

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

豊田克博^{1)*}・鷹野 澄²⁾

¹⁾ 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻・²⁾ 東京大学情報学環 / 地震研究所

Estimating the Damping Ratio of Buildings Using Weak Seismic Ground Motion : A Case Study on Buildings of the University of Tokyo

Takahiro Toyoda^{1)*} and Kiyoshi Takano²⁾

¹⁾ Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo, ²⁾ Interfaculty Initiative in Information Studies/Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

Abstract

Few previous studies have estimated the damping ratio of buildings using seismic ground motion, due to the difficulty of making estimations. The Random Decrement (RD) technique is applied to vibration observation data of a building excited by a weak seismic ground motion. Estimates are made of the damping ratio and natural frequency for 7 buildings of the University of Tokyo. Data are obtained with IT strong-motion seismographs installed inside buildings of the University. Then, a Single Degree Of Freedom (SDOF) system analysis is carried out. The simplest building for which the primary mode dominated is selected, and parameters estimated using the RD technique are sent to the SDOF system. The results obtained with the RD technique and the SDOF system analysis are compared, and the accuracy of the estimated data are verified. Finally, problems related to establishing the method for estimating the damping ratio using weak seismic ground motion are discussed.

Keywords: damping ratio, natural frequency, Random Decrement technique, weak seismic ground motion, SDOF system, IT strong-motion seismograph.

1. はじめに

建物の減衰定数は、固有振動数と並び、建物の振動特性を決定する重要なパラメータの一つである。しかし、建物の実測データを使った既往の研究では、固有振動数については詳細に論じられていても、減衰定数については詳細に論じられることはあまりない。また、減衰定数を求めるときの実測データも、常時微動観測データを使うことが多く、地震時の観測データを利用している例は数少ない。その背景としては、地震時の観測データを利用して減衰定数を精密に算定することが、固有振動数に比べて困難であるということが考えられる。

我々は、学内の複数の建物内に IT 強震計を設置して、24 時間 365 日の連続観測を行っており、日頃の震度 1 程

度の弱い地震動から、まれに発生する強い地震動までの、様々な地震動とそれによる建物応答観測データを蓄積している（鷹野, 2009, 鷹野・伊藤, 2010, 鷹野・伊藤, 2011）。しかしこれまで、地震時の観測データを利用した建物の減衰定数の推定は未着手であったことから、今回、以下の目標を設定して研究を行った（鷹野・豊田, 2013）。

- (1) 弱い地震動を用いて建物の減衰定数を算出する手法を確立する。
- (2) 具体的に学内の複数の建物について、IT 強震計により計測された地震動から減衰定数を推定する。

本論文では、以上の研究結果を報告する。まず、弱い

* e-mail: t_toyoda@buildcon.arch.t.u.tokyo.ac.jp (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 11 号館 8 階)

Table 1. Classification of the evaluation methods of damping ratio based on actual survey.

Types of vibration	Methods of data acquisition	Types of acquired data	Methods of data analysis	Principal methods of evaluation of damping ratio	
Steady-state vibration	Steady-state excitation by vibration generator	Amplitude and Phase (Data of frequency)	Resonance curve and Phase curve (Data of frequency)	Frequency response data	Curve fitting techniques
Random vibration	Microtremor measurement	Random wave (Time history wave)	Conversion to the frequency response data -Fourier spectrum -Power spectral density -Transfer function		Half power method 1/√2 method
	Wind-induced response measurement Seismic response measurement		Conversion to the free vibration data -Autocorrelation function method -Random Decrement technique	Phase gradient method	
Free vibration	Sudden stop after the excitation by shaking machines	Free vibration wave (Time history wave)	Filtered free vibration wave	Free vibration wave	Techniques by amplitude damping ratio Techniques by Minimum square method
	Man-power excitation Towline technique Pendulum technique				
Time history wave of random or free vibration			Methods of system identification : Extended Kalman's filter, ARX, ARMAX, etc.		

地震動による建物応答観測データを用いた減衰定数の推定手法について検討し、その手法を適用して学内の建物の減衰定数を推定する。次いで、1次モードが卓越している単純な建物を例として、本手法で推定された固有振動数と減衰定数を用いて1自由度系の弾性応答解析をシミュレーションとして行い、実際の観測データと比較することで本手法の妥当性を確認するとともに、最終的な目標である、弱い地震動を用いて減衰定数を推定する手法の確立に向けて、残された課題について議論する。

2. 研究の概要

建物振動観測データから減衰定数を算出する手法としては、利用するデータとして、常時微動観測、風応答観測、地震応答観測などの自然現象を用いたものと、起振機による加振、人力加振などの人工的な加振を用いたものがあり、その評価方法としては、周波数応答データを用いて評価する方法と、自由振動波形を用いて評価する方法などがある。減衰定数の算出方法の一覧を、文献(日本建築学会, 2000)より作成してTable 1に示す。

ランダム振動である地震動を用いる場合の評価手法については、Table 1に示されているように、周波数応答データ・自由振動波形のどちらも用いられているが、地

震動が強い場合は、建物応答の非線形性や非定常性の強さ、地盤との相互作用が懸念されるなどの問題もあり、そのどちらも研究の数は少ない。弱い地震動を用いた研究はさらに少ないが、弱い地震動は強い地震動より観測される数が多く、建物応答も線形性が期待できるなど有利な点があると考えられる。

そこで本研究では、弱い地震動を用いて建物の減衰定数を算出する手法として、Table 1の自由振動波形を用いた評価手法の代表的なものであるRD法を用いて弱い地震動から自由振動波形を作成し、減衰定数を推定することを試みた。そして、得られた推定値を利用して1自由度系の弾性応答解析をシミュレーションとして行い、もとの観測地震動と比較することで、精度の検証を行った。

3. RD法について

3.1 原理

RD (Random Decrement) 法は、常時微動観測データを利用する場合に広く利用されている減衰定数の評価法である(田村ほか, 1993, 日本建築学会, 2000)。RD法では最初のステップとして、Fig. 1に示すように、建物が振動するときの応答波形 $X(t)$ から、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て、RD 波形を作る。この重ね合わせを十分行うことにより、RD 波形は減衰振動波形となるので、次のステップとして、Fig. 2 に示すように RD 波形に減衰曲線をフィットさせて減衰定数を求める、という手法である。

ここで、建物上階の応答波形 $X(t)$ を、減衰振動解 $D(t)$ と強制振動解 $R(t)$ の和で示されると仮定する。

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

$X(t)$ 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 RD 波形は、

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

となる。ここで、 $R(t)$ がランダム波形であれば、それを十分に重ね合わせるることにより、 $\Sigma R(t)$ は相殺されて振幅が小さくなり、一方 $\Sigma D(t)$ は相乗して大きくなることから、RD 波形は減衰振動波形となる。建物上階の応答波形は、固有振動数附近の狭帯域のランダム過程となることから、観測された波形に固有振動数付近のバンドパスフィルタを施して重ね合わせて RD 波形を作ること

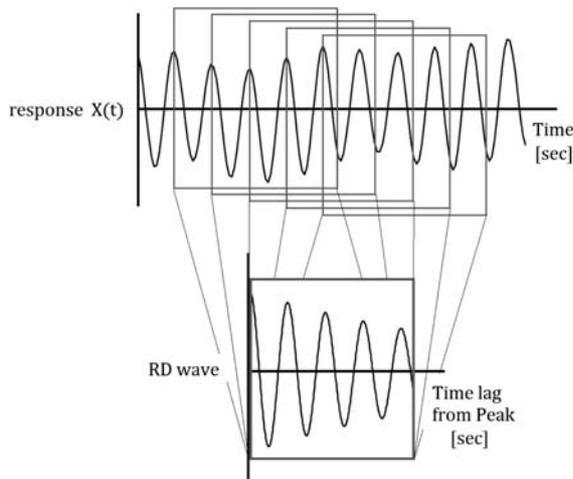


Fig. 1. Conceptual diagram of Random Decrement technique.

により、建物の減衰振動波形を得ることが可能となる。

ところで、減衰振動波形 $x(t)$ は式 (3) のように表せる。

$$x(t) = e^{-h\omega_0 t} \{A \sin(\omega_d t - \Psi)\} \quad (3)$$

$$\omega_d = \sqrt{1 - h^2} \cdot \omega_0$$

そこで、重ね合わせて得られた RD 波形について、上式のパラメータ（振幅 A ・振動数 ω_0 ・減衰定数 h ・位相差 Ψ ）を最小二乗法で算出する事で近似曲線が得られるとともに、減衰定数を得る事が可能となる。これが RD 法の原理である。なお、波形を合わせるのではなく、減衰曲線（ $= e^{-h\omega_0 t}$ ）のみを近似して減衰定数を算出するという方法もしばしば用いられる。

ところで、RD 法が良く用いられている常時微動観測データの場合は、建物上部の応答波形は「定常的」であるが、地震動の場合は定常的とは言い難い。この点に関しては、過去の研究で、RD 波形を求める際には、応答波形の「定常性の要求はそれほど厳密ではない」とされている（田村ほか、1993）。

3.2 算出結果に影響を与える因子

RD 法による減衰定数の算出結果に影響を与える因子は以下の3つが考えられる。

① バンドパスフィルタの幅

既往研究（小林・鍵山ほか、2007）などにおいて、バンドパスフィルタの幅が解析結果に影響を与える事が報告されている。幅を広げると他の振動成分が RD 波形に混入し、減衰定数は過大評価になる。一方、狭めすぎると過小評価になる。

② 近似する波数

常時微動測定を用いる場合、波数を多く（10 波長など）見ても RD 波形の乱れは小さく、近似する波数が結果に与える影響は小さい。一方、定常性が弱くデータの短い地震動を用いる場合、5 波長前後から RD 波形が乱れる事が多く、近似する波数が多すぎると過大評価になる。

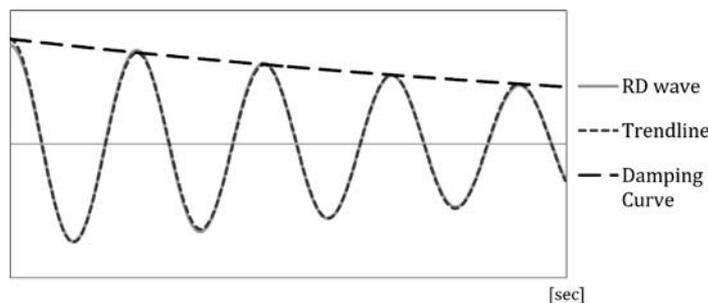


Fig. 2. Sample of RD Wave, Trendline, and Damping Curve.

一方、少なすぎると過小評価になる。

③ 波形の抽出方法

重ね合わせるピークを元の波形から抽出する方法は多く存在する(日本建築学会, 2000)。特定の振幅の極大値のみ抽出して重ね合わせるなどにより、非線形システムへの適用や振幅依存性などの議論が可能となる。

3.3 弱い地震動と RD 法について

本研究において、弱い地震動に対して RD 法を用いるにあたっての仮定などを整理する。

(1) 建物振動の線形性

今回は弱い地震動を用いている為、建物上階の最大応答は 20 gal 程度であり、建物として鉄筋コンクリート造(RC 造)、鉄骨鉄筋コンクリート造(SRC 造)や鉄骨造(S 造)を対象とするため、線形性が成立し、減衰定数や固有振動数に振幅依存が無いものと仮定した。

(2) 定常性

常時微動に比べて地震動では定常性に難がある事は確かであるが、本研究では、過去の研究(田村ほか, 1993)の「定常性の要求はそれほど厳密ではない」ことを頼りに、RD 波形を求めることにした。

(3) データの短さ

過去の研究(田村ほか, 1993)によると、常時微動測定データを用いて波形の全ての極大値を重ね合わせる場合、「誤差率 σ^* を 20% 以内に納めるのに重ね合わせ個数 N を 1000 個以上必要と」するとしている。

地震動データ全体の長さは 200~300 秒程度であり、RD 法を地震動に対して用いる場合、建物の固有振動数が 1 Hz であると仮定すると、重ね合わせる波の個数はおよそ 200~300 個程度となる。ただし、RD 波形の振幅の中心的な構成要素は主要動部分の波形であり、一つの地震動ではデータが短く、地震波形全体を利用して、重ね合わせる波の個数は十分多くない。そこで本研究では、重ね合わせによる強制振動解部分の相殺を十分にするために、地震波形全体を利用して RD 波形を算出するとともに、10 以上の地震データを用いて算出を行い、それらの平均値を求める事で、地震動の個性の影響を排除しつつ、バラツキを含めた推定を行った。

4. データと算出方法

4.1 調査建物と利用した地震計の設置場所の概要

Fig. 3 から Fig. 10 に調査対象とした東京大学学内の建物の概要を示す。

(1) 本郷・本部棟 (ADM)

この建物は、12 階建ての S 造建築で、1 階から 12 階までが、Fig. 3 に示すように 4 隅の大きな柱で囲まれた

建物である。この建物の最上階に地震計が 2 箇所設置してあるが、計測結果に有意な差が見られなかったため、本研究では東側の地震計の観測データを利用した。

(2) 本郷・第 2 本部棟 (ADM2)

この建物は、7 階建ての S 造建築で、Fig. 4 に示すように、本部棟と同様に、4 隅の大きな柱で支えられた建物である。この建物の最上階には、地震計が 3 箇所に設置してあるが、本研究では中央部のものを利用した。

(3) 本郷・情報学環 (III)

この建物は、10 階建ての SRC 造建築である。この建物では、10 階中央と西側に 2 箇所と 11 階東側(ペントハウス)に 1 箇所の地震計が設置されている。ここでは、Fig. 5 に示す 10 階中央と 11 階東側の 2 つの地震計を利用した。11 階東側の地震計からは、建物中央部では観測されないねじれ振動数とその減衰定数も推定した。

(4) 柏・環境学研究棟 (FSES)

この建物は、7 階建ての RC 造建築である。この建物は Fig. 6 に示すように、S 字型の平面構造をしており、地震計はそのほぼ中央に設置されている。本研究では、最上階に設置された地震計の観測データを利用した。

(5) 柏・宇宙線研究所 (ICRR)

この建物は、6 階建ての S 造建築である。この建物は Fig. 7 に示すように、南側と北側の 2 つのビルが、最上階で結合されている。地震計は、北側のビルのほぼ中央に設置されており、本研究ではその最上階に設置された地震計の観測データを利用した。

(6) 駒場・15 号館 (KMB15)

この建物は、7 階建ての RC 造建築である。Fig. 8 に示すように、地震計は、ビルの東側のパイプスペース内に設置されており、本研究では、その最上階に設置された地震計の観測データを利用した。

(7) 駒場・16 号館 (KMB16)

この建物は、8 階建ての RC 造建築である。Fig. 8 と Fig. 9 に示すように、この建物は 15 号館と、低層部分で接続されている (Fig. 10) が、構造的には一体ではない。地震計は、ビルの中央付近の、低層接合部分に近いパイプスペース内と、ビルの東側のパイプスペース内に設置されており、本研究では、最上階の中央付近と東側の 2 箇所とも採用した。東側の地震計からは、建物中央部では観測されないねじれ振動数とその減衰定数も推定した。

最後に、各建物の構造種別・建物高さをまとめて Table 2 に示す。

4.2 利用した地震

Table 3 に本研究で利用した地震の一覧を示す。関東

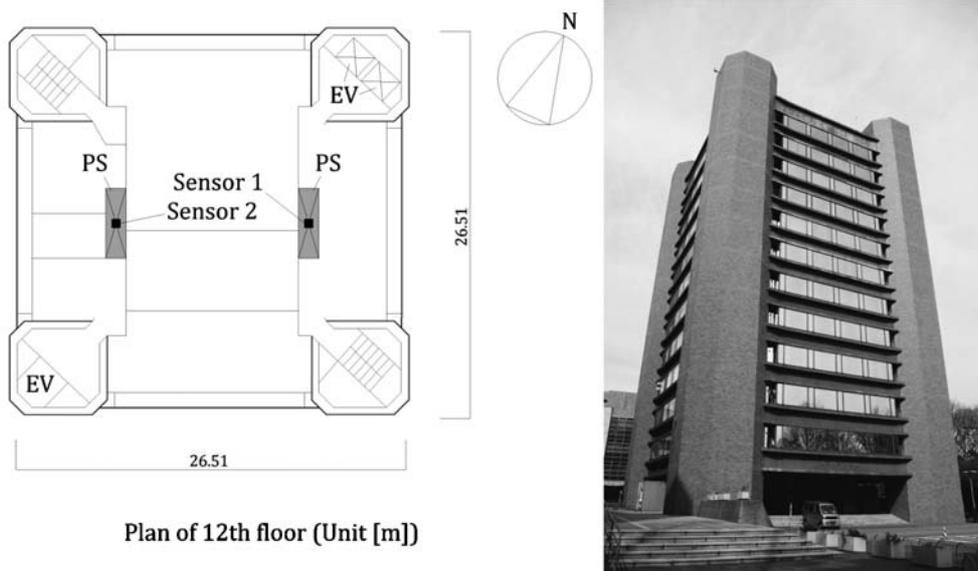


Fig. 3. Plan and exterior of the Administration Building (“ADM”) in Hongo. Since there was no significant difference between the results from two sensors, we used Sensor 1 in this study.

