

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	実大体育館加振実験における加速度の二重積分による変位算出法の精度検証
Title(English)	VERIFICATION OF DISPLACEMENT INTEGRATED FROM MEASURED ACCELERATION ON SHAKE TABLE EXPERIMENT OF FULL-SCALE GYMNASIUM SPECIMEN
著者(和文)	佐々木智大, 佐藤大樹, 鈴木理恵, 田川浩之, 青井淳, 梶原浩一
Authors(English)	Tomohiro Sasaki, Daiki Sato, Rie Suzuki, Hiroyuki Tagawa, Atsushi Aoi, Koichi Kajiwara
出典(和文)	日本建築学会技術報告集, Vol. 23, No. 54, pp. 427-432
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 23, No. 54, pp. 427-432
発行日 / Pub. date	2017, 6
権利情報	日本建築学会
Relation	https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijt/23/54/23_427/_article/-char/ja
Note	本文データは学協会の許諾に基づきJ-STAGEから複製したものである

実大体育館加振実験における加速度の二重積分による変位算出法の精度検証

VERIFICATION OF DISPLACEMENT INTEGRATED FROM MEASURED ACCELERATION ON SHAKE TABLE EXPERIMENT OF FULL-SCALE GYMNASIUM SPECIMEN

佐々木智大 — * 1 佐藤大樹 — * 2
鈴木理恵 — * 3 田川浩之 — * 4
青井 淳 — * 5 梶原浩一 — * 6

Tomohiro SASAKI — * 1 Daiki SATO — * 2
Rie SUZUKI — * 3 Hiroyuki TAGAWA — * 4
Atsushi AOI — * 5 Koichi KAJIWARA — * 6

キーワード：

実大振動実験, 体育館, 加速度, 変位, 積分

Keywords:

Full-scale shake table experiment, Gymnasium, Acceleration, Displacement, Integration

In shake table experiments of structures, a lot of accelerometers are generally used to identify structural response while only a few displacement transducers are installed because large stiff frames are generally needed to measure displacement. Theoretically, displacement can be calculated from integrations of acceleration. However, low frequency components of measurement errors, noise and drift components resulted from permanent drift are amplified and unrealistic large displacement can be observed. To reduce low frequency errors, low-cut-filters are empirically used. This report discusses about errors of measured displacement and evaluates accuracy of the displacement resulted from integration of measured acceleration.

1. はじめに

建築構造の振動実験においては、一般的に加速度計が主要な測定センサとして使用され、測定されることが多い。しかしながら、耐震設計上重要となるのは、ブレースなどの各種部材の変形や層間変形角などの変位情報である。変位計測では、計測の基準となる点を所定の位置に別途設け、そこからの相対変位を様々なセンサで測定することとなる。実験の規模が大きくなり、測定したい変位と基準となる点の位置が遠くなるほど、この基準点を設けるために必要な治具が大きくなる。治具は一般的に、測定に影響しない範囲で剛体を仮定できるだけの断面を有する部材で組まれた十分剛なフレーム構造などが用いられる。通常は、試験体の固有振動数の少なくとも数倍程度、可能であれば10倍以上は高い固有振動数となるよう治具を設計するが、治具が大型化するとこの目標固有振動数の達成が困難なことも多い。センサを取り付けるだけで絶対加速度が容易に計測可能な加速度計測に比較すると、変位計測は多くの点を計測することが難しい。

そこで、容易に計測が可能な加速度計による計測結果を二重積分することにより、変位記録を得ることが考えられる。しかしながら、計測上の誤差やノイズ、永久変位などの要因で生じるドリフト成分等により、積分の過程でこれらの長周期成分が大きく増幅されてしまい、変位結果が発散してしまうことも多く、ただ積分するだけでは求められない。これを補正するため、多項式の基準線を仮定して基線



写真1 実大体育館試験体

補正をかける方法¹⁾や、低周波成分をカットするフィルタを用いるなどの手法²⁾が用いられる。

著者らは、実大鉄骨造体育館を用いた振動実験により、天井の脱落被害の再現と耐震吊り天井の耐震余裕度の検証を実施している^{3,4)}。この実験に用いた試験体の中央部および軒先部における変位を計測するため、大きな鋼製フレームによる治具を取り付けた。しかしながら、この治具を用いた計測では、中央部と軒先部のそれぞれ1点の計測である。しかし、体育館のような空間構造では、屋根面の振動は一様ではなく、この一様ではない変形が天井の脱落メカニズムに及ぼす影響の評価は重要である。このためには屋根面及び天井面の面

¹⁾ 防災科学技術研究所 研究員
(〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋 1501-21)

²⁾ 東京工業大学大学院 准教授 (前 防災科学技術研究所)

³⁾ 東京工業大学大学院 修士課程学生

⁴⁾ 武庫川女子大学 准教授 (前 防災科学技術研究所)

