

線路上空建物の免震防振化における 架構形式の構造性能に関する研究



山高 円*



星川 努*

既往の研究で、線路上空建物の免震技術を導入することにより、地震時の建物の応答が低減され、下部構造を縮減できる可能性が示されている。また、設計施工上の制約が多い線路上空空間において、線路階での建築限界を確保しつつ、免震層のスペースを極力小さくするために、ダブルガーダーと呼ぶ架構形式を提案している。本研究では、ダブルガーダーの構造性能を明らかにするために積層ゴムとダブルガーダーで構成された縮小試験体を用いて静的加力実験を行い、実験結果のシミュレーションによってダブルガーダーの設計手法を確立した。

●キーワード：線路上空建物、免震、積層ゴム、静的加力実験

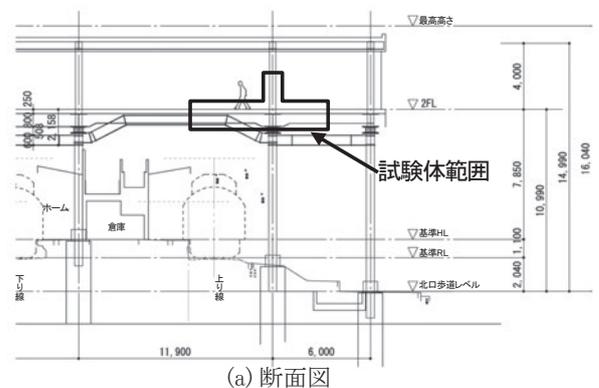
1. はじめに

線路上空空間の有効活用の観点から、線路上空建物の免震化において、積層ゴムやダンパーなどの免震装置の設置スペースを確保しつつ免震層高さを極力抑える架構形式を提案した¹⁾。その架構形式について、免震層周りの縮小モデルによる構造実験を実施し、実験結果をもとに設計手法の提案とその妥当性の検証を行った。

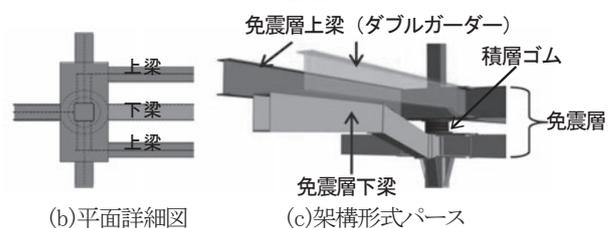
2. 架構形式の概要

地上2階建（1階：線路階、2階：コンコース階）、上部構造が鉄骨純ラーメン架構の、ある線路上空建物（以下、想定建物）に免震工法を導入した場合の架構形式を図1に示す。免震層の変位によって線路階の列車運行やホーム上の旅客流動を阻害しないように線路階直上に免震層を設ける中間層免震としている。また、建築限界を侵さないように線路階の空頭を確保するために、一般的には直線状である免震層の下梁を折り上げた形状としている。そして、免震層の上梁を2本の大梁（以下、ダブルガーダー）とし、折り上げた下梁をそれらの間に配置することで、免震層の高さを縮減しつつダンパーの設置スペースを確保している。

このディテールでは、ダブルガーダーは免震層直上の柱に直接柱に取り付かず、ダブルガーダーと直交する大梁を介して取り付くことになる。その場合、ダブルガーダーは作用する曲げモーメントを直接柱に伝達することができないため、直交する大梁のねじり抵抗で伝達することになる。そこで、免震層周りの構造性能を確認するために、図1に示す部分を再現した縮小モデルの試験体を用いて静的加力実験を行う。



(a) 断面図



(b) 平面詳細図

(c) 架構形式パース

図1 線路上空建物の免震化の概要

3. 実験概要

3.1 試験体概要

図2に試験体形状・寸法を示す。試験体は免震層上部の架構をモデル化した。試験体の縮尺は1/1.6とし、免震層およびその上部の柱の反曲点までと両側の梁の反曲点までをモデル化した。柱は□-300×300×16 (STKR400)、柱に直接取り付く梁はH-400×200×8×13 (SS400) とし、大梁を介して取り付くダブルガーダーはH-500×200×10×16 (SS400) とした。積層ゴムには免震防振積層ゴム (RV30-520-27.2×3) を用い、積層ゴムの下面は固定支持とした。

