

I-88 長大吊橋の変形特性に関する実験的研究

京都大学工学部 ・ 正員 工博 小西一郎
建設省土木研究所 正員 工修 横塚義幸
三菱重工業株式会社 正員 工修 岩田輝俊

1. 概要

長大スパンの吊橋の変形特性を明らかにするため、すなわち、特に①タワーの剛性や上部構造の変形特性に及ぼす影響、②補剛トラスとケーブルの変形状態における連成度の解析、③主径間及び側径間の変形挙動の関連性の解析、一を主目的として、全長13m(3.25m+6.50m+3.25m)の構造模型を複製し、それについて今まで行なう実験について報告する。実験は静的実験、動的実験について行なう。なお、主眼は後者であり前者は模型の精度を検討するため補助的に行なう。こののである。

2. 模型及び実験手法

模型の原型は明石海峡連絡橋第一次案であり、linear reduction factor = $1/200$ 、scaling factor = 5.798 を使用し、鉛直撓み振動のモードが原型と同じになるように設計されている。使用材料はケーブルに直径26mm(断面積5,309mm²)のピアノ線を用い、ハングーには直径0.4mmのピアノ線を使用した。補剛トラス(ワレントラスで桁高60mm)には相似律の拘束と工作の容易さを考慮して、上、下弦材には5mm×6mmのアクリライトを、鉛直材には付加的な死荷重を取付けるため3mm×4mmの鋼を使用している。斜材には橋樑の斜材と同じく3mm×4mmのアクリライトを使用している。タワーは原型と模型の塔頂に等価な水平力を作用させた場合、等価な塔頂水平変位が得られるように計算し、16.8mm×16.8mmの正方形断面で長さ1200mmの鋼をシャフトに使用し、ストロットには16.8mm×30mmと16.8mm×50mmの二種類を考えた。付加的な死荷重は軟鋼のブロックを用い、1径間(6m)当たり3,234kgを1:2の割合でケーブルと補剛桁に分配してある。

静的実験では等分不活荷重(615.6g/panel/1side)を約20種の荷重状態で載荷し、それぞれの状態での補剛トラスの鉛直撓みと塔頂の橋軸方向水平撓みを模型に取付けたスケール(主径間で11点、両側径間で5点づつ)をレベル又はトランシットで読みとり、ケーブル、タワー、補剛トラスの応力はストレインゲージが求めた。またタワーを橋軸方向に移動した場合(最大2.4cm)の撓みを同様な手法で測定した。

動的実験では鉛直撓み振動と水平撓み振動について行なう。すなわち鉛直撓み振動で主径間1/2点及び1/4点を加振して、その後の自由減衰振動の補剛トラスの撓みを差動トランス、ケーブルの歪をストレインゲージで取り、ビシグラフで記録した。この記録した振動波形から振動数、振動モード、減衰減衰率等を求めた。尚この実験は塔頂を固定した場合についても行なう。また加振機(国際機械振動のVE 3202型、加振力125kg、振動数5~5000%)を主径間1/2点、1/4点にそれぞれ、補剛トラスを加振した。これはSweep testと定常加振試験との二種について行なう。Sweep testでは加速度レベルを一定にし5~50%の連続的に振動数を変え、その振動波形の記録から共振点を求めた。定常加振機によるSweep testの結果から得た共振点を加振し、その時の補剛トラスの撓みを差

動トランスとアスカ=Aで、ケーブルの歪をストレインゲージで取り出し、ヒジグラフで記録した。
 これから振動数、振動モードを求めた。水平振動については自由共振振動と同様な手法で記録し、振
 動数、振動モード、対数減衰率を求めている。

3. 理論計算

静的な読み戻しケーブル張力の水平成分は換算理論により求めた。式は次のようである。

$$EI \frac{d^4 \eta}{dx^4} - (H_w + H_p) \frac{d^2 \eta}{dx^2} + \frac{W}{H_w} H_p = P(x)$$

$$H_p \frac{L_k}{E_c F_c} \pm \alpha_T \Delta T \cdot L_T - \frac{W}{H_w} \int_0^L \eta dx = 0$$