⁵⁾ 竹中工務店技術研究所 研究員 (前 防災科学技術研究所)

⁶⁾ 防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門長

¹⁾ Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

²⁾ Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology (former National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

³⁾ Master Student, Tokyo Institute of Technology

⁴⁾ Assoc. Prof., Mukogawa Women's Univ. (former National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

⁵⁾ Researcher, R&D Institute, Takenaka Corp. (former National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

⁶⁾ Manager, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

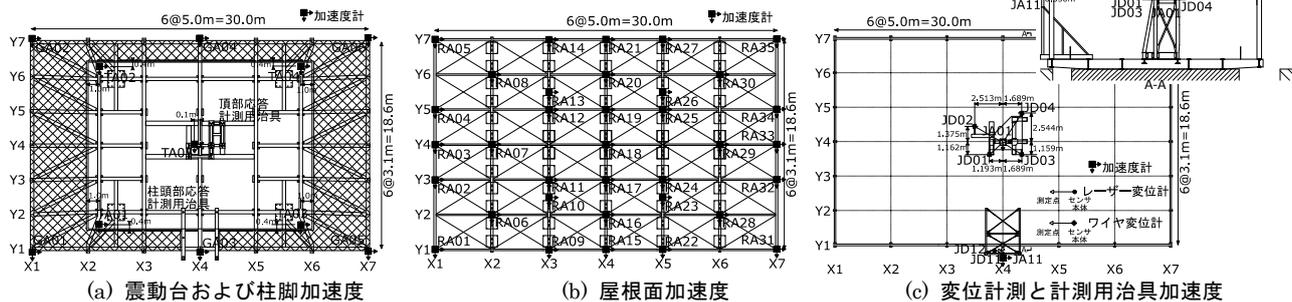


図 1 計測計画(一部)

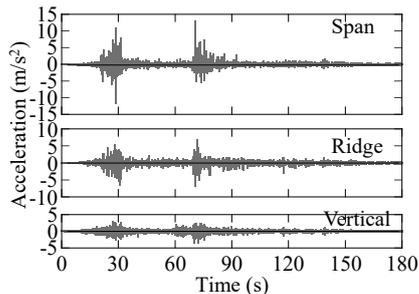


図 2 K-NET 仙台波 100%加振時の震動台加速度

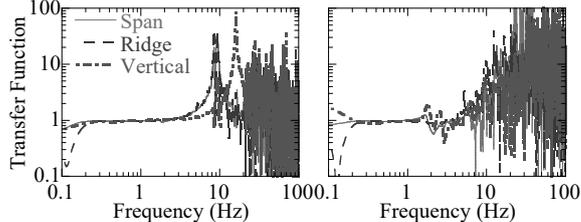


図 3 計測用治具加速度の震動台入力加速度に対する伝達関数 (K-NET 仙台波 100%加振)

的な変位分布を求め、面内変形を評価できることが望ましい。

そこで、本報では、屋根面に取り付けた加速度計により計測された加速度記録と中央部で計測した変位記録の精度に関する検証を行うとともに、加速度成分から変位を求めるための二重積分の方法に関する考察を行った。

2. 試験体と計測計画

写真 1 は、振動実験に用いた試験体である。実験の詳細については参考文献 3)、4)を参照することとし、ここでは、本報において特に重要となる項目についてのみ示す。この試験体は、小中学校の鉄骨造体育館を模擬する平面寸法 18.6m×30m、頂部高さ 9.09m の実大試験体であり、内部に吊り天井を有する。以下本報では、梁間方向を X、桁行方向を Y、鉛直方向を Z 方向とする。実験では、東北地方太平洋沖地震において、K-NET 仙台観測点で観測された地震動(K-NET 仙台波)および兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された地震動(JMA 神戸波)の 2 種類を用いた。NS 成分を梁間方向に、EW 成分を桁行方向に、UD 成分を鉛直方向にそれぞれ入力している。入力レベルとしては、K-NET 仙台波は振幅を原波の 5%、25%、50%、80%、100% に、JMA 神戸波は振幅を原波の 100%および 150%に変化させ、徐々に入力レベルを上げながら実験を行った。図 2 に K-NET 仙台波 100%加振時に、震動台上で計測された加速度を示す。試験体は K-NET 仙台波 50%入力までは弾性範囲で応答し、K-NET 仙台波 80%で屋根ブレースおよび壁ブレースが降伏するとともに、柱の柱脚に作用する曲げモーメントが降伏モーメントに達した。損傷前の試験体の弾性 1 次固有振動数は、梁間方向 2.4Hz、桁行方向 2.8Hz である。

