

無電源で動作する地震時最大加速度推定装置の提案

名波 健吾* 松本 星斗* 豊岡 亮洋*

Development of Maximum Acceleration Estimate Device for Seismic Measurement without Electric Power

Kengo NANAMI Hoshito MATSUMOTO Akihiro TOYOOKA

For prompt investigation of damage state of structures, and resuming operation of transportation service, seismic intensity along structures should be identified. There is difficulty, however, to put seismic measurement system with high density, in terms of cost and maintenance. Therefore, in this study, the maximum acceleration estimate device, which is composed of economical and non-electric components, is suggested. The identification accuracy test of the proposed device was conducted using a large-scale shaking table. It was confirmed that the device worked successfully and the exceedance of set acceleration level was possible to be checked visually.

キーワード：地震観測，最大加速度推定装置，振動台実験

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震¹⁾や2016年熊本地震²⁾のように大規模な地震が発生した場合、列車の運行を停止して設備等の点検を行う必要がある。その後の早期の運転再開のためには速やかな点検箇所の把握が不可欠である。

ここで地震の揺れが生じるエリアは広範囲に及ぶことが多く、路線沿線の揺れを高密度かつ迅速に把握することができれば、効率的な被害把握が可能となる。一般に鉄道沿線には高感度な地震計が一定間隔で設置されているものの、設置間隔は路線にもよるが20～40km程度の場合もあり、地震計間における加速度等の揺れの情報を直接取得することは困難である。一方で、高精度な地震計を高密度に設置することは費用面からもメンテナンス面からも非現実的である。

こうした情報の不足を補う方法の1つとして、近隣の地震計の計測値の分布状況から各地点の加速度などを面的に推定する方法がある。例えば、鉄道総研が開発した鉄道地震被害推定情報配信システム(DISER)³⁾では、防災科学技術研究所強震観測網K-NET⁴⁾の観測データを利用して面的に地震動を推定している。

地震計の観測情報の不足を補う第2の方法として、地震計に加えて安価な計測機器を多数配置することにより実測値を取得する方法が考えられる。例えば、近年ではセンサー技術の進歩を反映して、MEMS⁵⁾を活用した観測システムが提案されている。しかし、MEMSを活用した方法は長期間安定して性能を維持できるか不明であり、また電源供給が必要となる等、克服すべき課題が多い。

本研究では揺れの情報を直接高密度に取得する第2の

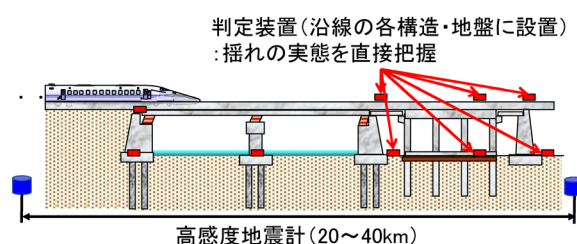


図1 簡易推定装置による高密度な観測のイメージ

($z > a_{in} (= a_L)$ で錘が移動 ⇒ 目視で確認)

z : 入力加速度

a_{in} : 検知加速度の目標値 a_L : 検知加速度

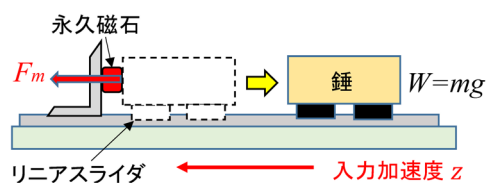
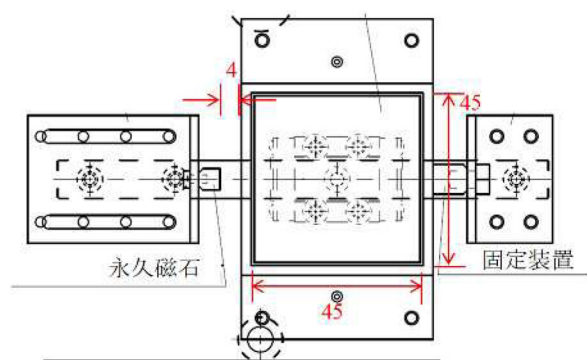


