

鋼管鉄塔部材に貼付した高減衰ゴムシートの強風下での振動抑制効果に関する基礎的研究

山中 宗徳

1. 序

送電用鉄塔などのスパースなラチス構造物では、細長比が大きい細長い部材が多数存在する。特に送電用鉄塔において、細長比が大きく初期応力が小さい鋼管や山形鋼の部材では、渦励振や他部材からの振動伝播の影響などにより部材振動が生じることが報告されている¹⁾。これらの部材振動は、ボルト接合部や溶接部の疲労問題を引き起こす可能性が考えられるため、鉄塔部材の振動特性を把握し、有効な制振対策を解明することは送電鉄塔の力学的安全性向上につながる。

鉄塔部材の制振方法の一つとして、そのスパースなラチス構造の施工やメンテナンスの特性からダンピングシートを鉄塔部材に巻き付けて減衰を増加させる方法が考えられる。ダンピングシートは騒音などの音環境対策や自動車などメカニカルな機構の簡易的な制振方法として主として500~1000Hzの高周波数域振動対策に利用されている²⁾。しかし、鉄塔部材の振動は数十Hzの周波数域であり、そのような低周波数域振動に対するダンピングシートの有用性は明らかにされていない。

本研究では、ダンピングシートとして鋼鉄道橋規格を満足する高減衰ゴムシートを用いて、低周波数域で振動する鉄塔部材への振動抑制効果を明らかにすることを目的とし、実験模型として使いやすいアルミパイプを用いた風洞実験を行う。また、実験に用いた試験体を模擬した解析モデルを構築して動的解析を行い、高減衰ゴムシートを用いた部材制振方法の有効性を検

証する。

2. 試験体および解析モデル概要

2.1 試験体

実験には外径30mm、肉厚1.0mm、長さ1260mmのアルミパイプを用い、両端ピン支持の模型を製作して、九州大学大学院人間環境学研究院のエッフェル型風洞内に設置した³⁾。模型概要を図1に示し、模型の風洞内設置状況を写真1に示す。また、風流れ方向振動と風向直角方向振動の2方向を計測するために、図1に示すようにパイプ内の中央部に加速度計を2体設置し、パイプ中央部の加速度信号を1000Hzでサンプルした。高減衰ゴムシートの厚さは2mmとし、長さはパイプの長さの約1/3の400mmとしてパイプ中央部に両面テープで貼り付けた。拘束板には厚さ0.1mmのステンレスシートを用い、パイプと高減衰ゴムシートを挟み込むように両面テープで貼り付けた。拘束板と高減衰ゴムシートの寸法を表1に示す。高減衰ゴムシートおよび拘束板は、風流れ方向に対してパイプの上下に貼付した。また、高減衰ゴムシートのみの振動抑制効果を調べるため、パイプと拘束板の間に厚さ2mmのバルサを挿入し、パイプに高減衰ゴムシートと拘束板を貼付した試験体の形状を模擬した試験体を作成した。また、高減衰ゴムシート等の貼付に伴う形状変化による空力特性の変化を除去し、貼付部分の外形を円形に保持するため、貼付部分外側にOHPシートを巻きつけ円形を再現し、さらに拘束板等を固定するため太さ0.2mmの針金で固定した。各試験体の構成を表2に示

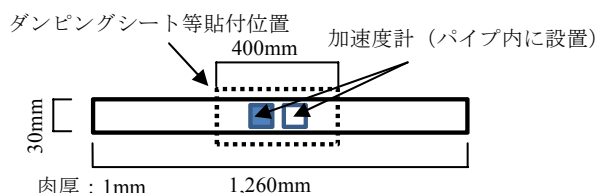


図1 アルミパイプ模型概要

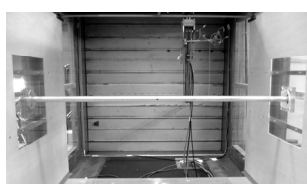


写真1 アルミパイプ模型を風洞内に設置した様子

表1 拘束板およびダンピングシート寸法一覧

| | 寸法(厚さ×円周方向×長手方向) |
|----------|------------------|
| 拘束板 | 0.1×45×400mm |
| 高減衰ゴムシート | 2.0×45×400mm |

