

耐震天井振動実験 報告書（速報）

2014 年 8 月 29 日

兵庫県立大学大学院シミュレーション学研究科

教授 永野 康行

1. 序 [1]を参照し加筆

平成 23 (2011) 年の東日本大震災では首都圏を含む極めて広範囲において非構造部材に大きな被害が発生した。その中でも吊り天井の被害が顕著で、これらの被害は人的被害ならびにその後の建物の機能消失を生み出した。

吊り天井が地震時に落下する被害は以前から発生していたと考えられる。この被害が注目され出したのは平成 13 (2001) 年の芸予地震からである。平成 7 (1995) 年の兵庫県南部地震における阪神・淡路大震災では天井落下被害も確認されていたものの、構造体自体の被害が大きい状況下において天井落下は必然的な現象と捉えられていたことによる。一方、芸予地震やそれ以降の平成 15 (2003) 年の十勝沖地震、平成 17 (2005) 年の宮城県沖の地震では、構造体にはほとんど損傷が発生しない程度の地震動であったにもかかわらず、大規模な天井落下被害が発生した (例えば写真 1(a))。このような背景のもと、国土交通省は技術的助言を発表していたが^[4]十分な対策がなされない間に東北地方太平洋沖地震が発生し、この東日本大震災では首都圏を含む極めて広い地域において大規模な天井落下被害が発生した (例えば写真 1(b))。この甚大な被害を受けて、建築物の天井脱落対策を規定するために建築基準法施行令が改正され、それに基づき関連告示^[5]が公布され、日本建築学会では天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン^[6]が策定された。告示^[5]では『脱落によって重大な危険を生ずるおそれがある天井』(以下『特定天井』) が適合すべき構造耐力上安全な天井の構造方法が定められ、設計用地震力 (水平震度) としての基準が最大 2.2G と設定された。



(a) 2005 年宮城県沖の地震における被害事例^[2]



(b) 2011 年東日本大震災における被害事例^[3]

写真 1 地震時の天井落下被害事例

特定天井に該当する天井を有する施設としては、体育館、武道場、屋内プール等が該当し、特に学校施設が保有するものが多いため、文部科学省では早急な対策が取られた¹⁷⁾。そこでは、屋内運動場等（武道場、講堂及び屋内プールを含む）の大規模な空間の天井については、特定天井に加え、①高さが6mを超える天井、または②水平投影面積が200m²を超える天井、については天井撤去などの対策を検討するなど、迅速勝効率的に総点検を実施するよう、各学校長等に通知している。これに関連して、神戸市教育委員会事務局 総務部 学校整備課へヒアリング（2014年7月29日、永野とM2学生の呂にて実施）をしたところ、文部科学省の通知を受けて、該当天井を撤去する方針で平成27年度末工事完了を目途として計画がなされている。現在、特定天井に対応する吊り天井が無いことから、原則として撤去（もしくは吊り天井ではない直付天井への改修）される模様である。

このような背景のもと、ビューテック株式会社と旭ビルト工業株式会社は特定天井に従来の天井設置条件に近い状況下で設置可能な、軽量で高剛性の新耐震システム天井の開発に至った。

2. 実験概要

2.1 試験装置及び試験架台

天井の耐震性能を確認するための試験装置として大型三次元振動台（神奈川県愛甲郡愛川町中津 4036-1 の日本国土開発株式会社 技術センター所有）を使用した（図 1）。天井耐震実験用架台の概要を図 2 に、実験の概要を写真 2 に示す。架台は 4 本 H 形鋼柱の X、Y 両方向とも筋違付骨組、柱芯 5,560×4,280、架台の上部重量は 414kg である。

この振動台は水平・上下方向の計 3 軸、及び各軸回りの回転を加えた 6 自由度の加振が可能で高精度なシミュレーションが行え、また十分な可動変位（最大振幅±30cm）があるので、地震動の再現性が高い^[8]。

