

制振システム天井の開発

高木 政美^{*1}・日比野 浩^{*1}・成原 弘之^{*2}・佐々木 晴夫^{*3}・井上 和夫^{*4}・出雲 洋治^{*5}

Keywords : grid system ceiling, clean room, static loading test, shaking table test

システム天井, クリーンルーム, 静加力試験, 振動台実験

1. はじめに

昨年、震度 5 を超える地震が多発し、生産施設や公共施設などで天井が損傷・落下するなどの被害が報告された。筆者らはクリーンルームのシステム天井が損傷を受けた場合、清浄空間を復旧するのに多大な時間と金額がかかることに着目し、地震を受けてもクリーンルームとしての機能を保持することができる制振システム天井の開発を目的として研究・開発を行った。研究・開発は、まず開発の目標を定め、次に、天井部材の静的試験、解析による制振システム天井の成立性の検討、振動台による実証試験の順に行なった。本報では、その結果について報告する。

2. 制振システム天井の概要

2.1 開発コンセプト

2.1.1 従来型システム天井の問題点

従来のシステム天井は直交するバーを吊ボルトで吊り下げ、ブレースを適所に配置する方法で耐震性を確保していた。しかし、地震時には図-1 に示すように吊部材およびブレースに座屈や切断を生じ、天井や壁が損傷する可能性があった。

2.1.2 開発目標

供用期間中に遭遇する可能性の高い震度 5 強～6 弱相当の地震でクリーンルームに被害がなく、生産が継続できることを開発目標とした。そのためには天井部材および天井部材に取り合う壁部材、設備機器に過大な荷重・変形が生じないこと（加速度 800cm/s^2 以下、変位 10cm

以下）を設定目標とした。

対象とするクリーンルームは躯体チャンバー方式の FFU 空調方式とし、天井の質量は天井部材、FFU 等設備機器を含めて 50kg/m^2 （クラス 100 相当）を想定した。

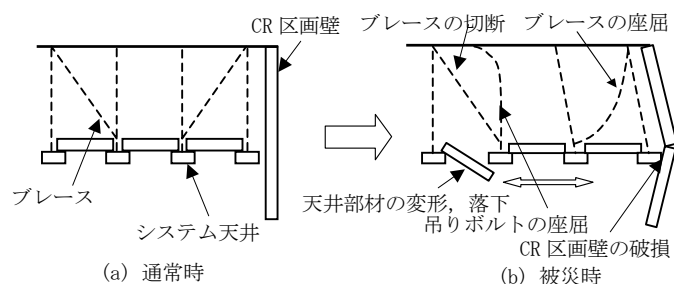


図-1 従来型システム天井の地震時の挙動（模式図）

Behavior of usual grid system ceiling on earthquake excitation

2.2 制振システム天井の概要

開発した制振システム天井は靱性型支持方式とダンパー方式の 2 種類である。

2.2.1 靱性型支持方式

靱性型支持方式の概念を図-2 に示す。支持鋼材のねばり（靱性）によって振れ幅を制御する方式である。靱性型支持部材の上端を鉄骨梁に剛接合し、下端は天井パネルに接合する。天井部材に地震力が作用したときの水平力を靱性型支持部材が受け持つ。支持部材は弾塑性変形することにより天井部材に作用する加速度と変位を制御する。

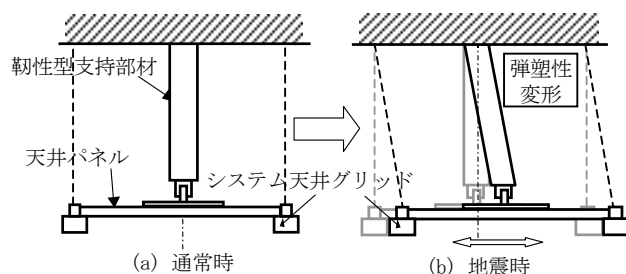


図-2 靱性型支持方式の概念

Concept of ductile support system

*1 技術センター建築技術研究所防災研究室
 *2 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室
 *3 建築本部技術部建築技術部
 *4 設備本部設備部
 *5 設計本部構造グループ

