

建築設備の横引配管の耐震性能評価法

諏訪 仁 勝 俣 英 雄
上 宮 晃 雄 木 村 剛

(オーク設備工業)

(本社設計本部)

Seismic Performance Evaluation of Horizontal Piping for Building Services

Hitoshi Suwa Hideo Katsumata

Akio Uemiya Takeshi Kimura

Abstract

The function of building is required to be maintained against earthquakes, achieving the business continuity. The building services are one of the significant factors to maintain the function of building after the occurrence of earthquakes. The shaking table tests were carried out with respect to the systems which consist of horizontal piping and seismic supporting members. It was verified that the horizontal piping was not damaged but some seismic supporting members were damaged. The judgment method of the damage level of seismic supporting members through the seismic intensity scale of input wave was worked out by using the results of shaking table tests. Moreover, the damage risk of the seismic supporting member at each floor of the building was calculated through this judgment method.

概 要

最近、事業継続マネジメント(BCM)の観点より建物の機能性が注目され、躯体に加えて建築設備の耐震安全性が重要となっている。このため、建築設備のうち横引配管を対象に耐震支持材を建築設備耐震設計・施工指針に基づき選定し、耐震支持の方法が横引配管や耐震支持材に与える影響を振動台実験に基づき検証した。つぎに、改正消防法などの地震被害想定への適用を目的に、震度階級を用いて横引配管の耐震性能評価法を開発した。

1. はじめに

最近、事業継続マネジメント(BCM)が注目され、地震後にも、重要業務をできる限り継続させることが求められている。地震後に建物の機能性を確保するには、躯体に加えて非構造部材や建築設備の耐震安全性が重要となる。本研究では、建築設備の横引配管を対象に耐震安全性を検討する。配管の耐震支持材は、建築設備耐震設計・施工指針¹⁾に基づき設計されるが、耐震支持材は配管の設置場所により異なり、鋼材を用いたもの(以下、A種耐震支持材)と全ネジボルトをブレース材として用いたもの(以下、B種耐震支持材)が使用されている。現状では、配管と耐震支持材を組み合わせた配管系統としての耐震安全性は十分に検証されておらず、既往研究^{2)~4)}においても、例えば高層建物を想定し消火設備配管に対する振動台実験⁴⁾などが行われ始めている。しかし、これらの既往研究では主としてB種耐震支持材を対象に振動台実験が行われており、A種耐震支持材のみやA種耐震支持材とB種耐震支持材を組み合わせた配管系統の耐震安全性は十分に検証されていない。

このような背景を踏まえ、横引配管の設置場所に対応した耐震支持材を建築設備耐震設計・施工指針に基づき

設計し、耐震支持の方法が横引配管や耐震支持材に与える影響を振動台実験に基づき検証する。つぎに、実験結果に基づき、改正消防法における建築設備の地震被害想定などへの適用を目的に、横引配管の実用的な耐震性能評価法を検討する。

2. 実験条件

2.1 試験体

スプリンクラー設備を想定して配管は炭素鋼管とし、主管の呼径は150A、分岐配管は50Aとして、吊り長さは100cmとする。建築設備耐震設計・施工指針では、耐震支持の方法はTable 1のように横引配管の設置場所により異なるため、上層階を想定した系統1と中間階を想定した系統2の2系統を対象に振動台実験を行う。横引配管を

Table 1 設置場所と耐震支持材の関係
Seismic Supporting Members
(Seismic Class A or Seismic Class B)¹⁾

想定される設置場所	耐震支持材の種類
上層階、屋上、塔屋	A種耐震支持材のみ
中間階	50m以内に1箇所はA種耐震支持材とし、その他はB種耐震支持材

支持するA種ならびにB種耐震支持材は、満水状態を想定して呼径に応じた水重量を考慮した上で、耐震クラスAまたは耐震クラスBに適合するように設計する。なお、両系統ともに横引配管の配置寸法および吊り長さは同一とする。建築設備耐震設計・施工指針では、耐震支持材の設置間隔のみ規定され設置場所については特に規定されていないため、耐震支持の方法を方向別にTable 2のように設定する。このとき、横引配管と支持材の配置図をFig. 1に、支持材の部材仕様をTable 3に、試験体の外観図をFig. 2に示す。

