部分補強された在来工法天井の動的加振実験とシミュレーション解析

DYNAMIC TEST ON PARTIALLY REINFORCED CONVENTIONAL CEILINGS AND SIMULATION ANALYSES

半澤 徹也*, 田中 栄次*, 鈴木 健司*, 櫻庭 記彦*, 金子 美香**

Tetsuya HANZAWA, Eiji TANAKA, Kenji SUZUKI,

Fumihiko SAKURABA and Mika KANEKO

In recent years, the collapse of ceilings due to earthquakes has become a serious problem. The authors have proposed the reinforcing method to improve the aseismic performance of conventional ceilings. The proposed method employs the partial reinforcement only around the braces of ceilings, and can be easily and economically applied. The shaking table tests of the partially reinforced ceilings were carried out to investigate dynamic characteristics. The analytical model of the reinforced ceilings is proposed based on the static cyclic loading tests and the simulation analyses were carried out to show the effectiveness of the analytical model.

Keywords : Nonstructural component, Ceiling, Dynamic test, Simulation analysis

非構造部材, 天井, 加振実験, シミュレーション解析

1. はじめに

近年の建築物の地震被害では、非構造部材、特に天井の被害が顕在化してきており、その耐震性の向上に向けた対応が急がれている。

本論で対象とする軽量鉄骨下地天井¹⁾の耐震性に関しては、地震被害に関する研究^{2)~4)}、部分天井に対する実験的研究^{5)~8)}、接合要素(金物)に対する実験的研究^{9)~11)}、解析的研究^{12)~14)}などが行われている。既往の研究によれば、天井ボード崩落の被害では、天井ボードは野縁とともに落下しており、崩落跡には多くのクリップの散乱が見られること^{4),9)}、クリップの外れは、鉛直方向の力だけではなく水平方向の滑動によって、特に腹掛けクリップの場合に生じ易いこと⁹⁾などが明らかにされている。また、平成25年に公布された国土交通省告示第771号では、特定天井に対する構造耐力上安全な構造方法を定めており、天井設計のための解析技術と解析的研究は今後重要性を増すものと思われる。

筆者らは、在来の鋼製下地天井の耐震性の向上を図る補強工法として、ブレース周りの金物の部分的な補強による方法を提案し、28m²規模の天井システムの加振実験により、その性能を検証した¹⁵⁾。本論では、この補強工法に改良を加えた天井システムの加振実験を追加すると共に、解析モデルによるシミュレーション解析を実施して、その妥当性を検証する。なお、解析モデルで用いた要素の荷重変形

関係は、別途実施した2m²規模の天井試験体に対する静的繰返し加力実験^{注1)}結果に基づいている。

2. 動的加振実験

2.1 実験計画

試験体の概要とブレース下端の詳細を図1に、使用部材を表1と写真1に各々示す。天井ボードは2枚張りで、野縁・野縁受けからなる下地材にビス止めされている。野縁と野縁受けを含めた単位質量は16.5kg/m²、全面積の質量は462kgである。中央部に1対のブレースをV字形に配置し、その周辺9箇所のクリップおよびハンガーを耐震仕様としている。ブレース下端は、野縁受け方向では野縁受けにビス止めとし、野縁方向ではブレース受け材Aにビス止めされている。なお、ブレース受け材Aは、ハンガーに設置されたブレース受け材Bにビス止めされている。ブレース接合部材(ブレースホルダー)は、吊りボルトに対して閉断面を成しており、ブレース面内の角度が自在に変えられるタイプである。試験体はA、Bの2体であり、試験体Aは文献15)で実施されたもの、試験体BはAの耐震仕様クリップについて、野縁方向に滑動しないように金物をあてがいビス止めで拘束し(写真1)、ブレースを増厚したものである。

