

震源断層近傍の地震動上下成分の解析と
上路式鋼アーチ橋の非線形応答挙動

ANALYSIS OF VERTICAL GROUND MOTIONS OF NEAR SOURCE
RECORDS IN JAPAN AND THEIR EFFECTS ON THE NONLINEAR
RESPONSES OF STEEL ARCH BRIDGE

原田隆典¹⁾、野中哲也²⁾、児玉喜秀³⁾、中村真貴⁴⁾

Takanori HARADA¹⁾, Tetsuya NONAKA²⁾, Yoshihide KODAMA³⁾, Masaki NAKAMURA⁴⁾

1) 宮崎大学工学部土木環境工学科、教授 工博

¹ Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Miyazaki, Dr. Eng.

e-mail : harada@civil.miyazaki-u.ac.jp

2) (株)地震工学研究開発センター、代表取締役 博士(工)

² President, Earthquake Engineering Research Center Inc., University of Miyazaki, Dr. Eng.

e-mail : nonaka@eerc.co.jp

3) (株)地震工学研究開発センター、研究員

³ Research Engineer, Earthquake Engineering Research Center Inc., University of Miyazaki

e-mail : kodama@eerc.co.jp

4) 宮崎大学大学院農学工学総合研究科博士後期課程、学生

⁴ Graduate Student, Dept. of Environment and Resource Sciences, University of Miyazaki

ABSTRACT: The vertical component of the ground motions recorded near sources (within the shortest distance 20km from fault) of nine earthquakes occurred in Japan, which caused damages, is investigated. The two quantities; the Fourier spectral amplitude ratios and the acceleration response spectral ratios of vertical to horizontal components are analyzed. Also, the effects of the vertical ground motions on the non-linear response behavior of steel arch bridge are investigated. Finally, qualitative recommendations for the seismic design intensity in the vertical direction of near source ground motions are proposed.

キーワード: 震源域、地震動上下成分、橋梁、3次元非線形地震応答解析

1. まえがき

構造物の非線形応答に及ぼす地震動の水平成分の影響に関する研究に比べると、上下成分の影響に関する研究は少ない(例えば¹⁾)。通常の構造物の耐震設計では、上下方向の設計荷重として水平成分の設計震度または加速度応答スペクトルの50~70%を採用しているものが多い。しかし、震源断層近傍の強震観測記録の蓄積に伴い、水平成分に比べると最大加速度、最大速度の大きい地震動上下成分が観測されている。例えば、2008年岩手・宮城内陸地震は逆断層の地震であり、KiK-net 一関西で水平最大加速度1435(cm/s²)に対して上下成分では、断層永久変位を含む3866(cm/s²)の大加速度が観測された。内陸地震の正断層の地震においても断層永久変位を含む強震動上下成分が予測される。

そこで本論文では、わが国で最近発生した内陸被害地震の震源断層近傍(断層最短距離20km以内)における強震観測記録を用いて、地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比(|V(T)|/|H(T)|: T=地震動の周期)と2%減衰定数に対する加速度応答スペクトル比(S_{A_v}(T^{*})/S_{A_H}(T^{*}): T^{*}=構造物の固有周期)の平均値と標準偏差の周期特性を求めることとする。

そして、これらの平均値や標準偏差の周期特性と、2008年岩手・宮城内陸地震による KiK-net 一関西の観測地震動特性との関係を整理する。次に、KiK-net 一関西の観測地震動を入力地震動として上路式鋼アーチ橋の3次元非線形応答解析を実施し、地震動上下成分の応答挙動への影響を調べる。

2. 震源断層近傍の地震動上下成分の特性

2.1 解析に用いた地震と観測点

本論文では、表1に示すように2000年から2008年の間に起きた9個の被害地震（内陸地震）において、断層最短距離が20km以内の28のK-NET観測点で観測された加速度記録を用いた。図1は2008年岩手・宮城内陸地震の断層位置と用いたK-NET観測点とKiK-net一関西観測点の位置を示す。

