

クリアランスを有さない天井の地震応答性状 その1 振動台実験の概要および結果

佐々木康人 田原健一
佐藤幸博*1 佐々木聡

概 要

吊り天井の耐震性を確保する方法のひとつとして、天井面と周囲の壁などの構成要素の間にクリアランスを設けず、天井面に作用する地震力をその周囲の構成要素に負担させる方法が検討されてきている。既往の検討では、天井面を周囲の構成要素に接触させようとしても通常の施工では施工上不可避免的な隙間(ギャップ)が生じ、このギャップが大きいほど地震時の天井面の衝突による衝撃力が大きくなることが指摘されている。本研究では、クリアランスを有さない天井を対象として、特にギャップに着目した振動台実験を行い、地震時の天井の応答性状について検討した。主な実験変数は、天井の受け部材(梁、LGS壁)、天井の方向(野縁方向、野縁受け方向)、ギャップ寸法および地震動のレベルである。実験の結果、以下の知見が得られた。

- 1) クリアランスを有さない天井は極めて稀な地震に対しても損傷は見られなかった。
- 2) 天井の加速度は、衝突開始時と天井変形の最大時の2つの時点でピークを示す。
- 3) ギャップが大きいほど天井の最大加速度応答も大きくなる。

Seismic Performance of Ceiling without Artificial Spacing to Surrounding Object Part 1: Outline of Shaking Table Test

Abstract

A ceiling without artificial spacing to surrounding object (the non-clearance ceiling) is a kind of suspended ceiling, which uses walls, girders or other surrounding objects to support the seismic force of the ceiling. Some previous studies reported that the larger gaps between the ceiling and the surrounding objects cause a larger collision force for the ceiling.

In this study, a shaking table test was carried out to investigate the seismic performance of the non-clearance ceiling. The main parameters of the tests are the type of the surrounding objects (girder or LGS-wall), axis of the ceilings, widths of the gaps and the scale of the input earthquake waves. The following results were obtained.

- 1) No damages can be seen on the non-clearance ceiling even under the level-2 input.
- 2) The acceleration of the non-clearance ceiling shows two peaks at the moment of collision and at the maximum deformation of the ceiling.
- 3) Larger gaps between the ceiling and the surrounding objects cause larger collision forces for the ceiling.

キーワード: 吊り天井、軽量鉄骨下地壁、
衝突、振動台実験

*1 首都圏支社 建築技術部

§1. はじめに

吊り天井のこれまでの地震による被害を受け、2014年4月1日に新たな天井の耐震性に関する告示¹⁾が施行された。告示ではブレースにより水平力を負担し、かつ天井の周囲に大きな隙間(クリアランス)を設けて地震時の衝突を防ぐことを基本方針としている。

しかしながら、天井裏設備や室の用途などの制約条件によりブレースやクリアランスを設けにくい場合があり、その場合には十分な耐震性を確保できないことになる。

一方で、天井の耐震性を確保する方法のひとつとして、天井面と周囲の壁などの構成要素の間にクリアランスを設けず、天井面に作用する地震力をその周囲の構成要素に負担させ、天井の応答を抑制する方法が検討されてきている²⁾。文献²⁾では、通常の施工では、天井面を周囲の構成要素に接触させようとしても施工上不可避的な隙間(ギャップ)が生じ、このギャップが大きいほど地震時の天井面の衝突による衝撃力が大きくなることが指摘されている。本研究では、クリアランスを有さない天井を対象として、天井面と周囲の構成要素との間のギャップに着目した振動台実験を行い、地震時の性状について検討した。本報では、実験の概要と結果について示す。

§2. 実験の概要

2.1 実験方法の概要

実験状況を写真1に示す。1軸振動台のテーブル(4m×4m)上に鋼製のフレーム(幅2m×高さ2m×長さ5m)を設置し、そのフレームに試験体となる鋼製下地在来工法天井を設置した。天井試験体は幅が910mmで加振方向長さが4650~4980mmの部分モデルである。吊り長さは1mとし、天井の重量はおもりに(鋼板)により調整し、約35kg/m²とした。ブレースは加振直交方向には設けたが、加振方向には設けていない。天井の両側には天井面に作用する地震力を負担させるH形鋼の梁または軽量鉄骨下地壁(以下、LGS壁)の受け部材を設けた。

