

スポパーク松森における天井落下事故調査報告

—大空間を有するスポーツ等施設の天井落下—

1. 調査目的等

1. 1 調査目的

平成 17 年 8 月 16 日（火）午前 11 時 46 分頃、宮城県沖を震源（深さ 42km）とするマグニチュード 7.2（暫定値）の地震が発生し、大空間を有するスポーツ等施設の天井に落下被害が発生した。平成 13 年の芸予地震、平成 15 年の十勝沖地震の際に、地震時に天井が脱落しないための具体的な注意事項が技術的助言として通知されており、今回、このように技術的助言が通知された後に建設された建築物において天井落下が生じたので、事実関係に関する情報収集を行うことを目的として本調査を実施した。

なお、本報告は特に断らない限り、調査当日に現地で購入した構造計算書等の資料及び当日不足しており後日郵送等により入手した資料に基づいている。

1. 2 調査者

田中政幸 国土交通省 住宅局 建築指導課 課長補佐
西山功 国土交通省 国土技術政策総合研究所 住宅研究部 部長
向井昭義 国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部 室長
脇山善夫 独立行政法人 建築研究所 建築生産研究グループ 研究員

1. 3 調査スケジュール

平成 17 年 8 月 16 日（火）

21:00	東北地方整備局において仙台市から概況報告
22:00	スポパーク松森において現場確認（現場は電源を落とし現場保存していたため遠目に見る程度）

平成 17 年 8 月 17 日（水）

10:00	東北地方整備局において事前打ち合わせ
11:15～	図面チェック、設計会社等関係者ヒアリング
13:00～14:30	現場調査

2. 地震の概要

平成 17 年 8 月 16 日（火）午前 11 時 46 分、宮城県沖を震源（深さ 42km）とするマグニチュード 7.2（暫定値）の地震が発生した。宮城県の川崎町で震度 6 弱、宮城県の仙台市、石巻市や岩手県の藤沢町などで震度 5 強を観測したほか、東北地方を中心に北海道から四国地方の一部にかけて震度 5 弱～1 を観測した。気象庁報道発表資料に基づき、以下に各地の震度（図 2.1）、東北地方の各観測点の震度分布（図 2.2）を示す。

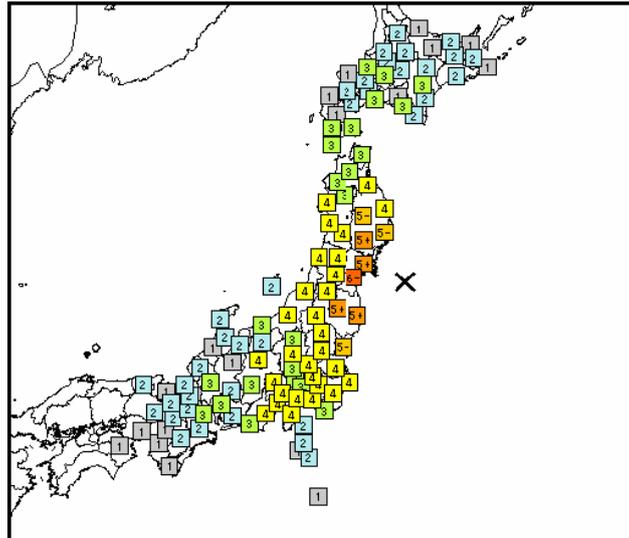


図 2.1 2005 年 8 月 16 日 11 時 46 分頃の宮城県沖の地震による各地の震度
（気象庁報道発表資料より）

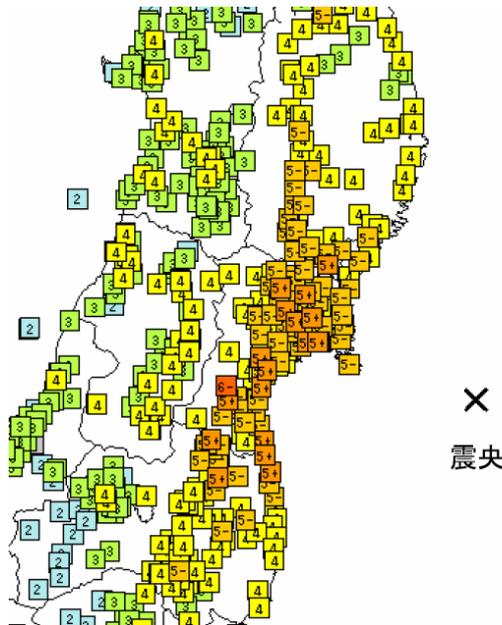


図 2.2 東北地方の各観測点の震度分布
（気象庁報道発表資料より）

防災科学技術研究所が運用している強震観測網（K-NET）により観測された地表での最大加速度分布を図 2.3 に示す。太平洋沿いに振幅の大きな領域が伸びており、このような傾向は、2003 年 5 月 26 日の宮城県北部沖の地震（M7.1、深さ 72km）においても観察されているとされている。

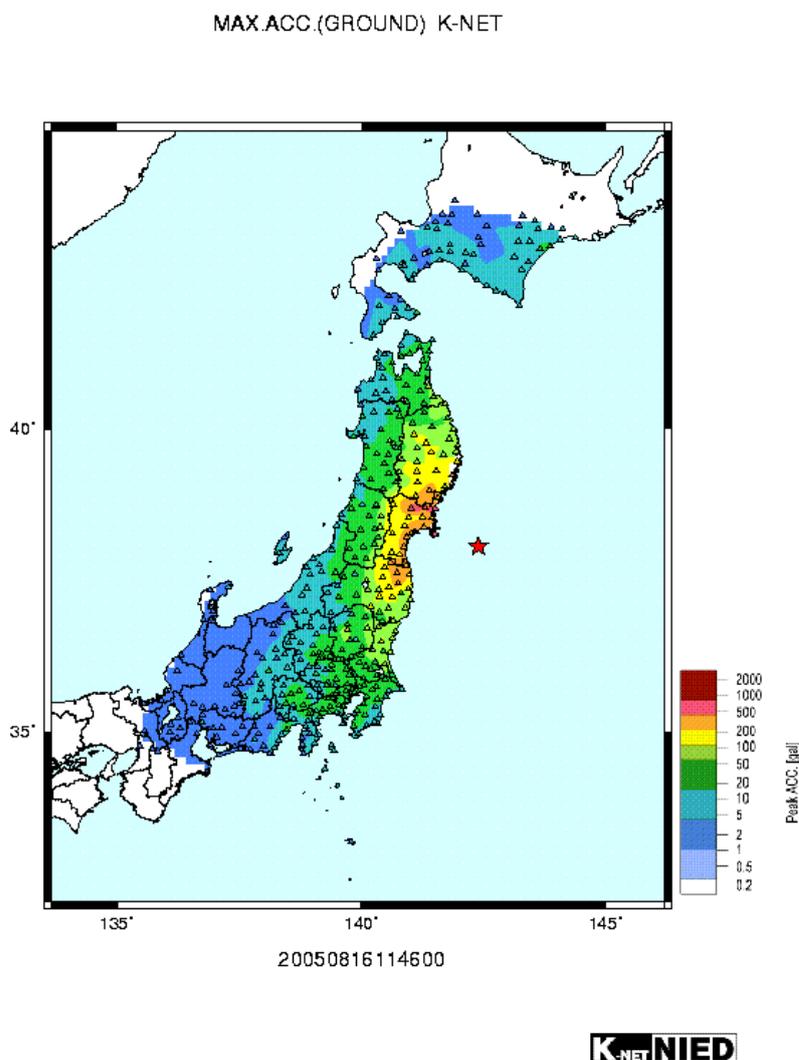


図 2.3 強震観測網（K-NET）による各地の最大加速度分布（K-NET HP より）

建築研究所による 2005 年宮城県沖の地震 K-NET 観測波解析速報（<http://www.kenken.go.jp/japanese/research/str/list/topics/miyagi-jishin/index.pdf>）では、K-NET により観測された加速度データの中で、宮城県内での観測の中でいずれかの方向の最大計測加速度が 200gal を超える記録計 9 波（表 2.1）について加速度応答スペクトル（減衰定数 $h=0.03, 0.05, 0.10$ ）の算定結果を示している。図 2.4 には、観測点「MYG013 仙台」（K-NET）の加速度応答スペクトルの算定結果を示す。

