第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

橋梁に用いる制震デバイスのモデル化に関する解析的検討

田嶋 仁志[1]・藤倉 修一[2]・姫野 岳彦[3]・今西 修久[4]・木野村 宏昭[5]・井手 和也[6]

[1]正会員　工博　株式会社IHIインフラシステム（〒135-8710 東京都江東区豊洲3-1-1　豊洲IHIビル）
[2]正会員　工博　宇都宮大学教授　地域デザイン科学部（〒321-0094 栃木県宇都宮市陽東7-1-2）
[3]正会員　工博　株式会社川金コアテック　本社（〒332-0015 埼玉県川口市川口2-2-7）
[4]正会員　工博　株式会社エイト日本技術開発　東京支社（〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11）
[5]正会員　工博　株式会社エイト日本技術開発　東京支社（〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11）
[6]正会員　株式会社エイト日本技術開発　関西支社（〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島5-5-15）

1. はじめに

橋梁に用いる制震デバイスには，粘性体の抵抗力や鋼材の降伏およびゴムの減衰など，種々の材料や構造でエネルギー吸収を図るよう開発されている．

制震デバイスは地震時の橋梁の応答変位の低減や橋梁全体の減衰性能の向上など，橋梁の耐震性確保の上で非常に重要な部材である．制震デバイスを用いた橋梁の地震時挙動を精度良く評価するためには，制震デバイスの動的特性を適切に再現できるようモデル化することが重要である．

2．対象とする制震デバイスと検討概要

制震デバイスの動的特性やモデル化に関する既往の研究には文献1)があり，複数の制震デバイスに対し統一的な観点から振動台実験が実施されていることから，この貴重な実験データを利用し制震デバイスのモデル化の検討を行った．実験模型は，ウェイトを載せた桁模型をゴム支承で支持したものに制震デバイスを設置した構造となっている（**写真-1**）．

検討対象は，シリンダー系デバイス（以降シリンダー系と称す），鋼材せん断降伏系デバイス（以降せん断降伏系と称す），鋼材軸降伏系デバイス（以降軸降伏系と称す）とした．各デバイスの概要を**図-1～図-3** に示す．検討に用いた解析モデルは各制震デバイス部分以外は基本的に共通とし，**写真-1** に示す文献 1)の実験模型を，**図-4** のとおり梁要素やばね要素等によりモデル化した．

この解析モデルに文献1)で行われた実験と同じ加振波形を入力し応答を計算した．制震デバイスの非線形特性は文献1)の実験結果や解析結果を踏まえ，複数の非線形モデルを設定し，実験結果と対比する形で整理した．以降，本稿中の実験結果や実験に関する情報は全て文献1)からの引用である．

