

クリアランスを有さない天井の地震応答性状 その2 解析的評価

田原 健一 佐々木康人
佐藤 幸博*1 佐々木 聡

概 要

吊り天井と周囲の壁等との間のクリアランスを設けず、天井に生じる地震力を周囲の壁等に負担させる「クリアランスなし天井」について、地震時の応答性状を明らかにすることを主な目的として振動台実験を行い、この結果について前報で報告している。天井と壁の間には施工上生じるわずかな隙間(ギャップ)が存在する可能性があるが、このギャップが原因で衝突が生じ耐震性能が左右されることがわかっている。本報では、その1で示した振動台実験の結果について時刻歴応答解析による評価と、スペクトル法による最大応答値の評価を行った。解析結果については概ね良く実験結果と対応しており、衝突の際の衝撃力についても対応した。また、応答スペクトル法の適用性について検討を行い、ギャップを0とした試験体については応答スペクトル法を十分な精度で適用可能であることが明らかになった。

Seismic Performance of Ceiling without Artificial Spacing to Surrounding Object Part 2: Analytical Study

Abstract

'The non-clearance ceiling' is a kind of suspended ceiling that uses walls, girder or other surrounding objects to support the seismic force of the ceiling. The previous paper reports the experimental results of the shaking-table-test and the seismic performance of the non-clearance ceiling. The results show that the gap width between the ceiling and the surrounding objects causes collisions and degrades the seismic performance of the ceiling. This paper reports the result of numerical analysis following the result of these shaking table tests. The analysis can closely replicate the results of the test, including the collision force. Then, the maximum response of the test was estimated by using the response-spectrum-method. The estimation of this method on the specimen with zero-gap was found to be accurate.

キーワード: 吊り天井、衝突、
地震応答解析、応答スペクトル

*1 首都圏支社 建築技術部

§1. はじめに

天井に生じる地震力を、吊りボルト上端と野縁受けの間に設置したブレースではなく周囲の壁等に負担させることで耐震性を確保するクリアランスなし天井については、これまでいくつかの研究がなされている^(例えば1)が、特に解析的検討については例が少なく条件も限定的である。このクリアランスなし天井を対象として振動台実験を行い地震時の性状について検討を行っており、本報その1では実験の概要と結果について述べている。

本報その2では、この振動台実験の結果について時刻歴応答解析による評価と、スペクトル法による最大応答値の評価を行う。実験では、稀に発生する地震を想定したレベル1の場合と極めて稀に発生する地震を想定したレベル2の場合の2種類の大きさの入力を行っている。レベル2に関しては弾性範囲を超えている場合があり、弾塑性挙動をモデル化するための基礎的実験が不十分であるため、本報では材料特性を弾性範囲に限定し、レベル1の場合を対象として検討を行う。

§2. 減衰と剛性の評価

2.1 衝突実験の概要

衝突実験を行い天井の弾性時の軸剛性や壁の水平剛性、減衰を評価する。用いた試験体は本報その1で振動台実験を行った試験体と同じであり(表 1)、試験体によって異なる受け部材との接触部(せっこうボードまたは野縁)な

表 1 実験パラメータと試験体名

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

どが評価対象に影響する実験変数である。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(鋼板)により調整し、約35kg/m²とした。振動台実験を行う前に片側の受け部材(梁・LGS壁)をはずし、天井端部に伸縮性の少ない糸を接続し巻取り機構を用いて引くことで強制変位を与え、糸を切断することで初速度を与えないよう変位を開放し、受け部材に衝突させた(図 1)。

2.2 天井

試験体B2の重心位置変位の時刻歴を図 2に示す。衝突後、自由振動となった状態の固有周期は1.28秒であった。

天井と梁の衝突をばねに置換することについて検討する。天井の質量を重心位置の集中質量とみなしたとき、接触部がせっこうボードの試験体については、せっこうボードの全断面が重心位置から接触位置(先端)まで均一に軸変形する(接触部が野縁の試験体では野縁のみが均一に軸変形する)と仮定した場合の剛性 K_{Imp} は下式となる。

$$K_{Imp} = \frac{E_p A_p}{L} \quad (\text{せっこうボードが接触する場合})$$

$$K_{Imp} = \frac{E_s A_m}{L} \quad (\text{野縁が接触する場合})$$

E_p :せっこうボードのヤング率 E_s :下地用鋼材のヤング率
 A_p :せっこうボードの断面積 A_s :下地用鋼材の断面積
 L :天井の重心位置から先端までの長さ

