

鋼トラス構造のハイブリッド地震応答実験と解析 — 継続時間の長い地震動の影響

舟山 淳起¹・宇佐美 勉²・今瀬 史晃³・渡辺 孝一⁴

¹正会員 工修 八千代エンジニアリング株式会社（〒161-8575 東京都新宿区西落合 2-18-12）

²フェロー D.Sc., 工博 名城大学教授 理工学部（〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口）

³学生会員 名城大学大学院理工学研究科建設システム工学専攻修士課程（同上）

⁴正会員 工博 名城大学准教授 理工学部建設システム工学科（同上）

1. 緒言

2011年3月11日、我が国の観測史上最大のM9.0を記録した東北地方太平洋沖地震が発生した。東日本各地で地震またはこれに伴って発生した巨大津波による甚大な被害が報告され、戦後最大の大惨事となった。また、長周期地震動によってかなりの広範囲で揺れを観測し、本震に匹敵するほどの余震が過去に例の無いペースで頻発した。この地震は、宮城県沖、三陸沖南部海溝寄り、福島県沖、茨城県沖といった複数の領域を震源としており、海溝型地震の連動に加え、津波地震が連動したいわゆる大連動地震であった。近代観測開始以降、我が国で初めて明確に連動型地震動と断定できるものであり、複数回強震動、長時間継続といった特徴を有している地震動であった。なお、この東北地方太平洋沖地震で観測された地震波は、道路橋示方書¹⁾の改訂に伴い、新たにレベル2タイプIの標準波に採用されている。

上記のような特徴を有す地震動は、構造物の損傷度に大きく影響を及ぼすと言える。特に、塑性変形を繰り返して素材の履歴減衰によって地震エネルギーを吸収する履歴型の制震ダンパー（座屈拘束ブレース：BRB、せん断パネルダンパー：SPD）を使用する場合には、低サイクル疲労について考慮することが重要になると考えられ、照査を行う際に連動型地震動による影響を考慮すべきか検討が必要となる²⁾。

著者らは文献3)で既設H形鋼斜材を座屈拘束ブレース化（H形BRB）した鋼トラス構造の繰り返し载荷実験およびより要素を使用した解析モデルを用いて複合非線形準静的解析を行っている。本研究では、東北地方太平洋沖地震で観測された地震動（複数回強振動、長時間継続）が構造物および制震ダンパーの損傷度に与える影響について検討するために、文献3)で使用した実験供試体、解析モデルを使用したハイブリッド地震応答実験⁴⁾および

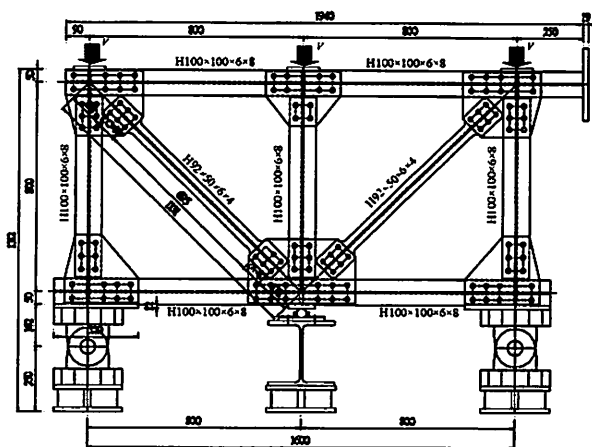


図-1 実験供試体

地震応答解析を実施した。

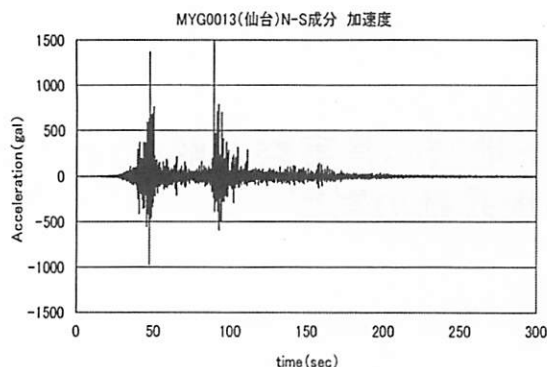
ハイブリッド地震応答実験では、実験供試体の10倍スケール（相似比 $S=10$ ）⁴⁾の実構造物を想定して実験を行い、入力地震波として東北地方太平洋沖地震仙台観測波（MYG0013 N-S成分）を使用した。

