

# 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

## 内容

- 社会的背景
- 研究目的
- 試験片について
- 両端単純支持梁実験
- 片持ち梁振動実験
- 自由振動実験, スイープ試験, 実地震波加振実験
- ヒステリシス特性による減衰比
- 結言

## 社会的背景



(a) 体育館(長野県)

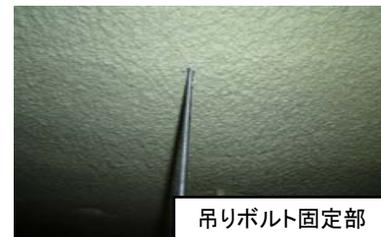


(b) 九段会館 (東京都)

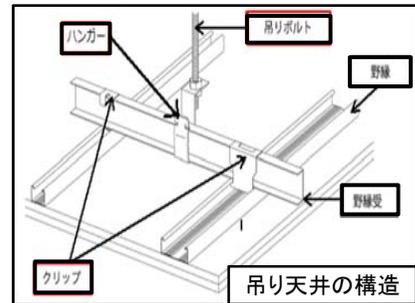
地震による吊り天井被害の例

- 天井板の大部分の落下
- 人的被害無し
- 落下物によって, 2名死亡, 32名負傷

## 社会的背景



吊りボルト固定部



吊り天井

- 吊り天井について
- 1) 役割  
配線・配管又は断熱・遮音材等を收容する空間の確保.
- 2) 従来の構造  
吊りボルトに, 化粧板・照明器具・空調設備等を吊り下げる構造.

# 吊り天井の耐震対策

- ・クリップおよびハンガーをねじ留めにより固定する。
- ・壁と6cm以上のクリアランスを設ける。
- ・吊りボルトの本数を増やす。
- ・吊りボルトの間にブレースを取り付ける。
- ・吊り天井の下に落下防止用のネットを張る。
- ・吊り天井構成材をロープおよびワイヤー等で吊る。



問題点  
作業時間が約4倍。→人件費がかかる  
構造的にブレースを使用できない建物がある。

# 研究目的

- ・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。
- ・樹脂含浸バサルト繊維パイプ材
- ・樹脂含浸ガラス繊維組紐パイプ材
- ・高耐熱・難燃・軽量な新素材

# 試験片 BF, GF組紐パイプ材



Fig.1 Resin impregnated **basalt fiber(BF)** pipe (2PLY) 2400TEX

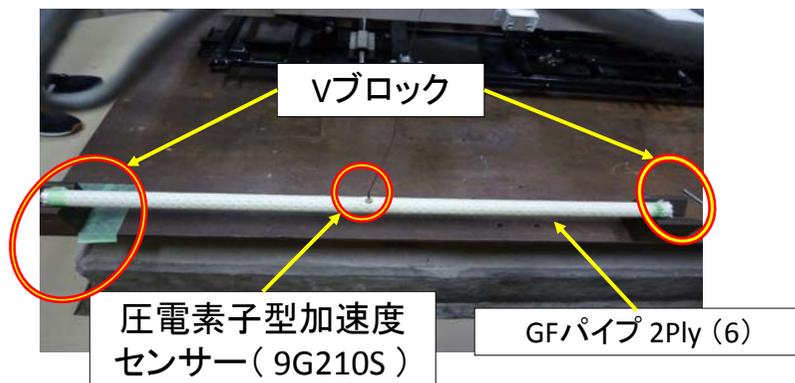


Fig.1 Resin impregnated **glass fiber(GF)** pipe 2200TEX Top 2: 2PLY, Bottom 2: 3PLY

# 表1 機械的性質

| Characteristics            | GBF Basalt fiber | E glass fiber |
|----------------------------|------------------|---------------|
| Density(g/m <sup>3</sup> ) | 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           |

## 両端単純支持梁振動実験



実験装置 ( GFパイプ 2Ply (6) 全長:815mm)

