

変形や変位の地震観測記録を用いた橋梁上部構造の減衰特性

矢部 正明¹・松原 拓朗²・久保田 成是²・塚本 英子³

¹正会員 （一財）首都高速道路技術センター 技術研究所（〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目10番11号虎ノ門PFビル）

²正会員 首都高速道路株式会社 技術部 技術推進課（〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1）

³非会員 株式会社長大 第一構造事業部 構造防災技術部（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

1. はじめに

構造物を対象とする地震観測の多くが、応答加速度を観測しているため¹⁾地震観測記録から推定される減衰定数も、応答加速度波形から求められている例が多い²⁾。応答加速度波形は、それが橋梁上部構造のものであっても、構造物の固有振動モード以外の周期成分を数多く含んでおり、その勢力も大きいいため、構造物の固有振動モードの固有周期やモード減衰定数の特定が難しい。応答加速度に比較して、応答変位波形や変形の応答波形（応答ひずみ波形）は、構造物の固有振動モードに起因する周期成分が卓越し、応答加速度波形に比較して他の周期成分も少なくその勢力も小さいことから、固有振動モードに相当する固有周期を特定し易い。加速度計と異なり、変位計の多くは相対変位計であり、そのセンサーの数も加速度計よりも圧倒的に少ないため、変位や変形のセンサーから固有振動モード形を推定することは容易ではない。しかし、相対変位計ならばセンサーの感振方向、ひずみ計ならば部材の変形方向の減衰定数の推定を容易にし、応答加速度波形よりも質の高い推定値が得られることが期待される。

本論文では、首都高速道路で観測された地震観測記録の中から相対変位計とひずみ計で観測された波形を用いて、橋梁上部構造のモード減衰定数や部材の減衰定数を推定した。検討対象としたのは、図-1から図-3に示す固有振動モードに起因する減衰定数である。図-1は、橋軸方向の支持形式として弾性拘束ケーブルが用いられている鶴見つばさ橋の橋軸方向Swayの固有振動モードである³⁾。鶴見つばさ橋には、扇島側の主塔位置と端部橋脚位置で上部構造と橋脚頂部間の橋軸方向相対変位を計測する変位計が

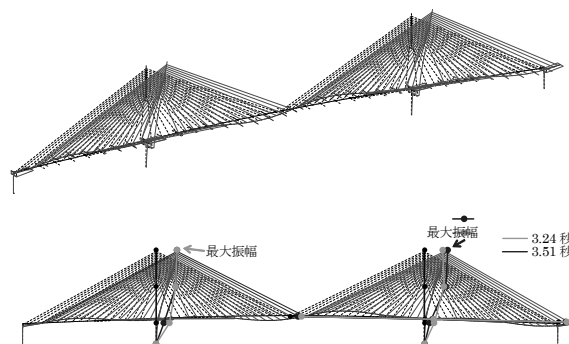


図-1 2004.10.23 平成 16 年新潟県中越地震 Mj6.8 記録から推定した鶴見つばさ橋の橋軸方向 Sway の固有振動モード（3.24 秒・3.51 秒）³⁾

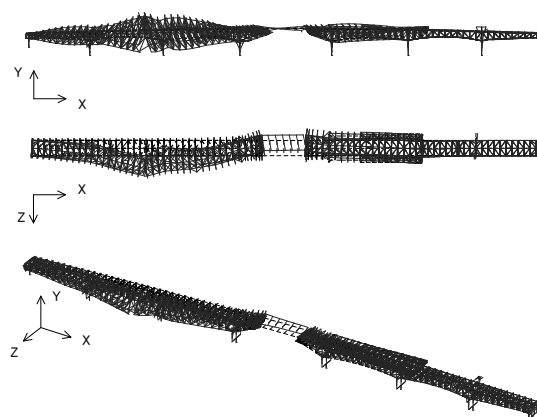


図-2 耐震補強工事中の荒川湾岸橋の固有振動モード（ガセットの破断に影響した固有振動モード、1.23 秒）⁴⁾

設置されている。

図-2は、荒川湾岸橋の固有振動モード形である。図は、2011.3.11東北地方太平洋沖地震Mw9.0でガセット部が破断した橋脚位置のトラス構面に橋軸直角方向の変形を生じさせている固有振動モード形であ

