

新遠心力載荷装置の振動特性に関する詳細調査

富阪和秀・井合進・飛田哲男

要 旨

京都大学防災研究所の遠心力載荷装置は2年前に更新を行った。更新によりアームの剛性を強化し、振動台駆動時に加振周波数50 Hz付近でアームが共振する問題を解消した。しかし、更新後の装置について、実験者からプラットフォームの剛性不足、新規に導入したプラットフォーム固定方式の欠陥、振動台から上下動が発生しているとの指摘があった。これらの問題を改善するために、昨年度装置の改修を行った。改修によりプラットフォームを再度更新し、固定方式についても改造を行った。本調査では、更新したプラットフォームおよび振動台やアームに加速度計を設置し、振動台の加振試験を行い、振動特性を調査した。その結果、プラットフォームの剛性不足が改善したことを確認した。また、振動台で発生していた上下動は、プラットフォームの固定、DITHERと呼ばれる振動台の制御信号、振動台の機械的構造が主な原因であることがわかった。

キーワード：遠心力載荷装置，プラットフォーム，振動台，振動特性，上下動

1. はじめに

京都大学防災研究所の遠心力載荷装置は、設置から約 24 年経過している。この間、研究の発展と共に動的試験用振動台の開発（北ら，1989）、無線通信を利用した多チャンネルの計測システムの開発（井合ら，2004）など実験設備の機能充実を図ってきた。

しかし、遠心力載荷装置のアームの固有振動数が実験データの解析時に重要となる 50 Hz 付近であることが近年になって判明した。50 Hz 付近の周波数を含む入力波で振動台を加振させるとアームが共振してしまい、目的とする加振条件で実験土槽を振動させることができていないことがわかった。また、スリップリングの老朽化に起因して配電不良が起り、振動台の駆動源である油圧ポンプの作動不良を引き起こすなど実験進行の阻害だけでなく実験者への安全面に関わる不具合も発生していた。そのため 2 年前に装置の全面的な更新を行った。更新によりアームの剛性が強化された結果、アームの固有振動数が 100～110 Hz となり、50 Hz 付近で共振が発生する問題は解消した。

その後、実験者の装置利用により、改修したプラットフォームおよび振動台の挙動に関して以下のような指摘があった。

（1）更新したプラットフォームの側壁は設計段階

の見込みよりも剛性が低く、剛性を維持するための補強を施す処置が取られた。その結果、施した補強が実験準備時の土槽設置作業を困難にし、実験土槽を新規製作する際に形状を制限してしまうことになった。また、プラットフォームの剛性不足は将来的に故障の要因となることが懸念される。

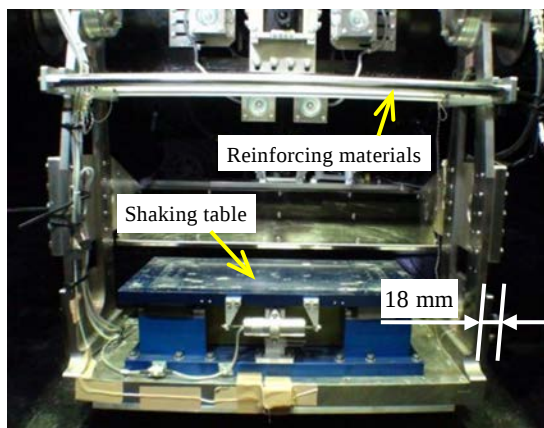
（2）更新によりプラットフォームを固定する方式を採用し、プラットフォームとアームの接合部である回転軸の弾性変形を利用して、遠心力載荷装置の回転時 30 G で、アームの先端へ着座し、遠心力によってプラットフォームを押え付けて固定する着座固定方式を導入したが、プラットフォームの剛性不足もあって着座が不完全であることが判明した。そのため振動台駆動時にプラットフォームが動いているとの指摘があった。

（3）動的実験時に振動台上で加振方向に対して鉛直方向に振動が発生しているとの報告があった。

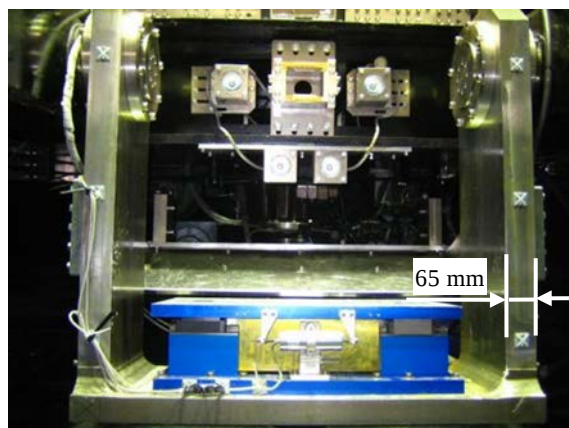
これらの不具合を改善するために、昨年プラットフォームの更新を再度行い、剛性を強化した。固定方法も着座方式を廃止し、プラットフォームを油圧式シリンダによって両側から押さえつけて固定する機械式に改造した。



Photo 1 Side view of new geotechnical centrifuge at DPRI

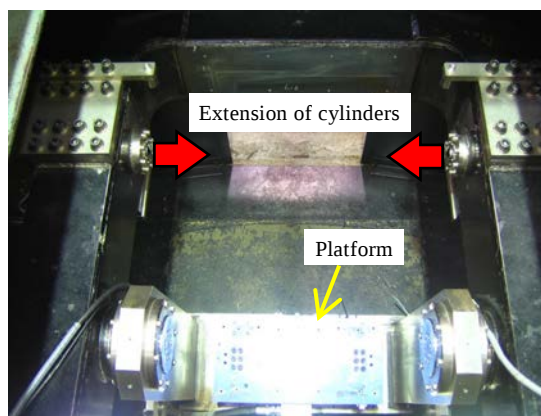


(a) Before renewal

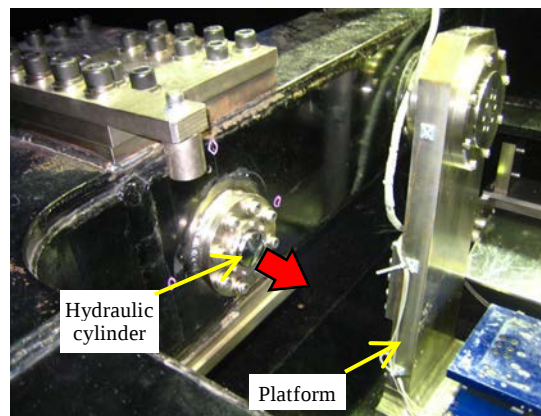


(b) After renewal

Photo 2 Comparison between before and after renewal of platform



(a) Top view of platform



(b) Closeup of new fixed mechanism

Photo 3 New fixed mechanism of platform

本調査では、更新したプラットフォーム、振動台、アームの振動特性を明らかにするために、装置の各所に加速度計を設置し、振動台の加振試験を行って調査したので結果を報告する。

2. プラットフォームの改修

プラットフォーム改修後の遠心力载荷装置を Photo 1に示す。プラットフォームは写真の矢印で示

す部分である。Photo 2はプラットフォームを正面から見たもので、プラットフォーム底面に振動台を搭載し、実験時には振動台上に土槽を設置して動的実験を行う。Photo 2 (a)は改修前、Photo 2 (b)は改修後のプラットフォームである。改修前はプラットフォーム側壁の部材厚が18 mmと薄かったために、剛性が低く写真に示すような補強部材を取付けていたが、改修後は部材厚が65 mmとなり、底面と側壁の部材を溶接により一体化させて剛性を強化したため、補

強部材は取り除いている。

プラットフォームの固定はPhoto 3に示すように、回転時にプラットフォームがアームに対して水平になった段階（30 G）で、アームから伸びた油圧シリンダがプラットフォームの両側面を押すことによって固定する機構となった。

3. 振動特性の調査

遠心力载荷装置のプラットフォームとアームはスプラインという回転軸を介して接合されている。動の実験時に振動台が発する振動はプラットフォームに伝わり、回転軸とプラットフォーム固定用の油圧シリンダを通じてアームに伝わる。そのためプラットフォームやアームが、振動台から発生する振動と共振すると、振動台に入力した波形とは異なった振動が土槽に対して入力されることになる。

したがって、改修後のプラットフォームおよびアームの振動特性を調査することは重要である。

3.1 調査の概要

調査は振動台、プラットフォーム、アームに加速度計（SSK社製：A6H-50）を設置し、振動台駆動時

の加速度を計測した。Fig. 1に加速度計の設置箇所（Acc 1～Acc 5）を示す。振動台加振方向の水平動の計測（以後、計測値を水平加速度と呼ぶ）は、振動台天板（Acc 1）プラットフォーム底面（Acc 2）、アームの先端（Acc 3）の3ヶ所、加振方向に対して鉛直方向の上下動の計測（以後、計測値を鉛直加速度と呼ぶ）は、振動台天板の左端（Acc 4）、右端（Acc 5）の2ヶ所である。