表 2.1 K-NET により宮城県内で観測された加速度データの主要なリスト
(建築研究所 HP より)

		北緯	東経	EW	NS	UD
MYG004	築館	38.73	141.02	381	513	111
MYG002	歌津	38.73	141.51	300	501	190
MYG011	牡鹿	38.31	141.50	363	499	123
MYG003	東和	38.73	141.31	404	402	142
MGY012	塩竈	38.32	141.02	292	252	155
MYG013	仙台	38.27	140.93	248	261	117
MYG010	石巻	38.43	141.28	218	249	98
MYG008	北上	38.58	141.45	229	247	169
MYG015	岩沼	38.10	140.87	232	175	87

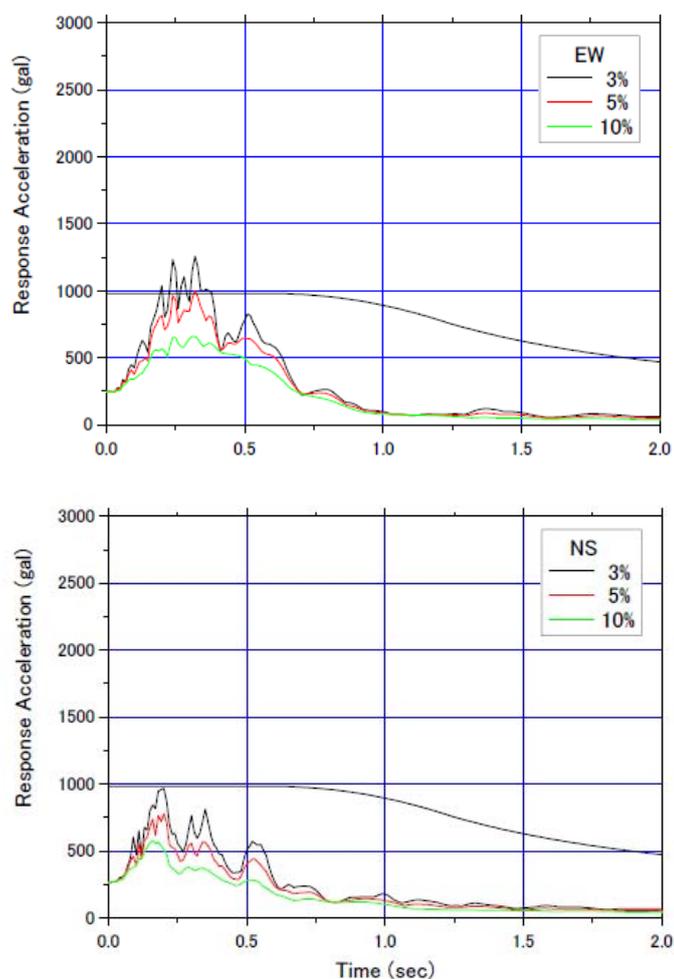


図 2.4 MYG013 仙台 (K-NET) の加速度応答スペクトル (建築研究所 HP より)

3. 調査対象建築物の概要

3. 1 建築物の概要

調査対象建築物は、宮城県仙台市泉区に2005年7月1日にオープンしたスポパーク松森内にある屋内施設（建築物）である。スポパーク松森の概要は以下のとおり。

＜スポパーク松森の概要＞

- ・所在地：仙台市泉区松森字城前地内
- ・施設内容：温水プール、テニスコート、フットサルコート等
- ・敷地面積：約5万㎡
- ・建築面積：約4,600㎡(プールを含む屋内施設)
- ・事業概要：仙台市がPFI法に基づき「(仮称)松森工場関連市民利用施設整備事業」として実施したもので、設計、建設、運営、維持管理及びそれらに係る資金調達等について、地元建設業界等により設立された「松森PFI株式会社」が一括して行っている。

この屋内施設は、設計図書によると半径約31.5mの円形平面を有する鉄骨造2層の建築物（高さ11.75m）であり、屋根面には緑化ブロックが配置されるとともに一部中庭となっている（図3.1.4～3.1.7）。1階には、エントランス、温水プール、温浴施設、休憩室、事務関係諸室、2階には、スタジオ、ギャラリー、マシンジム、等がある。図3.1.1～3.1.2には建築物の外観を示す。今回の地震で天井が脱落した温水プールは、吹き抜けとなった1階部分であり図3.1.5、3.1.6中に赤色部分として示している。また、調査日における温水プールの写真を図3.1.3に示す。



図3.1.1 建築物外観



図3.1.2 建築物外観近景(赤丸部分が露出型柱脚)



