

地震の影響を最小化する新構造技術の開発に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 19～平 22
担当チーム：橋梁構造研究グループ
研究担当者：星隈順一，張広鋒，崔準祐

【要旨】

近い将来に発生が懸念されている首都直下地震等の大規模地震では、現在の耐震設計で考慮されている地震力を超える地震動の発生も推定され、このような想定外の大きな地震力に対する対策が求められている。本研究は、その一対策の構築に向けて、従来の耐震・免震・制震技術の統合・アップグレードし、地震動強度に対してセンシティブではないダメージフリー構造の提案に関する検討を行ったものである。検討では、既設橋梁の耐震補強への適用に主眼を置き、すべり支承とダンパーの組み合わせを用いるダメージフリー構造の考案を行ったとともに、実規模橋梁を対象としたシミュレーション解析に基づいた検討により、考案しているダメージフリー構造の地震応答低減効果を数値解析的に確認した。また、実橋梁の耐震補強に本構造を適用する際の考え方および留意事項等を整理した。

キーワード：橋梁，耐震性能，ダメージフリー構造，制震デバイス，シミュレーション解析

1. はじめに

近年個別の断層を考慮した地域毎の地震動強度の推定が行われているが、例えば中央防災会議からの発表による東海地震や首都直下地震など、現在の耐震設計で考慮されている地震力を大きく超えるものも推定されている。このような想定外の大きな地震力に対する対策が求められているが、現在の道路橋の耐震設計においては、設計地震力の大きさが構造物の断面や強度を決める上で主要な支配条件である。したがって、想定地震力が大きくなるにつれ部材強度が大きくなり、建設費用も増大する。

こうした問題点を改善するためには、地震動強度に対してセンシティブではない構造、あるいは、地震動を受けても橋梁としての性能が低下するような損傷が生じず、特別な対策がなくても供用できる構造（以下、ダメージフリー構造と呼ぶ）が有効と考えられ、このような構造の開発が必要となっている。そこで、本研究では、地震動強度に対してセンシティブではないダメージフリー構造を構築するために、従来の耐震・免震・制震技術の統合・アップグレードし、容易に点検・交換可能な構造によりエネルギー吸収を行うとともに、確実に橋梁の地震時挙動を制御し、所要の性能を確保可能な構造機構の構築を試みた。

本検討では、地震動強度に対してセンシティブではない構造のコンセプトおよびそのために必要とする制震・免震デバイスの性能に関する基礎資料の整理・分析を行った上、既設橋梁の耐震補強への適用に着眼したダメー



図-1 構造物の固有周期と加速度応答

ジフリー構造の考案を試みた。また、試設計した実規模橋梁に対してダメージフリー構造の適用性およびその地震応答の低減効果に関する解析的に検証を行ったとともに、実橋梁の耐震補強に本構造を導入する際の考え方および留意事項を整理した。

2. ダメージフリー構造の考案

2.1 地震動強度に対してセンシティブではない構造

地震動強度に対してセンシティブではない構造とは、地震力の影響を受けにくい構造、すなわち地震の揺れに対して構造物が振動にくい構造のことをいう。構造物の固有周期が地震動の卓越周期に近づくとも構造物は揺れやすくなるが、構造物の固有周期がこの共振領域から離れるように調整すれば、地震動強度に対してセンシティブではない構造にすることが可能と考えられる。図-1は、

