

## (5) 各種ダンパを適用した鋼橋の耐震性向上法

三菱重工業(株)広島製作所 正 岡俊蔵 正 増田伊知郎 正 古川謙一郎  
三菱重工業(株)広島研究所 正 井上幸一 正 明神久也

### 1. まえがき

平成8年道路橋示方書(以下道示と呼ぶ)耐震設計編が改訂され、レベル2地震に対する耐震性の確保が義務付けられた。それに伴い、それ以前に建設された橋梁に対しては断面補強などによる耐震性向上策が施されているが、単純な補強による耐震対策が非現実的なものになったり、死荷重増加に伴う下部工反力増加に対応できないという問題も数多く生じている。また、アーチ橋や斜張橋といった特殊な型式の橋梁では地震時の挙動が複雑であったり、橋梁が供用下にあることなどに起因する施工性の問題等の理由から検討が進んでいないものも多い。

そこで本論文ではこの点に着目し、施工が容易な各種ダンパを適用した鋼橋の耐震性向上法の効果を検討した例を報告する。

### 2. 現状の耐震上の問題点

#### 1) 検討対象としたモデル橋の地震応答解析

本論文で耐震対策として、各種ダンパを適用したモデル橋は、平成8年以前の道示で設計された図2-1に示す4種類の橋で、以下これらをA、B、C、D橋と称する。

A橋は橋長95(m)、支間長31+33+31(m)の方杖ラーメン橋、B橋は橋長80(m)、支間長12+56+12(m)の上路式ランガー橋、C橋は橋長220(m)のニールセン系ローゼ桁橋、D橋は橋長180(m)、支間長40+40+100(m)の斜張橋である。

これらモデル橋に対し、道示のレベル2地震波<sup>1)</sup>(A、B橋はタイプII、I種地盤、C、D橋はタイプI、III種地盤)を適用し、各橋の部材を弾性としたときの地震応答値と元設計値との比率 $\lambda$ として示す。

$$\lambda = S_{RQ} / (\alpha \cdot S_0)$$

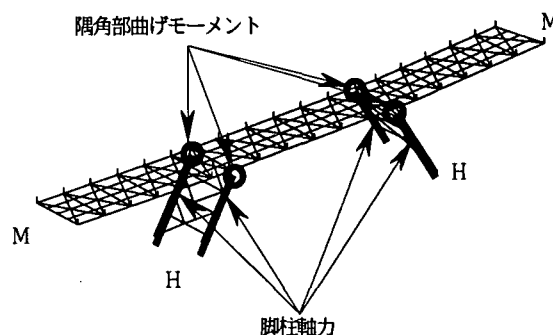
ここに、 $S_{RQ}$ :死荷重応力度とレベル2地震応答値の和、 $S_0$ :元設計値(例えばD+Lで決定)、 $\alpha$ :降伏(または座屈)応力度と許容応力度の比(D+Lの場合には1.7)である。

$\lambda$ が1より大きい場合には、対象部材に降伏または座屈を生じていることを意味している。

#### 2) 地震応答解析結果

解析結果より、図2-1の太線で示す部位でいずれの橋梁も2倍~6倍の弾性限度を超えた応答が生じており、重大な損傷が発生する可能性があることがわかった。

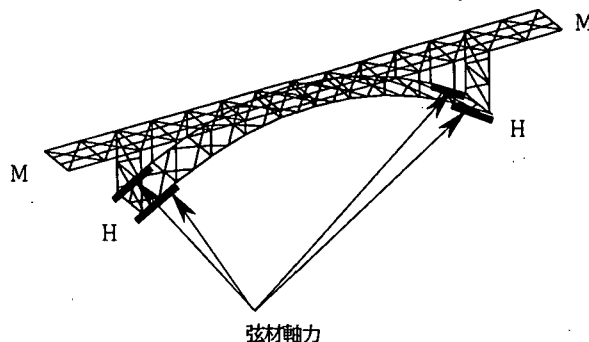
すなわち、A橋は橋脚が桁を隅角部で支える構造であるため、隅角部ならびに脚柱が損傷を受けると、落橋の恐れがある。B橋、C橋ともアーチ弦材が全体の構造体を支えているので、弦材が損傷を受けると全体の崩壊を引き起こす可能性



