

スマートデバイスを用いた構造の地震応答計測のための性能確認実験

党紀¹・菊池友介²・Ashish SHRESTHA³・王欣⁴

¹正会員 工博 埼玉大学助教 理工学研究科（〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255）

²非会員 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻（〒989-3122 宮城県仙台市青葉区栗生3-5-6）

³Nonmember, graduate student of Saitama University (255 Shimo-Ohkubo Sakura District Saitama City, 338-8570)

⁴非会員 東北大学 災害国際研究所助教（〒989-3122 宮城県仙台市青葉区栗生3-5-6）

1. はじめに

兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震などの大地震における橋梁などの構造物の損傷に関する知見に基づき、日本の耐震設計は今まで大きく進展してきたが、地震による構造物の破壊原因の解明や破壊のシミュレーションなどに不可欠である実測データは十分には得られているとは言えない。

今後、レジリエントな社会を目指して、近い将来での発生確率が低い大地震に備え、高速道路システムの地震時被害の早期把握や、地震後点検の効率化の観点から、広域で高密度の観測点で構成される危機管理システムなどは有用である。

免震建築構造などに振動観測が広がっていることに比べ、設備費や維持管理費が高額となり得るため、振動観測システムを有する高速道路高架橋は多くない。長期的な視点から、高速道路高架橋の地震応答を観測し、貴重な地震応答データを多く確保するためには、精力的な観測システムの整備と実用性の高いデータの活用方法の検討は重要な課題であり、その実現には、安価で維持しやすい観測デバイスが不可欠である。

2011年から急速な普及を果たしたスマートデバイスには、小型加速度計や小型GPSなどの小型電子計測用装置(MEMS)が搭載されており、従来では高価なMEMSの値段が安くなるとともに、高性能製品の開発と汎用化も爆発的に進歩している。

沼田らは振動台実験を行い iPhone 3GS の分解能は 18gal, iPad の分解能は約 1gal であり、ある程度の精度があることを確認していた¹⁾。Alessandro らは iPhone 4 に使われた MEMS 加速度計 LIS331DLH に対

して、性能検証を行い、その周波数性能や位相特性においてレファレンス地震計 EpiSensor とほぼ差がないことを確認しているが、計測した振幅が実振幅を過小評価していることを指摘している²⁾。

防災科研では、スマートホンの内蔵加速度計を用い、センサークラウド技術を用いた建物の地震応答情報共有システムを開発し、システムの精度検証や、地域住居での実測まで多くの結果が得られている^{3), 4)}。

アメリカ地質研究所(USGS)では、スマートホンにつける衛星測位システム GPS を用い、アメリカのカリフォルニア州の緊急地震速報システムを補助することに精力的な研究を進んでいる⁵⁾。なお UC Berkley のグループでは、人間が携帯しているスマートホン(Android system)を用いて、人間の動きと振動伝達を取り除き、地震動に返還する試みも行っている⁶⁾。Cheng らはこのような個人から計測した独立したデータからできるだけ多くの情報を読み取るような方法を開発している⁷⁾。

本研究では、高速道路高架橋の維持管理のスマート化の一環として、スマートデバイスを用いる構造地震時挙動のリアルタイム広範囲かつ高密度モニタリングを目的として、まず簡易な振動計測システムを開発し、とその性能の検証するための小型振動台による動的実験を行った。

2. スマートデバイスを用いる振動計測

(1) スマートデバイスと計測ための開発環境

MEMS加速度計などのセンサー機能に加え、操作

システムと計算，プログラム機能を有するスマートフォンやタブレットなどは，大量生産されており，安価な振動観測の機器として利用できると考えられる．このような機器は，現在多くあるものの，本研究ではiPod Touch，iPhone 5，iPhone 5s，iPhone 6，iPad Air2をスマートデバイスの例として検討する．

これらのスマートデバイスを用いて，加速度計測やデータの転送などを実施するために，まず，iOSアプリケーション開発用プログラム環境Xcodeを使用し，Object-Cプログラム言語を用いた振動計測用アプリケーションの開発を行った．

