風荷重の動的成分が高減衰系積層ゴムの応答特性に与える影響に関する実験的研究及びその解析モデルの検討

EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE OF DYNAMIC COMPONENT OF WIND LOADING ON RESPONSE CHARACTERISTICS OF HIGH DAMPING RUBBER BEARINGS AND MODELING FOR WIND RESPONSE ANALYSIS

森 隆浩*, 加藤 秀章**, 竹内 貞光***, 菊地 隆志****, 室田 伸夫*****

Takahiro MORI, Hideaki KATO, Sadamitsu TAKEUCHI,

Takashi KIKUCHI and Nobuo MUROTA

In this study, wind response properties of high damping laminated rubber bearings (HDR) is investigated by experimental and analytical methods. According to the experimental result of HDR, horizontal creep deformation depends on magnitude of dynamic loading as well as that of static loading under the wind loading. This feature differs from other seismic isolation devices. Then we propose the simplified evaluation method and hysteresis model for time history response analysis under wind loading, which are established by taking account of the effect of creep deformation caused by dynamic loading. Firstly, we perform the wind loading test for high damping laminated rubber bearings and establish the simplified evaluation method and hysteresis model based on the test results. Next, we verify the validity of proposed models by comparing the analysis results with experimental results. Finally, we perform the time history response analysis using proposed hysteresis model.

Keywords : *Seismic isolation, High damping laminated rubber bearings, Wind response, Creep, Hysteresis model, Time history response analysis*

免震, 高減衰積層ゴム, 風応答, クリープ, 復元力モデル, 時刻歴応答解析

1. はじめに

近年、免震構造を採用した建築物の普及が進み、超高層建築物の免震化の事例も数多く見られるようになった。こうした超高層建物においては、台風などの風荷重の影響を受けやすく、風荷重を想定した免震装置の健全性評価が必要となる。免震装置の代表例として、復元力特性と減衰特性を併せ持つ高減衰積層ゴムや鉛挿入型積層ゴムが挙げられる。これらの免震装置は、減衰性能を持つという特徴から、クリープ特性を示し、風荷重載荷時には時間と共に変形が増大する恐れがある。過去、鉛挿入型積層ゴムにおいては、風応答に対する様々な評価が実施され^{1), 2)}、簡易評価方法も提案されている³⁾。一方、高減衰積層ゴムにおいても数例の試験評価が実施されているが^{4), 5), 6)}、高減衰積層ゴムは、鉛挿入型積層ゴムに比べ複雑な風応答性状を示し、風応答における簡易評価方法が確立されていない。

本研究では、高減衰積層ゴムの風応答評価試験を実施し、その評価結果を基に、風荷重下の最大せん断ひずみを予測する簡易評価方法を提案する。本研究における高減衰積層ゴムの風応答評価試験の

結果、風荷重の静的成分一定の条件下で動的変動成分を変化させた場合、動的変動成分が大きい程積層ゴムの水平クリープひずみが大きくなる性質を示すことが明らかとなった。鉛挿入型積層ゴムにおいては、クリープ特性は静的成分のみに依存し、動的変動成分には依らないことが知られており³⁾、これは高減衰積層ゴム固有の性質である。本研究において提案する簡易評価法は、動的変動成分によるクリープ変形の効果を考慮に入れている。

超高層建物の風応答に対する健全性評価手法の1つに、時刻歴応答解析が挙げられる。安井らはクリープ変形を伴う免震建物における風応答時刻歴解析モデルの提案を行っている⁷⁾。しかしながら、このモデルは静的成分に対するクリープ変形の影響しか考慮されていない。このため、動的変動成分がクリープ変形に影響を与えると、高減衰積層ゴム固有の特性を再現できず、クリープ変形を適切に評価することができない。過去、筆者らは有限要素法への適用を目的とした高減衰積層ゴムのゴム材料の構成則として、変形履歴積分型の弾塑性構成則を提案している⁸⁾。さらに、この構成則を単

本論文は参考文献13に示す日本建築学会大会学術講演会において発表したものを再考察し、加筆しまとめたものである。

* (株)ブリヂストンインフラ資材開発部 博士(理学)

** (株)ブリヂストンインフラ資材開発部 修士(理学)

*** (株)ブリヂストンインフラ資材開発部 修士(工学)

**** (株)ブリヂストンインフラ資材開発部

***** (株)ブリヂストンインフラ資材開発部 Ph. D.

Infrastructure Products Dept., Bridgestone Co., Dr. Sci.

Infrastructure Products Dept., Bridgestone Co., M. Sci.

Infrastructure Products Dept., Bridgestone Co., M. Eng.

Infrastructure Products Dept., Bridgestone Co.

Infrastructure Products Dept., Bridgestone Co., Ph. D.