図3.1.3 温水プール

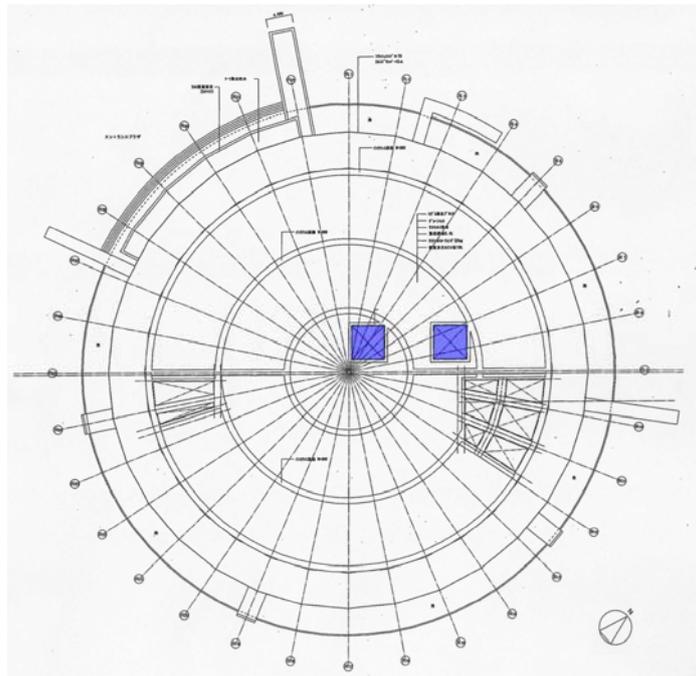


図 3.1.4 屋上階屋根伏図（青色部分が中庭）

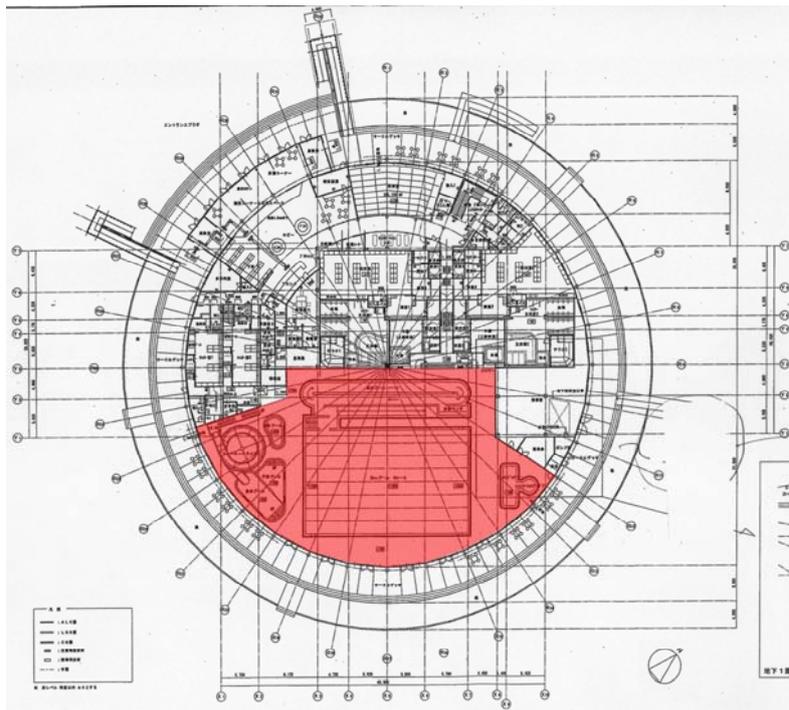


図 3.1.5 2F 平面図

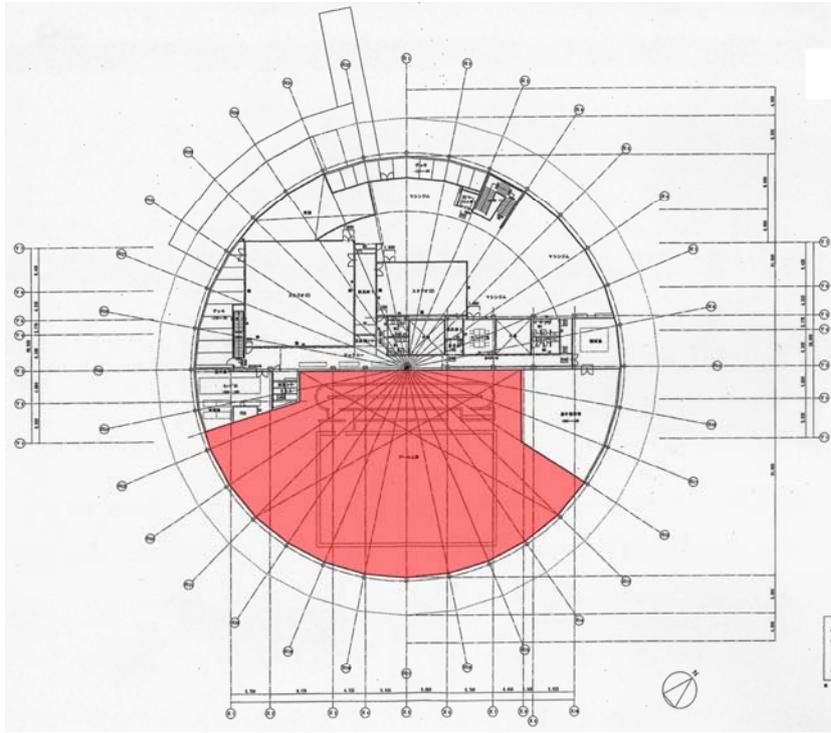


图 3.1.6 1F 平面图

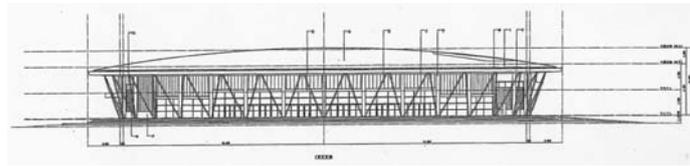


图 3.1.7 南立面图

3. 2 構造概要

1) 規模・構造等概要

設計図書によると、規模、構造等の概要は以下のとおり。

- ・階数 : 地上 2 階
- ・高さ : 11.75m (平均地盤からの高さ)
- ・軒の高さ : 9.05m
- ・階高 : 1 階 4.0m、 2 階 4.0m
- ・主要スパン : X 方向 (m) 4.725~6.7 (1, 2 階)、31.5 (RF)
Y 方向 (m) 4.85~10.65 (1, 2 階)、31.5 (RF)
- ・基礎底深さ : 地下 2.15~3.815m
- ・構造種別 : 鉄骨造
- ・骨組形式 : X 方向 純ラーメン構造
Y 方向 純ラーメン構造
- ・基礎種別 : 杭基礎 (既製コンクリート杭)
- ・敷地の特殊性 : 埋土地