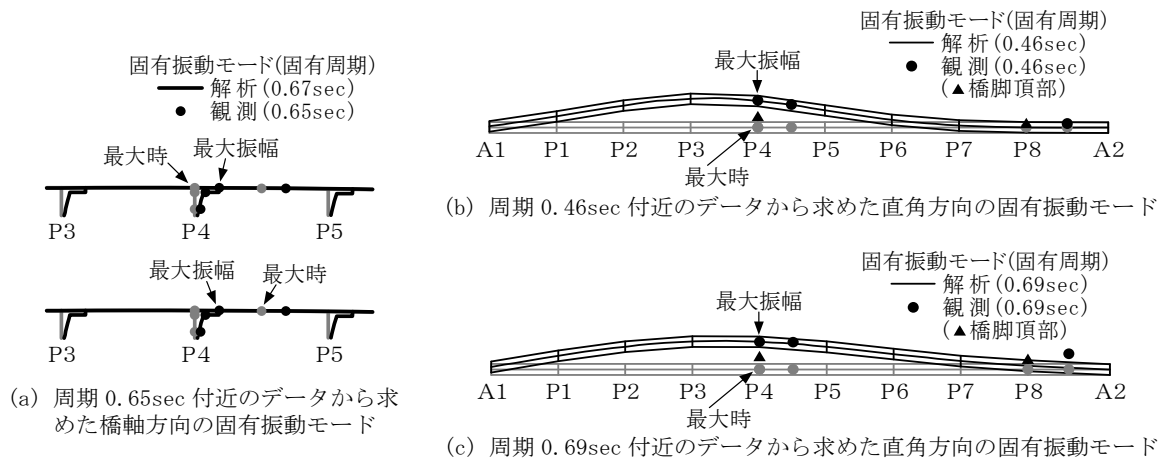


図-3 2011.3.11 東北地方太平洋沖地震 Mw9.0 の観測記録より推定した東扇島高架橋の固有振動モード⁵⁾

る．首都高速道路では、破断したガセット部の復旧工事の効果を確認するために、鉛直材と対傾構および下横構と下弦材にひずみゲージを貼り付けて1ヶ月間の連続観測を行っている．その間に、2011.3.11東北地方太平洋沖地震Mw9.0の余震が数回生じている⁴⁾．

図-3は、上部構造と橋脚頂部間の相対変位を計測するために橋軸方向と橋軸直角方向に相対変位計を設置している鉛プラグ入り積層ゴム支承を用いた東扇島高架橋の固有振動モード形である⁵⁾．

本論文では、図-1から図-3に示した固有周期付近に着目して、橋梁上部構造の減衰定数を推定した．鶴見つばさ橋は周期3.24秒と3.51秒の橋軸方向Swayのモード減衰定数を、荒川湾岸橋はトラスを構成する部材の軸方向変形に起因する部材の減衰定数を、東扇島高架橋は橋軸方向は0.65秒のSway、橋軸直角方向は、上沓とサイドブロックが接触するまでの弾性支持状態の0.69秒と接触した時の固定支持状態の0.46秒のモード減衰定数を推定した．

2. 減衰定数の推定方法

減衰定数の推定は、自己相関関数法の1つで条件に応じた小サンプルを多数切り出し、それらを重ね合わせることでノイズがアンサンブル平均化され、自由減衰振動波形を得ることができるRD法(Random Decrement法)⁶⁾によった．地震観測記録のような非定常性が強い振動波形から減衰定数を推定する場合には、用いる推定法によっても得られる減衰定数の値が異なる．しかし、加速度波形に比較して特定すべき周期や周期範囲を特定し易い変位波形やひずみ波形の場合には、RD法によって質の良い自由減衰振動波形が得られると考えられる．減衰定数の振幅依存性にも着目することができることも、

RD法を用いた理由の1つである．

RD法を用いて地震観測記録から減衰定数の推定を行ったのは田村ら⁸⁾である．本論文の第一著者と第四著者も横浜ベイブリッジで観測された地震記録から、RD法を用いてモード減衰定数の推定⁷⁾を行っている．RD法によって構造物の減衰定数を推定するためには、バンドパスフィルターの幅、減衰定数を評価する振幅数(波数)、波形の抽出法と様々な工夫を必要とし^{9)~16)}一般化には至っていない．

図-4にRD法の流れを示した．応答波形 $X(t)$ を、減衰振動解 $D(t)$ と強制振動解 $R(t)$ の和で表されると仮定すると式(2-1)が得られる． $X(t)$ の全ての極大値を、ピークを一つずつずらしながら重ね合わせたときの自由減衰振動波形は式(2-2)のように得られる．

