

軽量構造物用免震システムの開発

—— 木造2階建酒蔵建築に適用したソフトランディング免震構法 ——

寺村 彰 野畑 有秀 稲葉 学
田中 耕太郎 南保 光
(本店 建築設計第6部) (神戸支店 営業第9部)

Development of Base-isolation System for Lightweight Structure

—— Rubber Bearing Isolation with Soft Landing System Applied to 2-story Wooden Structure ——

Akira Teramura Arihide Nobata Satoru Inaba
Koutarou Tanaka Hikari Nanbo

Abstract

When a laminated rubber bearing base-isolation system is used in a lightweight structure, it is difficult to ensure that the rubber bearing can withstand larger deformation and longer period. This report describes the application of a laminated rubber bearing and soft landing system to a 2-story wooden structure. The soft landing system can prevent buckling of the laminated rubber bearing in case of strong earthquake motion, which was confirmed by earthquake response analysis. As a result, the seismic performance of the structure and the effect of the soft landing system were verified.

概 要

木造建物、鉄骨造低層建物などの軽量建物へ積層ゴム免震構造を適用するに当たり、軽量であるがゆえに積層ゴムが小型化して変形能力と長周期性の確保が難しくなるという課題が生じる。本論文は、木造2階建物を例として、この課題に対する一つの解決方法を検討したものである。この木造建物は兵庫県南部地震で倒壊し、その復元工事に当たり恒久的な耐震性を確保する目的で積層ゴムとソフトランディング装置から成る免震構法を採用した。ソフトランディングは強震時に建物荷重を支持する機能により小型積層ゴムの座屈防止に、また滑り摩擦抵抗がダンパーとして機能することにより免震装置の変位抑制に寄与する。地震応答解析において、兵庫県南部地震のときサイト近くで観測された大阪ガス暮合供給所観測波（入力速度123cm/s）に対する変位応答がソフトランディング装置により抑制され、かつ、上部構造物が耐震性能を満足することを確認した。

1. はじめに

木造建物などの軽量建物に、積層ゴム免震構法を適用することは、その重量が軽いため積層ゴムが小型化して、強震時の変形能力と長周期性を確保することが一般に難しいと考えられている。この解決方法として、厚いコンクリート床スラブを敷設して重量を増す、支持スパンを大きくして積層ゴムの負担過重を大きくするなどの方法がある。近年、軽量建物用に転がり支承の免震構法が開発されつつあるが、低コストな積層ゴムの使用に限ると、さらに、小型積層ゴムを採用して長周期性を確保し、変形能力の解決に同積層ゴムにバックアップ装置を設けるという考え方がある。

このバックアップ装置としては、免震装置の水平荷重 Q ～変形 δ 関係において、順次、ハードニング傾向を表す衝撃吸収装置などのストッパーを設けて変位を抑制する方法がある。しかし、これらの装置は振動吸収ととも

に弾性ばね剛性が漸増傾向が強くなり、このため、蓄積される弾性歪エネルギーが温存されて、開放時の変位反転時に大きな衝撃力を発生する性質がある。一方、当社開発のソフトランディング装置を設ける方法は、後述するように、水平荷重 Q ～変形 δ 関係においてハードニングの様相を呈するものの、純粋に摩擦消費エネルギー特性によるものであり、変位反転時の衝撃は少ないという性質がある。

本論文は、軽量構造物の免震化の際に問題となる免震装置の長周期性、変形能力の確保という課題を克服するために採用したソフトランディング装置を付与する免震構法について、木造建物を例として、その概要、免震性能と地震解析について述べる。

