在来天井の耐震対策に関する振動台実験 一制震天井システム工法の開発一

Shaking Table Test on The Earthquake Preparation for The Conventional Ceiling

—Development of Ceiling-Control Device System—

金川 基* 高橋 孝二**

Motoi Kanagawa Koji Takahashi
飯塚 信一* 鹿籠 泰幸***

Shinichi Iizuka Yasuyuki Shikamori

要 約

2003年の十勝沖地震では公共性の高い空港ロビーや管制塔の天井が落下し、また、2005年の宮城県沖地震ではプールの天井が落下した等、地震による在来天井の落下被害が報じられている。

このような状況を踏まえ、本研究では、在来天井を対象とした天井材等の非構造部材の損傷・落下の原因究明と対策の方針を得るための振動台実験を実施し、指針等による従来の対策法(十分なクリアランスをとる等)に代わる簡便で有効な対策方法を提案する.

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 天井破壊メカニズム実験
- § 3. 天井落下防止対策実験
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

近年の大地震により、体育館等の大空間に設置された 在来天井の落下被害¹⁾ が報じられていることから、本研 究では、在来天井を対象とした天井等の非構造部材の損 傷・落下の原因究明と対策の方針を得るため、はじめに 天井材の損傷・落下メカニズムの把握のための振動台に よる検証実験を行い、次いで天井材破壊防止対策につい て振動台による対策効果確認実験を行った.

対策方法については、多種考えられるが、学会指針等による従来の対策法、つまり、十分なクリアランスをとる等は、省エネ等の問題から困難であると判断し、それに代わる簡便で有効な対策方法を検討とした。

* 技術研究所技術研究部建築技術研究課

§2. 天井破壊メカニズム実験

2-1 実験概要

(1) 試験体および実験方法

試験体は、実物の材料を使用し、在来工法による天井(石膏ボード 1 枚貼り)を対象とした。試験体の概要を図ー1 および写真ー1 に示す。天井は、在来天井の一部を模擬し、天井面の大きさ 3,640×3,640 mm、吊りボルト(ϕ 9 mm)長さを 1,500 mm、間隔を 900 mm ピッチで配置した。また、大空間に相当する慣性質量として、中央部に錘(約 20 m 相当分で 1.2 tf)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て設置した。ボード部と壁部との衝突までのクリアランスは、既往の文献 2)を参考に、約 100 mm とした。

(2) 加振方法および計測方法

加振は、西松建設㈱所有の3軸6自由度振動台(テーブル寸法5,500×5,500 mm, 定格積載重量30 tf, 最大加速度2 G)を用いた.入力は、正弦波(ランダム波加振から求めた固有振動数1.0 Hz, 加速度レベル200 gal)とBCJ L2(原波加速度レベル355 gal)の野縁方向への1方向とした.

計測は,野縁と野縁受けの中央部および端部に加速度 計を設置し,また,ボード部と壁部の相対変位測定のため壁部にレーザー変位計を設置した.

^{**} 建築設計部構造課

^{***}技術研究所技術研究部

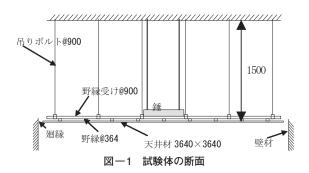




写真-1 試験体の全景

2-2 実験結果

(1) 正弦波加振

正弦波入力時の試験結果を図-2 および写真-2 に示す。実験経過は、加振後変位振幅が徐々に増幅し30 秒付近からボート端部が壁部と激しく衝突し、50 秒付近から共振により天井の揺れがさらに大きくなり、最終的に破壊に至った。

(2) BCJ L2 波加振

BCJ L2 波入力時の試験結果を図一3 および写真一3 に示す。BCJ-L2 原波の入力では、加振後 10 秒でボード部と壁が激しく衝突を繰り返し、最終的に天井材は破壊した。

2-3 天井落下メカニズムの検証

正弦波および BCJ L2 波の加振結果より, 天井落下に 至る過程は, まず繰り返し壁部に衝突したボードが徐々 に破損し, その後, 野縁部が直接壁と接触しながら, 共 振的に変位振幅が増大し, 野縁部の座屈が起こり, 野縁 に固定しているボードが落下する.

