

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	積層ゴム引抜き時の剛性低下を考慮した時刻歴解析結果を用いる水平上下重ね合わせ手法の提案
Title(English)	
著者(和文)	吉江一馬, 佐藤大樹, 松田頼征, 北村春幸, 中村昌弘, 森隆浩, 加藤秀章, 脇島健二, 石田安澄
Authors(English)	Daiki Sato, Yoriyuki MATSUDA, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 405-408
Citation(English)	, , , pp. 405-408
発行日 / Pub. date	2017, 3

積層ゴム引抜き時の剛性低下を考慮した時刻歴解析結果を用いる水平上下重ね合わせ手法の提案

構造—振動

正会員 ○ 吉江一馬<sup>\*1</sup> // 佐藤大樹<sup>\*2</sup> // 松田頼征<sup>\*1</sup>  
 免震構造 引抜き 上下動 時刻歴和 // 北村春幸<sup>\*1</sup> // 中村昌弘<sup>\*3</sup> // 森 隆浩<sup>\*3</sup>  
 SRSS 組合せ係数法 エネルギー一定則 // 加藤秀章<sup>\*3</sup> // 脇島健二<sup>\*3</sup> // 石田安澄<sup>\*3</sup>

1. はじめに

近年、免震建物の高層化や形態の多様化の面もあり、積層ゴムに生じる引抜きが重要な課題となっている。積層ゴムの引抜きの要因には上下動によるものと水平動によるものがある。水平と上下で一般的に固有振動数が異なるため、設計時にはそれを考慮しなければいけないが、水平上下同時入力では水平方向と鉛直方向の一次固有振動数に対して任意の減衰定数を与えることは困難である。

そのため、水平と上下を別々に解析して重ね合わせる方法が数多く提案されている<sup>1)~4)</sup>が、地震動やモデルにより精度にばらつきがある。さらに、積層ゴムは圧縮側に比べて引張側で剛性が低下するという特性を示すため、積層ゴム引抜き時の剛性変動を考慮した水平上下の重ね合わせ手法が必要となるが、上述した方法では積層ゴム引抜き時の剛性低下は考慮されていない。

以上を踏まえて本報は、積層ゴム引抜き時の剛性低下を考慮した時刻歴解析結果を用いた精度の高い水平上下重ね合わせ手法の提案を目的とする。以降、引抜き時の剛性低下を考慮しない際、考慮する際における従来の重ね合わせ法の精度を検討した後、引抜き時の剛性低下を考慮しない水平および上下それぞれの時刻歴解析結果から、剛性低下を考慮する場合における応答を予測する手法を提案する。

2. 検討用モデルの概要

2.1 上部構造の設計

対象建物は、地上 24 階、高さ 96.0m、長辺方向 32.0 m、短辺方向 24.0m、搭状比 4.0 の鉄骨造免震建物を用い、基準階伏図と X1, X6 通り軸組図を図 1 に示す。上部部材は SM490 材を用い、 $C_0=0.2$  の水平地震力に対して許容応力度計算を基に断面を定めた。上部構造の固有周期は 2.70s で、減衰は水平上下共に定値減衰で 2%としている。

2.2 免震層の概要

免震層は、天然ゴム系積層ゴム<sup>5)</sup>と履歴減衰型ダンパー<sup>6)</sup>で構成した。天然ゴム系積層ゴムは、せん断弾性係数  $G = 0.392 \text{ N/mm}^2$ 、2次形状係数  $S_2 = 5.0$  とし、柱の長期軸力に対する面圧が 10~15  $\text{N/mm}^2$  となるようにゴム径を定め、各柱下に配置した。履歴減衰型ダンパーは、初期剛性 12.5  $\text{kN/mm}$ 、降伏荷重 348  $\text{kN}$ 、降伏変位 27.9  $\text{mm}$  の U