2.2 振動台実験の条件

実験では満水状態における配管内の水重量を再現するため、Fig. 3に示すように横引配管の周囲にサンダムシート

Table 2 耐震支持の方法
Method of Seismic Supporting

		耐震支持の方法	
系統1	X方向	両端をA種耐震支持材で固定	
	Y方向	一端のみをA種耐震支持材で固定	
系統2	X方向	一端をA種耐震支持材で固定 他端をB種耐震支持材で固定	
	Y方向	両端をB種耐震支持材で固定	

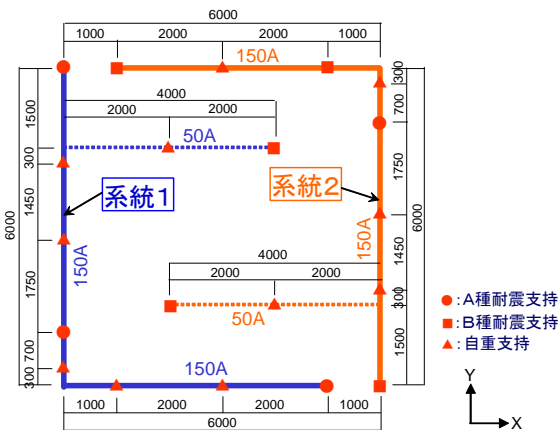


Fig. 1 横引配管の系統図
System Diagram of Horizontal Piping and Seismic Supporting Members

Table 3 耐震支持材の部材寸法
Seismic Supporting Members

	150A			50A		
	支持方法	支持材	取付金物	支持方法	支持材	取付金物
A種耐震支持		L-70×70×6	M16			
B種耐震支持		M8	M8		M8	M8
自重支持		M8	M8		M8	M8

トを巻き付けて行った。また、横引配管の損傷の有無を調べるため、Fig. 4に示すように約0.1MPaの空気圧を予め与えて振動台実験を行い、加振前後で空気圧の変化を計測した。ここで、横引配管の加速度ならびに変位の計測位置をFig. 5に示す。つぎに、振動台実験で用いた地震波をTable 4に示す。実験では、Table 4に示す原波に対して10%~125%まで入力レベルを徐々に大きくし、加振レベルと横引配管および耐震支持材の損傷状態の関係を確認

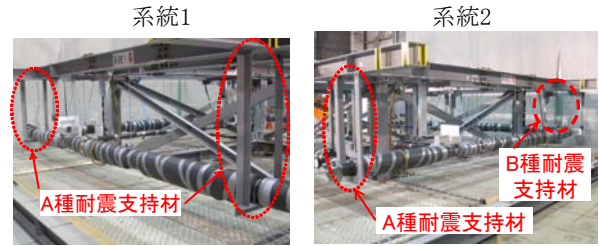


Fig. 2 横引配管と耐震支持材の写真
Experimental Photos of Horizontal Piping and Seismic Supporting Members



Fig. 3 サンダムシートの貼り付け
Horizontal Piping with Sheets

Fig. 4 圧力計の設置
Pressure Gauge

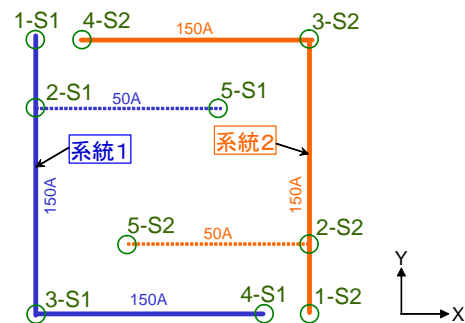


Fig. 5 加速度ならびに変位の計測位置
Measurement of Acceleration and Displacement

Table 4 振動台実験に用いた地震波
Seismic Waves for Shaking Table Test

		加速度 (cm/s ²)	計測震度	震度階級
エルセントロ波	NS	341.7	5.2	震度5強
	告示波 位相:ランダム	326.0	5.5	震度6弱
神戸波	NS	818.0	6.2	震度6強
	EW	617.3	6.1	震度6強
	3方向	891.0	6.4	震度6強