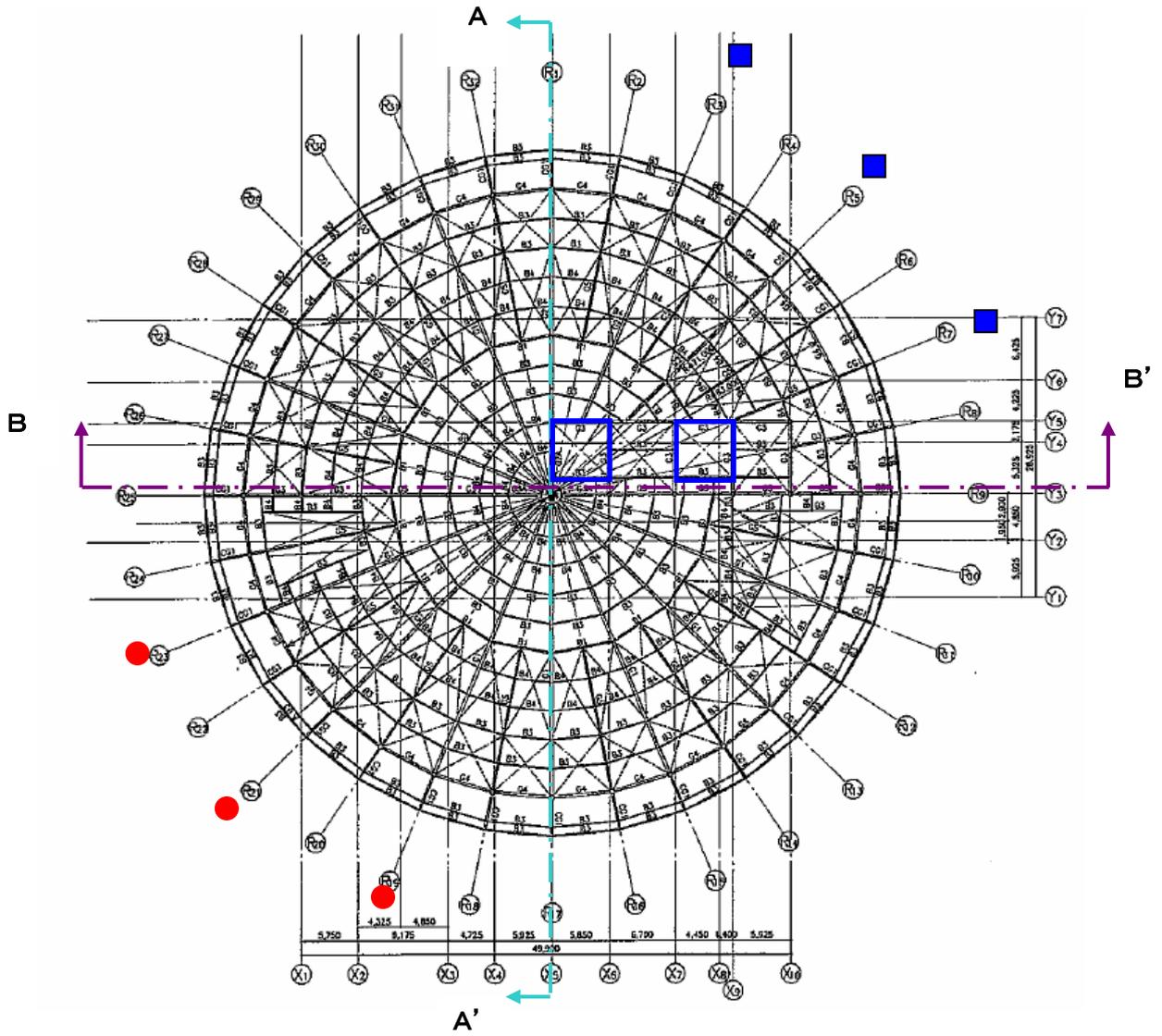


図 3.2.1 屋上階伏図（青線で囲んだ部分が中庭）

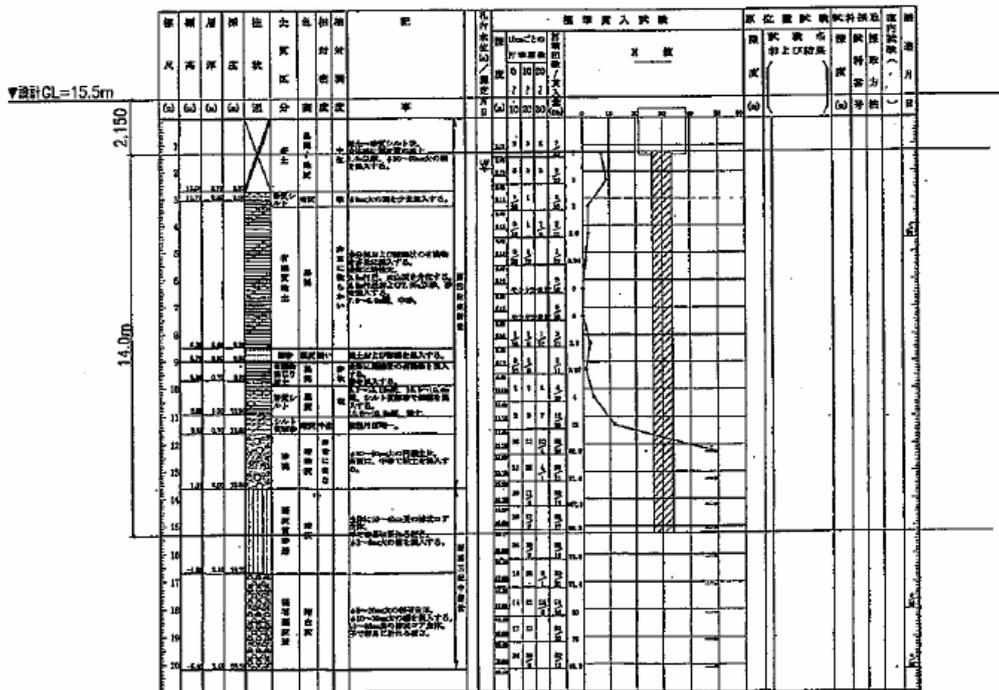


図 3.2.3 ボーリング柱状図

2) 概要説明

この建築物は、平面は直径約 63m の円形、屋根はライズ¹の低い曲面形状であり、建築物としては円筒形に近い形状をしている。

基本的な構造をみると、外周部の 32 本の柱 (○-508.0×22²、STKN490B³) と中心の柱 (○-508.0×22、STKN490B)、中心の柱と外周の柱をつなぐ、屋根面に放射線状に配置された大梁 (BH-1200×300×16×25⁴、SN490B⁵、プール室と事務室等との境界部分等では一部 BH-600×250×16×22、BH-900×300×16×22 が使用されている) と外周部の柱を相互につなぐ梁 (BH-600×250×12×19、SN490B) から成り立っている。その他プール室に隣接する事務室やスタジオがある北西側の半円部は 2 階建てになっており、別途柱や梁が存在する。なお、外周部に存在する V 字型の部材 (図 3.1.2 に示す外周部に見える V 字型の部材) は、水平力を負担する部材ではなく、^{ひさし}庇の荷重の一部を支える部材 (設計図書によると接合部には水平方向にルーズホール⁶が設けられている) である。

1 一般に基準となる水平線や水平面からの高さをいう。階段の蹴上げ、起 (むく) り、アーチの迫り高、防水層やフラッシングの立ち上がりなど。

2 直径が 508.0mm、板厚が 22mm の鋼管。

3 「JIS G3475 建築構造用炭素鋼管」に定める鋼管のうちの 1 種で、強度が 490N/mm² クラスのもの。

4 せいが 1200mm、幅が 300mm、ウェブ板厚が 16mm、フランジ板厚が 25mm の H 形鋼。

5 「JIS G3136 建築構造用鋼材」に定める鋼材のうちの 1 種で、強度が 490N/mm² クラスのもの。

6 長孔のことをいう。これを用いたボルト接合部は、長孔の方向の力を伝達できないが、長孔と直交方向の力を伝えることはできる。

中心の柱と外周の柱をつなぐ屋根面の大梁は、中心の柱と剛接合されているが、一部ピン接合のものもある（屋上階伏図の●印の梁）。また、中庭（図 3.1.4 中の青色部分）の上に位置する大梁は、中心の柱に直接接合されていないものもある（屋上階伏図の■印の梁）。外周の柱の 1 階柱脚部は、露出型柱脚である（図 3.1.2 の赤丸部分）。

地盤の状況を見ると、ボーリング柱状図によれば、11m 程度の深さまで N 値⁷が 10 以下（図 3.2.3）と軟弱な地盤であり、設計図書によると杭基礎が採用されている。

構造設計図書によれば、構造計算は、許容応力度等計算のルートで行われており、そのうち耐震計算は、いわゆるルート 3⁸である。応力解析は立体フレーム応力解析⁹、立体静的弾塑性解析¹⁰を行っている。屋根面の固定荷重は 2,000N/m² として構造計算が行われている。構造計算に用いた固有周期は、0.35 秒とされている。また、構造計算書によれば、ねじれにともなう必要層せん断力の割り増し係数 F_e は 1.00～1.01 である。

なお、現地調査の時点では、本建築物の X 方向 2 階において偏心率が 0.38 であると構造計算図書に記載されていたことと、プール室と反対側の半円部分ではプール室側に比べて柱の本数が多くなっており剛性が高いと考えられたため、ねじれを生じやすい建築物と考えられたが、後に、構造計算図書のとりまとめ表の数値が構造計算結果の転載ミスであり偏心率は 0.038 と非常に小さい値であることがわかり、ねじれを生じやすい建築物ではないことが判明した。

⁷ 「JIS A1219標準貫入試験法」に定める貫入試験を実施するとき、質量63.5kgのハンマーを76cm自由落下させ、標準貫入試験用サンプラーを地盤に30cm打ち込むのに要する打撃回数。

⁸ 建築基準法施行令 82 条、82 条の 2、82 条の 4 の計算を行うルート

⁹ 平面的なフレームモデルではなく、3次元の立体フレームモデルとして応力を解析すること。

¹⁰ 立体モデルに対して、静的（動的の反対語で、荷重等に時間の長さの概念を必要としないほどゆっくり作用すると見なせる状態）な荷重を加え、その荷重の値を次第に大きくしていき、骨組の変形や応力を弾塑性域（材料が途中で降伏して、力と歪みの関係が一定ではなくなる部分も含む領域）で部材に加わる応力や変形を計算で求めること。

3. 3 天井の構造

この建築物の温水プール天井の下地部分の設計図、施工図については、設計者及び施工者からのヒアリングによると、作成されていなかったため、以下の記述は、特にことわりのない限り、現場調査及び関係者からのヒアリングによるものである。

今回の地震により脱落した温水プール天井は、軽量鉄骨天井下地を用いた捨張り¹¹工法による一般的な在来工法による天井となっている。

この工法による軽量鉄骨天井下地部分は、①屋根や母屋あるいは床スラブに設置した「インサート¹²」から「吊りボルト」を下げ、②吊りボルトの先端近傍において「ナット」を用いて取り付けられた「ハンガー」に「野縁受け^{のぶち}」が取り付けられ、③この野縁受けに「クリップ」を用いて「野縁」が取り付けられる。天井面材の継ぎ目や、壁に平行する天井の端部等では「ダブル野縁」を用い、その際には野縁受けへの取付けに「ダブルクリップ」が用いられる。天井面材の下地板は、野縁あるいはダブル野縁に「タッピングねじ¹³」で取り付けられ、接着剤と釘またはステープルを用いて仕上材が張られる。

今回の地震で脱落した天井の構成も基本的には上記と同じとなっている。ただし、インサートは母屋材¹⁴に設置され（図 3.3.14 の赤丸部分）、天井面材は珪酸カルシウム板+ロックウール吸音板となっている。

