T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	免震構造における上部構造の剛性分布を考慮した設計手法の提案
Title(English)	Proposal of design method considering stiffness distribution of superstructure for base-isolated structure
著者(和文)	陳正楽, 佐藤大樹
Authors(English)	Chen Zhengle, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 485-488
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 485-488
発行日 / Pub. date	2020, 3

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

2019年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2020年3月

免震構造における上部構造の剛性分布を考慮した設計手法の提案

構造ー振動　　正会員　○　陳正楽[*1]　　正会員　　佐藤大樹[*2]

免震構造　剛性分布　履歴ダンパー
せん断力係数分布　設計手法

1. はじめに

1995 年以降，免震建物が増加し，超高層建物にも免震構造が適用されるようになり，上部構造の 1 次固有周期が長い免震建物も設計されるようになってきた。また，インターネット通販市場の拡大と 2011 年東北地方太平洋沖地震の影響で，鉄骨造物流倉庫に免震構造を採用する事例が増えてきた。物流倉庫では，内部空間を広く確保したいという要求から，スパンが長く，階高が高く設計されている。そのような建物に免震構造を採用する場合，上部構造の周期と免震周期の差が小さくなるため，免震効果が十分に発揮されない可能性がある。

付・佐藤らは免震建物の設計に対して，上部構造の周期について，設計クライテリアを満足するための適切な範囲の把握ができる手法を提案した [1)]。これは，エネルギーの釣合に基づき，免震層の等価周期と上部構造の 1 次固有周期の比率を用い，免震建物の上部構造の変形を予測する手法である。しかし，付・佐藤らの手法 [1)]では，上部構造と免震層のバランスについて，上部構造の固有周期と免震等価周期比だけを考慮しているため様々な層剛性分布を有する建物にも適用できるか確認されていない。

そこで本報では，付・佐藤らの手法に上部構造の剛性分布を考慮できるように拡張した設計手法を提案する。設計応答値を時刻歴解析結果と比較することで設計方法の妥当性を検討する。

2. エネルギー釣合に基づく設計手法

2.1 手法理論の説明

本節では，文献 1）より，免震層変形および上部構造の層間変形角のクライテリアを設定する。等価変形倍率の予測曲線を用い，設計クライテリアを満たすために，上部構造の 1 次固有周期 T_u の範囲を求める手法について概説する。

付・佐藤ら [1)]によって提案されている設計フローを図 1 に示す。図中 S6 における，エネルギーの釣合に基づいた等価変形倍率δ_{ueq}/δ_0 の予測式は式(1)で表される [1)]。

$$\frac{\delta_{ueq}}{\delta_0}=\left(\frac{T_{eq}}{T_u}\right)^{-2}\cdot\left(-4n_1\frac{\alpha_{sy}}{\alpha_0}+\sqrt{\left(4n_1\frac{\alpha_{sy}}{\alpha_0}\right)^2+1}\right) \quad (1)$$

ここで，δ_{ueq}：上部構造の 1 階と中間階における最大変位の差，T_{eq}：等価周期，T_u：上部構造の 1 次固有周期，δ_0：免震層無減衰時の最大変形（式(2)），α_{sy}：免震層ダンパーの降伏せん断力係数，α_0：ダンパーがなしの免震層のせん断力係数（式(3)），n_1：等価繰り返し数，V_E：入力エネルギーの速度換算値とする。なお，中間階は上部構造高さの半分に最も近い階と定義する。

$$\delta_0=\frac{T_f\cdot V_E}{2\pi} \qquad \alpha_0=\frac{2\pi\cdot V_E}{T_f\cdot g} \quad (2),\ (3)$$

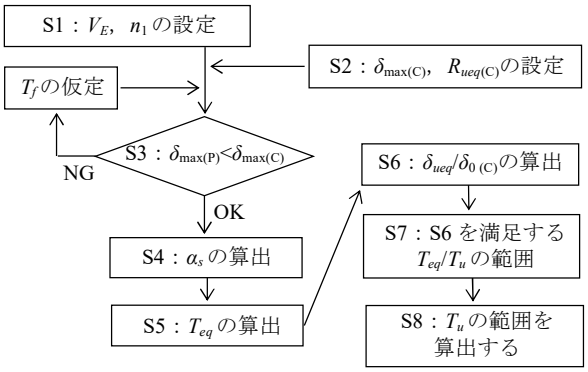


図 1　設計フロー

2.2 設計例

本節では付・佐藤らの手法 [1)]を用いた設計例を示す。対象とする建物は，免震層直上の上部構造の質量 M_u = 15,120 ton，建物の総質量 M = 21,546 ton，1 階から中間階までの高さ H_{ueq} = 1,500cm である。入力地震動 ART HACHI 80 に対するエネルギー速度換算値 V_E = 180cm/s，等価繰り返し数 n_1 = 6 と設定する。免震建物の設計クライテリアを，免震層変形 $\delta_{max(c)}$ = 40 cm，上部構造の層間変形角 $R_{ueq(c)}=\delta_{ueq}/H_{ueq}$ = 1/300 とする。