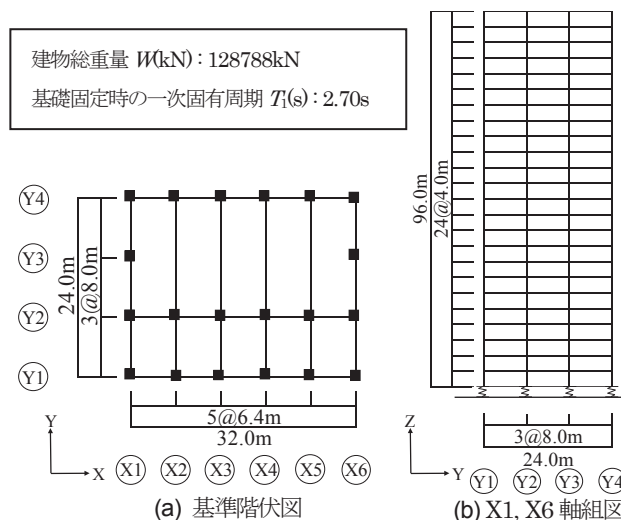


図 1 建物モデル概要

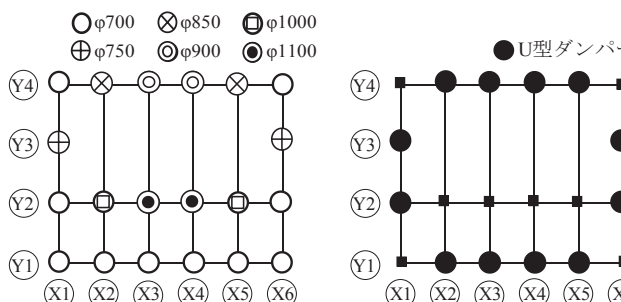


図 2 積層ゴム配置図

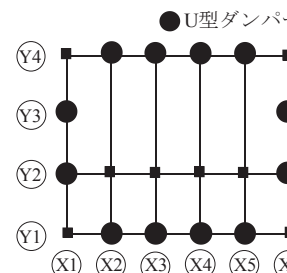


図 3 ダンパー配置図

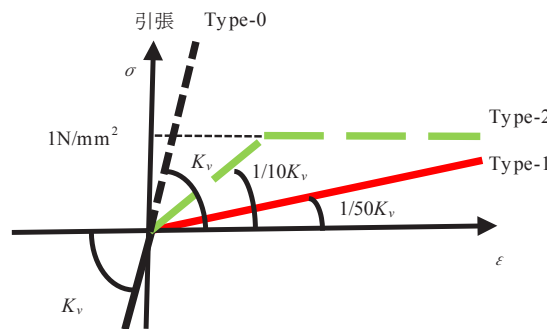


図 4 鉛直方向の面圧  $\sigma$  - ひずみ  $\epsilon$  関係

型ダンパーを用いて、建物総重量の 3% で降伏するように設定した。せん断歪み 250%降伏時の免震建物の固有周期は 4.48 s である。免震層の構成として、図 2 に積層ゴムの配置を、図 3 にダンパーの配置を示す。

2.3 積層ゴムの引張特性のモデル化

図 4 に各ケースの面圧  $\sigma$  - ひずみ  $\epsilon$  関係を示す。同図に示

す通り、Type-0 は、圧縮側と引張側で剛性を同一としたモデルで、引張限界を  $1 \text{ N/mm}^2$  としたものである。残る 2 タイプは、森ら<sup>7</sup>が提案している引張剛性を圧縮剛性の  $1/50$  として引張限界を  $5\%$  とした Type-1、引張剛性を圧縮剛性の  $1/10$ 、引張応力  $1 \text{ N/mm}^2$  以降で引張剛性を 0 とした Type-2 とする。なお、森らは引張限界に引張歪みを用いることを提案していることから、以降の重ね合わせ法では水平上下の付加歪みの重ね合わせにより最大引張歪みを推定する。

### 3. 検討用地震動

入力には水平上下二方向入力として、水平動はコーナー周期  $T_c = 0.64 \text{ s}$  以降で擬似速度応答スペクトルを  $100 \text{ cm/sec}$  で一定とした告示波を用いた。上下動は設計用入力地震動作成手法技術指針(案)による方法により水平動の応答スペクトルに上下動成分係数を乗じて上下動の応答スペクトルを設定した<sup>8</sup>。位相特性は、1968 年の十勝沖地

