

在来天井の耐震対策に関する振動台実験



稲井 慎介 *1

中原 理揮 *2 松本喜代隆 *1
 端 直人 *3 矢萩 大作 *2
 山下 英利 *2 宅間 真 *3
 桑 素彦 *2 高山 真一 *2

概 要

近年の大地震により、体育館などの大空間に設置された在来天井の被害が数多く報じられている。建物の主要構造部にほとんど被害はないものの、天井が落下することにより人命が危険にさらされたり、建物が使用不能になるなど数多くの被害が生じている。本報では、在来天井の落下原因を検証するとともに、新たに考案した「制震天井」の耐震性能の検証結果について報告する。

Shaking Table Test on The Earthquake Preparation for The Conventional Ceiling

Shinsuke INAI*1 Masaki NAKAHARA*2
 Kiyotaka MATSUMOTO*1 Naoto HASHI*3
 Daisaku YAHAGI*2 Hidetoshi YAMASHITA*2
 Makoto TAKUMA*3 Motohiko KUWA*2
 Shinichi TAKAYAMA*2

An earthquake in recent years, the gymnasium and the sport facility report many damage of the conventional ceiling. Even if there is no damage in a building, the damage in which use of a building becomes impossible has arisen when ceiling falls. Additionally, there is a problem also about the safety of a human life. This paper reports verification of the cause of fall, and the effect of Ceiling-Control device system.

*1 戸田建設(株) 技術研究所 *2 戸田建設(株) 構造設計部 *3 戸田建設(株) 建築工事技術部

*1 Technical Research Institute, Toda Corp. *2 Structural Engineering Dept., Toda Corp. *3 Architectural Engineering Dept., Toda Corp.

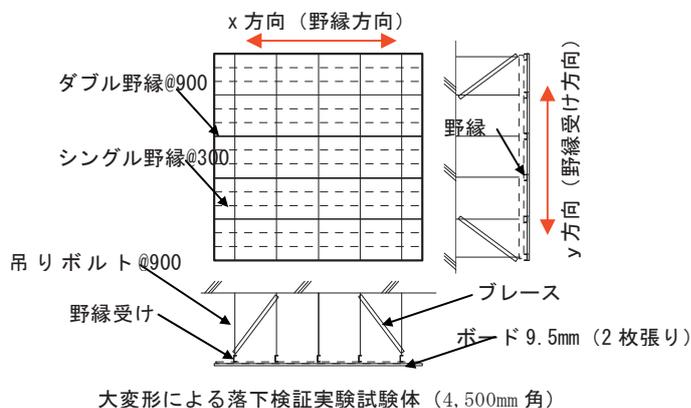
在来天井の耐震対策に関する振動台実験

稲井 慎介*1 中原 理揮*2 松本喜代隆*1
 端 直人*3 矢萩 大作*2 山下 英利*2
 宅間 真*3 桑 素彦*2 高山 真一*2

1. はじめに

近年の大地震により、体育館などの大空間に設置された在来天井の落下被害が数多く報じられている。建物の主要構造部にはほとんど被害はないものの、天井が落下することにより人命が危険にさらされたり、建物が使用不能になるなど数多くの被害が生じている。

このような問題の対策として、在来天井の落下原因を検証するとともに、新たに粘弾性ダンパーを用いた「制震天井」を考案し、その耐震性能を検証した結果について報告する。また、「制震天井」の地震時挙動のシミュレーション解析を行い、実験結果と比較することにより、解析の妥当性を検証する。



2. 全体概要

振動台実験は、天井落下原因の検証実験と、制震天井の性能検証実験の2回に分けて実施した。本報では、以下に示す順序で報告する。

- ①天井落下原因検証実験の概要と実験結果、考察
- ②制震天井の性能検証実験の概要と実験結果
- ③制震天井のシミュレーション解析

3. 天井落下原因検証実験概要

3.1 試験体概要

実験で再現する天井落下要因としては、既往の文献¹⁾でも示されているような大変形による接合部の外れによるもの(以下、大変形による落下実験)と、壁との衝突によるもの(以下、衝突による落下実験)のふたつを想定して行った。