図2 最大加速度推定装置の原理

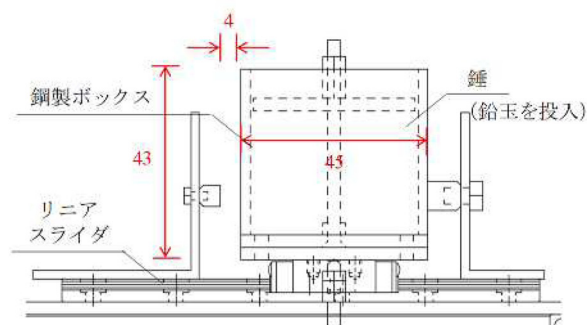
方法(図1)に着目し、外部の電源を必要としない検知装置を開発することとした。無電源で動作させる場合、物理的な機構のみを用いて地震に係る指標を計測できる必要がある。計測対象とする指標については、最大加速度や最大速度、最大変位、SI値などが考えられるが、本検討では最大加速度を検知対象とすることとした。これは、地震時の被害と強い相関関係があり、かつ慣性力として物理的な指標への置き換えが容易なためである。

本稿では以上の方針に基づき、無電源で動作し、かつ単純で安価な機構のみからなる加速度検知装置を提案する。そしてその装置の動作検証を振動台実験により行った結果を示す。

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室



(a) 平面図 (単位:mm)



(b) 側面図 (単位:mm)

図3 今回試作した最大加速度推定装置

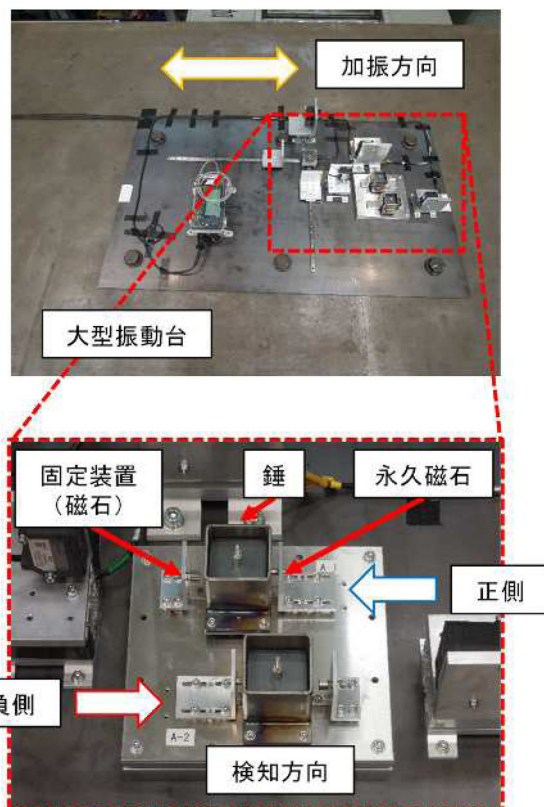


図4 今回試作した加速度推定装置の実況

2. 最大加速度推定装置の概要と試作

2.1 最大加速度推定装置の概要

本研究で提案する最大加速度を検知するための機構を図2に示す⁶⁾。装置に加速度が作用すると、ある閾値を超えた場合のみ錘が動き、その閾値の超過/非超過を容易に検知できる機構となっている。本装置では簡単な物理機構を利用していることから詳細な作用加速度の数値を把握することはできないが、揺れの分布を知るための重要な観測情報である最大加速度がある閾値を超過したかを判別できるだけでも有益である。以後、本装置を最大加速度推定装置と呼ぶ。

著者らは先行の研究において上記機構を有する装置の試作を行っている⁶⁾。本研究では、前記の研究⁶⁾の推定装置の磁石や錘などの部材を変更するなどの改良を行って検知精度の向上を図るとともに、精度検証のための大型振動台試験を行った。

