

U.D.C 693/694

在来工法天井における耐震化手法に関する実験的研究

－東急建設式天井耐震補強システムの開発－

豊田 将文* 中本 康**

要約： 近年、震度5を超える地震が発生する度に大空間天井の落下被害が報告されている。これらの落下被害は非構造部材である天井材にも構造部材と同等の耐震安全性が求められることを再認識させ、社会的に新築及び既存を問わず安全対策を施すことが急務となっていることが広く知られるところとなった。特に在来工法は一般的な工法として広く用いられていることから、その対策にはコスト及び手間が掛からない汎用で効率的な手法であることが求められる。本報では、直接天井板をブレースにより支持する耐震補強型と鋼製下地の交点を拘束する落下防止型の2種類の簡易で安価な耐震化手法について、実大振動実験により得られた力学的特性を報告する。耐震補強型は嵌合と挟みの特徴とする取付金具を介してブレース補強する構成であり、この補強方法により質量 277kg の天井に1対の割合で座屈させないブレースで補強した実大天井は、エルセントロ波 300%の加振により天井面にて生じた1.05Gの慣性力に対し耐震性を発揮した。落下防止型も落下防止効果が認められた。

キーワード： 天井、耐震補強、振動実験、耐震要素、耐震金具、クリップ

目次：	1. はじめに	6. 結果概要
	2. 対策の概要	7. 慣性力と変形の関係（弾性レベル）
	3. 試験体	8. 慣性力と変形の関係（1G レベル）
	4. 実験方法	9. 慣性力と変形の関係（T2 のE波 300%3D加振）
	5. 測定方法	10. まとめ

1. はじめに

震度5クラス以上の地震発生時において、体育館等の大規模天井が落下する被害が伝えられている。そのほとんどが在来工法による天井であり、近年の研究でその力学的特性や動的挙動が明らかになりつつある。在来工法天井の落下原因として、振れ止めブレース近傍の鋼製下地の交点に地震力が集中し、その交点を繋ぐクリップが滑り、外れてしまうことが指摘されている¹⁾。このクリップの脆弱性が引き金になり、最終的に天井全体が崩落にいたると考えられている。本研究にてクリップの脆弱性を補う手法を模索した結果、鋼製下地交点のクリップに地震力が集中しない独自の東急式天井耐震補強システムおよびクリップの外れを防止する簡易な方法を提案したので、その検証実験結果と共にその効果を報告する。

2. 対策の概要

クリップの脆弱性を補う耐震補強としては、クリップを介さずに、野縁材に直接振れ止めブレースを取り付けて、直接的に天井ボードに働く慣性力をブレースに伝達できるように接合することが有効であると考え、図1に示す金物（I型・II型）を用いたブレース接合方法を考案した。天井ボードへの金具の取付は、鋼製下地を介して行う。野縁方向へは、野縁を両側から厚さ2.3mmの鋼板を挟み込んで取り付ける。野縁受け方向へは、ユニークな形に加工した同厚の鋼板を野縁に嵌合させ野縁

受けを跨いで取り付ける。これら取付けの特徴は、一般的に用いられる野縁や野縁受けへのビス止めに変え、嵌合や挟みの機構を用いていることであり、ビスの破断や外れ等による急激な耐力低下を避け、取付部の挙動に靱性を持たせていることである。

なお、金物の形状は経済性・施工性と金物の性能の関係を確認するため2タイプ設定した。I型が野縁を多数の金物で囲むタイプで、II型がそれを簡略した経済的で施工性に優れるタイプである。I型は落下防止を図ったJ型薄板鋼板（幅18.0mm厚さ1.0mm）を野縁リップに入れており、野縁への嵌合の割合は30%である。II型は挟みこむ鋼板に設けた切起し（幅18.0mm）を野縁