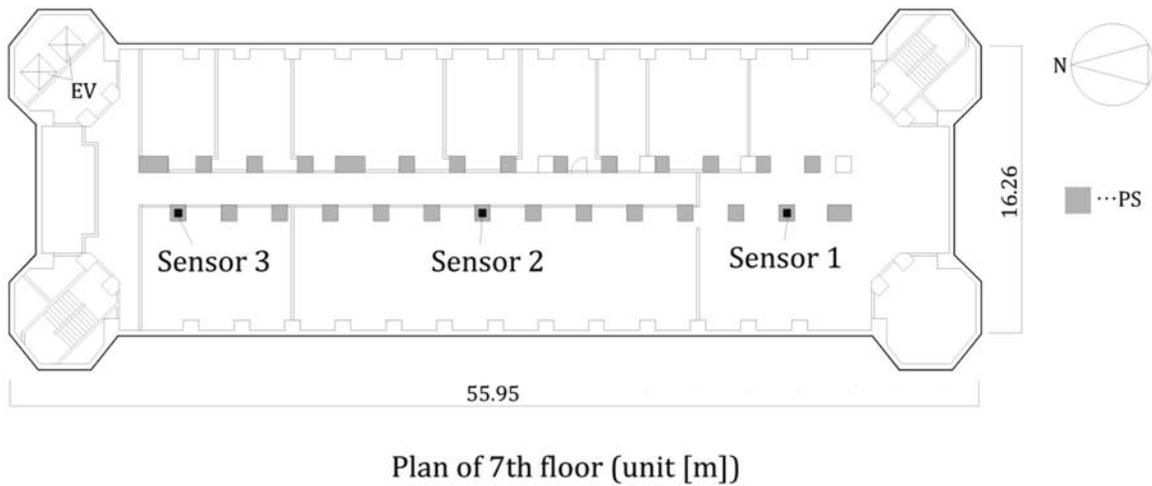
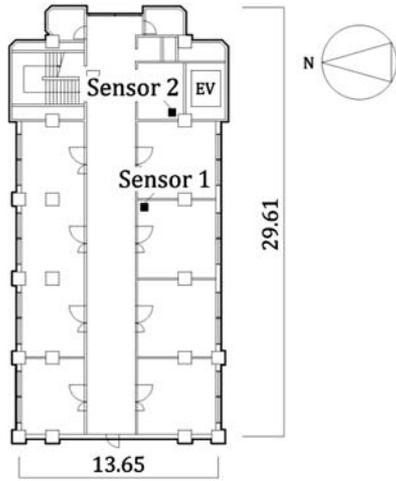


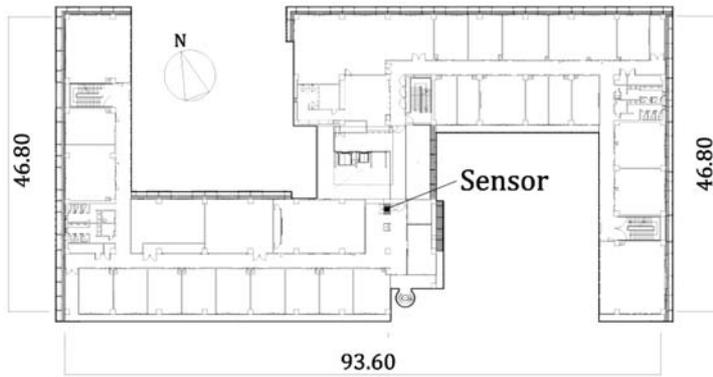
Fig. 4. Plan and exterior of the 2nd Administration Building (“ADM2”) in Hongo. Since there was no significant difference between the results from three sensors, we used Sensor 1 in this study.



Plan of 10th floor (unit [m])



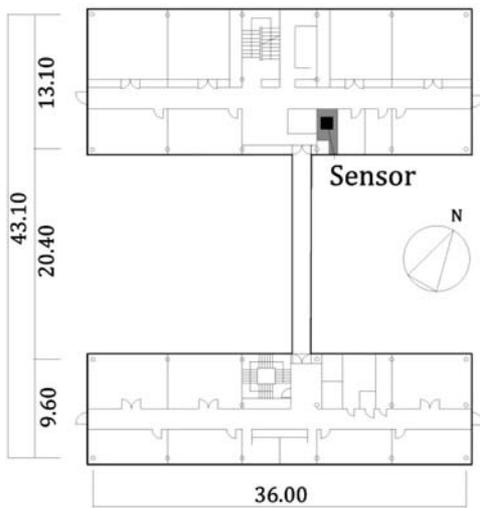
Fig. 5. Plan and exterior of the Building of Interfaculty Initiative in Information Studies (“III”) in Hongo. The highest building in right picture is the subject of analysis. We used both sensors in this study. “Sensor 2” is actually on the 11st floor.



Plan of 7th floor (Unit [m])



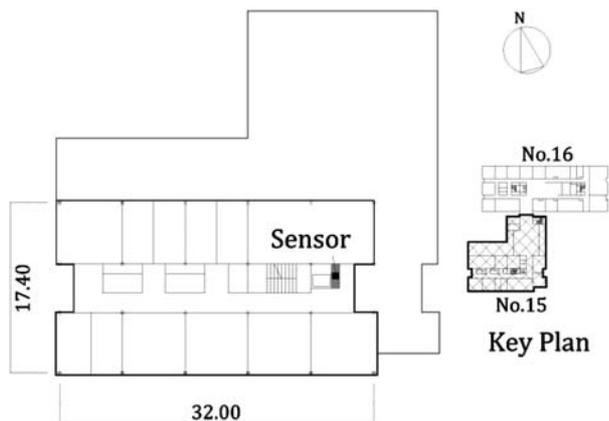
Fig. 6. Plan and Exterior of the Building of Researching Environmental Studies (“FSES”) in Kashiwa.



Plan of 6th floor (unit [m])

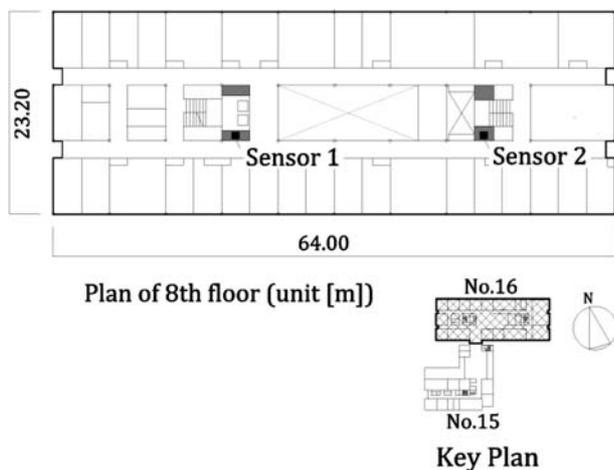


Fig. 7. Plan and Exterior of the Building of Institute for Cosmic Ray Research (“ICRR”) in Kashiwa.



Plan of 7th floor (unit [m])

Fig. 8. Plan and Exterior of the Building No. 15 ("KMB15") in Komaba.



Plan of 8th floor (unit [m])

Fig. 9. Plan and Exterior of the Building No. 16 ("KMB16") in Komaba. We used both sensors in this study.



Fig. 10. Joint of Building No. 15 and No. 16.

Table 2. Structural type and building height of 7 buildings.

	ADM	ADM2	III	FSES	ICRR	KMB15	KMB16
Structural Type	S	S	SRC	RC	S	RC	RC
Building Height(H)[m]	42.81	25.87	36.07	29.60	29.60	25.65	29.90

Table 3. List of the earthquakes.

Number	Date of occurrence	Magnitude	Depth of the hypocenter [km]	Place of the hypocenter	Seismic intensity			
					Max	Hongo	Kashiwa	Komaba
q01	2011/12/03 05:55	M5.2	22	Northeastern Chiba (35.4N 140.3E)	4	2	2	1
q02	2012/01/28 07:43	M5.4	18	Eastern Yamanashi (35.5N 139.0E)	5-	3	2	2
q03	2012/01/29 16:46	M4.7	21	Eastern Yamanashi (35.5N 139.0E)	4	1	1	1
q04	2012/02/18 13:56	M3.8	2	Tokyo bay (35.6N 140.1E)	3	1	1	1
q05	2012/02/18 14:13	M4.2	2	Tokyo bay (35.6N 140.1E)	4	1	1	1
q06	2012/04/29 19:28	M5.8	48	Northeastern Chiba (35.7N 140.6E)	5-	2	2	2
q07	2012/06/01 17:48	M5.1	44	Northwestern Chiba (36.0N 139.9E)	4	3	3	3
q08	2012/11/24 17:59	M4.8	72	Tokyo bay (35.6N 140.0E)	4	3	3	3
q09	2013/01/22 04:46	M5.1	16	Eastward offshore of Chiba (35.9N 140.9E)	4	2	2	1
q10	2013/02/01 01:04	M4.3	45	Southern Ibaraki (36.0N 139.9E)	3	1	2	1
q11	2013/02/19 21:27	M5.6	37	Eastward offshore of Chiba (35.3N 141.2E)	3	1	1	1
q12	2013/04/04 13:42	M5.1	12	Eastward offshore of Chiba (35.8N 140.9E)	4	2	2	1
q13	2013/04/29 22:01	M5.6	34	Eastward offshore of Chiba (35.8N 141.1E)	3	1	2	1

近辺を震源とする、震源の深さ 50 km 以内、M4~M5 程度の地震の計 13 個を選択した。調査建物のある、本郷、柏、駒場の各キャンパスにおける地震動の大きさは、多くは気象庁震度で震度 1 から 2 であり、一部に震度 3 もあるが、総じて弱い地震動と言えるものである。なお、既往の研究で、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震の前後で、建物の特性が変化したことが知られているので、本研究では、2011 年 3 月 11 日より後に発生した地震を利用している。

4.3 算出方法

本研究では以下のようにして、各建物の固有振動数と減衰定数を算出した。

(1) 地震動の場合は、最上階と 1 階、地階もしくは地盤の伝達関数のピークから固有振動数を求めるのが一般的である。しかし、弱い地震動に対する地震応答波形において、最上階のフーリエスペクトルのピークが明らかな場合は、そのピークを固有振動数とみなすことができる。すなわち RD 法において、フーリエスペクトルのピークを含むバンドパスフィルタを施すことでも大きな差異はないと考えられる。そこで本論文では、最上階のセンサーから得られた加速度波形のフーリエスペクトルを確認し、問題がないと思われる場合はそのピークを含む帯にバンドパスフィルタを施した。なお、ピーク位置が明瞭でない宇宙線研究所 (ICRR) の EW 成分については、最上階と地階の平滑化したフーリエスペクトルのスペクトル比から伝達関数を算出し (Fig. A1.2 の ICRR

(transfer function) 参照)、バンドパスの帯を求めた。バンドパスフィルタは、0.5 Hz 幅の Butterworth フィルタを施した。0.5 Hz という幅は、最も単純なフーリエスペクトルを示す建物において、1 次振動数のスペクトルのピークの裾野が凡そ全て入る範囲である事より決定した。また既往の研究 (建築研究所, 2010) を参考に、本研究では、Butterworth フィルタを採用した。

各建物の最上階の地震計で観測されたフーリエスペクトルを Appendix 1 に示す。Fig. A1.1 が ND 成分のフーリエスペクトルで、Fig. A1.2 が EW 成分のフーリエスペクトルである。なおここでは代表として、一つの地震動 (Table 3 の地震番号 q01) のときのスペクトルを掲載している。

(2) 各地震について、各建物の最上階の加速度波形データに (1) でフィルタを施して得られた建物の応答加速度波形より、全ての極大値を抽出し重ね合わせる事で RD 波形を作成した。作成したすべての RD 波形を Appendix 2 に示す。Fig. A2.1 が本部棟の NS 方向で Fig. A2.2 が EW 方向である。以下同様に各建物の NS 方向と EW 方向の RD 波形を Fig. A2.3 から Fig. A2.18 に示した。なお、重ね合わせる時に、極大値のみでなく、極小値も抽出して波形を反転して重ねることで、重ね合わせ回数を増やす事ができるが、簡単な予備調査の結果、結果に違いが見られなかったことから、本研究では簡単のために極大値のみを利用して重ね合わせている。

(3) 各地震について、(2) で得られた RD 波形より、最

小二乗法により近似曲線を算出し、固有振動数と減衰定数を同定した。3.2にて述べたように、常時微動の場合に比べて、地震動の場合は近似する波数を多くとれないことから、近似する波数は最低でも3波長とし、RD波形が乱れない所までを近似した。

(4) 全13地震について、(3)で得られた減衰定数は、バラツキが大きいため、まず全部の平均値と標準偏差 σ を算出し、その上で、 1σ の範囲を出る物は除外して、 1σ の範囲内に残ったものから平均値を算出して減衰定数の推定結果とした。

(5) 一方、固有振動数は地震ごとのバラツキが小さかったため、全13地震による結果の平均値を推定結果とした。

5. 推定結果

固有振動数 (f) ならびに減衰定数 (h) の推定結果を、各建物について Table 4~7 に示す。表の quake number は、Table 3 に示した各地震の識別番号で、Scale は、その地震の時に建物のあるキャンパス周辺の気象庁観測点で観測された気象庁震度である。その右側には、それぞれの地震の時に観測された建物応答データから、4.3の方法で求めた、各建物の南北方向 (NS) と東西方法 (EW) の固有振動数 (f) と減衰定数 (h) を示してある。ここで、グレーに塗られた部分は 1σ の範囲の外で除外されたデータである。各表の下側は、全13個の地震で得られた固有振動数と減衰定数の平均 (Average) と、最終的な推定結果 (Estimation) と、データのバラツキ

Table 4. Estimated results of natural frequency and damping ratio of the Administration Building ("ADM") and the 2nd Administration Building ("ADM2").

Hongo		ADM				ADM2			
Scale	quake number	NS		EW		NS		EW	
		f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]
2	q01	1.04	2.07	1.06	2.03	2.65	3.10	2.22	3.03
3	q02	1.05	2.09	1.05	2.98	2.59	2.26	2.30	1.39
1	q03	1.08	2.89	1.08	2.57	2.58	3.23	2.36	1.99
1	q04	1.10	1.53	1.10	0.88	2.58	3.05	2.41	2.18
1	q05	1.09	2.23	1.09	1.30	2.57	2.80	2.40	2.14
2	q06	1.07	2.40	1.05	2.08	2.54	2.77	2.44	2.45
3	q07	1.07	2.16	1.06	1.44	2.54	2.36	2.32	2.74
3	q08	1.07	3.53	1.05	2.12	2.58	1.53	2.32	3.97
2	q09	1.06	2.89	1.06	1.02	2.55	3.47	2.30	3.13
1	q10	1.10	2.06	1.06	1.74	2.64	3.02	2.36	3.11
1	q11	1.05	2.21	1.05	1.66	2.57	3.99	2.36	3.04
2	q12	1.09	1.30	1.09	1.41	2.62	3.39	2.41	3.82
1	q13	1.08	1.85	1.08	1.66	2.56	2.69	2.40	4.43
Average		1.07	2.25	1.07	1.76	2.58	2.90	2.35	2.88
Estimation		1.07	2.13	1.07	1.72	2.58	2.99	2.35	2.73
Standard deviation		0.020	0.566	0.015	0.569	0.034	0.593	0.058	0.828

Table 5. Estimated results of natural frequency and damping ratio of Building of Interfaculty Initiative in Information Studies ("III").

Hongo		III				III - 2			
Scale	quake number	NS		EW		NS_translation		NS_torsion	
		f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]
2	q01	1.45	2.72	1.34	3.97	1.44	2.61	2.22	2.84
3	q02	1.49	2.47	1.36	3.81	1.49	2.63	2.33	2.00
1	q03	1.49	2.25	1.40	3.48	1.49	2.37	2.34	2.26
1	q04	1.53	2.61	1.52	3.77				
1	q05	1.52	2.31	1.50	4.35	1.52	2.69	2.36	2.46
2	q06	1.44	3.57	1.31	2.84	1.44	3.43	2.30	2.48
3	q07	1.47	2.97	1.37	3.68				
3	q08	1.47	3.76	1.34	2.47	1.46	3.25	2.26	1.99
2	q09	1.47	3.99	1.34	3.45	1.44	3.90	2.33	2.88
1	q10	1.53	3.54	1.44	4.11	1.53	3.84	2.34	1.94
1	q11	1.45	3.11	1.31	2.93	1.44	3.19	2.29	2.85
2	q12	1.49	3.08	1.41	4.45				
1	q13	1.49	3.11	1.39	4.50	1.49	3.11	2.35	2.45
Average		1.48	3.04	1.39	3.68	1.47	3.10	2.31	2.41
Estimation		1.48	3.09	1.39	3.75	1.47	2.99	2.31	2.50
Standard deviation		0.027	0.536	0.063	0.610	0.031	0.498	0.043	0.347

Table 6. Estimated results of natural frequency and damping ratio of Building of Department of Environmental Studies (“FSSES”) and Building of Institute for Cosmic Ray Research (“ICRR”).

Kashiwa		FSSES				ICRR			
Scale	quake number	NS		EW		NS		EW	
		f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]
2	q01	1.82	3.52	1.82	3.42	2.54	2.72	3.15	1.91
2	q02	1.86	4.93	1.86	3.25	2.31	2.56	3.09	2.38
1	q03	1.83	3.23	1.82	2.81	2.37	3.55	3.08	1.53
1	q04	1.90	3.72	1.87	4.23	2.53	2.53	3.18	2.00
1	q05	1.89	4.04	1.86	4.93	2.52	2.52	3.18	1.58
2	q06	1.77	3.80	1.82	3.22	2.48	2.87	3.16	2.09
3	q07	1.80	3.71	1.82	3.24	2.39	3.55	3.11	1.79
3	q08	1.85	3.73	1.79	3.12	2.34	2.17	3.12	1.96
2	q09	1.79	3.15	1.75	3.36	2.52	3.31	3.18	2.36
2	q10	1.90	2.57	1.86	2.57	2.52	2.62	3.18	3.02
1	q11	1.84	3.02	1.86	2.77	2.45	2.92	3.09	2.31
2	q12	1.84	2.92	1.81	2.94	2.48	3.62	3.21	2.15
2	q13	1.80	4.35	1.85	3.78	2.50	2.45	3.15	1.77
Average		1.84	3.59	1.83	3.36	2.46	2.87	3.15	2.07
Estimation		1.84	3.55	1.83	3.19	2.46	2.88	3.15	2.07
Standard deviation		0.039	0.608	0.033	0.618	0.075	0.460	0.041	0.381

Table 7. Estimated results of natural frequency and damping ratio of Building No. 15 (“KMB15”) and No. 16 (“KMB16”).

