

(論文)

# キールダンパを用いた橋桁の制振

## Vibration Control of Bridge Girders with Keel Dampers



本家浩一\*(工博)  
Dr. Koichi Honke



岡田 徹\*(工博)  
Dr. Toru Okada



宇津野秀夫\*(工博)  
Dr. Hideo Utsuno



安田克典\*\*  
Katsunori Yasuda



清水義和\*\*  
Yoshikazu Shimizu

A newly developed keel damper, a convenient damping technique, can provide high damping performance for vibration caused by wind and bridge traffic. In this paper, the basic structure of this damper is introduced. In addition, scale model and numerical analysis results for a model bridge are also discussed.

まえがき = 近年、橋梁の合理化・低コスト化を目的とした少数主桁橋梁などが増加している。少数主桁橋梁は、I桁で構成された開断面形状であり、対傾構や横構を省略することが通例である。その結果、従来の橋梁形式に比べてねじれ剛性が低くなるため、ねじれ振動数が低下すると言われている。また、各種実験データによると、少数主桁橋は減衰についても従来の橋梁に比べて低下する傾向にあることも報告されており<sup>1)</sup>、風や交通振動の問題が懸念されている。

そこで著者らは、簡便な装置で高い減衰付加性能を発揮する制振手法(キールダンパ)を提案した。このダンパは桁の端部に取付ける構造であり、過去の研究例からも桁の端部にダンパを付加できれば、橋梁に非常に効果的に減衰を付加できることが報告されている<sup>2)</sup>。本ダンパは、少数主桁橋梁で課題とされる曲げ変形とねじり変形の双方に対して減衰効果を付加することを特長とする。本稿では、このダンパの基本構造を紹介し、模型実験による効果の検証と考察、及びモデル橋に対してキールダンパを適用した場合の検討結果を報告する。

### 1. キールダンパの基本構造

キールダンパの概略図と基本構造を図1及び図2に示

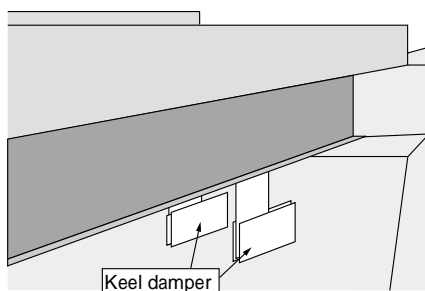


図1 キールダンパ概略図  
Fig. 1 Schematic diagram of keel damper

す。橋桁の底フランジからヒレ状の板(これがヨットのキールを彷彿させることからキールダンパと呼んでいる。以後この板のことをキールと呼ぶ)を伸ばし、また橋台や橋脚からこのキールを挟みこむように出した2枚の板部材の間に制振材料を設けた構造である。

