

令和元年6月13日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06477

研究課題名（和文）鋼製橋脚を制震化するためのブレース接合構造に関する非線形性を考慮した設計法の提案

研究課題名（英文）Proposal to seismic control design for steel portal frame with BRBs

研究代表者

渡辺 孝一（Watanabe, Koichi）

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：90387762

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は鋼製ラーメン橋脚を軸降伏型の座屈拘束ブレース（BRB）で制震化し、レベル2地震動に対して橋脚の最大応答変位が目標とする限界変形に収まるよう制御し、橋脚の機能を保持するための設計手法を提案するものである。

ラーメン橋脚基部にBRBを接合する立体的な形状を縮小模型化した供試体を製作し、ハイブリッド実験によって地震応答を検証した。また、制震部材としてBRBに要求される変形性能を実験的に検証した。BRBをガセットプレートに高力ボルト摩擦接合したラーメン橋脚の耐荷力を非制震の橋脚と比較し検証するため、静的載荷実験を行った。制震化によって橋脚が急激な耐荷力の低下が生じないことを実験的に明かにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1995に発生した阪神淡路大震災で被災した鋼製ラーメン橋脚の損傷を教訓として、橋脚の耐震性能の向上のために橋脚内部のリブ補強やコンクリート充填工法などの多くの研究がなされた。その結果、耐震性能を向上させた橋脚の設計法が確立されているが、座屈拘束ブレースなどの制震ブレースを添加する制震化手法は概念的な範囲に留まり、具体的な設計に踏み込んだ研究は非常に少ない。

本研究は、強震時の鋼製ラーメン橋脚の損傷を非線形特性に配慮して部分的な範囲にとどめ、橋脚としての機能を保持するための設計手法を提案しており、耐震設計の選択肢を広げる意味で重要な意味をもつ。

研究成果の概要（英文）：Buckling-restrained braces (BRBs) are used as energy dissipation dampers to improve the seismic performance of steel rigid-frame piers.

In the present study, the effectiveness of BRBs connecting steel rigid-frame piers with gusset plates to protect the structure under cyclic loading was experimentally investigated. Compared with the load carrying capacity of the original structure, the strengthened model with BRBs was found to be equivalent in terms of deformation capacity and ultimate strength. An online seismic response test was carried out on a specimen with a bolted gusset in order to examine the seismic behavior under severe earthquake conditions. The results indicated that a bridge pier subjected to seismic control using a BRB could maintain member safety level 2.

研究分野：構造工学

キーワード：ダンパー 鋼製ラーメン橋脚 ガセットプレート 局部座屈 ハイブリッド実験 レベル2地震 低サイクル疲労 エネルギー吸収

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

本研究は、図1のように制震ブレースを既設の鋼製ラーメン橋脚に添加することにより、鋼製ラーメン橋脚の制震性能を飛躍的に向上させるための座屈拘束ブレースと橋脚の接合部に関する補強方法を提案するものである。鋼製ラーメン橋脚に制震ブレースを添加すると全体剛性が高くなることから、ブレース設置前よりも過大な応力が橋脚基部に作用する。従って、ブレースを接合する鋼製ラーメン橋脚の内部構造は、補剛材やダイアフラムなどの構造特性に配慮して地震力を制震ブレースに伝達させる構造とすることが重要である。1995に発生した阪神淡路大震災によって被災した鋼製ラーメン橋脚の損傷を教訓として、鋼製ラーメン橋脚の耐震性能の向上のため、橋脚内部のリブ補強やコンクリート充填工法に関する多くの研究がなされた結果、耐震性能を向上させた橋脚の設計法が確立されている。しかし、座屈拘束ブレースなどの制震ブレースを添加することによる制震化は概念的な範囲に留まり、具体的に制震設計まで踏み込んだ研究は非常に少ない。

2. 研究の目的

本研究は、図2に示すような鋼製ラーメン橋脚の縮小模型供試体により実用的に転用可能な耐震補強方法を提案し、実験と数値解析の両面から制震ブレースによる橋脚の制震効果を実証する。特に、制震ブレースの取り付けが想定される鋼製ラーメン橋脚の基部に対して、制震構造化による変形性能を評価するために解析要素としてシェル要素を用いて精密な立体モデルを構築し、制震ブレースの接合が橋脚の耐荷力に与える影響や、制震ブレースとの接合構造にあたるガセットとブラケットの連結構造に対して、数値解析的な検討と縮小モデルによる模型実験を行う。本研究では、1) 制震したラーメン橋脚に対して、制震ブレースに軸力を伝達するメカニズムを明らかにする。2) 鋼製ラーメン橋脚の内部補剛リブに求められる必要剛性を明らかにする。3) ハイブリッド応答実験により、制震化したラーメン橋脚の地震時応答を取得し、既往の簡略モデルによる応答との違いを明確にし、強震時の鋼製ラーメン橋脚の損傷を、部分的な範囲にとどめ、ラーメン橋脚としての機能を保持するための非線形特性に配慮した制震設計手法を提案することである。