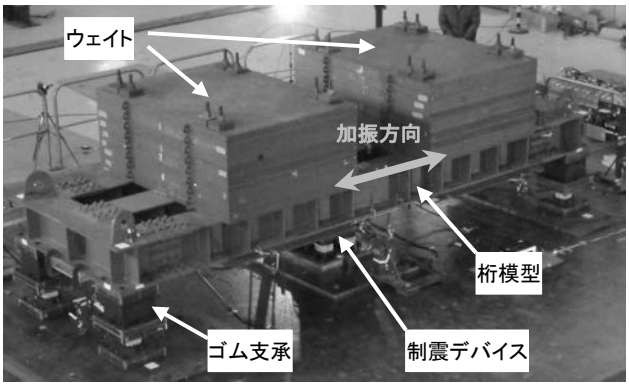


写真-1 実験模型

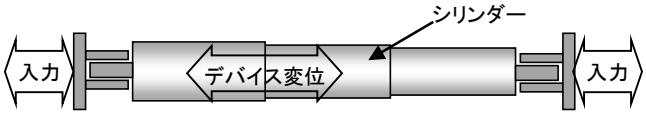


図-1 シリンダー系デバイス

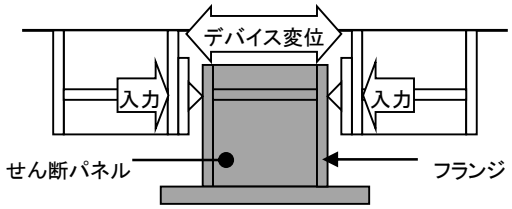


図-2 鋼材せん断降伏系デバイス

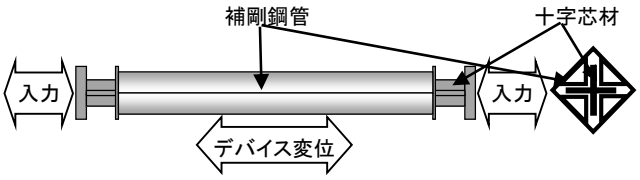


図-3 鋼材軸降伏系デバイス

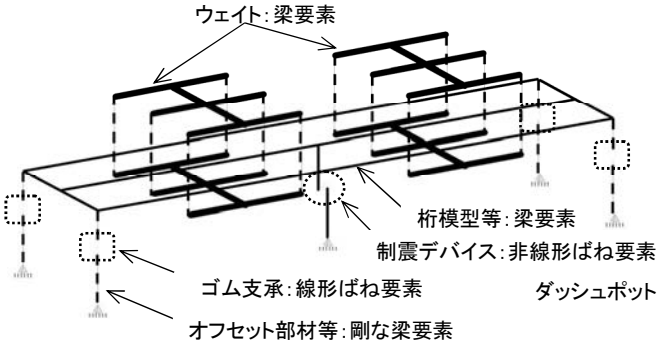


図-4 解析モデル

3. シリンダー系制震デバイス

(1) モデル化

シリンダー系は，シリンダー内に充填された粘性体の中をピストンが移動するときの抵抗力でエネルギー吸収を図るものである．シリンダー系の力学的特性は速度累乗型モデルやバイリニア型モデルとしてデバイスメーカーから提供されている（これを規格値と呼ぶ）．**図-5** は文献 1)のシリンダー系の荷重－速度の相関性の実験結果を示しており，①速度累乗型の規格値のほか，②速度累乗型の最大値（実験結果の最大値を包絡する線），③速度累乗型の最小値（同じく最小値を包絡する線），を追記している．同図より規格値に対して±10%程度のばらつきがあることがわかる．**図-6** は④バイリニア型の規格値のほか，⑤規格値の降伏抵抗力 Py の 1.1 倍，⑥規格値の降伏抵抗力 Py の 0.9 倍，⑦規格値④で 2 次勾配有りモデル，⑧規格値の 1.1 倍の⑤で 2 次勾配有りモデル，⑨規格値の 0.9 倍の⑥で 2 次勾配有りモデル，も併せて示している．2 次勾配を有するモデルは，定格速度（0.5m/sec）を超える場合にデバイス荷重が定格速度時抵抗力より大きくなることを考慮し設定している．

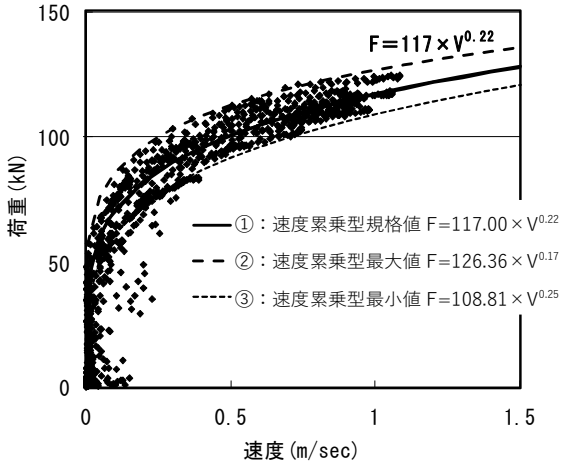


図-5 シリンダー系力学特性（速度累乗型）

(2) 加振解析結果

前述の非線形モデル①～⑨に対し，タイプⅠ地震動（振幅160%），タイプⅡ地震動（振幅120%），1.0Hz正弦波（振幅450gal），2.0Hz正弦波（振幅800gal）の4波形について加振解析を行った．シリンダー系では，文献1)のデバイスの非線形モデルの検討で用いられたものと同じ波形を基本とし，これに地震動の違い（速度の違い）による影響を確認するため，タイプⅠ地震動を加えた．ここに，タイプⅠ地震動は文献2)に示されるⅡ種地盤の加速度波形Ⅰ－Ⅱ-1の振幅を160%，タイプⅡ地震動は加速度波形Ⅱ－Ⅱ-1の振幅を120%としたものである．

デバイス変位とデバイス荷重および実験供試体変位の解析結果の最大・最小値の実験結果に対する比率をそれぞれ，**表-1**，**表-2**，**表-3**，各波形のデバイス速度の実験結果を**表-4**に示す．また，タイプⅡ地震動の速度累乗型モデル①～③のデバイス荷重－変位履歴を**図-7**，バイリニア型モデル④～⑥を**図-8**，2次勾配有りモデル⑦～⑨を**図-9**に示す．

デバイス変位の最大・最小値に着目すると速度累乗型③およびバイリニア型⑥が実験結果を比較的精度良く再現しており，全加振波形平均では③が最も再現性が高い結果となっている．いずれも図-5の最小値を包絡するモデルであり，シリンダーの抵抗力が小さいため，デバイス変位は大きくなるモデルである．結果，これらのデバイス荷重は，③の全加振波形平均で13%，⑥の全加振波形平均で20%，実験結果より小さい値となっている．

