

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

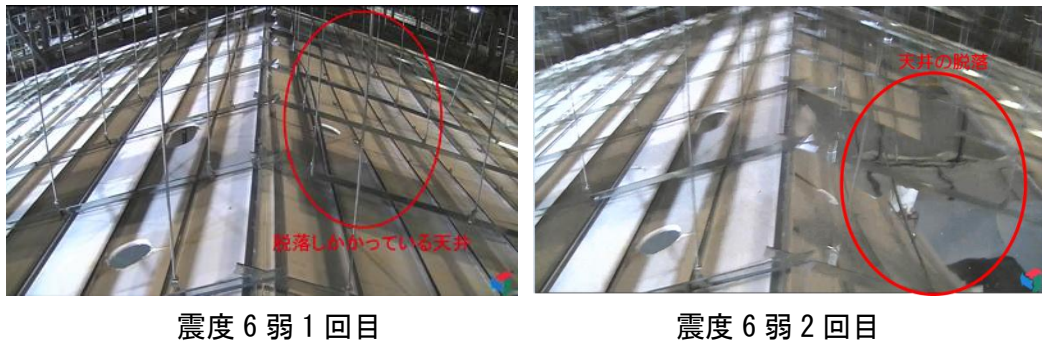
実験時期	主体構造	天井
平成26年1月27日、28日 (実施済み)	純鉄骨造 柱：鉄骨造 屋根：鉄骨山形架構	・H13年よりも前に設計・施工された耐震対策されていない天井 ⇒大規模空間での地震被害の発生を引き起こす構造体と非構造体の応答特性と、天井の脱落被害のメカニズムの解明
平成26年2月27日、28日 (実施予定)		・H26.4に施行される基準に準拠した耐震対策天井 ⇒新しい基準で設計された大規模空間における天井の安全性および耐震余裕度の検証

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。



震度 6 弱 1 回目

震度 6 弱 2 回目

図 2 実験中の天井裏の様子

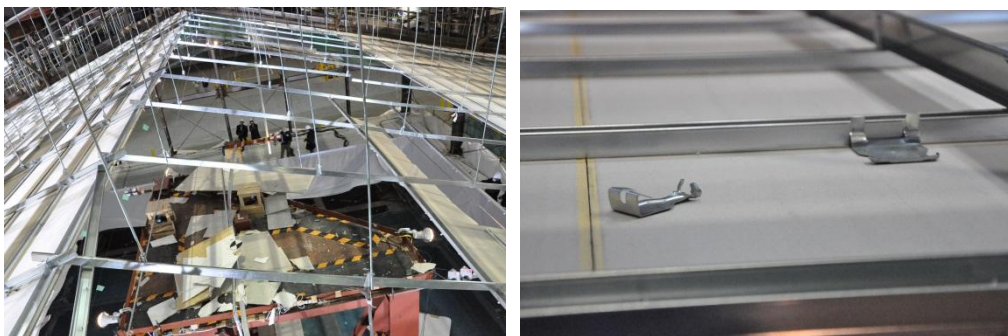


図 3 実験後の状況（左：天井裏より、右：外れた金具）



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200m²超、単位面積質量2kg/m²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。