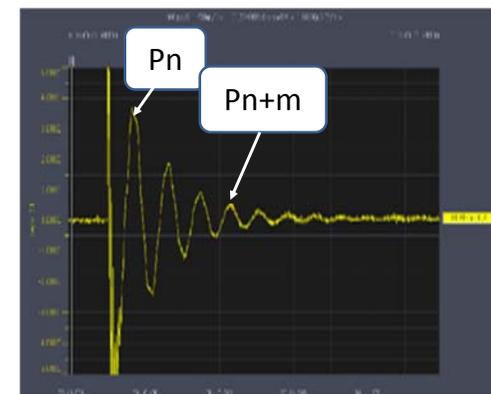
BF, GFパイプを, Vブロック上に置き, 加速度センサーを有効長さの半分に設置する. 部材に衝撃を加えた時の加速度をデータロガーで測定し, 3回実験を行う.

## 減衰比の計算方法

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{P_n}{P_{n+m}} \quad (2)$$

m = 周期数

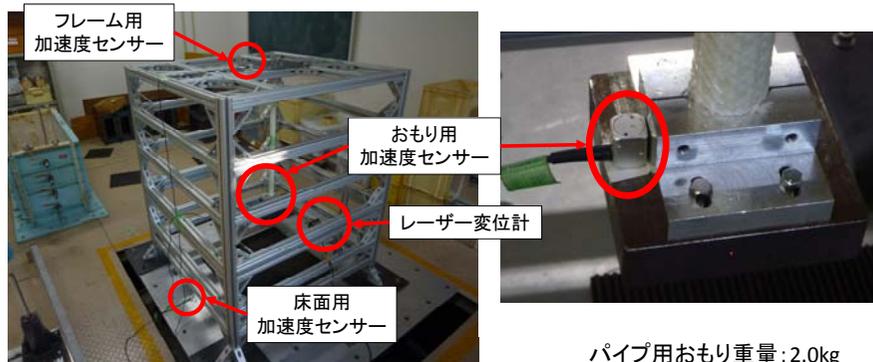


引用: ・小野測器-減衰をあらわす係数の意味と求め方-2  
[https://www.onosokki.co.jp/-WK/c\\_support/.../dampingfactor\\_](https://www.onosokki.co.jp/-WK/c_support/.../dampingfactor_)  
 ・振動学 小林繁夫著 丸善株式会社出版 3ページ 式(14)

減衰比 $\zeta$ は式(1)で求め,  
 対数減衰率 $\delta$ は式(2)で求める.

## 片持ち梁振動実験 自由振動実験

自由端に取り付けられたおもりにゴムハンマーで衝撃を加えて, 各部材を自由振動させる.



パイプ用おもり重量:2.0kg

実験装置

## 片持ち梁の自由振動実験

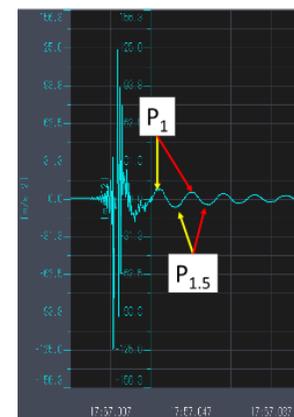


Fig.5 GF pipe 2Ply(6)

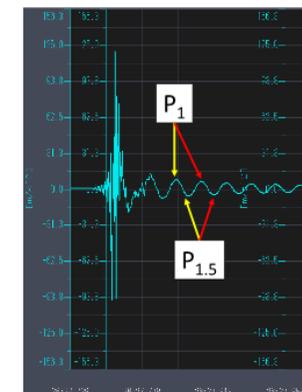


Fig. 6 GF pipe 2Ply(7)

