

平成21年 5月30日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560239
 研究課題名（和文） 高減衰合金をばね要素として用いた制振装置の設計手法に関する研究
 研究課題名（英文） Study on design method of dynamic damper which high damping alloy is used for as a spring element
 研究代表者
 藤本 滋 (FUJIMOTO SHIGERU)
 湘南工科大学・工学部機械デザイン工学科・教授
 研究者番号：80386888

研究成果の概要：本研究の目的は、鋼製構造物の振動低減のための Mn-Cu 高減衰合金ばねを用いた制振装置の設計手法を確立することである。まず、Mn-Cu 合金ばねの振動試験により、その減衰特性および振動耐久性が明らかにされ、減衰モデルが提案された。さらに、鋼製歩道橋と制振装置を対象にした小型模型振動試験により、制振装置の良好な制振性能が確認された。また、小型模型振動試験に対する応答解析により、振動解析手法の妥当性が検証された。最終的に実際の歩道橋に対する制振装置の設計を行い、この制振装置が設置された場合の歩道橋の地震応答解析を行った結果、提案の制振装置は十分な制振性能が得られることが確認された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,100,000	0	2,100,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	500,000	0	500,000
総計	3,700,000	330,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学（分科）、機械力学・制御（細目）

キーワード：耐震・免震設計、制振

1. 研究開始当初の背景

鋼材は加工性や強度に優れているために様々な産業や公共インフラの施設や設備に用いられているが、減衰能が非常に小さいため、鋼材で構成された構造物には振動が発生しやすく、それが原因となるトラブルや損傷事故が多発している。その中で、長スパンの鋼製歩道橋は、路面振動や人の歩行に対して揺れやすい構造物である。特に、地震による歩道橋の揺れは歩行者を危険な状態におくだけでなく、損傷により重大な事故や交通障害を引き起こす恐れがある。建設後、数十年経過した歩道橋は、腐食などによる構造強度の劣化が進んでおり地震時の被害が増大する可能性がある。以上のことより、今後予想

される大地震に対して、社会インフラの代表的施設の一つである鋼製歩道橋の被害を低減し、災害の拡大を防ぐことが望まれる。

歩道橋の振動を低減し地震時の被害を防ぐには、耐震型剛構造方式よりも従来構造に動吸振器型制振装置（以下、制振装置）を設置する方法が最も低コストで合理的である。この場合でも、制振装置は構造が簡素でメンテナンスフリーであることが望まれる。

筆者は減衰能が大きい Mn-Cu 合金材に注目した。これを制振装置のばねとして用いると、減衰装置も兼ねることが可能なため構造が簡素になる。さらに、耐腐食性を有するためメンテナンスは不要となり、低コストで制振装置を製作・設置することが可能である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、歩道橋の振動を低減するための制振装置として、ばね要素と減衰要素を兼ねる Mn-Cu 高減衰合金ばねを用いた動吸振器型の制振装置の提案とその設計手法を確立することである。また、これまで Mn-Cu 合金材はばねとして用いられたことがないため、減衰要素を兼ねるばねとしての減衰特性や耐久性を詳細に把握し、実用化への見通しを得ることも大きな目的である。