2. 建物の概要

江戸時代末期に建てられた木造2階建の酒蔵資料館

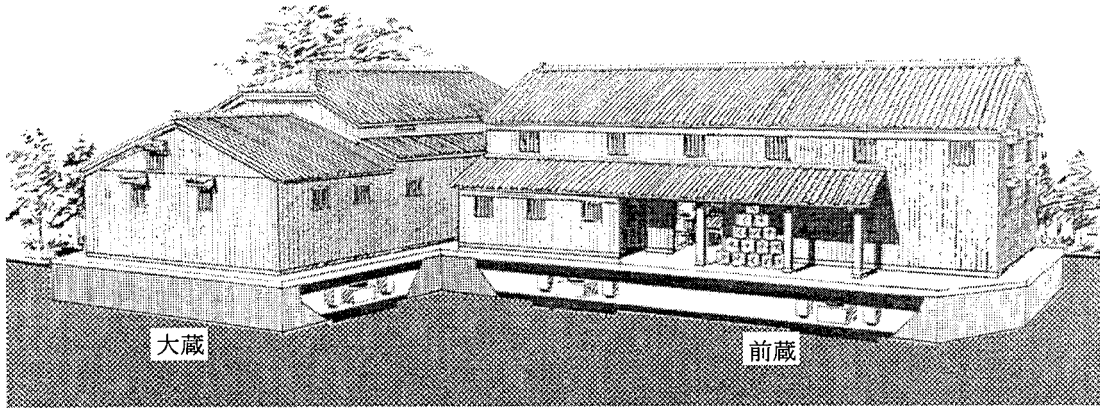


Fig. 1 建物外観図
Schematic of the 2-story Wooden Structure

Table1 耐震性能の目標値
Seismic Performance

入力速度	標準波50cm/s	葺合波123cm/s
上部構造	弾性限度以内	水平保有耐力以内
免震構造	せん断歪200%以下	せん断歪400%以下
基礎構造	短期許容応力度以内	弾性限度以内

(神戸市灘区)は、1980年に兵庫県重要民族文化財の指定を受けたが、この度の兵庫県南部地震で倒壊した。その復元工事に当たり、文化財として内観・外観を損なわずに恒久的な耐震性を確保する目的で免震構造を採用した。この木造建物は、Fig. 1に示すように前蔵と大蔵の同規模の2棟から構成され、その規模、構造などは次のとおりである。

名称：兵庫県指定文化財「沢の鶴株式会社大石蔵」

規模：木造2階建，瓦葺屋根，延べ面積977m²

免震構法：高減衰積層ゴム+ソフトランディング[®]免震構造

1階スラブ：ハーフPC-RC床板（厚さ：120mm），

プレストレスRC梁

荷重：約860tf（積層ゴム支持全荷重）

地盤：液状化無し，布基礎形式

3. 免震設計の概要

3.1 免震性能の目標

レベル1 (25cm/s) およびレベル2 (50cm/s) の標準的な地震波(八戸波, エルセントロ, 等) と, レベル2を越える安全裕度の検討として, 兵庫県南部地震のとき現地近くで観測された大阪ガス葺合観測波(123cm/s, 802cm/s²) とに対して, 各構造部の耐震性能の目標値はTable1のように設定した。

3.2 葺合観測波に対する免震構造システムの検討

葺合観測波の変位・加速度応答スペクトルをFig. 2に示す。Fig. 2より, 免震装置の周期および減衰定数を周期 $T=3$ 秒, 減衰定数 $h=C/C_c=0.10$ (10%) と設定した場合の応答は, 変位80cm, 加速度350cm/s²程度に概算される。この免震建物に適用する積層ゴムは軽量構造物用であるので, 一般建物用の積層ゴムに比べて小型になる(実際に適用した積層ゴムの直径は550mm)。よって, この変位80cmは積層ゴムの座屈限界や直径を超えるため, 変位抑制対策が重要となった。変位抑制対策としては, 以下に示すように, いくつかの方法が考えられる。

1) ストップ方式: $Q \sim \delta$ 曲線で暫時ハードニング傾向を示すストップを設ける方法があるが, 積層ゴムの座屈限界変位以内ではハードニングの勾配が急激となり上部構造に大きなせん断力を発生させる