n_1 = 6 のとき，免震層の全せん断力係数比（α_1/α_0）とダンパーの降伏せん断力係数比（α_{sy}/α_0）の関係は図 2 の実線で示される。図 2 より，α_1/α_0 の極小値が示す α_s/α_0 は 0.14，アイソレータせん断力係数 α_f と α_0 の比（α_f/α_0）は 0.146（$\alpha_f/\alpha_0=\delta_{max}/\delta_0$）である。免震層アイソレータのみの周期 T_f を 4s と仮定すると，免震層の最大変形の予測値 $\delta_{max(p)}$ は 16.71cm となり，免震変形クライテリア（40cm）以内に収まることが確認できる（式(4)）。

Proposal of design method considering stiffness distribution of superstructure for base-isolated structure　　*CHEN Zhengle, SATO Daiki*

$$\delta_{\max(p)} = \frac{\delta_{\max}}{\delta_0} \cdot \delta_0 = \frac{\delta_{\max}}{\delta_0} \times \frac{V_E \cdot T_f}{2\pi} = 16.71\,\mathrm{cm} < 40\,\mathrm{cm} \qquad (4)$$

免震層履歴ダンパーの降伏せん断力係数 α_{sy} は，ダンパーなしの免震層のせん断力係数 α_0（式(3)）を用い，α_{sy}/α_0 より 0.04 となる。ダンパーの降伏変形 δ_{sy}=3cm を採用する。アイソレータ群の剛性 k_f と履歴ダンパー群の初期剛性 k_s はそれぞれ式(5)と式(6)より求められる。よって，式(7)と式(8)のように計算し，免震等価剛性 K_{eq} が 1,041kN/cm，免震等価周期 T_{eq} が 2.86s となる。

$$k_f = \frac{4\pi^2 M}{T_f^2} \qquad k_s = \frac{\alpha_{sy} \cdot Mg}{\delta_{sy}} \qquad (5),\ (6)$$

$$K_{eq} = k_f + \frac{\delta_{sy}}{\delta_{\max(p)}} \cdot k_s \qquad T_{eq} = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_{eq}}} \qquad (7),\ (8)$$

等価変形倍率 δ_{ueq}/δ_0 の設計クライテリアは免震層無減衰時の最大変形 δ_0 = 114.6cm（式(2)）及び上部構造等価変形 δ_{ueq}（5cm）より求められる。等価変形倍率の設計クライテリアは図 2 中の赤破線（0.044）で示す。赤破線以下とするための等価周期比 T_{eq}/T_u の範囲は，α_{sy}/α_0 = 0.14 に対しておおよそ 2.0 以上であることが確認できる。よって，免震等価周期 T_{eq} と等価周期比 T_{eq}/T_u の範囲より，ここでは，上部構造の 1 次固有周期 T_u は 1.4s とする。