レベル2地震応答値(各種ダンパ適用前)  
\*数値は元設計値を1とした時の比率

橋軸方向地震	隅角部曲げモーメント	1.9
橋軸直角方向地震	脚柱軸力	2.0

a) A橋: 方杖ラーメン橋



レベル2地震応答値(各種ダンパ適用前)  
\*数値は元設計値を1とした時の比率

橋軸直角方向地震	弦材軸力	2.0
----------	------	-----

b) B橋: 上路式ランガー橋

図2-1(1).モデル橋応答値比較

がある。なお、B橋については橋軸方向地震に関してはレベル2地震による損傷はない。また、D橋は主塔に定着されたケーブルで桁を吊る構造であるため、主塔基部および支承部が損傷を受けると、落橋等の重大な状況となる可能性がある。

そこで、以下の検討では図2-1に示した箇所での応答値の比較を行うこととした。

ところで、レベル2地震応答値が比較的小さかったA橋およびB橋については、単純な断面補強を行った場合に必要な鋼材の重量の検討を試みた。その結果A橋は現状の総鋼重が270(t)であるのに対し、必要補強鋼重が190(t)、B橋に至っては現状総鋼重が117(t)にもかかわらず、必要補強鋼重が154(t)にもなり、断面補強による耐震性向上法は、鋼橋本体の補強の大規模化、死荷重増加による下部工反力の増大の他、施工性・工期等の面から見ても現実的ではないものと判断できる。そこで、現実的かつ効果的に橋梁の応答低減が可能な方法が必要であり、次章以降にて各種耐震ダンパ要素の適用について検討する。

### 3. 耐震ダンパ要素

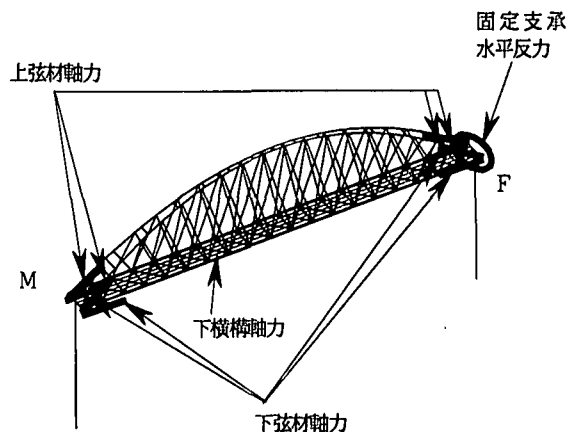
検討に適用する耐震要素は、建築構造物などではよく用いられている代表的なダンパである。表3-1に各種ダンパの原理・特徴を示す。

#### 1) ダンパ要素の選定方法

鋼製ダンパは、ダンパ自体が塑性変形を生じるようにその諸元を決めて設置すれば、塑性変形によりエネルギーを消費することで応答値を低減させることができる。機械式ダンパは、ダンパロッドの変位による運動エネルギーが、内部流体の熱エネルギーとして消散することで応答値を低減させることになる。

これらダンパの具体的な実橋への適用方法として、橋梁の可動側桁端と橋脚等の固定点になりうる部位の間に取付ける。軸力降伏型の鋼製ダンパはトラスを構成する斜材として用いられるが、取付られる斜材の両端部の軸方向相対変位が生じることで、効果的にエネルギーを吸収できる。

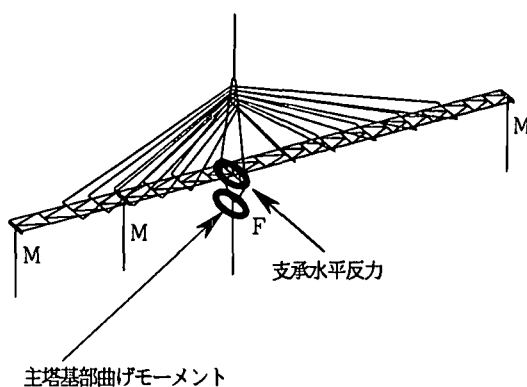
曲げ降伏型鋼製ダンパとオイルダンパの適用対象箇所は基本的に同じと考えられるが、安価なこと、メンテナンス性が良好なこと、地震時作用方向に制限がないことなどから、通常は曲げ降伏型鋼製ダンパを第1番目の選択肢として考慮する。曲げ降伏型鋼製ダンパは、可動側の端部にブラケット等を介してメタルタッチの状態に取り付けると最も効果的に性能を発揮する。しかし、温度変化による橋体の移動が生じる箇所などでは常時にダンパからの反力が橋体に作用