表1 解析で用いた内陸の被害地震とK-NET観測点

地震名と発生日 (合計9地震)	気象庁地震 規模 M_{JMA}	断層分類	断層最短距離 20 km 以内の K-NET 観測点(合計 28 地点)
鳥取県西部地震 2000/10/6	7.3	横ずれ断層	TTR007, TR008, TTR009, SMN015
芸予地震 2001/3/24	6.4	正断層	HRS019, EHM007
宮城県沖の地震 2003/5/26	7.0	逆断層	MYG001, MYG002, IWT008
宮城県北部の地震 2003/7/26	6.2	逆断層	MYG010, MYG007, MYG012
新潟中越地震 2004/10/23	6.8	逆断層	NIG017, NIG019, NIG020, NIG021
福岡県西方沖地震 2005/3/20	7.0	横ずれ断層	FKO006, FKO007
能登半島沖地震 2007/3/25	6.9	逆断層+ 横ずれ断層	ISK003, ISK005, ISK006
新潟中越沖地震 2007/7/16	6.8	逆断層	NIG016, NIG018
岩手・宮城内陸地震 2008/6/14	7.2	逆断層	AKT023, IWT010, IWT011, MYG004, MYG005

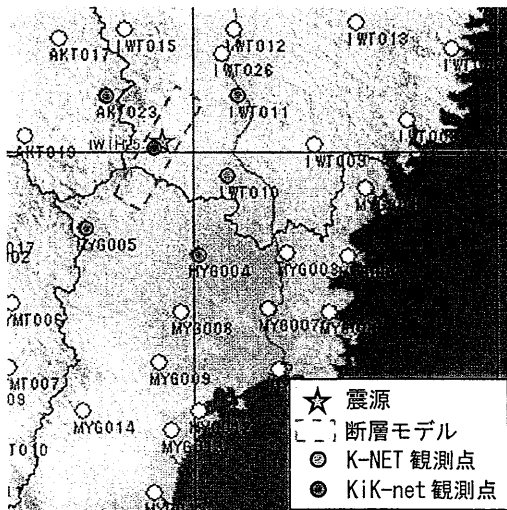


図1 2008年岩手・宮城内陸地震の断層位置と用いたK-NET観測点とKiK-net一関西観測点の位置

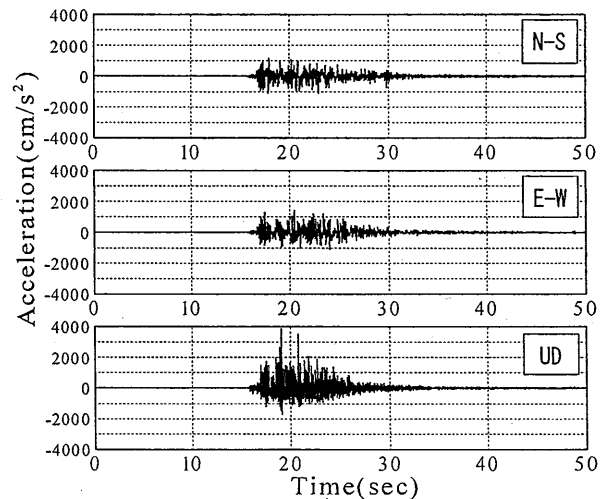


図2(a) 2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西観測点の加速度波形

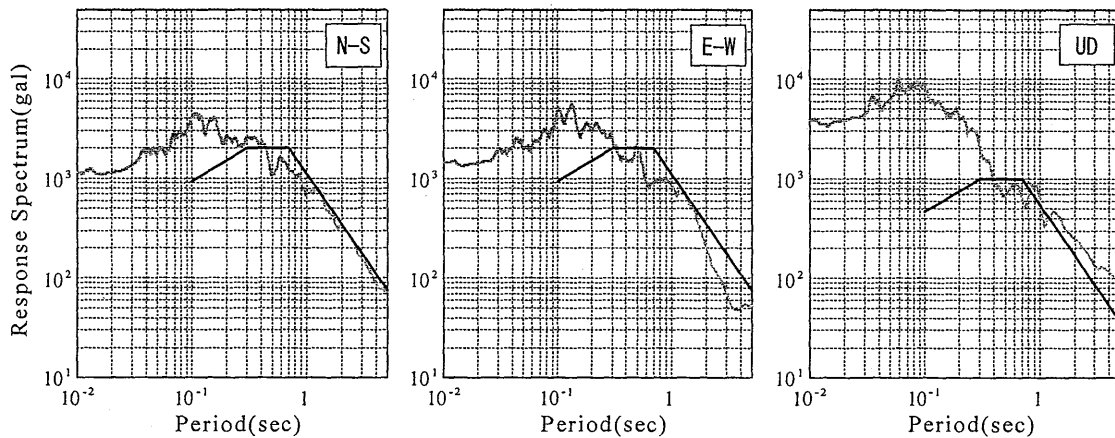


図2(b) 2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西観測点の応答スペクトル(5%減衰定数)