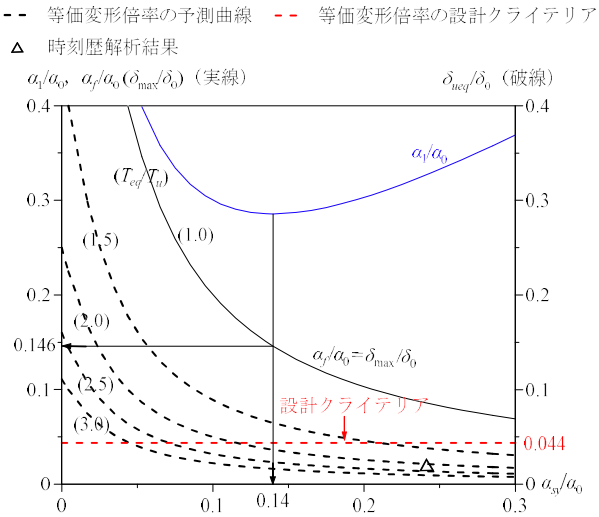


図 2　予測曲線における予測結果

3. 時刻歴解析による検討

3.1 解析モデルの概要

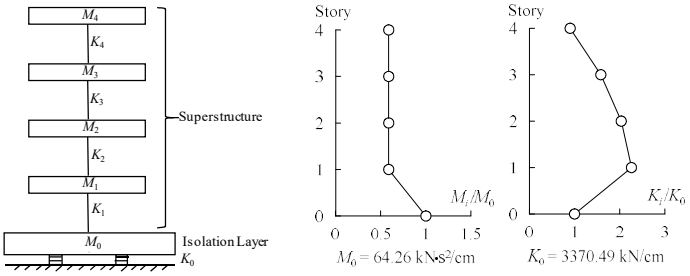
本報では文献 1)と同様に，平面 70m×40m の 4 層建物とし，階高はそれぞれ 7.5m の鉄骨造物流倉庫 [1]を対象とする。なお，異なる剛性分布を有する建物を想定する。解析質点系モデルを図 3(a)に示す。本報では，上部構造の平均密度 ρ = 180 kg/m^3，免震層質量 M_0 は 1 階目質量 M_1 の 1.7 倍に設定する。免震層の質量で基準化した質量分布を図 3(b)に示す。また，上部構造の 1 次固有周期 T_u におけるモード変位 ϕ_i が直線となるよう上部構造の各層剛性 k_i (i = 1~4)を式(9)より算出する。免震層は線形の剛性 k_f を有するアイソレータと初期剛性 k_s の履歴ダンパーで構成され，免震層初期剛性 k_0 は式(10)のように計算できる [2]。図 3(c)に免震層の弾性剛性で基準化した層剛性分布を示す。

$$\begin{cases} k_N = \dfrac{\omega_u^2 \times M_N \times \phi_N}{\phi_N - \phi_{N-1}} \\ k_i = \dfrac{\omega_u^2 \times M_i \times \phi_i + K_{i+1} \times (\phi_{i+1} - \phi_i)}{\phi_i - \phi_{i-1}} \\ k_1 = \dfrac{\omega_u^2 \times M_1 \times \phi_1 + K_2 \times (\phi_2 - \phi_1)}{\phi_1} \end{cases} \quad (i = 2 \cdots N-1) \qquad (9)$$

$$k_0 = k_s + k_f \qquad (10)$$

ここで，ω_u：上部構造の固有振動数，N：屋上の層数，ϕ_i：一次直線モード($\phi_i = i$)，M_i：i 層目の質量である。

上部構造とアイソレータは弾性，ダンパーは完全弾塑性（復元力特性：降伏せん断力係数 α_{sy}，降伏変形 δ_{sy}）とする。T_u に対して h = 2%となる初期剛性比例型の減衰を上部構造のみに与える。

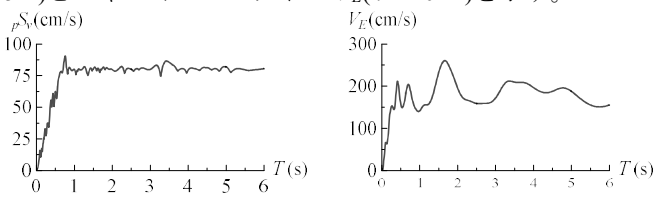


(a) 免震構造解析モデル　(b) 質量基準化　(c) 剛性基準化

図 3　モデル情報

3.2 入力地震動概要

入力地震動は，HACHINOHE（1968）EW 成分を位相特性に用い，コーナー周期以降で擬似速度応答スペクトル $_pS_v$(h = 5%)が 80cm/s で一定となる告示波とする（ART HACHI と呼ぶ）。図 4 に，擬似速度応答スペクトル $_pS_v$(h = 5%)とエネルギースペクトル V_E(h = 10 %)を示す。



(a) 擬似速度スペクトル (h = 5%)　(b) エネルギースペクトル (h = 10%)

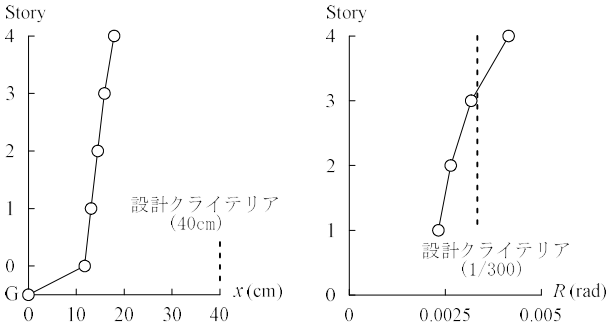
図 4　解析用入力地震動

3.3 解析応答結果

免震層アイソレータのみの周期 T_f = 4 s，履歴ダンパーの降伏せん断力係数 α_{sy} = 0.04，降伏変形 δ_{sy} = 3 cm，上部構造の 1 次固有周期 T_u = 1.4 s のモデルを用い，V_E = 180 cm/s の ART HACHI を入力地震動とし，時刻歴応答解析

