

斜張橋の System Damper 効果に関する 2, 3 の考察

大阪大学工学部 正会員 前田幸雄

川田工業(株) 正会員 前田研一

川田工業(株) 正会員 越後 滋

大阪大学大学院 学生員 〇藤原 要

1. まえがき 斜張橋の動的特性に関し、F. Leonhardt^{1), 2)}は、斜張橋が特有の System Damper 効果によって鉛直たわみ振動に対する高い動的安定性を有することを報告し、その要因として、サグの影響によるケーブルのひずみ挙動の非線形性、異った周期を有するケーブルの横振動の干渉などを挙げている。しかし、それらの要因は推測の域を出ないものであると思われる。一方、小松・川谷³⁾は、ケーブルの横振動の周期が全体構造の周期と近接するような張力の場合には、走行荷重による動的増幅率が低減するという一計算結果を報告している。この結果はケーブルがダンピングの役割を果たしたことによるとしているが、部分構造としての主桁とケーブルの振動の内部共振によるものであると考えられる。

本研究は、その内部共振を追究して、System Damping の支配的な一要因として定義し、その妥当性を検討するものである。さらに、マルチケーブル型式斜張橋における System Damping の効果について経済的設計を行う立場からの資料を得ることを試みるものである。

2. System Damping の要因の定義 部分構造としての主桁とケーブルの固有円振動数が近接する場合、内部共振を起こし、全体構造としては各々の相似な振動成分が達成し、ケーブルの位相が逆転した2種の固有振動モードを生じる。この2種のモードに対応するベクトル y_i, y_j について主桁上を単一集中荷重が走行する場合の運動方程式を解き、さらに注目する主桁の一点について変位の動的応答値を求めれば、次式が与えられる。

$$y_{Gk}(t) = \frac{y_{Gk} F_k}{\omega_k^2 - \omega_p^2} (\sin \omega_k t - \frac{\omega_p}{\omega_k} \sin \omega_p t), \quad F_k = (y_k^T M \cdot y_k)^{-1} (y_k^T Q) \quad (k=i, j) \quad (1)$$

ここに、 M は質量マトリクス、 y_{Gk} は y_k の対応する要素である。また、 Q, ω_p は、単一集中荷重をフーリエ展開し、その一成分が卓越するとした場合の正弦関数型外力の係数ベクトル、円振動数である。式(1)の第一項が強制振動項、第二項が自由振動項であり、この式から、自由振動項が初等振動学における beating (唸り) 現象を生じることがわかる。すなわち、2種の近接した固有円振動数 ω_i, ω_j に対応する主桁変位の自由振動項 $y_{Gi}(t), y_{Gj}(t)$ を合成すれば

$$y_{Gi}(t) + y_{Gj}(t) = \bar{A}_G(t) \cdot \sin[(\omega_i + \frac{\delta}{2})t - \phi_G], \quad \bar{A}_G(t) = \sqrt{(\lambda_i \cdot X_{Gi})^2 + (\lambda_j \cdot X_{Gj})^2 + 2(\lambda_i \cdot X_{Gi} \lambda_j \cdot X_{Gj}) \cos \delta t} \quad (2)$$

$$\phi_G = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_i X_{Gi} - \lambda_j X_{Gj}}{\lambda_i X_{Gi} + \lambda_j X_{Gj}} \right) \tan \frac{\delta}{2} t, \quad \delta = |\omega_i - \omega_j|, \quad \lambda_k = \left(\frac{\omega_p}{\omega_k} \right) / \left\{ 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega_k} \right)^2 \right\}, \quad X_{Gk} = y_{Gk} F_k / \omega_k^2 \quad (k=i, j)$$

なる正弦波の式が得られ、beating 現象によって、振幅 $\bar{A}_G(t)$ が最大値 $\bar{A}_{Gmax} = |\lambda_i X_{Gi} + \lambda_j X_{Gj}|$ 、最小値 $\bar{A}_{Gmin} = |\lambda_i X_{Gi} - \lambda_j X_{Gj}|$ で周期 $2\pi/\delta$ の周期関数となる。ここに、 X_{Gk} は静的な場合の応答振幅である。したがって、最大振幅 $\bar{A}_{Gmax}$ が内部共振をほとんど起こさない場合と差異がないならば、動的応答値がかなり低減されることになる。

ゆえに、これらのことから、部分構造系としてのケーブルと主桁の振動の内部共振による自由振動項の beating 現象を斜張橋の System Damping の支配的な一要因として新たに定義する。

