

体育館における天井脱落被害を模擬した振動台実験 Experimental Study on Collapse Behavior of Suspended Ceiling of School Gym Damaged by Earthquake

高井 茂光*

鹿籠 泰幸**

Shigemitsu Takai

Yasuyuki Shikamori

飯塚 信一**

金川 基*

Shinichi Iizuka

Motoi Kanagawa

要 約

本論では、2001年芸予地震の際に天井の脱落被害を生じた広島県内の体育館の天井および屋根構面の一部を模擬した試験体を用いて、地震時の天井脱落被害の再現を試みた振動台実験を実施し、天井の地震時の挙動について現象面から考察するとともに、大規模な天井の破損や落下、崩落につながる現象に関して得られた新たな知見について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 振動台実験の概要
- § 3. 実験結果
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

近年の2001年芸予地震^{1)~3)}、2003年十勝沖地震⁴⁾、2005年8月16日の宮城県沖地震⁵⁾などの地震の際に、体育館など大規模空間を有する公共施設において吊り天井が破損・脱落する地震被害が多く報告されている。大規模空間に設けられる天井は、建築鋼製下地材および天井板などで構成される在来工法による天井や、Tバーおよび天井板などで構成されるシステム天井があり、在来工法については、部分的に生じた天井脱落が広範囲の天井脱落につながるような被害が報告されている。体育館等の施設は地震時には避難場所として機能することが求められるものもあり、そのためには天井を含めて十分な安全性を確保することが求められる。

国土交通省はそれぞれの地震の際に被害を受けた天井について現地調査を行い、2001年芸予地震の後に「芸予地震被害調査報告の送付(技術的助言)」、2003年十勝沖地震の後に「大規模空間を持つ建築物の崩落対策について(技術的助言)」を通知している。また2005年8月には「大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策について」

を各地方公共団体に通知し、天井落下による事故を防止するために、体育館、屋内プール、劇場、ホール、空港などのターミナル、展示場等の500平方メートル以上の大規模空間を有する建築物について、落下の危険性を調査するとともに、その結果に基づいて適切な崩落防止対策等の措置を講ずることを求めている。これら地震による天井の破損や落下、崩落の原因については、いまだに不明の部分が多く残されており、現在もそのメカニズムの究明が続けられている。

本稿では、2001年芸予地震の際に天井の脱落被害¹⁾を生じた広島県内の体育館(写真一1)の天井および屋根構面の一部を模擬した試験体を用いて、地震時の天井脱落被害の再現を試みた振動台実験を実施し、天井の地震時の挙動について現象面から考察するとともに、大規模な天井の破損や落下、崩落につながる現象に関して得られた新たな知見について報告する。



写真一-1 2001年芸予地震による天井落下被害事例

* 技術研究所建築技術グループ

**技術研究所

§ 2. 振動台実験の概要

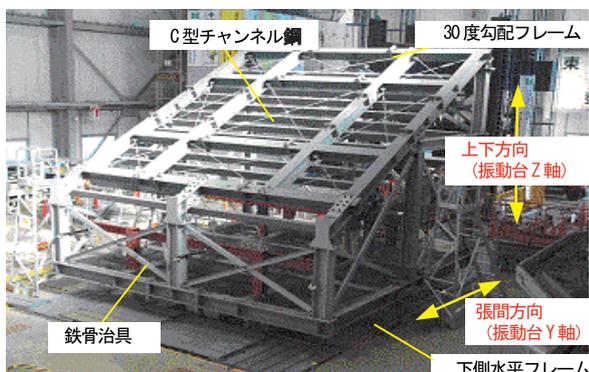
2-1 試験体の概要

対象とした体育館は、1989年に竣工した小学校体育館とした。構造種別は、1階が鉄筋コンクリート造、2階が鉄骨鉄筋コンクリート造、屋根は鉄骨造の寄棟である。スパンは張間方向で26m、桁行方向で40m、天井高さは頂部で13m、端部で8m、屋根勾配は約30°である。天井のふところ深さは約700mmである。