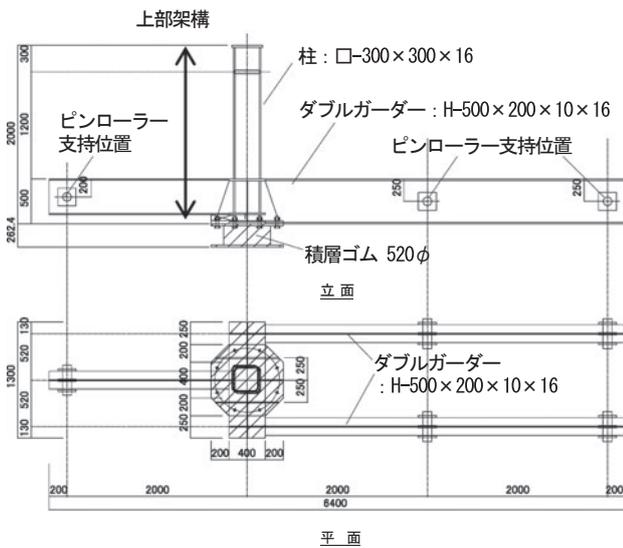


図2 試験体概要

表1に実験パターンの一覧を示す。パラメータは柱が中柱の場合と側柱の場合、およびダブルガーダーのスパンとした(実験パターン1~4)。中柱を想定する場合は柱に直接取り付く側の梁をピンローラー支持とし、側柱を想定する場合はピンローラー支持を自由端とした。また、ダブルガーダーのスパンの長短はダブルガーダーに設けたピンローラー支持の位置を変更することで実現した。

表1 実験パターン一覧

実験パターン	ダブルガーダースパン	柱位置
1	長い	中柱
2	短い	
3	長い	側柱
4	短い	

表2に試験体に用いた鋼材の機械的性質を示す。

表2 鋼材の機械的性質

部位	径 板厚	鋼種	降伏応力度 $\sigma_y(N/mm^2)$	降伏ひずみ $\epsilon_y(\mu)$	引張強さ $\sigma_u(N/mm^2)$	降伏比 Y.R.	伸び $\epsilon(\%)$
柱	16mm	STKR400	400	1951	486	0.82	38
パネル	19mm	STKR400	407	1985	485	0.84	40
ダブルガーダー H-500×200×10×16		SS400	361	1761	458	0.79	29
梁 H-400×200×8×3		SS400	322	1571	460	0.7	30
上ダイヤフラム	22mm	SN400B	290	1415	426	0.68	33
下ダイヤフラム	19mm	SN400B	325	1585	429	0.76	34
大梁ウェブ	9mm	SN400B	329	1605	442	0.74	30
補強リブ	12mm	SN400B	278	1356	433	0.64	32
免震層取付部	32mm	SN400B	271	1322	419	0.65	34

3.2 载荷方法

図3に加力装置の概要を示す。想定建物の設計時における積層ゴムの平均面圧に相当する軸力(269kN(自重除く))を試験体の柱に油圧ジャッキで与え、柱の反曲点位置を水平方向に载荷した。梁の反曲点はピンローラー支持であり、

鉛直力のみ抵抗する。この鉛直力をピン型ロードセルで測定し、梁に作用する曲げモーメントを求める。

図4に試験体および加力装置の全景と、軸力(269kN)導入後の積層ゴムの状況を示す。

载荷は積層ゴムのせん断変形角で制御し、せん断変形角 $\pm 50\%$ 、 $\pm 100\%$ 、 $\pm 150\%$ 、 $\pm 200\%$ 、 $\pm 250\%$ 、 $\pm 300\%$ をそれぞれ2回ずつ正負漸増载荷した。なお、せん断変形角300%は、想定建物に「鉄道耐震標準²⁾におけるレベル2地震動」を入力した場合の地震応答解析から求められる、積層ゴムの最大せん断変形角のおよそ1.2倍に相当する。