2) 滑り支承方式: オイル系や粘性系ダンパより変位抑制効果は優れるが, 摩擦係数を大きくすると上部構造の層せん断力が大きくなり免震効果が得にくい

3) オイルダンパの付与: 文化財建物では維持管理の不要な乾式ダンパが望まれるが, 仮に, 過大変形時にオイルダンパを付与したとしても, 応答スペクトルより座屈限界変位未満にすることは難しい

4) ソフトランディング方式: 座屈変形以上に対して建物荷重を支持し, 暫増する摩擦減衰により上部構造に衝撃を与えず変位を抑制することができる

以上の選択肢の中から, 免震性能を保持しつつ変位を抑制できるソフトランディング方式が最良であると判断した。

3.3 復元工事の構造計画

木造建物は単位面積当たりの重量がRC造やS造と比べて軽く水平剛性が小さいため, 構造計画では次の方法を採用した。

1) 木造建物の水平剛性と耐力の向上を図るため, 外壁内に鉄筋ブレース付鉄柱を埋込む補強法を採る。

2) 建物荷重を集めて免震装置の数量を減じるため, 1階の木造柱脚下にPSコンクリート梁を配して大スパン架構とする。

3) 1階は土間として土盛りが必要であるため, このPS梁上にハーフPC版を敷設しRC床版を設けた。

4) 大スパン架構を, 重量115tf用の高減衰積層ゴム8個で支持しこの積層ゴムの両側にソフトランディング装

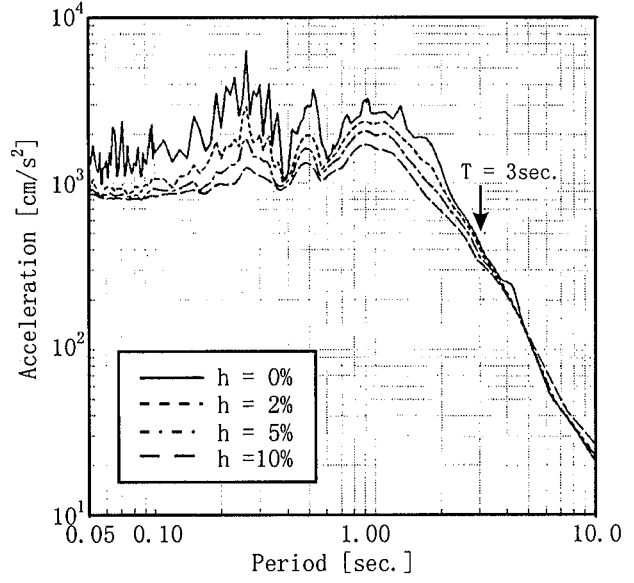
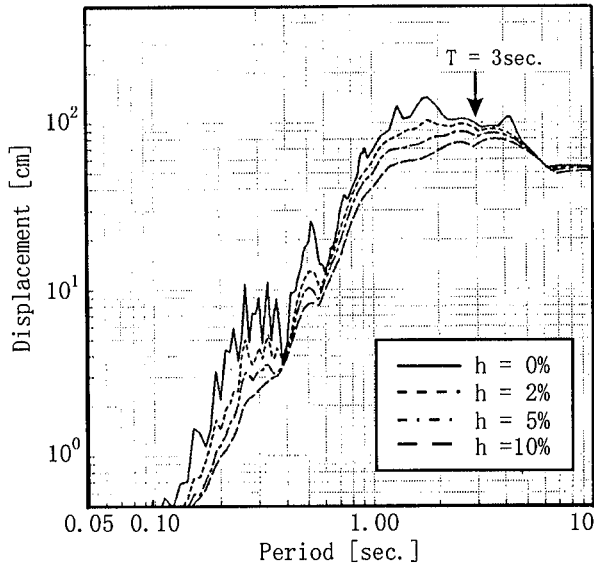


