

◇技術紹介 Technical Report◇

天井制振構法「ロータリーダンパー天井制振システム」のシステム天井への展開 Vibration Control System with Rotary Dampers for Grid Ceiling System

青山 優也 Yuya Aoyama
奥田 浩文 Hirofumi Okuda
(技術本部)
達富 浩 Hiroshi Tatsutomi
(札幌支店営業第一部)
田嶋 往夫 Yukio Tajima
(東京本店建築事業部)

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震、およびその余震による甚大な天井脱落被害を受けて、国土交通省は地震時の損傷を防止し、脱落の低減を図る天井の構築を義務化した¹⁾。その具体的な方法の一つは耐震ブレースを多数設置することであるが、天井裏の設計的・施工的な制約が増大し、ひいては天井施工に係るコストが大幅にアップするという課題が発生している。また、同地震では揺れ方の異なる天井と設備機器の衝突に起因する被害事例が多数報告された。

これらの問題を解決するために、筆者らはアングル材により構成されるフレーム（以下、補強フレーム）と在来工法吊り天井（以下、Z天井）をエネルギー吸収装置（以下、ロータリーダンパー）で接続することで地震の揺れを吸収し、衝突を回避するロータリーダンパー天井制振システム²⁾（以下、RDS）を2018年に開発した。

一方、グリッドタイプのシステム天井（以下、GS天井）の耐震改修工事に耐震ブレースを用いる場合、既設天井の解体復旧によるコスト・工期の増大だけでなく、室内空間が使用できなくなることが課題であった。

そこで筆者らは、Z天井を対象として開発したRDS（以下、Z天井用RDS）の、GS天井への展開を図った。（以下、GS天井用RDS）。GS天井用RDSは、天井ボードを部分的に取り外すだけで施工可能であるため、天井の全面的な解体が不要となり、室内の使用性を妨げずに耐震化することができる。

本報では、GS天井用RDSの概要と、その性能確認、解析との整合確認を目的として行った振動台試験結果について紹介する。

2. 先行技術

2.1 吊り天井の種類と概要

吊り天井の系統図をFig.1に示す。Z天井の施工では、下地材と天井ボードの緊結が必要である。一方、GS天井は、接合部が差込み式の下地材であるTバーをグリッド状に接続し、天井ボードや設備機器をグリッドの枠内に組込むことで施工可能である。このため、Z天井と比較して施工性が良く、工期短縮が図れるメリットがある。一方、GS天井の天井ボードはグリッドの枠に載せただけであるため、面内方向の剛性・強度が小さい。