地震応答解析では、実験と同様に供試体の10倍スケール（相似比 $S=10$ ）の実構造物を想定して解析を行った。入力地震波は仙台観測波（MYG0013 N-S成分）を使用し、ハイブリッド地震応答実験の結果をもとに解析モデルの妥当性を検証している。さらには、兵庫県南部地震JR鷹取駅観測波（JRTN-S成分）を使用して動的応答特性の比較を行うと共に、BRBの照査法に関する検討を行っている。

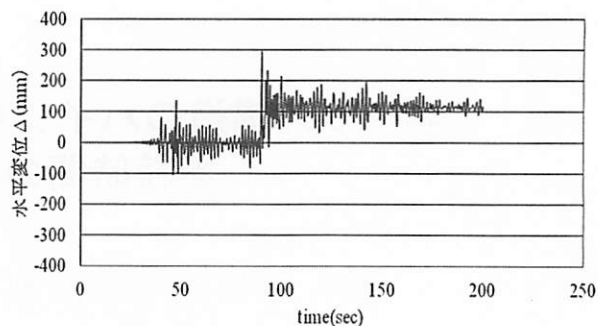
2. ハイブリッド地震応答実験

(1) 実験概要

ハイブリッド地震応答実験では、文献3)と同様の供試体を使用し、相似則を考えた1自由度系に対するハイブリッド実験手法⁴⁾の内「相似モデル解析型手法」を用いた。



(a) 入力地震動 MYG0013 N-S 成分



(b) 時刻歴応答水平変位 Δ (実スケール)

図-2 入力地震動と応答結果

実験供試体は図-1に示すような鋼平面トラス構造で、支持条件として両端基部がピン支承、中央基部がローラー支承である2次不静定構造である。3本の鉛直ジャッキによって均等な一定鉛直荷重 V (死荷重を想定) が各鉛直材の軸線上に載荷され、トラス右上格点に対して上弦材軸線方向にジャッキから荷重が作用し変位が生じる。鉛直荷重 V の大きさは鉛直材の降伏軸力の20%である。上下弦材および鉛直材にはH形鋼 (H100x100x6x8で材質はSS400) を弱軸回りに使用した。斜材はH形鋼部材 (H92x50x6x4) をチャンネル材と平板によって被覆しBRB化したものを使用した。供試体の格点は板厚8mmの2枚のガセットを介してF10T高力ボルト (M16) で摩擦接合されており、ガセット板厚、高力ボルト本数は道路橋示方書⁵⁾の基準を満たすように設計している。下弦材を回転支承部に取り付けるベースプレートは、PL 260 x 12 x 320であり、下弦材フランジに両面隅肉溶接 (脚長4mm) されている。地震波は、仙台観測波の生データに対して基線補正⁶⁾を行ったものを入力した。入力地震動に対する基線補正の有無による応答結果への影響についての検討はAPPENDIXに示す。本研究では、供試体の10倍スケールの実構造物を想定しており、相似側⁷⁾を考慮するにあたって入力地震波の加速度を10倍、時間軸を1/10としている。実構造物の応答は、実験終了後に相似比を考慮し換算して求めた。

(2) 実験結果

実験に先立って固有振動解析を行った。解析モデルについては第3章にて後述する。結果は固有周期が $T=1.51$ (S) (実構造物) となり、1次モードが大きく卓越する結果 (有効質量比: 99%以上 (1次モード)) となった。

図-2, 3に実験結果を示す。図-2は時刻歴応答水平変位 Δ と入力地震動、図-3は復元力 Q —水平変位 Δ 関係を示したものである。1波目のピーク ($t \approx 50$ (s)) で dr (ドリフト) $=1/60$, 2波目のピーク ($t \approx 90$ (s)) で最大応答 $dr_{max}=1/33$ と非常に大きな応答となった。ここではドリフト dr の定

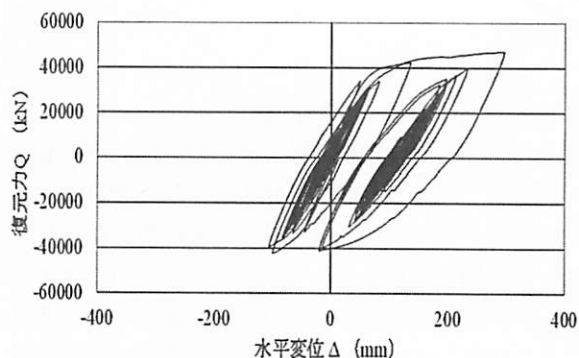


図-3 復元力 Q —水平変位 Δ (実スケール)