2.2 最大加速度推定装置の構造

本研究で提案する最大加速度推定装置の構造について述べる。推定装置は鉄製の錘、永久磁石、リニアスライダから構成されており、通常時には錘は永久磁石により固定されている。入力加速度の最大値 z が所定の加速度 a_m を超えると、錘が永久磁石から外れて固定装置(磁石)に吸着され、この移動を目視等で確認することで地震時

に所定の加速度 a_m の超過を簡易に検知できる。

上記の原理による最大加速度推定装置は、一方向に力が作用した場合のみ錘が移動して検知判定となる。このため実際に地震動を検知するためには、両方向2基の推定装置が必要となる。入力加速度 z が作用した場合にスムーズに錘が移動できるよう、レール部分には摩擦の少ないリニアスライダを用いた。超過を検知したい加速度 a_m の値は錘の重量ないしは永久磁石の磁力により調整が可能である。永久磁石の磁力の微調整は困難であるため、今回は錘の重量を調整可能な構造とした。

2.3 最大加速度推定装置の試作

先に示した概要をもとに最大加速度推定装置を製作した。推定装置の諸元を図3に、また試作した推定装置の実況を図4に、それぞれ示す。図3のように鋼製ボックス内に鉛玉を投入して密閉することで錘の重量により検知加速度の微調整が可能となっている。これにより後述するように所定の目標加速度 a_m と実際の検知加速度 a_L の誤差を可能な限り小さくできるように配慮した。

今回の推定装置の試作においては、今後の実用化を想定し、装置を構成する部品をすべて安価な市販品とするように配慮した。磁石には、サマリウムコバルト磁石(表1)を用いた。磁石、リニアガイドを含めた推定装置全体の製作費は数千円程度であり、多数導入する必要が生じた場合にもコスト的には十分対応可能であると考え

表1 使用した磁石の吸着力一覧表

種別	メーカー	型番	吸着力 (N)
永久磁石	TRUSCO	TSM G-5	1.5
固定装置		TNM G-8	7.6

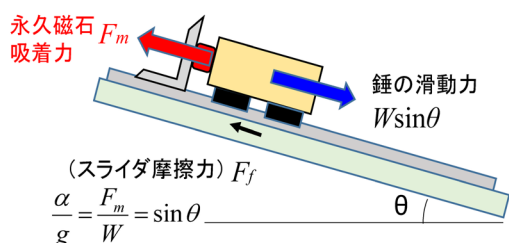


図5 傾斜度 θ を利用した検知加速度 a_L の検定

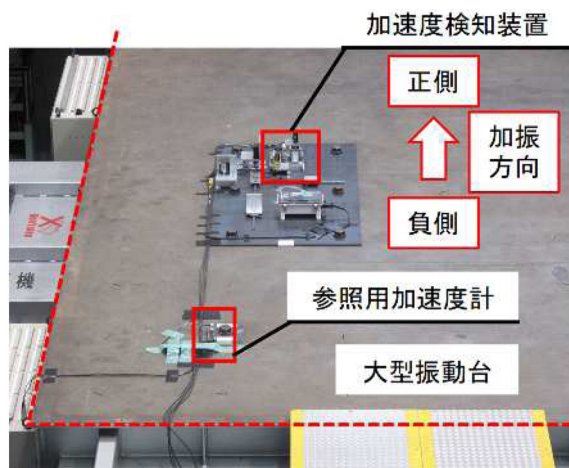


図6 大型振動台上の計測機器の配置状況

られる。また、推定装置の大きさは収納ケースを含めて18cm四方であり、橋梁などの狭隘な部分への設置にも適している。

なお、推定装置は前述のように、一方向のみ検知可能であることから、同一構造で可動方向を逆にした装置を2基設置することで正負いずれかの最大加速度が a_m を超過したことを検知できるようにした。

既往の研究で試作した同装置は、錘が一旦永久磁石から外れた後、固定磁石に吸着する前に再度永久磁石に吸着される誤作動が生じた⁶⁾。これは錘と固定磁石の距離が長いことが一因であったため、再吸着の防止対策を講じた。具体的には、図3のように永久磁石と固定装置の間の距離を4mmと短くすることにより、錘が永久磁石から外れた後、直ちに固定装置に捕捉されるよう調整した。地震動が作用する場合には上述の対策で誤作動の発生確率を十分低くできると考えられる。