天井試験体は、2001年芸予地震で脱落被害のあった体育館天井（写真一1）と同じ仕様とした。鋼製下地材はJIS A 6517に規定される19形の材料を、石膏ボードはJIS A 6901、吸音用穴あき石膏ボードはJIS A 6301に規定されているものを使用した。JISに規定のない材料については、学校体育館等に一般的に用いられる材料を使用した。

試験体を設置する架台フレームは、写真一1に示した被害天井の一部を模擬するために6.5m×6.5m×高さ5.3mの大きさとし、剛性を確保するために構面にブレースを設置した。架台フレームの全景を写真一2に示す。

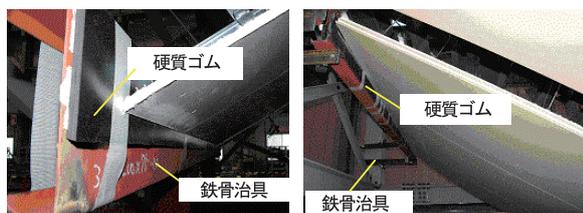
次に試験体の詳細を図一1に示す。天井は勾配方向が野縁受けの長さ方向となるように設置し、天井のふところ深さは800mmとした。試験体は対象とした体育館と同じ仕様となる試験体1-1を基本として、吊り方法を地



写真一2 振動台実験全景

表一1 試験ケース一覧

試験体 No.	天井の大きさ (mm)	吊り方法	吊りボルト 吊り方	石膏ボード	境界条件
1-1	2,700×5,760	勾配に垂直	在来	2枚貼り	両端拘束
1-2		地面に垂直	ピン金物	2枚貼り	
1-3		勾配に垂直	在来	4枚貼り	
1-4		地面に垂直	ボルト曲げ	2枚貼り	



(a) 下端部

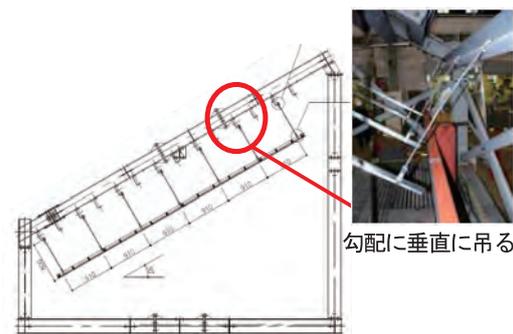
(b) 上端部

写真一3 天井端部の詳細

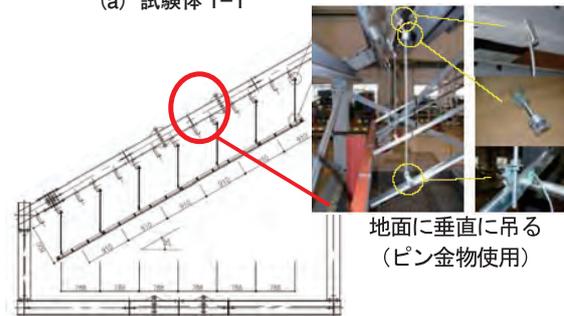
面に垂直とした試験体1-2（専用ピン金物を使用して設置）、試験体1-4（吊りボルトを曲げて設置）、ボード枚数を2倍の4枚とした試験体1-3の4種類とした。試験ケースをまとめて表一1に示す。

試験体1-2,1-4のような地面に垂直に天井を吊る方法は、現在広く行われている施工方法であるため、試験体1-1と比較するために実施した。試験体1-3はより広い範囲の天井面積を考慮して、クリップなどに作用する力を検証するために実施した。