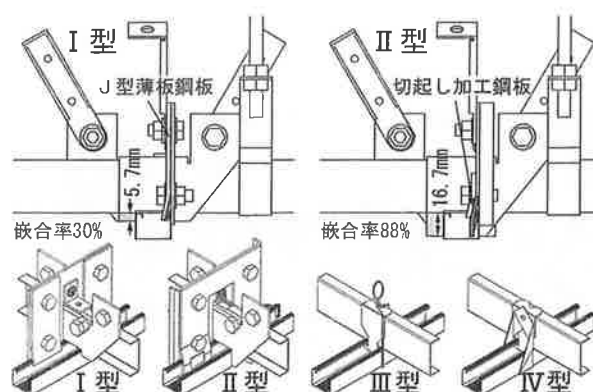


図1 耐震性向上および落下防止対策

リップに入れており、野縁への嵌合率は88%である。

また、クリップの脆弱性を補う天井落下防止としては、野縁と野縁受けの交点を緊結させる方法が有効であると考え、図1に示す方法(Ⅲ型・Ⅳ型)を用いた落下防止策を考案した。Ⅲ型は結束線で野縁と野縁受け交点を縛る方法であり、Ⅳ型はユニークな折曲げ金物で縛る方法である。Ⅲ型は径0.9mm、SUS304製の結束線を2重巻したもので、Ⅳ型は幅18mm、厚さ0.4mmの薄肉折曲げ鋼板で野縁受け側面にビス止めしたものである。これらは、天井の耐震対策の中でも人的被害の回避に絞った対策であり、フェールセーフ的な対策と位置づけられる。

3. 試験体

本実験における構造諸元を表1、試験体を図2に示す。試験体は実大の19型鋼製天井下地材で組立てた4.5m四方の在来工法天井で、1.5mの天井ふとを有し、天井ボード(16kg/m²)、振れ止めブレース(天井負担面積

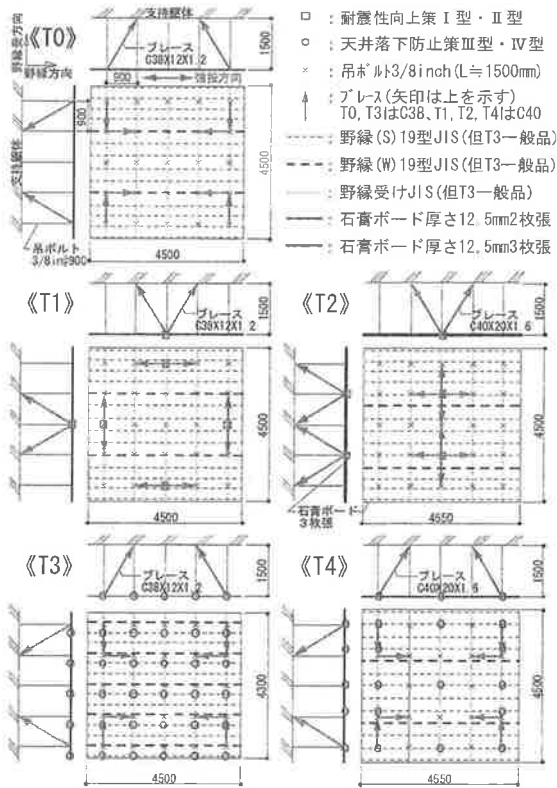


図2 実大天井試験体概要

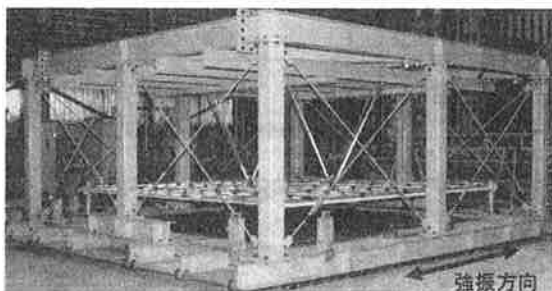


写真1 加力装置 試験体と鉄骨フレーム(架台)

12~20m²)を均等に配置した天井を基本とした。T0 は一般的な天井を模擬した試験体で、T1 および T2 はⅠ型を4箇所、Ⅱ型を2箇所に用いた耐震性向上を図った試験体である。T3 および T4 はⅢ型を25箇所、Ⅳ型を13箇所に用いた天井落下防止を図った試験体である。T2 の天井ボードは3枚張り(24.79kg/m²)とした。