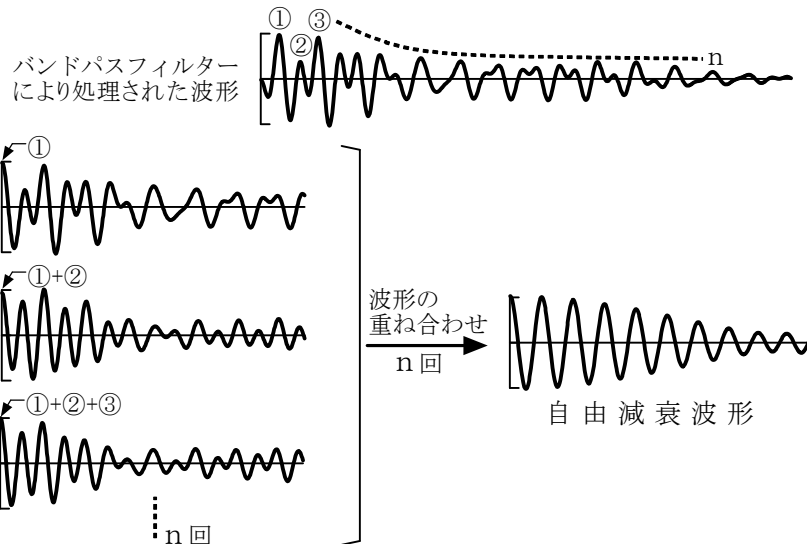
$$X(t) = D(t) + R(t) \quad (2-1)$$

$$\sum X(t) = \sum D(t) + \sum R(t) \quad (2-2)$$

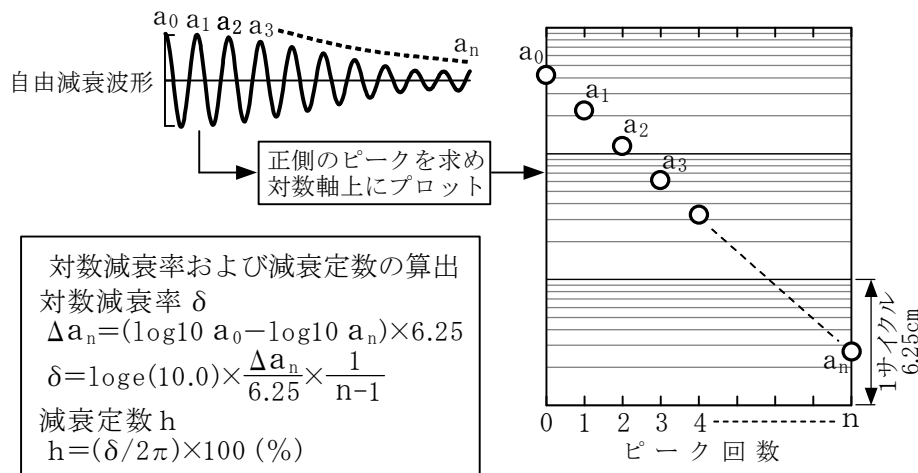
$R(t)$ がランダム波形であれば、それを十分に重ね合わせることで、 $\sum R(t)$ は相殺されて振幅が小さくなり、 $\sum D(t)$ は相乗して大きくなることから、自由減衰振動波形となる．観測された変位波形やひずみ波形に着目すべき周期付近のバンドパスフィルターを施して重ね合わせて自由減衰振動波形を作る．ここでは、重ね合わせ数は1000回とした．

3. 鶴見つばさ橋の相対変位波形による減衰

図-5は、鶴見つばさ橋のP3主塔(扇島)位置とP4端部橋脚(扇島)位置に設置された上部構造と橋脚頂部間の相対変位計で観測された相対変位波形である．相対変位計が機能している間に地震動強度が大きい地震動が生じていないため、SN比が小さい記



(1) RD法による自由減衰振動波形の推定



(2) 自由減衰振動波形から減衰定数の算出

図-4 RD法による自由減衰振動波形の推定と減衰定数の評価

録である。図-6と図-7は、相対変位の値が他の地震に比較して大きかった1996.9.11千葉県東方沖地震Mj6.4で観測された相対変位波形から求めた自由減衰振動波形と減衰定数の推定結果である。図-6は主塔位置の相対変位波形の周期3.24秒付近、図-7は端部橋脚位置の相対変位波形の周期3.51秒付近の周期成分に着目して求めた自由減衰振動波形と減衰定数の推定結果である。自由減衰振動波形の継続時間70秒のうち、0秒から20秒付近と20秒以降から70秒までの振幅の減衰の様子は微妙に異なっていることがわかる。0秒から20秒付近では、振幅の減少が等差級数的（直線的）であるのに対して、20秒以降から70秒までの振幅の減少は等比級数的（指数関数的）であることがわかる。この傾向は、同じ位置の上部構造に設置した加速度計で観測された応答加速度波形から求めた自由減衰振動波形でも確認されている。

振幅が等比級数的に減少するのは粘性減衰の場合、等差級数的に減少するのは固体摩擦による減衰の場合であることから^{17),18),19)}、鶴見つばさ橋の橋軸方向相対変位には、減衰効果として摩擦に起因するものと粘性減衰に起因するものが含まれている（現れている）ことがわかる。鶴見つばさ橋は、主塔位置に鉛直摩擦支承が設置されており、鉛直摩擦支承の摩擦による散逸エネルギーが鶴見つばさ橋の振動減衰に大きく寄与していることが、山口らによって報告されている²⁰⁾。図-5に示した相対変位、山口らが対象とした定常加振実験とともに、その振幅レベルが小さいことから、鉛直摩擦支承の摩擦の影響が大きく現れていると考えられる。