3. 研究の方法

研究目的のために以下の研究を行った。

- (1) 歩道橋に適した Mn-Cu 合金ばねを用いた動吸振器型制振装置の基本構造を検討し、設計諸元に基づいた構造概念を提案する。
- (2) Mn-Cu 合金ばねの振動試験により、その減衰特性を詳細に把握する。
- (3) Mn-Cu 合金ばねの振動試験により把握された減衰特性をもとに制振装置の設計用の減衰モデルを作成するとともに、歩道橋に制振装置が設置された解析モデルを用いた振動解析を行い、提案の制振装置の制振性能および振動解析手法の妥当性を見通しを得る。
- (4) Mn-Cu 合金材のばねとしての振動耐久性を調べるため、Mn-Cu 合金板ばねの自由振動試験及び連続正弦波加振試験を行い、振動回数が減衰特性や剛性に及ぼす影響を把握する。これらの試験により、Mn-Cu 合金ばねの実用化への見通しを得る。
- (5) Mn-Cu 合金ばねを用いた動吸振器の制振性能を歩道橋と制振装置を模擬した小型モデルを用いた振動試験により確認する。さらに、振動試験に対応する振動解析を行い、解析結果と試験結果とを比較することにより、振動解析手法の妥当性を検証する。
- (6) 実際の歩道橋に対する制振装置の設計を行うと共に、解析モデルを用いた振動解析を行いその制振効果を確認することで設計手法の妥当性を検証する。また、制振装置設計に必要な既設の歩道橋の振動特性を把握する手法についても検討を行う。

4. 研究成果

(1) 動吸振器型制振装置の構造概念の提案

鋼製歩道橋の鉛直振動を低減するための Mn-Cu 合金ばねを用いた制振装置の構造概念を提案した⁷⁾。以下に概要を述べる。

本研究において制振対象としたスパン間質量 19,400kg の鋼製歩道橋の構造と提案する

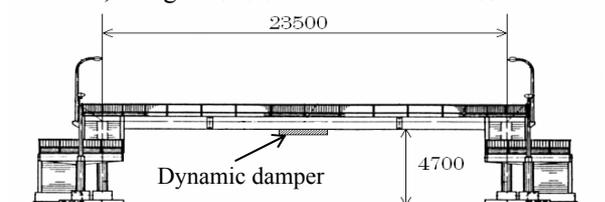


Fig.1 Pedestrian bridge structure

制振装置の設置概念を図 1 に示す。

歩道橋において最も揺れやすい鉛直 1 次モード 2.8Hz に対する振動低減を図る動吸振器型制振装置の基本諸元は Den Hartog の定点理論を用いて決定された。この諸元を基に制振装置の基本設計を行った結果を図 2 に示す。

提案の制振装置は、両端が支持された Mn-Cu 合金板ばねの中央に錘が設置された構造である。Mn-Cu 合金板ばねは減衰要素も兼ねている。主要諸元は、錘の相当質量が 194kg、鉛直ばね定数が 56kN/m、固有振動数が 2.70Hz である。

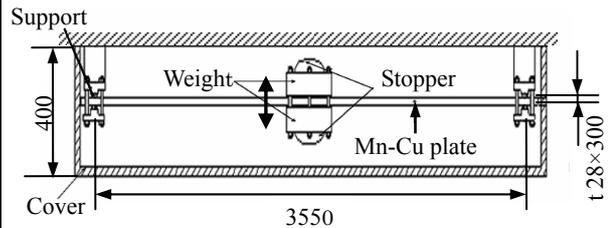


Fig.2 Structure of the dynamic damper with a Mn-Cu alloy leaf spring

(2) Mn-Cu 合金ばねの減衰特性

制振装置に用いる Mn-Cu 合金ばねの減衰特性を明らかにするために、図 3 に示す片持ち梁とした Mn-Cu 合金板ばねの先端に錘を固定した試験体を用いて自由振動試験を行った⁷⁾。ここでは、錘質量および梁長さを変えることにより試験体の固有振動数を 1.3~4.3 Hz の間で 9 種類変化させた試験を行った。

試験結果として、板ばね下端の曲げひずみ振幅に対する減衰比の関係を図 4 に示す。試験結果より、以下のことが明らかにされた。

- ① 減衰特性は、ばね振幅に対して減衰比が増加する振幅依存の非線形特性を持つ。
- ② ばねとして実用的な大振幅領域である 500~1500 μ において減衰比 0.03~0.04 を得る。
- ③ 減衰特性は、試験範囲では振動数に依存しない。歩道橋用制振装置のばねとして作動すべき振動数範囲においては、減衰特性は振動数に依存しないと考えられる。