それぞれの試験体の詳細を図-1に、試験体全景を写真-1に示す。試験体は、実大の在来工法による天井の一部を模擬し、天井面の大きさは、大変形による落下実験では4,500mm角とし、衝突による落下実験では3,640mm角とした。後者では、大空間に相当する慣性質量として、中央部に錘(約20m相当分で1.2tf)を天井と固有振動数が同じになるようにボルトの剛性を調整した。石膏ボードと壁部とのクリアランスは、既往の文献²⁾を参考に100mmとした。両者とも、吊りボルトはφ9mm、吊り高さ1,500mm、間隔を900mmで配置した。ブレース(〔38×12×1.2〕は大変形による落下実験ではX、Y方向に4本、衝突による落下実験では6本(3,640mm角)を設置した。

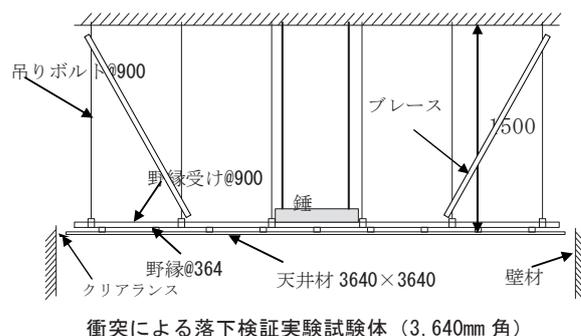


図-1 試験体概要



試験体 (4,500mm角) 試験体 (3,640mm角)

写真-1 試験体全景

3.3 試験ケース

試験ケースを表-1に示す。大変形による落下実験ではEl Centro波を100~900galに振幅調整したものをそれぞれケースE-100x~E-900xとし、900galの加振で上下動を加えたものをケースE-900xzとした。衝突による落下実験はBCJ-L2波の1方向のみでケースB-170x、B-340xとした。

3.4 計測位置

大変形による落下実験の計測機器設置の概要を図-2に示す。計測は、石膏ボード面、野縁および野縁受けに加速度計、石膏ボードと壁部の相対変位測定用に壁部にレーザー変位計、吊りボルトのブレースに軸力計測用のひずみゲージを設置した。

*1 戸田建設(株) 技術研究所 *2 戸田建設(株) 構造設計部 *3 戸田建設(株) 建築工事技術部

表-1 試験ケース

ケース名	天井規模	入力波	入力加速度 (gal)	
			X	Z
大変形による落下検証ケース				
E-100x	□4,500mm	El-Centro	100	—
E-200x			200	—
E-400x			400	—
E-600x			600	—
E-900x			900	—
E-900xz			900	480
衝突による落下検証ケース				
B-170x	□3,640mm	BCJ-L2	170	—
B-340x			340	—

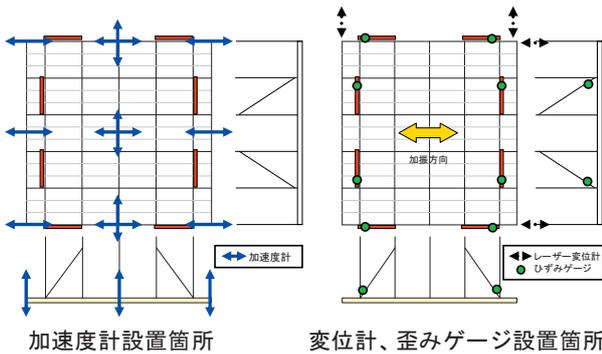


図-2 計測機器設置の概要

4. 天井落下原因検証実験結果

4.1 天井の固有振動数

天井の固有振動数は、大変形による落下実験では約2.1Hz、衝突による落下実験では大空間に相当する慣性重量を付加しているため約1.0Hzであった。また、天井を支持するフレームの固有振動数は約8.9Hzであった。

4.2 大変形による落下検証実験結果

図-3に入力加速度と天井の最大加速度・変位の関係を示す。入力加速度が増大するにしたがい、天井変位は比例的に増大しているが、天井加速度は約270galで頭打ちとなっている。これは、クリップ部に滑りが生じ、地震力が天井に伝達されなかったためと考えられる。

被害状況を写真-2に示す。200galの入力加速度でブレース近傍のクリップにすべりが生じ、400galで一部のクリップが外れ、野縁受けが大きく変形した。以降は入力加速度を増大させても、クリップ部のすべりにより天井変形が大きくなるのみで、天井落下には至らなかった。