レベル2地震応答値 (各種ダンパ適用前)  
\*数値は元設計値を1とした時の比率

橋軸方向地震	上弦材軸力	1.1
	固定支承水平反力	5.7
橋軸直角方向地震	上弦材軸力	1.4
	下弦材軸力	3.0
	下横構軸力	3.8
	固定支承水平反力	4.7

c) C橋：ニールセン系ローゼ桁橋



レベル2地震応答値 (各種ダンパ適用前)  
\*数値は元設計値1とした時の比率

橋軸方向地震	主塔基部曲げモーメント	3.3
	支承水平反力	3.2

d) D橋：斜張橋

図2-1(2).モデル橋応答値比較

することになるため、その移動量分のクリアランスを設ける必要がある。その場合、当然のことながらダンパの効率は低下する。一方、オイルダンパは温度伸びのように速度の遅い変形に対しては抵抗を生じることがないため、このような問題は避けられる。

また、ダンパ適用箇所のスペースも両者の選定において考慮すべき点である。すなわち、曲げ降伏型ダンパの設置には移動方向に直角な方向の空間が必要であるのに対し、オイルダンパは移動方向の空間が必要である。橋台上の桁下空間など狭隘な場所に設置する場合には、このような空間的な制約を受ける可能性が高い。

軸力降伏型ダンパは元構造部材と置き換えられる場合には、空間的な制約は問題にならないと考えられる。

## 2) ダンパ要素の諸元決定法

レベル2地震時にダンパとして所要の機能を発揮するためには、適切なダンパの性能と配置が重要である。これらは、地震応答解析によって決定することになる。非線形性を有するダンパでは、何回かの繰り返し解析が必要である。

配置に関しては、移動や変形が大きく生じる部位に適用するのが基本である。この時、前述の空間的制約なども当然配慮する。

ダンパ性能として決定すべき重要な要素に、最大荷重とダンパ変位がある。変位は地震応答解析により求まるが、最大荷重は解析に先立って以下の点を考慮して仮定しておく必要がある。

即ち、曲げ降伏型鋼製ダンパやオイルダンパを用いる場合には、橋脚の保有水平耐力や設置箇所の強度を参考にしてダンパに作用させる最大荷重を決定しておく。

また、軸力降伏型鋼製ダンパは、橋梁構造の一部である横構等のトラス構造を構成する斜材の代用となる耐震用部材であるため、レベル2地震時にはダンパとして機能し、それ以外には通常の弾性部材としての強度が必要である。したがって、軸力降伏型鋼製ダンパの降伏荷重を決める場合は、地震時以外の荷重条件下における最大軸力に対して弾性範囲内で所要の安全率を持つように諸元を決める。

## 4. ダンパを用いたモデル橋の耐震検討

### 1) モデル橋の固有振動解析

前章で説明した各種ダンパが効果的に機能するように配置を検討するには、地震応答に影響の大きい振動モードを知る必要があり、そのためには固有振動解析を実施する。曲げ降伏型鋼製ダンパ、オイルダンパについては橋軸方向または橋軸直角方向への変位量が大きく生じている部分に適用する。また、軸力降伏型鋼製ダンパは、軸力が作用する部材への適用されるので、トラス構造の面内せん断変形が大きく生じている部分の斜材に適用する。

表3-1. 各種ダンパの特徴

形式種類	鋼製ダンパ		機械式ダンパ
	曲げ降伏型	軸力降伏型	オイルダンパ
概形図			
基本原理	荷重 P による曲げ応力が、使用材料の降伏応力を超えるように D および h を決めることでダンパに塑性変形が生じるようにし、エネルギーを吸収。	荷重 P による直応力が、使用材料の降伏応力を超えるようにダンパ部 (L <sub>d</sub> 部) の断面積 A を決めるとともに座屈拘束がすることで、ダンパ部に塑性変形が生じるようにし、エネルギーを吸収。	荷重 P により、本体内部に封入されたオイルの抵抗を受けながらダンパロッドは伸縮する。この時の運動エネルギーが熱エネルギーに変換され消散する。
適用箇所	主に橋軸方向地震に対し、橋脚と桁間など	主に橋軸直角方向地震に対し、対傾構・横構など	主に橋軸方向地震に対し、橋脚と桁間など
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・製作が容易であり、安価</li> <li>・スペースが小さい場合 (主に高さ方向) は設置困難</li> <li>・任意方向からの地震に対してダンパは作用する</li> <li>・温度伸びに対するクリアランスが必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・製作が容易であり、安価</li> <li>・橋梁部材の一部として兼用可能。</li> <li>・荷重 P の値を決める際には、地震以外の荷重条件に対し所要安全率が得られるよう注意が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・機械品であり比較的高価</li> <li>・スペースがある程度小さくても設置可、高い減衰力が得られる。</li> <li>・ダンパロッド方向に対してしかダンパは作用しない</li> <li>・橋軸方向温度伸びには抵抗しない</li> <li>・定期的なメンテナンスが必要</li> </ul>