なお、この片持ち梁試験体の支持条件は、図 2 に示される制振装置の Mn-Cu 合金板ばねの片側半分、すなわち錘と片側支持端の間の支持条件に近い。このため、本試験で得られた曲げひずみ-減衰比関係は、実機 Mn-Cu 合金板ばねのそれとほぼ相似であると考えられる。

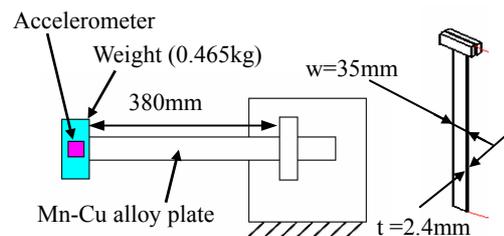


Fig.3 Experimental model for free vibration tests

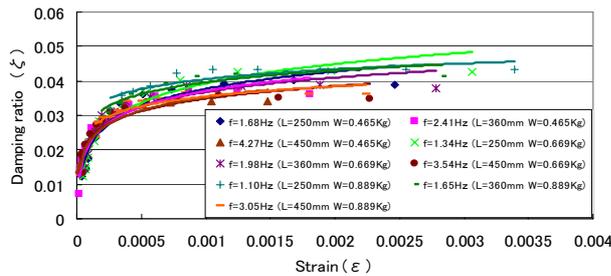


Fig. 4 Effects of the bending strain on damping ratio of the Mn-Cu alloy plate

(3) 振動解析手法および制振性能の検討

Mn-Cu合金ばねの振動試験結果から得られた減衰特性をもとに制振装置の減衰モデルを作成するとともに歩道橋に制振装置が設置された設計用振動解析モデルを提案した⁴⁾⁷⁾。さらに、この振動解析モデルを用いた振動応答解析を行い、振動解析手法の有用性および歩道橋に対する制振装置の制振性能を評価した⁴⁾⁷⁾。以下に概要を述べる。

振動解析のための制振装置の Mn-Cu 合金板ばねの減衰モデルを次のような手順で作成した。まず、図 5 に示される Mn-Cu 合金板ばねの曲げびずみ振幅に対する減衰比の関係のデータから、図中の実線で示される減衰近似曲線を求める。さらに、この減衰近似曲線にフィットするような多直線を求め、これを設計用の減衰モデルとした。図 5 に示された四角形のプロット点の間を直線で結んだものが多直線近似で表された減衰モデルである。減衰特性を多直線近似とすることで関数では表現が困難な非線形特性を比較的精度良くモデル化することが可能である。

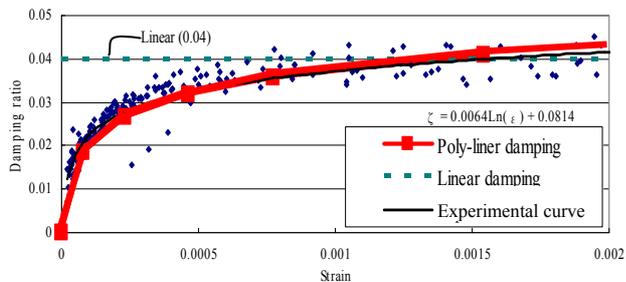


Fig. 5 Damping analytical models of Mn-Cu alloy spring

次に、制振装置の制振性能を確認するために振動応答解析を行った。歩道橋に制振装置が設置された歩道橋解析モデルは、図 6 に示されるような歩道橋中央に制振装置を取り付けた橋桁構造を両端支持の鉛直 1 次元 20 質点曲げせん断梁モデルとした。制振装置は、橋桁中央質点 10 の下部に Mn-Cu 合金ばねに相当するばね要素 K、減衰要素 C および錘に相当する質点 20 として表された。減衰要素 C については、Mn-Cu 合金ばねの減衰特性である多直線近似減衰モデルが実機諸元のばね変位-減衰係数関係の減衰モデルに置き換