3. 研究の方法

本研究で使用する実験システムは、数値演算（FEM解析）と部分模型実験を組み合わせる。制震ブレースは、軸降伏型の座屈拘束制震ブレース（Buckling-Restrained Brace以下、「BRB」と略記する）を用いる。制震ブレースを接合する橋脚基部の模型は、実構造を1/5から1/6に縮小したものを使用する。また、接合に使用するBRB接合継手は地震損傷後のBRB交換を想定し、高力ボルトによる摩擦接合を採用する。まず、図3に示すような実験装置によって、繰り返し軸力荷重と付加曲げを同時に荷重する静的荷重実験を行うことで、制震ブレースに累積的なダメージを与えることで、橋脚の制震化に必要なBRBの変形性能を明らかにする。その後、制震ブレース橋脚とガセットから伝達される力を、実構造に近い境界条件により静的な漸増変位繰り返し実験を実施する。その後、橋脚とBRBの接合構造について、強震時のラーメン橋脚の部材の損傷度を部分的な損傷に留めるための非線形性を考慮した設計で製作した模型供試体に対して、ハイブリッド実験によりその有効性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 制震化に必要なBRBに関する性能実験

鋼製ラーメン橋脚の制震化には、図4に例示する外観のBRBを適用した。BRBは橋脚に設置後の地震時のBRBの平均応答軸ひずみとして、3%の変形性能を有すること、および低サイクル疲労照査として、CID（=累積塑性変形）0.7を有するため、制震材の断面をパラメータとしてとして形状を変化させて設計した。制震ブレース芯材の断面を4通りに変化させたBRBの繰り返し漸増荷重実験により制震性能を明らかにした。

実験により、制震ブレース芯材長さ L_b をブレース全体長さ L との比率（ブレース区間のうちエネルギー吸収する部材の占める比率） $\xi_1=0.334$ で設計したBRBは、いずれも軸ひずみ3%、CID>0.7を確保する変形性能を有することを明らかにした。BRBとブラケットを含むブレース全体の変形挙動から、地震時の制震挙動に

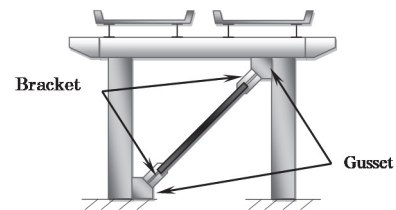


図1 BRBで制震化する鋼製ラーメン橋脚の概念

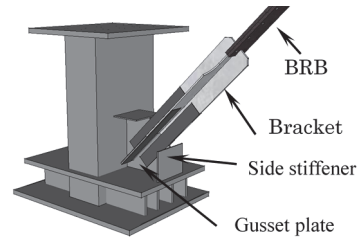


図2 鋼製ラーメン橋脚とBRBの接合部模型

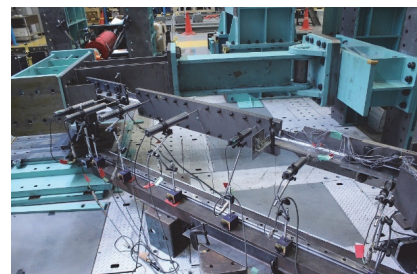


図3 軸方向荷重と偏心曲げを受けるBRBの荷重実験状況

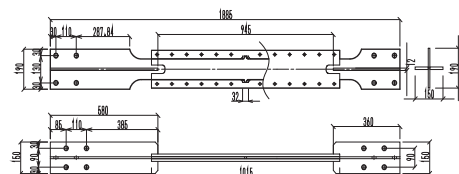


図4 BRBの外観と諸元の例

鋼製ラーメン橋脚の内部で生じる BRB の回転変形について検証し、制震時に回転変形を可能とする BRB の端部の諸元を実験ならびに解析的検討から明らかにした。特に BRB が圧縮を受けて生じる回転変形時には、BRB の支持ブラケットの弾性変形を考慮し、その限界値を具体的に示した。その後、BRB の制震性能を検証するため、図 5 に示すような簡易的なファイバー要素によって数値モデル化した鋼製ラーメン橋脚の数値解析モデルに対して、BRB に対する地震応答を実験装置から取得するパイブリッド実験を実施した。