次に、キールダンパの動作原理を図3に示す。橋梁が曲げ変形する際、桁の端部における上下変位は小さいが、

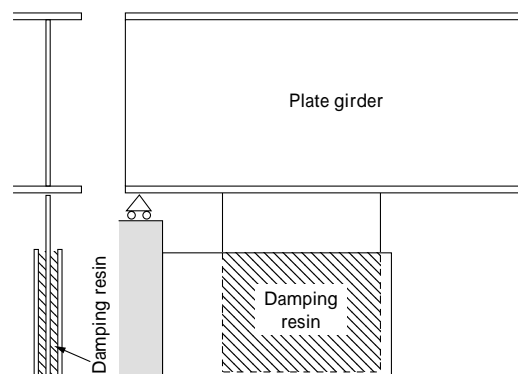


図2 基本構造  
Fig. 2 Fundamental structure of keel damper

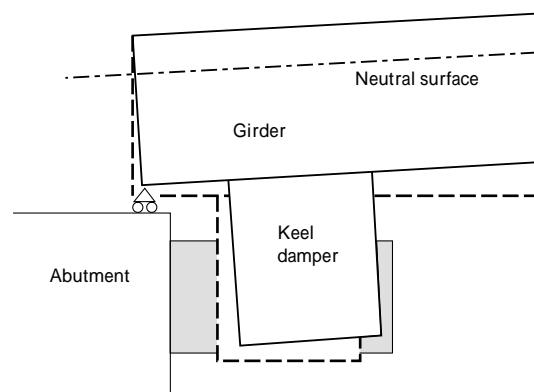


図3 動作原理  
Fig. 3 Operating principle

\*技術開発本部 機械研究所 \*\*都市環境・エンジニアリングカンパニー 構造技術部

桁がゴム支承などの移動ピン支持構造になっている場合、回転変形は橋梁長手方向で最大となる。この回転変形は、桁下から伸ばしたキールにより並進運動に拡大変換され、橋梁のわずかな変位に対しても制振樹脂の部分に大きなせん断変形を生じさせることができる。また、この回転運動の中心は、ゴム支承部ではなくその上方の桁の曲げ中心との交点となり、キールの長さ以上に回転半径が大きくなる。この結果、比較的コンパクトなダンパでも、効率的にエネルギー吸収を行うことができ、高い制振性能の付加が可能となる。

## 2. 模型実験による検証<sup>4)</sup>

### 2.1 実験装置

支間長約50mの2主桁橋にキールダンパを取付けた場合を想定し、曲げ変形に関して相似則を満足する模型を製作し、実験を行った。実験装置を図4に示す。模型の基本縮尺は1/10で、重量比は1/10<sup>3</sup>とした。固有振動数は、周波数依存性のある樹脂の特性を観察するため、実橋とほぼ一致させた。これらの相似則を満足させるため、橋梁部は25mm厚の平板で模擬し、ダンパ部はその面積を実橋想定の1/10<sup>3</sup>とした。また樹脂厚は実橋適用想定時の40mmに一致させた。さらに、キール部分の弾性変

形の影響を無視するため、ダンパを構成する各部材は実橋に比べて相対的に剛にした。これは、今回の実験が主に樹脂特性と減衰性能との関係に着目したことが理由である。図4(b)に実際の橋梁の形状を破線で示している。実験に使用した制振樹脂の材料特性を図5に示す。樹脂特性の温度依存性の制振効果に対する影響を調べるため、樹脂部を取囲むように冷却水タンクを取付け、タンク内の水の温度を0～45℃に変化させて実験を行った。減衰性能は打撃試験による自由振動応答波形から求めている。

### 2.2 実験結果

図6に実験結果を示す。図には実験結果に合わせた図7のFEMモデルにより算出した解析結果も併せて表示している。一般に同規模の橋梁の減衰比が1%程度であることを考えると、今回実験に用いた制振樹脂の特性が比較的大きい温度依存性を持つにもかかわらず、本ダンパにより広い温度範囲(0～50℃)で高い減衰性能を付加できることが確認できる。温度が低くなるほど固有振動数が増加しているが、これは図5から分かるように樹脂が硬くなるためである。