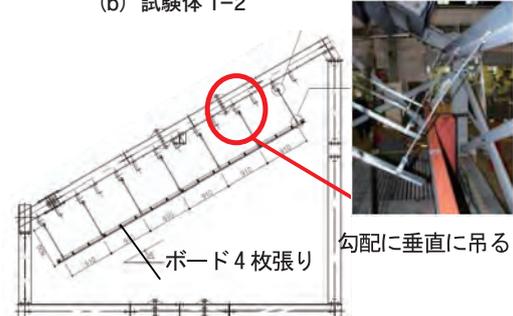
天井端部の詳細を写真一3に示す。天井端部は、天井の水平固有振動数が概ね同じになるように、フレームとの間に厚さ10mmの硬質ゴムを設置した（写真一3(a)）



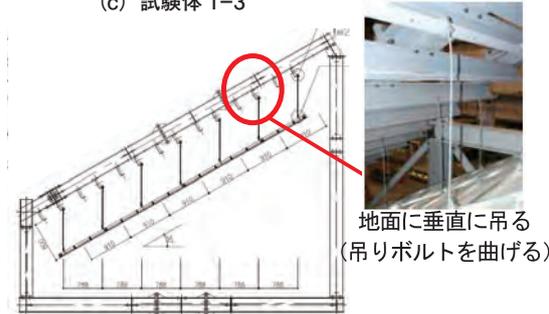
(a) 試験体 1-1



(b) 試験体 1-2



(c) 試験体 1-3



(d) 試験体 1-4

図一1 試験体の詳細

2-2 振動台入力波

入力波は、2001年に発生した芸予地震観測記録を用いて実施したシミュレーション解析における屋根部の応答波とした。図-2にシミュレーション解析モデルを、図-3に屋根（A点）の応答加速度時刻歴を示す。振動台入力波は図中のA点における加速度とし、入力方向は張間方向、および上下方向の2方向とした。図より、最大加速度は、張間方向、上下方向とも5000gal程度となっている。ただし、振動台実験においては、振動台性能の制約からこれを再現できないため、加速度の倍率を調整し水平、上下とも最大約2000galとして試験を実施した。

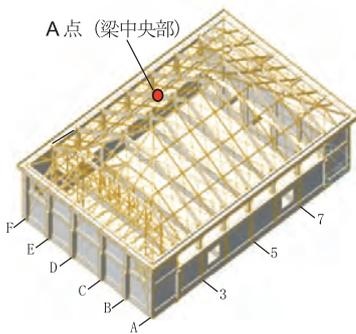


図-2 シミュレーション解析モデル

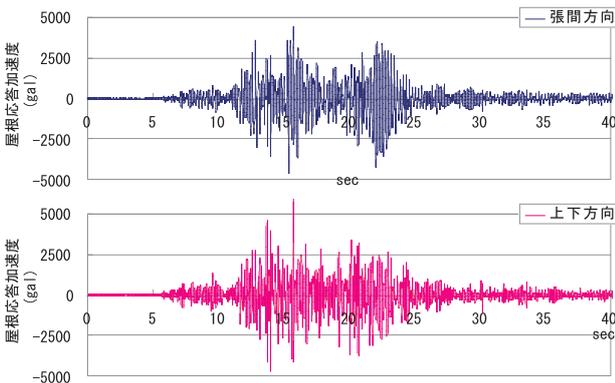


図-3 屋根（A点）部応答加速度

2-3 計測方法の概要

計測位置を図-4に示す。計測は、天井部材（野縁・野縁受け・ボード）の加速度、天井全体の変位、ブレース・吊りボルト・クリップ部のひずみとした。また、入力として振動台、試験体フレームの加速度もあわせて計測した。加速度計については、天井の勾配方向に設置しているため、周波数解析等のデータ処理を行う場合は、必要に応じて水平方向への座標変換を行っている。また、クリップ脱落時の挙動を詳細に検証するために、クリップ部を高速カメラ（サンプリングレート40kS/s、記録レート250fps@VGA）で撮影した。計測データのサンプリング周波数は200Hzとした。

