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)	エネルギー一定則を用いた積層ゴムの最大引張歪みと基礎梁の曲げモーメントの推定手法の提案 (その1) 積層ゴム軸方向の復元力特性の違いが引張歪みの推定に与える影響の検討
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, Ⅰ, , pp. 589-592
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 589-592
発行日 / Pub. date	2018, 3

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

2017年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2018年3月

エネルギー一定則を用いた積層ゴムの最大引張歪みと基礎梁の曲げモーメントの推定手法の提案
（その 1）積層ゴム軸方向の復元力特性の違いが引張歪みの推定に与える影響の検討

構造ー振動

免震構造　引抜き　上下動　時刻歴和
水平上下応答値の重ね合わせ　エネルギー一定則

正会員 ○ 吉江一馬[*1]　〃 佐藤大樹[*2]　〃 松田頼征[*1]
〃 北村春幸[*1]　〃 中村昌弘[*3]　〃 森　隆浩[*3]
〃 加藤秀章[*3]　〃 脇島健二[*3]　〃 石田安澄[*3]

1.　はじめに

近年，免震建物の高層化や上部建物形状の多様化もあり，積層ゴムに生じる引抜きが重要な課題となっている。その中で森ら[1)]は積層ゴムの引張限界を従来の応力度ではなく引張歪みで規定する手法を提案している。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とがある。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な場合が多い。

そこで，既往の研究では，水平方向と上下方向の地震動に対して個別に解析して，それらの応答を重ね合わせる方法[2)-6)]が数多く提案されている。しかし，これらの方法では圧縮弾性率に対して引張弾性率が低くなる積層ゴムの特性[7)]は考慮されていない。一方，引張弾性率が低くなることで，積層ゴム引抜き時に応力再配分が発生し引抜けた積層ゴム周辺の基礎梁の曲げモーメントが大きくなることを著者らは確認した[8)]。そのため，積層ゴムの引張限界を引張歪みで規定して免震建物の設計を行う際には積層ゴム歪みのみでなく基礎梁の曲げモーメントについても検討する必要がある。

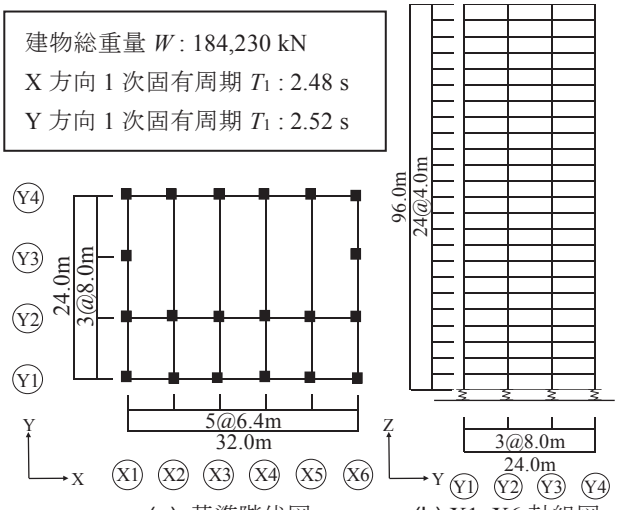
以上を踏まえて本報の目的は，免震建物に水平上下 2 方向入力した際の積層ゴムの引張弾性率が圧縮弾性率に対して低くなることを考慮した水平上下応答値の重ね合わせによる積層ゴムの引張歪みの推定手法および積層ゴム引抜き時の基礎梁の曲げモーメントの推定手法を提案することである。

その 1 では，圧縮弾性率に対し引張弾性率が低くなる積層ゴムの特性を考慮して積層ゴムの引張歪みを推定する手法について提案し，さらに積層ゴムの軸方向での復元力特性の違いが引張歪みの推定に与える影響を検討する。