Table 5 試験体の固有振動数
Natural Frequency of Each System(Hz)

	系統1	系統2
X方向	4.2	4.1
Y方向	2.5	3.3

した。

2.3 試験体の固有振動数

地震波による加振前にランダム波加振を行い試験体の固有振動数を求めると、Table 5となる。固有振動数が高いほど配管系統としての水平剛性が大きくなり、地震時

の横引配管の水平変位(揺れ幅)を小さくできる利点がある。固有振動数の高い順に並べると、A種耐震支持材で両端を固定(系統1のX方向) > A種耐震支持材で一端をB種耐震支持材で他方の一端を固定(系統2のX方向) > B種耐震支持材で両端を固定(系統2のY方向) > A種耐震支持材のみで一端を固定(系統1のY方向)となる。従って、A

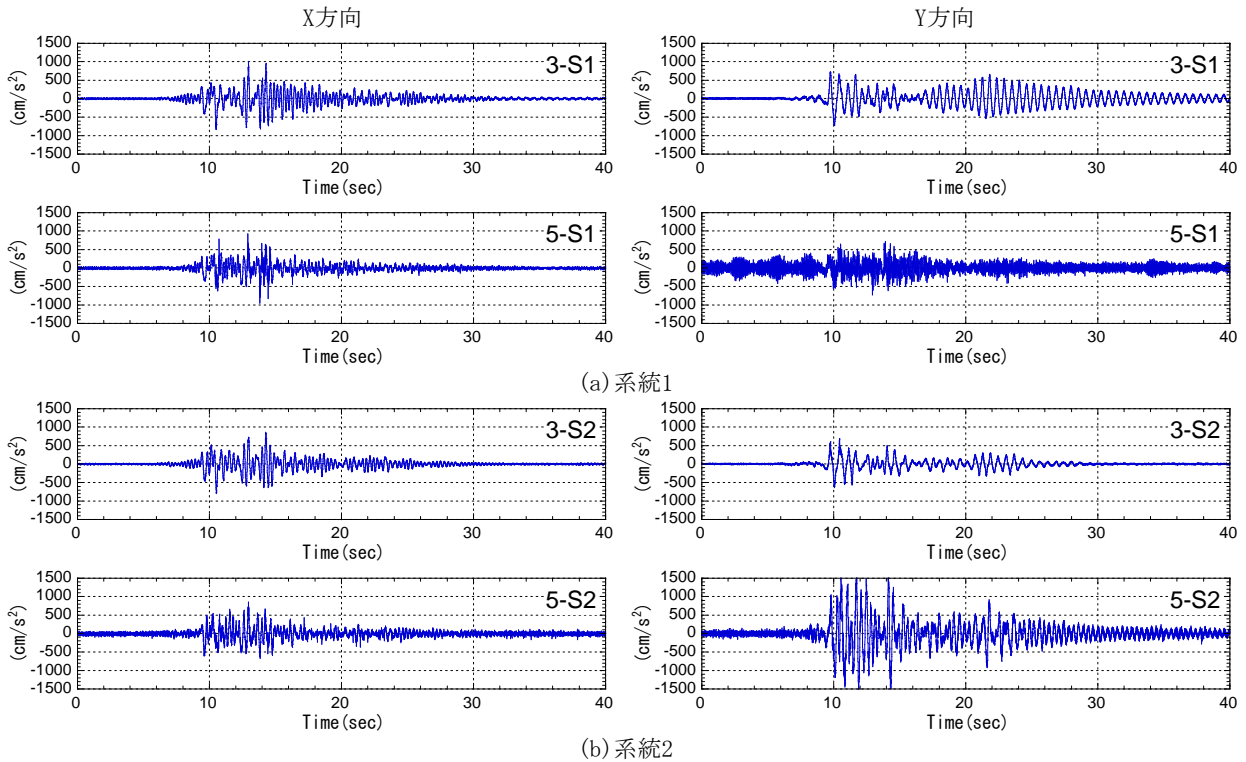