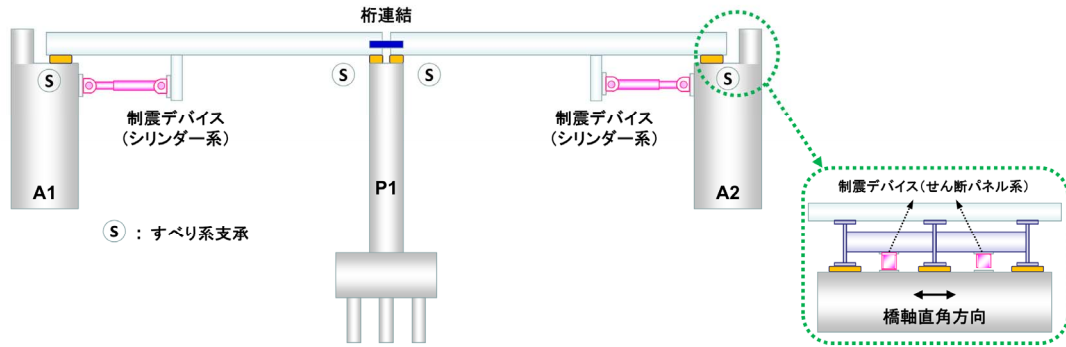


図-2 提案のダメージフリー構造のイメージ図

加速度応答スペクトルを模式的に示したものである。一般的な地震動では、構造物は固有周期がある程度の範囲を超えると地震応答が小さくなる。そのため、特殊なデバイスを用いることによって構造全体の固有周期を長くし、地震による構造物への影響を低減させることが一般的に考えられる。免震橋はその一例として取り上げられる。

2.2 ダメージフリー構造の概要

現在の橋梁の耐震設計や耐震補強においては、デバイスを用いて構造全体の地震応答特性を制御することが一般的である。デバイスとしては、橋梁全体系の減衰および固有周期の増加を図るためのゴム系免震支承、橋梁全体系の震動を抑えるためのダンパー、地震エネルギー吸収を図るためのダンパー、地震力を遮断するために用いられるスベリ支承等が取り上げられる。これらのデバイスは、それぞれ挙動メカニズムが異なり、適用目的および適用範囲も異なっている。ここで、本研究では、既設橋梁の耐震補強への適用に主眼を置き、これらの既存のデバイスを活かすダメージフリー構造の提案を試みた¹⁾。図-2に、本研究で提案しているダメージフリー構造のイメージ図を示す。

提案のダメージフリー構造では、図-2に示すように、地震力を遮断するためのスベリ支承、上部構造の振動を抑えるためのシリンダー系ダンパーおよび地震エネルギーを吸収させるためのせん断パネル系ダンパーを用い、橋梁全体系の地震時挙動を制御することとしている。本構造では、1) スベリ支承を用いることによって下部構造である橋脚や橋台に水平地震力を作用させない(実質、スベリ支承の摩擦が存在するため、完全に遮断することが不可能であるが、極力地震力を低減させる)ようにする；2) 両橋台に取付けるシリンダー系ダンパーを用いることによって上部構造の振動を抑える；3) 橋台に取付けるせん断パネル系ダンパーによって上部構造の橋軸直

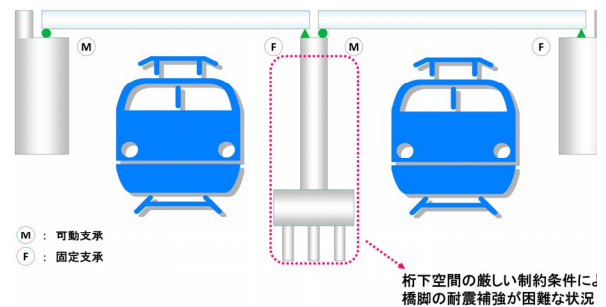


図-3 下部構造の耐震補強が困難な跨線橋のイメージ

角方向の振動を抑えるとともに地震エネルギーを吸収させる。スベリ系支承の導入により地震時橋脚に作用する上部構造の慣性力の低減が期待できる一方で、上部構造の移動量が増加し、橋軸方向の場合は桁端部と橋台間の衝突、橋軸直角方向の場合は上部構造の逸脱などが懸念される。このため、上部構造の水平移動を抑えることが必要とされるが、その対策としては、橋軸方向に対してはシリンダー系ダンパーを、橋軸直角方向に対してはせん断パネル系ダンパーを設置することとした。

一方、このような構造を考案した背景としては、図-3に示す跨線橋のように、橋脚の耐震補強が必要であるが、補強工事の作業空間や工期が確保できず耐震補強対策の実施は極めて困難な場合に適用可能な対策を提案することである。このような状況下の橋の耐震補強に提案のダメージフリー構造を適用する場合は、橋脚に水平の地震力が作用しないため、橋脚や基礎の耐力補強を行う必要がなく、橋脚における工事は支承部の交換のみとなる。そのため、橋梁の耐震補強による鉄道への影響を最小限に抑えることができ、工期の短縮やコストの縮小にも繋がると考えられる。

