

隙間を有さない在来工法天井の耐震性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF CEILING WITHOUT CLEARANCE

稲井 慎介^{*1}, 渡壁 守正^{*2}, 森田 泰弘^{*1}
Shinsuke INAI, Morimasa WATAKABE and Yasuhiro MORITA

In recent years, suspended ceilings were often damaged by earthquakes. Investigations on seismic capacity of ceilings have been conducted by some researchers. The new standard for ceilings against earthquakes requires a relatively large clearance around those to prevent collision with surrounding walls. On the other hand, there are still the needs for ceilings without clearance because of workability or room's uses. When considering the seismic capacity of the ceiling without clearance, confirming the strength and stiffness are important. In addition, verifying the impact force when the ceiling has an impact with the surrounding walls is important. In this paper, it was verified by these experiments are shown below.

- (1) Bending stiffness and strength of steel furring suspended ceiling system are clarified by static bending tests.
- (2) Mechanical properties of steel furring suspended ceiling system for in-plane compression are clarified by static compression tests.
- (3) Verifying the impact force by vibration tests when the ceiling has an impact with the surrounding walls.
- (4) Verifying the impact force by large-scale excitation tests when the ceiling has an impact with the surrounding walls.

Keywords : Ceilings, Clearance, Static Compression Tests, Vibration Table Tests, Dynamic Tests
天井, クリアランス, 静的圧縮実験, 振動台実験, 加振実験

1. はじめに

近年、天井の脱落被害が注目され、その耐震対策の検討が進められている。2014 年 4 月 1 日からは天井告示(平成 25 年国交告第 771 号¹⁾等)が施行され、特定天井を対象とした天井の耐震対策が示された。告示では地震時の水平力を斜め部材で負担し、天井が周囲の壁等と衝突しないよう所定のクリアランスを設けることが前提となっている(図-1(a))。一方で、建物用途(音響に配慮する必要があるホールや、気密性の求められるクリーンルーム等)や施工性などを考えた場合、周囲にクリアランス設けない天井(図-1(b))に対するニーズも多い。クリアランスを設けない天井では、地震時の水平力を天井の面内剛性により、周囲の壁等に伝達するため、天井の耐震対策を検討する上では、その剛性や耐力を把握しておくことが重要であり、これまで多くの報告がされている(例えば^{2)~5)}。また、施工誤差等により天井と周囲の壁等との間に隙間(以下、ギャップと呼ぶ)が生じ、地震時に天井が周囲と衝突し、天井に衝撃力が作用することが考えられる。本報では、

面外曲げ実験、静的面内圧縮実験、振動台実験、及び加振実験により、天井の剛性、耐力、天井に作用する衝撃力、および破壊形態について検討した結果報告⁷⁾に加え、当該報告に関連した検討結果の概要を紹介するものである。

2. 実験概要と実験方法

図-2 に実験の全体概要を示す。実験的検討は大きくは耐力と外力(衝撃力)に分けて行った。試験体はすべて鋼製下地吊り天井(以下、在来工法天井)とし、耐力の把握は、静的実験として、天井面の面内圧縮実験や曲げ実験を、外力の把握は動的实验として振動台実験と大規模天井の加振実験を実施した。

図-3 に試験体記号の一覧を示す。実験結果の比較がしやすいよう各試験体記号は、それぞれの実験で共通の記号を用いている。

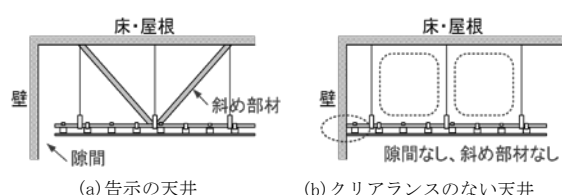
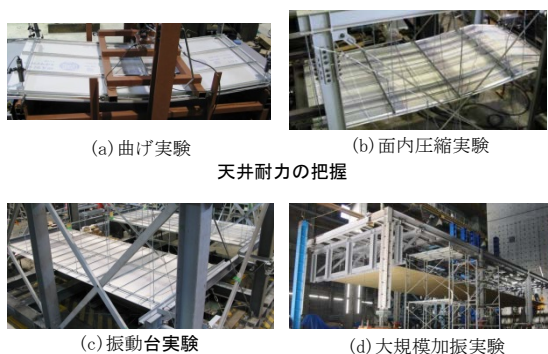


図-1 天井の仕様



天井に作用する外力の把握
図-2 実験の全体概要

*1 戸田建設(株)開発センター

*2 戸田建設(株)開発センター 工博

Research and Development Center, TODA CORPORATION

Research and Development Center, TODA CORPORATION, Dr.Eng.

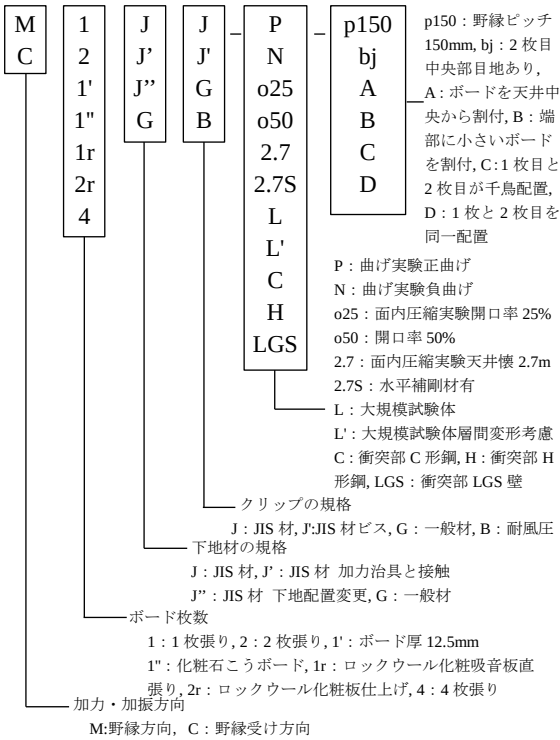


図-3 試験体記号一覧

2.1 曲げ実験

図-4、表-1 にそれぞれ試験体と試験体一覧を示す。試験体寸法は 910mm×1820mm とした。面材は石こうボード、ロックウール化粧吸音板(1r)、天井用化粧石こうボード(2r)の3種類を用い、下地のクリップ、野縁、野縁受けは JIS 材 19 形又は一般材 19 形を用いた。パラメータは、下地材の方向、加力の正負、野縁ピッチ、面材種類、ボードの枚数、下地材の種類とした。表中の重量は実測による。加力は、スパン 1620mm で試験体を単純支持した上で、上部に設置したパンタグラフジャッキ（容量 8kN）により 3 等分線 2 線荷重を単調载荷として加えた。

ジャッキに取り付けたロードセルにより荷重を、スパン中央に取り付けたレーザー変位計によりたわみを測定した。また、支点付近で浮き上がりや傾きが生じないことを確認するため端部にも変位計を設置した。下地材側から加力する場合を正曲げ、ボード面側から加力する場合を負曲げとした。試験状況を写真-1 に示す。

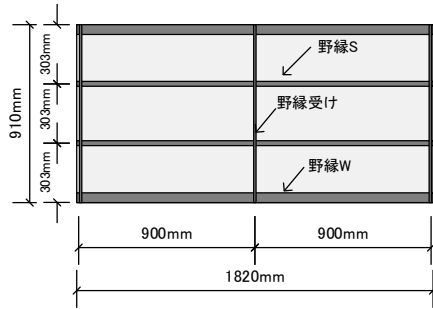
表-1 試験体一覧（曲げ実験）

No.	試験体記号	単位面積重量(N/m ²)	最大荷重(kN)	単位幅当たりの曲げ剛性(kNm ² /m)	対面圧縮に対する単位幅当たりの座屈荷重(kN/m)
1	M1JJ-P	89	0.98	3.21	17.4
2	M1JJ-N-1	89	1.26	2.42	13.1
3	M1JJ-N-1	87	1.17	2.29	12.4
4	M1JJ-N-1	89	1.32	2.53	13.7
5	M1GJ-P	82	0.65	2.42	13.4
6	M1GJ-N	83	1.20	2.30	12.5
7	M1JJ-P-p150	98	1.66	4.33	23.5
8	M1GJ-P-p150	90	1.11	3.62	19.6
9	M2jj-P	153	1.34	4.19	22.7
10	M2JJ-P-bj	153	1300	3.80	20.6
11	M2JJ-N-bj	153	1.52	3.33	18.1
12	M2GJ-P	129	1.01	4.46	24.2
13	M1'JJ-P	87	1.03	3.53	19.1
14	M2rJJ-P	124	1.06	2.99	16.2
15	M1rJJ-P	41	0.97	2.22	12.0
16	M1JB-P	94	1.04	2.66	14.4
17	M1JB-N	93	1.46	2.68	14.5
18	C1JJ-P	86	1.33	6.28	19.1
19	C1JJ-N	89	1.53	5.96	18.2
20	C2JJ-P	154	1.41	7.12	21.7
21	C2JJ-P-bj	154	1.11	7.63	23.2
22	C2JJ-N	154	1.57	6.58	20.0
23	C2JJ-N-bj	154	1.58	6.61	20.1
24	C1''JJ-P-bj	107	1.26	5.96	18.2
25	C1rJJ-P-bj	68	0.95	4.58	14.0
26	C1''JJ-P-bj	90	1.47	5.54	16.9
27	C1JB-P	93	2.03	7.04	21.4
28	C1JB-N	93	2.14	6.37	19.4