図2(a)と図2(b)は、KiK-net一関西観測点で観測された地震動加速度波形とその5%減衰定数に対する加速度応答スペクトルを示す。図2(b)の加速度応答スペクトル図には、3本の直線からなる道路橋耐震設計用のType IIのI種地盤(内陸型地震動の硬質地盤)におけるレベル2水平地震動の加速度応答スペクトルとその50%を上下成分の加速度応答スペクトルとしてプロットしている。このような道路橋耐震設計用のレベル2地震動の加速度応答スペクトルと比較すると、KiK-net一関西観測点は逆断層直上に位置しており、水平最大加速度 $1435(\text{cm/s}^2)$ に対して上下成分では、断層永久変位を含む $3866(\text{cm/s}^2)$ の大加速度が観測されているものの、周期約0.4秒より長周期側では、道路橋耐震設計用のレベル2水平地震動の加速度応答スペクトルとほぼ同じであり、上下成分ではやや大きめであることがわかる。この波形は3章の上路式鋼アーチ橋の3次元非線形応答解析の入力地震動として用いるが、次節で示す震源断層近傍の地震動上下成分の平均的特性を解析するためには、28のK-NET観測点の記録のみを用いた。

2.2 地震動上下成分の特性

表1に示す断層最短距離が20Km以内の28のK-NET観測点で観測された加速度記録から、地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比 $(|V(T)|/|H(T)| : T = \text{地震動の周期})$ と、2%減衰定数に対する加速度応答スペクトル比 $(SA_V(T^*)/SA_H(T^*) : T^* = \text{構造物の固有周期})$ を計算し、その平均値と標準偏差を求めた。図3と図4は、それぞれ地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比と、2%減衰定数の加速度応答スペクトル比の「平均値」と「平均値+標準偏差」、「平均値+2×標準偏差」をプロットしたものである。フーリエスペクトル振幅比の計算では、バンド幅0.1Hzのパーゼンウィンドウによるスムージングを行った。

これらの図から、 $T = 0.05, T^* = 0.06$ 秒で最大となり、周期が長くなると減少し、 $T = 0.25, T^* = 0.2$ 秒よりほぼ一定となる傾向を読み取ることができる。なお、 $T = 0.05, T^* = 0.06$ 秒より短周期側でもフーリエスペクトル振幅比と加速度応答スペクトル比は最大値よりも小さくなっている。このような短周期側のスペクトル比の低下については、K-NET観測点の基礎形状と地盤の動的相互作用の影響が現れるもの²⁾と考えられ、自然地盤の地震動とは異なる。したがって、本論文では、 $T = 0.05, T^* = 0.06$ 秒より短周期側のスペクトル比は、一定値として与えるものとする。以上のようなスペクトル比の平均値と

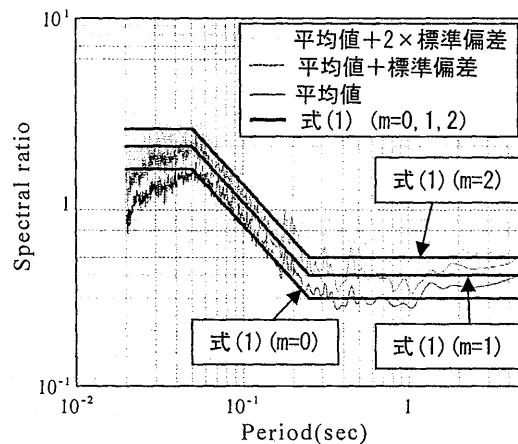


図3 震源断層近傍の地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比の「平均値」、「平均値+標準偏差」、「平均値+2×標準偏差」と式(1)の比較

標準偏差を用いて、スペクトル比の「平均値+ $m\sigma_j$ 」(σ_j : 標準偏差 $j = F, SA$) を、次式のようにモデル化した。

$$E \left[\frac{|V(T)|}{|H(T)|} \right] + m\sigma_F \quad (1)$$

$$= \begin{cases} 1.5 + m\sigma_F & T \leq 0.05 \\ (1.5 + m\sigma_F) \left(\frac{0.05}{T} \right) & 0.05 \leq T \leq 0.25 \\ 0.2(1.5 + m\sigma_F) & 0.25 \leq T \leq 5 \end{cases}$$

$$E \left[\frac{SA_V(T^*)}{SA_H(T^*)} \right] + m\sigma_{SA} \quad (2)$$

$$= \begin{cases} 1.0 + m\sigma_{SA} & T^* \leq 0.06 \\ (1.0 + m\sigma_{SA}) \left(\frac{0.06}{T^*} \right) & 0.06 \leq T^* \leq 0.2 \\ 0.3(1.0 + m\sigma_{SA}) & 0.2 \leq T^* \leq 5 \end{cases}$$