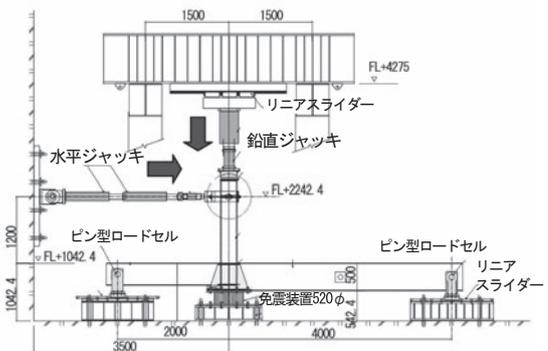


図3 加力装置概要



図4 試験体全景(左)、軸力導入後の積層ゴム(右)

3.3 測定方法

測定方法については、試験体における免震層の各部分の水平変位を巻取り式変位計で、積層ゴム上面の傾斜角を傾斜計で測定した。また、上部架構の層間変形角と直交梁のねじれ角を測定した。

試験体の各部分のひずみについては、ダブルガーダー梁端部接合部近傍およびダブルガーダーの取り付け直交梁のねじれに伴うひずみを測定した。また、柱に直接取り付け梁端部の曲げひずみと、柱の曲げひずみおよび軸ひずみを測定した。

4. 実験結果

本稿では、パターン1~4のうち、パターン1とパターン3についての実験結果を示す。図5は、積層ゴム下端から加力点までの変形を対象とした架構全体の水平力-層間変形角関係

を示す。図6は、水平力-積層ゴムせん断ひずみ関係を示す。図7は、上部架構の水平力-層間変形角関係を示す。積層ゴムのせん断ひずみ±300%の振幅に対して積層ゴム、上部架構ともに概ね弾性挙動を示した。

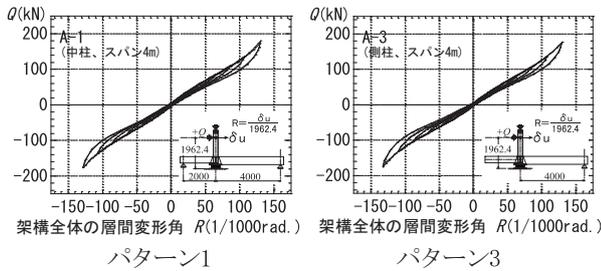


図5 架構全体の水平力-層間変形角関係

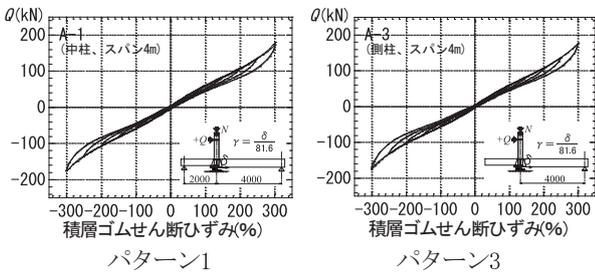


図6 水平力-積層ゴムせん断ひずみ関係

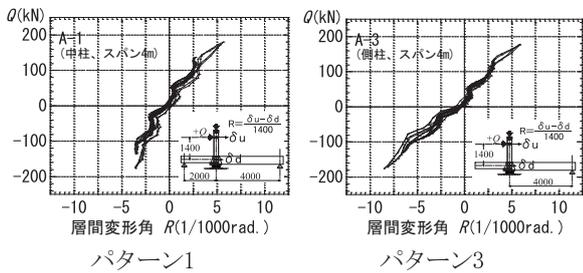


図7 上部架構の水平力-層間変形角関係

図8には、水平力-積層ゴムの傾斜角関係を示す。正負で剛性は異なるものの概ね弾性挙動を示している。なお、正負の剛性が異なるのは積層ゴムの水平変形により積層ゴム上部の鉛直下方変位が増加し付加応力が発生したためと考えられる。図9には、パターン1の積層ゴムのせん断変形角+300%時の変形状況写真を示す。

