前解析と同様に入力波形の時間軸を相似比1/√5倍し，目標最大加速度は400 cm/s²，600 cm/s²，700 cm/s²の3つのレベルとした。本報では，試験体の基本的な特性について記すため，各部材が弾性範囲内に留まった実験を対象とする。

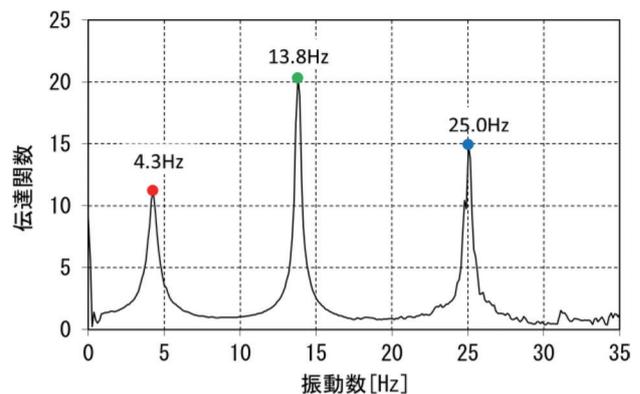
表一6 入力波形の概要

順番	波形	目標最大加速度 [cm/s ²]	備考
1	ホワイトノイズ	50	振動数の範囲 0.5 Hz から 20.0 Hz
2	正弦波	100	振動数 4.0 Hz 振幅一定の継続時間 10 s
3	正弦波	110	
4	正弦波	120	
5	BCJ-L2	400	相似則を適用
6	BCJ-L2	600	
7	BCJ-L2	700	

§4. 振動台実験の結果

4-1 ホワイトノイズ加振

ホワイトノイズ加振により，試験体の固有振動数を確認した。1階床とR階床に設置したY方向の加速度計の計測波形から算出した試験体の伝達関数⁵⁾を図一8に示す。図一8の卓越振動数より，試験体の1次固有振動数は4.3 Hz，2次は13.8 Hz，3次は25.0 Hzである。事前解析の1次固有振動数は4.2 Hzであり，実験結果と良い一致を示した。



図一8 試験体の伝達関数

4-2 定常波加振

試験体の1次モードでの挙動を確認するため定常波加振を実施した。正弦波の振動数は試験体の固有振動数である4.0 Hzとし，目標最大加速度をパラメータとした。R階が最大応答加速度となる時刻の各階での応答加速度分布および応答変位分布を図一9に示す。R階の最大応答加速度を入力波の最大加速度で除した応答倍率の一覧を表一7に示す。図一9より，各層の応答加速度および応答変位は，入力加速度に応じて比例的に増幅している。表一7より，応答倍率は5.6~6.5と入力加速度に比例して増加しており，減衰の振幅依存の影響が考えられる。上記より試験体は弾性の挙動を示しており，本加振から試験体の弾性1次モードの挙動を確認できた。

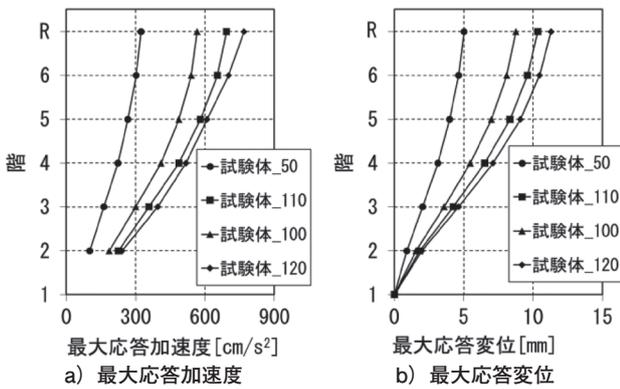


図-9 最大応答分布

表一七 最大加速度と応答倍率

順番	最大入力加速度 [cm/s ²]	最大応答加速度 [cm/s ²]	応答倍率
2	57.9	322.8	5.6
3	98.4	566.4	5.8
4	111.4	693.4	6.2
5	118.1	768.4	6.5

4-3 非定常波加振

試験体の地震時の挙動を確認するため日本建築センター模擬波 (BCJ-L2) による非定常波加振を実施した。1階床に設置した加速度計で計測した波形 (入力波) の加速度応答スペクトル (h=5%) を最大加速度ごとに、図-10 に示す。ここで、図-10 の破線は 700 cm/s² の目標波である。入力波は目標波に対して下回っているが、その形状は酷似している。各入力加速度における最大応答加速度および層間変位を図-11 に示す。目標加速度 700 cm/s² 時の解析結果を併記する。解析の入力波は1階床で計測した加速度記録、減衰定数は自由振動時の対数減衰より 2.3%、その他の諸元は事前解析と同様である。実験結果の 700 cm/s² での最大応答層間変位は2階で 6.8 mm であり、層間変形角は 1/117 rad である。最大応答層間変位において、解析結果と概ね一致している。

入力加速度 700 cm/s² の実験結果および解析結果の荷重-変形関係を図-12 に示す。実験結果と解析結果は全階において概ね等しく、弾性の挙動を示している。1階の実験結果が解析結果より剛性が高いのは、柱脚部のリブが影響していると考えられる。

