

(12) 経時特性を考慮した斜張橋 ケーブルの最適張力調整

OPTIMUM CABLE TENSION ADJUSTMENT OF CABLE-STAYED BRIDGE CONSIDERING TIME EFFECTS

渡邊 英一* 古田 均** 杉浦 邦征*** 原 諭****
Eiichi WATANABE, Hitoshi FURUTA, Kunitomo SUGIURA, Satoshi HARA

The objective of this study is to develop an analysis method of estimating the time-dependent behavior of cable-stayed bridges. In the analysis, both the experimental results obtained by the creep and/or relaxation tests and the numerical results obtained by the FEM analysis are utilized. Assuming that cables are modeled as visco-elastic bodies, the creep and relaxation analysis is performed with the aid of the Laplace transformation technique. Based on these results, an adequate shim adjustment is determined using the sacrificing trade-off method. Several numerical examples are presented to demonstrate the efficiency of the method developed here.

Key Words : cable-stayed bridge, cable tension adjustment,
creep, relaxation, sacrificing trade-off method

1. まえがき

本研究では、実物大ケーブルを用いたクリープ・リラクセーション試験から得られたケーブルの経時特性を考慮し、有限要素法を用いた数値解析を行い、架設段階を考慮にいれた斜張橋の経時挙動解析を行う。その結果をもとにケーブル系橋梁の維持管理法の1つであるシム調整に着目し、その調整量を最適化手法を用いて求め、橋梁の維持管理に有用な情報を得る。

実際に橋梁に使用されるケーブルの経時特性を引張試験により決定し、そこで得られたパラメータを用いて斜張橋について数値解析を行う。解析方法としては時間依存挙動が認められるケーブルを線形粘弾性体と仮定する。次に対応原理を用いて有限要素法によりラプラス像空間における各架設段階での厳密解を求める。そして数値ラプラス逆変換を用いて各架設段階での現空間の解を求めた。

その経時挙動の結果をもとに、多目的の場合の最適化手法の1つである満足化トレードオフ法を用いてシムの最適調整本数、及び調整量を求めた。

最後に、架設中からのケーブル張力、キャンバーの変化をシム調整の最適化まで考慮してシュミレーションを行い実測値のあるものはそれと比較を行い、考察を加えた。

* Ph. D 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 ** 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科
*** Ph. D 京都大学助手 工学部土木工学科 **** 工修 (株)熊谷組 技術研究所

2. 解析方法

本方法は次に示すような3段階からなる。

- (1) 実物大ケーブルのクリープ・リラクセーション試験
- (2) 有限要素法による数値解析
- (3) 満足化トレードオフ法によるシム調整最適化

まずクリープ・リラクセーション試験は実物大ケーブルを用いて行うものとし、長期にわたってその経時挙動を観察することにした。そして、ケーブルを3要素モデルで表される線形粘弾性体であると仮定し、計測データからその粘弾性パラメータを同定することにより、斜張橋の主要部材であるケーブルの時間依存的特性を把握することを試みた¹⁾。

つぎに、この試験で得られたデータをもとに架設段階を考慮にいれて斜張橋の経時挙動に関する数値解析を行った²⁾。解析手法としては、ケーブルが斜張橋のクリープ・リラクセーション挙動の主要因であると考え、これを3要素モデルで表される線形粘弾性体であると仮定する。次に、有限要素法を適用し、E. H. Leeの提案した対応原理により、ラプラス像空間において各架設段階における主桁、タワーのつりあい式とケーブルのつりあい式を求め、両者をラプラス像空間で静的に合成し、斜張橋全体のつりあい式を作る。これは線形代数方程式であるから簡単かつ厳密に解ける。つぎに、この像空間では解は離散化したデータとして得られるため、数値ラプラス逆変換を適用することにより、各架設段階において現空間における解を求めることが必要となる。

各架設段階における解を求めるためには、初期段階において数値ラプラス逆変換を適用することにより現空間における解を求めればよい。そして初期の段階における現空間の解が求まれば、各架設段階間の増分を合成することで、それ以降の架設段階における解も逐次求められることになる。詳しい手法は文献2)によられたい。

そして、その解析をもとにしてケーブルのシム調整によるケーブル張力、キャンバーの調整をシミュレーションする。この調整の場合、ケーブルのシム調整量の減少よりもケーブルの調整本数の減少を行うことで維持管理作業の低減が行われる。そこで、ケーブル張力、キャンバーに関して一定の精度を保ちつつ調整本数の減少を目的として最適化を行った。ここで最適化の手法として満足化トレードオフ法を採用した³⁾。その理由は、最適化の目的が調整誤差の減少とケーブル本数の減少であるため一度に2つの目的を持って最適化を行わなくてはならないため、多目的の最適化手法を採用する必要がある、この手法が決定者に制約条件決定に対する自由度を与えるため、実状にあった最適化を行うことができるためである。

満足化トレードオフ法は、最適化における理想の状態を表す理想点、目的達成に対する許容値を表す希求水準を用いることで、各目的に対する重みを導入し、様々な目的を同一レベルで考えることができる。そして、目的を同一レベルにした後、Max-Min問題を解くことにより最適化が行われる。