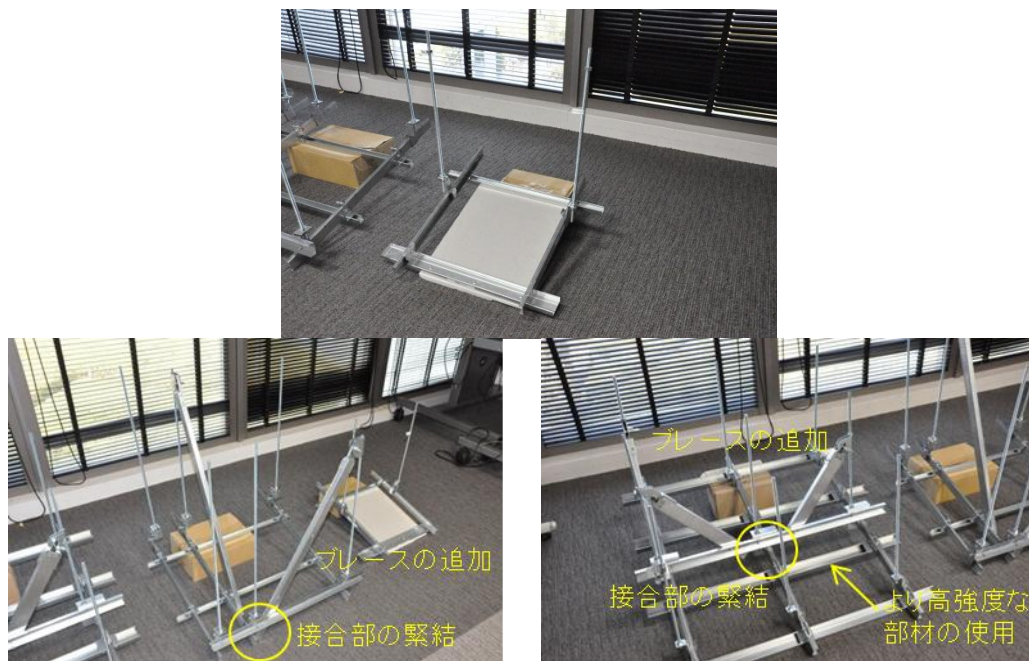


図5 天井試験体の模型（上：未対策天井、左：JIS規格材を中心とした主たる部材とした耐震天井（1.1G耐震天井）、右：JIS規格材より高強度の部材で構成した耐震天井（2.2G耐震天井））

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 ²	13.8kg/m ²	16.0kg/m ²

※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。

大規模空間に設置された吊り天井の脱落被害再現実験

1. はじめに

大地震発生時の避難拠点となる学校体育館などの大規模建築物については、避難拠点として災害発生後も使用可能であり、災害発生後の余震にも耐えうる施設であることが求められています。しかし、東日本大震災では本震に加えて最大震度 6 弱以上の余震が多数回発生し、学校体育館などでは柱脚の損傷やブレース材（斜材）が折れ曲がるなどの構造部材の被害、および、天井材等の非構造部材や照明等の設備機器の落下被害等により、地震後の避難拠点としての機能を満たさない事例が報告されました。特に天井等の非構造部材の損傷・落下被害は、人命保護の観点から、あってはならない事象であり、最優先で対策されるべき課題であるといえます。

東北地方太平洋沖地震時に多数の施設で発生した天井脱落被害を受け、国土交通省では、平成 25 年 7 月に建築基準法施行令を改正（平成 26 年 4 月施行）し、天井脱落防止対策を義務づけることとしました。また、文部科学省では、「学校施設における非構造部材の耐震対策の推進に関する調査研究」において、「学校施設における天井等落下防止対策のための手引き」の作成を行い、これを活用して学校体育館などの天井等の総点検・対策を推進しています。

防災科学技術研究所では、学校体育館などの天井落下被害軽減技術や対策の提案を行うことを目的とし、「学校施設における大空間建築物の実験研究プロジェクト」を立ち上げました。本プロジェクトは、学校体育館をモデル化した大規模空間を有する試験体の加振実験を実施し、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部材の応答特性と天井の脱落被害メカニズムの解明を目指しています。

2. 試験体概要

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）。今回公開する実験は最初に行うものであり、吊り天井の落下被害の再現を行い、そのメカニズム解明を行うことを目的とした実験です。本実験で使用する試験体は、平面寸法 18.6m×30m の山形屋根を有する体育館を模擬した試験体です（図 1）。この平面寸法は、バスケットコート（28m×15m）ならば 1 面、バレーコート（18m×9m）ならば 2 面確保することが出来る大きさで、小中学校で使用される体育館とほぼ同等の大きさの試験体です。Eーディフェンス震動台（15m×20m）を大きく超える寸法の試験体で、これまで実施してきた Eーディフェンス振動実験の試験体の中でも最大の平面寸法を有しています（図 2）。

表 1 実験計画

実験時期	主体構造	天井
平成 26 年 1 月	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
2 月		・ 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

