

## 放射音対策のための複合減衰材料の開発

研究代表者 研 究 員 平野 廣和（総合政策学部）

共同研究者 研 究 員 櫻山 和男（理工学部土木工学科）

共同研究者 客員研究員 連 重俊（三造りフレ株）

共同研究者 客員研究員 丸岡 晃（八戸工業高等専門学校）

### 1 はじめに

近年、構造物の環境への配慮が重要視されてきており鋼橋の騒音問題もその一つである。特に比較的低い周波数帯域の騒音は、これまでの遮音壁などによる対策では低減することは難しく問題視されている。従来の騒音は 600Hz ~ 1.2KHz 程度付近の周波数にピークを持っており、その原因は主に車両走行音に起因したものである。一方、比較的低い周波数帯域の騒音は太鼓を叩くような衝撃音と表現され、その卓越周波数は 200Hz を下回るものがほとんどである。この騒音は、ある外的要因で発生した振動が鋼橋の構成部材を伝播し比較的面積が広くかつ、剛性の低い変形し易い部材を振動させることで発生する、いわゆる固体伝搬音であると考えられる。原因となる振動源は通常、橋面の伸縮装置のわずかな段差や遊間異常に起因しており伸縮装置の改善によりある程度の対策を講じることが可能である。しかしながら完全に伸縮装置をなくさない限り、わずかな振動の発生は残り、騒音を発するため完全な防音は困難である。

著者らは、この比較的低い周波数帯域の固体音低減対策として、振動部材に複合材料の制振板を付加し振動エネルギーの減衰を促すパッシブ型減衰システムを開発してきた [1] ~ [4]。このシステムは、阪神高速道路公団池田線延伸部で採用され、期待通りの成果をあげることができた [5]。

しかしながら、実際の施工を行ったことによって再検討すべき 3 つの項目が新たに生じた。第一は、振動し易いと想定される部材の抽出とその振動モードの把握である。これにより、現場での敏速かつ正確な施工が可能となる。第二は、制振システムに合成ゴムを使用していることから、ゴムの耐久性や経年変化、温度依存性等に関する合成ゴムの物性値を正確に把握することである。第三は、低音域騒音の評価方法である。従来の様にデシベル値を下げるのではなく、特定の周波数領域の発生時間を短くすることが必要である。

本報では、実際の施工経験から得られた再検討項目に関して論ずることとする。

### 2 振動部材の特定方法

本システムの実橋への適用に際しては事前の現地騒音調査、部材の振動特性の計測および振動モード解析により最適な制振板の配置を設定することで実現している。ここで振動モード解析においては、振動し易いと想定される横桁および主桁の腹板等、剛性の低い部材を対象としており、通常、横桁腹板では部材全体を主桁腹板では横桁間隔をモデル化している。しかし、この方法は横桁腹板のように比較的狭い部材を対象にする場合は有効であるが、主桁腹板のように広い部材の場合、対象としている振動周波数のモードを表現するには相当高次のモードまで解析する必要があり、解析時間を相当量要する必要があった。

そこで、解析量の低減を考慮し、主桁腹板の対象領域を垂直補剛材で囲まれた領域に簡略化することで、低次モードの算出のみで対象としている振動周波数を捉える手法を考案した。

モデル化の有効性を確認するため比較対象とした鋼橋主桁腹板のモデルは、図 1 に示す従来タイプの横桁間隔を対象領域とした Model-1 と垂直補剛材間隔のみを対象領域として簡略化した Model-2 である。また、表 1 に今回モデル対象として想定した構造の諸元を示す。図 2 より Model-1 の各モードの固有振動数は 40 ~ 50Hz と 80 ~ 100Hz の顕著なグループの存在が確認され、さらに 150 ~ 180Hz にも弱いつながりのグループが形成されていることが解る。これらのグループにはそれぞれ Model-2 の 1 次、2 次および 4、5 次の固有振動数が対応しており、モード形状も概ねその傾向を示している。また、Model-1 の個々のモードは Model-2 の 1 ~ 5 次までの基本モードの組合せで構成されていると判断できる形状を示している。

