

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04035

研究課題名(和文)座屈拘束された波形鋼板を芯材とする高機能制震ダンパーの研究開発

研究課題名(英文)Development of high-performance BRRP dampers for bridge structures

研究代表者

宇佐美 勉 (Usami, Tsutomu)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・研究部・上席研究員

研究者番号：50021796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：橋梁用高機能制震ダンパー開発の一環とし、座屈拘束された波形鋼板を芯材に用いる制震ダンパー(BRRP)の研究開発を行った。BRRPは、桁橋両端に設置され、レベル2(L2)地震動に対しては芯材の塑性変形、L2地震動を上回る地震動に対しては拘束材がせん断パネルダンパーとして機能して地震エネルギーを吸収する。本研究では、L2地震動を対象とした、繰り返し載荷実験、オンライン地震応答実験、およびL3地震動を対象とした芯材と拘束材を一体とした構造の繰り返し載荷実験を実施し、それらの成果に解析的検討を補完することにより、BRRPが座屈拘束ブレース(BRB)に比した優位性を持っていることを実証した。

研究成果の概要(英文)：New seismic dampers termed Buckling-Restrained Rippled Plate (BRRP) dampers have been developed. BRRPs are intended to be used as stoppers, and when they are installed at the edges of girder-type bridges, they will act as stiff elastic bearings in small to moderate earthquakes (Level 1 earthquakes) and as energy dissipating dampers in large earthquakes (Level 2 earthquakes). The target performances of BRRPs are such that they can withstand three consecutively acting Level 2 earthquakes as well as earthquakes exceeding Level 2 earthquakes (say, 1.5 times larger than a Level 2 earthquake). The inelastic behavior of BRRPs was investigated using cyclic and pseudo-dynamic loading tests, in addition to numerical analyses, to acquire fundamental knowledge on their performances. It has been found that adequately designed BR

研究分野：構造工学

キーワード：制震ダンパー 波形鋼板 鋼桁橋 性能実験 低サイクル疲労 数値解析

1. 研究開始当初の背景

制震ダンパーを既設橋梁に設置して制震橋梁化する耐震補強法が我が国で実用化されるようになってから10年余が経過し、現在では鋼橋の耐震補強法の主流になりつつある。制震ダンパーは、(a)既存の部材・部品を置換する、(b)上部構造と下部構造をつなぐ、(c)隣接桁をつなぐ、等の方法により既設橋梁に付与される。(a)では履歴型ダンパーが多く用いられ、座屈拘束ブレース (BRB) が多用されている。(b)では、レベル2 (L2) 地震動に対してエネルギー吸収部材として機能するせん断パネルダンパー (SPD) 等が設置される。本研究が対象としているのは(b)のタイプの制震ダンパーである。研究代表者らのグループは、制震橋研究のパイオニアとして数多くの橋梁用制震ダンパーの研究開発を行い、レベル2 (L2) 地震動3回に耐えられるような高い変形性能と低サイクル疲労性能を有する制震ダンパー (高機能制震ダンパーと称する) を開発し、それらを種々の鋼橋モデルに設置した場合の耐震性向上効果を実験および解析で明らかにしてきた。

2. 研究の目的

橋梁用高機能制震ダンパー研究開発の一環とし、座屈拘束された波形鋼板を芯材として用いる新形式制震ダンパー (Buckling-restrained rippled plate damper, BRRP と略称する。図-1 参照) の開発を行う。目標性能は、3回のL2地震動に耐えられ、さらにL2地震動を上回る地震動(L3地震動と称する)に対する余剰耐震性を担保した制震ダンパーである。即ち、図-2のように、L2地震動に対しては芯材がエネルギー吸収をするBRRP、それを越えるL3地震動に対しては、圧縮時に移動端端部が拘束材に接触することにより、拘束材がSPDとして機能して余剰耐震性を担保する超高機能制震ダンパーである。

3. 研究の方法

1) BRRPは、適切に波型形状を設計すること

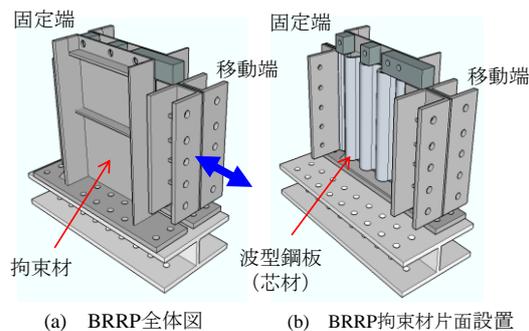


図-1 座屈拘束波型鋼板 (BRRP)