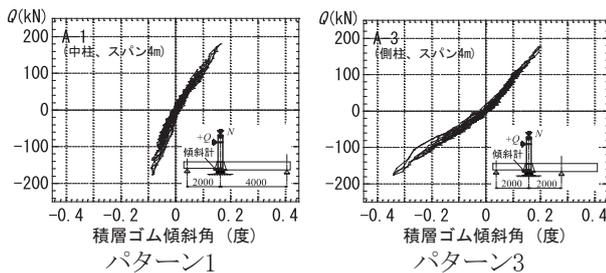


図8 水平力-積層ゴム傾斜角関係

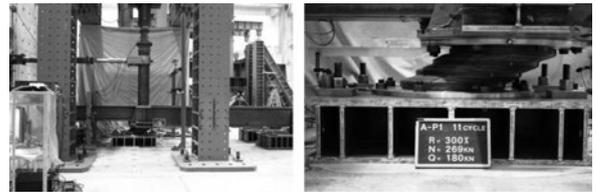


図9 変形状況写真 (パターン1、せん断変形角+300%)

5. 設計手法の検討

ダブルガーダー架構の設計を、通常のラーメン架構のように部材を線材置換して行うためには、ダブルガーダーの梁端部と柱とが直接取り合わないことによって生じる仕口部のねじれ変形を適切に考慮する必要がある。本節では、ダブルガーダー架構を線材置換するためのモデル化の方法を提案し、実験結果のシミュレーションによってその妥当性を検証する。

5.1 シミュレーションモデルの提案

モデル化の方針としては、(1)ダブルガーダーの2本の梁を1本としてモデル化、(2)仕口部のねじれ変形の影響を回転ばねとしてモデル化、の2点である(図10)。

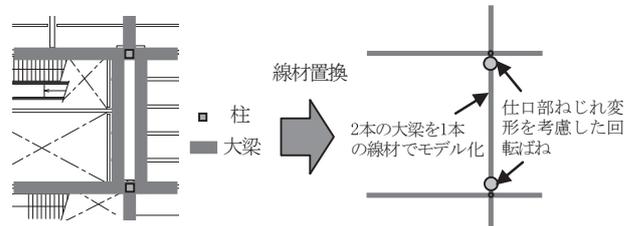


図10 ダブルガーダー架構の線材置換概念図

ダブルガーダーの2本の梁を1本の梁としてモデル化することについては、梁の各断面諸元を2倍することで対応する。

仕口部のねじれ変形については、仕口部の断面形状がH形鋼に近いことから曲げねじれ、いわゆるワグナー (Wagner) ねじれが卓越すると考えられる(図11)。

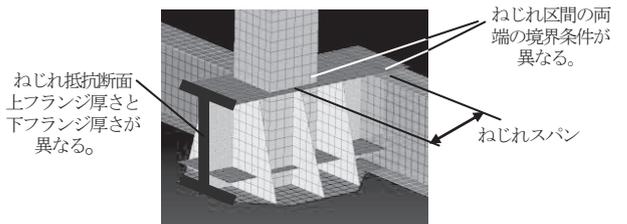


図11 仕口部詳細図

曲げねじれ定数 EI_w から回転ばね剛性 K_T は以下のように求められる。 t_f には上下フランジ厚の平均値、端部境界条件にはピン支持を採用した。

$$K_T = 48EI_w / L^3 \quad (1)$$

$$EI_w = t_f b^3 h^2 / 24$$

E: 鋼材のヤング係数 h: 梁せい b: 梁幅

L: ねじれスパン t_f : フランジ厚さ (上下フランジ厚の平均)

5.2 シミュレーションモデルの妥当性の検証

仕口部のねじれ変形は、上部鉄骨架構についての問題であるので、積層ゴムを除いた上部鉄骨架構部分について検討を行う。仕口部分については剛体とみなす。

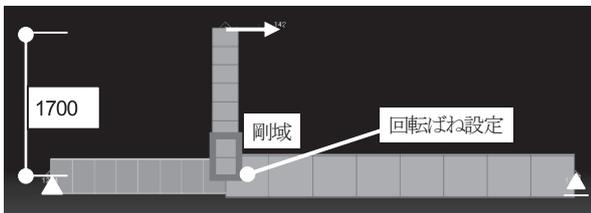


図12 線材置換モデル図

各部材は試験体に合わせて、柱: □-300×300×16、左側大梁: H-400×200×8×13、右側大梁: 2H-500×200×10×16とした。解析ソフトには、Nastranを使用した。