4. 実験方法

振動台に剛な鉄骨フレーム(写真1参照、以下架台)を組み、その中に天井試験体をセットし1~3次元加振を行うことにより、動的挙動を比較検討するものとした。

入力波はエルセントロ波を最大300%(架台上部中央にて1G相当)とした3次元加振波を用いた。強振方向のNS成分は野縁方向とした。架台の固有振動数は野縁方向(以下、X方向と呼ぶ)17.9Hz、野縁受け方向(以下、Y方向と呼ぶ)18.4Hzであり、振動台と架台上部中央の最大加速度は両者ともよく対応する。なお、通常天井に比し大きな質量としたT2において、Z方向の加振レベルの低減は行っていない。

5. 測定方法

測定方法を図3に示す。レーザー変位計により架台と天井の相対変位を計測し、更にリール式変位計を4台配

表1 実験の構造諸元

No	目標	使用金具 [ヶ所]	天井材 ¹⁾		振止材 (両方向2対)	野縁受け ³⁾ (φ900)	野縁19型 ³⁾ 「ダブルシングル」 [枚]	天井板材 ⁴⁾ [kg/m ²]
			サイズ[m]	[kg]				
T0	再現	—	4.5x4.5	382.2	C-38x12x1.2	C-38x12x1.2	①1820 ③364	2枚張り 16.59
T1	耐震Ⅰ型	4ヶ所	4.5x4.5	382.2	C-40x20x1.6	C-38x12x1.2	①1820 ③364	2枚張り 16.59
T2	性能Ⅱ型	2ヶ所	4.5x4.55	554.4	C-40x20x1.6	C-38x12x1.2	①1820 ③364	3枚張り 24.79
T3	落下Ⅲ型	25ヶ所	4.3x4.5	364.8	C-38x12x0.9	C-38x12x0.9	①910 ③303	2枚張り 16.60
T4	防止Ⅳ型	13ヶ所	4.5x4.55	384.2	C-40x20x1.6	C-38x12x1.2	①1820 ③364	2枚張り 16.47

注1) 特記なき場合は単位はmm、注2) 天井材質量は鋼製下地を含む、注3) 野縁受け材、野縁材はJIS品使用、但しT3のみ一般材「ダブル19x50x0.35、シングル19x25x0.35」、注4) 板材は「石膏」ボード厚さ12.5mm、注5) Ⅲ型はφ0.9mm、SUS製結束線2重巻、注6) Ⅳ型はt=0.4mm、W=18mm、STKMRK400、振止材脚部と対材の中間に配置、注7) Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ型は特許出願済

