

地震による吊天井落下被害の原因分析に関する研究

Study on Causal Analysis for Failure of Suspended Ceilings under Seismic Motion

建築構造学分野 鈴木秀明

吊天井は体育館や公共ホール等で用いられており、地震災害時には地域の避難所として利用される。東北地方太平洋沖地震による吊天井落下で死傷者が発生した。また、三連動地震発生が指摘されているので、吊天井落下原因の解明が求められる。本論では、地震を受けた建物と天井落下被害の相関性について定量的に分析する。さらに天井落下被害が生じた建物の数値シミュレーションにより地震動を受ける建物内の吊天井の応答性状を把握し、落下原因について考察する。

A suspended ceiling is used in buildings, such as a gymnasium, public hall, etc., and used as a shelter of the disaster area. There were casualties in failure of suspended ceilings by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. Moreover, while seismic linkage of mega thrust earthquakes around the Nankai trough Southwestern Japan is pointed out, the resolution of cause for the failure of suspended ceilings is required. This paper shows analysis about the quantitative correlativity between the buildings and the failure of suspended ceilings in past earthquakes. In addition, the seismic response of suspended ceiling in a building is numerically studied to investigate the causes of failure.

1. 序

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、天井板、照明などの「非構造部材」に損傷を生じた建物が多くみられた。またそれ以前にも多くの天井材落下の被害が報告されている。兵庫県南部地震(1995年)では、吊天井や照明、音響設備などが落下し、避難所として使用することの出来ない体育館・公共ホールが数多く存在した¹⁾²⁾。芸予地震(2001年)では、天井落下による人的被害が発生³⁾。十勝沖地震(2003年)では、釧路空港ターミナルビルや管制塔の天井が落下し、空港が一時閉鎖されるなどの被害を受けた⁴⁾。これらの天井材落下の被害を受けて、国土交通省より、2001年6月1日付け国住指第357号「芸予地震被害調査報告の送付について(技術的助言)」及び2003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)」の2つの技術的助言が示された。しかしそれ以降にも、天井落下被害が多数報告されている。

吊天井の落下被害は、仕上げボードの部分的な剥落、鋼製下地材を含む吊天井全体の崩落、などが存在する。川口ら⁵⁾によって宮城県内の温水プール施設の吊天井落下原因について考察しているが、天井落下原因の解明には至っていない。一方で、三連動地震の発生が指摘されており、避難拠点として使用される公共施設の吊天井の安全性は以前より重要性を増しているため、

吊天井の落下原因の解明が求められていると言える。

本論では、吊天井落下の原因分析を以下の2点について行う。1点目では、地震によって被害を受けた建物の軒高、天井高、天井面積、天井重量など、と天井落下被害率との相関性について定量的に分析し、天井の落下原因について考察する。2点目では、東北地方太平洋沖地震によって天井の落下被害が生じた建物を参考に数値シミュレーションを行い、地震時の建物および吊天井の挙動を把握し、天井の落下原因について考察する。

2. 吊天井落下被害における定量的分析

本章では、まず表1に示す地震を受けた建物の天井種類、建物が受けた地震(地震名称、発生年)、建物(軒高、天井高)、吊天井(天井落下被害率、面積、吊長、ボード総重量、単位面積当たりの天井ボード重量)を比較することで天井落下被害に影響を及ぼしている要因について確認する。ここで天井落下被害率は(1)式と定義する。

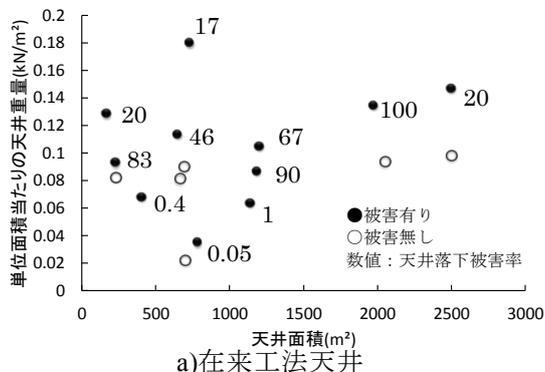
$$\text{天井落下被害率(\%)} = \frac{\text{天井落下面積(m}^2\text{)}}{\text{天井面積(m}^2\text{)}} \times 100 \quad (1)$$

図1に天井種類ごとの天井重量・面積と天井落下被害率の関係を示す。これより、図1a)より、在来工法天井では、単位面積当たりの天井重量が0.08(kN/m²)を超えると天井落下被害率が大きくなっていることが読み

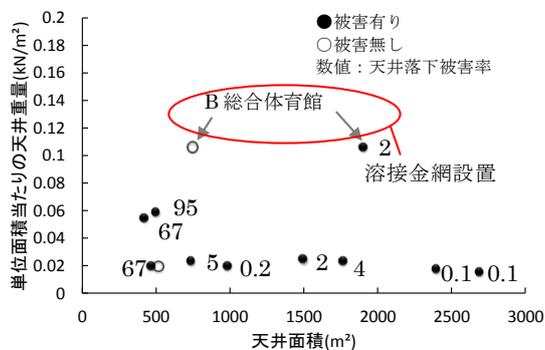
取れる。天井重量を 0.08(kN/m²)より軽くすることで被害率を軽減できる可能性があると考えられる。図 1b)より、システム天井は天井重量の値に関わらず天井落下被害が発生していることが読み取れる。図 2 は変位応答スペクトルと固有周期の関係を示す。曲線は変位応答スペクトル (左縦軸) を示し、縦線の高さは天井