Fig. 6 横引配管の加速度応答波形
Time History Response of Acceleration

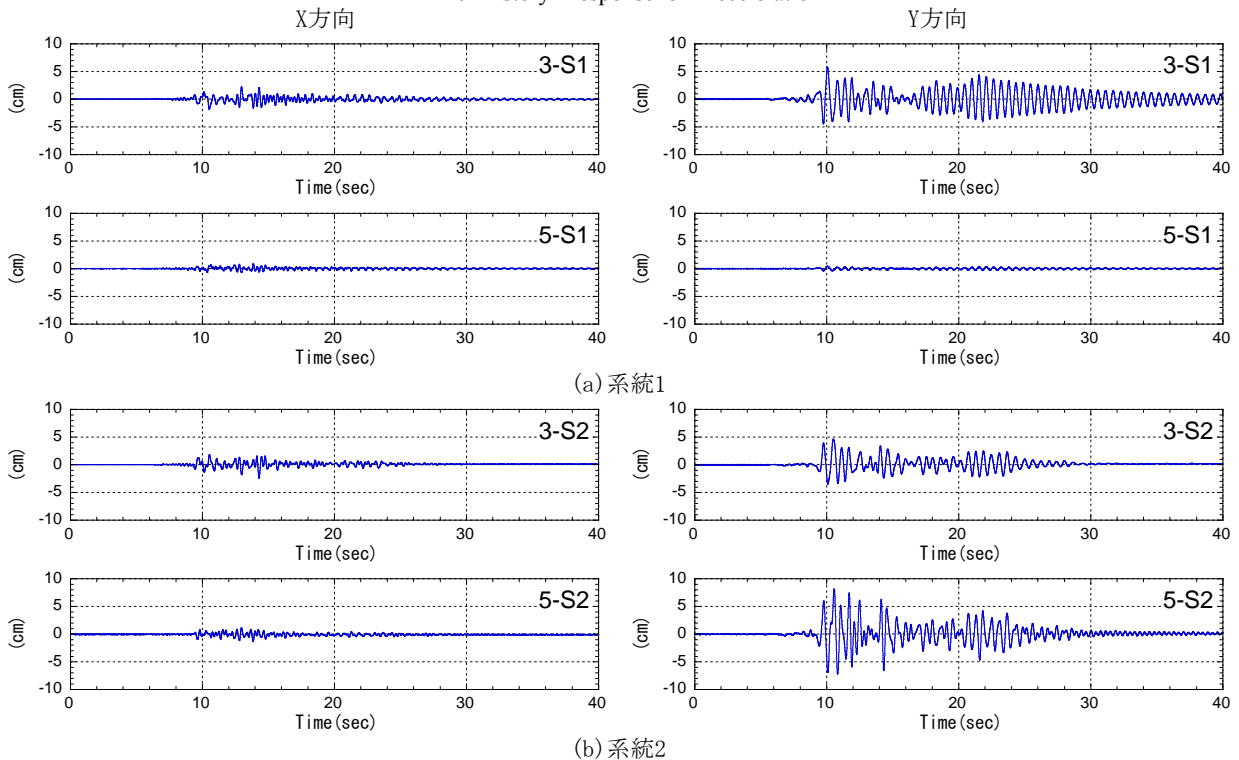


Fig. 7 横引配管の変位応答波形
Time History Response of Displacement

種耐震支持材のみで一端を固定しても横引配管の固有振動数を高くすることは難しく、少なくともB種耐震支持材で他端を固定する必要がある。

3. 横引配管の地震応答

3.1 各系統および各方向による応答比較

神戸波(3方向)×50%で加振したとき、横引配管の加速度応答波形を系統別かつ方向別にFig. 6に示す。同様に、横引配管の上部固定部に対する相対変位応答波形をFig. 7に示す。なお、図中の記号は、Fig. 5の計測位置に対応している。