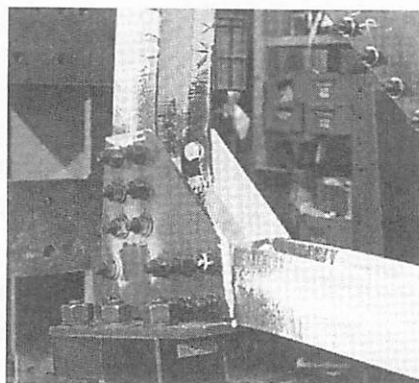


写真-1 支承周辺部材の塑性変形

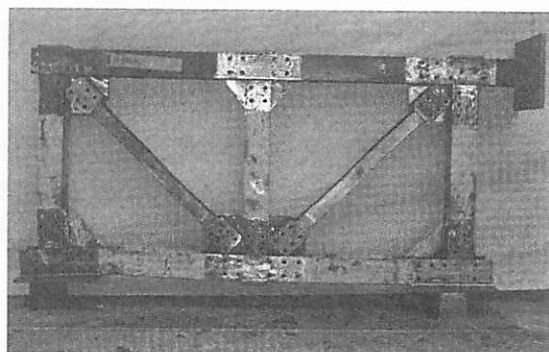
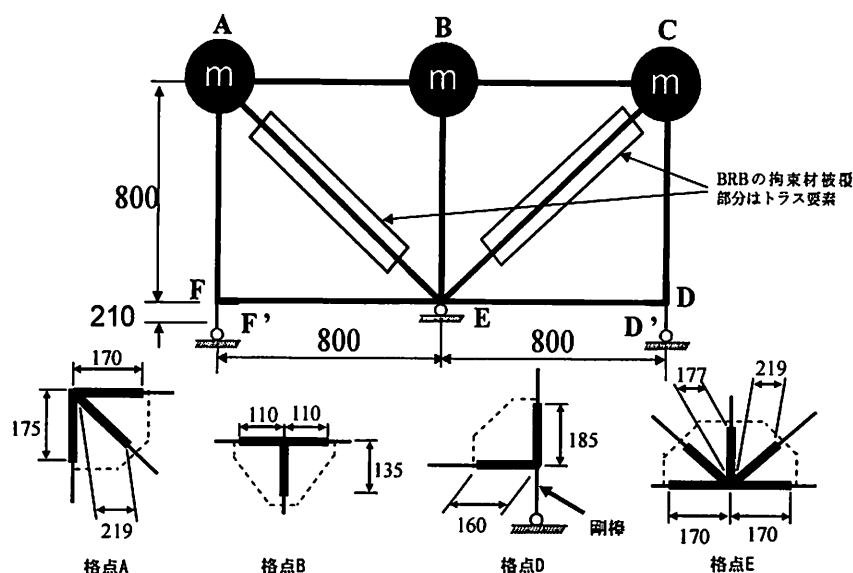


写真-2 変形状況 (実験終了後)



義として、応答水平変位 Δ をトラス構造の高さ h で除した
ものとしている ($d=\Delta/h$)。最大応答時には、写真-1のよ
うに支承周辺部材に大きな塑性変形が発生するとともに、
下弦材とベースプレート溶接部に亀裂が確認された。こ
れらの損傷により、実験終了時では残留変位が $d=1/80$ と
大きな応答となった。

実験終了後にガセットおよびBRBの拘束材を除去して変形・損傷状態を観察したものを写真-2に示す。支承部周辺の下弦材とベースプレート溶接部から進展した亀裂が確認されたがその他の部材には亀裂や破断といった損傷はみられなかった。BRBには損傷が無く健全な状態で実験を終了した。心材(H形鋼部材)は拘束材内部でわずかに弱軸方向に2次のモードで変形しており、写真では分かり難いがフランジが高次モードで局部座屈変形していることを確認した。