落下被害率 (右縦軸) を示す。次に表 2 で示す変位応答値に着目する。ここで、吊天井の固有周期は、吊ボルトの長さにより決まる振り子振動と吊ボルトのばね剛性によって決まるばね振動とが合成された振動として評価され、(2)式で与えられる⁶⁾。

$$T = 2 \sqrt{\frac{ml}{mg + kl}} = 2 \sqrt{\frac{m}{mg/l + k}} = 2 \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (2)$$

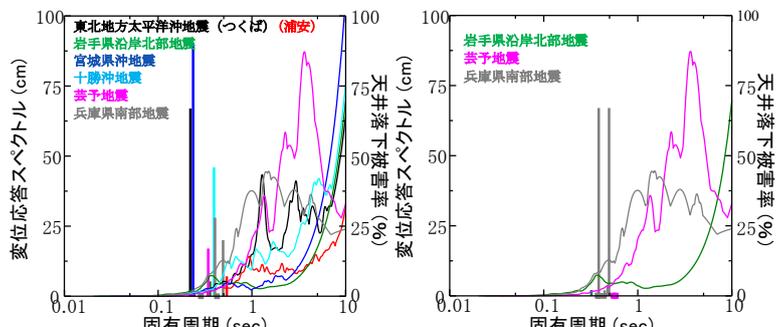


a) 在来工法天井

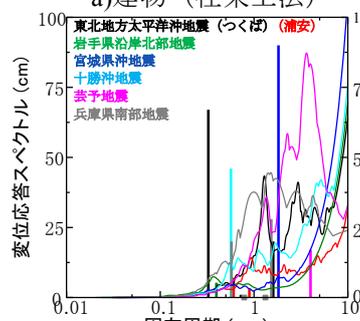


b) システム天井

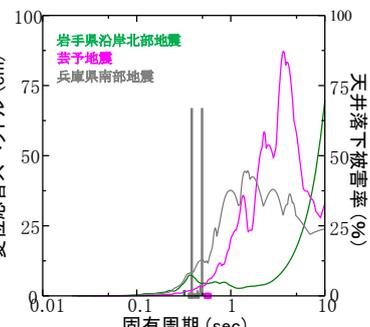
図 1 天井重量・面積と天井落下被害率の関係



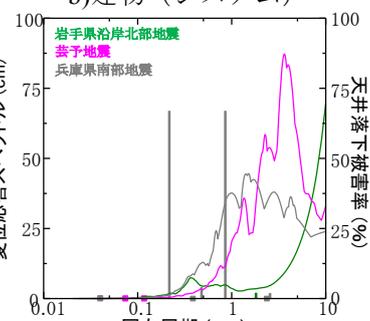
a) 建物 (在来工法)



c) 天井 (在来工法)



b) 建物 (システム)



d) 天井 (システム)

図 2 変位応答スペクトルと固有周期

表 1 兵庫県南部地震以降の天井落下被害の分類

建物名	天井種類	地震		建物					天井			
		地震名	発生年	H (m)	h (m)	X (%)	S (m ²)	L (m)	M (kN/m ²)	M/S		
I空港ターミナルビル N科学未来館 福島県施設大ホール 福島県施設2階会議室 学校体育館栃木県内 公共プール栃木県内 文化施設宮城県内 八戸市小学校体育館 1公共体育館 2公共体育館 体育館A 体育館D 志賀町中学校体育館 Sプール 体育館A 体育館D K空港ターミナルビル 大野町体育館 A体育館 N小学校体育館 I小学校体育館 S体育館 T体育館 O体育館 S体育館2 K体育館 小体育室 H文化体育館 ギャラリー I文化会館 ホール	在来工法天井	東北地方太平洋沖地震	2011	11.00	8.30	20	168	1.60	22	0.129		
				30.00	25.60		513	1.93	55	0.107		
				26.80	9.50	7.1	1800	7.00	141	0.078		
				16.80	3.20	3	311	1.10	24	0.078		
				12.00	9.00	1	1140	1.00	73	0.064		
				11.00	7.00	67	1200	2.00	126	0.105		
				21.00	11.50		2800	4.00	305	0.109		
				岩手県沿岸北部地震	2008	11.13	8.40	5.3	780	1.34	9	0.012
				岩手・宮城内陸地震	2008	17.80	11.45	1	1368	0.89	69	0.069
						16.16	14.50	2	1890	1.60	148	0.078
			新潟県中越沖地震	2007	29.70	28.50	0	2500	0.98	245	0.098	
					16.97	12.00	0	1518	3.45	177	0.117	
			能登半島地震	2007		7.50	0.4	404		27	0.068	
			宮城県沖地震	2005	11.75	6.50	90	1183	2.50	103	0.087	
	新潟県中越地震	2004	29.70	28.50	20	2500	0.98	368	0.147			
			16.97	12.00		1518	3.45		0.067			
	十勝沖地震	2003	19.60	9.73	46	648	1.55	74	0.114			
	茨予地震	2001		17.00	11.00	17	726	5.00	131	0.180		
	伊豆大島近海地震	1987				1500	152	0.101				
						1050	123	0.118				
				12.00	0	662	54	0.081				
				12.00	0	698	16	0.022				
				11.20	0	689	62	0.090				
		兵庫県南部地震	1995	21.10	11.70	0	2052	1.40	193	0.094		
				14.20	6.00	0	230	2.14	19	0.083		
				24.50	5.70	20	1195	2.55	110	0.092		
				20.10	3.40	28	229	1.60	21	0.093		
Y公共体育館 横手市内小学校体育館 能登町小学校体育館 Y体育館 O体育館 S体育館2 B総合体育館 Mアリーナ B総合体育館 Sアリーナ H総合体育館 I文化会館 体育館 K体育館 大体育室 K勤労市民センター T研修センター	システム天井	岩手県沿岸北部地震	2008	15.95	10.00	2.1	1606	3.65	57	0.035		
		岩手・宮城内陸地震	2008	13.18	9.50	5	736	1.87	17	0.024		
		能登半島地震	2007	15.00		95	496	0.96	29	0.059		
				13.30	11.75	2	1496	0.50	37	0.024		
		茨予地震	2001	28.96	20.50	0.1	2688	0.40	42	0.016		
				27.55	12.85	0.1	2395	0.50	42	0.018		
				22.10	14.10	2	1903	3.06	202	0.106		
				19.00	11.10	0	748	3.38	80	0.106		
				23.75	19.50	4	1764	1.50	41	0.024		
			兵庫県南部地震	1995	19.10	6.35	67	420	1.63	23	0.055	
				18.70	12.64	0.2	983	0.18	19	0.020		
				21.70	5.00	0	518	1.60	10	0.020		
				24.60	8.00	67	467	0.68	9	0.020		