2.2 試験体

試験体の一覧を表1に示す。例として、試験体B3、W3およびW4の形状を図1に示す。

主な実験変数は、(1)天井の方向(野縁方向、野縁受け方向)、(2)受け部材(梁、LGS壁)、(3)天井面の受け部材との接触部(ボード、下地)、(4)天井面と受け部材の隙間(ギャップ)である。ギャップなしの試験体は、ボードを周囲の構成要素に接触させることが施工上難しいことを考慮し、野縁または野縁受けを受け部材に接触させている。野縁受け方

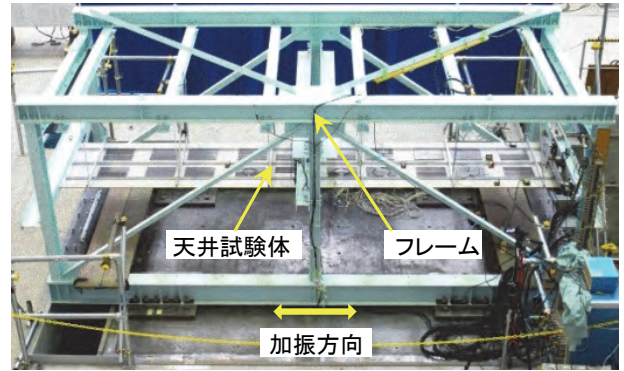
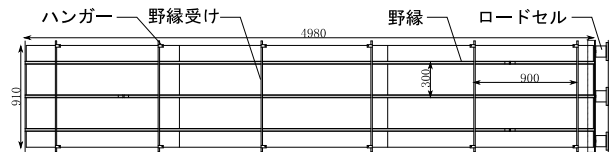


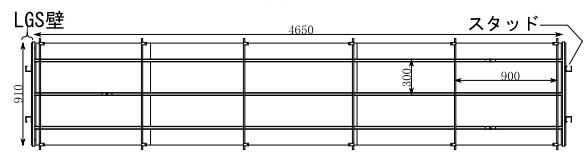
写真1 実験状況

表1 試験体の一覧

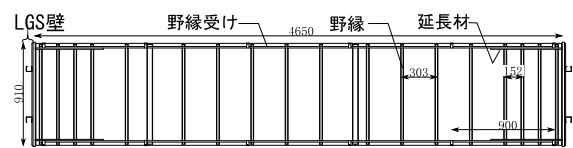
No.	受け部材	加振方向	接触部	ギャップ (mm)
B1	梁	野縁方向	ボード	10
B2			野縁	5
B3			野縁	0
W1	LGS壁		ボード	10
W2		野縁	5	
W3		野縁	0	
W4		野縁受け方向	野縁受け	0



(a) B3

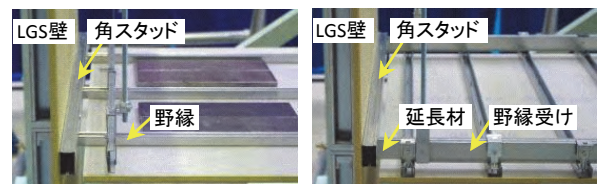


(b) W3



(c) W4

図1 試験体



(a) 野縁方向

(b) 野縁受け方向

写真2 天井面端部のディテール

向は、端部のみ野縁受けに同じ部材(延長材)を取り付け、延長材を接触させるものとした。延長材が取り付く部分は野縁のピッチを中央部分の1/2とし、クリップは従来のクリップの上にかぶせるタイプの耐震クリップとした。野縁受けと延長材はクリップごとビスで留めた。

受け部材がLGS壁の場合には、LGS壁のボードの局部の損傷が生じないようにするため、天井下地材が接触する位置に角スタッド(40×25×0.4)を水平方向に取り付け、LGS壁のスタッドまでビスで留めた。天井面端部のディテールを写真2に示す。