∴ κ. ηは鉛直読み、H_wは死荷重によるケーブル水平張力、H_pは活荷重によるケーブル水平張力の増分、Wは死荷重、L_k = ∫_0^L sec^2 φ dx, L_T = ∫_0^L sec^2 φ dx, α_Tはケーブルの線膨張係数、ΔTは温度変化である。

動的な解析では微小振動の範囲で「3原理」の原理を適用し、リッツの手法で振動数、振動モードの近似解を求め、これを用いて振動のエネルギー分布を求めた。詳言すると鉛直振動の低次モードに対しては主径間、側径間に次式を仮定した。

$$\eta = a_1 \sin \frac{\pi x}{l} + a_2 \sin \frac{3\pi x}{l} + a_3 \sin \frac{5\pi x}{l}, \quad \eta_1 = \bar{a}_1 \sin \frac{\pi x}{l_1}$$

振動数方程式は次式である。

$$A \left\{ \left(\frac{1}{q} - \frac{kB}{p} \right) C \cdot D + \frac{1}{4} B \cdot C + \frac{1}{25} B \cdot D \right\} + B \cdot C \cdot D = 0$$

∴ κ. A = sω^2 - λ - H_w, B = sω^2 - 81λ - 9H_w, C = sω^2 - 625λ - 25H_w, D = \frac{1}{4} sω^2 - 4λ - H_w, s = \frac{W l^2}{\pi^2 g}

p = \frac{\pi l}{16f} \frac{L_k}{E_c F_c}, k = \frac{32f}{\pi^2}, λ = \frac{\pi^2 EI}{l^2} である。高次モードには次式を仮定した。

$$\eta = a_n \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (n = 5, 7, \dots) \quad \eta = \bar{a}_1 \sin \frac{\pi x}{l_1}$$

振動数方程式は

$$n^2 A_1 B_1 \frac{p}{k} - (B_1 + \frac{n^2}{4} A_1) = 0$$

∴ κ. A_1 = sω^2 - n^2 λ - n^2 H_w, B_1 = \frac{1}{4} sω^2 - 4λ - H_w である。

水平振動に対しては振動モードを次のように仮定した。

$$V_0 = C_n \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad V = D_n \sin \frac{n\pi x}{l}$$

振動数方程式は

$$H_{nn}^{(1)} \cdot H_{nn}^{(2)} - (H_{nn}^{(3)})^2 = 0$$

∴ κ. V_0は補剛トラスの水平変位、Vはケーブルの水平変位であり、

$$H_{nn}^{(1)} = \omega^2 \frac{W l}{g} \frac{l}{2} - EI_2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \frac{l}{2} - \int_0^l \frac{2H_w \eta^2}{R} \sin^2 \frac{n\pi x}{l} dx,$$

$$H_{nn}^{(2)} = \int_0^l \frac{2H_w \eta^2}{R} \sin^2 \frac{n\pi x}{l} dx,$$

$$H_{nn}^{(3)} = \omega^2 \int_0^l \frac{W}{g} \sqrt{1 + \eta^2} \sin^2 \frac{n\pi x}{l} dx - \int_0^l \frac{2H_w \eta^2}{R} \sin^2 \frac{n\pi x}{l} dx - 2H_w \frac{n^2 l^2}{2l}$$

Wは補剛桁の死荷重、W_cはケーブルの死荷重、Rはハイゼーの長さである。

エネルギー分布に対しては次式を仮定する。

$$V_0 = \frac{EI}{2} \int_0^l \eta^2 dx + \frac{W}{2g} \omega^2 \int_0^l \eta^2 dx$$

$$V_c = \frac{4f}{l^2} H_p \int_0^l \eta dx + \frac{W}{2g} \omega^2 \int_0^l \eta^2 dx$$

$$V_g = -\frac{H_w}{2} \int_0^l \eta^2 dx + \frac{W}{2g} \omega^2 \int_0^l \eta^2 dx$$