§5. まとめ

本報では、構造ヘルスマモニタリングの課題点の抽出を目的に、実建物に相似則を適用した鋼構造骨組みによる振動台実験を実施し、得られた結果について記した。

以下に得られた知見を列挙する。

- ・試験体は、想定建物に対し寸法の縮尺を 1/5、質量の縮尺を 1/75 の6層鋼構造骨組として計画した。静的

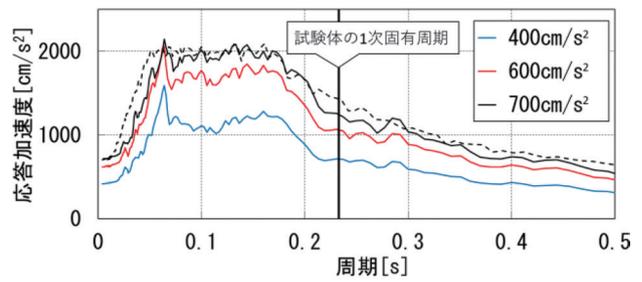


図-10 入力波の加速度応答スペクトル (BCJ-L2, h = 5%)

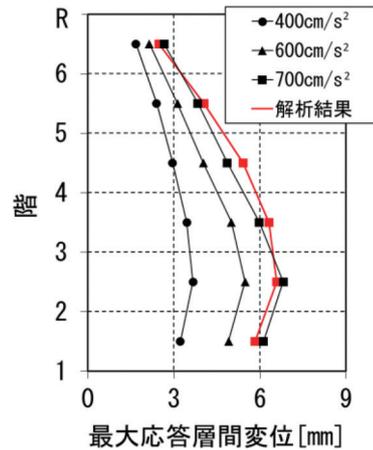


図-11 最大応答層間変位 (BCJ-L2)

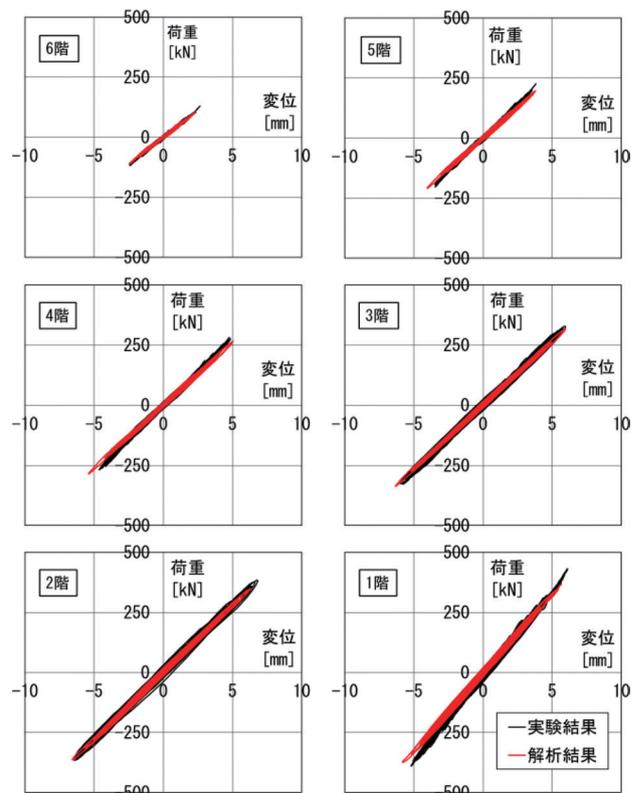


図-12 荷重-変位関係 (BCJ-L2, 700 cm/s²)

荷重増分解析および時刻歴応答解析により、試験体の構造特性と誘導した相似則の妥当性を確認した。

- ・想定建物に相似則を適用した試験体を用いた振動台実験の結果から、事前解析のモデルと試験体の1次の固有振動数が概ね等しいことを確認した。
- ・試験体の1次固有振動数での正弦波およびBCJ-L2による試験体の弾性範囲内の挙動を確認した。BCJ-L2加振時の実験結果から得られた最大層間応答変位は、事前解析の結果と概ね一致すること、荷重-変形関係は全層において概ね等しく、弾性挙動であることを確認した。
- ・事前解析の結果と実験結果は各種最大値の比較においては概ね一致したが、波形レベルで比較すると差異があり、解析モデルの調整などが今後の課題である。

参考文献

- 1) 石丸辰治ほか：多入力地震波を受ける構造物の応答特性について（その12）動の実験における相似則について、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp. 759-760, 1986. 8.
- 2) 隈澤文俊ほか：鉄筋コンクリート造超小型立体模型建物の振動破壊実験 超小型立体模型による建物の振動破壊性状に関する研究（第1報），日本建築学会構造系論文集，第493号，pp. 83-90, 1997. 3.
- 3) 株式会社構造計画研究所：建築構造物の構造解析・振動解析プログラムRESP-D 利用者マニュアル，2022.
- 4) 一般財団法人日本建築センター：日本建築センター模擬波（基盤波）BCJ-L1及びBCJ-L2, 1992.
- 5) 理論地震動研究会：地震動その合成と波形処理，1994.