T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	免震物流倉庫の地震応答に関する検討 その1 高減衰ゴム系積層ゴム支承のバイリニアモデルへの置換
Title(English)	Seismic response of base-isolated warehouse Part1. Modeling of high-damping rubber bearing by bilinear restoring force characteristics
著者(和文)	新井雄大, 佐藤大樹, Alex Shegay, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介
Authors(English)	Yudai Arai, Daiki Sato, Aleksey Vadimovich Shegay, Ryota Tobari, Jumpei Yasunaga, Takuya Ueki, Yosuke Kaneshiro
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 341-344
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 341-344
発行日 / Pub. date	2022, 3

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

2021年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2022年3月

免震物流倉庫の地震応答に関する検討
その1　高減衰ゴム系積層ゴム支承のバイリニアモデルへの置換

構造ー振動　　正会員 ○ 新井雄大[*1]　正会員 佐藤大樹[*2]
〃 Alex Shegay[*3]　〃 戸張涼太[*4]
免震構造　鋼構造建物　高減衰ゴム系積層ゴム支承　〃 安永隼平[*5]　〃 植木卓也[*5]
物流倉庫　鋼材ダンパー　天然ゴム系積層ゴム支承　〃 金城陽介[*5]

1. はじめに

昨今，インターネット通販市場の拡大などの影響により物流施設の需要が高まり，事業継続計画（BCP）を見据え，物流施設に免震構造が採用される事例が増えている。ばね機能のほかに減衰機能を有する高減衰ゴム系積層ゴム支承（以降「HDR」）はコンパクトでかつ低コストに免震層の設計が可能であるとして，大規模物流倉庫の免震構造にも比較的多く採用される。「エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法（以降「エネルギー法」）[1)]」は，大臣認定を必要とせず，申請期間や手間を省ける耐震設計手法であり，エネルギー法告示[2)]として2005年に公布された。しかしながら，エネルギー法による設計が認められている免震部材は，天然ゴム系積層ゴム支承（以降「NRB」）や鋼材ダンパーなどの依存性の少ない部材のみであり，各種依存性が多く，かつ材料非線形性の強いHDRには認められていない。各種依存性を考慮したHDRの復元力モデルの提案は精力的に行われており[例えば3)]，有限要素法に対して時間効率に優れる復元力モデルにHDRを置換することでエネルギー法への適用が可能であると予想されるものの，HDRのエネルギー法への適用を試みた研究はこれまでになされていない。

また，上部構造に着目すると，大規模物流倉庫は，内部空間を効率的に利用したいという要求から，高い階高でかつロングスパンで設計されることが多いため，上部構造の固有周期が長くなり，免震効果が十分に得られない可能性がある。笠井ら[4)]は等価線形化法を用いて，上部構造の柔性を考慮した免震建物の応答の仕組みを示し，免震性能曲線を提案している。さらに，付ら[5)]，Chenら[6)]により，エネルギーの釣合に基づいた，免震層の変形と上部構造の層間変形角を設計クライテリア内に収めるための適切な上部構造の固有周期や剛性分布の予測手法の提案がなされてきた。しかしながら，これらの研究は各層の質点とせん断ばねから構成されるせん断モデルで検討されており，柱や梁などの部材から構成される部材構成モデルでの検討には至っていない。ブレース付鉄骨造建物では，ブレースの配置や剛性によりブレースの実効変形比が異なるため，文献5)，6)での設計手法により上部構造を設計する際には，部材構成モデルでの検討が別途必要であり，適切なブレースを決定するにはパラメトリックな解析が必要となる。

そこで，本報では，HDRのエネルギー法への適用を目指した基礎研究，および上部構造に異なる配置・剛性のブレースを有する免震建物の地震応答・構造性能の違いの検証を行う。具体的には，その1ではHDRのみから構成される免震層の復元力特性をバイリニアモデルに置換したときの，入力レベルごとの地震応答の再現精度を検証する。その2では，上部構造に着目し，上部構造に異なる配置・剛性のブレースを有する免震建物について，時刻歴応答解析を行い，地震応答の違いを確認する。その3では，その2の上部構造に対して状態NR解析[7),8)]による骨組特性値を比較することで構造性能の違いを比較する。

