

# 大規模空間に設置された耐震吊り天井の 耐震余裕度検証実験結果速報

## 1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した吊り天井の脱落被害を受け、関係各機関では、各種法規の整備や既存施設の早急な点検、対策の推進などの対応が進められています。例えば、平成 25 年 7 月には建築基準法施行令の一部を改正する政令が、同年 8 月 5 日には天井脱落対策に係る一連の技術基準告示が公布され、平成 26 年 4 月より施行される予定となっています。しかし、これらの新しい基準に基づいて設計された天井が、技術基準における設計想定を超えるレベルの地震にさらされた場合に、どこまでの揺れに耐え、どう損傷し脱落するのかについては、天井のみを取り出した実験（要素実験）などにより、関係各所やメーカーでも検証が進められているところです。しかしながら、天井の要素実験では、過去の脱落被害の再現も難しいことから、実大の建物を用いた加振実験によりその性能を検証し、被害メカニズムを探ることが重要です。

そこで、防災科学技術研究所では、学校体育館を模擬した大規模空間を有する実大モデル（試験体）を Eーディフェンスの震動台に載せ加振することにより、大規模空間での被害を引き起こす柱、梁等の構造部材の地震時挙動と、これによる天井などの非構造部材の応答特性、および天井がどう壊れ脱落するのか、その脱落被害メカニズムの解明に取り組んでいます。

## 2. 実験概要

本プロジェクトでは、試験体の天井の組み合わせを変えた実験を実施しました（表 1）。本実験で使用する建物試験体は、小中学校で使用される体育館を模擬した実大試験体です。平成 26 年 1 月の実験では、この試験体の内部に耐震対策のない吊り天井（未対策天井）を施工して加振実験を実施し、吊り天井の脱落被害の再現を行いました。この結果については平成 26 年 2 月 21 日プレス発表資料 ([http://www.bosai.go.jp/press/2013/pdf/20140221\\_01.pdf](http://www.bosai.go.jp/press/2013/pdf/20140221_01.pdf)) をご参照ください。

平成 26 年 2 月は、試験体の内部に平成 26 年 4 月施行予定の技術基準に基づいて設計された吊り天井を 2 種類施工し、加振実験を行いました。1 つは一般の流通量が多い JIS 規格材を主たる部材とした吊り天井（1. 1G 耐震天井）で、もう 1 つは JIS 規格材よりも高強度な部材で構成された吊り天井（2. 2G 耐震天井）です。この 2 種類の耐震天井は、斜め部材（ブレース）により天井の揺れを抑制し、天井の周囲にクリアランス（隙間）を設けることにより設計時に検討が困難な壁による拘束の影響を無くしました。さらに、各天井材をビスなどで相互に緊結させることで天井全体の剛性を高め、天井材の損傷・落下を防止する構造となっています。それぞれの天井の細かい仕様の違いについては、表 2 および平成 26 年 2 月 21 日プレス発表資料をご参照ください。

入力地震動は、東北地方太平洋沖地震において、震源から約 170km の距離にある宮城県仙台市宮城野区にて強震観測網（K-NET）で観測された地震動（K-NET 仙台波）と 1995 年兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された地震動（JMA 神戸波）を用いました。（表 3）

表 1 実験計画

実験時期	主体構造	天井
平成 26 年 1 月 27 日、28 日	純鉄骨造 柱：鉄骨造 屋根：鉄骨山形架構	・ H13 年よりも前に設計・施工された耐震対策されていない天井 ⇒大規模空間での地震被害の発生を引き起こす構造体と非構造体の応答特性と、天井の脱落被害のメカニズムの解明
平成 26 年 2 月 27 日、28 日		・ H26. 4 に施行される基準に準拠した耐震対策天井 ⇒新しい基準で設計された大規模空間における天井の安全性および耐震余裕度の検証