・ H:高さ, h:天井高, X:天井落下被害率, S:面積, L:吊長, M:天井重量

表 2 建物・天井の変位応答値

建物名称	天井種類	X (%)	T (s)	S ₀ (cm)
I空港ターミナルビル	在来工法天井	20	建物 0.22 天井 1.56	1.4 22.3
福島県施設大ホール		7	建物 0.54 天井 0.61	4.4 3.6
福島県施設2階会議室		3	建物 0.34 天井 0.89	3.1 19.5
学校体育館栃木県内		1	建物 0.24 天井 0.72	1.7 10
公共プール1			建物 0.22 天井 0.33	1.4 2.3
栃木県内		67	建物 0.36 天井 0.4	10.8 9.3
八戸市小学校体育館		5	建物 0.24 天井 1.82	2.1 9.4
Sプール		90	建物 0.39 天井 0.57	3.1 18.2
K空港ターミナルビル		46	建物 0.34 天井 0.78	2.4 7.8
A体育館		17	建物 0.42 天井 1.32	12.4 52.1
S体育館2		0	建物 0.28 天井 0.79	4 34.3
K体育館 小体育室		0	建物 0.49 天井 0.58	17.1 15.9
H文化体育館 ギャラリー		20	建物 0.4 天井 1.53	10.4 57.5
I文化会館 ホール		28	建物 0.32 天井 1.81	4.8 3.5
Y公共体育館	2	建物 0.58 天井 0.07	5.9 0.0	
O体育館	0	建物 0.55 天井 0.11	4.5 0.1	
D体育館	0	建物 0.44 天井 2.55	11.5 36.7	
A総合体育館 Mアリーナ	システム天井	2	建物 0.38 天井 2.36	8.7 34.2
A総合体育館 Sアリーナ		0	建物 0.48 天井 0.48	12.8 12.8
H総合体育館		4	建物 0.38 天井 0.85	8.7 34.1
I文化会館 体育館		67	建物 0.38 天井 0.04	8.7 0.0
K体育館 大体育室		0	建物 0.43 天井 0.39	10.8 8.8
K勤労市民センター		0	建物 0.49 天井 0.22	13.0 1.4
T研修センター		67	建物 0.22	

・ T:一次固有周期, S₀:変位応答値

天井の変位応答値は建物に比べて大きくなる傾向にある。これらは、建物に対して天井の周期が長い場合が多いためである。

それぞれの吊天井における落下被害率が大きい場合には、吊ボルトが破断、またはハンガーがひしゃげることで天井下地ごと落下している場合が存在したので、吊ボルトおよびハンガーの強度の検討が必要であることを確認した。

3. 数値シミュレーションによる解析的分析

3.1 F文化センターの概要

F文化センターは、東北地方太平洋沖地震により大規模な天井落下被害が発生した。天井落下被害調査を行った3F展示場およびその下階の平面図、断面図、および3F展示場にある天井詳細図をそれぞれ図3、図4、図5に示す。

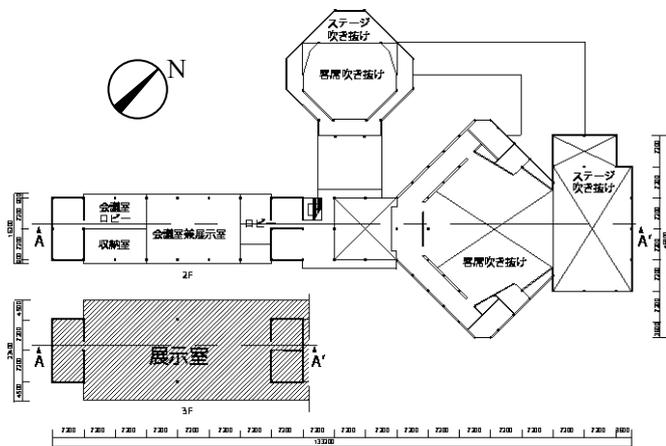


図3 F文化センター平面図(2F,3F)

