

15. 新素材を使用した耐震・免震性を有する吊り天井の開発

発表者：荻原 尚弥
指導教員：新谷 真功 准教授

Abstract; This paper deals with development of new material for suspended ceiling with high damping property and seismic base isolation. After the suspended ceiling was damaged by a major earthquake, ceiling boards, lighting equipment, air conditioning equipment etc. dropped from the suspended ceiling. And people died and many people were injured. Since the damping ratio of the iron anchor bolt is very small, the displacement response of the suspended ceiling increases and it is not reduced in a short time. For that reason, ceiling boards, lighting fixtures, air conditioners, etc. will fall from the suspended ceiling. Therefore, it is necessary to develop new materials which are light weight, flame retardancy, high heat resistance, high damping suspended ceilings with earthquake resistance and seismic isolation structure. The purpose of this research is to experimentally verify the high damping performance of basalt fiber material or glass fiber material and to develop a ceiling member having earthquake resistance and seismic isolation. In this study, we attempt to verify the damping performance with simple support beam at both ends and cantilever beam using new materials.

1. 緒言

大型公共・商業施設の吊り天井は、配線用空間を確保し、ケーブル・コード等を床から見えなくするために、上階床の裏面にあたるコンクリートに埋め込まれた吊りボルトに、板・照明器具・空調設備等の構成物を吊り下げる構造になっている。吊りボルトは、垂直方向の荷重を支えることを目的とするため、水平方向の変位を抑える機能が無く、横揺れに弱い。そのため、震度5以上の地震が発生した際、天井全体が揺れて、壁に衝突して、吊りボルトや取り付けの金属部品であるクリップが、機能しなくなり、吊り天井の落下が起こっている。東北地方太平洋沖地震以降、吊り天井の耐震化が進められてきた。耐震対策は、吊りボルト間に、斜め補強材をV字状に設置し、それをボルトで固定していく方式がある。しかし、天井の重量化や工程数の増加が欠点である。そこで、新たな吊り天井の落下防止構造或は方法を新たに研究開発する必要性が出てきた。

本研究の目的は、減衰比の小さな鉄製の吊りボルトに代わり、軽量で、難燃性のある高減衰性能革新素材を開発して、耐震・免震性を有する新たな吊り天井を開発することである。新素材として、樹脂含浸バサルト繊維パイプ材と樹脂含浸ガラス繊維パイプ材を選択して、従来の鉄製吊りボルトと共に、自由振動実験・スweep実験を行い、減衰比を評価していき、さらに実地震波加振実験を行い、応答加速度・変位から、耐震性能を検討している。

2. 試験片

2.1 新素材について

新素材として、高耐熱・難燃・軽量である樹脂含浸バサルト繊維組紐パイプ材(以下、バサルト繊維パイプとする)と樹脂含浸ガラス繊維組紐パイプ材(以下、ガラス繊維パイプとする)の2種類である。丸型発泡芯材に2400TEXのバサルト繊維を2層重ね(2PLY)と3層重ね(3PLY)に組紐として巻き付けたパイプ材にエポキシ系樹脂で含浸したものをバサルト繊維パイプ材とする。また、丸型発泡芯材に2200TEXのガラス繊維を2層重ね(2PLY)と3層重ね(3PLY)に組紐として巻き付けたパイプ材にエポキシ系樹脂で含浸したものをガラス繊維パイプ材とする。図1に樹脂含浸ガラス繊維パイプ材の例を示す。TEXとは、繊維の太さの単位であり、1TEXは1000mで1gの繊維の太さを表す。

バサルト繊維は、中国・ロシア(ウクライナ)が原産国で火山岩の一種である玄武岩(英名:Basalt)を原料とし、同組成・同程度の密度を持つガラス繊維よりも高強度で、炭素繊維よりも安価である。

ガラス繊維は、バサルト繊維と同等の性質を持ち、バサルト繊維よりもさらに安価で入手しやすい繊維材である。

さらに、振動特性の比較用として、従来から使用されているM9鉄製全ねじ吊りボルトを用いる。



Fig.1 Resin impregnated glass fiber pipe 2200TEX
Top 2: 2PLY, Bottom 2: 3PLY

2.2 新素材の機械的性質

表1に新素材の機械的性質を示す。密度は鉄の密度(7.8g/m³)より小さく軽量の素材であることが分かる。また、バサルト繊維とガラス繊維は、ほぼ同等な性質を示していることが分かる。