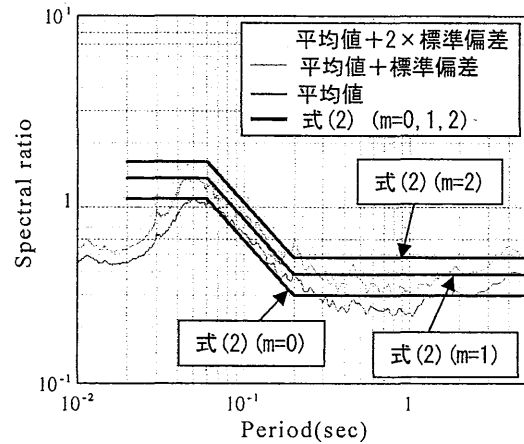


図4 震源断層近傍の地震動上下成分と水平成分の加速度応答スペクトル比の「平均値」、「平均値+標準偏差」、「平均値+2×標準偏差」と式(2)の比較

ここに、 $\sigma_F = 0.5$, $\sigma_{SA} = 0.3$ 。上式で $m = 0$ とすると、スペクトル比の平均値が求められる。

図3と図4には、観測記録の「平均値」、「平均値+標準偏差」、「平均値+2×標準偏差」と、式(1)と式(2)を比較しているが、式(1)と式(2)が観測記録の特性をよく近似していることがわかる。

2.3 2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net-関西観測点における加速度波形のスペクトル比の特性

ここでは、前節で求めた地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比と、2%減衰定数の加速度応答スペクトル比の平均値と標準偏差の特性と、逆断層直上で観測された2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net-関西観測点の加速度波形のスペクトル比の特性を比較して、KiK-net-関西観測点の加速度波形のスペクトル比の特性が、平均的スペクトル比の特性からどの程度違っているのかを評価し

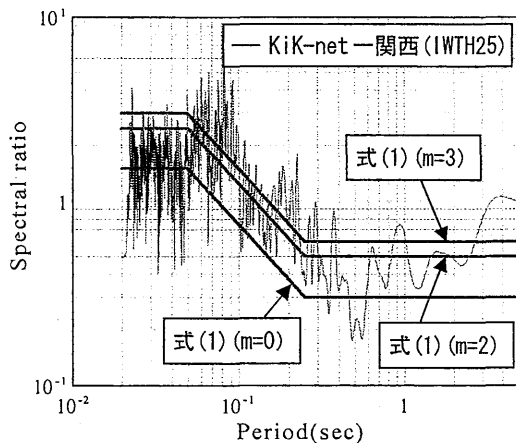


図5 2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net-関西観測点の加速度波形の上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比と式(1)による「平均値+2×標準偏差」と「平均値+3×標準偏差」の比較

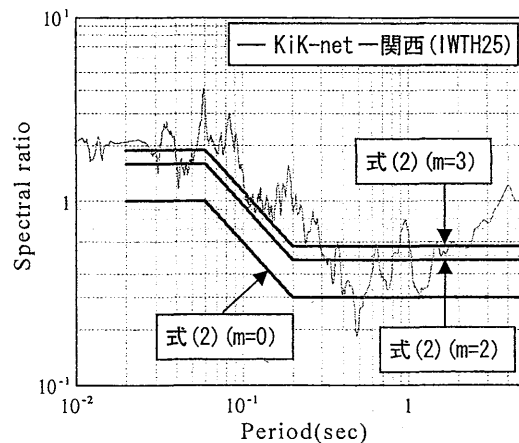


図6 2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net-関西観測点の加速度波形の上下成分と水平成分の加速度応答スペクトル比と式(2)による「平均値+2×標準偏差」と「平均値+3×標準偏差」の比較