具体的には図 3 にその例を示すように、Model-1 の 1 次モード (a) は Model-2(d) の 1 次モードに対応しており、Model-2 の 10 次モード (b) は Model-2(d) の 2 次モードに対応した形状となっている。また、図 4 に示す今回対象にした腹板モデルと同等な実橋の試験車両走行時における振動計測結果によれば、その卓越周波数は 60Hz 付近と 100Hz 付近にあり図 3 に現れている Model-1 の 1 ~ 6 次

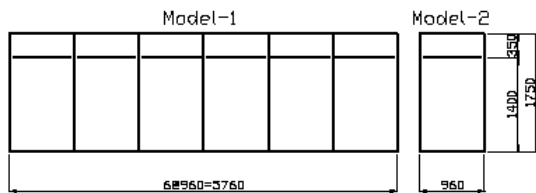


図1 解析モデル

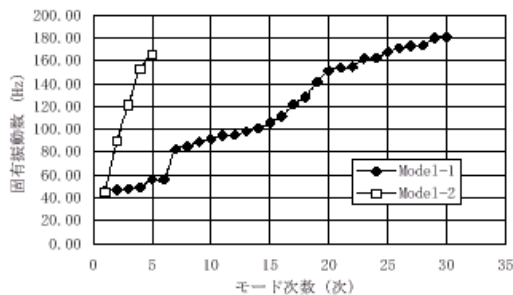


図2 固有振動数とモード次数の比較

と10次前後のモードの2つのグループやModel-2の1,2次モードの固有振動数と概ね良い一致を示している。従って、基本的な

表1 モデル対象の構造諸元

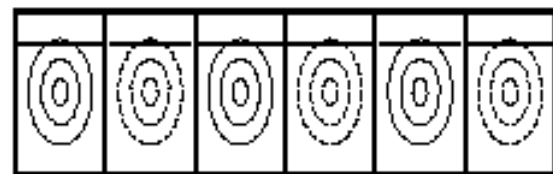
|         |           |
|---------|-----------|
| 腹板高     | 1,750mm   |
| 横桁間隔    | 5,560mm   |
| 垂直補剛材間隔 | 960mm     |
| 腹板厚     | 9mm       |
| 水平補剛材   | 110 × 9mm |
| 垂直補剛材   | 110 × 9mm |

振動数やモード形状を予測するには本研究で提案する垂直補剛材間隔のみを対象領域としたModel-2による振動モード解析による検討で十分有効であると考えられる。なお、実橋のデータによれば、その多くはModel-2の1,2次モードの形状と振動数で説明できるが、図3(c)のように図4の実橋の腹板振動計測結果にModel-2の1~3次モードの形状が混在するものもあり、実橋でのその寄与率等についてはデータの詳細な分析が必要である。

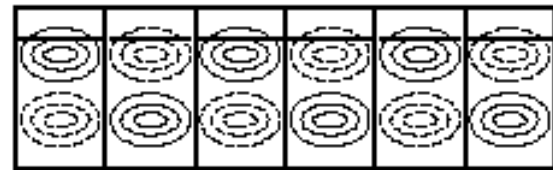
以上のことから制振板の最適な配置を設定する目的で行う振動モード解析においては、鋼橋腹板面を横桁間隔までモデル化する必要はなく、垂直補剛材で囲まれた領域のみの簡略なモデル化で十分な情報を得ることができることが確認された。

### 3 合成ゴムの物質特性

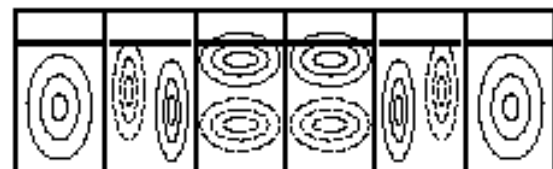
本制振システムなどに代表される様に、ゴムを主成分とした複合材料が使われるなど、鋼構造橋梁にゴム製品が広く使われるようになってきた。しかし、ゴム製品が土木の分野で広く利用されるにつれて、耐久性や経年変化、温度依存性などのゴム物性を問題点として合成ゴムの物質特性に熟知していない土木技術者から指摘される機会が増えてきている。そのため、例えば指摘を受けると、あわてて温