この計算値はそれぞれ10200N/mm、8570N/mmとなる。衝突実験において得られた、梁の反力と天井の重心位

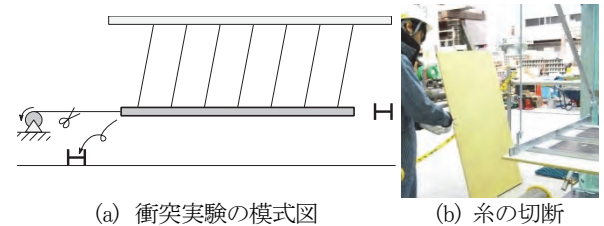


図 1 衝突実験

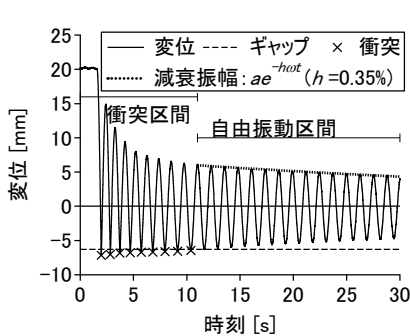


図 2 変位の時刻歴(B2)

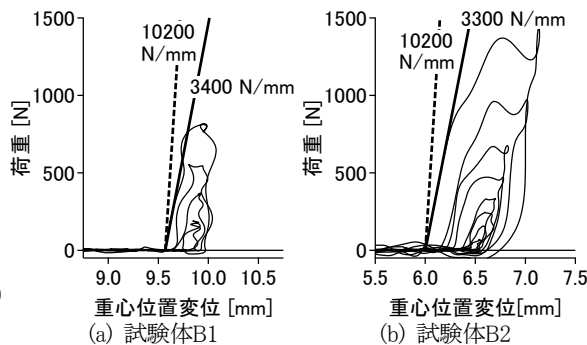


図 3 天井の軸剛性の評価 (衝突部がせっこうボードの場合)

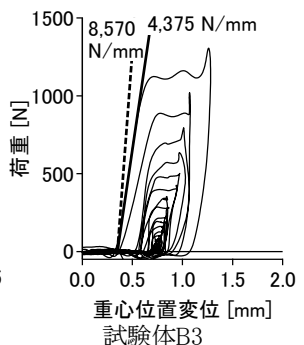


図 4 天井の軸剛性の評価 (衝突部が野縁の場合)

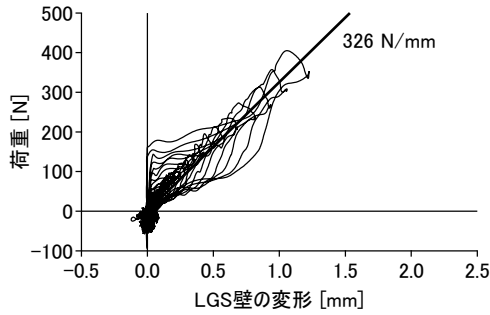


図 5 LGS壁の水平剛性の評価(試験体W3)

置の変位の関係から天井の軸剛性を評価する。図 3は試験体B1およびB2の結果であり、ギャップを有しせつこうボードの先端が梁に接触する場合である。図 4は試験体B3の結果であり、野縁を延長して梁と接触させた場合である。

梁が剛と仮定し、衝突中の剛性を天井の軸変形の影響によるものと仮定する。実験結果から評価される天井の軸剛性はそれぞれ3400N/mm、3300N/mm、4375N/mmとなった(図中太線)。これらの値は計算値(図中太破線)に対し、せつこうボードが接触する試験体で約3分の1(33%)、野縁が接触する試験体で約2分の1(52%)となっている。剛性が計算値より低い原因としては、接触部分の不均一性やせつこうボードの非線形性、ビスのずれや天井全体の面外への変形などが考えられる。