ておく。

図5と図6は、KiK-net一関西観測点の加速度波形のスペクトル比と、前節で求めた式(1)と式(2)で与えられる上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比と、2%減衰定数の加速度応答スペクトル比の「平均値」、「平均値+2×標準偏差」、「平均値+3×標準偏差」を比較したものである。これらの図より、逆断層直上で観測された2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西観測点の地震動上下成分の特性は、「平均値+2×標準偏差」から「平均値+3×標準偏差」程度として評価することができ、震源断層近傍の地震動上下成分の平均的スペクトル比特性の上限値に近い特性であることがわかる。

3. 震源断層近傍の上路式鋼アーチ橋の非線形応答挙動に及ぼす地震動上下成分の影響に関する解析例

3.1 対象橋梁および解析モデル

検討対象の上路式鋼アーチ橋³⁾を図7に示す。本橋梁は、橋長174m、アーチ支間114mの上路式RC床版逆ローゼ桁橋である。

本橋梁に対して、軸力変動および2軸曲げの影響が考慮できる3次元ファイバーモデルによりモデル化する。その解析モデルを図8に示す。同図にはファイバー要素で定義したアーチリブのセル分も示している。材料構成則については、各ファイバー要素に定義する応力-ひずみ関係はひずみ硬化を考慮したバイリニアモデルとし、硬化則は移動硬化則とした。解析の種類として、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した複合非線形動的解析を採用した。

3.2 対象橋梁の固有振動特性

対象橋梁の固有周期を表2に、それに対応する固有モードを図9に示す。表2から、1次の周期が約1.4秒であることがわかりアーチ橋としては比較的長周期である。

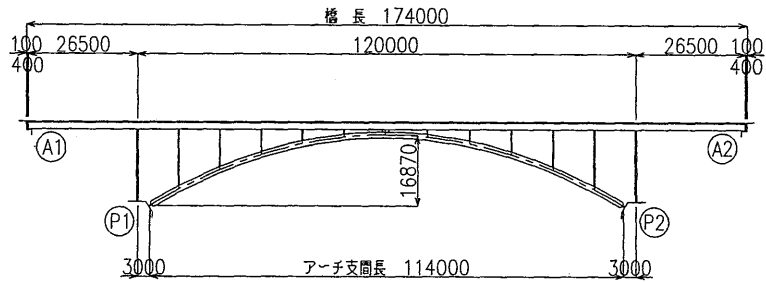


図7 対象橋梁の上路式鋼アーチ橋

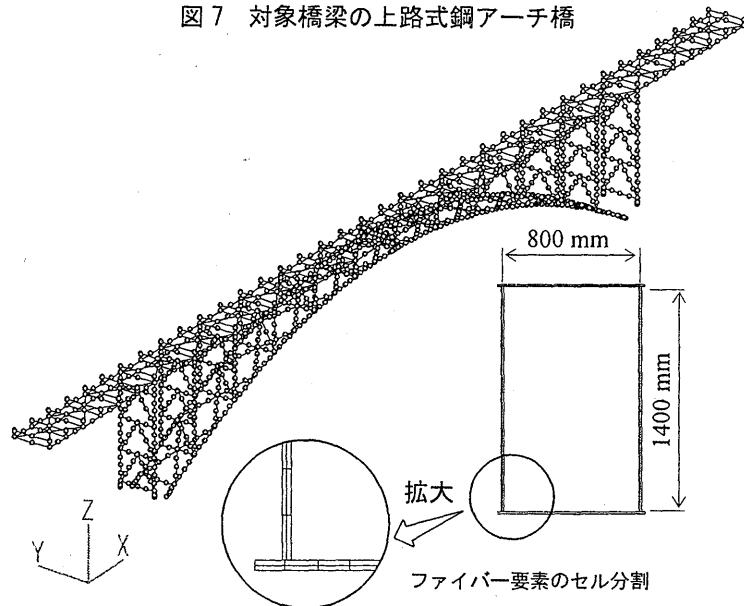


図8 解析モデル

表2 固有周期

モード次数 n	振動数 f	周期 T	有効質量比		
	Hz	sec	X	Y	Z
1	0.7308	1.3683	16.9%	0.0%	0.0%
2	1.0538	0.9489	0.0%	72.1%	0.0%
3	1.6038	0.6235	0.0%	0.0%	2.2%
4	2.1174	0.4723	0.0%	0.0%	0.0%
5	2.5665	0.3896	28.9%	0.0%	0.0%
6	2.6319	0.3800	0.0%	0.0%	53.1%
7	3.2246	0.3101	0.0%	13.0%	0.0%
8	3.6563	0.2735	32.7%	0.0%	0.0%
9	3.7050	0.2699	0.0%	0.0%	14.3%
10	3.9370	0.2540	12.6%	0.0%	0.0%

