

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

大場康史・川口健一（東京大学・生産技術研究所）

調査日：2011年3月13日(日)、17:30~19:00

所在地：茨城県小美玉市

施設概要：鉄骨造2階建て(一部3階建て)、延べ床面積約7,800 m²

供用開始：2010年3月11日

被災日時：2011年3月11日14:46、東北地方太平洋沖地震本震、震度6弱(小美玉市小川)

負傷者：なし

天井の構成：天井材は捨て張り石膏ボード t9.5+ロックウール化粧吸音板 t15

天井下地は軽量鉄骨下地の在来工法



図1 配置図 (Google Map に記入)



図2 所在地と各観測地点 (Google Map に記入)

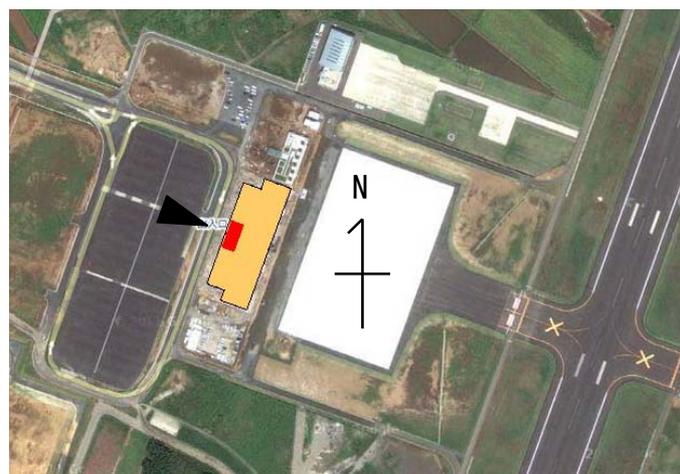


図3 空港配置図 赤色部分がロビー部分 (Google Map に記入)

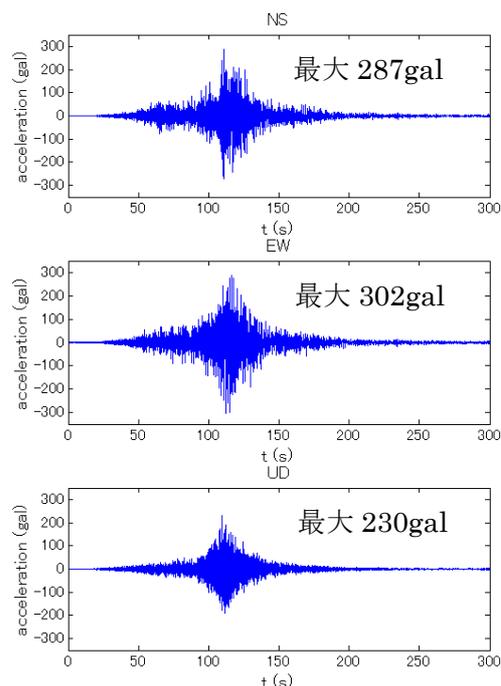


図4 観測加速度波形 (石岡)
(K-NET の強震データを利用)



図 5 外観

◆被害概要

エントランスホール及び待合ロビーを兼ねた吹き抜け空間部(約 25.8m×11.2m、天井高 8.3m)の吊り天井の落下被害。照明の列と交互に 5 列に分けて設置された吊り天井のうちの最北側 1 列(約 11.2m×3.0m)の天井材全体が本震時に落下した。天井は、軽量鉄骨下地の在来工法で天井材は捨て張り石膏ボード t9.5+ロックウール化粧吸音板 t15。吊り長は約 1600mm。



図 6 ロビー全景



図 7 天井落下箇所(Nは北方位)



図 8 落下天井材



図 9 落下クリップ

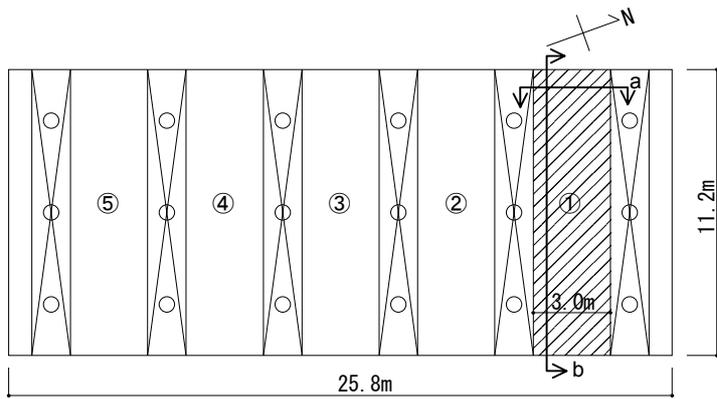


図 10 天井伏図

(ホール全体。斜線が落下部分。×部は天井の無い部分)