本報の以降の検討では、天井の軸剛性には試験体B1とB2の実験から得た値の平均値(試験体B3を対象とした解析ではB3の実験から得た値)を用いることとする。

減衰定数は自由振動となった状態での振幅比から評価しており、0.35%程度であった(図 2参照)。

2.3 LGS壁

LGS壁の水平剛性について検討する。図 5は試験体W3で行った衝突実験において得られた、LGS壁の荷重変形関係である。LGS壁の変形は不動点から直接計測した値、荷重は天井の加速度に天井の質量とLGS壁の等価質量(全体質量の2/3と仮定)を乗じたものである。スタッドのみ

表 2 評価したパラメータ

(a) Bシリーズ

天井の質量(M_C)	151.5 kg
天井の減衰(C_C)	0.35 % (初期剛性比例型)
天井の剛性(K_C)	3.7 N/mm
天井の軸剛性(K_{Imp})	W1, W2: 3350 N/mm W3: 4375 N/mm

(b) Wシリーズ

	LGS壁	天井
質量(M_C, M_{W1}, M_{W2})	10.7 kg	151.5 kg
減衰(C_C, C_{W1}, C_{W2})	35 %	0.35 %
剛性(K_C, K_{W1}, K_{W2})	326 N/mm	3.7 N/mm
天井の軸剛性(K_{Imp1}, K_{Imp2})	W1, W2: 3350 N/mm W3: 4375 N/mm	

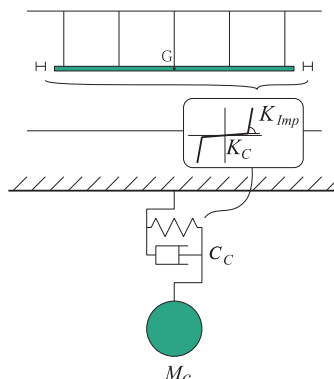


図 6 1質点モデルの概要

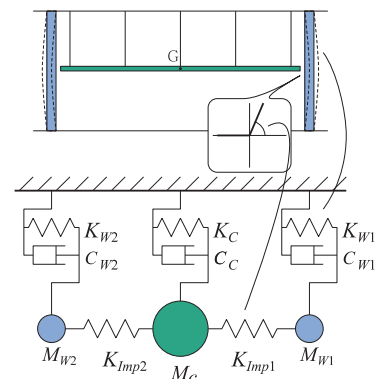


図 7 3質点モデルの概要

を考慮し単純支持の仮定の次式で剛性 K_W を計算する。

$$K_W = \frac{3E_s I_s (a + b)}{a^2 b^2}$$

I_s : スタッドの断面2次モーメント
 a : LGS壁の衝突部より上の長さ
 b : LGS壁の衝突部より下の長さ

計算値は326N/mmとなった(図中の太線)。実験結果と良好に一致していることがわかる。

LGS壁の減衰については、加振実験の前にLGS壁を打撃する実験を行い、自由振動を加速度計により計測して、この波形の振幅比から評価した。減衰定数は35%であった。

評価した各パラメータを表 2に示す。なお、表中の1次剛性、2次剛性については次章のモデル化の説明で述べる。

§3. 時刻歴応答解析

前章までに評価したパラメータを用いて時刻歴応答解析を行い実験結果の評価を行う。受け部材が梁のBシリーズとLGS壁のWシリーズでは異なる解析モデルを用いて検討を行い、それぞれのモデルの特徴を比較する。Kobe L1入力(稀に発生する地震動を想定し、原波の10%にしたJMA Kobe 1995 NS波に対する周期1秒、減衰5%の1自由度系の応答波形を入力)の実験を対象とし、この実験で計測された入力波形を解析で用いる。入力波形の時間刻みは 5×10^{-3} 秒とした。

3.1 解析モデル

(1) 1質点モデル(Bシリーズ)