以上の方針に基づき製作した最大加速度推定装置の検証試験とその結果について、次章に示す。

表2 傾斜を利用した静的環境下で検定された検知加速度 a_L

推定装置	傾斜度 θ (deg)	検知加速度 a_L (gal)	検知加速度 a_L 平均 (gal)
正側-250(gal)設定	15.25	258	249
	14.71	249	
	14.16	240	
正側-500(gal)設定	30.78	501	485
	29.96	489	
	28.33	465	
正側-750(gal)設定	49.30	743	741
	48.75	737	
	49.30	743	
負側-250(gal)設定	14.98	253	250
	14.71	249	
	14.71	249	
負側-500(gal)設定	30.78	501	495
	30.23	493	
	29.96	489	
負側-750(gal)設定	49.84	749	746
	48.48	734	
	50.39	755	

3. 動作検証試験

3.1 検知加速度の調整

永久磁石の磁力や錘の重量には個体差が生じるため、製作後最初に検知加速度 a_L を検定する試験を実施した。

検定試験は図5に示す傾斜度 θ を有する斜面を用いて行う。推定装置を斜面上に配置し、傾斜度 θ を漸増させ、錘が外れるときの θ を調べる。このとき、永久磁石の吸着力 F_m (N) と、錘 (質量ボックス含む) の重量 W (N) の関係は、 θ を用いて式(1)により表される。

$$F_m = W \sin \theta \quad (1)$$

提案する推定装置ではリニアスライダを用いて摩擦(静止摩擦・動摩擦)を低減することにより、錘の作用慣性力をほぼそのまま永久磁石に作用させることができる(図5の $F_f \approx 0$)。このとき図2で、錘が加速度 a_L で移動するとすれば、重量 W (N) の錘部分に作用する慣性力と永久磁石の吸着力 F_m の関係から、式(2)が得られる。

$$F_m = W a_L / g \quad (2)$$

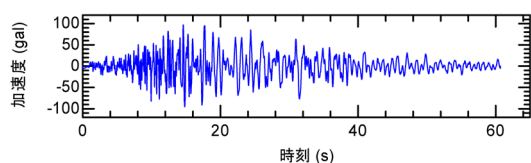
ただし、 g は重力加速度 (=9.8m/s²) である。

式(1)と(2)から、加速度推定装置が動作する場合の入力加速度 a_L は式(3)で算出できる。

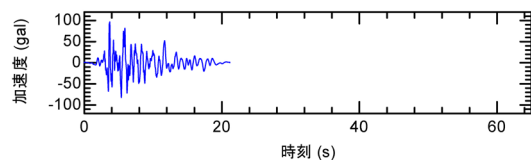
$$a_L = F_m g / W = g \sin \theta \quad (3)$$

表3 加振条件

地震波形	地震動入力条件	最大加速度 (gal)	ケース
地表面想定：スペクトルⅠ	+1 倍 (正方向)	100, 200, …, 800	8
	-1 倍 (負方向)	100, 200, …, 800	8
地表面想定：スペクトルⅡ	+1 倍 (正方向)	100, 200, …, 800	8
	-1 倍 (負方向)	100, 200, …, 800	8
高架橋上想定：スペクトルⅠ	+1 倍 (正方向)	100, 200, …, 1200	12
	-1 倍 (負方向)	100, 200, …, 1200	12
高架橋上想定：スペクトルⅡ	+1 倍 (正方向)	100, 200, …, 1000・1200・1500	12
	-1 倍 (負方向)	100, 200, …, 1000・1200・1500	12



(a) L2 地震動スペクトルⅠ



(b) L2 地震動スペクトルⅡ

図7 地表面波形を想定した入力波形（最大加速度を100galに調整した場合）

式(3)より、検知加速度 a_L が所定の目標加速度 a_m となるように錘の重量 $W(N)$ を調整する。

今回の試験では検知加速度 a_L の目標値を 250, 500, 750(gal) と定め、可能な限り a_L に近くなるよう錘の重量を調整した。以上の手順により、傾斜度を利用した静的環境下において検定された検知加速度を表2に示す。