系統1の加速度応答を方向別に比較すると、方向による加速度応答の差異は小さく、系統2でも同様の傾向が見られる。つぎに、系統1と系統2の加速度応答を比較すると、系統による加速度応答の差異は概ね小さい。しかし、枝管端部の計測位置5-S1と5-S2におけるY方向の加速度応答は、系統2が系統1と比較して大きくなっている。

系統1の変位応答を見ると、主管のエルボ部の計測位置(3-S1)におけるY方向の変位応答がX方向と比較して大きくなっている。系統2の変位応答でも同様の傾向があり、系統2では枝管端部の計測位置(5-S2)のY方向の変位応答もX方向と比較して大きくなっている。この原因として、Fig. 1の系統図より、系統1のX方向にはA種耐震支持材が端部とエルボ部の2箇所設置されているが、Y方向には一端しか設置されていないため、Y方向の固定度がX方向と比較して小さい。同様に、系統2のX方向ではA種耐震支持材で一端をB種耐震支持材で他方の一端を固定しているが、Y方向はB種耐震支持材のみで両端を固定しているためである。

3.2 耐震支持材の設置場所による応答比較

耐震支持材の設置方法が横引配管の応答に与える影響を調べるため、神戸波NS×75%を両方向別々に一方向加振した。系統1の計測位置(3-S1)と系統2の計測位置(3-S2)における加振方向の変位応答波形を比較すると、Fig. 8となる。系統1および系統2ともにY方向の最大変位応答は、X方向と比較して約4倍程度大きくなっている。従って、横引配管の変位応答を低減させるには、対象とする変位方向と直交して走る配管に対して、A種耐震支持材で両端を固定あるいはA種耐震支持材で一端をB種耐震支持材で他方の一端を固定する必要がある。

4. 損傷度判定条件

4.1 横引配管と耐震支持材の損傷状態

全ての加振ケースに対して、空気圧の変化が無いことを確認し、配管自体に破損は生じていないものと判断した。耐震支持材の損傷状態を、Fig. 9に示す。系統1のA種耐震支持材では軽微な損傷として鉄骨梁への取付プレートの変形などが見られ、重大な損傷として配管の取付