純せん断変形へ適用することで、時刻歴応答解析のための復元力モデルの提案も行っている⁹⁾。これらの変形履歴積分型の構成則や復元力モデルは弾塑性モデルではあるが、過去の変形履歴に依存したクリープ特性を示すように考案されたモデルであり、動的変動成分の影響を考慮できる。本研究では、この変形履歴積分型復元力モデルを用いた解析結果と実験結果を比較することで、モデルの妥当性について検証する。また、提案した復元力モデルの風荷重時刻歴応答解析を行い、その結果についても報告する。

2. 高減衰積層ゴムの風応答特性評価実験

高減衰積層ゴムにおける風荷重載荷時の特性を評価するために、以下の3タイプの試験を行った。

- (1) 静的加力試験：1方向に一定の水平荷重（静的せん断応力 τ_s ）を与える静的な加力試験
- (2) 動的加力試験：1方向への一定の水平荷重（静的せん断応力 τ_s ）に加えて、正弦波の繰り返し動的荷重（振幅 $\pm \tau_d$ の動的せん断応力）を与える動的な加力試験
- (3) 応答波加力試験：風荷重時刻歴応答解析から得られた応答荷重を入力として与えた動的な加力試験

試験概要及び試験結果を以下に示す。

2.1 評価試験概要

本実験に用いた評価試験体は、せん断弾性率 $G=0.620\text{MPa}$ 、等価粘性減衰定数 $H_{eq}=0.240$ の高減衰ゴム系積層ゴムとした¹⁰⁾。試験体の形状を図1に、形状・性能一覧を表1に示す。また、静的加力試験、動的加力試験、応答波加力試験の条件をそれぞれ表2~4に、応答波加力試験における入力荷重の波形を図2に示す。静的加力試験と動的加力試験においては、残留変形を評価するために、加力後1時間、水平荷重0で放置している。ただし、鉛直荷重については水平荷重除荷後も載荷したままである。また、表4の応答波加力試験において入力した応答波は、近藤ら¹¹⁾によって解析された風荷重時刻歴応答解析の応答荷重結果のうち、免震システムとして鉛挿入型積層ゴムを想定した粗度区分II（応答荷重名 X-II）とIII（応答荷重名 X-III）における風向方向の応答結果とした。

図1 試験体の形状

試験装置の外観図を図3に、試験装置諸元を表5に示す。実験に際しては、試験機のベアリング摩擦の影響を除外するため、摩擦の影響を受けない位置に設置した分力計により水平荷重の計測・制御を実施した。また、図4に示したように、実験中の積層ゴム表面温度を非接触式温度計で計測した。静的加力試験及び動的加力試験においては、試験機と試験体の間には断熱材を設けていないが、応答

波加力試験においては断熱材を設けている。試験体は試験開始24時間以上前から、20℃に設定した恒温槽による保管を行い、試験中の試験室は空調を20℃に設定して試験を行った。

表1 試験体形状・性能一覧

試験体数	2
ゴム外径／内径(mm)	$\phi 225 / \phi 0$
ゴム1層厚さ(mm)	1.6
ゴム積層数	28
内部鋼板厚さ(mm)	1.0
1次形状係数 S_1	35.2
2次形状係数 S_2	5.02
せん断弾性率(MPa)	0.620
水平剛性(kN/mm)	0.554

※ せん断弾性率と水平剛性はせん断ひずみ100%時の性能を表す。

表2 静的加力試験条件

試験体	せん断応力 $\tau_s \pm \tau_d$ (MPa)	面圧 (MPa)	加力時間 (hour)	加力後放置時間(hour)
No.1	0.1±0.0	15	2	1
	0.2±0.0	15	2	1
	0.3±0.0	15	2	1
	0.4±0.0	15	2	1

表3 動的加力試験条件

試験体	せん断応力 $\tau_s \pm \tau_d$ (MPa)	面圧 (MPa)	周波数 (Hz)	加力時間 (hour)	加力後放置時間(hour)
No.2	0.2±0.05	15	0.33	2	1
	0.2±0.1	15	0.33	2	1
	0.2±0.2	15	0.33	2	1
No.2	0.3±0.075	15	0.33	2	1
	0.3±0.15	15	0.33	2	1
	0.3±0.3	15	0.33	2	1
No.1	0.4±0.1	15	0.33	2	1
	0.4±0.2	15	0.33	2	1
	0.4±0.4	15	0.33	2	1

表4 応答波加力試験条件

試験体	応答荷重名	最大応答荷重 (MPa)	面圧 (MPa)	加力時間 (hour)	加力後放置時間(hour)
No.2	X-III	0.521	15	4.5	0
	X-II	0.673	15	4.5	0

(a) X-III

(b) X-II

図2 応答波加力試験における加力波形

図3 試験装置全体図

表5 試験装置諸元

鉛直ストローク	±100mm
鉛直荷重(圧縮を正)	-30~+100tonf(-300~1000kN)
鉛直クリアランス	200mm
水平ストローク	±300mm
水平荷重	±20tonf(200kN)