なお、図 2 に示すとおり、K-NET 仙台波は 3 分を超える長時間地震動であるが、本報告ではこれ以降、2 回ある大きな加速度入力のうち、最初のピークである 30 秒付近を拡大して示すが、検討は全時間帯に渡って行っている。

試験体には加速度計および変位計を取り付け、各種変形を計測している。計測計画のうち、図 1 に本報で取り上げる計測点の位置を

示す。3 軸加速度計を、震動台上に 5 カ所、柱脚部に 6 カ所取り付け、試験体に入力される地震動を計測している。屋根面に取り付けた 3 軸加速度計は、各通り芯の交点の一部、31 点、Y2~Y3 通り間、Y5~Y6 通り間の大梁に 4 点である。また、X4 通りの柱頭では、レーザー変位計 2 台を、試験体中央の頂部には、ワイヤ変位計 4 台を用いて、試験体基礎梁上に取り付けた変位計測用治具との間の相対変位を計測している。また、変位計を取り付けた治具の振動を評価するため、これらの治具に対しても 3 軸加速度計を取り付けている。使用した 3 軸加速度計は、東京計器製 TA-25E を、レーザー変位計はキーエンス製 LK-500、ワイヤ変位計は DTP-D-300 を用いた。なお、レーザー変位計 LK-500 には、センサ本体から 500mm の距離を基準に ±250mm 測定できるロングモードと、これよりも測定レンジが狭い、センサ本体からの距離 350mm を中心に ±100mm 測定する、精度を高めた高詳細モードが搭載されており、高詳細モードで計測した。

測定は防災科学技術研究所が E-ディフェンス振動実験用に有する実験計測システムを用いた。測定条件としては、試験体の固有周期に比較し、十分高速に測定するため、サンプリング周波数は 1kHz、アンチエイリアシングフィルタとして 2kHz のローパスフィルタを設定した。

3. 変位計測の精度検証

3.1 変位計測のための治具の振動評価

図 1(c)に示したとおり、柱頭部および頂部の変形の計測では、基礎梁上に組んだ十分剛と見なせる治具と試験体との間の相対変位を計測している。理想的には治具が変形せず、震動台上と治具上が同じ動きをすることが期待されるが、治具も振動し、この振動が計測に影響するため、治具の振動について評価する。

図 3 に K-NET 仙台波 100%加振における治具上で計測された加速度の、震動台上で計測された加速度に対する伝達関数を示す。なお、図 3 では、0.5Hz 幅の Parzen 窓関数を用いてスムージングを行ってい

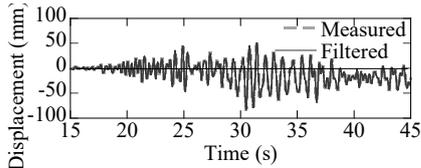


図4 ワイヤ変位計 JD01 により測定された変位 (K-NET 仙台波 100%加振)

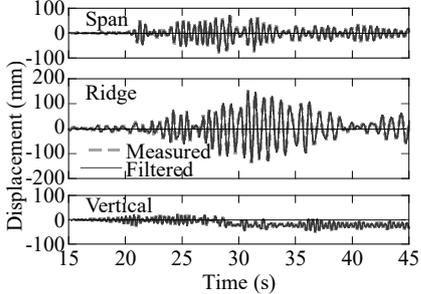


図5 ワイヤ変位計で測定された変位から求めた屋根頂部の変位 (K-NET 仙台波 100%加振)

る。図 3 (a) に示す震動台中央の治具上の伝達特性によると、8~9Hz 付近に大きなピークがあることがわかる。これが治具の振動によるものと考えられ、計測に含まれる誤差と考える。

一方、図 3 (b) に示す柱頭部の変位を計測する治具の伝達特性であるが、2Hz 前後に不明瞭ながら小さなピークが有る。これは、おおむね試験体の固有周期帯に一致しており、試験体の応答に伴って生じる基礎梁の変形によるものと考えられる。また、おおむね 9Hz 程度を越える領域で応答が 10 倍以上に増幅しており、これは治具の振動による影響と思われる。

以上より、8~10Hz 程度の領域においては治具が振動することにより変位計測に悪影響を与えていると見なすことが出来ることから、これらの成分について、適切な処理が必要であると言える。

なお、頂部、柱頭部いずれの計測用治具でも、0.2Hz よりも長周期の成分において何らかの振動が生じている。使用した加速度計は DC 成分も計測可能なセンサのため、センサの特性によるとは考えにくい。また、ここには示していないが、震動台の回転の影響も十分小さいことをすでに検討している⁵⁾ため、原因は不明である。結果の分析では、0.2Hz (5 秒) よりも長周期の成分に関して、不要な振動が含まれていないかなどの十分な検討が必要である。