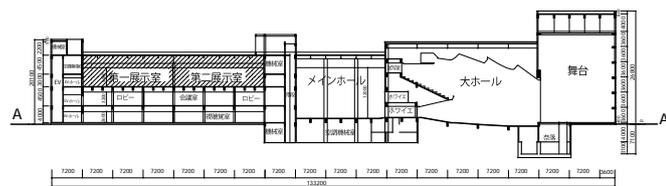


図4 A-A'断面図

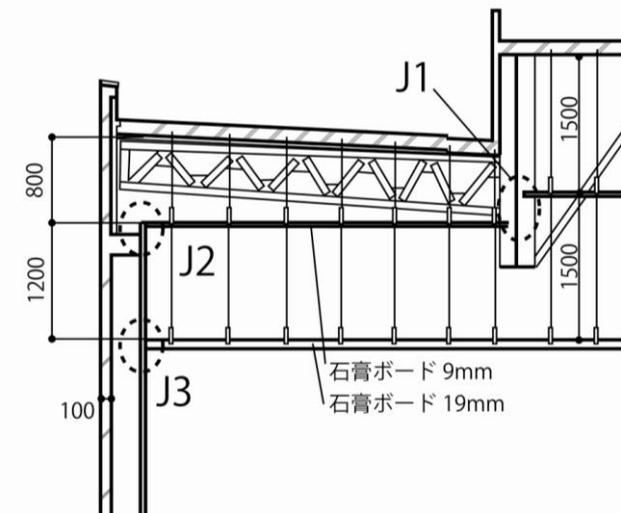


図5 天井詳細図

3.2 天井落下状況

調査による3F展示場の吊天井落下被害の状況を図6に示す。東側の天井の半分が上段天井の格子材ごと崩落した(a)。北西側では、一部において格子材ごと墮落した(b)。南西側の角部では、衝突による天井ボード材の破損が見られた(c)。また、床には野縁と野縁受けを接合するクリップが変形した状態で発見された(d)。さらに、吊ボルト先のハンガーはひしゃげた状態で発見された(e)。以上のことと、天井落下被害部分(図7)から東側と西側で天井落下状況が異なることがわかる。

3.3 解析モデル概要

図8に3F展示場およびその下階の解析モデル図を示す。解析モデルは構造体の屋根面に吊天井重量を負担させた解析モデルA、構造体に吊天井を設置した解析モデルBの2種類を使用する。自重として作用させる荷重は、構造材重量、床重量(2.3kN/m³)、壁重量(2.3kN/m³)および積載荷重(1.76kN/m²)を考慮した等分布荷重とする。構造材重量は、境界支持節点およびトラスの下弦材の節点を除く全節点に作用させる。床重量と積載荷重は床面を構成する各節点に負担面積に応じて作用させる。壁重量は壁面を構成する各節点に面積に応じて作用させる。天井重量は構造躯体に直結されている吊ボルト先の節点に負担面積に応じて作用させる。



図6 F文化センター3F展示場 天井落下状況

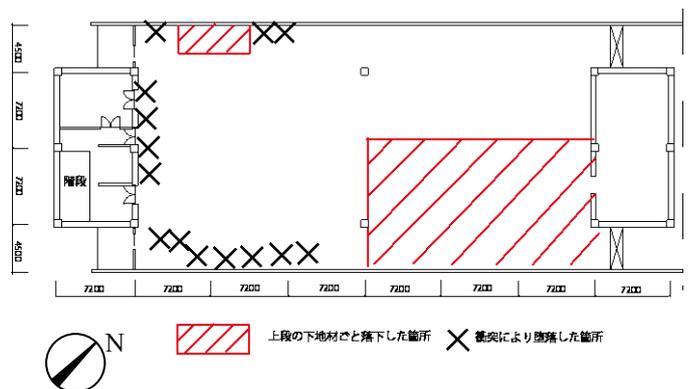


図7 F文化センター3F展示場 天井落下箇所

次に、図9、図10に解析モデルBの天井平面図を示す。天井面が壁面から受ける反力および天井面と壁面にクリアランスがないことを考慮し、天井面と建物の接合は全てピン接合とする。また、天井面は中央を通るy方向の軸を中心に面が途切れているおり、端部が接しているため、天井格子材の接合は、中央はピン接合、その他は剛接合とする。さらに、天井ボードはせん断剛性を等価としブレース置換し、両端はピン接合とする。吊天井の短手と長手の断面図を図11と図12にそれぞれ示す。吊ボルトの接合条件は上端剛接合、下端ピン接合とする。

3.4 2方向水平地震応答解析

水平地震に対する建物および吊天井の応答性状を把握するため、幾何学的非線形を考慮した弾性時刻歴応答解析を行った。使用する地震波は、防災科学技術研究所 強震観測網(K-NET,KiK-net)より頒布される東北地方太平洋沖地震のNS成分(Station Code FKS003)(以下、TOHOKU-NS)とEW成分(Station Code CHB008)(以下、TOHOKU-NEW)の2方向同時入力とする。解析の