図4 試験の様子

2.2 評価試験結果

静的加力試験におけるせん断応力-せん断ひずみ関係(τ - γ 関係)の結果を図5に示す。図5からわかるように、時間とともにせん断ひずみが増大するクリープ現象が確認された。一般に、クリープひずみは弾性ひずみ(初期ひずみ)からの偏差として扱われる。しかしながら、高減衰積層ゴムにおいては、弾性ひずみとクリープひずみの境界が不明瞭であり、両者を区別することが難しい。そこで、本論文では、弾性ひずみも含めた全ひずみ量によって、風荷重載荷時の変形特性を議論する。図5に示したように、静的なせん断応力 τ_s が大きい程、せん断ひずみ量が多いことがわかる。また、せん断ひずみ量は、 τ_s に対して線形ではなく、 τ_s が大きくなるにつれて非線形に増大することがわかる。除荷1時間後の残留ひずみについては、 $\tau_s=0.4\text{MPa}$ の場合でも $\gamma=0.1$ 程度である。一般的な積層ゴムのゴム層厚さは200mm程度であるので、 $\gamma=0.1$ を実際の建物における免震層の変形量に換算すると20mm程度であり、残留変形の影響は小さいことがわかる。

動的加力試験におけるせん断ひずみの時間変化(γ - t 関係)の結果を図6に、 τ - γ 関係の結果を図7に、積層ゴム表面温度の時間変化を図8に示す。図6、7からわかるように、いずれの試験においてもクリープ挙動を示すが、 $\tau_s \pm \tau_d = 0.4 \pm 0.4\text{MPa}$ を除いて比較的安定した変形

の増大が見られる。しかしながら、 $\tau_s \pm \tau_d = 0.4 \pm 0.4\text{MPa}$ の場合は、時間とともに変形量が急激に増大しており、不安定な挙動を示していることがわかる。これは、図8からもわかるように、 $\tau_s \pm \tau_d = 0.4 \pm 0.4\text{MPa}$ の場合には、繰返し加力によって積層ゴムの温度が急激に上昇し、その結果、積層ゴムの剛性が低下したことが原因と考えられる。このような不安定挙動は、積層ゴムの内部温度と密接に関係しており、急激な温度上昇を示すような風応答入力がある場合は、免震建物の設計において、高減衰積層ゴムの適用範囲外とする必要がある。

鉛挿入型積層ゴムにて動的加力試験を行った場合、クリープ特性は静的成分(=静的せん断応力 τ_s)のみに依存し、動的成分(=動的せん断応力 τ_d)が鉛プラグの繰返し熱履歴による降伏荷重低下のない範囲であれば、動的成分には依らないということが従来の知見としてある³⁾。しかしながら、高減衰積層ゴムにおいては、図6、7からわかるように、静的成分一定の条件下で動的成分を増加させたとき、動的成分の増大とともにせん断ひずみ量も増大している様子がわかる。本論文では、動的成分の増大に伴うこのような付加的せん断ひずみを、「動的クリープ」と呼ぶこととする。竹中らは、風応答によるせん断ひずみを、静的成分 γ_s と動的成分 γ_d に分離することによる簡易評価手法の提案を行っている³⁾。静的成分 γ_s については、図5に示した静的クリープ試験から予測し、動的成分 γ_d については、積層ゴムのスケルトンカーブから応力が τ_d となる点のせん断ひずみとして定める。 γ_s と γ_d の和を風応答における最大せん断ひずみとして評価しているため、この評価手法では、高減衰積層ゴムの動的クリープ変形による付加的な変形が考慮されていない。本論文3.1節にて、これらの動的クリープを考慮した高減衰積層ゴムの風荷重下の最大せん断ひずみを予測する簡易評価法を提案する。

応答加力試験における γ - t 関係を図9に、 τ - γ 関係を図10に、積層ゴム表面温度の時間変化を図11に示す。図9、10からわかるように、風荷重の増大とともにせん断ひずみが増大し、風荷重の減少とともにせん断ひずみが減少している様子がわかる。応答波形 X-III に対しては、最大応答せん断ひずみ $\gamma=0.72$ 、残留せん断ひずみ $\gamma=0.23$ だった。また、応答波形 X-II に対しては、最大応答せん断ひずみ $\gamma=1.18$ 、残留せん断ひずみ $\gamma=0.49$ だった。応答加力試験では、動的加力試験で実施したような加力後の放置試験を実施していないが、加力後の放置を考慮に入れると、残留変形はさらに小さくなると予想される。また、図11からわかるように、応答加力試験においては、積層ゴム表面の温度はほぼ一定であり、急激な温度上昇は観測されなかった。

図5 静的加力試験における γ - t 関係

図 6 動的加力試験における γ - t 関係

図 7 動的加力試験における τ - γ 関係

図 8 動的加力試験における表面温度の時間変化

※ $\tau_s \pm \tau_d = 0.3 \pm 0.075$ (MPa)については、試験機の不具合により動的加力後の 1 時間の放置試験を実施していない。