デバイス荷重の最大・最小値に着目すると速度累乗型②およびバイリニア型⑤が実験結果を比較的精度よく再現しており，全加振波形平均では僅差であるが②が最も再現性が高い結果となっている．これらは図-5の最大値を包絡するモデルであり，シリンダーの抵抗力が大きいため，デバイス変位は小さくなるモデルである．結果，これらのデバイス変位は，

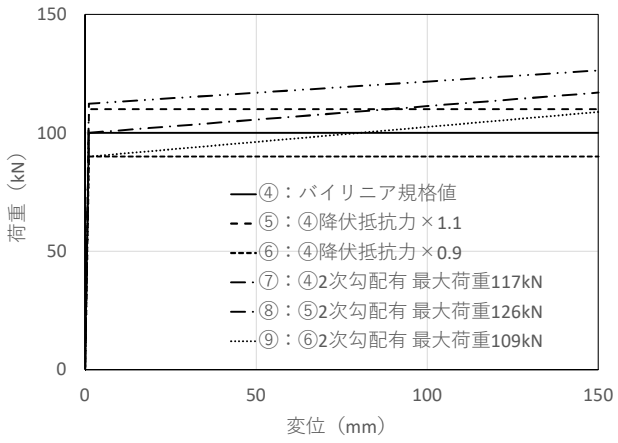


図-6 シリンダー系力学特性（バイリニア型）

②の全加振波形平均で17%，⑤の全加振波形平均で20%，実験結果より小さい値となっている．

実験供試体変位の最大・最小値は，全般にデバイス変位と同じ傾向で，より再現性が低くなっている．

デバイス荷重-変位履歴に着目すると，履歴曲線の形状は速度累乗型の再現性が高いが，前述のとおり，荷重の再現性が高い場合は変位の再現性が低くなることから，全体的に実験結果にフィットするような履歴曲線は得られなかった．これは他の加振波形でも同様の結果であった．

一方，最大・最小ではなく，デバイス荷重の時刻歴応答に着目すると，タイプⅡ地震動の①～③の解析結果は**図-10**のとおりである．時刻12.2s付近では③，時刻12.7s付近では②，時刻13.5s付近では①，の解析結果がそれぞれ実験結果に近い値を示しており，②がすべての時刻で実験結果を最も精度良く再現できているわけではない．これは**図-5**に示した荷重－速度関係にばらつきがあることによるものと考えられる．バイリニア型の④～⑨でもこの傾向は同様であった．このほか，バイリニア型のみタイプⅠ・Ⅱ地震動で残留変位が生じていた．

表-1 解析結果：デバイス変位比率（解析/実験）

デバイス変位比率	タイプⅠ地震動		タイプⅡ地震動		1.0Hz正弦波		2.0Hz正弦波		単純平均
	－側	＋側	－側	＋側	－側	＋側	－側	＋側	
①	***0.97***	***0.96***	0.86	***1.06***	0.86	0.85	0.81	0.83	***0.90***
②	0.89	0.85	0.87	***0.92***	0.77	0.76	0.78	0.81	0.83
③	***1.01***	***1.03***	0.84	1.17	***0.92***	***0.91***	0.83	0.84	***0.95***
④	0.86	0.70	0.89	***0.99***	0.79	0.78	***0.95***	***0.95***	0.86
⑤	0.73	0.61	***0.94***	0.85	0.70	0.69	***0.91***	***0.94***	0.80
⑥	***0.99***	0.78	0.82	1.15	0.88	0.87	***0.97***	***0.96***	***0.93***
⑦	0.84	0.68	0.86	***0.96***	0.82	0.81	***0.97***	***0.99***	0.87
⑧	0.69	0.59	***0.92***	0.80	0.66	0.65	***0.92***	***0.96***	0.78
⑨	***0.95***	0.76	0.80	***1.09***	0.76	0.75	***0.99***	***1.00***	0.89

表-2 解析結果：デバイス荷重比率（解析/実験）

デバイス荷重比率	タイプⅠ地震動		タイプⅡ地震動		1.0Hz正弦波		2.0Hz正弦波		単純平均
	－側	＋側	－側	＋側	－側	＋側	－側	＋側	
①	***0.93***	***0.91***	0.89	0.88	***0.99***	***0.99***	***0.93***	***0.94***	***0.93***
②	***1.04***	***1.00***	***0.96***	***0.96***	***1.09***	***1.09***	***1.00***	***1.01***	***1.02***
③	0.85	0.84	0.84	0.83	***0.92***	***0.92***	0.87	0.87	0.87
④	***0.97***	***0.97***	0.80	0.84	***0.95***	***0.96***	0.82	0.82	0.89
⑤	***1.07***	***1.07***	0.88	***0.93***	***1.05***	***1.06***	***0.90***	***0.90***	***0.98***
⑥	0.87	0.88	0.72	0.76	0.86	0.86	0.74	0.74	0.80
⑦	***0.99***	***1.03***	0.87	***0.93***	***1.03***	***1.04***	0.90	***0.90***	***0.96***
⑧	1.10	1.13	***0.95***	***1.02***	1.13	1.13	***0.98***	***0.99***	***1.05***
⑨	***0.91***	***0.95***	0.82	0.85	***0.96***	***0.97***	0.83	0.84	0.89