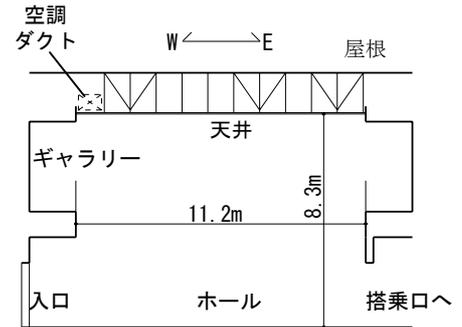


図 11 断面図

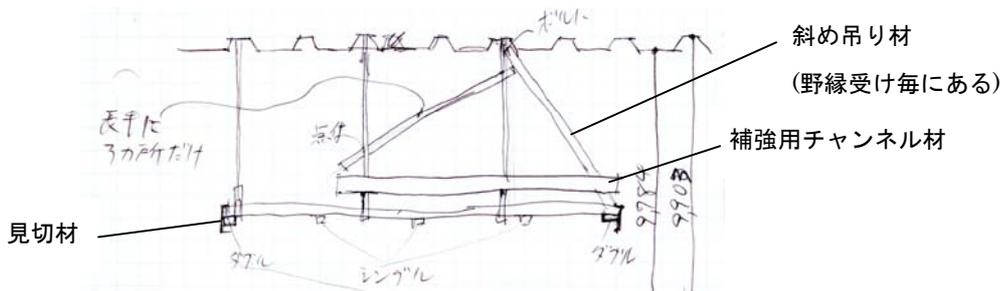


図 12 下地材の短手方向断面復元スケッチ (図 10 の a 方向)

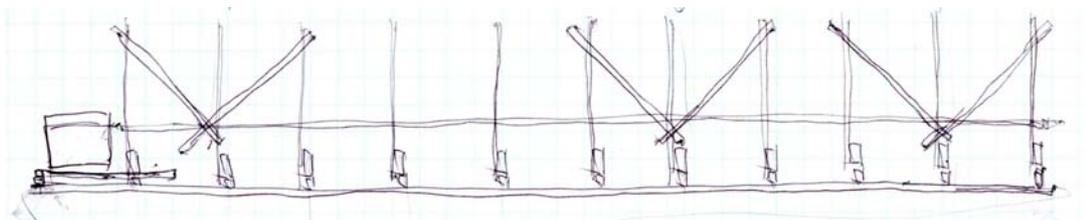


図 13 下地材の長手方向断面復元スケッチ (図 10 の b 方向)