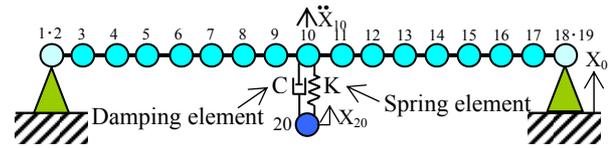


Fig. 6 Analytical model of the pedestrian bridge with the dynamic damper

えられた。ばね要素 K および質点 20 の錘の諸元は(1)に記載された値に設定されている。

この振動橋解析モデルを用いて歩行者振動および地震動に対する時刻歴応答解析を行った。地震応答解析においては、EL Centro 地震波、Taft 地震波、十勝沖地震八戸波、台湾 921 集々地震波、日本海中部地震秋田波および兵庫県南部地震神戸海洋気象観測波の上下動加速度波形が振動入力として用いられた。解析結果例として台湾 921 集々地震上下動波に対する応答解析結果を示す。制振装置がない場合および制振装置が設置された場合の歩道橋中央部質点 10 の上下方向加速度応答時刻歴をそれぞれ図 6 および図 7 に示す。また、全ての地震応答解析の結果として、各地震波に対して制振装置が無い場合および制振装置が設置された場合の歩道橋中央部の最大応答加速度の比較を図 8 に示す。

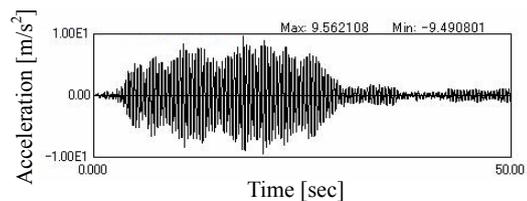


Fig. 6 Response acceleration time history at the center of pedestrian bridge without dynamic damper under Taiwan 921 UD earthquake

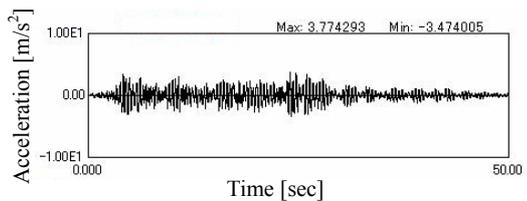


Fig. 7 Response acceleration time history at the center of pedestrian bridge with dynamic damper under Taiwan 921 UD earthquake

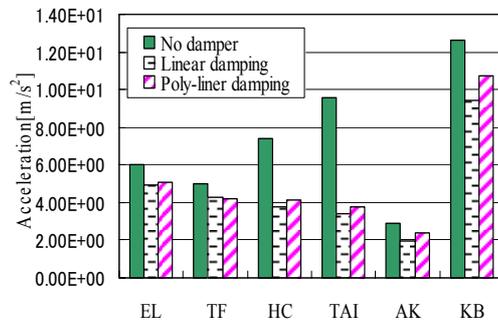


Fig. 8 Maximum response accelerations at the center of pedestrian bridge for vertical seismic waves

以上の検討より以下の結論が得られた。

- ①制振装置に用いられる Mn-Cu 合金板ばねの減衰モデルとして多直線近似型の減衰モデルを提案した。さらに、歩道橋および制振装置を連成させた設計用の振動解析モデルを提案した。
- ②制振装置の制振性能を評価するために、歩道橋に制振装置を設置した場合と設置しない場合の歩行者振動および地震動に対する振動応答解析を行った。その結果、制振装置は各振動入力に対して十分な制振性能を持つことが確認できた。また、設計用振動解析モデルは妥当な解析結果が得られていることが確認された。

(4) Mn-Cu 合金ばねの耐久性評価

制振装置に用いられる Mn-Cu 合金板ばねにおいて、振動回数がその減衰特性、剛性および歩道橋に対する制振性能に及ぼす影響を把握するために、Mn-Cu 合金板ばねの正弦波加振試験および振動応答解析を行った^{1),4)}。以下に概要を述べる。