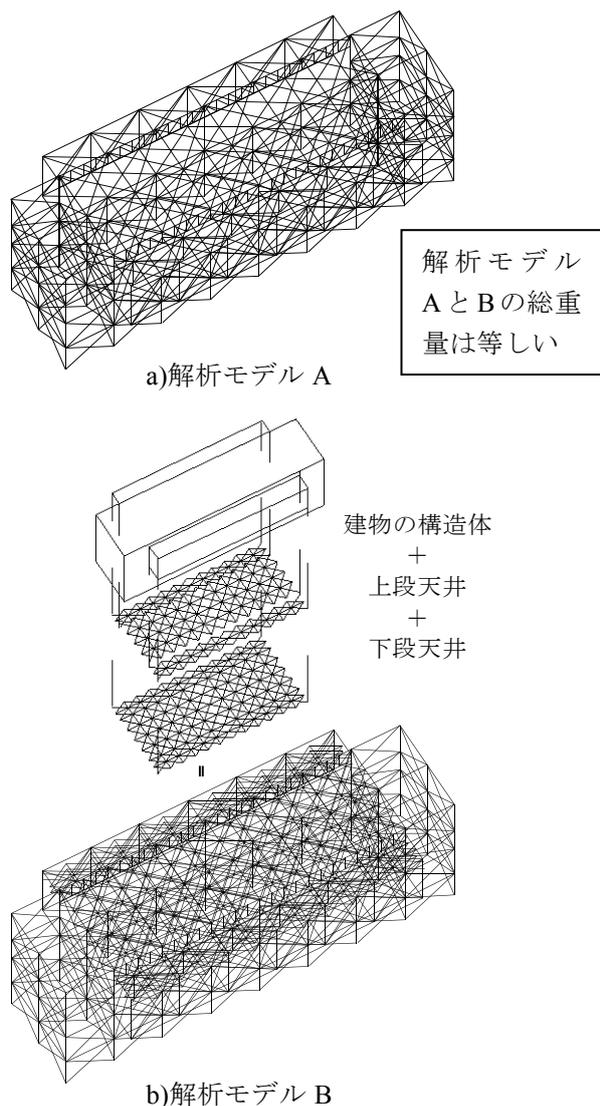


図8 解析モデル図

際に入力する地震波には90秒から150秒までの60秒間の加速度波形データを用いる。入力方向は図13に示す。

(1) 評価内容

解析モデルAでは、応答が比較的大きくなったy方向について確認するため、建物の屋根面のy方向の地盤に対する相対変位を算出し、屋根面の地震応答性状を評価する。

解析モデルBでは、解析モデルAとの比較のため、応答が比較的大きくなったy方向について、建物の屋根面のy方向の地盤に対する相対変位を算出し、屋根面の地震応答性状を評価する。また、吊天井の天井面の時刻歴応答変位を算出し、天井面の応答を評価する。さらに、天井面を構成する格子材および吊ボルトの時刻歴の曲げモーメントを算出し、格子材および吊ボルトの力の分布を評価する。

(2) 評価方法

解析モデルAおよびBは建物中央を通る短手方向の物南側半分を対象とする。また、見られる節点として、

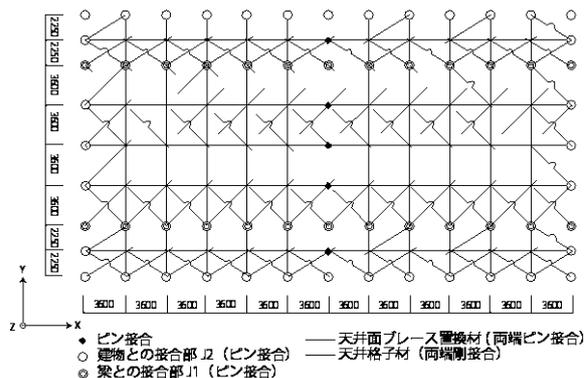


図9 解析モデルB 上段天井平面図

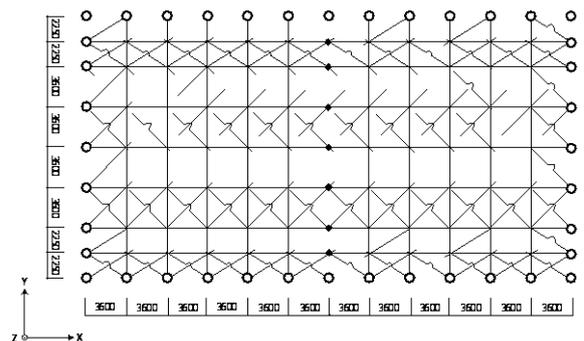


図10 解析モデルB 下段天井平面図

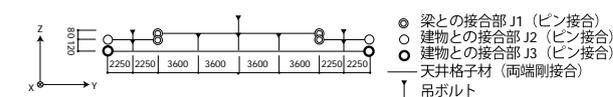


図11 解析モデルB 断面図 (短手)

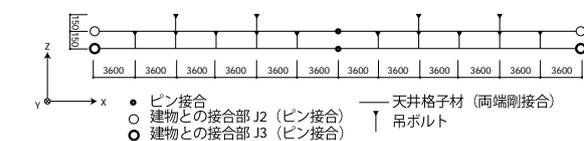


図12 解析モデルB 断面図 (長手)

軸を中心に線対称であり、x 方向に比べて y 方向の応答が大きいため、屋根面の応答の評価は地震応答は建図 13 に示す節点 A~D を代表節点で評価を行う。

(3)解析結果

図 14 に解析モデル A および B の点 A~D の時刻歴応答相対変位を示す。屋根面は y 方向に均一に水平応答したのではなく、最大応答相対変位を示している点は C 点であることがわかった。これは x 方向における解析モデルの両端にある比較的剛性の高いコアがあること、また 3F の柱がコアと中央にのみ存在していることが影響している。これにより F 文化センターは、y 方向に関して水平地震動を受ける場合、屋根面に左右対称なねじれ変形が発生していることが確認できた。また、解析モデル B は、解析モデル A と比較して屋根端部の変位が小さくなっていることが分かる。これは、吊天井の変形が地震によって入力されるエネルギーを吸収したためであると考えられる。天井面において、z 方向に最大変形が生じた時刻における天井面の変形図を図 15 に示す。また、変形時の天井面の断面図を図 16、図 17 に示す。天井面は水平応答だけでなく上下応答も生じており、局所的に上方向の変形が卓越している箇所が見てとれる。これは、水平応答により壁面に部材が密集し、面内での行き場を失った部材が面外に変形することで生じるものと考えられる。また天井面が下に凸でなく上に凸の変形が卓越するのは、天井面の水平応答時、吊ボルトが伸び変形をほとんど生じないためである。次に、天井面節点の応答変位ベクトル図を図 18 示す。東側部分の変位ベクトルが中央に向いている。また、図 19、図 20 に天井格子材の曲げモーメント分布を示す。格子材の天井の東側の壁際におい