Table 1 Mechanical nature

Characteristics	GBF Basalt fiber	E glass fiber
Density(g/m ³)	2.63	2.54
Tensile strength(MPa)	3200-3850	3100-3200
Elastic modulus(GPa)	93	72.5
Break elongation rate(%)	3.1	4.7
Softening temperature(°C)	1050	850
Operating temperature(°C)	-260-650	380

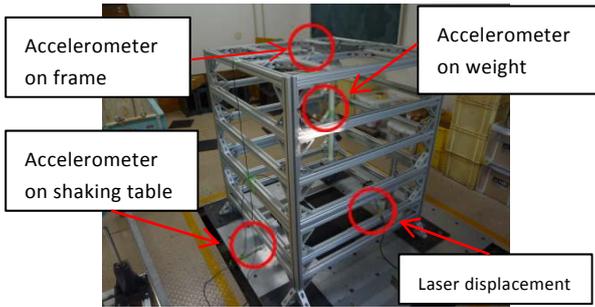


Fig.2 Experimental apparatus

3. 実験装置及び実験方法

3.1 実験装置

吊りボルトの使用の一例として、天井に設置してある空調機は4本の吊りボルトで支えられている。これを簡単に、片持ち梁に空調機の重量の1/4のおもりをつけた実験モデルを考える。片持ち梁を試験片として、梁を保持する実験装置を図2に示す。図2に示すように、装置は幅990mm×奥行990mm×高さ1200mmの寸法であり、40×40mm, 40×80mmの角アルミフレーム（GFS8シリーズ）で構成されている。実験装置上面には、試験片を固定するための厚さ5mmの鉄板（天板）が吊り付けてある。装置は、下面のアルミフレーム4本には、厚さ5mmの鉄板とボルトで地震波再現装置(振動台)床面に固定されている。

図2に示すように、振動台上の加速度、架台上面の加速度、おもり上の加速度を測定する。さらに、おもりの変位を測定する。

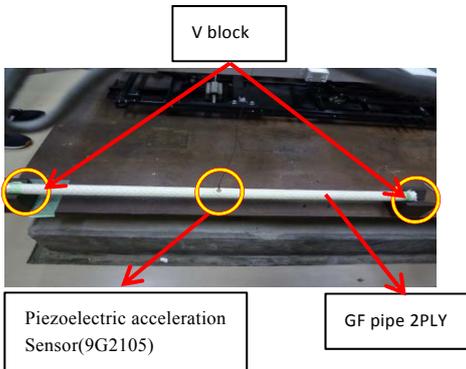


Fig.3 Experimental apparatus
(simple support beam at both ends)

3.2 実験方法

3.2.1 両端単純支持梁

図3に両端単純支持梁の実験の様子を示す。バサルト繊維パイプ材とガラス繊維パイプ材の両端を、Vブロック上に両面テープで固定用治具の端に固定して、軽量の圧電型加速度センサーを有効長さの半分の位置に設置する。ほぼ中央に衝撃を加えて、自由振動を発生させる。部材に衝撃を加えた時の加速度をデータロガーで測定する。

実験は、パイプ材1本につき2回行う。加速度のデータより、部材の固有振動数、粘性減衰比を求める。

3.2.2 片持ち梁

片持ち梁の固有振動数を地震波入力で、応答をしやすいように、3.0Hz近傍になるように、固有値解析を行って、

おもりの大きさを決めている。パイプ材では、おもりの重さを2.0kgとし、吊りボルトでは、4.5kgとした。おもりを付けた片持ち梁状態で、バサルト繊維パイプ材とガラス繊維パイプ材の自由端に取り付けられたおもりに衝撃を加えて、自由振動させる。

自由振動の応答加速度・変位データを取り、加速度波形から粘性減衰比、加速度と変位からヒステリシス特性を求めて、減衰比を求める。

3.2.3 スweep実験

地震波再現装置(振動台)で、図2に示す実験装置にスイープ波形（周波数範囲：1~10Hz, 掃引速度：0.5Hz/s）で加振して、各部材の応答変位・加速度のデータを測定する。