### 2.3 考察

ダンパの減衰付加性能は、材料の損失係数だけでなく、

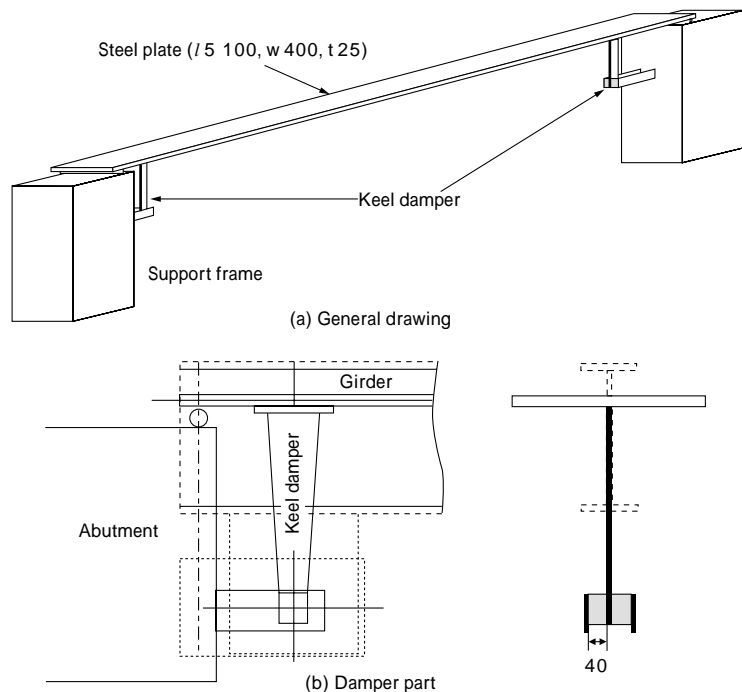


図4 実験装置  
Fig. 4 Experimental equipment

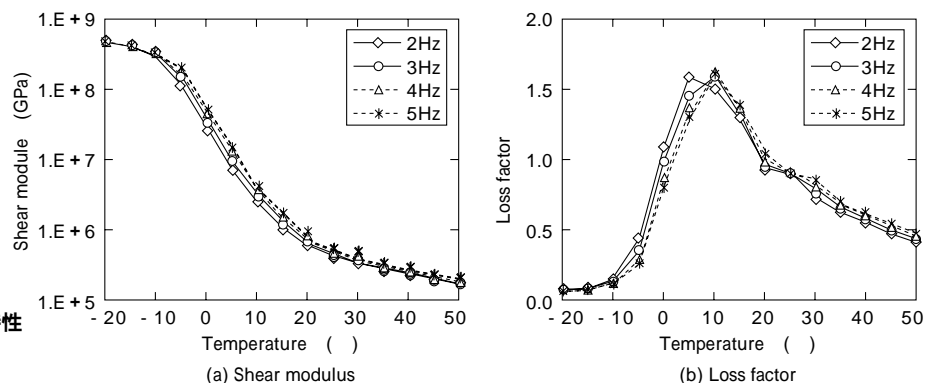


図5 実験に使用した制振材料の材料特性  
Fig. 5 Material property of damping material used for experiment