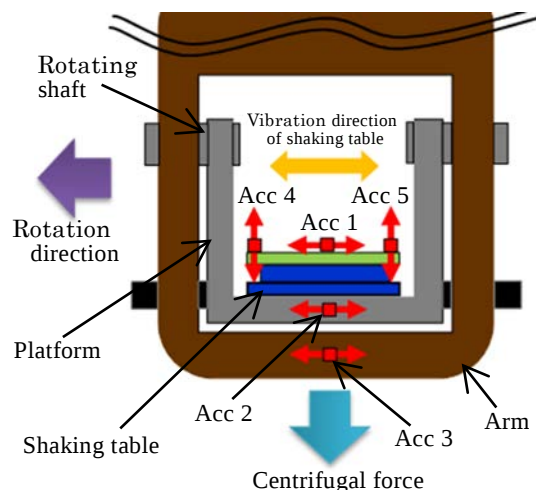


Fig. 1 Arrangement of accelerometers

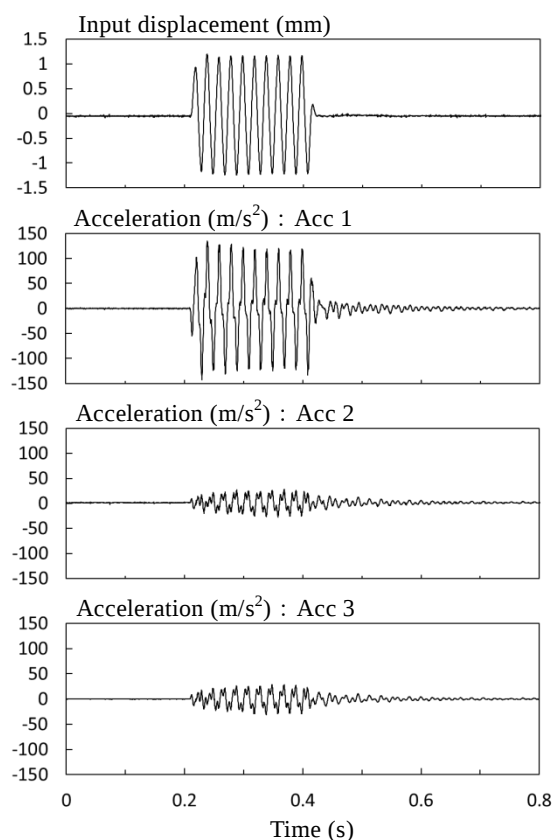


Fig. 2 Results of centrifuge tests before renewal of platform by sine wave input: frequency of 50 Hz, amplitude of 1 mm, wave number of 10

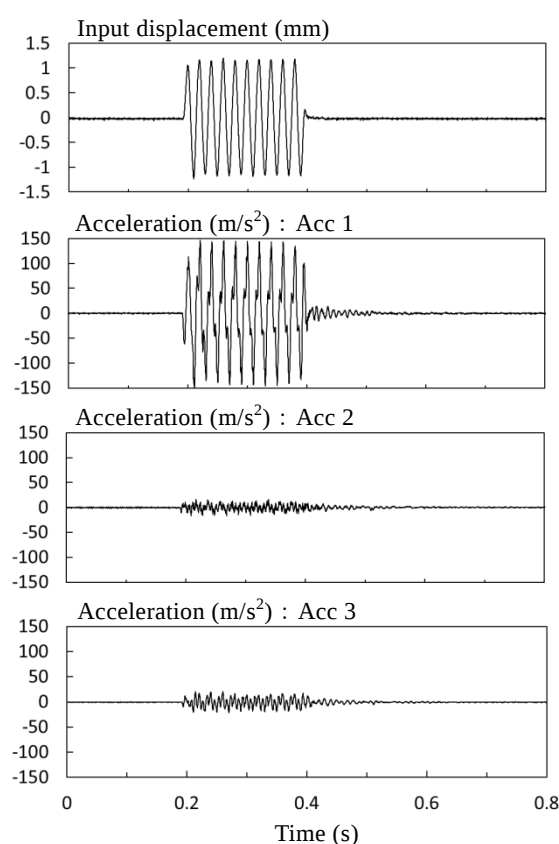


Fig. 3 Results of centrifuge tests after renewal of platform by sine wave input: frequency of 50 Hz, amplitude of 1 mm, wave number of 10

計測は実際の実験状況に近い状態で行うことが望ましいため、重量74 kg（土槽＋砂＋水）のダミー土槽を振動台に設置し、50 Gの遠心場で行った。

振動台の加振条件として、入力波形は正弦波（振動数10～200 Hz: 10～100 Hzは5 Hz刻み, 100～200 Hzは10 Hz刻み, 振幅1 mm, 波数10）および地震波（臨界波, 八戸波, JMA神戸波, JR鷹取波, ホワイトノイズ）を使用した。

3.2 調査結果

振動台加振試験によって得られた各計測点の加速度をプラットフォームの改修前後で比較する。また、フーリエスペクトルによる比較も行う。

改修前後の比較を行うために、改修前の記録として残っている正弦波（入力振動数50 Hz, 振幅1 mm, 波数10）の記録で比較を行った。Fig. 2に改修前, Fig. 3に改修後の計測結果を示す。グラフは、上から順に振動台の変位, 振動台の水平加速度（Acc 1）, プラットフォーム底面の水平加速度（Acc 2）, アームの先端の水平加速度（Acc 3）である。それぞれ比較すると、プラットフォーム（Acc 2）やアーム（Acc 3）では改修後の加速度が小さくなっていることがわかる。

改修後の振動台の上下動について、前述の正弦波入力による計測結果をFig. 4に示す。鉛直加速度の最大値は水平加速度（Fig. 3 : Acc 1）の約50 %程度の大きさに達している。

次に地震波による計測結果の1例として、臨界波入力の計測結果をFig. 5に示す。鉛直加速度（Acc 4, Acc 5）の最大値は水平加速度（Acc 1）とほぼ同じ値を示している。

これらの結果（Fig. 3～Fig. 5）をフーリエスペクトルで表す。Fig. 6に正弦波, Fig. 7に臨界波のフーリエスペクトルを示す。正弦波（Fig. 6）について、振動台天板（Acc 1）では入力振動数の50 Hzで大きなピークが現れているが、上下動（Acc 4, Acc 5）では150 Hzや550 Hz付近で値が大きくなっている。臨界波（Fig. 7）では、全ての計測点において550 Hz付近でピーク値がみられ、上下動（Acc 4, Acc 5）では値が特に大きくなっている。

3.3 上下動に関する考察

Fig. 4, 5より、振動台で発生している上下動の鉛直加速度（Acc 4, Acc 5）は、振動台天板の水平加速度（Acc 1）と値がほぼ同じである。Fig. 8(a) は臨界波の水平加速度（Fig. 5 : Acc 1）の一部分を拡大したもので、Fig. 8(b) は鉛直加速度（Fig. 5 : Acc 4, Acc 5）の一部分を拡大して左端（Acc 4）と右端（Acc 5）の波形を重ね合わせたものである。

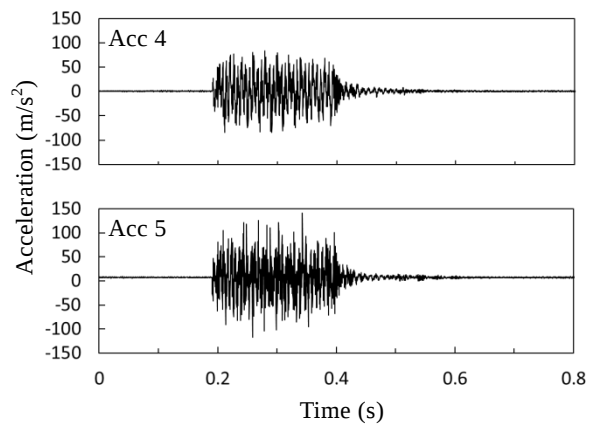


Fig. 4 Results of shaking table vertical motion by sine wave input: frequency of 50 Hz, amplitude of 1 mm, wave number of 10