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 96.0 m，長辺方向 32.0 m，短辺方向 24.0 m，搭状比 4.0 の鉄骨造免震建物とした。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，$C_0 = 0.2$ の水平地震力に対する許容応力度計算を基に断面を定めた。上部構造の 1 次固有周期は X 方向：2.48 s, Y 方向：2.52 s である。上部構造は弾性体とし，免震建物の水平と上下の固有周期の相違に影響を受けない $h = 2\%$ の定値減衰として検討を行う。また，解析時間刻みは 1/1,000 s とする。



(a) 基準階伏図　(b) X1, X6 軸組図

図 1 建物モデル概要

2.2 免震層の概要

図 2 に積層ゴムの配置を，図 3 にダンパーの配置を示す。免震層は，天然ゴム系積層ゴム[9)]と履歴減衰型ダンパー[10)]で構成されている。天然ゴム系積層ゴムは，せん断弾性係数 $G = 0.392$ 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 N/mm^2 となるようにゴム径 φ 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 19.2 kN/mm, 降伏荷重 608 kN, 降伏変位 31.7 mm の U 型ダンパーを用いて，建物総重量の約 2.5 %で降伏するよう設定した。せん断歪み 250 %時の免震建物の固有周期は X 方向：4.38 s, Y 方向：4.40 s である。

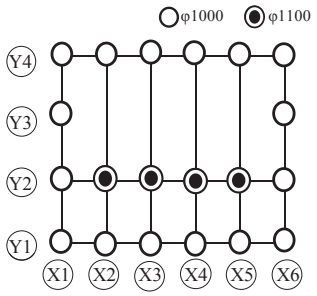


図 2 積層ゴム配置図

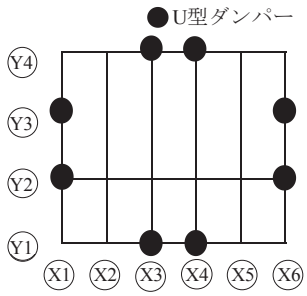
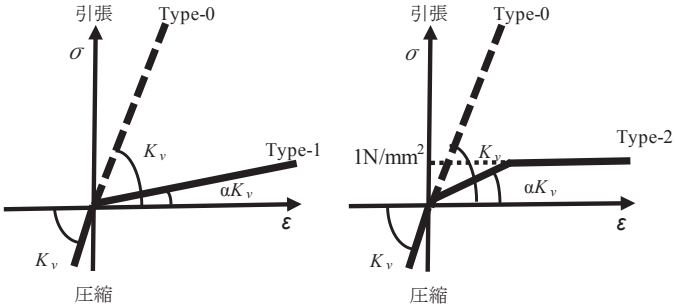


図 3 ダンパー配置図

積層ゴムの鉛直方向の引張特性には 3 つのタイプを用いて比較を行う。図 4 に各タイプの面圧σ - ひずみε関係を示す。Type-0 は，圧縮側と引張側で弾性率を同一としたモデルである。残る 2 タイプは，引張弾性率を圧縮弾性率より小さくして引張側でリニア型のタイプを Type-1(図 4(a))，引張弾性率を圧縮弾性率より小さくして，引張応力 1 N/mm^2 以降で剛性を 0 とした引張側でバイリニア型のタイプを Type-2(図 4(b))とする。以降，歪みは Z 方向のものを指し引張を正値とする。積層ゴムの引張弾性率の圧縮弾性率に対する比率αは 1/10, 1/20, 1/30, 1/40, 1/50, 1/100 の 5 つを用いる。