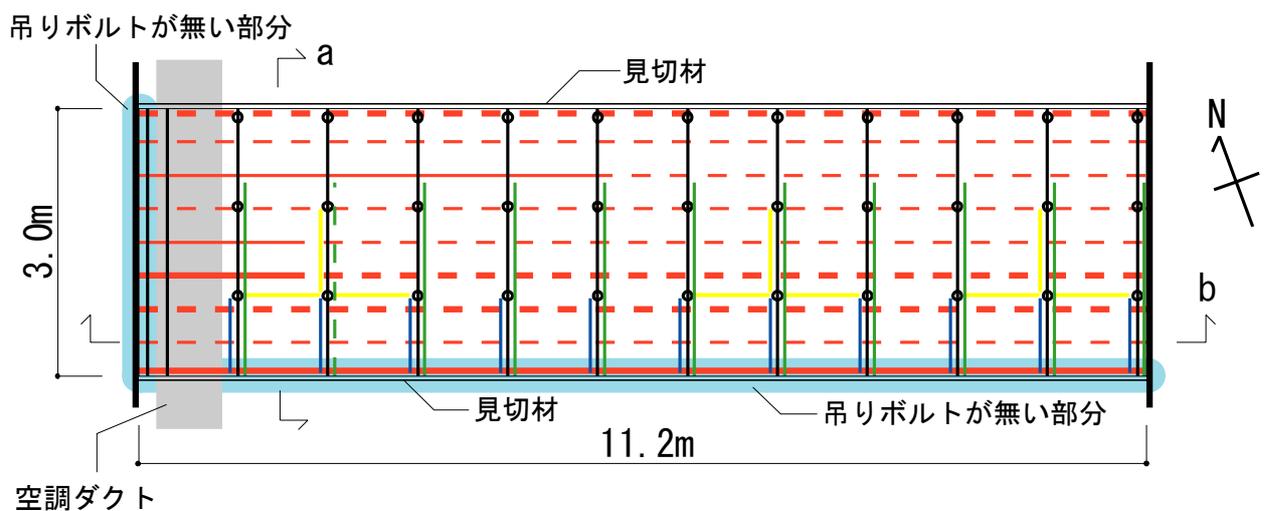


図 14 天井落下後に残った下地材等の伏図

- 吊りボルト
 - ダブル野縁
 - シングル野縁
 - 野縁受け
 - 斜め材
 - 斜め吊り材
 - 補強チャンネル材
- ※それぞれの破線は落下した部分

図 14 に示すように、屋根側の打ち込みインサートの配置と天井配置が合わなかったようである。吊りボルト配置に対して天井面は幅方向に偏って取り付けられている(図 14 では最下列(上から 4 列目)に吊りボルトが無い)。そのため天井材とダブル野縁を吊るボルトがなく、この部分が片持ち状態となる。それを補強するためと思われるチャンネル材と、斜め吊り材が南側にのみ設けられている(図 12 の右部)。この斜め吊り材は野縁受け毎に設置されているが、それらの斜め吊り材と対となる斜め材が 3 箇所のみ設けられている(図 12 の書き込み)。2 本の斜め材の上端が合わさるように八の字に設置されており、野縁受けを介した三角形と台形によって南北の水平動に抵抗する形になっている。斜め材の取り付けは軽量下地材や吊りボルトへの点付け溶接(のように見える)が主で、国土交通省の推奨するような詳細にはなっていない。

天井長手方向の吊りボルト配置は、空調ダクトがある西側端を除き均等であるが、3 箇所設けられた斜め材の配置は南側に偏っている(図 13 に見える斜め材は図 14 の上から 4 列目の破線、南側の吊りボルトの列のみに設置されている)。



図 15 短手方向天井下地



図 16 長手方向天井下地 見切材

斜め材の上端は、吊りボルトの吊り元近くで専用金具で止められているが、下端は吊りボルト又は補強用のチャンネルつなぎ材に点付け溶接されている。長手方向端部は段差部に突きつけとなっており、クリアランスはない。その段差部は、落下した天井と接していた場所以外でも衝突による剥離落下が起きている。

また、落下した列以外でも、下がり落ちるように変形した列などがあり、余震による落下の危険性がある。

天井の南北の両長辺は、背の黒い見切り材が走っている。見切り材の内側(天井に向いている側)は上下に 2 段に仕切られており、すべての野縁受けはこの上段にピンのような部材で留めつけられている。従って、見切り板と野縁受けを組み合わせたシステムは全体として並行クランクのような運動が可能となっていたものとも思われ、この運動自由度はクリップ金物及びビスを介して、天井板によって拘束されていたと思われる。下段は天井板がはまっていたものと思われる。



図 17 斜め材接合部



図 18 長手方向端部



図 19 変形した天井（図 10 の③列）



図 20 天井面の穴（図 10 の②列）
（点付け溶接が外れた下地材が貫通しかけているのだろうか。）



図 21 段差部の落下跡（図 10 の⑤列）



図 22 落下していたクリップ



図 23 落下したロックウール化粧吸音板



図 24 落下した捨て張り石こうボード



図 25 落下野縁

ロビー吹き抜け以外では、2階ギャラリーの間接照明及び天井が約11mにわたり落下した。また、売店天井の排煙ダクト口が下がり出た。天井高も比較的低いことから、これらの部分の詳細は本報告では割愛する。