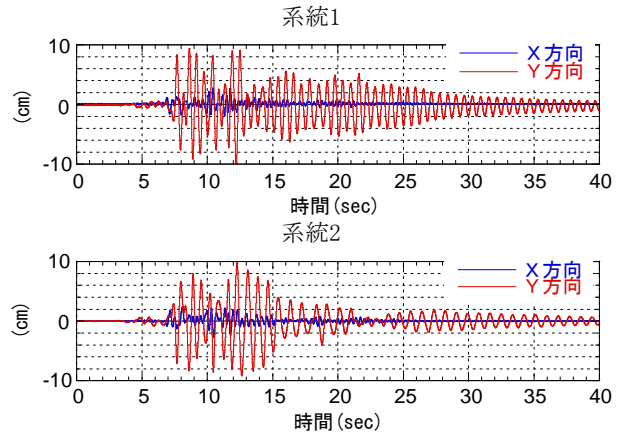


Fig. 8 変位応答波形の比較
Comparison of Time History Response of Displacement

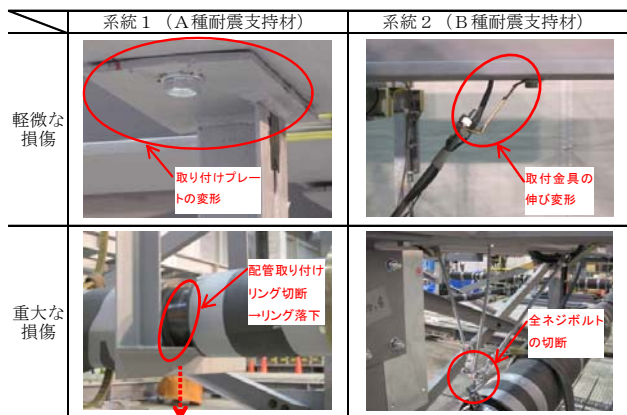


Fig. 9 耐震支持材の損傷状態
Damage State of Seismic Supporting Member

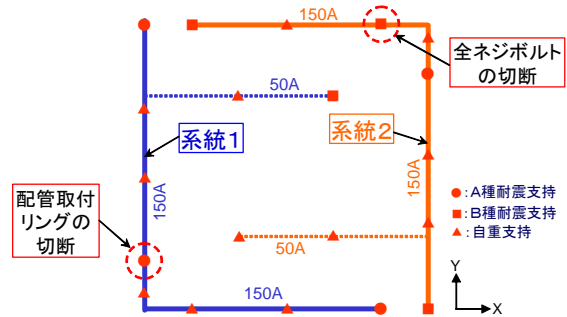


Fig. 10 重大な損傷の位置
Severe Damage of Seismic Supporting Members

リングが切断した。系統2のB種耐震支持材では、軽微な損傷として全ネジボルトの吊り金物に伸び変形などが生じ、重大な損傷としてブレース交差部と配管取付リングの接続部において全ネジボルトが切断した。重大な損傷が生じた耐震支持材の設置場所を示すとFig. 10となり、両系統ともにエルボ付近に損傷が生じていることがわかる。なお、東日本大震災においても、B種耐震支持材では吊り金物や全ネジボルトの切断の損傷が見られ、地震被害の結果とも概ね整合している。

4.2 耐震支持材の損傷度判定条件

耐震支持材に損傷が発生したときの加振波の入力レベ

ルと、計測位置(3-S1)と計測位置(3-S2)における変位応答角と、計測位置(3-S1)と計測位置(3-S2)における上部固定部に対する配管の加速度応答倍率をまとめるとTable 6となる。ただし、神戸波(3方向)×125%の入力加速度は、3成分の合成値を表示している。系統1では、軽微な損傷が発生した変位応答角は約1/10、重大な損傷では約1/3となり、また上部固定部に対する横引配管の加速度応答倍率は約2.3~2.4となる。一方、系統2では、軽微な損傷の変位応答角は約1/15、重大な損傷では約1/10となり、加速度応答倍率は系統1と同様に約2.2~2.3となる。重大な損傷が発生したとき、加振前と加振後でランダム波加振を行い、計測位置(3-S1)と計測位置(3-S2)において耐震支持材が損傷した方向の加速度応答波形を用いて加速度フーリエ振幅スペクトルを計算するとFig. 11となる。系統1では、Fig. 10に示したように、主としてX方向を固定するA種耐震支持材に損傷が発生したため、X方向の固有振動数は3.4Hzから1.0Hzに変化している。一方、系統2では、主としてY方向を固定するB種耐震支持材に損傷が発生したため、Y方向の固有振動数は2.4Hzから1.1Hzに変化していることがわかる。

加振波の強さを示す指標として計測震度を採用し、計測震度は気象庁の計測震度の算出方法に基づき計算する。耐震支持材に損傷が生じる震度階級は、Table 7となる。系統1では軽微な損傷は震度6強、重大な損傷は震度7で発生し、系統2では軽微な損傷は震度6弱、重大な損傷は震度6強以上で発生している。従って、横引配管の設置場所における震度階級が求められると、建築設備耐震設計・施工指針の耐震クラスAまたは耐震クラスBに適合した耐震支持材の損傷度はTable 7の損傷度判定条件を用いて概ね評価できる。