実験装置を図2に示す。実験装置は、振動台上の加力フレームの

* 清水建設㈱技術研究所 工学修士

** 清水建設㈱技術研究所 博士(工学)

Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

図1 天井試験体概要

表1 試験体諸元

部位	試験体A	試験体B
天井ボード	2枚張り(計19mm)	
野縁・野縁受け	JIS C19・C38	
ボード縁のクリップ	JIS規格品(19形, t=0.6)	耐震仕様*(t=1.6)
ブレース周りのクリップ	耐震仕様(t=1.6)	耐震仕様*(滑り拘束)
その他のクリップ	JIS規格品(19形, t=0.6)	
ブレース周辺ハンガー	耐震ハンガー**(t=2)×9個	
その他のハンガー	その他: JIS規格品(19形, t=2)	
ブレース	C40x20x1.6	C40x20x2.3
ブレース水平受け材A・B	C40x20x1.6	
ブレースホルダー	(株)サワタB-S-W3/8用	
吊りボルト	W3/8	

* 耐震仕様クリップ: (株)能重製作所 耐風圧SC

** 耐震ハンガー: (株)オクジャー ハンガーN

耐震ハンガー ブレースホルダー 耐震クリップと滑り拘束方法
写真1 使用材料の例

図2 実験装置

頂部から天井試験体を懸垂したものである。吊りボルトは加力フレーム上の角パイプを貫通して、上下端をナット固定されている。加振方法は、野縁受け方向をX方向、野縁方向をY方向として地震波その他を入力するものとしたが、試験体が振れないように、それぞれの加振において、ボード端部直交方向に仮設ブレースを設置した。なお、ホワイトノイズ加振による伝達関数から推定される加力フレームの固有振動数はX方向34Hz、Y方向12Hzである。

試験体A、Bに対する加力プログラムを表2に示し、入力波形を図3に例示する。試験体Aでは、波の種類を共通とし、入力レベルを3段階とした。試験体Bでは、波の種類を変え、鉛直方向(Z方向)にも同時入力した。なお、El Centroの水平方向はNS成分である。また、高層波とは、2011年東北地方太平洋沖地震で得られた首都圏の高層建物(12階建て、1次固有周期1.6秒)の屋上階レベルでの観測波、低層波とは同じ地震で得られた岩手県内の地表面観測記録を入力として、低層建物(2階建て、1次固有周期0.6秒)を想定して求めた2階レベルでの解析応答波であり、それぞれレベルを調整して用いた。入力波形の応答スペクトルを図4に示す。低層応答波は0.4、0.6秒に、高層応答波は1.6秒にピークを持っている。低層応答波の0.4秒の成分は入力地震動の卓越成分である。各加振においては、加振後に金物の変形などを確認し、変形した際は交換して、できるだけ損傷が累積しないようにした。

2.2 実験の経過

X方向加振時の試験体Aには、入力が小さいうちは目視上特段の損傷は見られず、El Centro 600cm/sec²入力の際にブレースが座屈、耐震クリップがはめ込まれている野縁に開きが見られた(写真2)。Y方向加振時の試験体Aには、150 cm/sec²入力から耐震クリップが野縁に沿って滑動し、300、600 cm/sec²ではそれが顕著になった。

Y方向加振時の試験体Bには、入力レベルが小さいうちは目視上特段の損傷は見られず、El Centro 600 cm/sec²入力の際にブレース端部に若干緩みが見られた程度であった。耐震クリップは野縁に拘束

表 2 加力プログラム

試験体A (cm/sec ²)			試験体B (cm/sec ²)		
No.	内容	方向/レベル	内容	方向/レベル	
1	ホワイトノイズ	X:100	ホワイトノイズ	Y:100	
2	ホワイトノイズ	Y:100	ホワイトノイズ	Z:100	
3	ホワイトノイズ	Z:100	低層波	YZ:190	
4	El Centro	X:150	高層波	YZ:582	
5	El Centro	X:300	El Centro	Y:600, Z:300	
6	El Centro	X:600	ホワイトノイズ	X:100	
7	El Centro	Y:150	高層波	XZ:582	
8	El Centro	Y:300	El Centro	X:600, Z:300	
9	El Centro	Y:600	低層波	XZ:190