※ 2 月の実験の詳細については別途お問い合わせください

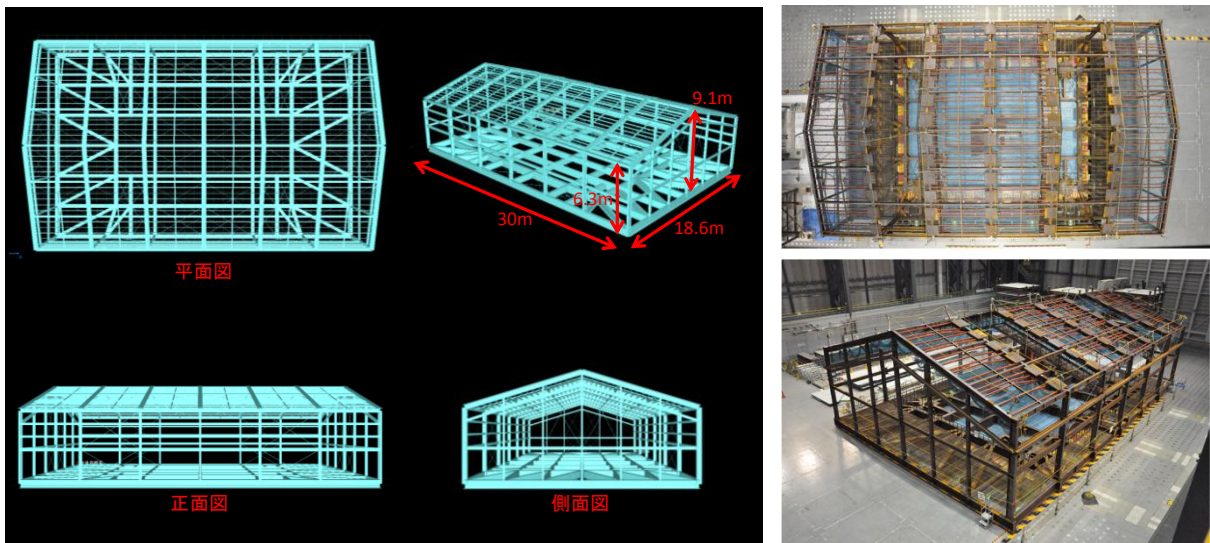


図 1 試験体イメージ図と建設中の試験体

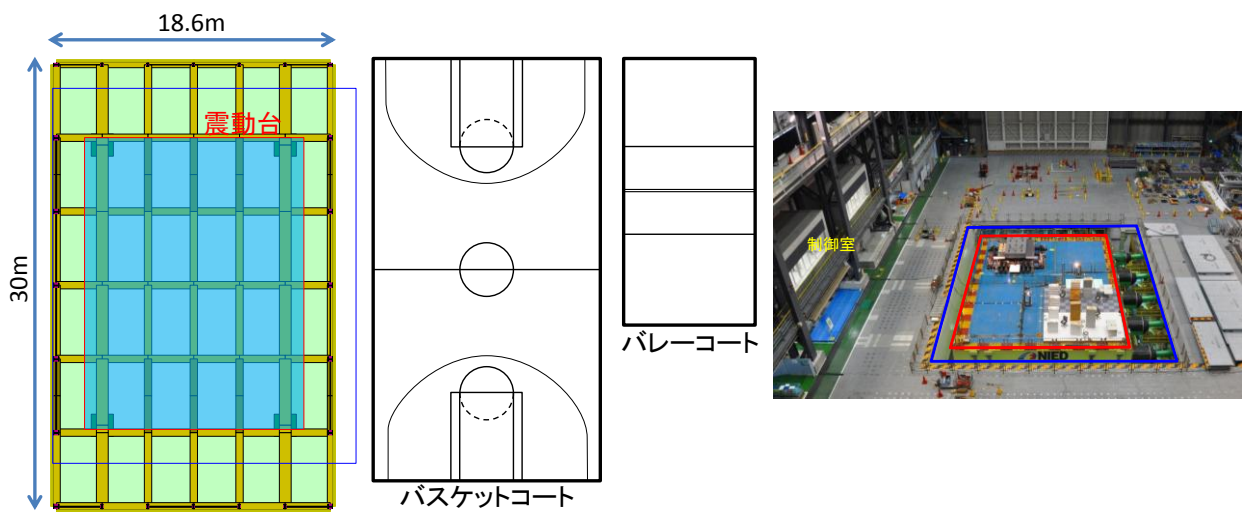


図 2 試験体の大きさ比較

試験体の柱および大梁には幅 200mm、高さ（せい）400mm の H 形鋼を、小梁には幅 248mm、高さ 124mm の H 形鋼を使用しています。今回の実験では、内部に設置された天井の動きを外側から確認できるように屋根は省略し、建物の動きが実物の体育館と同等となるよう、鋼材おもりを屋根面に調整して設置します。

