

非対称支間長を有する一面吊り斜張橋の固有振動解析

Natural Vibration Analysis of Cable-stayed Bridge with Asymmetric Span Lengths

北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 植松 勇樹 (Yuuki Uematsu)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 箭原 大祐 (Daisuke Yahara)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 安田 絢一 (Junichi Yasuda)

1. まえがき

1955 年に近代斜張橋の先駆となった Strömsund 橋が架設されて以来、斜張橋は今日に至るまで普及・発展を続け、短期間に近代橋梁として一定の位置を確保するに至っている。その理由としては、斜張橋がケーブルの配置、塔形状などによる形態が多様で、設計の自由度が大きいこと、支間長の適用範囲が広いこと、経済的な設計ができること、ケーブルを利用した張出し架設が可能で、合理的な架設ができること、塔、ケーブル、主桁の組み合わせにより、多様な景観設計ができること¹⁻²⁾など、斜張橋の持つ優れた構造特性によるところが大きいと思われる。このため今後も海峡部や都市河川部などで斜張橋の架設事例は増えていく傾向にあるものと考えられる。

また、1995 年 1 月、兵庫県南部地震が発生し、1996 年 12 月「道路橋示方書 V 耐震設計編」³⁾が大幅に改訂された。この改訂により、特殊な形状、構造を有する橋、また構造部位の固有モードが数種あり、各モードが互いに連動するため地震時の挙動が複雑であると考えられる橋に対しては動的解析を行い、その結果を設計に反映させることとなった。

一般に斜張橋は振動の影響を受けやすい橋梁構造物であり、塔、補剛桁、ケーブルなどを含めた全体として複雑な地震時の挙動を示すと考えられる⁴⁻⁵⁾。このため斜張橋の基本的構造形式を決定する際には塔や補剛桁の耐風安定性の検討および補剛桁の支持条件などを考慮した地震時の動的挙動について検討することが必要である。風や地震による振動性状を把握するためには、まずその構造の持つ固有の振動特性(固有振動数と固有振動モード)を明らかにすることが必要であり、固有振動解析が行われる。固有振動解析とは固有振動数とこれに対応する固有振動モードを求める解析である。この解析で用いられる解析モデルとしては、節点に集中した質量を与え、部材の剛度は通常の静的解析に用いる剛度を使用した多質点系の骨組構造モデルを用いるのが普通である。すなわち、斜張橋の動的挙動を正確に把握するためには振動性状の目安となる固有振動解析が重要であると考えられる。

本研究では非対称支間長を有する一面吊り斜張橋の全体構造システム(塔、補剛桁、ケーブル)としての非線形地震時動的応答解析に向けた解析モデルの構築を目指し、固有振動解析を行うことによって鉛直曲げ振動、水平曲げ振動についてそれぞれの固有振動数、固有振動モード、有効質量比を求めることを目的とする。

2. 解析モデル

本研究で対象とした一面吊り鋼斜張橋は、道道幕別帯広芽室線・札内清柳大橋(第二札内大橋)である。全長は 229.7m で支間長が 97.7m+132m の非対称支間となっている。塔の高さは 50m で、塔断面は、塔上部で耐風安定性を考慮した八角形断面を、塔基部では矩形断面を採用している。補剛桁断面は逆台形 3 室箱型断面となっている。ケーブルは一面吊り 11 段ハープ型マルチケーブルシステムを採用し、塔基部と補剛桁は剛結構造となっている。

解析を行うにあたり使用したモデルと主要な節点番号を図-1に示す。解析モデルは、節点数 53 個、要素数 74 個の立体骨組構造である。なお本解析モデルは札内清柳大橋主橋梁部上部構造のみを考慮しており、側橋梁との連成は考慮していないモデルとなっている。以下に上部構造の支持条件を示す。節点番号 15 番はピボット沓で橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直方向 3 方向の変位を拘束している。節点番号 1 番、34 番は水平沓で橋軸直角方向の変位を拘束している。前述の 3 沓の両側はペンデル沓により鉛直方向の変位が拘束されている。解析に使用した鋼材の諸元は、ヤング係数 $E=2.06 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 、単位体積重量 76.93 kN/m^3 、また、ケーブル、補剛桁、主塔の断面諸元を表-1に示す。