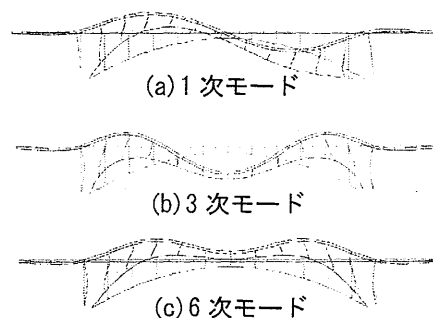


図9 固有モード図

図9に示すように対象橋梁の面内方向（XZ平面）に変形するモードは、1,3,6次モードである。

3.3 検討ケース

本橋梁に対して、2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西観測点の観測地震動を作用させる。本検討では、表3に示すようなケースで解析を実施する。検討ケース3のUD成分×0.186は、水平成分の最大値の0.5程度になるように地震動上下成分を調整したものである。なお、対象橋梁に対する地震動の水平作用方向として、橋軸方向にN-S成分、橋軸直角方向にE-W成分を入力した。

表 3 検討ケース

ケース名	検討内容
検討ケース1	岩手・宮城内陸地震N-S成分, E-W成分考慮
検討ケース2	岩手・宮城内陸地震N-S成分, E-W成分, UD成分考慮
検討ケース3	岩手・宮城内陸地震N-S成分, E-W成分, UD成分×0.186

3.4 解析結果および考察

(1) 応答変位の比較

検討ケース1、2の応答変位の結果を図10(a)(b)にそれぞれ示す。応答変位の出力位置は、アーチリブの1/4地点上の補剛桁位置である。アーチ橋の構造上、この位置が鉛直に大きく変位する。図9の固有モード図でいえば、1次モードに近い変形を示す。

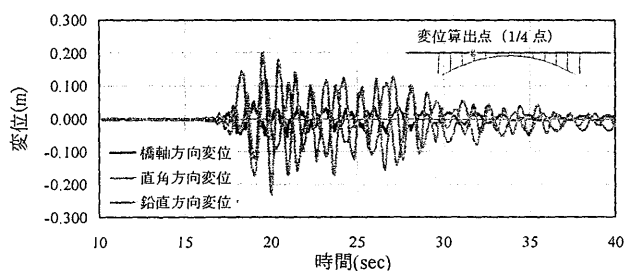
これらの結果から、UD成分を含めた検討ケース2の方が、検討ケース1と比較して鉛直方向変位が1.4倍程度大きくなり、他の成分はほとんど変わらないことがわかる。なお、検討ケース3は省略するが、検討ケース1と検討ケース3の応答変位はほとんど同じであった。

(2) 損傷位置および損傷程度

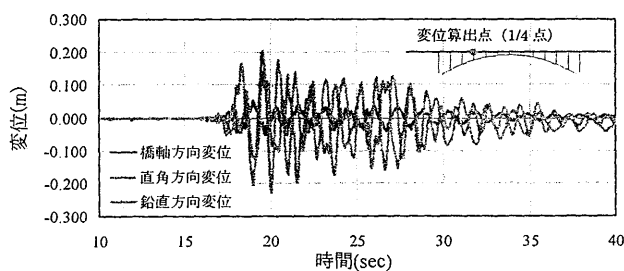
各検討ケースにおける損傷位置とその損傷程度（応力-ひずみ関係）をまとめたものを図11に示す。図内に赤色の箇所が塑性化した部分を示している。また、アーチリブ、補剛桁および端支柱において最も塑性化した部材の応力-ひずみ関係も示している。

まず、検討ケース1と2を比較する。検討ケース1において主部材の中で支柱のみ塑性化（端支柱は大きく塑性化）していたが、検討ケース2では上下成分の影響により、アーチ橋として重要な部位のアーチリブや補剛桁も塑性化するようになり、塑性化の範囲が拡大した。ただし、アーチリブと補剛桁の塑性化の程度は比較的小さい。これは、対象橋梁の固有周期が約1.4秒（応答変形が1次モードに近い振動モードであった）であり、図2(b)の上下成分の応答スペクトルにおいてその固有周期では約450(cm/s²)程度となっているからである。また、対象橋梁のような上路式アーチ橋では、全重量の大部分を占めるRC床版の位置から水平方向（特に橋軸直角方向）の耐震性がないと判断される場合が多く、鉛直方向においては常時設計で死荷重（自重）の1.7倍の安全係数で弾性設計され構造上強いことも理由に挙げられる。