表 2 天井の仕様

項目	仕様		
	未対策天井	1. 1G 耐震天井	2. 2G 耐震天井
加振実験日	H26. 1. 27~28	H26. 2. 27~28	
試験体の考え方	地震に対する対策のない天井 (過去の脱落被害再現のため既存の天井を模擬)	JIS 規格材を主たる部材とした耐震天井 (耐震設計の妥当性と耐震余裕度の検証)	JIS 規格材よりも高強度な部材で構成した耐震天井 (耐震余裕度の検証)
耐震基準	なし	H26. 4 施行予定の新耐震基準 (2 階建て建物の 1 階部分に相当する地震力を想定)	H26. 4 施行予定の新耐震基準 (基準で想定されている最大地震力)
設計想定地震力	地震による揺れが設計想定外	天井に作用する慣性力が 1. 1G (K-NET 仙台波 25%相当)	天井に作用する慣性力が 2. 2G (K-NET 仙台波 50%相当)

表 3 入力地震動

加振波	入力レベル	備考
K-NET 仙台波	25% (震度 5 強)	1. 1G 耐震天井の設計レベル
	50% (震度 6 弱)	2. 2G 耐震天井の設計レベル
	80% (震度 6 強)	
	100% (震度 6 強)	海溝型地震による長時間の揺れに対する耐震天井の耐震性検証
JMA 神戸波	100% (震度 6 強)	直下型地震による揺れに対する耐震天井の耐震性検証
	150% (震度 7)	天井の破壊メカニズム解明のための加振

### 3. 実験結果

実験による天井損傷の進展をまとめると、以下のようになります。(表4)

表4 天井の被害状況のまとめ

加振ケース	損傷状況		
	未対策天井 (参考比較)	1.1G 耐震天井	2.2G 耐震天井
K-NET 仙台波 25% [震度 5 強]	骨組みを接合する金物の滑り等の軽微な損傷	損傷なし	損傷なし
K-NET 仙台波 50% [震度 6 弱]	(1 回目) 骨組みを接合する金物が外れ、天井が大きいたわむ。天井面は脱落寸前	損傷なし	損傷なし
	(2 回目) たわんだ天井面が大きく振動し、脱落		
K-NET 仙台波 80% [震度 6 強]		一部の揺れ止めが折れ曲がる	損傷なし
K-NET 仙台波 100% [震度 6 強]		揺れ止めがさらに大きく折れ曲がり、元に戻らなくなる	揺れ止めを取り付ける金具のずれ
JMA 神戸波 100% [震度 6 強]		柱と激しく衝突し、天井ボードが落下	揺れ止めを取り付ける金具が一部破断
JMA 神戸波 150% [震度 7]		さらに激しく衝突し天井ボードが多数落下	揺れ止めが折れ曲がり取り付けられている金具が破断 骨組みも大きく変形 天井ボードも多数落下

平成 26 年 1 月に実施された未対策天井の脱落被害再現実験において、天井脱落の生じた K-NET 仙台波 50%(震度 6 弱)の実験では、1.1G 耐震天井、2.2G 耐震天井ともに損傷はありませんでした。

さらに入力レベルを大きくしていき、K-NET 仙台波 80%および 100% (いずれも震度 6 強相当)の実験では、天井面が大きく振動し、一般に流通する JIS 規格材を使用した 1.1G 耐震天井では、天井面の揺れを抑えるための斜め部材 (ブレース) が、地震によって天井面に生じる力の大きさに耐えられなくなり曲がり始めました。しかし、未対策天井のように天井面が大きいたわむなどの危険な状態に至ることはありませんでした(図 1)。また、より高強度な部材を用いた 2.2G 耐震天井では、目視で確認できる被害はありませんでした(図 2)。