天井落下メカニズムを図-4に示す.

天井落下メカニズムを検証した結果, 天井と天井周辺部材の衝突をいかに防止するかが重要であることが確認された. そこで, 天井と外周の壁に相当する部分の間に粘弾性ダンパーを配置し, 天井と天井外周部材との衝突を防止するとともに, 天井の変位応答を抑制することを目的とした天井落下防止対策を立案し, その効果について検証した.

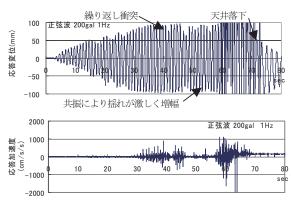


図-2 応答変位と応答加速度の時刻歴波形(正弦波)









写真一2 最終破壊状況(正弦波)

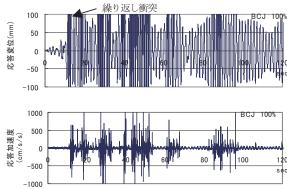
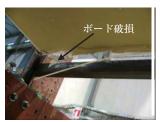
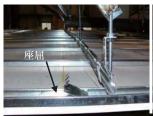
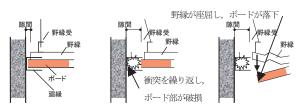


図-3 応答変位と応答加速度の時刻歴波形 (BCJ L2 波)





写真一3 最終破壊状況 (BCJ L2 波)



図一4 天井落下メカニズム

§ 3. 天井落下防止対策実験

3-1 実験概要

(1) 試験体

試験体の概要を図-5 および写真-4 に示す。天井は、石膏ボード 2 枚貼りとし、前節での天井をスケールアップして $4,500 \times 4,500$ mm とし、吊りボルト (ϕ 9 mm) 長さを 1,500 mm, 間隔を 900 mm ピッチで配置した。ボード部と壁部とのクリアランスは、約 50 mm とした。試験体諸元を表-1 に示す。試験体は、在来天井および粘弾性ダンパーによる対策を施したケースを基本として、粘弾性ダンパーの設置箇所(外周:壁側に設置、中央:上階梁またはスラブから吊り下げた剛なフレームに設置。それぞれの設置状況については写真-5参照)、個数および種類(水平 360 度に効果を発揮する全方向型および水平一方向に効果を発揮する一方向型)とした。また、在来天井の吊りボルトには、ハの字型にブレース([-38)を設置している。

(2) 天井落下防止装置

天井落下防止装置として採用した粘弾性ダンパーの形状(全方向型)を図-6および写真-6に示す. 粘弾性

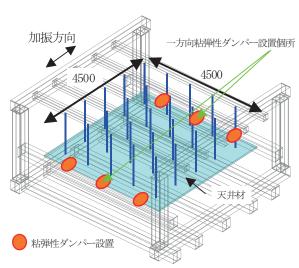


図-5 試験体の概要



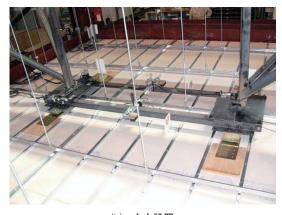
写真-4 試験体の全景

表一1 試験体諸元

		粘弹	単性ダンク		
No.	項目	設置部	種	類	吊りボルト ブレース数
			全方向	一方向	
No. 1	在来天井	_	_	_	4
No. 2		外周	6 基	_	_
No. 3	対策天井	外周	4 基	2 基	_
No. 4		外周	4 基		_
No. 5		中央	4 基	_	_



(a) 外周設置



(b) 中央設置 写真-5 粘弾性ダンパー設置状況

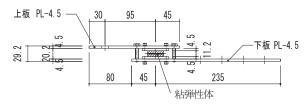
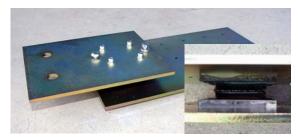
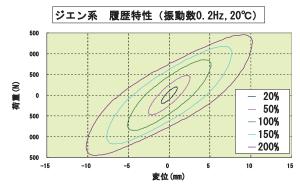


図-6 粘弾性ダンパーの形状(全方向型)



写真一6 粘弾性ダンパー (全方向型)