3.2 ワイヤ変位計による変位計測の精度

図 1 (c) に示したとおり、頂部の変形の計測にはワイヤ変位計を用いる。ワイヤ変位計による測定では、治具にセンサ本体を取り付け、そこから変位計測したい点までワイヤを延長し、そのワイヤの巻き取り量を電気信号に変換することにより変位を計測する。このセンサは、ワイヤを巻き取るために一定の張力をかけており、その値は 5~8N 程度とメーカー仕様で規定されている。一定の張力 F_s が作用したときのワイヤの振動の固有振動数 f は、ワイヤ長さ L とワイヤの線密度 ρ を用いて、次式で求められる。

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_s}{\rho}} \quad (1)$$

治具に取り付けたセンサ本体から、屋根頂部の測定点までの距離を求めると、3.59~4.58m であり、使用しているワイヤは径 0.45mm のものであるから、これらの諸元より弦の固有振動数を求めると 8.6~10.9Hz である。このことから、8Hz 程度以上の振動については、ワ

イヤ自身の振動を拾っている可能性が有り、これらの成分は有意な結果とは言えない。前述した治具の振動評価においても 8~10Hz 程度の領域で治具が振動していることから、これらの振動成分は有意な結果と言えずローパスフィルタによりカットすることが適切であると言える。このことは高次モードの議論が変位からは難しいことを示している。図 4 に、ワイヤ式変位計 4 台で測定された変位のうち、図 1 (c) に示す JD01 で測定された変位について、測定された値そのままの結果と、これにローパスフィルタをかけた結果を示す。細かい変化が取り除かれてはいるものの、大きな傾向は変わっておらず、図 4 に示したグラフ上では、2 つの値はほぼ重なって見える。これらの高振動成分誤差が変位に及ぼす影響は小さいといえる。

ここで、ワイヤ変位計は、センサ本体と測定点との間の距離の変化を計測するセンサである。しかし、ここで求めたい変位は XYZ の直交 3 成分の応答変位である。そのため、測定点、センサ本体の位置、測定される距離の変化量から、応答変位の各方向成分を求める。求めたい応答変位 3 成分を用いて、ワイヤ変位計で計測される変位との幾何的な関係を表す式を求めると次式ようになる。

$$(u+L)^2 = \sum_{i=x,y,z} (p_i + u_i - q_i)^2 \quad \left(\text{ただし } L^2 = \sum_{i=x,y,z} (p_i - q_i)^2 \right) \quad (2)$$

ここで、 L は実験前の測定間距離、 u は測定間距離の変化量、 (p_x, p_y, p_z) は測定点の位置を、 (q_x, q_y, q_z) はセンサ本体の位置、 (u_x, u_y, u_z) は求めたい X、Y、Z 方向応答変位である。本実験では 4 台のセンサを用いて計測しており、式(2)が 4 式立てられる。一方、求めたい未知数は (u_x, u_y, u_z) の 3 つであるため、ここでは、式(2)の誤差の自乗が最小となる応答変位 (u_x, u_y, u_z) を求めた。図 5 に、K-NET 仙台波 100%加振時における応答変位を 8Hz のローパスフィルタの有無と比較して示す。

なお、ワイヤ変位計による計測において使用したワイヤは、天井面を貫通させて震動台上の治具のセンサ本体と、ターゲットである大梁の頂部をつないでいるため、天井の損傷、脱落により、ワイヤに天井パネル等が接触したため、異常値が測定された。このため、未対策天井を対象とした実験では K-NET 仙台波の入力レベル 25%まで、耐震天井を対象とした実験では 100%までが有効な計測結果である。

3.3 レーザー変位計による計測の精度

前節では、計測に用いているワイヤの振動が計測に影響している可能性について検討した。しかし、レーザー変位計を用いた計測では、レーザーの反射光を観測することにより変位を計測する、非接触式の計測であるため、センサ本体とターゲットとなる対象の振動以外は計測に影響しない。前述したとおり、計測用の治具の振動が問題となるが、本報では、前節のワイヤ変位計と同様、8Hz のローパスフィルタによる処理を行うこととした。また、レーザー変位計による計測では、梁間方向、桁行方向それぞれの方向の変位を直接計測できるため、計測結果をそのまま各方向の変位とすることができる。ただし、本実験では高詳細モードを用いて計測したが、K-NET 仙台波 80%よりも入力レベルの大きい加振では、応答変位が 100mm を越える結果、測定レンジをオーバーしており、最大値が正しく計測されていない。図 6 は、レーザー変位計を用いて計測した、K-NET 仙台波 100%加振時における柱頭部の応答変位である。レンジオーバーにより、主要動付近で測定された変位が頭打ちになっていたり、負の最大値に急激に変