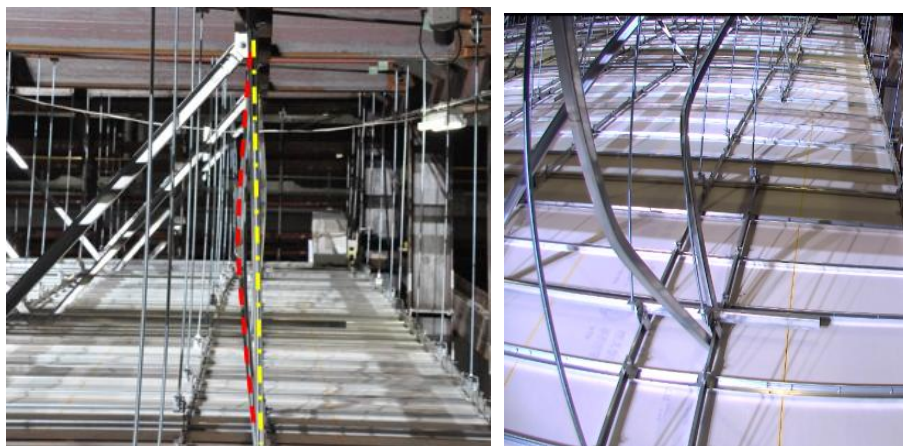


図1 折れ曲がったブレース(1.1G 耐震天井)  
(左:K-NET 仙台波 80%[震度 6 強]後、右:K-NET 仙台波 100%[震度 6 強]後)



図2 損傷のない2.2G耐震天井(K-NET 仙台波 100%[震度6強]後)

これらの実験により、東北地方太平洋沖地震あるいは同様の地震においても、H26年4月施行予定の耐震基準を満たした天井では、脱落に至る被害が起きないであろうことが確認されました。

また、直下型地震の揺れに対する耐震天井の耐震性能を検証するために、兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台（兵庫県神戸市）での観測記録（JMA神戸波、震度6強）による実験を続けて実施しました。1.1G耐震天井では、ブレースの変形がすでに起こっていたため、ブレースの天井面の揺れを抑える機能が低下しており、天井面が大きく揺さぶられ、周囲の柱などに天井面が衝突し、天井ボードなどが衝撃により脱落しました（図3）。2.2G耐震天井では、ブレースの取り付け部が痛んでおり、数点はずれたことが確認されました。



図3 JMA神戸波 100%（震度6強）加振後の被害状況

さらに、2.2G耐震天井がどう壊れ、脱落していくかを確認するため、兵庫県南部地震の記録を1.5倍にまで増幅させた揺れ（震度7相当）で検証を続けました。この結果、2.2G耐震天井も大きく揺さぶられ、天井面を構成する骨組みが変形し、天井ボードが大きく脱落しました（図4）。

実験により計測された天井面の加速度をまとめると、表4のようになります。これらの実験により、耐震天井は設計想定の上の2倍以上の地震の揺れにも耐えられるだけの余裕度を持っていることが明らかに出来ました。