2.3 スベリ支承の性能

提案しているダメージフリー構造では、スベリ支承やシリンダー系ダンパーおよびせん断パネル系ダンパーを

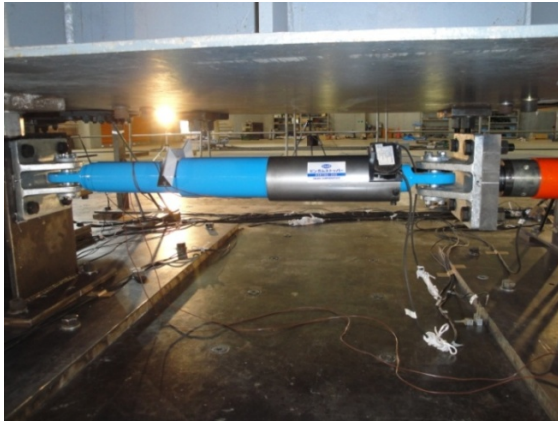


写真-1 シリンダー系ダンパー

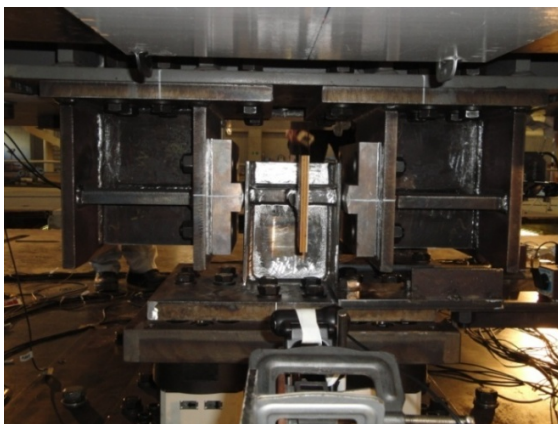


写真-2 せん断パネル系ダンパー

用いているが、シリンダー系ダンパーおよびせん断パネル系ダンパーについては、写真-1, 2 に示すような橋梁の耐震補強に一般的によく用いられるものを考えている。ここで、本研究では、重点としてすべり支承の性能について調査・検討を行った。図-4 と写真-3 に、一例として球面すべり支承の構成および写真を示す。

支承部のすべり材料としては、一般に PTFE(テフロン) が用いられている。PTFE の摩擦係数は、クーロンの摩擦法則により示されるような材料固有の値とはならず、載荷条件に依存した特性を有することが報告されている。そこで、摩擦現象を評価する手法として用いられるトライボロジー理論やヘルツの接触理論に基づき、面圧に依存する支承部の摩擦特性に関する評価式は、式(1)のように誘導される²⁾。

$$\mu(\sigma, v) = \mu'(\sigma)(1 - e^{-Dv}) + \mu''(\sigma)e^{-Dv} \quad (1)$$

ここで、 $\mu(\sigma, v)$: 摩擦係数, σ : 面圧(MPa), v : 速度(kine), $\mu'(\sigma)$: 高速加振時における動摩擦係数 $\mu'(\sigma)$, D : 速度依存性を決める係数, $\mu''(\sigma)$: 低速加振時における動摩擦係数, である。具体的に摩擦係数として算出する場

