501 建物の床応答性状を考慮したサーバーラックの振動特性評価

The Evaluation of Dynamic Characteristics for Server Racks in Consideration of Floor Responses of Buildings.

○ 原田 智也 (明治大院) 正 荒川 利治 (明治大)

Tomoya HARATA and Toshiharu ARAKAWA

Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa

The purpose of this study is to evaluate the performance for earthquake resistance of a server rack in detail through vibration test that use a floor response waves of buildings. To reveal the fundamental dynamic characteristics of the server rack through the vibration test of sinusoidal waves input, it is analyzed the influence of connection number of the server rack, additional mass, and mass position. Earthquake responses characteristics of the server rack are also investigated through input waves assuming severe excitation.

Key Words: Server Rack, Vibration Test, Natural Frequency, Damping, Torsion, Earthquake Response

A 1. 研究目的

情報機器を収納するサーバーラックの耐震性能評価は、現在、確立されていない。大地震後の建物機能の維持の観点からも、建物床上に設置するサーバーラックの振動特性を明らかにすることは重要である。そこで、建物内に設置されたサーバーラックを想定し、建物の床応答における振動特性を考慮した振動実験により、詳細な耐震性能を評価することを研究目的とする。

A 2. 実験概要

ラックマウント型サーバーラック (Fig. A1) を対象とする。共振実験により、サーバーラックの基本的な振動性状である固有振動数、応答倍率、減衰比を検討する。また、地震応答実験により、建物の床応答特性を考慮した詳細な耐震性能を評価する。実験においては、サーバーラックの連結個数、積載量、積載位置の違いによる振動特性への影響を考察する。

A 3. ねじれ応答

連結時において、純並進成分 X_C 、ねじれによる並進成分 X_θ 、およびサーバーラック端部における並進成分 $X_C + X_\theta$ からねじれ応答を比較検討した (Fig. A2)。サーバーラック連結時の積載位置の違いにより、ねじれ応答が増幅されることを確認した。2 連結時において、積載の偏在がある場合、サーバーラック端部で並進方向応答と同程度にまでねじれ応答が増幅された。また、サーバーラック個々の積載位置の違いにより、応答増幅の振動数帯域が広がることなどが分かった。

A 4. 地震応答性状

低層、中層、高層建物の床応答特性を考慮した地震波を用いた実験により、振動数成分の高い地震波がサーバーラックの応答を増幅させることが分かった。また、連

Fig. A1 The dimensions and the section of members of a server rack

Fig. A2 Resonance curves for translational and torsional motion (X direction, double racks)

結個数、積載量が増えるとサーバーラックの固有振動数が低くなり、地震時の応答が増幅された。

1. 序論

情報機器は都市機能を維持し、近年、日常生活を送る上で必須なものとなっている。建物内に設置するサーバーラックの耐震性能の評価方法は確立されておらず、大地震後の建物機能の維持の観点からも、建物床上に設置するサーバーラックの振動特性を明らかにすることは重要である。そこで、建物内の床上に設置されたサーバーラックを想定し、建物の床応答における振動特性を考慮した振動実験により、詳細な耐震性能を評価することを研究目的とする⁽¹⁾。本論文では、サーバーラックの基本的な振動特性である固有振動数、応答倍率、減衰比を共振実験により明らかにする。また、建物床上に設置されているサーバーラックを想定し、建物の床応答性状を考慮した地震動を用いた地震応答実験により、サーバーラックの詳細な耐震性能評価を行う。実験においては、サーバーラックの使用実態に合わせ、連結させた場合、積載量を変化させた場合、および積載位置が偏在した場合について、振動性状の変化を考察し、特に、ねじれ応答の増幅に関して検討を行う。

2. 実験概要

2・1 サーバーラック ラックマウント型サーバーラック（本体質量 125[kg]）を対象とし、サーバーラックを振動台に固定して実験を行った。サーバーラックの前後方向を X 方向とした。寸法および断面を Fig. 1 に示す。