Komaba		KMB15				KMB16				KMB16-2			
scale	quake number	NS		EW		NS		EW		NS_translation		NS_torsion	
		f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]
1	q01	2.36	3.02	2.70	2.25	1.75	3.99	1.94	4.07	1.70	4.38	2.26	3.18
2	q02	2.27	2.35	2.92	3.00	1.87	2.81	1.92	4.05	1.75	3.31	2.30	2.58
1	q03	2.35	2.47	2.70	2.76	1.83	4.77	1.96	2.94	1.79	4.37	2.35	2.77
1	q04	2.39	2.40	2.80	3.70	1.85	3.15	2.04	2.54	1.81	2.98	2.34	2.62
1	q05	2.37	2.55	2.81	3.47	1.86	3.43	2.03	2.83	1.81	3.38	2.34	2.53
2	q06	2.37	2.80	2.78	2.18	1.80	4.67	1.97	3.78	1.75	4.23	2.35	2.01
3	q07	2.40	3.11	2.62	3.24	1.74	2.65	1.90	4.31	1.73	2.48	2.35	2.90
3	q08	2.26	2.82	2.63	1.77	1.70	4.56	1.86	4.67	1.67	4.22	2.25	3.56
1	q09	2.38	2.77	2.67	3.11	1.84	2.57	1.93	3.81	1.80	3.20	2.36	2.37
1	q10	2.38	3.24	2.69	3.65	1.84	3.20	1.98	3.96	1.80	3.32	2.39	2.62
1	q11	2.36	2.68	2.60	3.20	1.79	2.58	1.96	3.92	1.77	2.77	2.35	2.43
1	q12	2.52	2.98	2.80	2.13	1.82	2.97	1.96	3.82	1.81	2.84	2.47	2.83
1	q13	2.48	3.66	2.75	2.93	1.79	4.12	1.93	4.41	1.75	4.24	2.40	2.04
Average		2.37	2.83	2.73	2.88	1.81	3.50	1.95	3.78	1.77	3.52	2.35	2.65
Estimation		2.37	2.84	2.73	3.10	1.81	3.38	1.95	3.96	1.77	3.24	2.35	2.63
Standard deviation		0.067	0.355	0.089	0.595	0.048	0.791	0.045	0.609	0.043	0.656	0.055	0.406

を示す標準偏差 (Standard deviation) である。

Table 4 は、本郷キャンパスの本部棟 (ADM) と第 2 本部棟 (ADM2) の結果で、Table 5 は情報学環本館 (III) の結果、Table 6 は柏キャンパスの環境学研究棟 (FSSES) と宇宙線研究所 (ICRR) の結果、Table 7 は駒場キャンパスの 15 号館 (KMB15) と 16 号館 (KMB16) の結果である。なお、Table 5 および Table 7 の右列の III-2 と KMB16-2 は、建物の中心から離れた位置に設置された地震計 (Sensor 2) から求めた並進振動モードの固有振動数と減衰定数、およびねじれ振動と推定される振動モードの固有振動数と減衰定数の推定結果である。なお、Table 5 の黒く塗り潰した部分はデータの欠落を示す。

6. 推定結果についての考察

6.1 固有振動数についての考察

固有振動数およびその逆数である固有周期について、全棟の最終的な推定結果を Table 8 に示す。

我が国の建物では、建物高さ H (m) と固有振動数の逆数である固有周期 T (sec) の間には、多くの建物で以下の式 (4) (5) のような関係がある事が知られている。そこで本研究の推定結果がこの関係が成り立つかを調べる為に、既往の研究 (建築研究所, 2006) (田村ほか, 1998) の図に本研究の結果を重ねてプロットしたものをそれぞれ Fig. 11, Fig. 12 に示す。

$$T_1 = 0.020H \quad (\text{S 造}) \quad (4)$$

Table 8. Results of the estimated natural frequency and natural period (Translation).

Natural Frequency(f) [Hz]	Translation								
	ADM	ADM2	III	III-2	FSES	ICRR	KMB15	KMB16	KMB16-2
NS	1.07	2.58	1.48	1.47	1.84	2.46	2.37	1.81	1.77
EW	1.07	2.35	1.39	-	1.83	3.15	2.73	1.95	-

Natural Period(T) [sec]	Translation								
	ADM	ADM2	III	III-2	FSES	ICRR	KMB15	KMB16	KMB16-2
NS	0.93	0.39	0.67	0.68	0.54	0.41	0.42	0.55	0.57
EW	0.94	0.43	0.72	-	0.55	0.32	0.37	0.51	-

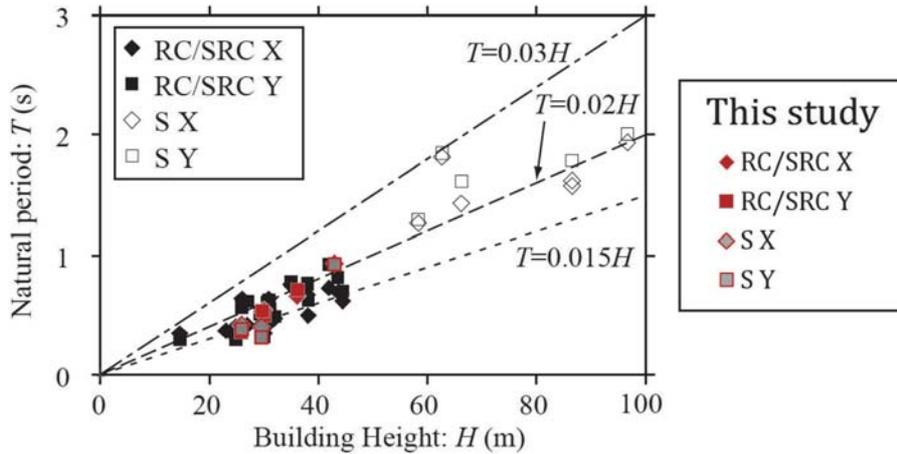


Fig. 11. The relation between the building height H and the estimated natural period T . The original figure is in the former research (Building Research Institute, 2006), and we added data which we estimated in this study on the figure.

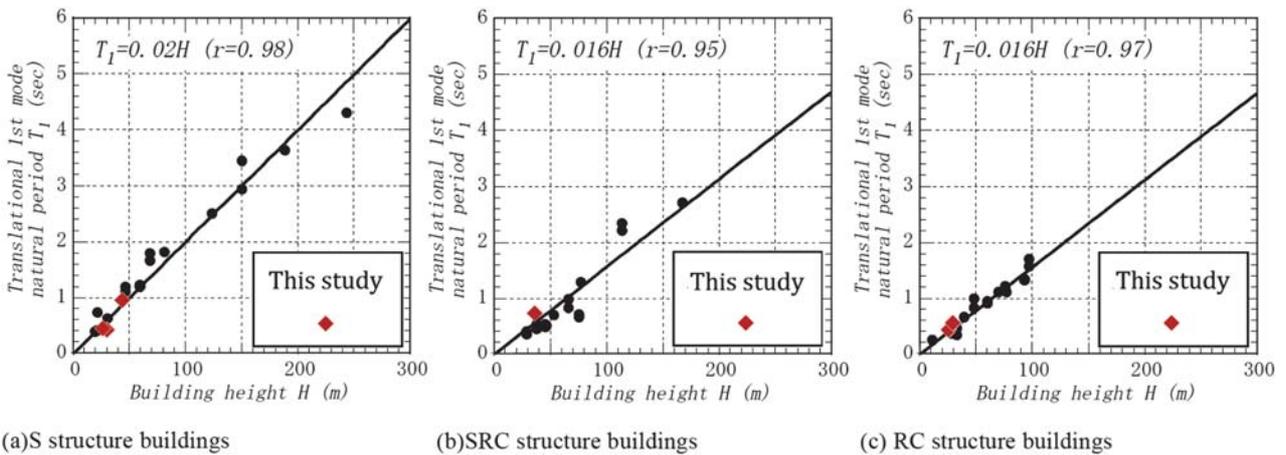


Fig. 12. Translational first mode natural period T_1 versus building height H . The original figure is in the former research (Tamura, Y., et al. 1998), and we added data which we estimated in this study on the figure.

$$T_1 = 0.015H \text{ (RC造・SRC造)} \quad (5)$$

Fig. 11 より、本研究の推定結果は、既往の研究（建築研究所、2006）で得られた推定結果とおおむね一致し、推定結果のバラツキも同等の範囲に収まっていることが

確認できた。詳細に見ると、S造は下方に、RC造は上方に外れているものが多いことがわかった。

Fig. 12 は、本研究で推定した固有周期について、NS方向・EW方向のうち値の大きいものを選択して、既往の研究（田村ほか、1998）の図に重ねてプロットしたも

Table 9. Results of the estimated damping ratio (Translation).

Damping Ratio (h) [%]	Translation								
	ADM	ADM2	III	III-2	FSES	ICRR	KMB15	KMB16	KMB16-2
NS	2.13	2.99	3.09	2.99	3.55	2.88	2.84	3.38	3.24
EW	1.72	2.73	3.75	-	3.19	2.07	3.10	3.96	-

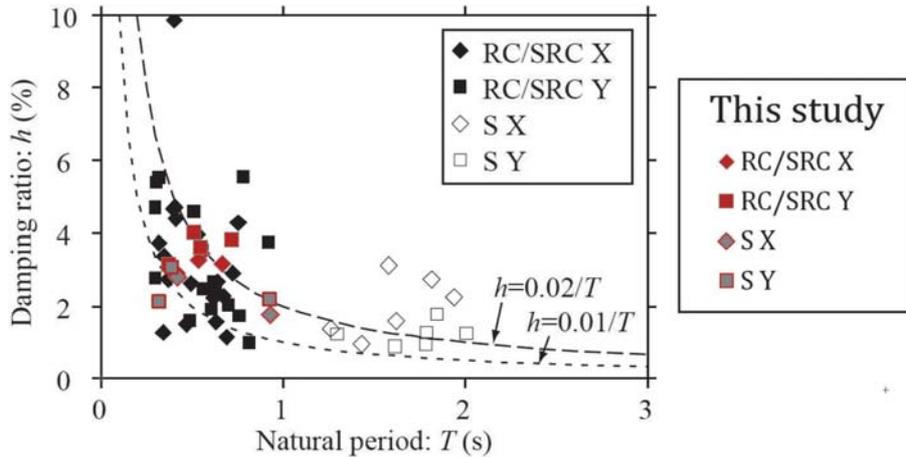


Fig. 13. The relation between the estimated natural period T and the estimated damping ratio h . The original figure is in the former research (Building Research Institute, 2006), and we added data which we estimated in this study on the figure.

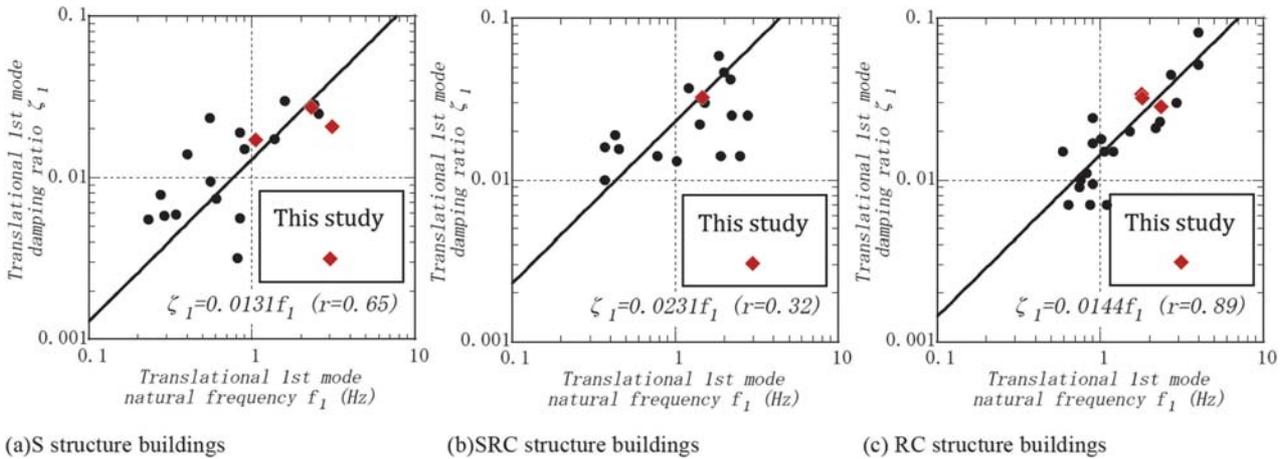


Fig. 14. Translational first mode damping ratio ζ_1 versus natural frequency f_1 . The original figure is in the former research (Tamura, Y., et al. 1998), and we added data which we estimated in this study on the figure.

のである。これより、本研究の推定結果は、構造物のタイプ別に見ても、既往の研究とも高い整合性を示している。なお、この既往研究では、式(5)の関係式の係数を0.015ではなくて0.016としている。また、この既往研究において、SRC造のうち建物高さの小さいものはRC造に近い傾向を示す事が指摘されているが、本研究のSRC造建物(情報学環)の結果でも同様の傾向が示された。

6.2 減衰定数についての考察

減衰定数について、全棟の最終的な推定結果を Table

9に示す。また、固有振動数あるいはその逆数の固有周期と減衰定数の関係について、既往の研究(建築研究所, 2006)(田村ほか, 1998)の図に重ねて本研究の結果をプロットしたものをそれぞれ Fig. 13, Fig. 14に示す。

Fig. 13より、本研究の減衰定数 h (%) と固有振動数の逆数である固有周期 T (sec) の推定値は、既往のデータと同じようにプロットされる事が確認できる。ただし、宇宙線研究所は固有周期が短く減衰定数も低く、図の左下に値が外れており、情報学環はその反対に値が右上に

外れてプロットされている。

さらに、既往の研究（田村ほか、1998）では、固有振動数（ f_1 ）と減衰定数（ ζ_1 ）（注：この文献では、 h （%）ではなく $\zeta(=0.01h)$ を用いている）の関係を、式（6）～（8）のように推定している。

$$\zeta_1 = 0.0131f_1 \quad (\text{S 造}) \quad (6)$$

$$\zeta_1 = 0.0231f_1 \quad (\text{RC 造}) \quad (7)$$

$$\zeta_1 = 0.0144f_1 \quad (\text{SRC 造}) \quad (8)$$

Fig. 14 は、この（田村ほか、1998）の文献にある図の上に本研究の推定結果をプロットしたものである。ただし、NS 方向・EW 方向のうち減衰定数の値の小さいものを選択してプロットしている。本研究の推定結果のうち、S 造で固有振動数が最も高い宇宙線研究所の減衰定数の値は（6）の近似式よりやや下方に外れているが、残る 6 棟の値は既往のデータや（6）～（7）の近似式と比較的高い整合性を示す事が確認できる。

ところで建物の設計にあたっては、減衰定数は経験的に、S 造の場合 2%、RC 造の場合 3% が与えられる事が多い。本研究の推定結果も、S 造は 2% 以上、RC 造は 3% 以上で SRC 造はその中間の値で、S 造の減衰定数が RC 造の減衰定数よりも小さい値となっている。また、今回の推定結果の多くは先述の経験的な値と一定の整合性があり、この値を大きく下回らない事も確認できる。

また Fig. 14 において、既往のデータの減衰定数のバラツキは大きいですが、本研究の推定結果は既往データと比較すると小さくなっている。弱い地震動を用いる事で、減衰定数のバラツキを小さくできる可能性がある。ただし本研究は対象建物の数が少ない点には注意が必要である。

6.3 ねじれ振動モードについての考察

情報学環および駒場 16 号館は、建物長手方向に 2 つの地震計（Sensor 1, Sensor 2）が設置されている。ここで建物中心付近が Sensor 1、建物の外側にあるものが Sensor 2 である。それぞれの地震計で計測された地震動の NS 方向のフーリエスペクトルを Appendix 1 の Fig. A1.1 の III と KMB16 に示している。建物中心付近の地震計（Sensor 1）ではフーリエ振幅の小さい（もしくは全く観測されていない）ピークが、建物外側の地震計（Sensor 2）では明確に出現しており、このピークはねじれ振動による固有振動数と推察される。この振動モードのパラメータを並進振動モードと同様の手法で同定した結果を Table 10 に示す。この振動モードの減衰

Table 10. Results of the estimated natural frequency and damping ratio (Torsion).

Natural Frequency(f) [Hz]	Torsion	
	III-2	KMB16-2
NS	2.31	2.35
EW	-	-

Damping Ratio (h) [%]	Torsion	
	III-2	KMB16-2
NS	2.50	2.63
EW	-	-

定数は、同一建物の並進モードと比較して 20% ほど小さい値となっている。

6.4 既往の解析結果等との比較

本部棟は、減衰定数・固有振動数とも他の建物よりも値が低いが、既往の研究による（6）式、（4）式の関係を良く満たしていることから、建物高さが他の建物よりも高いこと、S 造であることに起因すると推察できる。

情報学環の NS・EW 方向の固有振動数の推定結果は 1.48 Hz・1.39 Hz である。この値は、既往の研究（志田・鷹野、2012）において常時微動測定から同定された情報学環の NS・EW 方向の固有振動数（1.59 Hz・1.46 Hz）と比較すると 5～7% ほど小さい結果となった。一方、駒場 16 号館の NS・EW 方向の固有振動数の推定結果は 1.81 Hz・1.95 Hz であったが、これは同既往研究における NS・EW 方向の固有振動数 1.76 Hz・1.95 Hz とほぼ一致する結果となった。

柏の環境学研究棟（RC 造）は、平面形状が複雑であるが、建物高さがほぼ同一で平面形状が単純である駒場の 16 号館（RC 造）と固有振動数の推定結果がほぼ等しい。また Fig. 12 より、これら 2 棟の推定結果は既往の研究による RC 造の関係式とも高い整合性を示している。なお、環境学研究棟については、設計時の構造解析データによれば、1.77 Hz および 1.80 Hz に振動モードが出現するとされており、今回の結果（1.83 Hz にモードが出現）は、設計時の固有振動数との整合性も確認された。

6.5 その他の考察

本部棟の建物平面は正方形であり、固有振動数は NS・EW 方向で等しい値となったが、減衰定数については NS 方向が 2.13% に対して EW 方向は 1.72% と 0.4% ほど低く、かつ設計時の経験的な値である 2% をも下回る。S 造の減衰定数には 2 次部材の摩擦減衰の関与が大きいとされており（田村ほか、1998）、本部棟では、NS 方向に比べて EW 方向では非構造壁などの 2 次部材が少ないことが考えられる。

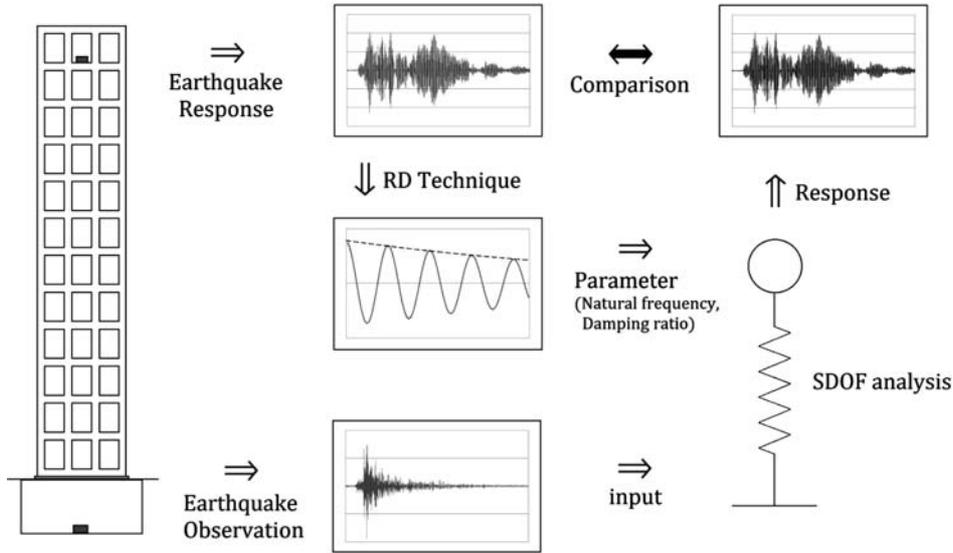


Fig. 15. Flow chart showing the comparison of the estimated results and the results by the simulation.