図4-1に各モデル橋の耐震対策上重要な振動解析のモード図を示す。

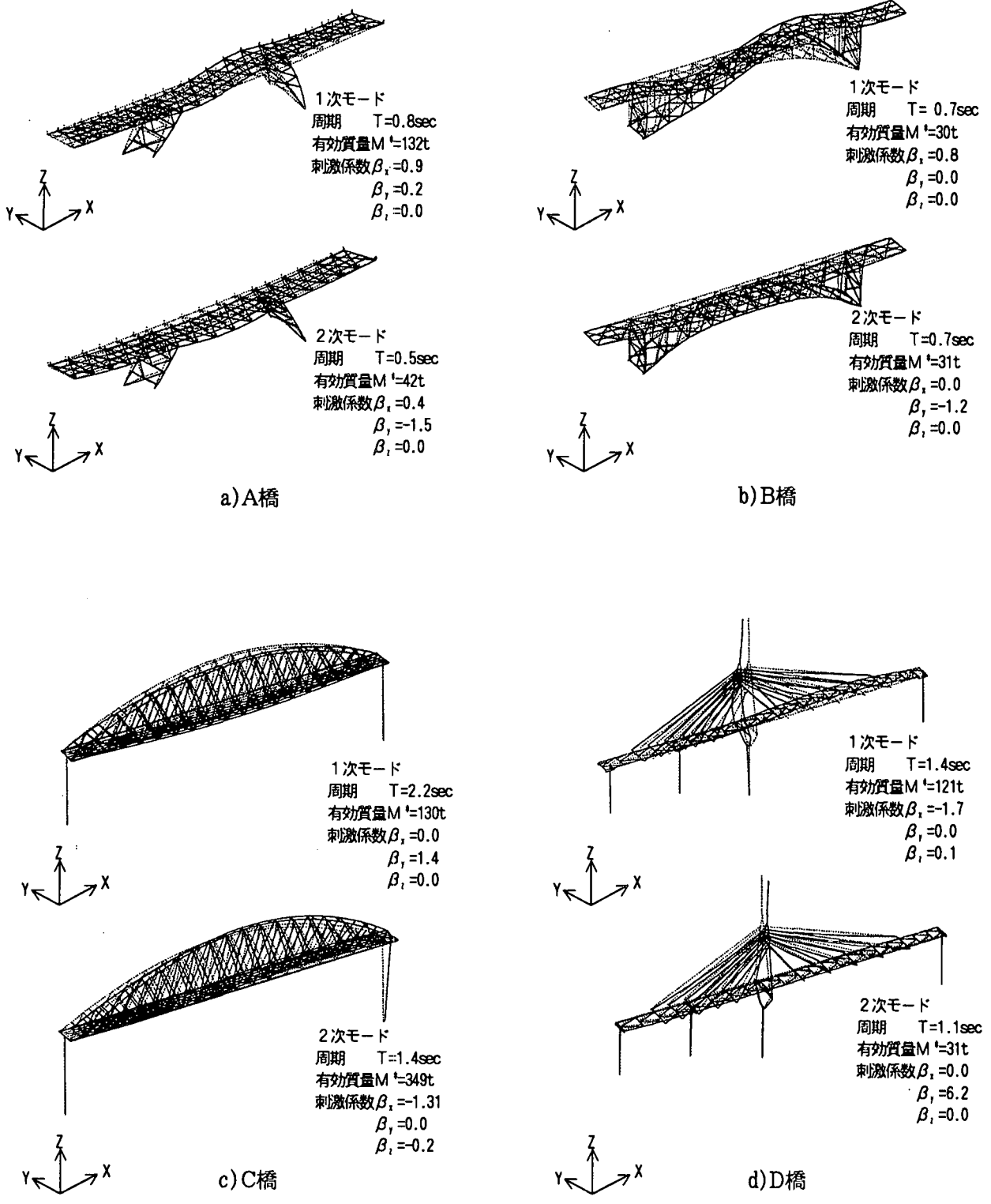


図4-1. モード図

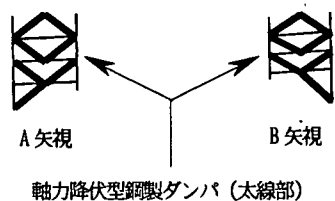
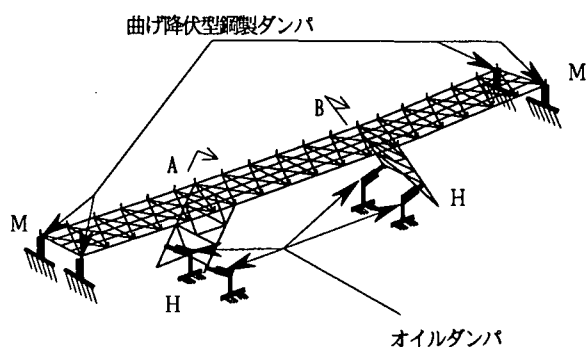
## 2) モデル橋への各種ダンパの適用

図4-2には、これらモードを参考にして決めた各モデル橋ごとのダンパ適用箇所を示す。各種ダンパの適用に際しては、ダンパを1箇所での設置で耐震性を向上させようとした場合、ダンパの反力が過大となることが多い。そこで、反力の分散化を図り本体補強を減じるために、各種ダンパの併用もしくは同種のダンパであっても複数箇所への適用を行うことを原則とした。

また、同図中にダンパ性能も示す。これらは地震応答解析により定めたものであるが、ダンパによる応答低減効果の確認を主目的にしており、必ずしも最適な値に収束させていないものもある。