2・2 実験項目 実験においては、サーバーラックの連結個数、積載量、積載位置の違いによる振動特性への影響を、X 方向および Y 方向について考察した。実験における実験項目を Fig. 2 に示す。

連結個数の違いによる実験は、積載無しサーバーラックの連結個数を変化させて行った。連結個数は単体、2 連結、および 4 連結とした。積載量の違いによる実験は、最大積載量を 600kg とし、積載量を変化させて行った。積載位置の違いによる実験は、2 連結および 4 連結において、積載量を 420kg に限定し、積載位置を変化させて行った。

2・3 入力波 振動実験は明治大学理工学部の 3 次元振動台を用いて行った。実験内容は、正弦波加振による共振実験、および実地震波入力による応答実験である。共振実験では、入力加速度を 50gal で一定とし、振動数を 1.0 ～ 20.0Hz で入力し、共振曲線を作成した。地震応答実験では、1995 年 1 月 17 日の兵庫県南部地震において神戸海洋気象台にて観測された 3 方向地震動（地表面波）、および同 3 方向地震動を基礎部に入力したときの RC 造 2 層建物最上層床応答波（2 層床応答波）、RC 造 6 層建物最上層床応答波（6 層床応答波）、および RC 造 15 層建物最上層床応答波（15 層床応答波）を用いた。地震応答実験における入力波のフーリエスペクトルを Fig. 3 に示す。各床応答波を求める際の RC 造建物の設計は、サーバーラックを設置する一般的なデータセンターを想定した。

Fig. 1 The dimensions and the section of members of a server rack

Fig. 2 Manners setting up each mass

Fig. 3 Fourier spectra of input earthquake waves

3. 並進方向振動性状

振動台入力加速度とサーバーラック頂部応答加速度との関係から、連結個数、積載量、積載位置の違いによる共振曲線を各方向について作成し、固有振動数、加速度応答倍率、および減衰比をそれぞれ検討する。実験においては、X方向入力の場合のX方向応答およびY方向入力の場合のY方向応答から共振曲線を作成した。なお、Z方向については剛体的な挙動をしていると考えられる。また、X方向、Y方向ともに2次モード以降の刺激性が低いため、本報告では1次モードについて考察する。共振曲線の1次ピークにおける振動数を固有振動数とし、そのときの加速度応答倍率を最大加速度応答倍率とした。減衰比は共振曲線において $1/\sqrt{2}$ 法⁽²⁾を用いて算定した。Table 1 に連結個数および積載位置の違いによる振動性状を示す。

3・1 連結個数 サーバーラック積載無しの場合の連結個数の違いによる固有振動数、最大加速度応答倍率、および減衰比を考察する。Fig. 4 に各方向の連結個数別の共振曲線を示す。

固有振動数は、連結個数が増えるほど、X方向で低下し、Y方向では変化が無かった。X方向の固有振動数は、単体で8.2Hzと高いものの、4連結では5.6Hzまで低下し、建物の固有振動数に近づいた。連結個数をさらに増やした場合、ある一定の値に漸近すると考えられるが、その詳細は定かではない。

最大加速度応答倍率は、連結個数が増えるほど、X方向で増加し、Y方向で低減した。X方向の最大加速度応答倍率は、単体で5.0倍であるが、4連結時には9.8倍と単体の2倍程度まで増幅された。

減衰比は、連結個数の違いによる変動が各方向とも小さい。X方向単体の減衰比は14%と大きな値であるが、扉・サイドパネルの影響が表れていると考えられる。扉・サイドパネルによる減衰効果は、サーバーラックの積載が増えることにより見られなくなった。

3・2 積載量 サーバーラックの積載量の違いによる固有振動数、最大加速度応答倍率、および減衰比の変化を考察する。Fig. 5 に積載量に対するサーバーラック単体の振動性状を示す。

