

I - B 264

不規則外力を受ける橋梁振動の減衰パワーの評価

長崎大学大学院 学生員 ○串山智恵美
 長崎大学工学部 フェロー 岡林 隆敏
 長崎大学大学院 学生員 宮崎 慎也

1. はじめに

構造物の振動制御を効果的に実現するには、外力が作用した構造物のエネルギー収支を明確にする必要がある。構造物に外力による仕事を取り込まれると、減衰パワーにより系外にパワーが放出される。土木構造物は規模が大きいために、パッシブおよびアクティブ振動制御においても、減衰効果を高める機構になっている。したがって、振動制御は取り込まれた外力による仕事を、最適な方法で系外に放出する機構であると考えることができる。本研究は、このような視点から、地震外力が作用した橋梁振動の減衰パワーの評価を試みたものである。

2. 構造物のモデル化

(1) 多自由度系構造物の運動方程式

図 - 1 に、斜張橋である浦上歩道橋の解析モデルを示す。構造物のモデル化には有限要素法を用いた。全節点数は39、要素数は46である。ケーブルと桁の接合部には、仮想剛部材を用いている。また、表 - 1 にこの構造物の諸元を示す。 n 節点でモデル化された構造物の変位、外力ベクトルを $y = [y_1 \cdots y_{3n}]^T$, $f = [f_1 \cdots f_{3n}]^T$ とする。これより、構造物の運動方程式は次式となる。

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = f(t) \quad (1)$$

m, c, k は構造物の質量、減衰、剛性行列である。さらに、 $y(t) = \Phi \cdot q(t)$ とモード分解すると、 m 次振動に関する方程式は、

$$\ddot{q}(t) + H\dot{q}(t) + \Omega q(t) = \Phi^T f(t) \quad (2)$$

となる。ここで H, Ω は、 $[2h_i\omega_i]$, $[\omega_i^2]$ ($i=1 \sim m$) を対角要素に持つ行列であり、 ω_i, h_i は、 i 次の固有円振動数、減衰定数である。表 - 2 に、浦上歩道橋の振動特性を示す。また図 - 2 に、地震外力として用いた El Centro 地震波を示す。

(2) 減衰係数行列の同定

振動に伴う減衰パワーを求めるには、減衰係数 c が必要となる。しかし、 c を直接求めることは困難である。そこで、次式によって、モード減衰 $H = [2h_i\omega_i]$ ($i=1 \sim m$) より c を同定する。

$$c = (\Phi^T)^{-1} \cdot H \cdot \Phi^{-1} \quad (3)$$

3. パワー・エネルギーの定義

構造物の外力によるパワー $PE(t)$ と振動減衰パワー $PD(t)$ は次式となる。

$$PE(t) = \dot{y}(t)^T \cdot f(t) \quad (4) \quad PD(t) = \dot{y}(t)^T \cdot c \cdot \dot{y}(t) \quad (5)$$

また、振動減衰パワーは各節点および各次振動におけるパワーの和として、次式により表現できる。

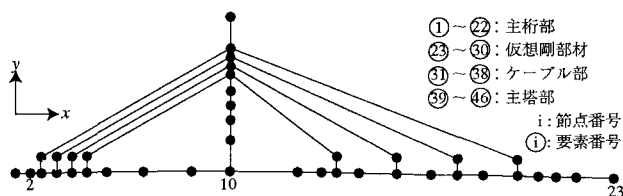


図 - 1 浦上歩道橋の骨組構造モデル

表 - 1 浦上歩道橋諸元

構造形式	2径間連続鋼斜張橋	
位置	長崎県長崎市茂里町～竹の久保町	
材質	鋼	
橋長	79.450	m
斜材総数	8	本
弾性係数	主塔部	2.10×10^7
	塔部	2.10×10^7
	ケーブル部	1.95×10^7

表 - 2 浦上歩道橋の固有振動数

振動次数	振動数(Hz)	振動次数	振動数(Hz)
1次	1.3126	6次	11.0242
2次	3.0759	7次	12.9645
3次	4.2471	8次	14.0791
4次	7.0168	9次	15.0163
5次	7.7691	10次	20.6800

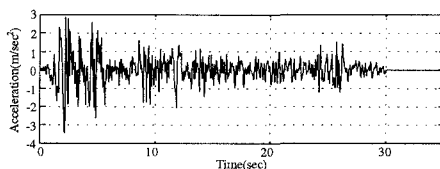


図 - 2 El Centro地震波形

キーワード：橋梁振動，構造減衰，減衰パワー，振動制御

〒852-8521 長崎市文教町1-14 長崎大学工学部社会開発工学科

TEL(FAX) 095-847-1111

$$\text{各節点：} PD_i(t) = \sum_{i=1}^n \dot{y}_i(t) \cdot c_i \cdot \dot{y}_i(t) \quad (6)$$