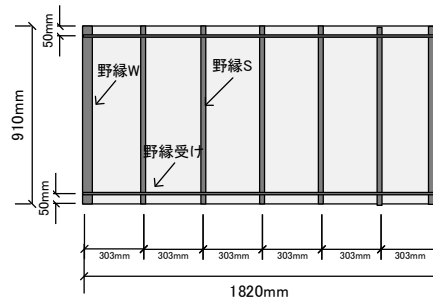


(a) 正曲げ (b) 負曲げ

写真-1 実験状況（曲げ実験）



(a) 野縁方向加力



(b) 野縁受け方向加力

図-4 試験体（曲げ実験）

2.2 面内圧縮実験

面内圧縮実験の天井構成材の仕様を表-2に、試験体を図-5、図-6にそれぞれ示す。

試験体は、平面寸法が1.82m×3.85m（約7m²）の小規模試験体と、16.5×4.8m（約80m²）の大規模試験体の2種類とした。前者は各種パラメータの影響を確認するため、後者は天井規模が力学特性に及ぼす影響を確認することを目的とした。

吊元は吊りボルトを上部フレームにナットで締め付けて固定した。

圧縮力をボードのみに作用させるため、下地材は図の左右の端より20mm内側までとした。下地材とボードはビス留め（周辺は約15cm、中央は約20cm間隔）とした。大規模試験体には耐風圧クリップを用いた。

表-3に試験体一覧を示す。実験パラメータは、天井サイズ、圧縮方向、ボードの枚数、ボード割付（図-7）、天井懐、クリップの種類、開口の有無、開口サイズ（図-8）とした。表中の損傷震度×長さは単位幅当たりの耐力を単位重量で除して算出した値であり、天井の耐力を長さの単位で示したものである。

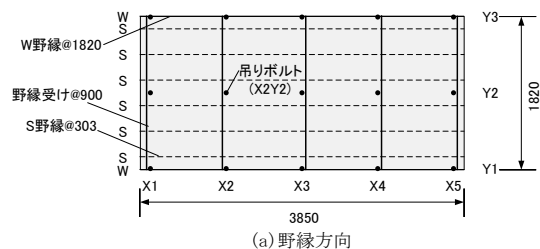
小規模試験体を例に加力方法を図-9に示す。実験は、鉄骨フレームから吊り下げた天井の両端をH形鋼（加力梁）に当て、片側からジャッキにより水平

に載荷することにより行った。大規模試験体も同様の方法で実施した。

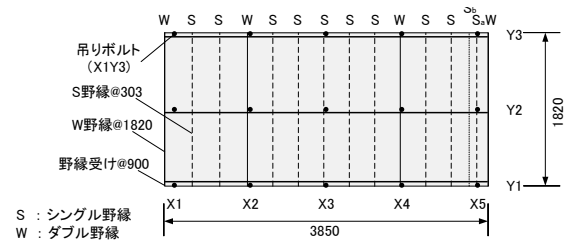
計測は、載荷荷重をジャッキに設置したロードセル、天井面水平変位をレーザー変位計を用いて行った。ロードセルは、小規模試験体では加力側の両端2箇

表-2 天井構成材の仕様（面内圧縮実験）

項目	仕様	
	小規模試験体	大規模試験体
試験体長さ	3,850mm	16,500mm
試験体幅	1,820mm	4,800mm
吊りボルト	3/8@900mm	3/8@900mm
天井懐	1,500mm/2,700mm	1,500mm
野縁受け	CC-19@900mm	CC-19@900mm
水平補剛材	CC-19@1,800mm (天井懐 2,700mm)	-
ハンガー	JIS ハンガー	JIS ハンガー
シングル野縁	CS-19@303mm	CS-19@303mm
ダブル野縁	CW-19@1,820mm	CW-19@1,820mm
シングルクリップ	CS-19/耐風圧 クリップ@303mm	耐風圧クリップ @303mm
ダブルクリップ	CW-19/耐風圧 クリップ@1,820mm	耐風圧クリップ @1,820mm
面材	石こうボード 9.5mm 1枚張り/2枚張	石こうボード 9.5mm 2枚張

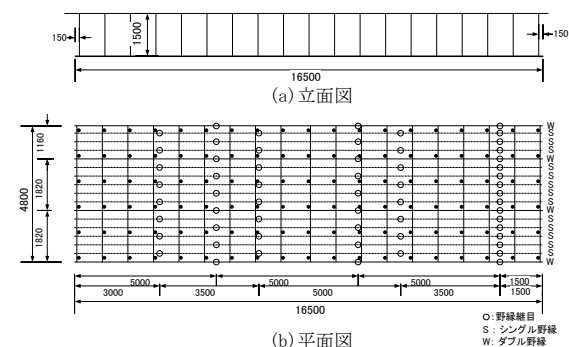


(a) 野縁方向

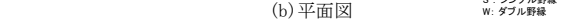


(b) 野縁受け方向

図-5 小規模試験体（面内圧縮実験）



(a) 立面図



(b) 平面図

図-6 大規模試験体（面内圧縮実験）

所、大規模試験体では加力側両端と中央の3箇所に設置した。変位計は、小規模試験体、大規模試験体とも加力側とその反対側（以下、反力壁側）の両端2箇所（計4箇所）に加力方向が正となるように設置し、両者の差（加力側、反力壁側とも平均値）から天井の変形を算出した。

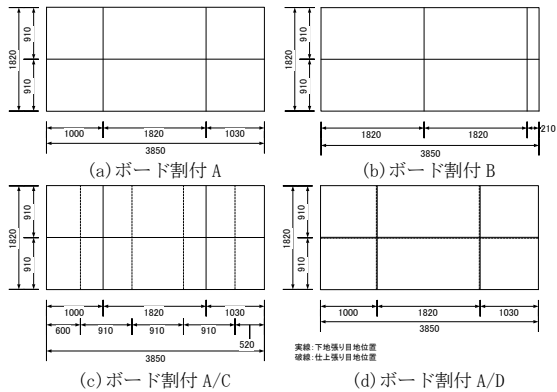


図-7 ボードの割付（面内圧縮実験）

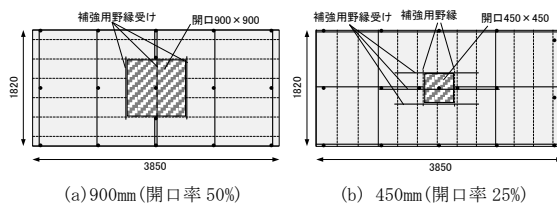


図-8 開口サイズ（面内圧縮実験）

2.3 振動台実験

表-4 に試験体一覧を、図-10 に試験体の概要をそれぞれ示す。試験体は4.85m×2.12mとし、天井懷は1.5mとした。パラメータは、加力方向、ボード枚数、ギャップ、及び衝突部の仕様とした。表中の天井周期、減衰定数は自由振動から、剛性比は衝突時の荷重変形関係から得られた剛性と天井剛性から求めた。また、反発係数は衝突直前と衝突後の速度比から算出した。計測は天井吊元の加速度、天井面の加速度、