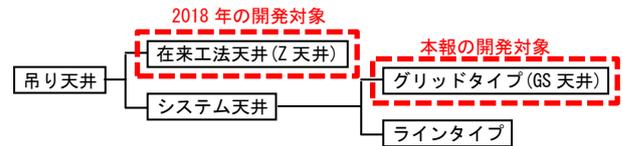


Fig. 1 吊り天井の系統図
System Diagram of Suspended Ceiling

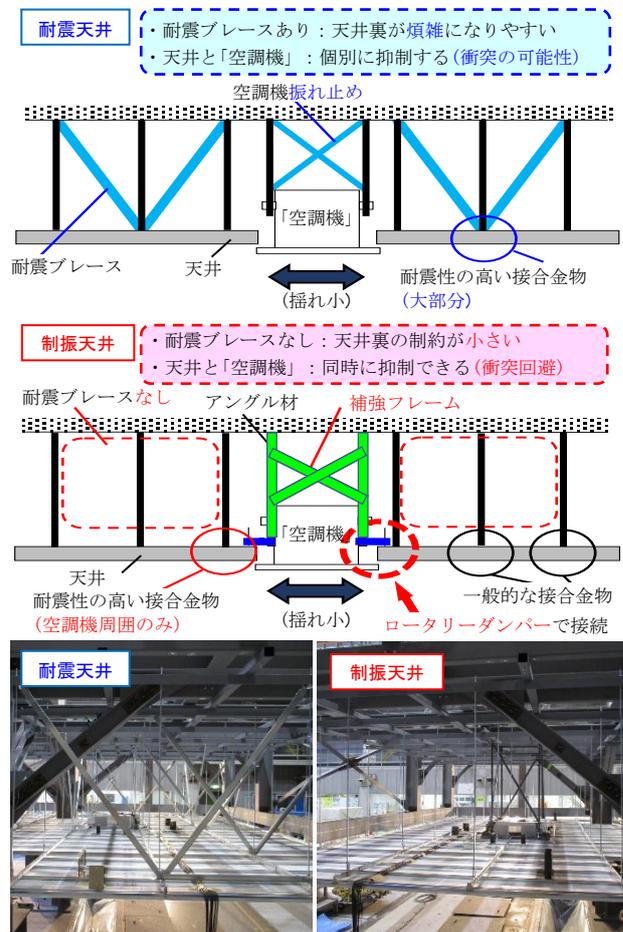


Fig. 2 耐震天井とRDSの補強方法と特長
Comparison of the Ceiling Reinforcement

2.2 耐震天井とRDSの比較

耐震天井とRDSの補強方法と特長についてFig.2に比較して示す。RDSは、天井・設備双方の耐震性向上を合理的に達成することができるほか、天井裏の耐震ブレースが不要となるため、設備機器の設計的・施工的な自由度が拡大し、ひいてはコストダウンに貢献する。ここで、補強フレームの内側に、設備機器の一種である天井埋込

みカセット型室内機（以下、「空調機」）を設置することで、「空調機」の耐震性向上も可能である。

2.3 RDS の機能と前提条件

RDS は、「建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説」³⁾（以下、「天井技術基準」）の「計算ルート（応答スペクトル法）」で規定されている天井面に作用する地震力に対して、以下の機能を発揮する。

- 1) 天井面構成部材等、「空調機」を含む補強フレーム、ロータリーダンパーおよび天井補強材の損傷回避
- 2) 天井と当該天井周辺の壁等との衝突回避

なお、補強フレーム以外の懸垂物が本技術における補強フレームと同等以上の剛性、耐力を有していれば、当該懸垂物を補強フレームの代替として用いることができる。

以下に、RDS を適用する際の前提条件を示す。

- 1) 天井と周辺の壁等との間に所定のクリアランスを確保する。このクリアランスは、一般的な耐震天井と同様に 6cm を基本とするが、天井および周辺の壁の変形に 1.5 倍の安全率を考慮して個別に設計する。
- 2) 補強フレームは天井面積および天井質量に応じて必要数を釣り合いよく配置する。
- 3) 天井に耐震ブレースは設置しない (Fig. 2 参照)。

3. GS 天井用 RDS の概要

前述のとおり、GS天井は天井面の剛性・強度が小さいため、Z天井用RDSを直接GS天井に適用することができない。そこで、Fig. 3に示すアルミフレーム・ターンバックル等の既製品を用いた天井面の補強方法を考案し、ダンパー力を天井全体に伝達することを実現した。

GS天井用RDSの基本構成および構成部材の概要をFig. 4に示す。GS天井用RDSは、以下の部材で構成される。

- 1) ロータリーダンパーとその取付金物
- 2) ロータリーダンパー力を吊り元へ伝達するための補強フレーム
- 3) 天井面の面内剛性を担保するための天井補強材

天井補強材は、梯子状のアルミフレームおよびトラス構造とするためのターンバックルにより構成されている。補強フレームとアルミフレームはロータリーダンパーユニットを介して接続されており、ロータリーダンパーユ