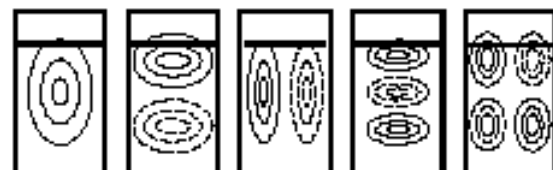
a. Model-1(1次モード:46Hz)



b. Model-1(10次モード:92Hz)



c. Model-1(9次モード:89Hz)



d. Model-2(1~5次モード)  
1次モード(45Hz) 2次モード(90Hz) 3次モード(121Hz) 4次モード(153Hz) 5次モード(165Hz)

図3 モード形状の概要

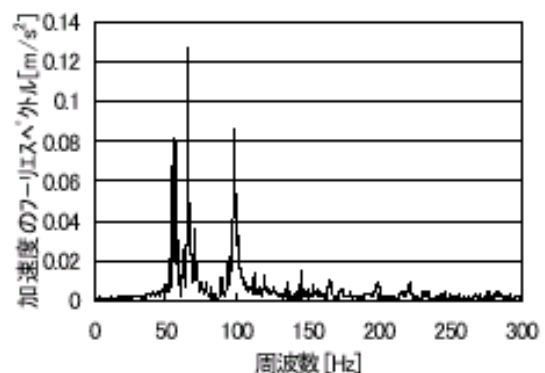


図4 実橋の腹板振動計測結果

度依存性等の試験を行い、急いだがために一般的なことも見逃し、結果的には製品としての信用を失墜する様なことも起きている。この要因として考えられることは、用途別に最適なゴムを選択し配合設計しているにもかかわらず、一般的なゴムの材料特性があたかも同一であるかのような誤解から生じている。しかしながら高分子化合物であるこれらのゴム製品に使われている材料は、各種の添加物の配合設計により大きく材料特性を変えることが可能であり、土木の分野で希求される用途別(荷重支持や減衰効果)特

性を満足することは、現在の技術では可能となりつつある。

本報では、著者らが提案している固体伝播音振動減衰材に使用している合成ゴム材料のクロロプレンゴム（以下 CR）とブチルゴム（以下 IIR）の比較に絞り、それらの減衰効果（粘弾性特性）の温度依存性に関する材料特性を明らかにすることにより、用途別の最適設計の定性的な方向性を提案するものである。

### 3.1 試験の概要

試験試料としては、外径 29mm、厚さ 12.5mm の CR 及び IIR の 2 種類を用意した。試験方法は、JIS K 6385 防振ゴムの試験方法に準拠し、試料をたわみ 3mm になるまで 2 回予備的に圧縮した後、3 回目の圧縮過程での各温度下において、荷重 - たわみ曲線を測定した。ここでの試験温度は、 $-40$ 、 $-30$ 、 $-20$ 、 $-10$ 、 $0$ 、 $20$ 、 $40$ 、 $60$ 、 $80^{\circ}\text{C}$  の 9 状態である。各温度下においての荷重 - たわみ曲線よりせん断弾性率（以下 G）を算出する。

### 3.2 減衰効果の温度依存性の確認

図 5 に各試料の温度変化に伴う G の変化と損失係数 ( $\tan\delta$ ) 推定値を示す。CR では、高温側から  $20^{\circ}\text{C}$  付近まではほぼ一定の G を示しているが、それより低温になると急激に G の上昇が見られ、 $-30^{\circ}\text{C}$  付近で収束を迎える。この G の変化で、 $-15^{\circ}\text{C}$  から  $15^{\circ}\text{C}$  付近までの狭い範囲が粘弾性領域であり、ここが有効な減衰を期待できる温度領域と考えられる。一方、IIR では高温側から徐々に G の上昇が見られ、 $-40^{\circ}\text{C}$  に至っても G の上昇が続いている。これより減衰効果の期待できる温度領域は  $-30^{\circ}\text{C}$  から  $50^{\circ}\text{C}$  付近となり、CR よりも広範囲な温度域で粘弾性領域を有していることがわかる。減衰効果が現れる領域がこの粘弾性領域である。