いずれの試験体も、野縁はCS-19およびCW-19(W4の一部)とし、野縁受けおよび延長材はCC-25とした。天井およびLGS壁のせっこうボードは普通せっこうボード $t=12.5\text{mm}$ とし、天井は1枚張り、壁は天井側のみ片面1枚張りとした。LGS壁のスタッドはWS-50とし、2本設置した。

2.3 加振波

加振波には、固有周期0.5秒、減衰5%の建物(1自由度系)の時刻歴応答解析結果を用いた。地震動はJMA-Kobe 1995 NS波とし、稀な地震動(レベル1)として10%に縮小した地震動に対する応答波形をKobe L1、極めて稀な地震動(レベル2)として50%とした地震動に対する応答波形をKobe L2と称する。振動台に入力する波形の加速度時刻歴と加速度応答スペクトルを図2に示す。なお、フレームの振動数は十分に高く、振動台とフレーム(天井吊元)の振動は概ね一致することを確認している。

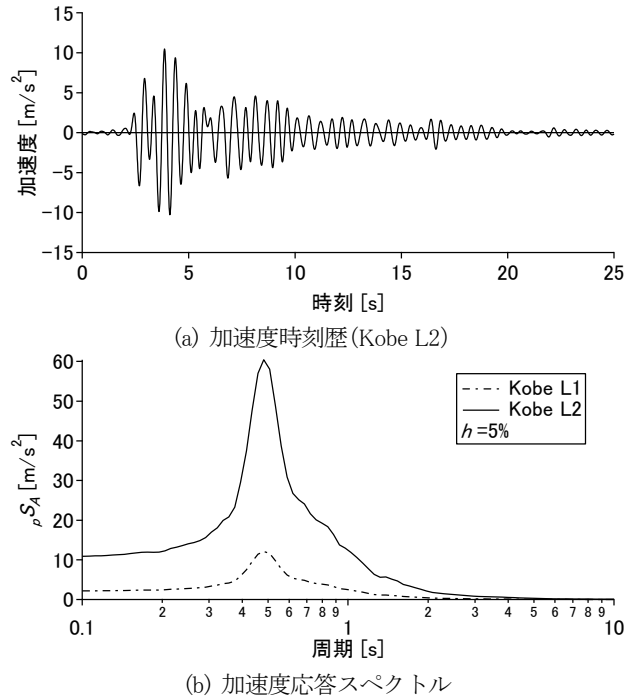


図2 加振波

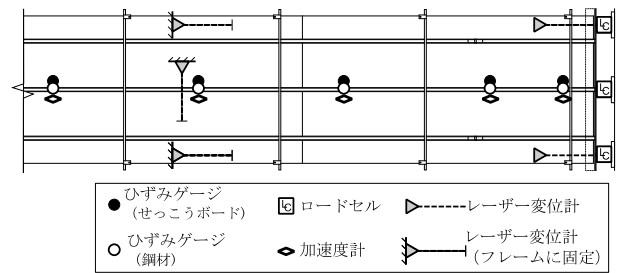


図3 計測位置

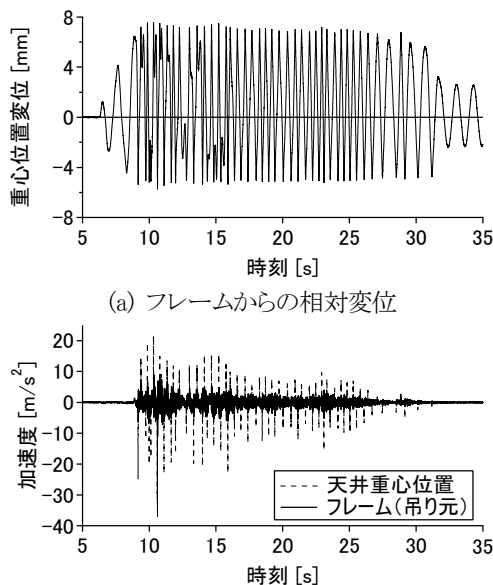
2.4 計測

フレームおよび天井試験体の加速度、天井-フレーム間および天井-受け部材間の変位、天井下地材、天井のボード、壁下地材のひずみ、梁への衝撃荷重などを計測した。図3に梁を受け部材とした試験体Bシリーズの天井面の計測位置を示す。天井面の加速度計、下地材およびボードのひずみゲージは、加振方向の分布を確認できるように配置した。計測のサンプリング周波数は5000Hzとした。