3. 定義の妥当性の検討

定義の妥当性を検討するために、図-1に示す計算モデルについて、ケーブルの導入引張応力 σ_c を変化させた種々の数値計算を行なった。

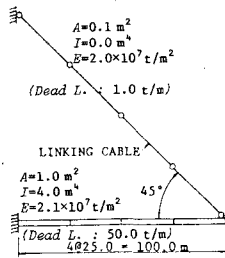


図-1 計算モデル

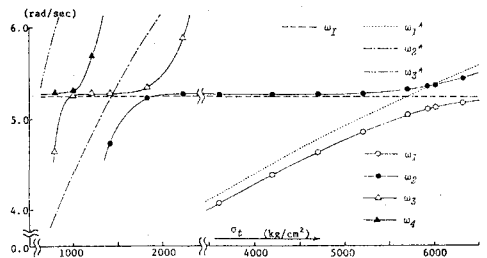


図-2 固有円振動数

計算結果の一部を図-2, 3に示す。ここに、 ω_k , ω_k^* ($k=1\sim4$)は全体構造、ケーブルの固有円振動数であり、 ω_k はケーブルを単なる引張材に置換した場合の主桁の一次モードに対応するものである。また、 X_{Gk} , X_{Gk} , X_{Gk} ($k=1, 2$)は、自由端に正弦関数型外力 $P \sin \omega_p t$ が作用した場合における、 ω_k , ω_k に対応する主桁自由端の鉛直方向変位、ケーブル中央点の法線方向変位の静的な場合の応答振幅を表わす。

4. マルチケーブル型式斜張橋の動的応答解析

System Dampingの效果についての設計資料を得ることを目的とし、図-4、表-1に示す実橋設計例を用い、共振車頭間隔の7個の集中荷重からなる走行速度60km/hのL-20相当設計荷重³⁾による動的応答解析を行った。

解析結果の一部を図-5, 6、表-2に示す。ここに、MODEL-1は全ケーブルを引張材、MODEL-1Lは10段目のケーブルのみを鎖状ケーブルとしたもの、さらにMODEL-2Lは10段目のケーブルの横振動が主桁の対称一次モードの振動と内部共振を起こすように張力を調整したものである。

5. 考察 以上の結果からは、定義した要因がSystem Dampingの支配的な一要因であるといえ、マルチケーブル型式の場合、走行時の動的増幅率をかなり低減でき、残留自由振動についても、充分な構造減衰が作用すれば、高い減衰性が得られることがわかった。

(参考文献) 1) Leonhardt, F. et al.: Cable-Stayed Bridges, [ABSE SURVEYS, 3-13/80, 1980. 2) Leonhardt, F. et al.: Modellversuche für die Schrägkabelbrücken Zárate-Brazo Largo über den Rio Paraná (Argentinien), Bauingenieur 54, 1979. 3) 小松田隆: 斜張橋の動荷重走行による動的応答と耐震性能に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 215, 1978.

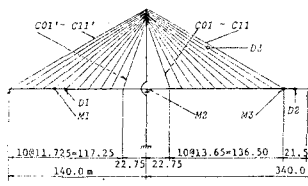


図-4 実橋設計例

表-2 鉛直方向変位の動的増幅率

	MODEL-1	MODEL-1L	MODEL-2L
D1 Static		-0.0611 (m)	
(DAF)	1.121	1.132	1.091
D2 Static		0.1874	
(DAF)	1.081	1.084	1.049
D3 Static		0.0904	
(DAF)		1.204	2.562

図-3 beating現象における主桁自由端、ケーブル中央点の自由振動量の最大、最小振幅における周波数

表-1 諸元

	CABLE	GIRDER	TOWER
AREA	0.0128 ~ 0.0192	1.214	0.968, 1.392
INERTIA	0.0	2.98	1.518, 2.284
Y-MODULUS	2.05×10^7	2.10×10^7	2.10×10^7
DEAD LOAD	ω_d (t/m) 0.1408 ~ 0.2112	21.6	9.40, 13.7
TENSION	σ_d (t) 150.0 ~ 800.0		

(1.0x95.8kN)

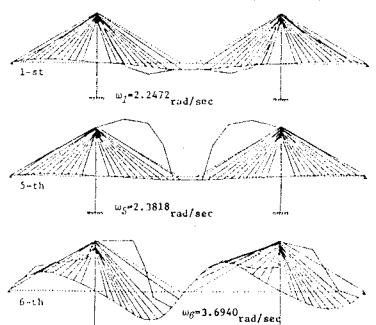


図-5 主桁の振動成分が卓越する固有振動モード (MODEL-2L)

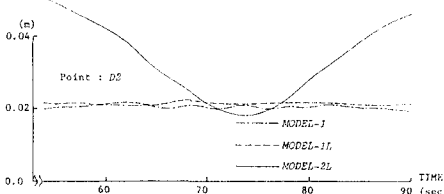


図-6 残留自由振動時の鉛直方向変位の振幅の時間推移