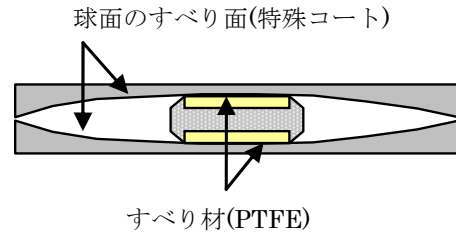


図-4 球面すべり支承の構成



写真-3 球面すべり支承

合には、実験データに基づき各定数を設定することになる。

土木研究所では、今まで支承単体および橋梁全体系に関する振動台実験が実施され、すべり支承の性能を検証した^{3)~5)}。ここで、支承単体に関する実験の概要およびその結果を簡単に説明すると以下ようになる。実験では、図-5 に示すように、振動台上に橋軸方向(長辺) 6.11m, 橋軸直角方向(短辺) 1.83m, 重量 276kN の桁模型を設置し、その4隅を球面すべり支承を用いて支持する供試体を用いた。各すべり支承の下に三分力計を設置し、各支承部に作用する荷重を計測するとともに、レーザー変位計・加速度計により支承の相対変位・桁の加速度を計測した。写真-4 に供試体のセットアップ状況を示す。また、本実験では、すべり系支承の基本的な動的挙動の確認を目的としており、加振方向については橋軸方向の一方のみとした。入力波形は、正弦波及び実地震動による観測波とし、観測波としては 1995 年兵庫県南部地震時の JR 西日本鷹取駅構内における記録の NS 方向を用いた。表-1 に入力波形ケースの一覧を示す。表-2 に各入力ケースの主要な応答値の最大値を示す。これらの結果を考察すると、いずれの結果においても入力振幅を大きくするに従って最大応答値も少しずつ大きくなる傾向にあるが、その値は 20.5kN~26.3kN 間であり、上部構造重量 276kN の 10% 以下であることが確認できた。また、桁に生じる

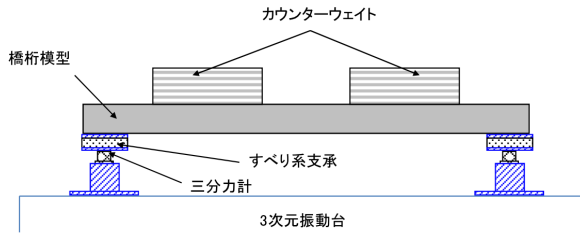


図-5 供試体の模型図



写真-4 供試体のセットアップ状況

加速度はいずれの入力ケースにおいてもほぼ摩擦力相当となり、入力波の違いによる影響はほとんど見られなかった。

本研究では、これらの実験結果を整理・分析を行い、ダメージフリー構造に適用するすべり支承の挙動特性やその地震応答の低減効果を検証した。

3. ダメージフリー構造の効果に関する解析的検証

3.1 解析対象

図-6は、検証シミュレーションに用いた既設橋の一般図および諸元を示したものである。本橋は、各径間長40m、全長80mを有する2径間単純鋼板桁橋であり、実在する既設橋梁に基づき試設計したものである⁶⁾⁷⁾。ダメージフリー構造を適用する前の橋脚の支持条件は、固定支承による可動と固定である。橋脚は、鉄筋コンクリート(RC) T型単柱橋脚とした。また、本橋脚は、現行の設計地震動に対して必要な保有水平耐力を保有していないものである。

3.2 解析概要および解析モデル

3.2.1 解析モデル

検討では、対象とした橋梁に対して、ダメージフリー構造を適用した場合の解析結果を現況に関する解析結果と比較することにより、提案のダメージフリー構造の低減効果を検証することとした。

表-1 入力波形ケース

	入力波	振幅
case1	正弦波 (周期1.0秒)	400gal
case2		500gal
case3		600gal
case4	正弦波 (周期2.0秒)	100gal
case5		150gal
case6	鷹取波	30%
case7		40%
case8		50%

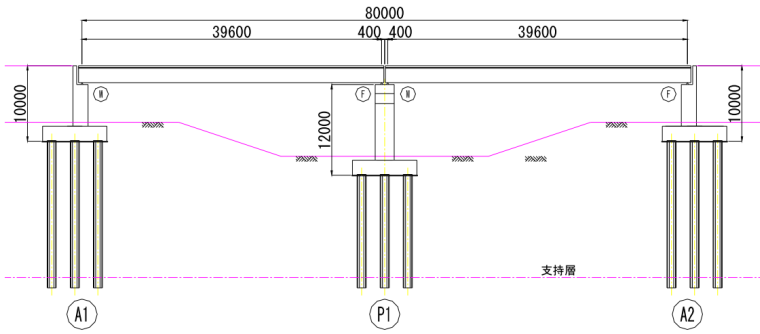
表-2 最大応答値

	入力 加速度 (m/sec ²)	支承の 相対変位 (mm)	橋桁模型 の加速度 (m/sec ²)	三分力計 の荷重 (kN)
case1	4.12	114.2	0.81	20.8
case2	-5.26	141.4	0.88	24.4
case3	6.42	167.4	0.96	26.3
case4	-1.14	89.0	0.75	20.5
case5	-1.65	185.2	1.01	24.5
case6	-2.04	125.3	0.88	23.0
case7	-2.73	194.8	1.03	25.1
case8	-3.31	255.8	1.16	25.2

