

汎用有限要素解析プログラムを活用した斜張橋の逆解析

株式会社ヒロコン 正会員 ○都関 雄介
 広島工業大学工学部 フェロー 中山 隆弘
 広島工業大学大学院 学生会員 鈴木悠紀賞

1. はじめに

近年、土木や建築に関わる様々な社会基盤施設や構造物の老朽化が深刻な問題になってきた。したがって、このところモニタリングによって構造物の健全性を評価する方法の研究が数多く見られるようになった。例えば、コンピュータの著しい進歩に支えられて開発された構造解析を初めとする解析ツールによって、いわゆる既存構造物の力学特性を同定しようとする試みもその一例である。

そのような状況に鑑み、本研究でも汎用有限要素解析プログラム（DIANA）を用いて3径間連続鋼斜張橋部材の状態を評価する方法の有効性を検討とした。ただし、今回は同定の対象をケーブル張力のみとした。

一方、構造設計の国際標準化の動向や、安全率の低減によって建設コストを縮減しようとする研究²⁾を視野に置き、あくまで設計計算書といくつかの仮定の下にはあるが、同橋のケーブルの信頼性指標についても検討を試みた。

2. 逆解析による斜張橋のケーブル張力の同定

2.1 対象橋梁の概要

まず、解析の対象とした橋梁を図-1に示す。

同橋は橋長385.0m（支間割：85.0m+215.0m+85.0m）の3径間連続鋼斜張橋で、ケーブルのプレストレス量は、完成時に、主桁の各ケーブル取付点の鉛直変位と塔頂の水平変位が0になるように決定されている。

2.2 対象橋梁のモデル化および解析条件

紙面の都合上、詳細な断面諸量を記載することはできないが、本橋の対称性を考慮して作成した解析用モデルと作用荷重を図-2に示す。使用した要素について略述すれば、

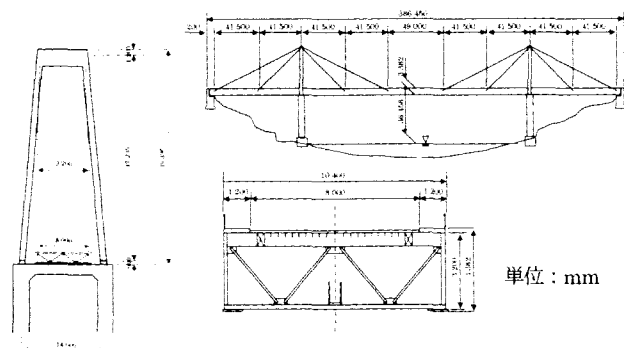


図-1 対象橋梁

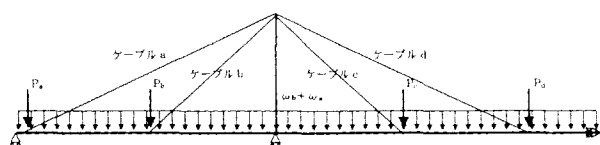


図-2 FEMモデル

主桁および塔については2次元はり要素、ケーブルについては、サグの影響を無視して、2次元トラス要素を使用することにした。また、それらはいずれも等断面であると仮定した。さらに、塔と主桁は非剛結とし、塔の支点は橋軸方向に回転自由なヒンジ支点としている。

次に、設計計算書に与えられている作用荷重（死荷重）を表-1に示す。表中の集中荷重 P_a 、 P_b 、 P_c 、 P_d は各ケーブル取付け部への作用荷重、また、等分布荷重 ω_b は主桁に作用する前死荷重、 ω_a は同じく後死荷重である。

さて、逆解析を行う際の観測値としては、各ケーブル取付部の主桁の鉛直変位量と塔頂部の水平変位量を用いることにした。ただ、今回は実際の観測データではなく、表-2に示した仮定値に基づいて、各ケースに対するケーブルの軸力の同定を試みた。因みに各ケーブル取付部の鉛直変位および塔頂部の水平変位をすべて0としたケース1は、全前述の通り、架設時のケーブルのプレストレス量を決定するための条件である。したがって、ケース1に対する逆解析の結果と設計計算書に与えられ計算結果を比較することによって、本解析結果の妥当性が検証できるものと考えている。他のケースについては、クリープ現象によってケーブルの初期の軸力が低下することを想定したものである。

表-2 各観測点の観測値

CASE	ケーブル取付部の鉛直変位 (mm)				塔頂部の水平変位 (mm)
	a点	b点	c点	d点	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	5.00	5.00	5.00	5.00	0.00
4	7.00	7.00	7.00	7.00	0.00
5	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00

2.3 解析結果

まず、ケース1に対する同定結果と設計計算値および架設完了後に振動法によって測定された測定値を併せて表-3に示す。

表-3に示すように、同定結果はかなり良好なもので、設計計算値との差が最も大きいケーブルbでも、計算値との

表-3 同定結果と計算値および測定値

ケーブル名称	同定値 (tf)	計算値 (tf)	測定値 (tf)
a	351.66	342.2	367
b	227.29	207	193
c	184.34	180.8	206
d	374.28	363.1	371

では、架設時におけるケーブルのプレストレス量については、計算値の±10%程度以内に収める必要があるようである。したがって今回の逆解析による結果を測定値と比較して考察を行う必要がある。