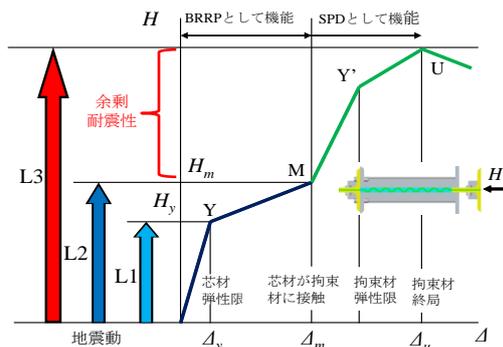


図-2 BRRPの想定Pushover挙動

により、平均ひずみ ($=\Delta/L_0$, Δ =移動端の変位, L_0 =芯材変形部の長さ) に比べ、局部ひずみ (波型部凹部の軸方向ひずみ) を小さくすることが可能で、BRBに比べ、低サイクル疲労性能の点から有利になる。本研究では、その具体的条件 (最適波形形状条件と称する) を数値解析により明らかにする。

2) 最適波形形状条件を満たすように設計されたBRRPダンパーの、繰り返し載荷実験、低サイクル疲労実験および数値解析により、BRRPが保有する変形性能、低サイクル疲労性能の限界値(Capacity)、および地震応答計算のための復元力特性を明らかにする。

3) 3回のL2地震動を連続的に作用させたオンライン実験および地震応答解析により、桁橋両端に設置したBRRPのL2地震動に対する応答値 (Demand) を求め、構造安全性 (応答値 \leq 限界値) を検証する。

4) BRRPの耐力を上げ、実構造物への適用範囲を拡げるため、BRRP芯材を2体並列に設置したBRRPダンパー (Twin-BRRPと称する、図-3参照) を製作し、BRRPとの性能比較実

験を行う。

5) 芯材と拘束材を一体化した BRRP 構造システムの圧縮破壊実験を実施し, L2 地震動を超える地震に対する BRRP の余剰耐震性能を検証する。

4. 研究成果

(1) 最適波形形状条件

BRRP 芯材は, 半波の同一形状の波形を周期的に長さ方向に加工したものである。半波あるいは 1 波の円弧アーチ状の部分波形構造を取り上げ, 引張荷重下で, 最適波形形状条件を満たす形状を, 弾塑性有限変位解析から次式のように求めた。

$$\theta_0 \geq \frac{1.84}{\sqrt{R/t}} \quad (1.37 \leq R/t \leq 6.0) \quad (1)$$

ここで, θ_0 =円弧アーチの開角の 1/2, R =アーチ軸中心線の曲率半径, t =芯材厚さである。本研究では, $\theta_0=\pi/2$ (半円弧) に固定し, 式(1)を満たすように $R/t \cong 3.0$ ($t=9\text{mm}$ または 25mm) を採用して, 全ての BRRP 芯材を設計した。

(2) 実物大 BRRP の性能実験と解析

SS400 鋼板 ($t=25\text{mm}$) を $R/t=3.0$, $n=4$ (半波の数) に成型した実物大 BRRP3 体を用いて限界値実験 2 体 (変動変位および定変位振幅の繰り返し載荷実験), 応答値実験 1 体 (BRRP を桁の両端部に 1 基ずつ設置した実大単純鋼桁橋を想定したオンライン地震応答実験) を行い, L2 地震動 (道路橋示方書 II-II-1) を 3 回連続受けた際の安全性を検証し, 開発した BRRP の耐震性能評価を行った。

解析的検討においては, BRRP の高さ方向に 1/5 の部分解析モデルを対象にシェル要素を用いた複合非線形解析により実験結果の検証を行った。さらに, 支間長 27m 程度の実単純鋼桁橋の両端部に実験で用いた実物大 BRRP を 2 基設置した実制震橋を対象に, 道路橋示方書の L2 地震動 18 波をそ

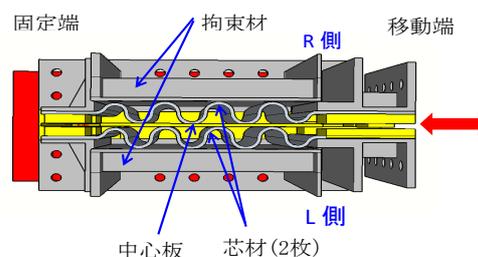


図-3 Twin-BRRP (上面図)

れぞれ 3 回連続作用させた地震応答解析結果を基に構造安全性を検証した。得られた成果は以下のようである。

1) 限界値実験: 非常に安定した紡錘型の水平荷重 H -水平変位 Δ 履歴曲線が得られた。また, 局部ひずみが平均的なひずみより小さくなるという BRB, SPD には見られない逆転現象が生ずることを実証できた。