5. 横引配管の耐震性能評価法

5.1 横引配管と耐震支持材の損傷状態

損傷度判定条件を用いて横引配管の地震リスクを評価するには、横引配管の設置場所における震度階級が必要となる。このため、j階の加速度応答 a_j を、地表面の加速度 a_0 に加速度増幅率 B_j を乗じて求める。

$$a_j = B_j \times a_0 \quad (1)$$

ここに、 a_j : j階の加速度応答
 B_j : j階の加速度増幅率
 a_0 : 地表面の加速度

階の加速度増幅率 B_j は、建築設備耐震設計・施工指針に基づき、各種地震波に対する増幅率の平均値 B_{T0} を用いて評価する⁵⁾。なお、建物の復元力特性を与えて各階の加速度増幅率を地震応答解析より計算すると、(2)式は地震j応答解析結果を概ね包絡できることを確認している。

$$B_j = (B_{T0} - 1) \times \sin(\pi/2 \times \beta_j) + 1 \quad (2)$$

ここで、 β_j はj階の地表面からの基準高さである。

Table 6 地震の大きさと耐震支持材の損傷度の関係
 Relationship between the level of Seismic Wave and the Damage level of Seismic Supporting Member

系統1		
	軽微な被害	重大な被害
加振波	神戸波NS×75% Y方向入力	神戸波(3方向) ×125%
入力加速度 (cm/s ²)	613.5	1113.8
計測位置(3-S1)の変位応答角	1/10	1/3
計測位置(3-S1)の加速度応答倍率	2.3	2.4
系統2		
	軽微な被害	重大な被害
加振波	神戸波NS×50% Y方向入力	神戸波NS×75% Y方向入力
入力加速度 (cm/s ²)	409.0	613.5
計測位置(3-S2)の変位応答角	1/15	1/10
計測位置(3-S2)の加速度応答倍率	2.2	2.3

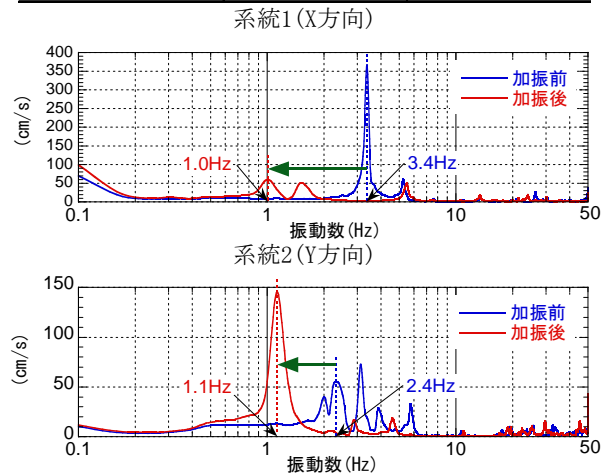


Fig. 11 加速度フーリエ振幅スペクトルの比較
 Fourier Amplitude Spectrum

$$\beta_j = h_j / H \quad (3)$$

ここに、 h_j : j階の地表面からの高さ

H : 建物の高さ

このとき、j階の計測震度 I_j は、気象庁の計測震度算定式にj階の加速度応答 a_j を代入して求める。

$$I_j = 2 \times \log(a_j) + 0.94 \quad (4)$$

ここに、 I_j : j階の計測震度

a_j : j階の加速度応答

従って、各階に設置された耐震支持材の損傷状態は以下の手順①~③で評価できる。

①各階の震度階級

地震の揺れの大きさを地表面の計測震度 I_0 で与えたとき、地表面の加速度 a_0 を次式より求める。

$$a_0 = 10^{\left(\frac{I_0 - 0.94}{2}\right)} \quad (5)$$

ここに、 I_0 : 地表面の計測震度

つぎに、j階の加速度増幅率 B_j を計算し、j階の加速度応答 a_j を(1)式から求める。このとき、j階の計測震度 I_j を(4)式より計算してj階の震度階級を求める。

