

PC橋における張力測定への高次振動法の適用について

神鋼鋼線工業(株)	工修	○河村 睦
神鋼鋼線工業(株) 正会員		山家 芳大
大成建設(株)	工修	奥村 敏弘
(株)神戸製鋼所	工修	山極 伊知郎

1. はじめに

近年、土木構造物の長寿命化の要求が高まり、吊橋や斜張橋などの吊構造物や、プレストレストコンクリート（以下、PCと称す）を用いた構造物などにおいて、設計値を満足するケーブル緊張力が施工時もしくは供用時に導入されているか確認する手法が求められている。

従来、ケーブル張力の計測手法として、ケーブルの曲げ振動の振動方程式から導いた振動法の実用式¹⁾が広く使用されている。この手法においては低次（1次または2次）の固有振動数を使用し、また曲げ剛性が既知であるということ为前提としているが、曲げ剛性はケーブルの種類や張力状態などによって異なるため、事前実験と現地計測とでは条件が異なることにより張力算定に誤差が生じる。

これらの問題を解決するために、低次から高次までの複数の固有振動数とモード次数の関係式から直接、張力と曲げ剛性を同時に求める手法（以下、高次振動法と称す）が提案されており、吊橋や斜張橋などの吊構造物では実用化されている。

しかし、PC橋の外ケーブルやエクストラドーズド橋の斜材などにおいて高次振動法を適用する場合、以下の点が懸念された。

- (1) 吊橋や斜張橋などに比べてケーブル長が短く、測定精度に影響をおよぼす可能性がある。
- (2) ケーブルが偏向部に接触しており、張力算出時の境界条件、ケーブル長の設定が不明確である。

そこで、室内実験および実橋で確認試験を実施し、本手法の実用性を検証した。本報ではその内容を報告する。

2. 張力および曲げ剛性同時算定

ケーブルの曲げ振動の振動方程式から、両端単純支持の場合には、固有振動数 f_i とモード次数 i との間に式(1)の関係式が得られる²⁾³⁾。

$$f_i^2 = \frac{\pi EI}{4\rho AL^4} i^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} i^2 \quad (1)$$

ここに、 EI は曲げ剛性、 T は張力、 ρ は密度、 A は断面積、 L はケーブル長を表す。

式(1)は i に関する多項式となっており、測定で得られた低次から高次までの複数の固有振動数とモード次数の関係より最小二乗法で係数を同定すれば、曲げ剛性 EI と張力 T とを同時に求めることができる（図-1参照）。本手法によれば事前の曲げ剛性の測定は不要であり、既設構造物のケーブル張力も容易に測定することができる。図-2に本手法による測定フローを示す。

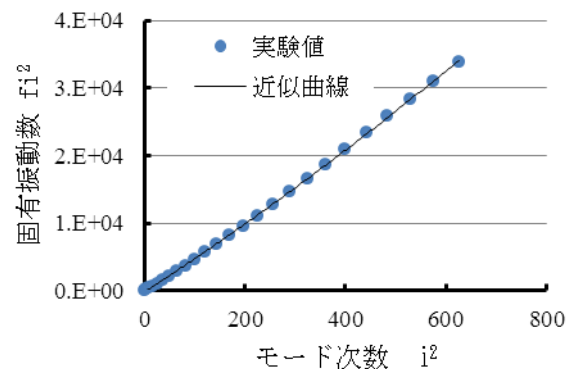


図-1 固有振動数とモード次数の関係

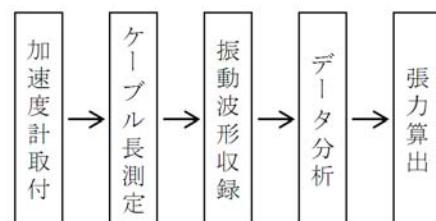


図-2 測定フロー

3. 室内実験

3. 1 実験方法

実験条件を表-1に示す。実験は、引張試験機でケーブルに張力を与えた状態でケーブルを加振し、定着部から1.5m、2m点の位置に取付けた加速度計で振動波形を計測し、周波数分析を行うことにより固有振動数を測定した。(図-3)