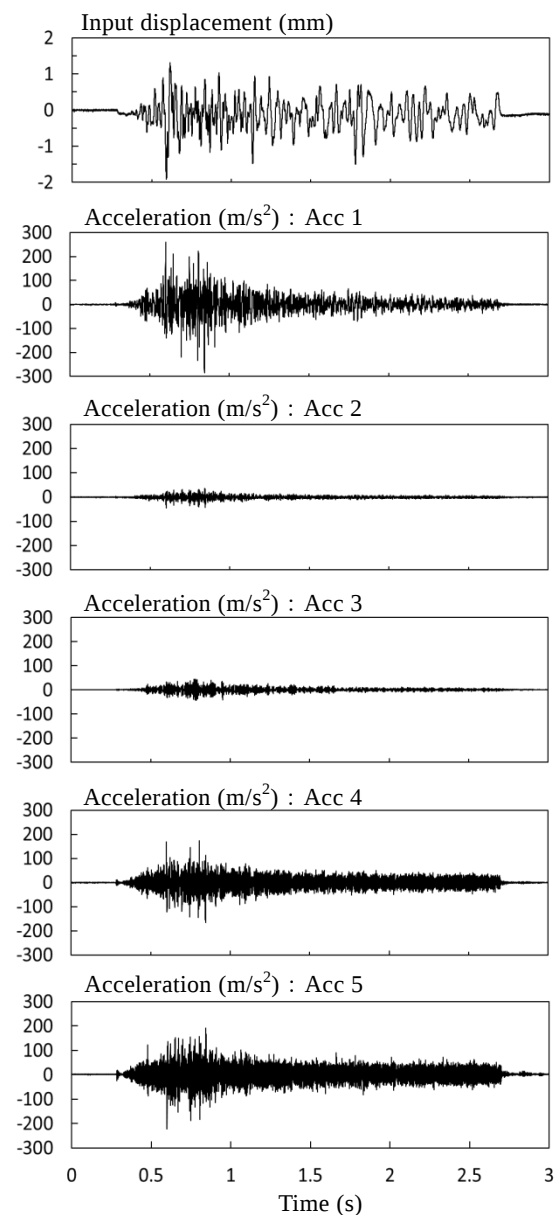


Fig. 5 Results of centrifuge tests by Rinkai wave input

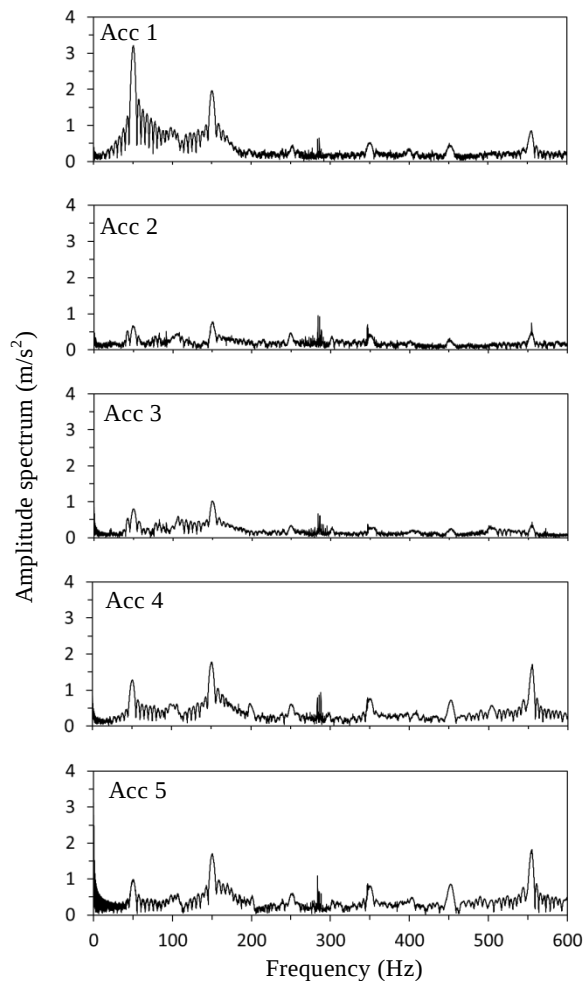


Fig. 6 Amplitude spectrum computed from test results by sine wave input: frequency of 50 Hz, amplitude of 1 mm, wave number of 10

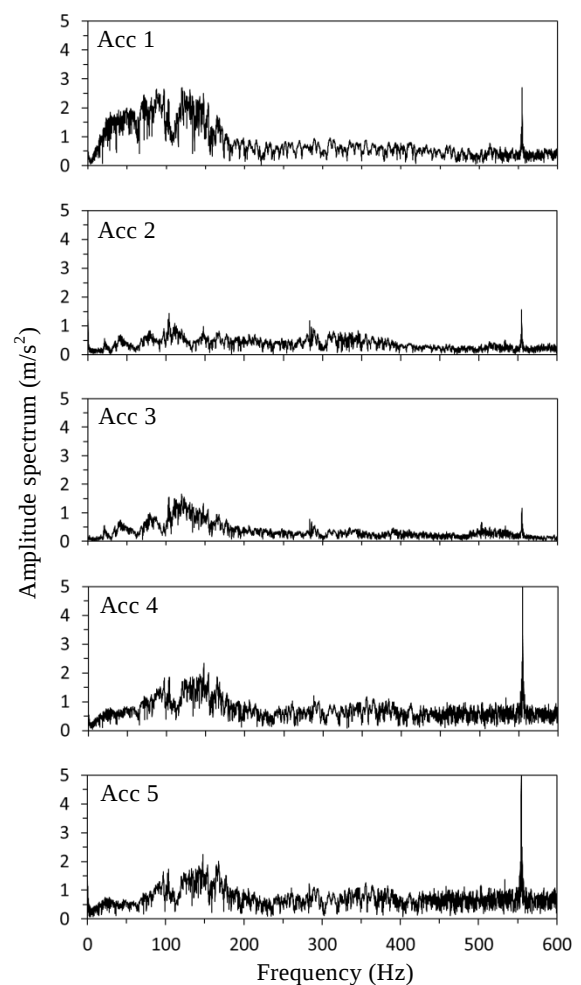


Fig. 7 Amplitude spectrum computed from test results by Rinkai wave input

Fig. 8 (b) より、両端の上下動は逆位相で振動していることがわかる。これは振動台の天板が、振動台駆動時にスライドするために用いられているリニアガイドのガタが原因の一つと考えられる。すなわち振動台を構成する機械部品の構造的な要素が原因であると推測される。

また、Fig. 8 (a) の水平加速度が大きくなったときに、Fig. 8 (b) の鉛直加速度も大きくなっていることがわかる。これは計測に用いた加速度計が、計測方向に対して鉛直方向の加速度成分も、多少は検知するという特性を持つためである。この特性についてはメーカーに確認済みである。

プラットフォームの改修により、改造された機械式の固定方式がプラットフォームや振動台の振動特性に何らかの影響を与えていることも考えられる。

フーリエスペクトル (Fig. 6, 7) から、550 Hz でピークが表れることがわかったが、これは振動台を制御するための DITHER と呼ばれる信号の周波数設定

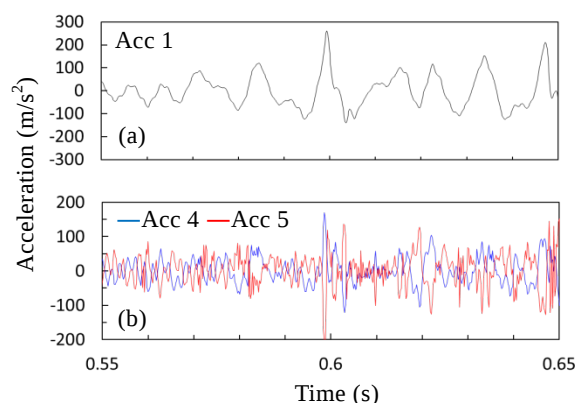


Fig. 8 The enlargement of test results (Fig. 5) : (a) Acc 1, (b) Acc 4 and Acc 5

値である。

DITHER信号とは、振動台のサーボ弁の駆動特性を改善するための信号で、550 Hzの周波数をもつ電流

を制御信号電流に加えることで案内弁部のスプールを振動させる。その結果、サーボ弁の非線形性を改善し、案内弁の静摩擦を軽減してシステリシスを少なくすることができるものである。

Fig. 7より550 Hzで水平動（Acc 1）よりも上下動（Acc 4, Acc 5）のピーク値が高くなっているが、なぜDITHER信号が上下動の発生原因となるのか現時点ではわかっていない。

Table 1 Test cases

Case No.	Fixation of platform	DITHER signal
0	Fixed	On
1	Not fixed	On
2	Fixed	Off
3	Not fixed	Off

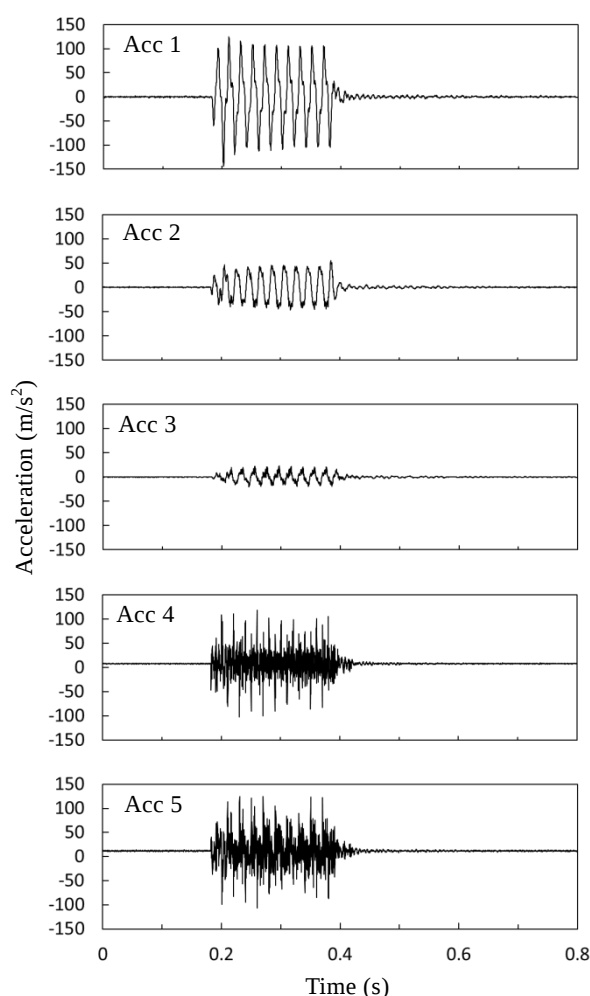


Fig. 9 Results of centrifuge tests for Case 1 by sine wave input: frequency of 50 Hz, amplitude of 1 mm, wave number of 10

4. 追加調査

3.3節より、振動台で発生する上下動の原因のうち振動台の天板とスライドガイドとの間のガタは、機械的構造のクリアランスレベルの問題であることから早期に改善することは難しい。プラットフォームの固定やDITHER信号による影響の度合いを調べることは、装置の設定を変更することで可能なため、追加の調査を行った。

4.1 追加調査の概要

追加調査は、Table 1に示すCase 1～Case 3を行った。Case 0は3章で行った調査である。Case 1はプラットフォームの固定を解除したケース、Case 2はプラットフォームを固定してDITHER信号を解除したケース、Case 3はプラットフォームの固定とDITHER信号の両方を解除したケースである。その他の加振条件はCase 0と同様である。本報告では、Case 1およびCase 2で行った結果の一例を報告する。