表-3 解析結果：実験供試体変位比率（解析/実験）

供試体変位比率	タイプⅠ地震動		タイプⅡ地震動		1.0Hz正弦波		2.0Hz正弦波		単純平均
	－側	＋側	－側	＋側	－側	＋側	－側	＋側	
①	***0.95***	***0.91***	0.84	***1.03***	0.85	0.82	0.79	0.80	0.87
②	0.87	0.80	0.86	0.90	0.76	0.74	0.76	0.78	0.81
③	***0.98***	***0.97***	0.83	1.14	***0.91***	0.88	0.81	0.81	***0.92***
④	0.83	0.66	0.87	***0.96***	0.78	0.76	***0.93***	***0.92***	0.84
⑤	0.71	0.58	***0.92***	0.83	0.69	0.67	0.89	***0.91***	0.77
⑥	***0.96***	0.74	0.81	1.12	0.87	0.84	***0.95***	***0.93***	***0.90***
⑦	0.82	0.64	0.84	***0.94***	0.75	0.72	***0.94***	***0.96***	0.83
⑧	0.68	0.57	***0.90***	0.78	0.65	0.63	0.90	***0.93***	0.76
⑨	***0.92***	0.72	0.79	***1.06***	0.81	0.79	***0.97***	***0.97***	0.88

表-4 実験結果：デバイス速度

デバイス速度(m/s)	タイプⅠ地震動		タイプⅡ地震動		1.0Hz正弦波		2.0Hz正弦波	
	－側	＋側	－側	＋側	－側	＋側	－側	＋側
実験結果	0.39	0.32	0.79	0.67	0.67	0.66	1.09	1.06

(3) 速度累乗型とバイリニア型の応答の比較

速度累乗型とバイリニア型の規格値モデル①と④のデバイス荷重の最大・最小値に着目すると，速度累乗型がバイリニア型に比べて実験結果に近い値となり，デバイス速度が大きいタイプⅡ地震動や2.0Hz 正弦波でその傾向が顕著である．これは速度依存性の考慮の有無によるが，この影響を把握するため，1.0Hz 正弦波加振で加速度を 400gal，450gal，500gal と変化させた場合のデバイス変位やデバイス荷重を検討した．これらを実験結果との比率で示すと**図-10** のとおりである．速度累乗型ではデバイス速度が大きくなるにつれてデバイス変位・荷重とも実験結果との乖離が減少する傾向であるが，その変動量は 1～5%と僅かである．バイリニア型では，デバイス変位は乖離が減少し，デバイス荷重は乖離が大きくなる傾向が顕著に確認できる．