3.2 加振試験概要

次に装置に地震波が作用した場合の動的環境下における動作と精度の検証のため、鉄道総研の大型振動台を使用した加振試験を行った。図6に試験状況を示す。加振は地震波を用いた1軸加振とし、加振に際しては最大加速度を100(gal)から漸増させて段階加振を行って、各加振段階での推定装置の動作状況を確認した。以下に試験の詳細を示す。

3.3 加振条件および計測条件

入力波形は装置を地表に設置することを想定した2波(図7, 鉄道の耐震設計標準⁷⁾記載のL2地震動スペクトルⅠ・Ⅱ)および一般的な鉄道高架橋上への設置を想定した等価固有周期0.5(s)の構造物天端での弾性応答波

表4 加速度推定装置の設定条件

加速度推定装置の設置方向	設定する検知目標加速度 (gal)	
正側	(1) 500	(2) 750
負側	(1) 500	(2) 250

形2波を用いた。大型振動台の最大変位の制約から、前記の4波形にはバンドパスフィルタ処理を施し、周波数帯域0.4~20(Hz)に制限した波形とした。この条件で100(gal)から段階的に加速度を漸増させて加振を行った。

推定装置は一方向のみの加速度が検知可能であるため、検知方向が入れ違いとなるよう、図4, 図6のように2基の推定装置(正側・負側)を設置した。各波形について一連の加振終了後、加振波の正負を入れ替えたケースも実施した。各加振ケースの条件を表3に示す。推定装置の動作状況は、各試験後に目視で確認し、振動台上に設置した加速度計の最大値と比較することで動作状況を検証した。なお、錘の動作状況は錘のレーザー変位計を用いた計測からも判定できるようにした。データ計測はサンプリング周波数1000(Hz)で行った。

加振試験に使用した加速度推定装置の設定を表4に示す。試験実施の制約により、250(gal)設定については負側、750(gal)設定については正側に設置した推定装置のみで試験を実施した。500(gal)設定については正側・負側の両方に対して試験を実施した。

4. 試験結果と考察

4.1 加振結果の概要

表3の波形による表4の設定の加速度推定装置の加振試験結果から得られた最大加速度の値と動作状況の関係を図8~図11に示す。図の横軸に示した最大加速度の値は振動台上の加速度計により計測された実測値である。図の縦軸は動作確率を表しており、各プロットは実際の錘の動作状況について、試験後の目視により動作した場合を