加速度計測アプリケーションは，Apple社が公開しているフリーサンプルコードMotionGraphs⁸⁾に基づいて作成し，加速度記録へのアクセス，図面表示の機能のほかに，時間データ，割り込み計算，データのファイル保存と転送などの機能を実装した．

(2) データの獲得と保存

計測システムにおいて，データの獲得から保存されるまでの流れを図-1に示す．まず，デバイスのアプリプログラム内で，サンプリング周波数に決まった微小時間間隔ごとに，内蔵MEMSに經由して，センサーから3軸加速度や時刻などの計測データを獲得し，これを一時的にメモリ中に一時的に保管する．

メモリの中に保管しているデータは，操作あるいはトリガーによって，計測が起動される．計測中では，メモリでは一時的に保管しているデータを永続化を図るデータとして，このデータに関して，記録場所，開始時間などさまざまな情報を用いた計測データを用い，計測終了時に，ローカルフォルダに永続に保管できるファイルに，計測開始時間をファイル名として保存する．

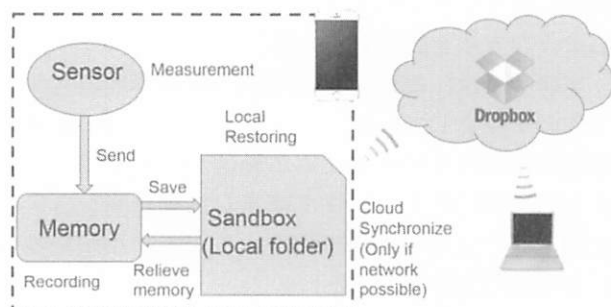


図-1 データの獲得とサーバ同期

デバイスのローカルフォルダにあるファイルは，インターネット条件が整えているときに，クラウドサーバに同期する．今回は，即時同期機能が優れた

Dropboxをクラウドサーバとして用いた．Dropboxのサーバと通信するために，Dropboxが公開した同期用API (Application Programming Interface) Sync API⁹⁾を用いた．

(3) 簡易計測

簡易な計測を行うための操作画面は図-2に示す．



図-2 簡易計測の操作画面

Recordボタンを押すと，加速度データを記録し，もう一度ボタンを押せば，記録をローカルフォルダであるSandboxに保存し，サーバにもアップロードする．なお，Sandboxにあるデータファイル，ファイルの中身の確認，データファイルのメール送信，サーバへの同期，データのFFT解析やフーリエスペクトル図の作成などの機能も備えている．

(4) 長期観測

また、長時間に渡る観測では、計測したデータサイズが膨大になるため、長期観測の場合、60秒ごとに一つのデータファイルを自動的に保存し、サーバに同期する。これを上記の簡易観測と別に、簡易計測の外形とほぼ同じである長期観測の操作画面を設けている。これによって、インターネット環境を整備している場合、長期間にわたって連続的に振動をモニタリングすることができる。

(5) トリガーを用いる地震動観測

スマートデバイスに装備しているMEMS加速度計の分解能やサンプリングレートが高性能の微動計より劣っているため、現段階では、常時微動観測より地震動や構造物の地震応答などの振幅の大きい振動観測が実現しやすい。本研究では、実務的な構造観測のために、トリガーを用いる地震動観測の機能の開発を試みた。

プログラムは60秒のデータを常時バッファしており、トリガーとして、バッファデータのPGAを20gal以上であれば記録を始めるとしている。

3. 小型振動台による調和加振実験

構造物の地震応答観測を目的としていないスマートデバイスに対し、振動計測の妥当性と信頼性を検証するために、まず、小型振動台を用い、さまざまな振幅と周波数を有する正弦波を加振して、スマートデバイスが加速度計として、信頼できる計測範囲を把握する。