ただし、今回の対象橋梁の固有周期は約1.4秒と比較的長周期であったが、同形式の小中規模のアーチ橋では固有周期が0.5秒程度のものが多いので、このような橋梁に対しては地震動上下成分の影響が大きく現れる可能性がある（例えば、図2より固有周期0.6秒の加速度応答スペクトル値は900(cm/s²)となる）。

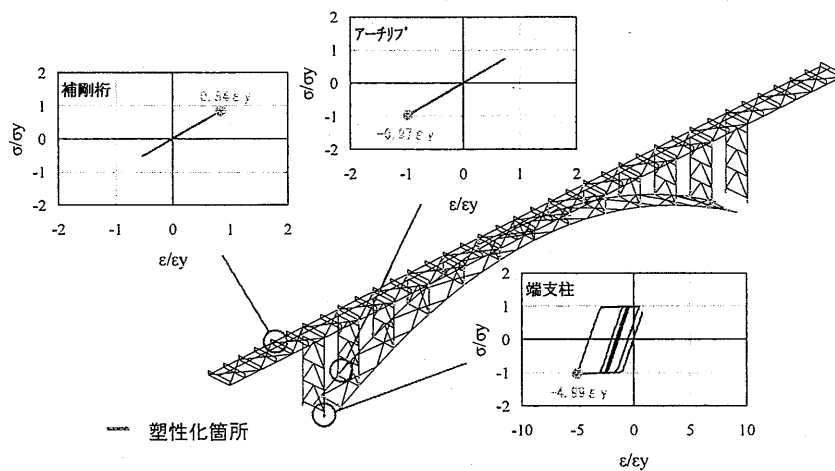


(a) 検討ケース 1

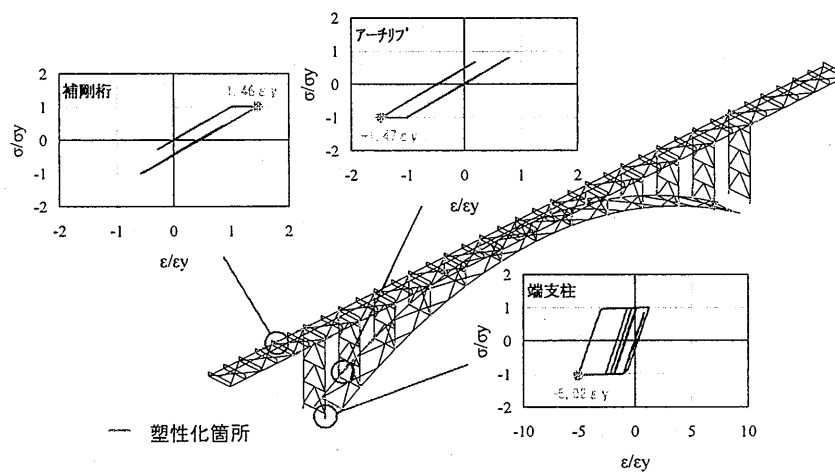


(b) 検討ケース 2

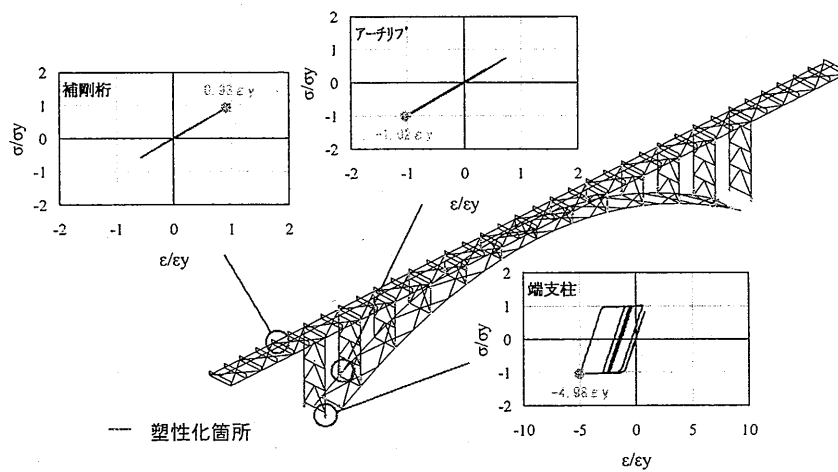
図 10 応答変位履歴



(a) 検討ケース 1



(b) 検討ケース 2



(c) 検討ケース 3

図 11 損傷位置および着目部材の応力-ひずみ関係

次に、検討ケース1と3を比較する。検討ケース3でアーチリブがわずかに塑性化するようになったが、ほとんど差が無いことがわかる。このことから、採用した内陸直下型の岩手・宮城内陸地震によるKiK-net 一関西観測点の観測記録において、通常的设计で行われているように最大水平加速度の0.5倍程度の地震動上下成分として対象橋梁に作用させても、応答結果にほとんど影響のないことがわかった。

4. まとめと課題

- (1) わが国の最近の内陸被害地震の震源断層近傍（断層最短距離 20km 以内）における強震観測記録を用いて、地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比 $(|V(T)|/|H(T)| : T = \text{地震動の周期})$ と 2%減衰定数に対する加速度応答スペクトル比 $(SA_V(T^*)/SA_H(T^*) : T^* = \text{構造物の固有周期})$ の平均値と標準偏差の周期特性を求めて、そのモデル化を提案した。
- (2) これらの平均値と標準偏差の周期特性と比較から、2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net 一関西観測点の地震動上下成分の特性は、「平均値+2×標準偏差」から「平均値+3×標準偏差」程度として評価することができ、震源断層近傍の地震動上下成分の平均的スペクトル比特性の上限値に近い特性であることがわかった。
- (3) 次に、KiK-net一関西の観測地震動を入力地震動として上路式鋼アーチ橋の3次元非線形応答解析を実施し、地震動上下成分の応答挙動への影響を調べた。上下成分を無視した場合、主部材の中で支柱のみ塑性化（端支柱は大きく塑性化）していたが、上下成分を考慮すると、アーチ橋として重要な部位のアーチリブや補剛桁も塑性化するようになり、塑性化の範囲が拡大し、上下成分の影響があることがわかった。ただし、アーチリブと補剛桁の塑性化の程度は比較的小さかった。その理由は、今回の対象橋梁の固有周期は約1.4秒と比較的長周期で、この周期での入力地震動加速度があまり大きくなかったことによる。同形式の小中規模のアーチ橋では固有周期が0.5秒程度のものが多いので、このような橋梁に対しては地震動上下成分の影響が大きく現れる可能性がある。