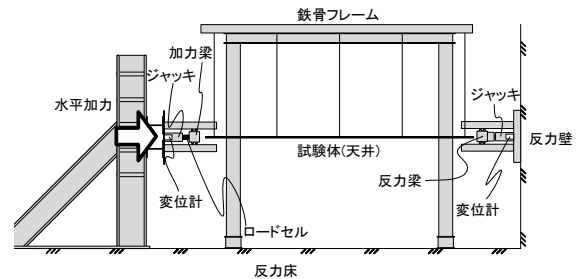


図-9 実験方法（面内圧縮実験）



(a) 小規模実験

(b) 大規模実験

写真-2 実験状況（面内圧縮実験）

表-3 試験体一覧（面内圧縮実験）

No.	試験体記号	圧縮方向	平面寸法(m) (圧縮方向 ×幅方向)	ポ-ト [*] 枚数	ポ-ト [*] 割付※1	天井懷 (m)	クリップ [*] 種類	水平 補剛材	開口率 (%)	単位面積 重量 (N/m ²)	単位幅当たり 損傷荷重 (kN/m)	損傷震度 ×長さ (m)
1	M1JJ	野縁	3.85×1.82	1	A	1.5	JIS	-	-	82.0	13.53	165
2	M1J'J	野縁	3.85×1.82	1	A	1.5	JIS	-	-	82.0	11.80	144
3	C1JJ	野縁受	3.85×1.82	1	A	1.5	JIS	-	-	81.6	16.50	202
4	C1JJ-B	野縁受	3.85×1.82	1	B	1.5	JIS	-	-	81.6	16.10	197
5	M2JJ-C	野縁	3.85×1.82	2	A/C	1.5	JIS	-	-	143.3	22.70	158
6	M1GJ-N	野縁受	3.85×1.82	2	A/C	1.5	JIS	-	-	143.0	14.10	99
7	C2JJ-D	野縁受	3.85×1.82	2	A/D	1.5	JIS	-	-	143.0	22.80	159
8	M1JJ-2.7	野縁	3.85×1.82	1	A	2.7	JIS	-	-	82.0	11.30	138
9	C1JJ-2.7	野縁受	3.85×1.82	1	A	2.7	JIS	-	-	81.6	9.20	113
10	C2JJ-2.7-C	野縁受	3.85×1.82	2	A/C	2.7	JIS	-	-	143.0	9.10	64
11	M1JJ-2.7S	野縁	3.85×1.82	1	A	2.7	JIS	有	-	82.0	15.66	191
12	C1JJ-2.7S	野縁受	3.85×1.82	1	A	2.7	JIS	有	-	81.6	12.20	149
13	M1JJ-o50	野縁	3.85×1.82	1	A	1.5	JIS	-	50	74.9	12.81	171
14	M1J'J-o50	野縁	3.85×1.82	1	A	1.5	JIS	-	50	74.9	15.44	206
15	M1GJ-o50	野縁	3.85×1.82	1	A	1.5	JIS	-	50	74.9	8.27	110
16	C1JJ-o50	野縁受	3.85×1.82	1	A	1.5	JIS	-	50	73.3	11.43	156
17	C1JJ-o25	野縁受	3.85×1.82	1	A	1.5	JIS	-	25	81.5	17.99	221
18	M2JB-L	野縁	16.5×4.80	2	A/C	1.5	耐風圧	-	-	141.7	17.11	121
19	C2JB-L	野縁受	16.5×4.80	2	A/C	1.5	耐風圧	-	-	141.6	19.03	134
20	M1JB	野縁	3.85×1.82	1	A	1.5	耐風圧	-	-	84.7	12.15	144
21	C1JB	野縁受	3.85×1.82	1	A	1.5	耐風圧	-	-	84.5	13.20	156
22	C1J'B	野縁受	3.85×1.82	1	A	1.5	耐風圧	-	-	84.5	24.86	294

※1 ボード割付 A：ボードを天井中央から割付，B：端部に小さいボードを割付，A/C：1枚目と2枚目が千鳥配置，A-D：1枚目と2枚目を同一配置（図-7参照）

表-4 試験体一覧 (振動台実験)

No.	試験体記号	ボルト枚数	加力方向	単位面積重量 (N/m ²)	天井周期 (sec)	減衰定数	反発係数	剛性比 κ		接合部補強
								左側	右側	
1	M1JJ-C	1	野縁	81.3	1.489	0.011	0.661	504	211	-
	C1JJ-C		野縁受け	80.9	1.517	0.010	0.570	526	220	-
2	M2JJ-C	2	野縁	143.9	1.682	0.005	0.681	359	150	-
	C2JJ-C		野縁受け	143.5	1.638	0.007	0.726	346	145	-
3	M4JJ-C	4	野縁	224.7	1.820	0.007	0.574	272	114	-
	C4JJ-C		野縁受け	224.3	1.862	0.006	0.723	286	120	-
4	M1HH-H	1	野縁	81.3	1.489	0.011	0.819	1345	1345	-
	C1JJ-H		野縁受け	80.9	1.517	0.010	0.604	1402	1402	-
5	M4JJ'-H	4	野縁	224.7	1.820	0.007	0.545	727	727	ビス留め
	C4JJ'-H		野縁受け	224.3	1.862	0.006	0.650	761	761	ビス留め
6	M4JB-LGS	4	野縁	224.7	1.820	0.007	0.872	727	98	耐風圧
	C4JB-LGS		野縁	224.7	1.820	0.007	0.889	727	84	耐風圧

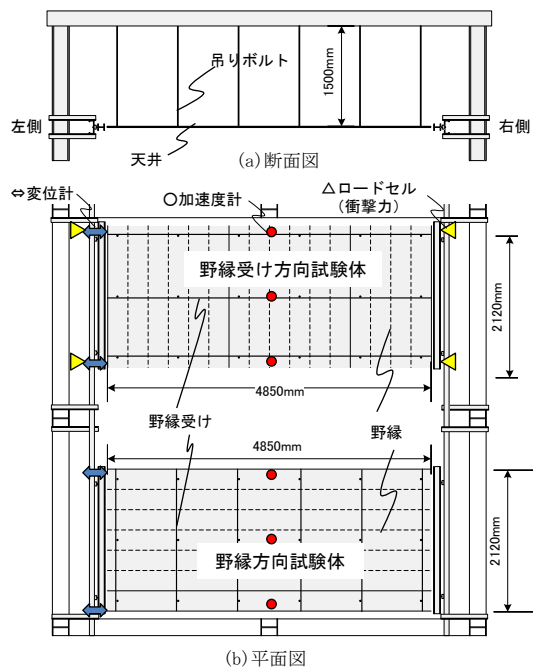


図-10 試験体 (振動台実験)

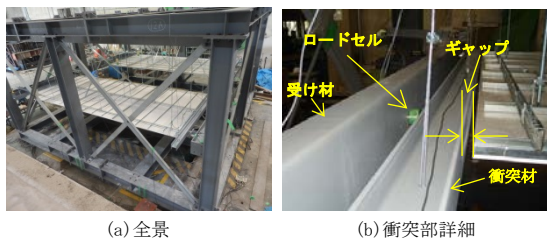
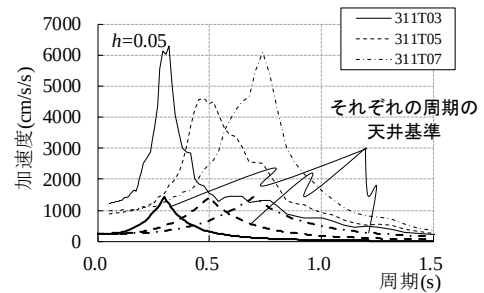


写真-3 実験状況 (振動台実験)

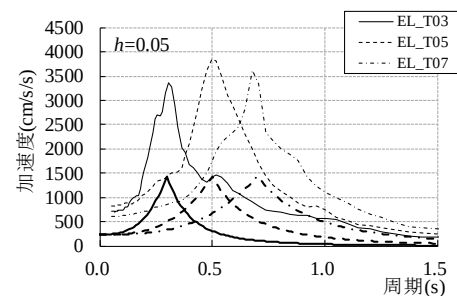
天井の相対変位, 衝撃荷重 (ロードセル) とした。
 写真-3 に実験状況と, 天井衝突部の詳細を示す。
 実験は, 振動台に設置したフレームからそれぞれ下
 地材方向 (野縁方向と野縁受け方向) の異なる天井
 を 2 体吊り下げ, 水平 1 軸方向に加振することにより
 実施した。入力波は, 入力地震動に対する 1 自由
 度系の応答加速度波形とし, El Centro NS 成分, 及
 び東北地方太平洋沖地震の JMA 仙台観測波 NS 成分⁶⁾

表-5 入力波一覧 (振動台実験)

入力地震動	1 自由度系の固有周期 T(s)		
	0.3	0.5	0.7
El Centro NS	○	○	○
3.11 JMA 仙台 NS	大規模加振 実験のみ実施		



(a) 3.11 JMA 仙台 NS



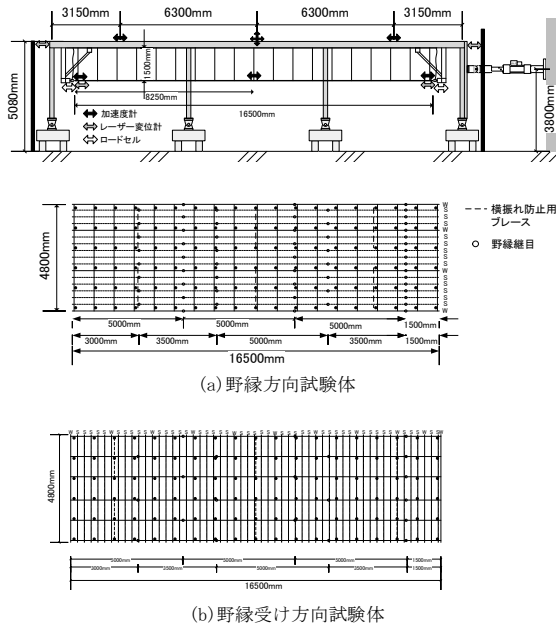
(b) El Centro NS

図-11 入力波の応答スペクトル

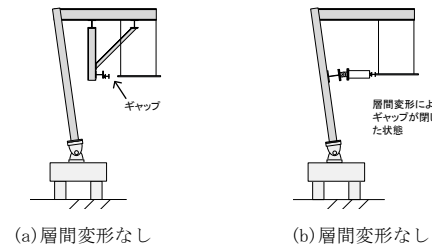
とし, 1 自由度系の固有周期は, 表-5 に示す通り設
 定した。図-11 に原波相当の入力波の応答スペクト
 ルを天井基準 (平成 25 年国交告第 771 号¹⁾等) で用
 いられる床応答スペクトルとともに示す。実験は,
 原波に対し 5~50%程度のレベルにおいて複数回加振
 し, 天井の衝撃力等を確認した。また, 天井の破壊
 形態を確認するため, 天井基準で用いられる床応答
 スペクトルの 6 倍~10 倍程度で加振した。

表－6 試験体一覧（大規模加振実験）

試験体記号	加力方向	ボード枚数	天井単位面積重量 (N/m ²)	天井周期 (sec)	減衰定数	反発係数		剛性比 κ		層間変形
					非衝突時	南側	北側	南側	北側	
M1JJ-L	野縁	1	80.0	1.490	-	0.311	0.542	1332	1332	-
C1JB-L	野縁	1	81.9	1.462	0.0055	0.444	0.314	1251	1251	-
C1JB-L	野縁受け	1	81.7	1.107	0.0098	0.559	0.566	720	720	-
M2JB-L	野縁	2	163.9	1.639	0.0042	0.390	0.385	787	787	-
C2JB-L'	野縁受け	2	163.4	1.366	0.0011	0.503	0.505	548	548	○
C2JB-L	野縁受け	2	163.4	1.342	0.0028	0.499	0.499	529	529	-