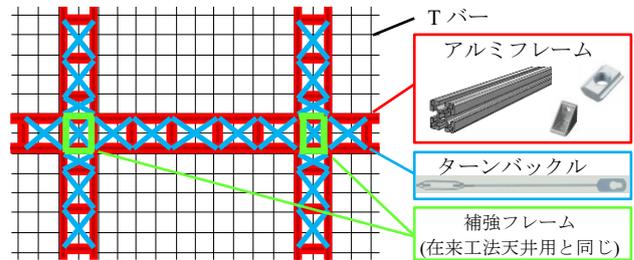


Fig. 3 GS 天井の面内補強概要
Outline of In-Plane Reinforcement for System Ceiling

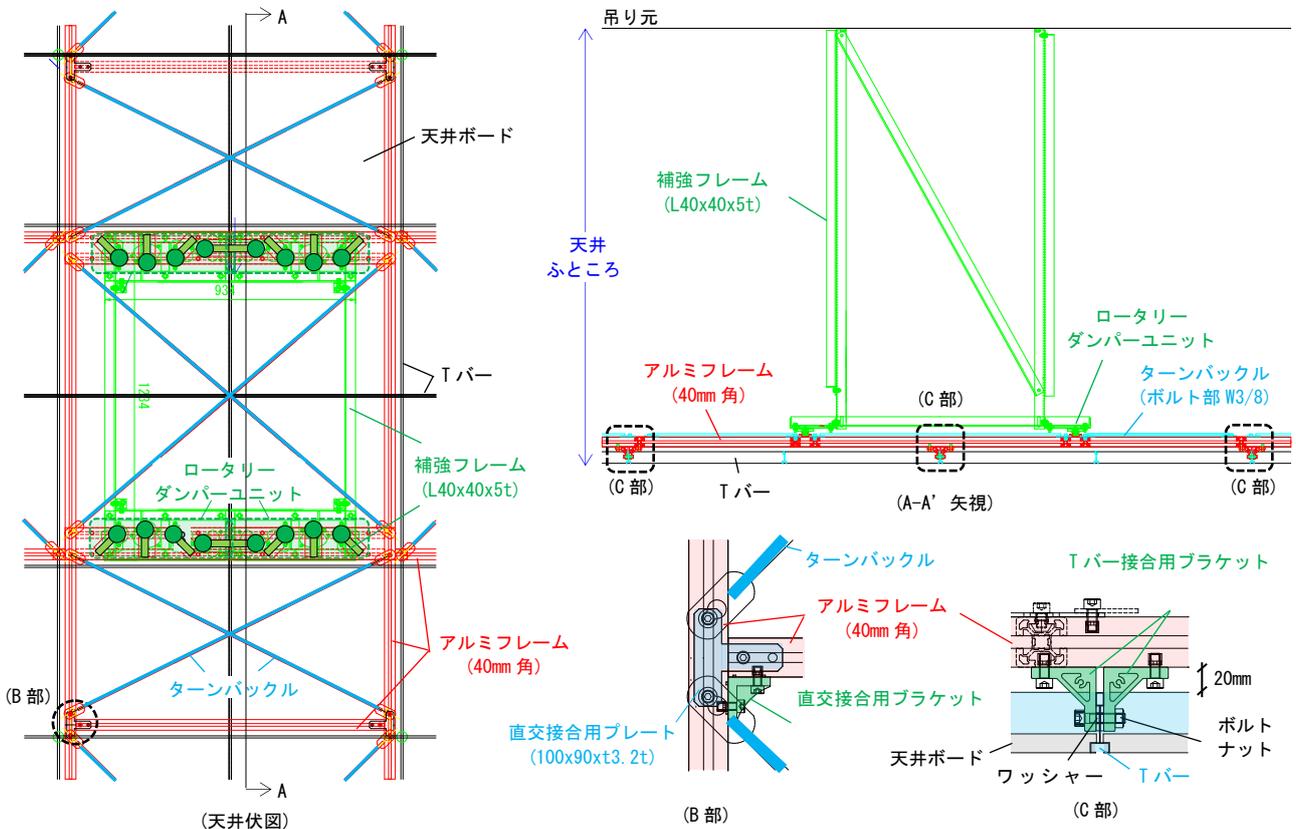


Fig. 4 GS 天井用 RDS の基本構成および構成部材の概要
Member Arrangement of RDS for System Ceiling

ニットが相対変形することによりエネルギーを吸収する。一方、アルミフレームとGS天井はTバー接合用ブラケットを介して接合されている。ここで、アルミフレームは、天井ボードの取り外しが可能となるように、Tバーの天端から上方20mmがアルミバーの下端となっている。