固有振動数は、各方向とも、積載量が増えるほど低下する傾向が見られた。X方向の固有振動数は、積載量が増えるほど、7.0Hz程度の値から低下するが、積載300kg以上の場合から4.5Hzに漸近すると考えられる。Y方向の固有振動数は、積載量が増えるほど、3.5Hz程度の値から低下するが、積載300kg以上の場合、固有振動数は2.2Hzに漸近すると考えられる。

最大加速度応答倍率は、各方向とも、積載量が増えるほど低下する傾向が見られた。X方向の最大加速度応答倍率は、積載量が増えるほど、8倍程度の値から低下し、最大積載量である積載600kgの場合には、6倍程度まで低下した。Y方向の最大加速度応答倍率は、積載量が増えるほど、

Fig. 4 Resonance curves for each connection of a server rack

Fig. 5 Dynamic characteristics for each addition mass

Table 1 Dynamic characteristics for each connection of a server rack and addition mass

Connection	Addition mass	Single		Double			Quadruple	
		Non mass	Addition mass	Non mass	Mass pattern 1	Mass pattern 2	Mass pattern 3	Non mass
Natural frequency [Hz]	X dir.	8.2	4.5	6.9	3.8	3.7, 6.5	3.9	5.6
	Y dir.	3.8	2.2	3.8	2.4	2.3	2.1	3.9
Magnification factor	X dir.	5.0	6.2	7.9	5.5	4.6	6.5	9.8
	Y dir.	22.1	9.3	18.1	6.7	6.9	7.6	5.3
Damping ratio [%]	X dir.	14	10	7	10	10	12	8
	Y dir.	3	9	3	11	8	7	11

18倍程度の値から低下し、積載600kgの場合には9倍程度まで低下した。

減衰比は、Y方向よりもX方向が大きくなった。方向により変形性状が異なるため、減衰効果も異なっていると考えられる。X方向の減衰比は、ばらつきが大きく、積載量に対する傾向が明瞭に見られなかった。Y方向の減衰比は積載量が増えるほど増加する傾向が見られた。Y方向におい

て、減衰比が大きいと最大加速度応答倍率が低下することが分かった。

3・3 積載位置 2連結および4連結のサーバーラックにおいて、積載位置の違いによる固有振動数、最大加速度応答倍率、および減衰比の変化を考察する。Fig. 6に各方向の積載位置の違いによる共振曲線を示す。

固有振動数は、積載位置の違いにより、X方向、Y方向ともにほとんど変化しなかった。積載パターンごとの総質量は420kgで固定して実験を行ったため、連結時の固有振動数はサーバーラックの総質量でほぼ特定できることが分かった。2連結積載パターン2の共振曲線において、ピークの山が2つ表れている。これは、左右のサーバーラックの積載位置の違いにより、サーバーラック個々の固有振動数が変化し、それぞれのサーバーラックの特性が表れたためであると考えられる。一方、2連結積載パターン1の共振曲線においては、ピークの山は2つ表れていない。片方のサーバーラックが積載無しであり、全体の応答に影響を与えなかったためであると考えられる。よって、サーバーラック個々の積載位置の違いにより、応答が増幅する振動数帯域が広がると考えられる。

最大加速度応答倍率は、積載位置の違いにより若干異なるが、その変動は10%程度と小さい。

Fig. 6 Resonance curves for each mass position

Fig. 7 Torsional motion of the plan of a server rack

減衰比は、連結個数の違いによる変動が各方向とも小さい。積載位置の違いと最大加速度応答倍率、および減衰比との関係は薄いと考えられる。

Fig. 8 Resonance curves for translational and torsional motion (X direction, double racks)

Fig. 9 Resonance curves for translational and torsional motion (X direction, Quadruple racks)

Table 2 Response magnification factor of torsion

Connection	Double			Quadruple		
	Addition mass	Non mass	Mass pattern 1	Mass pattern 2	Mass pattern 3	Addition mass
X_θ	1.9	5.5	2.2	1.3	1.4	4.3