上下動を加えた加振(E-900xz)では、ブレース近傍のクリップが大きく上下に変形し、損傷程度も水平加振のみと比較して高かったが、天井落下には至らなかった。

図-4に入力加速度とブレース軸力の関係を示す。ブレース軸力においても、上記と同様にクリップ部のすべりにより地震力がブレースに伝達されていないと考えられ、約1500Nで頭打ちとなった。軸力は100galの入力で約900Nとなり、この値は座屈長さをブレース長さとして仮定したオイラー式から算定される弾性座屈荷重の約1.6倍であるが、ブレースに座屈は生じなかった(座屈長さをブレース長/2とした座屈荷重は下回っている)。

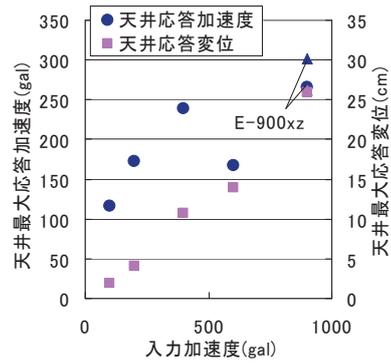


図-3 入力加速度と天井最大応答加速度・応答変位の関係

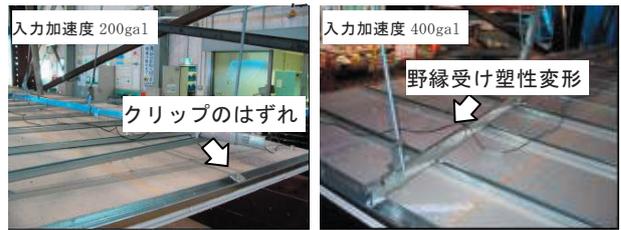


写真-2 大変形による落下実験の被害状況

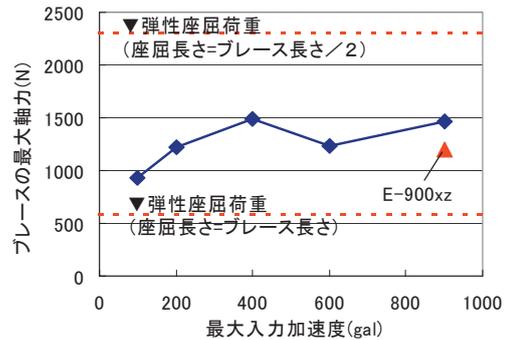


図-4 入力加速度とブレース軸力の関係

また、上下動入力も、ブレース軸力に与える影響は小さかった。

上記より、天井落下に至らない原因として、繰り返し加振によりクリップ部にすべりが生じ、地震力が天井に伝達されないことが考えられる。これを確認するため、補足試験として、最初に水平加速度1260gal、上下加速度1200galでの加振を別途行った。その結果、ブレースが座屈して、クリップが外れ、天井材の全体崩落が発生した(写真-3)。



写真-3 大変形に落下実験の被害状況(参考結果)

4.3 衝突による落下検証実験結果

図-5、図-6に衝突による落下検証実験ケースの天井加速度時刻歴、天井変位時刻歴を示す。ケース

B-170xでは20～60秒の間に壁部と天井ボード端部がわずかに接触し、最大約900galの加速度が生じた。ケースB-340xにおいては、加振10秒後から100秒まで天井と壁部は激しく衝突を繰り返し、2000galを超える加速度が生じた。被害状況を写真-4に示す。ケースB-170xでは天井ボード端部に傷が生じた程度で大きな被害はなかった。一方、ケースB-340xでは、天井と壁が激しく衝突を繰り返したため、野縁に座屈が生じ、天井ボードの一部が落下した(写真-4)。

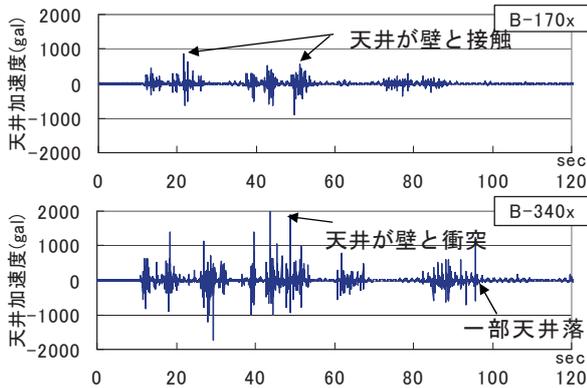


図-5 天井加速度時刻歴(衝突による落下実験)