固体摩擦による自由減衰振動波形から、摩擦係数やそれによる振幅の減少量を評価するためには、自由減衰振動波形のn番目のピーク振幅を縦軸、n+1番

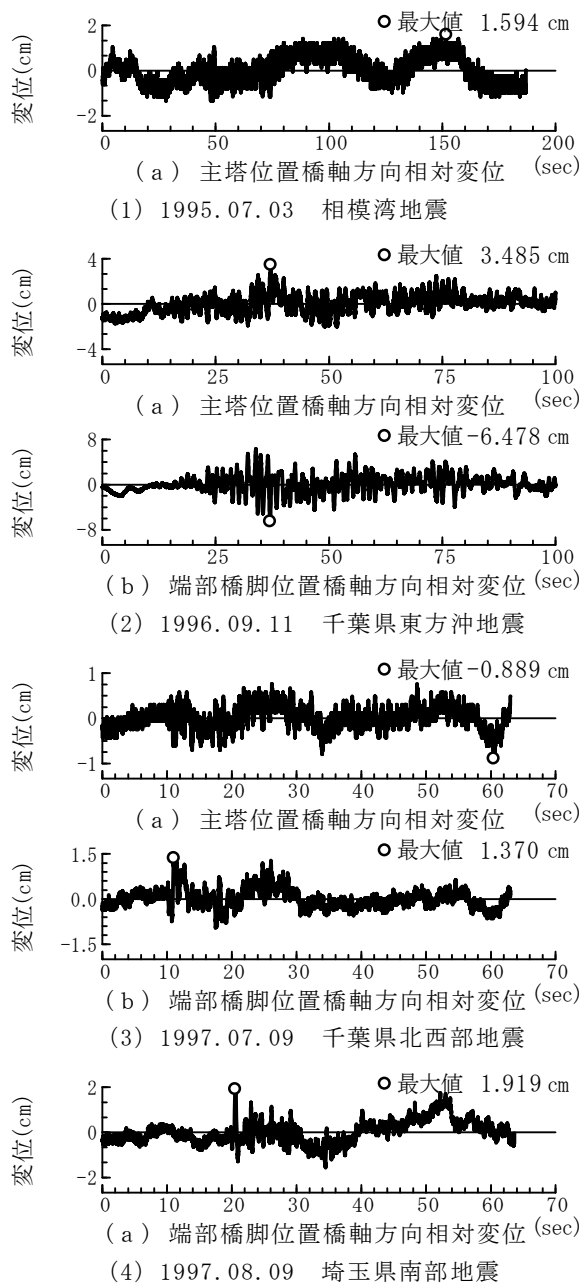


図-5 鶴見つばさ橋で観測された相対変位波形

目のピーク振幅を横軸にプロットし、プロットした点群の傾斜を求める必要がある¹⁸⁾が、ここでは、減衰定数の値が小さいので、固体摩擦に起因する減衰も粘性減衰と同様に、図-4の(2)に示す方法で減衰定数を推定した¹⁹⁾。

表-1は、鶴見つばさ橋で観測された相対変位と相対変位計と同じ位置に設置された上部構造の加速度計で観測された応答加速度から推定した橋軸方向Swayの固有振動モードのモード減衰定数である。表には、相対変位計で明瞭な記録を得ることができなかったが、長周期成分によって鶴見つばさ橋の揺れが励起された2004.10.23新潟県中越地震Mj6.8での上部構造の応答加速度から求めた減衰定数も示してあ

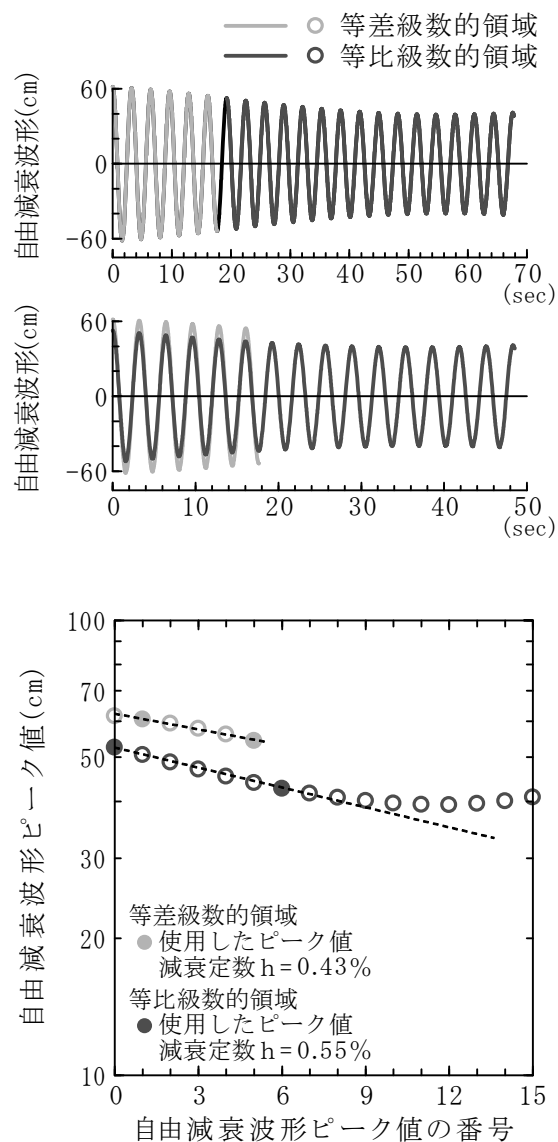


図-6 1996.9.11 千葉県東方沖地震 Mj6.4 で観測された主塔位置橋軸方向相対変位波形から求めた自由減衰振動波形と減衰定数

る。表より、固体摩擦に起因する減衰の減衰定数は小さい値もあるが概ね1.0%、粘性減衰に起因する減衰の減衰定数は、概ね0.5%から3.5%の範囲に分布していることがわかる。

図-6と図-7に示したRD法によって推定した自由減衰振動波形の前半部で固体摩擦による振幅の減衰の様子が現れ、自由減衰振動波形の中間から後半部で粘性減衰による振幅の減衰の様子が現れる理由は解らないが、鶴見つばさ橋の実際の支持形式を構成する、弾性拘束ケーブル、ベーン型オイルダンパー、鉛直摩擦支承、水平支承、ペンデル支承、ウィンド支承によって現れるであろうと考えられる固体摩擦や粘性減衰の特性が現れているので自由減衰振動波