まず、Mn-Cu 合金板ばねの振動回数（繰り返し変形）が減衰特性および剛性に及ぼす影響を把握するために図 3 に示された試験装置を用いた Mn-Cu 合金板ばねの正弦波加振試験を行った。この試験では、4 体の Mn-Cu 合金板ばねを用いて、板ばね下端曲げひずみの振幅を 250μ 、 500μ 、 1000μ 、 1500μ とした 4 ケースの試験を行った。各ケースとも 10 万周期の振動を繰り返した後、自由振動試験を行い、減衰特性と固有振動数を計測した。このような試験を 10 回実施し、合計 100 万周期までの各特性の変化を調べた。試験結果例として、曲げひずみ振幅 1500μ の試験ケースにおける加振前すなわち 0 周期時と 100 万周期後のひずみ振幅と減衰比との関係を図 9 に示す。加振回数が増加するに従い、減衰比は次第に低下し、100 万周期後には全振幅領域において 20~35% 減少した。これらの試験結果から以下のことが明らかにされた。

- ①振動を繰り返すと減衰比は 20 万周期までに急激に低下し、その後は比較的安定し、一定値を保持する。100 万周期後には減衰比は振動初期に比べて 500μ 以上の大振幅領域においては約 20% 低下し、小振幅領域では 30~35% 低下する。
- ②繰り返しの振幅が小さい場合のほうが、振動回数に対する減衰比の低下割合は小さい。
- ③固有振動数はほとんど変化がなく、振動回数が剛性に及ぼす影響は小さい。
- ④最大振動振幅を 500μ ~ 1000μ 程度に抑制することにより、大幅な減衰特性の低下を避けることができ、少なくとも 0.025~0.03 の減衰比を保持することが可能である。

次に、振動回数による減衰特性低下が制振装置の制振性能に及ぼす影響を把握するため

に、上記 (3) で述べた歩行者振動および地震動に対する時刻歴応答解析を行った^{2),3)}。解析ケースは、制振装置が無い場合について、また、制振装置が設置された場合については、減衰特性が図 9 に示されるような振動回数が 0 回の減衰特性の劣化がない場合および振動 100 万周期後に減衰特性の劣化が生じた場合の 2 種類の場合についての計 3 ケースとした。解析結果として、各地震波に対する歩道橋中央部の最大応答加速度を図 10 に示す。

以上の結果より、Mn-Cu 合金ばねの減衰特性の変化が制振装置制振性能に及ぼす影響について以下のことが明らかになった。

- ⑤Mn-Cu 合金ばねの減衰特性が低下すると、歩行者振動および地震動に対して歩道橋の応答は若干増幅する。ただし、その増幅率は小さく、制振性能は大幅には低下しない。
- ⑥Mn-Cu 合金ばねに振動回数が積み重なり、その減衰能が低下しても、制振装置は十分な制振性能を有する。

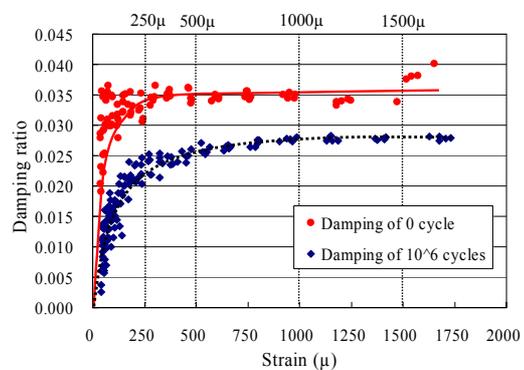


Fig.9 Change of damping ratio at 0 cycle and 10^6 cycles (Test case 1)

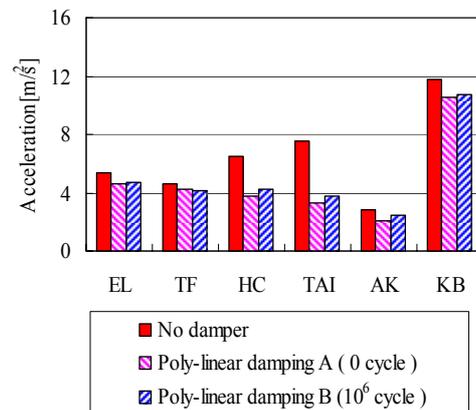


Fig.10 Maximum response accelerations at the center of pedestrian bridge for vertical seismic waves