振動計測点を2点設けている理由は、各振動モードにおける波形の節位置と加速度計取付位置とが合致し、固有振動数のピークが消失することを避けるためである。ケーブル両端部はくさび式定着具を用い、ケーブル定着長は約10mとした。ケーブルの加振はセミプレファブ型の垂鉛めっきマルチケーブルでは、一括被覆されたポリエチレン被覆(写真-1左)を、被覆のない現場組立型ケーブルでは、12本のストランドを一様に加振するため、ケーブルを一体化させた締結リング(写真-1右)をハンマーによって打撃することによって行った。また、車両通行時を模擬した常時振動として試験機のクロスヘッド部を揺らすことで振動を与える間接加振についても測定を行った。

3. 2 実験結果

図-4に測定結果を示す。横軸は試験機荷重を、縦軸は高次振動法による測定値を試験機荷重で除した値を百分率で示す。なお、測定値は境界条件を単純支持と見なして算出した。図-4によれば試験機荷重が大きくなるにつれて、試験機荷重に対する測定値の割合が小さくなる傾向が見られたが、±5%以内の算定精度を有していることが確認できた。また、間接加振による測定結果もハンマー加振と比べて同等の精度であり、現場組立型ケーブルにおいてもケーブルを一体化することで、セミプレファブ型ケーブルと同等の測定精度を有することが確認できた。

4. 実橋確認実験

4. 1 測定対象

高次振動法の実橋での適用性を確認するために、紀北東道路重谷川高架橋(仮称)の桁内外ケーブルとして配置された表-2に示すセミプレファブ型ケーブル(アンボンドマルチケーブル)を用いて測定を実施した。橋梁全体図を図-5に、測定位置を図-6に、測定条件を表-3に示す。測定は表-3に示すとおり、中央径間の02、03ケーブルについては緊張作業時および緊張から約3ヶ月経過した時点で測定し、側径間を含む04ケーブルについては全ケーブル緊張後に測定した。

表-1 実験条件

タイプ	12S15.2 (引張荷重 $P_u=3132\text{kN}$)	
ケーブル	セミプレファブ型 (垂鉛めっきマルチ)	現場組立型 (裸マルチ)
単位重量 kg/m	15.7	13.2
設定張力 kN	1000, 1300, 1600, 1900, 2200	2000

