

ニールセンローゼ桁橋のケーブル張力調整方法について

日本橋梁建設土木施工管理技士会

三井造船鉄構エンジニアリング株式会社

設計担当

現場担当

高田 孝史朗[○]

埜 博 道

1. はじめに

主要地方道大田杵築線は旧大田村と杵築市中心部を結ぶ重要な路線であるが、幅員狭小、線形不良、急勾配により交通の利便性に乏しく地域間交流に支障となっている。これらを解消し、県北地域の活性化を図るための道路改良工事の一部として、石山ダムを跨ぐ下路式ニールセンローゼ桁橋の製作・架設工事を実施した（図-1 参照）。

本稿では、ニールセンローゼ桁橋のケーブル張力管理に着目し、その調整方法を紹介する。

工事概要

- (1) 工 事 名：平成25年度交付地改別第1号
道路改良工事
- (2) 発 注 者：大分県別府土木事務所
- (3) 工事場所：大分県杵築市大字溝井
- (4) 工 期：平成25年12月12日～
平成29年3月15日



図-1 完成写真

2. 現場における問題点

ニールセンローゼ桁橋は、アーチ部材から吊り下ろされた斜材ケーブルにて補剛桁を弾性支持することで構造系が成立している。

設計で想定する構造系を再現するためには、全ての斜材ケーブルで、設定する誤差の範囲内での張力導入が必要条件となる。また、同時に、完成時の路面線形についても計画値を再現するためには、補剛桁部の出来形も許容される誤差の範囲で管理する必要がある。

ニールセンローゼ桁橋は高次の不静定構造物であるため、ケーブル張力、補剛桁の出来形について同時に許容される誤差の範囲で調整するためにはケーブルに導入する張力を精度よく計測でき、それぞれのケーブルに着目した張力と変位の影響値を算出し、それぞれの誤差が最小になるようにケーブル張力の調整を行う必要がある。

3. 工夫・改善点と適用結果

問題となるケーブル張力調整には、社内で開発したケーブル張力調整システムを使用した。このシステムを使用することで、ケーブル張力調整時の各ケーブルの張力と補剛桁変位の影響値が算出でき、全体として張力と出来形について、最小の誤差となる導入張力（シム量）を求めることができた。この結果を用いて張力調整を実施すること

で効率的な調整作業が可能となった。

なお、ケーブル張力の計測は、過去の同種の工事を参考とし、実績も多く、計測も比較的容易な振動法を採用した。

以降に具体的な施工の流れを示す。

3.1 斜材ケーブルの張力管理

3.1.1 張力測定方法

本工事における斜材ケーブルの張力計測方法はケーブルの固有振動数から理論算定式によって導入張力を算定する振動法を採用した。

振動法を用いる際、理論算定式から求めた張力と実際の導入張力には差異が生じることがあり、その差異を埋めるために理論算定式を補正する必要があり、この補正係数を確定する作業をキャリブレーションという。

適用する理論算定式は他橋でも採用実績の多い新家式を採用した。理論算定式を式-1（サグがほとんどない、対称1次振動を対象）に示す。

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{4w}{g} (f_1 \ell)^2 \left\{ 1 - 2.20 \frac{C}{f_1} - 0.550 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right\} \quad (17 \leq \xi) \\ T &= \frac{4w}{g} (f_1 \ell)^2 \left\{ 0.865 - 11.6 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right\} \quad (6 \leq \xi \leq 17) \\ T &= \frac{4w}{g} (f_1 \ell)^2 \left\{ 0.828 - 10.5 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right\} \quad (0 \leq \xi \leq 6) \end{aligned} \right\} \text{式-1}$$

ここに、 $\xi = \sqrt{T/EI} \cdot \ell$, $C = \sqrt{EIg/w\ell^4}$, T:張力, w:単位質量
f1:固有振動数, ℓ :ケーブル弦長, g:重力加速度

本工事で使用したケーブルの理論算定式で必要となる計算因子は表-1に示す項目となる。

なお、ケーブルは合計60本あるが、対称性を考慮して全体の1/4のケーブルを対象にキャリブレーションを行った。

3.1.2 導入張力の規格値

振動法に伴う張力計測誤差の規格値については明確な規格根拠及び基準がないため、下記の誤差を考慮して規格値を設定することとした。

- a) 死荷重、部材剛性の仮定による誤差や解析誤差等の設計上発生する誤差
- b) アーチ構造物や斜材ケーブルの製作架設誤差

表-1 ケーブル計算因子

項目	記号	単位	数値	備考
単位質量	w	kg/m	16.64	カタログ値
ヤング係数	E	kN/mm ²	191	〃
断面積	A	mm ²	1765.1	〃
断面2次モーメント	I	mm ⁴	424000	断面固着