表2 試験体の構成

| 試験体 | 構成 |
|---------|---------------------|
| P-B-S | アルミパイプ+バルサ+拘束板 |
| P-HDR-S | アルミパイプ+高減衰ゴムシート+拘束板 |

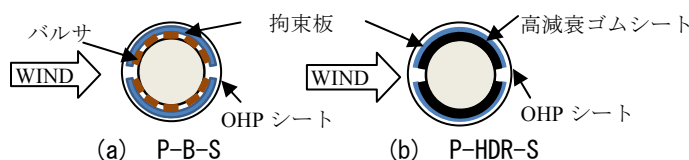


図2 各試験体の断面概略図

し、各試験体断面概略を図2に示す。

2.2 解析モデル

解析モデルは、風洞実験に用いた試験体をソリッド要素にて再現し、両端をピン支持とした。試験体 P-B-S においては、バルサの材料実験データが不足しているため、実験で得られた試験体 P-B-S の固有周波数と解析モデルの固有周波数が一致するようヤング係数を調整した。高減衰ゴムシートの入力情報は材料実験を行って得られた密度、体積弾性率を入力した。解析モデル作成時に入力した材料定数を表3および表4に示す。

3. 実験および解析方法

3.1 実験方法

まず、無風時の試験体の振動特性を把握するため、各試験体中央部をハンマリングし、得られた自由振動波形から固有周波数と減衰定数を算出した。なお、加速度振幅が 2m/s^2 から 0.4m/s^2 の範囲内での各ピーク値を用い、減衰定数を式(1)より算出した。

$$h = \frac{\sum_{m=1}^n \ln(\ddot{x}_m / \ddot{x}_{m+2})}{2(n-2)\pi} \quad (1)$$

ここに、 h ：減衰定数、 \ddot{x}_m ： m 番目の加速度ピーク値 (m/s^2)、 n ：加速度 2m/s^2 から 0.4m/s^2 までのピーク数である。

風洞実験で風速 2m/s から 12m/s の範囲で 0.5m/s 刻みで風を 30 秒間吹かせた時のパイプの応答を計測し、得られた各試験体中央部の加速度波形とパワースペクトルを比較した。また、加速度波形から標準偏差を算出し、風速ごとに比較を行った。

試験体は渦励振が発生することが予想されるため、発生する渦と試験体が共振する風速付近は、 0.1m/s 刻みで計測を行った。なお、渦と試験体の共振風速は式(2)の f_v に試験体の固有周波数を代入して求めた。

$$U = \frac{f_v \times D}{S_t} \quad (2)$$

ここに、 U ：風速 (m/s)、 f_v ：渦の放出周波数 (Hz)、 D ：試験体の外径 (m)、 S_t ：円柱のストローハル数 (0.2) である。

3.2 解析方法

解析には非線形構造解析ソフト ADINA を用い、Newmark β 法による時刻歴応答解析を時間刻み 0.001 秒で 3 秒間行った。渦励振による荷重は式(3)および式(4)に示す調和外力⁴⁾を、メッシュ分割した解析モデル P-B-S の風直角方向に位置する各節点に図3に示すように与えた。

$$F_{M1}(t) = \frac{1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot D_1 \cdot h_1 \cdot \sqrt{2} \cdot C'_{L1} \cdot \sin(2\pi f_1 t)}{\text{アルミパイプ部分長手方向のメッシュ分割数}} \quad (3)$$

$$F_{M2}(t) = \frac{1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot D_2 \cdot h_2 \cdot \sqrt{2} \cdot C'_{L2} \cdot \sin(2\pi f_2 t)}{\text{バルサおよび拘束板貼付部分長手方向メッシュ分割数}} \quad (4)$$