※本試験は試験室温の空調を 20℃に設定した上で実施している。しかし、実際の室温が 20℃を下回っていたために、積層ゴムの表面温度が時間とともに低下するケースが見られた。

図 9 応答波加力試験における γ - t 関係

(a) X-III

(b) X-II

図 10 応答波加力試験における τ - γ 関係

図 11 応答波加力試験における
表面温度の時間変化

(a) $\tau_s=0.2\text{MPa}$

(b) $\tau_s=0.3\text{MPa}$

(c) $\tau_s=0.4\text{MPa}$

図 12 評価式と試験結果の比較

3. 解析モデルによる評価

動的加力試験の結果、高減衰積層ゴムにおいては、動的な荷重振

幅がクリープ変形に影響を与えることが分かった。本章では、動的荷重振幅の影響を考慮した、高減衰積層ゴムの風応答簡易評価法である「風荷重下の最大せん断ひずみ予測式」及び風荷重時刻歴応答解析モデルを提案する。

3.1 高減衰積層ゴムの風荷重下の最大せん断ひずみ予測式

2章で示したように、積層ゴムは、簡易的に風荷重を静的成分 τ_s と動的成分 τ_d に分離した加力実験を行い、最大せん断ひずみや残留変形等の応答性状を評価する。その結果を基に、強風時に免震層に極度の変形が生じないよう、建物を安全に設計する。この際、強風時の最大変形量を予測できる簡易評価法があれば、建物の設計に有用である。本章では、風荷重下の高減衰積層ゴムの変形特性を予測する「最大せん断ひずみ予測式」を、風荷重の時間 $t(\text{sec})$ 、静的せん断応力 $\tau_s(\text{MPa})$ 、動的せん断応力 $\tau_d(\text{MPa})$ の関数として提案する。2.2節の「静的加力試験」及び「動的加力試験」の結果を基に、「動的クリープ」を考慮した高減衰積層ゴムにおける風荷重下の最大せん断ひずみの予測式を、以下に示す。

$$\gamma_m(\tau_s, \tau_d, t) = C_1 t^{p_1} \tau_s^{q_1} + C_2 t^{p_2} \tau_s^{q_2} \tau_d^{r_2} \quad (2.1)$$

γ_m は「動的加力試験」において応力振幅 τ_d の動的せん断応力を与えた時、1 サイクル中に経験する最大せん断ひずみである。右辺第1項が静的に一定水平荷重を与えた場合のクリープを考慮した変形特性を表す項であり、右辺第2項が動的クリープも考慮するために追加された項である。 C_1 、 C_2 、 p_1 、 p_2 、 q_1 、 q_2 、 r_2 は「静的加力試験」及び「動的加力試験」の結果から決めるパラメータである。2.2節における試験結果に合うように、各パラメータを表6の通り決定した。また、不安定挙動を示した $\tau_s \pm \tau_d = 0.4 \pm 0.4(\text{MPa})$ を除く試験結果と評価式(2.1)の比較を図12に示す。評価式と試験結果が概ね合っていることがわかる。

表 6 評価式におけるパラメータ

C_1	C_2	p_1	p_2	q_1	q_2	r_2
1.76	4.50	0.0831	0.0481	1.63	0.691	1.08

3.2 解析モデル概要

本節では、高減衰積層ゴムの風応答時刻歴解析のための復元力モデルを提案する。モデルは、筆者らによって提案した変形履歴積分型の復元力モデルを基本とした⁹⁾。本研究にて提案する復元力モデル

ルのせん断応力-せん断ひずみ式（ τ - γ 関係式）を以下に示す。

$$\tau(\gamma) = aW(\gamma)\gamma + \sum_{i=1}^3 g_i \int_0^\gamma e^{-(\Gamma-\Gamma')^{q_i}} \left(\gamma'^2 - \frac{2}{3} \gamma \gamma' + 1 \right) d\gamma' \quad (3.1)$$

$$\Gamma = \Gamma(\gamma) = \int_0^\gamma |d\gamma| \quad (3.2)$$

$$W(\gamma) = \theta + (1 - \theta) \exp(-\gamma_{\max} / \beta) \quad (3.3)$$

Γ はせん断ひずみの変化量の累積値を表す。即ち、せん断ひずみ 100%の変形を 1 サイクル与えた場合には $\Gamma=4$ であり、単調加力した場合には $\Gamma=\gamma$ となる。 $W(\gamma)$ はゴムが大変形を受けた際の剛性低下を表現するためのダメージ関数であり、過去に受けた最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ の関数である。 $a, \theta, \beta, g_1, g_2, g_3, l_1, l_2, l_3$ は物性パラメータである。本式は、変形履歴積分型の弾塑性構成則から単純せん断ひずみ γ を与えたときの τ - γ の関係式を導出し、さらに繰り返しの剛性低下を考慮するために、ダメージ関数 $W(\gamma)$ を付加したものである。提案した復元力モデルの基本となる変形履歴積分型の弾塑性構成則は、時間依存性は示さず、過去の変形履歴に依存して応力緩和特性やクリープ的特性を示すのが特徴である。従って、提案した復元力モデルも時間依存性がないため、静的な一定荷重を与えた場合にはひずみは一定であり、時間とともにひずみが増大するクリープ特性は示さない。動的成分を与えて初めてクリープの挙動を示すのが特徴である。