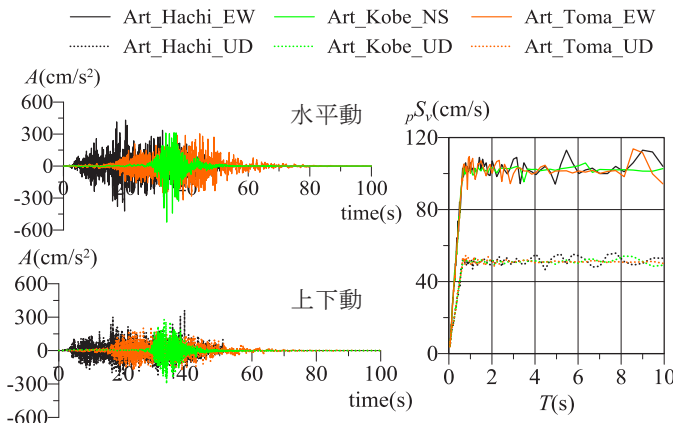


図 5 入力動の(左)加速度  $A$  と(右)擬似速度応答スペクトル  $\rho S_v$

震 (HACHINOHE) EW 成分, 1995 年兵庫県南部地震 - 神戸海洋気象台記録(JMA KOBE)NS 成分, 2003 年の十勝沖地震(K-NET 苫小牧) EW 成分を用いた。以降、HACHINOHE の NS 成分を用いた地震を Art\_Hachi, JMA KOBE の NS 成分を用いた地震を Art\_Kobe, K-NET 苫小牧の EW 成分を用いた地震を Art\_Toma と呼ぶ。図 5 に加速度  $A$  と擬似速度応答スペクトル  $\rho S_v$  を示す。

### 4. 免震層を弾性体とした検討

本章では免震層を弾性体とした際における各重ね合わせ法の精度を検討する。はじめに、各重ね合わせ法の概要を示した後、算出した最大引張歪みの比較を行う。

#### 4.1 重ね合わせ法の概要

以下に、水平方向単独入力、上下方向単独入力の結果の重ね合わせによって水平・上下同時入力による積層ゴムの最大歪みを算出する手法について説明する。なお、既往の研究では面圧の重ね合わせを示しているが、本検討では引張歪みにおいても面圧と同様に重ね合わせが可能だと考えて用いている。その際、重ね合わせによる積層ゴムの最大引張歪みを  $\varepsilon_{max}$ 、水平動のみを入力した際の鉛直方向の変動歪みを  $\varepsilon_y$ 、上下動のみを入力した際の鉛直方向の変動歪みを  $\varepsilon_z$ 、長期歪みを  $\varepsilon_0$  として示している。

$$\text{時刻歴和} : \varepsilon_{max} = \text{MAX}(\varepsilon_y + \varepsilon_z) + \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$\text{絶対値和} : \varepsilon_{max} = \text{MAX}(\varepsilon_y) + \text{MAX}(\varepsilon_z) + \varepsilon_0 \quad (2)$$

$$\text{SRSS法} : \varepsilon_{max} = \sqrt{(\text{MAX}(\varepsilon_y))^2 + (\text{MAX}(\varepsilon_z))^2} + \varepsilon_0 \quad (3)$$

$$\text{係数法} : \varepsilon_{max} = \text{MAX}(\varepsilon_y) + \alpha \times \text{MAX}(\varepsilon_z) + \varepsilon_0 \quad (4)$$

$\alpha$  の値は、西山ら<sup>2</sup>同様  $0.4$  を用いて検討を行う。この際、絶対値和, SRSS法, 係数法は水平上下単独入力した際の各