受け部材が剛な場合、受け部材の振動を考慮しない単純なモデルが既往の研究¹⁾で用いられている。本実験のBシリーズについては同様に1質点系の単純なモデルで検討を行う。モデルの概念図を図 6に示す。解析モデルは天井を表す1自由度系と、天井単体の剛性および梁の衝突性状を表すばねからなる。

衝突解析に用いるばねの復元力特性としてHertzモデルを使用した解析等も行われているが²⁾、本報では簡便性を考慮して硬化型非線形弾性ばねとした。履歴形状はバイリ

ニア型とし、1次剛性を天井の自由振動時の剛性、折点変位はギャップ、2次剛性を天井の軸剛性の値(前章で評価した値)とした。ギャップについては試験体の設計値ではなく実験結果から推定される実際の大きさとした。減衰については、天井単体の減衰定数を初期剛性比例型として与えた。解析の積分方法はNewmarkのβ法($\beta=1/4$)とし、時間刻みは衝突の瞬間の安定性等を考慮して 10^{-4} 秒とした。

(2) 3質点モデル(Wシリーズ)

受け部材の剛性が低く、受け部材の振動が無視できないと考えられるWシリーズでは3質点系のモデルを用いる。モデルの概念図を図7に示す。解析モデルは天井及び2つのLGS壁を表す合計3つの1自由度系と、天井と受け部材の衝突性状を表すばねからなる。3つの1自由度系は弾性と仮定し、それぞれの剛性とそれぞれ単独での減衰係数を算定して設定した。衝突ばねについては、硬化型の非線形弾性ばねとし、1次剛性をほぼ0、2次剛性は天井の軸剛性の値(前章で評価した値)とした。衝突ばねの減衰定数は0とした(完全弾性衝突に相当)。解析の積分方法、時間刻み等は1質点モデルと同様である。

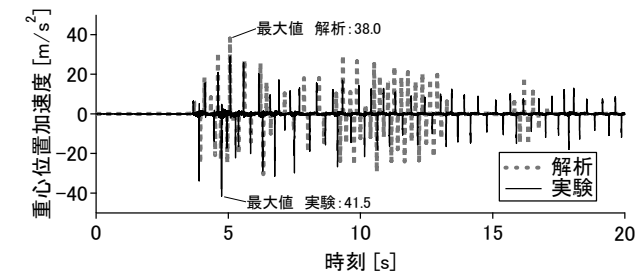
3.2 解析結果

(1) 時刻歴波形

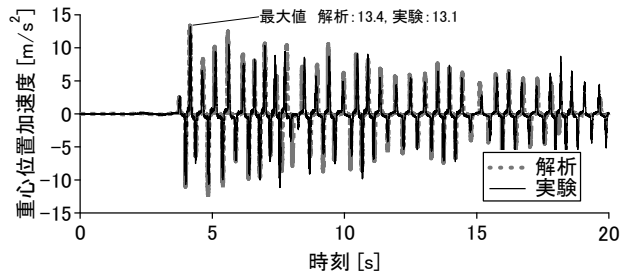
Bシリーズの解析結果の一例として試験体B1のKobe L1入力の場合の実験結果と解析結果を比較したものを図8に示す。(a)は天井の重心位置の加速度、(b)は重心位置の相対変位の時刻歴波形、(c)と(d)は重心位置の加速度—変位関係を示している。時刻歴波形のグラフにおいては実験と解析の時刻を揃えて示している。

加速度波形については後半で位相や振幅のずれが見られるものの概ね実験の応答性状を解析で表現できていると言える。変位波形についてはよく一致している。また、加速度—変位関係については、実験では衝突中に生じている履歴曲線のループ形状が、解析で表現されていないが、急激な剛性増加と最大加速度などについては実験結果と解析結果が良く一致している。

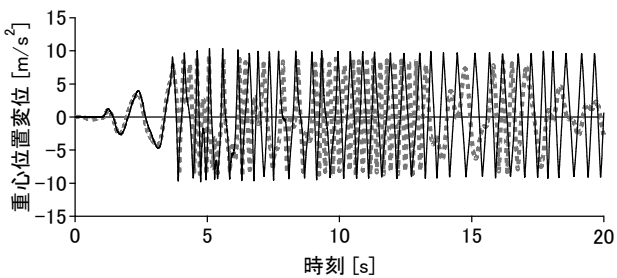
Wシリーズの解析結果一例として試験体W1の実験結果と解析結果を比較したものを図9に示す。時刻歴波形については、加速度、変位いずれも、実験結果と解析結果の振幅や位相がよく一致していることがわかる。また、加速度—