式(3.1)～(3.3)から明らかなように、提案されたモデルは温度の影響を考慮していない。即ち、2 章の実験結果において温度の影響が大きかった $\tau_s \pm \tau_d = 0.4 \pm 0.4 \text{ MPa}$ のようなケースには適用できず、本提案式は温度上昇の影響が小さい範囲で適用が可能である。温度上昇は、積層ゴムの単位時間・単位体積当たりのエネルギー吸収量に直接関係する。図 8(b)からわかるように、周期 3sec、 $\tau_s \pm \tau_d = 0.3 \pm 0.3 \text{ MPa}$ のケースであれば加力 2 時間後の温度上昇は 10°C 程度である。従って、周期 3sec、 $\tau_s \pm \tau_d = 0.3 \pm 0.3 \text{ MPa}$ における単位時間・単位体積当たりのエネルギー吸収量よりも小さい場合に、提案モデル式(3.1)～(3.3)は適用可能である。

式(3.1)～(3.3)の各物性パラメータは、 $\tau_s \pm \tau_d = 0.4 \pm 0.2 \text{ (MPa)}$ と $\tau_s \pm \tau_d = 0.2 \pm 0.05 \text{ (MPa)}$ の実験結果における τ - γ 関係に合うように値を定めた。表 7 に同定した各物性パラメータの値を示す。

表 7 パラメータ値

a (MPa)	θ (-)	β (-)	g_1 (MPa)	g_2 (MPa)
0.64	0.35	0.8	1.62	0.445
g_3 (MPa)	l_1 (-)	l_2 (-)	l_3 (-)	
0.06	0.0417	2.66	200	

式(3.1)～(3.3)は水平 1 方向加力にのみを考慮した復元力モデルであるが、実際の風荷重においては風向方向のみでなく風向直交方向の風荷重も問題となることがある。上式同様に変形履歴積分型の弾塑性構成則より、単純せん断ひずみ γ_x, γ_y を水平 2 方向に与えたときの $\tau_x(\gamma_x, \gamma_y), \tau_y(\gamma_x, \gamma_y)$ を導出し、1 方向加力の場合と同様のダメージ関数

を付加した 2 方向復元力モデルを以下に示す。

$$\begin{cases} \tau_x(\gamma_x, \gamma_y) = aW\gamma_x + \sum_{i=1}^3 g_i \int_0^\Gamma e^{-(\Gamma-\Gamma')^{q_i}} \frac{d}{d\Gamma'} \left[\frac{1}{3} (\gamma'_x - \gamma_x) (\gamma'^2_x + \gamma'^2_y) + \gamma'_x \right] d\Gamma' \\ \tau_y(\gamma_x, \gamma_y) = aW\gamma_y + \sum_{i=1}^3 g_i \int_0^\Gamma e^{-(\Gamma-\Gamma')^{q_i}} \frac{d}{d\Gamma'} \left[\frac{1}{3} (\gamma'_y - \gamma_y) (\gamma'^2_x + \gamma'^2_y) + \gamma'_y \right] d\Gamma' \end{cases} \quad \dots (3.4)$$

$$\Gamma = \int_C \sqrt{d\gamma_x^2 + d\gamma_y^2} \quad \dots (3.5)$$

$$W(\gamma) = \theta + (1 - \theta) \exp(-\gamma_{\max} / \beta) \quad \dots (3.6)$$

Γ は変形開始から描いた 2 方向加力軌道の長さを表す。即ち、一定のせん断ひずみ γ で円軌道を 1 サイクル描いた場合は $\Gamma=2\pi\gamma$ である。式(3.4)～(3.6)において、 $\gamma_y = \gamma, \gamma_x = 0$ とした場合、式(3.1)～(3.3)と一致する。

3. 3 解析結果及び実験結果との比較

動的加力試験及び応答波加力試験における、 γ - t 関係の試験結果と解析結果の比較を以下に示す。3. 2 節でも述べたように、提案した復元力モデルは、静的に一定荷重を与えた場合にはひずみは時間とともに変化せず一定であり、表 3 の加力条件では動的加力が止まる 2 時間後以降は、クリープ特性を示さない。そのため、残留変形の評価ができないため、加力 2 時間後までを比較した。図 13 からわかるように、 $\tau_s \pm \tau_d = 0.4 \pm 0.4 \text{ MPa}$ を除いて解析モデルの結果と実験結果が高い精度で合致し、クリープ変形も再現できていることがわかる。一方、図 14 からわかるように、応答波加力試験との比較においては、風荷重がピークとなる間までは実験結果と解析結果が概ね合っている。しかしながら、風が弱まるにつれて実験結果の方が、せん断ひずみが大きくなる傾向を示し、危険側の評価となっている。最終的な残留ひずみも実験結果の方が大きい結果となった。これは、本解析モデルが面圧の影響を考慮していないことが原因の一つと考えられる。実際の実験においても、試験終了後に積層ゴムの鉛直荷重を除荷した瞬間に、残留変形が小さくなる現象が観測されており、面圧の影響が大きいことを示している。表 8 に最大変形量と残留ひずみについて、実験結果と解析結果の比較を示した。