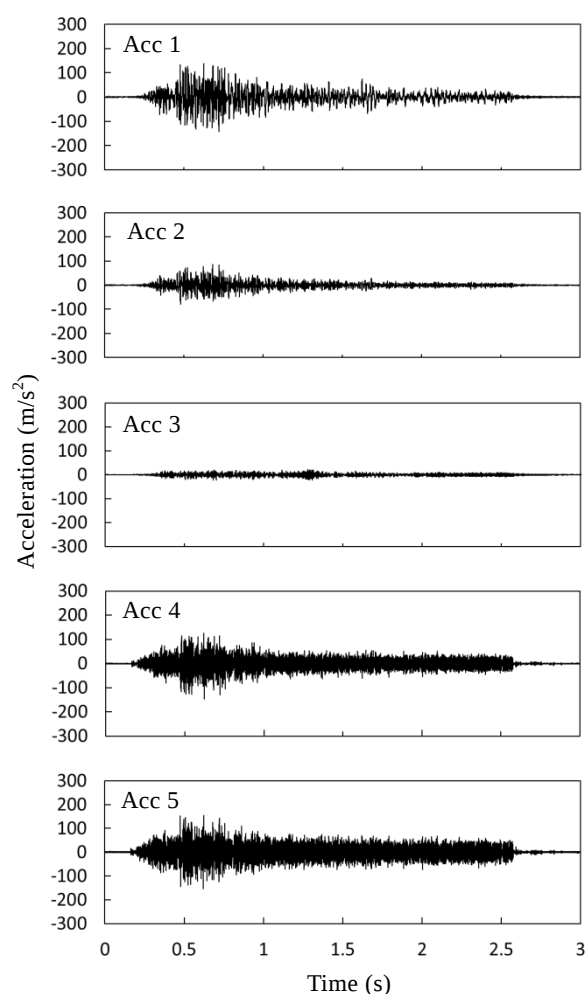


Fig. 10 Results of centrifuge tests for Case 1 by Rinkai wave input

4.2 追加調査結果 (Case 1)

Fig. 9に正弦波（振動周波数50 Hz，振幅1 mm，波数10）入力による計測結果を，Fig. 10に臨界波入力による計測結果を示す。両結果とCase 0の計測結果（Fig. 2～4）を比較すると，プラットフォームの加速度（Acc 2）はCase 1の方が大きいことがわかる。これは，プラットフォームの固定を解除したことにより，プラットフォームの振動に対する自由度が高まったためである。一方で，プラットフォームが振動台から発生する振動を吸収する形となるため，アームの加速度（Acc 3）はCase 0よりも小さくなっている。

振動台の水平動（Acc 1）や上下動（Acc 4, Acc 5）

については，Fig. 9およびFig. 10からCase 0との違いを読み取ることは難しい。そこで，伝達関数を用いた評価を行う。ここでの伝達関数は，計測した水平動と上下動の加速度から算出したフーリエスペクトルを，入力地震波の元データとなる加速度から算出したフーリエスペクトルで除したものである。本報告では，臨界波と八戸波の結果を報告する。臨界波の水平動（Acc 1）のCase 0とCase 1の伝達関数を重ね合わせたグラフをFig. 11に示す。左のグラフは右のグラフの0～300 Hzの範囲を拡大したものである。八戸波の水平動（Acc 1）の伝達関数をFig. 12に示す。いずれの結果も0～240 Hzの周波数領域でCase 1の方がCase 0よりも周波数ごとの変動量が小さくなって

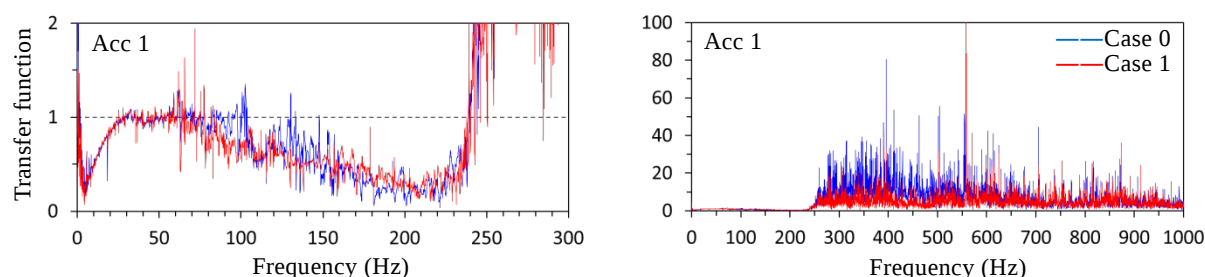


Fig. 11 Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 1 by Rinkai wave input

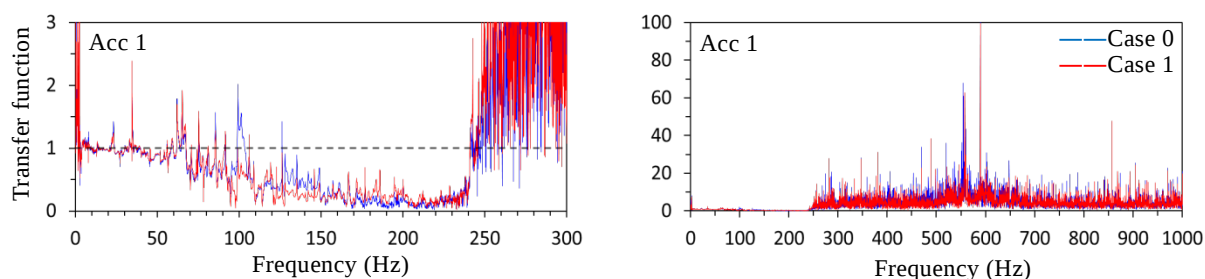


Fig. 12 Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 1 by Hachinohe wave input

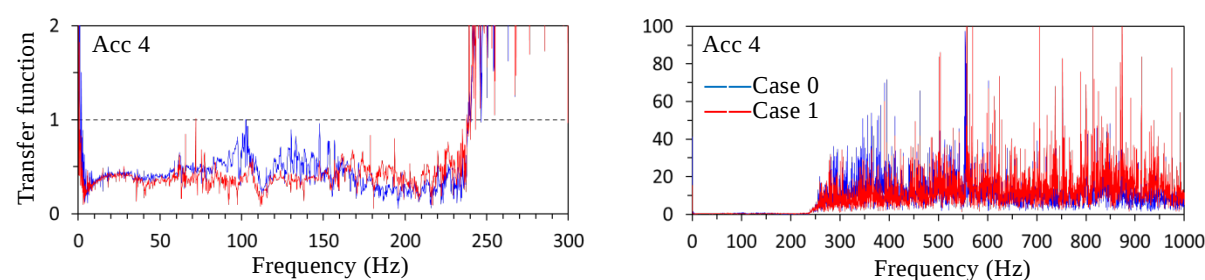


Fig. 13 Transfer function in the vertical motion table for Case 0 and Case 1 by Rinkai wave input

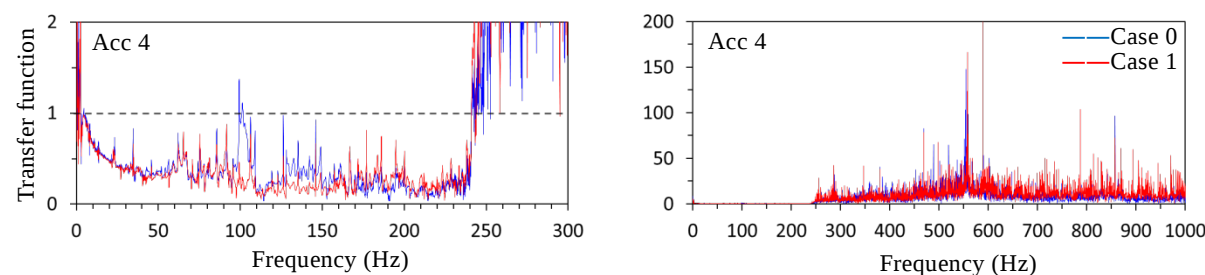


Fig. 14 Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 1 by Hachinohe wave input

いる。臨界波と八戸波の上下動（Acc 4）の伝達関数をそれぞれFig. 13, Fig. 14に示す。結果は水平動（Acc 1）と同様にCase 0よりもCase 1の方が周波数ごとの変動量も小さく、値が小さい周波数領域が多くなっている。すなわち上下動が減少していることを示している。特にアームの固有振動数である100～110 Hzの範囲では、Case 1ではプラットフォームが固定されていないことから固有振動数の影響を受けにくいいため、Fig. 11～14の全ての結果において伝達関数が減少している。

4.3 追加調査結果（Case 2）

Case 2における臨界波入力のパワースペクトルをFig. 15に示す。Case 0（Fig. 5）と比較すると、DITHER信号の設定周波数である550 Hzでピーク値が消失していることが分かる。

Fig. 16は臨界波、Fig. 17は八戸波入力による計測結果で、Case 0とCase 2の計測結果を重ね合わせたものである。グラフは上から振動台変位、振動台水平加速度（Acc 1）、振動台鉛直加速度（Acc 4）であ