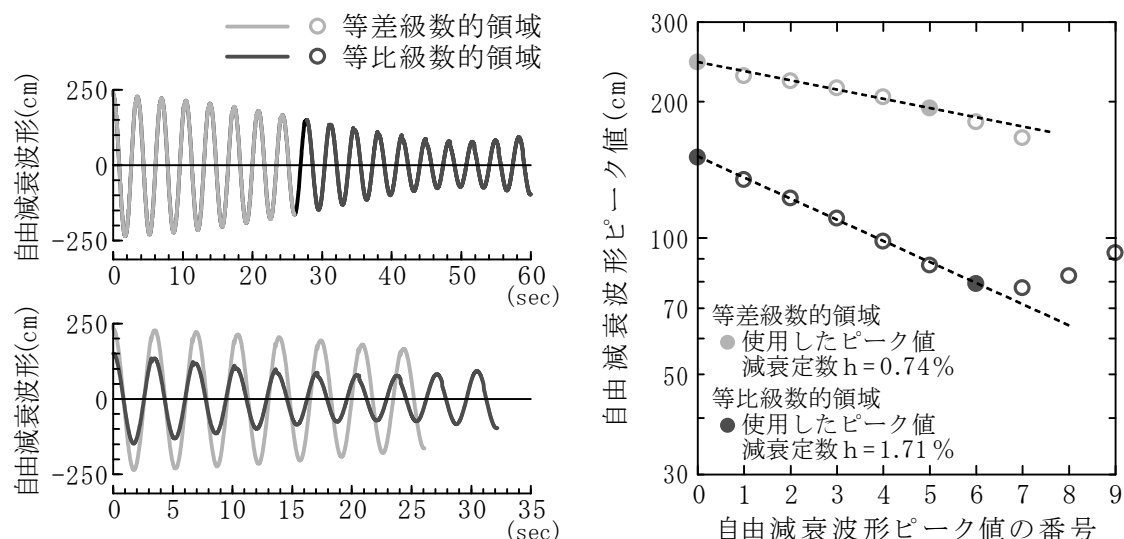


図-7 1996.9.11 千葉県東方沖地震 Mj6.4 で観測された端部橋脚位置橋軸方向相対変位波形から求めた自由減衰振動波形と減衰定数

表-1 鶴見つばさ橋の橋軸方向 Sway の固有振動モードによる減衰定数推定結果

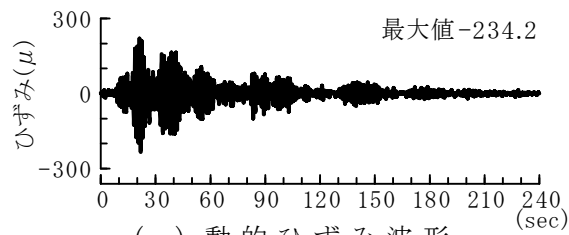
地 震	減衰性状	P3 主塔位置 (扇島側)				P4 端橋脚位置 (扇島側)			
		3.24 秒		3.51 秒		3.24 秒		3.51 秒	
		加速度	変位	加速度	変位	加速度	変位	加速度	変位
1995.07.03 相模湾 Mj5.2	等差級数	—	0.88	—	—	1.00	—	—	—
	等比級数	—	1.74	—	0.30	0.80	—	—	—
1996.09.11 千葉県東方 沖 Mj6.4	等差級数	1.00	0.43	—	—	0.99	—	—	0.74
	等比級数	1.88	0.55	—	—	2.46	—	—	1.71
1997.07.09 千葉県北西 部 Mj4.8	等差級数	—	—	—	—	—	0.80	—	—
	等比級数	—	—	—	0.34	3.18	0.61	0.82	3.52
1997.08.09 埼玉県南部 Mj4.9	等差級数	—	—	—	—	—	0.20	—	—
	等比級数	—	—	—	—	—	0.34	—	—
2004.10.23 新潟県中越 (本震) Mj6.8	等差級数	—	—	0.05	—	—	—	0.07	—
	等比級数	—	—	0.38	—	—	—	0.27	—

形に現れた性状は、実際の構造と整合していると考えられる。詳細な解明は、今後の地震応答の観測に期待したい。

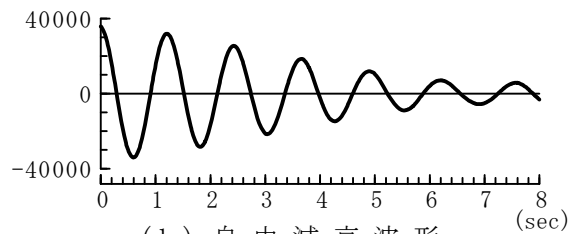
4. 荒川湾岸橋のトラス部材のひずみ波形から推定した減衰定数

荒川湾岸橋では、2011.3.11東北地方太平洋沖地震 Mw9.0 で生じた被害の応急復旧工事の効果を確認する目的で、複数のトラス部材（鉛直材、対傾構、下横構：斜材、下弦材）で一軸のひずみゲージを貼り付けてひずみの連続観測が行われている。目的は、活荷重走行時に各部材が適切に応力を負担しているかを確認することである⁴⁾。連続観測を行っている