て大きな面外モーメントが生じている。以上のことを踏まえ、図 7 より F 文化センターでは格子材ごとの天井落下被害は東側で発生していることを考慮すると、格子材ごとの天井落下は天井面が上に凸の変形を生じることでハンガーから格子部材が外れ、その場所から連鎖的に発生したと推察される。しかし、格子材が一カ所のハンガーから外れ、その直後から全体の崩落に至るまでの挙動を把握する必要がある。また、天井面

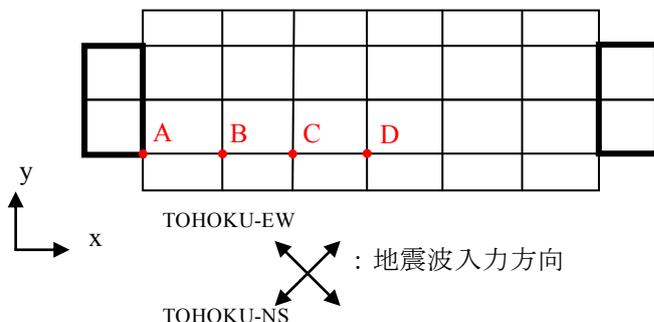


図 13 屋根面代表節点と地震入力方向

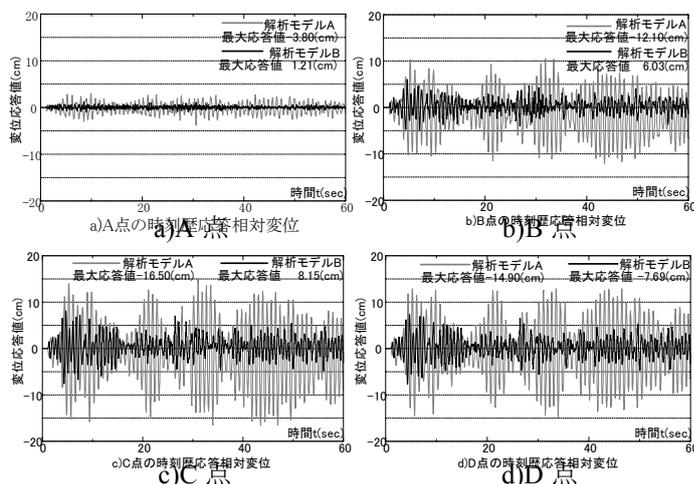


図 14 屋根面の時刻歴応答変位

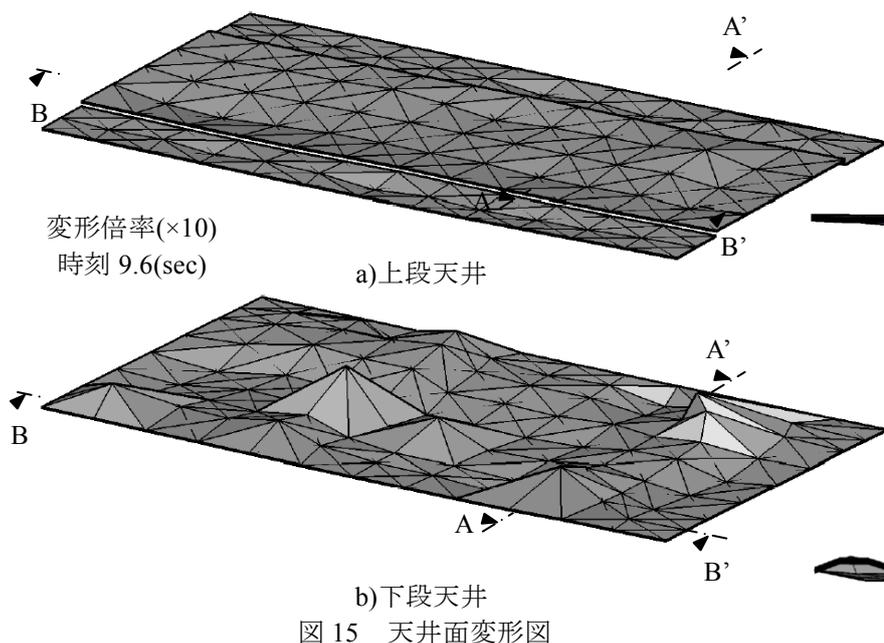


図 15 天井面変形図

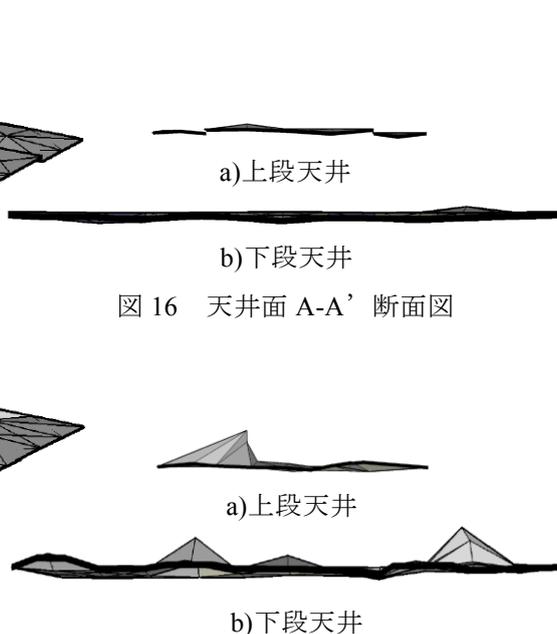


図 16 天井面 A-A' 断面図

図 17 天井面 B-B' 断面図