試験体内部には、屋根面と同じ勾配を有する吊り天井を設置します（図 3）。今回の公開実験で設置する天井は、揺れ止めのための斜め部材や周囲の壁との間に隙間（クリアランス）を空けていない、平成 13 年度の国土交通省による技術的助言（国住指第 357 号「芸予地震被害調査報告の送付について（技術的助言）」）よりも前の考え方で設計・施工された、耐震対策がされていない天井を想定して設計しています。天井仕上げは、9.5mm 厚さの石こうボードと 9mm 厚さの岩綿吸音板を組み合わせたものを、下地材は、JIS 規格で規定されている 19 型軽量鉄骨下地材を使用し、既存の建物でも広く採用されている天井面としています。単位面積あたりの天井面質量は約 13kg です。この天井面を、屋根面の梁に設置された母屋材（屋根を支える部材で、幅 50mm、高さ 100mm の C 形鋼）に、吊り長さ 1.5m で、w3/8 吊りボルトを使用してつり下げられた構造となっています。吊りボルトの間隔は、梁間方向（短辺方向）には屋根に沿って 1.2m、桁行方向（長辺方向）には 1m です。

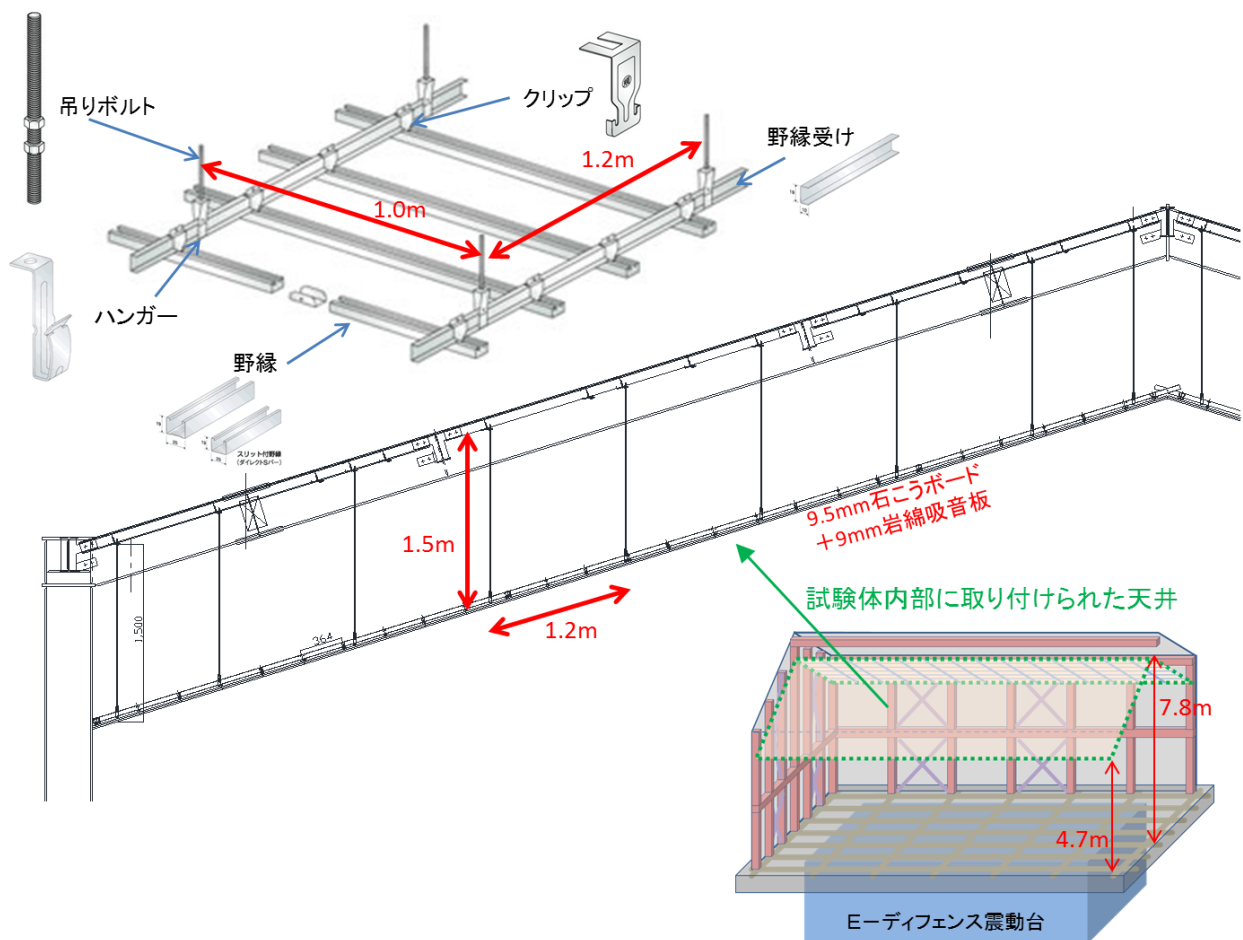


図 3 天井の各要素と寸法

（左上図：吊り天井を構成する部材、中図：屋根と天井の関係（試験体断面図）、
右下図：試験体の全体と天井配置イメージ）

3. 入力地震動