§3. レベル1に対する応答性状

3.1 全体挙動

いずれの試験体も天井の損傷は見られなかった。



(a) フレームからの相対変位
(b) フレームおよび天井の加速度
図4 時刻歴応答波形の例
(試験体 B2、Kobe L1 加振)

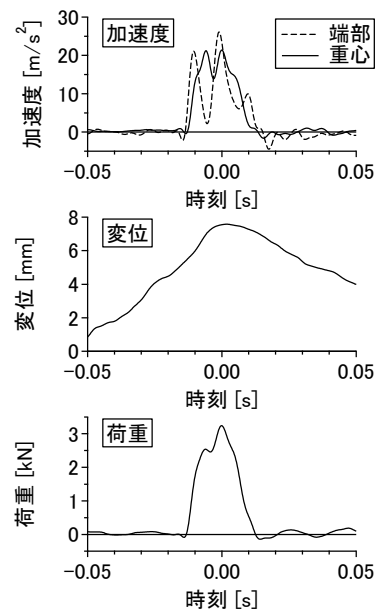


図5 衝突時の応答
(試験体 B2、Kobe L1 加振)

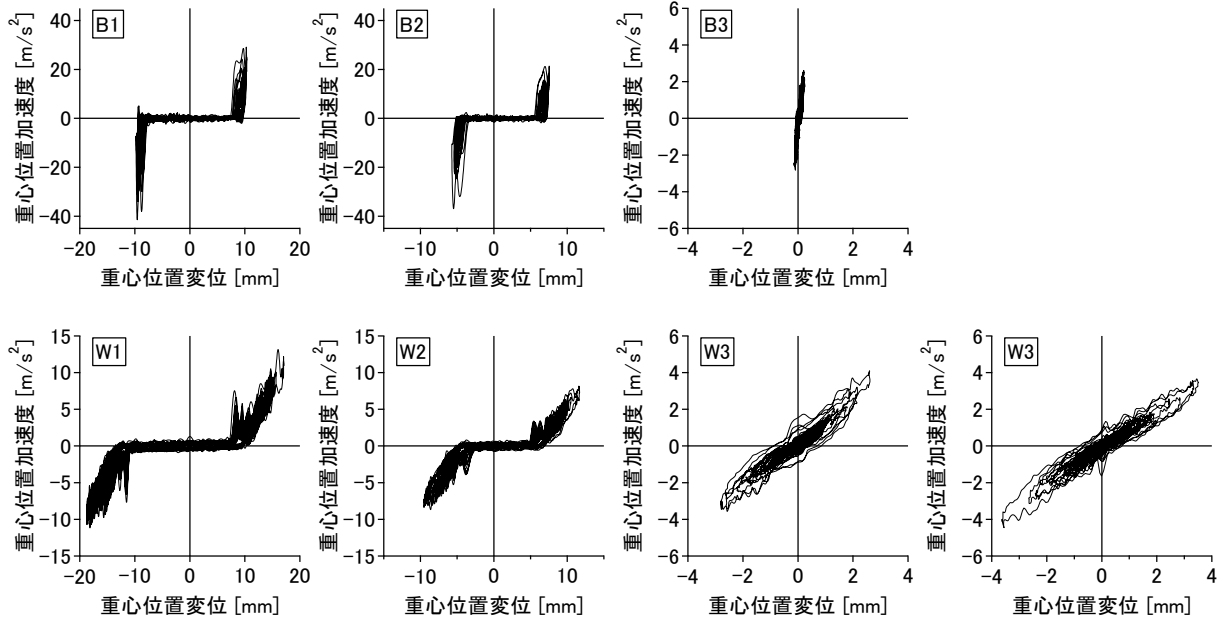


図6 天井重心位置での加速度—変位関係(Kobe L1 加振)