図 5 に温度  $20^{\circ}\text{C}$  を基準とした G の変化率を示す。CR に比べて G が適用温度領域で広範囲に変化している IIR の方が減衰効果の温度依存性が少なく、材料選択する上で有利な条件と考えられる。これらの判断の根拠は、温度低下によって分子運動が不活発となり、鎖上分子間の距離が縮まることによって分子間相互作用（摩擦）が働くことに起因する。これが弾性変化の大きな領域（粘弾性領域）で最も働くことから、減衰効果も期待できると考えられている。

### 3.3 合成ゴム材料の特性

高分子材料である合成ゴム材料を土木の分野で用いる場合には、次の基本的な事項を満足させることが重要であり、それぞれの用途に即した材料の選択が必要である。

- 1) 適用温度領域に粘弾性領域が存在し、かつ減衰効果 ( $\tan\delta$ ) に優れている。
- 2) 減衰効果の温度依存性が小さい。

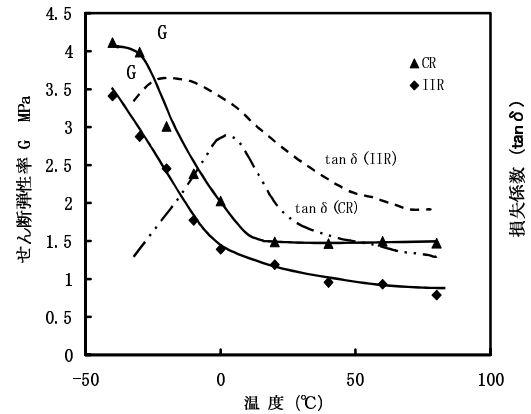


図 5 CR 及び IIR 弾性率の温度依存性

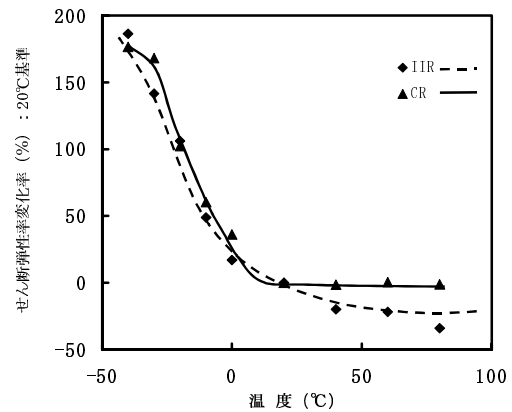


図 6 室温 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) を基準とした時の弾性率変化

3) 適度に剛性（せん断弾性率 G）を有して形状を維持できること。

4) 耐熱，耐候，難燃など実使用環境に耐える。

1), 2) では IIR が優れ, 3) では CR が優れているように、各合成ゴム材料によって固有の特性がある。例えば、支承などに代表される常時高面圧条件下での使用の場合、制振効果のみに着目して IIR を選択すると、CR に比較して剛性が弱いことから、永久ひずみが生じ易くなるために使用には適さないこととなる。つまり、支承などの用途には天然ゴムなみに剛性が大きく、かつ天然ゴムの弱点である耐候性に優れている CR を用いることが有効な選択である。一方、IIR の有する優れた減衰特性を生かした用途としては、橋梁桁などから生じる固体伝播音を防ぐ制振パネルなどの高荷重を受けずに断続的にその特性を生かす用途が適している。このようなことから、制振材料としての合成ゴム材料を選択する場合は、高荷重が常に生じる所では制振効果は劣るものの永久ひずみが生じにくい CR を、高荷重下でない場合には実用温度範囲で粘弾性領域の広い IIR が制振効果を十分に発揮するには有効であると判断することができる。