2. 建物モデル概要

検討対象建物は物流倉庫を想定したブレース付鉄骨造免震建物である。長辺方向10 m スパン，短辺方向11.5 m スパン，平面120.0 m × 69.0 m の整形な形状を持つ4階建てである。Table 1 に建物諸元，Fig.1 に基準階伏図，Fig.2(a)(b)にブレースを配置した構面の軸組図を示す。ブレースを配置した構面は Fig.1 に赤線で示すように，Y1,4,7 通りである。本モデルに用いたブレースの部材リストを Table 2 に示す。なお，4階柱のH型鋼はX方向に弱軸を向けている。

Fig.3(a)には本モデルの床面の位置FL（Floor Level）を示し，Fig.3(b)(c)には上部構造の第1層目で基準化した各層の質量分布，X方向の剛性分布を示す。本モデルは折板屋根であるため，最上層の重量・剛性が他階と比べて小さく，最上層の重量と剛性は一般階の約1/10であった。

本報での解析モデルは，HDR 91基より免震層が構成される「HDRモデル」と，NRB 91基と鋼材ダンパー 22基より免震層が構成される「NRBSD モデル」を作成する。

Seismic response of base-isolated warehouse
Part1. Modeling of high-damping rubber bearing by bilinear restoring force characteristics

ARAI Yudai, SATO Daiki, Alex SHEGAY, TOBARI Ryota, YASUNAGA Jumpei, UEKI Takuya, KANESHIRO Yosuke

HDR モデルと NRBSD モデルの免震層配置図をそれぞれ Fig.4(a)(b)に示す。

Table 1　Specifications of Superstructure

Columns	4F	H-300×300×10×15
	1-3F	□-500×500×16×16 ~ □-500×500×22×22
Girders	RF	H-369×199×7×11 ~ H-400×200×9×16
	2-4F	H-700×300×12×19 ~ H-900×350×16×32
Weight	471,855 kN	
Natural period	0.79 s	

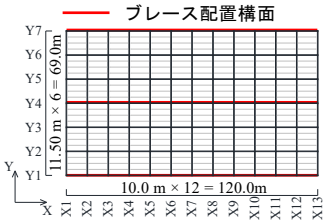
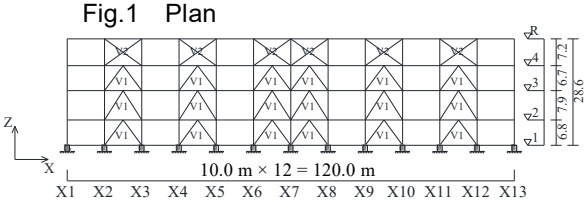


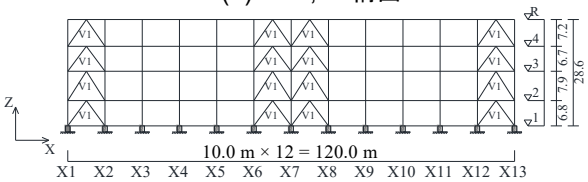
Fig.1　Plan

Table 2　Brace List

V1	4F	□-300×300×12×12
	3F	□-300×300×12×12
	2F	□-300×300×16×16
	1F	□-300×300×22×22
V2	2L-100×10×10	

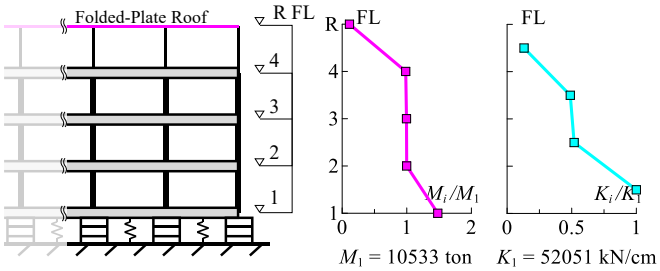


(a)　Y1, 7 構面



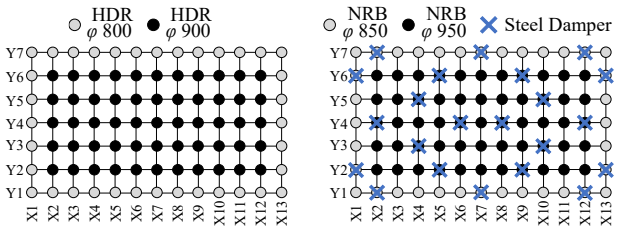
(b)　Y4 構面

Fig.2　Elevation [unit : m]