表-2 張力管理基準値

張力範囲 (kN)	a)設計 (%)	b)製作架設 (%)	c)温度 (%)	d)計測 (%)	ϵ_{AMIN} (%)
100-199	1.30	10.00	11.77	2.00	25.07
200-299	1.30	10.00	5.88	1.00	18.18
300-399	1.30	10.00	3.92	0.67	15.89
400-500	1.30	10.00	2.94	0.50	14.74

c) 部材温度による誤差

d) 計測誤差

理論上の各張力範囲における最小の張力管理値はa)～d)を合計した値となる。設定した張力管理基準値を表-2に示す。

各段階におけるケーブルに発生する張力と表-2に示す ϵ_{AMIN} の関係から導入張力の規格値は以下に示す範囲とした。

- i) 架設完了後計測 (第1回) 規格値 $\pm 30\%$
- ii) 床版地覆後計測 (第2回) 規格値 $\pm 20\%$
- iii) 高欄設置後計測 (第3回) 規格値 $\pm 20\%$

3.1.3 キャリブレーション

斜材ケーブルの張力調整は温度による計測誤差を極力排除するため、桁温度と斜材ケーブルが一定となる夜間に行った。

実測値のキャリブレーション行うためにまずは、理論算定式を用いて固有振動数と張力の関係をグラフ化した。その後、測定対象ケーブルの張力と固有振動数を測定し、理論値と比較ができるようグラフにプロットし、理論式の補正を行った。

ケーブル張力の測定は30t油圧ジャッキ2台+手押しポンプ1台にデジタル圧力メーターを取り付けて1kNまで読み取って精度を上げた(図-2、図-3、図-4参照)。また、固有振動数測定は振動計(バイブレーションアナライザー)を使用した。理論算定式の曲線グラフにプロットした実測値、補正前・補正後を図-5に示す(代表例



図-2 ケーブル張力調整



図-3 デジタル圧力メーター



図-4 固有振動数測定

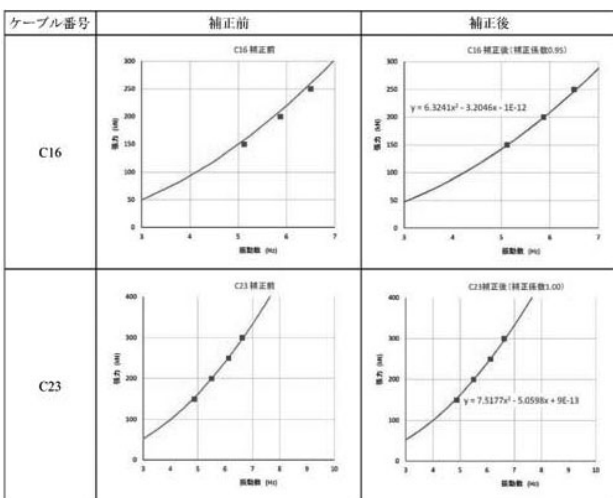


図-5 理論算定式を用いた張力と固有振動数の関係

表-3 振動数からの張力換算式

グループ	該当ケーブル	抽出モード	換算式
1	C15,C16	3次モード	$6.3241f^2 - 3.2046f$
2	C14,C17	3次モード	$5.1270f^2 - 2.8672f$
3	C13,C18	3次モード	$7.0702f^2 - 3.5419f$
4	C12,C19	3次モード	$5.5396f^2 - 3.5419f$
5	C11,C20	3次モード	$7.0351f^2 - 3.5419f$
6	C10,C21	3次モード	$3.9174f^2 - 3.0359f$
7	C9,C22	4次モード	$3.3583f^2 - 2.5299f$
8	C8,C23	2次モード	$7.5177f^2 - 5.0598f$
9	C7,C24	3次モード	$4.9916f^2 - 3.3732f$
10	C6,C25	2次モード	$5.5122f^2 - 5.3128f$
11	C5,C26	2次モード	$8.2197f^2 - 5.0598f$
12	C4,C27	2次モード	$3.1697f^2 - 5.0598f$
13	C3,C28	2次モード	$4.5068f^2 - 4.8068f$
14	C2,C29	1次モード	$5.8325f^2 - 9.6870f - 16.321$
15	C1,C30	1次モード	$1.9896f^2 - 5.4004f - 89.512$