図一7 粘弾性ダンパーの履歴特性

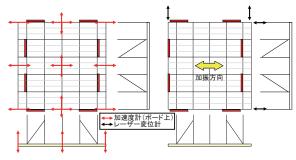


図-8 計測機器設置の概要

ダンパーは、粘弾性体を SDM-1 (ジエン系) とし、厚さ 4.5 mm の鉄板 (SS400) の間に高さ 11.2 mm, 面積 $30 \times 30 \text{ mm}$ の粘弾性体を設置した構成であり、この鉄板が天井材ボード部と壁部に接続されることで粘弾性体にせん 断力が伝達され振動を吸収する仕組みとなっている. 粘弾性ダンパーの履歴特性(振動数 0.2 Hz, 温度 20 度, せん断伸び $20 \sim 200\%$)を図-7に示す. また,粘弾性ダンパー1 基あたりの等価剛性および等価粘性減衰は,17.6 N/mm および 1.3 N·sec/mm である.

(3) 加振方法および計測方法

入力は、El Centro、Taft、八戸 および BCJ L2 を用い、 試験体の野縁方向への 1 方向加振を基本とした.

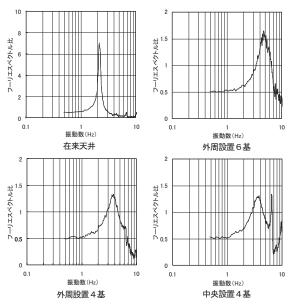
計測機器設置の概要を**図**-8 に示す. 計測は, ボード 面に加速度計を設置し, また, ボード部と壁部の相対変 位測定のため壁部にレーザー変位計を設置した.

3-2 実験結果

(1) ランダム波入力による天井の振動特性

在来天井および粘弾性ダンパー配置状況の違いによる 天井の固有振動数を調査するためランダム波加振を行っ た. 天井の振動特性を図一9に, 天井等の固有振動数の 一覧を表-2にそれぞれ示す. 在来天井に比べ対策天井 では粘弾性ダンパーの設置数に応じて固有振動数が高く なっていることがわかる.

また, 試験体を支えるフレームは加振方向である野縁 方向に対して, 試験体よりも固有振動数が高くなってい



図一9 天井の振動特性

表一2 天井等の固有振動数一覧

No.	項目	粘弾性ダンパー				固有振動数	
		設置部	種類		吊りボルト	野縁	野縁
			全方向	一方向	ブレース数	方向	受け 方向
						(Hz)	(Hz)
No. 1	在来天井	_			4 基	2.12	_
No. 2		外周	6 基	_	_	4.69	_
No. 3	対策天井	外周	4 基	2 基		4.69	_
No. 4				4 基	_	_	3.81
No. 5		中央	4 基		_	3.81	_
	フレーム	_		_	_	8.69	4.88

ることが確認できる.

(2) 在来天井と対策天井の比較

在来天井と対策天井の比較のため、El Centro NS 波を100~1,400 gal に基準化して入力した場合の実験結果の一覧(最大応答変位)を表一3に示す。また、入力レベル300 gal 時の天井の応答変位および応答加速度の時刻歴を図一10 および図一11 に示す。表一3より、天井に粘弾性ダンパーを設置することで、応答加速度はほぼ同等で、応答変位を約10%にまで低減でき、入力波の加速度レベルによらず、大幅な応答変位低減効果が見られた。

(3) 全方向型と一方向型の比較

全方向型および一方向型粘弾性ダンパーの性能比較のため、El Centro、Taft EW, 八戸 NS および BCJ L2 波の原波を入力した場合の実験結果の一覧(最大応答変位)を表一4 に示す。また、Taft EW 波入力(野縁方向)時および El Centro EW 波入力(野縁受け方向)時の天井の応答変位の時刻歴を図―12 および図―13 に示す。表―4

表一3 在来天井と対策天井の比較

,	実験結果				
種類	野縁 方向 (gal)	野縁受け 方向 (gal)	在来天井 No.1 (mm)	対策天井 No.2 (mm)	No.2/ No.1 (%)
	100	_	19.6	1.8	9
El Canton NO	200	_	43.7	3.6	8
El Centro NS	300	_	67.0	5.3	8
	1400	_	248.2	24.8	10