(a) Type-1　　(b) Type-2

図 4 鉛直方向の面圧 σ - ひずみ ε 関係

3. 検討用地震動

本報では，水平 45 度方向と上下の 2 方向入力を用いる。検討にはコーナー周期(0.64 s)以降で擬似速度応答スペクトルを一定とした模擬波 2 つと，観測波 2 つの計 4 つの波を用いる。模擬波における上下動は文献 11)の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。摸擬波の位相特性は，1995 年兵庫県南部地震 - 神戸海洋気象台記録(JMA Kobe)の NS 成分と UD 成分, 1968 年の十勝沖地震(Hachinohe)の EW 成分と UD 成分を用いた。以降, JMA Kobe の位相を用いた模擬地震を Art Kobe, Hachinohe の位相を用いた模擬地震を Art Hachi と呼ぶ。観測波には 1995 年兵庫県南部地震 - 神戸海洋気象台記録(JMA Kobe)の NS 成分と UD 成分, 1940 年の El Centro 地震の EW 成分と UD 成分を用いる。以降, JMA Kobe, El Centro と呼ぶ。本報では，紙幅の都合の上 Art Kobe, El Centro の結果のみを示す。図 5 に, Art Kobe および El Centro の擬似速度応答スペクトル(h=5%)と時刻歴波形を示す。ここでは例として，模擬波は NS 成分, EW 成分のコーナー周期以降を ${}_pS_v$ = 80 cm/s, 観測波は最大速度を V_{max} = 50 cm/s とした際の結果を示す。

4. エネルギー一定則を用いた引張歪みの推定手法

既往の研究 [12), 13)]より，比較的短周期の範囲での弾塑性系の地震応答では，短周期領域において弾性系と弾塑性系のエネルギーは降伏力に関わらずほぼ等しいとされている(エネルギー一定則)。本報ではエネルギー一定則を準用した引張歪みの推定手法を提案する。以下に図 6 に示す推定手法について述べる。