結果を図2に示す(図中△)。同図より，等価変形倍率δ_{ueq}/δ_0は設計クライテリアを満たすことが確認できる。

各層の最大応答変位と上部構造の最大層間変形角の高さ方向分布を図 5 に示す。図 5(a)より，免震層の最大変形は予測値以内に収めることが確認できる。しかし，図5(b)より，上部構造各層の最大層間変形角において，最上層応答結果は設計クライテリアを満たしていないことが確認できる。付・佐藤らの手法[1)]では，免震層の塑性化を考慮した等価周期比 T_{eq}/T_u に対する上部構造の中心高さの変形 δ_{ueq} の関係のみを考慮している。図 5(b)に示すように，建物中心高さ以下においては変形クライテリアは満足している。しかし，文献 1）の手法では，中心高さ以上において変形クライテリアを満足できる保証はなく，上層部の剛性分布の影響を加味する必要があることが確認できる。次章以降では，上部構造のせん断力係数分布を用いた，上部構造の層剛性の修正方法について検討する。



(a) 最大応答変位 x　　(b) 最大層間変形角 R

図５　エネルギー釣合による時刻歴解析結果

4. 層せん断力係数分布の設計

4.1 多種設計せん断力係数分布

本節では 5 種類のせん断力係数算出方法[3)]について記す。免震構造設計指針[4)]では，ダンパー群に対する上部構造の第 1 層の水平剛性比による免震構造の高次モードの影響を考慮し，指針法による各層の層せん断力係数α_i を式(11)で表している。

小林らは，増幅係数 a_i の代わりに，応答増幅β_iを用い，補正法[6)]による各層の層せん断力係数α_iを式(12)で評価する方法を提案している。

$$\alpha_i = \alpha_f + a_i \cdot \overline{\alpha}_i \cdot \alpha_s \qquad \alpha_i = \alpha_f + \beta_i \cdot A_i \cdot \alpha_s \qquad (11),\ (12)$$

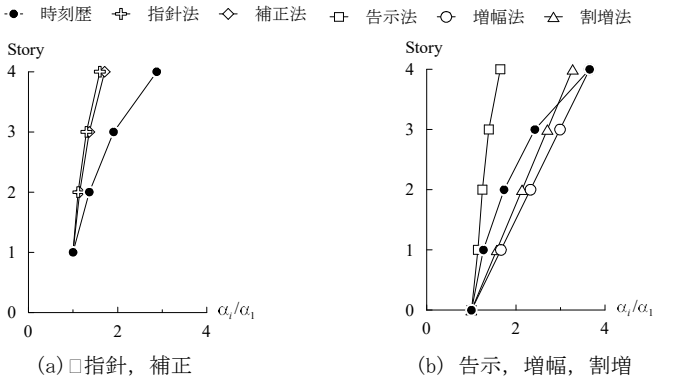
免震建築物に関する技術的基準（告示 2009 号）では，告示法[5)]による各層の層せん断力係数 C_{ri} を式(13)で表している。

飯場ら[7)]は，告示法によって層せん断力係数を 2 種類の方法で評価している。1 つの算出方法は，式(14)で示すように，告示法による免震層の層せん断力係数 C_{r0} に応答増幅率 a を乗じる増幅法である。もう 1 つは，式(15)で示すように，告示法による最上層の層せん断力係数 C_{rR} に応答割増率 b を乗じる割増法である。

$$C_{ri} = \frac{Q_{iso}}{M_u \cdot g} \cdot \frac{A_i \cdot (Q_h + Q_v) + Q_e}{Q_h + Q_v + Q_e} \qquad (13)$$

$$\alpha_R = C_{r0} \cdot a \qquad \alpha_R = C_{rR} \cdot b \qquad (14),\ (15)$$