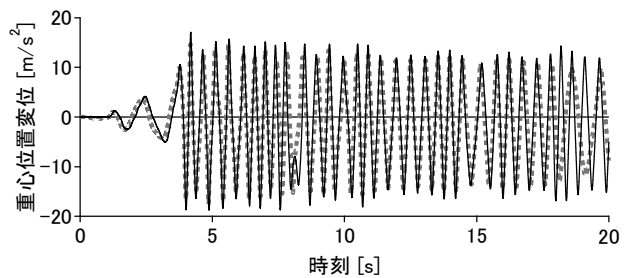
(a) 加速度時刻歴



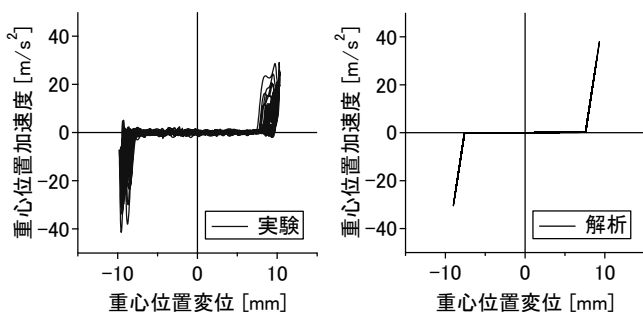
(a) 加速度時刻歴



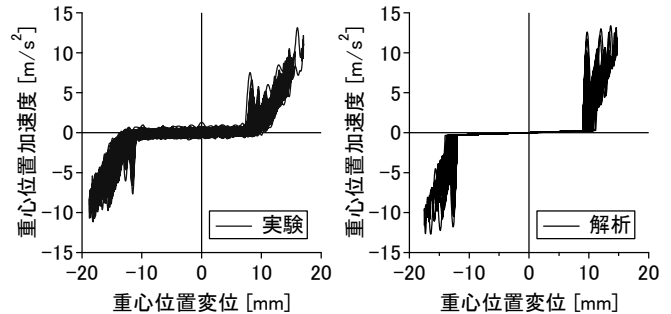
(b) 変位時刻歴



(b) 変位時刻歴



(c) 加速度—変位関係(実験) (d) 加速度—変位関係(解析)



(c) 加速度—変位関係(実験) (d) 加速度—変位関係(解析)

図8 実験結果と解析結果の比較(試験体B1)

図9 実験結果と解析結果の比較(試験体W1)

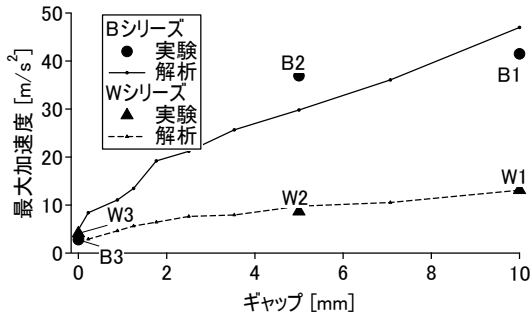


図 11 実験結果と解析結果の最大加速度の比較

変位関係を見ると、衝突直後とLGS壁の最大変形時の2つの時点で加速度にピークが生じる現象が、解析にも現れていることがわかる。この2つのピークはそれぞれLGS壁の慣性力、LGS壁のばね反力に起因しているが、Bシリーズの解析で用いたような1質点モデルやLGS壁などのような受け部材の質量を無視した場合にはこのような現象は現れない。

(2) 最大加速度応答

実験、解析それぞれから得られた、ギャップと最大加速度応答の関係を図 11に示す。解析についてはギャップを変化させた10ケースについての結果を示している。

Bシリーズについて、試験体B2では解析結果が実験結果を下回っているが、概ね傾向は表現できていることがわかる。Wシリーズについては全ての試験体で解析結果と実験結果が良く一致している。