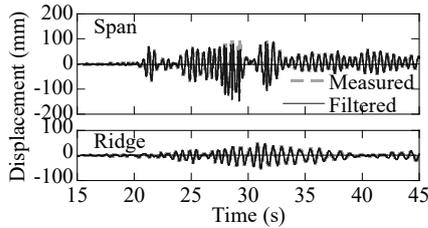
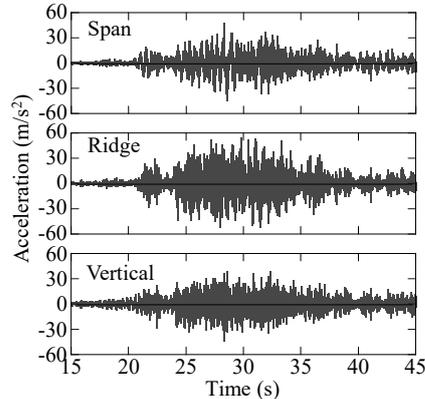
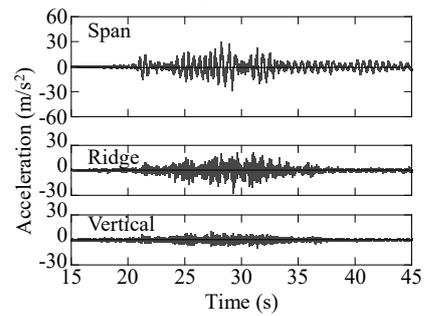


図6 レーザー変位計で測定された柱頭部の変位 (K-NET 仙台波 100%加振)



(a) 屋根頂部



(b) 柱頭部

図7 屋根面で計測された加速度 (K-NET 仙台波 100%加振)

化してしまっている点には注意が必要である。

4. 加速度計測の二重積分による変位算出

図7は屋根面で計測された加速度のうち、変位を計測している中央構面(X4 構面)の頂部と柱頭部の加速度である。屋根面に取り付けたおもりと屋根梁や母屋材との接触によって生じた衝撃加速度とみられる高振動成分が入っているものの、直接応答には影響しないと考えられる。なお、積分すると、この高振動成分は振幅が小さくなり、影響は少ないと考えられるため、参考文献1)と同様、高振動ノイズの除去を目的とした100Hzのローパスフィルタのみをかけている。以降、この結果を用いて時間領域および周波数領域での積分を行い、前節に示した変位計測結果と比較検討を行う。

4.1 時間領域での積分

加速度を積分して変位を求める際の積分にはさまざまな方法が提案されてきている^{6),7)}。ここでは、時間領域での積分として、次式に基づいて変位を算出した。

$$v_{j+1} = v_j + \frac{1}{2}(a_j + a_{j+1})\Delta t \quad (3)$$

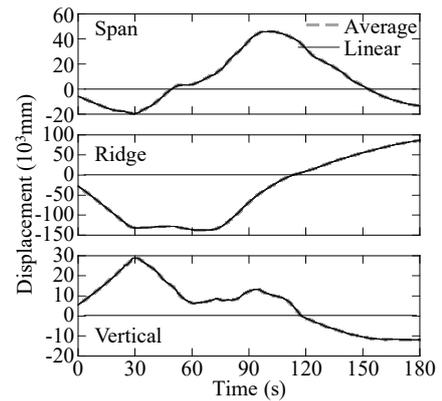


図8 時間領域積分で求めた屋根頂部の応答変位 (K-NET 仙台波 100%加振)

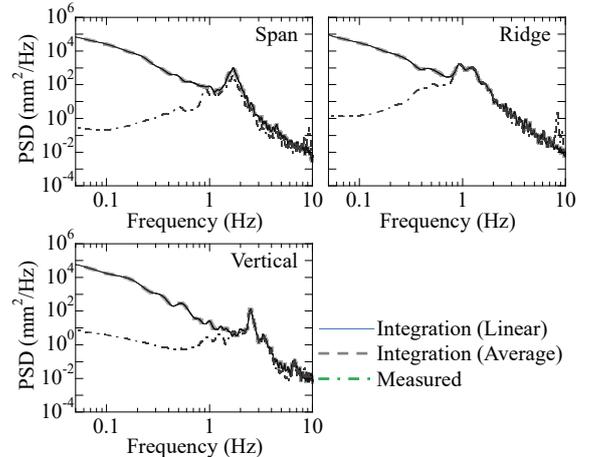


図9 時間領域積分で求めた屋根頂部の応答変位のパワースペクトル密度(K-NET 仙台波 100%加振)

$$u_{j+1} = u_j + v_j\Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)a_j\Delta t^2 + \beta a_{j+1}\Delta t^2 \quad (4)$$