(a) Floor Level　(b) Mass　(c) Stiffness

Fig.3　Distribution of Mass and Stiffness



(a)　HDR Model　(b)　NRBSD Model

Fig.4　Isolation Layer Plan

3. 解析モデル概要

3.1 解析概要

解析は構造計算プログラム RESP-D を用い，X 方向のみの検討を行う。上部構造は弾性とし，構造減衰は上部構造のみの 1 次固有周期に対して $h = 1$ %の瞬間剛性比例型の減衰を上部構造のみに与え，免震層は無減衰とする。

3.2 HDR のバイリニアモデル置換

Fig.5 に HDR モデルの免震層の復元力特性を示す [9]。HDR はせん断ひずみに応じて 1 次剛性 K_1，2 次剛性 K_2，および切片荷重 Q_{y0} が変化する。等価せん断弾性係数 G_{eq}，降伏荷重特性比 u はそれぞれ式(1)(2)より与えられる [9]。

$$G_{eq} = 0.620 \times (0.1364\,\gamma^4 - 1.016\,\gamma^3 + 2.903\,\gamma^2 - 3.878\,\gamma + 2.855) \quad (1)$$

$$u = 0.408 \times (0.03421\,\gamma^3 - 0.2083\,\gamma^2 + 0.2711\,\gamma + 0.9028) \quad (2)$$

ここで，γ : せん断ひずみである。さらに，G_{eq}，u を用いて，K_1，K_2，Q_{y0} が式(3) ~ (5)より算出される [9]。

$$K_2 = \frac{G_{eq}\,A}{H}(1 - u)\ ,\quad K_1 = 10\,K_2 \quad (3)\ (4)$$

$$Q_{y0} = u \cdot G_{eq} \cdot A \cdot \gamma \quad (5)$$

ここで，A : HDR の有効断面積，H : HDR のゴム総厚である。これらの式から，剛性や切片荷重がせん断ひずみによって変化することがわかる。

Table 3 には，El Centro のレベル 1，2 を入力地震動とした時刻歴応答解析を事前に行うことで得られる K_1，K_2，切片荷重 Q_{y0} を示す。以降では，NRBSD モデルの NRB 91 基を併せて「アイソレータ」，鋼材ダンパー22 基を併せて「ダンパー」と呼び，NRBSD モデルの免震層の復元力特性の K_2，Q_{y0} が HDR モデルの El Centro の入力レベル 2 時と同等になるようにアイソレータとダンパーを設定する。

Fig.6 と Fig.7 に線形性状を示すアイソレータと弾塑性型復元力特性を示すダンパー，およびその両者で構成される免震層のシステムの復元力特性を示す。本報では，降伏変位 δ_y が 3.0 cm で，完全弾塑性の鋼材ダンパーを用いることとする。免震層の剛性は Fig.6 のようにアイソレータとダンパーの和で表すことができる。NRBSD モデルの K_2 とダンパーの降伏耐力 Q_{sy} が，HDR モデルの地震動レベル 2 時の K_2 と Q_{y0} が同程度になるようにアイソレータとダンパーを設定した際のアイソレータ，ダンパー，および免震層のシステムの各諸元を Table 4 に示す。

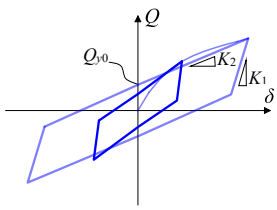


Fig.5　Restoring Force Characteristics of HDR

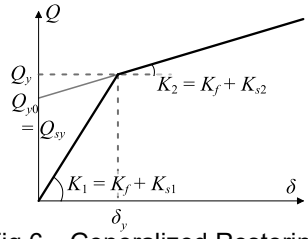
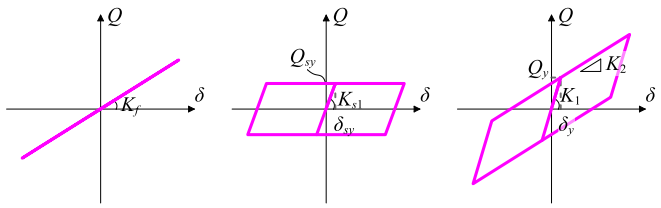


Fig.6　Generalized Restoring Force Characteristics of NRB & Steel Damper Isolation Layer

Table 3　Stiffness and Intercept Shear Force of Isolation Layer　(HDR Model)

	K_1 [kN/cm]	K_2 [kN/cm]	Q_{y0} [kN]
HDR model (Level 1)	15865	1587	8788
HDR model (Level 2)	10453	1045	13590