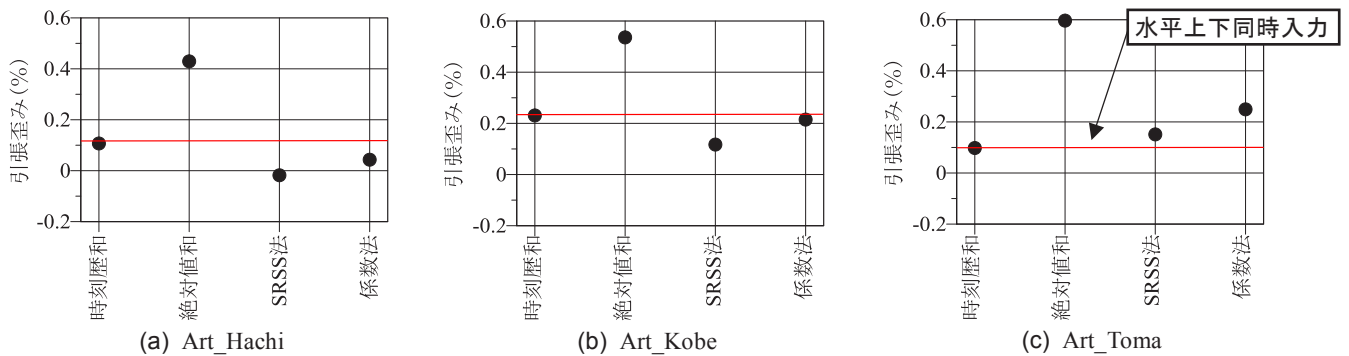


図 6 Type-0 における最大引張歪みの比較

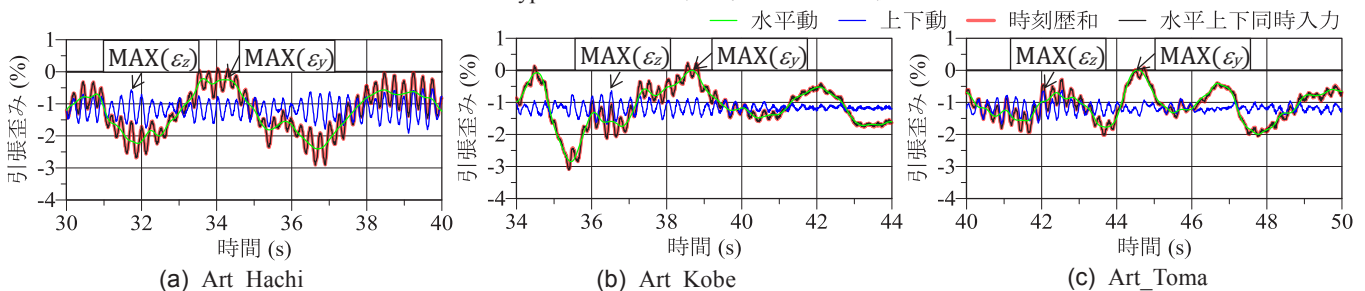


図 7 Type-0 における鉛直歪みの時刻歴波形

最大値のみを用いて  $\epsilon_{max}$  を算出する手法である。

## 4.2 最大引張歪みの比較

図 6 に Type-0 における各重ね合わせ法より算出した積層ゴムの最大引張歪みと赤線で水平上下同時入力における最大引張歪みを示している。なお、この結果は最大引張歪みが最も大きくなった X1-Y1 の積層ゴムにおける結果を示している。

図 6 より、絶対値和、SRSS 法、係数法では地震動によっては大きな差が生じており、時刻歴和による結果が水平上下同時入力の結果と同等の結果を得ることが出来る。これは、図 7 に示すように  $\text{MAX}(\epsilon_y)$  と  $\text{MAX}(\epsilon_z)$  が生じる時間がずれていることが要因である。そのため  $\text{MAX}(\epsilon_y)$  と  $\text{MAX}(\epsilon_z)$  を用いて水平上下同時入力における最大引張歪み  $\epsilon_{max}$  を算出する絶対値和、SRSS 法、係数法では精度良く表すことができない。

よって、免震層を弾性体とした際には時刻歴和法を用いることで水平上下同時入力における最大引張歪みを精度良く算出することができる。

## 5. 引抜き時の免震層の剛性低下を考慮した検討

前章において、免震層を弾性体とした際に各重ね合わせ法の精度を検討し時刻歴和法の精度が高いことを示したが、本章では引抜き時の免震層の剛性低下を考慮した際における各重ね合わせ法の精度の検討と精度良く評価する手法の提案を行う。