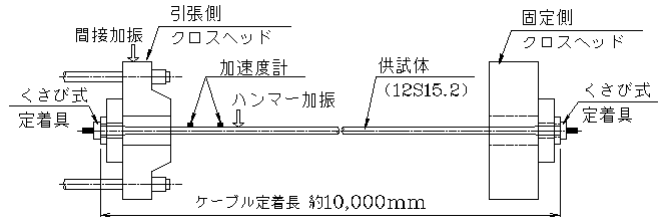


図-3 試験概要図

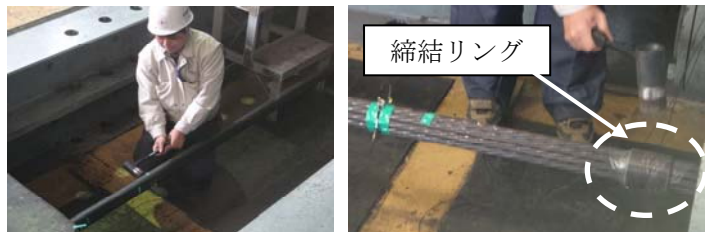


写真-1 試験状況

左) セミプレファブ型 右) 現場組立型

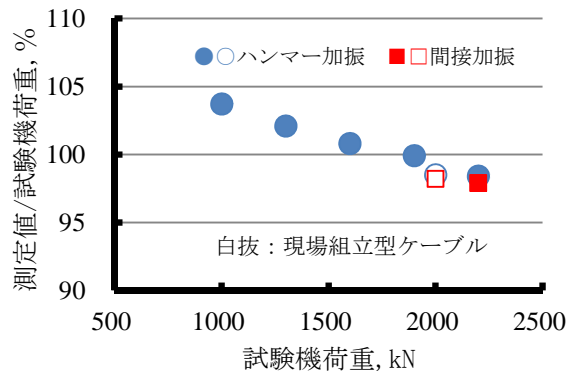


図-4 測定結果

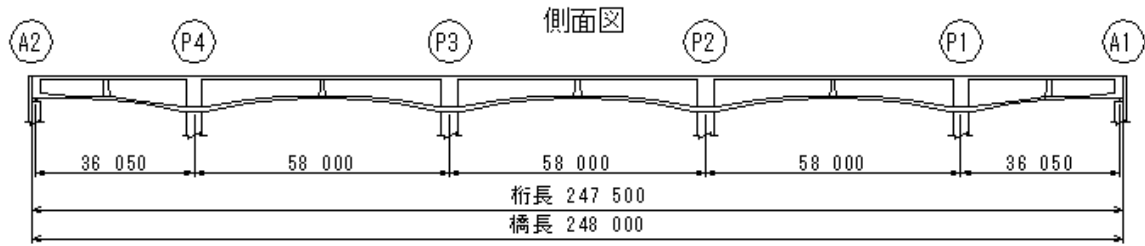
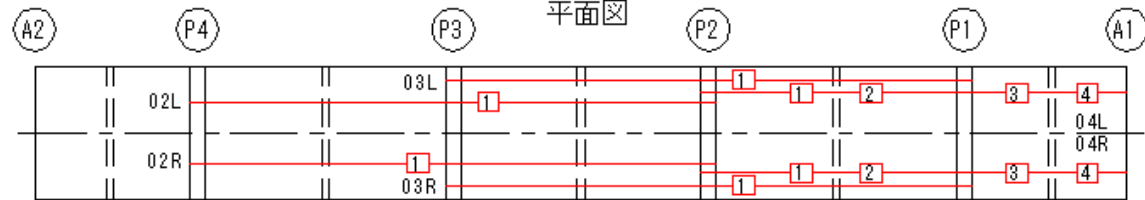


図-5 橋梁全体図



図中の文字はケーブルNo.を、 内の数値は測定位置を示す。

図-6 測定位置

表-2 ケーブル仕様

タイプ	19S15.2
引張荷重	4,959 kN
単位重量	24.0 kg/m

表-3 測定条件

ケーブル.No	設定圧力
02L, R	5, 10, 20, 30, 40, 45MPa, 最終緊張圧, 定着直後
03L, R	3ヶ月後
04L, R	全ケーブル緊張完了後

4. 2 測定方法

振動波形は各測定区間に2つの加速度計を取付け、所定荷重到達時にケーブルを加振して測定した。ケーブル長は各測定区間において偏向部とケーブルが接している点までの長さを計測し、偏向部間のケーブル支持長さとした(図-7参照)。張力は、2次~6次の固有振動数を用いて式(1)より算出した。比較対象となる緊張荷重は油圧ジャッキの油圧を圧力変換器で計測し、緊張管理結果(緊張荷重と伸びのデータ)を基に各測定区間において推定される張力を算出し、この値を推定値とした。

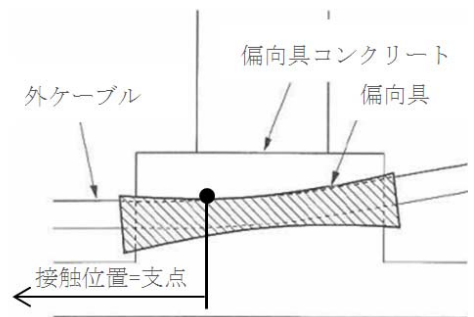


図-7 ケーブル長の設定

4. 3 実験結果

図-8に振動応答の周波数分析結果の例を示す。図中の数字が固有振動数のモード次数である。この図に示すように高次にわたり、固有振動数が規則的に励起されており、算出に用いる固有振動数の判別は容易であった。表-4に02, 03ケーブルにおける最終緊張荷重時および定着完了直後の測定結果を示す。推定値に対して5%以内の測定精度を有し、最終緊張時および定着完了直後において測定値の変動量は+0.1%~-0.7%と小さかった。測定区間はセットロスがおよばない区間であり、本手法により荷重低下が生じていないことが確認できた。図-9に02, 03ケーブルの3ヶ月経過後に測定した結果を示す。横軸は測定位置を、縦軸は高次振動法による測定値を推定値で除したものを百分率で示している。測定値は推定値に対して100.5%~105.6%の値と、定着完了直後の結果に比べて少し高く評価された。これは評価に用いた推定値がコンクリートのクリープ、乾燥収縮、PC鋼材のリラクセーション等による荷重低下を安全側に設定されて