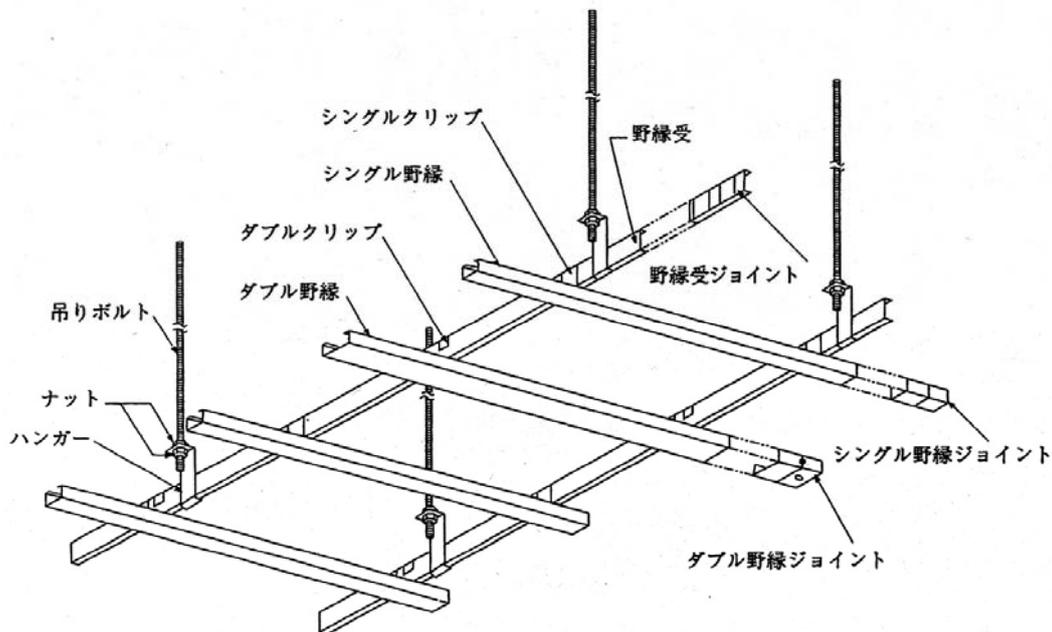


図 3.3.1 軽量鉄骨天井下地を用いた在来工法による吊り天井の構成図（一般的な場合。下から見上げた図）

¹¹ 天井、壁、床などで仕上材を張るための下地となる材を張ること。

¹² 壁体、床、屋根等に各種部材を取り付けるためにあらかじめ埋め込む鉄製の部品。内側に雌ねじなどが切っただけである。

¹³ 下穴があいていれば、ねじ自身でねじ溝を切ることができるねじ。

¹⁴ 屋根をささえる主要な梁及び小梁の上に乗った部材で、屋根の重量を直接支える部材。

なお、内装工事施工計画書（軽量鉄骨下地・ボード貼り）によれば、天井のふところが屋内で 1.5m 以上の場合には 1.8m 程度の間隔での振れ止め補強を行い、天井のふところが大きい場合に斜めの振れ止めを要所に入れるとしている（図 3.3.4）。また、下がり壁を境として天井に段違いがある場合には所要の間隔で補強用振れ止めを設けること（図 3.3.5）とされている。

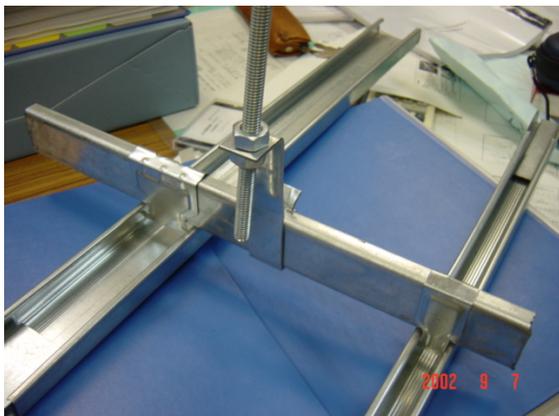


図 3.3.2 軽量鉄骨天井の下地の構成例（上から見る）



図 3.3.3 同左を裏側から見る

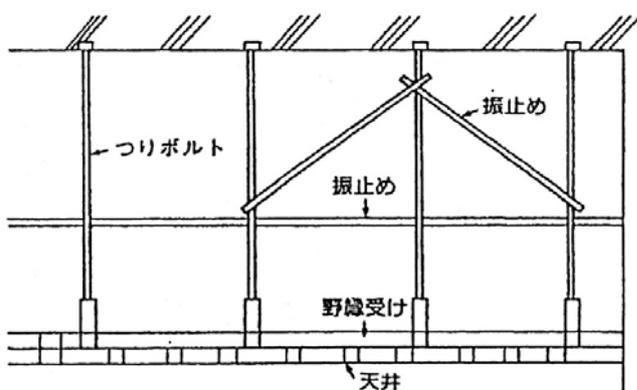


図 3.3.4 振れ止め補強方法

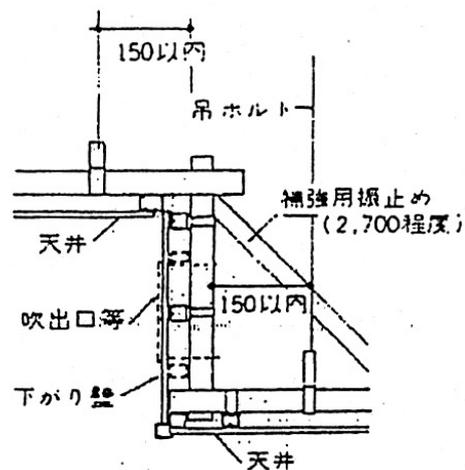


図 3.3.5 天井に下がり壁がつく場合の補強方法

以下では、現地での調査結果等に基づく天井の構成の概要を示す。なお、付録 1 に天井構成材の寸法を示す。

インサートは、図 3.3.6 に示すように、建築物の中心から半径方向におおよそ等間隔となる位置で母屋材に取り付けられていた。

吊りボルトの長さは、^{かなばかりず} 矩計図¹⁵によると、屋根下面から天井下面までの距離が約 1.6～3.4

¹⁵ 建物の各部分の標準的な高さを示すために、軒先を含む代表的な外壁部分を梁間方向に切断した垂直断面。

mであることから、同様に約 1.6~3.4mであったものと思われる。また、落下した部材の観察より、下地板の継ぎ目部分にはダブル野縁が用いられていた（図 3.3.7）。野縁受けのピッチを外周部の天井位置の図 3.3.6 から概算すると、800mm 程度であった。野縁受けを支える吊りボルトの間隔はおおむね母屋材の間隔（設計図書によると 600mm）となっていたものと思われる。また、落下した部材を計測した結果、シングル野縁のピッチは 360mm 程度（図 3.3.9）、ダブル野縁のピッチは 1,800mm 程度であった。野縁受けの、天井全体における概略の配置状況は、天井部を見上げて目視したところ、おおむね図 3.3.8 の天井伏図に示すとおりになっていた。図中の A 領域では野縁受けは円弧状に、C 領域では北東から南西方向に直線状に配置され、両者の中間の B 領域では円弧状から直線状に切り替えられていた（図 3.3.10~3.3.13 参照）。