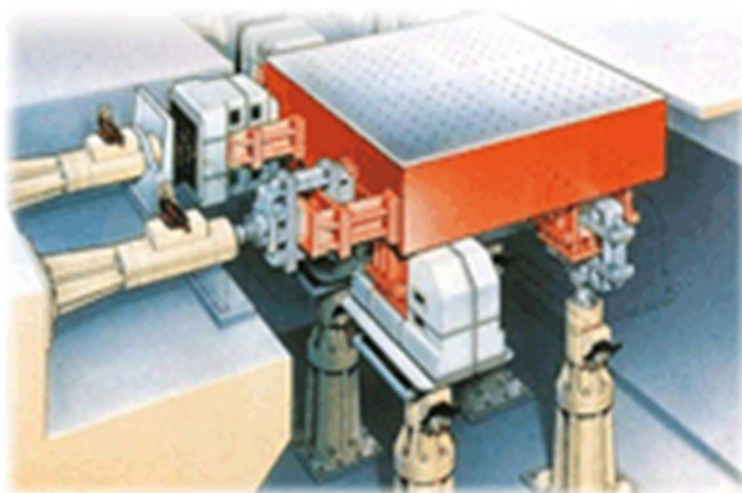


図 1 三次元振動台実験設備の概要図^[8]

表 1 三次元振動台設備の仕様^[8]

項目	仕様
寸法	4m×4m
積載重量	20ton（196KN）
加振軸	3 軸（水平 2 軸：X,Y 方向、上下 1 軸：Z 方向）、回転（ $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ）
最大振幅	X 軸：±200mm, Y 軸：±300mm, Z 軸：±100mm, 回転：±1°
速度（連続単独）	X 軸：±130cm/s, Y 軸：±130cm/s, Z 軸：±65cm/s
加速度	X 軸：±1.0G, Y 軸：±1.0G, Z 軸：±1.0G（※地震波の場合 1.5G ）
加振周波数	DC～50Hz
駆動方式	電気油圧サーボ式
制御方式	加速度・変位制御
加振波形	各種正弦波、スweep波形、地震波
付属設備	10tonf 天井式クレーン（桁下 7.5m）