2.2.2 ダンパー方式

ダンパー方式の概念を図-3に示す。支持部材に固定したオイルダンパーにより振れ幅を制御する方式である。鉄骨梁に上端が剛接合された支持部材の下端と天井部材との間にダンパーを直行する2方向に1対ずつ取り付ける。天井部材に作用する加速度と変位とをダンパーが制御する。

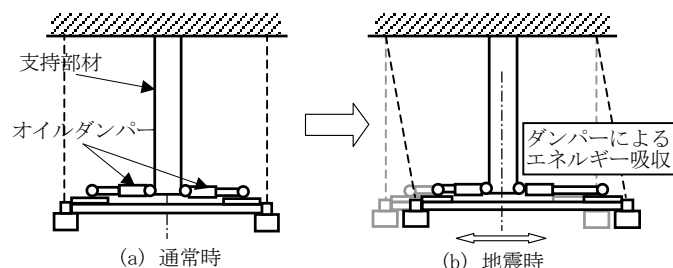


図-3 ダンパー方式の概念
Concept of damper system

3. 靱性型システム天井の静加力試験

3.1 システム天井部材耐力試験

3.1.1 目的

クリーンルームで使用されるシステム天井部材に、靱性型支持部材等から局所的に荷重が作用した場合の耐力を評価する目的で静加力試験を行った。

3.1.2 供試体

供試体の形状・寸法を図-4に示す。天井フレームを3×5のグリッドに組み、フレームの凸部断面の肩部に天井パネルを載せて供試体とした。

3.1.3 試験方法

試験方法を図-4に示す。天井グリッドの4隅を固定し、中央の天井パネルに接合部材を設置して、PC鋼棒に引張力を加える方法で載荷した。水平方向に加速度1Gが作用した場合を想定し、荷重の大きさは機器を含めた天井の重量相当とした。載荷方向は長手と短手の2方向とし、載荷荷重とグリッドの変位を測定した。

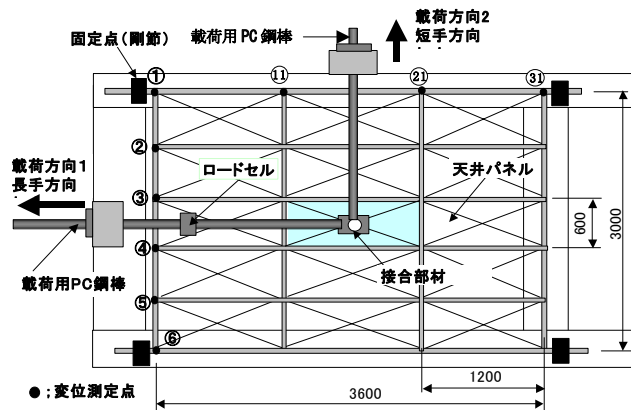


図-4 システム天井部材の形状・寸法と試験方法
Specimen of grid system ceiling for static loading tests

3.1.4 試験結果

荷重ごとの天井部材の変形分布を図-5に示す。

天井グリッドは、靱性型支持部材により局所的に作用すると想定した荷重に対して、20mm程度の変形を生じるが、十分な耐力があることが確認できた。

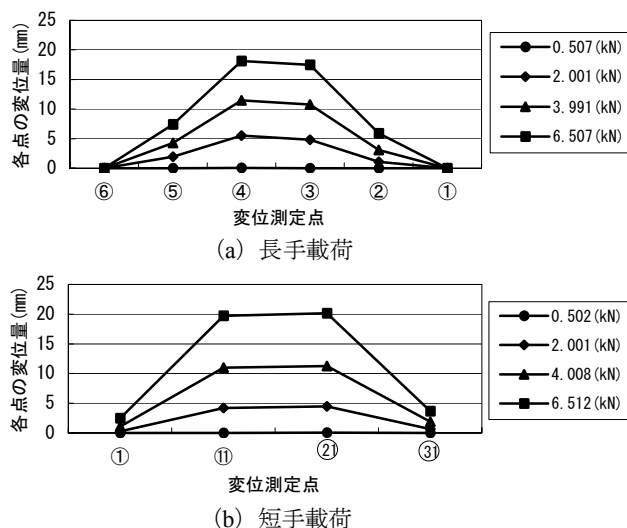


図-5 システム天井部材の変形の分布
Deformation distribution of grid system ceiling

3.2 靱性型支持部材の静加力試験

3.2.1 目的

靱性型支持部材は弾塑性変形することでエネルギーを吸収する。鋼材の規格値ではなく実際の物性値に基づいて設計する必要がある。ここでは靱性型支持部材として採用する鋼管の荷重-変形関係の評価することを目的とした。