2) 応答値実験: L2 地震動 3 回連続入力後も BRRP には塑性変形以外の損傷は見られなかった。また, 複数回の地震動の入力に関わらず, 一回ごとの H - Δ 履歴曲線, 最大応答変位, 残留変位, 累積塑性変形 (CID) 等のいずれも大きな変化はなかった。ここで, 累積塑性変形 (CID) は制震ダンパーの塑性変形による損傷度を表す物理量で, 全ループの塑性変形 (塑性ひずみ) 成分の総和である。このことから, 塑性変形以外の損傷が見られない供試体では, 地震波を 1 波入力して応答値実験, あるいは, 地震応答解析を行うことで, 複数回の同一地震動を入力した際の応答を概略求めることが出来る。

3) 解析的研究: H - Δ 履歴曲線, 時刻歴応答曲線, 累積塑性変形 CID の数値解析値を繰り返し載荷実験および地震応答実験結果と比較したところ, 地震応答実験における累積エネルギー吸収量を除いて, 細部に多少の差があるものの実験結果を概ねよく模擬していることが分かった。

4) 性能照査: 道路橋示方書の L2 地震動 18 波をそれぞれ 3 回連続作用に対し, 桁端に 2 基ずつ実験で用いた実物大 BRRP を設置した

実制震橋は、構造安全性照査（最大応答変形および累積塑性変形に関する応答値≦それぞれの限界値）を満足することが分かった。

(3) BRRP の低サイクル疲労性能

耐久性の検証のために低サイクル疲労実験を行った。SM400鋼板($t=9\text{mm}$)を $R/t=3.0$, $n=8$ に成型した BRRP6 体, Twin-BRRP5 体の静的定振幅繰り返し载荷, および 4 章(2)と同じ供試体 2 体を用いた動的定振幅繰り返し载荷による低サイクル疲労実験を実施した。载荷は同一の引張, 圧縮側の平均ひずみ振幅で行い, 平均ひずみ範囲 (正負の平均ひずみ振幅の和) $\Delta\varepsilon$ は 0.03~0.17 で行った。実験結果より, 芯材の低サイクル疲労曲線 ($\varepsilon-N$ 曲線) と共に, それに達するまでの 2 段階の許容疲労損傷度曲線における芯材の損傷の程度を機能保持の観点から考察した。得られた成果の概要は以下のようなものである。

1) BRRP および Twin-BRRP の低サイクル疲労性能は, 両者に有意な差は見られず, 共に鋼素材の低サイクル疲労性能と同程度, また, BRB に比べて格段に高い性能を有することが分かった (図-4)。

2) 図-4 の BRRP および Twin-BRRP 共通の $\varepsilon-N$ 曲線は次式で表される。

$$N_f = C^{-1} \cdot (\Delta\varepsilon)^{-m} \quad (2)$$

ここで, $C=2.15$, $m=1.80$, N_f は低サイクル疲労寿命である。式(2)の N_f は 3 回の L2 地震動に対する限界値を表す。式(2)に Miner 則を適用することにより, 多数のひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_i$ ($i=1\sim nc$, nc = 全サイクル数) による累積疲労損傷度 D は次式で表すことができる。

$$D = \sum_{i=1}^{nc} \frac{1}{N_f} = C \sum_{i=1}^{nc} (\Delta\varepsilon_i)^m \quad (3)$$

式(3)より, L2 地震動 3 回を対象とした, 低サイクル疲労に対応する構造安全性照査式は次のようになる。

$$\gamma_2 \cdot D < 1.0 \quad (4)$$

ここで, γ_2 は安全係数で $\gamma_2=3.0$ とする。安全

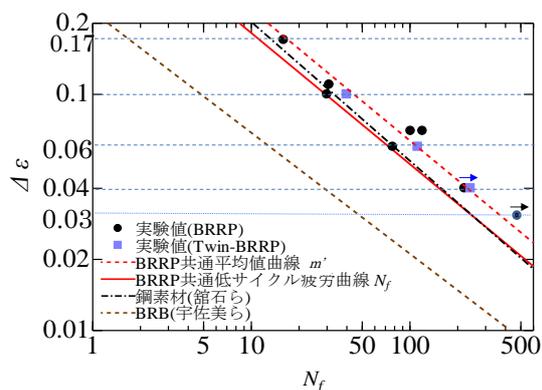


図-4 低サイクル疲労実験結果と $\varepsilon-N$ 曲線

係数 $\gamma_2=3.0$ は L2 地震動が 3 回連続作用したときに, 制震ダンパーが低サイクル疲労を起こすことを意図したものである。

3) 累積疲労損傷度 D の照査法に基づき, 1 回および 2 回の L2 地震動に対する疲労損傷度をそれぞれ式(5),(6)で定義し, BRRP の機能保持限界値とする。