(1) 実験対象

実験に用いたスマートデバイスは表-1に示すように、Apple社製のスマートデバイス5種類を用いた。そのうち、より古いiPhone 5 と iPod Tough（第3世代）には文献1)と文献2)にも用いられたSTMicroelectronics社製のLIS331DLHが使われているが、より最近のiPad Air 2とiPhone 6では、表に示すように、2種類のMEMS、MPU-6500およびBMA280を搭載しており、用途によって、操作システムは自動に最適のものが選ばれる。

各MEMS加速度計の基本的特性値を表-2に示す。MPU-6500の分解能が0.06galになっており、一番精度の高いものと思われる。ただし、スマートデバイスを用いて、構造または地震動を計測するに当たって、MEMSの性能のほか、デバイスのシステム

としての、操作システム(OS)、計算能力を決めるCPUとメモリ、ユーザが開発した応用アプリなどの性能も影響される。信頼性のある計測結果を得られるかはさまざまな要因に作用されており、その実験で得られたデータを用いた検証が重要である。

表-1 正弦波加振実験の試験体

試験体	種類	iOS	MEMS型番
iPad Air2	Tablet	8.1.1	MPU-6500+BMA280
iPhone6	Smart Phone	8.1.2	MPU-6500+BMA280
iPhone5s	Smart Phone	8.1.1	BMA220
iPhone5	Smart Phone	8.1.1	LIS331DLH
iPod touch	Media Player	8.1	LIS331DLH

表-2 各MEMS加速度計の特性値

MEMS	Digital Resolution (bit)	Resolution (mg)	Sensitivity (LSB/g)
LIS331DLH	12	1	1024
BMA220	8	15.6	64
BMA280	14	0.244	4096
MPU-6500	16	0.0610	16384

(2) 載荷装置および加振方法

前述したアプリを各スマートデバイスに実装し、デバイスを図-3に示す小型振動台（サンエス製）に乗せ、図-4に示すファンクションジェネレータにより正弦波形を発生し、アンプを使って振幅を調節し電磁式振動台を駆動して加振を行う。

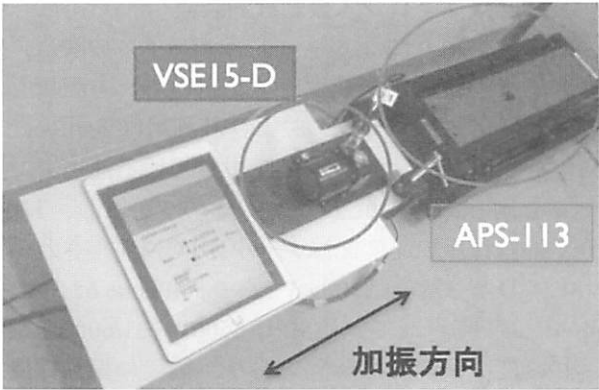


図-3 小型振動台の調和加振

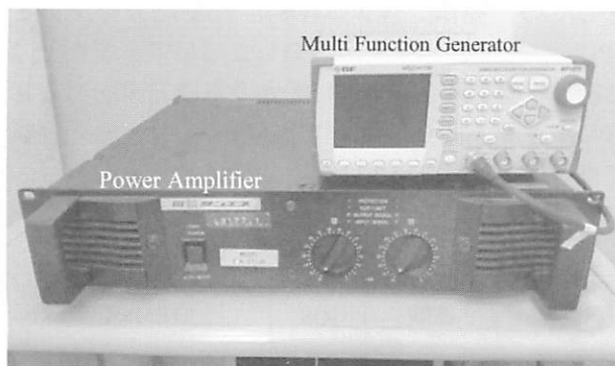


図-4 加振用ファンクションジェネレータとアンプ

正弦波加振では、デバイスの幅方向をX方向として1方向の加振を行う。デバイスの方向を変えて加振してみたところで、その結果は大差がないことを確認している。

加振正弦の周波数は、表-3に示すように、0.2Hz, 0.3Hz, 0.5Hz, 1Hz, 3Hz, 5Hz, 10Hzとし、振幅は加振装置の最大振幅に限度があったため、 $\pm 10\text{gal}$, $\pm 50\text{gal}$, $\pm 100\text{gal}$ で実験を行った。ただし、長周期の0.2Hz～0.5Hzにおいては、振幅10galのみの加振を実施している。