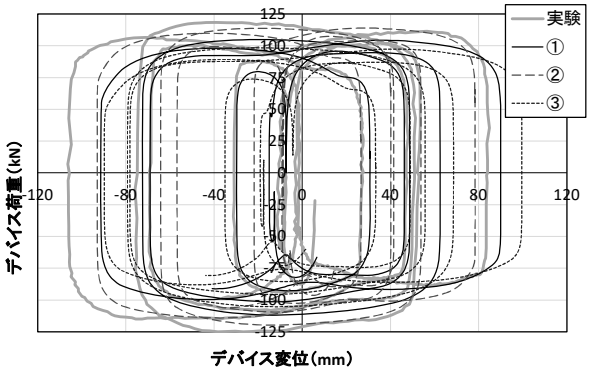


図-7 速度累乗型①～③のデバイス荷重-変位履歴

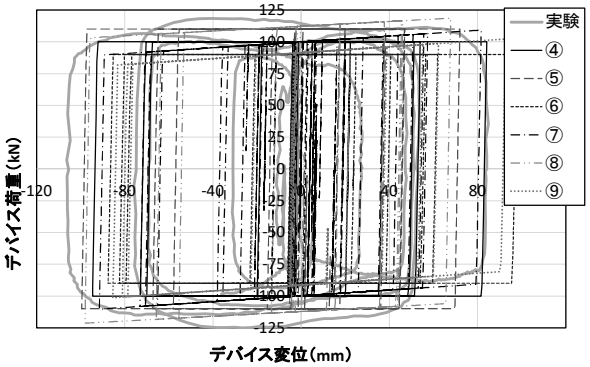


図-8 バイリニア型④～⑨のデバイス荷重-変位履歴

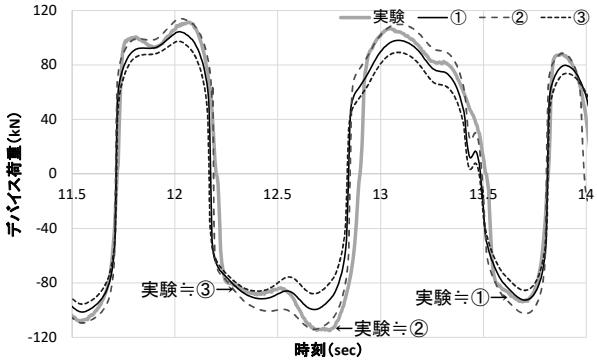
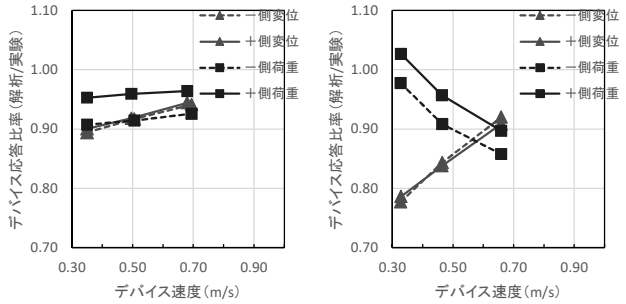


図-9 シリンダー系タイプⅡ地震動デバイス荷重時刻歴

これは**表-1** および**表-2** の④でも同じような傾向となっており，④のモデルはデバイス速度によってデバイス変位あるいはデバイス荷重のいずれかを過大あるいは過小に評価する可能性がある．



a) 速度累乗型　　b) バイリニア型

図-10　シリンダー系速度累乗型とバイリニア型の応答

(4) モデル化に関する考察

速度累乗型モデルは最大・最小応答や時刻歴応答など全般にバイリニア型モデルに比べ実験結果の再現性は良い．ただし，検討した速度累乗型モデルでは，デバイス荷重とデバイス変位の両方を精度よく再現するに至っていないことから，デバイスが直取り付く部位や部材に対しては②，それ以外の部材や橋梁全体の挙動に対しては③，のようなモデルの使い分けをするようなことが考えらえる．一方，バイリニア型モデルでも同じような使い分けが考えられるが，定格速度が前提のため，デバイス速度がその前提に合致していることが適用条件となる．また，バイリニア型の場合には残留変位が生じることに留意が必要である．

4．せん断降伏系制震デバイス

(1) モデル化

せん断降伏系デバイスは鋼板を溶接した構造でせん断パネルに低降伏点鋼を用いた構造である．デバイスメーカーの提案する非線形モデル（以降，規格値と呼ぶ）は，はじめにせん断パネルが降伏し続いてフランジが降伏するトリリニアモデルである（**図-11**①参照）．図中②～④は文献1)を参考に設定した非線形モデルであり，②は規格値のSwyとS12を結んだバイリニア型，③は②のSwy×1.2，初期剛性×1.2のバイリニア型，④は②の初期剛性×0.154倍，Sfu×1.2，3次剛性×0.025のトリリニア型である．⑤，⑥は実験より得られたデバイス荷重とデバイス変位の履歴曲線に数値解をフィッテイングさせつつ設定した骨格曲線（トリリニア型）であり，タイプⅡ地震動（振幅120%）の実験結果を用いて設定した．

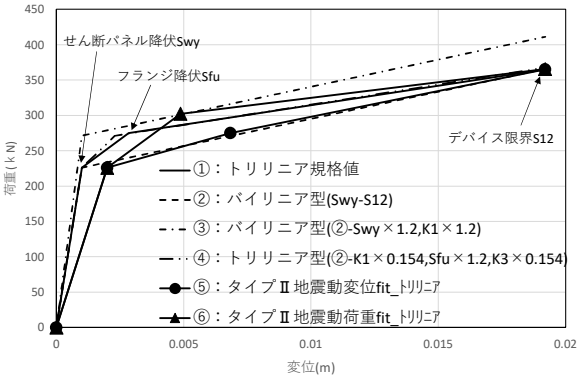


図-11　せん断降伏系-力学特性

(2) 非線形モデルの加振解析結果

前述の非線形モデル①～⑥に対し，文献1)と同様に，タイプⅡ地震動（振幅120%），1.0Hz正弦波（振幅800gal），1.5Hz正弦波（振幅800gal）の3波形について加振解析を行った．デバイス変位及びデバイス荷重，実験供試体変位の実験結果に対する最大・最小応答値の比率を**表-5**，**表-6**，**表-7**に示す．

全般にデバイス荷重に比べてデバイス変位・供試体変位は実験値との乖離が大きい傾向にあり，デバイス荷重は各非線形モデルとも±20%程度の誤差だが，デバイス変位は非線形モデルで80%超の誤差，供試体変位は非線形モデルで70%程度の誤差が生じた．①～④の検討では，規格値含むトリリニア型は，バイリニア型に比べデバイス荷重の再現性が高く，バイリニア型が±20%程度に対し，トリリニア型は±10%程度となっている．このように，本稿で対象とする実験結果に対しては，トリリニア型は比較的高い精度の解が得られると考えられる．