# 自由振動実験結果

Table 2 Example of damping ratio

|           | Damping ratio $\zeta$ [%] | Damping ratio $\zeta'$ [%] |
|-----------|---------------------------|----------------------------|
| GF2Ply(6) | 19.6                      | 19.2                       |
|           | 13.9                      | 16.1                       |
| GF2Ply(7) | 12.8                      | 10.7                       |
|           | 12.0                      | 12.8                       |
|           | 15.3                      | 18.9                       |

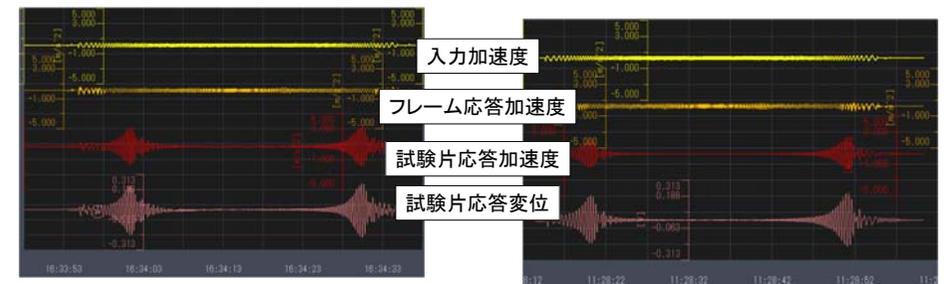
# 2層重ね(2PLY)と3層重ね(3PLY)による減衰比の変化

Table 3 Change in value of damping ratio

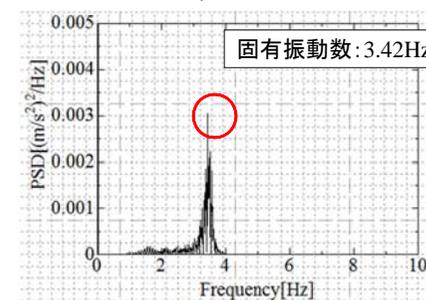
|                           | Type of impregnated resin | Ply | Average damping ratio [%] |
|---------------------------|---------------------------|-----|---------------------------|
| Basalt fiber braided pipe | A                         | 2   | 12.6                      |
|                       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