また、ロータリーダンパーの外観をPhoto 1に示す。ロータリーダンパーにはシリコンオイルが充填されており、回転方向に粘性減衰力を発生させるダンパーである。RDSにおいては、Fig. 5に示すダンパー腕、ベアリングおよびスライドレールを用いた機構により、回転方向の減衰力を直進方向のそれに変換する。Fig. 4に示すとおり、RDSは水平方向の全方向にほぼ同じ減衰力を発揮させることを目的として、ダンパー腕の方向を8方向(0°~315°まで45°刻み)に向けて配置している。

なお、GS天井用RDSは2022年3月に、一般財団法人日本建築総合試験所の建築技術性能証明(GBRC性能証明第17-29号改2)を取得している。

4. 振動台試験による性能確認

4.1 試験概要

想定する地震力に対して、RDSの構成部材が損傷しないことを確認するために、振動台試験を行った。本試験は、三次元振動台上にGS天井および補強フレームの吊り元となる鉄骨架台を組み立て、約82m²(11,520mm×7,680mm)のGS天井を施工し、GS天井と2台の補強フレームとをロータリーダンパーで接続する形で行った。

GS天井は、3章に示す天井補強材により補強した。GS天井および補強フレームの仕様をTable 1に、試験体概要をFig. 6にそれぞれ示す。一般に、GS天井は600mmグリッドタイプと640mmグリッドタイプがあるが、構成部品の諸元は共通であるため、より座屈しやすい場合の試験とすることを目的として、640mmグリッドタイプを用いた。また、天井ボードは12mm厚と15mm厚があるが、より脱落しやすい場合の試験とすることを目的として、12mm厚を用いた。

振動台への入力波形は、「天井技術基準」の応答スペクトル法で規定されている天井面に作用する水平方向加速度をGS天井の5%加速度応答スペクトルとみなし、このスペクトルに適合する人工地震動波形とした。同水平方向加速度は、建物の刺激関数・刺激係数をパラメータとする式となっている。そこで、せん断質点系を想定し、固有値解析により求めた刺激関数・刺激係数を用いた。建物周期による特性を網羅的に設定するため、3階建て、8階建て、15階建て、25階建ての建物を想定した。この時、位相特性は乱数位相を基本とし、比較的長周期の8階建て、15階建て、25階建てに対しては長周期成分を多く含む八戸位相も、比較的短周期の3階建てに対しては短周期成分を多く含む神戸位相もそれぞれ考慮した。

加振はX方向を基本とし、最も変位応答が大きくなる8



Photo 1 ロータリーダンパーの外観

Appearance of Rotary Damper

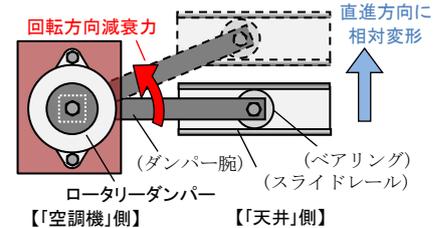


Fig. 5 制振天井のエネルギー吸収機構 Energy Absorption Mechanism of Damper

Table 1 GS天井および補強フレームの仕様 Specification of "Ceiling" and Reinforcing Frame

天井仕様	ふと	1.8m
	重量	14.5kg/m ² (天井5.7kg/m ² +天井補強材2.4kg/m ² +おもり20kg×24個)
面積	約82m ² (11,520mm×7,680mm - 1,280mm角の開口4か所)	
天井材	タイプ	640グリッドタイプ
	下地材	Tバー(亜鉛鋼板, 0.4mm厚)
	ボード	631角×12mm厚(岩綿化粧吸音板)
	吊りボルト	全ネジボルトW3/8
補強フレーム仕様	サイズ	800mm角×ふと1.8m用
	アングル	L40x40x5t

