

シリンダー型制震デバイスを水平斜め方向に設置した 橋梁の地震応答解析における制震デバイス部の 新たなモデル化手法の提案

宝蔵寺宏一¹・八ッ元仁²・崔準祐³

¹学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

²正会員 修（工） 阪神高速道路株式会社 技術部 技術開発課
(〒160-0004 大阪府大阪市中央区久太郎町四丁目1-3)

³正会員 博（工） 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

1. はじめに

近年、既設橋梁に制震デバイス等を適用して耐震性向上を試みる耐震補強事例や、新設橋の耐震性向上のために制震デバイスを活用する事例が増えているが、制震デバイスの性能評価法や制震デバイス本体や取り付け部材の設計法も含めた制震デバイスを用いた橋全体としての耐震設計法については、まだ確立されていない現状である。こうした背景から、筆者らは、これまで制震デバイスの動的性能検証やモデル化手法の検討、また制震デバイスの性能上のばらつきを考慮して解析モデルをパラメータとした地震応答解析など、橋梁構造物に適用する制震デバイスについて実験や解析による研究を行ってきた^{1)~5)}。

制震デバイスは、上部構造の地震時慣性力方向に合わせるのが効果的であるが、施工条件の制約などによりデバイスの軸方向と上部構造の慣性力方向が一致せず、写真-1に示すようにデバイスを斜め方向に設置する場合もある。また、デバイスの両端には、クレビス等を設け、橋梁との結合をピン結合として設置することが一般的であり、制震デバイスは比較的複雑な構造機構として橋梁に適用される場合が多い。しかし、制震デバイスを設置した橋梁の地震応答解析を行う際は、制震デバイスに対し一般に支承部位置に1方向成分を有するバネ要素を用いてシンプルにモデル化しており、デバイスの結合条件や取付部を詳細にモデル化していない。このように、

制震デバイスに対してシンプルなモデル化手法を用いて橋梁の地震応答解析を行うと、制震デバイス自身に生じる断面力やブラケット等の取付部に生じる断面力を調査することは不可能であるため、制震デバイスが斜め方向に設置された場合には制震デバイスをはじめ橋梁側に生じる地震力を精度良く評価することが困難であると考えられる。

そこで、筆者らは、制震デバイス部のモデル化手法に着目し、これまで鉛直斜め方向に制震デバイスが設置された橋梁を対象に、モデル化手法がデバイスや橋梁側の応答にどのような影響を及ぼすかについて検討を行ってきた⁶⁾。本研究では、水平斜め方向に設置した橋梁を対象に、結合条件を含め制震デバイスを詳細にモデル化した場合（以後、提案モデル）と制震デバイスを1本のバネ要素でシンプルにモデル化した場合（以後、従来モデル）の地震応答