ここで、 u_j 、 v_j 、 a_j は j ステップ目の変位、速度、加速度である。このうち j ステップ目までの応答はすでに求められており、 $j+1$ ステップ目の加速度は既知のため、これらから $j+1$ ステップ目の速度および変位を求めることができる。また、 Δt はサンプリング時間間隔である。 β は j ステップ目から $j+1$ ステップ目までの間の加速度の時間変化の仮定によって変化するパラメータで、加速度が j ステップ目と $j+1$ ステップ目の加速度の平均値で一定であるとした場合(平均加速度法)は $1/4$ を、 j ステップ目から $j+1$ ステップ目にかけて、線形(1次式)で加速度が変化するとした場合(線形加速度法)は $1/6$ とする。

図8は時間領域での積分によって求めた屋根頂部の変位である。ここでは、平均加速度法と線形加速度法の2通りの求め方を比較して示す。求められた変位は、手法の違いによる影響は小さく、いずれも長周期成分の誤差等の影響により、100mを越える非現実的なほど大きな変位が求められた。これと図5に示した直接計測した変位の結果とは大きくずれている。図9に時間領域の積分により求めた変位のパワースペクトル密度を示す。図9には比較のため、図5に示したワイヤ変位計によって計測された変位から求めたパワースペクトル密度(以下、PSD)も合わせて示す。なお、図9では、0.5Hz幅のParzen窓関数を用いてスムージングを行っている。これによると、

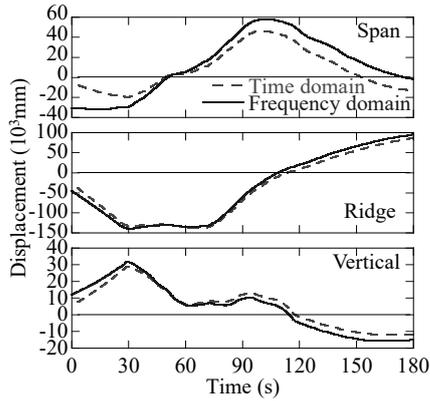


図10 周波数領域積分で求めた屋根頂部の応答変位 (K-NET 仙台波 100%加振)

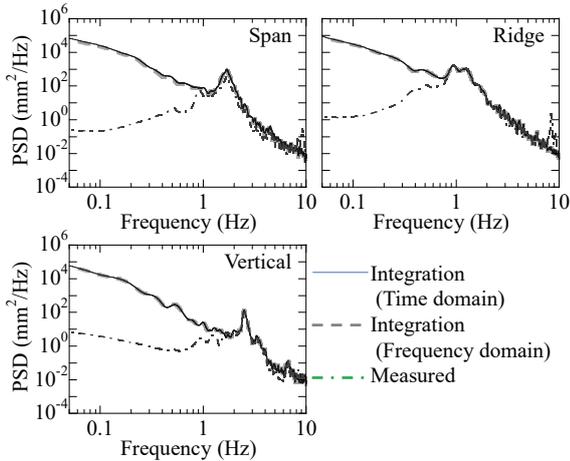


図11 周波数領域積分で求めた屋根頂部の応答変位のパワースペクトル密度(K-NET 仙台波 100%加振)

1Hz よりも長周期(低周波数)の成分で、積分によって求めた変位の方が、直接計測した変位よりも大きくなっており、これが原因で大きな変位になったと考えられる。

なお、線形加速度法、平均加速度法の両手法を比較しているが、結果に違いはほとんど無く、同等の結果が得られた。また、ここでは示していないが、柱頭部の加速度を積分した結果も、前述した屋根頂部の結果と同様に、非現実的なほど大きな応答変位が得られており、長周期成分の影響を確認している。

4.2 周波数領域での積分

ここでは、加速度を離散フーリエ変換し求めたフーリエ係数に対して積分を実施し、フーリエ逆変換により変位を求める^{6),7)}。ここで、総ステップ数 N で j ステップ目に測定された加速度を a_j 、求めたい変位を u_j とし、加速度および変位の k 番目のフーリエ係数を A_k 、 U_k とすると、二重積分により加速度から変位を求める式は以下の通りである。

$$A_k = \sum_{j=0}^{N-1} a_j e^{-2\pi i j k / N} \quad (5)$$

$$U_k = \left(\frac{i k \Delta t}{2\pi N} \right)^2 A_k \quad (6)$$

$$u_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} U_k e^{2\pi i j k / N} \quad (7)$$

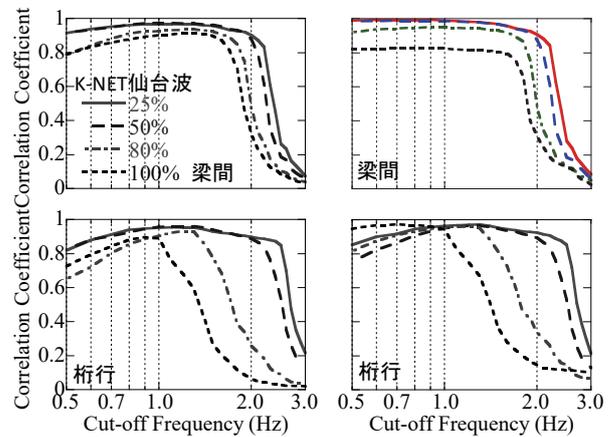
ここで、式(5)はフーリエ変換を、式(7)はフーリエ逆変換を表しており、式(6)が周波数成分ごとに積分している。時間領域での積分と