デバイス変位の再現性向上を目的に，実験結果の履歴曲線と加振解析から得られる履歴曲線にフィットするよう逐次検討を行い，⑤（②よりSwy×1.2，一次勾配×1.2），⑥（②より一次勾配×0.154，Sfu×1.2，三次勾配×0.154）の非線形モデル（トリリニア型）を設定した．タイプⅡ地震動（振幅120%）を対象とした場合のフィッテイング例を**図-12**に示す．デバイス荷重は⑤・⑥ともに異なる入力波形に対し，ある程度の再現性が確認された．デバイス変位および供試体変位について，⑤は再現性が低かったものの⑥はある程度の再現性が確認された．

表-5　解析結果：デバイス変位比率（解析/実験）

デバイス変位比率	タイプⅡ地震動		1.0Hz正弦波		1.5Hz正弦波		単純平均
	－側	+側	－側	+側	－側	+側	
①	0.83	***0.90***	1.34	1.61	1.37	1.41	1.24
②	1.20	1.21	1.57	1.87	1.83	1.88	1.59
③	0.46	0.47	1.30	1.57	1.17	1.22	***1.03***
④	0.77	0.82	1.36	1.63	1.36	1.41	1.22
⑤	1.17	1.26	1.54	1.86	1.64	1.68	1.53
⑥	0.86	***0.97***	***1.03***	1.23	1.11	1.13	***1.05***

表-6 解析結果：デバイス荷重比率（解析/実験）

デバイス荷重比率	タイプⅡ地震動		1.0Hz正弦波		1.5Hz正弦波		単純平均
	－側	+側	－側	+側	－側	+側	
①	***0.98***	***0.94***	1.10	***1.09***	***1.07***	***1.07***	***1.04***
②	***0.97***	0.89	1.20	1.19	1.24	1.24	1.12
③	***0.96***	***0.93***	1.23	1.23	1.14	1.15	1.11
④	***0.97***	***0.93***	1.11	1.11	***1.07***	***1.07***	***1.04***
⑤	***0.97***	***0.91***	1.18	1.18	1.16	1.17	***1.10***
⑥	***1.01***	***0.99***	***1.03***	***1.02***	***1.01***	***1.01***	***1.01***

表-7 解析結果：実験供試体変位比率（解析/実験）

供試体変位比率	タイプⅡ地震動		1.0Hz正弦波		1.5Hz正弦波		単純平均
	－側	+側	－側	+側	－側	+側	
①	0.81	0.81	1.26	1.42	1.25	1.27	1.14
②	1.13	***1.04***	1.46	1.65	1.67	1.68	1.44
③	0.48	0.46	1.22	1.40	***1.08***	1.11	***0.96***
④	0.76	0.74	1.27	1.44	1.24	1.26	1.12
⑤	1.11	***1.09***	1.44	1.64	1.49	1.50	1.38
⑥	0.84	0.87	***0.97***	***1.10***	***1.02***	***1.02***	***0.97***

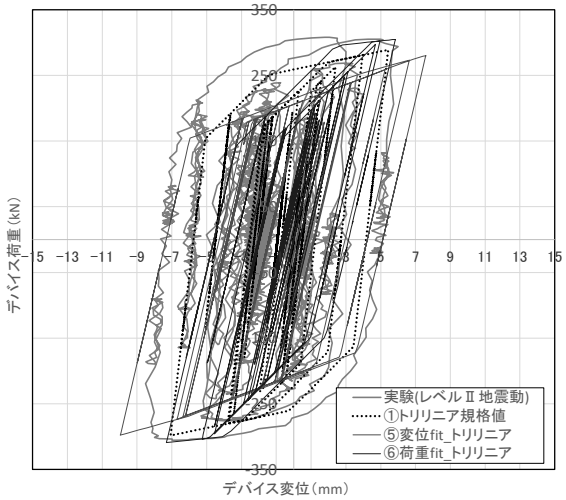


図-12 デバイス荷重-変位履歴曲線(タイプⅡ地震動)

(3) モデル化に関する考察

せん断降伏系は，規格値について，デバイス荷重は±10%以内と再現性は高いが，デバイス変位・供試体変位は-20～+60%が生じることが確認されたことから，実構造物への適用時には変位にばらつきが生じることに留意が必要である．またこの結果に対し，解析的にデバイス荷重およびデバイス変位，供試体変位の挙動を再現するためには規格値におけるせん断パネル降伏点及びフランジ降伏点を大きく設定する必要があることを確認した．デバイス荷重に着目した場合，実験値に対し規格値での結果ではどの入力波においてもほぼ同等または解析値が大きくなる結果であり，実験値に近似するように設定する場合にはフランジ降伏強度を大きくする必要があった．これは実構造のフランジが設計想定より大きな耐力を有していることが要因と考えられるため，規格値を用いた設計はほぼ妥当と判断できることを確認した．