### 5.1 最大引張歪みの比較

図 8, 9 に Type-1, Type-2 における積層ゴムの最大引張歪みと赤線で水平上下同時入力における最大引張歪みを示している。図中のエネルギー一定法は後述する。図より SRSS 法、組合せ係数法、絶対値和のみならず、Type-0 において水平上下同時入力の結果と同等の結果を得ることができている時刻歴和においても水平上下同時入力の結果を大きく危険側で評価している。その要因は、水平上下同時入力では、積層ゴム引抜き時の剛性低下により引張歪みが大きくなるが、時刻歴和法では水平上下の単独入力の結果より算出しており、図 10 に示すように水平上下の単独入力では積層ゴムに引抜きが生じておらず積層ゴ

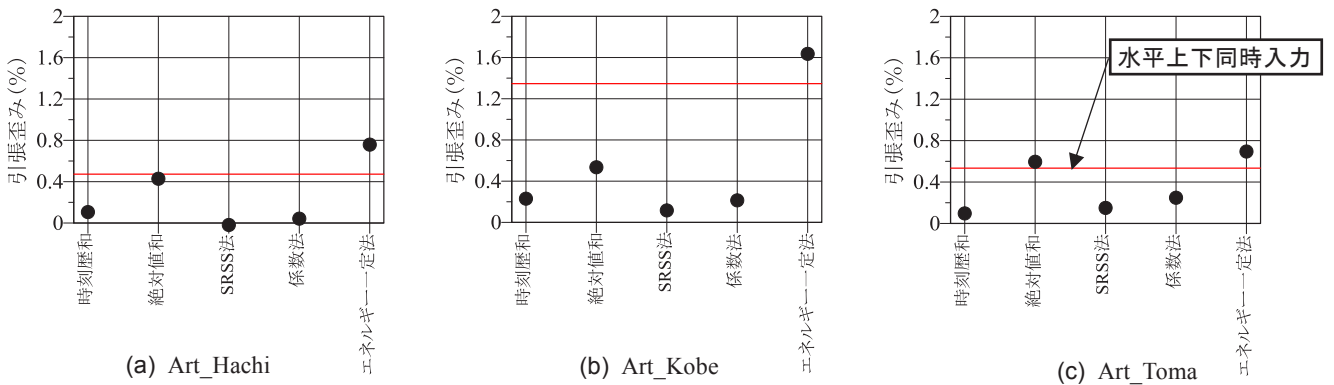


図 8 Type-1 における最大引張歪みの比較

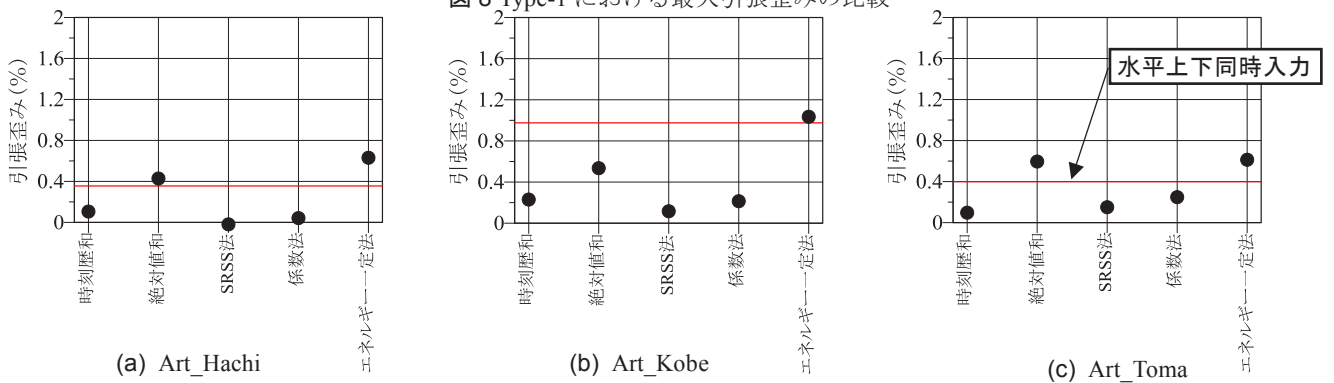


図 9 Type-2 における最大引張歪みの比較

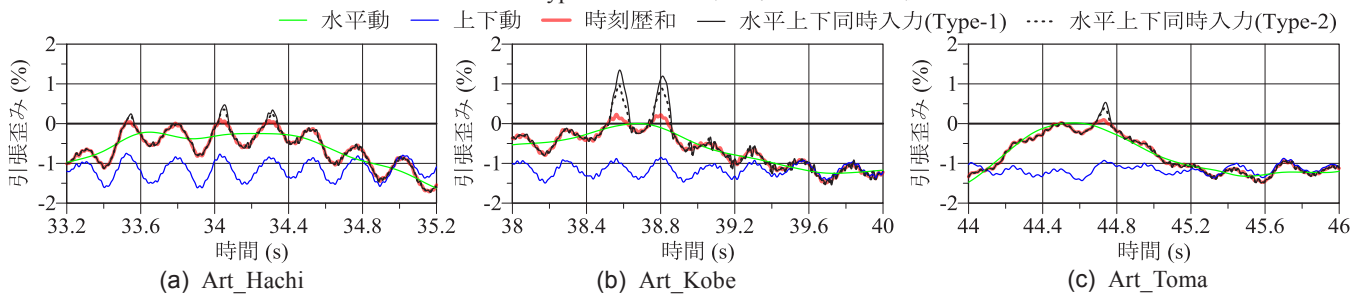


図 10 Type-1, Type-2 における鉛直歪みの時刻歴波形

ム引抜き時の剛性低下を考慮することが出来ていないため引張歪みが小さくなる。そのため剛性低下を考慮すると既往の研究より示される水平上下の重ね合わせ法では精度良く評価できない。そこで、次節よりエネルギー一定法を用いた水平上下の重ね合わせ法を提案する。

### 5.2 エネルギー一定法の概要

既往の研究<sup>9)</sup>より、バイリニア形の復元力特性を持つ弾塑性系の地震応答では、弾性系の最大ポテンシャルエネルギーと弾塑性ポテンシャルエネルギーは降伏力に関わらず等しいとされている。これを用いて、弾性系(Type-0)における水平上下単独入力の時刻歴和から最大引張面圧 $\sigma_{y+z}$ を予測してそのときのポテンシャルエネルギーと、引抜き後の剛性低下を考慮した際(Type-1, Type-2)におけるポテンシャルエネルギーが等しくなるように最大歪み $\epsilon_e$ を算出する。図11にエネルギー一定法の概要を示す。