Fig. 2 葺合観測波の変位・加速度応答スペクトル
Response Spectra of Displacement and Acceleration

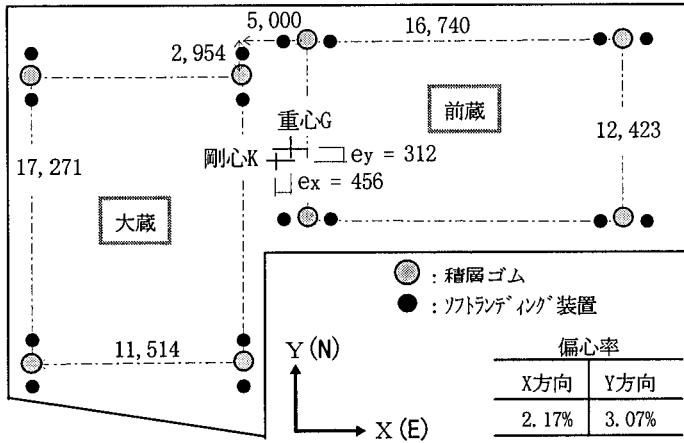


Fig. 3 積層ゴムおよびソフトランディング装置配置図
Site Plan

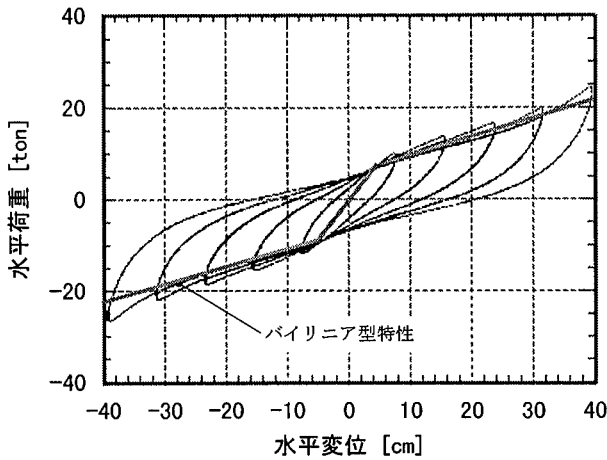


Fig. 4 高減衰積層ゴムの復元力特性
Hysteresis Characteristics

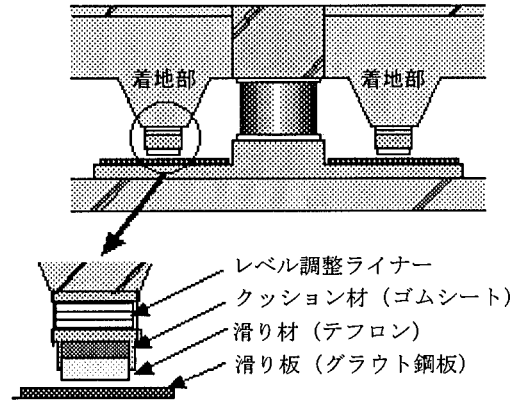


Fig. 5 ソフトランディング装置の断面図
Cross Section of Soft Landing System

置を設ける。

5) この8カ所の免震装置部はそれぞれその場所のみ掘削した地下ピットに収納する。

6) 地下ピットは直接基礎支持とし、基礎間の面外剛性を確保するためRC梁で連結する。

4. 免震装置の概要

4.1 免震装置の配置

免震装置は高減衰積層ゴムとソフトランディングとで構成される。積層ゴムは8基、ソフトランディングは積層ゴム1基に対して2基、計16基設置されている。積層ゴムは、免震層に過大なねじれが生じないように重心位置と剛心位置の偏心率が数%以内に収まるよう配置した。Fig. 3に積層ゴムとソフトランディング装置の配置図を示す。