A橋には、橋軸方向地震により隅角部曲げモーメントを発生させる橋軸方向の変位低減を目的とした主桁端部への曲げ降伏型鋼製ダンパの設置及び脚基部へのオイルダンパの設置、さらに、橋軸直角方向地震に対する脚柱軸力低減、すなわち脚柱対傾構のせん断変形低減を目的とした対傾構斜材への軸力降伏型ダンパの適用、以上の3種類のダンパを併用した対策を施すこととした。

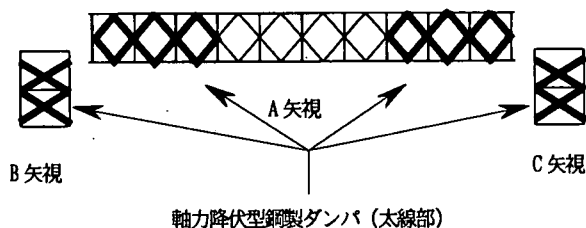
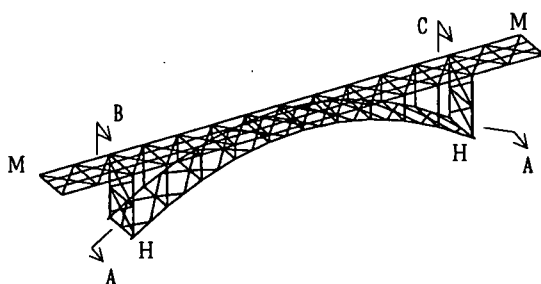
B橋には、橋軸直角方向地震に対するアーチ弦材軸力低減すなわちアーチの水平せん断変形低減を目的とした下横構斜材および端部対傾構斜材への軸力降伏型ダンパの複数箇所への適用を検討した。



ダンパ諸元

種類	主仕様
曲げ降伏型	材質:SS400 相当, 寸法φ300,L=2000mm 降伏水平荷重 $P_y=640\text{kN}$
オイルダンパ	減衰係数:11760kN・sec/m, 最大減衰力:3920kN, ストローク:±50mm
軸力降伏型	降伏軸荷重: $P_y=1765\text{kN}$

a) A橋



ダンパ諸元

種類	主仕様
軸力降伏型	降伏軸荷重: $P_y=440\text{kN}$ (対傾構) 降伏軸荷重: $P_y=450\text{kN}$ (下横構)