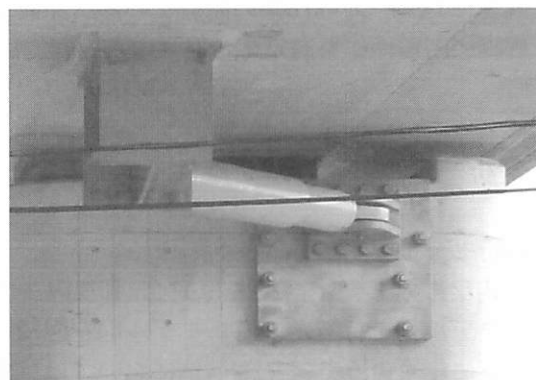


写真-1 水平斜め方向に設置した
制震デバイスの設置例

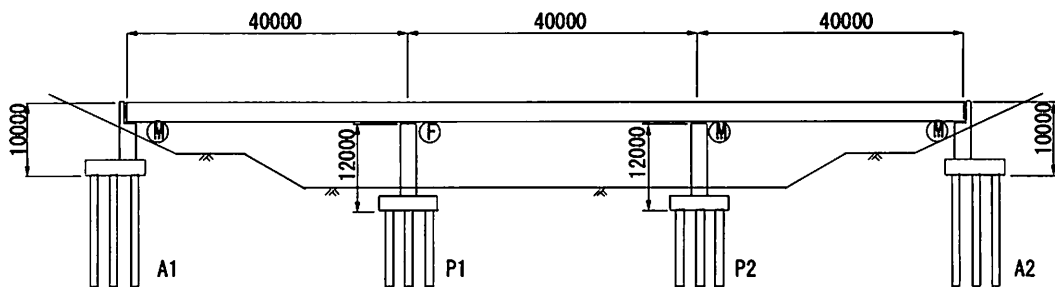


図-1 対象橋梁の一般図 (単位: mm)

表-1 橋梁の諸元

橋長	121.4m
形式	3径間連続鋼鈑桁橋
支間割	3*40.0m
有効幅員	8.5m
基礎形式	杭基礎

表-2 使用材料

主桁	鋼材	SM490Y
橋脚	コンクリート	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$
	鉄筋	SD345

解析を行い、制震デバイスや支承部等に作用する地震時応答を比較した。

2. 解析対象橋梁

解析対象橋梁は、橋長121.4m（支間割：40m+40m+40m）、有効幅員8.5m、RC壁式橋脚を有する鋼3径間連続鈑桁橋である。本橋の一般図を図-1に、諸元を表-1に、使用材料を表-2にそれぞれ示す。支承は鋼製支承であり、支持条件としては、P1橋脚のみ固定、他は可動とした。橋脚に対しては、道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁷⁾のレベル2地震動に対し橋軸方向の耐震性能を満足しないように試設計を行い、桁端部と橋台の間に粘性体を封入したシリンダー型制震デバイスを設置することにより橋梁の耐震性能を満足するよう耐震補強を行った。なお、本検討では、橋梁の耐震性能を満足させるため、制震デバイスの必要本数と容量を事前に求めることとした。その結果、降伏荷重が750kNのデバイスを各桁端部に3基ずつ、計6基の制震デバイスを設置すると橋脚の耐震性能を満足する結果となった。

3. 解析モデルおよび解析条件

(1) 解析モデル

対象橋梁に対し、本解析では3次元骨組みモデルによりモデル化を行った。解析モデル図を図-2に示す。図-2に示すように、上部構造においては、主桁、横桁、床版をそれぞれ線形梁要素でモデル化し、各部材に剛性や質量を与えることとした。支承部に対

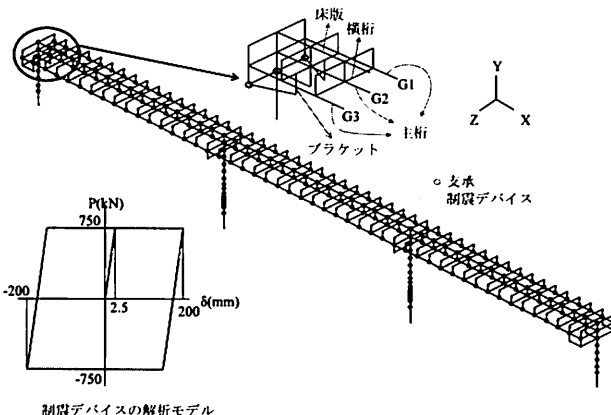


図-2 解析モデル図

しては、6方向成分を有する弾性バネ要素を用いてモデル化を行い、道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁷⁾に基づいて拘束条件を与えた。また、拘束条件として、橋軸直角軸回りの回転に対して可動としている。なお、可動支承の摩擦係数は0とした。

制震デバイスに対しては、バネ要素を用いてモデル化した。制震デバイスの非線形特性としては、過去に実施した変位制御実験や振動台実験より、デバイスの履歴をバイリニアモデルで簡便に表すことが可能であることを確認しており¹⁾、図-2に示すようなバイリニアモデルとした。この750kNの降伏荷重を有する制震デバイスの解析モデルを用いて、制震デバイスおよびデバイス周辺の部材のモデル化方法を変化させた解析を行うこととした。