$$\text{各次振動：} PD_2(t) = \sum_{j=1}^n 2h_j \omega_j \dot{q}_j^2(t) \quad (7)$$

さらに、外力による仕事 $E(t)$ と散逸エネルギー $D(t)$ は、次式で得られる。

$$E(t) = \int_0^t PE(t) dt \quad (8)$$

$$D(t) = \int_0^t PD(t) dt \quad (9)$$

4. 各次振動における減衰パワー解析結果

図 - 3 に、地震外力が作用した構造物の 1～10 次振動における減衰パワーの時間的変化を示した。全次数ともに、約 5 秒および 10 秒付近でピークを見せている。このことは、基本的に外力の強度のピークが発生する時刻と対応している。また、30 秒以降は自由振動となり、振動は急速に減衰している。さらに、各次振動のパワー値を比較すると、オーダーに大きなばらつきが見られる。また図 - 4 に、構造物全体と 1～3 次振動における散逸エネルギーの関係を示した。構造物全体に対する各次数から散逸するエネルギーの割合は、1 次振動が約 51%，8 次振動が 30%，3 次振動が約 15% である。このことより、1～3 次といった低次の振動において大半のエネルギーを散逸しており、高次の振動においてはエネルギーの散逸が少ないことがわかる。

5. 構造物全体のパワー・エネルギーの解析結果

図 - 5 は、構造物全体の減衰パワーを示したものである。最大値は約 2.4×10^4 (W) である。パワーの散逸形態に着目すると、エネルギーの割合の大きかった 1 次および 2 次振動と同様の徴候を示していることが分かる。このことから、低次の振動が支配的であることが分かる。さらに図 - 6 は、構造物全体の外力の仕事、および散逸エネルギーを示したものである。外力の仕事を実線、散逸エネルギーを点線で示した。この両者の差が、構造物に蓄積されるエネルギーである。収束値は、外力の仕事が 7.00 (J)、散逸エネルギーが 6.98 (J) である。パワーの散逸量の多かった約 5 秒付近までに急速にエネルギーを散逸している。また、外力の仕事に追従して、エネルギーが散逸している。構造物のモデル化さらに外力のモデル化にもよるが、外力が作用した場合のパワーの変化とエネルギーを評価することができる。

6. まとめ

構造物の振動を①各次振動における減衰パワー、②構造物全体の減衰パワー、③外力のなす仕事、④散逸エネルギーにより評価した。減衰パワーに着目すると、構造物の振動のメカニズムを評価することが可能になることが確認できた。現在、不規則振動論の視点から、減衰パワーの定式化を行っている。

【参考文献】(1) W.C.Hurty, M.F.Rubinstein: Dynamics of Structures, 1964, Prentice-Hall, Inc.

(2) R.H.Lyon, R.G.Dejong: Theory and Application of Statistical Energy Analysis, 1995, Butterworth-Heinemann.

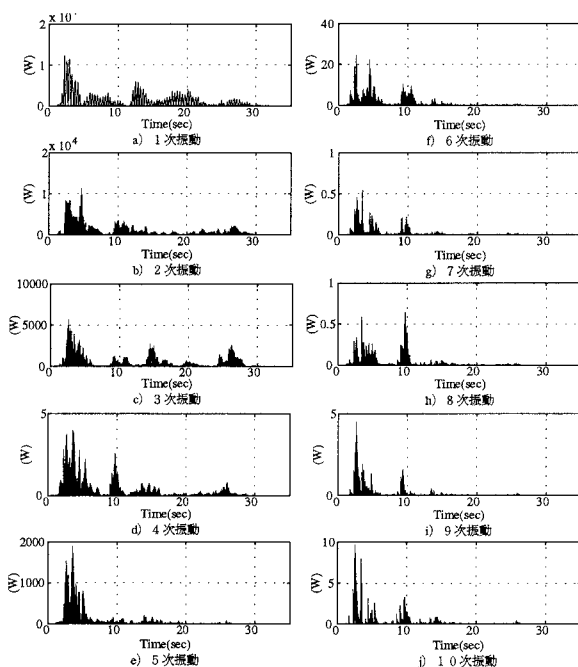


図 - 3 各次振動における減衰パワー

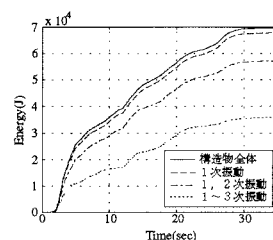


図 - 4 各次振動における散逸エネルギー

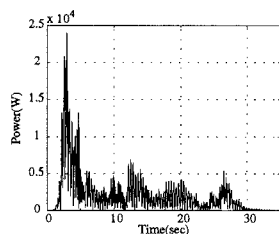


図 - 5 構造物全体の減衰パワー

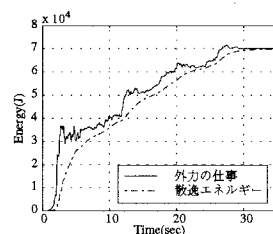


図 - 6 構造物全体のエネルギー