∴ κ. V_0は補剛トラスの歪エネルギーの全エネルギーに対する割合、V_c, V_gはケーブルの歪エネルギー、系のGravitationalエネルギーの全エネルギーに対する割合である。

4. 実験結果に対する考察

- (1) 塔頂自由の場合と固定の場合では対称一次モードにかなりの差があり、塔頂固定は補剛トラスのEIを減ずると同じ効果がある。但し振動数は高くなる。
- (2) 高次振動になると側径面との剛性は小さくなる。
- (3) 高次振動になるとエネルギー分布は補剛トラスの至エネルギーが相対的に大きくなり、ケーブルの至エネルギーは小さくなる。
- (4) 対称減衰率は振動次数の増加とともに幾分増加する。又振幅が小さくなるにつれ増加の傾向が見られる。これはケーブル摩擦の影響が強くでているものと思われる。
- (5) ケーブル張力の増分は対称振動の場合には撓みと同じ振動数であり波形も *sin curve* であるが、塔頂自由の逆対称一次振動では撓みの振動数の2倍の振動数である。塔頂固定の場合も2倍の振動数であるようであるが波形がくつ水ていては、まじりえぬ。この理由は目下解析中である。

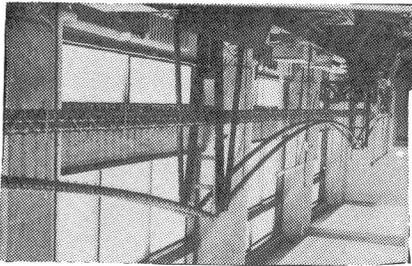


写真1 模型全景図 A-1

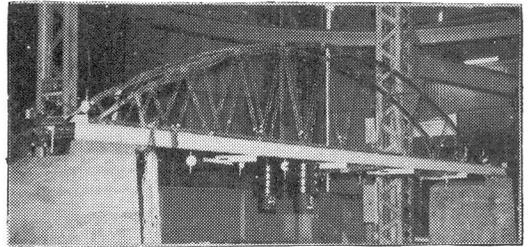


写真2 加振装置 A-3

スパン $\frac{1}{4}$ 点
スパン $\frac{1}{2}$ 点
ケーブル 点

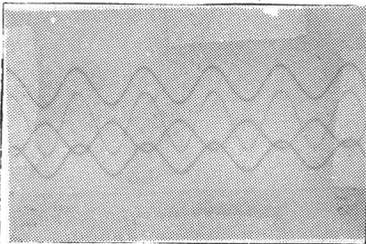
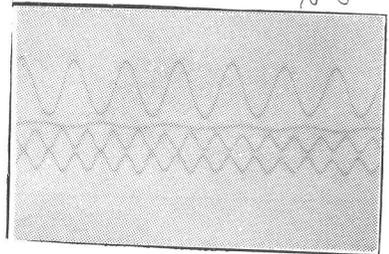


写真3

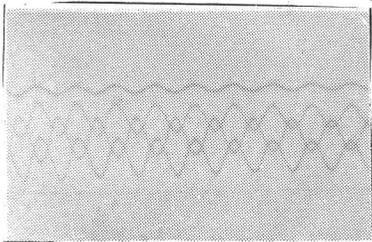
対称一次

写真5



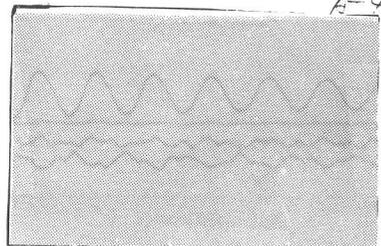
対称一次 (塔固定)

写真4



逆対称一次 A-2

写真6



逆対称一次 (塔固定)