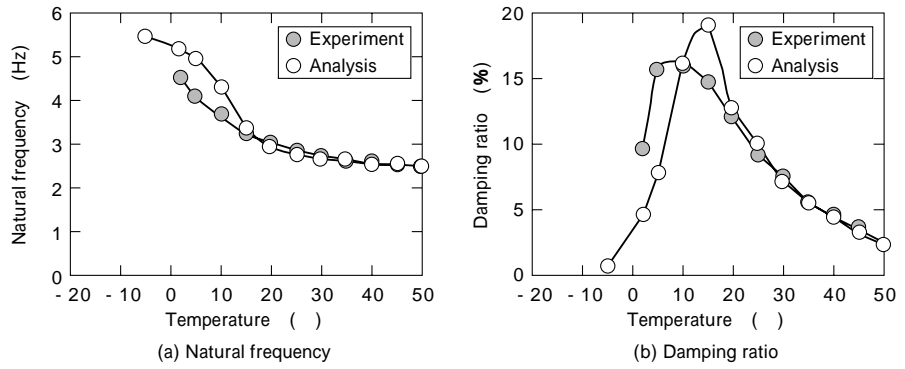


図6 実験結果  
Fig. 6 Experimental result

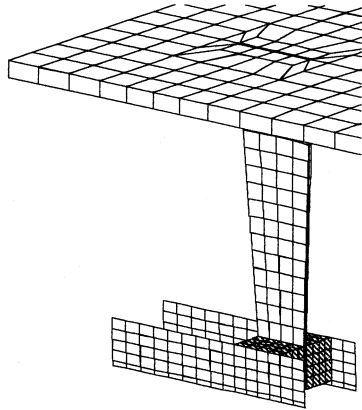


図7 模型 FEM モデル  
Fig. 7 FEM model of the scale model

ダンパの等価剛性も大きく関係する。ここではこれらの材料特性と減衰性能に関する考察を行う。

まず、キールダンパが取り付けられた橋桁を、図8に示すような両端に回転複素ばね  $k(1 + j)$  を有する長さ  $L$ 、曲げ剛性  $EI$ 、単位長さ当たりの質量  $m$  のはりでモデル化する。

ここで、次の無次元量

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, T = \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}t, K = \frac{kL}{EI} \quad \dots\dots\dots(1)$$

を定義すると、このはりの無次元化された運動方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial T^2} + \frac{\partial^4 Y}{\partial X^4} = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

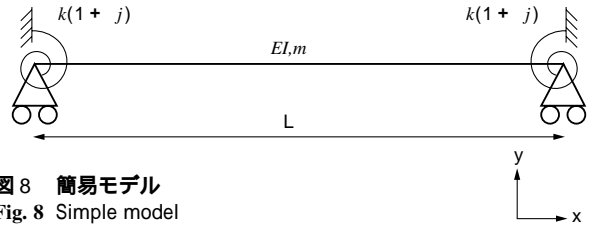


図8 簡易モデル  
Fig. 8 Simple model

また、無次元化された境界条件は次式で与えることができる。

$$X=0, X=1 \text{ で } Y=0, \frac{\partial^2 Y}{\partial X^2} = K(1 + j) \frac{\partial Y}{\partial X} \quad \dots\dots\dots(3)$$

これらの式を FEM を用いて複素固有値解析することにより、キールダンパを取付けた橋桁の固有振動数及び減衰比を得ることができる。

図9は、このようにして得られた減衰比に関するマップである。図から分かるように、ダンパの剛性に関しては最適値があり、これより大きすぎても小さすぎても減衰性能は悪化する。また、損失係数については、現実存在する樹脂の損失係数の範囲では、大きければ大きいほど望ましいことがわかる。

### 3. モデル橋に適用した場合の検討<sup>5)</sup>

実際の橋梁に適用することを想定して、モデル橋にキールダンパを適用した場合の減衰付加性能を数値シミュレーションにより検討した。本検討でのモデル橋は、PC床版を有する支間長 59.6m の単純合成 2 主桁橋とした。

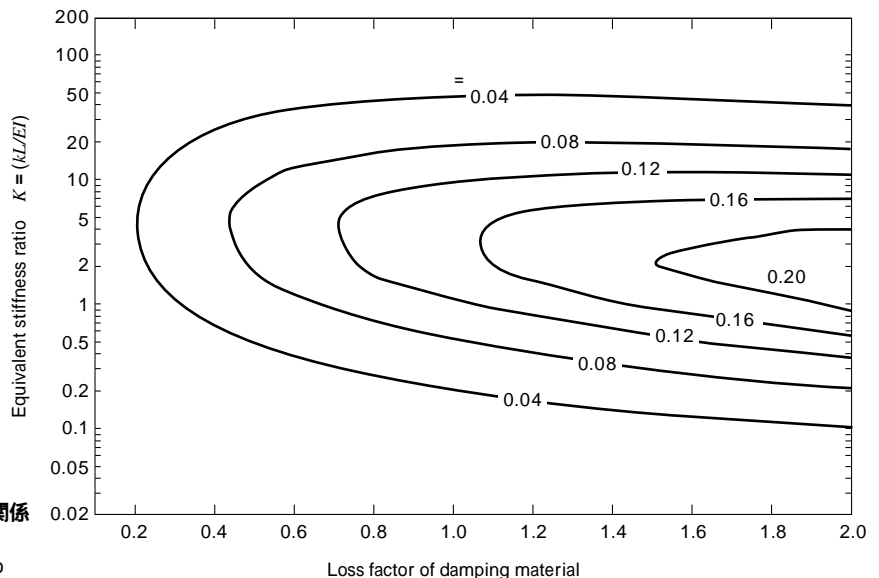


図9 ダンパ特性 ( $K$ , ) と付加減衰比 の関係  
Fig. 9 Relationship between damper characteristics ( $K$ , ) and damper ratio