図4は、試験体B2の天井とフレーム(吊元)の加速度波形と天井のフレームからの相対変位の時刻歴波形である(以後、天井の応答は断りのない場合は重心位置の応答)。図4(b)を見ると、衝突の際に大きな加速度が生じ、フレームの加速度の3.5倍程度の最大値となっていることがわかる。変位については、ギャップよりやや広い振幅となっているが、衝突時の天井先端から重心位置までの軸変形に、極めて小さいものの受け梁の変形が加わっているためである。なお、試験体の施工誤差などにより正負のギャップが等しくない場合がある。

3.2 衝突時の応答

図5に衝突の前後の時刻歴波形を示す。横軸の時刻0は最大変位時を示している。実線は重心位置、破線は端部から100mmの位置の加速度である。時刻-0.01秒付近で衝突が開始しているが、加速度や荷重は衝突開始直後に一度ピークを迎え、低下した後、最大変位時に再度ピークを迎えている。

3.3 加速度—変位関係

図6は、全試験体のKobe L1加振における天井の加速度—変位関係である。剛性の高い梁を受け部材とした試験体Bシリーズでは衝突後の加速度上昇が急激であり、壁を受け部材としたWシリーズより最大値も概して大きい。Bシリーズ、Wシリーズとも、ギャップが大きいほど最大値も大きくなっている。また、3.2で述べた衝突時と最大変形時の2つの加速度のピークが加速度—変位関係にも見られる(図7参照)。

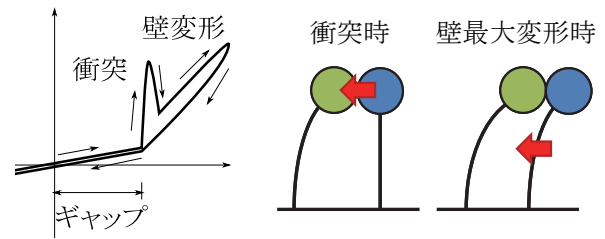


図7 加速度の2つのピーク

天井下地を梁、壁に接触させた試験体B3、W3、W4についても、衝突現象が生じないわけではない。天井の軸変形や壁の変形によって、天井が変位している方向と反対側の天井端部は、梁、壁と離間するため、変位が反転して戻ったときにその離間部が衝突する。衝突時には加速度が生じるが、ギャップのある試験体と比べると小さい。

3.4 天井のひずみ分布

図8は、天井の変位が最大となる半サイクルに注目し、その間の加振方向の下地材(野縁または野縁受け・延長材)とボードのひずみの最大値と衝突側先端からの距離の関係を示している。

天井のせっこうボードの先端が梁や壁に衝突するB1、B2、W1、W2ではせっこうボードの先端のひずみが最も大きく、先端から離れるに従い減少する。一方、野縁は先端から増加していき、1500mmを超えたところで、減少に転じる。これはせっこうボードの先端の衝撃荷重がビスを介して野縁に伝わっていくことと対応している。