図 3 入力波形（低層および高層応答波 100%）

図 4 入力の応答スペクトル

されており、試験体 A に比べて滑動を抑制することができた。X 方向加振時の試験体 B には、入力レベルが小さいうちは目視上特段の損傷は見られず、El Centro 600 cm/sec² 入力でもブレースの座屈は弾性的なものに留まり、顕著な残留変形は残らなかった（写真 3）。

写真 2 加振後の野縁の開き

写真 3 加振後のブレースの様子

2.3 実験結果

2.3.1 ホワイトノイズ加振による振動特性

試験体 A の計測加速度による天井／加力フレームの伝達関数（計測点 B₁/F₁）を図 5 に示す（Parzen Window 0.1Hz）。X、Y の固有振動数（ピークの振動数）は 6.2Hz と 5.0Hz であった。ピーク高さから減衰はそれぞれ 1.3%、3.3%程度と見なせる。

同じく、試験体 B の伝達関数を図 6 に示す。Y 方向は試験体 A の固有振動数とほぼ同じである。X 方向の固有振動数は試験体 A に比べ低下しており、その原因はホワイトノイズ加振の前に、Y 方向の地震加振を実施したためと考えられる。Y 方向の加振時には、耐震クリップと野縁受けの滑動は拘束されていても、野縁受けは傾斜を生じており、野縁と野縁受けには部材の接触部の局所的な変形、耐震クリップと野縁受けを貫通するビス孔の拡大などの損傷が生じ、それが X 方向の微小な振幅における振動周期の伸びの原因と推察される。

試験体 B の伝達関数の振幅は、試験体 A のそれに比べて小さく、減衰を概算すると X 方向 8%、Y 方向 6%程度となる。なお、ホワイトノイズ加振における天井の最大応答を表 3 に示す。加速度は計測点 B₁、変位は天井両端の平均値である。最大応答変位は各方向とも 1.2～1.3mm である。

図 5 試験体 A の伝達関数

図 6 試験体 B の伝達関数（X 方向は Y 方向加振後）

表 3 ホワイトノイズ加振における天井面の最大応答

方向	最大加速度 (cm/sec ²)		最大変位 (mm)	
	A	B	A	B
X	173	91.4	1.25	1.31
Y	103	117	1.34	1.22

2.3.2 地震入力に対する応答

試験体 A の応答波形の例を図 7 に、各地震応答から求めた試験体の伝達関数を図 8 に、最大値の一覧を表 4 に示す。加速度波形はノイズ除去のため 20Hz のローパスフィルタを掛けた。変位には残留

変位を歪めないためにフィルタを掛けていない。変位 D1, D2 は同位相の波形で最大値の差も小さいため、以後、変位は計測した 2 点の平均を用い、加速度は重心に近い B₁ を用いる。伝達関数には、応答レベルの増加とともに長周期化と減衰の増加が認められる。最大の応答レベルについては、X 方向は 1G (重力加速度) を超過しているが(質量 462kg に相当する慣性力 4.53kN 以上を負担しているが)、Y 方向は若干これを下回る。

試験体 B の伝達関数を図 9 に、応答の最大値を表 5 に示す。応答波形は解析結果とともに後述する。X 方向の場合、試験体 A では、El Centro NS 600 cm/sec² 入力において、1G を超え、変位も 40mm 以下であったが、試験体 B でも、概ね同程度の応答が得られている。試験体 A では X-Y 方向の順に、試験体 B では Y-X の順に加振を実施し、試験体 B の X 方向のホワイトノイズ加振による共振振動数は、試験体 A のそれに比べて低下していたが、振幅の大きい応答レベルはそれほど差が生じていない。

Y 方向の場合、試験体 A では El Centro NS 600 cm/sec² 入力において 1G に達せず、変位は 60mm を超えたが、試験体 B では 1G を超え、変位も 40mm 以下となっている。このように変位が抑制されたことは、耐震クリップの滑動の拘束の有効性を示すものであると考えられる。