次に、制震デバイス部のモデル化において、図-3に1本のばねで制震デバイスをモデル化した従来モデルを示す。従来モデルでは、支承部と同位置にバネ要素を設け、制震デバイスが作動する方向のみ非線形特性を与えることとし、その他の方向についてバネ要素を設けていない。一方、図-4に制震デバイ

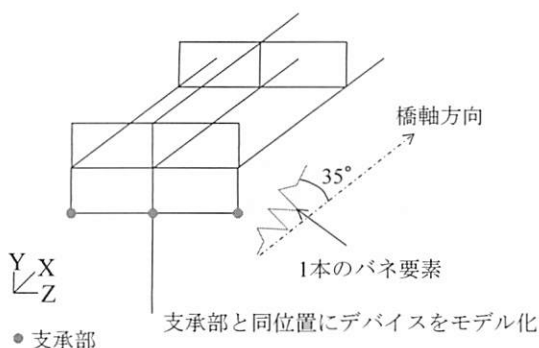


図-3 従来モデル

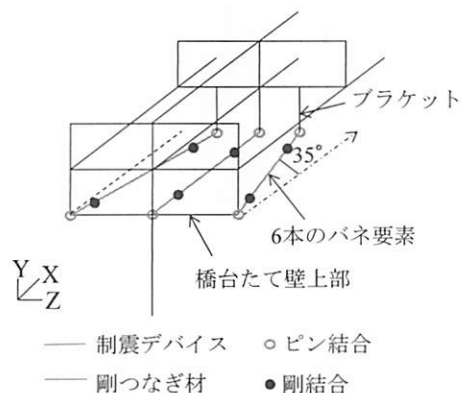


図-4 提案モデル

スおよびデバイスの周辺部材を詳細にモデル化した提案モデルを示す。提案モデルでは、デバイスの軸方向以外の方角に対してもバネ要素でモデル化しており、デバイスの軸方向には実剛性を与え、それ以外の5方向には剛な値と仮定した。また、制震デバイス両端部の連結については、橋台側にはたて壁の上部に連結させ、上部構造とはブラケットを模擬した剛な梁要素に連結させることとした。また、本検討で用いた解析ソフトでは、バネ要素と隣接要素をピン結合することができないため、バネ要素の両端に仮定の剛つなぎ材を設け、その剛つなぎ材の両端をピン結合として橋梁側に連結させることとした。

(2) 解析条件

解析条件として、入力地震動は道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編⁷⁾に示されている標準波タイプⅡを用い、Newmark β 法 ($\beta=0.25$) により数値積分を行った。減衰は要素別Rayleigh減衰により評価し、制震デバイスに対しては粘性減衰を与えないこととした。ひずみエネルギー比例型減衰で計算する際に用いた各部材の減衰定数は、道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編⁷⁾を参考に、主桁を0.02、床版を0.03、橋脚を0.02、橋台を0.05、基礎を0.2とした。また、本検討では、入力地震動の加震方向を橋軸方向、橋軸直角方向の2方向としており、橋軸方向には道路

表-3 固有値解析の結果(従来モデル)

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	有効質量比		
			X	Y	Z
1	2.238	0.447	0.000	0.000	0.550
2	2.364	0.423	0.010	0.020	0.000
3	2.654	0.377	0.340	0.000	0.000
4	3.275	0.305	0.260	0.000	0.000
5	3.400	0.294	0.000	0.000	0.000
6	4.053	0.247	0.120	0.000	0.000
7	4.111	0.243	0.000	0.310	0.000
8	5.184	0.193	0.000	0.000	0.160
9	6.389	0.157	0.000	0.000	0.000
10	8.419	0.119	0.020	0.000	0.000

表-4 固有値解析の結果(提案モデル)

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	有効質量比		
			X	Y	Z
1	2.222	0.450	0.000	0.000	0.540
2	2.686	0.372	0.520	0.000	0.000
3	2.888	0.346	0.050	0.000	0.000
4	3.410	0.293	0.000	0.000	0.000
5	4.053	0.247	0.120	0.000	0.000
6	4.195	0.238	0.010	0.000	0.000
7	4.845	0.206	0.000	0.360	0.000
8	5.294	0.189	0.000	0.000	0.160
9	6.477	0.154	0.000	0.000	0.000
10	8.712	0.115	0.000	0.000	0.060

橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編⁷⁾の標準波タイプⅡ-Ⅱ-1を、橋軸直角方向にはタイプⅡ-Ⅱ-2を用いることとした。

4. モデル化の違いによる固有振動モードと制震デバイスおよび支承部の地震応答特性の変化

(1) 固有値解析

まず、従来モデルおよび提案モデルにおいてそれぞれ固有値解析を行った。従来モデルの固有値解析の結果を表-3に、提案モデルの固有値解析の結果を表-4にそれぞれ示す。図-5に従来モデルの2次モードにおける固有変形モード図を、図-6に提案モデルの3次モードにおける固有変形モード図をそれぞれ示す。また、図-7に提案モデルの1次モードにおける固有変形モード図をそれぞれ示す。

固有値解析の結果より、橋軸方向と鉛直方向に有効質量比が卓越するモードにおいて、両モデルで固有値解析の結果に違いが生じていることが確認された。図-5、6より、従来モデルの2次モードと詳細モデルの3次モードはほぼ同じ変形モードであることがわかるが、従来モデルの2次モードでは固有周期が0.423秒であるのに対し、提案モデルの3次モードでは固有周期は0.346秒と、従来モデルより短くなっている。これは、提案モデルにおいては、制震デバイスのモデル化の際に、制震デバイスの軸方向以外の5方向に組み込んだ剛パネと、制震デバイス両

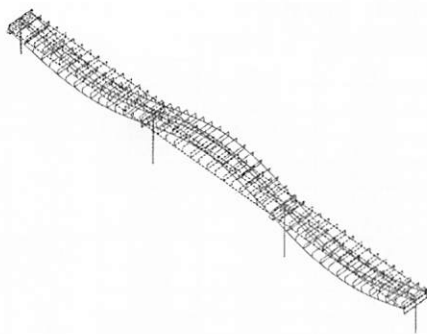


図-5 従来モデルの固有モード図 (2次モード)

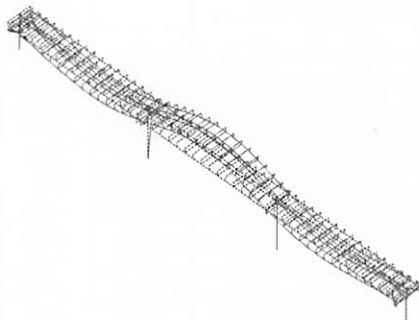


図-6 提案モデルの固有モード図 (3次モード)

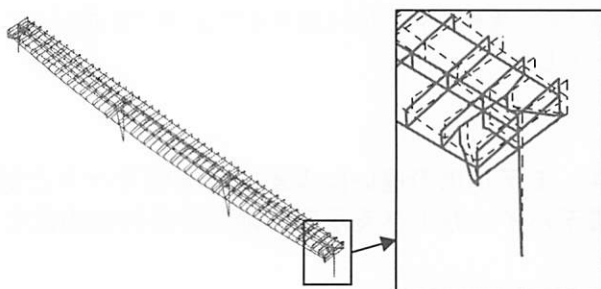


図-7 提案モデルの固有モード図 (1次モード)

端に追加した剛つなぎ材によって、提案モデルの剛性が増加していることが原因と考えられる。一方、橋軸直角方向に有効質量比が卓越する1次、8次モードにおいては、両モデル間で固有周期などに大きな違いは見られなかった。これは、図-7に示すように、橋軸直角方向に有効質量比が卓越する提案モデルの1次モードにおいて、上部構造の変位が中央径間で大きく、端部で比較的小さくなっていることから、制震デバイスのモデル化の違いは、橋軸直角方向の固有振動モードにそれほど影響を及ぼしていないことが考えられる。