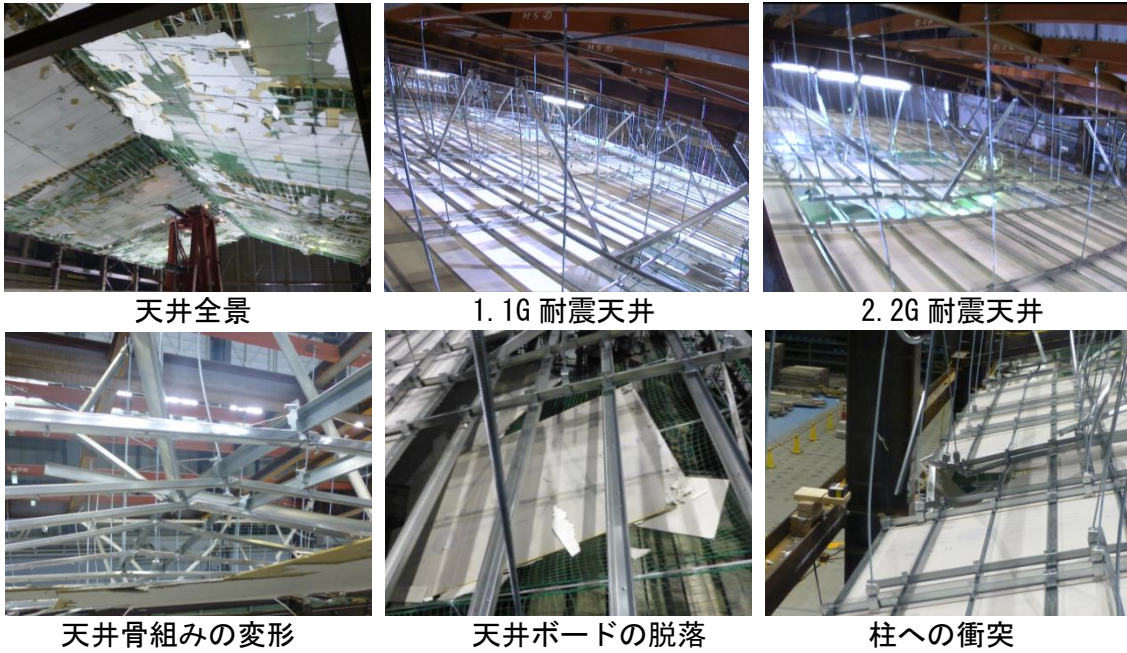


図 4 神戸波 150%[震度 7]加振後状況

表 4 天井面の加速度

加振ケース	天井面加速度*1 (梁間方向*2) の最大値		
	未対策天井*3	1. 1G 耐震天井	2. 2G 耐震天井
K-NET 仙台波 25% [震度 5 強]	0. 81 G	0. 63 G	0. 77 G
K-NET 仙台波 50% [震度 6 弱]	4. 21 G (5. 54 G)*4	1. 50 G	1. 55 G
K-NET 仙台波 80% [震度 6 強]		2. 18 G	2. 05 G
K-NET 仙台波 100% [震度 6 強]		2. 52 G	2. 51 G
JMA 神戸波 100% [震度 6 強]		4. 77 G	2. 40 G
JMA 神戸波 150% [震度 7]		4. 45 G	4. 90 G

\*1 加速度とは、速度の時間当たり変化率を表し、この数値が大きいほど揺れが大きいことを示す。天井面に作用した地震力と同じ意味を持ち、加速度 1G は、自身の重量に相当する力に等しい地震力が作用したことを表す。

\*2 屋根の大梁がかかる方向のこと。今回の試験体では建物の短手方向。

\*3 2月21日プレス発表資料の値とは若干異なるが、未対策天井、1. 1G 耐震天井、2. 2G 耐震点の3つの天井で比較できるよう、結果の整理方法を統一したためである。以前の結果とほぼ同じ傾向を示しており、結論に相違はない。

\*4 2回目加振の結果。ただし、加振途中に天井の損傷によりセンサが断線したため、計測できた途中までの最大値。

#### 4. まとめ

耐震対策の不足した未対策天井による実験および平成 26 年 4 月施行の技術基準に基づいて設計された耐震天井による実験によって、現時点において明らかになった点をまとめると以下のようになります。