図 3.3.6 母屋と吊りボルトの様子



図 3.3.7 天井下地に用いられたダブル野縁

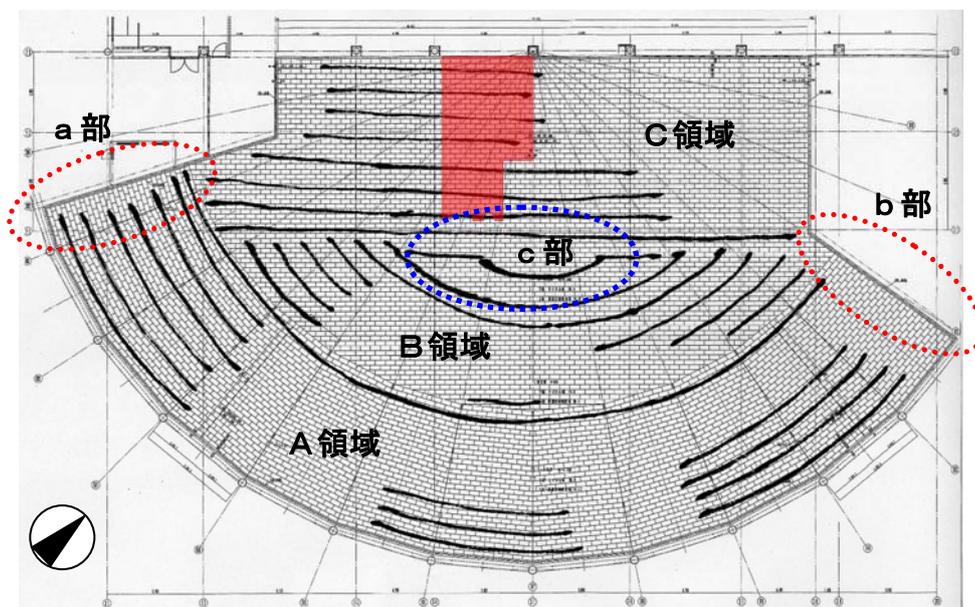


図 3.3.8 野縁受け配置の概要と未脱落天井部分（赤色）（天井伏図に書き込み）

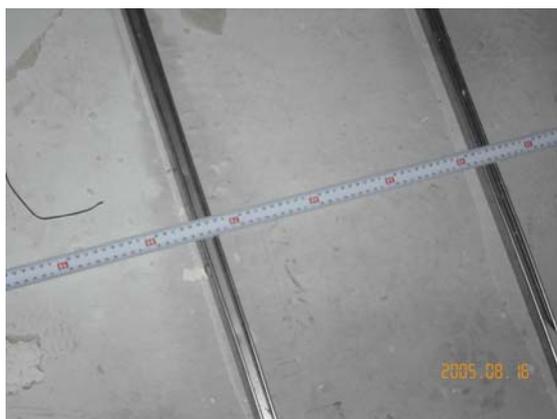


図 3.3.9 天井下地に用いられたシングル野縁

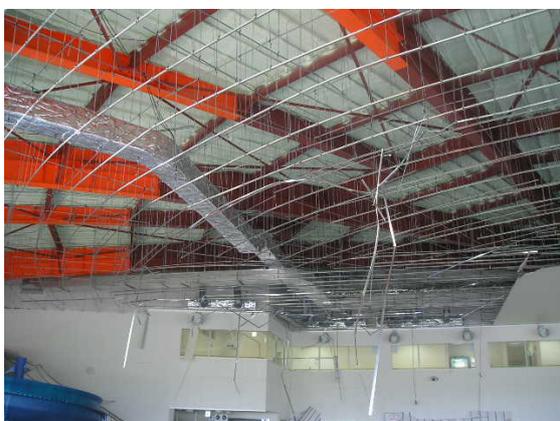


図 3.3.10 外周部から a 部方向を見る



図 3.3.11 外周部から b 部方向を見る



図 3.3.12 a 部側から b 部側を見る



図 3.3.13 外周部の野縁受けの配置

吊りボルトには水平の振れ止めが設置されている箇所があり、おおよそ野縁受けの方向および直交する方向に設けられ（図 3.3.14 内の矢印参照）、吊りボルトとの固定位置には図 3.3.14 の黒丸に示す黒い材が用いられていた。

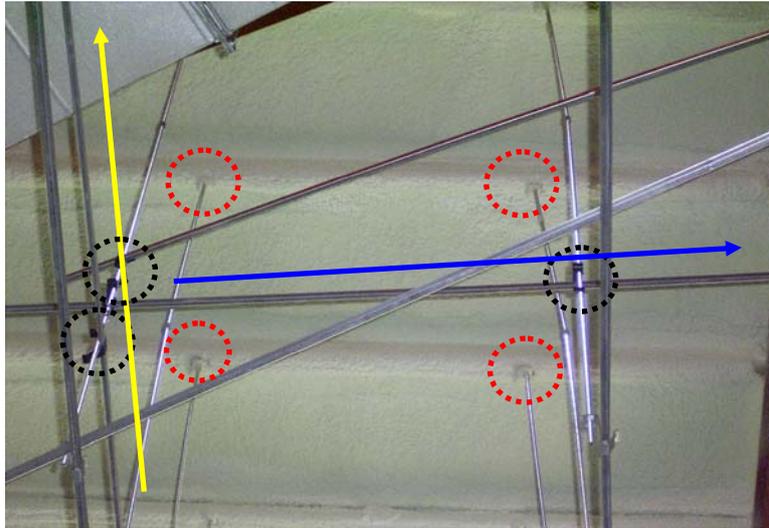


図 3.3.14 水平の振れ止めと吊りボルトの止め付け

(黄矢印は野縁受け方向の振れ止め、青矢印はそれと直角方向の振れ止め。赤く囲んだのがインサート部分で、黒く囲んだのが吊りボルトと水平振れ止めの固定位置。)

斜めの振れ止めについては、天井部に残った吊りボルト等の部材間にも、落下した部材の中からも確認できなかった。現地における関係者からのヒアリングや、後日入手した設計図書等の書類によると、斜めの振れ止めについては、仙台市が作成したPFI事業の要求水準書において、「国土交通省から出されている最新の仕様書(建築工事共通仕様書、電気設備工事共通仕様書、機械設備工事共通仕様書)及び宮城県土木部作成の共通仕様書(土木工事編)に準拠する」とされていた。また、仙台市に提出された設計図書においては、図面では記載されていなかったものの、仕様書において、「設計図及び特記仕様書に記載されていない事項は、国土交通省大臣官房官庁営繕部監修による下記の最新版による」とされ、「下記」に建築工事共通仕様書が記載されていた。(建築工事共通仕様書においては、振れ止めについて記載がされており、この仕様書の解説書の建築工事監理指針において斜めの振れ止めについて図に明示されている。)

さらに、施工者が作成した内装工事施工計画書においては、「斜めの振れ止めは、天井のふところが大きい場合に要所に入れる」とされ、振れ止めの概略図が添付されていた。

現地調査時点でのヒアリングにおいては、

- ・ 設計者側は平成 15 年 10 月 15 日付け国住指第 2402 号「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)」について認識していた
- ・ 詳細な設計図は作成せずに現場で施工者と打ち合わせながら施工していた
- ・ 施工者側は設計者側と十分に協議し施工状況についても要所で確認してもらいながら施工した

との回答があった。しかしながら、現場調査においては斜めの振れ止めを確認することは出来ず、施工計画書において斜めの振れ止めが要求されていたにもかかわらず求められていた仕様どおりの施工が行われていなかった。また、工事監理においても、斜めの振れ止

めが設置されているかどうかチェックしておらず、建築士の工事監理が適切に行われなかったものと考えられる。

プール天井部には、図面上、円弧状に段違いとなっている箇所（図 3.3.6 の A 領域と C 領域との境界に相当）があり、落下した部材においても、段違い部分の部材が確認できた。落下した天井の段違い部分の部材を調べると、段差の高さは 300mm 程度であったが、段違い部分の補強用振れ止めは確認できなかった。この点は、前述の内装工事施工計画書の記載内容と合致していない。

天井面材については、下地材である珪酸カルシウム板の厚さは 8mm、仕上材であるロックウール吸音板の厚さは 12mm であった（図 3.3.15）。珪酸カルシウム板は間隔 200mm 程度で野縁にビス止めされており（図 3.3.16）、ロックウール吸音板は接着剤及びビステーパーを用いて珪酸カルシウム板に貼り付けられていた（図 3.3.17）。

天井面材と周囲の壁体との間のアルミ製回り縁（品質証明書には「アルミ製 建築用 Exp.J.C.」と記載されている）は、図 3.3.18 に示すように幅 105mm であり、アルミ製回り縁の品質証明書に記載された内容によると天井面材と壁体のクリアランス（あそび）は 50mm とされている。野縁受けなどにクリアランスを確保するための長さ調整を行った跡が見られ、50mm のクリアランスが確保されていたものと考えられる。