(a) Isolator (NRB) (b) Steel Damper (c) System

Fig.7 Restoring Force Characteristics of NRB and Steel Damper

Table 4 Stiffness and Intercept Shear Force of Isolation Layer (NRBSD Model)

Isolator	Damper			System			
K_f [kN/cm]	K_{s1} [kN/cm]	K_{s2} [kN/cm]	Q_{sy} [kN]	K_1 [kN/cm]	K_2 [kN/cm]	Q_y [kN]	δ_y [cm]
1045	4530	0.0	13590	5575	1045	16725	3.0

4. 固有周期および刺激関数の比較

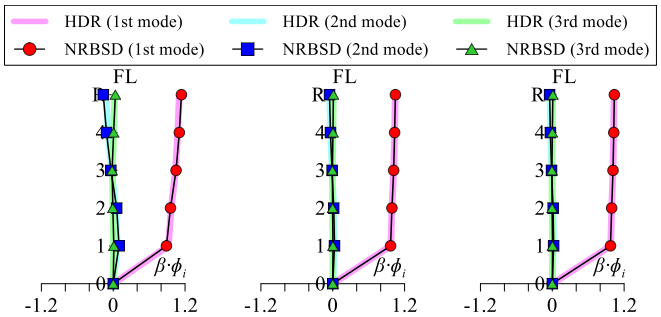
本章では HDR モデルと NRBSD モデルについて，固有周期と刺激関数の比較を行う。Table 5 に HDR モデルと NRBSD モデルについて，免震層固定時，免震層の層間変位 δ_{iso} が 10, 200, 400 mm の時の 1 次固有周期 T_{HDR}, T_{NRBSD} と，NRBSD モデルの 1 次固有周期に対する HDR モデルの 1 次固有周期の比 T_{HDR}/T_{NRBSD} を示す。

δ_{iso} の値に関わらず，1 次固有周期は HDR モデルの方がわずかに長かったものの，概ね等しい値となった。NRBSD モデルのダンパー降伏変位よりも変形量の小さい δ_{iso} = 10 mm 時には HDR モデルの固有周期が約 14 %長い結果となったが，それ以降の変形ではほとんど同じ値となった。

HDR モデルと NRBSD モデルの 1 ~ 3 次の刺激関数を免震層の変形ごとに Fig.8 に示す。刺激関数は刺激係数 β と固有モード$\{\phi\}$を乗じることで算出した。いずれのモデルも刺激関数はほとんど一致しており，δ_{iso} = 10 mm の変形時から 1 次モードの影響が支配的であることがわかる。

Table 5 Natural Period (1st mode)

δ_{iso}	0 mm	10 mm	200 mm	400 mm
T_{HDR}	0.79 s	2.23 s	3.44 s	3.92 s
T_{NRBSD}	0.79 s	1.95 s	3.37 s	3.75 s
T_{HDR}/T_{NRBSD}	1.00	1.14	1.02	1.05



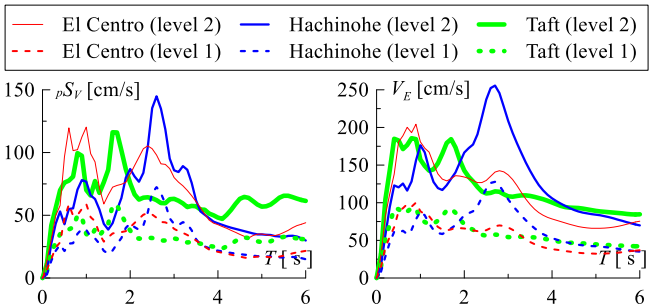
(a) δ_{iso} = 10 mm (b) δ_{iso} = 200 mm (c) δ_{iso} = 400 mm

Fig.8 Modal Shapes (HDR Model vs NRBSD Model)

5. HDR モデルと NRBSD モデルの地震応答の比較

5.1 入力地震動

本解析に用いる入力地震動は位相特性が El Centro (1940) NS 成分, HACHINOHE (1968) NS 成分 [10], Taft (1952) EW 成分の標準 3 波とし，稀に発生する地震動（レベル 1），および極めて稀に発生する地震動（レベル 2）を採用する。レベル 1 の地震動の最大速度を 25 cm/s，レベル 2 の地震動の最大速度を 50 cm/s に規準化する。Fig.9 に減衰定数 h = 5%の時の擬似速度応答スペクトル $_pS_V$，および h = 10 %の時のエネルギースペクトル V_E を示す。