3.2.2 供試体

供試体は直径、肉厚の異なる3種類の鋼管(STK400)とした。その種類を表-1に示す。

表-1 供試体一覧
Specimen of ductile members

供試体番号	直径φ(mm)	肉厚t(mm)	長さL(mm)
1	76	2.8	2100
2	89	2.8	2100
3	101	3.2	2100

3.2.3 試験方法

図-6に試験方法の概要を示す。2000kN アムスラー試験機により、靱性型支持部材の曲げ交番載荷試験を行った。正方向載荷と負方向載荷の交番は、供試体の上下を人力で転向させることにより行った。

3.2.4 試験結果

試験に供した靱性型支持部材のうち直径が89mmの鋼

管の荷重-変形関係を図-7 に示す。図より安定した履歴特性を有していることが分かる。

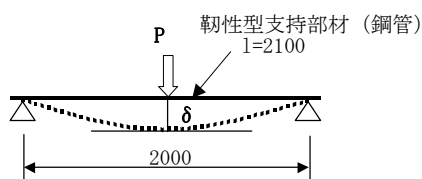


図-6 靱性型支持部材の静加力試験方法
Static loading test of ductile member

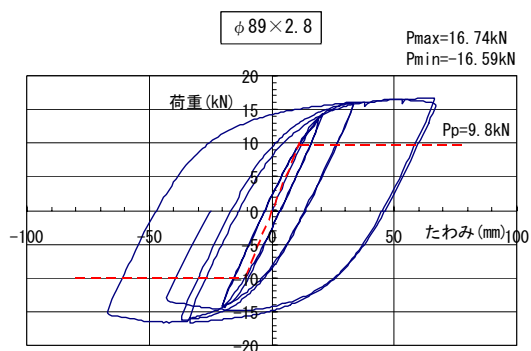


図-7 靱性型支持部材の荷重-変形関係 (φ89)
Load-deformation relationship of ductile member

3.3 静加力試験まとめ

天井部材に作用する想定荷重に対して天井部材が十分な耐力があることが確認できた。また、靱性支持部材の荷重-変形関係が把握でき、靱性型支持部材として機能することが確認できた。

4. 動的解析による制振システムの選定

システム天井に過大な荷重・変形が生じない靱性型支持部材およびオイルダンパー選定のために、実際の建物に本システムを適用した場合を想定し、天井の地震時挙動を動的解析により予測した。

4.1 解析モデル

4.1.1 想定建物

想定した建物は2階建ての生産施設で、1階と2階がクリーンルームとなっており、RFのコンクリートスラブと段差となったレベルにクリーンルームの屋根を有している建物である。

建屋フレームはX方向が

純ラーメン構造、Y方向がブレース構造で、ベースシア0.5相当で降伏すると仮定する。システム天井は屋根の架構から吊られている構造を想定している。

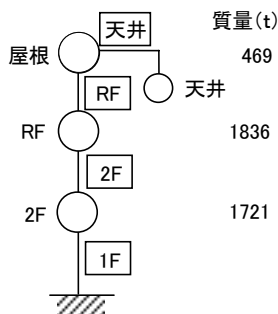


図-8 解析モデル図
Analytical model

4.1.2 解析モデル

解析モデルを図-8 に示す。モデルは各床レベルに質点を持ち、各階を非線形のせん断ばねでつないだモデルとし、天井は折板屋根から制振部材の剛性をもつせん断ばねで吊られた質点としている。