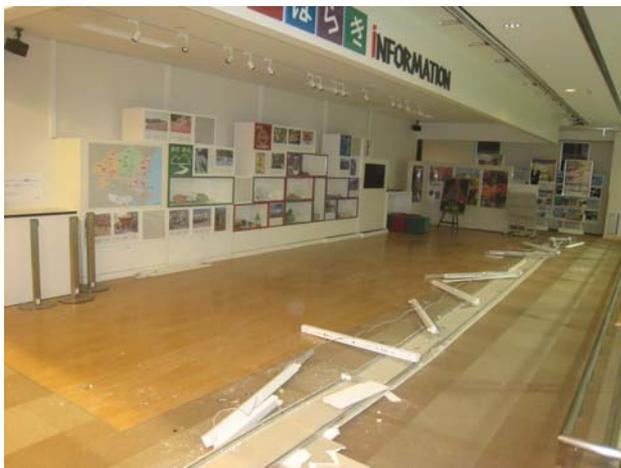


図 26 間接照明部落下



図 27 排煙ダクト口

茨城空港は、LCC 専用空港として平成 22 年 3 月 11 日に開港した。地震当日は一周年記念イベントを開催しており、被災したロビーでは直前まで記念品配布などが行われていた。地震時はロビーのエントランス付近で NHK による理事長へのインタビューが行われていたため、天井落下の様子が撮影され、TV にて放映された。

施主側は、ローコストでコンパクトな空港を徹底する為、ロビー部の天井は不要と主張していたが、設計者側の強い勧めで、ロビー吹き抜け部に天井を設置することになったとのことである。

謝辞

本レポートをまとめるにあたり、調査に快くご協力いただいた茨城県開発公社 坂入健 理事長、及び現場担当の小徳秀幸氏に深く感謝します。

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2/3：NHK ニュースのビデオ映像による落下過程の追跡

大場康史・川口健一（東京大学・生産技術研究所）

茨城空港の天井落下事故は、NHK のニュースで繰り返し放映された。以下では、そのビデオから抽出した時系列の画像により、天井の被災過程の考察を試みる。各写真番号後の括弧内数字は写真 NHK1 を基準 (0.0 s) としたときのおおよその時刻である。



写真 NHK1 (0.0 s)：国際線保安通路に避難した人々の直前を、見切り材の化粧材と思われる部材が落下している。この時、通常電源が停電し、あとは非常灯のみが点灯する。



写真 NHK2 (2.9 s)：見切り材についていた化粧材と思われる部材がさらに落下している。段差部が天井幅の中央部で既に割れている。



写真 NHK3 (3.5 s) : 照明は短い周期で主に南北方向に揺れているように見える。天井も段差部にこすりつけられるように主に南北方向に繰り返し揺れているように見える。

東西方向端部の段差部との間にはクリアランスがないため、大きく揺れているように見えないが、この部分も破損するため、強く繰り返し押し付けられているものと思われる。



写真 NHK4 (5.3 s) : スピーカー及び非常灯が並んでいる部分を起点とするように、天井北側の長辺において天井材の面外への折れ曲がりが見える。



写真 1：この部分の被災後の写真。黄直線がスピーカのあった列の折れ曲り線。クリップ金物はほとんど残っていない。天井板の強い変形が、野縁受けの変形としてあまり残っていないことから、写真 NHK4 の時点で、この周辺のクリップ金物は変形して外れていたと考えられる。野縁受けは段差部側のものを除いてあまり変形がない。黒い見切り材の北東隅は先端が強く折れ曲がっている。



写真 NHK5 (5.6 s)：スピーカーと非常灯のラインの外側に垂れ下がり変形が現れる。北東隅部は逆に少し上がっているように見える。南東隅部も段差部に乗り上げるような形で若干上がっているように見える。

長辺方向の斜め材が反対側（南側）に偏って配置されているため、偏心により北側の変形が大きくなり、天井下地材は全体として平行四辺形に変形しようとし、クリップ金物との縁が切れるに従って、北側ほど段差部に強く当たっている可能性がある。



写真 NHK6 (5.9 s) : スピーカーのラインは天井の欠損が多いため、これに沿って天井材が折れるとともに、北東隅部が下がり始める。天井の変形状況から考えると、この時点では北東の角付近のクリップはほとんど外れている可能性が高い。上記の平行四辺形の変形に起因するのではないだろうか。



写真 NHK7 (6.6 s) : 折れた箇所より東側、天井材の継ぎ目あたりで天井材が裂けはじめる。南側長辺は下がらずに、北側のみ端から落ち続ける。北側長辺のダブル野縁も落ちていたことから、これらの落下は主にクリップが外れたことによるものと考えられる。