ここに、 ρ ：空気密度 (1.2kg/m^3)、 D_1 ：アルミパイプの外径 (m)、 h_1 ：変動揚力の作用するアルミパイプ長さ (m)、 C'_{L1} ：アルミパイプのみの部分の変動揚力係数、 f_1 ：アルミパイプのみの部分から発生する渦の周波数 (Hz)、 D_2 ：バルサ等貼付部分の外径 (m)、 h_2 ：変動揚力の作用するバルサ等貼付部分長さ (m)、 C'_{L2} ：バルサ等貼付部分の変動揚力係数、 f_2 ：バルサ等貼付部分から発生する渦の周波数 (Hz) である。

式(3)および式(4)中の変動揚力係数 C'_{L1} および C'_{L2} は、実験によって得られる値である。そのため、風洞実験における試験体 P-B-S の各風速の加速度標準偏差と、解析モデル P-B-S の各風速における加速度標準偏差がほぼ一致するよう変動揚力係数を調整し、得られた C'_{L1} および C'_{L2} を代入した式(3)および式(4)の調和外力を解析モデル P-HDR-S に与え、各風速の加速度標準偏差を算出した。また、渦の放出周波数 f_1 および f_2 は実験より得られた加速度パワースペクトルのピーク周波数を採用した。なお、加速度標準偏差は、加速度波形が定常状態になってから 40 周期程度の波形から算出した。

4. 風洞実験結果

ハンマリングにより得られた自由振動波形から算出した各試験体の固有周波数および減衰定数を表5に示す。表5より、高減衰ゴムシートの貼付による減衰付加効果が確認でき、減衰定数はバルサを貼付した試験体と比較して約 80% 増加している。

各風速における各試験体中央部の風直角方向の加

表3 解析時に入力した材料定数

| 材料 | アルミ | ステンレス | バルサ |
|---------------------------|---------|---------|---------|
| ヤング係数(N/mm ²) | 7.0E+04 | 2.0E+05 | 1.0E+03 |
| 密度(kg/mm ³) | 2.7E-06 | 7.8E-06 | 8.8E-07 |
| ポアソン比 | 0.345 | 0.3 | 0.23 |

表4 解析時に入力した高減衰ゴムシートの材料定数

| | |
|---------------------------|----------|
| 体積弾性率(N/mm ²) | 433.1 |
| 密度(kg/mm ³) | 1.39E-06 |

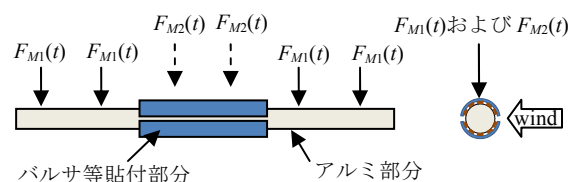


図3 調和外力作用点

表5 各試験体の固有周波数および減衰定数

| 試験体 | 固有周波数(Hz) | 減衰定数(%) |
|---------|-----------|---------|
| P-B-S | 42.0 | 1.6 |
| P-HDR-S | 37.7 | 2.9 |

速度標準偏差をプロットしたものを図4に示す。図4より、全風速に対して図4(b)の試験体 P-HDR-S のほうが図4(a)の試験体 P-B-S と比較して全体的に加速度振幅が抑えられていることが分かる。図4の4つの加速度ピーク値とそれぞれの共振風速を表6に示し、それぞれの加速度ピークに対応する加速度波形のパワースペクトルを図5に示す。表6より、試験体 P-B-S での最大ピークである加速度ピーク B と試験体 P-HDR-S での最大ピークである加速度ピーク D を比較すると、高減衰ゴムシートを貼付することで加速度ピークが約60%抑えられている。また、加速度ピーク A と加速度ピーク C を比較すると、高減衰ゴムシートを貼付することで、こちらも加速度ピークが約60%抑えられていることが分かる。図5を見ると、(a)~(d)の各パワース