4. ねじれ振動性状

サーバーラック連結時における積載量の偏在により、ねじれ応答が生じると考えられる。よって、2連結および4連結のサーバーラックにおいて、振動台入力加速度とサーバーラック頂部の端部におけるねじれ応答加速度との関係から、積載位置の違いによるねじれ応答の最大加速度応答倍率を考察する。Table 2 にねじれ応答の加速度応答倍率を示す。

本報告では、サーバーラック連結時の平面における中心点をC点、サーバーラックに向かって左側をL点とした。C点における純並進成分を X_C 、L点におけるねじれ応答によって生じる並進方向成分を X_θ とした (Fig. 7)。

Fig. 8 に2連結時における純並進成分 X_C 、ねじれによる並進成分 X_θ 、およびサーバーラック端部における並進成分 $X_C + X_\theta$ の共振曲線を、Fig. 9 に4連結時における X_C 、 X_θ 、および $X_C + X_\theta$ の共振曲線をそれぞれ示す。

積載位置の違いがあると、ねじれ応答は増幅されることが分かった。また、積載位置の違いが無い場合には、ねじれ応答はほとんど見られない。2連結時におけるねじれ応答の最大加速度応答倍率は、積載位置の違いで比較すると、積載パターン1の場合に6倍程度と最も大きく、並進成分と同程度にまで応答が増幅された。左右のサーバーラックにおける積載量の差が、ねじれ応答を増幅させる直接的な要因であると考えられる。4連結時も2連結時と同様にねじれ応答が増幅されている。4連結時の最大加速度応答倍率は2連結積載パターン1の場合と同程度であり、固有振動数もほぼ同じ値である。よって、連結時において積載が片方のサーバーラックに偏在している場合、連結個数を増やしても振動性状はほとんど変化しないことが予想できる。ただし、連結時においては、サーバーラック個々の積載位置の違いがあると、それぞれのサーバーラックの固有振動数の違いにより、共振曲線におけるピークの山が複数表れ、応答増幅の懸念がある固有振動数帯域が広がる危険性がある。

5. 地震応答性状

地震応答実験による加速度応答時刻歴波形を検討し、連結個数、積載量、積載位置、入力波の違いにおける加速度応答倍率を各方向について算定した。地震応答実験においてサーバーラックには、残留変形が無かったことから、地震動入力時には弾性範囲内であったと考えられる。Table 3 に地震波入力時における並進方向の加速度応答倍率を示す。

5・1 並進方向応答 並進方向の加速度応答波形から、連結個数、積載量、積載位置、入力波の違いによる純並進成分 X_C の最大加速度応答倍率を検討した。最大加速度応答倍率は、振動台における入力加速度の最大値に対するサーバーラック頂部における純並進応答加速度の最大値の比とする。Fig. 10 にサーバーラックへの入力波

Fig. 10 Earthquake input wave to a server rack and response wave of a server rack

Fig. 11 Response waves of the top of a server rack (X direction, double racks)

Table 3 Response magnification factor of earthquake response

Connection		Single		Double			Quadruple	
Addition mass		Non mass	Non mass	Mass pattern 1	Mass pattern 2	Mass pattern 3	Non mass	Addition mass
X dir.	2 stories	1.6	1.9	2.2	1.9	2.2	1.8	1.6
	6 stories	1.3	1.5	2.1	2.0	2.2	1.2	1.4
	15 stories	1.3	1.3	1.6	1.6	1.6	1.8	1.7
Y dir.	2 stories	2.2	2.8	2.6	1.9	3.1		
	6 stories	1.8	2.0	2.3	2.7	2.7		
	15 stories							
X _θ dir.	2 stories		0.7	1.5	1.6	1.4	0.4	1.2
	6 stories		0.3	1.6	1.3	1.3	0.4	1.0
	15 stories		0.1	1.3	0.6	0.2	0.4	1.0

形およびサーバーラックの応答波形を示す。

床応答波の卓越振動数は、2層建物で2.51Hz、6層建物で1.45Hz、15層建物で0.98Hzである。また、サーバーラックの固有振動数は積載無しの場合で約7.0Hz、積載300kg以上の場合で約4.5Hzである。