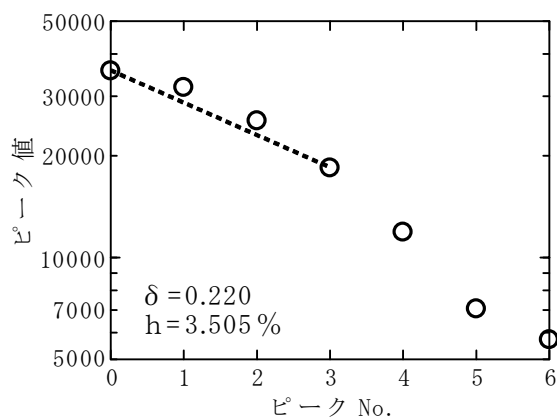
際に、2011.3.23 福島県浜通り Mj6.0 から 2011.4.11 福島県浜通り Mj7.1 の計 9 地震が観測されている。減衰定数の推定は、2011.4.11 福島県浜通りの地震 Mj7.1 で観測された応答ひずみ波形を対象に行った。ひずみ波形には、地震の影響だけでなく、活荷重の影響も含まれているので、荒川湾岸橋の基本固有周期よりも長い周期 5 秒よりも長周期側の周期成分を、移動平均法によって分離し、周期 5 秒よりも短周期側のひずみ波形を、地震の影響による応答ひずみ波形（動的ひずみ波形）とした。図には示さないが、応答ひずみ波形のフーリエスペクトルは、何れも、周期 1.26 秒付近に明瞭なピークが現れており、図-2 に示したトラス構面の橋軸直角方向に変形を生じさせた固有振動モードの固有周期とも近似している。



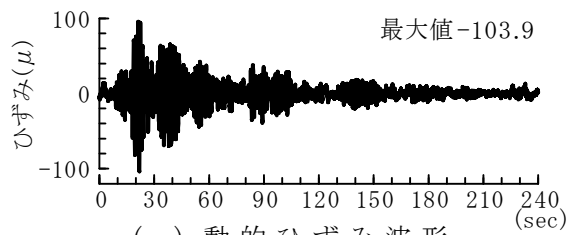
(a) 動的ひずみ波形



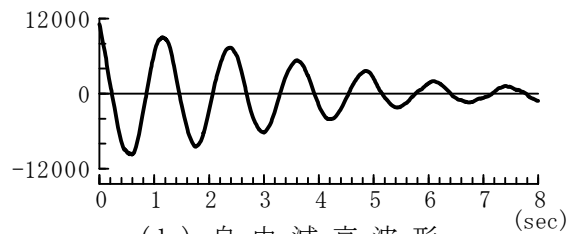
(b) 自由減衰波形
RD法(1000回)



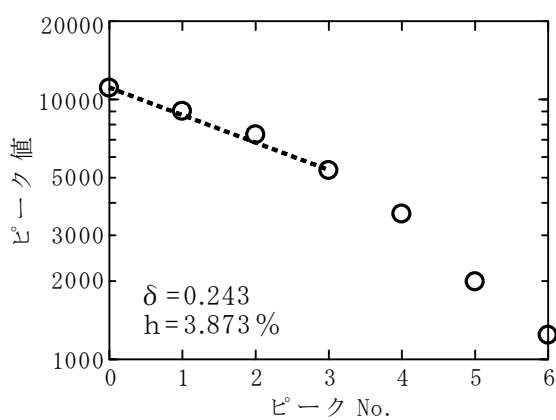
(c) 自由減衰波形のピーク値より求めた
対数減衰率 δ と減衰定数 h



(a) 動的ひずみ波形



(b) 自由減衰波形
RD法(1000回)



(c) 自由減衰波形のピーク値より求めた
対数減衰率 δ と減衰定数 h

(1)対傾構の自由減衰振動波形と減衰定数

(2)下横構の自由減衰振動波形と減衰定数

図-8 2011.4.11 福島県浜通りの地震 Mj7.1 の際に荒川湾岸橋のトラス部材で観測された応答ひずみ波形から求めた自由減衰振動波形と減衰定数

図-8は、対傾構と下横構の応答ひずみ波形から求めた自由減衰振動波形である。応答ひずみ波形からは、綺麗な自由減衰振動波形が得られることがわかる。他の部材で観測された応答ひずみ波形とそれから求めた自由減衰振動波形も、図-8と同じ傾向にある。

表-2は、鉛直材、対傾構、下横構、下弦材毎に減衰定数を整理したものである。表中、位置1と位置2と表記されているものは、同じ部材の同一断面位置で圧縮側と引張側の2箇所にはひずみゲージが貼られている場合である。上述したように、何れの部材も卓越周期は1.26秒であり、部材の減衰定数は約3%から5%の間に分布していることがわかる。一般にトラスを構成する部材は、軸力が卓越する部材である。表-2に示す減衰定数は、軸力が卓越する鋼部材の減衰定数としては、大きな値である。理由としては、

荒川湾岸橋の周辺地盤上に生じた地震動の強度が小さかったため、荒川湾岸橋のトラスを構成する各部材の接合部（主にボルト接合）の摩擦の影響が無視できない範囲にあったため、部材の見かけの減衰定数が大きく評価されたからと考えられる。