表 8 最大変形量と残留ひずみにおける
実験結果と解析結果の比較

		最大せん断ひずみ	残留ひずみ
X-III	実験	0.72	0.23
	解析	0.80	0.15
X-II	実験	1.18	0.47
	解析	1.24	0.29

本解析モデルにて、高減衰積層ゴムの風荷重応答解析を実施することにより、概ね最大変形を予測できると考えられる。ただし、残留ひずみが過小評価になることに注意が必要である。また、急激な温度上昇が生じるような場合も変形が過小評価となるため、本解析モデルの適用範囲にも注意が必要である。

図 13 動的加力試験における γ - t 関係

図 14 応答波加力試験における γ - t 関係

1 方向風応答における試験結果と比較し、本研究にて提案した復元力モデルにて、高減衰積層ゴムの変形特性は概ね再現できることを確認した。先にも述べたとおり、風荷重は風向直交方向の影響が問題となることもあり、水平 2 方向変形における評価が必要である。復元力モデルも水平 2 方向加力を考慮したモデルが望ましい。そこで、風荷重時刻歴応答解析の水平 2 方向応答荷重の結果を、2 方向を考慮した復元力モデル式(3.4)～(3.6)に入力し、1 方向の場合との比較を行った。物性パラメータは表 7 のものを用いた。応答波は、1 方向の場合と同様に、鉛挿入型積層ゴムを想定した粗度区分 II の風荷重時刻歴応答解析の応答荷重の結果を用いた¹⁴⁾。風向方向の応答波は図 2(b)と同一であり、風向直交方向の応答波は図 15 に示した。図 14 と図 16 の比較からわかるように、残留変形については、水平 1 方向と水平 2 方向の場合で差が見られなかった。しかしながら、水平 1 方向における最大変形と水平 2 方向における最大変形を比較すると、水平 2 方向の方がせん断ひずみで 20%程度、変形が大

きいことがわかる。以上は、解析による結果ではあるが、風荷重を考慮した免震設計の場合には、水平 2 方向加力の影響の重要性が示唆され、実験による水平 2 方向の風応答評価の実施も今後の課題である。

図 15 X-II における風向直交方向の応答波

(a) γ_x - t 関係(風向方向)

(b) γ_y - t 関係(風向直交方向)

(c) τ_x - γ_x 関係(風向方向)

(d) τ_y - γ_y 関係(風向直交方向)

(e) 変形軌道

図 16 2 方向復元力モデルによる解析結果(X-II)

3. 4 風荷重時刻歴応答解析

本節では、3. 2 節にて検討した高減衰 2 方向復元力モデルを用いた風荷重時刻歴応答解析を実施し、高減衰積層ゴムの挙動予測を行う。ここでは、1 質点系の水平 2 方向加力モデルを用いた。想定した建物は、建築物荷重指針・同解説(2004)¹⁴⁾の「風荷重の算出例 2」に示されている超高層建物を基本としている。ただし、建物の長手方向が NS 方向と一致し、建物は平地に立地しているという簡略化を施している。建築物の概要を表 9 に、建築物の形状を図 17 に示す。図 17 からわかるように、風向方向は方位 W 方向とし、風向方向を x 方向(EW 方向)、風直交方向を y 方向(NS 方向)とした。風の継続時間は 5 時間とした。風力は、最初の 2 時間で線形に増大した後、1 時間のピークに達し、その後の 2 時間で線形に弱まるとした。免震装置については、2 章の実験評価に用いたのと同じゴム種の積層ゴムとし、積層ゴムの面圧を 15MPa、積層ゴムのゴム総厚を 200mm とした。以上の条件下で、本研究の 1 質点系モデルの固有周期は、変形 200mm(積層ゴムのせん断ひずみ $\gamma=1$)の場合に 4.4sec である。復元力モデルのパラメータは表 7 のものを用いている。

表 9 想定した建築物の概要

建築物重量	180kg/m ³
建築地	東京都 B 区 (基本風速: 36m/sec)
粗度区分	IV
設計用再現期間	500 年
1 次固有振動数	x 方向: 0.30Hz、振動モード $\mu(Z)=(Z/H)^{0.9}$ y 方向: 0.33Hz、振動モード $\mu(Z)=Z/H$ (Z: 地表面からの高さ、H: 建物の基準高さ)
1 次減衰定数	x、y 方向: 0.01