注) ケーブルNo. は図-6、図-7を参照のこと

としてC16,C23をピックアップした。C16は補正ありの結果でC23は補正なしの結果である)。

キャリブレーションの結果より算定した振動数からの張力換算式を表-3に示す。

3.1.4 張力調整

張力調整は架設完了時点では誤差が大きく調整という段階ではなかったため、2夜間かけてジャッキメーターを確認しながら60本全てで設計張力を導入した。本橋は不静定構造物であるため、あるケーブルに張力を導入すると、他のケーブルの張力が変動することになる。従って全ケーブルに張力を導入後、改めてケーブル張力の計測を実施し、その後張力調整を行った。具体的には、測定結果を張力調整解析ソフトに入力し、標準温度の値に補正して、設計値との誤差を調整するシム量を算出した。表-4、図-6に解析データの一部を示す。

また、同時に補剛桁キャンバーを測定した。結果は規格値には問題なく入っており、ケーブルを調整することによる動きも微量で、ケーブル調整がキャンバーに与える影響はみられなかった。

解析ソフトを使用することで、シム量調整後の残留誤差が分かり調整量をシュミレーションすることができた。その結果、ケーブル調整回数を大幅に減らすことができ、当初2週間予定していた張力調整期間を1週間に短縮することができた。

第1回目(架設完了時)の張力調整で誤差を±

表-4 張力調整解析表

<< シム応答結果 >>

大田杵築入力DATA01 (縦桁架設系)

1/2

計測01

ステップ名称:01 計測日時:2016年07月19日 00時00分 気温: 26.0℃ 標準温度: 20.0℃

部材温度℃ 補剛桁 上面 (26.0, 26.0) 下面 (26.0, 26.0)

アーチリブ 上面 (26.0, 26.0) 下面 (26.0, 26.0)

ケーブル (26.0)

重み係数 キャンバー(0.000) 張力(0.000) シム量(0.000)

第1主構 張力調整結果 (単位:kN)

各点	計画値	補正值	誤差	調整値	残留誤差	許容誤差	シム量
LC1	136.150	212.088	75.938	-56.713	19.225	27.230	-1.500
LC2	134.010	136.131	-2.121	16.158	18.279	26.802	0.000
LC3	125.270	151.859	26.589	-9.562	17.026	25.054	-1.000
LC4	142.300	157.116	14.816	-3.923	18.739	28.460	0.000
LC5	113.920	118.922	5.002	2.882	7.884	22.784	0.000
LC6	171.860	190.024	18.164	0.594	18.759	34.372	0.000
LC7	91.770	85.968	-5.802	0.122	-5.679	18.354	0.000
LC8	195.810	190.042	-5.768	-0.260	-6.028	39.162	0.000
LC9	69.640	71.033	1.393	-0.166	1.227	13.928	0.000
LC10	199.430	218.998	19.568	-0.497	19.071	39.886	0.000
LC11	62.850	63.022	0.172	0.160	0.332	12.570	0.000
LC12	170.280	193.991	23.711	-0.320	23.391	34.056	0.000
LC13	98.400	105.005	6.605	0.337	6.942	19.680	0.000
LC14	113.310	95.993	-17.317	0.097	-17.221	22.662	0.000
LC15	136.940	126.994	-9.946	-1.285	-11.231	27.388	0.000
LC16	136.950	126.937	-10.013	0.567	-9.446	27.390	0.000
LC17	113.300	138.972	25.672	-7.696	17.976	22.660	0.000
LC18	98.400	120.000	21.600	2.480	24.080	19.680	0.000
LC19	170.260	108.036	-62.224	25.118	-37.106	34.052	3.000
LC20	62.890	105.024	42.134	-19.656	22.477	12.578	-2.500
LC21	199.350	204.040	4.690	-5.470	-0.780	39.870	0.000
LC22	69.730	52.959	-16.771	5.523	-11.248	13.946	0.000
LC23	195.570	218.992	23.422	-1.282	22.140	39.114	0.000
LC24	91.860	107.954	16.094	0.561	16.655	18.372	0.000
LC25	171.450	174.053	2.603	0.483	3.086	34.290	0.000
LC26	114.290	118.877	4.588	-0.168	4.420	22.858	0.000
LC27	142.380	145.067	2.687	0.762	3.449	28.476	0.000
LC28	126.660	151.874	25.214	-0.395	24.819	25.332	0.000
LC29	135.950	113.174	-22.776	0.358	-22.418	27.190	0.000
LC30	126.560	102.050	-24.510	-0.176	-24.686	25.312	0.000