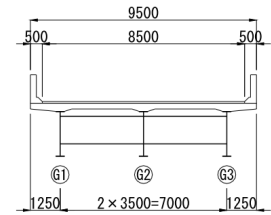
現況モデルについては、上部構造、橋脚、橋台に対しては梁要素、支承、制震ダンパー、基礎に対してはバネ要素で3次元モデルを作成した。図-7に全体モデル図を示す。上部構造については、主桁、横桁、床版をそれぞれ個別にモデル化し、質量を床版部の各節点に作用させることとし、上部構造の挙動を詳細に評価できるようにモデル化を行った。橋脚に対しては、非線形性を考慮しており、非線形履歴特性は武田モデル型を用いた。ダメージフリー構造モデルについては、現況モデルの支承をすべり支承に置き換え、桁端部に制震デバイスを付け加えたものである(図-8)。すべり支承に対しては、図-9(a)に示すように、摩擦係数0.026を有するものを採用し、摩擦力を超えるとすべり出すような非線形特性を有すると仮定した。この際、すべり系支承の初期剛性および摩擦抵抗力後の2次剛性を算定する必要があるが、ここでは、2.3節に紹介した振動台実験結果に基づいて決めることとした。また、デバイスに対しては、デバイスの抵抗特性を考慮したバイリニアモデルでモデル化を行った(図-9(b))。ここで、制震ダンパーの抵抗力は橋台の水平耐力の範囲内で設定することを基本とした。

3.3.2 解析条件

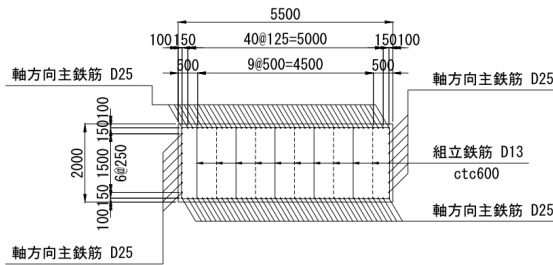
本解析では、直接積分法(Newmark β法)を用いて時刻歴応答解析を行った。入力地震波は道路橋示方書・同解説V耐震設計編に示されている標準波(タイプII, II



(a) 全体一般図



(b) 上部構造の横断面



(c) P1橋脚柱の断面図

D25 (SD295)	5.067 cm ²
本数	100本
As	506.7 cm ²
bd	110000 cm ²
Pt (As/bd)	0.461%

図-6 対象とした橋梁の諸元

種地盤)を用いた。解析ケースとしては、対象とした既設橋の現況解析、すべり支承のみ用いたモデルの解析、すべり支承と制震デバイスを用いたモデルの解析の3ケースとした。

3.3.3 解析結果

図-10, 図-11は、橋軸方向、橋軸直角方向加震時の橋脚最大曲げモーメントおよび橋脚基部のM-φ履歴を検討ケースごとにそれぞれプロットしたものである。すべり支承を採用したケースでは、橋軸方向加震で橋脚基部の最大曲げモーメントが降伏曲げモーメントを若干超えているものの、現況モデルに比べ橋脚の塑性化が橋軸方向、橋軸直角方向ともに大きく減少していることが分かる。すべり支承を用いたことで、上部構造の地震力を下部構造に伝えない結果となり、橋脚に作用する上部構造の地震時慣性力を大きく軽減することが可能であることが確認できた。また、すべり支承に制震デバイスを設置したケースでは、橋軸直角方向加震の場合橋脚の最大曲げモーメントがすべり系支承のみを設置したケースに比べ、若干大きくなっている。これは、桁連結により上部構造の面外挙動の変化に起因し、橋脚の曲げモーメントに影響を与えたものと考えられるが、橋脚の応答値の変化は大きくなく、現況モデルより応答値が小さく評価されている。