図 3.3.15 珪酸カルシウム板とロックウール吸音板



図 3.3.16 珪酸カルシウム板のビス止め跡



図 3.3.17 ロックウール吸音板の張付け状況



図 3.3.18 脱落したアルミ製回り縁

4. 被害状況

4. 1 構造被害

この建築物の構造体には、被害は確認されなかった。また、建築物外周部の窓ガラス等の被害も確認されなかった。

4. 2 天井被害

温水プールの天井以外では、比較的大きな天井面を有する 2 階のマシンジムにおいても天井の破損・脱落などの被害は見られなかった。

温水プール部分の天井の面積は 1,200m²弱であり、約 9 割強の天井に脱落が生じている(図 3.3.8)。落下していた部材(図 4.2.2)の観察調査によれば、クリップの多くが野縁受けに引っかけていた折り曲げ部分が開く形で損傷していた(図 4.2.2 の丸印が落下したクリップ)。天井の脱落は、直接的には、ほとんどの位置で図 4.2.1 に示すように野縁と野縁受けとの間(クリップ)で発生したことによるものである。



図 4.2.1 脱落した天井面



図 4.2.2 落下したクリップ



図 4.2.3 壁面に残る野縁受けの衝突跡(図中の丸印部分)

また、アルミ製回り縁が、ALC¹⁶パネルからアンカーボルト¹⁷が引き抜けたことにより、図 3.3.8 の a 及び b 部の 2 箇所大きく脱落していた。

天井面材と周囲の ALC パネルによる壁体との衝突の痕跡としては、図 4.2.3 に示すように野縁受けの跡が図 3.3.8 の a 部付近の ALC パネルに残っていた程度であった。

天井落下の状況については、警察の捜査の過程において、防犯ビデオに映っていた映像があるとの新聞報道があり、これについては、調査報告時点で提供を依頼中であり、確認できていない。このほか、天井落下の状況に関する記事としては、『揺れが始まると、「地震だー」と叫び声があがった。天井に張られた約千平方メートルのパネルが、南隅の方から徐々に落ち始め、あたり一面に散乱した。揺れが大きくなると、真ん中がどかんと落ちた。・・・という。』（8月17日朝日新聞記事）、『天井の周りから落ちてきたので、とっさにプールの真ん中に潜った』と・・・話した。』（8月17日付け河北新報記事）を確認している。

5. まとめと考察

まず、調査した建築物の天井の構造、天井詳細・損傷の特徴を、以下に列記する。

A 天井の構造の特徴

- 1) 建築物は円形平面を有し、ライズの低い曲面形状の屋根は、円形平面の中央柱から放射状に配置されたロングスパンの梁（約 31.5m）により支持されていた。
- 2) 脱落を生じた温水プールの天井は、不整形な平面となっていた。
- 3) 不整形な天井平面だったことにより、特に野縁受けの配置方向が図 3.3.8 の c 部において不連続となっていた。

B 天井詳細・損傷の特徴

- 1) 天井と壁体との間のすべての周囲において、クリアランス 50mm 確保の仕様とされているアルミ製回り縁が使用されていた。
- 2) 吊りボルトの長さは約 1.6~3.4m であるにも関わらず、斜めの振れ止め（ブレース）は設置されていなかった。
- 3) 天井にはA領域とC領域の境目に高さ 30cm の下がり壁が円弧状にあるにも関わらず、この部分に補強用振れ止めが設置されていなかった。
- 4) 全面積の9割強で発生した天井の脱落は、その大部分が野縁と野縁受けの間で発生しており、落下したクリップには取付けのために折り曲げた箇所が開いているものも多く見られた。

¹⁶ autoclaved lightweight aerated concreteの略。軽量気泡コンクリートの一種。断熱性、耐火性に優れたもので、一般に鉄骨造や鉄筋コンクリート造の壁、床、屋根材、間仕切りとして用いられる。

¹⁷ 柱脚部や土台をコンクリートの基礎に、あるいは小屋組トラスなどを鉄筋コンクリート柱や壁に緊結したりするために用いる埋込みボルト。

次に、天井落下について、①天井が周囲の壁体に衝突した根拠、②衝突した箇所が力が集中しやすい弱点であったこと、などについて考察する。

- ①本建築物は、水平方向の固有周期が0.35秒（構造計算書の略算）程度である。一方、吊りボルト長さが1.6～3.4m（平均2.5m）の天井では水平方向の固有周期は約1.8秒以上となる（財団法人日本建築センター「体育館等の天井の耐震設計ガイドライン」平成17年5月に示された計算に準じて算定。付録3参照）。本建築物の建設地における地震動は観測されていないが、図2.4より500gal程度の加速度応答は生じていたものと仮定する。 $C_0^{18}=0.2$ の地震力に対する建築物の水平変位が構造計算図書より24～28mmであり、かつ固有周期の比（1.8/0.35）が充分大きいことから、建築物と天井の相対変位は建築物の変位に代表させることが出来る。したがって、この場合の変位は60～70mm程度と推定でき、クリアランス50mmであっても衝突した可能性が極めて高い。
- ②さらに、不整形な天井であったために、図3.3.8のa部及びb部では衝突時には力が集中しやすい構造となっていたことも、天井落下を助長した可能性がある。この点は、南隅の方から徐々に落ち始めたとの報道とも符合している。また、このように天井の90%以上が落下に至ったのは、天井落下がひとたび発生すると、クリップが支える荷重が増大し、動的な力も作用するので、ちょうどシールを剥がすように天井が野縁と野縁受けとの間で連鎖的なクリップ破壊を起こし、天井落下が進展したためと考えられる。一方で、天井下地を構成する部材やそれらを連結するクリップ等の強度を高めることができれば天井落下を防止できた可能性も考えられる。

次に、技術的助言に従って斜めの振れ止め（ブレース）及び適切なクリアランスを確保しておけば、天井の衝突は防げた可能性が高いことを示す。

前記ガイドラインに従ってきちんと斜めの振れ止め（ブレース）が配置されている場合について、天井の水平方向の固有周期を算定すると約0.53秒程度（付録3参照）となり、屋根に対する天井の相対変位が小さくなる。

その他、天井材の吸湿による重量増大については、使用された天井面材（ロックウール吸音板）の吸水率は製品規格表によれば30%以下であり、また、施設管理者の話によれば屋内プール部分は24時間換気されていた点を参考として報告しておく。

以上述べたように、今回の天井落下事故においては、斜めの振れ止めが設置されておらず、それに応じたクリアランスが不十分であったことが主因と考えられることから、平成15年10月15日付け国住指第2402号「大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策につい

¹⁸ C_0 ：建物の1階の層せん断力を建物の総重量で割った値、0.2は基準法における稀に発生する地震の場合の値。

て(技術的助言)」等の趣旨を改めて徹底する必要がある。

このほか、天井落下を助長した可能性がある以下の要素について、設計・施工時の配慮や技術改良等により適切に対応する必要があると考えられる。

- ・ 不整形な天井における壁との衝突時に力が集中しやすい箇所について、通常よりもクリアランスに余裕を持たせるなどの対応
- ・ 応力が集中する可能性がある野縁受けの配置が不連続な箇所について、付加的な補強をする、あるいは一体的な天井とせずに分節化して設計するなどの対応
- ・ 天井落下の発生や連鎖的進展の防止に寄与するよう、天井下地を構成する部材やそれらを連結するクリップなどについて、適切な強度を確保するなどの対応

付録1 天井構成材の寸法一覧

部位	施工計画書から	落下部材の計測から
吊りボルト	ねじ山径：9.0（円筒部径：8.1以上）	ねじ山径：9.1
ハンガー	板厚：2.0以上	板厚：1.9～2.0
ナット	高さ：7.7以上	—
野縁受け	断面外形：38×12 厚さ：1.0	断面外形：38.0×12.0 厚さ：0.9～1.0
野縁受けジョイント	板厚：1.0以上	—
クリップ	板厚：0.6以上	板厚：0.6
シングル野縁	断面外形：25×19 厚さ：0.4	断面外形：約26×19※1 厚さ：※2
ダブル野縁	断面外形：50×19 厚さ：0.4	断面外形：50×19※1 厚さ：※2
野縁ジョイント	板厚：0.5以上	—
珪酸カルシウム板	長辺：1820 短辺：910 厚さ：8.0	長辺：※3 短辺：※3 厚さ：7.9
タッピングねじ	径：3.5 長さ：22～25	—
耐湿ロックウール吸音板	長辺：600 短辺：300 厚さ：12.0	長辺：※3 短辺：※3 厚さ：11.7
天井下がり壁の補強用 振れ止め	野縁受けと同材 または Lアングル 断面外形：30×30 厚さ：3	—
補強を行う場合の天井 ふところの振れ止め	吊りボルトと同材 または Cチャンネル 断面外形：19×10 厚さ：1.2	—