柏の宇宙線研究所は、固有振動数はEW方向(3.15Hz)がNS方向(2.46Hz)より高く、減衰定数は逆にNS方向(2.88%)がEW方向(2.07%)より高くなるという結果となった。また、Fig. 11, Fig. 13においても値が外れている。この建物はFig. 7に示すように、南側と北側の2つのビルが最上階で結合されているなど、立面形状が特異的であることや、長手方向に別な建物と連結されていることなどに起因していると推察される。

7. 弾性応答解析による推定結果の検討

ここでは、1次モードが卓越している単純な建物について、本手法で推定した固有振動数と減衰定数を用いて1自由度系の弾性応答解析を行い、その結果と観測データを比較することで、本手法の精度を検証する。本部棟のフーリエスペクトルは非常に鋭く、応答波形も非常に単純である。そこでこのEW方向について、本研究で推定された固有振動数と減衰定数を入力パラメータとした1自由度系の弾性応答解析のシミュレーションを行い、結果を比較した。このフローをFig. 15に示す。

7.1 最上階の地震応答波形との比較

Fig. 15に示すように、まず、Table 3の地震q09の時に、本部棟の地下に設置されたセンサーの観測データを入力地震動とし、本研究で最終的に推定されたEW方向の固有振動数および減衰定数の値を入力パラメータとして、1自由度系の弾性応答解析を行い、得られた応答波形を実際に観測された最上階の地震応答波形と比較した。Fig. 16は、このときの主要動付近のフィルタされた波形を拡大して比較したものである。

濃灰色実線が本研究で求めたEW方向の固有振動数1.07Hzと減衰定数1.72%を入力したときの弾性応答解析による波形で、黒実線が最上階のセンサーで実測された地震応答波形である。また減衰定数の値を1.72%から1.4%と2.2%に変化させた時の弾性応答解析波形を、それぞれ淡灰色実線と灰色破線で表示している。減衰定数のパラメータを変化させると、実測された地震応答波形からの差が大きくなることから、本研究で得られた1.72%の減衰定数が適切であることが確認出来た。ただし、主要動から離れた後続波の部分では、これほどの良い一致は得られなかった。また減衰定数の値をより小刻みに変化させても、波形の比較は困難であり、地震動ごとの弾性応答解析波形と地震応答波形との整合性の程度にも差があることから、この方法で定量的に減衰定数を精度よく照合することは困難である事が確認された。

7.2 弾性応答解析波形へのRD法の適用

次に、弾性応答解析のシミュレーションで得られた応答波形(以降、シミュレーション波形と記す)に対して、本研究によるRD法を施して固有振動数と減衰定数を求めて、入力したパラメータとの照合を行った。この結果をTable 11に示す。左列は、本研究による地震ごとの固有振動数と減衰定数でTable 4に示したのと同じである。右列は、固有振動数1.07Hzと減衰定数1.72%を入力パラメータとして、各地震について1自由度系の弾性応答解析を行い、得られたシミュレーション波形に対して、本研究によるRD法を施して求めた固有振動数と減衰定数である。

固有振動数は、入力パラメータ1.07Hzに対して1.06

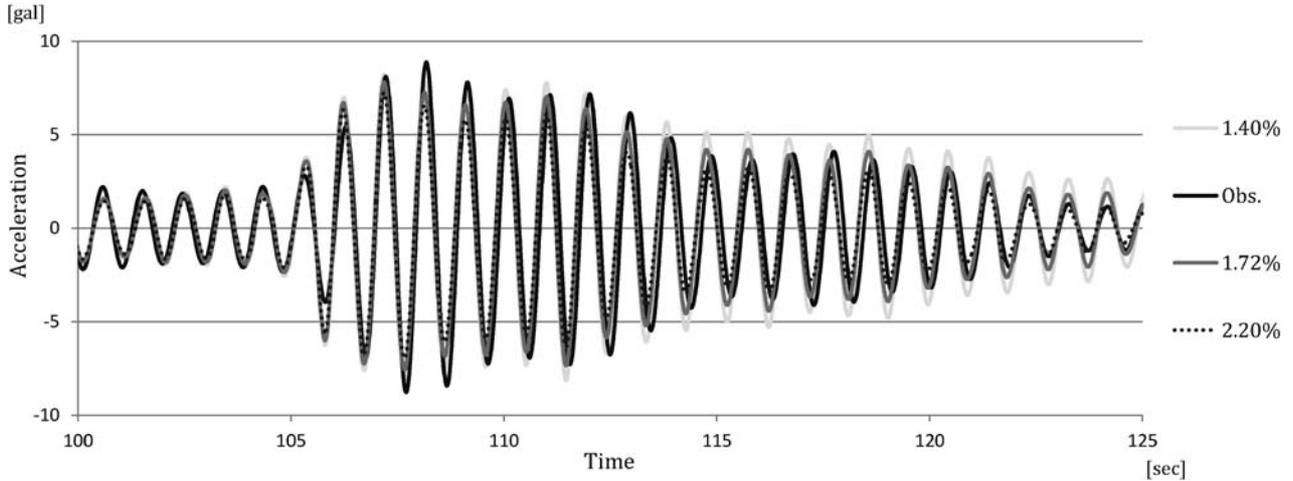


Fig. 16. Result of the wave comparison. The parameter is damping ratio (1.40 %, 1.72 %, and 2.20 %). 1.72 % is an estimated result of damping ratio by RD technique. The earthquake number is q09, and these simulated waves are the most fitted results in all simulation.

Table 11. Comparison of the natural frequency and damping ratio (estimated results and the results by the simulation). The row “This study” is quoted from Table 4.

Hongo		ADM (EW)			
Scale	quake number	This study		Simulation	
		f[Hz]	h[%]	f[Hz]	h[%]
2	q01	1.06	2.03	1.07	1.69
3	q02	1.05	2.98	1.05	1.81
1	q03	1.08	2.57	1.06	1.64
1	q04	1.10	0.88	1.07	0.79
1	q05	1.09	1.30	1.07	1.33
2	q06	1.05	2.08	1.05	1.88
3	q07	1.06	1.44	1.06	1.15
3	q08	1.05	2.12	1.05	2.34
2	q09	1.06	1.02	1.06	0.75
1	q10	1.06	1.74	1.07	0.94
1	q11	1.05	1.66	1.05	1.19
2	q12	1.09	1.41	1.07	0.68
1	q13	1.08	1.66	1.07	1.33
Average		1.07	1.76	1.06	1.35
Estimation		1.07	1.72	1.06	1.38
Standard deviation		0.015	0.569	0.007	0.484

Hz が得られて、高い整合性を示すが、減衰定数は、入力パラメータ 1.72% に対して 1.38% と、弾性応答解析のシミュレーション波形から求めた結果が 0.3~0.4% ほど小さく、比率に換算するとおよそ 20% 小さいという結果となった。

7.3 弾性応答解析波形との比較からの考察

弾性応答解析のシミュレーション波形から求めた減衰定数が、入力パラメータに対して 20% ほど低くなった事については、入力に用いた地震動がシミュレーション波形に大きく影響を与えていることから、本手法で RD 波形を作成する際、この入力地震動の影響を十分に打ち消す事ができていない可能性が考えられる。

地震動の影響を低減する事が喫緊の課題であり、常時微動測定データを用いた結果との比較など更なる検討を行い、地震動の影響をうまく相殺するような改善をすることが今後の課題である。

また、現時点では、確定はできないが、本研究で推定した減衰定数の値自体が、20% ほど過小評価となっている可能性も否定できない点に注意が必要である。

8. 結論・今後の展望

東京大学の建物 7 棟について、IT 強震計により観測された 13 個の弱い地震動に RD 法を適用し、固有振動数・減衰定数の算出を行った。固有振動数はパラツキが小さく、常時微動測定等との結果の整合性が確認されたが、減衰定数はパラツキが大きく、真値と推定値の誤差の評価が困難であった。弱い地震動から求めた各建物の固有振動数と減衰定数については、常時微動観測等で求められた建物高と固有周期との関係や、固有振動数と減衰定数の関係などの既往の研究結果と比較した結果、既往の研究結果とも整合性があることが確認できた。また、得られた固有振動数と減衰定数を用いて、いくつかの建物について、その特徴的な構造等の関係を考察した。

最後に、1 次モードが卓越している単純な建物について、本手法で推定した固有振動数と減衰定数を用いて 1 自由度系の弾性応答解析を行い、その結果と観測データを比較することで、本手法の精度を検証し、弱い地震動を用いた減衰定数の推定の方法の確立に向けて残された課題について議論を行った。

今回は実施できなかったが、弱い地震動を多数利用す

る場合は、例えば波形の主要動付近のみを抽出して定常性を向上させて RD 波形を作成するなど、地震動の影響をできるだけ相殺する方法をさらに検討して改善することが今後の課題である。また、得られた RD 波形の波長数が算定値に与える影響の分析・検討、常時微動測定から得られる推定結果との比較、弾性応答解析シミュレーションとの照合などを駆使して、推定値と真値の関係をより深く追求し、その誤差を評価することも残された課題である。

謝 辞

本論文の査読者の方には、本稿を改善するにあたり大変有益なご意見を頂きました。また、東京大学大学院工学系研究科・藤田香織准教授には日頃から指導を頂いており、本研究に際しましてもご協力を頂きました。IT 強震計の共同研究者である伊藤貴盛博士（現在、慶応義塾大学特任助教）には、本研究のデータ利用に際してご協力頂きました。この場を借りて心より御礼申し上げます。

文 献

鹿嶋俊英, 2006. 建物を対象とした強震観測, 建築研究所講演会パネル展示.
 小林慎祐・鍵山佳秀・神野達夫・水浦健二, 2007. RD 法による減衰評価に解析パラメータが及ぼす影響, 日本建築学会大

会学術講演梗概集(九州), 構造Ⅱ, 515-516.
 日本建築学会, 2000, 「建築物の減衰」, 日本建築学会 / 丸善, 65-106 頁.
 大川 出・飯場正紀・小山 信・森田高市・境 茂樹・藤井陸・保井美敏・渡壁守正, 2010. 常時微動等を利用した集合住宅の振動特性の評価, 建築研究所 建築研究資料 第 122 号.
 志田龍太郎・鷹野 澄, 2012. IT 強震計による建物常時微動観測と構造物ヘルスマニタリングに関する研究, 東京大学大学院修士論文.
 鷹野 澄, 2009, 地震災害軽減を目指したセンサネットワーク—IT 強震計による取り組みについて—, 電子情報通信学会誌, 92, 3, 209-217.
 鷹野 澄・伊藤貴盛, 2010. 大学キャンパス内建物の地震観測～建物毎の地震応答の違い～, 第 13 回地震工学シンポジウム, つくば国際会議場, 11 月 17 日～20 日, 日本地震工学会.
 鷹野 澄・伊藤貴盛, 2011, IT 強震計でみた 3.11 の東大キャンパスの建物の揺れ, 日本地震学会 2011 秋季大会, 静岡, 10 月 12 日～15 日, 日本地震学会.
 鷹野 澄・豊田克博, 2013, 弱い地震動を利用した建物の減衰定数の推定, 日本地震学会 2013 秋季大会, 横浜, 10 月 7 日～9 日, 日本地震学会, P3-50.
 田村幸雄・佐々木淳・塚越治夫, 1993. 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, 29-38.
 田村幸雄・佐々木淳・須田健一・菅沼信也, 1998. 建築物の減衰定数実測値の固有振動数依存性および振幅依存性の検討, 日本機械学会 機械力学・計測制御講演論文集, No. 98-8.
 (Received March 3, 2014)
 (Accepted March 28, 2014)

Appendix 1

Fourier spectrum of the earthquake response of each building obtained by weak seismic ground motion. We chose one earthquake (quake number q01 in the Table 3.) as a sample.

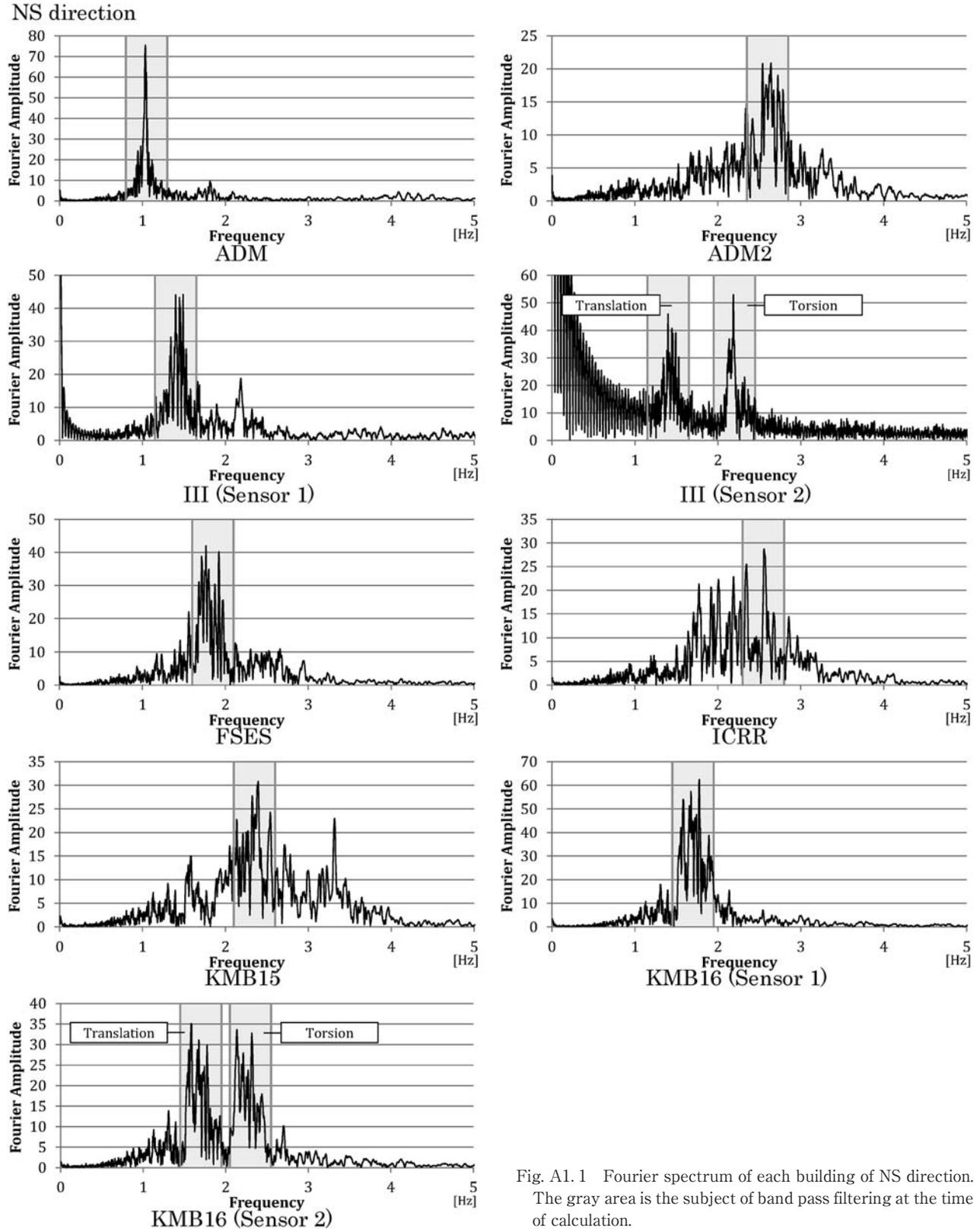


Fig. A1.1 Fourier spectrum of each building of NS direction. The gray area is the subject of band pass filtering at the time of calculation.