表-3 正弦波加振条件

	Frequency(Hz)							
		0.2	0.3	0.5	1	3	5	10
振幅(gal)	±10	○	○	○	○	○	○	○
	±50	-	-	-	○	○	○	○
	±100	-	-	-	○	○	○	○

(3) 高精度レファレンス振動計測装置

図-3に示すように、スマートデバイスの隣に、東京測振社のサーボ型速度計（VSE15-D）を配置し、また図-5に示すデータログおよび計測用PCを用いた高精度の振動計測システムを使用している速度センサーで計測した速度値をデータログに送信し、1次微分で得られた加速度記録データがPCに保存される。

VSE15-Dの分解能は 10^{-5}gal であり、iPhone 6およびiPad Air 2に使われているMPU-6500の約1/6000となり、高精度な振動計測装置であり、橋梁の振動観測や地盤の微動観測なども使われている。本研究はVSE15-Dをレファレンスセンサーとして用いる。



図-5 レファレンス計測システム（東京測振社製）

(4) サンプリング周波数のずれと補正

スマートデバイスとレファレンス計測装置のサンプリング周波数を100Hzとし、計測レンジ $\pm 2\text{g}$ と設定し、振動台に載せ、上述した正弦波加振を計測した。iPod Touchで計測した振幅10gal周波数1Hz加速度波形とそのフーリエ振幅スペクトルの一例を図-6に示す。

図に示すように、高精度なレファレンスセンサーとスペクトル（図中赤線）とスマートデバイス（図中青線）で計測した波形が概ね一致している。ただし、時間とともに、波形のずれが見られている。同じ現象は、ほかのデバイスにもある程度見られている。

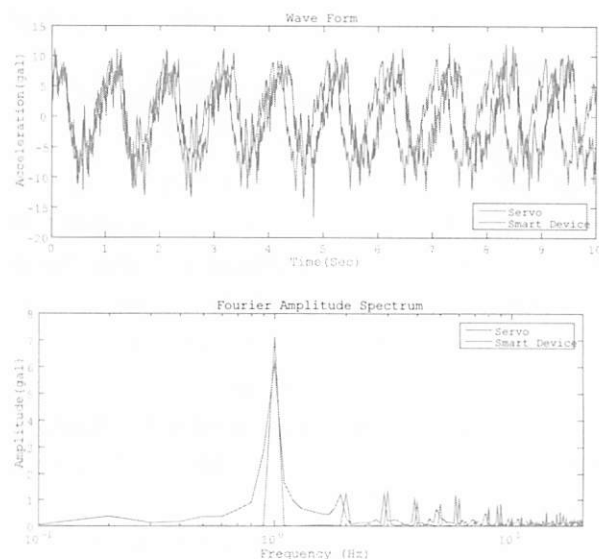


図-6 誤差の大きい iPod Touch の計測結果(振幅 10gal, 加振周波数 1Hz)

計測した波形の時間のずれの原因は、計測したデ

一タの間の時間間隔を調べたところ、レファレンス計測装置の実測サンプリング周波数が設定通りの100Hzである一方、スマートデバイス、特に iPod Touch では計測データの時間間隔にバラツキが見られており、これによって実測したサンプリング周波数が実際に変動していることが分かっている。