モデル橋の一般図を図 10 に示す。

### 3.1 解析モデルの説明

解析は 3次元 FEM モデルで行い、図 11 に示す曲げとねじれの 1次モードに対する効果を調べた。橋梁部はシェル要素でモデル化した。キールダンパはその概略寸法を図 12 に示すものとし、板状部材にはシェル要素を、制振樹脂の部分はソリッド要素でモデル化した。キールダンパが無い場合の橋梁の固有振動数は、曲げ 1次、ねじれ 1次がそれぞれ 1.75Hz、1.90Hz である。検討に使用した粘弾性体のせん断係数及び損失係数を図 13 に示す。実験に使用したものと比較すると、樹脂特性の温度依存性が小さいものを用いている。減衰付加性能は実固有値解析によりモード歪みエネルギーを算出し、モード歪みエネルギー法を用いることにより求めている。

### 3.2 解析結果と考察

図 14 に 0 から 40 における各モードの固有振動数と減衰比を示す。減衰比は粘弾性体以外の橋梁部の構造減

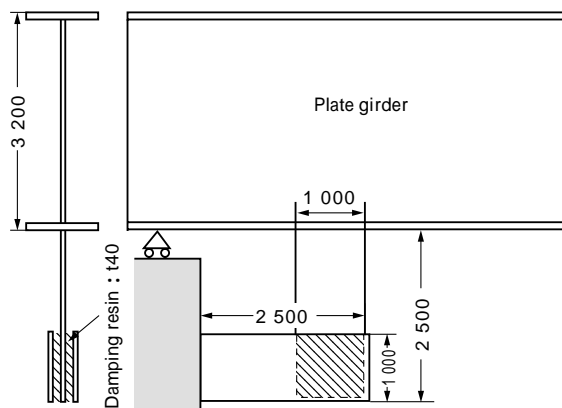


図 12 モデル橋の側面図と概略寸法  
Fig.12 Side-view and main dimension of model bridge

衰は零として計算しているため、図 14 (b) の値は、このキールダンパにより付加される減衰量となる。曲げモードでは温度 20、ねじれモードでは温度 0 において

図 10 モデル橋一般図  
Fig.10 General drawing of model bridge

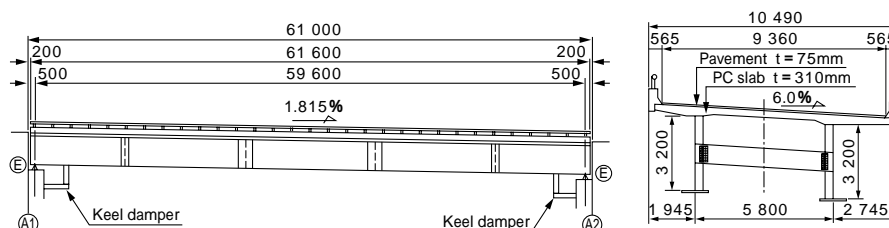


図 11 モデル橋の固有振動モード  
Fig.11 Vibration mode of model bridge

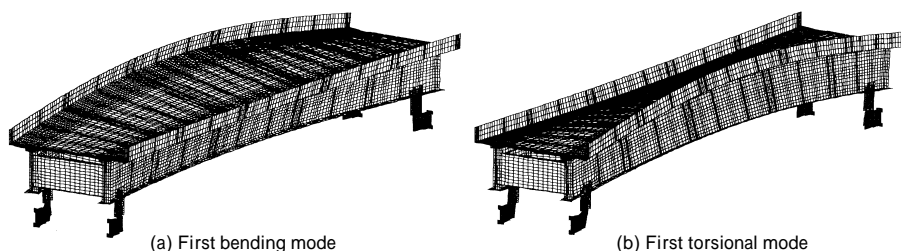


図 13 モデル橋に用いた制振材料の材料特性  
Fig.13 Material property of damping material used for model bridge