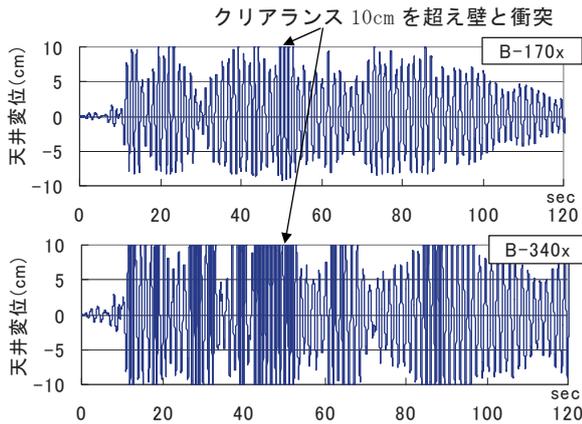


図-6 天井変位時刻歴(衝突による落下実験)



写真-4 衝突による落下実験の被害状況(B-340x)

表-2 各ケースの被害状況一覧

ケース名	天井の被害状況	最大加速度 (gal)	最大変位 (cm)
E-100x	特に目立った被害なし	116	1.9
E-200x	ブレース付近のクリップに滑りが発生	172	4.1
E-400x	クリップが外れ、天井は大きく変形	239	10.7
E-600x	"	168	13.9
E-900x	"	265	25.9
E-900xz	E-900xと比べ、ブレース近傍の上下変位が大きく、損傷度合いも高い	301	26cm以上
B-170x	ブレース付近のクリップに滑りが発生	900	10cm以上
B-340x	天井の一部が壁との衝突により破損	-	10cm以上

4.4 天井の被害状況一覧

表-2に各ケースの被害状況と最大加速度、変位の一覧をまとめて示す。

5. 天井落下原因の考察

天井に大きな変形が生じた場合は、図-7に示すようにブレース近傍のクリップの外れを発端として、その他の部分のクリップが徐々に外れ、天井が落下する可能性が高いと考えられる。また、天井と壁が衝突した場合は、図-8に示すように衝突により野縁が座屈し、野縁に固定されている天井ボードが落下する可能性が高いと考えられる。

いずれのケースにおいても、地震時の入力エネルギーを効果的に吸収し、天井の過大な変形を抑制することが、天井の耐震対策として有効であることがわかる。次章から天井の過大な変形を抑制する「制震ダンパー」とその効果について示す。

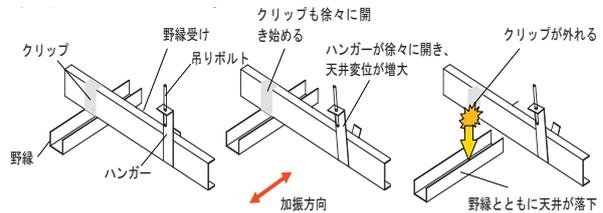


図-7 大変形による天井落下の原因

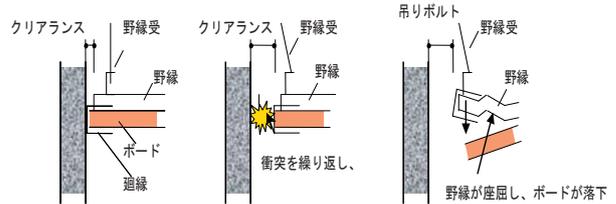


図-8 衝突による天井落下の原因

6. 制震天井の性能検証実験概要

6.1 制震天井概要

制震天井は、粘弾性ダンパーを用いて天井と壁(または上階床)を接合し、地震時の天井の過大な変形を防止する天井である。粘弾性ダンパーの材料はジエン系とした。図-9に制震天井に用いられるダンパー(以下、制震ダンパー)の構成を示す。制震ダンパーは、粘弾性体(30mm×30mm×t10mm)と天井および躯体側に接合するためのプレートで構成され、写真-5に示すように壁、および上階床から取り付けることが可能であり、それぞれ天井の仕様に応じて選択することが可能となっている。