4.2 免震積層ゴム

積層ゴムは高減衰積層ゴムで、その諸元は以下のとお

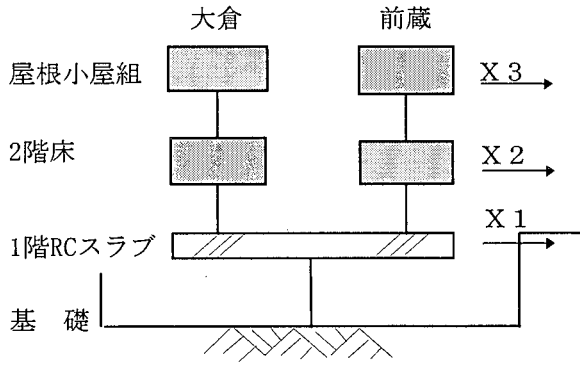


Fig. 6 解析モデル
Analytical Model

Table2 解析モデルの諸元
Parameter of Analytical Model

	大蔵			前蔵		
	重量 (tf)	剛性 (tf/cm)		重量 (tf)	剛性 (tf/cm)	
		X方向	Y方向		X方向	Y方向
小屋組み	48	18	34	51	39	29
2階	65	54	53	64	51	51
1階	重量 : 632.2tf					

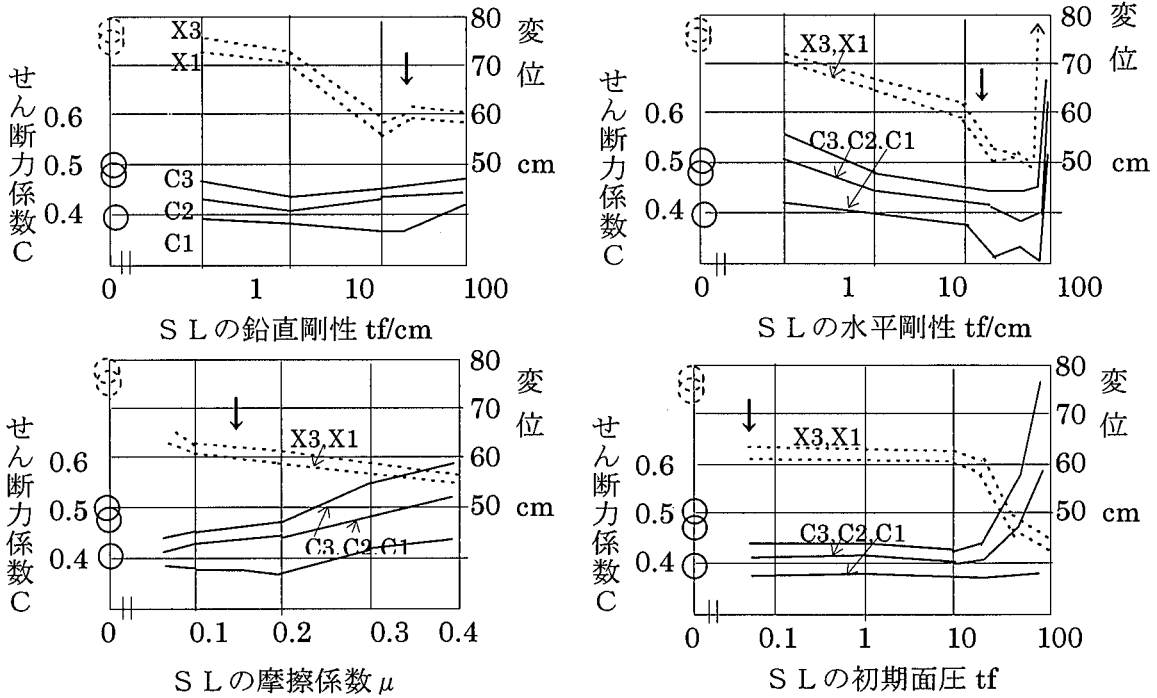


Fig.7 ソフトランディング装置の諸定数を決めるパラメータスタディ結果
Results of Parametric Study

りである。

- 設計荷重 : 115tf 直径 : 550mm
- 形状・材質等 : ①内部ゴム厚5mm, 32層, 総厚16cm
- ②内部鋼板SPHC2.2mm, 31層
- 水平ばね定数 : 10cmで1.19tf/cm, 20cmで0.80tf/cm
- 鉛直ばね定数 : 1,230tf/cm

この高減衰積層ゴムの水平方向復元力特性をFig. 4に示す。同図中には、復元力特性をバイリニア型で置換した特性も折線で示す。このときの各値は、初期剛性1.687tf/cm, 剛性比0.2174, 降伏荷重4.747tfである。

