

横浜ベイブリッジのケーブル張力測定

首都高速道路公団 正員 ○市川 衡
首都高速道路公団 正員 中込 秀樹

1. はじめに

横浜ベイブリッジは、首都高速道路湾岸線を構成する3径間連続ダブルデッキの鋼斜張橋（200 + 460 + 200 = 860 m）であり、平成元年9月の供用開始後すでに5年を経過している。斜張橋を構成する主要部材であるケーブルの健全性を確認することを目的として今回ケーブルの張力測定を行った。本稿は、ケーブルの張力を測定した結果と張力算定時の問題点について述べる。

2. 張力測定方法

本橋のケーブルは、NEW-PWS7φ-199~421で、図-1に示すように全部で88本（並列ケーブルであるから正確には176本）あるが、今回は32本（正確には64本）を測定対象とした。ケーブルの諸元の例を表-1に示す。張力測定は、振動法によった。具体的には、ケーブルに取付けた加速度計から得られる波形をFFTによりスペクトル解析して固有振動数を測定した。この際、常時微動波形では交通振動等による影響で明確なスペクトルのピークが得られなかったことから、ロープにより並列ケーブルの両方を同時に人力加振して行った。

3. 張力算定時の問題点

振動法ではケーブルの固有振動数を測定して、振動数～張力関係式により張力を算定するが、長大斜張橋のケーブルのようにケーブル長が長く、サグが大きい場合には、いわゆる弦理論式（式-1）ではかなりの誤差を生ずることがあることが、新家らの研究¹⁾で指摘されている。振動数測定にあたっては、一般にケーブルの1次モードによるのが単純明快であるが、1次モードではケーブルのサグが大きくなるに従って次第に弦理論より高い振動数が測定されるようになる¹⁾。これは今回の測定でも実際に確認された（図-2）。図-2の横軸 Γ はケーブルのサグや傾斜角を表す無次元パラメータであり、 $\Gamma \rightarrow 0$ はサグ・傾斜角が大きくなることを意味する。縦軸の η は振動数比（測定振動数/弦理論振動数）である。今回測定対象としたケーブルの内、C1, C4, C7, C16, C19, C22ケーブルが Γ が1.5~5程度であり、サグ・傾斜角の影響により弦理論振動数より高い振動数が測定されていることがわかる。弦理論式では張力は振動数の2乗に比例するので張力を過大に見積もることになり注意が必要である。したがって、サグの大きいケーブルの張力測定は2次モードにより行い、新家らの方法¹⁾等適切な振動数～張力関係式を用いることが重要である。今回の測定では、新家らの式（式-2）により張力を算出している。

4. ケーブル張力の温度補正

測定時の温度における張力から設計基準温度における張力に換算する必要があるため、本解析では、上弦材の温度、上弦材の上面と下面との温度差、下弦材の温度、主塔の温度、主塔の橋軸方向の温度差、およびケーブルの温度の6個をパラメータとして平面骨組モデルにより静的解析を行い、ケーブル張力に及ぼす温度影響値を算出した。具体的には、上記の各位置に単位の温度荷重を与えたときの、ケーブルの張力の変化を算出した。基準温度への補正值は、この影響値と、上記6点における基準温度との温度差の線形結合により与えられる。今回の測定時の温度は約3℃~8℃であり、これを20℃の張力に補正する補正值の例を図-3に示す。

5. 張力測定結果

温度補正後の張力測定結果を図-4, 5に示す。曲げ剛性については後述するような理由のため充実断面の曲げ剛性によった。また、今回64本の測定を行ったが、測定の結果、並列ケーブル間の有意な張力差は認められなかったため、32本分について結果を示している。主塔に近いケーブル（C11, C12）が、活荷重や温度補正の影響をやや受けていると考えられるが設計張力との差は小さくケーブルは健全であると言える。

6. その他の影響

(1) ケーブルダンパーの影響

本橋では、渦励振やウェイクギャロッピング対策のために、並列ケーブル間の位相差により動作するオイルダンパー（スパーサ）が路面から約15mの高さの位置に設置されている。張力測定に及ぼすダンパーの影響を確認するため、C1（長い）、C7（短い）ケーブルでダンパーを取り外した状態での測定も行ったが、ダンパーの有無による有意な差は認めらず張力測定にはダンパーの影響は小さいことがわかった。

(2) ケーブルの曲げ剛性の影響

新家らの張力算定式では、ケーブルの曲げ剛性が必要となる。ケーブルには素線自体の曲げ剛性と素線間の摩擦などの影響による曲げ剛性が存在するが、その値はケーブル長、傾斜角、張力などにより変化することが知られており、その値を求めることは難しい。ここでは、曲げ剛性を充実断面の場合とその50%、25%と仮定した場合の張力をそれぞれ算出したが、張力の値で2~3%程度の違いであり曲げ剛性の影響は小さかった（表-2）。これは、本橋のケーブルの場合、式-2の ξ （ケーブルの剛性を表す無次元パラメーター）の値が、充実断面の曲げ剛性と仮定したとしても、短いケーブルで80程度、長いケーブルでは190程度あり、梁ではなく弦として挙動しているためと思われる。