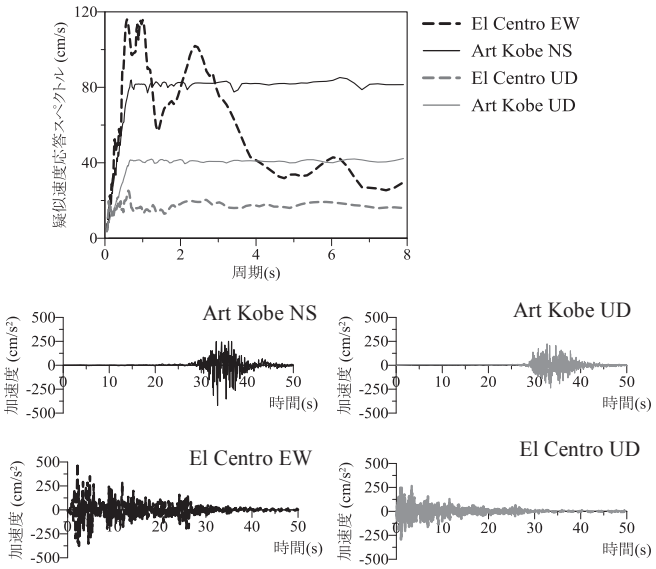


図 5 入力動の(上)擬似速度応答スペクトルと(下)時刻歴波形

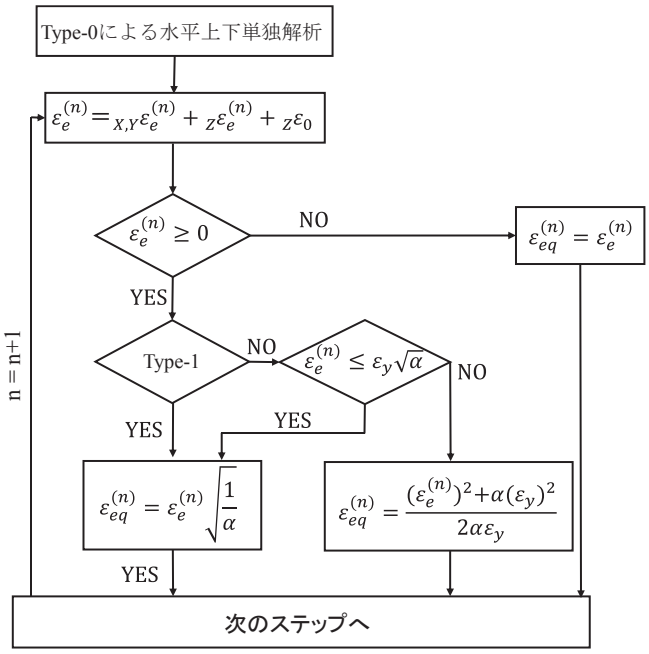


図 6 エネルギー一定則による引張歪み$\varepsilon_{eq}^{(n)}$の算出手順

はじめに, Type-0 を用いて水平方向，上下方向単独での時刻歴解析を行う。次に，Type-0 での水平上下単独入力による${}_{X,Y}\varepsilon_e^{(n)}$，${}_Z\varepsilon_e^{(n)}$，長期歪み${}_Z\varepsilon_0$を用いて式(1)より引張歪み$\varepsilon_e^{(n)}$を求める。Type-0 における積層ゴムの鉛直方向の弾性歪みエネルギーと，引張弾性率が圧縮弾性率より低い Type-1 の弾性歪みエネルギーが等しくなるように(図 7), 引張歪み$\varepsilon_{eq}^{(n)}$を算出する(式(2))。ここで，${}_{X,Y}\varepsilon_e^{(n)}$，${}_Z\varepsilon_e^{(n)}$はそれぞれ水平方向単独，上下方向単独を入力した解析のステップ n での変動歪み，${}_Z\varepsilon_0$は長期荷重による鉛直歪みで

ある。本報では式(1)を時刻歴和法と呼ぶ。

$$\varepsilon_e^{(n)} = {}_{X,Y}\varepsilon_e^{(n)} + {}_Z\varepsilon_e^{(n)} + {}_Z\varepsilon_0 \tag{1}$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{eq}^{(n)} = \varepsilon_e^{(n)} & \varepsilon_e^{(n)} \le 0 \\ \varepsilon_{eq}^{(n)} = \varepsilon_e^{(n)}\sqrt{\dfrac{1}{\alpha}} & 0 \le \varepsilon_e^{(n)} \end{cases} \tag{2}$$

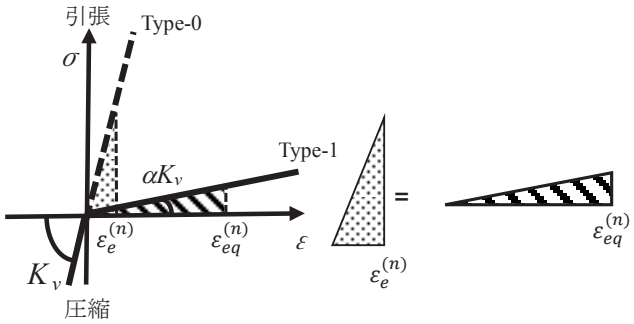


図 7 エネルギー一定則の概要(Type-1)

その後，次のステップへ進み同じ手順をくり返す。

Type-2 の場合にも，ステップ n での弾性系(Type-0)での引張歪み$\varepsilon_e^{(n)}$を(1)式を用いて算出する。その後 Type-0 のエネルギーと Type-2 のエネルギーが等しくなるように(図 8)(3)式より引張歪み$\varepsilon_{eq}^{(n)}$を算出する。

$$\begin{cases} \varepsilon_{eq}^{(n)} = \varepsilon_e^{(n)} & \varepsilon_e^{(n)} \le 0 \\ \varepsilon_{eq}^{(n)} = \varepsilon_e^{(n)}\sqrt{\dfrac{1}{\alpha}} & 0 \le \varepsilon_e^{(n)} \le \varepsilon_y\sqrt{\alpha} \\ \varepsilon_{eq}^{(n)} = \dfrac{(\varepsilon_e^{(n)})^2 + \alpha(\varepsilon_y)^2}{2\alpha\varepsilon_y} & \varepsilon_y\sqrt{\alpha} \le \varepsilon_e^{(n)} \end{cases} \tag{3}$$