本研究では固有値を求める解析手法として、実対称マトリックスの標準的な固有値問題の非常に優れた解法の一つである Householder 法を用いる。なお解析には、立体骨組構造物の非線形動的解析プログラムである DYNA2E を用いる。

3. 固有振動解析結果

3.1 固有振動モード

解析モデルの固有振動解析から得られた 1 次から 8 次までの固有振動モードを図-2に示す。全体のモード形状について検討を行い、鉛直曲げ振動、水平曲げ振動について考察する。

鉛直曲げ振動は 1 次、3 次、4 次、6 次、7 次モードに現れている。1 次モードを見ると、補剛桁では長支間部の振幅が短支間部に比べて大きく現れ、左右非対称のモード形状となっていることがわかる。また塔にも若干振動が見られ、鉛直 1 次モードについては補剛桁と塔とが連成していることが確認できる。3 次モードについては短支間部の振幅が卓越し、固有振動モードの腹が 3 個形成されていることが認められる。

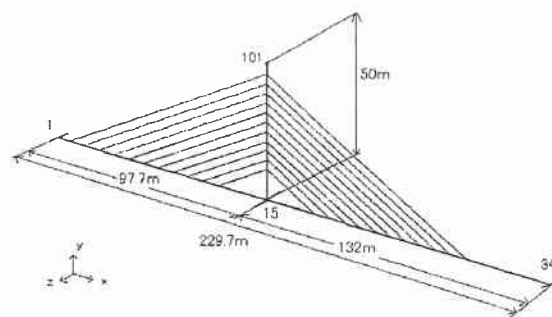


図-1 解析モデル

表-1 断面諸元

	補剛桁	塔	ケーブル
$A(\text{m}^2)$	1.0008~1.2134	0.4124~0.8281	0.00766~0.01530
$I_y(\text{m}^4)$	49.4183~52.1903	0.2823~0.8541	*
$I_z(\text{m}^4)$	1.1797~1.4546	0.4193~1.4802	*
$J(\text{m}^4)$	1.9977~2.2235	0.6653~1.3339	*
$N(\text{kN})$	*	*	708.54~3581.9

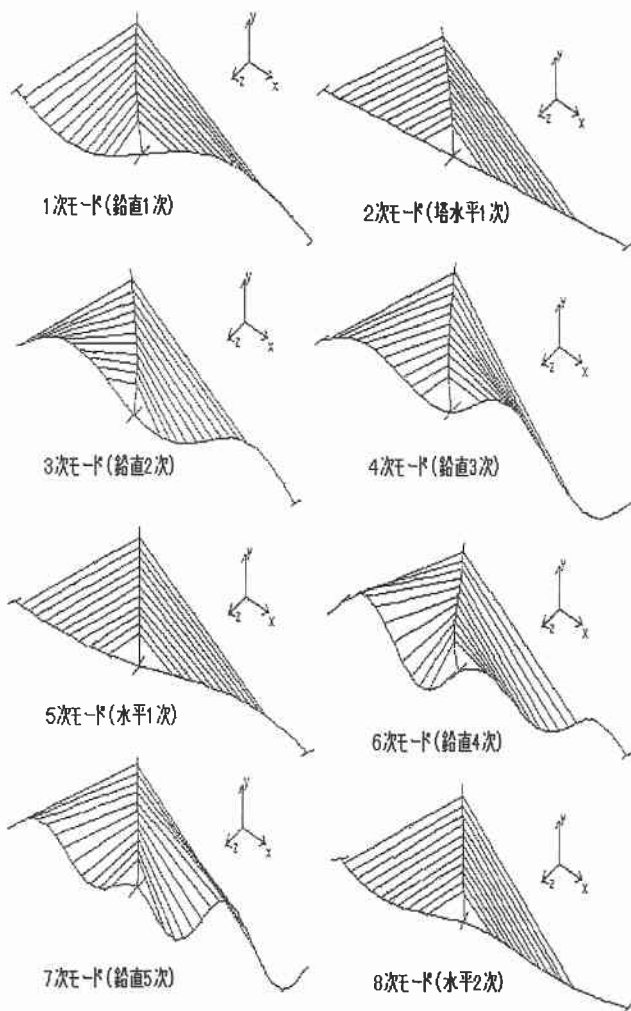


図-2 固有振動モード

水平曲げ振動は2次、5次、8次モードに現れている。2次モードは、塔が面外方向に独立した形で大きく曲げ振動していることがわかる。一方、5次、8次モードは補剛桁が面外方向に大きく曲げ変形し、塔とは独立した水平曲げ振動である。つまり、水平曲げ振動では、塔と補剛桁とが独立した形で曲げ振動を生じることが理解できる。