壁取り付けタイプは、躯体側プレートを、アングルを

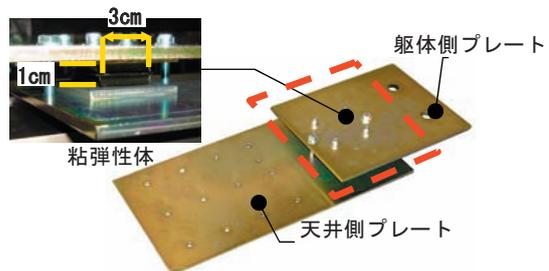


図-9 制震ダンパーの構成

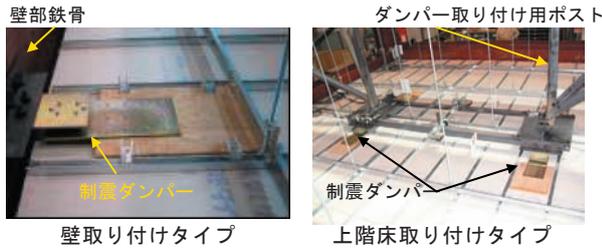


写真-5 制震ダンパーの設置状況

介して壁部鉄骨に、上階床取り付けタイプは、躯体側プレートを上階床に取り付けたポスト先端に、それぞれ取り付け付けた。両者とも天井側プレートはコンパネを介して石膏ボードにビス留めした。

6.2 試験体概要

試験体は、大変形による落下実験と同じ試験体4,500mm角のみとし、吊りボルト仕様、配置はすべて同じとした。ブレースは設置しなかった。試験体の概要と全景をそれぞれ図-10と写真-6に示す。ダンパー個数は予備応答解析より、天井変形が約1~2cmとなるように4~6個とした。

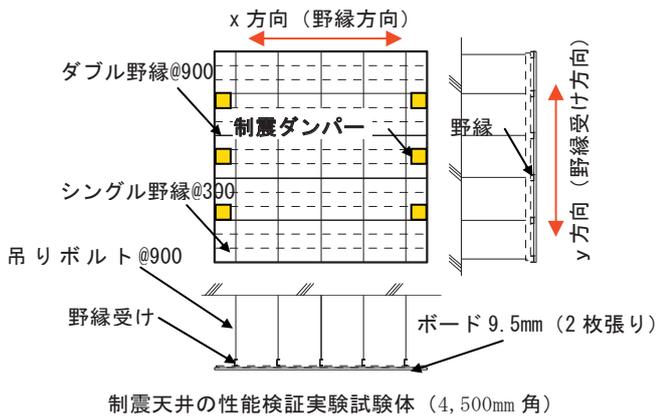


図-10 試験体概要

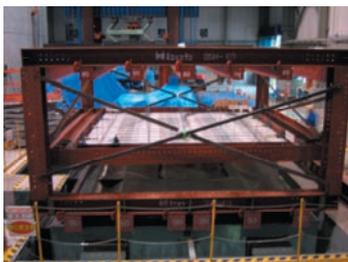


写真-6 試験体全景（制震天井）

6.3 加振概要

入力は、大変形による落下実験と同じEl Centro波を振幅調整したものを用い、試験体の野縁方向への1方向加振、および1方向+上下動加振とした。

6.4 試験ケース

試験ケースを表-3に示す。パラメータは天井の種類、およびダンパー取り付け位置とした。取り付け位置の外周は壁部、中央は上階床に制震ダンパーを取り付けたケースを示す。在来天井のケースは上述したケースと

表-3 試験ケース

ケース名	天井種類	ダンパー		入力加速度 (gal)		
		個数	取り付け位置	x	y	z
E-300x	在来天井	なし	-	300	-	-
E-900x				-	-	
E-900xz				-	480	
D1-300x	制震天井	6箇所	外周	300	-	-
D1-900x				-	-	
D1-900xz				-	480	
D2-380x	制震天井	4箇所	外周	380	-	-
D2-380xy					-	-
D2-380xyz					-	190
D3-380x			中央	380	-	-
D3-380xy					-	-
D3-380xyz					190	160