秒ごとに、iPod Touch のサンプリング周波数を数分間の観察し、その結果を数えた結果を図-7 の確率紙に示している。

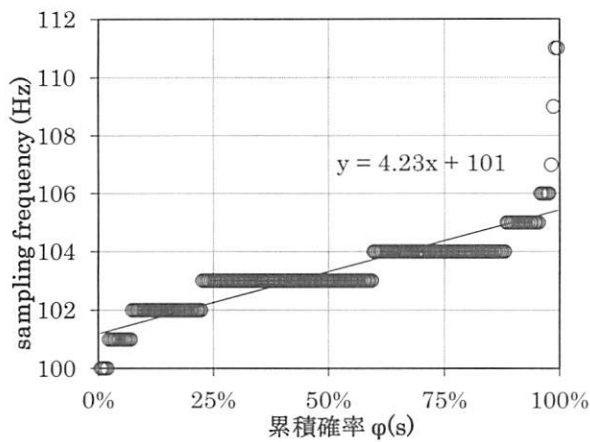


図-7 iPod Touchのサンプリング周波数のバラツキ

横軸の累積確率は、各秒の結果をサンプリング周波数の昇順で並び、順位番号を数えた秒数で除することで得られている。図に示すように、サンプリング周波数は設定した100Hzより上回っており、正規分布のようになっている。各デバイスの実測サンプリング周波数の確率分布を調べ、その平均値と標準偏差を図-8に示す。

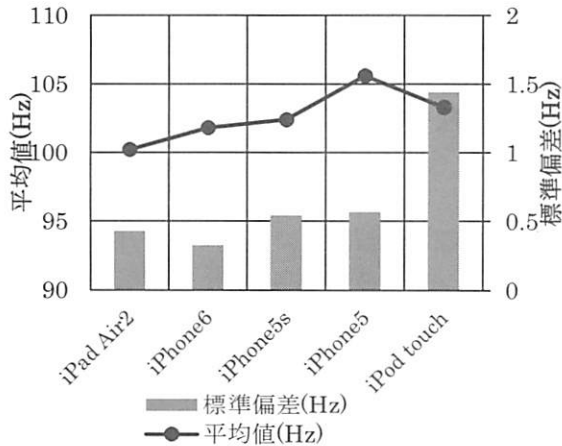


図-8 各試験体のサンプリング周波数特性

図に示すようにデバイスごとの平均サンプリン

グ周波数が異なっており、そのうちiPad Air2はほぼ誤差のない平均値と少ないバラツキで安定で正確にサンプリングしていることが分かる。一方、iPod Touchの平均値も設定目標より大きく、バラツキも大きく、差が大きく不安定なサンプリングをしている。なお、同図から、iPhone 5s以降のスマートデバイスなら、より信頼できる計測をしていることが分かる。

実測したサンプリング周波数の平均値を用いて、時間刻みを設定するようにデータを補正した。補正後の加速度波形は、レファレンス計測装置と重なっているように合致しており、時間遅れが解除されている。なお、フーリエ振幅スペクトルにおける卓越周波数もほぼ差がないが、卓越周期の振幅において、図-9に示すように、低周波数領域において、若干の差が見られるが、これは加速度計が長周期領域の共通の問題で、実用的に大きな問題がないと思われる。

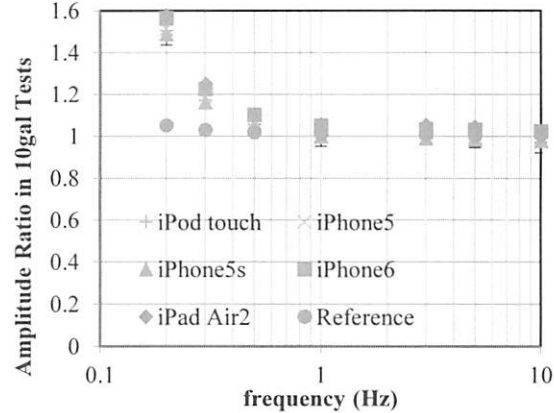


図-9 修正後の振幅特性

4. 地震動加振実験

(1) 実験概要

地震動や構造物の地震応答を計測する場合、スマートデバイスの計測装置とする性能を把握するために、正弦波加振のほかに、地震動加振実験を行った。地震動加振実験は、東北大学災害国際研究所で行った。