②耐震支持材の損傷度判定条件

耐震支持の方法はTable 1のように横引配管の設置場所により異なるため、耐震支持の方法に応じた損傷度判定条件を各階ごとにTable 7を用いて設定する。

③耐震支持材の損傷度

地表の震度階級が与えられたとき、①各階の震度階級と②損傷度判定条件を比較し、各階の耐震支持材の損傷度を評価する。

5.2 評価例

RC造10階の建物を対象に、Table 1の建築設備耐震設計・施工指針の耐震クラスAまたは耐震クラスBに適合した横引配管の地震リスクを評価する。ここで、1階はB種耐震支持材となるが、吊り長さが50cmのB種耐震支持材を対象に振動台実験を行った結果、損傷度判定条件は系統2と同程度であることが確認されたため、1階に対しても系統2の損傷度判定条件を用いる。地表の震度階級は、震度5弱～震度6強までの4階級を設定する。震度階級には計測震度のレンジ幅があるため、地表の計測震度 I_0 はレンジ幅の中央値に設定する。このとき、各階の震度階級はTable 8となり、Table 7の損傷度判定条件と比較することで各階の耐震支持材の損傷度がTable 9のように評価できる。震度5弱以下では全ての階の耐震支持材は無被害であるが、震度5強では2階以上の耐震支持材に軽微な損傷が発生し始め、震度6強以上では全ての階の耐震支持材に重大な損傷が発生する。

6. まとめ

事業継続マネジメント(BCM)の観点より地震後も重要業務を継続するには、建築設備を含め建物としての機能性を確保する必要がある。建築設備のうち横引配管を対象に、建築設備耐震設計・施工指針の耐震クラスAまたはBに適合した耐震支持材を選定し、配管系統としての耐震安全性を振動台実験に基づき検証した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 配管自体に損傷は発生しないが、耐震支持材には配管の取付リングの切断や全ネジボルトの切断などの損傷が確認できた。
- 2) 地震の大きさと耐震支持材の損傷状態の関係を整理し、震度階級を用いて耐震支持材の損傷度判定条件を作成した。
- 3) 改正消防法における建築設備の地震被害想定⁶⁾などへの活用を目的に、横引配管の実用的な地震リスク評価法を提案した。

Table 7 震度階級を用いた損傷度判定条件
Judgment Method of the Damage Level of Seismic Supporting Members

	系統1	系統2
無被害	震度6弱以下	震度5強以下
軽微な損傷	震度6強	震度6弱
重大な損傷	震度7	震度6強以上

Table 8 各階の震度階級
Seismic Intensity Scale at Each Story

階	震度6弱	震度6強	震度7	
10階	震度5強	震度6弱	震度6強	震度7
9階				
8階				
7階				
6階				
5階				
4階				
3階	震度5弱	震度5強	震度6弱	震度6強
2階				
1階	震度5弱	震度5強	震度6弱	震度6強
地表の震度階級	震度5弱	震度5強	震度6弱	震度6強

Table 9 各階の耐震支持材の損傷度
Evaluation of the Damage Level of Seismic Supporting Members at each Story

階	無被害	軽微な損傷	重大な損傷	重大な損傷	
10階			軽微な損傷		軽微な損傷
9階			軽微な損傷		軽微な損傷
8階			軽微な損傷		軽微な損傷
7階			軽微な損傷		軽微な損傷
6階			軽微な損傷		軽微な損傷
5階			軽微な損傷		軽微な損傷
4階	軽微な損傷	軽微な損傷			
3階	軽微な損傷	軽微な損傷			
2階	軽微な損傷	軽微な損傷			
1階	無被害	軽微な損傷	軽微な損傷		
地表の震度階級	震度5弱	震度5強	震度6弱	震度6強	

参考文献

- 1) 日本建築センター:建築設備耐震設計・施工指針2005年版、(2005)
- 2) 宮村正光ほか:重要施設の機能維持評価を目的とした天井・設備機器の振動台実験と解析、大会講演梗概集、pp.747～756、(2008)
- 3) 平山昌宏ほか:排水と配水管系の耐震性 高層建物の耐震性評価に関するE-デیفュエンス実験-その8、大会講演梗概集、pp.877～888、(2008)
- 4) 研究代表者 木内俊明:高層建築物に設置する消火設備配管等の耐震基準に関する研究 中間報告書、(2009)
- 5) 寺本ほか:地震時の床応答に関する研究-その1 最大加速度応答-, 大会講演梗概集、pp.1039～1040、(1998)
- 6) 消防科学総合センター:大規模地震対応 消防計画作成マニュアル、(2009)