解析結果についてギャップと最大加速度の関係に注目

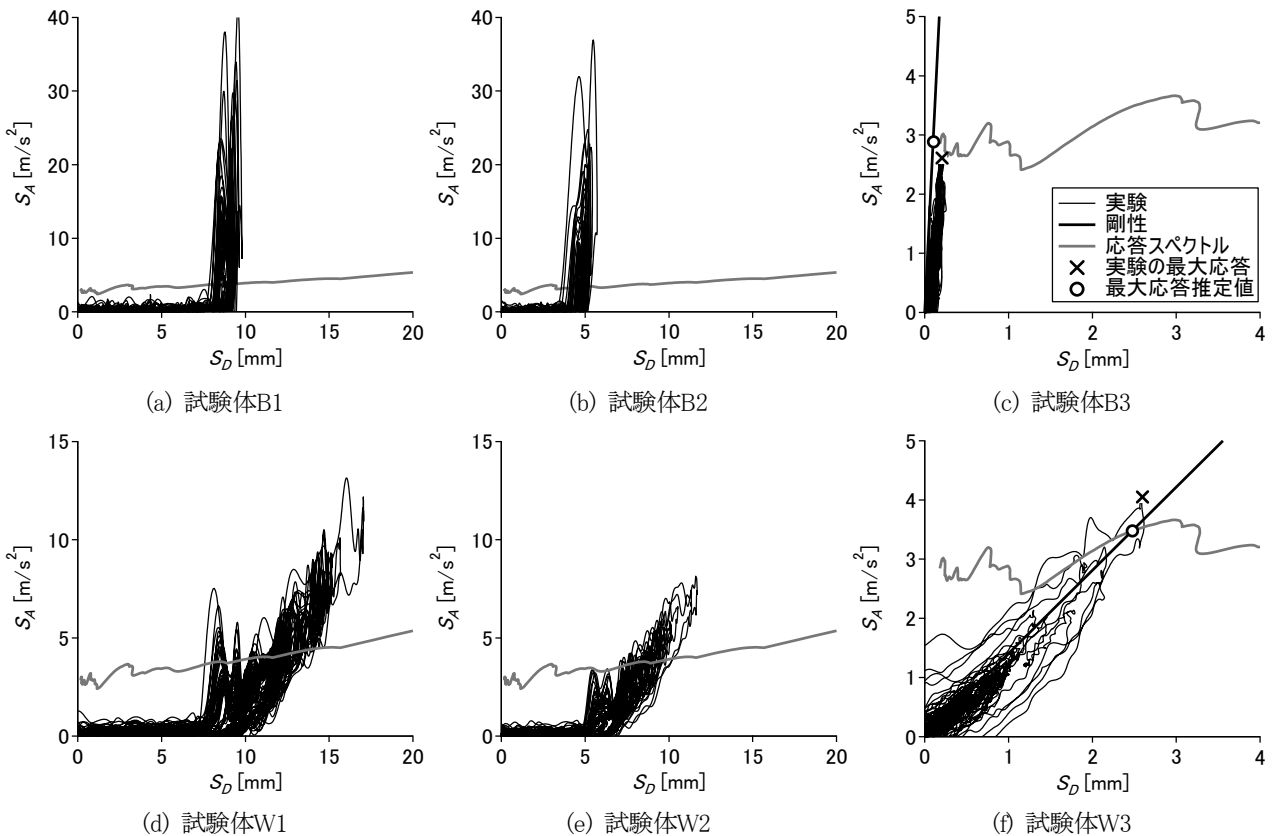


図 10 応答スペクトル法による最大応答の評価

すると、ギャップが2mm程度以下の範囲ではギャップ増加に応じた加速度の増加の程度が大きい、それ以上では緩やかに増加している。

§4. スペクトル法による解析

本章では天井の最大応答について応答スペクトルを用いて簡便に推定することを目的として分析を行う。

実験結果から得られた天井重心位置の加速度—変位応答関係と、実験で計測された入力波形から作成した擬似加速度—変位応答スペクトルを比較したものを図 10に示す。応答スペクトル作成の際の減衰定数は5%としている。