# スweep試験 実験結果

地震波再現装置(振動台)で、実験装置にスweep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。

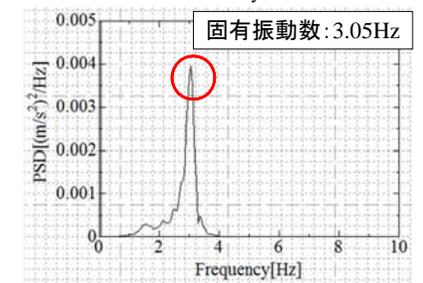


BF 3Ply (1) 波形

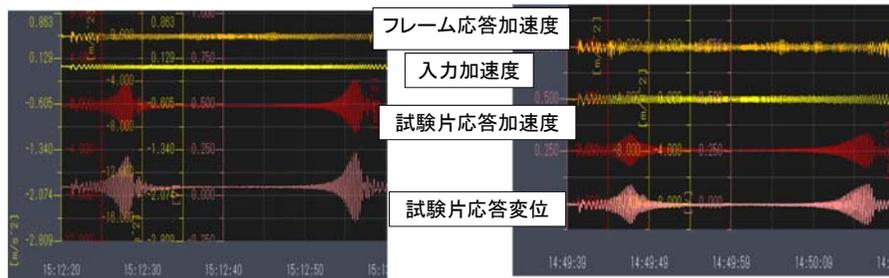


BF 3Ply (1) PSD

BF 3Ply (3) 波形

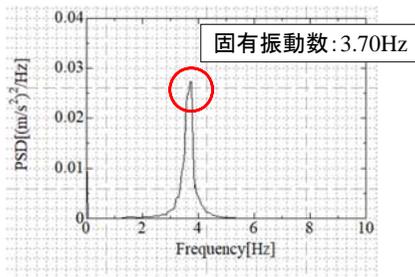


BF 3Ply (3) PSD

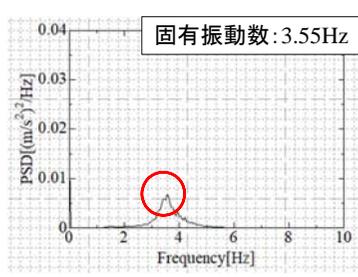


GF 2Ply(3) 波形

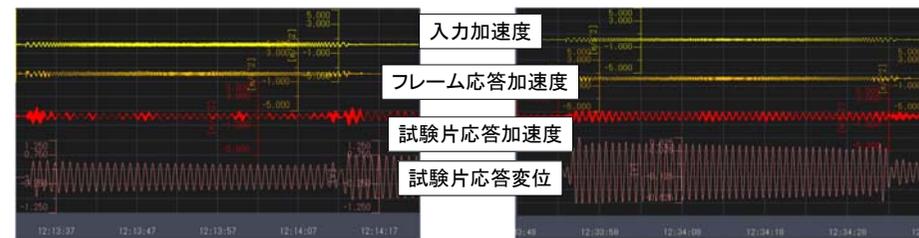
GF 3Ply(3) 波形



GF 2Ply(3) P.S.D.

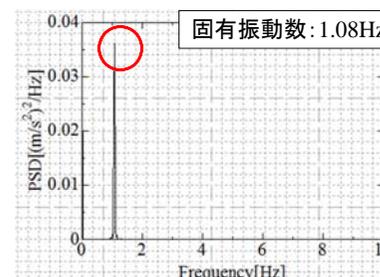


GF 3Ply(3) P.S.D.

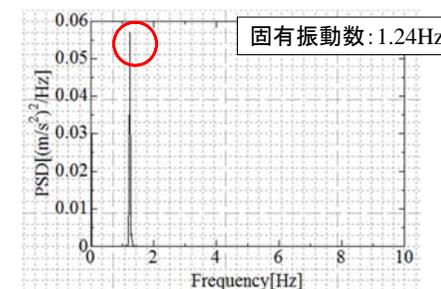


Anchor Bolt (1) 波形

Anchor Bolt (2) 波形



Anchor Bolt (1)  
PSD



Anchor Bolt (2)  
PSD

## スイープ試験結果

表 バサルト繊維組紐パイプ材の応答まとめ

| Sweep wave     | 最大入力加速度 [m/s <sup>2</sup> ] | 最大応答加速度 [m/s <sup>2</sup> ] | 増幅倍率 | 最大応答変位 [mm] |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|------|-------------|
| BF 2Ply(1)     | 0.38                        | 2.70                        | 8.04 | 8.54        |
| BF 2Ply(2)     | 0.38                        | 2.79                        | 8.27 | 8.23        |
| BF 2Ply(3)     | 0.38                        | 2.70                        | 8.11 | 8.60        |
| Anchor Bolt(1) | 0.38                        | 1.42                        | 4.70 | 23.58       |
| Anchor Bolt(2) | 0.38                        | 1.10                        | 3.86 | 22.91       |

バサルト繊維組紐パイプ材の方が、吊りボルトに対して、**1/3程度まで**変位低減となっている。バサルト繊維組紐パイプ材は、高い減衰性能を持っていることが分かる。

## スイープ試験結果

表 ガラス繊維パイプ材応答まとめ

| Sweep wave     | 最大入力加速度 [m/s <sup>2</sup> ] | 最大応答加速度 [m/s <sup>2</sup> ] | 増幅倍率 | 最大応答変位 [mm] |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|------|-------------|
| GF 2Ply(1)     | 0.36                        | 1.90                        | 6.29 | 4.82        |
| GF 2Ply(2)     | 0.36                        | 2.28                        | 7.32 | 4.76        |
| GF 2Ply(3)     | 0.36                        | 2.46                        | 7.84 | 5.46        |
| GF 2Ply(4)     | 0.47                        | 2.33                        | 5.94 | 5.35        |
| Anchor Bolt(1) | 0.38                        | 1.42                        | 4.70 | 23.58       |
| Anchor Bolt(2) | 0.38                        | 1.10                        | 3.86 | 22.91       |