図－12 実験装置と試験体（加振実験）



図－13 層間変形の有無（加振実験）



写真－4 試験体の外観（加振実験）

2.4 大規模加振実験

表－6 に試験体一覧を、図－12 に実験装置と試験体の概要をそれぞれ示す。試験体は、16.5m×4.8m とし、パラメータは、下地材方向、ボード枚数、ギャップ、層間変形角の有無（図－13）とした。実験は、天井を吊り下げた足元がピン機構のフレームを、アクチュエータを用いて、水平 1 軸方向に加振することにより実施した。加振波は、表－5 に示す振動台実験と同様とし、加振は加速度波形を変位に変換し、変位制御により実施した。計測は、天井吊元の加速度、天井面の加速度、天井の相対変位、天井面に作用する衝撃荷重とした。写真-4 に試験体の外観を示す。

3. 実験結果

3.1 曲げ実験結果

図－14～図－19 に示す荷重変位（ $P-\delta$ ）関係により、各種パラメータによる剛性・耐力等の比較を行った。変位は 2 点の平均値とした。

(1) 加力の正負及び野縁ピッチの比較

図－14 (a) の野縁方向では、剛性は正曲げの方が高いが、耐力は正曲げの方が低かった。野縁ピッチを短くして密に配置することで剛性・耐力とも大きく増加することが確認できた。また、負曲げでは同一

仕様の 3 体を実施したが、それぞれで耐力に若干のばらつきが見られた。図－14 (b) の野縁受け方向では正負で剛性は変わらないが、耐力は負曲げの方が若干高かった。最終的には正負いずれも野縁受けのねじれによって急激な耐力低下が生じた。

(2) ボード枚数と目地の有無の比較

図－15 (a-1), (a-2) の野縁方向では、正負とも 2 枚張りとする事で剛性・耐力とも高くなった。

正曲げで 2 枚張りの仕上げに目地を入れた場合の剛性・耐力は、目地が開く方向の加力となるため 2 枚目ボードの寄与が小さく、1 枚張りと同程度であった。図－15 (b-1) 及び (b-2) の野縁受け方向では、剛性、耐力とも 1 枚張りとは 2 枚張りで大きな違いはなかった。また、目地を入れた場合の剛性・耐力は、負曲げでは目地がない場合と同程度であった。これは、負曲げでは目地が閉じる方向の加力となるため、目地の影響が小さいためと考えられる。

(3) 面材の厚さの比較

図－16 (a) の野縁方向では、ボード厚さの違いは見られなかった。図－16 (b) の野縁受け方向においても剛性・耐力の違いはほぼなかった。

(4) 面材の種類の比較

図-17(a)の野縁方向では、仕上げ材のロックウール吸音板(2r)がほとんど剛性・耐力に寄与しないため、1枚張り石こうボード(1)と同等の剛性・耐力であった。ロックウールの直張り(1r)は1枚張り石こうボード(1)に比べて剛性が低くなるものの耐力は同等であった。図-17(b)の野縁受け方向を見ると、化粧石こうボード直張り(1')は、1枚張り石こうボード(1)と同等の剛性・耐力であった。ロックウールの直張り(1r)は支点部分で面材が破壊して一旦荷重が落ちたが、下地(野縁受け)の端部が支点と接触するようになると荷重が上昇し、最終的に石こうボードと同等の耐力となった。

(5) クリップの種類の比較

図-18(a)の野縁方向の正曲げではクリップの種類によらず、剛性、耐力はほぼ同程度であった。負曲げでは耐風圧クリップの方が耐力は若干大きかった。

図-18(b)の野縁受け方向では、耐力は正負とも耐風圧クリップの方が大きく、JIS のクリップに対して1.4~1.5 倍になっている。これは、耐風圧クリップを取り付けることにより、野縁受けの倒れが抑制されるためである。

(6) 下地材の種類の比較

図-19(a)の野縁方向1枚張りでは、特に正曲げで一般材(G)の耐力が小さかった。一般材であっても野縁を密に配置(p150)すれば、JIS 材と同等以上の剛性・耐力となった。図-19(b)の2枚張りでは、剛性はほぼ同等であるが、耐力は一般材の方がかなり小さかった。

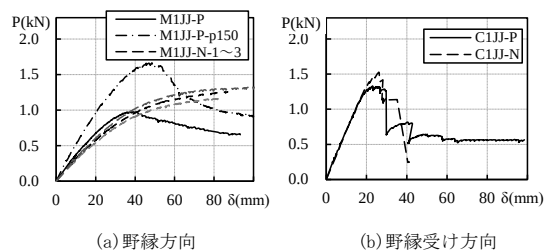


図-14 加力方向と野縁ピッチの比較

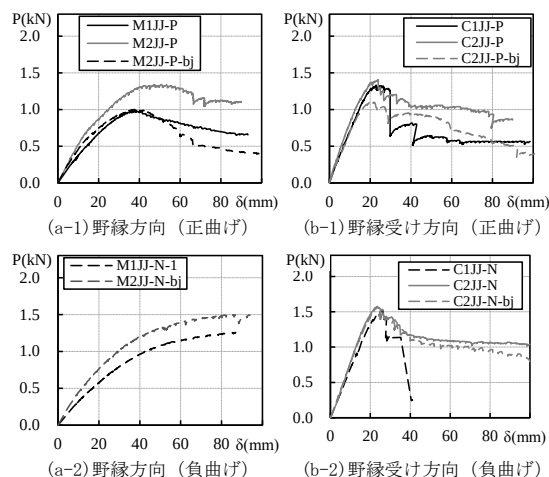


図-15 ボード枚数と目地の有無の比較

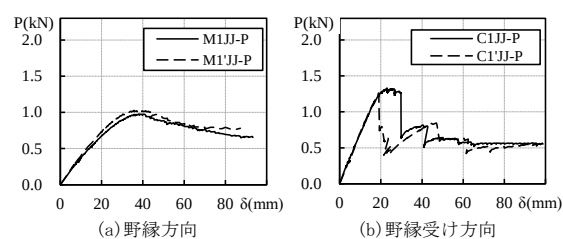


図-16 面材の厚さの比較

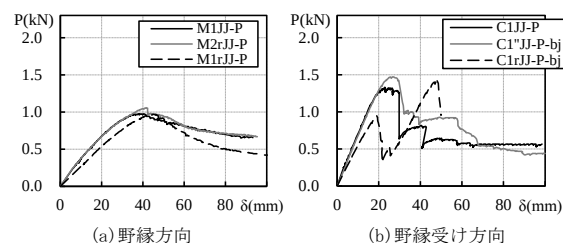


図-17 面材の種類の比較

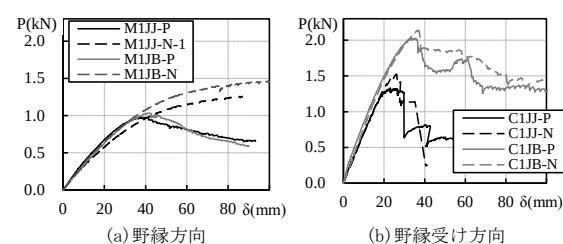


図-18 クリップの種類の比較

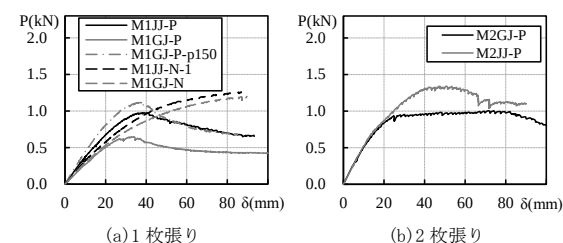


図-19 下地材の種類の比較

3. 2 面内圧縮実験結果

(1) 荷重とひずみの関係

1) 圧縮方向の違いによる比較

図-20(a)に圧縮方向の違いによる荷重ひずみ関係の比較を示す。野縁方向圧縮(M1JJ)では耐力(最小に荷重が低下する値)は13.5kN/mであった。また、野縁受け方向圧縮(C1JJ)時の耐力は16.1kN/mであり、約1.2倍C1JJの方が大きく、圧縮方向による差が見られた。一方、ボード2枚張りのM2JJ-CとC2JJ-Dを比較すると両者はほぼ同じ耐力であり圧縮方向の差は見られなかった。ボード2枚張りではボード枚数が多い分、ボード自体が耐力に寄与する割合が大きくなり、相対的に下地材方向の影響が小さくなっているためと考えられる。天井懐2.7mのM1JJ-2.7とC1JJ-2.7を比較すると、前者の方が1.2倍程度耐力は大きかった。この結果は、水平補剛材を入れたM1JJ-2.7S、C1JJ-2.7Sの比較でも同じ傾向であった。天井懐が長くなると、吊りボルトに早期に弾性座屈が生じた後、野縁受けに倒れが生じる。野縁受け方向圧縮時は、特にその影響が大きいため、圧縮方向による差が生じたものと思われる。

2) ボード枚数の違いによる比較

図-20(b)にボード枚数の違いによる荷重ひずみ関係の比較を示す。M2JJ-CはM1JJの1.9倍、またC2JJ-DはC1JJより1.4倍耐力は大きく、ボード枚数が多くなるに従い耐力も大きくなる傾向が見られた。