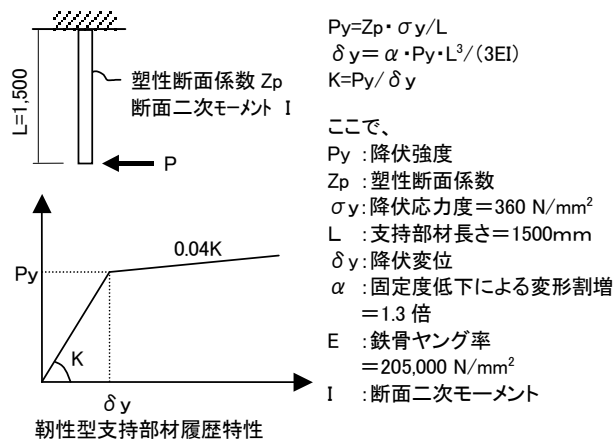
4.1.3 入力地震動

入力地震動は El Centro 1940 NS、Taft 1952 EW、Hachinohe 1968 NS を 25cm/s に基準化した地震波、および告示スペクトルを約 1.3 倍した告示波（以後それぞれ El Cen、Taft、八戸、告示と略記する）を使用した。地表面加速度としては 164~255cm/s² であり、これらの地震波は気象庁震度によると震度 5 強の大きさとなる。

4.2 制振部材の履歴特性

4.2.1 靱性型支持方式

靱性型支持部材は平面的に 3.6m ピッチに設置することとし、天井質量はクリーン度クラス 100 程度の 50kg/m² としている。図-9 に靱性型支持部材モデルを示す。靱性型支持部材モデルは長さ L=1500mm の片持ち材の剛性を有し、その降伏強度 Py で塑性化するバイリニアモデルとした。降伏応力度σy は静的試験より鋼材 F 値の約 1.5 倍の値とした。鋼管径はφ76、φ89、φ101 の 3 種類とした。



靱性型支持部材履歴特性

図-9 靱性型支持部材モデル
Analytical model of ductile member

4.2.2 ダンパー方式 (ダブル配置、シングル配置)

図-10 に示すようにオイルダンパーは接合部材と天井パネル材間に水平に設置する。履歴特性はオイルダンパーの規格値を基にしたバイリニアの減衰力特性および接合部材の剛性でモデル化した。オイルダンパーの 1 箇所あたりの本数を 2 本の場合（以下、シングル配置とする）と 4 本の場合（以下、ダブル配置とする）の両ケースについて検討を行った。

4.3 動的解析結果

4.3.1 靱性型支持方式

靱性型支持部材の解析結果を図-11 に示す。靱性型支持部材が大きくなるに従い変形は小さくなるが、逆に加速度は大きくなる。 $\phi 89$ ではシステム天井を取付ける構造躯体と天井パネルとの層間変形（以下、天井の変形と記す）が 10cm 程度におさまリ、そのときの天井加速度は約 800cm/s^2 程度と予想される。

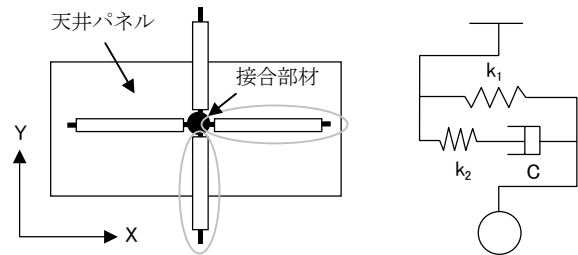
4.3.2 ダンパー方式（ダブル配置、シングル配置）

シングル配置の場合の解析結果を表-2 に示す。天井の変形は約 10cm、天井加速度は約 600cm/s^2 程度となっている。ダブル配置の場合の変形は約 6cm、加速度は約 800cm/s^2 となった。

4.4 動的解析結果まとめ

制振システム天井に用いる靱性型支持部材の選定、お

よびダンパー本数を確認するために動的応答解析を行い検討した。天井の変形を約 10cm にするためには、靱性型支持方式では靱性型支持部材を $\phi 89$ とすればよく、ダンパー方式ではダンパーの数を接合部 1 個所あたり 2 本とすればよいことがわかった。



(図はダブル配置の場合を示す。
シングル配置の場合は $\bigcirc$ で示す 2 本のみを用いた)