ガラス繊維組紐パイプ材の方が、吊りボルトに対して、**1/4程度まで**変位低減となっている。ガラス繊維組紐パイプ材は、高い減衰性能を持っていることが分かる。

# 実地震波加振実験

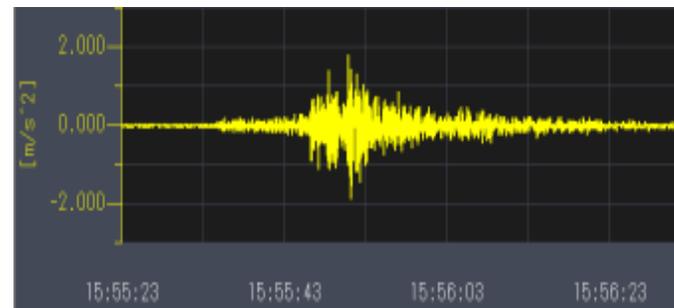
## 1) 兵庫県南部地震（1995年1月17日）

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



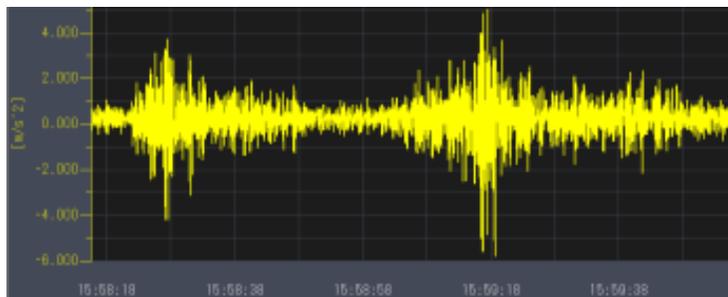
## 2) 岩手・宮城内陸地震（2008年6月14日）

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



# 兵庫県南部地震

| The 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake | Maximum input acceleration [m/s <sup>2</sup> ] | Maximum displacement [mm] |
|---|--|---------------------------|
| BF 2Ply(1)                                    | 2.79   | 31.9                      |
| BF 2Ply(2)                                    | 2.83   | 32.0                      |
| BF 2Ply(3)                                    | 2.74   | 36.6                      |
| Anchor Bolt(1)                                | 2.79   | 140                       |
| Anchor Bolt(2)                                | 2.83   | 138                       |

バサルト繊維組紐パイプ材の方が、**1/4程度まで**変位低減となっている。  
 バサルト繊維組紐パイプ材は、高い減衰性能を持っていることが分かる。

# ガラス繊維組紐パイプ材

ガラス繊維パイプ材

吊りボルト

|   | Maximum input acceleration [m/s <sup>2</sup> ] | Maximum Displacement [mm] | Maximum input acceleration [m/s <sup>2</sup> ] | Maximum Displacement [mm] |
|---|--|---------------------------|--|---------------------------|
| The 1995 Southern Hyogo Prefecture Earthquake           | 3.13   | 9.83                      | 5.22   | 140                       |
| The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake                     | 2.37   | 6.27                      | 1.86   | 20.6                      |
| The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (1) | 5.44   | 25.26                     | 5.07   | 105                       |
| (2)   | 5.44   | 18.4                      |  |                           |