5．軸降伏系制震デバイス

(1) モデル化

軸降伏系は座屈拘束型の軸降伏部材を部材両端に備え，弾性範囲で挙動する中間材で構成された構造である．デバイスメーカーが提案する非線形モデルの規格値は，**図-13**①に示すバイリニア型の履歴モデルである．図中，②は規格値から二次剛性K2を6.7倍，③は降伏強度Pyを1.6倍，④は初期剛性K1を1.5倍としたバイリニア型モデルであり，文献1)の感度分析結果を参考に設定した．また，⑤～⑧は実験より得られたデバイス荷重とデバイス変位の履歴曲線に数値解をフィッティングさせつつ設定した骨格曲線（⑤⑦：非対称バイリニア型，⑥⑧：対称トリリニア型）であり，⑤⑥はタイプⅡ地震動（振幅120%），⑦⑧は1.0Hz正弦波（振幅800gal）の実験結果に基づき設定した．

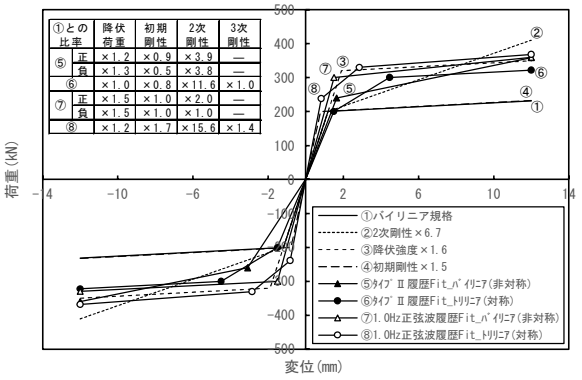


図-13 軸降伏系の非線形特性（検討モデル）

(2) 非線形モデルの加振解析結果

前述の非線形モデル①～⑧に対し，タイプⅠ地震動（振幅 160%），タイプⅡ地震動（振幅 120%），1.0Hz 正弦波（振幅 800gal）の 3 波形について加振解析を行った．軸降伏系では，文献 1)のデバイスの非線形モデルや応答特性の検討に用いられたものと同じ波形を基本とした．デバイス変位およびデバイス荷重，実験供試体変位の実験結果に対する最大・最小応答値の比率を**表-8**，**表-9**，**表-10** に示す．

全般にデバイス荷重に比べてデバイス変位の応答値は実験値との乖離が大きい傾向にあった．例えば，③では 3 波全てでデバイス荷重に対する再現性は高いが，デバイス変位の再現性は低い結果となっている．このように，①～④の正負対称型のバイリニアモデルによる検討では，対象とする実験結果に対しデバイス荷重，デバイス変位ともに精度よく再現することは困難であった．一方で，供試体変位に着目すると，デバイス変位と同様に再現性は低く，その傾向はより顕著であった．実験値の履歴曲線に数値解がフィッティングするよう骨格曲線を設定した⑤

～⑧では，**表-10** より供試体変位は全ケースで実験値と比較して小さな値となっていることがわかる．

つぎに，加振解析から得られる履歴曲線が実験値とフィットするよう逐次検討を行い，非線形性の骨格曲線を設定した⑤～⑧に着目する．1.0Hz正弦波（振幅800gal）を対象とした場合のフィッティング例（履歴曲線）を**図-14**に示す．なお，比較のため**図-14**には①バイリニア規格値の結果も表示した．図からわかるように，①では実験値と比較し大きなデバイス変位が生じているが，①より降伏強度を1.5倍，2次剛性を2倍（負側は1倍）とした⑦では，履歴曲線の挙動は実験と解析とで概ね一致する．特にデバイス荷重についてはトリリニア型でフィッティングさせた⑥や⑧の場合，異なる入力波形の実験結果に対してもある程度の再現性が確認された（**表-7**参照）．ただし，デバイス変位については**表-6**からわかるように異なる入力波形の実験結果に対しては再現性の低い結果となっている．

(3) モデル化に関する考察

(2)に示したとおり，解析的にデバイス荷重，デバイス変位の挙動を再現するためには，規格値から降伏強度や剛性を高く設定した非線形特性を設定する必要があった．このように非線形モデルをデバイス本体の挙動に合わせた場合，供試体変位，すなわち橋梁全体系の変位は小さくなる傾向となる．本検討モデルでは，デバイス取付部には安全側であっても，下部構造含め全体系挙動としては変形が小さくなり危険側の判断となることに留意する必要がある．

一方で文献1)では，加振実験におけるデバイスの結合条件が両端剛結合ではなかったため，芯材と補剛部材の摩擦力によりデバイス荷重が増加する傾向にあったことが記されている．この傾向は**図-14**における履歴曲線からも確認できる．上記を踏まえると，デバイス取付け部の状態がデバイスの応答に大きく影響し，軸降伏系デバイス本来の性能を発揮させるためには，開発メーカーの推奨する結合状態を正確に再現することが重要であると考えられる．