写真 NHK8 (7.1 s) : 裂け目から石膏ボードの余りが見える。仕上げの破損線はロックウール吸音版の継ぎ目に沿っているようだ。



写真 NHK9 (7.5 s) : 裂けた天井材片が落下している。段差部寄りに、野縁材が2本ほどみえるため、先に落下中の天井材片は石膏ボードがビスの頭抜けをしていることがわかる。この時点で、天井全体が北東隅部からはっきりと落下状態になっている。南辺部分もたわみだしている。



写真 NHK10 (8.1 s) : 南側長辺も一気に落下。南側長辺のダブル野縁は下地に残っており、この部分はビスの頭抜けによる落下であることがわかる。南東の段差部も一緒に落ちている。



写真 NHK11 (8.8 s) : 全体が垂れ落ちるように落下。長辺に設けられていた見切り材の化粧部品も飛散している(黄丸)。



写真 NHK12 (9.5 s) : 端部が床に達する。最西部の天井はまだ上部にとどまっている。この部分は画面左のずっと上であるが、野縁が残り、ビスの頭抜けになって落下しているので、落下が追いつくのに遅れがある。最西部は吊りボルトが無いので、この時、最西部の野縁受けを支点として、端部がかなり跳ね上がるような挙動をしていると推測される。



写真 NHK13 (9.9 s) : 床に到達した部分から粉々に脆く破損していく。



写真 NHK14 (10.3 s) : 天井西端部は先に落下した部分に逆に覆いかぶさるように落下している。手前に黒く塗った吊ボルトがクランプ金物とともに落下している。ハンガー金物等は付いてない。



写真 NHK15 (10.7 s) : 石膏ボードによる脆い破壊が見られる。



写真 NHK16 (11.3 s) : 石膏ボード下地の破損に伴う埃と残骸が散らばっている。



写真 2：東端見切り材端部。手前の北側の方が変形も大きい。



写真 3：西端の見切り材端部。手前の北側の方が変形も大きく、照明の脇で捩じれ座屈的な変形も生じている。段差部と当たった痕跡も強く残っている。

上記 2 枚の写真を見ると、(南側に偏った斜め材の配置により)、天井下地が平行四辺形に変形しようとし、特に北側が大きく動いたように推察される。

(以上)

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1版)

その3/3：天井落下の危険性に関する考察

中楚洋介・川口健一（東京大学・生産技術研究所）

茨城空港で発生した天井落下の危険性について考察する。

文献1)~3)では天井ボードを様々な高さから落下させ、ダミーヘッドに衝突させることで落下衝突時の人頭部への衝撃力を計測している。本レポートでは、この文献のデータを参照し、茨城空港で落下した天井の直下に身長170cmの人が立っておりその頭部に天井が衝突したと仮定したときの人体に対する影響について考察する。

3.1 実験と実際の違いについて

茨城空港では、11.2m x 3.0mの吊り天井材がほぼ一体となって落下した。（天井総重量は約4.3kN(野縁を含む)）。一方、上記の文献では市販のボード一枚の大きさを単位として水平に落下させて実験している。しかしながら、ロックウール吸音版や石膏ボードなどの脆い材料が衝突する場合には、局所的な破壊が発生するため、衝突直前の落下スピードが同じであれば、天井材の大きさには無関係に実験とほぼ同様な衝撃力が発生するものと考えることができる。衝突時の天井の傾きについては、ビデオ映像を見ると11.2m x 3.0mの天井材の場所によって異なるように見えるが、以下で着目する、最初に接地する天井部分は、床上170cmの位置では、ほぼ水平に落下しているように観察される。

茨城空港の天井は、捨て張り(石膏ボード t9.5+ロックウール吸音板 t15)が野縁とともに落下している。文献1)~3)の実験で用いられている天井材でこの条件に最も近いものは、野縁付き捨て張り(ケイ酸カルシウム板 t8+ロックウール吸音板 t12)である。落下させた天井材のサイズは910mm×910mmで、重量は10.5kgである。以下では、この天井材のデータを参照することとする。

3.2 衝突直前速度の比較

実際の天井の落下スピードをビデオから概算する。そのため、変化の見やすい部分として、落下天井の最初に接地する部分に着目する。実際のビデオ映像から推定した床上約 170cm の時のこの部分の落下スピードは 9m/s となった。天井高は 8.3m であるので、落下距離 6.6m における落下スピードということになる。