加振用の振動台は、東北大学所有のものが、前述の正弦波加振用のものと同じタイプのものであった。各デバイスを図-10 に示すように振動台に乗せ、X 方向 1 方向に地震動波形を揺らした。地震動加振の加速度は正弦波加振実験より強いいため、各デバイスの下面を両面テープで振動台のアルミニウム製の台面に簡易接着している。

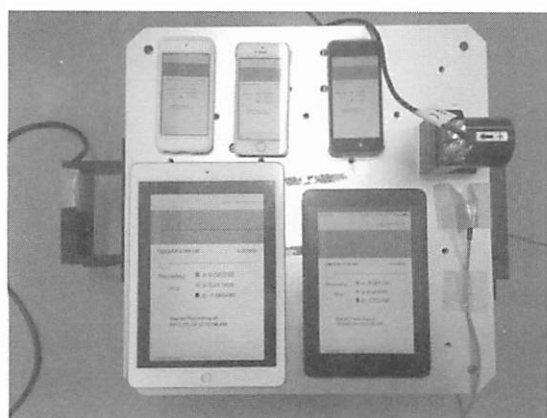


図-10 地震動加振実験

入力地震動は 1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の NS 方向成分 (Kobe) および 2011 年東北地方太平洋沖地震時に仙台で計測した地震波の NS 方向成分 (MYG) を用いた。振動台のストロークの許容範囲に適用できるように、地震動を振幅縮小して加振を行った。

(2) 実験結果

地震波加振実験の結果のうち、縮小した Kobe 波を入力したときに得られた波形、フーリエ振幅スペクトルおよび応答スペクトルを図-11 に示す。図に示すように、加速度波形において、レファレンスと比較しても、ほぼ重なっているものとなっており、振幅を 10gal 付近に縮小した加振においてもほぼ同じように重なっていることが確認できている。フーリエ振幅スペクトルと応答スペクトルにも見えるように、各周期成分において、スマートデバイスと高精度のレファレンス速度計の結果と大差がない。

構造物の振動計測において、構造同定の手法にもよるものの、フーリエ振幅スペクトルなどもっとも率直的に構造物の固有振動周波数などを判断する場合においては十分な精度を有しているといえる。

(3) トリガー機能の確認のための構造モデル加振

スマートデバイスは橋梁等の構造物に配備し、実務的な計測を行うために、電源および通信の確保、長期作動の安定性などが重要である。連続的に計測して、リアルタイムにサーバに加速度データを送信するのは、もっとも基本の方法であるが、通信費用の高騰や、計測処理作業、生データや処理した 2 次データを保管するデバイスと管理などの難点がある。

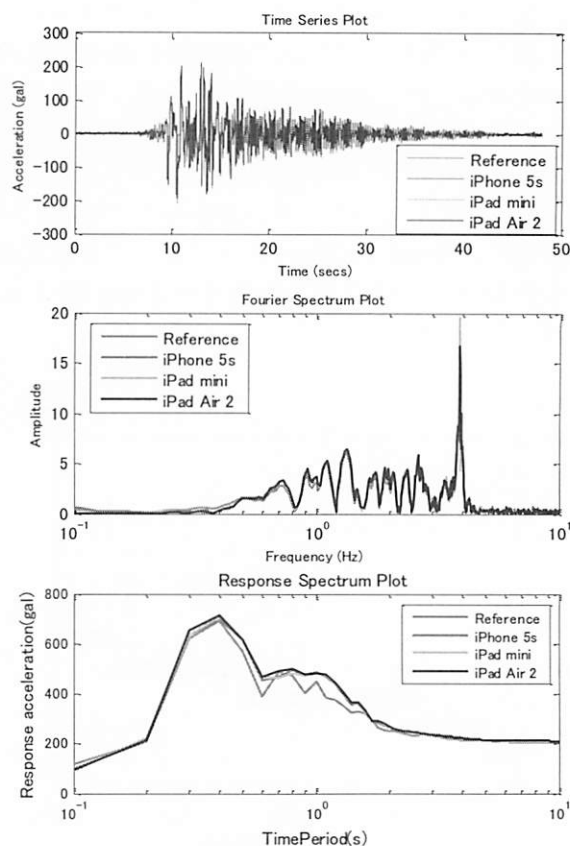


図-11 地震動入力加振による結果 (Kobe)