3. 地震応答解析

(1) 解析概要

本節では、まず、前節のハイブリッド地震応答実験の結果をもとに解析モデルの妥当性を検証した。次いで、仙台観測波とJR鷹取駅観測波による動的応答特性を比較している。

a) 解析モデル

使用した解析モデルは図-4 に示し、詳細は次のようである。：1) 部材長は骨組長とし、格点は骨組線の交点とする。2) 斜材断面はガセット接合部付近でフランジが広がっているため、変断面にすることによりその影響を考慮する。3) ガセットプレートの影響は、その厚さ（片面 8mm または 4.5mm）を部材連結部の最先端ボルト位置

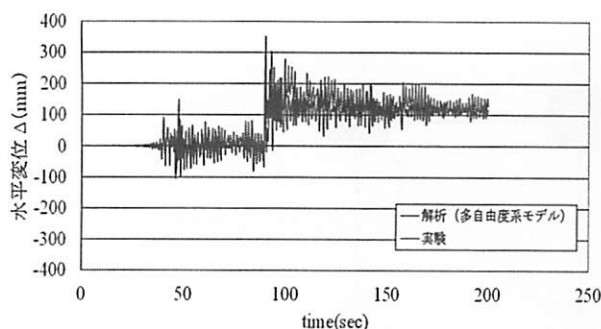
から格点までの部材のフランジ厚に加える。図-4 の太実線の部分がガセットの影響を考えた部材である。4) 接合部はすべて剛結とする。5) 下弦材の格点が回転支承のヒンジの位置から上方 212mm にある影響(支承のオフセットの影響)はその間を剛棒要素で結ぶことで考慮する。解析は全て構造解析用汎用コード Abaqus version 6.8 を使用した。上下弦材、鉛直材を *Timoshenko* はり理論に基づく平面はり要素(要素番号 B31)でモデル化した。斜材を BRB 化した供試体については斜材に拘束材が設置してある中央部 545mm はトラス要素(要素番号 T3D2)、その他の部分は弦材等と同様にはり要素を用いた。BRB は中央部を 1 分割(トラス要素)、端部は他の斜材と同様 4 分割した。上下弦材、鉛直材はすべて 10 分割した。用いた構成則(応力-ひずみ関係)は、バイリニア型移動硬化則(2 次勾配: BRB は $E/60^2$ 、その他の部材は $E/100$)である。材料定数は文献 3) と同様の材料定数を用いた。

境界条件は次のようである。すべての格点はz軸（紙面に垂直な方向）に水平移動しないよう拘束、D'点およびF'点はz軸周りの回転以外を拘束、E点は、y軸方向（鉛直方向）の変位を拘束した。死荷重を想定して実験時に載荷した鉛直荷重に相当する質量(V/g)を各上部格点に設定した。地震波は、仙台観測波とJR鷹取駅観測波の2種類を使用し、D'、F'点に同位相で入力した。ハイブリッド実験と同様に、本検討でも供試体の10倍スケールの実構造物を想定しており、相似側を考慮するにあたって入力地震波の加速度を10倍、時間軸を1/10としている。