表-3の第2列と第4列との比較により、同定値と測定値の差は同じくケーブルbでもっとも大きく、その差は約18%である。因みにその他のケーブルについては、いずれも両者の差は10%程度に収まっている。

ただ、有限要素解析におけるモデル化に伴う不確実性や振動法による軸力の測定値における不確実性を考慮すれば、今回の逆解析についてはおおむね妥当であると判断できる。

次に、各ケースに対するケーブル張力の同定値を図-3に示す。図より汎用有限要素解析プログラムによる逆解析によって、主桁の鉛直変位量とその際のケーブル張力の関係を比較的容易に算定でき、例えばケーブルbおよびケーブルcのケーブル張力の減少によって、桁が大きく変位すること等が図より理解できる。

すなわちケーブルbの張力が227.3tfから201.3tfに、ケーブルcの張力が184.34tfから160.0tfに減少することによって、主桁のケーブル取り付け点がそれぞれ1cm沈下することが分かる。

ただ、今回の研究で用いた主桁の沈下量はあくまで仮定値であり、今後、主桁に対する実際の観測値と、より進歩した計測法によるケーブル張力の測定値を得ることによって、再度今回の逆解析法および有限要素法におけるモデル化の妥当性を検討することが望ましいと考えている。

3. 対象橋梁架設直後のケーブルの信頼性指標

3.1 信頼性指標の算出方法

本研究では、同定したケーブル張力を用いて、作用荷重やケーブルの切断荷重の不確実性を考慮して、極めて単純な方法でケーブルの信頼性指標 β を計算してみた。

その際、切断荷重は正規分布に従うものとし、その公称

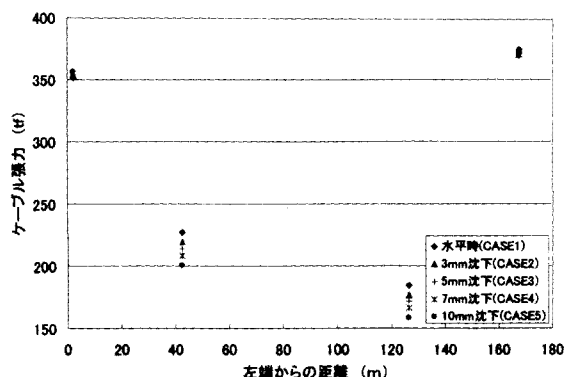


図-3 主桁の沈下による同定値の変化

値は非超過確率を5%に対応する値であると仮定した。また、その変動係数についても実験値が無い場合、やや過大である可能性もあるが、3%、5%、8%と仮定した。さらに、作用荷重の変動係数についても、死荷重に対して $\delta_d=0.05$ を、活荷重に対して $\delta_L=0.30$ を与えた。

このような仮定の下では単純な2次モーメント法によって信頼性指標 β が次式で計算できる。

$$\beta = \frac{\mu_c - (\mu_d + \mu_L)}{\sqrt{\sigma_c^2 + (\delta_d \mu_d)^2 + (\delta_L \mu_L)^2}} \quad (1)$$

式中、 μ_c :ケーブルの切断荷重の平均値、 μ_d :死荷重載荷時のケーブル張力(同定値)、 μ_L :活荷重載荷時のケーブル張力、 σ_c :ケーブルの切断荷重の標準偏差である。

3.2 信頼性指標の計算結果

表-4に β の算出結果を示す。対象橋梁のケーブルが切断荷重に対する安全率が3.0以上として設計されているため、算出された各ケーブルの信頼性指標 β は、破断荷重の変動係数が3%のときで14~15と極めて大きく、その変動係数をかなり大きく8%の仮定してもせいぜい8.6とかなり大きい。

ただし、今回の信頼性指標 β の計算結果は、あくまで死荷重および活荷重の確率特性については仮定が成立することを前提とした結果である。特に、斜張橋の活荷重の不確実性に対する考え方はこれまではっきりとした提言がなく、今後の重要な課題である。

表-4 切断荷重および作用荷重の不確実性を考えたときの
各ケーブルの信頼性指標 β (安全率 $\gamma=3.0$ の時)

		ケーブル				
		a (4-φ70)	b (4-φ54)	c (4-φ56)	d (4-φ66)	
信頼性指標 β	切 断 荷 重	要 動 係 数 3%	14.23	14.78	15.41	15.39
		5%	11.21	11.43	11.99	11.59
		8%	8.12	8.18	8.6	8.16

(ただし、 $\delta_d=0.05$, $\delta_L=0.30$)

4. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると次のようになる。

- 汎用有限要素解析プログラムによって3径間鋼斜張橋のケーブル張力の同定を行った結果、測定値に比較して小さいとは言えない差が見られた、有限要素法におけるモデル化の問題や、振動法による張力測定の誤差等を考えれば、今回の方法でもかなり妥当な逆解析が可能であると思われる。
- あくまで仮定の下ではあるが、初期張力に対するケーブルの信頼性指標 β は極めて大きな値となった。

<参考文献>

- Wei-Xin Ren, Guido De Roeck: Structural Damage Identification using Modal Data., Jour. of St. Eng., ASCE, 87-104, Jan., 2002.
- 野上, 齋藤, 長井, 藤野: 超長大吊橋の終局強度に着目した主ケーブル, ハンガー及び主塔の安全率の合理化, 土論, 第682/I-56, 2001.7.
- 土木学会鋼構造委員会: 鋼斜張橋, 土木学会, 1990.9.