図-10 オイルダンパー設置および解析モデル
Layout of oil damper and analytical model

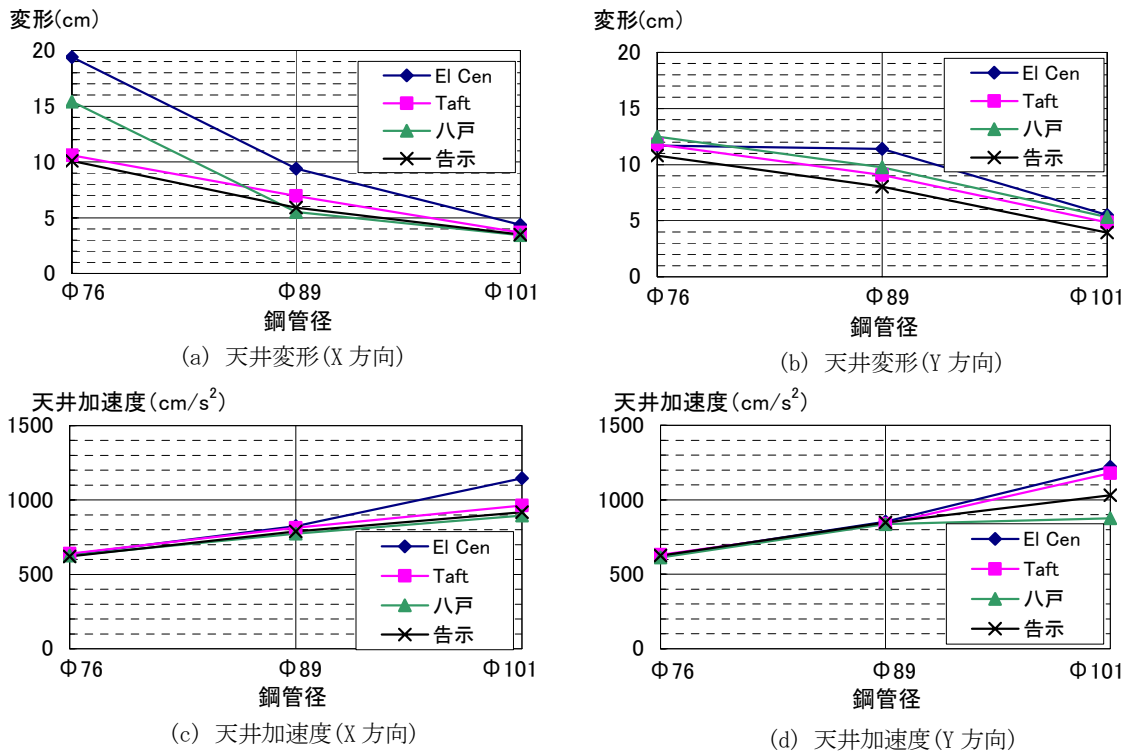


図-11 靱性型支持材方式の解析結果
Analytical results of ductile support system

表-2 ダンパー方式解析結果（シングル配置）
Analytical results of damper system (single type)

	X方向				Y方向			
	El Cen	Taft	八戸	告示	El Cen	Taft	八戸	告示
屋根－天井層間変形 (cm)	10.4	6.2	7.5	7.7	6.7	5.7	3.1	3.7
屋根－天井層間変形角	1/14.4	1/24.2	1/20.0	1/19.5	1/22.4	1/26.3	1/48.4	1/40.5
天井 加速度 (cm/s^2)	640	517	429	442	587	488	274	309
屋根 加速度 (cm/s^2)	620	525	409	407	696	578	328	406
地表面 加速度 (cm/s^2)	255	248	165	156	255	248	165	156

従来型では、加振途中で吊りボルトにはめ込まれたブレース固定金具のU型溝部分が脱落したために応答加速度は靱性型支持方式と同程度であったが、最大応答変位は計測可能範囲 25cm を上回った。

実験結果と解析結果を比較すると、概ね両者は整合している。加振ケースによって差が現れたのは、ここでの解析は実験結果のシミュレーション解析ではなく、天井を取り付けるための鉄骨フレームを考慮していない（鉄骨フレームの増幅を考慮していない）事が要因と考えられる。

El Cen 加振時の靱性型支持方式とダンパー方式の荷重－変位関係を図-16 に示す。靱性型支持方式の荷重－変位関係は、2 章で示した部材単体の静加力試験で得られたそれと同様の形状となっており、システム天井に組み込まれた状態でも安定した性能を発揮していることが確認できる。ダンパー方式は接合部材の剛性と粘性減衰が組み合わさった菱形に近い安定した形状となっている。

5.3 振動台試験結果まとめ

靱性型支持方式、ダンパー方式の実験結果では一部のケースを除き目標変位 10cm 内に収まっていた。目標変位を上回るケースでも、実施適用の際は計画時に建物の応答、天井の重量や制振部材の負担面積（天井単位面積当たりの制振部材数）を考慮することで目標変位に収めることが可能である。