五種類の層せん断力係数の基準化した結果は図 6 に示す。図 6(a)は指針法と補正法，図 6(b)に告示法，増幅法と割増法の免震層せん断力係数α_0 に対する基準化結果をあ示す。時刻歴解析結果の基準化した結果をそれぞれ比較すると，指針法，補正法および告示法は危険側，割増法による基準化係数結果は最上階のみ危険側となり，増幅法だけが時刻歴結果の安全側となることが確認できる。増幅法と割増法は時刻歴解析結果により近くなる傾向を示している。



(a) □指針，補正　　(b) 告示，増幅，割増

図６　係数分布基準化

4.2 各せん断力係数と検証

図 9 に，適切な高さ方向のせん断力係数も考慮した設計フローを示す。エネルギー法による時刻歴解析結果は設計クライテリア以内に収まらない場合，各層せん断力係数α_iに移行する。上部構造第 1 層の最大せん断力 $Q_{1\max}$ は免震層の最大せん断力 $Q_{0\max}$ と等しいと仮定し，指針法と補正法では，式(16)で示すように，上部構造第 1 層の層せん断力係数α_1 = 0.12 が得られる。告示法，増幅法と割増法では，式(17)で示すように免震層の層せん断力係数α_0 = 0.08 が得られる。図 6 で示している係数分布基準化を通じ，多種類の層せん断力係数予測結果が算出でき，その結果を図 7 に示す。同図より，増幅法と割増法は時刻歴

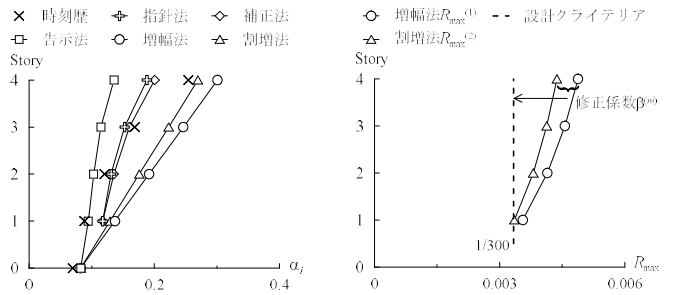


図７　多種類層せん断力係数　　図８　新たな設計による予測

結果の安全側となることが分かる。

$$\alpha_1 = \frac{Q_{1\max}}{M_u \cdot g} = \frac{Q_{0\max}}{M_u \cdot g} = \frac{k_{eq} \cdot \delta_{\max(\mathrm{p})}}{M_u \cdot g} \tag{16}$$

$$\alpha_0 = \frac{Q_{0\max}}{M \cdot g} = \frac{k_{eq} \cdot \delta_{\max(\mathrm{p})}}{M \cdot g} \tag{17}$$

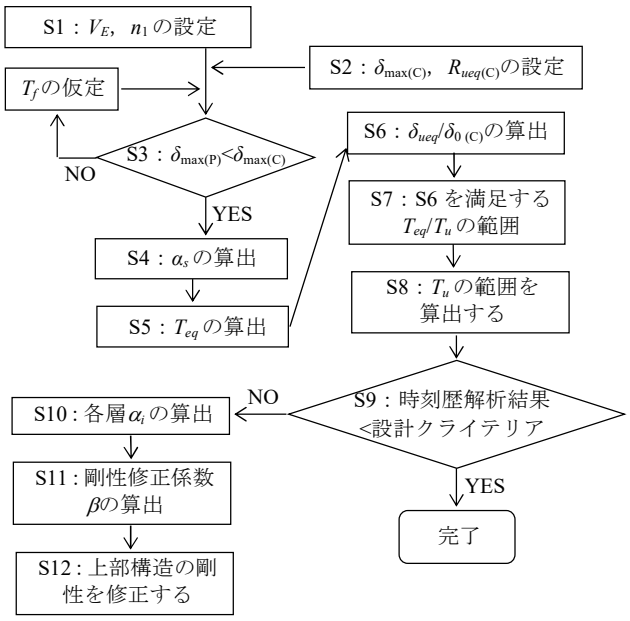


図９　せん断力係数を考慮した設計フロー

5. 設計用α_iによる免震建物の応答予測

5.1 剛性修正係数β

増幅法と割増法では，エネルギー釣合による上部構造の剛性が強くなるため，層間変形角予測値を用い，剛性修正係数$\beta^{(m)}$を算出する。増幅法と割増法による層間変形角の予測値を図 8 に示す。同図より，エネルギー釣合による設計クライテリア線を超えることが分かる。そこで，式(18)で示すように，最上層の層間変形角 $R_{N\max}$ より，$\beta^{(i)}$ が計算できる。増幅法と割増法は，剛性修正係数がそれぞれ 1.46，1.31 になることが分かる。増幅法と割増法による上部構造の各層剛性は式(19)で示すように，エネルギー釣合による上部構造各層剛性 k_i と剛性修正係数$\beta^{(m)}$より得られる。修正した上部構造の 1 次固有周期 $T_u^{(m)}$ は，増幅法と割増法では，設計法の式(20)より，1.4s からそれぞれ 1.16s，1.22s までに減少する。