3) 天井懐の違いによる比較

図-20(c)に天井懐の違いによる荷重ひずみ関係の比較を示す。M1JJとM1JJ-2.7では剛性は大きく異なるものの耐力に大きな差はなかった。一方、C1JJとC1JJ-2.7を比較すると、C1JJの方が約1.8倍大きく、天井懐が長くなると耐力は低下した。

4) 開口の有無・サイズの違いによる比較

図-20(d)に開口の有無・サイズの違いによる荷重ひずみ関係の比較を示す。M1JJとM1JJ-o50の耐力を比較すると、ともに約13kN/mと同程度であった。また、C1JJとC1JJ-o50、C1JJ-o25の耐力を比較すると、C1JJ-o50は約0.7倍、C1JJ-o25は約1.1倍であった。野縁方向圧縮においては、開口を設ける際に行った補強により、開口率50%においても同等の耐力を示した。一方、野縁受け方向では、開口率25%程度では耐力に大きな差はないものの、開口率50%では明らかに耐力が低下した。

5) 水平補剛材の有無の違いによる比較

図-20(e)に水平補剛材の有無の違いによる荷重ひ

ずみ関係の比較を示す。M1JJ-2.7S、C1JJ-2.7Sとも、それぞれM1JJ-2.7、C1JJ-2.7より約1.3倍耐力は大きく、水平補剛材を取り付けることにより、天井懐が短くなる効果が確認できた。

6) JIS クリップ・耐風圧クリップの違いによる比較

図-20(f)にJIS クリップ、耐風圧クリップの違いによる荷重ひずみ関係の比較を示す。野縁方向圧縮時の耐力は概ね同じ(M1JJとM1JBの比較)であった。一方、野縁受け方向圧縮時の耐力は、C1JJとC1JBでは、JIS クリップの方が1.3倍程度、C1JJとC1JBでは、耐風圧クリップの方が1.5倍程度大きかった。野縁受け方向圧縮時は、下地材の配置によって耐力に大きな差が見られ、耐風圧クリップの有無の他に、下地材の配置も耐力に大きく影響していると考えられる。

7) 天井端部仕様の違いによる比較

図-20(g)に、天井端部の仕様の違いによる荷重ひずみ関係の比較を示す。試験体M1J'J、M1J'J-o50はボード面と野縁の小口が加力梁に当たった場合、試験体M1JJ、M1JJ-o50はボード面のみが加力梁に当たった場合の比較を示している。耐力は、M1J'JはM1JJの0.9倍程度、M1J'J-o50はM1JJ-o50の1.2倍程度であり、試験体により異なる結果であった。

8) 天井規模の違いによる比較

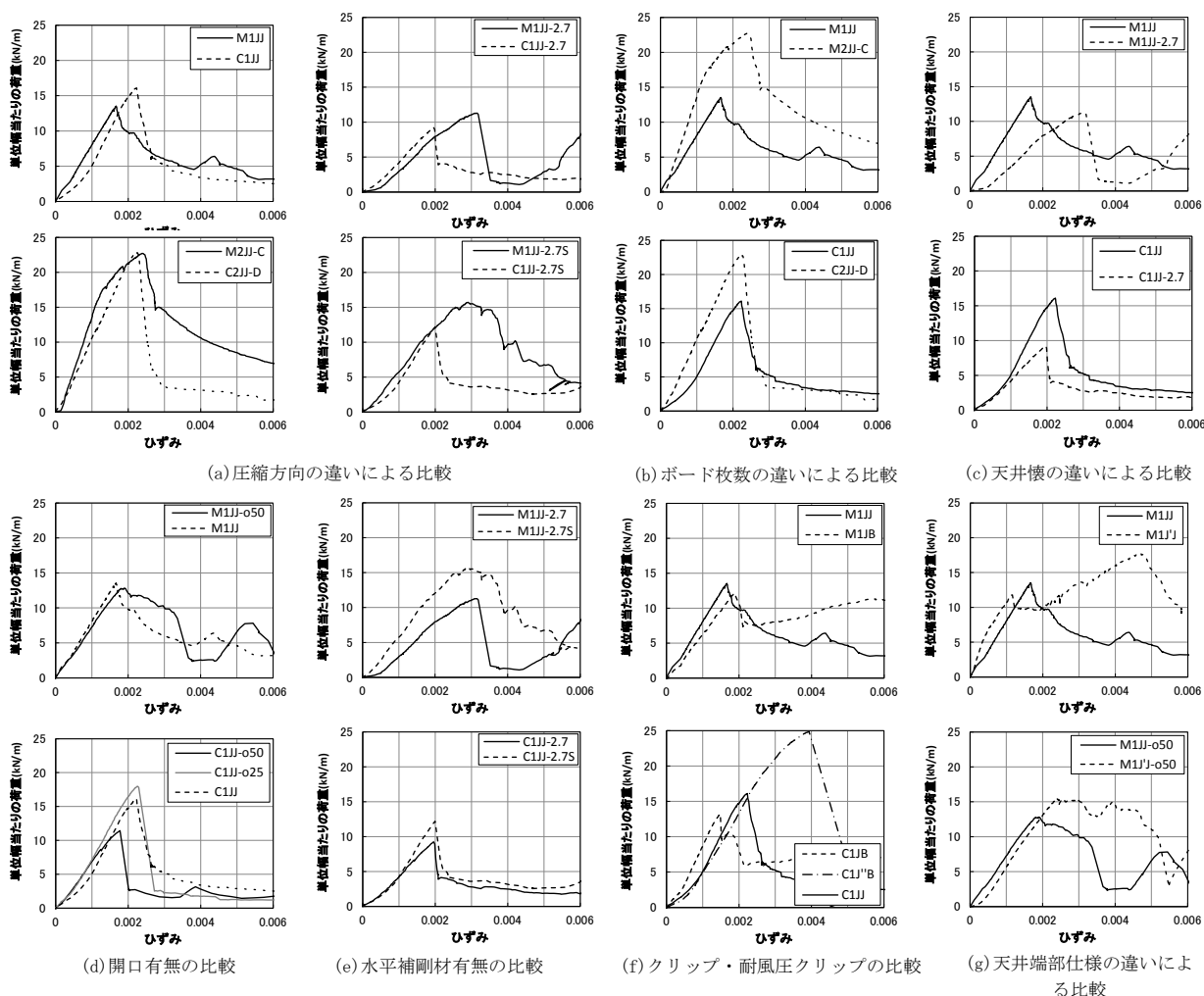
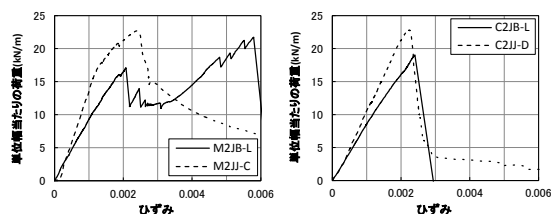


図-20 荷重とひずみの関係の比較（面内圧縮実験）

図-21 に天井規模の違いによる荷重ひずみ関係の比較を示す。野縁方向圧縮時は、大規模試験体 (M2JB-L) の耐力は、小規模試験体 (M2JJ-C) より 3 割程度小さかった。野縁受け方向圧縮時においても、大規模試験体の耐力が小規模試験体の耐力に比較して 2 割程度小さく、天井規模が大きくなると耐力が小さくなる傾向が見られた。



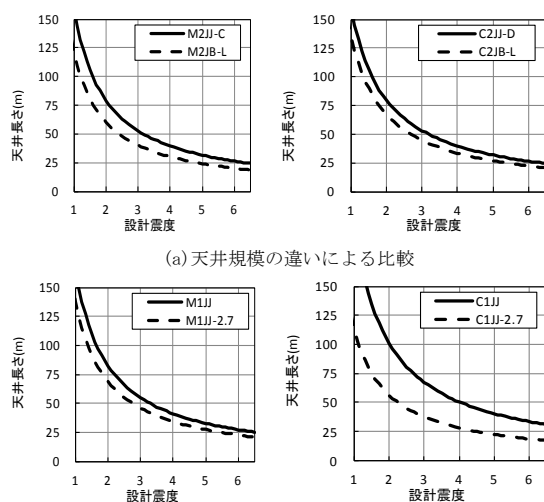
(a) 野縁方向加力

(b) 野縁受け方向加力

図-21 天井規模の違いによる比較

(2) 設計震度と天井長さ

図-22 に水平の設計用震度（以下、設計震度）と天井長さの関係を示す。図-22(a)は天井規模、図-22(b)は天井懐の違いによる比較をそれぞれ示している。図は、設計震度に対して天井がどの程度の耐力を有しているかを天井長さの単位で示したものである。例えば、図-22(a)に示す M2JJ-C で設計震度 3 であれば、長さ 50m 程度の耐力を有していると言える。天井規模が大きくなるほど、また天井懐が長くなるほど設計震度に対する天井長さは小さくなることからわかる。特に、野縁受け方向で天井懐が長い場合にその傾向は顕著である（図-22(b)）。