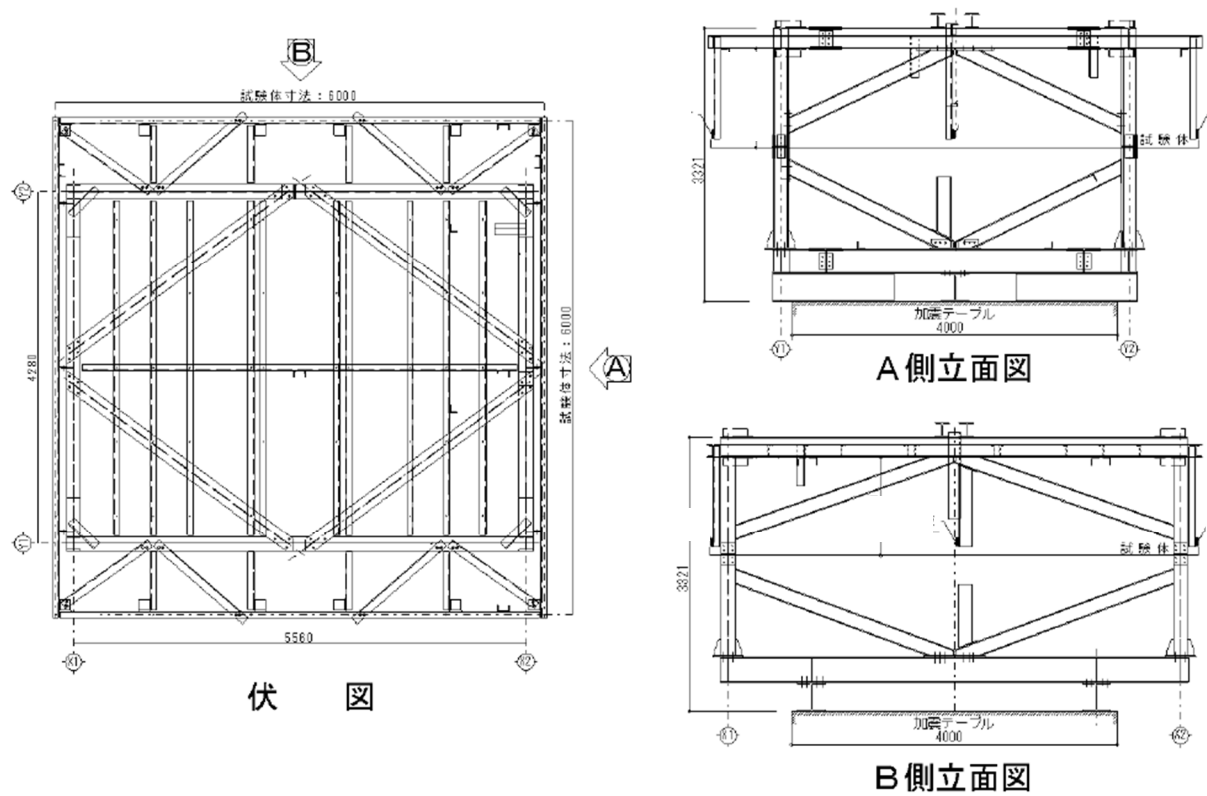


図2 架台図面

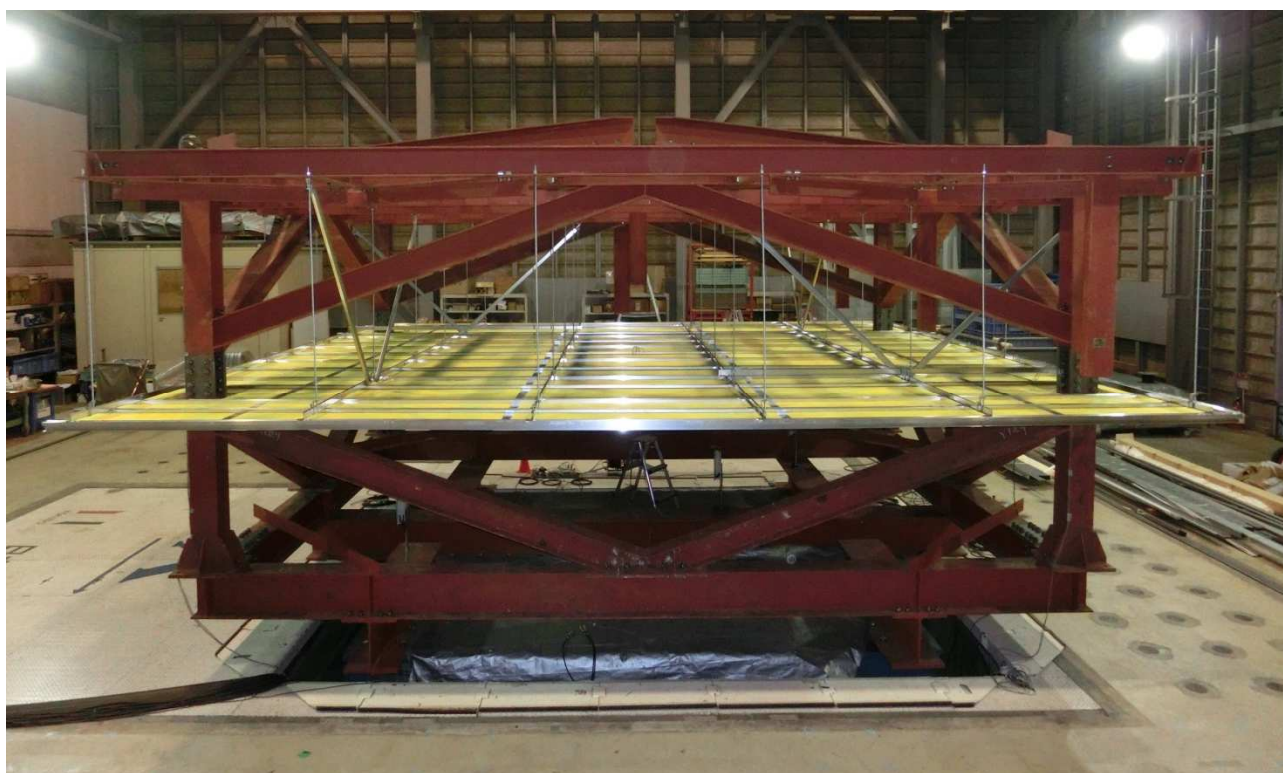


写真2 架台と試験体

2.2 天井試験体

天井試験体の概要を表2に示す。この新耐震システム天井の耐震性能を確認するため、約40m²（6.3m×6.3m）の試験体を各種（4パターン）振動実験台上に設置したシステム天井実験用架台から試験体を吊るし、各地震波を入力し加振する。

入力地震動を表3に示す。1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災により神戸地方気象台で観測された地震動JMA神戸波、2011年3月11日に発生した東日本大震災により栃木県芳賀郡芳賀町で観測されたKIK-NET芳賀波、同じく茨城県日立市で観測されたKIK-NET日立波を用い、また各種試験体の固有周期の検証によるX,Y,Z方向の正弦波（SIN波）の加振によって、試験体天井面の応答特性、試験体の破損の有無を確認する。