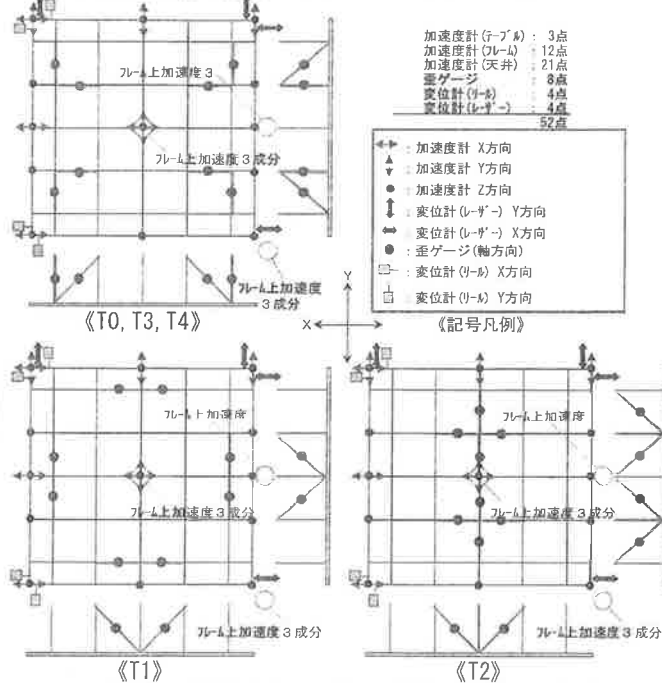


図3 計測点配置—試験体天井と架台、振動台

置し、補正による大変形時の変位及びねじれ回転を求めた。加速度計は天井面、架台、振動台に配置した。振れ止めブレースにはひずみゲージを貼り、負担軸力も計測した。

6. 結果概要

実験結果を表2に示す。表中にはエルセントロ（以下、Eと記す）波60%2D(XZ)加振と300%3D(XYZ)加振時の天井面中央における、加速度最大値、慣性力最大値、ゆれ（以下、変位と呼ぶ）最大値を示す。一部試験体T2のみ200%3D(XYZ)の結果も併記する。X方向は野縁方向を意味し強振方向である。Y方向は野縁受け方向であり、Z方向は上下方向を意味する。表中の天井質量は天井下地材を含み、慣性力はその質量と加速度の乗算値とした。E波60%加振は架台（鉄骨フレーム）上面にて200galを目標とし弾性的挙動を把握し、同200%加振は684galを目標とし、同300%加振は1026gal(1G相当)を目標とした。

7. 慣性力と変形の関係（弾性レベル）

図4にE波60%2D(XZ)加振のX方向における天井面の慣性力と変位の関係を示す。一般的な天井を模擬した試験体T0において、慣性力1667N、変位43.1mmであったのに対し、耐震性向上を図った試験体T1、T2では1215N、2149Nの慣性力、1.0mm、1.3mmの変位が計測され、変位は1/40以下と確認された。ここでT2の慣性力と変位がT1より大きいのは、天井ボードの質量を約1.5倍割増しているためである。また、天井落下防止を図った試験体T3、T4は、T4にて若干の変位抑制効果が認められるが、T0の挙動と大きな差異は認められない。

8. 慣性力と変形の関係（1Gレベル）

図5に架台面上にて1Gを想定しE波300%3D加振した場合の天井面における慣性力と変位を示す。ここで、T2は質量が1.5倍であるため、天井面に生じる慣性力が他と同様となる加振波(E波200%3D)を採用した。T0はこの加振で天井が落下した。本報ではT2については、同波200%3D加振結果と比較する。

8.1 耐震性向上を図った試験体の履歴特性

耐震性向上を図った試験体T1、T2では、強振方向であるX方向の慣性力は、T0の落下前に記録された2192Nに対し、3872N、6166Nと大きくなっている。変位はT0の330.1mmに対し、45.9mm、7.4mmと1/7以下のゆれ抑制効果が確認された。T2は慣性力がT1より大き

表2 実験結果一覧

No	天井質量(kg)	E波60%2D(XZ)(0.2G)				E波300%3D(1G相当)				天井試験体対策(耐震性向上策)(落下防止策等)	
		加速度X(N)	慣性力X(N)	変位X(mm)	変位Y(mm)	加速度X(gal)	慣性力X(N)	変位X(mm)	変位Y(mm)		
T0	382	436	1667	43.1	574	2192	330.1	747	2853	277.1	通常天井・落下
T1	382	318	1215	1.0	1013	3872	45.9	1470	5618	44.1	耐震性向上I型
T2	554	388	2149	1.3	1344	7449	23.2	1030	5711	121.3	耐震性向上II型
					[1112]	[6166]	[7.4]	[889]	[4929]	[35.8]	[E波200%3D]
T3	365	413	1507	28.8	800	2918	347.6	646	2356	331.4	落下防止策III型
T4	384	371	1425	26.8	1501	5767	226.4	1126	4324	108.6	落下防止策IV型

注1)天井質量は下地含む。注2)慣性力は天井質量と加速度の乗算値。注3)加速度および変位は天井ボード面の計測値。注4)[]内は通常質量天井への換算にて架台上1G相当。注5)X方向は野縁(強振)方向をY方向は野縁受け方向を示す。注6)I、II、IV型は特許出願済