同様にして、図10に周波数領域での積分で求めた変位を示す。また、図11にこれのパワースペクトル密度をワイヤ変位計によって測定された変位から求めたパワースペクトル密度(PSD)と比較して示す。図10、11には、線形加速度法で求めた結果も合わせて示している。また、図11は、0.5Hz幅のParzen窓関数でスムージングしている。時間領域での積分と同様、長周期成分で大きな差があり、1Hzよりも長周期の成分に大きな差があることがわかる。また、周波数領域での積分も、時間領域における積分もほぼ同等の結果が得られている。

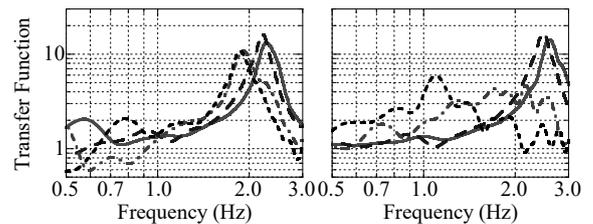
4.3 ハイパスフィルタによる長周期成分誤差の除去

上述したとおり、長周期成分の誤差等による影響で、非現実的に大きな変位に発散してしまう。そこで、既往の研究でも用いられている長周期成分の誤差と思われる部分をハイパスフィルタで除去することを考える。ここで、ハイパスフィルタとしては、フィルタ処理によって位相遅れなどが生じないように、離散フーリエ変換し求めたフーリエ係数のうち、カットオフ周波数未満のフーリエ係数を0とすることで長周期成分を取り除く処理を使用した。

図12に、加速度を積分した変位と、直接計測した変位の相関係数をK-NET 仙台波の25%、50%、80%、100%加振の4実験に対して求めたものと、ハイパスフィルタのカットオフ周波数の関係を示す。図12では、比較のため、屋根頂部で計測した加速度の、震動台上加速度に対する伝達関数も合わせて示す。なお、図12では、加速度の積分には線形加速度法を用いて求めた結果を使用したが、他の手法であっても同様の結果である。いずれの結果においてもカットオフ周波数を高くしていくと、ある値を境にして急激に相関係数が低下する。また、K-NET 仙台波 25%および50%加振では、2Hz程度までカットオフ周波数を上げて相関係数は低下しないが、ブレースが大きく塑性化したK-NET 仙台波 80%および100%加振では相関係数の大きく低下



(a) 屋根頂部 (b) 柱頭部
(1) 相関係数とカットオフ周波数の関係



(c) 梁間方向 (d) 桁行方向
(2) 震動台加速度に対する屋根頂部の加速度の伝達関数
図12 積分して求めた変位と直接測定した変位との相関係数に与えるカットオフ周波数の影響(K-NET 仙台波加振)

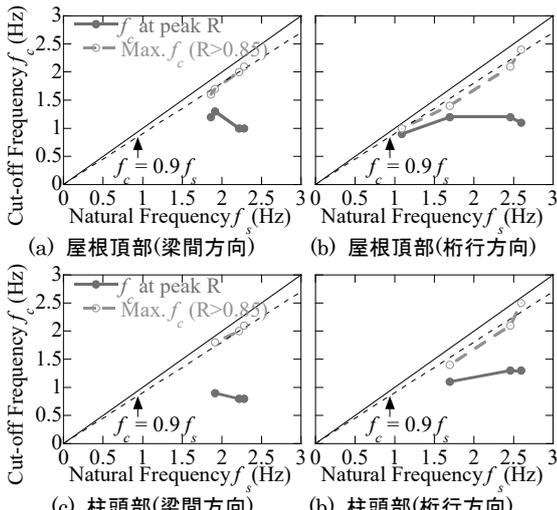


図 13 相関の高いカットオフ周波数と固有周期の関係

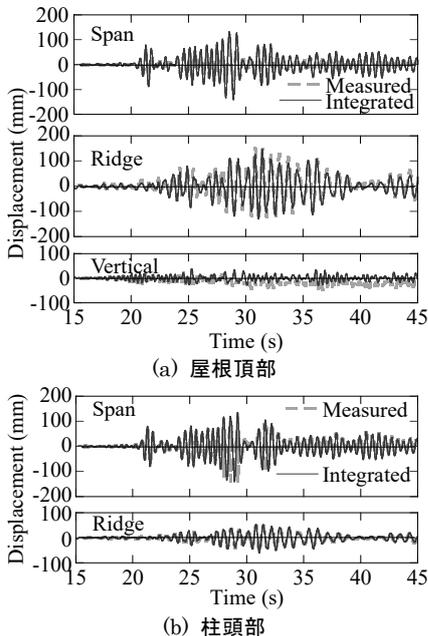


図 14 加速度の積分により求めた変位 (ハイパスフィルタ有り、K-NET 仙台波 100%加振)