### 5.3 エネルギー一定法により算出した引張歪みの検討

図12に積層ゴムの引張歪みをエネルギー一定法によって算出した時刻歴波形を示している。その際、引張歪みが最も大きくなったArt\_Kobeの結果のみを示している。図

より、Type-1, Type-2のどちらにおいてもエネルギー一定法によって引張歪みを算出すると、水平上下同時入力の結果と概ね対応していることが分かる。また、図8,9に示した積層ゴムの最大引張歪みにおいてもエネルギー一定法では水平上下同時入力における積層ゴムの最大引張歪みを安全側で評価することができている。

よって、エネルギー一定法を用いると積層ゴム引抜き時の剛性低下を考慮しないモデルによる水平および上下それぞれにおける時刻歴解析結果を用いて、剛性低下を考慮した場合での水平と上下が同時に作用した場合での応答を予測することが可能であると言える。

## 6. まとめ

本報では、積層ゴム引抜き時の剛性低下を考慮した時刻歴解析結果を用いた精度の高い水平上下重ね合わせ手法の提案を目的とし、引抜き時の剛性低下を考慮しない際の水平および上下それぞれの時刻歴解析結果から、剛性低下を考慮する場合に水平上下が同時に作用した場合の応答を予測する手法について検討した。

- 1) 引抜き時の剛性低下を考慮するとき、絶対値和法、SRSS法、組合せ係数法、時刻歴和法では水平上下同時入力の際の引張歪みを評価できない
- 2) エネルギー一定法を用いることで、引抜き時の剛性低下を考慮しないモデルの水平および上下の時刻歴解析結果から、剛性低下を考慮した際の引張歪みを概ね表すことができ、最大引張歪みも安全側で評価することができる。