図1 落下した天井の最初に接地した部分

ここで、文献による、落下高さ と 衝突直前の落下速度 の関係を表したグラフと比較する。野縁付き捨て張り(ケイ酸カルシウム板 t8+ロックウール吸音板 t12)の落下距離 6.6m における落下スピードは 8.7m/s である。これは概ね、上記の概算値 9m/s と一致する。従って、この場合は、一体となって落下している当該天井と、1枚 910mm×910mm の実験の天井板の、同じ落下距離に対する衝突直前のスピードはほぼ同一と考えることとする。

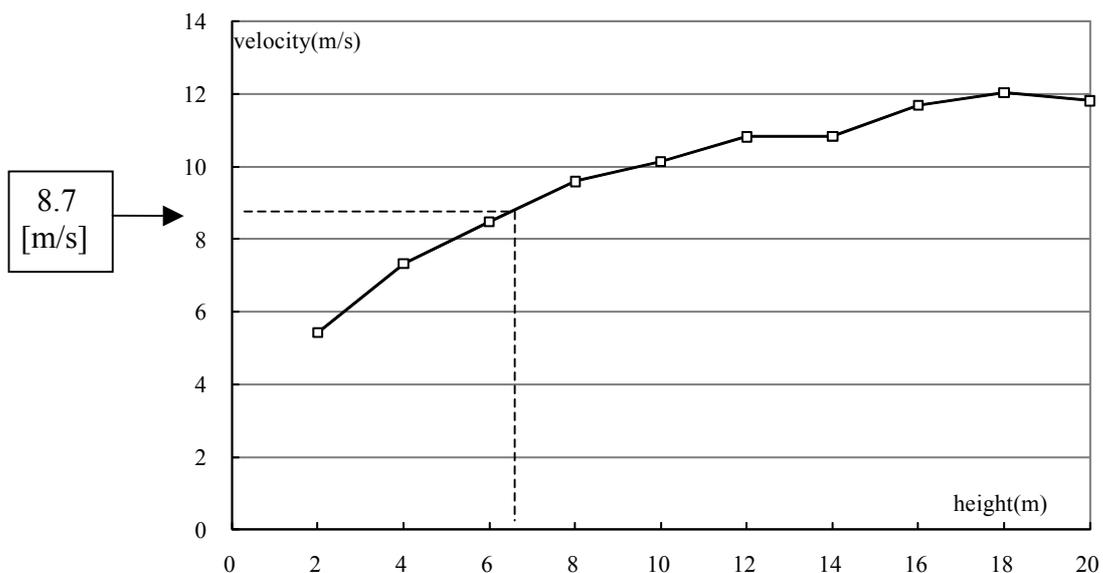


図2 野縁付き捨て張りの最大落下速度

3.3 頭部への衝撃荷重の比較

以上より、実際に落下した天井の衝撃荷重は、同じ 6.6m の落下距離である、野縁付き捨て張り (ケイ酸カルシウム板 t8+ロックウール吸音板 t12) とほぼ同じであると考えることとする。文献による落下高さ と 頭部にかかる 衝撃荷重の 関係を表したグラフを以下に示す。