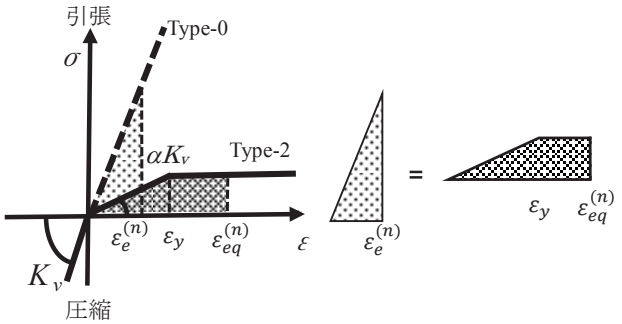


図 8 エネルギー一定則の概要(Type-2)

その後，次のステップへ進み同じ手順をくり返す。

5. 検討結果

本章では，前章に示したエネルギー一定則によって積層ゴムの引張歪みを算出した際に，積層ゴムの引張弾性率が圧縮弾性率よりも小さくなることを考慮した水平上下同時入力による積層ゴムの引張歪みを推定できるかを検討する。その際，積層ゴムの引張側の復元力特性の差異が推定に与える影響に着目して検討する。

5.1 最大引張歪みによる検討

図 9, 10(a), (b)に, Art Kobe および El Centro 入力時における Type-1, Type-2 のε_αMaxに対するε_{eq}Maxの比率をそれぞれ示す。なお，検討は隅角部 X1-Y1 の積層ゴム(図 1)において行っている。図 9, 10 より，積層ゴムの復元力特性が Type-1, Type-2 の際も積層ゴムの引張弾性率の圧縮弾性率に対する比率αが小さくなるほど水平上下同時入力の結果を安全側で評価しており，α = 1/40 より小さくなると積層ゴムの復元力特性が Type-1, Type-2 のどちらにおいても積層ゴムの最大引張歪みを安全側で推定できることが確認できる。

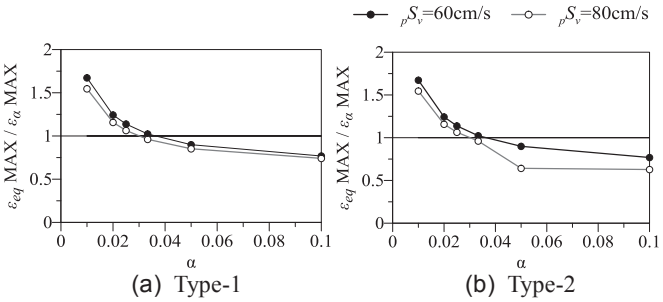


図 9 ε_αMaxに対するε_{eq}Maxの比率（Art Kobe）

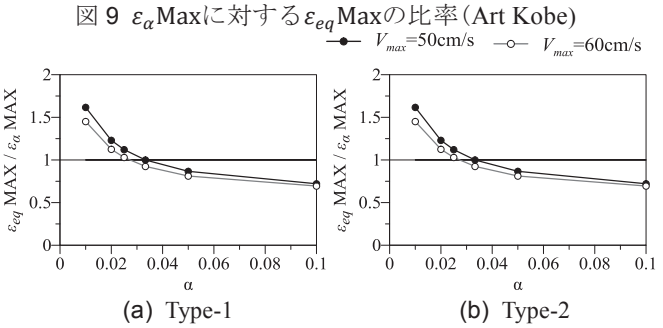
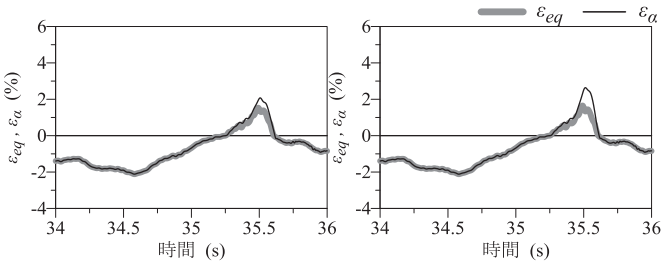


図 10 ε_αMaxに対するε_{eq}Maxの比率(El Centro)