同じであり、試験体にブレースを設置した。

ケースEとケースD1は制震天井の耐震性能の検証、ケースD2とケースD3はダンパー取り付け位置の違いによる性能比較のために行った。

6.5 計測位置

計測位置は、落下検証実験と同じとした(図-3参照)。

7. 制震天井の性能検証実験結果

7.1 天井の固有振動数

天井の固有振動数はケースEで2.1Hz、ケースD1~D3で、それぞれ4.69Hz、3.81Hz、3.81Hzであった。

7.2 制震天井と在来天井の性能比較

図-11にケースEとケースD1の天井変位の比較を示す。変位は天井両端で計測した平均変位を示している。変位は、ダンパーの有無により大きく異なり、制震天井では、在来天井の1/10以下に抑えられている。ケースEの900gal入力においては、前述したようにクリップが外れ、25cmを超える変形が生じ、天井の一部が損傷したが、ケースD1の制震天井では天井変形は1cm程度であり、被害はまったくみられなかった。また、上下動を加えた場合も、制震天井では、変形に大きな差はみられなかった。

ダンパーを取り付けた制震天井のほうが、固有振動数が高いことから若干大きくなる傾向がみられるが、最大値で比較すると大きな差はみられなかった。

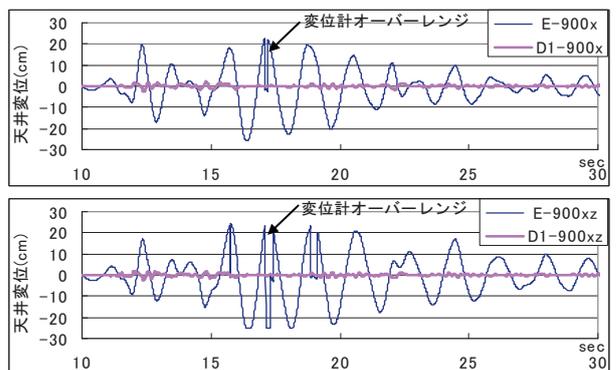


図-11 天井変位時刻歴（在来天井と制震天井の比較）

7.3 ダンパー取り付け位置の違いによる性能比較

図-12にダンパー取り付け位置による天井変位(野縁方向)の比較を示す。図より、ダンパーを外周に取り付けた場合も、中央(上階床から取り付け)に取り付けた場合も応答にほとんど差はなかった。2方向、および3方向入力においても、最大変位にわずかな差はあるものの両者の応答にほとんど差はなかった。

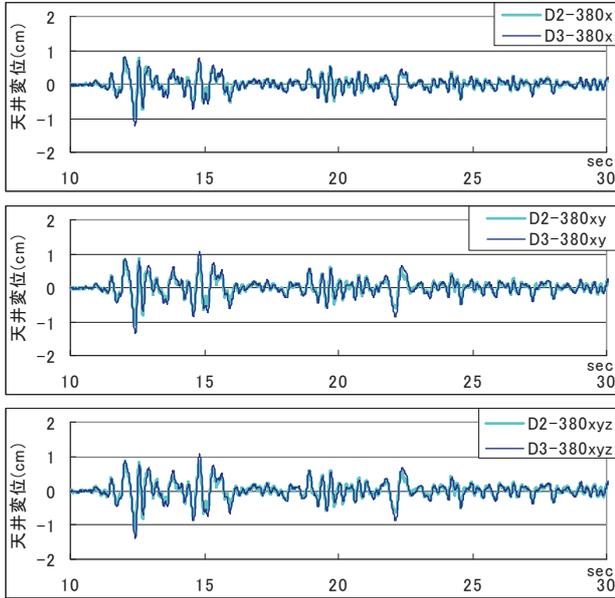


図-12 天井変位時刻歴(野縁方向)

8. 制震天井のシミュレーション解析

制震天井の応答のシミュレーション解析を行い、実験値と比較することにより解析の妥当性を検証した。また、参考として制震ダンパーのない通常の在来天井での実験値と解析値の比較も行った。

図-13に解析モデルを示す。吊りボルト、およびフレームの剛性はそれぞれ実験から得られた固有振動数から設定した(在来天井の吊りボルト剛性はブレースを含む)。ダンパーはバネとダッシュポットを並列に配置してモデル化した。