また、桁端部における支承部相対変位の時刻歴を図-12,

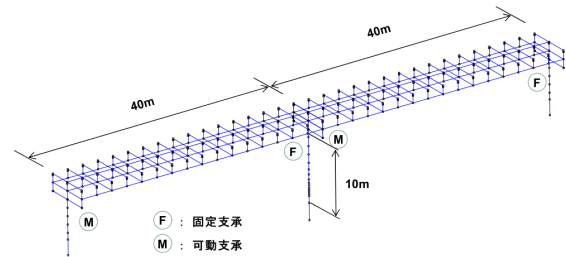


図-7 現況モデルのモデル図

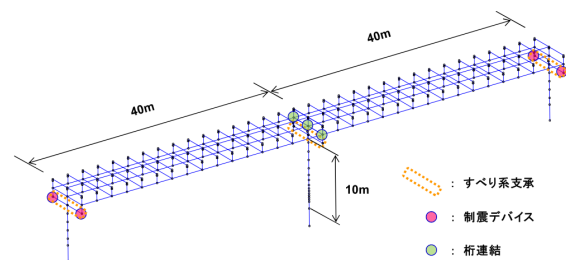
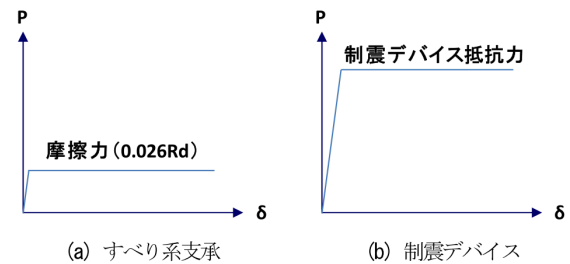


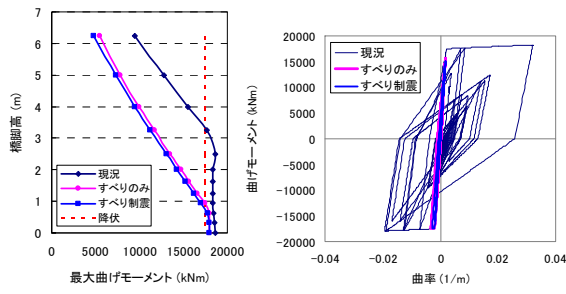
図-8 ダメージフリー構造モデルのモデル図



(a) すべり系支承

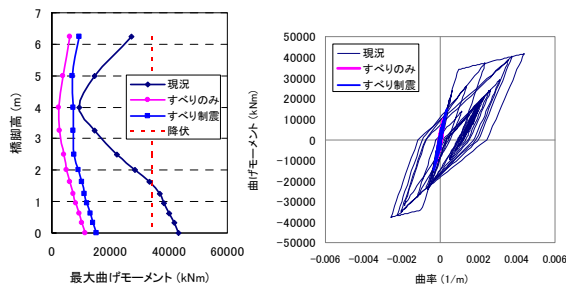
(b) 制震デバイス

図-9 デバイスのモデル図



(a) 橋脚の最大曲げモーメント (b) 橋脚基部のM-φ履歴

図-10 橋脚の応答結果 (橋軸方向加震)



(a) 橋脚の最大曲げモーメント (b) 橋脚基部のM-φ履歴

図-11 橋脚の応答結果 (橋軸直角方向加震)

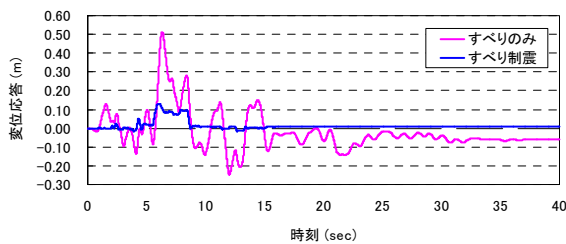


図-12 桁端部の支承部相対変位 (橋軸方向加震)

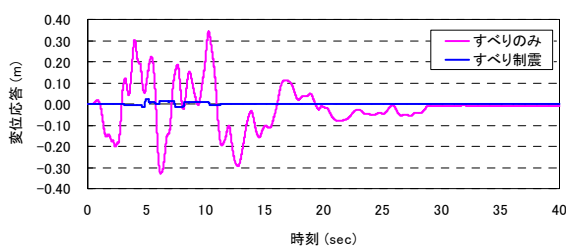


図-13 桁端部の支承部相対変位 (橋軸直角方向加震)

図-13 に示す。すべり支承のみ用いたモデルでは、橋軸方向加震の場合最大0.51m、橋軸直角方向加震の場合最大0.34mの相対変位が生じているが、すべり支承と制震デバイスを用いたモデルでは、橋軸方向加震の場合最大0.13m、橋軸直角方向加震で0.03mと、桁端部の相対変位が大幅に減少する結果となった。制震デバイスを用いることにより、桁端部に生じる相対変位を抑制することが可能であることが確認できた。