伝達関数を見ると、Y 方向では、応答レベルの小さい低層波、高層波では固有振動数の変動は小さく、El Centro 600 cm/sec² で大きく低下した。X 方向では、高層波から El Centro 600 cm/sec² の入力の変化で固有振動数が大きく低下して、次に入力された低層波では固有振動数の変動はなく、ピーク高さも高くなった。以上のように、固有振動数の変化は、応答変位の大きさと、大きな変位応答により低下した剛性が、その後の小さな変位振幅時には回復しない性状とに関連づけることができる。

図 7 試験体 A の応答波形の例

図 8 試験体 A の伝達関数

表 4 地震入力における試験体 A の天井面最大応答

方向	入力レベル (cm/sec ²)	加速度 (cm/sec ²)		変位 (mm)		
		B1	B2. or. B3	D1	D2	平均
X	El Centro150	467	466	5.4	6.0	5.7
	El Centro300	645	627	12.7	11.4	10.8
	El Centro600	1094	1082	31.1	30.5	30.8
Y	El Centro150	337	362	7.3	7.7	7.5
	El Centro300	601	631	20.3	20.3	20.1
	El Centro600	913	963	61.2	62.0	61.6

図 9 試験体 B の伝達関数

表 5 地震入力における試験体 B の天井面の最大応答

方向	入力レベル (cm/sec ²)	加速度 (cm/sec ²)		変位 (mm)		
		B1	B2. or. B3	D1	D2	平均
YZ	低層波190	386	405	7.1	7.1	7.1
	高層波582	463	487	8.8	8.5	8.7
	El Centro600	1258	1331	38.7	37.6	38.1
XZ	高層波582	505	542	7.9	10.0	8.3
	El Centro600	1062	1182	29.2	36.7	32.0
	低層波190	503	520	11.4	11.3	10.8

3. シミュレーション解析

3.1 解析モデル

本節では、前節で述べた動的加振実験結果に対するシミュレーション解析について述べる。試験体 A, B は偏心の小さい平坦な天井パネルであるため、解析モデルは図 10 に示す 3 節点モデルとした。本工法による天井システムの力学特性は、補強金物とブレース部分の特性が支配的である。筆者らは、その特性を小規模実験で別途把握しており、その概要を注 1) に示す。対象はブレースを含んだ 2m² 規模の天井ユニットで、金物の仕様は、本論の試験体 A と同様である。動的加振実験同様、野縁受け方向ではブレースの座屈 (最大耐力 4.95kN)、野縁方向では耐震クリップの滑動と野縁受けの曲げ変形 (最大耐力 4.92kN) が生じた。解析モデルは、ブレース部分のトラス要素、耐震クリップ部分のばね要素、さらに負担力の限界を表すばね要素からなり、前二者はバイリニアとバイリニアスリップ型の復元力を有する 2 要素を並列させてモデル化されている (図 11, 図 12)。注 1) に述べたとおり、本モデルは概ね静的繰り返し加力実験による天井ユニットの荷重変形関係を模擬している。

解析モデルの諸元を表 6 に示す。これらの諸元は、静的繰り返し加力実験の荷重変形関係の包絡線からトリリニア型のスケルトン、第一折れ点の荷重、戻り勾配を決めれば、他のパラメータは一意に決まる。表中の「耐力」は、試験体が負担できる最大耐力で、試験

体 A の X 方向と試験体 B の X および Y 方向は主としてブレースの座屈、試験体 A の Y 方向では、耐震クリップの滑動と野縁受けの曲げ変形によって決まる。ここでは、最大加速度および静的繰り返し加力実験の最大耐力を参考に定めており、試験体 A の X 方向は、静的繰り返し加力実験結果の 95%、Y 方向は 90%、試験体 B の X 方向は 99%、Y 方向は 114%に当たる。なお、試験体 B の耐震クリップは野縁方向に対してビスにより変位拘束されているため、上記のクリップモデルに対して、スリップ性状を除いたスケルトンとし、バイリニア型復元力を与えた。減衰は試験体 A、B とも、X 方向はモデルの 1 次固有振動数に対して 1.2%、Y 方向は 3.3%の瞬間剛性比例型減衰とした。