§3. 実験結果

3-1 振動特性

張間方向（野縁受け長さ方向）、および上下方向それぞれの一方方向ランダム波加振による各試験体のフーリエスペクトル比（天井試験体中央部の石膏ボード上に設置した加速度計と振動台テーブル上の加速度計による比）より求めた各試験体の固有振動数を表-2に示す。試験体1-2は吊り元にピン金具を使用しているため、他のケースに比較して固有振動数が低くなっている。また、天井端部を拘束しているため、ボード枚数が4枚の試験体1-3の固有振動数も、試験体1-1に比較してそれほど低くないことがわかる。

なお、架台フレームの固有振動数は、張間方向で約

表-2 天井の固有振動数

試験体 No.	張間方向 固有振動数 (Hz)	上下方向 固有振動数 (Hz)
1-1	13.1	12.6
1-2	7.0	7.7
1-3	10.4	10.3
1-4	11.3	11.2

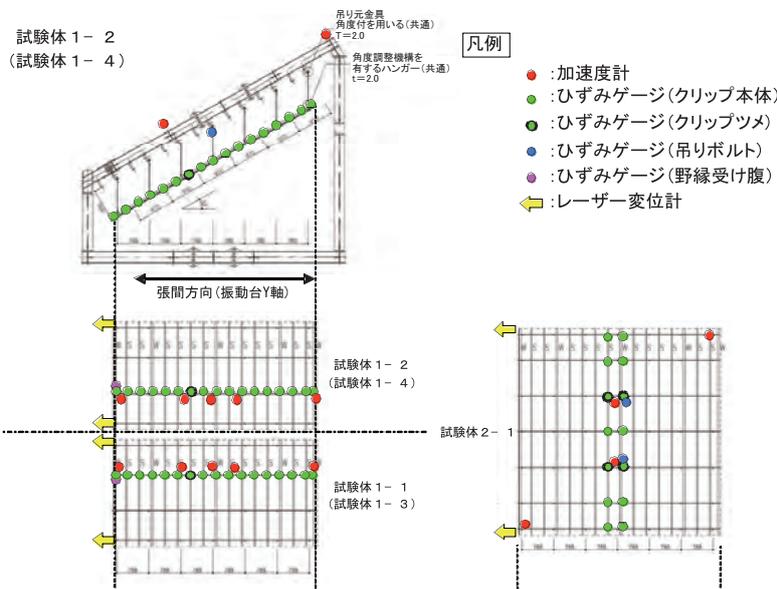


図-4 計測機器の設置位置

9 Hz, 上下方向で約 19 Hzであった。張間方向において、天井固有振動数より低くなっているが、今回の入力波においてはこの振動数帯の成分がほとんどないことから、試験には影響がないものと判断した。

3-2 応答値の比較

(1) 応答加速度-応答変位の関係

表-3, 図-5 にそれぞれ天井の応答加速度と応答変位の関係を示す。表中の各値はそれぞれZ方向で最大450 gal 入力時, 2200 gal 入力時の加速度-変位関係の近似線を示している。同様に図-5 の点線が450 gal 入力時, 実線が2200 gal 入力時の近似線を示している。何れの試験体も入力加速度2200 gal 時にいくつかのクリップの脱落が生じている。

吊りボルトを天井面に対して垂直とした試験体1-1, 試験体1-3では入力加速度が大きくなるに従い, 勾配が小さくなる傾向が見られる(図中の点線と実線の履歴の比較)。また, 吊りボルトを地面に垂直とした試験体1-2, 試験体1-4では勾配は殆ど変わらない。前者は, 天井ボードに垂直に吊りボルトを設置しているため, 接合部が塑性化すると, 重力の影響により変形が進行することが主な原因と考えられる。

(2) 天井の振動モード

図-6 に試験体1-1~試験体1-4の上下方向の応答加速度から算出した, 入力加速度毎の天井の振動モードを示す。図の横軸は天井長さ(斜め天井を水平で表示, 0は斜め天井の下側を示す)を示す。振動モードは, 各試験体ケースの固有振動数から算出し, 全ケースの最大値で基準化している。試験体1-1と試験体1-4の天井中央