- 耐震対策の不足した未対策天井は、東北地方太平洋沖地震の観測記録の揺れを 50%にまで縮小した地震動(震度 6 弱相当)でも脱落の恐れがあることが明らかになりました。脱落に至る過程を詳細に把握できたことから、天井脱落被害メカニズムの解明に大いに役立つ物と考えられます。
- 本震で脱落しかかった状態の天井は、本震後の大きな余震により、大きく脱落することが確認されました。このことから、地震後の安全点検は重要であるといえます。データの詳細分析により、安全点検のために必要な知見の収集も期待されます。
- 脱落した天井をワイヤ/ネットで受け止めるフェイルセーフ機能は有効でした。ただし、既存の施設にどう取り付けるかについては課題があり、さらなる技術開発が必要と考えられます。
- 平成 26 年 4 月施行の技術基準に基づいて設計された耐震天井は、東北地方太平洋沖地震の観測記録(震度 6 強相当)による実験でも脱落することはなく、設計想定 of 2 倍以上の余裕度を持っていることが明らかになりました。
- 耐震天井に対して、設計想定を大きく超える地震動を加えることにより、耐震天井がどう壊れるかを示すデータを取得できました。データの詳細分析により、耐震天井の合理的な設計手法、設計・施工における課題などを洗い出し、より安全な耐震天井の開発につなげ、さらなる被害低減技術開発をすすめていけるものと考えています。

# 大規模空間に設置された吊り天井の脱落被害再現実験結果速報

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、2,000件以上の吊り天井の脱落被害が報告されており、これらによる人的被害も発生しました。これらの被害の中でも特に、災害発生時に避難所・防災拠点としての活用が想定されている体育館等の施設では、天井などの脱落被害により、その機能を失われた事例が多数有り、問題となっています。

これらの問題に対し、関係各機関では、各種法規の整備や既存施設の早急な点検、対策の推進などの対応が進められていますが、天井がどう壊れ、どのように脱落するのかを含む被害メカニズムは未だ明らかにされていないのが現状です。

そこで防災科学技術研究所では、学校体育館を模擬した大規模空間を有する実大モデル(試験体)をイーディフェンスの震動台に載せ加振することにより、大規模空間での被害を引き起こす柱、梁等の構造部材の地震時挙動と、これによる天井などの非構造部材の応答特性、および天井がどう壊れ脱落するのか、その脱落被害メカニズムの解明を目的とした振動実験を実施しました。

## 2. 実験概要

本プロジェクトでは、試験体の天井の組み合わせを変えた実験を計画しています(表1)。本実験で使用する建物試験体の詳細については、別添の平成26年1月7日プレス発表資料および1月28日公開実験当日資料を、実験に使用する天井の詳細な仕様については、P.6の参考資料をそれぞれご参照ください。平成26年1月に実施した実験は、耐震対策のされていない吊り天井の脱落被害の再現を行い、そのメカニズム解明を行うことを目的とした実験です。入力地震動は、東北地方太平洋沖地震において、震源から約170kmの距離にある宮城県仙台市宮城野区にて強震観測網(K-NET)で観測された地震動K-NET 仙台波を用いました。平成26年1月に実施した実験では、K-NET 仙台波の加速度記録を25%に縮小することにより揺れの大きさを震度5強相当に調整して1回加振しました。その後、加速度記録を50%に縮小することにより震度6弱相当にした揺れを2回加振し、脱落被害の再現を行いました。

表1 実験計画

実験時期	主体構造	天井
平成26年1月27日、28日 (実施済み)	純鉄骨造 柱：鉄骨造 屋根：鉄骨山形架構	・H13年よりも前に設計・施工された耐震対策されていない天井 ⇒大規模空間での地震被害の発生を引き起こす構造体と非構造体の応答特性と、天井の脱落被害のメカニズムの解明
平成26年2月27日、28日 (実施予定)		・H26.4に施行される基準に準拠した耐震対策天井 ⇒新しい基準で設計された大規模空間における天井の安全性および耐震余裕度の検証

本実験では、すでに建物へ設置されている地震に対する対策のない特定天井（高さ 6m 以上、平面積 200m<sup>2</sup> 以上）に対し、耐震補強以外の地震対策の選択肢として適用してもよいと建築基準法施行令に定められている天井の脱落を防止する措置を想定し、ワイヤとネットで脱落した天井を受け止めることが出来るフェイルセーフ機能を設置しています（図 1）。フェイルセーフ機能は、脱落した天井を確実に受け止めることが期待されますが、これが機能するかについての研究はまだ不十分であり、今回の実験でその有効性を検証しました。今回の実験では、脱落した天井全体の重量は 800mm 間隔で設置したワイヤで受け止め、破損した細かい金物類は 30mm 間隔の比較的細かいネットで受け止める構造としています。