図 10 解析モデル

図 12 バイリニアスリップの履歴則

図 11 復元力特性の与え方

表 6 解析モデル諸元

試験体と部位		復元力特性	初期剛性 (kN/mm)	降伏変位 (mm)	2次 剛性比	備考
A	X:ブレース	バイリニア	2.25	0.4	0.111	スリップの 負勾配0
		スリップバイリニア	2.75	1.0	0.236	
	Y:ブレース	X方向に同じ				
	X:クリップ	バイリニア	0.9	0.667	0.111	耐力4.7kN 負勾配0.1
		スリップバイリニア	0.3	3.167	0.2333	
	Y:クリップ	バイリニア	0.25	2.0	0.28	耐力4.43kN 負勾配0.1
		スリップバイリニア	0.15	7.455	0	
B	ブレース	試験体Aに同じ				
	X:クリップ	試験体Aに同じ				耐力4.89kN
	Y:クリップ	バイリニア	0.4	2.0	-	耐力5.62kN

3.2 解析結果

モデルの固有値解析による 1 次固有振動数を、前節で述べた試験体の固有振動数および注 1)に示した 2m² 規模の試験体の初期剛性から得られる値と比較して表 7 に示す。()の数値は、ホワイトノイズによる値との比である。28m² 規模の試験体の水平剛性は、ブレース部分の剛性が支配的であり、ブレースを含む 2m² 規模の実験結果からの推定値との差は Y 方向で 1 割程度である。解析モデルは 2m² 規

模の試験体の静的繰り返し加力実験の結果を反映しているが、第一折れ点の取り方により初期剛性が X 方向で大きめとなっているものの、実験値との差はやはり 1 割程度に留まる。

試験体 A の実験および解析による加速度および変位波形の例を図 13、図 14 に、最大応答値の比較を表 8 に示す。実験値と同様、加速度には 20Hz のローパスフィルタを掛け、変位にはフィルタを掛けていない。El Centro NS 入力に対する解析波形は、最大値、位相とも概ね実験結果を模擬しており、振幅の小さい場合を除くと、最大値の実験値に対する誤差は 1 割程度である。

試験体 B の実験および解析による加速度および変位波形の例を図 15、図 16 に、最大応答値の比較を表 9 に、試験体 A、B の応答の一覧を図 17 に示す (図中、波線は±10%)。解析波形は X 方向低層波の場合を除き、最大値、位相とも概ね実験結果を模擬しており、振幅の小さい場合を除くと、最大値の実験値に対する誤差は 1 割程度である。低層応答波については、図 3 に示した通り、20~30 秒の区間の他に 60~70 秒で大きな振幅を有する。図 15 にある低層応答波入力の当該区間の応答を図 18 に示す。解析結果は、当該区間でも概ね実験結果を模擬している。高層波入力については、入力の卓越周期は 1.6 秒であり、応答波形にもその成分は見られるが、それ以外に試験体の固有振動数成分が高周波成分として見られる。図 15 にある高層応答波入力を拡大して図 19 に示す。解析結果は、実験結果に見られるこの高周波成分も模擬している。

X 方向の低層波の場合は、直前に El Centro NS 600 cm/sec² 入力による 30mm 程度の変位応答を経験している。解析では繰り返し振幅による剛性低下を考慮しているが、そうした大変形を経験した後では、応答精度は低下した。そうした場合を除けば、解析モデルは、中~大変形の領域で、3 種類の入力波に対する実験結果をよく再現している。

表 7 1 次固有振動数の比較

	X方向 (Hz)	Y方向 (Hz)
28m ² 試験体(ホワイトノイズ 結果)	6.2	5.0
2m ² 試験体(初期剛性値)	6.2	4.6
	(1.01)	(0.91)
解析モデル(固有値解析)	6.7	4.5
	(1.08)	(0.90)