$$N_{(1)} = N_f/3 \quad (5)$$

$$N_{(2)} = 2 N_f/3 \quad (6)$$

4) $N_{(1)}$, $N_{(2)}$ に相当する限界状態での BRRP の損傷の程度を, 荷重低下率および実験供試体の実損傷の観察により検証した。全供試体の荷重低下率の範囲は $N_{(1)}$ で 91%以上, $N_{(2)}$ で 88%以上に収まり, き裂進展による破断直前の急激な荷重低下に対して十分余裕があり, 機能保持は確保されていることが分かった。このことから, L2 地震動 3 回に対して設計された BRRP は, L2 地震動を 1 回または 2 回受けても, 制震ダンパーとしての機能を維持し続けることができることが実証出来た。

(4) BRRP 拘束材の Pushover 実験

BRRP の拘束材 (図-5) は, 芯材移動端に取り付けた部材 (アングル材) が軸圧縮荷重により拘束材端面に接触する (図-2 の M 点に対応) までは, 芯材が面外変形して拘束材の内面に接触して生ずる摩擦力を受けるが, 载荷重の大きさに比べれば小さい。アングル材が拘束材に接触後は, 軸方向荷重が直接拘束材と芯材に伝達されるが, 拘束材の方が芯

材に比べ剛であるため、拘束材には大きな軸方向力が作用し、弾塑性域でせん断座屈を起こす可能性がある。この状態では、桁両端に設置されたBRRPの拘束材はSPDと同じような挙動を示し、地震エネルギーを吸収する機能を有すると考えられる。本研究では、芯材のみが繰り返し引張-圧縮力を受ける初期荷重(L1-L2 荷重と称する)から、芯材と拘束材が一体となって圧縮力を受ける荷重状態(L3 荷重と称する)に至るまでの挙動(図-2の原点からU点に至るまでの挙動)に関する実験と解析を行った。得られた成果の概要は以下のである。

1) Pushover 実験は、 載荷装置の容量(±1,000kN)の不足で、拘束材が弾性範囲内での実験しかできなかった。そのため、実験を模擬した載荷パターンを基に複合非線形解析により、拘束材は弾塑性域でのせん断座屈により最大耐力に至ったことがわかった。

(図-6, 図-7)

2) 実験で使用した拘束材を SPD として機能させるため、降伏耐力を低くし、縦横リブを追加してパネルの幅厚比パラメータを小さくしてせん断座屈を防止する工夫が必要であることがわかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件) 全て査読有り

1) 宇佐美勉, 山田聡徳, 葛漢彬, 山崎伸介 (2018) : BRRP 制震ダンパーの低サイクル疲労性能と許容疲労損傷度, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.169-181.

2) 宇佐美勉, 山田聡徳, 葛漢彬, 山崎伸介 : Twin-BRRP 制震ダンパーの性能実験と拘束材の Pushover 挙動, 土木学会論文集, (印刷中)

3) Usami, T. (2017): Full-scale BRRP seismic dampers, Proc. of the Fifth Intl. Conf. "Advances in Computing, Communication and Information Technology", Zurich, Switzerland, pp.13-17.

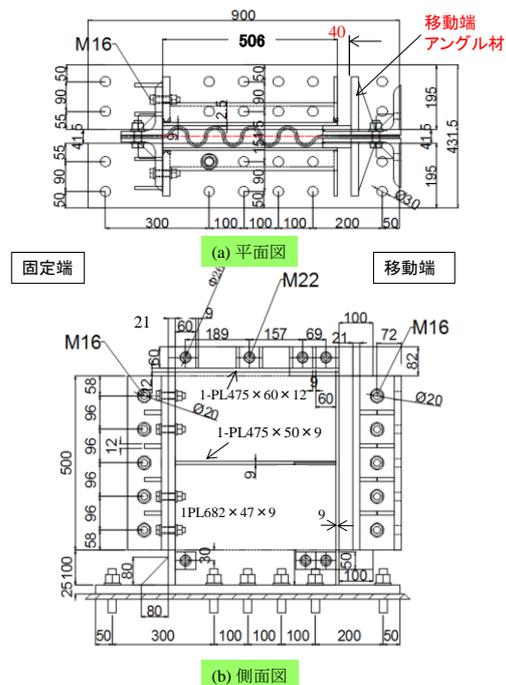
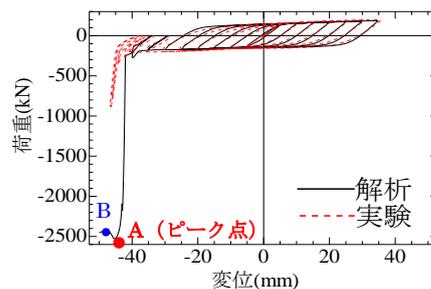
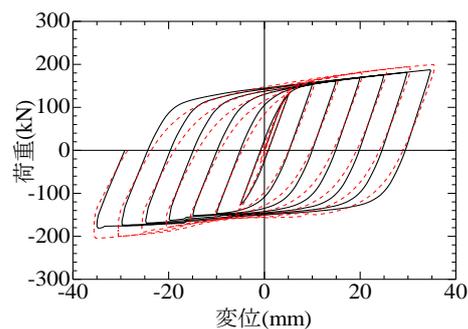