4.3 ソフトランディング装置

Fig. 5にソフトランディング装置の断面構造を示す。ソフトランディング装置は、滑り材としてのテフロン、滑り板としてのグラウト鋼板、積層ゴムの沈み込みに伴い徐々に荷重を支持するためのクッション材であるゴムシートおよび滑り材と滑り板の初期面圧を調整するため

のレベル調整ライナーで構成される。

5. 動的解析

5.1 動的解析モデル

5.1.1 解析モデル 1階のRC床スラブは共通で、前蔵と大蔵とは分離された構造である。構造計画で示したように1階RCスラブ上の剛心と重心の偏心距離は少ないので、ここで用いる振動モデルは、Fig. 6に示す“小屋組み～2階床～1階床”の3層並立モデルとする。また、積層ゴムとソフトランディングから成る免震層のモデルは、積層ゴムの水平剛性はLindlyの剛性式にハードニングをべき関数で表現する非線形剪断ばね特性式¹⁾を用い、鉛直剛性はゴムの支圧面積および曲げ剛性による沈み込みを考慮する非線形ばね式¹⁾を用いて、水平および鉛直自由度に関するロッキング・スウェイモデルとした。

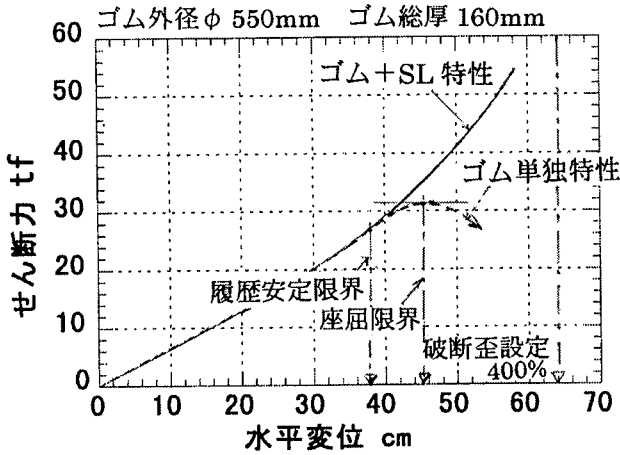


Fig. 8 積層ゴムの水平変位とせん断力の関係
Relationship between Horizontal Displacement and Shear Force

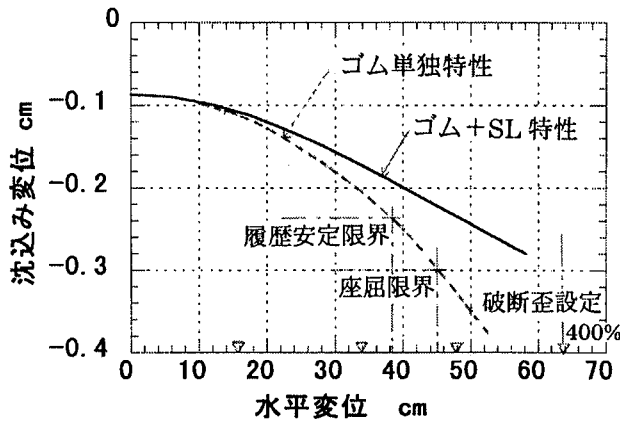


Fig. 9 積層ゴムの水平変位と沈込みの関係
Relationship between Horizontal and Vertical Displacement

5.1.2 上部構造の諸定数 Table2に上部構造の質量および剛性を示す。なお、表中の値は構造設計書の記載値であり、剛性は木造構造および鉄骨枠の剛性が含まれる等価せん断剛性である。

鉄骨枠補強を含む木造構造の1次減衰定数は下記の根拠により $h=5\%$ とした。

- ・同規模木造酒蔵の測定値： $hw=7.2\% \sim 9.3\%$
- ・鉄骨枠の想定値： $hs=2\%$
- ・平均減衰定数 $h=(1/2)\tan\delta=0.046$ (約5%)