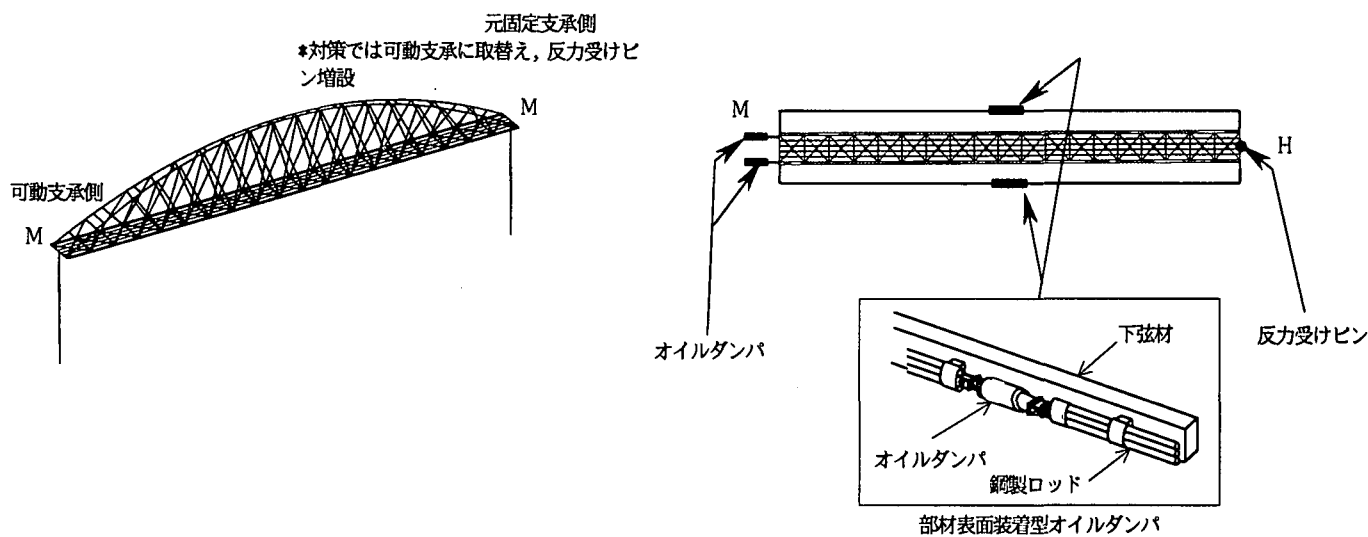
b) B橋

図4-2(1). 各種ダンパ適用箇所および諸元

C橋では、鋼製ダンパの設置がスペースの関係等で難しかったため、オイルダンパを主体とした対策で検討を行うこととした。橋軸方向の支承水平反力低減すなわち橋軸方向の変位低減を目的とした可動側桁端へのダンパ設置、橋体の面外変形低減を目的とした固定側桁端における固定支承から可動支承への取替えおよび水平反力受けピンの設置、さらに、下弦材表面の橋軸方向全線に鋼製ロッドを取付け、その中間部にオイルダンパを設置した減衰装置の付加を検討した。これは、橋体面外変形により発生する鋼製ロッドの伸縮エネルギーを中央部に取付けられたダンパで吸収するものである。

また、D橋では、鋼製ダンパの設置がスペースの関係等で難しかったため、オイルダンパを主体とした対策で実施することで検討を行うこととした。橋軸方向の支承水平反力低減、すなわち橋軸方向の変位低減を目的とした可動側桁端へのダンパ設置を行った。

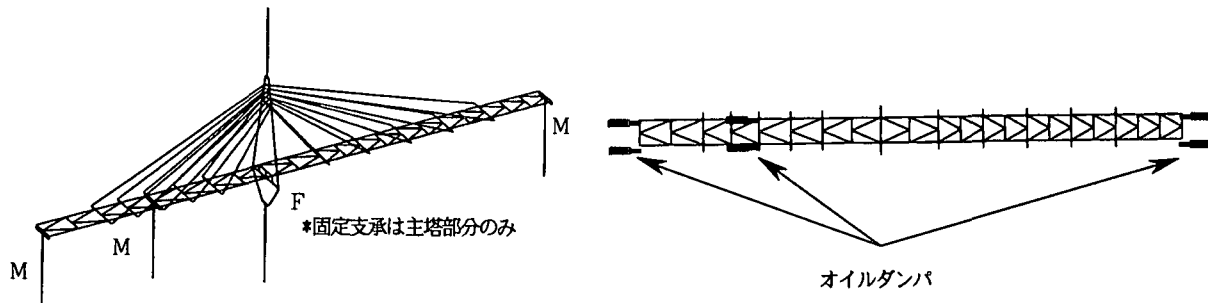
ただし、D橋のような斜張橋においては、橋軸直角方向地震時応答に対するケーブル振動の影響が複雑で、本検討で採用した各種ダンパによる耐震性向上法だけでは対応困難であったため、橋軸直角方向地震に対しての検討を行っていない。