その結果、軸方向剛性が異なる BRB を付加したラーメン橋脚の制震効果を検証した。その一例として、図 6 に示す通り、BRB の軸方向剛性の違いによる鋼製ラーメン橋脚の地震エネルギー吸収量を示し、断面を変化させた BRB による制震効果への影響を明らかにした。この時、制震ブレース芯材長さを一定にした BRB で比較すると図 7 の示すように、剛性が高い BRB は、BRB 自身のエネルギー吸収性能が高い傾向を示すことを明らかにした。

本実験結果の場合、例えば S(T9W123)-HYD では BRB に作用する軸力が S(T6W73)-HYD に比べ 2 倍以上であるため、ラーメン橋脚全体としてのエネルギー吸収性能は小さく、塑性化による損傷が解析上、軽減されることが推察されるが、鋼製ラーメン橋脚基部に作用する荷重による予期せぬ鋼製ラーメン橋脚取り付け部の損傷に配慮する必要があることを示した。この考察として、BRB の剛性が高めの場合、数値解析に適用した解析モデルは、ラーメン橋脚とブレース接合部の局所的な損傷を評価できないことから、さらに詳細な検討が必要となった。

(2) BRB 取り付け部を精密化した解析と実験検討

先の問題を改善するため、図 5 の解析モデルを改良して、鋼製ラーメン橋脚と BRB の接合部をより精密にモデル化した。その結果、図 8 に示すような、ファイバー要素と BRB 取り付け部となる橋脚基部を精密なシェル要素で構築した複合数値解析モデルを構築して BRB の接合部となる橋脚基部に生じる局部座屈などの損傷を再現し、解析の推定精度を向上させた。

精密なモデルにより、鋼製ラーメン橋脚頂部に橋軸直角方向の単調な水平変位を与えるプッシュオーバー解析を行った。解析結果を図 9 に示す。ここでは、制震化の前後による鋼製ラーメン橋脚全体の水平剛性の変化と制震化の部材設計の考え方について検討した。

図中の①では橋脚の降伏水平変位 $\delta_{h,y}$ よりも先行して BRB が降伏し、($\delta_{b,y}$ は BRB が降伏する変位) BRB 内部の制震部材の塑性変形が進行する。その後、②で橋脚基部が降伏し、③橋脚の層間変形の限界変形値に到達後、終局状態に達するまで非線形挙動を示す。制震化による変形初期段階から①までの剛性(線形履歴の傾き)は非制震よりも大きくなるが、BRB が塑性変形した後の履歴曲線は BRB の軸方向剛性が初期剛性の 1/60~1/100 程度となり、BRB の影響が小さくなるため、非制震と同様な剛性が得られる。従って③で示す限界値 $2.8\delta_{h,y}$ に至る間に、急激な剛性の低下が生じないような橋脚の性能を検証すること、想定するレベル 2 地震による地震応答を推定し、橋脚の最大応答が部材健全度 2 の範囲に収まることを検証することが制震化後の変形性能を確保する上で重要である。

検証のため、図 10 に例示するような鋼製ラーメン橋脚基部と BRB を接合するためのガセット、ブラケットを含めた縮小模型供試体により、漸増変位繰り返し載荷実験を実施して橋脚が終局に至るまでの変形性