(5) 縮小模型振動試験

Mn-Cu 合金ばねを用いた制振装置の制振性能を確認するために歩道橋と制振装置を模擬した縮小模型を用いた振動試験を行った。さらに、振動試験に対する振動解析を行い、振動解析手法の妥当性を検証した^{3),7)}。以下に概要を述べる。

縮小模型構造を図 11 に示す。模型は両端支持されたステンレス板の中央に質量 2.851 kg の錘を設置した歩道橋模型とこの模型の錘部に設置された制振装置模型とからなる。Mn-Cu 合金板ばねと質量 0.125kg の錘で構成された制振装置模型は、歩道橋模型錘部に左右対称に 2 体設置されている。制振装置模型の基本諸元は、(1) で述べた Den Hartog の定点理論から決定された。このような小型模型が振動台に設置され、固有振動特性を把握するための正弦波掃引試験と制振性能を調べるための地震波加振試験が行われた。さらに、制振装置の減衰特性を把握するための制振装置単体の自由振動試験が行われた。

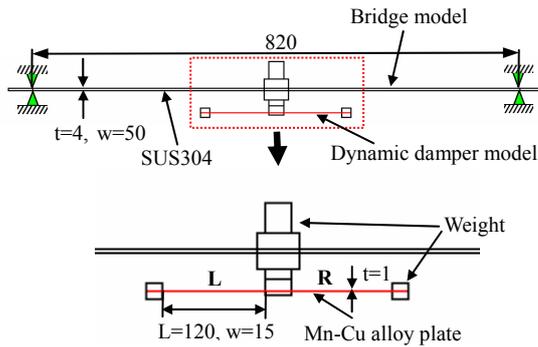


Fig. 11 Vibration test model

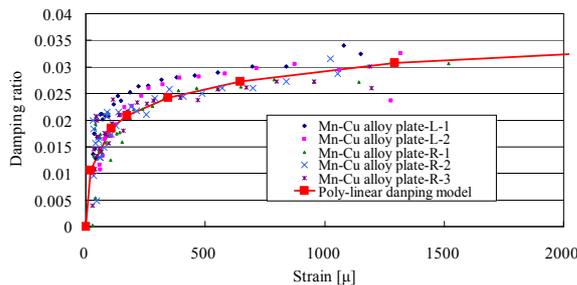


Fig. 12 Effects of the bending strain on damping ratio of the Mn-Cu alloy plate

自由振動試験から得られた制振装置の減衰特性および(3)で提案した方法で作成した多直線型の減衰モデルを図 12 に示す。次に、この制振装置模型の減衰モデルが考慮された縮小模型の振動解析モデルを図 13 に示す。この解析モデルにより振動解析が行われた。

振動試験および振動解析の結果の例として、El Centoro 地震 UD 波および台湾集々地震 UD 波の加速度レベル 1 倍および 2 倍の加振試験に対する歩道橋模型中央部の応答加速度時刻歴の 2 乗平均値を図 14 に示す。図中には、歩道橋模型に制振装置模型が設置された場合と設置されない場合についての振動試験結果と解析結果が示されている。このような検討の結果、以下の結論が得られた。

①縮小模型を用いて振動試験を行った結果、全ての地震波に対して Mn-Cu 合金ばねを用いた制振装置模型により歩道橋模型の応

答は十分低減された。提案の制振装置は良好な制振性能を有することが確認された。
②縮小模型の地震波加振試験に関して、試験結果と応答解析結果は全ての試験ケースについて良く一致した。制振装置の減衰モデルを含めた振動解析手法は十分妥当であることが検証された。