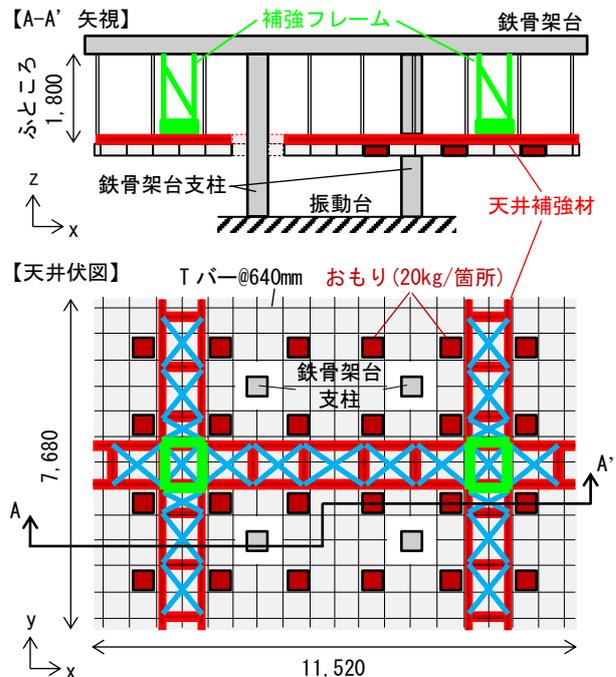


Fig. 6 試験体概要 Outline of Test Piece

階建て・乱数位相の場合のみ、Y方向加振および45度方向加振も行った。

4.2 試験結果

一例として、3階建て・乱数位相波形でX方向加振した直後の試験体状況例をPhoto 2に示す。本試験を含む全ての試験において各種構成部材に損傷は発生しなかった。また、Table 2の上段にX方向加振のみの試験で得られた各種最大応答値を示す。同Tableより、GS天井の試験変位は4cm以内に抑えられていることが確認できる。これ

は、2.3節で述べたRDSが基本とするクリアランス6cmに対し1.5倍の安全率を満足する。試験においては周辺の壁等を設置していないが、仮に周辺の壁等が設置されていたとしても、設計値6cmのクリアランスがあればGS天井と周辺の壁等との衝突は回避できたものと考えられる。

これらのことから、GS天井用RDSは「天井技術基準」の「計算ルート」で規定される天井面に作用する地震力に対して、天井面構成部材等、補強フレーム、ロータリーダンパーおよび天井補強材の損傷および落下を防止できることを確認した。

4.3 解析と振動台試験との結果比較

GS天井用RDSの振動台試験で得られた結果(試験値)と解析モデルにより求めた結果(計算値)とを比較することで、解析の妥当性を検証する。解析モデルは、既報²⁾に示すZ天井のモデルを援用し、各種質量、剛性、減衰定数等の各種パラメータには4.1節で述べた試験体の値を用いた。解析における入力波は、試験においてGS天井の吊り元で計測した加速度データとした。

試験値と計算値の各種最大応答値比較をTable 2に、時刻歴波形比較をFig. 7にそれぞれ示す。ただし、同図には3階建て頂部・乱数位相の波形の結果を示している。これらの結果から、試験値と計算値とは概ね一致していることが確認できる。なお、紙面の都合上割愛したが、Y方向、45°方向の全ての試験ケースにおいて、試験値と計算値とは概ね一致していたことを付記しておく。

以上より、GS天井用RDSについても、既報と同様の解析モデルを用いた解析の妥当性が確認できた。従って、GS天井と当該天井周辺に設置されている壁等との間のクリアランスは、既報と同様の解析により確認することができる。

5. まとめ

在来工法天井用に開発済みのロータリーダンパー天井制振システムを、グリッドタイプのシステム天井へ展開するGS天井用RDSの開発を行った。GS天井用RDSは、天井ボードを部分的に外すだけで施工できるため、天井の全面的な解体なしに、室内の使用性を妨げず耐震改修を実現する技術である。また、耐震ブレースが不要となるため、天井裏における設備機器等の設計的・施工的な自由度が拡大し、ひいてはコストダウンにも貢献する。