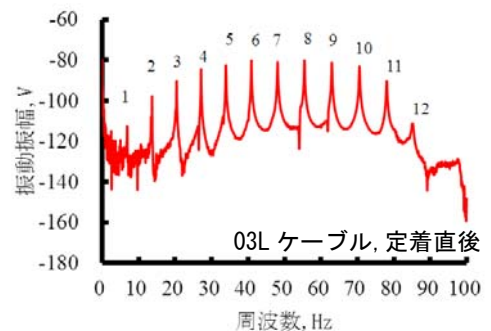


図-8 周波数分析結果例

図-9に02, 03ケーブルの3ヶ月経過後に測定した結果を示す。横軸は測定位置を、縦軸は高次振動法による測定値を推定値で除したものを百分率で示している。測定値は推定値に対して100.5%~105.6%の値と、定着完了直後の結果に比べて少し高く評価された。これは評価に用いた推定値がコンクリートのクリープ、乾燥収縮、PC鋼材のリラクセーション等による荷重低下を安全側に設定されて

いたためと考えられる。図-10に04ケーブルの測定結果を示す。横軸は測定位置を、縦軸は高次振動法による測定値を推定値で除したものを百分率で示す。P2からA1までの4区間のうちP2に近い3区間については±5%の精度であった。しかし、04L-2ケーブルのA1に近い区間においては推定値に対して精度5%を超える結果であった。これは04L-2ケーブルにおいて、支持点に設定したケーブルと偏向管の接触位置がケーブル偏向方向でなかったため、偏向管から受ける反力が小さかったことが原因であると考えられる。ケーブル偏向方向の接触位置を支持点に設定して再測定を行った結果、推定値に対して105.1%の結果を得た。

表-4 緊張時の測定結果 単位：%

Cable.No.	最終緊張荷重時 A	定着完了直後 B	差異 A-B
02R	100.2	100.2	0.0
02R	104.3	104.4	-0.1
03R	104.7	104.3	+0.4
03L	104.9	104.2	+0.7

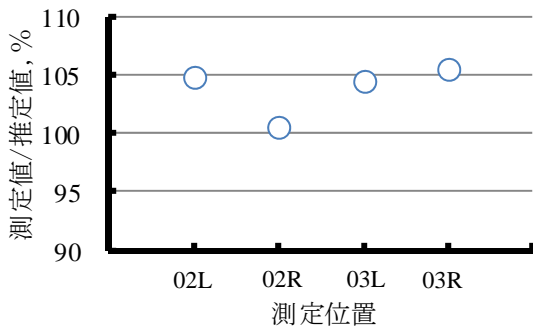


図-9 経過観察結果

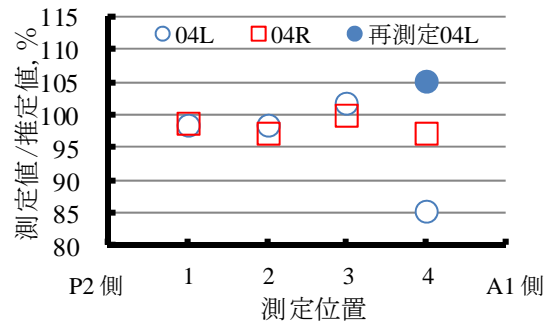


図-10 04ケーブル測定結果

5. まとめ

高次振動法の桁内外ケーブルへの適用を試み、以下のことを明らかにした。

- 1) 室内実験において各種ケーブルを用いて高次振動法の適用性を検討し、±5%以内の精度で測定可能であることを確認した。また車両の交通を模擬した間接振動でもハンマー加振と同等の測定精度を有することが確認された。
- 2) 実橋において偏向部で曲げ配置されたケーブルは、境界条件を単純支持、ケーブル長を各偏向部とケーブルの偏向方向の接触点間と見なして張力を算定した結果、推定される張力に対して室内実験と同等の±5%程度の精度を有しており、実用上問題ないことを確認した。

6. おわりに

本手法は現場において張力と曲げ剛性を同時に推定することができるため、事前に曲げ剛性を把握していないケーブルについても、実用上十分な精度にて張力算出が可能であり、維持管理のニーズに応じた診断技術として有効活用できると考える。

最後に実橋確認実験に対してご協力を頂いた近畿地方整備局殿に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 新家徹, 広中邦汎, 頭井洋, 西村春久: 振動法によるケーブル張力の实用算定式について, 土木学会論文報告集, 第294号 (1980) P25
- 2) 山極伊知郎, 宇津野秀夫, 菅野直樹, 杉井謙一: 振動法によるケーブル曲げ剛性と張力の同時推定法, 構造工学論文集, Vol142A, 3, 1996, P547-554
- 3) 杉井謙一, 山極伊知郎: ハンマーでケーブル張力を測る, 土木学会誌, Vol. 83, 11, 1998, P10