(a)、(b)と(d)、(e)についてはそれぞれB1とB2、W1とW2 (いずれもギャップのある試験体)の結果を重ね書きしている。ギャップのある試験体では最大応答が応答スペクトルを大幅に上回っており、とくに接触後の剛性の高いBシリーズの試験体の場合はその差異が顕著である。

一方、(c)、(f)に示すギャップを0とした試験体B3、W3の結果については、いずれも実験結果においても最大応答点(図中×印)は応答スペクトルとよく一致している。また、B3については天井の軸剛性、W3についてはLGS壁の剛性に該当する直線を太実線で示し、応答スペクトルとの交点を○印で示しているが、これについても実験結果の最大応答点とよく一致している。

§5. まとめ

クリアランスを有さない吊り天井に関して行った振動台実験について、時刻歴応答解析による評価とスペクトル法による最大応答値の評価について検討した。本報では、稀に発生する地震を想定したレベル1の実験を検討の対象としている。本報から得られた知見に関するまとめを以下に示す。

1. 衝突実験の結果から天井の軸剛性、LGS壁の弾性剛性を評価した。天井の軸剛性については、せつこうボードが衝突する試験体では計算値の1/3、野縁が衝突する試験体では計算値の1/2程度の値となった。LGS壁の剛性については軽量鉄骨下地材のみ考慮した計算値と実験から評価した値は概ね一致した。
2. 受け部材の剛性が十分に高いBシリーズの試験体については梁の変形を無視した1質点系を用い、受け部材の剛性の低いWシリーズの試験体ではLGS壁と天井を3つの質点としたモデルを用い、それぞれ時刻歴応答解析を行った。実験結果と解析結果は概ね良好に一致し、Wシリーズの試験体で見られた衝突時とLGS壁の変形時の2つの加速度のピークが発生する状況も解析は良好に対応した。
3. ギャップを0とした場合については、最大応答点と応答スペクトルは概ね一致した。

ギャップは最大加速度応答に対して影響が大きく、ギャップを適切に管理することが耐震性能の確保に対して重要となることは本報その1から明らかになっている。また、ギャップを0とみなせる場合について、応答スペクトル法による最大応答の推定について、弾性範囲ではあるが、本報で一例を示した。なお、弾性範囲を超える場合についての天井やLGS壁等の部材の履歴特性や、塑性化を考慮した解析的な検討については今後の課題である。

天井の耐震性に関する告示³⁾で示されている設計法は、レベル1地震を対象とした弾性設計が基本であり、また、応答スペクトルを用いた設計荷重の評価法についても示されている。本報の結果からも、ギャップを0とした天井については応答スペクトル法により簡便に設計荷重を算定することができると考えられる。本報の実験で試験体に用いたような下地材の延長等により確実にギャップ0を担保する工法を用いることで、耐震性の優れる吊り天井の簡便な設計法による実現が期待できる。

謝辞 東京工業大学大学院 教授 元結正次郎先生には、解析の実施や本報の執筆にいたるまで懇切丁寧なご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。本社設計エンジニアリングセンター管理部の薦野氏には解析において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) 石原直、脇山善夫、森田泰弘、渡壁守正、稲井慎介、喜々津仁密: 周囲の壁等に慣性力を負担させる水平な在来工法天井の耐震性に関する実験的研究 その1～その5、日本建築学会学術講演梗概集(近畿)、構造I、pp. 977-986、2014年9月
- 2) 角友太郎、元結正次郎、金子健作、菅野嵩晃: 不可避的な隙間を有する天井の地震時衝突挙動に関する検討 その1・その2、日本建築学会学術講演梗概集(近畿)、構造I、pp. 987-990、2014年9月
- 3) 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)、ほか、官報号外第170号、2013年8月5日

ひとこと

クリアランスなし天井が十分な耐震性を有していることは本報からも明らかになっています。耐震性と利便性、経済性を両立した本工法の大臣認定を取得し、広く普及させていきたいと思っております。



田原 健一