(2) 地震応答解析

ここでは、従来モデルと提案モデルに対し、それぞれ橋軸方向加震と橋軸直角方向加震による地震応答解析を行い、両モデルの制震デバイスの履歴応答やせん断力、橋台支承部の反力の地震時応答を比較した。

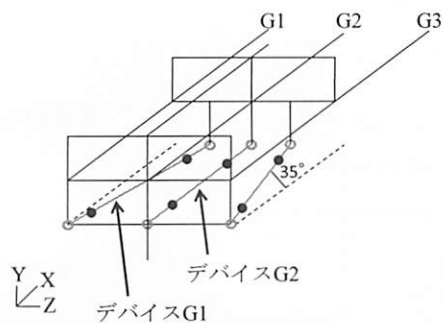
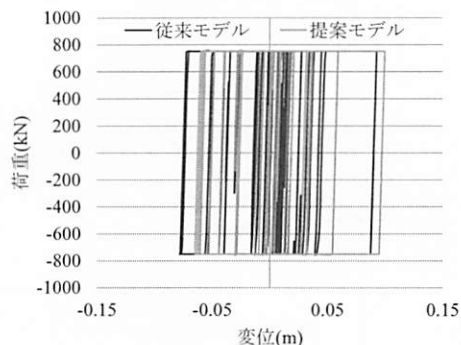
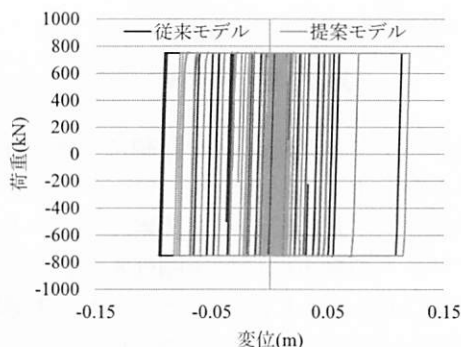


図-8 制震デバイスの設置位置と名称



(a) デバイス G1 の履歴



(b) デバイス G2 の履歴

図-9 制震デバイスの履歴の比較

a) 橋軸方向加震

ここでは、橋軸方向加震時の応答比較について述べる。まず、図-8に示すように、水平斜め方向に設置した制震デバイスをデバイスG1、設置方向を橋軸方向と一致させた制震デバイスをデバイスG2と呼ぶこととする。従来モデルと提案モデルの制震デバイスの履歴を比較したものを図-9に示す。デバイスG1、デバイスG2ともに制震デバイスの履歴形状において大きな差はみられていないが、変位応答についてはわずかながら応答差が生じていることが確認された。また、どちらのモデルにおいても、水平斜め方向に設置されたデバイスG1に比べ、デバイスG2の方が大きな面積の履歴を描いていた。

次に、図-10に提案モデルにおける制震デバイスの軸方向に対して水平直交方向に作用するせん断力の時刻歴を示す。ここで、制震デバイスのせん断力とは、デバイスの軸方向に対して水平直交方向に設

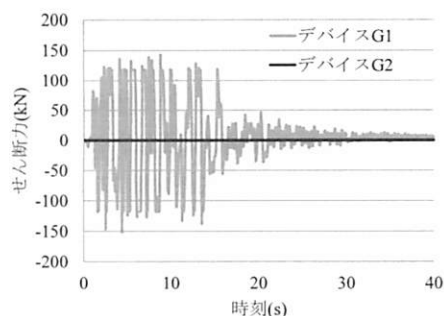


図-10 制震デバイスのせん断力（提案モデル）

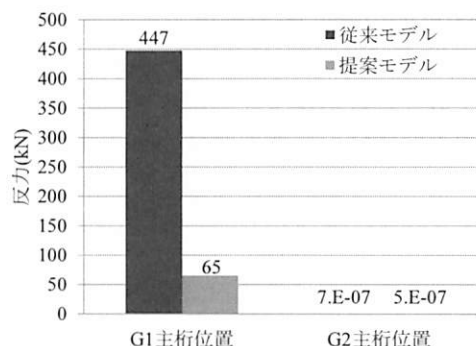
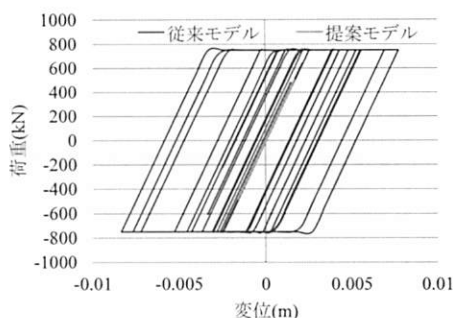