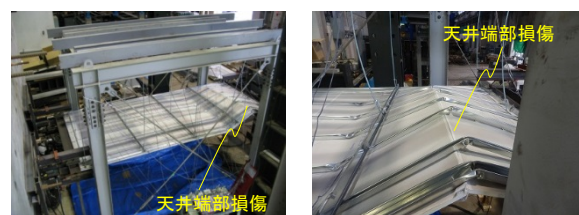
(a) 天井規模の違いによる比較

(b) 天井懐の違いによる比較

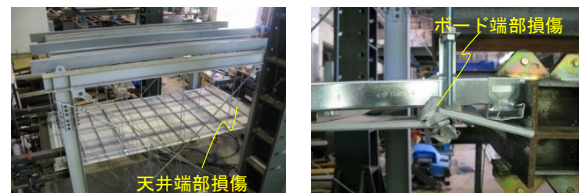
図-22 設計震度と天井長さの関係

(3) 天井の破壊形態

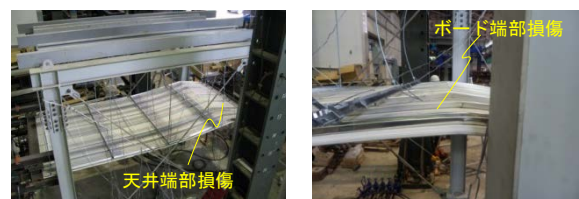
写真-5 に小規模試験体、大規模試験体の破壊形態の一例を示す。小規模試験体、大規模試験体の破壊形態に大きな違いはなく、何れも天井端部で破壊した。野縁方向圧縮時は、野縁の座屈、ボードからのビス抜け、野縁受け方向圧縮時は野縁受けの倒れが生じ、その後、何れも端部ボードの座屈により荷重低下が生じた。



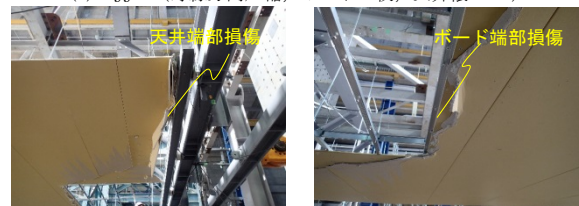
(a) M1J' J (野縁方向圧縮, ボード 1 枚, 天井懐 1.5m)



(b) C1JJ (野縁受け方向圧縮, ボード 1 枚, 天井懐 1.5m)



(c) M2JJ-C (野縁方向圧縮, ボード 2 枚, 天井懐 1.5m)



(d) C2JJ-L (野縁受け方向圧縮, ボード 2 枚, 天井懐 1.5m)

写真-5 天井の破壊形態（面内圧縮試験）

3.3 振動台実験結果

(1) 衝突時の挙動

図-23 に質量の異なる試験体 M1JJ-C, M2JJ-C における単位質量当たりの衝撃力（衝撃力を天井重量で除した値で、衝撃力はロードセル計測値）、天井面加速度、速度、変位の時刻歴を、ギャップ寸法 10mm を例に示す。入力波は 3.11JMA 仙台 NS 波を弾性 1 自由度系に入力した際の応答波とした。入力倍率は 50% で、最大入力加速度は約 420cm/s/s である（試験体、入力波の詳細は図-11、表-5 参照）。図-23(a)が単位質量当たりの衝撃力の加振全時間の時刻歴を示し、図-23(b)～(e)は衝突が生じた 11.5 秒～13 秒の単位質量当たりの衝撃力、天井面加速度、速度、変位を拡大して示したものである。天井面速度は変位の数値微分から算出した。単位質量当たりの衝撃力図中の◇印は、衝撃力を(1)式²⁾より計算し、単位質量当たりに換算した結果を示している。

$$F = \sqrt{mk}v_0 \quad (1)$$

ここで、 m は天井質量、 k は衝突時の荷重変形関係から得られる剛性、 v_0 は衝突直前の天井面速度を示している。単位質量当たりの衝撃力は、(1)式の計算結果と概ね対応していた。

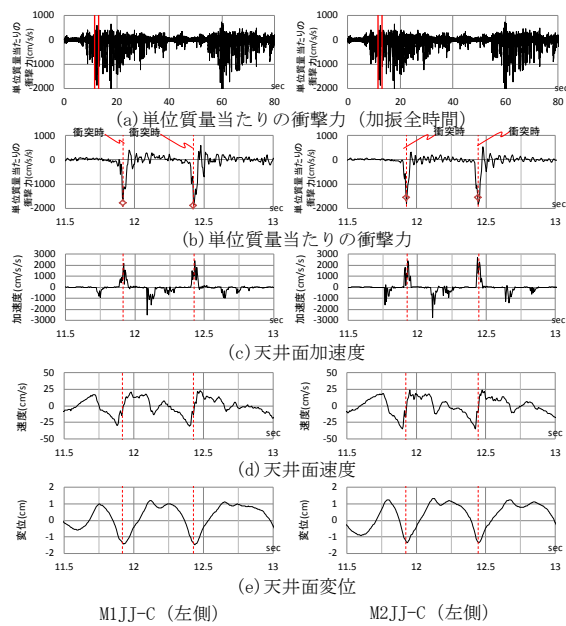


図-23 天井衝突時の応答時刻歴

(2) 各種パラメータの違いによる衝撃力の比較

1) 吊元加速度と単位質量当たりの衝撃力の関係

図-24 に吊元加速度と単位質量当たりの衝撃力の関係をギャップ 5mm と 10mm を例に示す。入力倍率は 5%~100% とした。衝撃力は天井両端で計測しているが、ここでは片側（位置の詳細は図-10 参照）の結果のみ示している。多少のばらつきはあるものの、吊元加速度が大きくなるに従い、衝撃力も大きくなる関係が確認できる。試験体 M4JB-LGS の衝撃力が他に比べて小さいのは、衝突部が LGS 壁で剛性が小さいためと考えられる（図-24(b) 囲み部）。

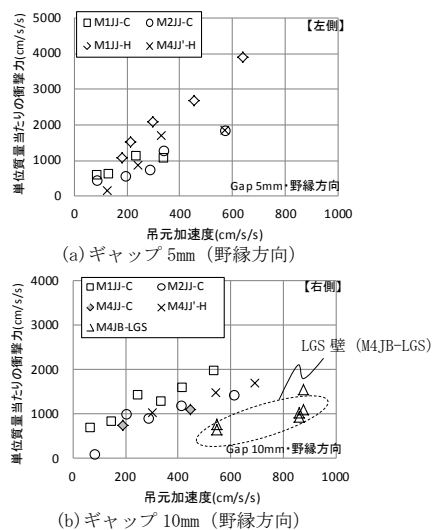


図-24 吊元加速度と単位質量当たりの衝撃力の関係

2) ギャップと単位質量当たりの衝撃力の関係

図-25 にギャップと単位質量当たりの衝撃力の関係を入力倍率 30%, 50% を例に示す（それぞれ振動台入力加速度約 260cm/s/s, 約 420cm/s/s）。図-25(a) は野縁方向加振（M1JJ-C）、図-25(b) は野縁受け方

向加振（C1JJ-C）時の結果を示している。何れもギャップ寸法が大きくなるに従い、単位質量当たりの衝撃力も大きくなり、ギャップ寸法 40mm の衝撃力は 10mm の場合よりも 1.6 倍~2.5 倍大きかった。ギャップ寸法 5mm の場合に、ほぼ天井重量に相当する衝撃力（約 1000cm/s/s）であった。

③衝突部剛性と単位質量当たりの衝撃力の関係

図-26 に衝突部の剛性と単位質量当たりの衝撃力の関係を、野縁方向、ギャップ寸法 10mm を例に示す。図-26(a) 左側、図-26(b) は右側の結果を示している。何れも、多少のばらつきはあるものの衝突部の剛性に比例して単位質量当たりの衝撃力も大きくなる傾向が確認できる。試験体 M4JB-LGS は、左側が鉄骨梁、右側が LGS 壁に衝突させた場合で、衝突部の剛性の違いにより単位質量当たりの衝撃力が大きく異なることがわかる。

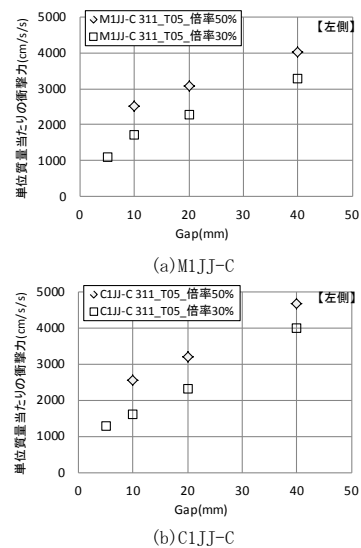


図-25 ギャップと単位当たりの質量衝撃力の関係

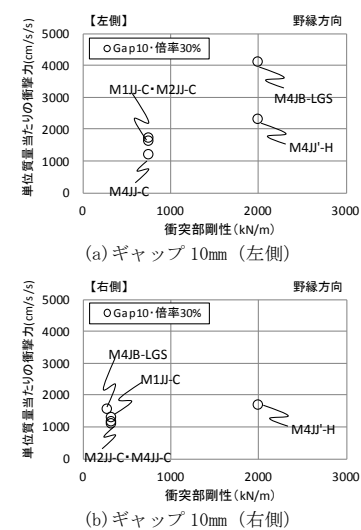


図-26 衝突部剛性と単位質量当たりの衝撃力の関係

(3) 天井の破壊形態

天井が衝撃力を受けて破壊する際の破壊形態を確認した。破壊形態の確認は、接合部が JIS クリップ

の試験体 M4JJ-C、及び JIS クリップにビス留め補強を行った試験体 M4JJ'-H について紹介する。振動台への入力地震動は、入力倍率 150%, 180%とした。図-27 にそれぞれの入力波の加速度時刻歴、及び加速度応答スペクトルを天井基準の床応答スペクトル (BSL, 稀に発生する地震動レベル)³⁾とともに示す。ギャップは 40mm とした。試験体の破壊形態を写真-6 に示す。JIS クリップのみの場合、衝撃力によってクリップが緩み、ツメが開いて接合部が外れ、野縁とともに天井面が落下した (写真-6(a))。また、クリップのツメが開かないようビス留めを行った場合、ツメの開きによる外れは生じないものの、野縁と噛み合うクリップの根元が損傷して外れ天井が落下した (写真-6(b))。耐風圧クリップを用いた場合、上記の入力においても、天井端部が欠ける等の損傷はあるものの、クリップ接合部の損傷はなく、天井は落下しなかった。