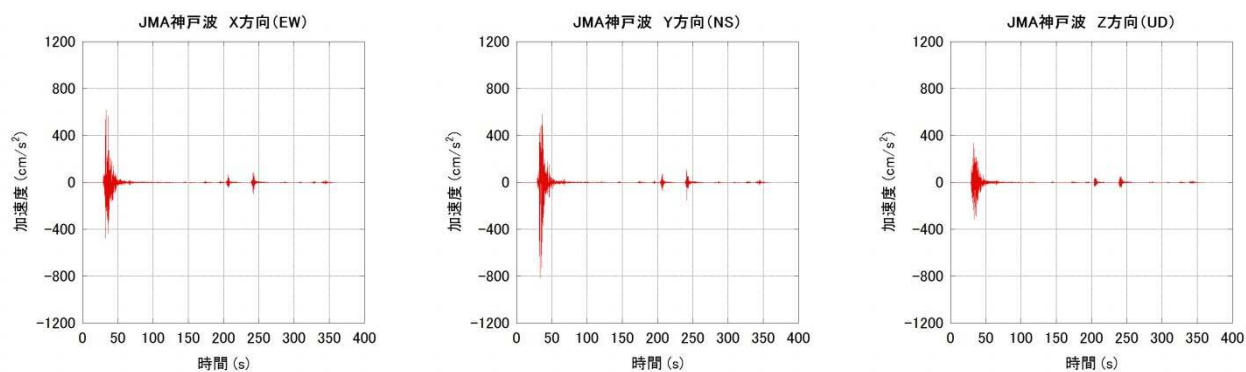
表2 天井試験体の概要

試験体名	仕様	天井板	メイン下地部材	天井面部材重量 (kg/m ²)
試験体A	ATS工法(メイン1000)	化粧グラスウール天井板	アルミ型材他	3.527
試験体B	ATS工法(メイン1500)	化粧グラスウール天井板	アルミ型材他	3.536
試験体B(O)	ATS工法(メイン1500)	化粧グラスウール天井板	アルミ型材他	3.536
試験体C	ルクサロン 300C スイム	カラーアルミパンチング メタルホーミングパネル	アルミ専用 ストリンガー他	5.396

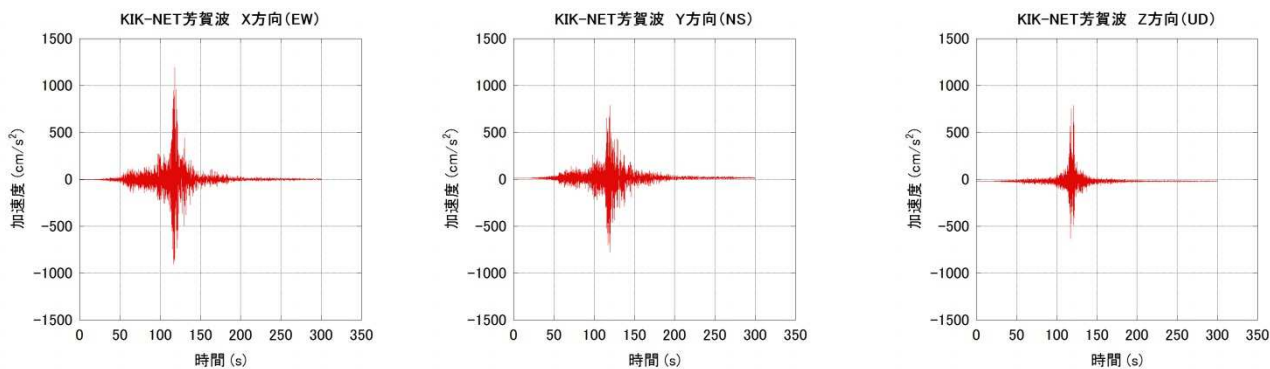
表3 入力地震動

入力地震動波形：入力レベル	震度階（計測震度）	備考
JMA 神戸波：100%	震度6強（6.3）	直下型地震による揺れに対する耐震天井の耐震性検証
KIK-NET 芳賀波：100%	震度7（6.51）	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
KIK-NET 日立波：100%	震度6強（6.46）	吊り天井に影響が大きいとされる縦振動に突出した揺れが観測されている地震波で、これに対する耐震天井の耐震性検証