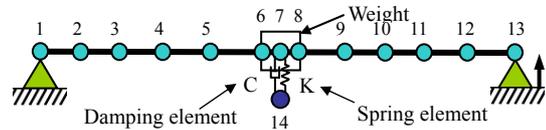


Fig. 13 Analytical model of the vibration test model with the dynamic damper model

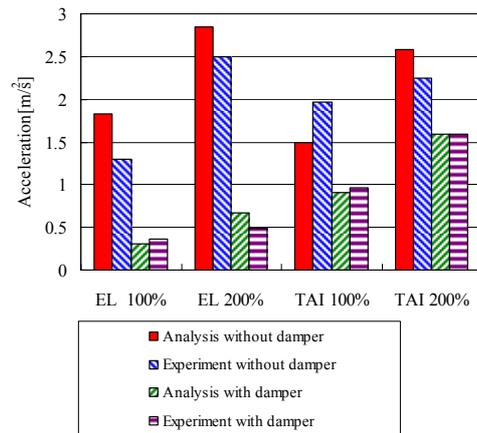


Fig. 14 RMS of response accelerations at the weight of the vibration test model for seismic waves

(6) 制振装置の設計手法の総合検証

実際の歩道橋に対する制振装置の設計を行うとともにその制振効果を振動解析により確認することで、制振装置設計手法の妥当性を検証した^{2), 5), 6)}。以下にその概要を述べる。

まず、制振装置の設計に必要な歩道橋の振動特性を把握するために、実際の歩道橋の振動計測を行い、振動特性を実測した。

本研究では、2 基の橋桁長さの異なる標準的な鋼製歩道橋の振動計測を行った。図 15 に振動計測時の計測位置例を示す。車両走行時、歩行者歩行時、歩道橋中央部での歩行者 1 名の飛び跳ね時、小型起振機による加振時に図に示す 3 箇所の X, Y, Z 方向の加速度を計測した。これらの加速度波形を分析することにより歩道橋の振動特性を把握した。その結果、以下の結果が得られた。

- ①歩道橋の揺れは Z 方向が最も大きい。
- ②固有振動数は Z 方向が最も低く、支柱間スパンが 21m, 25.65m の場合、それぞれ 3.90 Hz, 3.78Hz であった。
- ③Z 方向減衰比はどちらの歩道橋とも非常に小さく 0.007~0.008 であった。

次に、制振装置の設計が支柱間スパンの長さ 21m, 橋桁質量が 11,681kg の歩道橋に対して行われた。制振装置の諸元は、(1) で述べ

た Den Hartog の定点理論から、錘質量は 116.8 kg, 最適ばね定数は 67,5KN が設定された。また、Mn-Cu合金ばねの減衰モデルは、図 9 に示された振動周期が 100 万回後の減衰特性が劣化した場合の特性を基に作成された⁷⁾。

振動解析モデルにおいては、図 6 に示された両端支持の鉛直 1 次元 20 質点曲げせん断梁モデルが用いられた⁷⁾。制振装置の減衰要素には上記で述べた減衰モデルが考慮された。ここでは、歩道橋に制振装置が設置された場合と設置されない場合の 2 種類の解析モデルを用いて (3) で述べた 6 種類の地震波に対する応答解析を行い、制振装置の制振性能を評価した。解析結果例として、図 16 に制振装置が設置された場合と設置されない場合の歩道橋中央部の上下方向応答加速度時刻歴の 2 乗平均値を示す。検討結果より、設計した制振装置により設計対象の歩道橋の地震応答は大きく低減されることが確認された。以上のことから以下の結論が得られた。

- ①鋼製歩道橋の振動計測により、歩道橋の詳細な振動特性が明らかにされ、制振装置設計のための重要な基礎データを得た。
- ②実際の歩道橋に対する制振装置の基本設計を行った。
- ③制振装置の性能評価のための歩道橋および制振装置の設計用解析モデルを作成した。
- ④地震応答解析の結果、設計した制振装置により、歩道橋の地震応答を大幅に低減できることが確認された。
- ⑤Mn-Cu 合金ばねを用いた制振装置の設計手順および設計手法の妥当性が確認された。