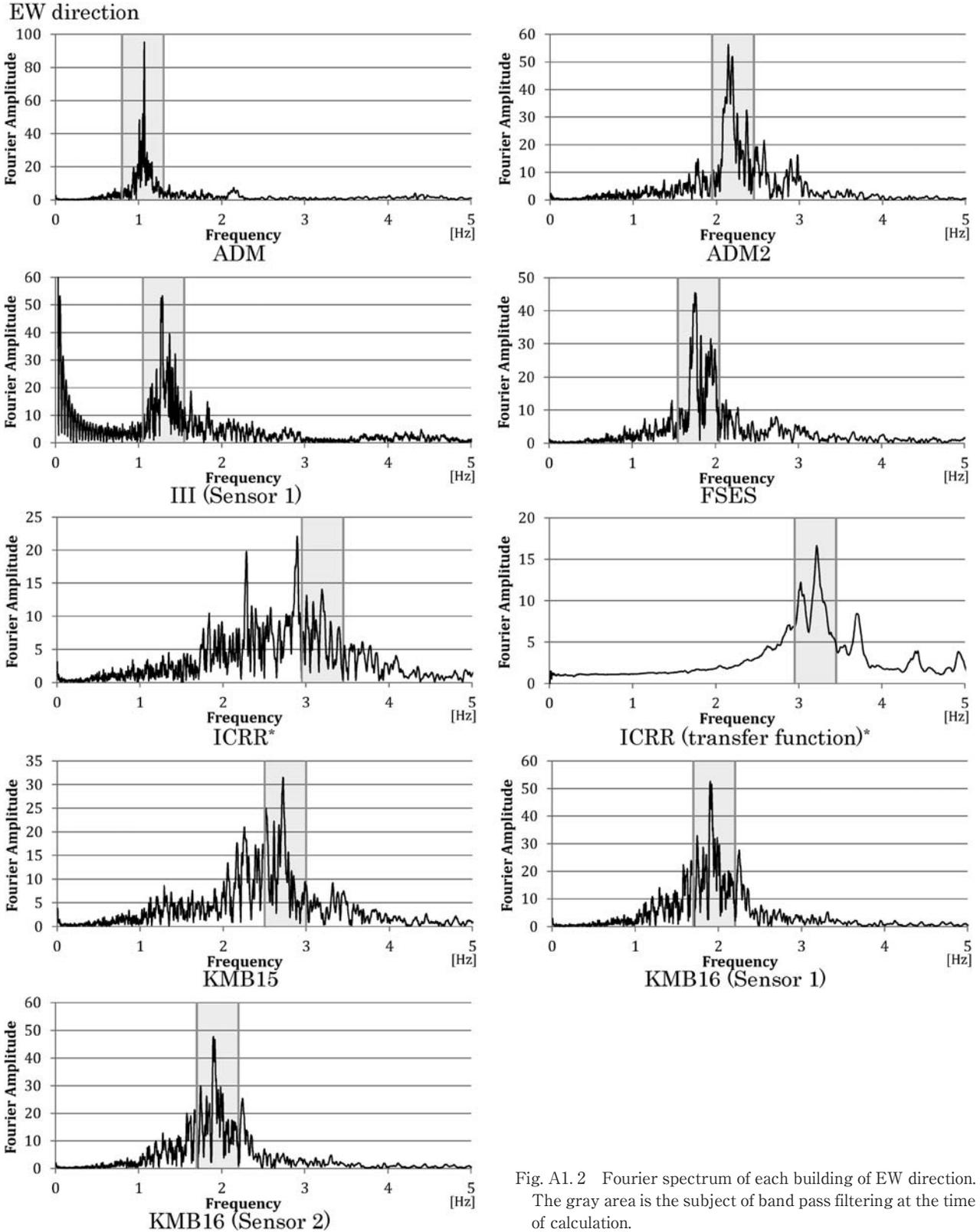


Fig. A1.2 Fourier spectrum of each building of EW direction. The gray area is the subject of band pass filtering at the time of calculation.

*In order to decide the band of filtering, we calculated transfer function by smoothing the original Fourier spectrum by using moving average and dividing it by similarly smoothed Fourier spectrum obtained at the sensor on the basement floor. The left figure is the original Fourier spectrum, and the right is the transfer function.

Appendix 2

RD waves made by Random Decrement (RD) technique by using weak seismic ground motion of the earthquakes of Table 3. Attached values are the natural frequency [Hz] and damping ratio [%] obtained from each RD wave.

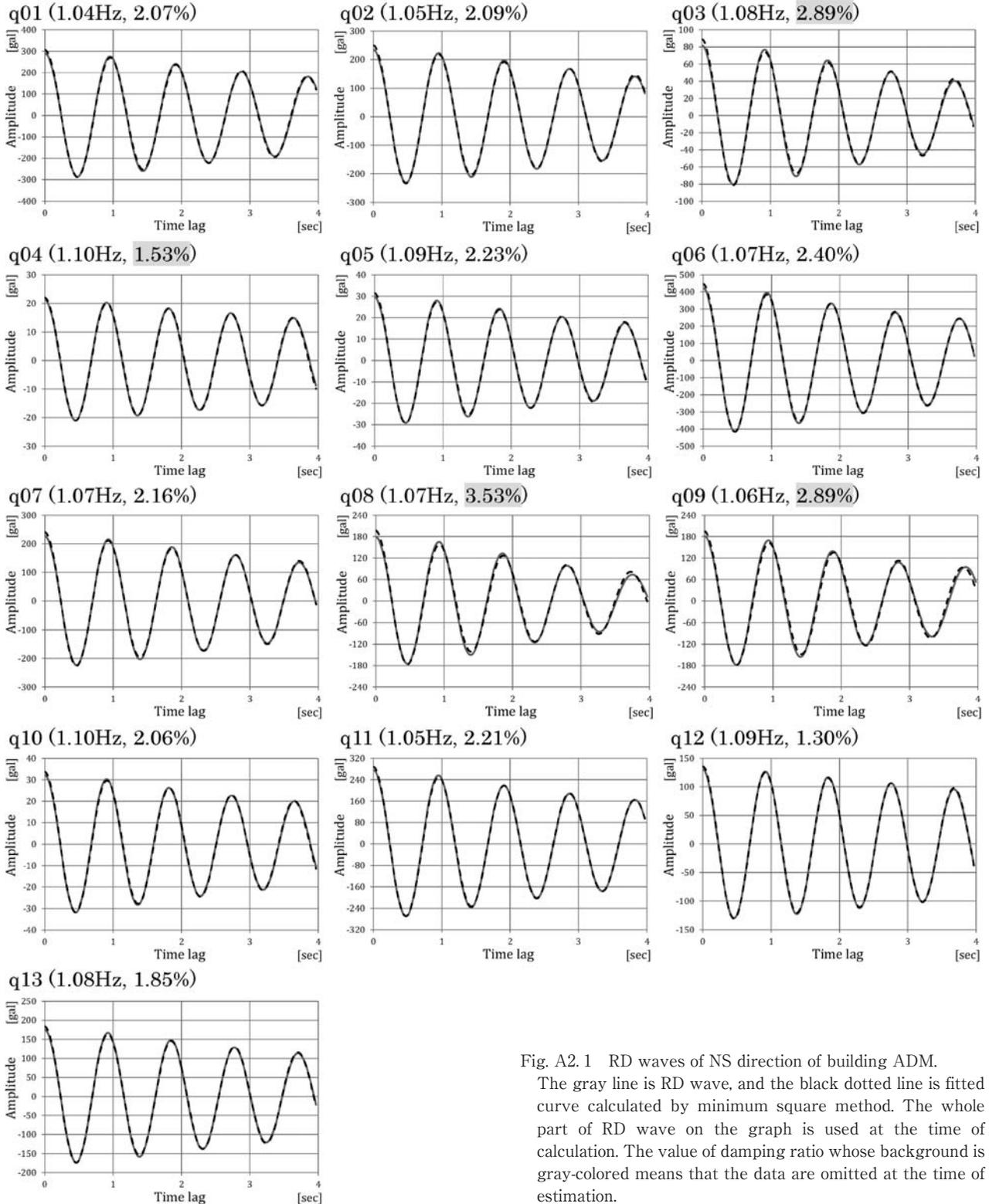


Fig. A2.1 RD waves of NS direction of building ADM.

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

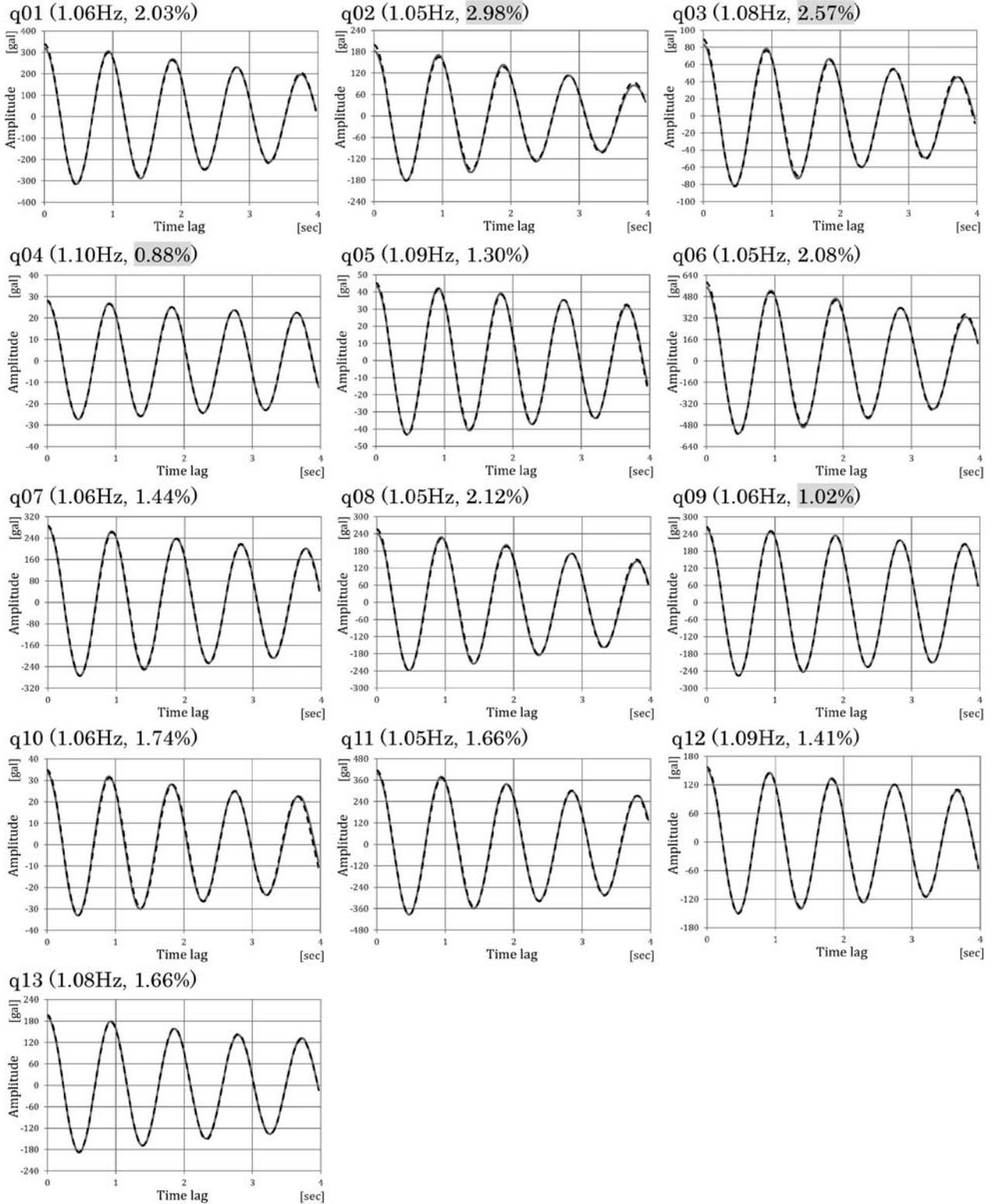


Fig. A2.2 RD waves of EW direction of building ADM.

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

弱い地震動を用いた建物の減衰定数の推定

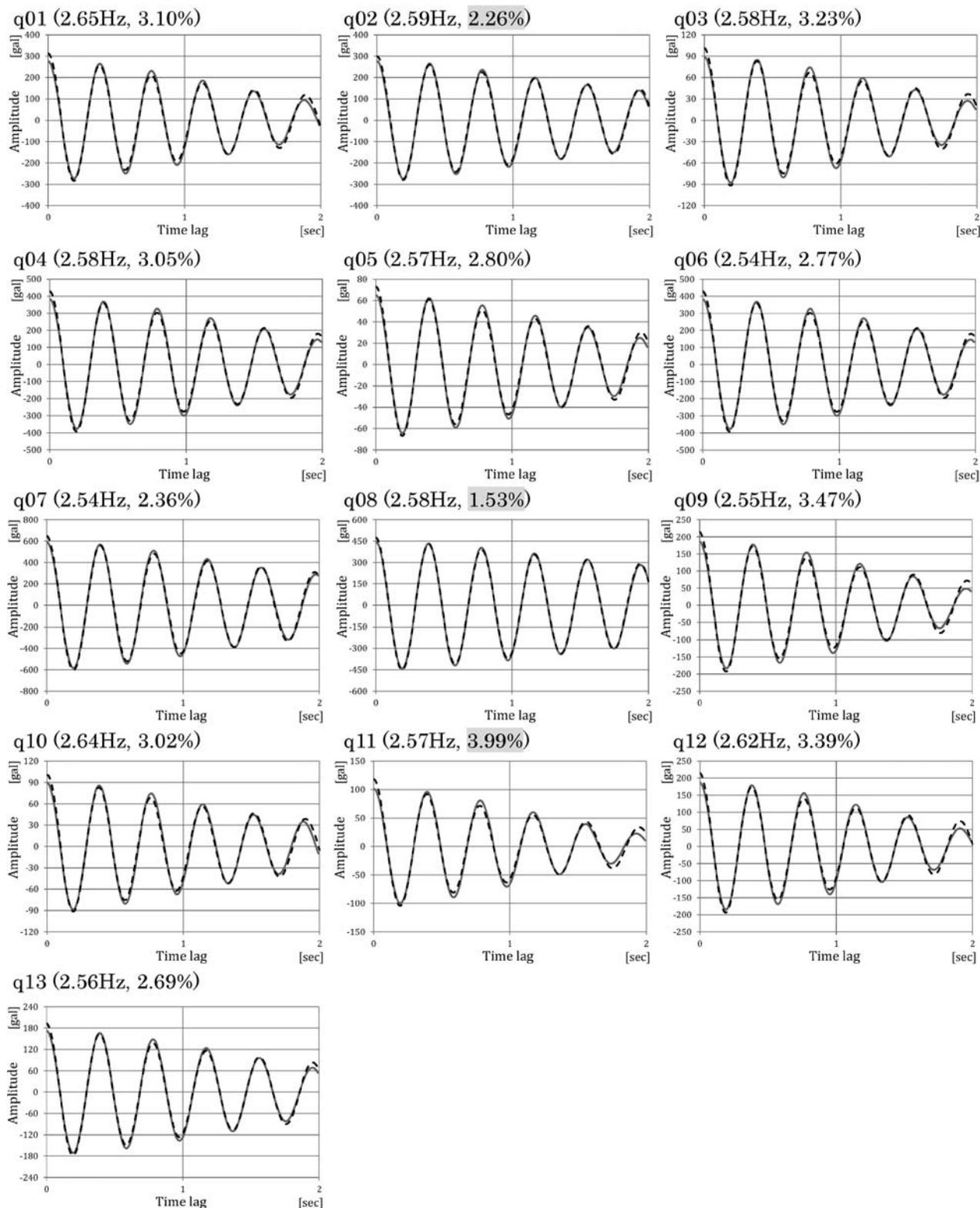


Fig. A2.3 RD waves of NS direction of building ADM2.

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

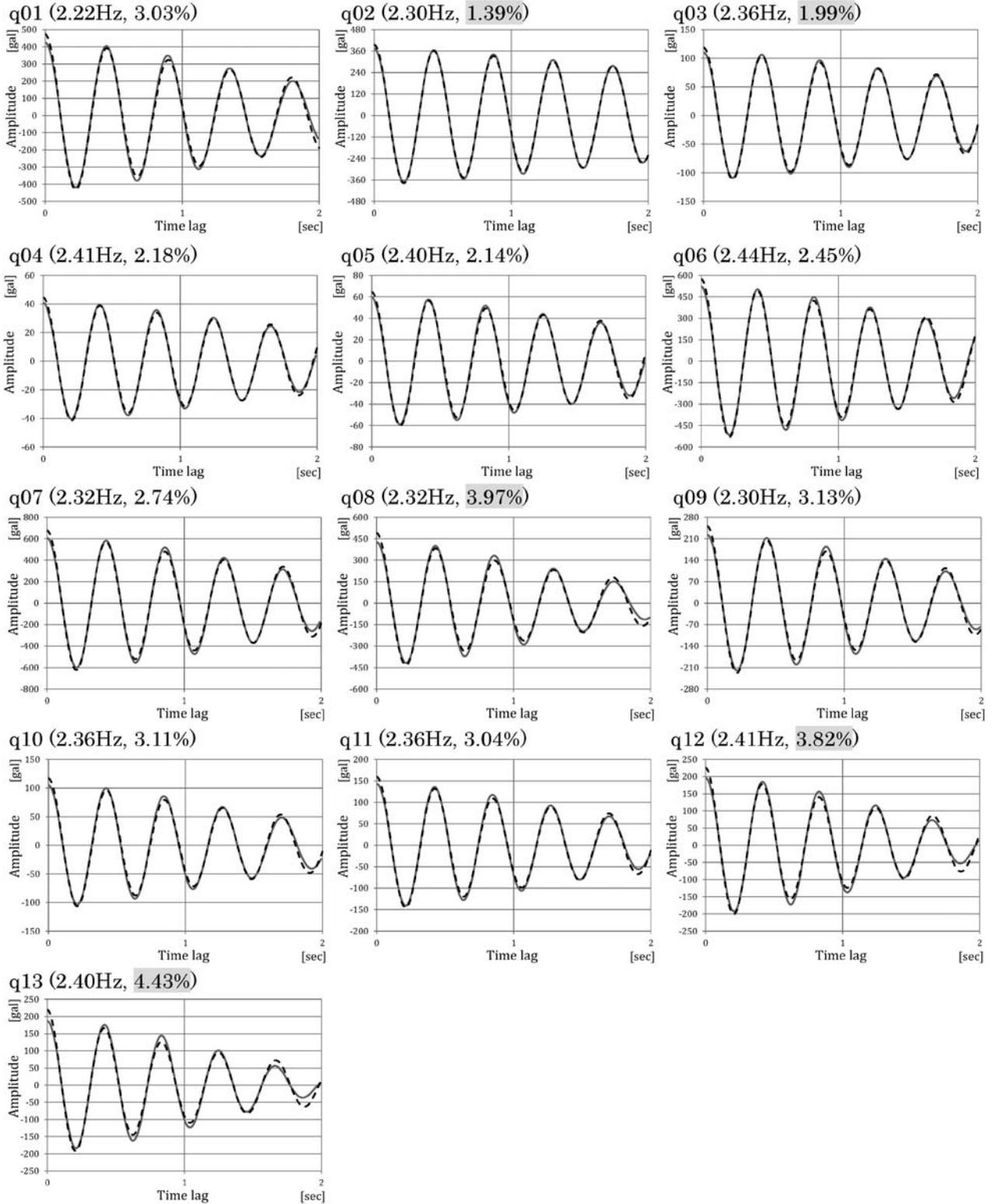


Fig. A2.4 RD waves of EW direction of building ADM2.