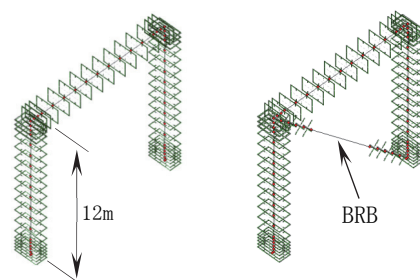


図 5 ファイバー要素による鋼製ラーメン橋脚数値モデル

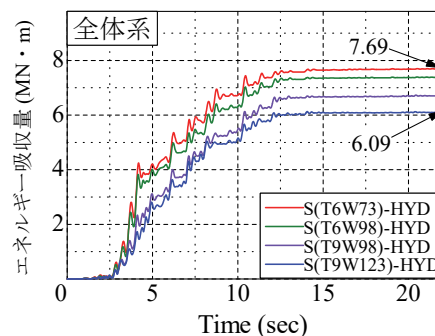


図 6 制震化した鋼製ラーメン橋脚の地震エネルギー吸収の比較

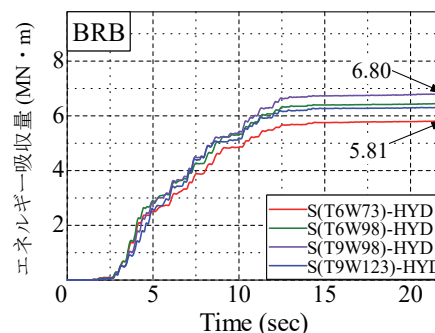


図 7 BRB の軸方向剛性違いによる地震エネルギー吸収量比較

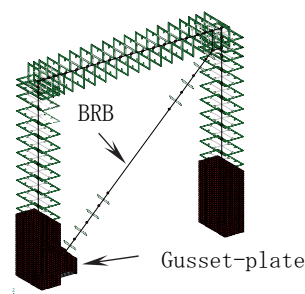


図 8 BRB 接合部を精密なシェル要素とした数値解析モデル

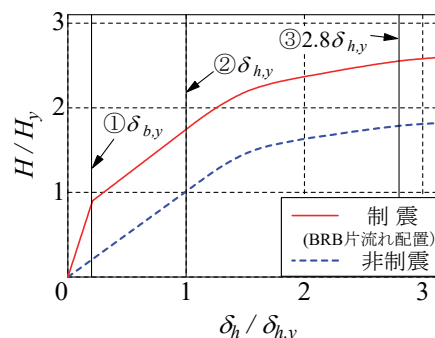


図 9 BRB により制震化した鋼製ラーメン橋脚の剛性の変化

能を実験的に検証した。この実験で得られた知見を以下にまとめる。

図 11(a)~(c)に、漸増繰り返し変位载荷の終了時の供試体損傷状況を比較して示す。図 11(a)は非制震モデルの実験供試体であり、実験終了時に圧縮側に最大変位を与えた際の状況を示している。図 11(c)左図のとおり、フランジが橋脚内部側に大きく凹む方向に局部座屈しており、座屈位置は底部からダイヤフラム位置の中央位置（高さ 200mm）で発生している。

図 11(b)は制震化のため BRB を接合するガセットを溶接によって橋脚フランジに接合した供試体である。BRB を接合するためのガセットが補強リブとしてフランジの面外変形を拘束するよう機能しており、非制震と終局時の損傷の程度は小さいことが分かる。

この検討結果により、BRB を片流れ配置した载荷条件によって制震化したラーメン橋脚の変形性能は、BRB の目標ひずみ 3%に相当する変形範囲で耐荷力が低下することなく、変形性能も非制震と同等であることを確認した。また、BRB を接続したガセットとスチフナは、接合するラーメン橋脚フランジの面外変形を抑制することを明らかにした。

この漸増繰り返し载荷実験によって得られた鋼製ラーメン橋脚の制震化による耐荷力から抽出した水平剛性、水平変形に関するスケルトンカーブを図 12 に示す。図中の[1]位置での荷重を比較すると制震モデルは非制震モデルの 4.7~7.2 倍程度の荷重上昇となることを確認した。初期剛性は制震モデルで 32.2kN/mm、非制震モデルで 5.3kN/mm となり BRB を付与したことで平均 6.1 倍程度剛性が上昇することが分かった。

次に[2]で水平荷重を比較すると、制震モデルの引張側で 140kN、圧縮側で 151kN、非制震モデルの引張側で 57kN、圧縮側で 58kN となり制震モデルは非制震モデルの 2.6 倍程度の比率となった。制震モデルの引張側と圧縮側で圧縮側の剛性が高い傾向となるのは、BRB の特性上、圧縮側で芯材と拘束材が接触し、摩擦が発生するためであることが既往の報告で明かとなっている。BRB が降伏した後、[2]から[3]における制震モデルの剛性は 3.1kN/mm 程度で、初期剛性の 10%まで低下した。この時、非制震モデルの剛性は 1.9kN/mm 程度となり、制震モデルは非制震モデルの 1.6 倍程度に留まって、急激な耐力の低下は確認されないことがわかった。