7. 結論

今回測定したケーブルは設計値（初期値）との差は小さく健全といえる。また、①サグの大きいケーブルでは、1次モードでは弦理論式との差が大きくなるので、2次モードにより測定を行い適切な振動数~張力関係式を用いる必要がある。②今回、並列のケーブル間での張力の違いはほとんど認められない。③張力測定時のダンパー付スペーサーの影響はほとんどない。④本ケーブルは弦として挙動し、曲げ剛性の影響は小さいことがわかった。今後も、定期的に張力の測定を行い橋梁の健全性を確認していく予定である。

参考文献 1) 新家、広中、頭井、西村：振動法によるケーブル張力の実用算定式について、土木学会論文報告集、第294号、1980年2月

表-1 ケーブルの諸元の例（本牧朝側）

番号	ケーブル長 m	傾斜角 deg	直径 m	設計張力 kgf	単位重量 kgf/m	弾性係数 kgf/cm ²	設計サグ m	設計張力での値	
								$\xi(EI) \sim \xi(EI/4)$	$\Gamma(EI) \sim \Gamma(EI/4)$
C1	221.5	29.7	0.175	465.2	131.8	2.0E10	1.50	157.4~314.9	1.44~1.42
C4	176.2	33.0	0.149	390.4	89.4	2.0E10	0.75	158.3~316.5	2.63~2.60
C7	131.9	38.8	0.122	283.5	62.4	2.0E10	0.37	150.6~301.2	4.57~4.52
C11	76.7	56.6	0.136	355.2	71.0	2.0E10	0.08	78.9~157.8	21.1~20.7
C12	74.6	55.5	0.136	340.9	71.0	2.0E10	0.08	75.2~150.3	19.1~18.7
C16	128.3	36.8	0.122	265.2	62.4	2.0E10	0.39	141.7~283.4	3.96~3.93
C19	172.0	30.8	0.149	368.1	89.4	2.0E10	0.77	150.0~300.0	2.32~2.30
C22	216.9	27.4	0.161	481.6	106.1	2.0E10	1.15	185.3~370.7	1.97~1.96

表-2 曲げ剛性の影響

EIの値	測定張力 (tonf)	
	C1	C11
EI	481	338
EI/2	487	344
EI/4	491	348

$$T = \frac{4\omega l^2}{n^2 g} (f_n)^2 \quad (n=1,2) \dots \text{式-1}$$

$$C = \sqrt{\frac{EIg}{\omega l^4}}, \quad \xi = \sqrt{\frac{T}{EI}} \cdot l, \quad \Gamma = \sqrt{\frac{\omega l}{128EA\delta^3 \cos^2 \theta}} \begin{bmatrix} 0.31\xi + 0.5 \\ 0.31\xi - 0.5 \end{bmatrix} \dots \text{式-2}$$

$$\Gamma < 3 \text{ and } \xi > 10 \quad T = \frac{\omega}{g} (f_2 l)^2 (1.02 - 6.26C/f_2)$$

$$\Gamma > 3 \text{ and } \xi > 17 \quad T = \frac{4\omega}{g} (f_1 l)^2 (1 - 2.2C/f_1 - 2C^2/f_1^2)$$

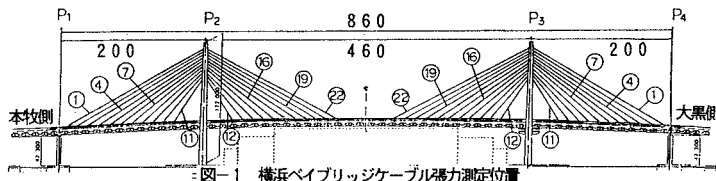


図-1 横浜ベイブリッジケーブル張力測定位置

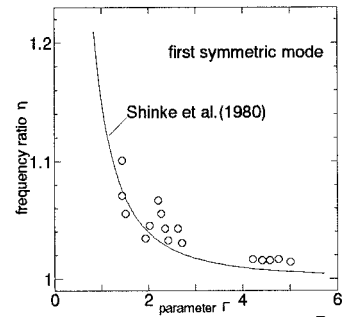


Fig.2 Relationship between η and Γ

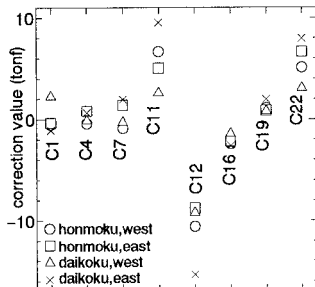


Fig.3 Example of correction for basic temperature (20°C)

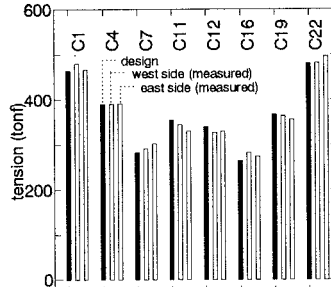


Fig.4 Comparison with design tension (Honmoku-Futo wharf side)

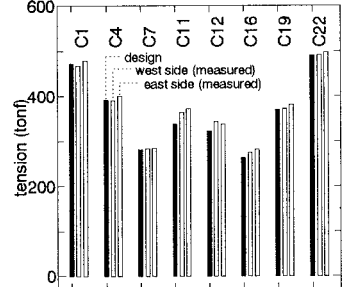


Fig.5 Comparison with design tension (Daikoku-Futo wharf side)