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

弱い地震動を用いた建物の減衰定数の推定

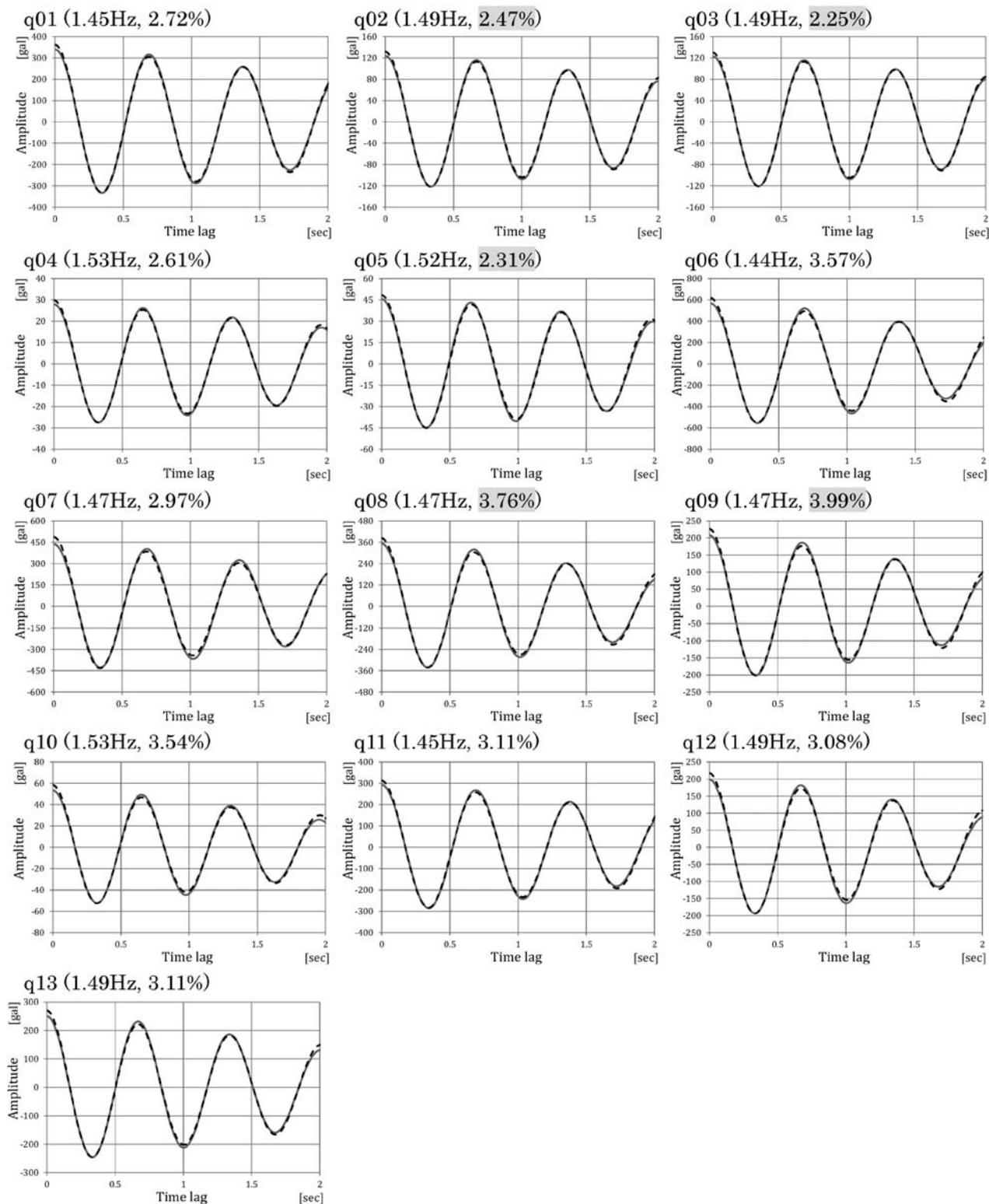


Fig. A2.5 RD waves of NS direction of building III (Sensor 1).

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

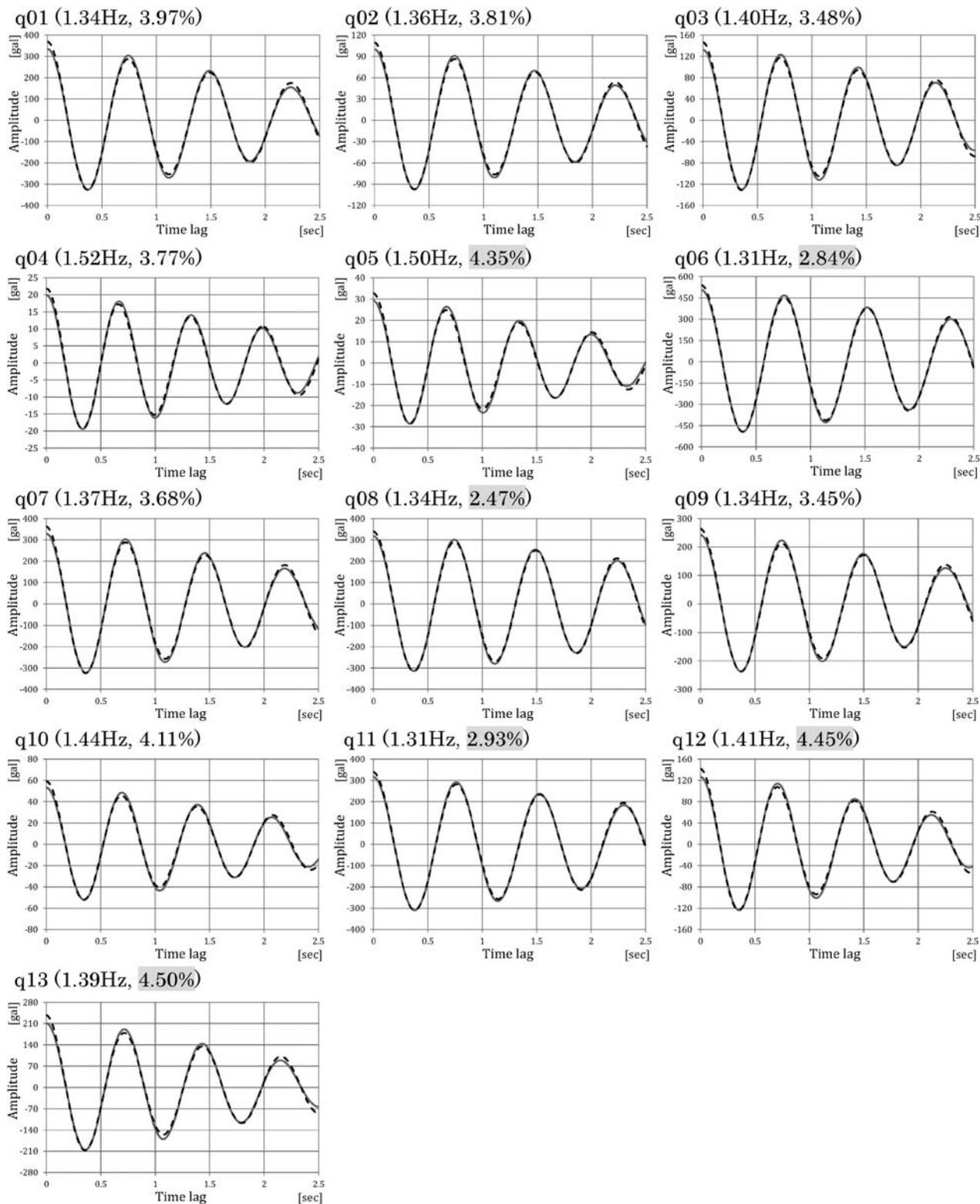


Fig. A2.6 RD waves of EW direction of building III (Sensor 1).

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

弱い地震動を用いた建物の減衰定数の推定

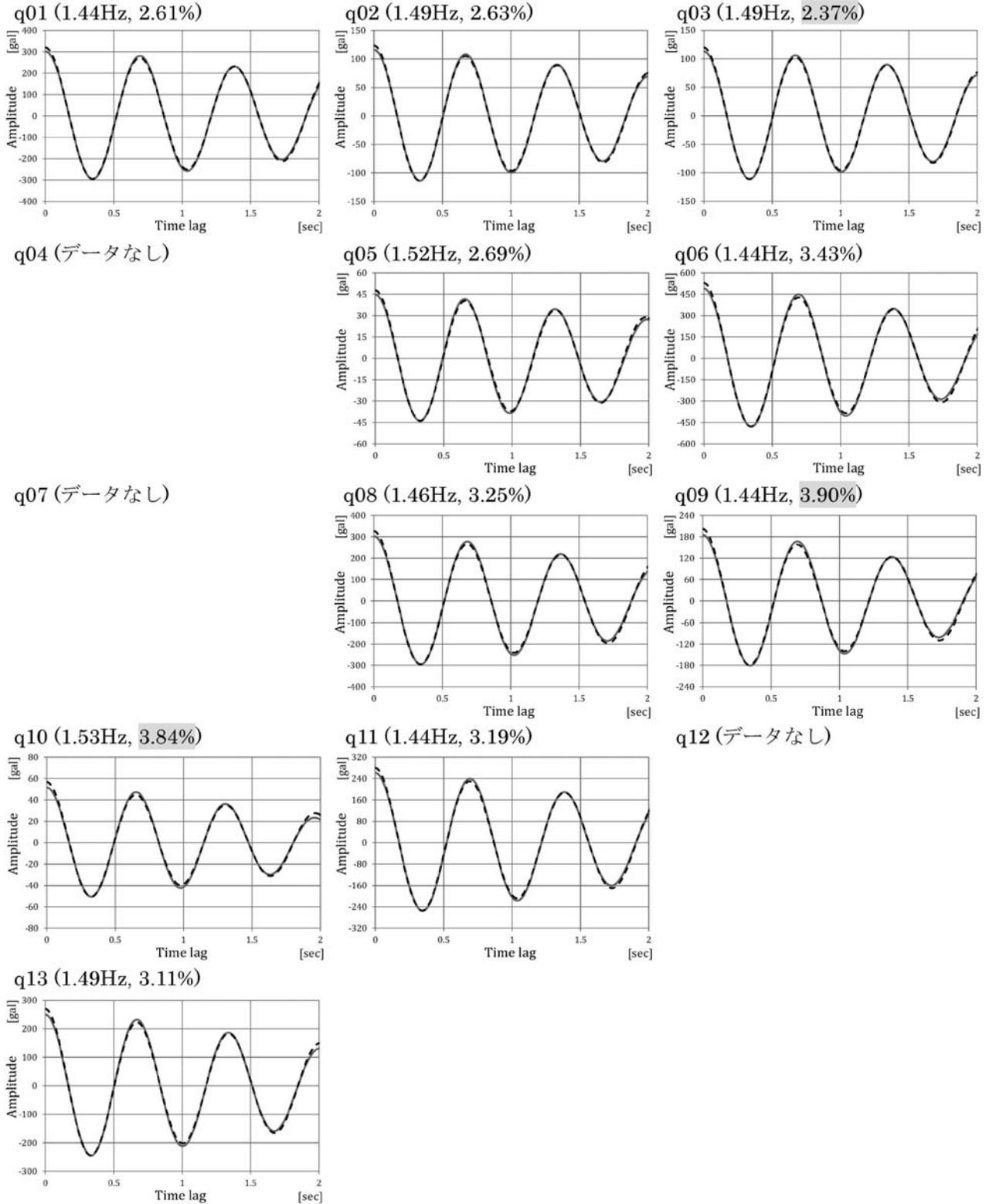


Fig. A2.7 RD waves of NS direction (translation) of building III (Sensor 2).
 The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

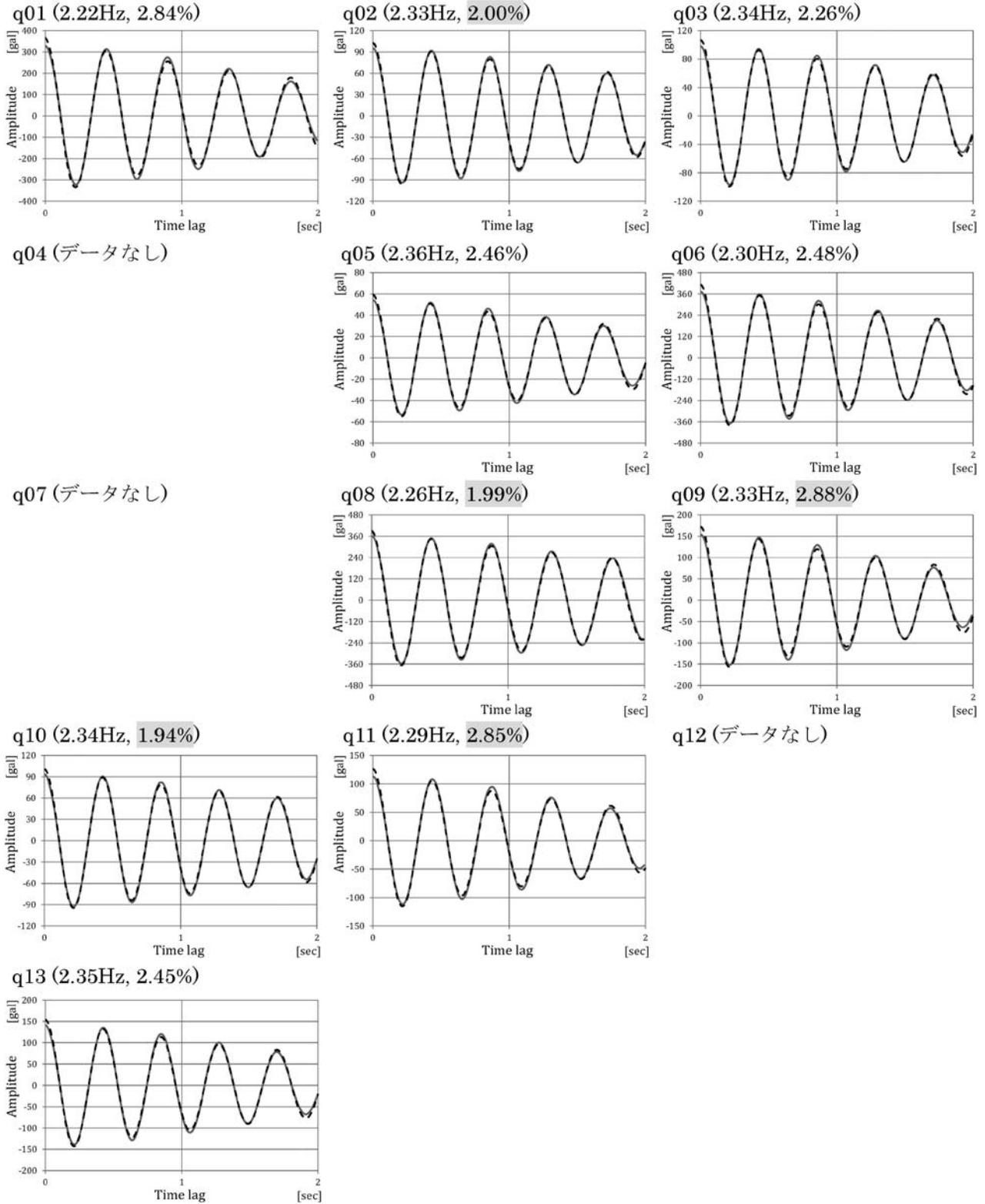


Fig. A2.8 RD waves of NS direction (torsion) of building III (Sensor 2).

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

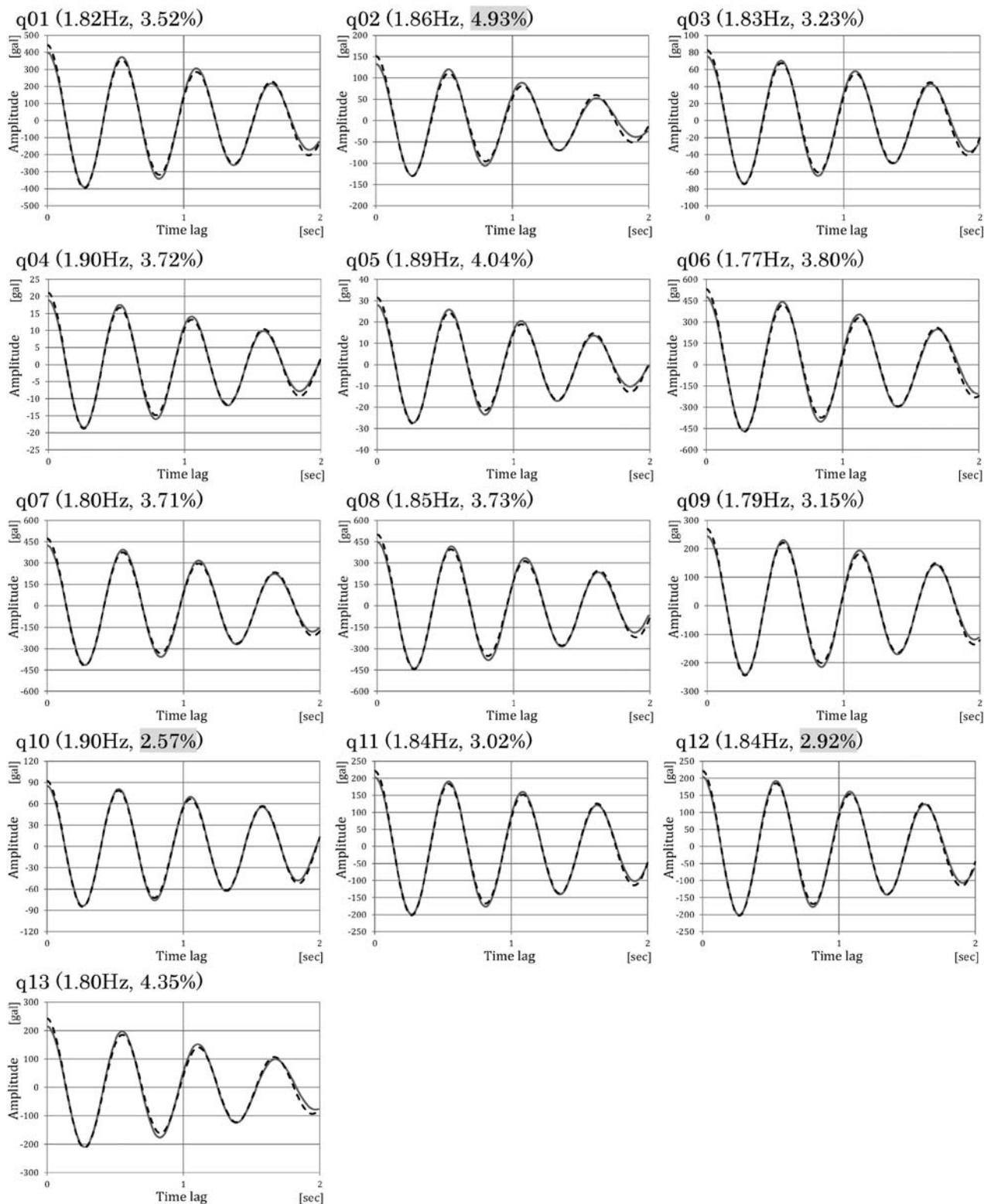


Fig. A2.9 RD waves of NS direction of building FSES.