# バサルト繊維組紐パイプ材と ガラス繊維組紐パイプ材

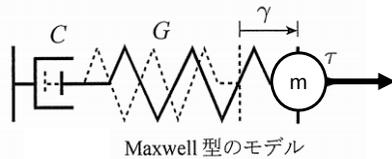
GFパイプ材

BFパイプ材

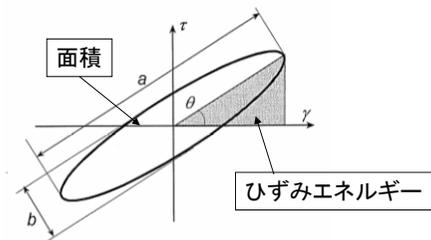
|            | 変位低減             | 変位低減             |
|------------|------------------|------------------|
| 兵庫県南部地震    | 9.83/140<br>1/14 | 33.5/139<br>1/4  |
| 岩手・宮城内陸地震  | 6.27/20.6<br>1/3 | 11.3/18.7<br>2/3 |
| 東北地方太平洋沖地震 | 25.6/105<br>1/4  | 25.6/105<br>1/4  |

ガラス繊維組紐パイプ材の方が、バサルト繊維組紐パイプ材より高い減衰性能を示している

## 履歴減衰

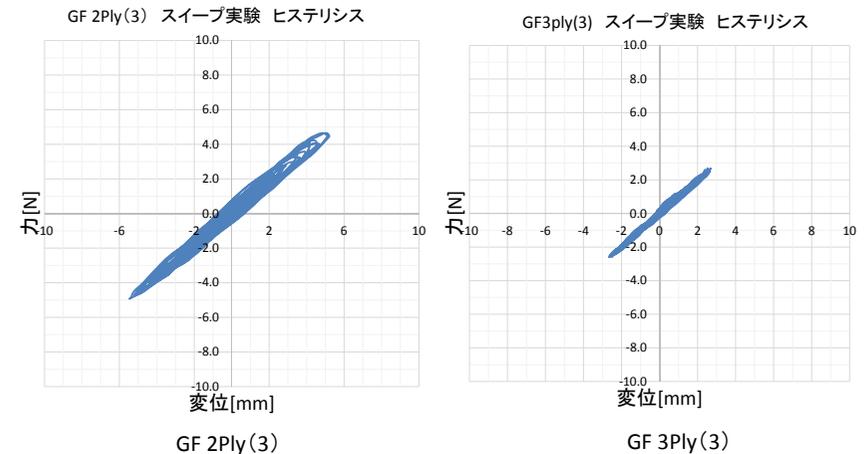


$$h = \frac{1}{2} \left( \frac{G}{C\omega} \right) = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \left( = \frac{1}{4\pi} \frac{\pi \frac{G^2}{C\omega} \gamma_0^2}{\frac{1}{2} G \gamma_0^2} \right)$$



- γ: 変位
- γ<sub>0</sub>: 初期変位
- τ: 外力
- h: 減衰定数
- G: ばね定数
- m: おもり重量
- f: 固有振動数
- ζ: 減衰比
- C: 粘性減衰係数
- ω: 角振動数
- ΔW: ループの面積
- W: ひずみエネルギー

## ヒステリシス特性による減衰比



# マクスウェルモデルの減衰比

## ガラス繊維パイプ材減衰比まとめ(スweep)

| 2017.7.20  | マクスウェルモデルの減衰比[%] |      |
|------------|------------------|------|
|            | スweep            | 自由振動 |
| GF 2Ply(1) | 4.88             | 15.4 |
| GF 2Ply(2) | 6.83             | 2.67 |
| GF 3Ply(1) | 8.89             | 4.70 |
| GF 3Ply(2) | 7.50             | 6.03 |

## 結言

- 独自配合したエポキシ樹脂を含浸させたバサルト繊維組紐パイプ材(2Ply)とガラス繊維組紐パイプ材(2Ply)を製作した.
- 片持ち梁の自由振動実験より, 大きな減衰比を確認した.
- Sweep試験により, 吊りボルトよりも大きな減衰比を確認した.
- ヒステリシスループを描き, 減衰比を求め, 5%以上の大きな減衰比を確認した.
- 実地震波加振実験により, 吊りボルトよりも応答変位が減少することを確認した.
- 樹脂含浸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.

ご清聴ありがとうございました.