(a) Pseudo Velocity Spectrum (h = 5 %) (b) Energy Spectrum (h = 10 %)

Fig.9 Spectrum of Input Earthquake Motion

5.2 免震層の履歴の比較

Fig.10 に El Centro のレベル 1, 2 の地震動を入力した時の HDR モデルと NRBSD モデルの免震層の層せん断力 Q - 層間変形 δ_{iso} 関係を示す。レベル 1 での履歴ループは，NRBSD モデルでは HDR モデルと比較して 1，2 次剛性 K_1,K_2 は小さく，切片荷重 Q_{y0} は大きかった。一方，レベル 2 では，NRBSD モデルと HDR モデルは，K_1 には差があるものの，K_2 と Q_{y0} は等しいことから，正しくモデル化できていることが確認できる。

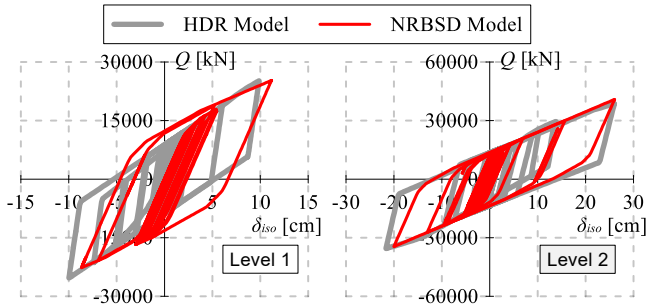


Fig.10 Hysteresis Loop of Isolation Layer (El Centro)

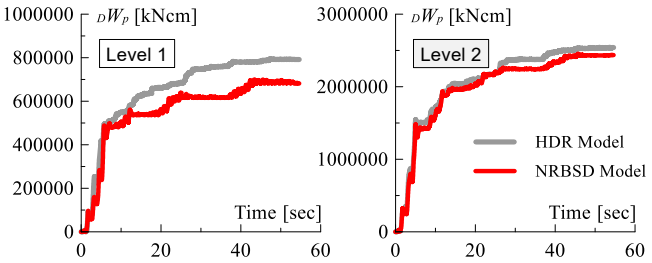


Fig.11 Time History of Energy Absorption of Isolation Layer $_DW_P$ (El Centro)

Fig.11 には，El Centro を入力した時の免震層のエネルギー吸収量 $_DW_p$ の時刻歴を示す。レベル 1 では，HDR モデルの $_DW_p$ が NRBSD モデルよりも 2 割程度大きかったのに対して，レベル 2 では 0.6 割程度であり，レベル 2 ではエネルギー吸収量も概ね等しいことがわかった。

5.3 応答性状の比較

Fig.12(a-1)～(c-2)に，地震動と入力レベルごとに，HDR モデルと NRBSD モデルの層間変形角 *R*，相対変位 *Dis.*，絶対加速度 *Acc.*，層せん断力 *Q* の最大応答を示す。入力レベル 1 の場合は，いずれの地震動でも，HDR モデルと NRBSD モデルで応答に差が生じた。NRBSD モデルは HDR モデルに比べて，層間変形角，絶対加速度および層せん断力で全層にわたり小さい値となった。特に，最上層の絶対加速度は，HDR モデルが NRBSD モデルの 1.5～2.0 倍程度と差が顕著であった。なお，NRBSD モデルは，レベル 2 時の免震層の履歴が等しくなるようにアイソレータとダンパーを設定しため，レベル 1 時に応答に違いが生じたことはここでは問題としない。入力レベル 2 時は，いずれの地震動でも NRBSD モデルの最上層の最大応答加速度が HDR モデルよりも 1.3 倍程度大きな値となったものの，両モデルは概ね同等の応答となった。

6. まとめ

せん断ひずみ依存性を有する高減衰ゴム系積層ゴム支承のみから構成される免震層を，時刻歴応答解析からわかる免震層の最大変形をもとに，天然ゴム系積層ゴム支承と鋼材ダンパーから構成されるバイリニアモデルの免震層へと置換し，両モデルの固有周期や地震応答の比較を行い，再現精度を確認した。レベル 2 時の最大変形より高減衰ゴム系積層ゴム支承をバイリニアモデルへ置換したため，レベル 1 時には応答に差が生じたものの，レベル 2 時には比較的高い精度で応答が一致した。