表-3 応答加速度-応答変位関係

試験体	①加速度/変位 (450gal入力時)	②加速度/変位 (2200gal入力時)	②/①
1-1	270.3	72.3	0.27
1-2	94.8	90.3	0.95
1-3	193.0	106.9	0.55
1-4	148.1	112.8	0.76

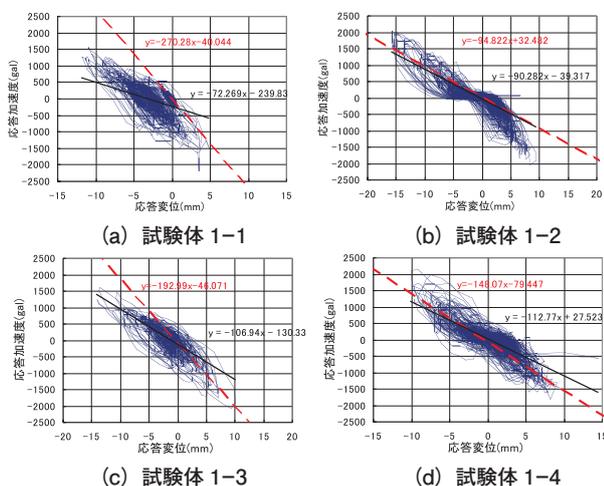


図-5 応答加速度と応答変位の関係

部付近がほぼ同程度の増幅率となり, 比較的よく似たモード形状を示している。試験体1-1は天井面に対して垂直, 試験体1-4は地面に垂直に吊りボルトを設置しているが, 試験体1-4の吊りボルトは吊り上端で曲げて設置していることから, 比較的似たモード形状となっていると考えられる。試験体1-2については入力倍率の大きさに係わらず, 増幅率にそれほど大きな違いはない。これは, 吊りボルト上端の取り付け部がピン状態のため, フレームからの入力直接天井に伝達されていないことが影響していると考えられる。

試験体1-3についても同様な傾向が確認できるが, こ

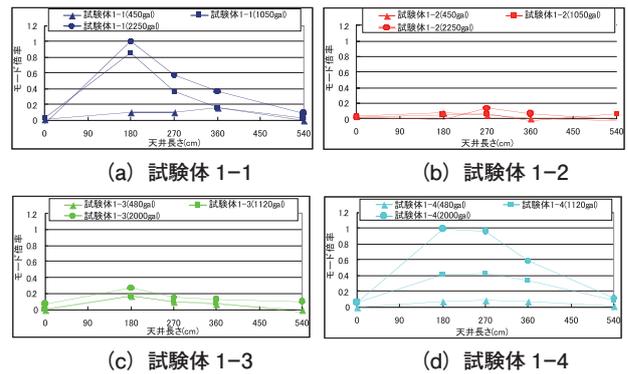
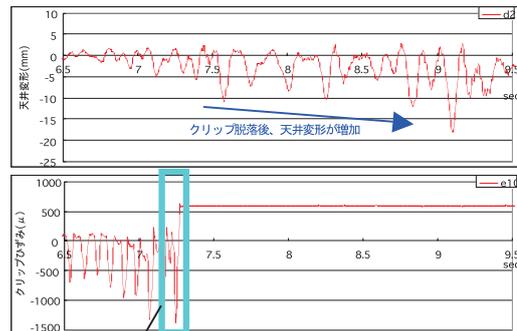


図-6 各試験体の振動モード(上下方向)