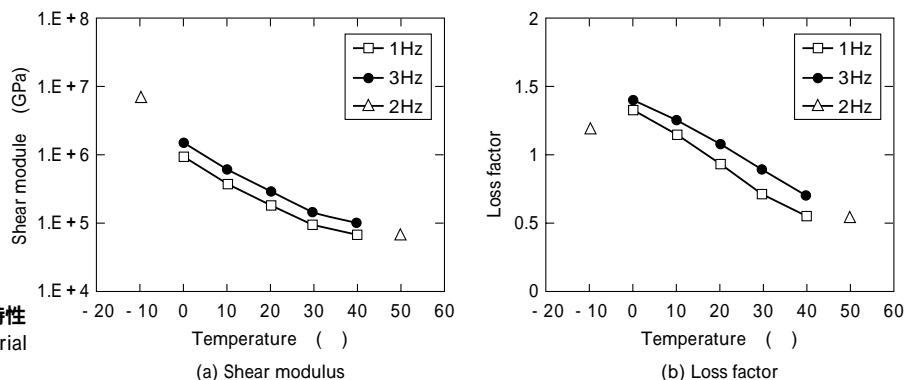
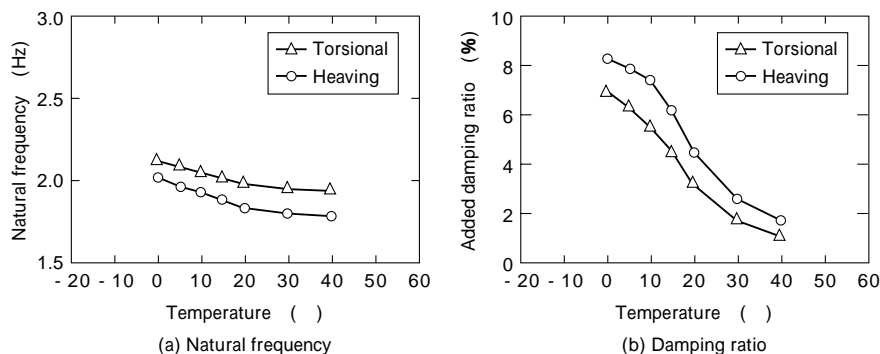