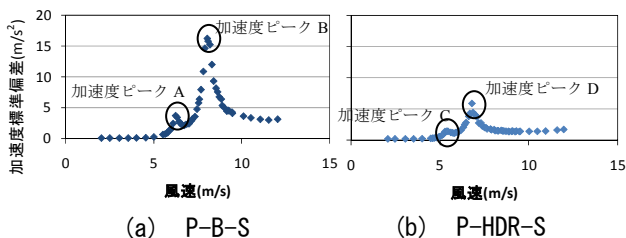


図4 各風速における風直角方向の加速度標準偏差

表6 各試験体の加速度標準偏差ピーク値と共振風速

| 試験体 | ピーク名 | 標準偏差(m/s ²) | 共振風速(m/s) |
|---------|---------|-------------------------|-----------|
| P-B-S | 加速度ピークA | 3.8 | 6.2 |
| | 加速度ピークB | 16.2 | 8.0 |
| P-HDR-S | 加速度ピークC | 1.5 | 5.4 |
| | 加速度ピークD | 6.0 | 6.8 |

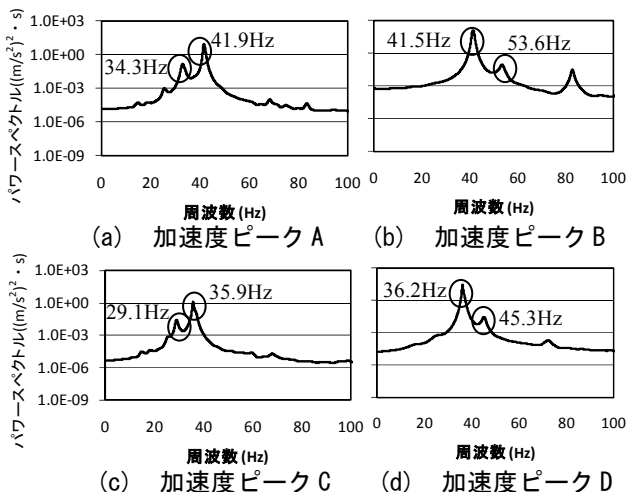


図5 各加速度ピーク時の加速度パワースペクトル
表7 式(3)を用いて算出した外径

| 試験体 | ピーク周波数(Hz) | 算出した外径(mm) |
|---------|------------|------------|
| P-B-S | 34.3 | 36.2 |
| | 41.9 | 29.6 |
| | 41.5 | 38.6 |
| | 53.6 | 29.9 |
| P-HDR-S | 29.1 | 37.1 |
| | 35.9 | 30.1 |
| | 36.2 | 37.6 |
| | 45.3 | 30.0 |

ペクトルの最大ピーク周波数は、表5に示す各試験体の固有周波数とほぼ一致している。図5(a)~(d)の各ピーク周波数とその時の共振風速を、式(2)の f_0 と U にそれぞれ代入し算出した試験体の外形 D を表7に示す。表7より、試験体P-B-Sにおいてピーク周波数が41.9Hzおよび53.6Hzのとき、また試験体P-HDR-Sにおいては35.9Hzおよび45.3Hzのときは算出した外径がパイプの外径とほぼ一致することから、バルサや高減衰ゴムシートを貼り付けていないアルミパイプのみの部分から発生した渦の放出周波数と考えられる。また、それ以外のピーク周波数においては、算出した理論上の外径がバルサや高減衰ゴムシート貼付部分の外径34.2mmに近いことから、バルサや高減衰ゴムシート等貼付部分から発生した渦の放出周波数と考えられる。算出した理論上の外径と実際の外径の値が一致しない原因として、拘束板をパイプに沿って均一に巻きつけられなかったことや、ストローハル数が0.2より小さいことが考えられる。