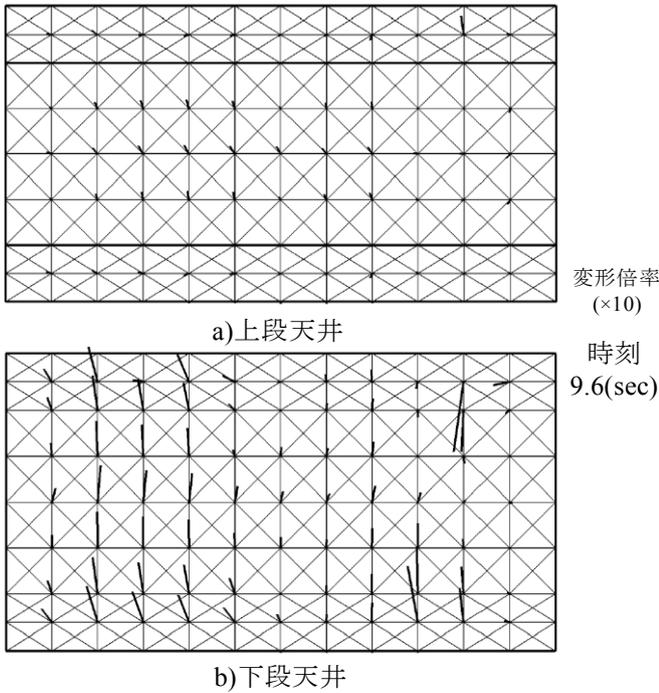


図 18 天井面節点の応答変位ベクトル図

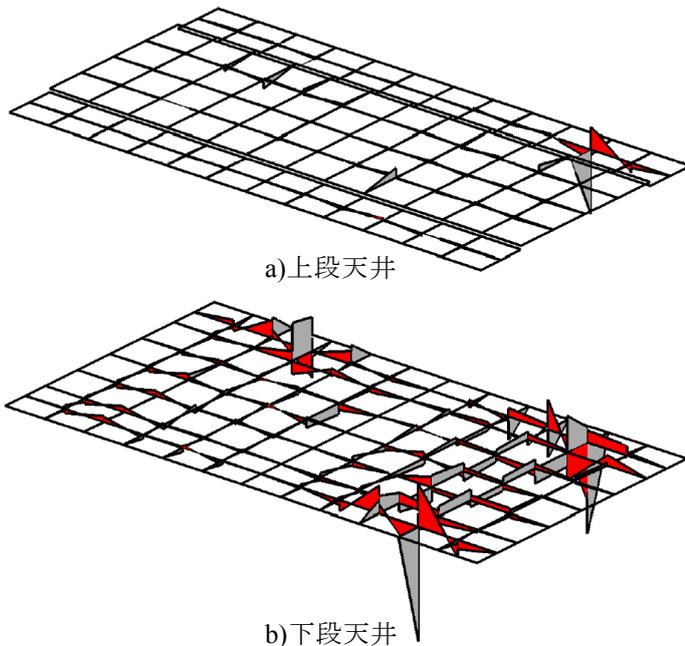


図 19 天井面外モーメント分布

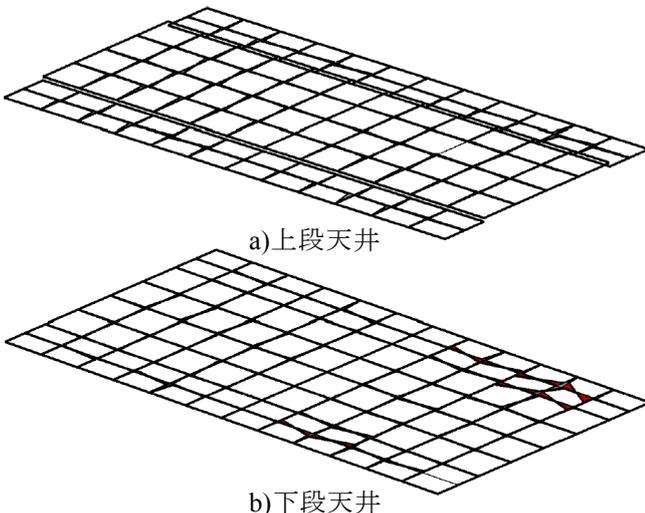


図 20 天井面内モーメント分布

は壁面からの反力を考慮するために格子材と建物の接合をピン接合としたが、地震により吊天井面が壁面から離れる状況も想定する必要もあり、これらが、今後の課題であると考えられる。

4. 結

本論文は、兵庫県南部地震以降の地震を受けた吊天井が設置された建物を対象に、定量的な分析を行い、天井落下原因との関連についてまとめ考察した。また、東北地方太平洋沖地震によって甚大な天井落下被害が発生したF文化センター展示場の数値解析モデルを作成し、2方向水平地震動を受ける場合の建物および吊天井の動的応答性状を把握した。以下に本論で得られた結論をまとめる。