## 謝辞

本研究は㈱ブリヂストンと東京理科大学北村研究室による共同研究の成果の一部をまとめたものです。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築センター：評価・評定を踏まえた高層建築物の構造設計実務，2002
  - 2) 西山隆，杉山達也，柏崎琢也：観測波を用いた水平応答と上下応答による組合せ法の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1697-1698，1994.7
  - 3) 松平有生，木本幸一郎：多数の観測強震動を用いた免震層の最大変位の解析的検討(その5 水平上下最大値の重ね合わせ方法)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.503-504，2016.8
  - 4) 本郷貴之，佐藤大樹，北村春幸：地震動観測記録を用いた超高層・中高層免震建物の水平・上下応答解析に基づく積層ゴムの軸力評価，日本建築学会技術報告集，pp.905-910，2014.10
  - 5) ㈱ブリヂストン：天然ゴム系積層ゴム技術資料，2009，4
  - 6) 社団法人 日本免震構造協会：免震部材標準品リスト 2009，第3版，p.616，2009.10
  - 7) 森隆浩，中村昌弘，室田伸夫他：引張限界ひずみによる免震構造物設計のため積層ゴムの引張特性の評価，日本建築学構造系論文集，pp.2021-2030，2015.12
  - 8) 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造II pp.443-444,2015.9
  - 9) 社団法人日本免震構造協会：JSSI 時刻歴応答解析による免震建物の設計基準・同マニュアル及び設計例，pp.70-71，2010.3
  - 10) 柴田明徳：最新耐震構造解析，第3版 pp.132-133，2014.12
- \*1 東京理科大学 \*2 東京工業大学 \*3 株式会社ブリヂストン

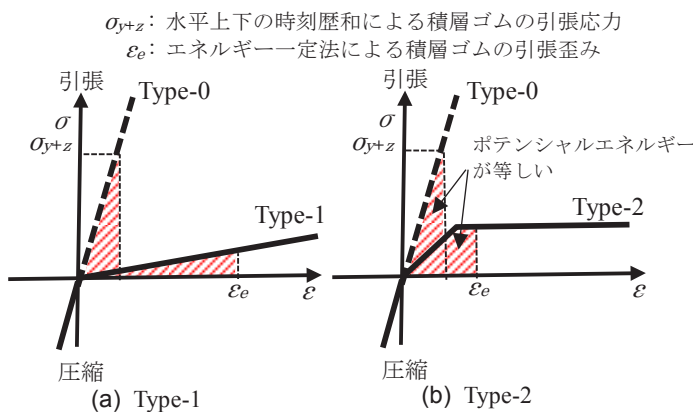


図11 エネルギー一定法の概要

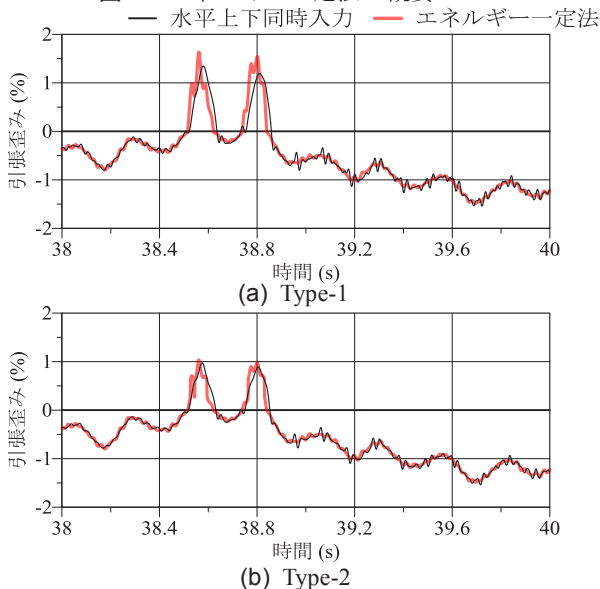


図12 エネルギー一定法より算出した時刻歴波形