3.2 固有振動数と有効質量比

固有振動数と有効質量比を表-2に示す。1次モードでは鉛直方向の有効質量比が4.73%、橋軸方向の有効質量比が0.15%という結果になった。これはモード形状は鉛直曲げ振動であるが橋軸方向にも振動することを表している。3次モードでは鉛直方向の有効質量比が55.83%と支配的なモードであることを示している。また、橋軸直角方向の有効質量比は5次モードで18.35%、8次モードで50.63%と支配的なモードであると考えられる。

本橋の初期剛性および設計解析モデルの妥当性を確認するために、現場振動実験を実施した。実験により得られた固有振動数を表-3にまとめて示す。鉛直1次モードの実測値(0.57Hz)は解析値(0.466Hz)より、やや大きな固有振動数の値を与えている。この原因としては、側橋梁部との連成が固有振動数に大きな影響を及ぼしたものと考えられる。また、塔水平1次および鉛直2次モードにおいては、実験値と解析値とがほぼ一致しており、設計時における本解析モデルの妥当性が確認できたものと考えられる。

表-2 固有振動数と有効質量比

固有モード	振動数 (Hz)	周期 (sec)	有効質量比			モード形状
			X	Y	Z	
1	0.466	2.145	0.0015	0.0473	0	鉛直1次
2	0.778	1.286	0	0	0.0502	塔水平1次
3	1.008	0.992	0.0001	0.5583	0	鉛直2次
4	1.449	0.690	0	0.1153	0	鉛直3次
5	2.058	0.486	0	0	0.1835	水平1次
6	2.380	0.420	0	0.0045	0	鉛直4次
7	2.917	0.343	0	0.0551	0	鉛直5次
8	4.066	0.246	0	0	0.5063	水平2次
9	4.249	0.235	0	0	0.0146	塔水平2次
10	4.577	0.219	0.0054	0.0058	0	鉛直6次
11	5.236	0.191	0.005	0.0405	0	鉛直7次
12	5.499	0.182	0.0687	0.0019	0	塔橋軸1次
13	6.992	0.143	0.0171	0.0219	0	鉛直8次
14	7.655	0.131	0.0322	0.0086	0	塔橋軸2次
15	7.953	0.126	0	0	0.0235	水平3次
16	8.756	0.114	0.0037	0.0022	0	鉛直9次
17	9.322	0.107	0.3732	0.0001	0	橋軸1次
18	10.268	0.097	0	0.0005	0	鉛直10次
19	11.211	0.089	0	0	0.0054	塔水平3次
20	12.048	0.083	0.3237	0.0001	0	橋軸2次

表-3 固有振動数の実測値

モード形状	実測値 (Hz)	解析値 (Hz)	実測値/解析値
鉛直1次	0.57	0.466	1.22
塔水平1次	0.81	0.778	1.04
鉛直2次	1.09	1.008	1.08
ねじり1次	1.27	*	*

4. あとがき

本研究では非対称支間長を有する一面吊り斜張橋の固有振動解析を行い固有振動モード、固有振動数、有効質量比を求め、解析結果に考察を加えた。一面吊り斜張橋の鉛直曲げ振動は、塔、補剛桁およびケーブルが連成した面内曲げ振動である。一方、水平曲げ振動は塔と補剛桁とがそれぞれ独立した面外曲げ振動となる。

今後は本研究により構築された解析モデルを用いて、非線形地震応答解析を行い非対称支間長を有する一面吊り斜張橋における地震応答特性、支承条件による影響について検討する。

〈参考文献〉

- 1) 林川俊郎：橋梁工学、朝倉書店、2000.
- 2) 土木学会：鋼斜張橋－技術とその変遷－、土木学会、1991.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、1996.
- 4) 吉澤努・川神雅秀：大規模地震動に対する鋼斜張橋全体系の非線形動的解析、第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 pp.257-260、1998.
- 5) 大塚久哲・堂上幸男・山平喜一郎・加藤一郎・藤野明義：鋼斜張橋（荒津大橋）の非線形地震応答解析とモデル化の検討、第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 pp.155 - 162、1998.