(3) ハイブリッド実験による地震応答実験

先の検討により、適切な軸方向剛性を有する BRB と鋼製ラーメン橋脚基部にガセット構造を再現することで、レベル 2 地震に対して橋脚の損傷を軽減することを静的実験で確認した。これらの知見を踏まえて、ハイブリッド実験によって BRB による制震効果を検証した。地震応答解析で使用した地震波は、1995 年兵庫県南部地震で観測された JR 鷹取駅の観測地震波の E-W 成分である。加速度波形を図 13 に示す。図 14、図 15 にハイブリッド実験結果の一例を示す。図 14 の(a)、(b)は BRB によって制震化した鋼製ラーメン橋脚全体系の水平荷重—水平変位関係、水平変位の時刻応答履歴であり、図 15(a)、(b)は BRB の軸力と伸縮応答変位に着目した同等の実験結果である。それぞれ図中の「実線」はハイブリッド実験の結果、「破線」は解析で算定される地震応答解析の解析結果を比較して示した。

図 14 により、制震化によってラーメン橋脚は降伏変位を僅かに上回る程度に応答が抑えられていることが分かる。また、図 15 に示す、BRB に着目すると設計値と供試体の違いによって事前解析に比べ若干小さめの応答であるが、応答履歴は安定した紡錘形を描いてお

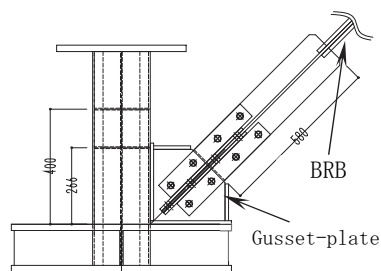
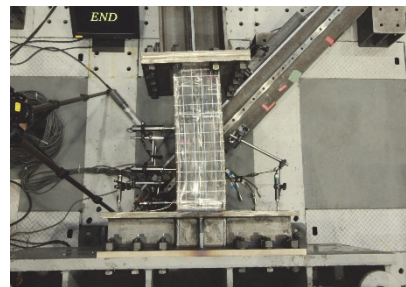
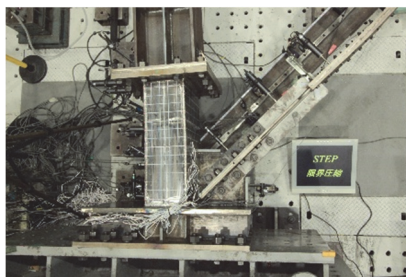