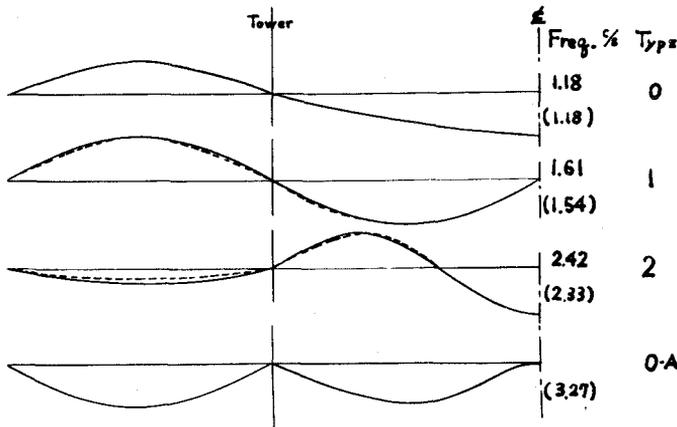


図-1 鉛直揺み自由振動モード () : 計算値

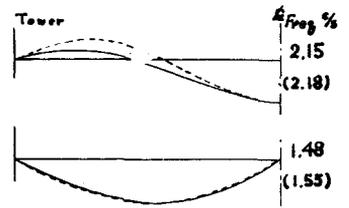


図-2 鉛直揺み自由振動 (塔頂固定)

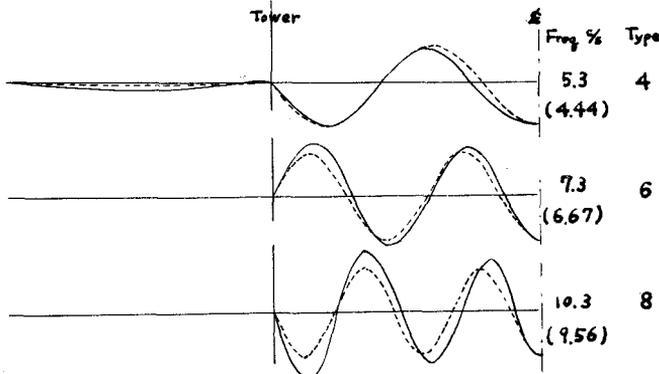


図-3 鉛直揺み定常加振振動モード () : 計算値

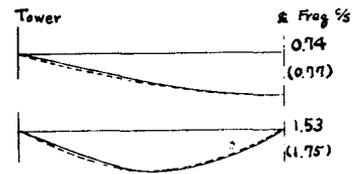


図-4 水平揺み自由振動

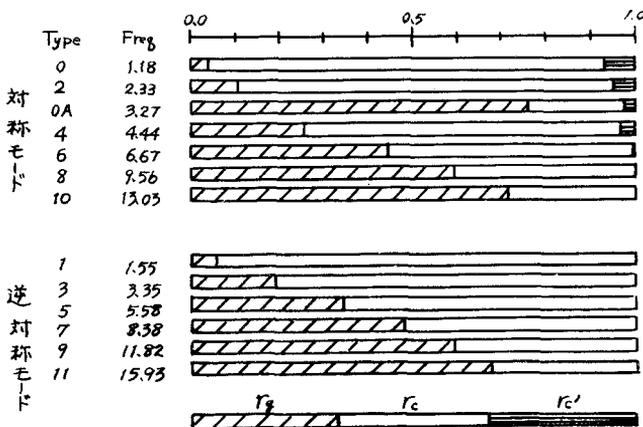


図-5 鉛直揺み振動のエネルギー分布

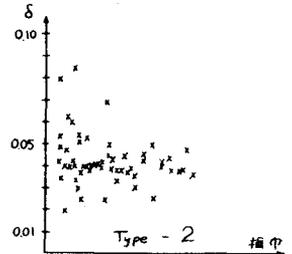
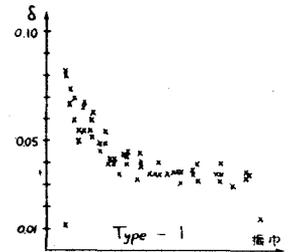
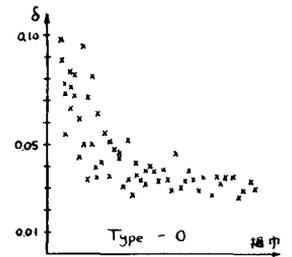


図-6 鉛直揺み自由振動の打数減衰率と挿中との関係