

I-206

粘性ダンパーによる高架橋交通振動の軽減

東京大学大学院 学生員 比江島 慎二
 東京大学 正員 藤野 陽三

1. まえがき：近年、交通網の発達に伴い都市内高架道路周辺における交通振動公害が問題となっている。橋桁の振動軽減策として、最近、検討がなされているものにTMD（動吸振器）やアクティブコントロールがある。しかし、交通振動は過渡的で非定常性が強く、しかも車両と桁の連成振動であるため車両の種類等により振動数が微妙に変わる。この種の振動に対しTMDはその原理からして制振効果があまり期待できない。また、アクティブコントロールの制振効果についてはまだ未知のところがあるが、設備、費用、維持管理上の問題がある。そこで、本研究ではより簡易で高い制振効果を期待できる手法として粘性ダンパー¹⁾を取り上げ、その交通振動に対する効果を検討した。

2. 複素固有値解析によるモード減衰の把握：図-1に示すダンパーを取り付けた高架橋を図-2のようにモデル化すると、その運動方程式は次のようになる。

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c \frac{\partial v}{\partial t} \{ \delta(x-x_c) + \delta(x-(L-x_c)) \} = 0$$

ここで、 EI は桁の曲げ剛性、 m は桁の単位長さ当り質量、 c はダンパーの粘性減衰係数、 v は桁の鉛直方向変位、 $\delta(\cdot)$ はディラックのデルタ関数である。また、桁は単純梁で質量及び剛性の分布は一様とし、ダンパーは速度比例型の粘性減衰として左右対称に2つ取り付けるものとする。

この方程式に対し、桁の鉛直変位を

$$v(x,t) = \sum_{j=1}^n q_j(t) \sin \frac{\pi j x}{L} \quad (q_j(t) \text{ は一般化変位})$$

としてガラーキン法を適用すると、多自由度系の運動方程式に離散化される。その運動方程式は非比例減衰系となるので複素固有値解析により振動特性把握を行う。そこで、ダンパーの取り付け位置 $x_c/L = 0.1, x_c/L = 0.04$ のそれぞれの場合のモード減衰定数を求めた結果が図-3及び図-4である。なお、横軸の ζ ($= 2c/mL\omega_{01}$, ω_{01} は梁の1次固有円振動数)はダンパーの減衰係数 c に関する無次元パラメータである。図-3によると、 ζ の値を $\zeta = 8.0$ 付近に設定すれば1次～3次モードは臨界減衰にまで達し、6次モードでさえ減衰定数にして10%程度の付加減衰が得られることが分かる。また、ダンパー取り付け位置をより端部にした場合について解析した図-4でも ζ の値を大きくしさえすれば同様に大きな付加減衰が得られることが分かる。高架橋に設置されるTMDの等価質量比を5%程度とすると、付加減衰定数はせいぜい10%程度でありしかもある1つのモードに対してしか有効でない。これに比べればダンパーは非常に有効な減衰付加手段であるといえる。

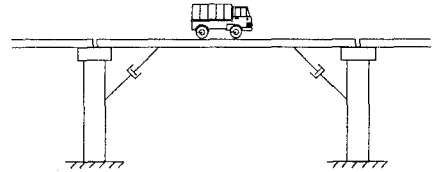


図-1 ダンパーを取り付けた高架橋

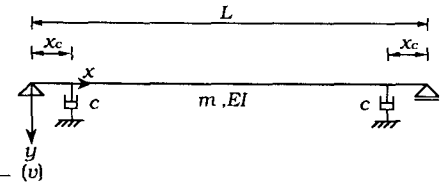


図-2 ダンパーを取り付けた梁のモデル

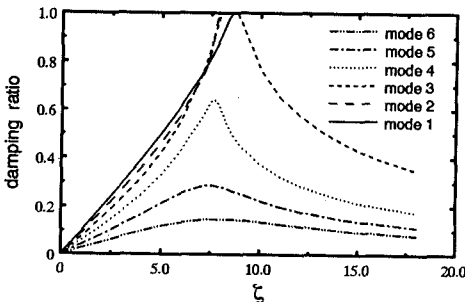


図-3 ダンパーによるモード減衰定数 ($x_c/L = 0.1$)

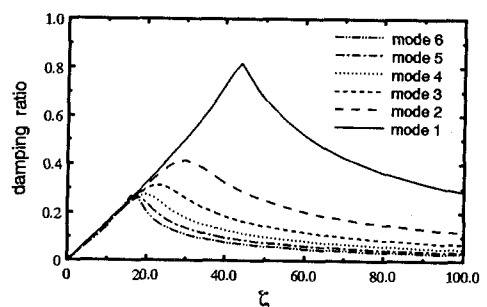


図-4 ダンパーによるモード減衰定数 ($x_c/L = 0.04$)

3. シミュレーションによる検討：交通振動に対するダンパー及びその他の手法の効果を比較検討するためにシミュレーションを行なった。シミュレーションはある橋梁（スパン40m、総重量130tonf、構造減衰2%）