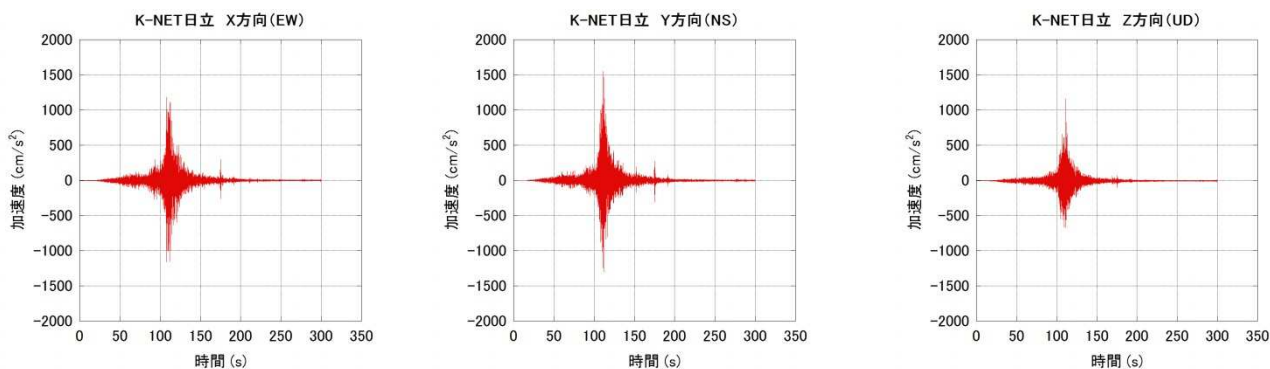
図 3 に入力地震動波形の時刻歴を示す。



(a) JMA 神戸波



(b) KIK-NET 芳賀波



(c) KIK-NET 日立波

図 3 入力次振動波形の時刻歴

3. 実験結果（速報）

3.1 各入力地震動による天井面応答加速度

表 4 に JMA 神戸波 100%入力時、表 5 に KIK-NET 芳賀波 100%入力時、表 6 に KIK-NET 日立波 100 入力時における天井面の最大応答加速度をそれぞれ示す。時刻歴応答波形は別添資料参照のこと。

※ 1 G=980 cm/s²

表 4 JMA 神戸波 100%入力時における天井面最大応答加速度 (cm/s²)

試験体名	X	Y	Z
試験体 A	1,646	1,262	4,715
試験体 B	1,020	1,270	951
試験体 B (O)	1,234	1,227	1,026
試験体 C	1,093	1,213	910

表 5 KIK-NET 芳賀波 100%入力時における天井面最大応答加速度 (cm/s²)

試験体名	X	Y	Z
試験体 A	2,849	2,357	15,036
試験体 B	2,267	1,613	6,579
試験体 B (O)	3,289	1,781	5,913
試験体 C	5,765	2,139	7,789

表 6 KIK-NET 日立波 100%入力時における天井面最大応答加速度 (cm/s²)

試験体名	X	Y	Z
試験体 A	6,400	7,931	20,368
試験体 B	4,615	4,701	15,991
試験体 B (O)	4,478	5,810	15,429
試験体 C	4,802	7,005	14,650

3.2 正弦波（Sin 波）による天井面応答加速度

表 7 に各固有周期における正弦波加振時における天井面最大応答加速度を示す。

表 7 各固有周期における正弦波加振時における天井面最大応答加速度 (cm/s²)

試験体名	X	Y	Z
試験体 A	10.0Hz 900cm/s ²	8.25Hz 1,200 cm/s ²	17.0Hz 600 cm/s ²
	3,194	2,656	17,423
試験体 B	9.0Hz 1,200 cm/s ²	10.75Hz 1,200 cm/s ²	18.0Hz 600 cm/s ²
	2,230	2,536	5,297
試験体 B (O)	7.75Hz 1,200 cm/s ²	10.75Hz 1,200 cm/s ²	19.0Hz 600 cm/s ²
	3,387	4,619	3,885
試験体 C	7.5Hz 1,200 cm/s ²	9.0Hz 1,200 cm/s ²	14.5Hz 300 cm/s ²
	5,803	2,977	13,289