脱落時の拡大

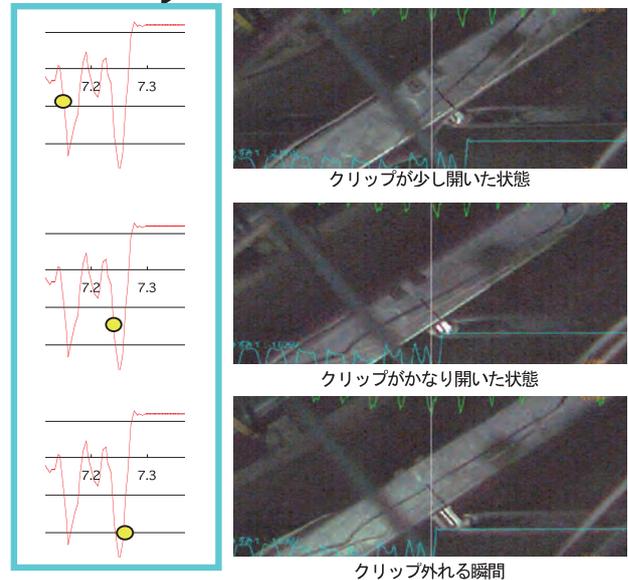


図-7 クリップ脱落時の詳細挙動と天井変形

これはこのケースがボード4枚張りのため、面外方向の曲げ剛性が他のケースに比較して大きいことがひとつの原因と考えられる。

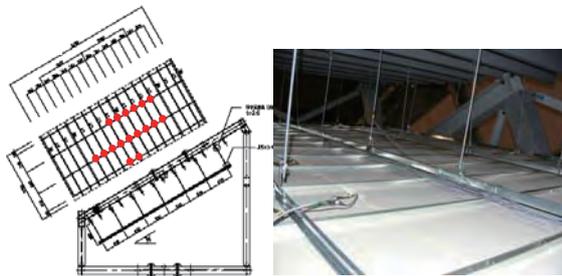
3-3 天井の破壊状況

(1) クリップ脱落時の挙動

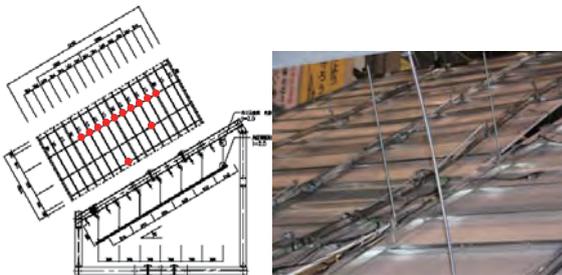
天井面中央部付近のクリップ脱落時の詳細挙動を図一7に示す。図中の写真は、クリップ脱落直前の0.1秒間の写真を、クリップひずみとあわせて示している。

クリップは、脱落する瞬間の0.1~0.2秒前に野縁受けが軸方向回りに大きく傾き、ひずみが数100 μ 増加、2~3度大きな変形を繰り返した後に脱落している。

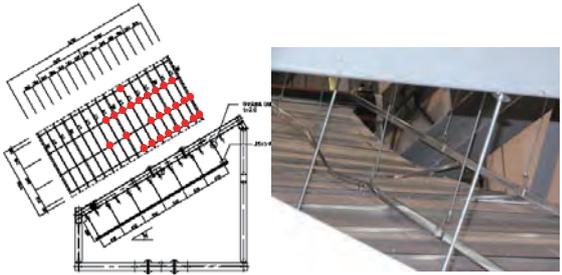
このクリップの外れに前後して他の数個のクリップも外れ、その後、天井の変形が大きく増加していることが確認できる。



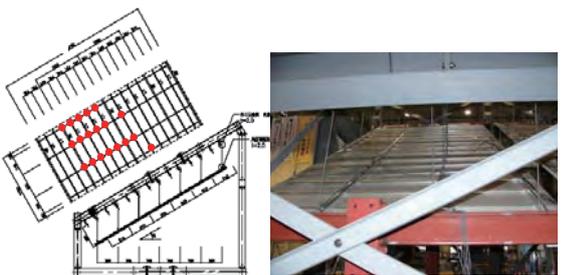
(a) 試験体 1-1



(b) 試験体 1-2



(c) 試験体 1-3



(d) 試験体 1-4

図一8 天井試験体の加振後の状況

(2) 加振後の状況

入力倍率50~60%の加振後の天井試験体の状況を図一8に示す。天井図面中の●はクリップ脱落箇所を示す。

試験体1-1では、野縁受けが軸と直交する方向に若干変形した。クリップも試験体の中央部付近で数カ所外れたものの、天井面が大きく脱落することはなかった。石膏ボードには損傷は見られなかった。