5.2 設計値結果検討

上部構造の 1 次固有周期 $T_u^{(m)}$（増幅法 1.17s，割増法 1.24s），免震層アイソレータのみの周期 T_f = 4 s，履歴ダンパーの降伏せん断力係数α_{sy} = 0.04 のモデルを用い，V_E = 180 cm/s，n_1 = 6 の ART HACHI80 を入力地震動とし，時刻歴応答解析の行った各層の最大応答変位と上部構造の最大層間変形角高さ方向分布結果を図 10 に示す。同図より，増幅法と割増法としては，いずれも免震層の最大変形は 40cm 以下，上部構造の各層最大層間変形角は 1/300 以下である。

以上の結果から，エネルギー釣合を基づき，上部構造の層せん断力係数も考慮する手法により求めた上部構造の各層剛性 $k_i^{(m)}$を用いることで，免震層最大変形も，上部構造の最大層間変形角も設計クライテリアを満たしていることが確認できた。

$$\beta^{(m)} = \frac{R_{N\max}^{(m)}}{1/300}, k_i^{(m)} = \beta^{(m)} \times k_i, T_1^{(m)} = \frac{1}{\sqrt{\beta^{(m)}}} \times T_1 \qquad (18) \sim (20)$$

ここで，N：4 を取り，m：m = 1 が増幅法を表し，m = 2 が割増法を表すことである。

6. まとめ

本報では，付・佐藤らのエネルギー法に上部構造の剛性分布を考慮できたように拡張した設計手法を提案し，適切な上部構造剛性の設計フローを提出した。免震構造を設計する場合，免震建物の免震層最大変形と上部構造の最大層間変形角は，本予測方法を用いることで，設計クライテリアを満たすための上部構造の 1 次固有周期が得られる。

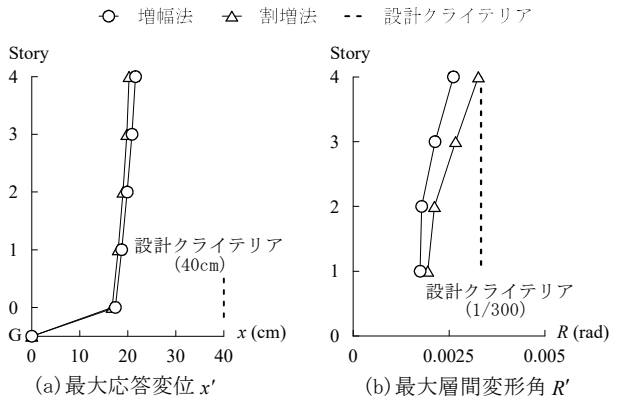


図１０　修正した時刻歴解析結果

参考文献

1) 付慧鑫，佐藤大樹，北村春幸，松田頼征，宮川和明，植木卓也，村上行夫：上部構造と免震層の等価周期比を用いた免震建物の応答予測式，日本建築学会技術報告集，第 24 巻，第 58 号，pp.951-956，2018.10
2) 佐藤大樹，笠井和彦，田村哲郎：粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 635 号，pp.75-82，2009.01
3) 付慧鑫，宮川和明,，佐藤大樹，佐藤利昭，北村春幸，植木卓也，村上行夫：屋上階の質量･剛性が小さい免震鉄骨造物流倉庫を用いた各種設計用層せん断力係数分布の考察，日本建築学会技術報告集，第 23 巻，第 53 号，pp.59-64，2017.02
4) 日本建築学会：免震構造設計指針，pp.73-110，1993
5) 国土交通省住宅局建設指導課など：免震層建築物の技術基準解説及び計算例とその解説，2001.5
6) 小林正人，谷崎豪，松田紳吾：免震部材の多様化に対応した免震建物の設計用地震荷重分布，日本建築学会構造系論文集，第 77 巻，第 676 号，pp.859-868，2012.6
7) 飯場正紀，田村和夫，猿田正明，西村拓也，森川和彦，北村佳久，小林正人，石原直：免震建築物の設計用地震層せん断力係数に関する検討，建築研究所，建築研究資料，No.162 号，2014.8

*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