する振動数が低くなった。この傾向は桁行方向が顕著である。これは、図 12(2)に示す伝達関数を見ると明らかのように、特に桁行方向において、ブレースの塑性化に伴い、試験体が長周期化しており、切り捨てられる周波数成分の中に、重要な固有周期の応答成分が入ったためである。

図 13 に、図 12(1)に示す相関係数が最も大きいカットオフ周波数と、図 12(2)に示す伝達関数から求まる固有周期との関係を示す。図 13 には、相関係数が最大となるカットオフ周波数を実線で示すとともに、相関係数が 0.85 を越えるカットオフ周波数の最大値を破線で示している。これによれば、適切なカットオフ周波数の範囲は試験体の固有周期に依存している。また、相関係数が 0.85 を越えるカットオフ周波数の最大値は概ね固有振動数の 0.9 倍に一致しており、測定対象の固有振動数の 0.9 倍までを上限としたカットオフ周波数の設定が望ましいことがわかる。また、カットオフ周波数として、0.8 ~ 1.3 Hz 程度とすることで、相関係数が高くなっており、精度の良い結果が得られる可能性が示唆される。

図 14 に積分して求めた変位に、1 Hz 以下をカットするハイパスフィルタをかけ、長周期成分を除去した結果を、直接計測した変位と比較したものを示す。屋根頂部の応答変位を見ると、梁間方向では、積分によって求めた変位の方が、直接計測した変位に比較して、全体的にやや大きめであった。主要動のピーク周辺において、顕著で有り、積分によって求めた変位の方が、直接計測した変位に比較して、最大値で 25%ほど大きめに評価されている。桁行方向の応答変位は、積分によって求めた変位と直接計測した変位は、全時間にわたり良く一致している。また、鉛直方向の変位は、加振の終わりに残留変位が生じているが、積分で求めた変位ではこれが再現できない。残留変位が再現できていない点を除けば、おおむね一致する結果が得られた。

5. まとめ

実大規模試験体の加振実験により得られた、応答変位の測定精度を検証するとともに、計測された応答加速度を二重積分することにより、変位を求める方法について考察した。その結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 変位を直接計測する手法では、ワイヤや治具の振動などにより、高振動成分の振動等の影響が生じるが、変位測定結果に与える影響は小さい。
- 2) 加速度をそのまま二重積分し変位を求めると、長周期成分の誤差等の影響により、結果が発散するが、長周期成分の誤差を消すためにハイパスフィルタで長周期成分をカットすることにより、加速度から変位を求めることが出来るようになる。適切なハイパスフィルタのカットオフ周波数は、測定対象の固有振動数に依存し、測定対象が塑性化するなどにより長周期化すると、適切なカットオフ周波数も低下する。本実験から得られた結果に基づく、固有振動数の 0.9 倍までが適切なカットオフ周波数の最大値であった。

参考文献

- 1) Mihailo D. Trifunac: Zero Baseline Correction of Strong-Motion Accelerograms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1201-1211, 1971.
- 2) G. V. Berg and G. W. Housner: Integrated Velocity and Displacement of Strong Earthquake Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 51, No. 2, pp. 175-189, 1961.
- 3) 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 梶原浩一, 荒井智一, 金井貴浩, 高岡昌史, 岩下裕樹, 吉澤睦博, 壁谷澤寿海, 清家剛, 山田哲, 福山洋, 太田勤, 江口亨, 伊山潤, 石原直, 磯部大吾郎: 大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のための E-ディフェンス加振実験報告書—大規模空間吊り天井の脱落被害再現実験および耐震吊り天井の耐震余裕度検証実験—, 防災科学技術研究所研究資料, 第 391 号, 2015. 2
- 4) 梶原浩一, 佐々木智大, 青井淳, 田川浩之, 壁谷澤寿海, 清家剛, 山田哲, 福山洋: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その 1 プロジェクト概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp. 997-998, 2014. 9
- 5) 佐々木智大, 梶原浩一, 青井淳, 佐藤大樹: E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その 17 試験体に入力された地震動の評価, 日本建築学会学術講演梗概集 (九州), pp. 853-854, 2016. 8
- 6) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994
- 7) Athanasios PAPOULIS: The Fourier Integral and Its Applications, McGraw-Hill, 1962.

[2016 年 10 月 5 日原稿受理 2016 年 11 月 24 日採用決定]