2011 年東北地方太平洋沖地震の被害を再現するため、入力地震動としては、同地震において、震源から 170km 離れた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 (震度 : 6 強) を用います (図 4)。公開実験では、この K-NET 仙台波のレベルを調整して入力する予定です。

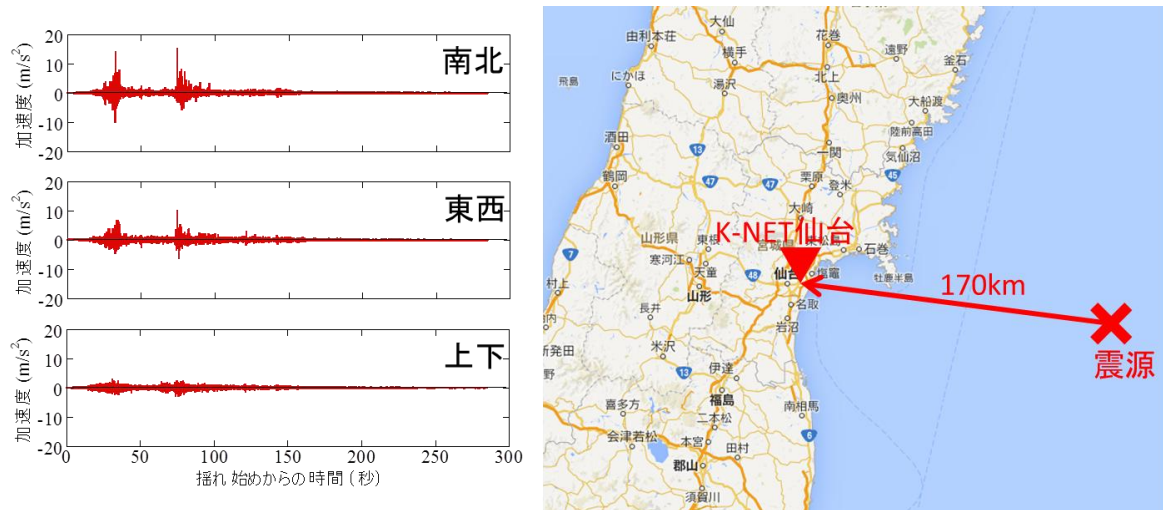


図 4 K-NET 仙台波

(左図 : K-NET 仙台波の加速度波形、右図 : 震源と観測点 (K-NET 仙台) の位置)

大規模空間に設置された吊り天井の脱落被害再現実験

公開実験用資料

平成 25 年 1 月 28 日
独立行政法人 防災科学技術研究所
兵庫耐震工学研究センター

1. はじめに

大地震発生時の避難拠点となる学校体育館などの大規模建築物については、避難拠点として災害発生後も使用可能であり、災害発生後の余震にも耐えうる施設であることが求められています。しかし、東日本大震災では本震に加えて最大震度 6 弱以上の余震が多数回発生し、学校体育館などでは柱脚の損傷やブレース材（斜材）が折れ曲がるなどの構造部材の被害、および、天井材等の非構造部材や照明等の設備機器の落下被害等により、地震後の避難拠点としての機能を満たさない事例が報告されました。特に天井等脱落等の被害は約 2000 件発生したと報告されており、これにより死者 5 名、負傷者 72 名以上の人的被害があったとされています。このような被害は人命保護の観点から、あってはならない事象であり、最優先で対策されるべき課題であるといえます。