5. 解析結果

5.1 風洞実験結果との比較

表8の各風速における変動揚力係数を代入した式(3)および式(4)の調和外力を、表5の試験体P-B-Sの固有周波数および減衰定数に設定した解析モデルP-B-Sに与えた時の各風速における解析モデル中央部の風直角方向加速度標準偏差を、図6に示して実験と比較した。図6から、実験と解析で加速度標準偏差はほぼ一致しているため、表8の変動揚力係数を解析モデルP-HDR-Sに与える調和外力の変動揚力係数として採用することにした。

解析モデルP-HDR-Sの自由振動波形から得られた固有周波数および減衰定数を表9に示す。これらの値は表5の風洞実験における試験体P-HDR-Sの固有周波数や減衰定数と比較すると、ほぼ一致している。解析

表8 各風速における変動揚力係数

| 風速(m/s) | C'_{L1} | C'_{L2} |
|----------|-----------|-----------|
| 2.0~6.5 | 0.12 | 0.3 |
| 6.6~7.4 | 0.3 | 0.3 |
| 7.5~12.0 | 0.3 | 0.4 |

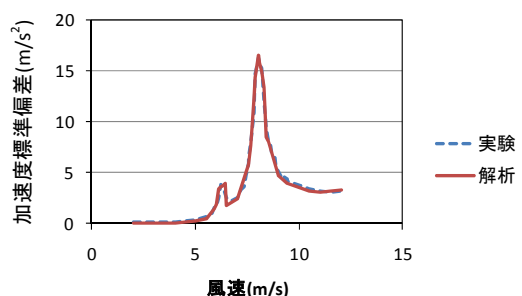


図6 実験と解析におけるP-B-Sの加速度標準偏差

モデル P-HDR-S に、表 8 の各風速における変動揚力係数を代入した式(3)および式(4)の調和外力を与えた時の各風速におけるモデル中央部の風直角方向加速度標準偏差を、図 7 に示して実験と比較した。また、解析モデル P-HDR-S の加速度標準偏差のピーク値とそのときの風速を表 10 に示す。図 7 を見ると、実験と解析結果は完全には一致しておらず、表 10 のピーク値と共振風速は、表 6 の試験体 P-HDR-S のピーク値と共振風速と比較しても若干のずれが見られる。これは、試験体と解析モデルで固有周波数および減衰定数に差があるためと考えられる。しかしながら、全体の傾向としては実験と解析はほぼ対応しており、解析モデルは妥当であると判断する。

5.2 解析結果から算出した変位標準偏差の比較

風洞実験で試験体の加速度のみを計測しているのは、変位算出法の特定が難しいからである。そのため 5.1 節で妥当性を確認した解析モデルを用いて変位を算出し、解析モデル P-B-S と解析モデル P-HDR-S の各風速

表 9 解析モデル P-HDR-S の固有周波数および減衰定数

| 固有周波数(Hz) | 減衰定数(%) |
|-----------|---------|
| 38.3 | 2.5 |

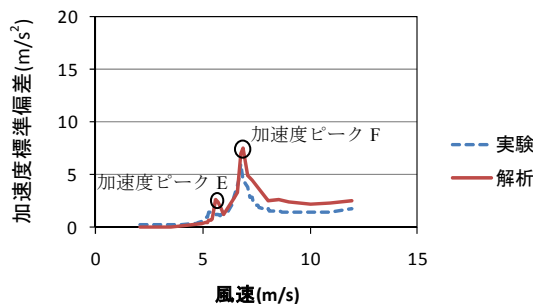


図 7 実験と解析における P-HDR-S の加速度標準偏差

表 10 解析モデル P-HDR-S の加速度標準偏差ピーク値および共振風速

| ピーク名 | 標準偏差(m/s ²) | 共振風速(m/s) |
|----------|-------------------------|-----------|
| 加速度ピーク E | 2.6 | 5.6 |
| 加速度ピーク F | 7.5 | 6.9 |