X方向の最大加速度応答倍率は、2層建物および6層建物で2倍程度、15層建物で1.5倍程度となった。Y方向の最大加速度応答倍率は、2層建物で3倍程度、6層建物で2.5倍程度となった。各方向とも、積載を付加させると応答が大きくなった。

サーバーラックを設置する建物が低層になるにつれて、建物の固有振動数がサーバーラックの固有振動数に近づき、応答は増幅した。あるいは、サーバーラックに積載を付加させた場合、連結個数を増やした場合には、サーバーラックの固有振動数が低くなり、設置する建物の卓越振動数に近づいたことから、応答は増幅した。

5・2 ねじれ応答 ねじれの加速度応答波形から、積載位置、入力波の違いによるねじれ応答の最大加速度応答倍率を検討した。最大加速度応答倍率は、振動台における入力加速度の最大値に対するサーバーラック頂部の端部におけるねじれ成分応答加速度の最大値の比とする。

Fig. 11 にサーバーラックの応答における純並進成分 X_c 、ねじれによる並進成分 X_θ 、およびサーバーラック端部における並進成分 $X_c + X_\theta$ の時刻歴波形を示す。

並進方向応答と同様に15層建物床応答波入力時のねじれ応答は小さい。積載の偏在がある場合、サーバーラック端部におけるねじれ応答は並進方向応答の8割程度である。サーバーラック端部には、並進方向応答に加えてねじれ応答が生じ、大きな応答となる場合があることが分かった。積載位置の違いが無い場合においてもねじれ応答が確認されたが、サーバーラック前面側に重心が偏在しているため、ねじれ応答が生じていたと考えられる。

6. 結論

サーバーラックを対象とした共振実験により、固有振動数、加速度応答倍率、減衰比を考察し、また、建物内におけるサーバーラックの設置条件を考慮した地震応答実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 連結個数が増えるほど、固有振動数はX方向で低下し、加速度応答倍率は大きくなった。減衰は、連結個数の違いによる影響が小さい。
- 2) 積載量が増えるほど、固有振動数は増加し、加速度応答倍率は小さくなった。減衰は積載量に対する傾向は見えにくいだが、積載物による減衰付加が確認された。
- 3) 連結時の固有振動数はサーバーラックの自重および積載量の総質量でほぼ特定できることが分かった。積載位置が加速度応答倍率に与える影響が少ない。サーバーラック個々の積載位置の違いにより、応答増幅の振動数帯域が広がることが分かった。
- 4) サーバーラック連結時の積載位置の違いにより、ねじれ応答が生じると分かった。2連結時において、積載パターン1の場合に、サーバーラック端部の応答が6倍と最も大きく、並進方向応答と同程度にまで増幅された。左右のサーバーラックにおける積載量の差がねじれ応答を増幅させる直接的な要因である。4連結時も2連結時と同様にねじれ応答が増幅されている。
- 5) 振動数成分の高い地震波を入力した場合に、サーバーラックの応答は増幅することが分かった。連結個数、積載量が増えるとサーバーラックの固有振動数が低くなり、応答が増幅された。
- 6) ねじれ応答は、積載位置の違いにより、地震波入力時においても増幅されることが分かった。積載に偏在がある場合、サーバーラック端部におけるねじれ応答は純並進成分応答の8割程度の大きな応答が生じた。
- 7) 共振曲線の最大加速度応答倍率と比較して、地震波入力時の最大加速度応答倍率は、2割程度となっていた。

本報告は、エーピーシー・ジャパンとの共同研究の一部である。

参考文献

- (1) 原田智也, 荒川利治, 飯島康弘, 篠崎慶一, 地震時建物の床応答特性を考慮した振動実験に基づくサーバーラックの振動性状評価, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, (2008), 213-214
- (2) 日本建築学会, 建築物の減衰, (2000), 92-93