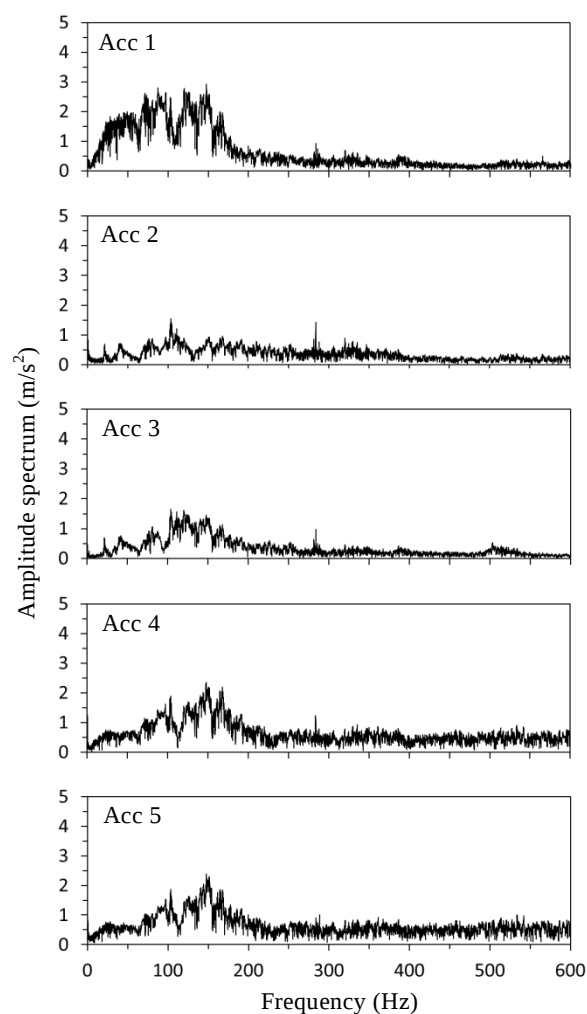


Fig. 15 Amplitude spectrum computed from test results for Case 2 by Rinkai wave input

る。DITHER信号は振動台の位置決めに関わる信号のため、信号を解除するとFig. 17の振動台の変位のように、途中からCase 0と異なった動きをすることがある。

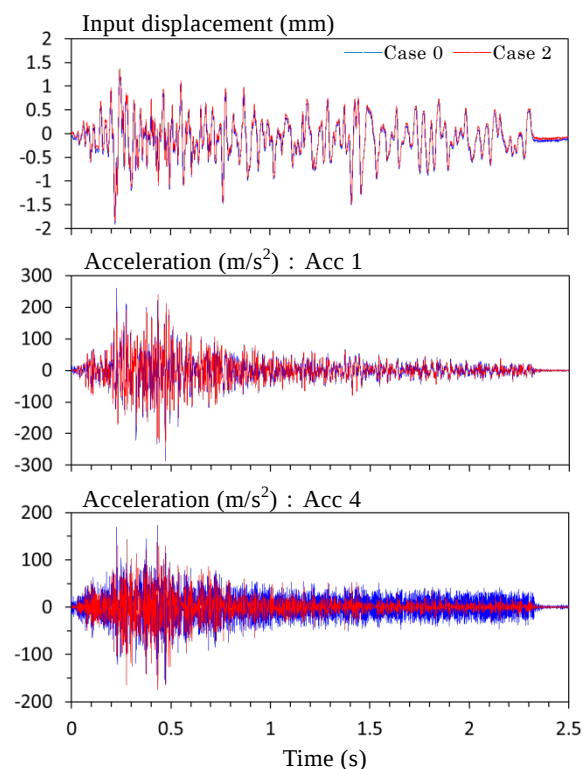


Fig. 16 Results of centrifuge tests for Case 0 and Case 2 by Rinkai wave input

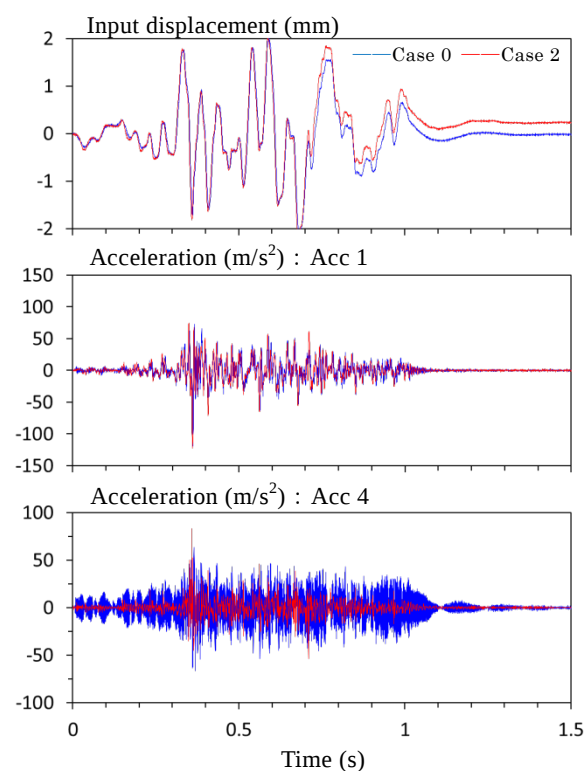


Fig. 17 Results of centrifuge tests for Case 0 and Case 2 by Hachinohe wave input

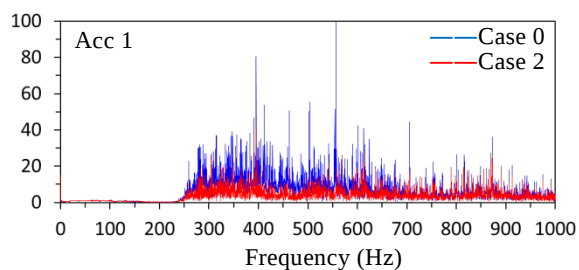
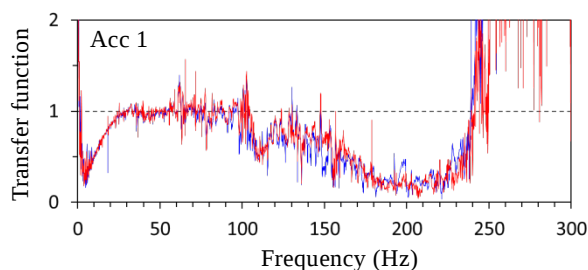


Fig. 18 Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 2 by Rinkai wave input

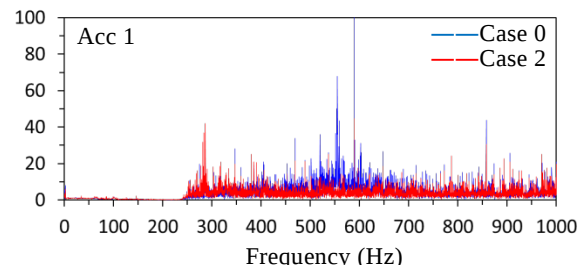
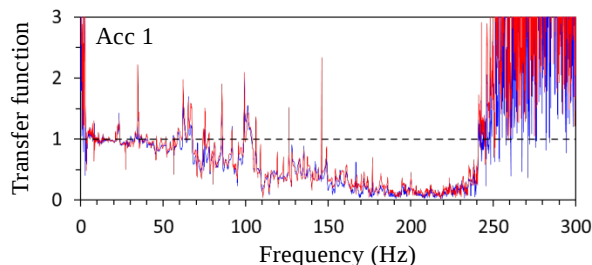


Fig. 19 Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 2 by Hachinohe wave input

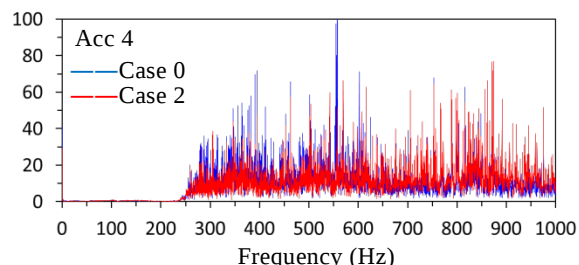
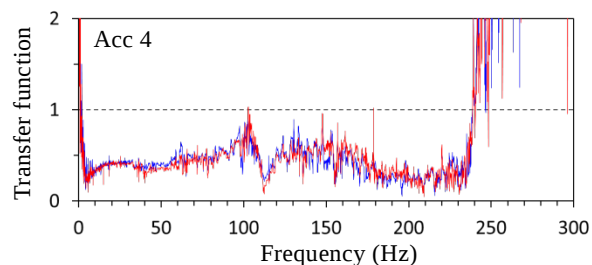


Fig. 20 Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 2 by Rinkai wave input

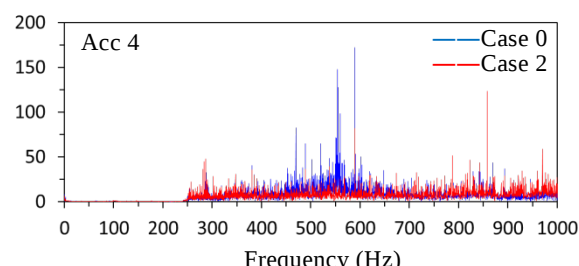
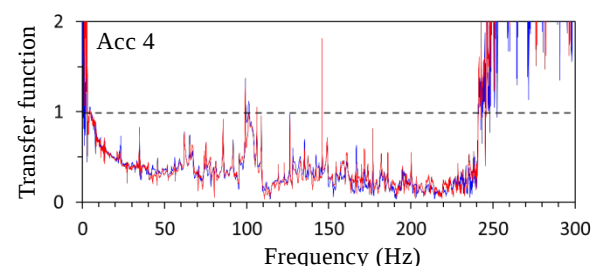


Fig. 21 Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 2 by Hachinohe wave input

だし、振動台の水平加速度 (Fig. 16 (Acc 1), Fig. 17 (Acc 1)) が示すように、変位が異なっても Case 0 と Case 2 の加速度波形に大きな差はないため問題はない。上下動の計測結果 (Fig. 16 (Acc 4), Fig. 17 (Acc 4)) を見ると、Case 0 の加速度と比較して Case 2 の方が大きく減少していることがわかる。このことから DITHER 信号が振動台の上下動の発生に関係していることがわかった。