3.3 実験による各試験体の破損、脱落等

表 8 に目視による実験結果としての各試験体の破損、脱落等を示す^[9]。

表 8 実験による各試験体の破損、脱落等（目視による）

試験体名	JMA 神戸波	KIK-NET 芳賀波	Sin 波	KIK-NET 日立波
試験体 A	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 天井板脱落 1 枚、 めくれ 3 枚発生
試験体 B	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 天井板脱落無し、 めくれ 3 枚発生
試験体 B (O)	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 天井板脱落無し、 めくれ 3 枚発生
試験体 C	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 天井板脱落無し	下地類破損無し、 耐震ブレース上部 金具破損 1 対発生、 天井板脱落無し

4. まとめ（速報）^[9]

いずれの試験体も国土交通省告示の耐震基準、水平方向最大加速度 2.2G を超える加速度の揺れになんく耐え、天井面構成下地類の破損については、フレームの歪みや外れ、ズレすら無く、ビス一本外れなかった。

最大応答加速度を記録した日立波 100% 入力時に試験体 A のグラスウール天井板が 1 枚脱落、天井板とアルミフレームの掛かり部分が数枚めくれた。試験体 B、B(O)は天井板脱落防止ワッシャーを取り付けた為、めくれは生じたが脱落はなかった。

試験体 C の天井面そのものには破損脱落はなかった。日立波 100% 加振時に耐震ブレースの上部金物の羽子板ボルト部が一对分（2 本）折れて外れた。

試験体 B(O)については、試験体 B の耐震ブレース材のみを交換し、天井自体はそのまま使用したもので、この試験体には、神戸波 100% を 2 回、芳賀波 100% を 2 回、日立波 100% を 2 回、更には正弦波もそれぞれ 2 回加振したことになる。これは阪神・淡路大震災 2 回と東日本大震災を 4 回経験しても全く壊れなかったこととなる。

謝辞

神戸市住宅都市局 建築技術部 技術管理課の建築技術担当係長の播磨正志氏、同技術管理係の栢田祐司氏には、2014 年 7 月 18 日に神戸市における特定天井の耐震化に関して現状を教えてくださいました。また、神戸市教育委員会事務局 総務部 学校整備課 耐震補強・学校改修担当課長の小林賢一氏、同 建築担当係長の中川龍一氏、同 山本衣純氏に 2014 年 7 月 29 日に神戸市における特に学校施設の特定天井等の取扱いについてヒアリングを実施し、同市における方針をご教示いただきました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献・URL

- [1] 公益財団法人 建築技術教育普及センター：国土交通大臣登録 構造設計一級建築士定期講習テキスト、pp.47-55、2014
- [2] 建築研究所：スポパーク松森における天井落下事故調査報告 一大空間を有するスポーツ等施設の天井落下—
<http://www.kenken.go.jp/japanese/emergency/miyagioki/hokoku.pdf#search='%E5%AE%AE%E5%9F%8E%E7%9C%8C%E6%B2%96+%E5%9C%B0%E9%9C%87+2005+%E5%A4%A9%E4%BA%95%E8%90%BD%E4%B8%8B'>
- [3] 大場康史、川口健一：東北地方太平洋沖地震による茨城空港ターミナルビル内天井落下に関する速報(第 2 版)その 1 / 3：天井落下の概要
http://space.iis.u-tokyo.ac.jp/main/Prompt_Report_of_Ibaraki_Airport_kawaguchi_lab_IIS_Univ_Tokyo.pdf#search='%E6%9D%B1%E5%8C%97%E5%9C%B0%E6%96%B9%E5%A4%AA%E5%B9%B3%E6%B4%8B%E6%B2%96%E5%9C%B0%E9%9C%87+2011++%E5%A4%A9%E4%BA%95%E8%90%BD%E4%B8%8B'
- [4] 国住指第 357 号（平成 13 年 6 月 1 日）芸予地震被害調査報告の送付（技術的助言）、国住指第 2402 号（平成 15 年 10 月 15 日）大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策について（技術的助言）、国住指第 1427 号（平成 17 年 8 月 26 日）地震時における天井の崩落対策の徹底について（技術的助言）
- [5] 特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法を定める件(平成 25 年国土交通省告示第 771 号)
- [6] 日本建築学会：天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン、2012
- [7] 文部科学省大臣官房文教施設企画部長 関靖直：学校施設における天井等落下防止対策の一層の推進について（通知）、25 文科施 201 号 平成 25 年 8 月 7 日
- [8] 日本国土開発株式会社 振動台設備 HP：http://www.n-kokudo.co.jp/tec_civil/v_c_testing.html
- [9] 西尾裕之、阪口正一：体育館、プール等、特定天井対応の軽量新耐震システム天井の振動台耐震実験結果速報、2014