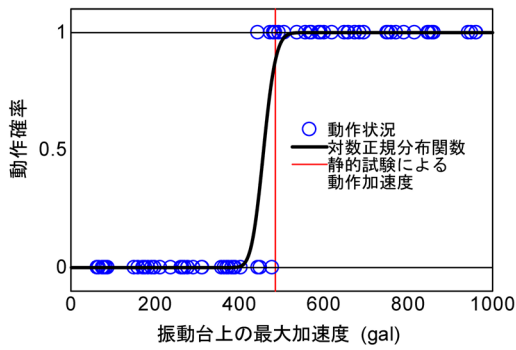


図8 推定装置の動作状況（正側； $a_L \doteq 500$ (gal)）

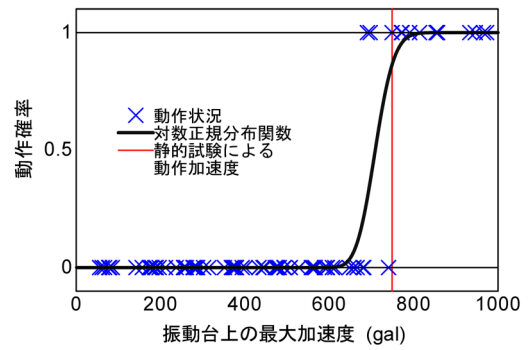


図9 推定装置の動作状況（正側； $a_L \doteq 750$ (gal)）

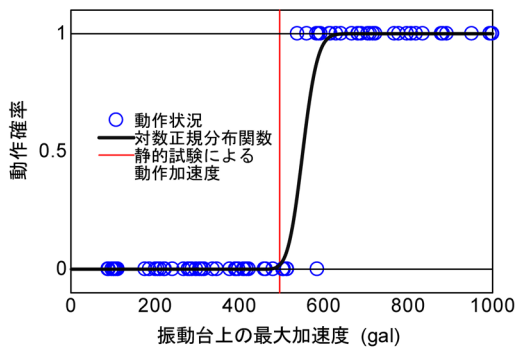


図10 推定装置の動作状況（負側； $a_L \doteq 500$ (gal)）

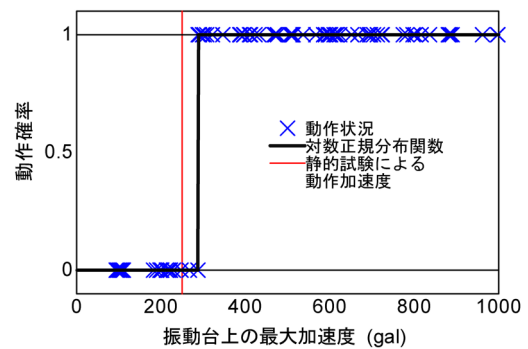


図11 推定装置の動作状況（負側； $a_L \doteq 250$ (gal)）

表5 推定装置の動作状況の総括表

	推定検知 加速度 (gal)	最低動作条件		対数正規分布		
		最低動作 加速度 (gal)	誤差 (%)	exp(対数平均) exp(μ) (gal)	誤差 (%)	対数 標準偏差 σ
正側-500(gal)設定	485	481	0.82	457	5.75	0.050
正側-750(gal)設定	741	749	1.08	709	4.32	0.050
負側-500(gal)設定	495	588	15.8	550	11.1	0.050
負側-250(gal)設定	250	288	15.2	288	15.2	0.000

1.0、動作しなかった場合を0.0として2値でプロットした。

この結果から、一定レベルの最大加速度が作用する場合に検知装置が動作する傾向が見られ、概ね作用する最大加速度の増加に伴い検知装置が動作するケースが増加することが確認できる。しかしながら境界領域では同程度の最大加速度が作用した場合においても検知となる場合と非検知となる場合があり、検知状況にばらつきがある。このばらつきと動作状況を次に定量評価する。

4.2 提案する最大加速度推定装置の動作状況

図8～図11に示される計測結果を表5のように整理し、各設定ケースについて考察を行う。表5には3.1節で示した静的環境下での傾斜度を利用した検定試験から得られる検知加速度 a_L の値を示しており、これと動的

試験から得られた計測値を比較する。

まず、各試験ケースの最低動作加速度について確認する。ここで、最低動作加速度とは、加振試験においてこの加速度以上であれば全ての試験ケースで推定装置が動作した下限の加速度と定義する。実際に当該の最大加速度推定装置を実用化するためには、ある目標検知加速度で確実に動作させることにより、加速度の設定値の超過を判断する必要がある。従って実用化の際には最低動作加速度と推定検知加速度の差は可能な限り小さいことが望ましい。この最低動作加速度と検知加速度 a_L の比較を表5に示す。 a_L については図8～図11にも赤線で示す。

表5から、正側の推定装置の動作加速度は3.1節の静的試験で確認された検知加速度と比較的近い値となっており、良好な精度で動作したことが確認できる。一方で、

負側の推定装置の動作加速度が静的試験と比較して大きめに出ることが確認された。これは、図 10 および図 11 において、推定値を示す赤線の右側にも非検知を示す 0.0 のプロットが散見されることから確認できる。