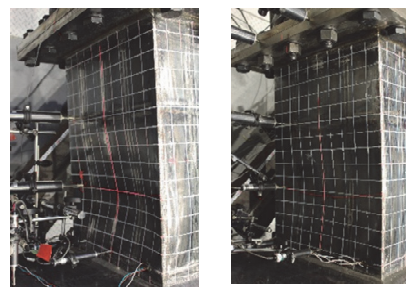
図 10 BRB を接合するガセットを模擬した縮小供試体



(a) 非制震橋脚の損傷状況



(b) 制震化した橋脚の損傷状況



(c) 橋脚フランジ面の損傷状況 (左) 非制震, (右) 制震

図 11 制震化の有無によるラーメン橋脚の損傷の違い

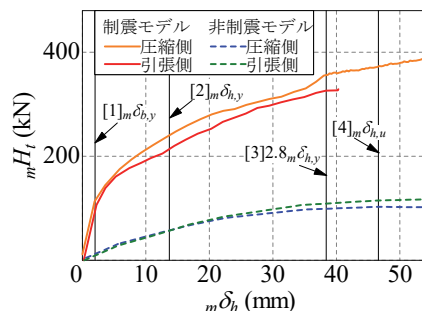


図 12 BRB により制震化した鋼製ラーメン橋脚の剛性の変化

り、BRB のエネルギー吸収量 0.42、限界値 0.7 を満足した。また、全体系の最大応答や残留変位の誤差は 1% 以内となった。

一連の研究によって得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) BRB を接合するガセットを接合したラーメン橋脚基部の供試体に対し、繰り返し漸増変位载荷実験を行い、非制震橋脚と変形性能を比較した。制震化したラーメン橋脚は、目標とする限界変形時に至るまでには、急激な耐力の低下が生じないことを実験的に明かにした。
- 2) BRB で制震化することで非制震に比べて水平剛性が大きく上昇し、繰り返し漸増変位载荷実験では、限界変形 $2.8 \delta_{h,y}$ 時に水平荷重が平均 2.1 倍に達した。このため、BRB による制震化はラーメン橋脚への荷重が極力小さくなるよう剛性に配慮して設計する必要がある。
- 3) ガセットを溶接接合した供試体と数値解析モデルによるハイブリッド実験を行い、レベル 2 地震応答解析を実施した。BRB によって制震化したラーメン橋脚は、最大応答変位が目標とする限界変形以内に収まり、部材健全度 2 を保つことを明かにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 渡辺 孝一, 浅井 駿弥, 石田 真士: 座屈拘束ブレースで制震化した鋼製ラーメン橋脚の変形性能, 日本鋼構造協会, 鋼構造論文集, Vol. 26, No. 101, pp. 57-67, 2019. 3. (査読有)
- ② 渡辺 孝一, 石田 真士: 座屈拘束ブレースを付与した鋼製ラーメン橋脚のハイブリッド実験による制震効果の検証, 土木学会, 構造工学論文集 A, 63A 巻, pp. 315-328, 2017. (査読有)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 浅井 駿弥, 渡辺 孝一: 「軸降伏型ダンパーを付与した橋脚基部模型のハイブリッド実験」, 土木学会第 73 回年次講演会, I-319, pp. 637-638, (2018)
- ② 浅井 駿弥, 石田 真士, 渡辺 孝一: 「BRB で制震化したラーメン橋脚基部の部分模型実験」, 土木学会中部支部研究発表会, I-8, pp. 15-16, (2017)
- ③ 浅井 駿弥, 渡辺 孝一: 「制震化した鋼製ラーメン橋脚のダイヤフラム補強に関する解析的検討」, 土木学会第 72 回年次講演会, I-672, pp. 1343-1444, (2017)
- ④ 石田 真士, 渡辺 孝一: BRB 接合部の組立精度を考慮した鋼製ラーメン橋脚の制震性能に関する解析的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, I-189, pp. 377-378, (2016)
- ⑤ 石田 真士, 渡辺 孝一: BRB 接合部の初期たわみを考慮した鋼製ラーメン橋脚の制震性能に関する解析的検討, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, I-18, pp. 35-36, (2016)

[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]

ホームページ等

<http://civil.meijo-u.ac.jp/lab/watanabe/index.html>

6. 研究組織

- (1) 研究分担者
なし
- (2) 研究協力者

吉野 廣一 (Hiroichi Yoshino), 石田 真士 (Masashi Ishida), 浅井 駿弥 (Shunya Asai)

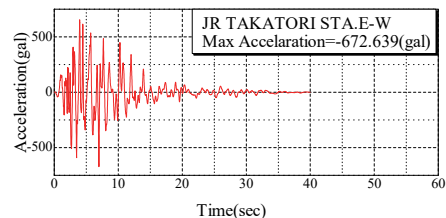
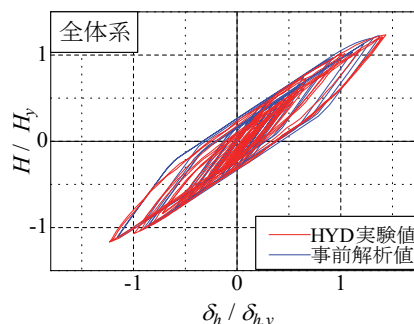
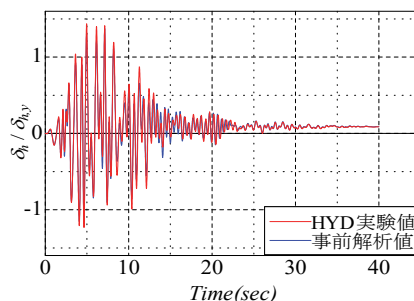


図 13 ハイブリッド実験に入力した地震加速度波形

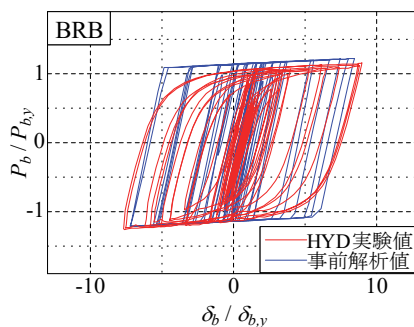


(a) 水平荷重-水平変位履歴

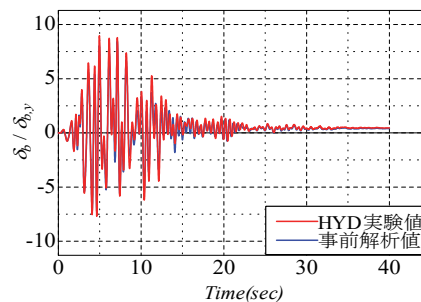


(b) 時刻応答履歴

図 14 制震化したラーメン橋脚の地震応答結果



(a) BRB の軸力-伸縮変形履歴



(b) BRB の時刻応答履歴

図 15 BRB の地震応答結果