表 8 解析による試験体 A の天井面の最大応答

方向	入力レベル	加速度 (cm/sec ²)		変位 (mm)	
		最大値	実験値比	最大値	実験値比
X	El Centro150	425	0.91	4.61	0.81
	El Centro300	644	1.00	11.4	1.06
	El Centro600	1091	1.00	34.5	1.12
Y	El Centro150	419	1.24	7.9	1.05
	El Centro300	585	0.97	18.6	0.93
	El Centro600	988	1.08	54.3	0.88

4. 結論

文献 15)で提案したブレース周辺部を部分補強した天井工法に関し、28m² に 1 対の V 字形にブレースを設置した天井システムに対し

図 13 試験体 A の天井面の加速度応答波形の比較

図 15 試験体 B の天井面の加速度応答波形の比較

図 14 試験体 A の天井面の変位応答波形の比較

図 16 試験体 B の天井面の変位応答波形の比較

表 9 解析による試験体 B の天井面の最大応答

方向	入力レベル	加速度 (cm/sec ²)		変位 (mm)	
		最大値	実験値比	最大値	実験値比
YZ	低層波	364	0.94	6.66	0.94
	高層波	460	0.99	8.92	1.03
	E1 Centro600	1253	1.00	37.6	0.99
XZ	高層波	494	0.98	6.88	0.83
	E1 Centro600	1092	1.03	35.2	1.10
	低層波	396	0.79	4.02	0.37

図 17 実験値と解析値の比較

図 18 低層波入力の時刻 55~80 秒における加速度応答波形

図 19 高層波入力の加速度応答波形の拡大図

て、地震観測波および建物解析応答波を用いた加振実験を行った。また、本工法の部分試験体 (2m² 規模) に対して行った静的加力実験結果に基づく解析モデルを用いて、動的加振実験のシミュレーション解析を行った。得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) 天井システムの固有振動数は、天井ユニットの静的繰り返し加力試験における小変形時の等価剛性から概ね説明できる。
- 2) 本工法による天井システムの性能を応答加速度から見ると、X 方向については、2 体の試験体とも、最大で 1G の加速度に相当する慣性力 (4.53kN) 以上を負担し、ブレース断面の小さい試験体 A では座屈が見られ、最大変位は 30mm 程度であった。また、加力順序を試験体 A では X-Y の順、試験体 B では Y-X の順としたが、ホワイトノイズ加振による固有振動数の変化に係わらず、ほぼ同程度の応答を示した。
- 3) Y 方向については、試験体 A では耐震クリップが滑動し、最大応答加速度も 1G をやや下回り、最大変位も 60mm 程度と大きかったが、滑動を拘束した試験体 B では最大応答加速度は 1G を超過

し、最大変位も 40mm 以下となり、補剛の効果が認められた。

- 4) 2m² 規模の天井ユニットの静的加力実験からモデル化したブレース・クリップモデルを用いた動的解析モデルは、28m² 規模の天井システムの複数種類の入力波による加振実験結果を、最大応答加速度、最大応答変位および波形位相に関して、概ね再現した。
- 5) 試験体 B に関して、実験で見られた耐震クリップの野縁方向の滑動拘束の効果は、解析においても再現された。
- 6) 解析モデルは繰り返しによる影響を考慮しているが、大変形を受けた後の小さな応答レベルの挙動に対しては、精度は低下する。