応答加速度のP.S.Dより、各部材の固有振動数を求める。

さらに、ヒステリシス特性を求める。

3.2.4 実地震波加振実験

振動台により、実験装置に地震波の加速度振幅を減少させた下記の実地震波を加振して、各部材の応答加速度・変位を測定し、応答波形を求め、減衰特性を検証する。

1) 兵庫県南部地震（1995年1月17日）

神戸（兵庫県）観測波
加速度を30%に減少
加振時間：40秒
卓越振動数：1Hz



2) 岩手・宮城内陸地震（2008年6月14日）

築館（宮城県）観測波
加速度を50%に減少
加振時間：90秒
卓越振動数：1~3Hz



3) 東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日）

築館（宮城県）観測波
加速度を50%に減少
加振時間：120秒
卓越振動数：1~3Hz, 5~7Hz



4. 実験結果

4.1 自由振動による減衰比評価

粘性減衰比は、図4のように、振幅のピーク振幅比を求め、式(2)の対数減衰率 δ から、式(1)より減衰比 ζ を求める。

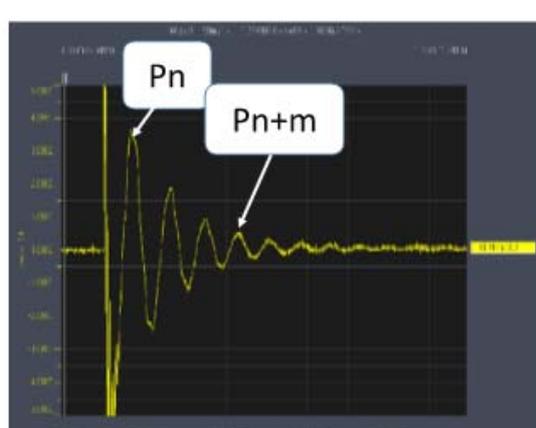


Fig.4 Calculation of damping ratio

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \tag{1}$$

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{P_n}{P_{n+m}} \tag{2}$$

ただし、m = 周期数である。

図 5、6 にガラスパイプ材の例を示す。

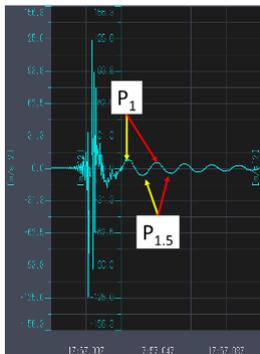


Fig.5 GF pipe 2PLY(6)

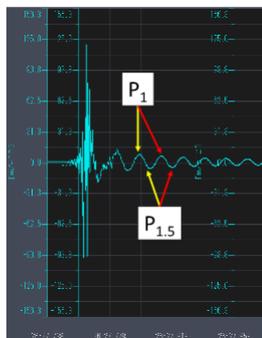


Fig. 6 GF pipe 2PLY(7)

Table 2 Example of damping ratio

	Damping ratio ζ [%]	Damping ratio ζ [%]
GF2Ply(6)	19.6	19.2
	13.9	16.1
GF2Ply(7)	12.8	10.7
	12.0	12.8
	15.3	18.9

表 2 は、片持ち梁による自由振動波形(Fig. 5, Fig. 6)により求めた例である。減衰比 ζ と ζ' は、Fig. 5, Fig. 6 の P₁ と P_{1.5} に対応している。表 2 の平均減衰比 ζ は、15.1%であった。

Table 3 Change in value of damping ratio

	Type of impregnated resin	Ply	Average damping ratio[%]
Basalt fiber braided pipe	A	2	12.6
		3	14.5
	B	2	17.5
		3	17.9
Glass fiber braided pipe	A	2	12.1
		3	11.1

表 3 に 2 層重ね(2PLY)と 3 層重ね(3PLY)による減衰比の変化を示している。層重ねによる減衰比の変化は少ないことが分かる。層を重ねることによる製作コスト上昇を考えると、2PLY 品で開発を進める。また、バサルト繊維とガラス繊維の減衰比の値に大きな差異が見られないため、今後は、輸入品のバサルト繊維より、入手しやすい繊維材であるガラス繊維を中心に開発を進めていく。

4.2 スイープ試験

ガラス繊維パイプ材(2PLY)のスイープ試験の結果の一例を図 7、図 8 に示す。図中の波形は、上からフレームの加速度、入力加速度、おもりの加速度、おもりの変位である。図 7、8 に、2 回のピーク振幅があり、共振していることを示し、固有振動数が分かる。変位波形より、振幅がだんだん大きくなり、すぐに減衰していることが分かる。最初が加振振動数を上げていくときのピークで、次のピークは振動数を下げているときのピークである。