<< シム応答結果 >>

大田杵築入力DATA01 (縦桁架設系)

2/2

第1主構 張力調整結果

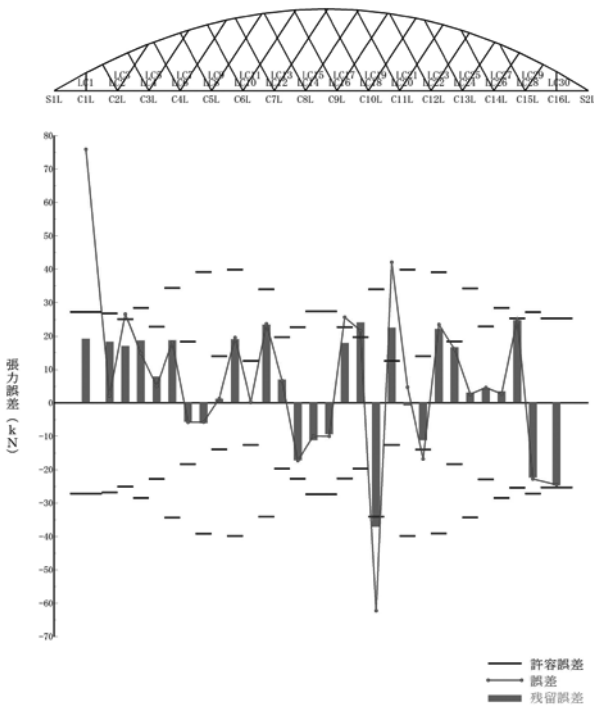


図-6 張力解析シュミレーション

<< 計測データ結果 >>

大田杵築入力DATA03 (縦桁完成系)

2/2

第1主構 張力計測結果

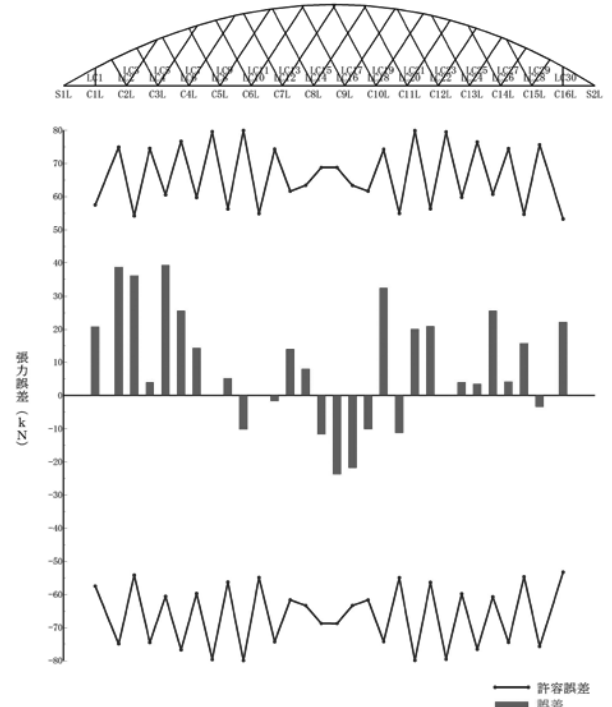


図-7 第3回張力計測結果

20%以内にするこゝで、第2回目(床版・地覆後)、第3回目(高欄設置後)はほぼ調整することなくケーブル張力調整を完了することができた。第3回目張力計測時の張力誤差量を図-7に示す。

4. おわりに

ここでは高次の不静定構造物であるニールセンローゼ桁橋のケーブル張力調整を効率的かつ精度よく実施できる方法の一例を示した。本手法が今後同種の工事における参考となれば幸いである。

最後に、大分県別府土木事務所の関係各位には適切な助言、協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。