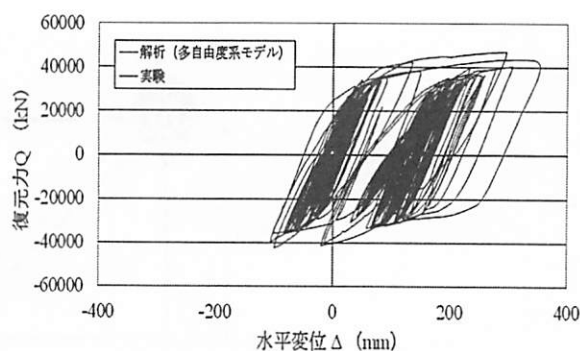
(2) 解析結果

a) 解析モデルの妥当性

前章の実験結果をもとに解析モデルの妥当性を検証した。図-5に実験結果と解析結果（多自由度

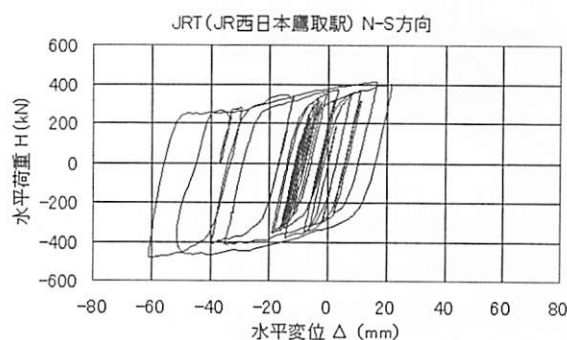


(a) 応答水平変位の比較



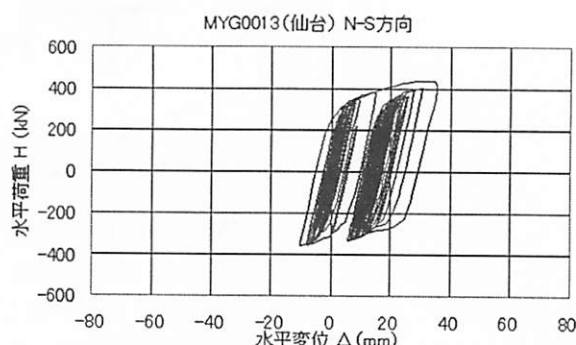
(b) 復元力Q-水平変位Δ関係

図-5 実験と解析結果比較



$$\Delta_{\max}/h=1/14, \Delta_R/h=1/50$$

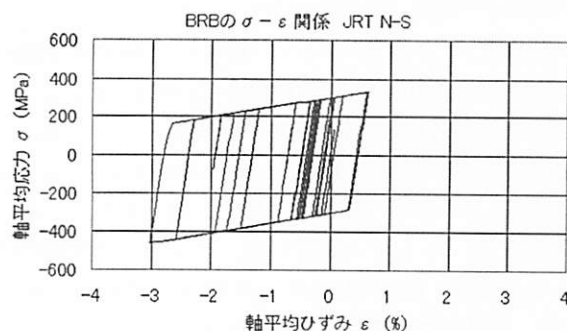
(a) JR 鷹観測波を入力した場合



$$\Delta_{\max}/h=1/30, \Delta_R/h=1/60$$

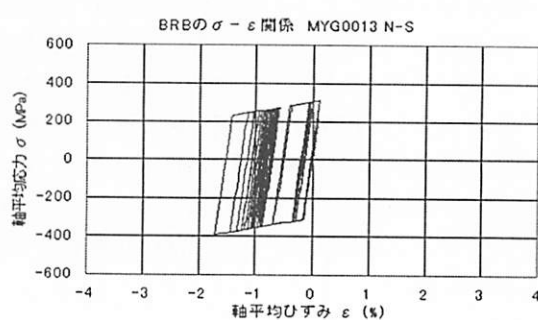
(b) 仙台観測波を入力した場合

図-6 復元力Q-水平変位Δ関係比較



$$\varepsilon_{\max}=3.0\%, \text{CID}=16\%$$

(a) JR 鷹観測波を入力した場合



$$\varepsilon_{\max}=1.7\%, \text{CID}=11\%$$

(b) 仙台観測波を入力した場合

図-7 BRBの軸応力σ-軸ひずみε関係比較

モデル)を比較したものを示す。2波目のピーク辺りから解析の応答変位が若干大きくなっているが、位相はほぼ一致しており、解析モデルは実験結果を概ね模擬できていると言える。

b) 仙台地震波とJR鷹取地震波の応答比較

仙台観測波とJR鷹取観測波による応答を比較した。図-6に復元力-水平変位関係を示す。連動型地震動である仙台観測波の最大ドリフトは $dr_{\max}=1/30$ 、残留ドリフトは $dr_R=1/60$ である。一方、直下型地震動であるJR鷹取観測波の最大ドリフトは $dr_{\max}=1/14$ 、残留ドリフトは $dr_R=1/50$ と非常に

大きな応答となり、本検討で対象とした構造に対してはクリティカルになる結果となった。

図-7にはBRBの軸応力-軸ひずみ関係を比較したものを示す。復元力-水平変位関係と同様にJR鷹取観測波の応答が大きくなり、最大軸方向ひずみは $\varepsilon_{\max}=1.7\%$ (仙台), 3.0% (JR鷹取) 累積塑性ひずみ (CID) を算出すると 11.0% (仙台) 16.0% (JR鷹取) となった。現在、BRBの性能照査には、JR鷹取観測波を使用した橋梁全体の動的解析結果をもとにした値が用いられている。本解析結果からは東北地方太平洋沖地震で観測された連動型