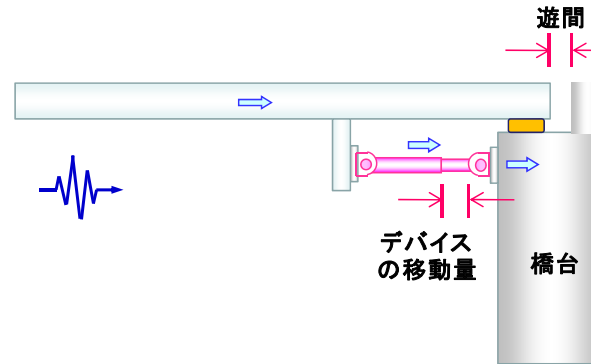


図-14 ダメージフリー構造を適用する場合の照査

4. ダメージフリー構造の設計時の留意点

制震デバイスを橋台に取り付ける場合は、地震時に制震デバイスに生じる抵抗力を橋台が受け持つことになる。既設橋の場合当初の設計においては、制震デバイスによる地震力負担分まで考慮されていないため、地震時の制震デバイスの抵抗力が橋台のたて壁の耐力以内にある必要があり、その耐力照査を行う必要がある。本ダメージフリー構造を適用する際には、橋台の保有耐力の範囲以内に収まることを前提とし、制震デバイスの設計を行う必要がある。また、シリンダー系制震デバイスは、地震時にシリンダーとピストンが相対運動する構造となっているため、地震時にはデバイスの水平移動量が生じる。地震時デバイスの水平移動量が桁端部の遊間より大きくなると、桁端とパラペットの衝突が生じるため、本ダメージフリー構造を適用する際には、デバイスの遊間および桁端の遊間のバランスを考慮しながら、すべり支承や制震デバイスの種類およびその性能を選定する必要がある (図-14)。

5. まとめ

本研究では、橋梁構造物において地震の影響を最小化することが可能な新構造技術の開発を目標として、既設橋梁の耐震補強への適用に主眼を置き、すべり支承とダンパーの組み合わせを用いるダメージフリー構造の提案を試みた。また、検討では、試設計した実規模橋梁に対してダメージフリー構造の適用性およびその地震応答の低減効果を解析的に検証したとともに、実橋梁の耐震補強に本構造を導入する際の考え方および留意事項を整理した。

参考文献

- 1) 崔 準祐, 星隈順一, 張 広鋒: すべり系支承と制震ダンパーを用いた既設橋の地震被害軽減策に関する基礎的検討, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011.9
- 2) 姫野岳彦, 運上茂樹: 支承部における摩擦特性のモデル化とその評価式に関する検討, 土木学会地震工学論文集 Vol.27, 2003.12
- 3) 岡田太賀雄, 運上茂樹: 制震ダンパーを用いた橋梁の地震応答特性, 第12回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.383-pp.390, 2009.1
- 4) 岡田太賀雄, 運上茂樹: 球面すべり支承により支持された橋梁模型の振動台実験, 土木学会第63回年次学術講演会, pp.1235-1236, 2008.9
- 5) Takao OKADA, Shigeki UNJOH: Shake Table Tests for Bridge Model Using Structural Response Control Devices, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.14, October, 2008
- 6) (社)日本道路協会: 道路橋示方書, 1980
- 7) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2002

Development of damage-free structural systems against earthquakes

Budget: Grants for operating expenses
General account

Research Period: FY2007-2011

Research Team: Bridge and Structural Engineering
Research Group

Author: Jun-ichi HOSHIKUMA,
Guangfeng ZHANG
Joon-Ho CHOI

Abstract: This research was conducted with the purpose to develop a damage-free structural system for protecting highway bridge against large earthquakes. The concept of the damage-free structural system was to reduce the seismic response of the bridge by using structural response control devices so as to keep the function of the bridges even in the earthquakes with strong ground motions. In this research, a damage-free structural system by means of using combination of dissipation devices and damper was purposed. The effects of this system were confirmed by dynamic analyses on a real scale bridge. Furthermore, the points for applying this system in practice were also summarized.

Key words: bridge, seismic performance, damage-free structural, seismic control device, simulation analysis