単位は mm

- ※ 未入手の部材に関しては“—”を示す
- ※1 損傷を受けて変形しているため、おおよその値を示す
- ※2 部材の破断に伴う変形および発錆により計測不能
- ※3 破断した部材を採取・計測しているため、計測不能

付録2：天井の単位質量（約 14kg/m²）

吊りボルト長さが 2.5m（天井質量としては 1.25m 分を算入）、野縁受けが 910mm 毎、ダブル野縁が 1,820mm 毎、ダブル野縁間にシングル野縁が 4 本あるものとして、910×1,820mm を一単位として計算する。すると、天井下地の単位面積あたりの質量は下記となる。

$$0.4 \times 1.25 \times 2 + 0.01 \times 4 + 0.0645 \times 2 + 0.546 \times 1.820 \times 1 + 0.371 \times 0.910 \times 1 + 0.014 \times 1 + 0.272 \times 0.910 \times 4 + 0.009 \times 4 = 3.54 \text{kg} \text{ (一単位の質量)}$$
$$\rightarrow 2.14 \text{kg/m}^2$$

ただし、吊りボルト=0.4kg/m、ナット=0.01kg/個、ハンガー=0.0645kg/個、野縁受け=0.546kg/m、シングルクリップ=0.009kg/個、ダブルクリップ=0.014kg/個、シングル野縁=0.272kg/m、ダブル野縁=0.371kg/m、と仮定した。

天井面材の質量は、落下した部材（付録図 2.1）の実測によれば約 12.1kg/m²であった。なお、天井面材は乾燥した状態で計測した。珪酸カルシウム板の単位質量がカタログから 6.7kg/m²、ロックウール吸音板の見本（付録図 2.2）から 4.9kg/m²であり、面材の質量は約 11.6kg/m²となり、実際に計測した値とほぼ一致している。



付録図 2.1 落下した天井面材の一部



付録図 2.2 ロックウール吸音板の見本

付録3：天井の固有周期の算定

以下の算定においては、財団法人日本建築センター「体育館等の天井の耐震設計ガイドライン」平成17年5月を参照した。

天井の固有周期は下式で与えられる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{ml}{mg + kl}} \quad \dots \text{式 (1)}$$

ただし、 T は振り子振動及びばね振動を考慮した固有周期、 m は天井の質量、 l は振り子の長さ、 g は重力加速度、そして k はばね剛性を示す。

天井の振り子としての長さが 2.5m (吊りボルト自体の長さは 235cm) で 1200m² の天井の固有周期を算定する。なお、天井の質量は、14kg/m² とする。

吊りボルトの本数は、1本の吊りボルトの支配面積が 0.83m² であるので、約 1450 本となる。

$$1200 \div 0.83 = 1446 \rightarrow 1450 \text{ (本)} \quad \dots \text{式 (2)}$$

天井の水平震度を 1.0 とすると水平力は、16800kgf となる。

$$1200 \times 14 = 16800 \text{kgf} \quad \dots \text{式 (3)}$$

水平の振れ止めが設置されている吊りボルトを吊りボルト総本数の半分 (725 本) とする。

《天井の野縁受け方向の固有周期の算定》

- ◆ハンガーの断面二次モーメント：0.001333cm⁴ (幅 20mm、高さ 2mm)
- ◆吊りボルトの断面二次モーメント：0.01817cm⁴ (有効直径 7.8mm)
- ◆水平の振れ止めも斜めの振れ止め (ブレース) も付かない吊りボルトの剛性
吊りボルトの両端固定の条件では、

$$\delta = \frac{Q \times 235^3}{12 \times 2100 \times 0.01817} + \frac{Q \times 6^3}{3 \times 2100 \times 0.001333} = 28500 \cdot Q$$

$$\frac{Q}{\delta} = 0.0000351 (\text{tonf} / \text{cm}) \quad \dots \text{式 (4a)}$$

吊りボルトの一端固定他端ピンの条件では、

$$\delta = \frac{Q \times 235^3}{3 \times 2100 \times 0.01817} + \frac{Q \times 6^3}{3 \times 2100 \times 0.001333} = 113400 \cdot Q$$

$$\frac{Q}{\delta} = 0.00000882 (\text{tonf} / \text{cm}) \quad \dots \text{式 (4b)}$$

- ◆水平の振れ止めの付く吊りボルトの剛性

水平の振れ止めの下部の吊りボルトの両端固定の条件では、

$$\delta = \frac{Q \times \{(235 - 3.8)/2\}^3}{12 \times 2100 \times 0.01817} + \frac{Q \times \{(235 - 3.8)/2\}^3}{12 \times 2100 \times 0.01817} + \frac{Q \times 6^3}{3 \times 2100 \times 0.001333} = 6770 \cdot Q$$

$$\frac{Q}{\delta} = 0.0001477(\text{tonf} / \text{cm}) \quad \dots \text{式 (5a)}$$

吊りボルトの一端固定他端ピンの条件では、

$$\delta = \frac{Q \times \{(235 - 3.8)/2\}^3}{12 \times 2100 \times 0.01817} + \frac{Q \times \{(235 - 3.8)/2\}^3}{3 \times 2100 \times 0.01817} + \frac{Q \times 6^3}{3 \times 2100 \times 0.001333} = 16890 \cdot Q$$

$$\frac{Q}{\delta} = 0.0000592(\text{tonf} / \text{cm}) \quad \dots \text{式 (5b)}$$

式 1 に式 4a、式 5a を代入して固有周期を小さな値として算定すると、天井の水平方向の固有周期は、約 1.8 秒となる。なお、天井の野縁受け直交方向の固有周期については、吊りボルトに斜めの振れ止めが設置されていないので野縁受け方向の固有周期で代表できるものとした。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(16.8/980) \times 235}{16.8 + (0.0000351 \cdot 725 + 0.0001477 \cdot 725) \times 235}} = 1.82(\text{sec}) \quad \dots \text{式 (6)}$$

[補足] 斜めの振れ止め (ブレース) を設置した場合の天井の固有周期と減衰定数

斜めの振れ止めが X 及び Y 方向それぞれ 6m² あたり 1 本配置されていると仮定すると、斜めの振れ止めの本数は、200 本となる。

$$1200 \div 6 = 200 \rightarrow 200 \text{ (本)} \quad \dots \text{式 (7)}$$

◆斜めの振れ止めの付く吊りボルトの剛性 (野縁受け方向)

$$\delta = \frac{Q \times 6^3 \times 3}{3 \times 2100 \times 0.001333} + \frac{Q \times 6^3}{3 \times 2100 \times 0.001333} = 102.9 \cdot Q$$

$$\frac{Q}{\delta} = 0.00972(\text{tonf} / \text{cm}) \quad \dots \text{式 (8)}$$

◆斜めの振れ止めの付く吊りボルトの剛性 (野縁受け直交方向)

$$\delta = \frac{Q \times 6^3 \times 3}{3 \times 2100 \times 0.001333} + \frac{Q \times 6^3}{3 \times 2100 \times 0.1333} = 77.4 \cdot Q$$

$$\frac{Q}{\delta} = 0.01292(\text{tonf} / \text{cm}) \quad \dots \text{式 (9)}$$

式 1 に式 4a、式 5a 及び式 8、式 9 を吊りボルトの本数に応じて代入して固有周期を小さな値として算定すると、天井の水平方向の固有周期は、約 0.5 秒となる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(16.8/980) \times 235}{16.8 + (0.0000351 \cdot 725 + 0.0001477 \cdot 525 + 0.00972 \cdot 100 + 0.01292 \cdot 100) \times 235}} = 0.53(\text{sec})$$

・・・式 (10)

なお、天井の減衰定数については、類似の実験データより、3.8%程度と考えられる。