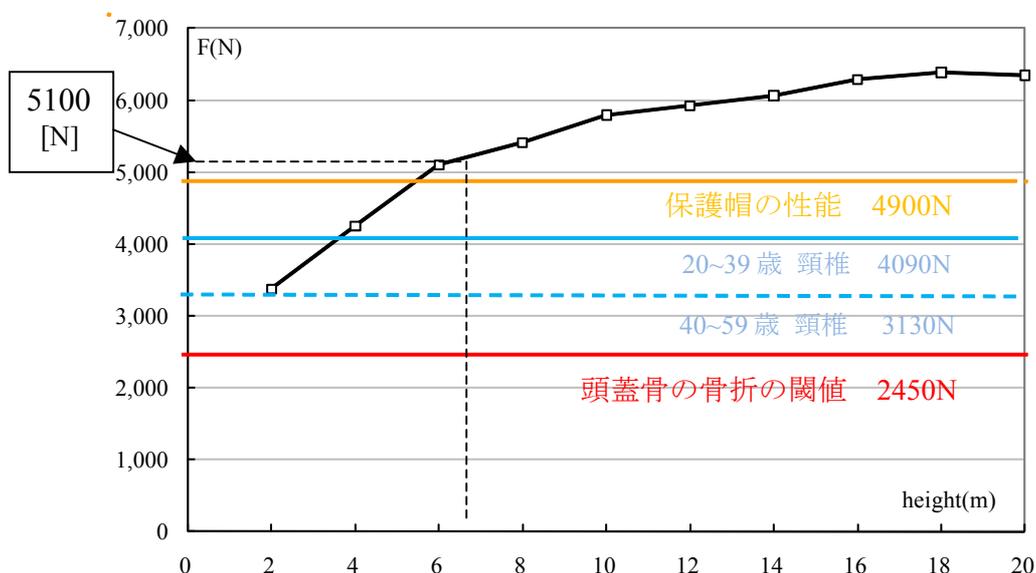


図 3 野縁付き捨て張りの衝撃荷重

これより、頭部にかかる衝撃荷重を推定すると約 5100N となる。赤の線は Naum による頭蓋骨(側頭頭頂骨)骨折の閾値を示す。20~39 歳の人の頸部の骨折の閾値を青の点線で示し、40~59 歳の人の頸部の骨折の閾値を青の実線で示す。橙の線は保護帽(ヘルメット)の性能規定に用いられる閾値を示す。

実験データから推定された衝撃荷重は、頭蓋骨骨折の閾値を超えていることがわかる。

以上より、もし落下した天井の直下に人がいた場合、脳挫傷や頸椎の損傷などに至る可能性があったと推測される。

<落下状況>

天井高さ	—	約 8.3m
人の身長	—	1.7m (仮定)
落下距離	—	6.6m
天井材質	—	捨て張り (石膏ボード t9.5+ロックウール吸音板 t15)
天井サイズ	—	約 11m×3m
天井重量	—	約 4.3kN(野縁を含む)
衝突直前速度	—	9m/s (落下映像から推定)

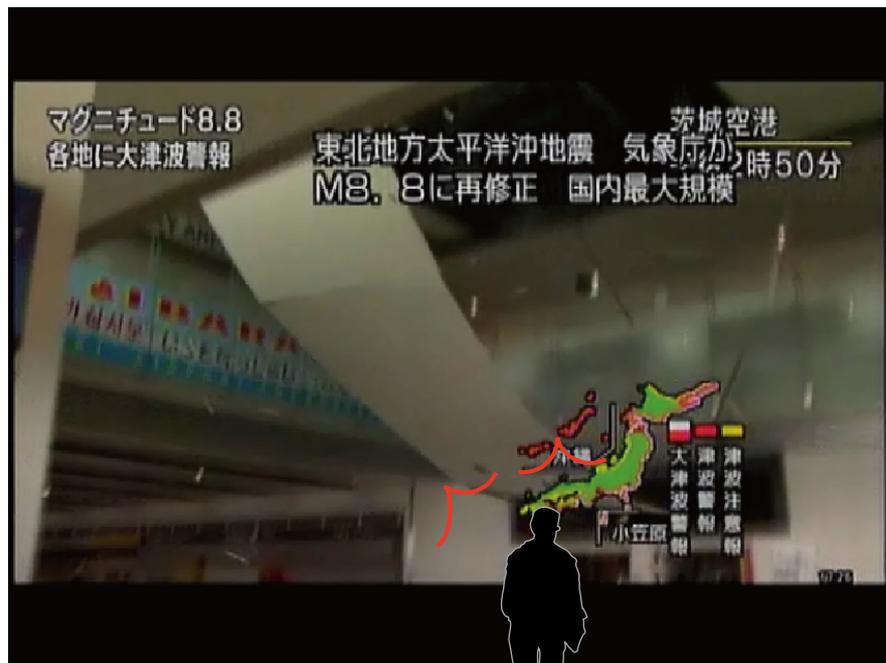


図4 衝突時のイメージ

参考文献

- 1) 内田拓見, 川口健一, 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その1 人体耐性指標, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, pp. 1081-1082, 2009.
- 2) 片山慎一郎, 川口健一, 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その2 天井材落下実験, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, pp. 1083-1084, 2009.
- 3) 内田拓見, 川口健一, 人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その3 天井材落下実験2, 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, pp. 881-882, 2010.