また、野縁が梁や壁に接するB3、W3では野縁の先端が

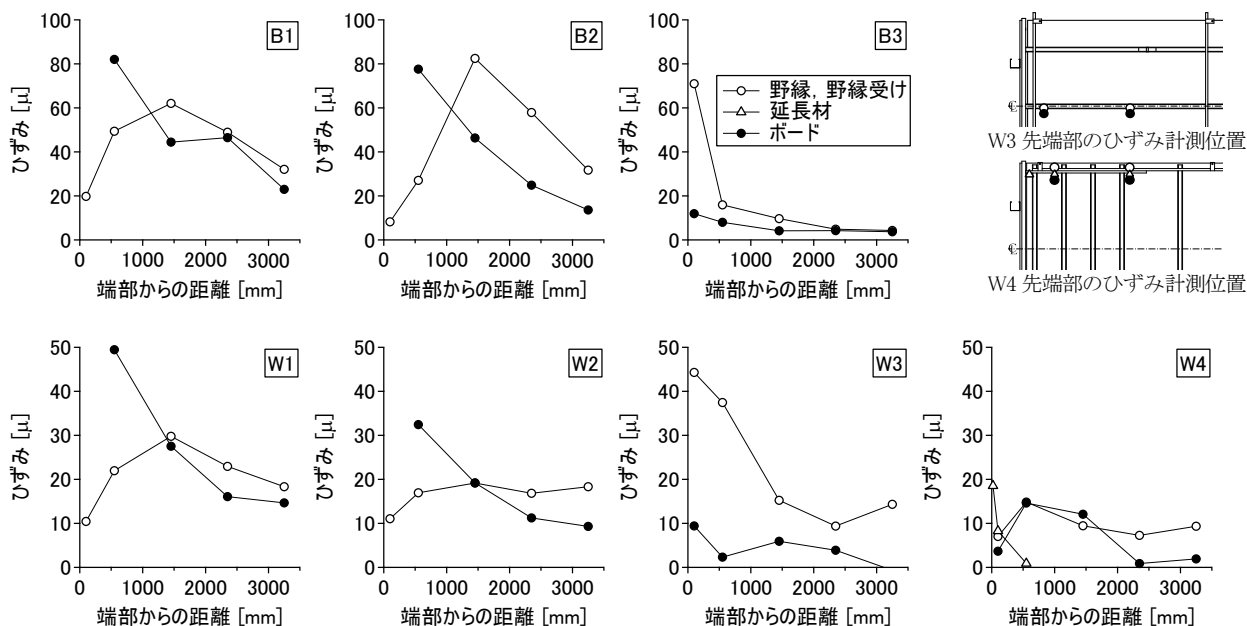


図8 最大ひずみの分布 (Kobe L1 加振)

最大となり、先端から離れるに従い減少する。せっこうボードも先端が最も大きい。野縁受けの延長材が壁に接するW4では延長材先端のひずみが最大で、野縁受け、せっこうボードのひずみは2列目の計測点で極大となる。延長材先端の荷重が、延長材をとめるビスを介して野縁受けに伝わり、1列目と2列目の計測点の間にある2~4列目のクリップと野縁からビスを介してせっこうボードへ伝わっていることが推察される。

3.5 最大応答とギャップの関係

図9は、重心位置の正負の最大加速度応答(●、▲)、Bシリーズについては正側にある梁のロードセルの最大荷重応答(○)をギャップごとに示したものである。左軸が加速度、右軸が荷重であり、左軸の値に天井の質量を乗じると右軸と一致するよう描かれている。ギャップが大きいほど最大応答は大きく、ギャップなしの場合と5mmの場合の違いが特に大きい。梁の場合とLGS壁の場合を比べると梁の方が応答は大きい。また、最大加速度に天井の質量を乗じると最大荷重とよく一致することが確認できる。

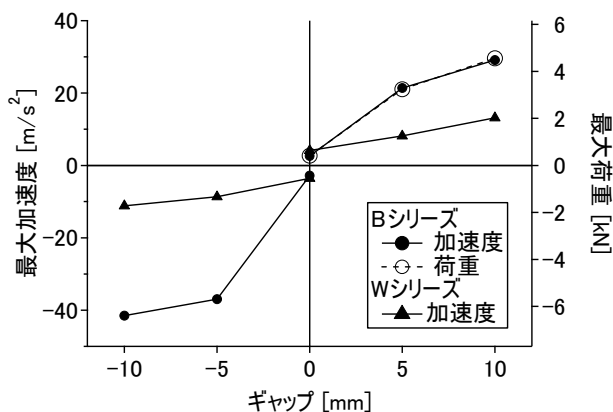
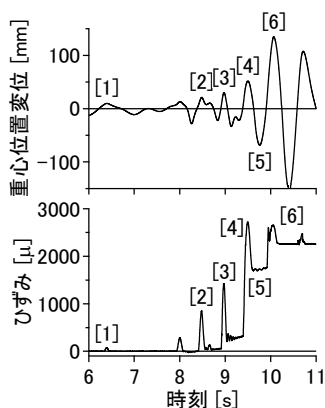


図9 最大応答とギャップの関係 (Kobe L1 加振)