図 14 モデル橋の解析結果  
Fig.14 Analytical result of model bridge



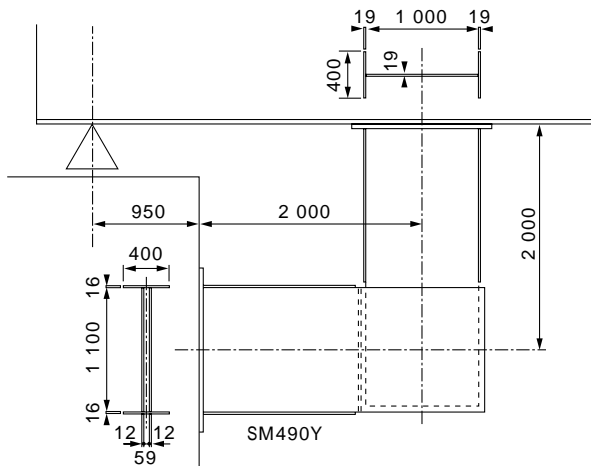


図 15 キールダンパ形状  
Fig.15 Final shape of keel damper

減衰比は最大となり、それぞれ 7.8%、6.7% にもなる。一方、耐風設計便覧によると、支間長 59.6m の橋梁では対数減衰率が約 0.1、すなわち減衰比で 1.5% であり、支間長 86.5m の連続合成 2 主桁橋の実橋振動試験結果では、対数減衰率が 0.04 程度という報告例もある<sup>3)</sup>。それに対し、キールダンパをつけることにより、減衰特性が大幅に改善され、温度が 0 から 40 の範囲内では、付加減衰比で 2.0% 以上(対数減衰率で 0.12)の減衰性能向上が期待できる。この値は、文献 1) による耐風対策を行うにあたり十分な減衰と考えられる。

### 3.3 強度に対する検討

制振材料の材料特性には温度依存性があり、低温時にはせん断係数が大きくなることから、キールダンパには大きな断面力が作用することになる。この断面力に対し鋼板 1 枚の断面では耐え得ることができないため、主桁付部材と橋台付部材の両方にフランジを取付けることとした。図 15 に最終的に採用したキールダンパ形状を示す。

図 15 に示すキールダンパが強度的に問題ないかどうかを確認するため、低温時(-10℃)に活荷重が載荷された場合を想定して FEM 解析を行った。解析結果の一例を図 16 に示す。この解析結果により、キールダンパに発生する主応力及びミーゼス応力は、いずれも許容応力度以内であることが確認できた。

むすび=少数主桁橋梁などの減衰性能を向上させることが可能な制振手法(キールダンパ)を開発した。このキールダンパは桁端に取付けるだけで、非常に効果的に橋梁の減衰性能を向上させることができる。以下、本論文の結果をまとめる。

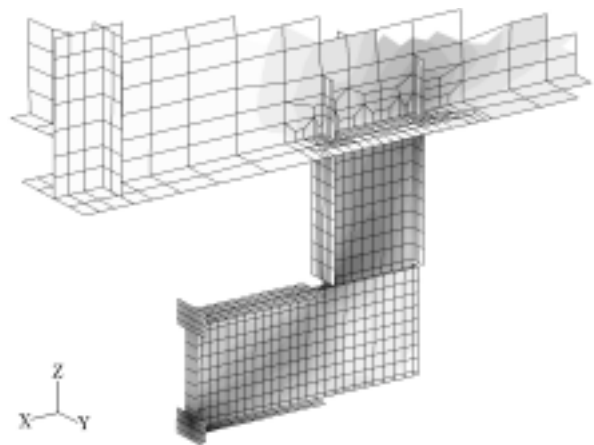


図 16 FEM 解析結果(ミーゼス応力)  
Fig.16 Analytical result of FEM (Von Mises Stress)

- ・ 模型実験により効果を確認したところ、比較的広い温度範囲にわたって高い減衰性能を示すことが分かった。
  - ・ 実橋想定モデル橋に対してキールダンパの適用を解析的に検討し、比較的低風速で発生する風速域限定型の振動を消滅させることが可能なレベルの減衰性能が得られた。
  - ・ 活荷重載荷時の強度についても検討を行い、キールダンパの形状を工夫することにより応力的にも問題無いことがわかった。
  - ・ 実橋に適用してみたところ、ダンパ無し時の減衰比約 1% に対して、ダンパを設置することで減衰比が 5% 程度に上昇することが確認された。
- 最後に、本研究に際し、京都大学大学院工学研究科土木工学専攻の渡邊英一教授にご教示を賜り、ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 山田均: 第 4 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, (2001), p.59.
- 2) 比江島慎二ほか: 土木学会論文集, No465, Vol.1-23 (1993), p.107.
- 3) 中村 元ほか: 土木学会第 55 回年次学術講演会, (2000) - B108.
- 4) 本家浩一ほか: 土木学会第 57 回年次学術講演会, (2002) -596.
- 5) 清水義和ほか: 土木学会第 57 回年次学術講演会, (2002) -597.