表一4 全方向型と一方向型の比較

入力波	野縁 方向 (gal)	野縁受け 方向 (gal)	対策天井 No.2 (mm)	対策天井 No.3 (mm)	No.3/ No.2 (%)
El Centro NS	372	_	7.9	5.8	74
Taft EW	152	_	2.7	2.8	102
八戸 NS	206	_	5.5	5.1	92
BCJ L2	348		11.2	10.3	92
El Centro EW	_	192	9.7	9.4	98

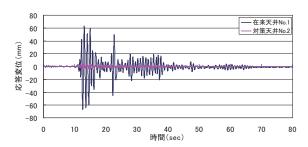


図-10 応答変位時刻歴 (El Centro NS 300 gal 時)

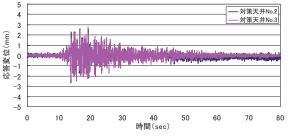


図-12 応答変位時刻歴(Taft EW 原波:野縁方向)

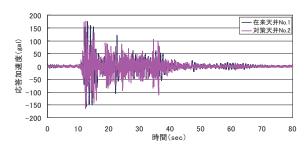
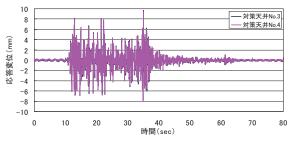


図-11 応答加速度時刻歴 (El Centro NS 300 gal 時)



図一13 応答変位時刻歴 (El Centro EW 原波:野縁受け方向)

より、2基の一方向型粘弾性ダンパーが作用して合計 6 基が作用する野縁方向加振では、El Centro NS 波で若干 応答変位に差が見られるが、その他の入力波においては ほぼ同等となっている。また、2基の一方向型粘弾性ダ ンパーが作用しない野縁受け方向加振では、粘弾性ダン パー4基での実験結果と同等であり、一方向型粘弾性ダ ンパーが想定方向以外には作用しないことを確認した。

(4) 設置場所による比較

粘弾性ダンパーの設置場所による性能比較のため、E1 Centro NS, Taft EW, 八戸 NS および BCJ L2 波の原波を入力した場合の実験結果の一覧(最大応答変位)を表一5 に示す。また、BCJ L2 波入力時の天井の応答変位の時刻歴を図一14 に示す。表一5 より、今回検討した入力では、応答変位はほぼ同様の値であり、設置場所によらず応答変位低減効果が見られた。

表一5 設置場所による比較

入力波	野縁 方向 (gal)	野縁受け 方向 (gal)	対策天井 No.4 (mm)	対策天井 No.5 (mm)	No.5/ No.4 (%)
El Centro NS	372	_	10.2	9.4	93
Taft EW	155	_	4.7	4.4	94
八戸 NS	205	_	7.7	6.8	88
BCJ L2	343	_	20.3	20.7	102

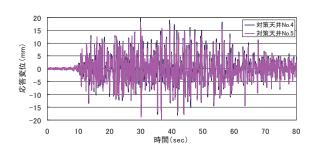


図-14 応答変位時刻歴 (BCJ L2 原波)

§ 4. おわりに

今回実施した振動台実験により、以下のことが明らかとなった.

- (1) 天井落下メカニズムは、繰り返し壁部に衝突したボードが徐々に破損し、その後、野縁部が直接壁と接触しながら、共振的に変位振幅が増大し、野縁部の座屈が起こり、野縁に固定しているボードが落下する.
- (2) 在来天井に粘弾性ダンパーを設置することで,応答加速度はほぼ同等で,応答変位を約10%にまで低減でき,入力波の加速度レベルによらず,大幅な応答変位低減効果が見られた.
- (3) 一方向型粘弾性ダンパーは、想定方向においては 全方向型と同等の応答変位低減効果が見られ、想 定方向外については作用しないことを確認した.

(4) 粘弾性ダンパーの設置場所について、壁に接続する場合と上階梁またはスラブから吊り下げたフレームに接続する場合の実験を行ったが、接続場所によらず応答変位低減効果が見られた.

謝辞:本研究は、戸田建設㈱との共同研究にて実施され、 本論作成にあたり、多大なるご協力を頂いた.記して謝 意を表します.

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.