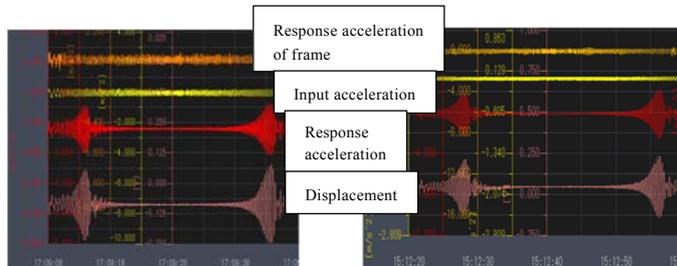


Fig. 7 Sweep test GF 2PLY(1)

Fig.8 Sweep test GF 2PLY(3)

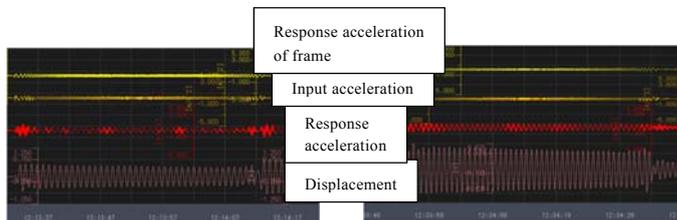


Fig. 9 Sweep test Anchor Bolt(1)

Fig. 10 Sweep test Anchor Bolt(2)

図 9、10 に吊りボルトのスイープ試験の結果を示す。変位の波形を見ると、共振した後の波形が減衰をしないまま続いていることが分かる。

表 4 に、スイープ試験から求めた固有振動数の一例を示す。吊りボルトの固有振動数が 1Hz 近傍になった。M9 ボルトのねじ底の径で計算をやり直すと、実験値に近づいた。

Table 4 Natural frequency

Sweep wave	Natural frequency[Hz]
GF 2Ply(1)	3.25
GF 2Ply(2)	3.66
GF 2Ply(3)	3.70
GF 2Ply(4)	3.55
Anchor Bolt(1)	1.08
Anchor Bolt(2)	1.24

4.3 実地震波加振実験の結果

図 11、図 12 に実地震波加振実験の結果の一例を示す。地震波は、兵庫県南部地震の波形である。バサルト繊維パイプ材の固有振動数成分を、地震波が含んでいるために、増幅をしていることが分かる。しかし、すぐに振幅が減少し

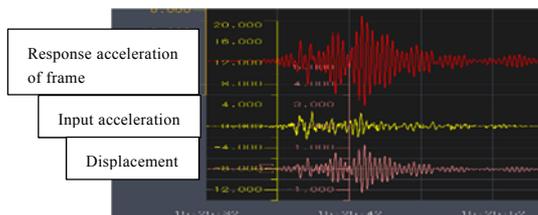


Fig. 11 Southern Hyogo Prefecture Earthquake
BF 2PLY (1)

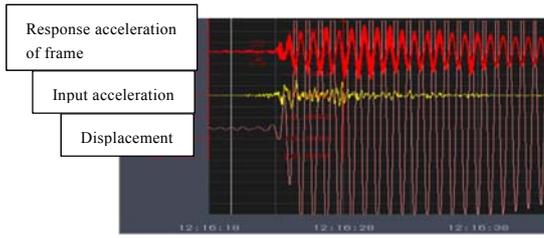


Fig. 12 Southern Hyogo Prefecture Earthquake
Anchor Bolt (1)

ていることが分かる。図 12 には、比較のために、吊りボルトの結果を示す。変位を見ると、すぐに、変位は増幅をして、その振幅がなかなか減衰しないことが分かる。吊りボルトの減衰比は、実験では約 2%であった。

Table 5 Maximum displacement

Southern Hyogo Prefecture Earthquake	Maximum displacement [mm]
BF 2Ply(1)	31.9
BF 2Ply(2)	32.0
BF 2Ply(3)	36.6
Anchor Bolt(1)	140
Anchor Bolt(2)	138

表 5 に最大変位を示す。吊りボルトの変位は 140mm あるが、バサルト繊維パイプ材は約 30mm で、1/4 までに小さくなっていることが分かる。高減衰性能素材の効果が見られる。