図 17 建物の形状及び風方向

入力風荷重波は、以下の手順に従って作成した。

- ① 「建築物荷重指針・同解説(2004)」の構造骨組用水平荷重の算出法に従い、風向方向の風荷重 W_x 及び風向直交方向の風荷重 W_y を算出する。
- ② ①で算出した風荷重から、風向方向の風応力の静的成分 τ_{sx} と動的成分 τ_{dx} 及び風向直交方向の風応力の動的成分 τ_{dy} を以下の通り規定する。 A は全ての積層ゴムの有効断面積の総和、 G_D は①で風荷重の導出過程で算出されるガスト影響係数である。
$$\begin{cases} \tau_{sx} = W_x / (AG_D) \\ \tau_{dx} = W_x / A - \tau_{sx} \\ \tau_{dy} = W_y / A \end{cases} \quad \dots (3.7)$$
- ③ ②で算出した τ_{sx} 、 τ_{dx} 、 τ_{dy} の値をもとに、表 10 に示した条件で、入力波を生成する。以上の仮定のみでは、詳細な波形の予測は非常に困難なため、波形はホワイトノイズを仮定する。具体的

には、ボックス-ミュラー法によって正規乱数を2秒おきに発生させ、それらのポイント間を線形補完し、表10の条件を満たすように規格化することで波形を生成する。ただし、風向方向の風荷重は、上限値 $\tau_{sx}+\tau_{dx}$ と下限値0を超えない範囲とし、風向直交方向の風荷重は、上限値 $+\tau_{dy}$ と下限値 $-\tau_{dy}$ を超えない範囲とする。

表10 入力風荷重波の条件

風向方向	静的成分	$F(t)\tau_{sx}$
	動的成分	変動幅(RMS)= $F(t)\tau_{dx}/3$ (MPa)のホワイトノイズ
風向直交方向	静的成分	0
	動的成分	変動幅(RMS)= $F(t)\tau_{dy}/3$ (MPa)のホワイトノイズ

※ $F(t)$ は風力の時間変化を表す関数であり、以下で定義される。 t は経過時間(hour)である。

$$\begin{cases} F(t)=0.5 \times t & (0 \leq t < 2) \\ F(t)=1 & (2 \leq t < 3) \\ F(t)=2.5-0.5 \times t & (3 \leq t \leq 5) \end{cases}$$

以上の計算条件から算出された τ_{sx} 、 τ_{dx} 、 τ_{dy} の値は、それぞれ、 $\tau_{sx}=0.327(\text{MPa})$ 、 $\tau_{dx}=0.465(\text{MPa})$ 、 $\tau_{dy}=0.547(\text{MPa})$ となった。作成された入力波を、図18に示す。数値解析には4次のRunge-Kutta法を用い、時間刻みは $\Delta t=0.001\text{sec}$ とした。

(a) x 方向(風向方向)

(b) y 方向(風向直交方向)

図18 入力波形

(a) γ_x - t 関係(風向方向)

(b) γ_y - t 関係(風向直交方向)

(c) 変形軌道

図19 時刻歴応答解析結果

時刻歴応答解析結果を図19に、風向方向のせん断ひずみ γ_x 、風向直交方向のせん断ひずみ γ_y 及び2方向におけるせん断ひずみ $(\gamma_x^2+\gamma_y^2)^{1/2}$ の、最大値と残留ひずみの結果を表11に示す。3.3節で提案した簡易評価式において、 τ_s 、 τ_d 、 t にそれぞれ風向方向の静的成分 $\tau_{sx}=0.327(\text{MPa})$ 、動的成分 $\tau_{dx}=0.465(\text{MPa})$ 、ピーク時の継続時間 $t=1(\text{hour})$ を代入した場合、最大せん断ひずみは1.91となる。風向方向のみに着目すれば、時刻歴応答の結果における最大せん断ひずみは予測式よりも小さい1.75であり、簡易評価式の結果が安全側の評価となっていることがわかる。しかしながら、2方向を考慮した場合、最大せん断ひずみは予測式の値1.91を上回り、1.94という結果となった。入力波形の予測の困難さから、本論文ではホワイトノイズを仮定した風荷重を用いている。その妥当性は別途検討が必要だが、以上の結果から、風向直交方向の影響も無視できず、2方向を考慮することの重要性が理解される。

表11 時刻歴応答解析における最大せん断ひずみと残留ひずみ

	最大せん断ひずみ	残留ひずみ
風向方向(x 方向)	1.75	0.16
風向直交方向(y 方向)	0.84	0.00
$(\gamma_x^2+\gamma_y^2)^{1/2}$	1.94	0.16