但し、複素剛性系減衰 $kw^*=2hkw$, $ks^*=2hsks$ より $\tan\delta=(kw^*+ks^*)/(kw+ks)$ である。ここで、木造部と鉄骨枠の水平剛性 kw , ks はほぼ $kw=ks$ である。

5.2 ソフトランディングの特性

5.2.1 ソフトランディングの諸定数 ソフトランディング装置の特性を決めるものとして、装置の鉛直剛性、水平剛性、摩擦係数および初期面圧がある。これら諸定数は、葺合観測波入力に対して、Fig.6の解析モデルを用いてパラメータスタディを行い決定した。解析の結果、上部構造と免震層の変位と剪断力の両者を配慮して、ソフトランディング(1セット2基分)の諸定数を

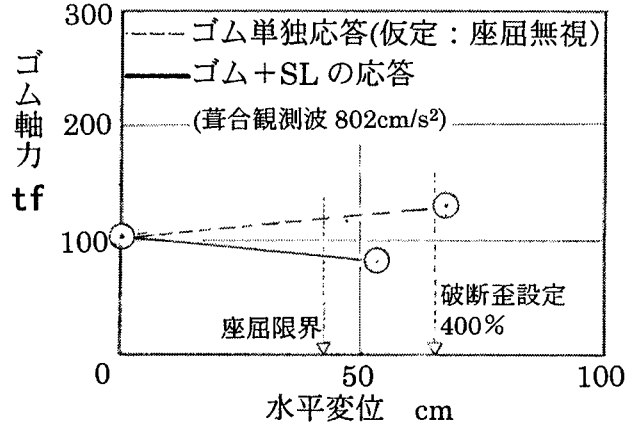


Fig. 10 水平変位と積層ゴム軸力の関係
Relationship between Horizontal Displacement and Axial Load

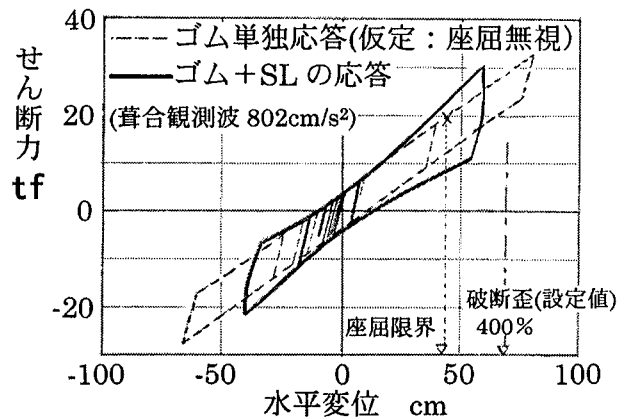


Fig. 11 免震層の水平変位とせん断力の関係
Relationship between Horizontal Displacement and Shear Force

Fig.7中に↓印で示すように、鉛直剛性約200tf/cm, 水平剛性約120tf/cm, 摩擦係数0.15, 初期面圧0.050tfと決めた。なお、同図の実線は左軸の応答せん断力係数(C3,C2,C1), 破線は右軸の応答変位(X3,X1), 横軸零の○, □印はソフトランディングが無い場合(復元力のみ)の応答値である。

また、この解析結果から、ソフトランディング装置の諸定数が変化しても、免震性能の変化は小さいことがわかる。ソフトランディング装置の鉛直剛性および水平剛性は、装置を構成する部材の特性で決まっているので、環境の変化に対しては、変動が小さいと考えられる。一方、摩擦係数や初期面圧は、環境の変化に対して変動する。摩擦係数は、摩擦面の状態(塵芥の堆積, 浸水等)により変動し、初期面圧は温度変化や経年変化による積層ゴムの高さ変化により変動する。しかし、解析結果から、摩擦係数は0.1~0.2の範囲で、初期面圧は0.05~10の範囲で変動しても、免震性能の変動は小さく、ソフトランディング装置は安定した性能を発揮する免震装置であることがわかる。