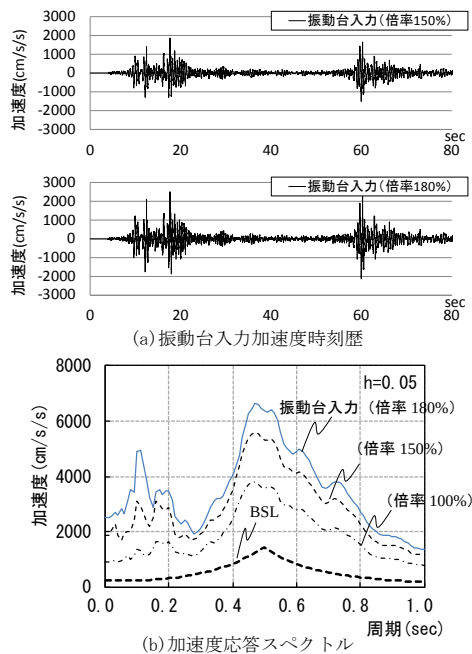
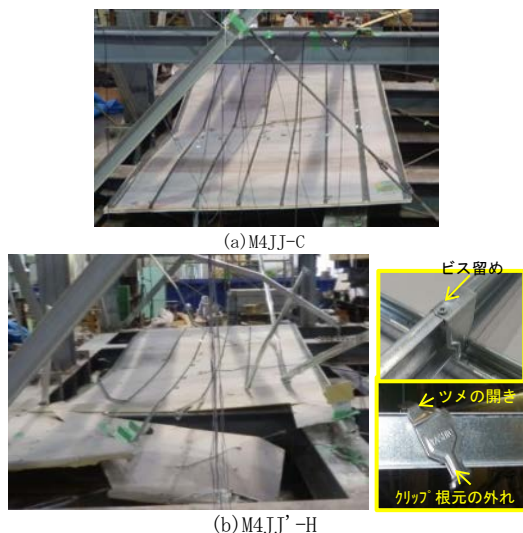


図-27 入力波の加速度時刻歴と応答スペクトル



3.4 大規模加振実験結果

(1) 吊元加速度と衝撃力の関係

図-28 に大規模加振実験の吊元加速度と単位質量当たりの衝撃力 (衝撃力はロードセルから計測値) の関係を示す。ギャップは 10mm とし、入力波は 3. 11JMA 仙台 NS 波を弾性 1 自由度系に入力した際の応答波とした (図-11 参照)。吊元加速度が大きくなるに従い、単位質量当たりの衝撃力も大きくなり、天井重量が大きい 2 枚張りの方が、単位質量当たりの衝撃力が小さくなる傾向が見られた。加振方向 (野縁方向, 野縁受け方向) の違いによる差はほとんど見られなかった。

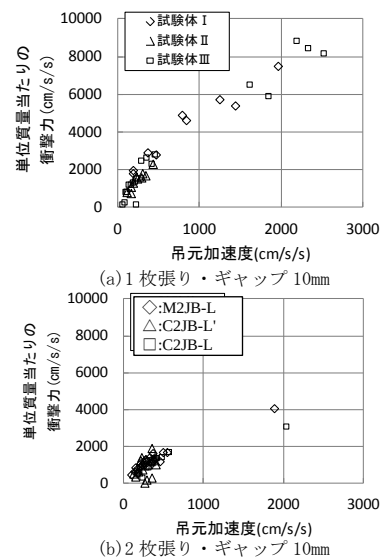


図-28 吊元加速度単位質量当たりの衝撃力の関係

(2) ギャップと衝撃力の関係

図-29 にギャップ 0mm (ギャップを設けない) と 10mm の吊元加速度と単位質量当たりの衝撃力の関係を試験体 C1JB-L を例に示す (ギャップ 0mm では衝突による衝撃力が不明であるが、ここでは衝撃力とした)。図中の破線は、吊元加速度と単位質量当たりの衝撃力の大きさが等しいことを示し、この線より上は吊元からの振動が天井面で増幅していることを示す。図より、ギャップ 0mm の場合の単位質量当たりの衝撃力は、ギャップ 10mm より小さいものの、吊元加速度と比較すると 1.5~2 倍程度増幅していることが確認できる。

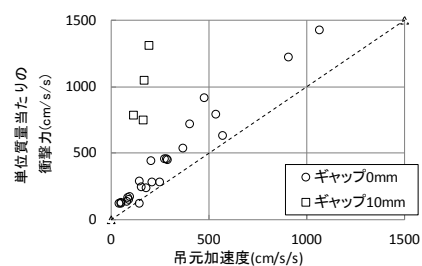


図-29 吊元加速度と単位質量当たりの衝撃力の関係 (C1JB-L: ギャップ 0mm と 10mm の比較)

(3) 層間変形角の有無の影響

図-30 に層間変形を考慮した場合としない場合の吊元加速度と単位質量当たりの衝撃力の関係の比較を示す（層間変形は図-13 参照）。多少のばらつきはあるものの、両者の関係に大きな違いはなく、層間変形の有無が衝撃力に与える影響は小さいと言える。

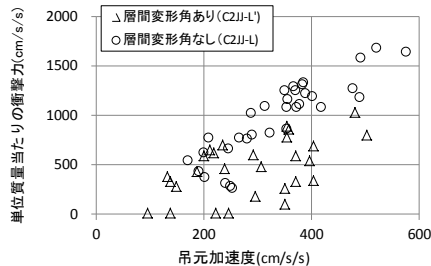


図-30 吊元加速度と単位質量当たりの衝撃力の関係
（層間変形有無の比較）

(4) 天井規模の違いによる比較

天井規模の違いが衝撃力に与える影響を確認するため、上述振動台実験結果との比較を行った。

図-31 に吊元加速度と単位質量当たりの衝撃力の関係を、振動台実験結果と併せて示す。比較は野縁方向加振で、天井重量の異なる（ボード枚数の異なる）2 試験体について行った。2 試験体とも天井規模の違いはあまり見られず、吊元加速度に比例して単位質量当たりの衝撃力が大きくなり、また天井重量が大きいほど単位質量当たりの衝撃力が小さくなる傾向も同様であった。

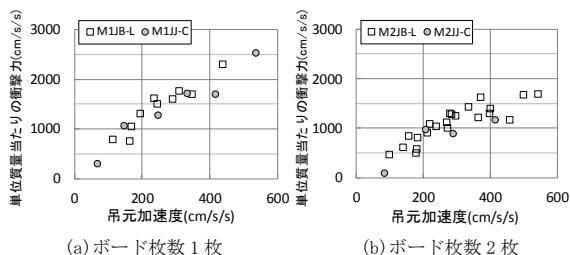


図-31 天井規模の違いによる衝撃力の比較

(5) 天井の破壊形態

天井が衝撃力を受けて破壊する際の破壊形態を確認した。破壊時の入力波は、EL-Centro NS (T=0.3 秒、天井基準床応答スペクトルの約 10 倍) とした。大規模天井の破壊形態を写真-7 に示す。JIS クリップのみの試験体 M1JJ-L は、衝撃力により接合部のクリップが外れ、天井が下地材ごと落下した。天井の端部が最初に破壊し、その後連鎖的に天井端部から 1/3 付近まで落下した。クリップの外れによる破壊形態は前報で示した振動台実験と同じであった。また、耐風圧クリップを取り付けた試験体 C1JB-L では、接合部の外れはないものの、下地材に留める箇所（ビス部分）でのボードの抜けにより天井が落下した。試験体 M1JJ-L と同様に損傷は天井の端部から生じた。

天井落下が生じた際の吊元加速度は 2000～3500cm/s/s、単位質量当たりの衝撃力は 8000～9000cm/s/s であった。

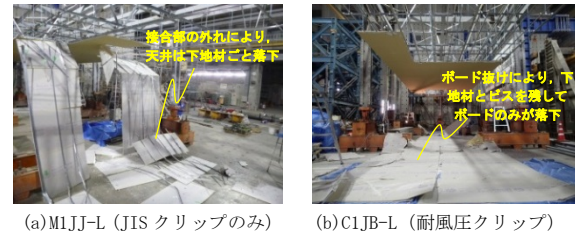


写真-7 天井の破壊形態（大規模加振実験）

4. 天井耐震クリップ⁸⁾の耐震性能

天井耐震クリップ（以下、耐震クリップ）の耐震性能を確認するため、耐震クリップによりクリップ接合部を補強した天井の面内圧縮実験、および耐震クリップと耐風圧クリップの大規模加振実験を実施した。実験方法は、それぞれ前述 2.2 章、2.4 章に示す方法とした。

