

## 旧タコマナローズ橋の構造減衰特性に関する一考察

近畿大学理工学部 フェロー ○米田昌弘

近畿大学理工学部 菅根絵里

近畿大学理工学部 中村京子

**1. はじめに** 今後の超長大吊橋として、経済性の観点から旧タコマナローズ橋と類似した断面形状を再考する場合、ねじれフラッター特性に対して慎重な検討が必要であり、構造減衰特性の把握はきわめて重要であると言える。そこで、本研究では、エネルギー比にもとづく算定法を適用して、旧タコマナローズ橋の構造減衰特性について考察することとした。

**2. 解析モデル** 旧タコマナローズ橋は、当時、世界第3位の中央支間長 2800ft (853.7m) を有し、支間長比は 1100ft/2800ft=0.393 である。本研究では、旧タコマナローズ橋を図-1に示すように節点数 237、要素数 402 の立体骨組にモデル化することとした。なお、ここで、補剛桁を一般的な魚骨モデルではなく、それぞれの主桁をモデル化した格子モデルを採用したのは、補剛桁が剛性の小さい2本のI断面桁から構成された旧タコマナローズ橋では、低次のねじれ振動特性に及ぼすそりねじり剛性（曲げねじれ剛性）の寄与を適切に評価する必要があるためである。

**3. エネルギー比に基づく構造減衰の算定法** エネルギー比にもとづけば、旧タコマナローズ橋における  $n$  次モードの減衰定数  $h_n$  は、

$$h_n = \frac{D_n}{4\pi U_n} = \frac{2\pi \eta_g V_{g,n} + 2\pi \eta_c V_{c,n} + 2\pi \eta_t V_{t,n} + 2\pi \eta_h V_{h,n} + 2\pi \eta_s V_{s,n}}{4\pi U_n} = \frac{\eta_g V_{g,n} + \eta_c V_{c,n} + \eta_t V_{t,n} + \eta_h V_{h,n} + \eta_s V_{s,n}}{\omega_n^2} \quad (1)$$

で計算できる。また、 $n$  次モードの対数減衰率  $\delta_n$  は、次式で算出すれば良い。

$$\delta_n = 2\pi h_n \quad (2)$$

ここに、 $D_n$  は1周期あたりの減衰エネルギー、 $U_n$  は1周期あたりのポテンシャルエネルギー、 $\omega_n$  は  $n$  次の固有円振動数である。また、 $\eta_g$ 、 $\eta_c$ 、 $\eta_t$ 、 $\eta_h$ 、 $\eta_s$  は補剛桁、主ケーブル、タワー、ハンガー、センタースティのロスファクター、 $V_{g,n}$ 、 $V_{c,n}$ 、 $V_{t,n}$ 、 $V_{h,n}$ 、 $V_{s,n}$  は補剛桁、主ケーブル、タワー、ハンガー、センタースティのひずみエネルギーを表す。

**4. 旧タコマナローズ橋の構造減衰** 旧タコマナローズ橋の固有振動解析を実施した後に、構成部材である補剛桁、主ケーブル、タワー、ハンガー、センタースティのロスファクターを与えれば、式(1)と式(2)から、旧タコマナローズ橋の構造対数減衰率  $\delta_n$ （減衰定数  $h_n$ ）を算出できる。ただし、旧タコマナローズ橋を構成する部材のロスファクターは不明であること、また、近代吊橋においても構成部材のロスファクターに着目した研究は実施されていないことから、ここでは、橋梁形式は相違するものの、同じ鋼製の吊形式橋梁に属する鶴見つばさ橋（鋼斜張橋）で同定された値<sup>1)</sup>を代用することとした。すなわち、構成部材の材質に着目し、補剛桁のロスファクター  $\eta_g$  として鶴見つばさ橋の主桁部の値である  $\eta_g=0.0094$  を、また、タワーのロスファクター  $\eta_t$  として鶴見つばさ橋の主塔部の値である  $\eta_t=0.0036$  を採用した。なお、辻・加納はワイヤーロープのロスファクターとして 0.038 を提案しているが、サグを有する主ケーブルやロッド部材を用いたセンタースティのロスファクターは 0.038 よりもかなり小さいと考えられる。そこで、まず、ハンガーのロスファクター  $\eta_h$  も含め、はじめに  $\eta_c = \eta_s = \eta_h = 0.01$  と仮定して旧タコマナローズ橋の構造減衰を算出することとした。ここで仮定したロスファクターの組み合わせを CASE-1 と記し、構造減衰の算出結果を表-1に示す。表-1より、センタースティの有無にかかわらず、たわみとねじれの対称1次および逆対称1次振動の構造対数減衰率は 0.055~0.063 の範囲にあることがわかる。ただし、ねじれ振動に着目した場合、対称1次振動の方が逆対称1次振動よりも幾分小さな値を示す結果となっている。また、セン

キーワード：旧タコマナローズ橋、構造減衰、エネルギー比、ねじれフラッター

連絡先：〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1 TEL 06-6721-2332 FAX 0729-95-5192

タースティがある場合とない場合のねじれ逆対称 1 次に着目した場合、ハンガーの寄与で、センタースティがない場合の方が、センタースティがある場合よりも、幾分大きな値を呈することにも留意が必要である。