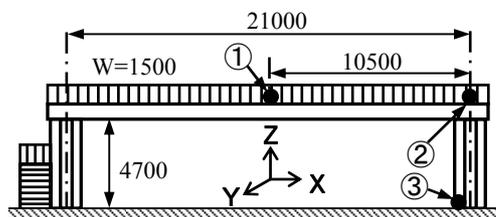


図 15 歩道橋の振動計測位置

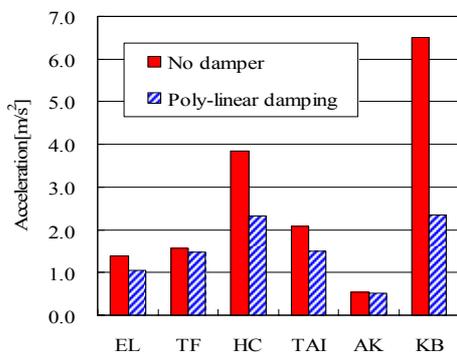


図 16 歩道橋中央部の上下方向応答加速度の 2 乗平均値 (制振装置あり, なしの比較)

(7) 結論

以下に研究成果を述べる。

- ①鋼製歩道橋に適した Mn-Cu 合金ばねを用いた動吸振器型制振装置の概念を提案した。
 - ②Mn-Cu 合金ばねの減衰特性および耐久性を明らかにした。特に、ばねの振動回数の増加により減衰特性が劣化するが、ばね振幅を抑えて使用することにより、一定の減衰能の持続が可能である。
 - ③Mn-Cu 合金ばねの減衰特性を多線形減衰モデルを提案した。さらに、歩道橋と制振装置の設計用振動解析モデルを提案した。
 - ④小型模型振動試験により、提案の制振装置の制振性能を確認するとともに振動解析手法の妥当性を検証した。
 - ⑤実際の歩道橋の振動特性を詳細に把握するとともにその歩道橋に対する制振装置の設計を行った。さらに、振動解析により制振装置の十分な制振性能を確認した。
- 以上、Mn-Cu 合金ばねを用いた鋼製歩道橋用制振装置の設計手法を確立した。

以上の研究より、提案の制振装置が鋼製構造物の振動抑制に十分有効であることが確認された。今後、公共インフラ施設に提案の制振装置が適用されることにより、これら施設の耐震性が向上し、大地震時の被害低減や災害防止に大きく役立つものと思われる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 7 件)

- 1) 藤本滋, 振動回数が高減衰合金ばねの減衰特性に及ぼす影響, 日本機械学会関東支部第 15 期総会講演会, 2009-3-7, 茨城大学。
- 2) 藤本滋, 腐食の進んだ歩道橋の振動特性評価, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2008, 2008-9-5, 慶応義塾大学。
- 3) 藤本滋, 制振材をばね要素に用いた動吸振器に関する研究, 日本機械学会関東支部第 14 期総会講演会, 2008-3-15, 東京海洋大学。
- 4) 藤本滋, 高減衰合金を用いた歩道橋用動吸振器に関する研究 (減衰特性の経年変化の影響), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007, 2007-9-27, 広島大学。
- 5) 藤本滋, 歩道橋の振動特性評価手法に関する研究, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007, 2007-9-27, 広島大学。
- 6) 藤本滋, 歩道橋の振動計測結果を用いた制振装置の設計および制振性能評価, 第 5 回日本地震工学会大会, 2007-11-13, 東京大学。
- 7) 藤本滋, 制振材を用いた制振装置の歩道橋への適用に関する研究 (制振材の非線形減衰特性の影響), 日本機械学会関東支部第 13 期総会講演会, 2007-3-16, 宇都宮大学。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本滋

湘南工科大学・工学部・教授

研究者番号：80386888