- (4) 今後は、色々な震源断層パラメータと破壊伝播特性、地盤条件等を考慮できる、震源断層・地盤系モデルに基づいた断層永久変位を含む地震動シミュレーション手法を使って、色々なシナリオに対する解析用入力地震動を作成し、震源断層近傍の橋梁の3次元非線形応答解析^{4),5),6)}を実施し、地震動上下成分の影響について調べる予定である。

謝 辞

本論文の観測波形の解析に当たっては、独立行政法人 防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの観測記録と震源メカニズム解を利用させて頂きました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：多次元入力地震動と構造物の応答、日本建築学会、1998年。
- 2) 河本悠歩：地震観測記録に及ぼす地震計基礎形状及び周辺環境の影響に関する研究—構造物と地盤との動的相互作用解析に基づいて—、名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻博士前期課程研究論文、2007年、<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/~fukuwa/paper-pdf/aij2007/kawamoto.pdf>。
- 3) 宇佐美勉編、(社)日本鋼構造協会：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン、技報堂出版、2006.9。
- 4) 原田隆典、野中哲也、王宏沢、岩村真樹、宇佐美勉：震源断層近傍における上路式鋼トラス橋の応答特性、構造工学論文集、Vol.55A, pp.573-582, 2009。
- 5) 王宏沢：理論的方法による震源断層近傍の地震動特性と長大構造物の応答挙動に関する研究、宮崎大学大学院工学研究科博士論文(2005年度)、2006。
<http://ir.lib.miyazaki-u.ac.jp/dspace/handle/123456789/674>
- 6) 原田隆典：震源から一貫して捉えた地盤・基礎・長大構造物系の応答評価とその予測法、科学研究費補助金基盤研究(c)(2)研究成果報告書(課題番号16560418)、宮崎大学、2008。
<http://ir.lib.miyazaki-u.ac.jp/dspace/handle/123456789/1054>