Fig. 18 に臨界波、Fig. 19 に八戸波入力 of 水平動 (Acc 1) の伝達関数を示す。Case 0 と Case 2 を比較すると、いずれも地震波の周波数領域 (0~240 Hz) ではほぼ同じような変動量を示しているが高周波領域の 550 Hz 前後で Case 2 の方が大きく減少している。

上下動についても Fig. 20 および Fig. 21 に示すように、550 Hz 前後の領域で Case 2 の方が大きく減少して

いる。

5. まとめ

防災研究所の遠心力载荷装置は、2 年前に更新したが、その後の利用によりプラットフォームに関して不具合の指摘があり、昨年再度改修を行った。本報告では、改修による問題点の改善効果を確認するために、装置のプラットフォーム付近の振動特性を調査した。調査は、振動台、プラットフォームおよびアームにそれぞれ加速度計を設置し、土槽を振動台上に設置して、50 G の遠心場で振動台の加振を行い、動的実験を模擬する形で行った。

その結果、プラットフォームの剛性強化を確認したが、同時に振動台天板上で上下動が発生している

ことも確認した。計測結果の考察から、上下動の主な原因は、振動台を構成する機械部品のクリアランスレベルの隙間のガタ, DITHERと呼ばれる高周波数の振動台制御信号, プラットフォームの固定であると推察した。振動台を構成する機械部品のガタについては、現時点で根本的な解決は難しい。その他の事項について確認するために、追加の調査を行った。追加調査は、プラットフォームの固定を解除した場合, DITHER信号を解除した場合, プラットフォームの固定とDITHER信号の両方を解除した場合の3ケースを行った。

追加調査の計測結果を解析した結果、以下のことがわかった。

- (1) プラットフォームを固定すると、アームと一体化され、アームの固有振動数100～110 Hzで共振する。また、周波数が80～160 Hzの範囲では、加振方向については加速度の変動量が大きくなり、上下動については加速度が増加する、すなわち上下動が大きくなる。
- (2) DITHER信号は550 Hzの電気信号であり、解除すると振動台の鉛直方向の加速度が減少する、すなわち上下動の発生が抑制される。

結論として、今後遠心力载荷装置で行う動的実験はプラットフォームを固定せず, DITHER信号を解除して実験を行うことが望ましいといえる。

参考文献

- 井合進・飛田哲男・宮本順司・稲積真哉・清水博樹・関口秀雄(2004):遠心力载荷装置における無線LANを用いた高速データ計測システムの開発, 京都大学防災研究所年報, 第47号B, pp. 89-92.
- 北勝利・八嶋厚・柴田徹・上田孝行(1989):遠心力場における動的実験システムの開発, 京都大学防災研究所年報, 第32号B-2, pp. 207-217.

付 録

4.2節で紹介できなかったJMA神戸波, JR鷹取波, white noiseの伝達関数を付録1に示す。4.3節で紹介できなかったJMA神戸波, JR鷹取波, white noiseの伝達関数を付録2に示す。本報告で紹介できなかったCase 3の伝達関数を付録3に示す。

(論文受理日: 2012年6月1日)

Detailed Study of Dynamic Characteristics of the New Geotechnical Centrifuge at Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

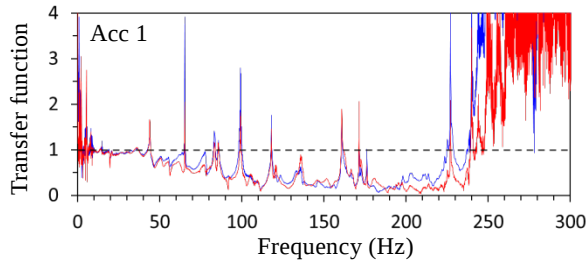
Kazuhide TOMISAKA, Susumu IAI and Tetsuo TOBITA

Synopsis

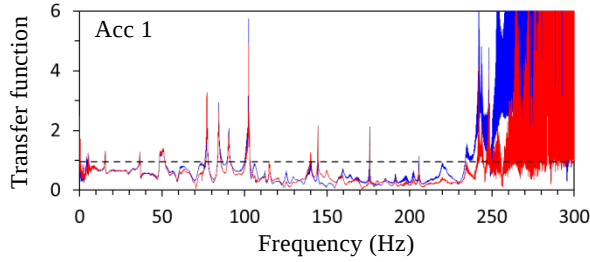
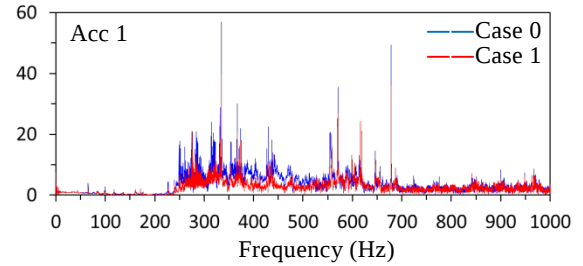
The geotechnical centrifuge at the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University was renewed two years ago. Consequently, the rigidity of the main frame of the device had improved. However, some problems emerged by subsequent use. The 1st problem was that the rigidity of the platform part of the device was low. The 2nd one was that the fixed system of the platform part adopted did not function. The 3rd one was that vibration of the vertical direction in the shaking table occurs when dynamic centrifuge tests were. In order to solve those problems, the platform part was renewed last year to what has high rigidity, and the fixed system was also changed. In the present study, we investigated the dynamic characteristics of the shaking table and the platform part by measuring the vibration when dynamic centrifuge tests were. As a result, it was found that the causes of vibration of the vertical direction were the structure of the shaking table and the control signal called "DITHER". Additionally, it compared with the result when not fixing the platform part. Based on the comparison results, it is suggested that it be used without fixing the platform part.

Keywords: geotechnical centrifuge, platform, shaking table, dynamic characteristics, vibration of the vertical direction

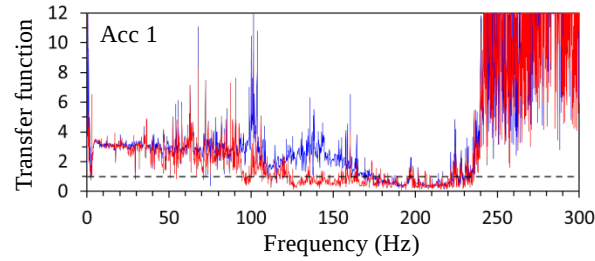
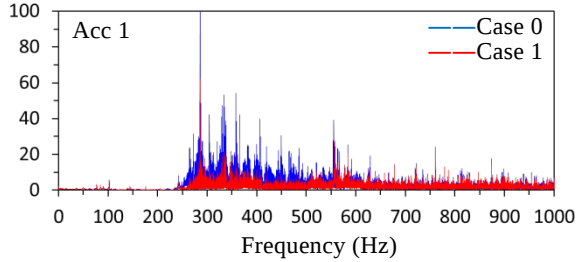
付録1



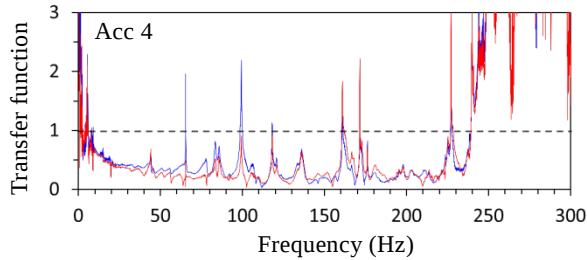
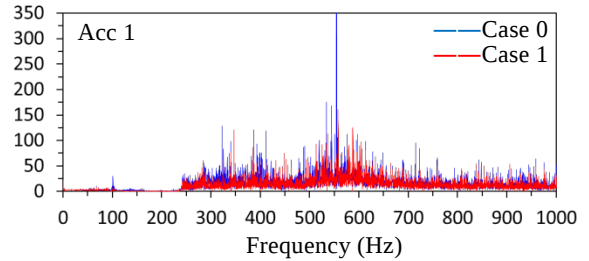
Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 1 by JMA Kobe wave input



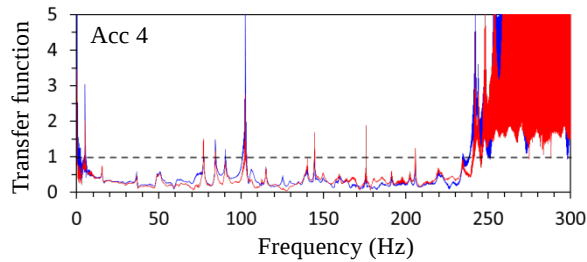
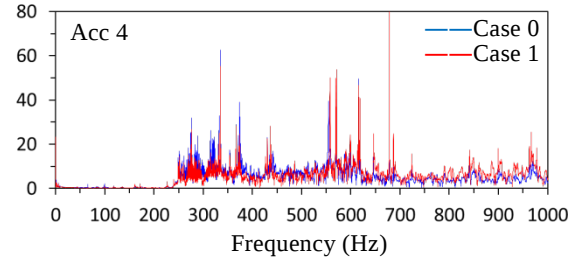
Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 1 by JR Takatori wave (50 %) input