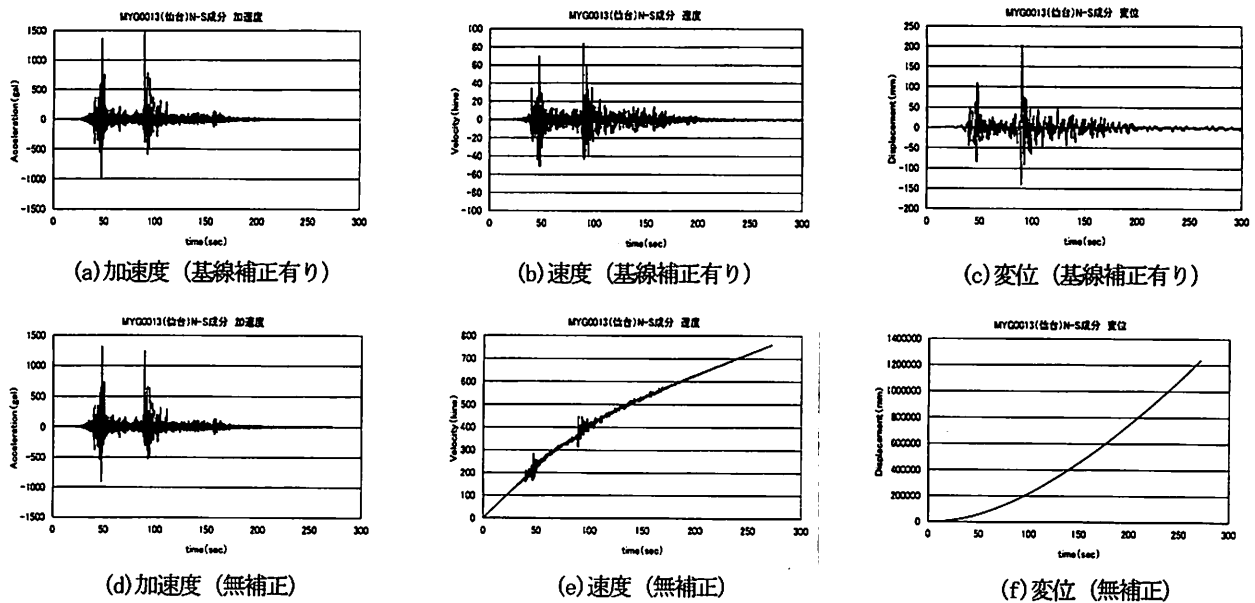


図-A1 入力地震動の加速度，速度，変位

地震動がBRBの低サイクル疲労に与える影響は小さく，新たに考慮する必要は無いと言える．さらに，現行照査法の既定値は，大地震3回程度を想定しており，本解析結果のCID（JR鷹取駅観測波を入力場合）を3倍して安全率1.5を考慮するとCID=70%となり，現行照査法の妥当性についても検証できた．

4. 結言

文献3)で対象とした既設H形鋼斜材をBRB化した鋼トラス構造モデルを使用し，ハイブリッド地震応答実験と地震応答解析とを行った．ハイブリッド実験では供試体の10倍スケール（相似比 $S=10$ ）の実構造物を想定し，東北地方太平洋沖地震の仙台観測波（連動型地震動）を使用して動的応答特性を求めた．地震応答解析では実験と同様に供試体の10倍スケール（相似比 $S=10$ ）の実構造物を想定して解析を行い，ハイブリッド地震応答実験の結果をもとに解析モデルの妥当性を検証している．さらには，兵庫県南部地震JR鷹取駅観測波（JRTN-S成分）を使用して動的応答特性の比較を行うと共に，BRBの照査法に関する検討を行った．得られた知見を以下に述べる．

ハイブリッド地震応答実験

- 1) 実験に先立って固有振動解析を行い，固有周期が $T=1.5(s)$ で1次モードが卓越する結果となった．
- 2) 最大ドリフト Δ_{max}/h は1/33，残留ドリフト Δ_R/h は1/80（実験）と大きな応答が得られた．