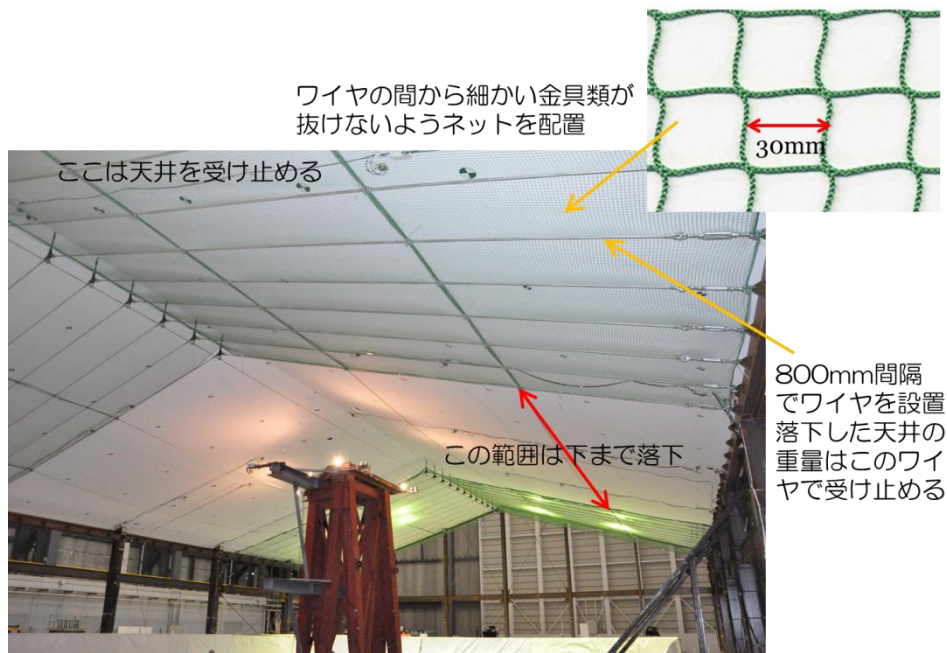


図 1 フェイルセーフ機能

### 3. 実験結果

東北地方太平洋沖地震（K-NET 仙台波）の加振による再現実験により、今回の天井は表 2 にあるような被害を受けました。震度 6 弱の 1 回目の揺れ（50%加振）により、天井を支える接合金物がはずれ、天井面が大きいたわみしました。天井は大破した状態であり、いつ脱落してもおかしくない状態まで損傷いたしました。

続いて余震を想定した震度 6 弱の 2 回目の揺れ（50%加振）が加わることにより、大きいたわんだ天井が揺れによって大きく振動し、耐えられなくなった天井面が脱落しました。中央の天井が脱落し始めたことにより、全体の 1/5 程度にあたる天井面が、軽量鉄骨下地に引っ張られるように次々と脱落し、大きな被害を及ぼしました。（図 2、図 3）

この振動実験により、これまで明確に把握されていなかった天井部材を接合する金物が外れ、脱落していく大規模吊り天井の天井裏の動きと天井脱落の様子を世界で初めてカメラに収めることが出来ました。この映像は、天井がなぜ、どのようにして脱落していくか、そのメカニズム解明のための重要なデータとなります。

また、本実験で導入したフェイルセーフ機能は、脱落した天井面および破損した金物を下にま



で落下させることなくきちんと受け止めました（図 4）。このフェイルセーフ機能により、少なくとも人的被害は抑えられたと考えられ、未対策天井の脱落対策に対する応急措置としては十分な性能があることが確認できました。