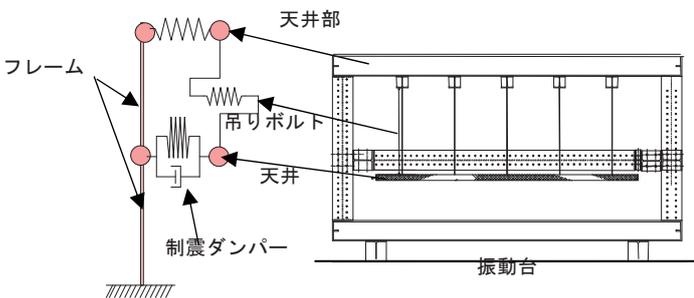


図-13 解析モデル

図-14にケースD1-300xの実験と解析の変位、加速度の時刻歴の比較を示す。両者を比較すると、加速度の最大値において解析値が50%程度大きめの値となっているものの、実験値と解析値は良好な対応を示していることが確認できる。

図-15に制震ダンパーのない通常の在来天井での実験と解析の変位、加速度時刻歴の比較を示す。入力波は上述した制震天井のケースと同じとした。天井の固有振

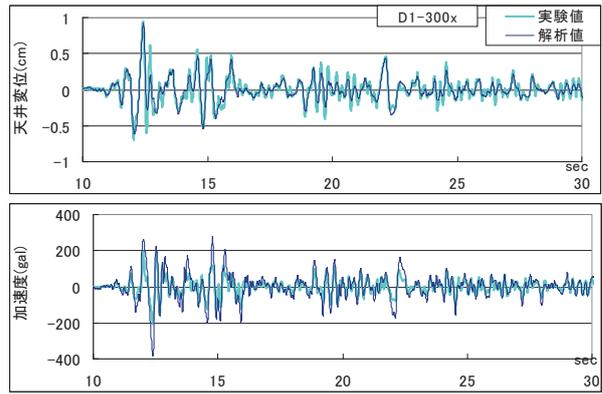


図-14 天井変位・加速度時刻歴の比較

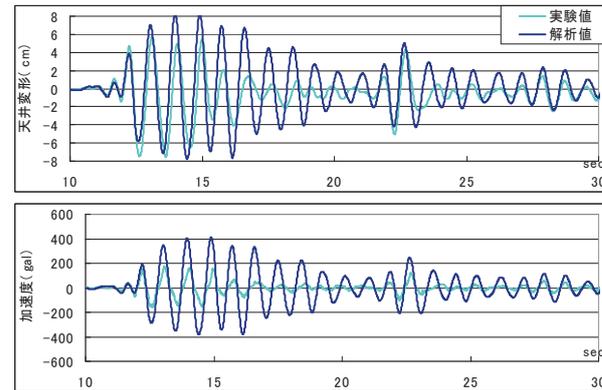


図-15 天井変位・加速度時刻歴の比較(ダンパーなし)

動数は1.1Hzであった。

変位時刻歴をみると加振初期の15秒までは実験と解析は比較的良好的な対応を示しているが、15秒以降は実験ではクリップのすべりと思われる減衰が大きいため、両者はあまり対応していない。また、加速度時刻歴においては、解析のほうが大幅に大きな値となった。これも上記同様、クリップ部の滑りにより、天井ボードに力が伝達されていないことが原因と考えられる。

9. まとめと今後の課題

天井の耐震対策として、落下原因を検証するとともに、粘弾性ダンパーを用いた制震天井を開発し、その耐震性能を検証した。その結果、制震天井は在来天井に比較し、効果的にエネルギーを吸収して天井の過大な変形を防止し、優れた耐震性を有することが確認できた。また、シミュレーション解析により制震天井の挙動をおおむね評価できることを確認した。

今後の課題として、段差天井や不整形な天井への適用、低コスト化、施工の簡略化などの改良を加えていく予定である。

【参考文献】

- 1) 2003年十勝沖地震における空港ターミナル等の天井の被害に関する現地調査報告、国土交通省国土技術政策総合研究所、2003.10
- 2) 体育館等の天井の耐震設計ガイドライン、(財)日本建築センター、1998.3
- 3) 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領、日本建築学会、2003