本報では、GS天井用RDSの振動台試験を行い、その性能および解析の妥当性を確認した結果を報告した。

GS天井用RDSは、一般財団法人日本建築総合試験所の建築技術性能証明(GBRC性能証明 第17-29号 改2)を取得している。今後は、在来工法天井用RDSに加えて、GS天井用RDSの普及・展開に努めていく所存である。

参考文献

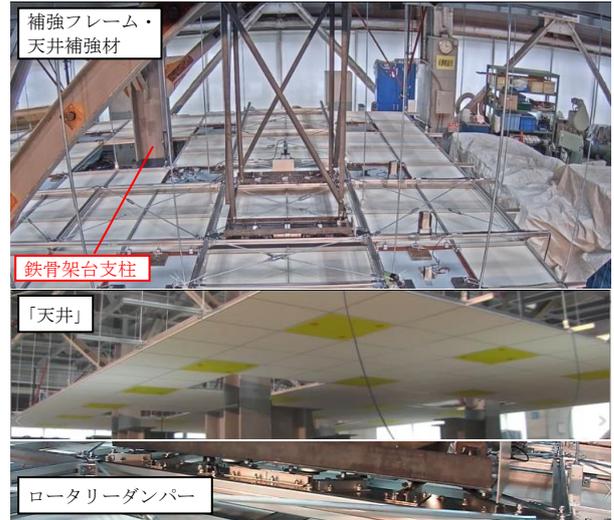


Photo 2 試験後状況
Situation after Test

Table 2 試験結果と計算結果の最大応答値比較
Comparison of Test and Analysis Maximum Values

入力波	GS天井 加速度	GS天井 変位	相対 変位	入力波	GS天井 加速度	GS天井 変位	相対 変位
3階建て頂部 乱数位相	518gal	29mm	20mm	3階建て頂部 神戸位相	484gal	30mm	22mm
	432gal	28mm	23mm		434gal	31mm	25mm
8階建て頂部 乱数位相	505gal	38mm	31mm	8階建て頂部 八戸位相	468gal	39mm	30mm
	432gal	53mm	49mm		436gal	48mm	44mm
15階建て頂部 乱数位相	416gal	27mm	21mm	15階建て頂部 八戸位相	413gal	20mm	15mm
	377gal	29mm	25mm		367gal	23mm	19mm
25階建て頂部 乱数位相	320gal	15mm	10mm	25階建て頂部 八戸位相	282gal	13mm	8mm
	295gal	15mm	11mm		284gal	11mm	7mm

上段:試験値
下段:計算値

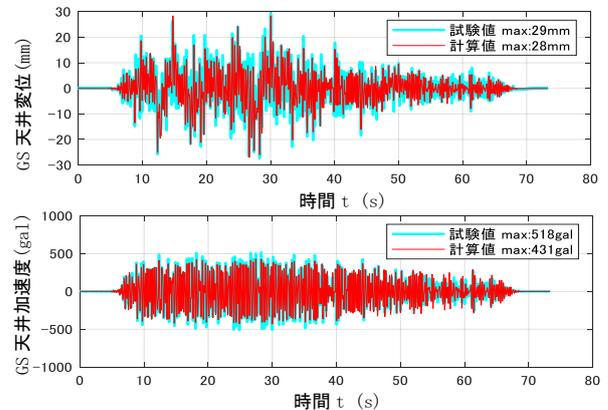


Fig. 7 時刻歴波形比較

Time History Waveform Comparison of Test and Analysis

- 1) 国土交通省:特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法を定める件(平成25年国土交通省告示第771号), 2013.8
- 2) 青山優也, 他:天井制振構法「ロータリーダンパー天井制振システム」, 大林組技術研究所報, No.82, 2018.12
- 3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所, 一般社団法人 新・建築士制度普及協会: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), 2013.10