次に、ハンガーのロスファクター $\eta_h$ のみを辻・加納の提案値である $\eta_h = 0.038$ に変更して旧タコマナローズ橋の構造減衰を算出することとした。ここで仮定したロスファクターの組み合わせを CASE-2 と記し、構造減衰の算出結果を表-2 に示す。表-2 より、ハンガーの寄与がきわめて小さいたわみとねじれの対称 1 次振動では、センタースティの有無によって構造減衰が変化しないこと、また実際、これらの値はハンガーのロスファクター $\eta_h$ を $\eta_h = 0.01$ と仮定した表-1 の結果ともほぼ一致していることがわかる。一方、センタースティがない場合、ハンガーの寄与を無視できなかったたわみとねじれの逆対称 1 次振動では、構造対数減衰率に明確な変化が認められ、たわみ逆対称 1 次で 0.022、ねじれ逆対称 1 次で 0.020 も増加する結果となっている。また、センタースティのない場合に着目すれば、ハンガーの寄与で、ねじれ逆対称 1 次振動の構造対数減衰率はねじれ対称 1 次振動の値と比較して $\Delta\delta = 0.024$ も大きくなっていることがわかる。

参考までに、センタースティが機能していなかった場合について、各側径間の陸地から 1/2 区間に作用する非定常空気力を無視（側径間の残りの 1/2 区間および中央径間に作用する非定常空気力を考慮）した場合のねじれフラッター解析結果（V- $\delta$  曲線）を示せば図-2 に示す通りである。なお、この図において縦軸は空力減衰を表しているが、実橋における対称 1 次と逆対称 1 次のフラッター励振力を比較する場合には、当然のことながら構造減衰の影響を考慮する必要がある。そこで、風速 19m/s における空力減衰をその前後における風速域の解析結果から線形補間して算出した後に、構造減衰の推定値（CASE-1 と CASE-2 の推定値）を加算して、対称 1 次と逆対称 1 次のフラッター励振力を求めることとした。その結果、CASE-1 と CASE-2 のいずれの場合もねじれ逆対称 1 次フラッターの方が励振力が大きいことがわかった。それゆえ、ねじれ逆対称 1 次の構造減衰がねじれ対称 1 次よりも幾分大きくても、陸地に近い側径間のある区間には 19m/s よりもかなり低い風速の風が作用していた場合には、実橋と同じく、逆対称 1 次のねじれフラッターが発現するものと推察される。

**5. まとめ** 以上の検討結果より、ロスファクターの仮定値についてはさらに詳細な検討が必要であるが、旧タコマナローズ橋では、ねじれ対称 1 次の構造減衰がねじれ逆対称 1 次振動を上回ることはない（ねじれ逆対称 1 次振動の方がねじれ対称 1 次振動よりも構造減衰が大きい）と考えられる。

【参考文献】1) 山口宏樹，高野晴夫，小笠原政文，下里哲弘，加藤真志，加藤久人：斜張橋振動減衰のエネルギー的評価法と鶴見つばさ橋への適用，土木学会論文集，第 543 号／I-36，pp.217～227，1996 年 7 月。

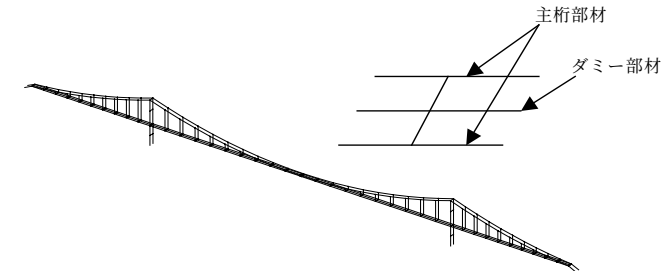


図-1 旧タコマナローズ橋の固有振動解析用モデル

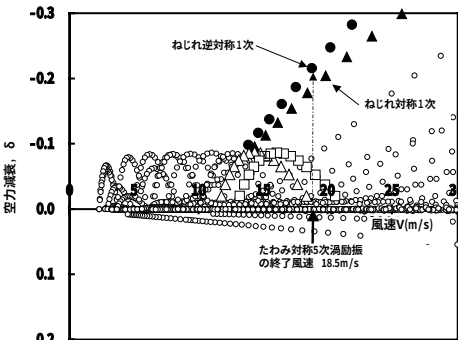


図-2 V- $\delta$  曲線（各側径間の陸地から 1/2 区間に作用する非定常空気力を無視した場合）

表-1 旧タコマナローズ橋の構造対数減衰率（CASE-1）

|            | 構造対数減衰率 |       |
|------------|---------|-------|
|            | スティあり   | スティなし |
| たわみ対称 1 次  | 0.062   | 0.062 |
| たわみ逆対称 1 次 | 0.063   | 0.063 |
| ねじれ対称 1 次  | 0.055   | 0.055 |
| ねじれ逆対称 1 次 | 0.058   | 0.063 |

表-2 旧タコマナローズ橋の構造対数減衰率（CASE-2）

|            | 構造対数減衰率 |       |
|------------|---------|-------|
|            | スティあり   | スティなし |
| たわみ対称 1 次  | 0.063   | 0.063 |
| たわみ逆対称 1 次 | 0.063   | 0.085 |
| ねじれ対称 1 次  | 0.056   | 0.056 |
| ねじれ逆対称 1 次 | 0.060   | 0.080 |