水平力-層間変形角関係について実験結果と解析結果の比較を図13に示す。パターン1は実験結果と解析結果がよく対応している。パターン3について、正加力側はよく対応しているが負加力側は大きく異なっている。柱を側柱としたことによって、負加力時は柱梁仕口部の位置が積層ゴムに対してピン支持点とは反対側となるため、回転拘束力が小さくなり変形が進んだと考えられる。

図14には、層間変形角-各梁端部に生じるモーメント関係を示す。パターン1は、地震時の積層ゴムの鉛直剛性低下による付加モーメントの補正を行ったデータを実験結果としている。図より、提案したモデルによるシミュレーション結果は、実験結果と概ね対応している。

図15に補正前の層間変形角-曲げモーメント関係を示す。これは、水平変形時に図16 (a) に示すように積層ゴムの荷重支持有効部分が減少し、鉛直剛性が低下する。その際、積層ゴム位置での鉛直変形は増加するが、各支持点の鉛直変形は増加しないので図16 (b) に示すような応力が発生する。この曲げモーメント分を補正した結果、図15に示す層間変形角-曲げモーメント関係を導出している。

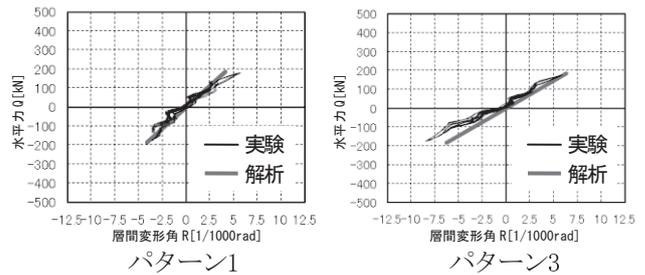


図13 上部架構の水平力-層間変形角関係

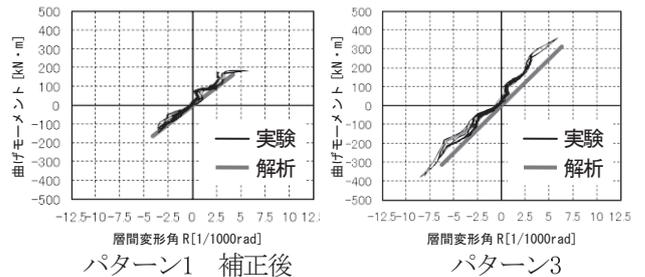


図14 層間変形角-梁端部に生じるモーメント関係 (モデル図右側ダブルガーダー梁合計値)

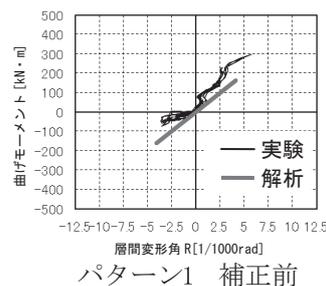


図15 層間変形角-梁端部曲げモーメント関係

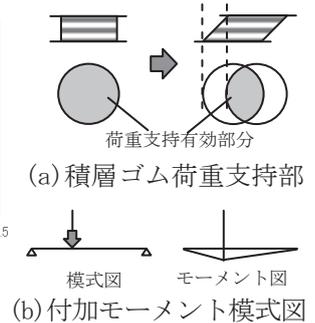


図16 積層ゴムの概念図

6. まとめ

線路上空建物の免震化において考案したダブルガーダーと呼ぶ免震層周りの架構形式について、構造性能を把握するために、縮小試験体を用いた静的加力実験を実施した。また、ダブルガーダーの設計におけるシミュレーションモデルを提案し、実験のシミュレーション結果が実験結果と概ね対応していることを示し、モデルの妥当性を確認した。

参考文献

- 1) 山高円, 岩崎和明, 星川努, 清水満; 厚肉積層ゴム免震部材を利用した低層線路上空建物の開発, テクニカルレビューNo37, 2011, 12
- 2) 財鉄道総合研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, 1999.10