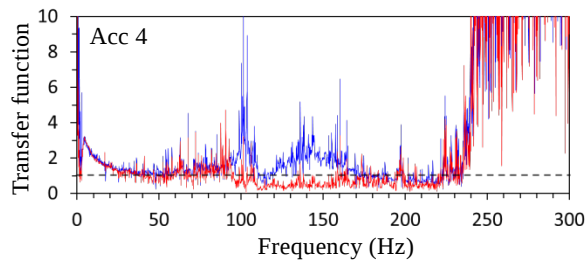
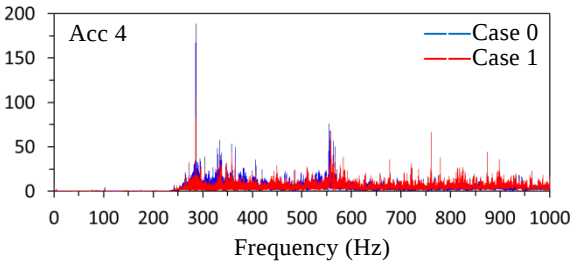
Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 1 by White noise input



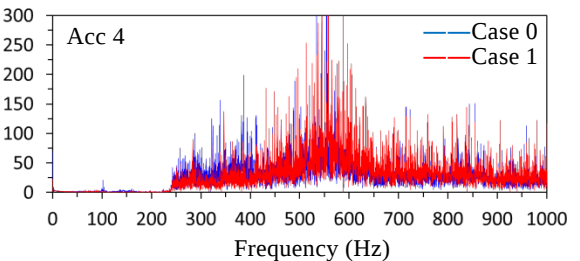
Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 1 by JMA Kobe wave input



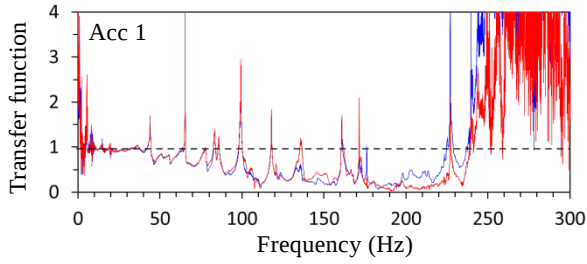
Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 1 by JR Takatori wave (50 %) input



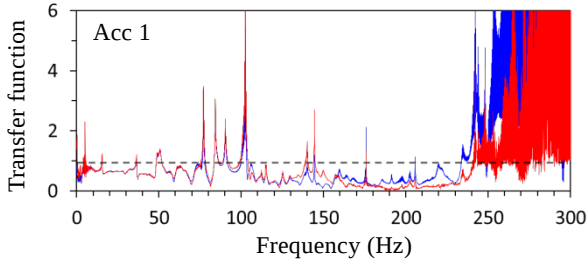
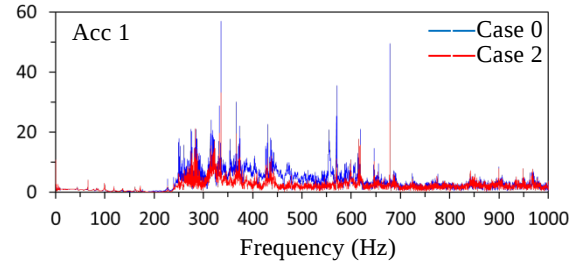
Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 1 by White noise input



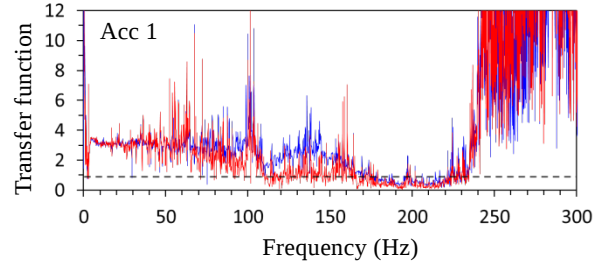
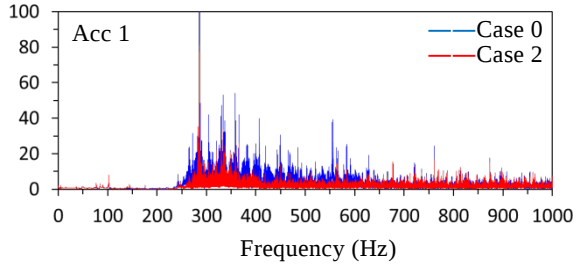
付録2



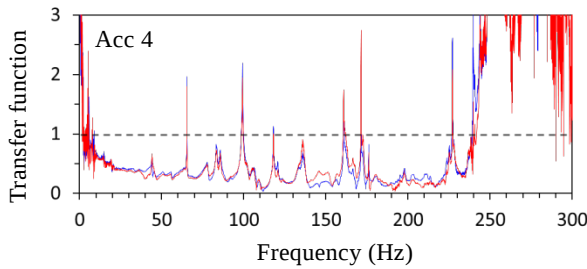
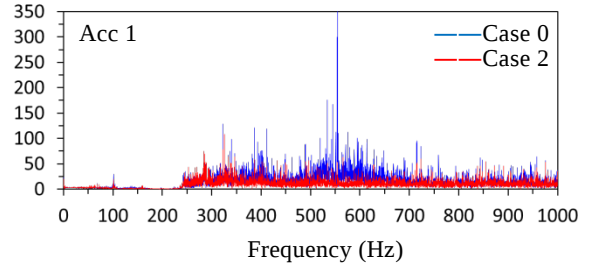
Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 2 by JMA Kobe wave input



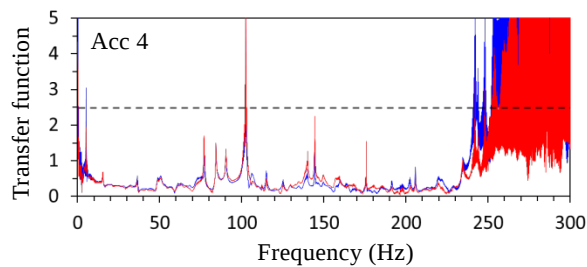
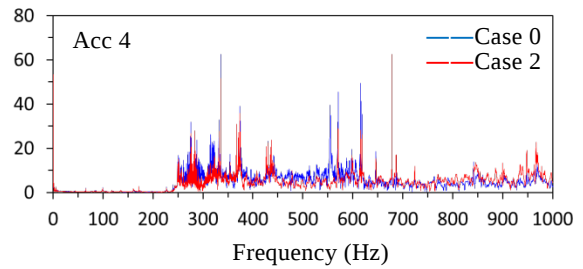
Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 2 by JR Takatori wave (50 %) input



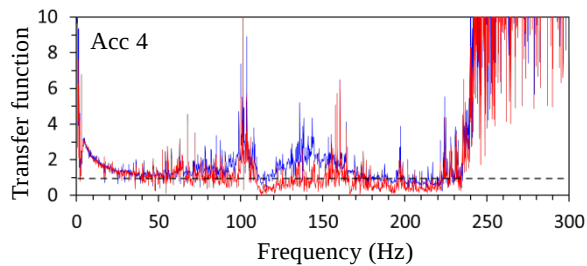
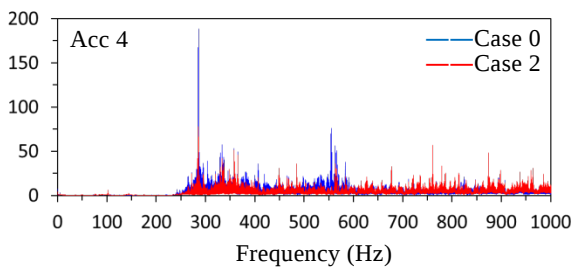
Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 2 by White noise input



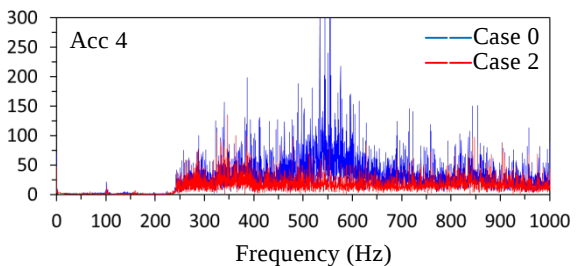
Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 2 by JMA Kobe wave input



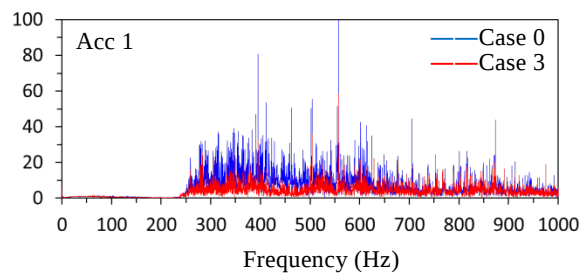
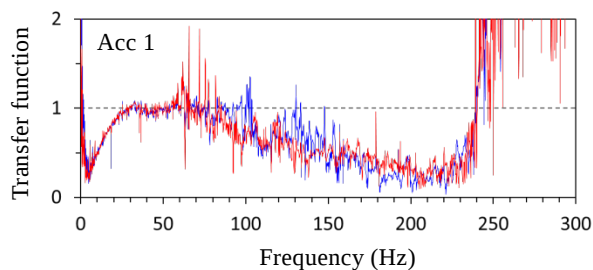
Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 2 by JR Takatori wave (50 %) input



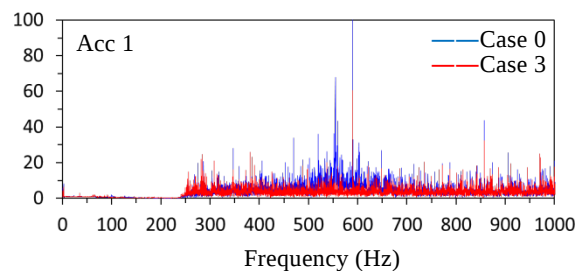
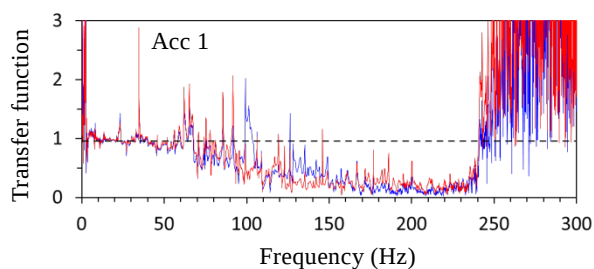
Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 2 by White noise input