図-11 A1橋台支承部の橋軸直角方向反力の比較

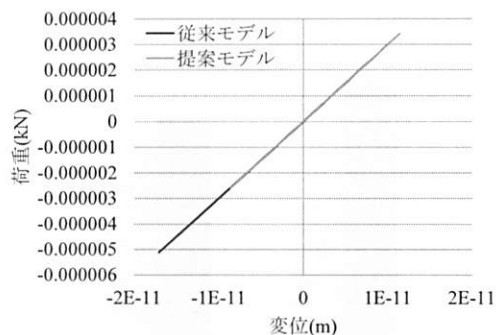
置した剛パネの軸力を指す。また、図-11にA1橋台側のG1およびG2主桁位置における支承部の橋軸直角方向反力の最大値を示す。図-10より、制震デバイスの軸方向と橋軸方向が一致しているG2位置では制震デバイスにせん断力がほとんど生じていないが、制震デバイスの軸方向が橋軸方向に対して斜めに設置されているG1位置では最大で150kN程度のせん断力が確認された。また、図-11より、支承部の橋軸直角方向反力については、G2主桁位置の支承部では両モデルともにほとんど反力が生じていない。一方、G1主桁位置の支承部については、従来モデルでは447kNの反力が生じているのに対し、提案モデルでは65kNしか生じていなかった。これらのことから、提案モデルでは上述のようにデバイスの軸方向と直交する方向にモデル化した剛パネがデバイスに作用するせん断力を受け持つのに対し、従来モデルではデバイスの軸方向に対してのみパネ要素でモデル化しているため、本来デバイスに作用するせん断力を支承部が負担していることが考えられる。

b) 橋軸直角方向加震

ここでは、橋軸直角方向加震時の応答比較について述べる。まず、図-12にデバイスG1とデバイスG2の履歴を示す。橋軸方向に対して斜め方向に設置したデバイスG1において、従来モデルが提案モデルより大きな変位を示した。この原因としては、提案モデルではデバイスの両端をピン結合としているため、



(a) デバイス G1 の履歴



(b) デバイス G2 の履歴

図-12 制震デバイスの履歴の比較

デバイスが橋軸直角方向に回転されやすくデバイスの軸方向に力が伝達されにくいこと、また、デバイス軸方向の水平直交方向の剛パネが上部構造に作用する地震力を負担したことが考えられる。

次に、図-13に提案モデルにおける制震デバイスの軸方向に対して水平直交方向に作用するせん断力の時刻歴を、図-14にA1橋台におけるG1およびG2主桁位置の支承部の橋軸直角方向反力の最大値をそれぞれ示す。図-13より、橋軸方向加震時と同様に、提案モデルの制震デバイスの水平直交方向せん断力は、デバイスG1では最大で80kN程度生じていたのに対し、デバイスG2ではほとんど生じていないことが確認された。また、A1橋台支承部の橋軸直角方向反力についても、G1主桁位置の支承部については、従来モデルでは1316kNの反力が生じているのに対し、提案モデルでは756kN生じていた。このことから、橋軸方向加震時と同様に、従来モデルでは、デバイスに作用するせん断力を、支承部が受け持っていることが考えられる。また、G2主桁位置の支承部反力については、従来モデルと提案モデルとの間に生じる差が小さく、デバイスG2については、モデル化の違いが支承部反力やデバイスのせん断力に及ぼす影響が小さいことが考えられる。