いにも関わらず、その変位が極めて小さく、変位に対する有効性はII型の欠み機構の方がI型に比べ高い。Y方向の慣性力は、T0の落下前に記録された2853Nに対し、5618N、4929Nと大きくなっている。変位はT0の277.1mmに対し、44.1mm、35.8mmと1/6以下のゆれ抑制効果が確認された。

8.2 落下防止を図った試験体の履歴特性

天井落下防止を図った試験体T3、T4では、天井落下に至らずIII型、IV型の落下防止効果が確認された。X方向の慣性力は、T3では2918Nとなり、T0の落下前に記

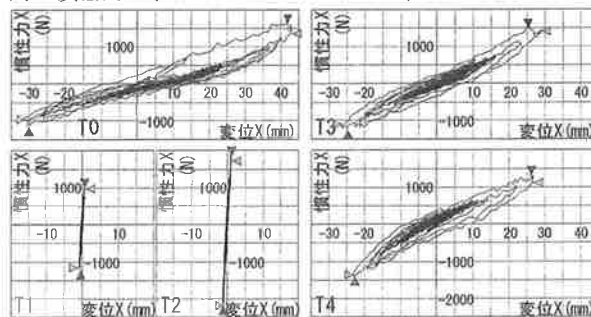


図4 慣性力と変位の関係（架台上で0.2Gを目標）

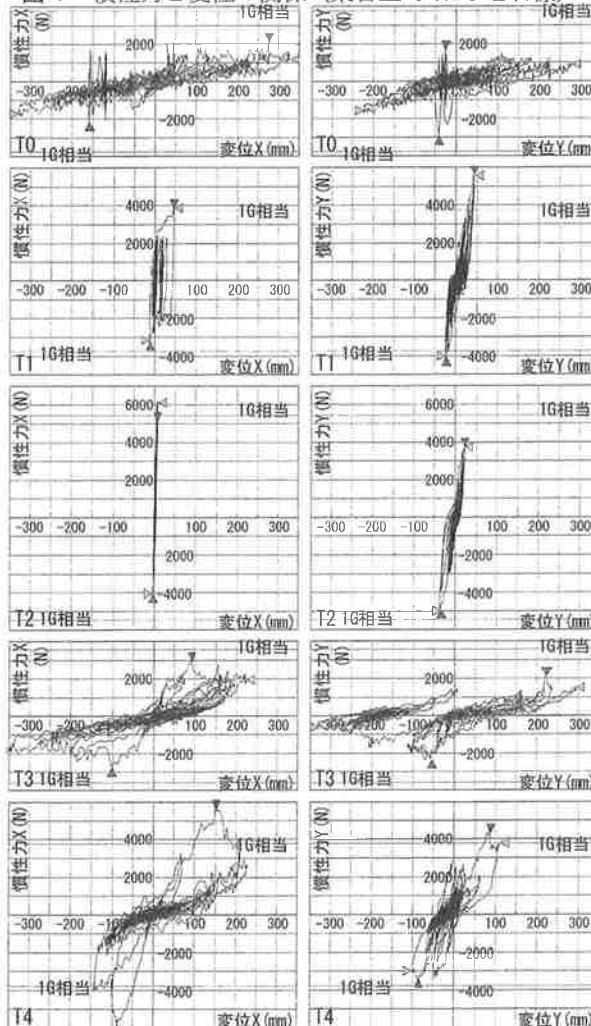


図5 慣性力と変位の関係（天井面で1Gを想定）

録された 2192N と同程度であったが、T4 は 5767N と大きくなった。変位は T0 の 330.1mm に対し、T3 は 347.6 mm と同程度であったが、T4 は、226.4mm と小さくなった。T3、T4 の慣性力は T0 より大きく、その履歴性状においても天井全体の剛性が向上している。特にIV型を使用した T4 ではその傾向が大であった。Y 方向の慣性力は、T3 では 2356N となり、T0 の落下前に記録された 2853N と同程度であったが、T4 は 4324N と大きくなった。変位は T0 の 277.1mm に対し、T3 では 331.4mm と 2 割程度大きく、T4 は 108.6mm と 1/3 程度となった。T3 の挙動(履歴曲線)からクリップ外れ限界を超えた後も結束線(Ⅲ型)により野縁への接合が保たれ、(1)クリップが野縁受け上を滑る、(2)野縁受けがハンガー内を滑ることが変位を増大させていると思われる。T4 においては、野縁受けへビス止めするため前述(1)の現象が見られず変位を抑制し、天井全体の剛性を向上させたと思われる。

9. 慣性力と変形の関係 (T2 の E 波 300%3D 加振)

図 6 に E 波 300%3D 加振における T2 試験体の天井面における慣性力と変位の関係を示す。

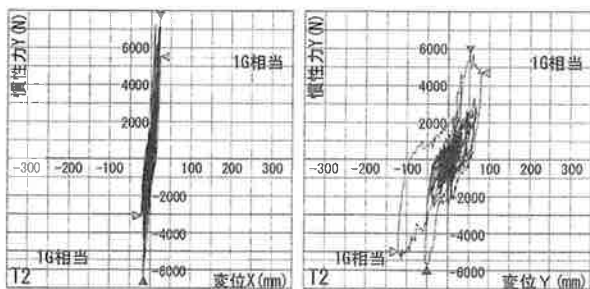


図 6 慣性力と変位の関係 (天井面で 1G を想定)

謝 辞

本研究にあたり東京工業大学院人間環境システム専攻元結正次郎准教授よりご指導ご助言をいただきました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会:実務者のための既存鉄骨造体育館等の耐震改修の手引きと事例, 2006 年 8 月

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EARTHQUAKEPROOF METHOD OF CONVENTIONAL CEILING

M.Toyoda, Y.Nakamoto