においてISOの評価基準で「良好」に属する路面凹凸を考慮し、その上を2自由度系(鉛直及び回転)の車両(重量20tonf)²⁾1台が走行(速度20m/s)したときの支点反力の応答波形を計算してそのフーリエスペクトルを求めた。その結果が図-5である。なお、図-5においてダンパー取り付け位置は $x_c/L = 0.1$ である。さらに、比較のため無ダンパー時(構造減衰のみを考慮)、TMDあるいはアクティブコントロールを取り付けた場合についても解析を行なった。その際、TMDは等価質量比5%(質量3.306ton)とし、桁の1次振動(3.0Hz)をターゲットとして調和振動外力に対する最適化を行なった。なお、その取り付け位置はスパン中点とした。また、アクティブコントロールは、桁中点の鉛直速度を桁中点に取り付けたアクチュエータにフィードバックするようなものを仮定し、制御ゲイン(桁中点に加える制御力と桁中点鉛直速度との比)を100として解析を行なった。制御ゲイン100というのは、桁の1次モードに対し、減衰定数にして40%程度のモード減衰を付加できる値である。

図-5によると、無減衰時には桁の1次固有振動数(3.0Hz)付近と車両の固有振動数(鉛直3.3Hz、回転2.4Hz)付近の振動が卓越しているのがわかる。実際、高架橋周辺で交通振動が問題となる建物等の固有振動数もこの付近である。ダンパーを取り付けた場合、適当な減衰係数 c の値(この場合 $c=500$ tonf/(m/s)程度)を選ぶことにより、この振動数領域の振動をかなり抑えられることがわかる。アクティブコントロールの場合も制御ゲインの値(この場合100 tonf/(m/s))を適当に選ぶことにより、振動を抑えることができる。TMDの場合、ターゲットとした3.0Hz付近の振動はかなり抑えることができるが、2.4Hz付近を抑えることができない。これに対しては、ターゲットとする振動数を下げることによりある程度改善できると思われるが、ダンパーやアクティブコントロールと同等な制振効果を得るにはさらに等価質量比を高くする等の措置が必要と思われる。しかし、高架橋の構造的な制約上、TMDの重量をあまり大きくすることは好ましくない。

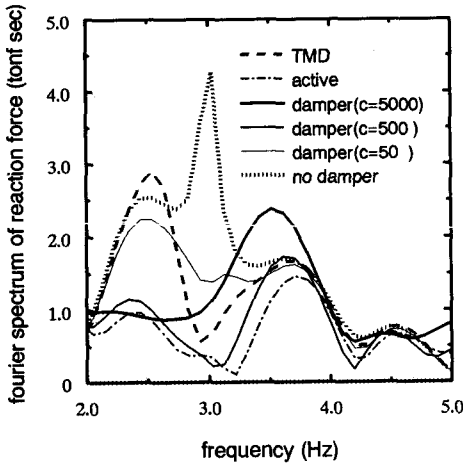


図-5 支点反力のフーリエスペクトル

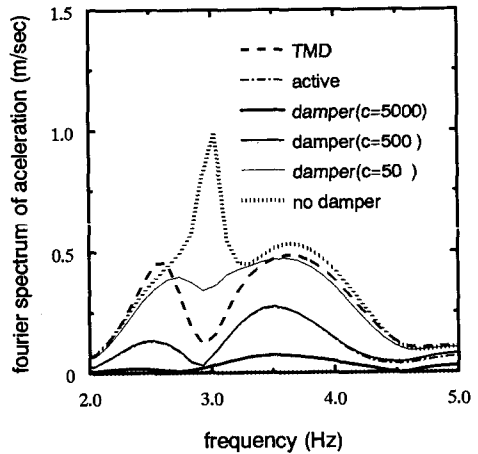


図-6 桁中点鉛直加速度のフーリエスペクトル

4. 最後に: 図-5によるとダンパーを取り付けた場合、 c の値を大きくし過ぎると3.3Hz付近の反力が再び大きくなっているのが分かる。ところが、桁の振動のみに着目して解析を行ったところ、この振動数付近の桁の振動自体は c の値を大きくするに従って逆に小さくなる一方であることが明かとなった(図-6)。これらの原因は、桁の振動は抑さえられても逆に車両の振動が大きくなって反力を増大させるためである。従って、桁の振動を抑さえても実際に地盤に伝わる反力は小さくなるとは限らないので、桁の振動のみを抑さえようとして制御を行っても交通振動は軽減されないものと思われる。

また、実際にダンパーを設置する際、ダンパー自体剛性を有するために制振効果が低下する恐れがある。そこで、ダンパーの剛性を考慮した解析も行ったが、それによる大幅な制振効果の低下は認められなかった。

<謝辞>シミュレーションには大阪大の川谷充郎先生の解析プログラムを一部使用させていただきました。

深く謝意を表します。

<参考文献>1) 倉西 茂他: ダンパーをもつはりのたわみ振動、土木学会論文集、第187号

2) 川谷充郎他: 桁橋の自動車走行による不規則振動と衝撃係数、土木学会論文集、第398号