- 1)在来工法天井に関しては、単位面積当たりの天井重量の値がおよそ $0.08(\text{kN}/\text{m}^2)$ より大きくなると天井落下率が大きくなっていることを確認した。
- 2)吊天井の1次固有周期は建物の1次固有周期より比較的長いものが多いことが分かった。その影響により吊天井の変位応答値は建物に比べて大きくなる傾向にあることを確認した。
- 3)屋根面の応答変位は、吊天井重量を屋根面に作用させる場合と比較して吊天井を設置した場合の方が、吊天井が応答することによる影響で小さくなる。
- 4)水平地震動を受けた場合、天井面では水平応答によって天井格子材が局所的に密集すること、および吊ボルトの曲げ変形によって天井格子材が上方向へ変位することにより上に凸の変形が発生することを確認した。

[参考文献]

- 1) 石川浩一郎, 川口健一, 田川健吾, 酒井達也「兵庫県南部地震による学校体育館及び公共スポーツホール等の被害調査報告」日本建築学会技術報告集 第5号, 日本建築学会, pp.96-101, 1997.12
- 2) 金子美香, 神原浩, 田村和夫「1995年兵庫県南部地震の被害調査に基づく非構造部材の耐震性評価」日本建築学会技術報告集 第17号, 日本建築学会, pp.563-566, 2003.6
- 3) 西山功, 伊藤弘, 西田和生, 梁一承「芸予地震による体育館天井の落下被害の調査とその対策」日本建築学会技術報告集 第16号, 日本建築学会, pp.367-372, 2002.12
- 4) 国土交通省「2003年十勝沖地震における空港ターミナルビル等の天井の被害に関する現地調査報告」 2003.10
- 5) 川口健一「大規模集客施設内部の非構造部材と安全性に関する基本的考察」日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 日本建築学会, pp.983-984, 2006.9
- 6) 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」 pp57-62 2005.5

討 議 等

◆討議 [谷口 徹郎 准教授]

固有周期が建物より天井の方が長くなると天井落下被害率が大きくなるのか。結論では、吊長を短くするとあるが、硬くすることが大事なのか。また、地震入力方向はなぜ斜めなのか。

◆回答：固有周期と天井落下被害率の間に明確な相関性を確認できておりません。図2より、周期を短くすることで変位応答値が小さくなるということです。また、地震入力方向は調査した建物の方位を再現しております。

◆討議 [谷池 義人 教授]

東北地方太平洋沖地震は長周期型の地震波であったが内陸の直下型だと地震波の周期が短く、天井周期を短くすると共振してしまうため、一概に短くしたら良いというものではないのではないのか。また、実際の天井被害の分布と解析結果は一致しているか。

◆回答：天井の周期を短くすることで直下型の短周期の地震波と共振する恐れはあります。ここでは、天井の変位応答値が小さくなる方法として天井の固有周期を短くするという事です。

また図15~19および図21から被害箇所と解析結果は概ね一致していると思われます。解析結果から西側の天井面においては、北側の端部で鉛直上方向の変形および面外モーメント値が大きく北側端部で落下が生じる可能性があります。また東側の天井面においては北側と南側で鉛直上方向の変形および面外モーメントが大きくなっており塑性時刻は南側の端部の部材がわずかではあるが早いので、塑性を考慮すると南側から変形が増大し落下が発生する可能性があります。

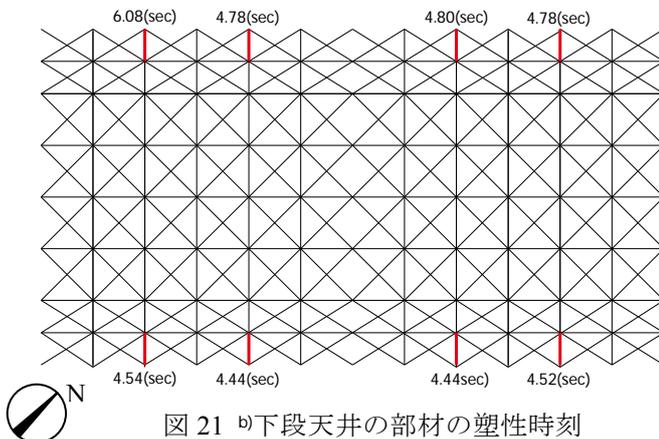


図21 b)下段天井の部材の塑性時刻

◆討議 [山口 隆司 教授]

設計法の見直しについて、今は鉛直材のみで引張のみの設計だが、吊材に対しては、簡単な振動解析は行われていないのか。

◆回答：振動解析および実験は行われており、天井のガイドラインは存在し、技術的助言も示されております。しかし、これらの基準は詳細な耐震性を示すものではないという記述もあるため吊天井の明確な耐震基準が必要だと考えられます。

◆討議 [谷口 徹郎 准教授]

天井材が落ちても大丈夫という考え方があるが、ここでは落ちても大丈夫なように軽くするという提案なのか。

◆回答：軽くすれば落ちても大丈夫という意味の提案ではありません。図1a)より単位面積当たりの天井重量が $0.08(\text{kN}/\text{m}^2)$ 以下であれば、天井面積に対する落下する天井材の割合が非常に小さくなり、天井落下自体を防ぐことができる可能性があるという提案です。

◆討議 [吉中 進 准教授]

複数の吊ボルトを一本に置換すると感覚的には応答が変わると思われるが。

◆回答：吊ボルトの伸び剛性と曲げ剛性を等価に置き換えているので、吊ボルト先の天井面の水平応答および鉛直応答を確かめる上では妥当であると考えています。

◆討議 [松村 政秀 講師]

解析において減衰はどのように決めているか。

◆回答：固有振動解析および地震応答解析においてはレーリー減衰の2%を用いております。また天井の地震応答スペクトル算出の際は、5%としております。これはガイドラインでは天井の減衰は3.5%とされており計測事例では4~5%とばらつきもあるため、ここでは5%を採用しております。