表 2 実験による天井の損傷まとめ

入力地震	天井面の揺れの強さ (加速度計測定値)	天井の応答（動き）と損傷
K-NET仙台波 25%（震度5強）	0.93G※	接合金物がずれる等軽微な損傷のみ。
K-NET仙台波 50%（震度6弱）	5.80G※	接合金物が外れ、天井面が大きくたわむ。脱落寸前であり、天井は大破した。
K-NET仙台波 50%（震度6弱）	7.15G※	たわんだ天井面が大きく揺すられ、激しい音とともに天井面が脱落した。脱落した天井は、全体の1/5程度であった。

※Gは加速度の単位。1Gで、自分自身の重さと同じ地震力を受けたことに相当する。金物の外れ、天井面の脱落の影響により、天井全体が大きく揺れたため、50%加振では加速度の値が大きくなっている。

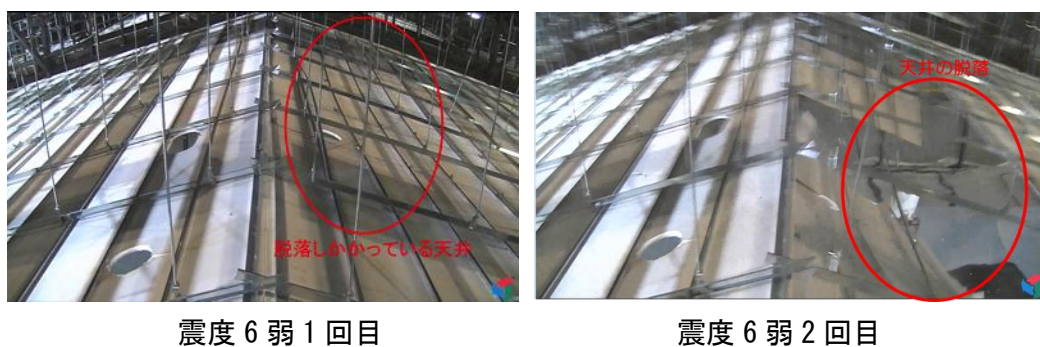


図 2 実験中の天井裏の様子



図 3 実験後の状況（左：天井裏より、右：外れた金具）



図 4 有効に機能したフェイルセーフ機能

#### 4. 今後のスケジュール

今回の実験により得られたデータを詳細に分析し、建物の揺れと天井の動きの相関関係を明らかにするとともに、天井が地震による激しい揺れでどう脱落に至るのか、そのメカニズムを解明し、報告書でまとめる予定です。

また、平成26年2月27日、28日には、平成26年4月より施行予定の新基準に準拠した耐震天井の実験を計画しています（P.6 参考資料）。この新しい基準は、国土技術政策総合研究所に設置された建築構造基準検討委員会における技術的検討に基づき取りまとめられた「建築物における天井脱落対策試案」をベースとして、パブリックコメントにより寄せられた意見やその後の調査研究による追加の技術的検討も踏まえて、平成25年7月12日に公布された建築基準法施行令の一部を改正する政令（平成25年政令第217号）および建築基準法施行規則および建築基準法に基づく指定資格検定機関等に関する省令の一部を改正する省令（平成25年国土交通省令第61号）と、同年8月5日に公布された天井脱落対策に係る一連の技術基準告示によるもので、「6m超の高さにある、水平投影面積200m<sup>2</sup>超、単位面積質量2kg/m<sup>2</sup>超の吊り天井で、人が日常利用する場所に設置されているもの」を「脱落によって重大な危害を生ずる恐れがある天井」（「特定天井」と略称される）と定義して、適切な脱落対策を取ることを求めています。