著者らは、スマートデバイスを用いて、地盤の常時微動計測や高層ビルの常時微動計測の試みをした結果、現段階の MEMS の分解能の制限もあり、1gal 以下の微動領域の振動に対して、ほぼ有意的な計測ができていない。したがって、長期観測において、連続的な計測よりトリガーを用いて、地震時だけの計測と送信が有効だと思われる。

前述したトリガー機能が構造物に実用した場合、想定通り作動できるかを検証するために、図-12 に示すように、振動台に構造モデルを乗せ、構造物基部と頂部にスマートデバイスを配置し、基部から地震波加振実験を行った。

スマートデバイスとして、前述した実験で基本機能を確認した iPhone5s の 2 台をそれぞれ構造モデルの基部と頂部に配置している。スマートデバイスのサンプリング周波数を 100Hz、トリガー加速度を 20gal、バッファ時間を 60 秒と設定している。前述したように、iPhone5s の実測サンプリング周波数は、目標を 100Hz と設定した場合、平均約 102Hz となっている。

構造物基部に縮小した東北地震の仙台波を加振した場合、スマートデバイスとレファレンス振動計測装置で得られたそれぞれ構造基部と頂部の加速度

波形を図-13 に示す。図に示すように、レファレンスとスマートデバイスで測った波形に大差がないが、構造基部の最大加速度が約 20gal の入力に対し、構造頂部の応答が約 200gal になっている。

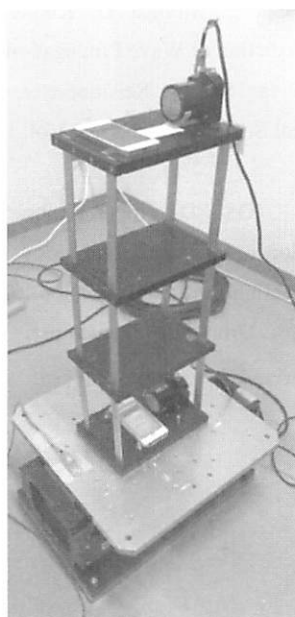


図-12 構造モデル地震動加振実験

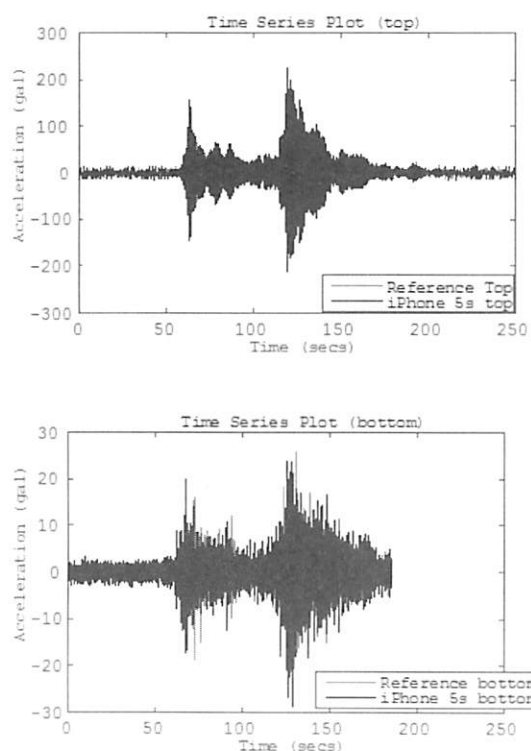


図-13 構造モデルの基部（上）と頂部（下）で得られた加速度波形

これによって、振動が収まっている最中で、トリ

ガー加速度の 20gal に 60 秒間続いて計測されていないため、基部のスマートデバイスの計測が先に終了した。頂部の応答が大きいため、振動の最後まで計測していた。