5.2.2 積層ゴムとソフトランディングの特性 今回使用した高減衰積層ゴムの水平変位とせん断力の関係を

Fig. 8に、水平変位と沈み込み変位の関係をFig. 9に示す。積層ゴム単体では、図中の“ゴム単独特性”に示すように、変形約38cmで履歴安定限界、約46cmで座屈限界に達する。しかし、この積層ゴムにソフトランディング（以下、SLと呼ぶ）を組合わせた場合には、図中“ゴム+SL特性”に示すように、履歴安定限界や座屈限界には至らず、破断変位まで安定している。これは、沈み込み変位の増加に伴い、鉛直荷重が順次ソフトランディングへ移行するためであり、これは振動台実験でも確認している¹⁾。また、破断変位は学会大会論文などの実験データから500%以上といわれるが、ここでは安全率を考慮して400%に制限して、Table1“耐震性能目標値”に示した。

5.3 地震応答解析

5.3.1 建物の固有周期 上部構造周期は補強後0.35～0.40秒であり、免震周期は水平変位20cmのとき約3.0秒である。

5.3.2 レベル2強震動入力に対する応答 標準波レベル2入力に対する免震層1階の応答せん断力係数は $C=0.13$ 、水平変位は20.8cm(同130%)となりTable1の目標値を満たした。

5.3.3 葺合観測波123cm/s入力に対する応答 レベル2を超える葺合観測波に対する応答計算は、積層ゴム単体の場合とソフトランディングを付与した場合(ゴム+SL)を実施した。ここで、積層ゴムは、座屈変位を超える場合の計算方法が確立されていないため、Fig. 4に折線で示したバイリニア型置換の $Q-\delta$ 特性を用いた。この結果、Fig. 10より最大変位時の積層ゴムの軸力は長期荷重および転倒モーメント変動荷重の和の約2/3程度に減り、SL装置が残り約1/3を負担する。また、Fig. 11の水平変位とせん断力の関係より、変位20cm以上でソフトランディングが着座しはじめ滑り摩擦抵抗力が暫増し、ゴム単体仮定の場合と比べて免震層の最大変位が抑制されて目標値400%以下となることがわかる。なお、上部構造の鉄筋ブレース枠等の補強は、この葺合観測波に対する最大応答せん断力に基づいて設計したものである。

6. まとめ

比較的軽量な木造2階建て建物に、小型高減衰積層ゴムとソフトランディングで構成される免震構法を採用し、軽量構造物の免震化という課題に対する一つの解決策を示した。また、安全性および免震性能を確認する目的で行った地震応答解析結果より、以下の事柄が明らかになった。

1) 強震動レベル1およびレベル2入力に対して高減衰積層ゴムは履歴安定限界約32cm(200%)以内の応答変位20.8cmであること確認した。

2) 安全余裕度検討用の葺合観測波入力に対して、高減衰積層ゴムのせん断許容歪みを400%と設定してその値以内の応答になることを確認した。免震層の最大変形は、ソフトランディングの無い仮定での78.5cm(490%)に比べて、有る場合に58.2cm(360%)である。

3) ソフトランディングは、水平変位の増加に伴い暫増する摩擦ダンパーとして機能する。

4) 積層ゴムの最大応答軸力は、建物荷重および転倒モーメントによる変動荷重の和の内2/3に低減し残り1/3をソフトランディングが負担する。

5) 上部構造の鉄筋ブレース枠補強は安全余裕度検討用地震波に対する最大応答せん断力に基づいて設計された。

以上より、ソフトランディング免震構法は、軽量構造物の免震構法として有効な手段であることを確認した。

参考文献

- 1) 寺村, 野畑, 他: 免震装置のフェールセーフ機構に関する研究(その3), 大林組技術研究所報, No. 53, (1996)
- 2) 寺村, 野畑, 他: 防護装置を有する免震構造物の大変形時の応答特性(その2: ソフトランディングタイプ), 第9回日本地震工学シンポジウム, (1994)
- 3) 飯塚, 笠原: 水平変位を受ける積層ゴムの鉛直剛性評価式, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1996)