In recent years the fall damage of the ceiling was reported whenever an earthquake more than seismic intensity 4 occurs. And we recognized that the fall of the ceiling threatened human life again. Earthquake proofing safety same as a structure member is necessary for the ceiling materials of the non-structure member, and it is necessary to take seismic safety measures on the ceiling immediately. In particular, that the measures for conventional ceilings are necessary to be cheap and simple. Because it is used widely in Japan.

In this paper, we report a dynamics characteristic reinforced by simple and cheap technique on 2-types earthquakeproof method by full size earthquake experiments.

9.1 X 方向における履歴特性

この加振により X 方向では架台面にて 978gal、天井面にて 1344gal が計測されたが、II型を用いた天井はクリップに異常損傷はなく、ブレースの座屈もなかった。天井の質量が落下試験体 T0 の 1.45 倍(27.1kg/m²)であり、通常天井の 1G 相当に比べ 2 倍程度の加振に相当する。X 方向の慣性力は 7449N を記録し、T0 の落下前に記録された 2192N の 3.4 倍となった。変位は T0 の 330.1mm に対し 23.2mm と 1/15 程度であった。本加振で得られた慣性力は、静的加力試験で得られた保持力に達しておらず、履歴特性も線形性を有し弾性的範囲内の挙動であった。

9.2 Y 方向における履歴特性

Y 方向では、最大耐力を超えた後、変位が増大(121.3 mm)し、急激な耐力低下を伴わず粘りのある履歴特性を示した。Y 方向の慣性力は 5711N を記録し、T0 の落下前に記録された 2853N の 2 倍となった。変位は T0 の 277.1mm に対し、121.3mm と 1/2 程度であった。

10. まとめ

鋼製下地在来工法天井における耐震補強工法および天井落下防止策について、対策案を示しその効果を確認した。

- ・振れ止めブレースと野縁の接合にビス止めではなく嵌合や挟みを用いる耐震補強工法の有効性が確認された。(東急建設天井耐震補強システムの開発)
- ・クリップの脆弱性を補う為に野縁と野縁受けの交点を緊結させる落下防止法の有効性が確認された。