このような結果は、今後、構造物に複数のセンサーを配置して、構造全体の計測を一体で行う場合、全ての計測装置が共同かつ完全に有用な地震動記録を確実に記録するために、各デバイスの独立トリガーではなく、各デバイスをつなぎ、システムとして作動を制御するアルゴリズムが必要であると考えられる。また、文献 3)、4) に提示しているように、緊急地震速報の情報を利用したトリガーの必要性も、このような実験結果で改めて認識された。

5. まとめ

本研究では、維持管理ための構造の振動特性同定や構造地震応答観測のための加速度計測装置としてのスマートデバイスの活用を目指し、振動計測アプリを試作し、性能確認のための小型振動台実験を実施した。スマートデバイスの計算性能によって、サンプリング周波数に誤差があったため、その補正方法を検討した。サンプリング周波数補正後の計測結果は、振幅が 10gal 以上の振動に対して、振動の卓越周波数を精確に把握することができる。なお、0.3Hz 以下の長周期領域では振幅を過大評価しているが、1Hz~10Hz の周波数領域では、高精度計測装置との差異は小さい。また、構造モデルを用いた地震動加振実験では、振動の小さい基部の計測が早めに終わられ、構造振動計測のために、スマートデバイスを用いて計測システムの構築する必要性が明らかになった。

6. 謝辞：本研究の振動台実験の一部は東北大学災害科学国際研究所災害リスク研究部門地域地震災害研究分野源栄研究室の振動台を用いて実施したものである。振動台の提供と熱心な指導をしていただいた源栄正人教授と大野准教授に感謝の気持ちと御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 沼田宗純, 太田賢治, 小林明夫, 小松高廣, 目黒公郎: 小型振動台によるSmartPhone内蔵加速度センサの評価試験, 生産研究, 62巻6号, pp.637-642, 2010.
- 2) Antonino D'Alessandro, Giuseppe D'Anna: Suitability of

- Low-Cost Three-Axis MEMS Accelerometers in Strong-Motion Seismology: Tests on the LIS331DLH(iPhone) Accelerometer, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 5, pp. 2906–2913, 2013.
- 3) Shohei Naito, Hiroki Azuma, Shigeki Senna, Mutsuhiro Yoshizawa, Hiromitsu Nakamura, Ken Xiansheng Hao, Hiroyuki Fujiwara, Yoshiharu Hirayama, Noboru Yuki, Minoru Yoshida: Development and Testing of a Mobile Application for Recording and Analyzing Seismic Data, *Journal of Disaster Research*, Vol. 8 No. 5, pp. 990-1000, 2013.
 - 4) 藤原広行, 東宏樹, 内藤昌平, 先名重樹, 中村洋光, はお憲生, 吉田稔, 結城昇, 平山義治: センサークラウド技術を用いた建物の地震応答情報共有システム, *日本地震工学会論文集*, 13巻5号, pp. 44-61, 2013.
 - 5) Sarah E. Minson, Benjamin A. Brooks, Craig L. Glennie, Jessica R. Murray, John O. Langbein, Susan E. Owen, Thomas H. Heaton, Robert A. Iannucci, Darren L.: Crowdsourced earthquake early warning, *Science Advances*, Vol. 1, No. 3, pp. 1-7, 2015.
 - 6) Qingkai Kong, Richard Allen, Louis Schreier: MyShake: Building smartphone seismic network, *Seismological Society of America Annual Meeting*, 2015
 - 7) Ming Hei Cheng, Monica D. Kohler, and Thomas H. Heaton : Prediction of Wave Propagation in Buildings Using Data from a Single Seismometer, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 105, No. 1, pp. 107–119, 2015.
 - 8) Apple Inc. iOS Developer Library: MotionGraphics <https://developer.apple.com/library/ios/samplecode/MotionGraphics/Introduction/Intro.html>, Version 1.0.1, 2012.
 - 9) Dropbox, Dropbox Developer, Sync API : <https://www.dropbox.com/developers/sync>, 2014.