表-2に示した部材の減衰定数は、地震観測記録から推定したにもかかわらずばらつきが小さいことから、応答ひずみ波形は部材の減衰定数を評価する上で質の高い情報を提供してくれることがわかる。

5. 東扇島高架橋の相対変位波形による減衰

図-9は、2011.3.11東北地方太平洋沖地震Mw9.0で観測された東扇島高架橋の橋軸方向の相対変位波形から求めた自由減衰振動波形とモード減衰定数の推定結果である。図の(b)に示すように、東扇島高架橋

表-2 荒川湾岸橋の応答ひずみ波形から推定した部材の減衰定数

部材	卓越周期	位置 1	位置 2	平均
鉛直材	1.26	3.88	3.88	4.31
	1.26	5.07	4.40	
対傾構	1.26	3.51	3.43	3.47
下横構	1.26	3.87		3.77
	1.26	4.57		
	1.26	4.00		
	1.26	4.02		
	1.26	2.87		
	1.26	3.25		
	1.26	3.69		
	1.26	3.85		
下弦材	1.26	5.30	5.14	4.86
	1.26	4.13		

の自由減衰振動波形から得られる減衰定数は、どの振幅を用いて評価するかによって、得られる減衰定数の値が大きく異なることがわかる。例えば、1番目から20番目の振幅を用いた場合の減衰定数は約0.06%，36番目から56番目の振幅を用いた場合の減

衰定数は約0.27%，70番目から100番目の振幅を用いた場合の減衰定数は約0.48%である。東扇島高架橋で採用されている鉛プラグ入り積層ゴム系支承は、支承に生じるせん断ひずみの大きさに応じて、支承の水平方向剛性や等価減衰定数が増加するため、RD法によって求められる自由減衰振動波形にも、その影響が現れていると考えられる。紙数の関係で示していないが、橋軸直角方向の相対変位波形の周期0.46秒付近の周期成分と0.69秒付近の周期成分に着目して求めた自由減衰振動波形にも、図-9と同様な傾向が見られる。

表-3は、橋軸方向と橋軸直角方向の相対変位波形からRD法によって求めた自由減衰振動波形の減衰定数の評価結果である。鉛プラグ入り積層ゴム支承を用いた免震支承に支持された橋の減衰定数としては小さいが、橋軸方向の相対変位が約7.8mm（せん断ひずみ約4.3%），橋軸直角方向の相対変位が約6.5mm（せん断ひずみ約3.7%）と免震支承に生じた変形が非常に小さいことが原因だと考えられる。橋軸方向よりも橋軸直角方向の方が、減衰定数が高いのは、橋軸直角方向に免震支承が変形し上咎とサイドブロックが接触した時は、その支承条件は固定となり、軟弱地盤に深く根入れされた基礎構造―地盤系に変形が生じたため逸散減衰効果等が橋梁の減衰に寄与したと考えられる。

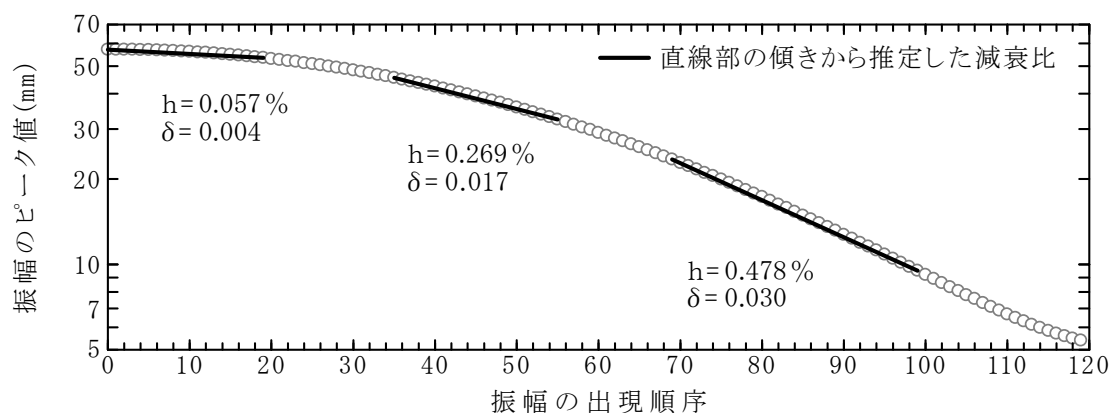
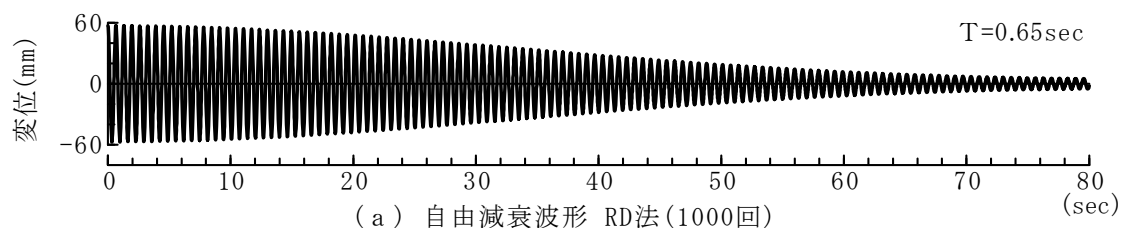