5. ヒステリシス特性について

5.1 ヒステリシス特性による減衰解析モデル

図 13 に、ヒステリシス特性減衰解析モデルの一つ Maxwell 型減衰モデルを用いる。ヒステリシスループによる減衰比は、図 13(b)に示すように、ひずみエネルギーとループの面積の比率で、式(3)で表される。

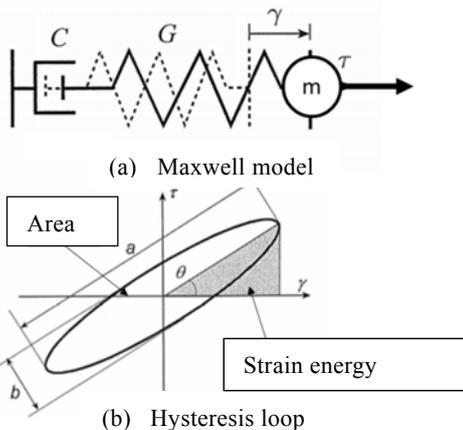


Fig. 13 Hysteresis characteristics Analysis model

$$h = \frac{1}{2} \left(\frac{G}{C\omega} \right) = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \left(= \frac{1}{4\pi} \frac{\pi C\omega \gamma_0^2}{\frac{1}{2} G \gamma_0^2} \right)$$

(3)

図 14, 図 15 に、ガラス繊維パイプ材のヒステリシスループの一例を示す。図 14, 15 の縦軸は、実験装置のおもりの加速度に質量をかけた値を取り、おもりの変位を横軸に取り描いている。

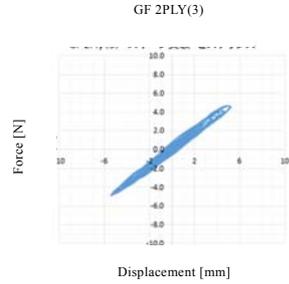


Fig. 14 Hysteresis loop

BF 2Ply (3)

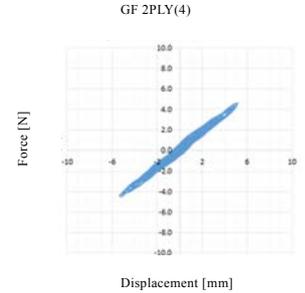


Fig. 15 Hysteresis loop

GF 2Ply (7)

表 6 に、式(3)から求めた減衰比の一例を示す。表 6 より、減衰比が 20%以上あることが分かる。

Table 6 Damping ration of
Hysteresis loop

	Damping ration[%]
GF 2PLY(1)	4.88
GF 2PLY(2)	6.83
GF 2PLY(3)	6.00
GF 2PLY(4)	5.73

Table 7 Parameter of Eq. 3

γ : Displacement
γ0 : Initial displacement
τ : External force
h : Damping ratio
G : Spring constant
m : Mass
f : Frequency
ξ : Damping ratio
C : Viscous damping constant
ω : Angular frequency
ΔW : Area
W : Strain energy

6. 結言

本研究をまとめると、以下のようになる。

- (1) 芯材にバサルト繊維を組紐で 2 層と 3 層重ね巻きパイプ材とガラス繊維を 2 層, 3 層重ね巻きパイプ材を製作した。
- (2) バサルト繊維パイプ材とガラス繊維パイプ材に独自配合したエポキシ樹脂を含浸させた。
- (3) 両端単純支持梁の自由振動実験より、大きな減衰比を持つことを確認した。
- (4) 架台装置を製作して、約 3Hz の固有振動数を持つ片持ち梁の実験装置を製作した。
- (5) 片持ち梁の実験装置より、自由振動実験、スイープ試験、実地震波加振実験を行った。
- (6) 自由振動実験より、大きな減衰比を確認した。
- (7) スイープ試験により、吊りボルトよりも大きな減衰比を確認した。
- (8) ヒステリシスループを描き、減衰比を求めた。約 6% の大きな減衰比を確認した。
- (9) 実地震波加振実験より、吊りボルトより、応答変位がかなり減少することを確認した。
- (10) 樹脂含浸したバサルト繊維パイプ材とガラス繊維パイプ材の高減衰性能を確認し、耐震性・免震性の有効性を示した。