ダンパ諸元

種類	主仕様
オイルダンパ	・部材表面装着型 減衰係数:11760kN・sec/m, 最大減衰力:4120kN ストローク:±100mm
	・桁端取付 減衰係数:11760kN・sec/m, 最大減衰力:5390kN ストローク:±200mm

c) C橋



種類	主仕様
オイルダンパ	減衰係数:19600kN・sec/m, 最大減衰力:2160kN ストローク:±50mm

d) D橋

図4-2(2). 各種ダンパ適用箇所および諸元

### 3) 各種ダンパ効果の確認

次に、これら各種ダンパの効果を確認するために、再度レベル2地震応答解析を実施し、対策前と対策後の応答値比較を行った。各モデル橋の元設計は、降伏応力に対し所要の安全率を見込んだ平成8年以前の道示に従った設計によるものであるため、各部材の応答値が元設計断面力と所要の安全率を乗じた目標値以内に収まれば、各構造部材は少なくとも降伏以下の弾性ということである。その結果を表4-1に示す。

A橋、B橋に関しては、橋軸、橋軸直角方向地震に対してほぼ元設計値のレベルにまで応答値を低減できていることがわかる。各種ダンパの性能および配置場所を適切に選べば、本体補強することなく対応可能になっている。

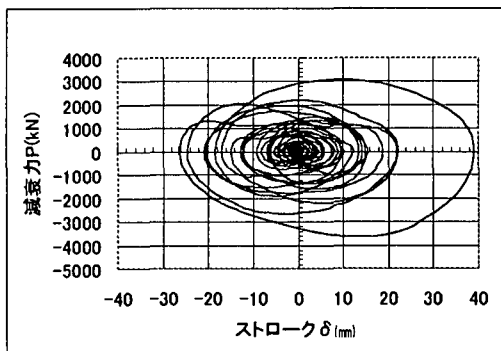
本検討で適用した各種ダンパの特性を、A橋を例にして図4-3に示す。

(I)は橋軸方向地震時の曲げ降伏型ダンパの応答履歴であるが、3章でも述べた通り、橋軸方向には温度伸びの影響を考慮しているため、地震時に桁が変位を生じ、ダンパに当たるまでに隙間が有る。その分だけエネルギーを吸収する効率が落ちる(図中変位±50mmの部分)。

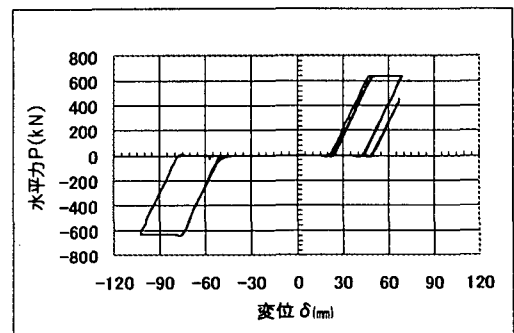
(II)は橋軸方向地震時のオイルダンパの応答履歴である。オイルダンパは3章で述べた通り速度に比例する特性を持つが、力と変位の関係は図のようになり、曲線で囲まれた部分が吸収エネルギーを示している。

(III)は橋軸直角方向地震時の軸力降伏型ダンパの応答履歴である。(I)と同様、鋼材の塑性変形を応用したという点で原理は同じであるが、ダンパと橋本体に隙間が無いので、(I)とは異なり効率よくエネルギーを吸収していることがわかる。

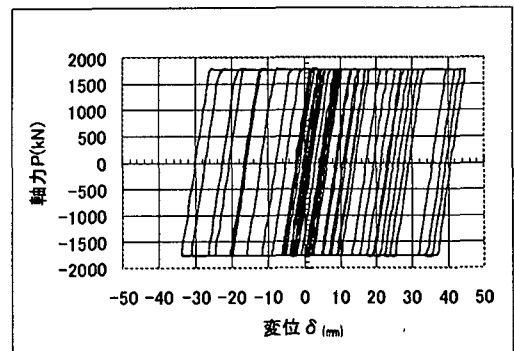
(I)および(III)については、塑性変形を繰り返すことによる、ダンパそのものの損傷や劣化の可能性が考えられるが、これに対しては累積塑性変形倍率<sup>2)</sup>や最大歪などに着目し、その塑性変形性能を検討する必要があるといえる。