上記の通り正側と負側に設置した 2 基の推定装置の間で静的試験との誤差に差異が見られる結果となった。このことから、両者の間に個体差が存在する可能性が考えられる。この原因として、正側と負側の推定装置の間で、リニアスライダの摩擦、錘の固定状況、錘と永久磁石の吸着状況等に差異が存在する可能性が考えられる。これを踏まえ、当該の推定装置の実用化に際しては、今回の試験から得られた誤差を余裕代として推定検知加速度を設定することが考えられる。具体的には表 5 の最低動作条件と推定検知加速度の誤差は最大で 15(%) 程度であることから、静的試験から得られる推定検知加速度をある程度割り増すことで安全側に動作加速度を設定できる。

次に、図 8～図 11 に示されるように加速度推定装置の検知状況には一定のばらつきが生じている。この動作状況のばらつきの定量化を目的として、対数正規確率密度関数の累積分布関数で動作状況のプロットを近似した⁸⁾。動作確率が対数正規分布関数 $f(x)$ の累積分布で表されるとき、 $f(x)$ は入力波の最大加速度 x 、対数平均 μ および対数標準偏差 σ を用いて式 (4) で計算できる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left\{-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (4)$$

なお、負側 -250(gal) 設定については、動作状況にばらつきが存在しない ($\sigma=0.000$) ため厳密には式 (4) で確率分布を算出できないが、便宜上極めて小さな対数標準偏差 σ を与えることで図 11 の確率分布関数を作成した。

式 (4) を用いて導かれる対数正規分布関数を図 8～図 11 に示す。また自然対数の底 e の対数平均 μ のべき乗、および 3.1 節の静的試験の結果から得られる値との誤差を表 5 に示す。対数標準偏差 σ も併せて表 5 に示す。

図 8～図 11 においては、対数正規分布関数が直立に近い形状をしていることから、検知加速度のばらつきはそれほど大きくないといえる。

4.3 加振結果の総括

加振試験結果を要約すると、次の通りである。

- (1) 単純な物理機構のみを利用した推定装置により、最大加速度を検知することが可能である。
- (2) 検知する下限の加速度には一定の誤差が確認された。
- (3) 推定装置による検知加速度のばらつきは比較的小さく、良好な加速度の検知が可能である。

上記の誤差を見込んで検定を行うことで、広域の加速度分布を検知するシステムを構築できると考えられる。

5. 結論

本研究では、安価かつ無電源で動作する最大加速度推定装置を製作し、精度検証として大型振動台を用いて実スケールの地震動を作用させた。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 簡単な物理機構のみを用いて無電源で動作する最大加速度推定装置を提案し、安価で入手が容易な市販品のみを用いて試作した。
- (2) 最大加速度推定装置に対して大型振動台を用いて加振し、実際の動作状況を確認した。
- (3) 加振試験の結果、推定装置間での個体差は存在するものの、検知加速度のばらつきは小さく良好に加速度を推定できることが確認された。

以上より、今回改良試作した構造で設定加速度の超過を検知する装置の動作を検証できた。今後は実用化を視野に入れ、長期的に推定装置が性能を維持できることの確認、および推定装置の個体差の把握を目的とした試作数を増やしての検証を行っていききたい。

文献

- 1) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会：東日本大震災合同調査報告 土木編 4 交通施設の被害と復旧，2018
- 2) 土木学会地震工学委員会：2016 年熊本地震被害調査報告書，2017
- 3) 岩田直泰，坂井公俊，山本俊六，室野剛隆，青井真：鉄道地震被害推定情報配信システム (DISER) を利用して素早く運転を再開する，RRR，Vol.77，No.2，2020
- 4) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：強震観測網 (K-NET, KiK-net) について，https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/kyoshin_index.html (参照日：2020 年 4 月 20 日)
- 5) 関谷英彦，木ノ本剛，田井政行，古東祐介，丸山收，三木千壽：MEMS 加速度センサを用いた二箇所同時変位計測に基づく支承部の健全度評価の試み，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol.73，No.2，pp.1_649-1_660，2017
- 6) 豊岡亮洋，布川博一：高密度な被害把握のための最大加速度推定装置の開発，構造工学論文集，Vol.65A，pp.145-153，2019
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012
- 8) 望月智也，中村孝明：多項反応モデルによる地震時損傷度曲線の統計的推定，第 2 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，pp.47-50，2000