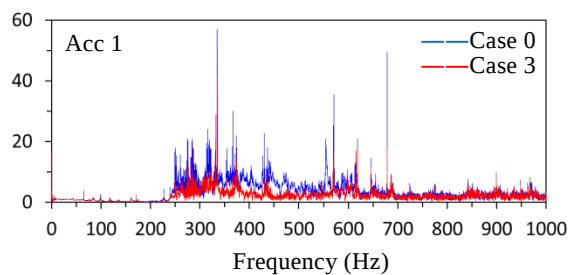
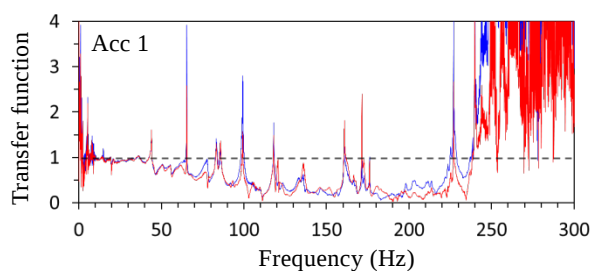
付録3



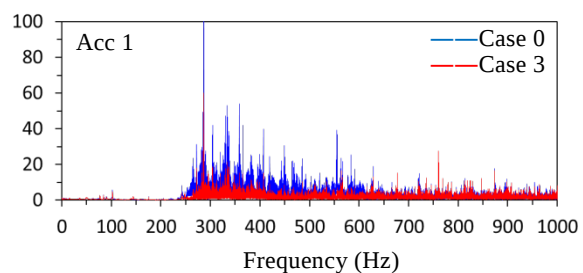
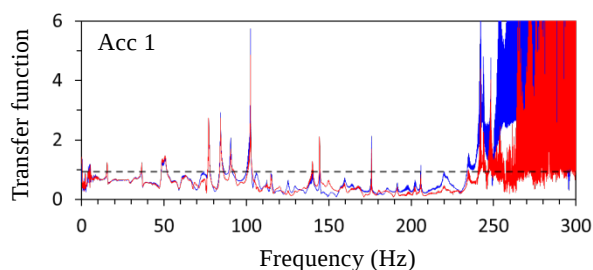
Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 3 by Rinkai wave input



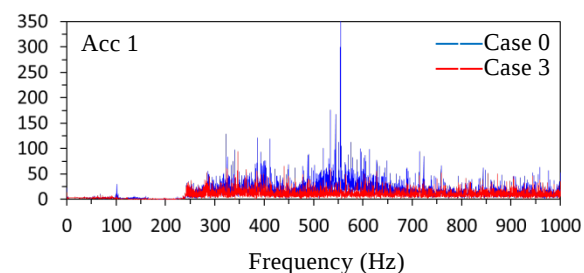
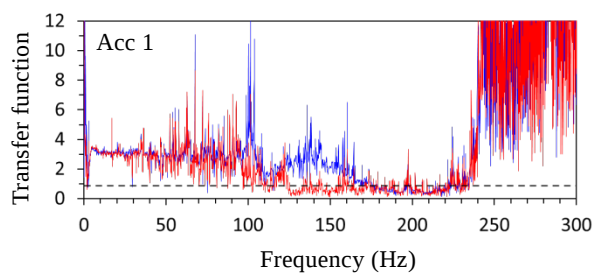
Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 3 by Hachinohe wave input



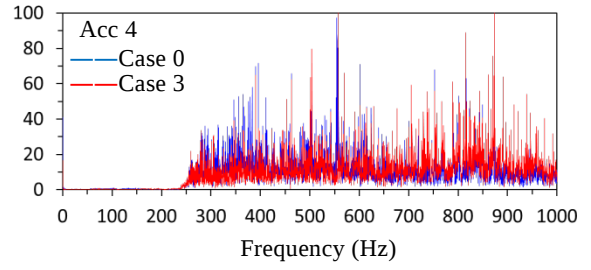
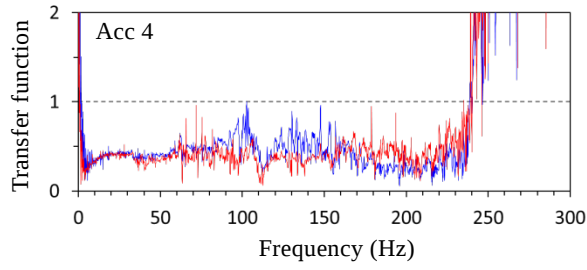
Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 3 by JMA Kobe wave input



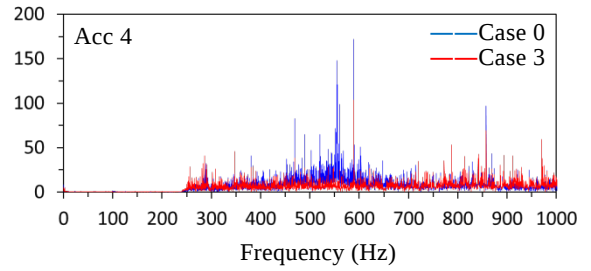
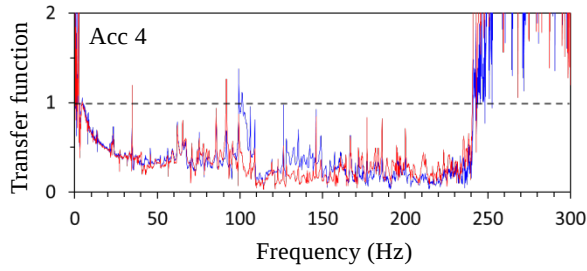
Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 3 by JR Takatori wave(50 %) input



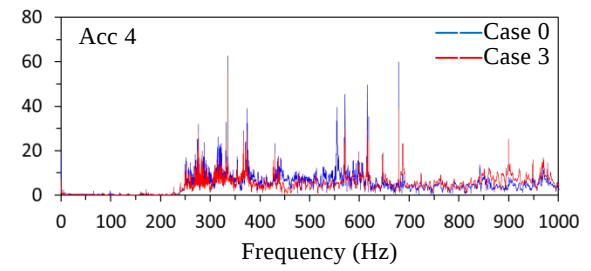
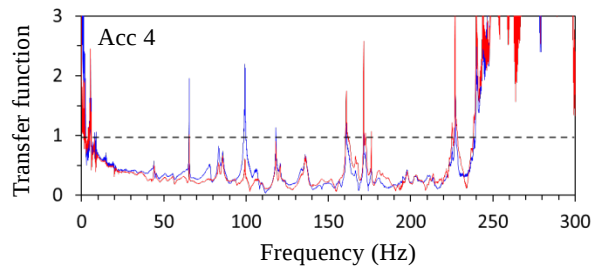
Transfer function in the horizontal motion for Case 0 and Case 3 by White noise input



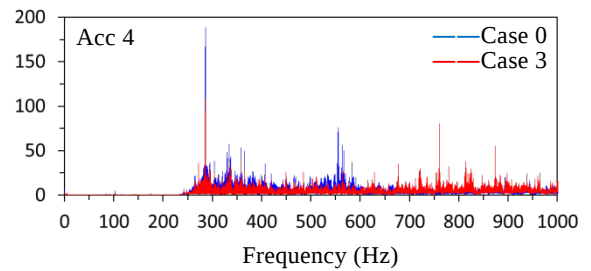
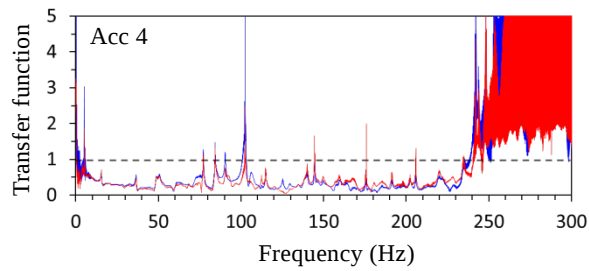
Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 3 by Rinkai wave input



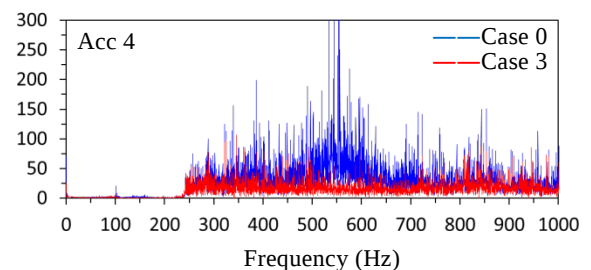
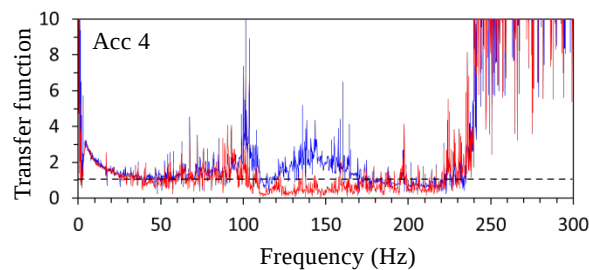
Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 3 by Hachinohe wave input



Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 3 by JMA Kobe wave input



Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 3 by JR Takatori wave (50 %) input



Transfer function in the vertical motion for Case 0 and Case 3 by White noise input