#### 4 騒音対策の判定基準

従来の騒音の評価方法としては、騒音を直接測定したA特性と人間の可聴域を基準に補正したL特性のデシベル値で評価されることが主であった。しかし、この評価基準が低音域で適切な評価方法であるか否かを検討する必要がある。つまり低音域では人間の不快感はデシベル値だけで評価される強弱だけではなく、その音の時間軸を考慮した評価になると考えられる。これは低音域が空气中を伝播してゆく場合の減衰にも大きく影響されていることから、結果的に強いエネルギーを有していることによる。つまり周辺住民の体感を改善するためには、単にデシベル値をOA値で低減するだけでは効果は少なく、特定の周波数帯の発生時間を短くすることに視点を向けることが必要である。

そこで、放射音である低周波域騒音の低減対策は、距離と振動部材の減衰定数が支配的であることがわかる。発生源は衝撃エネルギーと走行振動であり、その両方を制御する必要があるので、騒音対策の判定基準の意義が大きく問題になってくる。

第一段階としては、試験車走行による官民境界での騒音測定である。この段階において周波数帯の分布特性を把握することによって対象周波数帯が決定される。第二段階としては、構造図面から部材形状寸法を抽出して代表的な部材の固有値解析から発生予想周波数ごとに部材を分類することである。第三段階ではその部材配置を点から線、さらに面までに展開して測点を定めて試験車走行試験を実施する。第四段階では各車線毎に設置した計測点の加速度計で試験車走行の時刻歴を作成してデータを分析、固有値解析データと比較検証し、発生源である部材代表を特定する。

これが騒音対策対象箇所の基本方針となる。これらの段階での振動加速度のオーバーオール値は極めて大きな数値となることが多く、1/3 オクターブバンド中心周波数の騒音特性は、通常交通騒音のグラフとは異なった低音域(50 ~ 200Hz)に若干の変化が見られる程度が多い。しかし、試験車走行の数秒の時刻歴をオーバーオール値でも数秒から8秒くらいまで高い山が連続している場合がある。この連続した山がデシベル値だけで判断できないものであり、低音域騒音の特徴である。この状態のなだらかな山の時間を短くするのが低音域の騒音対策に必要不可欠である。低音域での数秒間の連続音を0.5秒程度になるように急速に減衰させるとOA値のデシベルが同じであっても体感的にはあまり気にならない通常の乗り越し音に変化してしまう。デシベル値を下げることだけが騒音対策ではないことがわかる。よって、デシベル値よりも急激な減衰効果に着目することが、低周波域の騒音対策に必要である。

#### 5 おわりに

試験施工を行ったことにより得られた3つの検討すべき項目に関して論じた。これから各種の施工を経験するにより、さらなる検討項目が出される可能性が高い。これは本研究がどうしても避けて通ることができない環境対策を含めた問題の一つの解決策であることからである。今後、一つ一つ解決して行く所存である。

#### 参 考 文 献

- [1] 小田, 連, 平野, 氏原: 放射音対策のための減衰材料の開発, 土木学会第 52 回年次学術講演会第 I 部門, 1997
- [2] 連, 石井, 渡邊, 平野: 複合材料を用いた固体音伝搬振動の減衰に関する試験施工, 土木学会第 55 回年次学術講演会第 I 部門, 2000
- [3] 徳田, 連, 渡邊, 井上: 鋼橋の固体音低減を目的とした振動モード解析モデルに関する考察, 土木学会第 56 回年次学術講演会第 I 部門, 2001
- [4] 井田, 連, 平野, 石井: 合成ゴム材料の減衰効果の温度依存性に関して, 土木学会第 56 回年次学術講演会第 I 部門, 2001
- [5] 連, 平野, 志村: 鋼橋の低音域騒音低減工法の開発と試験施工, 橋梁と基礎, Vol.35, No.4, 2001