4. まとめ

高減衰積層ゴムにおける風応答特性の評価試験を実施した。一般に復元力と減衰性能を併せ持つ免震装置は、一定荷重を与えた場合にクリープ変形を示す。風応答評価試験の結果、高減衰積層ゴムのクリープ特性は風荷重の静的成分だけでなく、動的成分にも依存することがわかった。即ち、静的成分を一定とし、動的変動成分を様々なに変化させた場合のクリープ特性を調べると、動的変動成分が大きい程、積層ゴムの水平変形が大きくなる性質を示すことが明らかとなった。また、動的な繰り返し加力によるエネルギー吸収によって、積層ゴムの内部温度が急激に上昇するような場合には、水平変形が急激に増大する不安定現象が確認された。

実験によって確認された動的クリープ変形を考慮し、高減衰積層ゴムの風荷重下の最大せん断ひずみを予測する簡易評価法及び時刻歴応答解析を目的とした復元力モデルを提案した。また、実験結果と比較することで、簡易評価式及び復元力モデルの妥当性について検証した。温度上昇による不安定挙動を示す場合を除き、簡易評価式及び復元力モデルともに、概ね試験結果を再現できることを確認した。しかしながら、温度上昇の影響は積層ゴムの変形特性に大きな影響を与えることも実験から明らかである。今後は温度上昇の影響を考慮した復元力モデルの構築が課題の一つである。また、本研究における復元力モデルは、残留変形が過小評価になり、2章の実験結果で示されたような、除荷後に残留変形が小さくなるクリープ特性も再現できない。今後は、除荷後の特性も含めて残留変形の予測が可能な復元力モデルの構築が課題である。

謝辞

本研究中にある実験・解析に用いた風荷重応答波形は基準整備事業 12「免震建物の基準の整備に資する検討」の成果に基づき実施しています。データ提供にあたり、鹿島建設株式会社、竹中康雄氏、近藤明洋氏にご尽力および多くの助言をいただき、ここに謝意を表します。また、東京理科大学北村春幸教授、日本大学神田亮教授、北海道大学菊地優教授には、本研究に対する貴重な助言に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 仲村崇仁, 竹中康雄, 池永雅良, 鈴木雅靖, 河内山修, 吉川和秀, 金子修平: 高層免震建物の風応答における LRB の健全性に関する研究(その 1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.489-492, 2003.9
- 2) 河内山修, 仲村崇仁, 金子修平, 和田章: 風応答における高層免震建物の LRB の健全性評価, MENSIN, 47, pp.47-53, 2005.2
- 3) 竹中康雄, 飯塚真巨, 鈴木雅靖, 吉川和秀, 山田和彦: 鉛プラグ型積層ゴムのクリープ性を考慮した高層免震建物の風応答簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp.89-94, 2002.11
- 4) 鈴木雅靖, 上野薫, 竹中康雄, 吉川和秀, 鈴木重信: 高層免震建物の台風時における免震装置に関する動的加力実験, 風工学シンポジウム論文集 16, pp.417-422, 2000.12
- 5) 竹中康雄, 菊地隆志, 鈴木雅靖, 飯塚真巨, 山田和彦, 吉川和秀, 二村有則, 鈴木重信: 高層免震建物の風応答に関する研究(その 2~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.677-680, 2001.9
- 6) 加藤秀章, 森隆浩, 室田伸夫: 高減衰系積層ゴムの風荷重応答に関する積層ゴム加力実験(その 1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.817-820, 2009.8
- 7) 安井八紀, 大熊武史, 丸川比佐夫: クリープ変形を伴う免震建物の風応答性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 619 号, pp.41-48, 2007.9
- 8) 森隆浩, 加藤秀章, 室田伸夫: 変形履歴積分型の弾塑性構成則を用いた高減衰積層ゴムの FEM 解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 658 号, pp.2171-2178, 2010.12
- 9) 森隆浩, 加藤秀章, 竹内貞光, 菊地隆志, 室田伸夫: 風荷重の動的成分が高減衰系積層ゴムの応答特性に与える影響に関する実験的研究及び解析モデルの検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 676 号, pp.1721-1728, 2011.9
- 10) 「高減衰積層ゴム(X0.6R タイプ)技術資料」, (株)ブリヂストン, 2011.5
- 11) 鈴木雅靖, 竹中康雄, 近藤明洋, 飯場正紀, 大熊武司, 松井正宏, 安井八紀, 吉江慶祐: 高層免震建物の風応答時刻歴解析による検討(その 1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.277-280, 2010.9
- 12) 鈴木雅靖, 近藤明洋, 竹中康雄, 飯場正紀, 大熊武司, 松井正宏: 高層免震建物の風応答時刻歴解析による検討(その 3~4), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.613-616, 2011.8
- 13) 菊地隆志, 竹内貞光, 森隆浩, 加藤秀章, 室田伸夫: 高減衰ゴム系積層ゴム支承における風荷重の研究(その 1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.513-516, 2011.8
- 14) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善, 2004

(2011年9月8日原稿受理, 2012年2月23日採用決定)