試験体1-2では、加振でハンガーと野縁受けの間で滑りが生じ、最終的には吊りボルトが勾配に対して垂直となり、石膏ボードが面外に押し下げられた。C型チャンネルと吊り金物の嵌合が充分でなく外れる箇所があった。

試験体1-3では、クリップが中央部付近で数カ所脱落、野縁受けが大きく塑性変形した。クリップが脱落した天井面の上端がずり下がったものの、落下はしなかった。

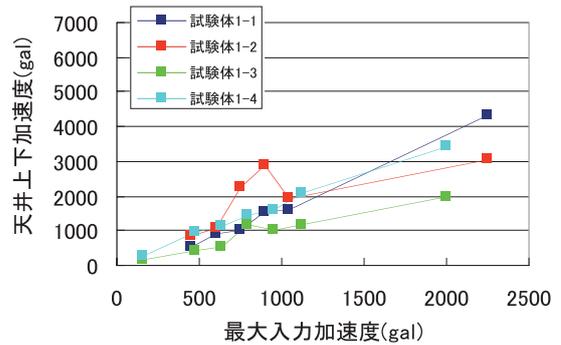
試験体1-4では、野縁受けが軸と直交方向に若干変形した。クリップが試験体の中央部付近で数カ所脱落、天井面が中央部付近で若干垂れ下がった。

(3) 最大応答加速度とクリップ最大ひずみ

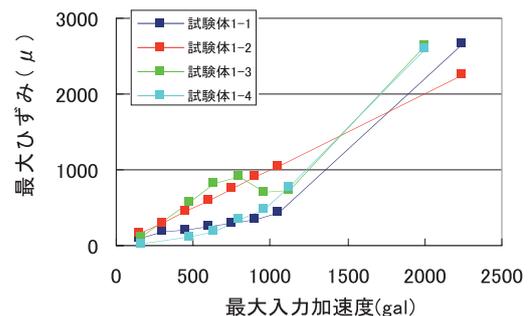
図一9、図一10にそれぞれ各試験ケースの最大入力加速度と天井中央部の加速度、クリップの最大ひずみの関係を示す。

試験体1-1と試験体1-4は天井加速度、最大ひずみの両関係とも概ね同じとなっており、両ケースの吊り方法による差が天井応答に与える影響は少ないことがわかる。これは前述した振動モード形状(図一6(a)と(d))が比較的似ていることからわかる。

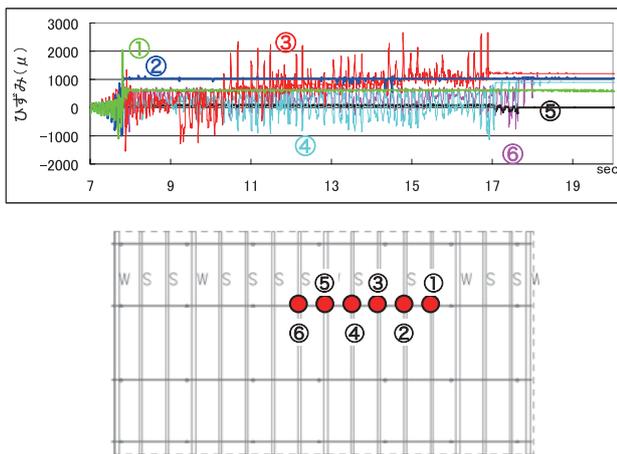
試験体1-2については入力加速度700~1000galの範



図一9 入力加速度と天井応答加速度の関係



図一10 最大入力加速度とクリップひずみの関係



図一11 脱落したクリップのひずみ時刻歴 (試験体 1-1)