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

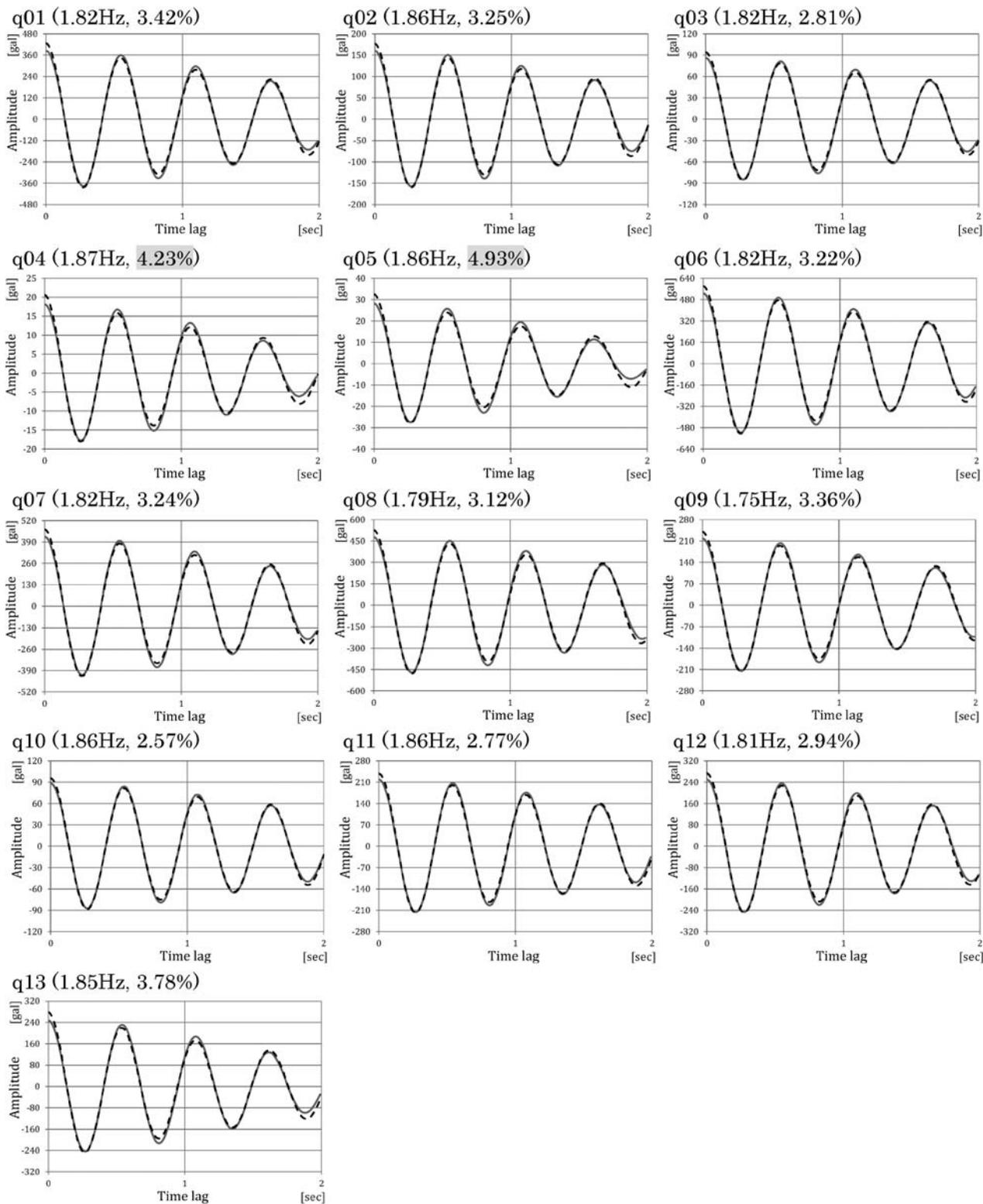


Fig. A2.10 RD waves of EW direction of building FSES.

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

弱い地震動を用いた建物の減衰定数の推定

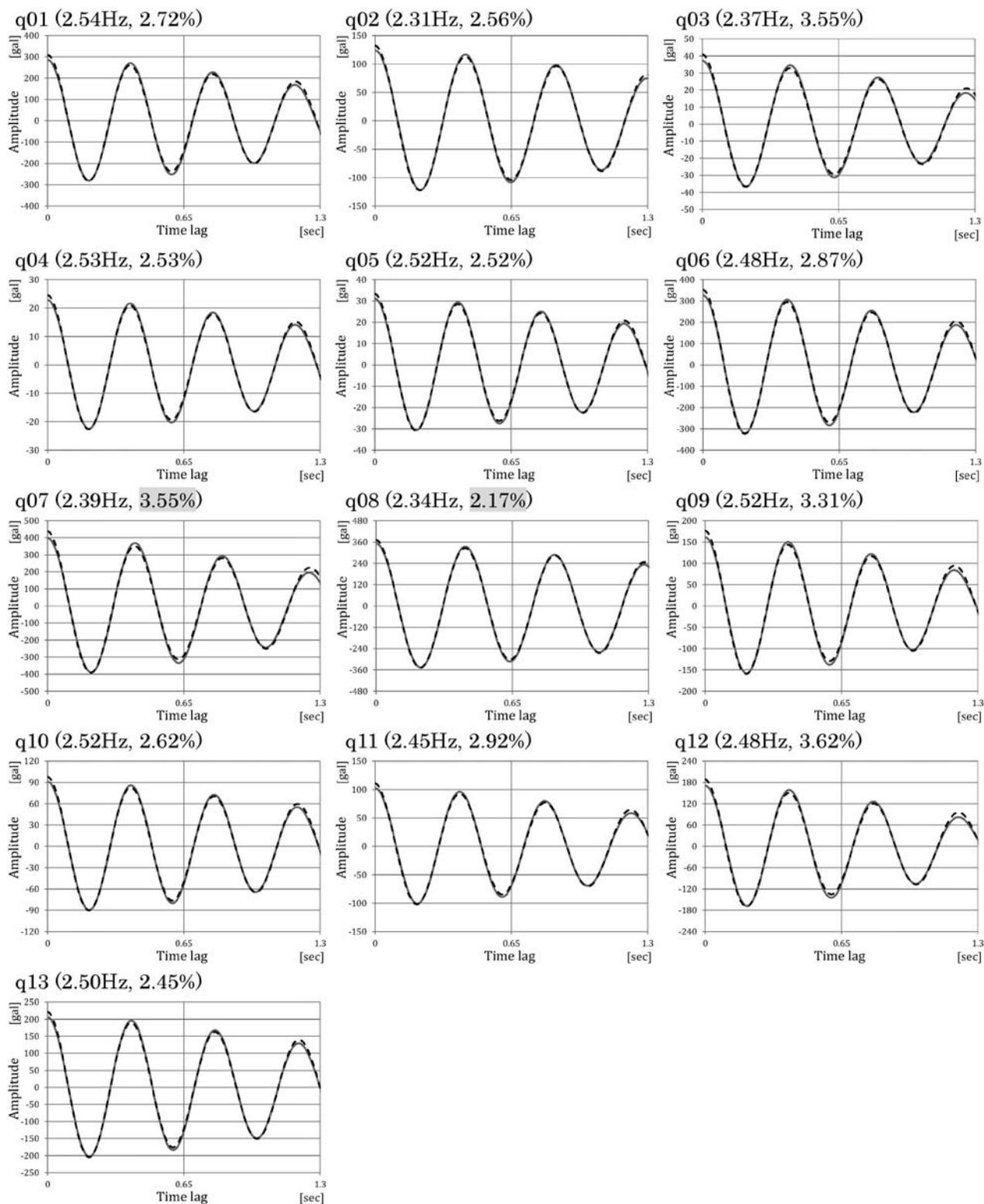


Fig. A2.11 RD waves of NS direction of building ICRR.

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

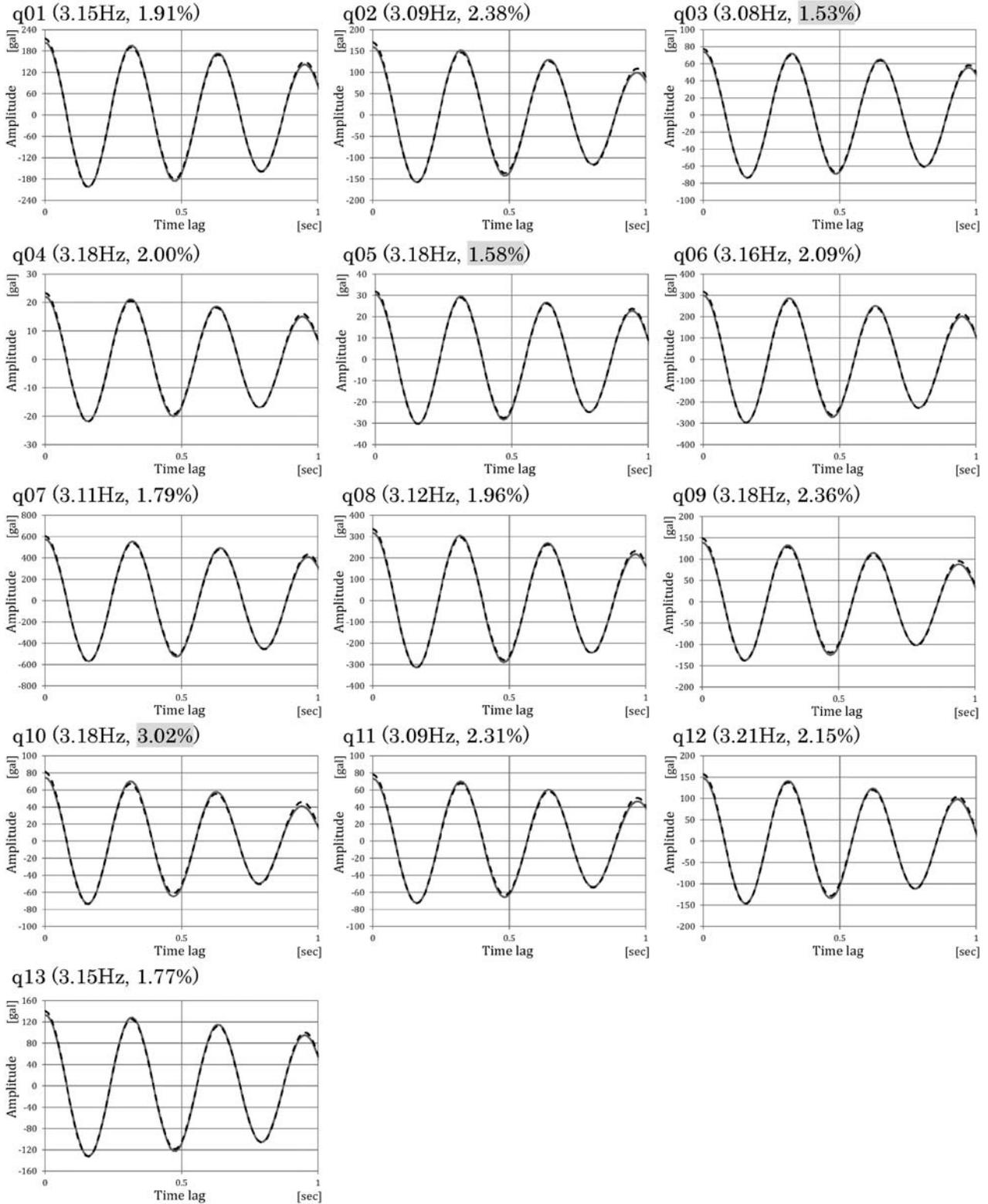


Fig. A2.12 RD waves of EW direction of building ICRR.

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

弱い地震動を用いた建物の減衰定数の推定

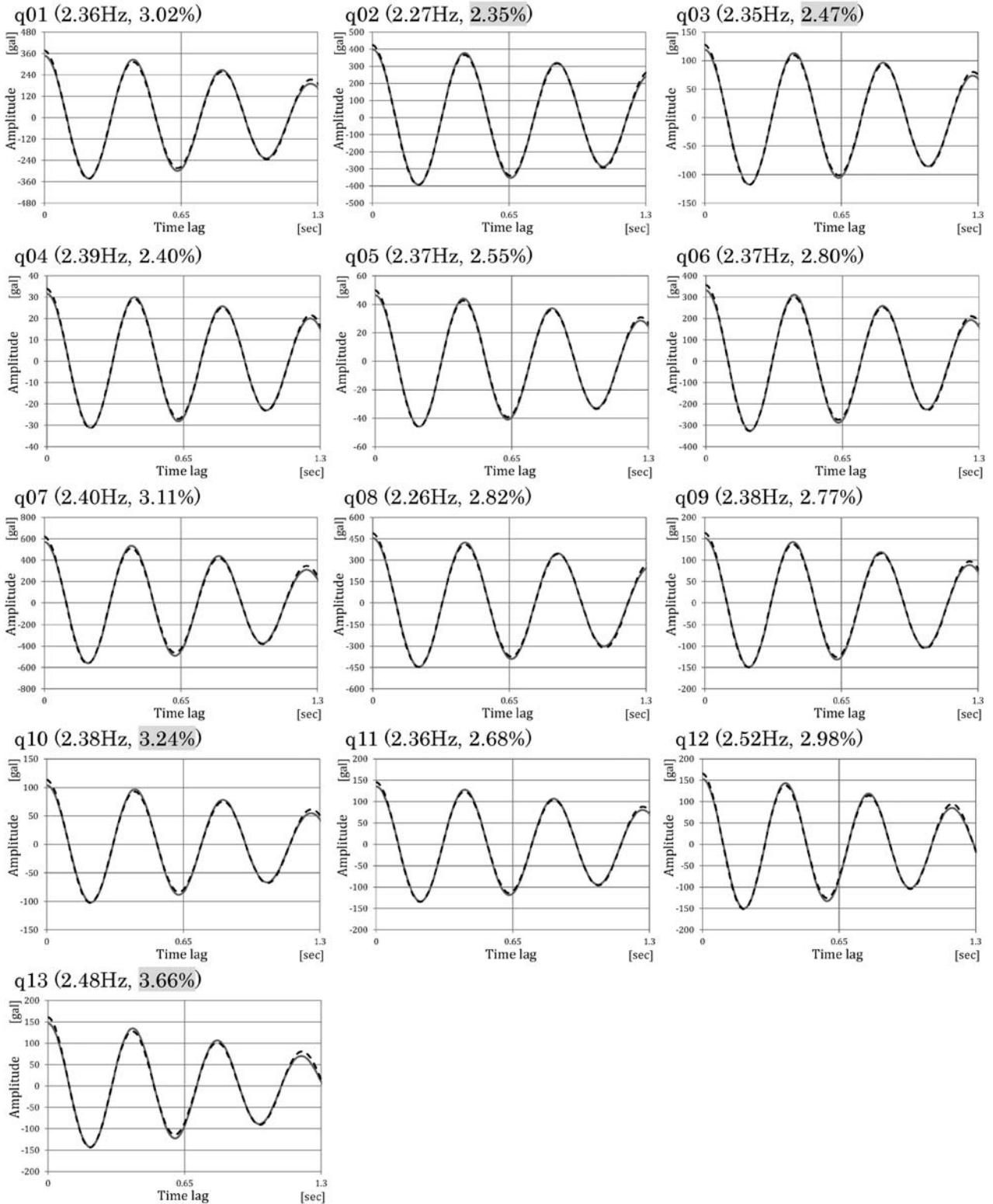


Fig. A2.13 RD waves of NS direction of building KMB15.