これらの天井脱落被害を受け、国土交通省では、平成 25 年 7 月に建築基準法施行令を改正（平成 26 年 4 月施行）し、天井脱落防止対策を義務づけることとしました。また、文部科学省では、「学校施設における非構造部材の耐震対策の推進に関する調査研究」において、「学校施設における天井等落下防止対策のための手引き」の作成を行い、これを活用して学校体育館などの天井等の総点検・対策を推進しています。これらは、地震後の被災調査から推定された破壊メカニズムや各所で実施されている天井要素の実験の結果等を根拠としています。しかしながら、天井要素のみを取り出した実験では脱落被害の再現が難しく、そもそも天井がどう壊れ、どのように脱落するのかはいま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、学校体育館などの天井脱落被害軽減技術や対策の提案を行うことを目的とし、「学校施設における大空間建築物の実験研究プロジェクト」を立ち上げました。本プロジェクトは、学校体育館をモデル化した大規模空間を有する試験体の加振実験を実施し、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部材の応答特性と天井の脱落被害メカニズムの解明を目指しています。

2. 実験概要

平成 25 年度では、吊り天井を有する実大体育館を模擬する試験体を対象とした加振実験を実施することにより、

- 1) 大規模空間に設置された吊り天井の脱落被害を再現し、そのメカニズムを解明する
- 2) 最新の耐震天井の設計想定を超えるレベルの大地震に対する耐震余裕度を評価することを目的としています。

また、今回の実験結果から得られたデータを活用し、設計基準で想定されているレベルを超える規模の地震に対しても十分な耐震性能を発揮できる耐震天井の開発、検証を目指します。

表1 H25年度実験計画

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
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

3. 試験体の構造設計概要

今回の実験に使用する試験体は小中学校で使用される鉄骨造体育館を想定して設計した実大試験体です。平面寸法は、E-ディフェンス震動台を大きく超える、18.6m×30mで、過去最大の平面積を有する試験体です。この平面寸法は、バスケットコート(28m×15m)ならば1面、バレーコート(18m×9m)ならば2面確保することが出来る大きさで、小中学校で使用される体育館とほぼ同等の大きさの試験体です。試験体の高さは約9mです。試験体の設計では、標準層せん断力係数 $C_0 = 0.2$ に対して許容応力度設計を行い、地震時保有水平耐力による照査を実施し、十分な耐力があることを確認しています。

試験体内には吊り天井を施工します。内部に設置された天井の動きを外側から確認できるように外壁、屋根は省略し、建物の動きが実物の体育館と同等となるよう、鋼材おもりを屋根面に調整して設置します。

表2 試験体の主な仕様

項目	仕様	
構造、階数	鉄骨造 平屋建て	
質量	約250t(天井材を含む)	
高さ	9.090m	
平面	30.0m×18.6m (6スパン×6スパン)	
設計	許容応力度設計 ($C_0 = 0.2$) 地震時保有水平耐力による照査を実施	
使用部材	柱 (妻面除く)	H400×200×8×13
	妻面の柱	H250×125×6×9、H300×150×6.5×9
	大梁	H400×200×8×13
	小梁	H248×124×5×8
	鉛直ブレース	M20、M27 T.B.付き (パイプ式)
	水平ブレース	M16 T.B.付き (パイプ式)