図-9 2011.3.11 東北地方太平洋沖地震 Mw9.0 で観測された東扇島高架橋の橋軸方向相対変位波形から求めた自由減衰振動波形と減衰定数

表-3 2011.3.11 東北地方太平洋沖地震 Mw9.0 で観測された相対変位波形から推定した東扇島高架橋の減衰定数

着目方向	着目した周期(sec)	領域 1		領域 2		領域 3	
		減衰定数(%)	評価した振幅数	減衰定数(%)	評価した振幅数	減衰定数(%)	評価した振幅数
橋軸方向	0.65	0.06	20	0.27	20	0.48	30
橋軸直角方向	0.46	0.08	20	0.32	17	0.68	15
	0.69	0.04	20	0.24	20	0.56	25

6. まとめ

首都高速道路で行われた地震観測の中から相対変位計とひずみ計で観測された応答変位波形と応答ひずみ波形を対象として、RD法によって自由減衰振動波形を求め、その減衰定数を推定した。

鶴見つばさ橋と東扇島高架橋の相対変位波形からRD法によって求めた自由減衰振動波形には、地震応答中の減衰特性の変化が現れていた。この点の解明は、今後の地震観測に期待したい。

荒川湾岸橋のひずみ波形からRD法によって求めた自由減衰振動波形からは、ばらつきが少ない減衰定数を得ることができた。

参考文献

- 1) 矢部正明, 塚本英子: 構造物の地震応答の観測に関する調査, 第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.297-304, 2017.
- 2) 矢部正明, 塚本英子: 構造物の耐震設計に用いる減衰に関する調査, 第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.415-422, 2017.
- 3) 山本泰幹, 藤野陽三, 矢部正明: 地震観測された長大吊橋構造系橋梁の動的特性と動的解析モデルによる再現性, 土木学会論文集A, Vol.65, No.3, pp.738-757, 2009.
- 4) 小河正次, 七條哲彰, 猪瀬研一: 東北地方太平洋沖地震による荒川湾岸橋の損傷と応急復旧, 第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.451-456, 2011.
- 5) 溝口孝夫, 大西孝典, 矢部正明, 鍋島信幸: 東北地方太平洋沖地震の強震記録による免震支承を有するPC箱桁橋の地震応答解析, 橋梁と基礎, Vol.47, No.10, pp.30-36, 2013.
- 6) J.K.Vandiver, A.B.Dunwoody, R.B.Campbell, M.F.Cook: A Mathematical Basis for the Random Decrement Vibration Signature Analysis Technique, Journal of Mechanical Design, Vol.104, pp.307-313, 1982.
- 7) 矢部正明, 七井英子, 若林登, 高野晴夫: 地震観測記録による横浜ベイブリッジのモード減衰定数の推定, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第1部, pp.334-335, 1993.
- 8) 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫: RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第454号, pp.29-38, 1993.
- 9) 荒川利治, 菅野裕晃: 常時微動による鉄筋コンクリート造高層煙突の減衰特性, 日本建築学会技術報告集, 第7号, pp.27-32, 1999.
- 10) Yukio Tamura, Lingmi Zhang, Akihiro Yoshida, Shinji Nakata and Takayoshi Itoh: Ambient Vibration Tests and Modal Identification of Structures by FDD and 2DOF-RD Technique, Proceedings of Structural Engineers World Congress, T1-1-a-1, 2002.
- 11) 藤村真弓, 前田潤滋, 森本康幸: いくつかの同定手法を組み合わせた送電鉄塔の空力減衰特性の分析, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第645号, pp.1949-1955, 2009.
- 12) 湯川正貴, 新宮清志, 平塚聖敏: シェル・空間構造物の減衰評価に関する研究-HPシェル及び円筒形シェル屋根の振動実験-, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第646号, pp.2271-2280, 2009.
- 13) 湯川正貴, 新宮清志, 平塚聖敏: 同一構造に対し異なる耐震補強を施した重層構造物の減衰特性, 日本建築学会技術報告集, 第16巻, 第32号, pp.119-124, 2010.
- 14) 岡本佳久, 赤澤隆士, 山田真澄, 大西良広, 林康裕: 連続地震観測記録に基づく超高層建物の振動特性評価, 日本建築学会技術報告集, 第19巻, 第41号, pp.59-64, 2013.
- 15) 豊田亮博, 鷹野澄: 弱い地震動を用いた建物の減衰定数の推定: 東京大学の建物を対象として, 建築研究所彙報, Vol.88, pp.1-36, 2013.
- 16) 阿部雅人, 藤野陽三, 長山智則, 池田憲二: 常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用例, 土木学会論文集, No.689, I-57, pp.261-274, 2001.
- 17) 松平精著: 基礎振動学(復刻版), 現代工学社, pp.30-48, 1973.
- 18) 森口繁一著: 初等力学, 培風館, pp.244-253, 1991.
- 19) 小堀為雄著: 応用土木振動学, 森北出版, pp.20-57, 1974.
- 20) 山口宏樹, 高野晴夫, 小笠原政文, 下里哲弘, 加藤真志, 加藤久人: 斜張橋振動減衰のエネルギー的評価法と鶴見つばさ橋への適用, 土木学会論文集, No.543, I-36, pp.217-227, 1996.