謝辞，参考文献はその 3 にまとめて記す。

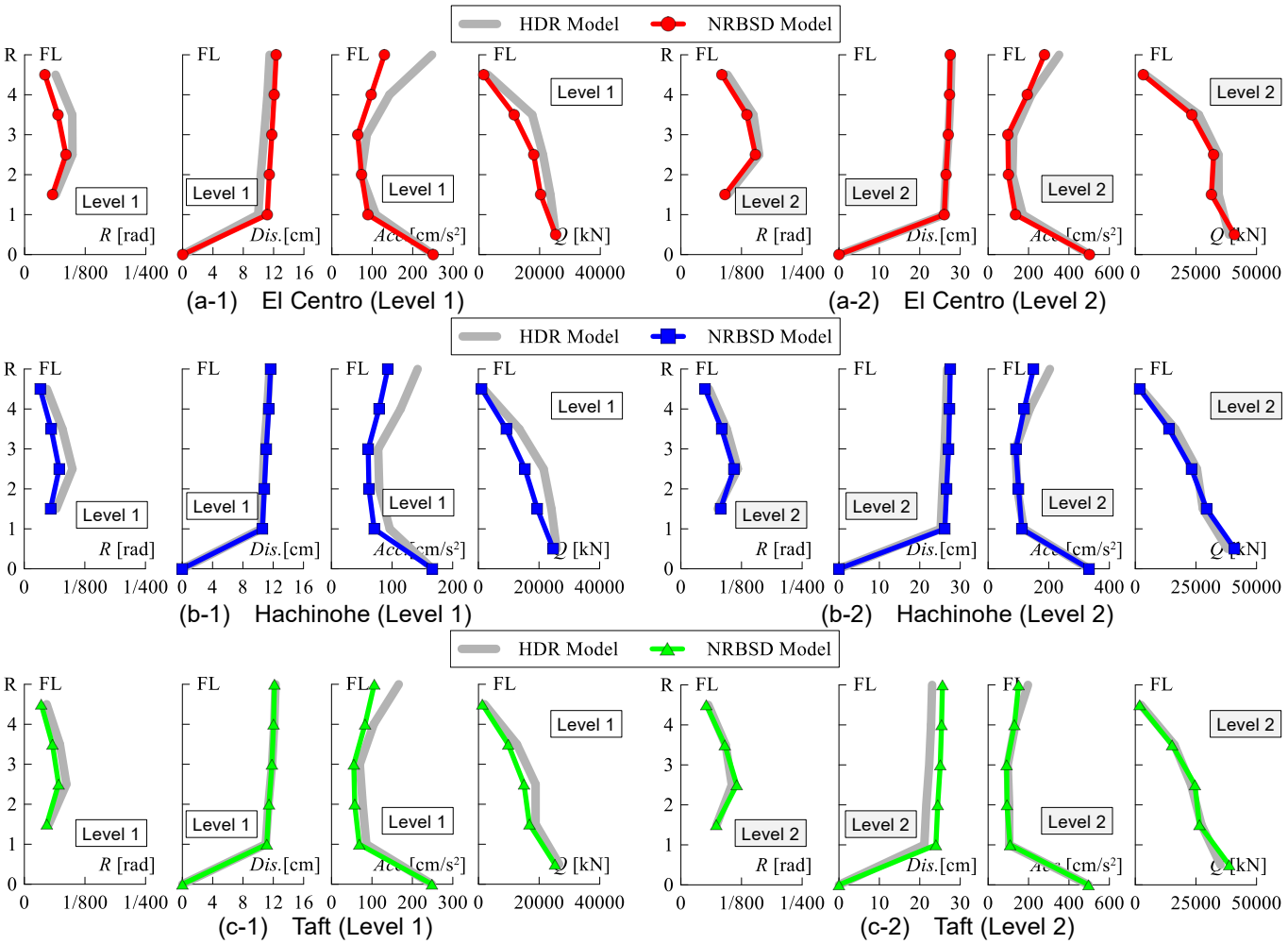


Fig.12 Time History Analysis Results (HDR model vs NRB model)

*1 学生会員 東京工業大学 大学院生 Graduate Student, Tokyo Institute of Technology*1
*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士（工学） Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng*2
*3 東京工業大学 未来産業技術研究所 助教・Ph.D. Assistant Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.*3
*4 JFE シビル株式会社 JFE Civil Engineering & Construction Corporation*4
*5 JFE スチール株式会社 JFE Steel Corporation*5