6. まとめ

震度 6 弱程度の地震後もクリーンルームとしての機能を保持することができる制振システム天井を開発することを目的として、天井部材の静的試験、解析による制振システム天井の成立性の検討を行った後、振動台試験によりその性能を実証した。

その結果、開発した制振システム天井は地震に対して損傷することなく目標変位に収まり、有効であることを確認した。今後はクリーンルームを有する生産施設のシステム天井への展開を図っていく予定である。

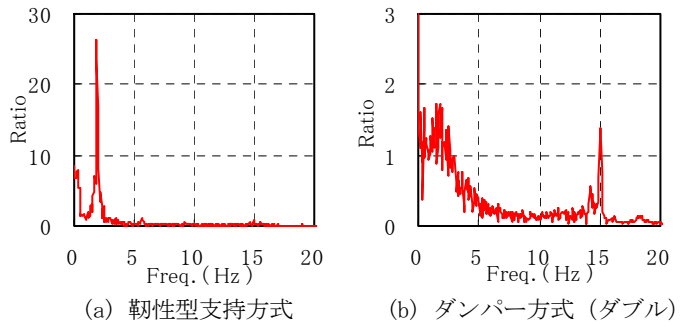


図-14 Y方向伝達関数（天井パネル中央／振動台）

Transfer function in y-direction

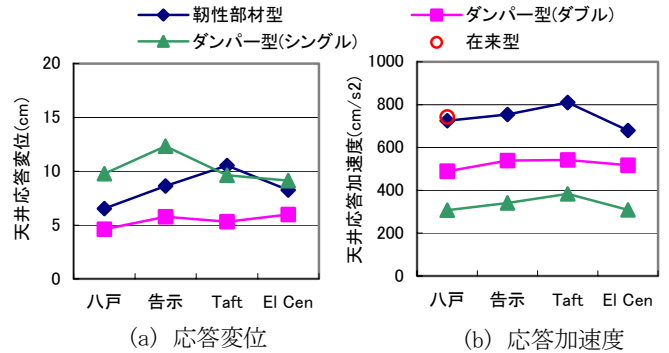


図-15 X方向加振最大応答値

Maximum response in x-direction

表-3 最大応答値一覧

Maximum response

方向	X 方向				Y 方向			
	入力波	ElCen	Taft	八戸	告示	ElCen	Taft	八戸
靱性型支持方式								
加速	実験	679	809	724	753	728	678	713
	解析	825	814	766	791	854	840	824
変位	実験	8.3	10.5	6.5	8.6	10.8	8.0	6.6
	解析	9.4	6.9	5.0	5.9	11.4	9.7	8.0
ダンパー方式（ダブル配置）								
加速	実験	517	541	488	539	605	554	407
	解析	723	615	471	535	841	732	391
変位	実験	6.0	5.3	4.6	5.8	5.3	4.7	3.0
	解析	6.6	4.3	5.0	5.0	5.5	4.9	2.6
ダンパー方式（シングル配置）								
加速	実験	309	383	307	341	345	330	271
	解析	640	517	429	442	587	488	274
変位	実験	9.1	9.6	9.8	12.3	7.3	5.6	4.0
	解析	10.4	6.2	7.5	7.7	6.7	5.7	3.1

表中単位は、加速度：cm/s²、変位：cm である。

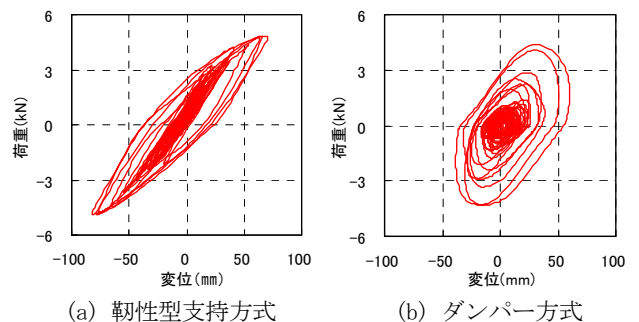


図-16 El Centro X 方向加振時荷重－変位関係

Loads-displacement relationships of
El Centro x direction excitation