謝辞

本研究における加振実験においてご協力頂いた株式会社ミルックスの安武浩通氏、工藤夕雅氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会、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、2003
- 2) 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、pp.367-372、2002.12
- 3) 川口健一、吉中進、大塚彩、片山慎一郎：新潟県中越地震と同中越沖地震における大規模集客施設内部の非構造材（吊り天井）被害の比較、日本建築学会技術報告集、第 14 巻第 27 号、pp.73-78、2008.6
- 4) 中本康、北川則昭、ほか 5 名：釧路空港ターミナルビル天井材落下に関する研究 その 1~5、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、pp.883-892、2004.8
- 5) 松岡祐一、ジェイソンマコーミック、吹田啓一郎、中島正愛：軽量鉄骨下地間仕切り壁とそれに囲まれた鋼製下地天井の耐震性能、日本建築学会構造系論文集、第 632 号、pp.1857-1864、2008.10
- 6) 小林俊夫、由利隆行、荒井智一：鋼製天井下地を用いた吊り天井の耐震性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 630 号、pp.1295-1302、2008.8
- 7) 渡壁守正、飯塚信一、ほか 4 名：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、日本建築学会技術報告集、第 18 巻第 39 号、pp.465-470、2012.6
- 8) 西山功、伊藤弘、西田和生、梁一承：在来工法天井及びシステム天井の動的加振実験、その 1~2、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.847-850、2002.8
- 9) 中本康、元結正次郎、ほか 3 名：鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究、その 1~3、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、pp.843-848、2006.9
- 10) 杉山達也、貫井泰、ほか 9 名：在来工法天井の構成部材および実大天井の力学的特性に関する実験研究、その 1~6、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、pp.227-238、2009.8
- 11) 杉山達也、貫井泰、ほか 10 名：在来工法天井の下地ボートと野縁のビス止め接合部のせん断試験 その 1~3、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、pp.871-876、2010.9
- 12) 船積宏彰、元結正次郎、ほか 5 名：在来工法による鋼製下地天井の力学的特性に関する研究、その 1~2、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、pp.911-914、2005.9
- 13) 船積宏彰、元結正次郎、ほか 6 名：鋼製下地在来工法天井の動的性状 その 2~6、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、pp.877-886、2009.8
- 14) 永井拓生、川口健一：在来工法吊天井の面内剛性の評価と振動性状に及ぼす影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、pp.883-884、2010.9
- 15) 鈴木健司、金子美香、他 3 名：鋼製下地在来工法天井の耐震性に関する実験的研究、清水建設研究所報告、第 89 号、pp.23-28、2012.2

注

注 1) 部分補強された在来工法天井の静的繰り返し加力実験について

本論で述べた解析を行うため、付図 1、付図 2 に示した 2m² 規模のブレース付き天井部分試験体に対して、図中の加力治具の点に変位制御の水平方向静的繰り返し加力実験を行い、部分補強されたブレース・天井系の力

学特性を把握した。天井ボードは2枚張り、補強方法は、本文で述べた試験体Aと同様である。载荷においては、野縁受け方向ではブレースの座屈と野縁の仕口の開き、野縁方向では耐震クリップの滑動と野縁受けの曲げ変形が見られ、これらは本論の動的実験の経過と同じである。

得られた外力と天井面水平変位による荷重変形関係を付図3に示す。この際、計測されたクリップ部分の変位（天井面－ブレース下端間の相対変位）から、クリップ部の荷重変形関係を求めた。更に、付図4に示す2節点モデルを構築することを意図して付図5に示すようなブレースの静的加力実験を別途実施した。試験体はブレースとブレースホルダーと吊りボルトから成り、吊りボルトに張力を与えた状態で、ブレースに正負軸力を与えた。得られたブレースの軸方向の荷重変形関係を付図6に示す。変形はブレースホルダーの回転に拠るところが大きく、ブレース部分のトラスモデルには、ブレースホルダー部分の剛性が含まれる。これらの力学特性を、本論の第3節で述べた解析諸元でモデル化し、実験結果と比較したものを付図7、付図8、付図9に示す。図中、Xは野縁受け方向、Yの野縁方向である。また、天井ユニット全体モデルの等価剛性および等価減衰定数を、静的加力実験による値と比較して付図10に示す。ブレースの軸方向の特性とクリップ部分の水平方向の特性とをモデル化して得られた全体の水平方向の特性が、概ね実験による荷重変形関係と整合していることが分かる。なお、等価剛性は最大・最小変位点割線剛性の平均値、等価減衰定数は次式による。