- 3) H形鋼部材をBRB化した斜材に損傷はみられなかったが，弦材および鉛直材に損傷が生じた．

地震応答解析

- 1) 最大ドリフト Δ_{max}/h は1/30（仙台），1/14（JR鷹取），残留ドリフト Δ_R/h は1/60（仙台），1/50（JR鷹取）とJR鷹取の応答が大きくなった．
- 2) 斜材に設置したBRBの応答についてもJR鷹取の応答が大きくなった．本解析結果からは連動型地震動（東北地方太平洋沖地震仙台観測波）によるBRBの低サイクル疲労に与える影響は小さく，照査を行う際に新たに考慮する必要は無いと言える
- 3) 現行照査法（BRBの低サイクル疲労性能）の妥当性を検証することができた．
- 4) 実観測長時間継続地震波（無補正地震波）の加速度から直接積分して得られる速度および変位が異常に大きくなる場合がある．（APPENDIX）
- 5) 無補正地震波を用いた応答結果では，加速度が小さい領域（120秒以降）でも変位が大きく増大していくという挙動がみられた．これは，基線の不安定性に起因するものであると考えられ，本研究のような長時間継続地震動および絶対変位を適用して解析を行う場合には，地震動の基線補正が必要になる場合がある．（APPENDIX）

APPENDIX 入力地震動に対する基線補正の有無による応答への影響

Abaqusのように絶対変位を用いた地震応答解析では入力地震動の基線の補正が必要になるため，文献6)に基づ

く低振動数誤差補正を施した地震動（基線補正有り）、および無補正地震動の2種類の地震波を使用して地震応答解析を行った。図-A1には、基線補正を施した地震動と無補正地震動の加速度、それぞれ加速度から積分して求めた速度、変位を比較したものも示す。加速度には殆ど違いが無いと言えるが、無補正地震動の場合では加速度が小さい領域にもかかわらず速度と変位が異常な大きさになっており、このことが応答結果へ与える影響について調べた。

次に、仙台観測地震波を用い、基線補正有り地震波と無補正地震波で応答結果を比較した。図-A2に時刻歴応答変位（図-1のC点水平変位 Δ ）を比較したものを示す。なお、解析は200秒までの応答を求めることとした。2波目のピーク（約90秒）まではほとんど同じ応答となっているが、その後は挙動に明らかな違いがみられた。基線補正有りでは、2波目のピークで約340mmの最大応答変位となり、その後はほぼ弾性範囲内での振動が続き最終的には約100mmの残留変位となった。一方、基線補正無しでは、2波目のピークで300mmの最大応答となった後、揺れ戻しのような挙動がみられた。さらに、入力地震動の加速度が非常に小さいと言える120秒以降も変位が増大するといった不可解な挙動となり、最終的には-760mmと非常に大きな残留変位となった。この結果は、基線の不安定性に起因するもの⁹⁾であると考えられ、本研究のような長時間継続地震動および絶対変位を適用して解析を行う場合には、地震動の基線補正が必要になると考えられる。

謝辞：文献3)に基づく補正地震波は（株）地震工学研究開発センターの王 宏沢氏から提供を受けた。本研究で

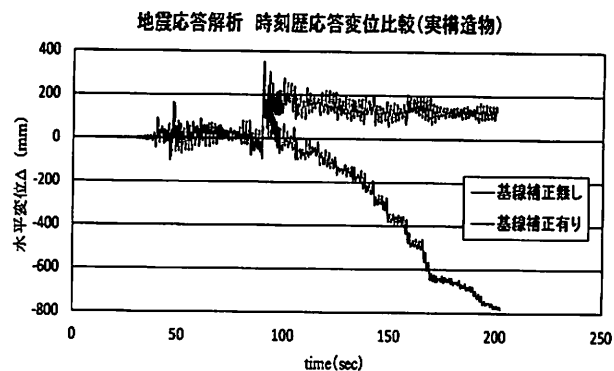


図-A2 時刻歴変位応答比較

使用した地震波はK-NETで観測された地震波を使用させて頂いた。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，丸善，2012。
- 2) 宇佐美勉編著，日本鋼構造協会編：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン，技報堂出版，2006。
- 3) 舟山淳起，今瀬史晃，宇佐美勉，王春林：H形鋼斜材をBRB化することによる鋼トラス構造の耐震性能向上効果，土木学会論文集（印刷中）。
- 4) 才塚邦宏，伊藤義人，木曾英滋，宇佐美勉：相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験手法に関する研究，土木学会論文集，1995。
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，丸善，2012。
- 6) 井合進，倉田栄一，土田肇：強震記録のデジタル化と補正，港湾技研資料，1978。