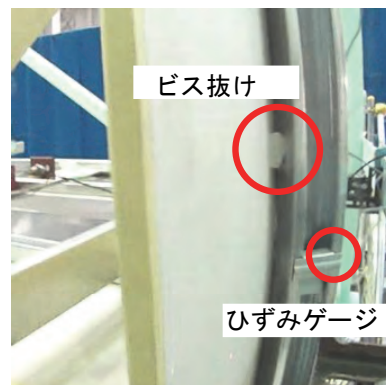
§4. レベル2に対する応答性状

4.1 全体挙動

入力地震動はレベル1の5倍であるが、いずれの試験体も天井の損傷は見られなかった。



(a) 天井の重心位置変位とLGS壁のスタッドのひずみ



(b) LGS壁の損傷状況

図10 試験体W1の破壊過程の応答と損傷状況

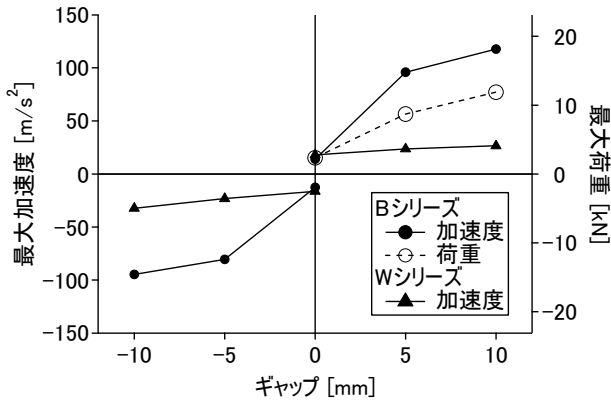


図11 最大応答とギャップの関係(Kobe L2 加振)

試験体W1ではLGS壁に大きな損傷が生じ、せつこうボードが脱落した。図11に破壊に至るまでの状況を示す。[1] (図10(a)中の番号)で最初の衝突が発生し[2]ではスタッドの変形によるボードとスタッドの隙間が生じた。[3]で曲げ振れ座屈によると思われる変形が顕著になりビスが抜け始め[4]、その後、完全に抜けた(図10(b))。[5]では明瞭な残留変形が見られ[6]でボードが脱落した。

試験体W2ではLGS壁の大きな損傷は生じなかったが、LGS壁のビスのめり込みが見られた。

4.2 最大応答とギャップの関係

図11は、Kobe L2加振の場合について図9と同様に重心位置の正負の最大加速度応答(●、▲)、Bシリーズについては正側にある梁のロードセルの最大荷重応答(○)をギャップごとに示したものである。最大応答とギャップの関係や梁、LGS壁の違いはレベル1の場合とほぼ同様の傾向を示している。レベル1の場合と比較すると、BシリーズやW3、W4での最大加速度は4～5倍の最大応答であるが、W1、W2では3倍程度となっている。試験体W1、W2では、LGS壁の損傷の影響と考えられる。なお、加速度に質量を乗じた値と荷重の整合がよくないが梁の振動などが計測値に影響していると思われる。

§5. まとめ

クリアランスを有さない天井を対象として、天井面と周囲の構成要素との間のギャップに着目した振動台実験を行い、梁およびLGS壁との衝突現象の分析や最大応答とギャップの関係を考察した。得られた知見を以下に示す。

- ・クリアランスを有さない天井は極めて稀な地震に対しても損傷は見られなかった。
- ・天井の加速度は、衝突開始時と天井変形の最大時の2つの時点でピークを示す。

- ・ギャップが大きいほど天井の最大加速度応答も大きくなる。
- ・下地を接触させた試験体は、衝突時の加速度は小さく、最大変形時の加速度もギャップがある場合より小さい。
- ・極めて稀な地震に対して天井の応答によりLGS壁が破壊した。LGS壁は天井からの荷重を考慮して適切に設計する必要がある。

謝辞 東京工業大学大学院教授 元結正次郎先生には、終始懇切丁寧なご指導をいただきました。また、実験では元結研究室の学生の皆様に多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法等を定める件(平成25年国土交通省告示第771号)、官報号外第170号、2013年8月
- 2) 元結正次郎、佐藤恭章:天井の動的性状を踏まえた設計地震力について—クリアランスを有さない天井の動的挙動 その1—、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp.1043-1044、2013年8月

ひとこと

クリアランスなし天井は、ブレースやクリアランスを設けずに天井の耐震性を確保したいというニーズに応えるものです。今後もニーズに応えられるよう技術開発を進めていきたいと思えます。



佐々木康人