図-5 拘束材詳細図

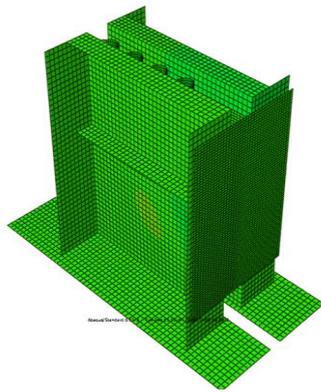


(a) 全体

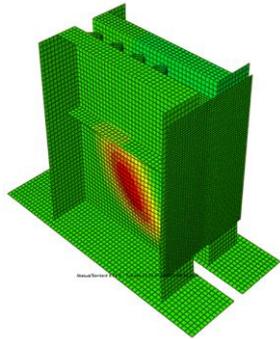


(b) L1-L2 荷重

図-6 拘束材の Pushover 実験と解析の比較



(a) A点(最大荷重時)



(b) B点(解析最終点)

図-7 拘束材のPushover解析結果

(A,B点は図-6)

4) 宇佐美勉 (2016) : L2地震動を超える地震動に対する余剰耐震性を担保した履歴型制震ダンパー, 橋梁と基礎, Vol.50, 2016-12.

5) 宇佐美勉 (2016) : 鋼橋の座屈・耐震設計に関する一考察, 橋梁と基礎, Vol.50, 2016-9, pp.26-31.

6) Yamazaki,S.,Usami,T.,Nonaka,T.(2016): Developing a new hysteretic type seismic damper (BRRP) for steel bridges, *Engineering Structures*, 124, pp. 286-301.

7) 山崎伸介, 加藤弘務, 宇佐美勉, 葛漢彬 (2016): 芯材に波形鋼板を適用した座屈拘束ブレース(RP-BRB)の性能実験と解析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.264-278.

8) 山崎伸介, 加藤弘務, 宇佐美勉, 葛漢彬 (2016): 波形鋼板制震ダンパー芯材の最適形状と復元力モデル, 構造工学論文集, Vol.62A,

pp.314-327

9) 山崎伸介, 野呂直以, 櫻井信彰, 宇佐美勉 (2015) : BRRP 制震ダンパーの芯材に適する波形形状と動的性能の検討, 鋼構造論文集, JSSC, 第22巻, 第87号, pp.33-46.

10) 加藤弘務, 宇佐美勉, 山崎伸介, 森翔吾, 野呂直以, 葛漢彬(2015) : 実物大 BRRP 制震ダンパー開発のための基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.211-223.

[学会発表] (計3件) 全て査読なし

1) 宇佐美勉(2017) : Twin-BRRP 制震ダンパーの性能実験と拘束材の Pushover 挙動, 土木学会・第37回地震工学研究発表会, CD-ROM.

2) 宇佐美勉(2016) : 地震外力のゆらぎに対する耐性を有する履歴型制震ダンパーの開発, 第7回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演概要集, pp.54-67

3) 閻 楊, 加藤弘務, 宇佐美勉, 葛漢彬 (2016) : 波形鋼板 (BRRP) 制震ダンパーの低サイクル疲労実験, 第71回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, pp.391-392.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

宇佐美 勉 (USAMI TSUTOMU)
名古屋産業科学研究所・首席研究員
研究者番号 : 50021796

(2)研究分担者

葛 漢彬 (GE HAN-BIN)
名城大学・理工学部・教授
研究者番号 : 90262873

(3)連携研究者

渡辺 孝一 (WATANABE KOUICHI)
名城大学・理工学部・准教授
研究者番号 : 90387762