囲において特に大きな応答となっているが、これは取り付け金物（前述写真一4 (b)）がわずかに緩み、取り付け部にガタが生じたことが原因である。このガタによる高振動数成分を除くと他ケースと応答加速度に大きな差は見られなかった。同ケースの最大ひずみが大きいのも同じ影響と考えられる。

試験体 1-3 についてはボード枚数が他の試験体の 2 倍であることから、クリップに生じる最大ひずみも約 2 倍となっている。入力加速度が 700 gal 程度から、一部クリップの塑性化、緩みにより、天井固有振動数が低下、天井の応答加速度が他ケースに比較して小さくなっている。

何れのケースも天井応答加速度 2000 gal 程度までは、最大ひずみも 1000 μ 以下であり、クリップの脱落は生じなかった（試験体 1-3 は 1000 gal 程度）。

次に図一11 に試験体 1-1 のクリップに外れが生じた箇所（図中①～⑤）のひずみの時刻歴を示す。クリップは、最初に天井端部①、②がほぼ同時に外れていることがわかる。その後、両クリップ分の力を負担した近傍の③～④のひずみが急激に大きくなり、これらのクリップも数秒で外れており、この部分のクリップが連鎖的に脱落している状況が確認できる。その他の試験ケースにおいてもクリップ脱落位置は異なるものの、クリップ脱落後、その近傍のクリップひずみが急激に大きくなり、連鎖的に外れる同様な傾向が見られた。

§4. まとめ

2001 年芸予地震時に天井の脱落被害が発生した体育館の屋根構面および天井の一部を模擬した試験体を用いた振動台実験を実施した。大規模空間を有する建築物の天井脱落被害につながる損傷を確認した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 今回設定した試験体、実験条件下で、主に天井試験体の中央部にて上下方向の応答加速度が増幅され、天井面の面外への力が生じることを確認した。天井脱落対策を検討する際に留意すべき点である。
- 2) 加振によりクリップが外れる際の挙動を、高速度カメラとひずみ計測を同期させて把握した。
- 3) 入力倍率 50～60% 加振により、天井をより大面積とした場合に天井脱落につながり得る損傷状況を再現した。
- 4) クリップは天井加速度が 2000 gal 程度では脱落しなかった。ただし、それ以上の加速度になると一部のクリップが脱落、その近傍のクリップも連鎖的に脱落することを確認した。
- 5) 吊り方法によるクリップ脱落の顕著な違いは見られなかった。

今回の振動台実験では、天井脱落に繋がる天井の挙動を現象面において明確に捉えることができた。今後の対策のためには構造躯体の応答特性の把握も重要となる。こうした現象を踏まえた天井の耐震対策やそのための定量的な評価等が今後の検討課題となる。

謝辞. 応答解析に用いた地震動は広島県よりご提供いただいた震度計波形データである。また、本研究は(独)建築研究所、西松建設(株)、戸田建設(株)および(財)日本建築センターの共同研究として、平成 21 年度国土交通省建築基準整備促進補助金事業⁶⁾により実施したものである。高速度カメラでの撮影はシナノケンシ(株)に御協力頂いた。記して、関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 腰原幹雄：芸予地震における建物の被害、建築技術、pp.194-197, 2001.7
- 2) 日本建築学会：2000 年鳥取県西部地震災害調査報告・2001 年芸予地震災害調査報告, 2001.10
- 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, pp.367-372, 2002.12
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：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) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：スポパーク松森における天井落下事故調査報告—大空間を有するスポーツ等施設の天井落下—, 2005.8
- 6) 国土交通省住宅局建築指導課：平成 20 年度建築基準整備促進補助金事業募集要領, 2008.8