5.2 引張歪みの時刻歴による検討（X1−Y1）

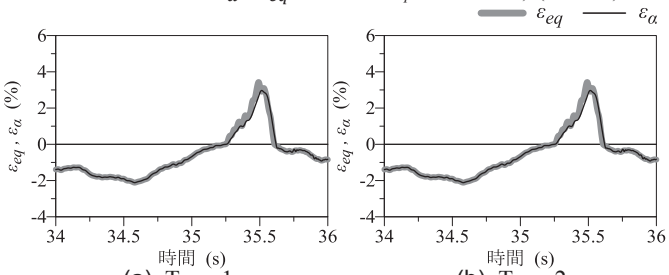
5.1 節において積層ゴムの最大引張歪みにおいて引張側の復元力特性の差異がエネルギー一定則による推定精度に与える影響について検討した。本節では，積層ゴム引張歪みの時刻歴を用いて検討する。

図 11~13(a), (b)に Type-1, Type-2 において X1-Y1 の積層ゴムでα = 1/10, 1/50, 1/100 のときの水平上下同時入力による積層ゴムの引張歪みε_αとエネルギー一定則を用いて算出した積層ゴムの引張歪みε_{eq}の時刻歴をそれぞれ示す。入力は Art Kobe ($_pS_v$=80cm/s)である。図 11~13 より積層ゴム引抜き時に弾性率が小さくなることによって引張歪みが大きくなるという挙動を推定することができている。また，図 11 より，α = 1/10 のときには，Type-1, Type-2 ともにエネルギー一定則は水平上下同時入力による引張歪みを小さく評価していることが確認できる。図 12, 13 より，α = 1/50 および 1/100 の時にはエネルギー一定則は積層ゴムの引張歪みを安全側で評価していることが確認できる。



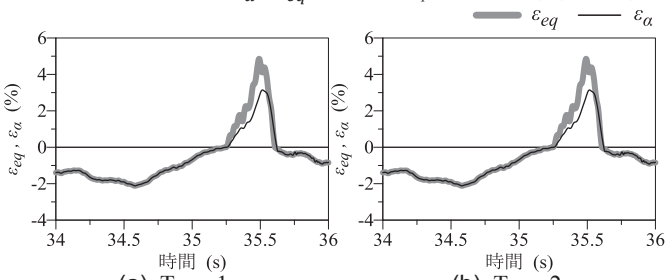
(a) Type-1　(b) Type-2

図 11 α = 1/10 でのε_α, ε_{eq}の時刻歴 ($_pS_v$=80cm/s) (X1-Y1)



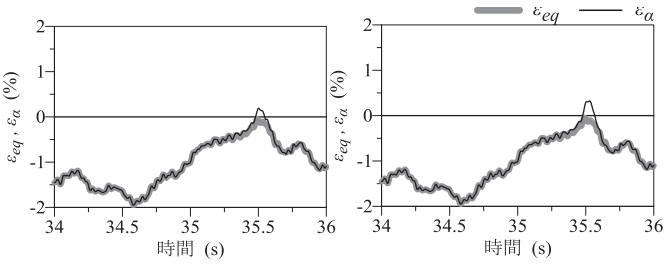
(a) Type-1　(b) Type-2

図 12 α = 1/50 でのε_α, ε_{eq}の時刻歴 ($_pS_v$=80cm/s) (X1-Y1)



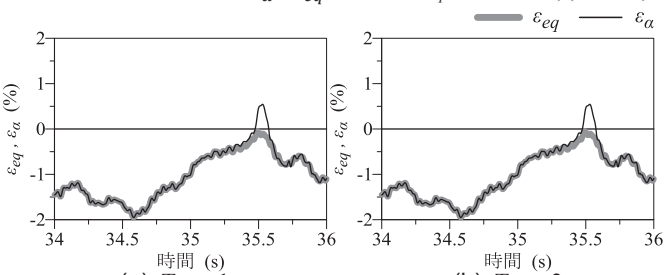
(a) Type-1　(b) Type-2

図 13 α = 1/100 でのε_α, ε_{eq}の時刻歴 ($_pS_v$=80cm/s) (X1-Y1)