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

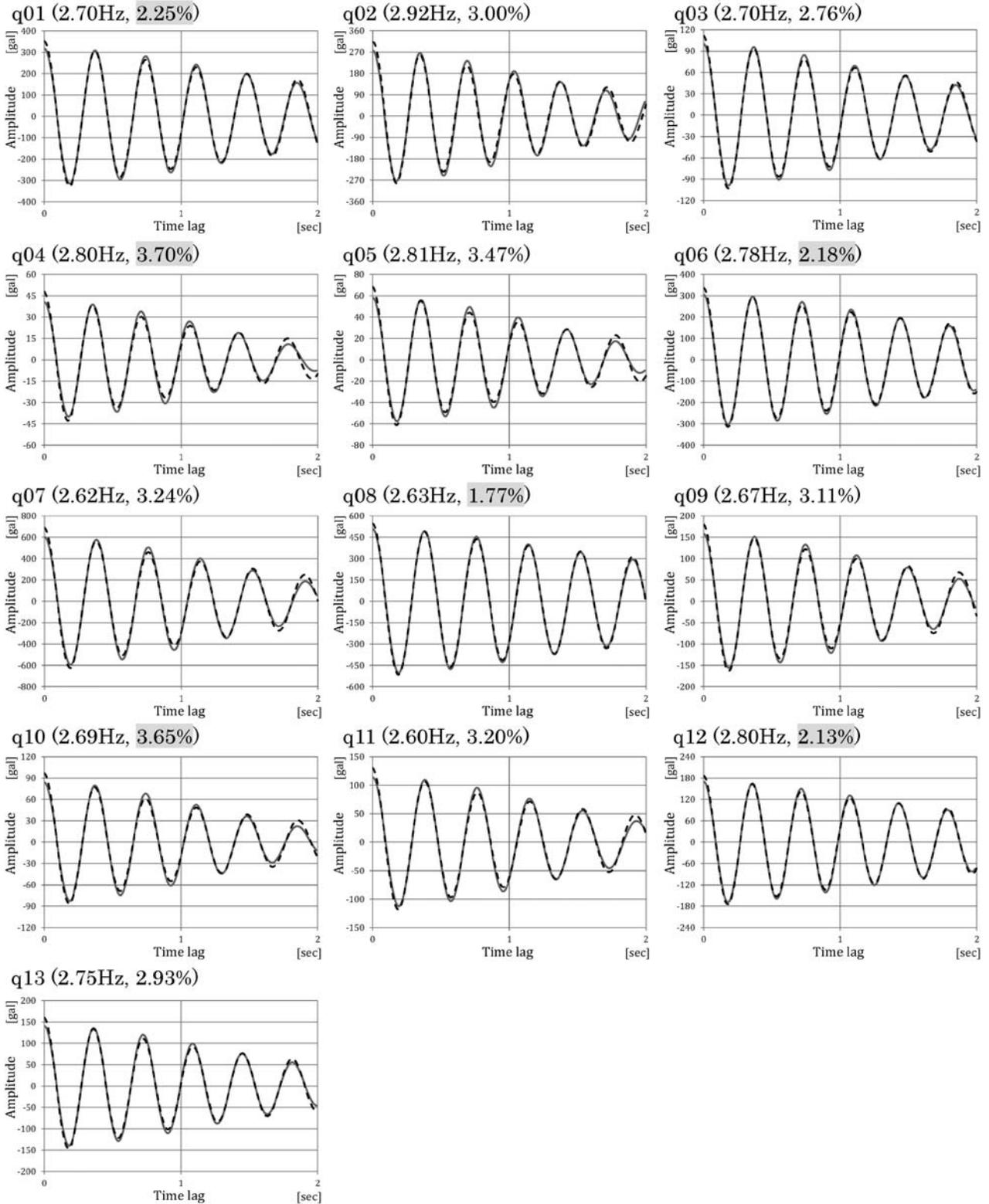


Fig. A2.14 RD waves of EW direction of building KMB15.

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

弱い地震動を用いた建物の減衰定数の推定

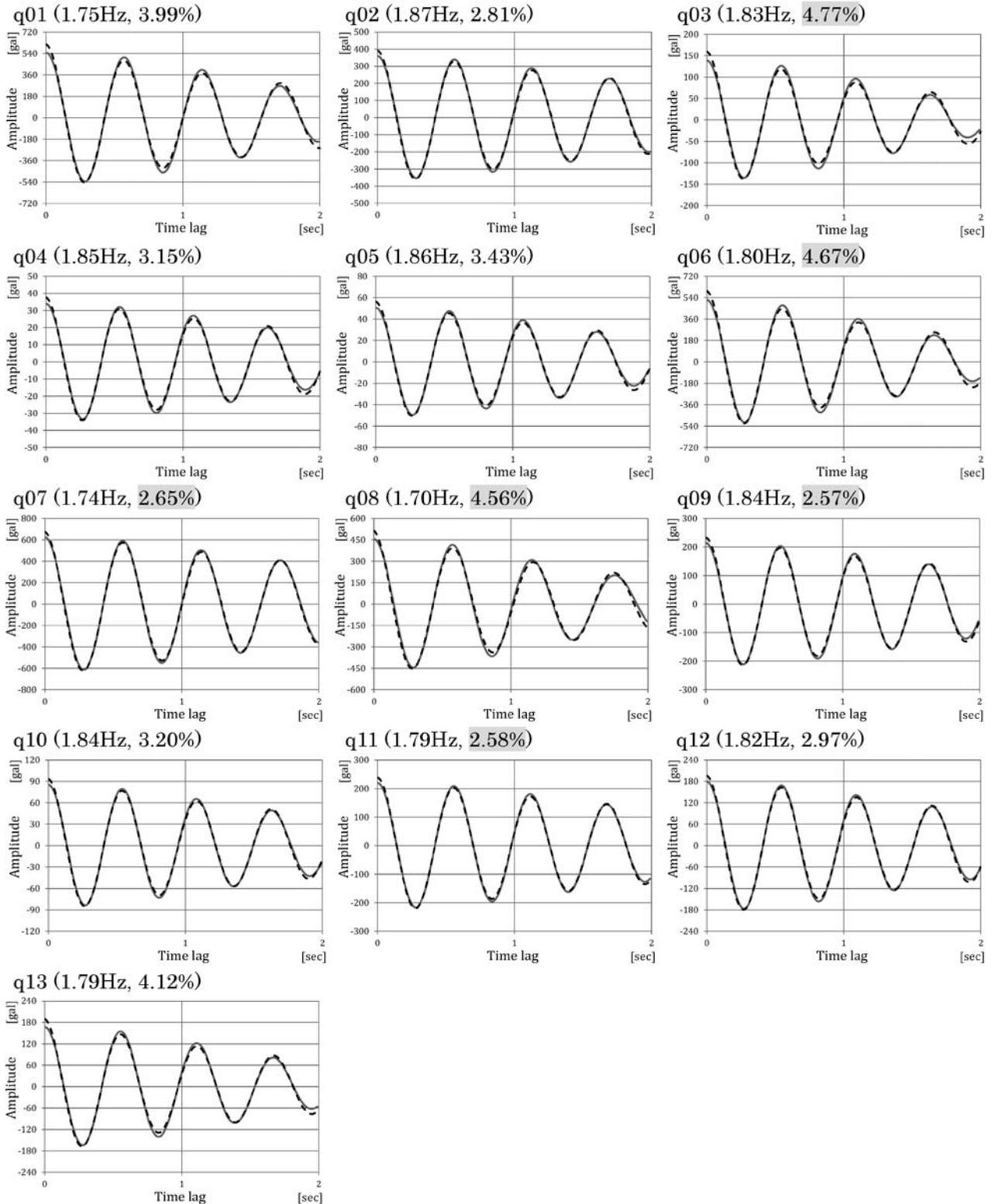


Fig. A2.15 RD waves of NS direction of building KMB16 (Sensor 1).

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

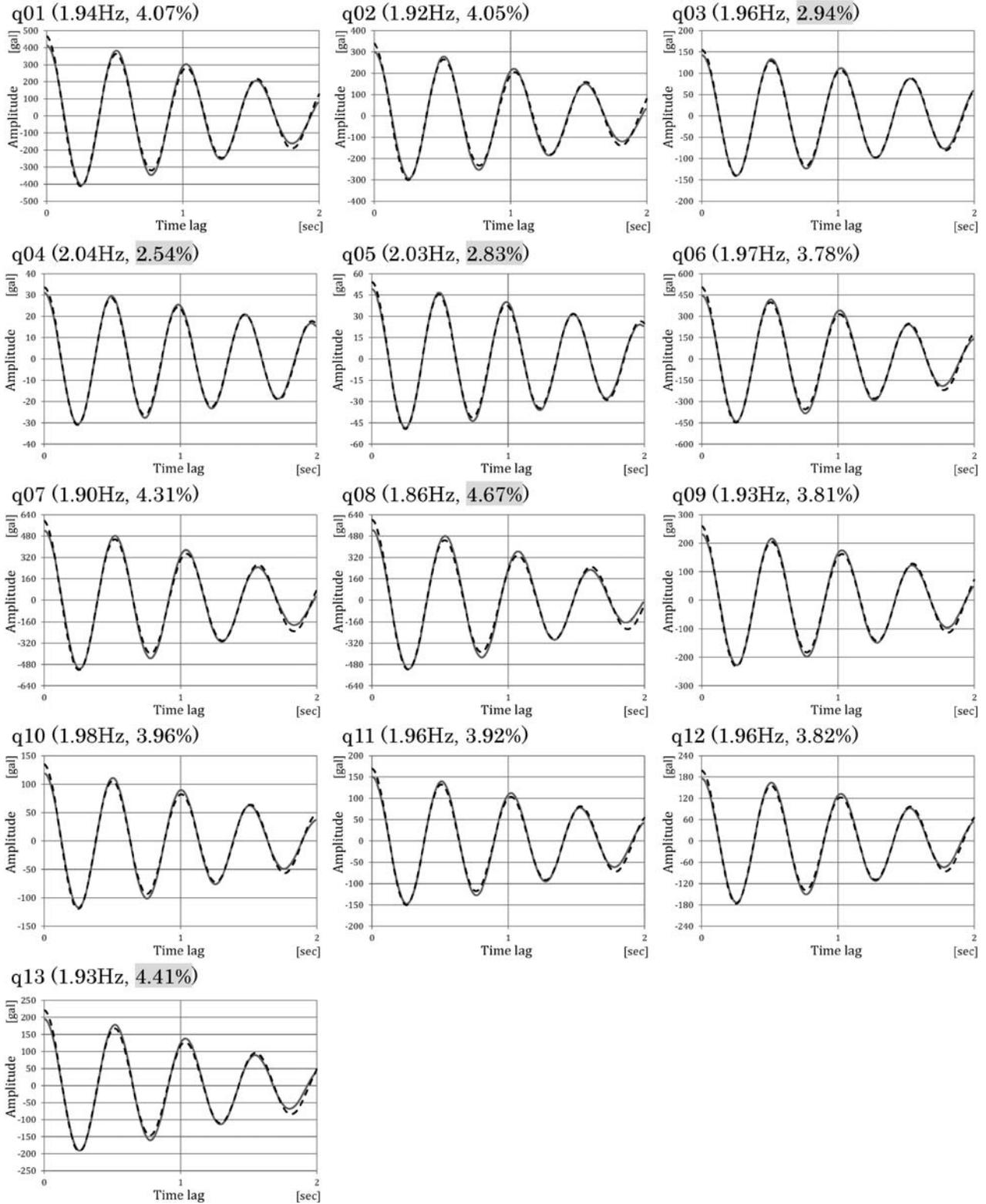


Fig. A2.16 RD waves of EW direction of building KMB16 (Sensor 1).

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

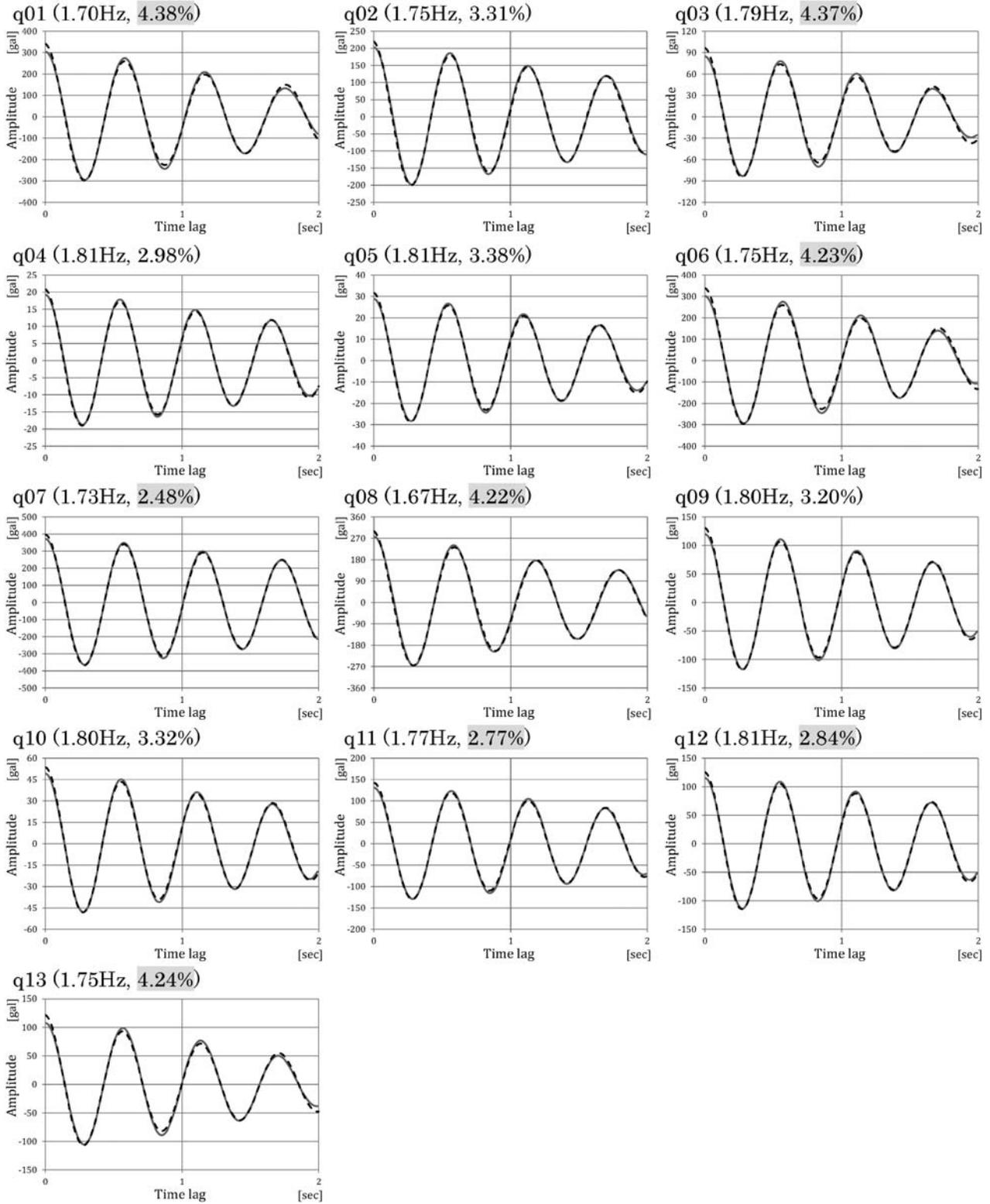


Fig. A2.17 RD waves of NS direction (translation) of building KMB16 (Sensor 2).

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.

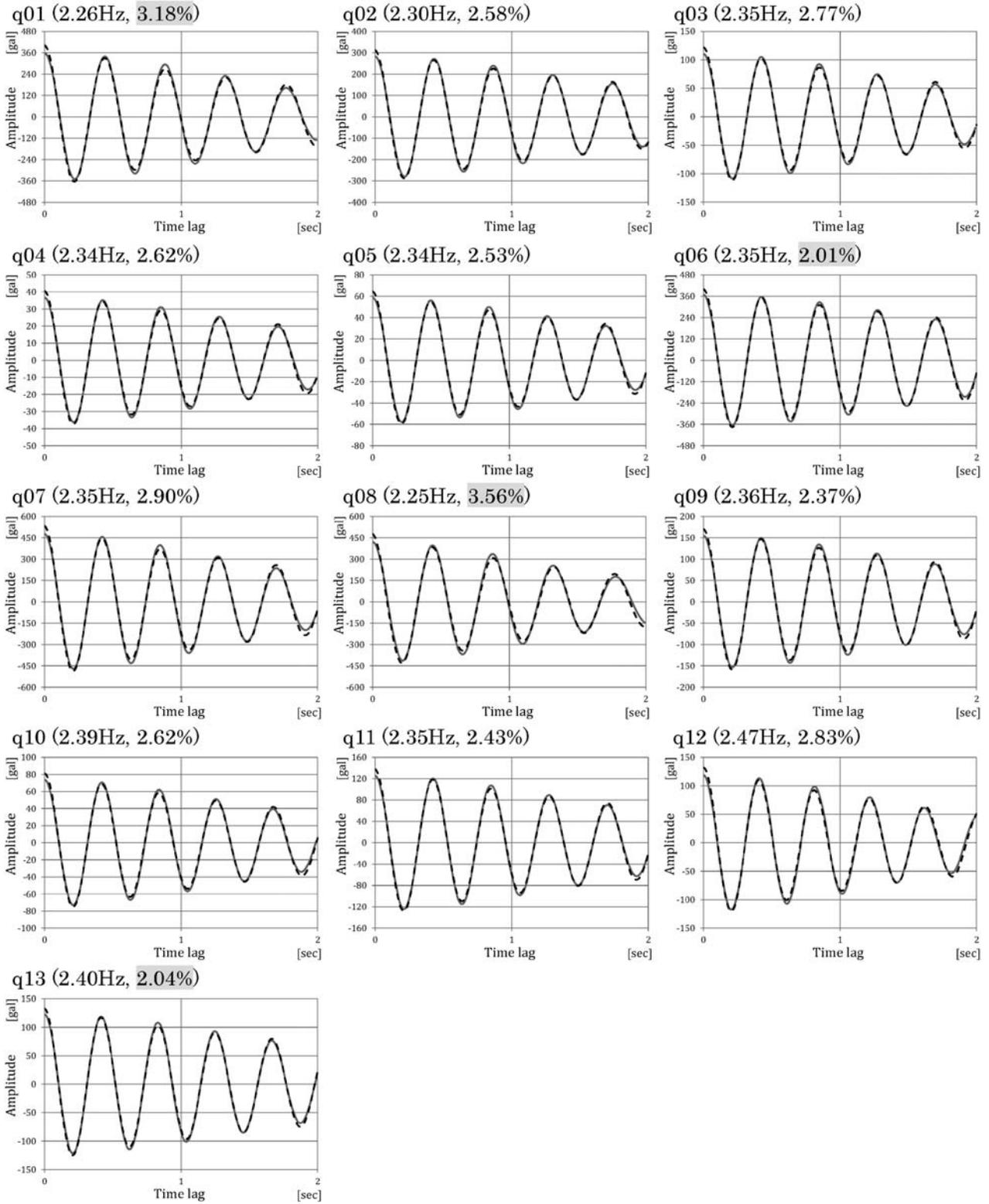


Fig. A2.18 RD waves of NS direction (torsion) of building KMB16 (Sensor 2).

The gray line is RD wave, and the black dotted line is fitted curve calculated by minimum square method. The whole part of RD wave on the graph is used at the time of calculation. The value of damping ratio whose background is gray-colored means that the data are omitted at the time of estimation.