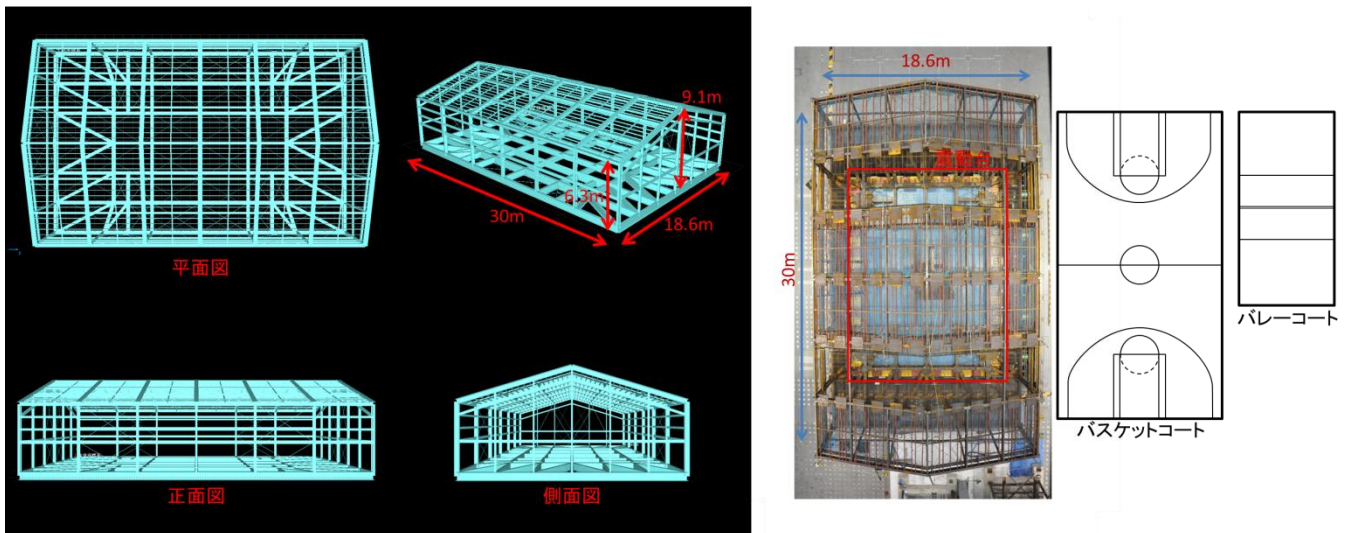


図1 大空間建築物試験体

4. 未対策天井の設計

試験体内部には屋根面と同じ勾配を有する吊り天井を施工します。今回の公開実験で設置する天井は、揺れ止めのための斜め部材や周囲の壁との間に隙間（クリアランス）を空けていない、平成13年度の国土交通省による技術的助言（国住指第357号「芸予地震被害調査報告の送付について（技術的助言）」）よりも前の考え方で設計・施工された、耐震対策がされていない天井を想定して設計しています。JIS規格に従い製作された部材（JIS材）で構成された天井とし、現在も多数の施設に残っていると考えられる耐震未対策の一般的な天井を目指し設計しました。天井仕上げは9.5mm厚さの石膏ボードと9mm厚さの岩綿吸音板を組み合わせたものを、下地材はJIS19型の軽量鉄骨下地材を使用しており、単位面積あたりの天井質量は13.1kg/m²です。天井の吊り元となる母屋材はC形鋼（C-100×50×20×3.2）を使用し、アングル材を介し、w3/8吊りボルトを用いて天井を吊り下げています。吊り長さは1.5m、吊りボルト間隔は、梁間方向は1147mm（屋根面沿いに1200mm）、桁行方向は1000mmです。

表3 未対策天井の仕様

項目	仕様
吊りボルト	3/8"吊りボルト（3分）@1147×1000mm、吊り長さ1500mm
野縁受け	CC-19 @1000mm
ハンガー	JISハンガー
シングル野縁	CS-19 @364mm
ダブル野縁	CW-19 @1820mm
シングルクリップ	CS-19クリップ
ダブルクリップ	CW-19クリップ
ブレース	なし
クリアランス	なし
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 ²