大規模加振実験の試験体は、ブレースを設置（設計地震荷重 2.2G）し、天井周囲に 6cm のクリアランスを設けたいわゆる特定天井¹⁾仕様とした。入力波は EL-Centro NS (T=0.3 秒) とし、天井吊元加速度 2.2G まで加振を行った。写真-8 に実験状況を示す。

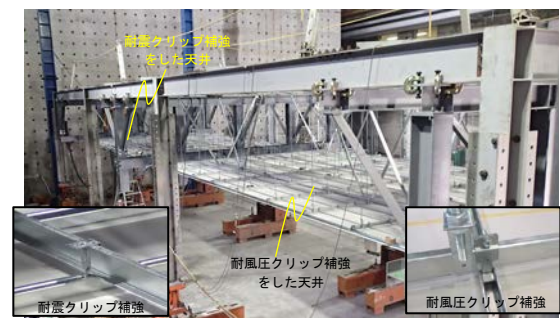


写真-8 試験状況

4.1 面内圧縮実験結果

図-32 に耐震クリップと耐風圧クリップの単位幅当たりの荷重とひずみの関係を、野縁方向加力、ボード 1 枚張りを例に示す。耐震クリップの試験体記号は M1JT とした。

図より、耐震クリップは、最大耐力までは耐力、剛性とも耐風圧クリップと同程度であった。

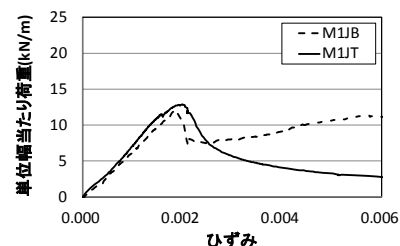


図-32 荷重とひずみの関係の比較（面内圧縮実験）

4.2 大規模加振実験結果

図-33 に天井吊元加速度と各試験体の天井面加速度時刻歴を示す。天井吊元の加速度は 2.2G を超え、天井面では更に揺れが増幅していることがわかる。天井面加速度は耐震クリップの天井より、耐風圧クリップの天井の方が大きかった。この原因として、後述するクリップのすべりが挙げられる。耐震クリップのすべり量は、耐風圧クリップのそれに比較して大きい（耐風圧クリップの方が接合部の固定度が大きい）ため、結果として天井面加速度が低減されているものと推測できる。

次に、写真-9 に加振後のそれぞれの試験体状況を示す。耐震クリップ、耐風圧クリップともにブレース近傍の接合部クリップのすべりが見られ、加振後のずれ量（残留変形）は前者で 20mm 程度、後者で 15mm 程度あった。また、ブレースの取り付けしていない接合部では両試験体ともずれは見られなかった。何れの試験体もブレース近傍のクリップのずれ（残留変形）以外は天井に大きな損傷は見られなかった。

この結果より、耐震クリップにより補強した天井は、この程度の入力レベル（吊元加速度 2.2G、図-33(a) 参照）においては、耐風圧クリップと同等の耐震性能を有していることが確認できた。

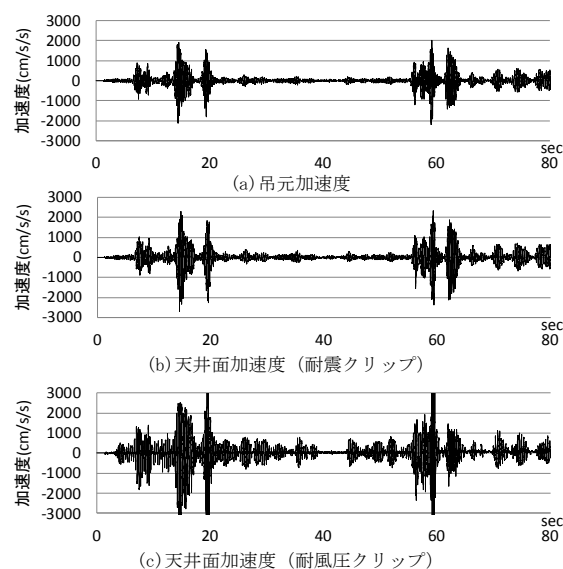


図-33 吊元と天井面の加速度時刻歴

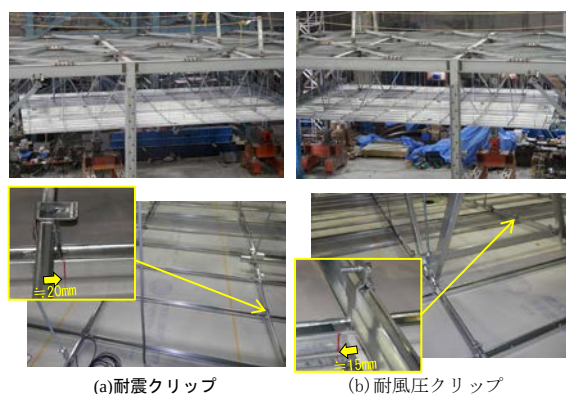


写真-9 加振後の状況

5. まとめ

クリアランスを設けない天井の耐震対策を検討する上では、その剛性や耐力、周囲の壁等と衝突した際の衝撃力を把握しておくことが重要である。本報では、面外曲げ実験、静的面内圧縮実験、振動台実験、及び大規模加振実験により、それらについて検討した。以下に得られた知見をまとめる。

1) 曲げ実験

- 下地材の方向、加力の正負、野縁ピッチ、面材種類、ボードの枚数、下地材の種類をパラメータとした実験を実施し、天井面の座屈に関わる曲げ剛性等を求めるためデータを取得した。

2) 静的面内圧縮実験

- 1枚張りでは野縁受け方向の耐力の方が、野縁方向大きく、2枚張りでは、加力方向の差はほとんどなかった。
- ボード枚数2枚張りの耐力は1枚張りより大きく、天井懐が長いほど耐力は小さかった。
- 天井耐力は、開口率25%では同程度（野縁方向では約1.3倍）、開口率50%では約0.7倍であった。
- 水平補剛材を取り付けることにより、耐力は約1.3倍大きくなった。
- 大規模試験体の耐力は、小規模試験体の0.7～0.8倍であり、試験体規模が大きくなると耐力は低下する傾向が見られた。
- 天井の破壊形態は、小規模試験体、大規模試験体で大きな違いはなかった。

3) 振動台実験

- $F = \sqrt{mk}v_0$ から評価した衝撃力は実験と概ね対応した。
- 吊元加速度、ギャップ、衝突部剛性が大きいほど、衝撃力は大きくなった。
- 単位質量当たりの衝撃力は、天井質量が大きくなるとわずかに小さくなる傾向が見られた。
- クリップ接合部の違いによる破壊形態を把握した。

4) 大規模加振実験

- 単位質量当たりの衝撃力は、天井の吊元加速度が大きくなるほど大きく、天井質量が大きいほど小さくなった。
- ギャップ0mmの単位質量当たりの衝撃力は、ギャップ10mmの半分以下であった。
- 層間変形の有無が衝撃力に与える影響は小さかった。
- 振動台実験と大規模加振実験の天井の単位質量当たりの衝撃力に大きな差はなかった。
- 天井の破壊は、JISクリップのみの場合は、クリップの外れにより、耐風圧クリップで接合部を補強し場合は、下地材に留める箇所でのボードの抜けにより生じた。

5) 天井耐震クリップの耐震性能

- 吊元加速度2.2G程度で、耐震クリップは耐風圧クリップと同等の耐震性能を有していることを確認した。

謝辞

本稿の一部は、戸田建設㈱が国土交通省より「平成 25 年度 建築基準整備促進事業」の補助の交付を受けて事業主体となり、独立行政法人建築研究所との共同研究として実施（4 章天井耐震クリップは除く）したものである。

同事業においては、清家剛准教授、元結正次郎教授をはじめ、委員・協力委員の方々からは貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す

また本稿の一部には BRIC 勉強会(筑波建築研究機関協議会)や同会を通じて紹介していただいた(独)建築研究所の成果などを含んでいる。ここに記して、関係各位に心より感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法等を定める件（平成 25 年国土交通省告示第 771 号）、ほか、官報号外第 170 号，2013. 8. 5
- 2) 日本建築学会 非構造材の安全性評価及び落下事故防止に関する特別調査委員会:天井等の非構造部材の落下事故防止ガイドライン，2013 年 3 月 4 日版
- 3) 建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説」（平成 25 年 10 月版），一般社団法人 建築性能基準推進協会
- 4) 中西敦士，元結 正次郎，國崎洋：野縁方向における天井面圧縮時の挙動に関する検討 （鋼製下地在来工法天井における天井面の安定性に関する研究 その 1），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 881-882，2012. 9
- 5) 元結正次郎，佐藤恭章：天井の動的性状を踏まえた設計地震力について ークリアランスを有さない天井の動的挙動 その 1 -，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1043-1044，2013. 8
- 6) 2011 年 3 月 11 日気象庁仙台管区気象台観測記録
- 7) 平成 25 年度建築基準整備促進事業 S4. 「吊り天井の耐震設計に係る基準の高度化に資する検討」報告書、平成 26 年 3 月
- 8) 渡壁守正，飯塚信一，稲井慎介，石岡拓，高井茂光，金川基:大規模空間を有する在来工法天井の耐震対策工法の開発，Vol. 18，No. 42，pp. 191-197，2011. 6