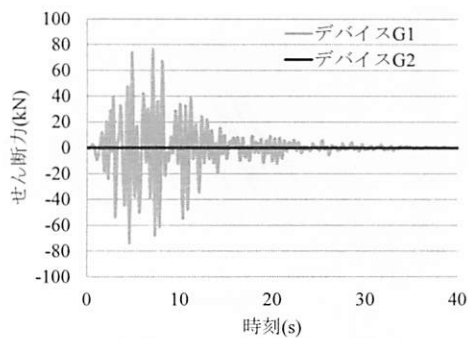


図-13 制震デバイスのせん断力（提案モデル）

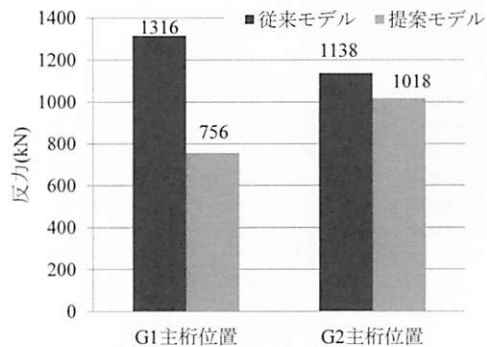


図-14 A1 橋台支承部の橋軸直角方向反力の比較

5. まとめ

本研究では、制震デバイスが水平斜め方向に設置された橋梁を対象に、制震デバイスやデバイスの周辺部材を詳細にモデル化した新たなモデル化手法を提案した。そして、地震応答解析での、制震デバイスを1本のバネでシンプルにモデル化した従来モデルとの比較を行うことで、制震デバイスと支承部に生じる地震時応答の差を定量的に評価した。本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 橋軸方向加震

橋軸方向加震の場合は、制震デバイスの履歴については従来モデルと提案モデルとで大きな差は生じていなかったが、支承部の橋軸直角方向反力に大きな差が生じた。これは、従来モデルにおいては本来制震デバイスに生じるせん断力を支承部が受け持っていることが考えられる。

(2) 橋軸直角方向加震

橋軸直角方向加震の場合は、斜め方向に設置されたデバイスG1の履歴において、提案モデルが従来モデルに比べて小さな応答を示した。この原因としては、提案モデルにおいては、制震デバイス両端がヒ

ン結合となっているため、デバイス軸方向に力が伝達されにくいことなどが考えられる。また、支承部の橋軸直角方向反力については、橋軸方向加震時と同様に、G1主桁位置の支承部において、従来モデルが提案モデルより大きな反力を示した。

(3) おわりに

本研究により、制震デバイスが斜め方向に設置されている橋梁においては、制震デバイス部を詳細にモデル化することにより、制震デバイスに80~150kN程度のせん断力が生じることが明らかとなった。これは、制震デバイスに接続しているブラケットや取り付けボルト、デバイス付近の桁に生じる断面力の評価にも影響を及ぼす可能性があると考えられるため、今後はそれらの部材に対する評価を含め、より詳細に検討していく予定である。

参考文献

- (独) 土木研究所：橋梁に用いる制震ダンパーの性能検証法および設計法に関する共同研究報告書，2012.
- 崔準祐，堺淳一，ハッ元仁，星隈順一：振動台実験との比較に基づく動的解析による制震デバイスの応答予測精度の検証，第15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.337-344，2012.
- 宝蔵寺宏一，崔準祐：既設橋に設置した制震デバイスのばらつきを考慮した橋梁全体系の地震応答解析，第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.37-42，2013.
- Joon-Ho Choi, Hisanori Otsuka, Koichi Hozoji : Influence of performance variation of dissipation device on seismic response of bridge structure system, Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, pp.3631-3638, 2013.
- 宝蔵寺宏一，崔準祐，大塚久哲：橋梁に斜め方向に設置した制震デバイスの入力地震動の加震方法に関する検討，土木学会第68回年次学術講演会，2013.
- 崔準祐，宝蔵寺宏一，ハッ元仁：橋梁に鉛直斜め方向に設置した制震デバイスの結合条件のモデル化に関する検討，第33回土木学会地震工学論文集，2013.
- (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.