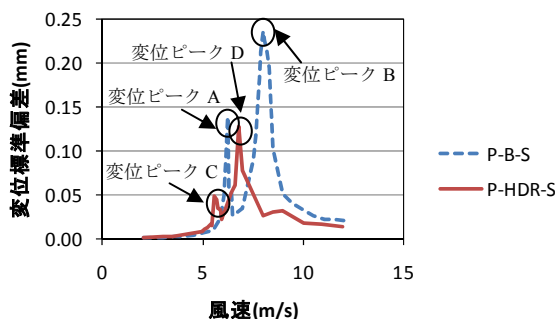


図 8 解析モデル P-B-S と P-HDR-S の変位標準偏差

表 11 各解析モデルの変位標準偏差ピーク値

| 解析モデル | ピーク名 | 変位標準偏差(mm) |
|---------|---------|------------|
| P-B-S | 変位ピーク A | 0.14 |
| | 変位ピーク B | 0.24 |
| P-HDR-S | 変位ピーク C | 0.05 |
| | 変位ピーク D | 0.13 |

におけるモデル中央部の風直角方向変位標準偏差を比較した。その結果を図 8 に示し、ピーク時の各モデル中央部の風直角方向変位標準偏差の値を表 11 に示す。図 8 より、解析モデル P-HDR-S の方が解析モデル P-B-S より変位が抑えられている。表 11 の各ピーク値で比較すると、解析モデル P-B-S で最大のピークを示している変位ピーク B と、解析モデル P-HDR-S で最大のピークを示している変位ピーク D を比較すると、高減衰ゴムシートを貼付することで、変位が約 45%抑えられることが分かる。また、変位ピーク A と変位ピーク C を比較すると、高減衰ゴムシートを貼付することで約 65%変位が抑えられることが分かる。これは、高減衰ゴムシートが拘束板との併用によってパイプと一体になり、高減衰ゴムシートがせん断変形することでパイプの振動エネルギーが効果的に吸収されたためと考えられる。

6. 結び

両端ピン支持のアルミパイプに高減衰ゴムシートと拘束板を貼付した試験体を用いた風洞実験を行い、風外力で振動する部材に対する高減衰ゴムシートの振動抑制効果を検証したところ、高減衰ゴムシート貼付範囲と貼付していない範囲から発生する渦励振に対し、高減衰ゴムシートと拘束板を併用することで、今回の実験では試験体の加速度を最大で約 60%抑えられることが分かった。また、実験に用いた試験体を再現した解析モデルに、渦励振による荷重を模擬した調和外力を与え動的解析を行い、解析モデルの変位と比較したところ、高減衰ゴムシートと拘束板を併用することで変位が最大で 65%抑えられることが分かった。高減衰ゴムシートと拘束板の併用は、風速 2m/s~12m/s の範囲の風外力で振動する部材に効果的であることが分かった。

参考文献

- 1) 淡嶋毅弘, 大熊武司, 本郷榮次郎, 漆原秀雄, 丸川比佐夫, 岡村秀良: 鋼管トラス鉄塔における腹材の風応答に関する実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 構造 I, pp.137-138, 2004.8
- 2) 平野廣和, 連重俊: 鋼橋の低周波数域騒音環境対策システムの開発と試験施工, 中央大学理工学研究所論文集, 第 9 号, 2004.
- 3) 中村論史, 竹内崇, 鶴則夫, 前田潤滋: 立ち上がり時間の短い突風を受ける物体の表面風圧に及ぼす受風物体の寸法効果, 日本建築学会研究報告集九州支部, 第 49 号・1[構造系], pp.169-172, 2010.3.
- 4) 薄達哉, 花田淳也, 竹内真弓, 前田潤滋: 鉄塔支持型鋼製煙突に作用する渦励振力の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 構造 I, pp.207-208, 2010.9.