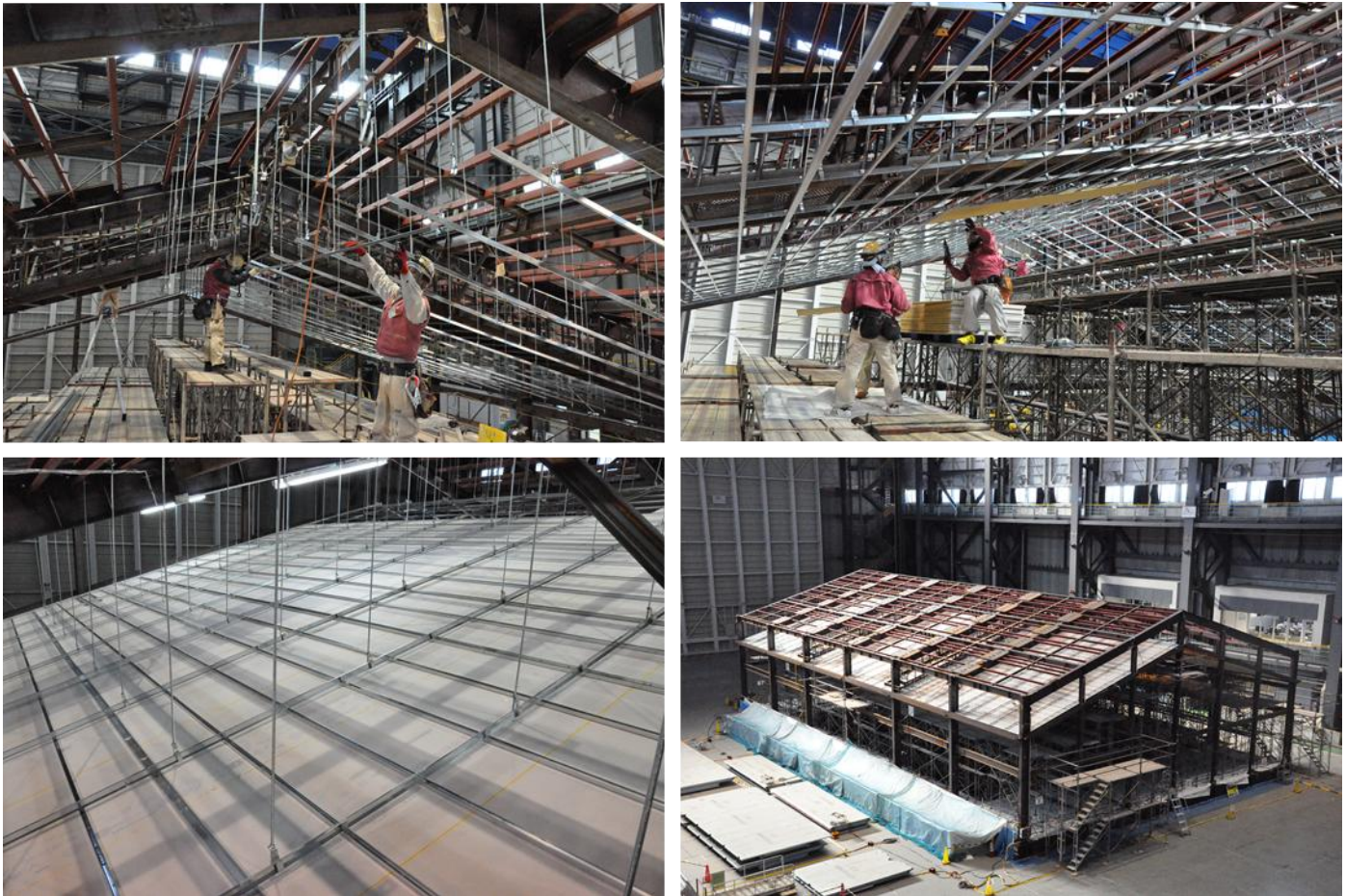


図2 未対策天井

5. 入力地震動

2011年東北地方太平洋沖地震の被害を再現するため、入力地震動としては、同地震において、震源から170km離れた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(震度:6強)を用います。公開実験では、この K-NET 仙台波のレベルを調整して入力する予定です。

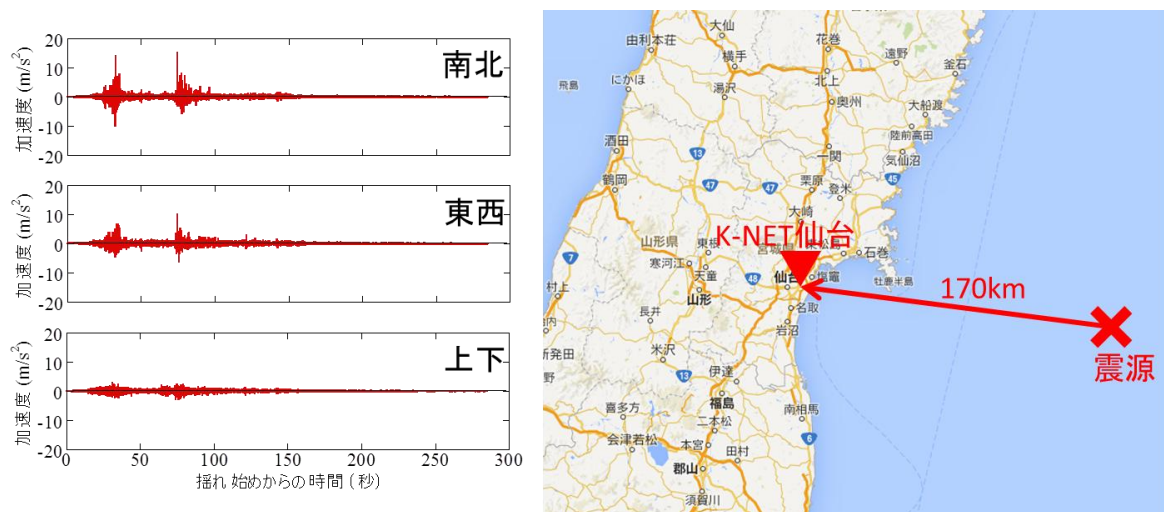


図3 入力する加速度記録と K-NET 仙台観測点の位置