6．おわりに

シリンダー系とせん断降伏系および軸降伏系の制震デバイスのモデル化方法について解析的検討を行った．いずれの制震デバイスにおいても，規格値は実験結果のデバイス変位とデバイス荷重の両方を精度よく再現するにはモデル化方法やそのモデルの適用方法について検討の余地があり，引き続き橋梁全体への影響も含めて検討を進める予定である．

本稿は鋼橋技術研究会 耐震・免震・制震デバイス部会の活動をもとにしている．実験データを提供していただいた土木研究所上席研究員大住道生様や，作業部会のチームリーダーの八千代エンジニヤリング石川義樹様，活動にあたり様々なご助言，ご指導いただいた部会の皆様にここに謝意を表します．

表-8 解析結果：デバイス変位比率（解析/実験）

デバイス変位比率	タイプⅠ地震動		タイプⅡ地震動		1.0Hz正弦波		単純平均
	－側	＋側	－側	＋側	－側	＋側	
①	1.89	***0.98***	2.50	1.73	3.77	4.88	2.62
②	1.36	0.87	1.34	***1.03***	***1.07***	1.39	1.18
③	0.77	0.47	0.18	0.40	0.52	0.77	0.52
④	1.25	0.80	2.45	1.56	3.76	4.83	2.44
⑤	1.29	0.66	***0.90***	***0.94***	1.39	1.91	1.18
⑥	1.29	0.81	***0.95***	***0.97***	1.39	1.83	1.21
⑦	***0.92***	0.45	0.17	0.49	***0.95***	1.34	0.72
⑧	0.46	0.55	0.48	0.49	0.82	***1.07***	0.64

表-9 解析結果：デバイス荷重比率（解析/実験）

デバイス荷重比率	タイプⅠ地震動		タイプⅡ地震動		1.0Hz正弦波		単純平均
	－側	＋側	－側	＋側	－側	＋側	
①	0.68	0.66	0.72	0.73	***1.02***	***0.91***	0.79
②	***0.96***	0.76	1.25	***0.94***	1.35	1.20	***1.08***
③	***1.06***	***0.96***	***0.97***	***0.90***	***1.01***	***0.91***	***0.97***
④	0.68	0.64	0.71	0.73	***1.02***	***0.91***	0.78
⑤	0.84	***0.91***	***0.95***	***0.95***	1.33	1.19	***1.03***
⑥	***0.95***	***0.91***	***0.94***	0.87	***1.03***	***0.91***	***0.94***
⑦	***0.98***	***0.92***	***0.95***	0.83	1.11	0.89	***0.95***
⑧	***1.03***	0.88	***1.02***	***0.94***	***1.10***	***0.98***	***0.99***

表-10 解析結果：実験供試体変位比率（解析/実験）

供試体変位比率	タイプⅠ地震動		タイプⅡ地震動		1.0Hz正弦波		単純平均
	－側	＋側	－側	＋側	－側	＋側	
①	***0.91***	0.45	1.64	***0.91***	2.45	3.03	1.57
②	0.69	0.41	***0.93***	0.57	0.74	***0.92***	0.71
③	0.43	0.26	0.17	0.26	0.37	0.52	0.34
④	0.62	0.37	1.61	0.83	2.44	3.00	1.48
⑤	0.49	0.25	0.64	0.52	0.65	0.87	0.57
⑥	0.28	0.29	0.66	0.54	0.57	0.71	0.51
⑦	0.49	0.25	0.16	0.30	0.65	0.87	0.46
⑧	0.28	0.29	0.37	0.30	0.57	0.71	0.42

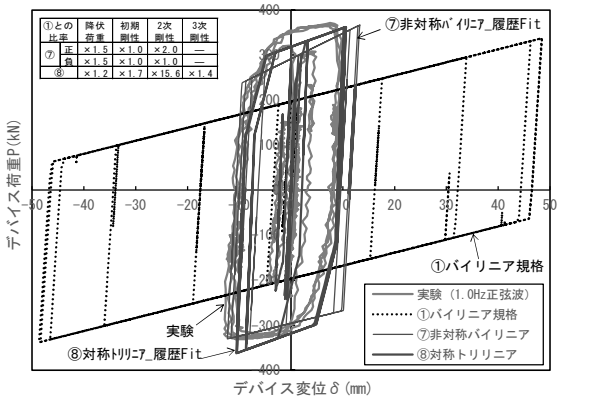


図-14 デバイス荷重-変位履歴曲線(1.0Hz 正弦波)

参考文献

1) 独立行政法人土木研究所：橋梁に用いる制震ダンパーの性能検証法及び設計法に関する共同研究報告書（その１ 制震ダンパーの動的挙動に関する振動台加振実験）（2012.3）

2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2002