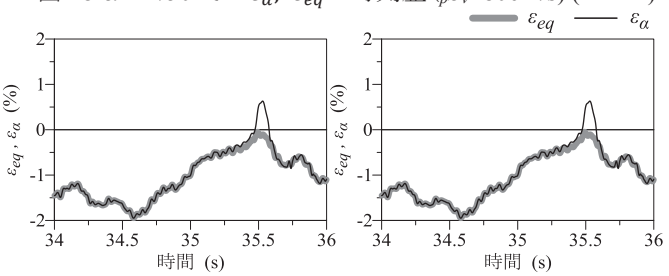
(a) Type-1　(b) Type-2

図 14 α = 1/10 でのε_α, ε_{eq}の時刻歴 ($_pS_v$=80cm/s)(X2-Y1)



(a) Type-1　(b) Type-2

図 15 α = 1/50 でのε_α, ε_{eq}の時刻歴 ($_pS_v$=80cm/s) (X2-Y1)



(a) Type-1　(b) Type-2

図 16 α = 1/100 でのε_α, ε_{eq}の時刻歴 ($_pS_v$=80cm/s) (X2-Y1)

5.3 隣接する積層ゴムの引張歪みの検討 (X2−Y1)

5.1 節, 5.2 節では隅角部 X1-Y1 の積層ゴムに着目して積層ゴムの引張歪みの検討を行ったが, 積層ゴム引抜き時には応力再配分によって隣接する積層ゴムに引張力を伝達して引張歪みが大きくなると考えられる。そのため, 本節では X2-Y1 の積層ゴムの引張歪みにおいて検討する。

図 14~16(a), (b)に Art Kobe ($_pS_v$=80cm/s)入力時における Type-1, Type-2 でのα = 1/10, 1/50, 1/100 のときの水平上下同時入力による X2-Y1 の積層ゴムの引張歪みε_αとエネルギー一定則を用いて算出した積層ゴムの引張歪みε_{eq}の時刻歴をそれぞれ示す。図 14~16 の Art Kobe ($_pS_v$=80cm/s)入力時におけるα = 1/10, 1/50,より, 水平上下同時入力では積層ゴムの引張弾性率の圧縮弾性率に対する比率αが小さいほど引張歪みが大きくなることが確認できる。対して, エネルギー一定則より算出した引張歪みは式(1)より算出した X2-Y1 の積層ゴムの引張歪み$\varepsilon_{e,X2-Y1}^{(n)}$が引張側とならないため, 引抜き時に弾性率が小さくなることによって引張歪みが大きくなるという挙動を推定できていない。

以上より, 隅角部積層ゴム引抜き時の応力再配分によって 2 箇所目の積層ゴムに引抜が生じる際, エネルギー一定則ではその引張歪みを推定できない。これについては, 本報その 2 で新たな手法を提案する。

6. まとめ

その 1 では, 積層ゴムの有する圧縮弾性率に対し引張弾性率が低くなる特性を考慮して積層ゴムの引張歪みを推定する手法について提案し, さらに積層ゴムの軸方向での復元力特性の違いが引張歪みの推定に与える影響を検討した。

その結果, エネルギー一定則を用いて積層ゴムの引張歪みを推定する場合, 引抜き時に弾性率が小さくなることによって引張歪みが大きくなる挙動を推定することができる。その際, 積層ゴムの引張弾性率の圧縮弾性率に対する比率が小さくなるほど水平上下入力による引張歪みを安全側で評価しており 1/40 より小さいときは安全側で推定できることを確認した。

しかし, 隅角部積層ゴム引抜き時の応力再配分によって隣接する 2 箇所目の積層ゴムに引抜が生じる際, エネルギー一定則ではその引張歪みを推定できない。

その 2 では, エネルギー一定則より算出した引張歪みを用いた基礎梁曲げモーメントの推定手法および隣接する 2 箇所目以降での積層ゴムの引張歪みの推定手法を提案する。

参考文献はその 2 にまとめて示す。