この基準に基づいて、2月に実施を予定している実験の天井では、各部材を接合する金物をより強固なものに入れ替えるとともに、揺れを抑える斜め部材（ブレース）を多数配置して天井全体の強度を大きく向上させ、地震による脱落被害に対する対策を施したものです（図5）。また、天井周囲には壁や柱との間に隙間（クリアランス）を設け、揺れにより天井が周囲の壁等に衝突することがないように設計されています。吊り天井に対する耐震対策として有効であると考えられているこれらのブレースやクリアランスが、天井の応答にどう影響を及ぼすのかを評価します。さらに、耐震天井が設計で想定している以上の揺れを受けた場合に、どこまでの揺れに耐え、どう壊れるかを明らかにし、耐震天井の耐震余裕度の検証を行う予定です。2月27日、28日の実験については別途お問い合わせください。



図5 天井試験体の模型（上：未対策天井、左：JIS規格材を中心とした主たる部材とした耐震天井（1.1G耐震天井）、右：JIS規格材より高強度の部材で構成した耐震天井（2.2G耐震天井））

天井の仕様

項目	仕様		
	未対策天井	1. 1G 耐震天井	2. 2G 耐震天井
加振実験日	H26. 1. 27~28	H26. 2. 27~28	
試験体の考え方	地震に対する対策のない天井 (過去の脱落被害再現のため既存の天井を模擬)	JIS 規格材を主たる部材とした耐震天井 (耐震設計の妥当性と耐震余裕度の検証)	JIS 規格材よりも高強度な部材で構成した耐震天井 (耐震余裕度の検証)
耐震基準	なし	H26. 4 施行予定の新耐震基準 (2 階建て建物の1 階部分に相当する地震力を想定)	H26. 4 施行予定の新耐震基準 (基準で想定されている最大地震力)
設計地震力	地震による揺れが設計想定外	天井に作用する慣性力が 1. 1G (K-NET 仙台波 25%相当)	天井に作用する慣性力が 2. 2G (K-NET 仙台波 50%相当)
吊りボルト		3/8' 吊りボルト (3 分)	
吊り長さ		1500mm	
吊り間隔	1147×1000mm	860×1000mm	860×1000mm
野縁受け	野縁受け 19 型 (38×12×1. 2)@1000mm (JIS 規格品)	野縁受け 19 型 (38×12×1. 2)@1000mm (JIS 規格品)	[-40×20×1. 6 @1000mm
ハンガー	JIS ハンガー加工品 (勾配天井用、JIS 規格同等品)	ビス付耐震フリーハンガー (野縁受け 19 型用)	ビス付耐風圧フリーハンガー*([-40 用)
シングル野縁	シングル野縁 19 型 (25×19×0. 5)@364mm (JIS 規格品)	シングル野縁 19 型 (25×19×0. 5)@303mm (JIS 規格品)	ダブル野縁 25 型 (50×25×0. 8)@303mm
ダブル野縁	ダブル野縁 19 型 (50×19×0. 5)@1820mm (JIS 規格品)	ダブル野縁 19 型 (50×19×0. 5)@910mm (JIS 規格品)	
シングルクリップ	シングル野縁 19 型用クリップ(JIS 規格品)	耐風圧クリップ S* ブレース近傍のみ ビス付き耐震クリップ S	耐風圧 Wクリップ* ([-40 用) ブレース近傍のみ 補強ピース+ビス固定
ダブルクリップ	ダブル野縁 19 型用クリップ(JIS 規格品)	耐風圧クリップ W* ブレース近傍のみ ビス付き耐震クリップ W	
ブレース	なし	[-40×20×1. 6 4 本@27 組=108 本	C-50×25×10×1. 6 4 本@30 組=120 本
クリアランス	なし	60mm 以上	
天井仕上げ材	石膏ボード 9. 5mm + 岩綿吸音板 9mm		
天井質量	13. 1kg/m <sup>2</sup>	13. 8kg/m <sup>2</sup>	16. 0kg/m <sup>2</sup>

※耐震天井に使用する金具の一部に耐風圧設計が必要な天井(大きな風荷重が作用する天井)用の金具を使用していますが、これらの金具は別途試験により耐震天井に使用できることを確認しています。