$$heq = \Delta W / (4\pi We)$$

ここに、 heq ：等価減衰定数、 ΔW ：1履歴ループの吸収エネルギー、 We ：最大・最小変位点割線剛性の弾性エネルギー平均値

付図1 2m²規模のブレース・天井試験体（野縁方向）

付図2 2m²規模のブレース・天井試験体（野縁受け方向）

付図3 荷重変形関係の例

付図6 ブレース+ホルダーの実験結果

付図4 2節点モデル

付図5 ブレース+ホルダーの実験

付図7 ブレース部の荷重変形関係

付図8 クリップ部の荷重変形関係

付図9 全体の荷重変形関係（左：X方向、右：Y方向）

付図10 等価剛性・減衰定数のモデルと静的実験結果の比較

DYNAMIC TEST ON PARTIALLY REINFORCED CONVENTIONAL CEILINGS AND SIMULATION ANALYSES

Tetsuya HANZAWA^{}, Eiji TANAKA^{*}, Kenji SUZUKI^{*},
Fumihiko SAKURABA^{*} and Mika KANEKO^{**}*

^{*} Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

^{**} Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

1. INTRODUCTION

In recent years, the collapse of ceilings due to earthquakes has become a serious problem. The authors have proposed the reinforcing method to improve the aseismic performance of conventional ceilings. The proposed method employs the partial reinforcement only around the braces of ceilings. The shaking table tests of the partially reinforced ceilings were carried out to investigate dynamic characteristics. The analytical model of the reinforced ceilings is proposed based on the static cyclic loading tests and the simulation analyses were carried out to show the effectiveness of the analytical model.

2. DYNAMIC TEST

2.1 Outline of the test

Figures 1 and 2 show the specimens of the vibration test. The number of the specimens is two, and both of them are the partially reinforced ceiling. The specimen-B is further reinforced toward the specimen-A to prevent the steel clips from gliding along the ceiling joist.

2.2 Process of the test

Specimen-A in X direction: Compression buckling arose in the brace for El Centro 600 cm/sec².

Specimen-A in Y direction: The steel clips glided along the ceiling joist for El Centro 600 cm/sec².

Specimen-B in X direction: Compression buckling didn't arise in the brace for El Centro 600 cm/sec² because of increased thickness of the braces.

Specimen-B in Y direction: The steel clips didn't glide along the ceiling joist in response to El Centro 600 cm/sec².

2.3 The test results

Figures 5 and 6 show the amplitudes of the transfer functions of the specimens A and B based on the white noise inputs. The natural frequency in Y-direction of the specimens A and B is about 5Hz. The natural frequency in X-direction of the specimen B is about 4.4Hz, and though that of the specimen A is about 6Hz. The test with white noise of the specimen-B in X-direction was carried out after the tests with seismic wave in Y-direction, the natural frequency in X-direction is considered to be affected by the loading history in Y-direction. Tables 4 and 5 show the value of the maximum response acceleration and displacement of the specimens subjected to seismic waves.

3. SIMULATION ANALYSES

3.1 Analytical model

Figure 10 shows the analytical model of the specimen. The characteristics of the restoring force of the clips and the brace are based on the static cyclic tests (see NOTE-1). Figure 10 in NOTE-1 shows the equivalent stiffness and damping factor of the analytical model in compared with the test results. The calculated equivalent stiffness and damping factor are in good agreement with the experimental data.

3.2 Results of Simulation Analyses

Tables 8, 9 and Figure 17 show the calculated values of the maximum acceleration and displacement, and the ratios to the experimental data.

Figures 13-16 show the response acceleration and displacement waves in compared with the experimental data. The calculated responses are in good agreement with the experimental data.

4. CONCLUSIONS

- 1) The natural frequencies of the reinforced ceiling based on the white noise tests are reasonably corresponding to the one base on the static cyclic loading tests.
- 2) The natural frequency of the reinforced ceiling is found to vary for small amplitudes of displacement. But the response for large amplitudes of displacement is not affected by the change of the natural frequency in range of the small amplitude.
- 3) The aseismic performance of specimen B in Y-direction improves in compared with that of specimen A.
- 4) The calculated response acceleration and displacement waves are in good agreement with the experimental data.
- 5) The accuracy of the simulation analyses of the reinforced ceiling subjected to the small input motions decreases after the large input motions.

(2014年3月7日原稿受理, 2014年9月26日採用決定)