(II) オイルダンパ (橋軸方向地震時)



(I) 曲げ降伏型鋼製ダンパ (橋軸方向地震時)



(III) 軸力降伏型鋼製ダンパ (橋軸直角方向地震時)

図4-3. 代表的な各種ダンパの応答履歴(A橋)

表4-1. ダンパによる応答値低減効果 (元設計値を1.0とした時の相対比較)

#### a) A橋

地震方向	着目部	無対策	ダンパ有
橋軸方向	隅角部曲げモーメント	1.9	1.0
橋直方向	脚柱軸力	2.0	1.0

#### b) B橋

地震方向	着目部	無対策	ダンパ有
橋軸方向	弦材軸力	0.9	-
橋直方向	弦材軸力	2.0	1.0

\*橋軸方向レベル2地震に対し、本モデル橋は対策無で弾性域にあるので橋軸方向の検討は省略。

#### c) C橋

地震方向	着目部	無対策	ダンパ有
橋軸方向	上弦材軸力	1.1	0.8
	支承水平反力	5.7	2.9
橋直方向	上弦材軸力	1.4	1.2
	下弦材軸力	3.0	0.9
	下横構軸力	3.8	1.9
	支承水平反力	4.7	2.1

\*支承水平反力は

橋軸方向：無対策時は固定支承の反力、ダンパ有時は反力受けピンの反力の値を示す。

橋直方向：無対策時は固定支承の反力、ダンパ有時は可動化した支承の反力の値を示す。

#### d) D橋

地震方向	着目部	無対策	ダンパ有
橋軸方向	主塔基部曲げモーメント	3.3	0.6
	支承水平反力	3.3	0.5

\*支承水平反力は主塔部固定支承の反力

C橋については、上部工各部材の応答値は、オイルダンパの減衰効果でほぼ元設計レベルにまで応答値が低減できている。しかし、支承部の水平反力値が十分低減できない。C橋のように桁が橋脚の上に載る構造では、橋脚と桁が一体とみなせるA、B橋のようなケースと異なり、各種ダンパが下部工に対しては配置されておらず、支承に対する十分な低減効果がないことを意味している。さらに、C橋のモデルは、橋脚が長い上、上部工の自重も大きくトップヘビーな構造であるために反力が極端に大きくなっているものと思われる。したがって、このような大型の桁橋の耐震性向上を考える場合は、上部工、下部工の剛性や寸法、重量等のバランスを考慮して、その両方に適切な対策を施す必要があると思われる。

D橋に関しては、第1段階で仮定したオイルダンパの効果が十分であったため、必要以上に応答値が低減した結果となった。必要に応じ、最適な効果が得られるまでの検討をさらに行えば良いが、本検討ではこれ以上の検討は省略した。D橋も橋脚上に桁が載る型式という意味では、C橋に近い性格を持っているといえるが、橋軸方向地震に関してはC橋とは違い、支承部の水平反力は十分低減できている。その理由は、元設計では主塔部の固定支承1箇所集中していた橋軸方向水平反力を、前述したように、橋脚上3箇所のオイルダンパに分散させることができたためと考えられる。

## 5. まとめ

本報告では、鋼橋への曲げ降伏型鋼製ダンパ、オイルダンパ、軸力降伏型鋼製ダンパの適用方法について示すとともに、平成8年道示以前に造られたいくつかの代表的な型式の鋼橋に対して、これら各種ダンパを適用した耐震性向上法の効果を確認した。

方杖ラーメン橋（A橋）や上路式ランガー橋（B橋）のような橋脚と桁が一体とみなせる鋼橋については、適切な箇所、仕様の各種ダンパを複数箇所に適用することで、従来の補強方法で必要であった補強物量を抑え、下部工反力の増加も抑えることが可能となった。

一方ニールセン系ローゼ桁橋（C橋）、斜張橋（D橋）のような型式の鋼橋については、上部工、下部工同時の対策が必要であり、それらの剛性、寸法および重量等のバランスを考え、効果的に全体の応答を低減できるような上部工、下部工を合わせた対策法を検討していく必要がある。

## 参考文献)

- 1)道路橋の耐震設計に関する資料，社団法人日本道路協会，p10-4～10-6，1997年3月。
- 2)森下，村瀬，井上，立山，両端に軸降伏ダンパーを組み込んだ長尺ブレースのダンパー部復元力特性試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，p903-904，2000年9月。