つぎに、最適シム調整への適用であるが、今回は目的として、桁変位の調整誤差、ケーブル張力の調整誤差を考慮することとし、さらにシム調整量も目的として含めることとした。また制約条件としてシム調整量の上下限値を与えた。調整誤差の求め方については、まず、無調整の場合の経時挙動解析を行い、経時変化量を各ケーブル、節点について求める。これは調整すべき量となる。

つぎに、調整を行う時期に単位シム調整を行い、経時挙動解析を行う。この結果から経時挙動解析を考慮した単位シム調整の影響線成分を計算し、その合成により調整ケーブルと主桁変位およびケーブル張力の影響線マトリックスを作成する。このマトリックスに調整量をかけるとシム調整による変化量が計算でき、これを無調整の場合の調整すべき量から引くと調整誤差が求まる。この誤差を目的として最適化を行うことにより、調整誤差の少ない解が求まることになる。さらに、調整本数の減少であるが、

これは調整量の少ないケーブルを無調整ケーブルとする条件で繰り返し最適化を行って減少した。このプロセスを図- 1に示す。

最後に、各架設段階において経時挙動解析を行った。さらに、今回用いたモデル橋については架設後のケーブル張力、キャンバーの実測データが得られているので解析結果との比較を行い、考察を行った。

3. 数値解析

数値解析には図- 2に示す斜張橋を用いた。数値解析は2つの段階に分けられ経時挙動予測と最適シム調整に分けられる。

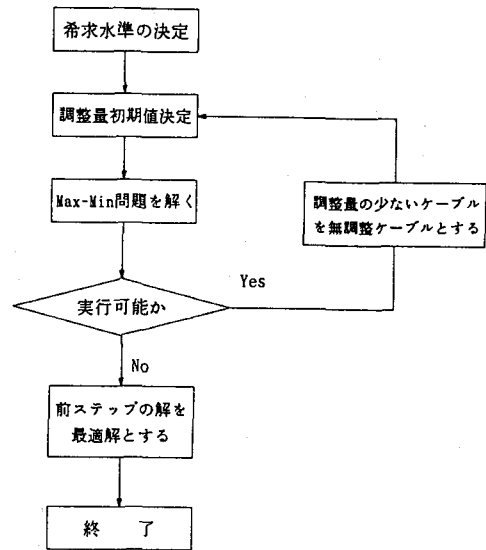


図- 1 最適化プロセス

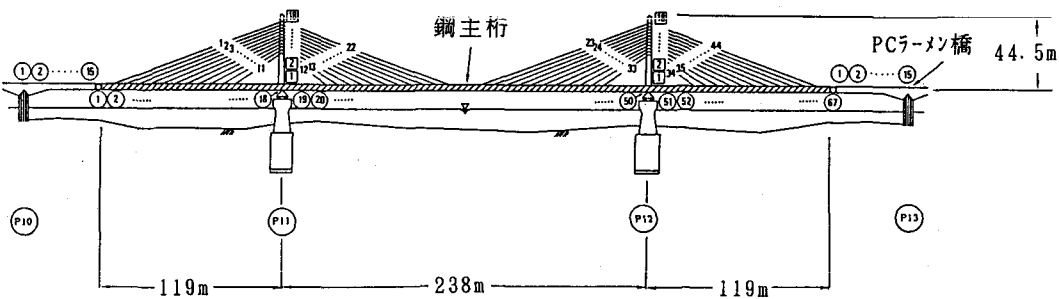


図- 2 斜張橋の概形

(1)経時挙動予測

経時挙動予測にはケーブルとしてNew-PWS、ソケットとしてHi-Amを使用して解析した。この際使用したケーブル・ソケットの粘弾性定数を、

表- 1に示す。また経時解析結果をケーブル11について図- 3、節点34について図- 4に示す。またこの図には実測値もプロットしてあるがケーブル張力については実測値を、節点変位については弾性解を基準にした変化を示している。

表- 1 ケーブルの粘弾性定数

	$E_1(\text{kg/m}^2)$	$E_2(\text{kg/m}^2)$	$\eta(\text{day} \cdot \text{kg/m}^2)$
経時挙動予測	2.029×10^{10}	7.220×10^{11}	1.230×10^{13}
シム最適化	1.994×10^{10}	1.403×10^{11}	2.300×10^{13}

(2)最適シム調整

経時挙動予測から実際の使用ケーブルでは最適化の対象となりにくいため変化の大きなケーブルを使用してシミュレーションを行った。この定数を表- 1に示す。そしてこの定数を用いた結果をケーブル11、節点34について図- 5, 6に示す。

表- 2 影響マトリックスの抜粋

		1	6	11	12	17	22
	1	5.66	-0.62	0.07	-0.26	-0.13	0.25
	6	-0.55	10.12	-1.08	0.06	0.04	0.03
	11	0.14	-1.08	24.83	1.11	0.11	-0.08
	12	-0.19	0.06	1.11	25.07	-1.28	-0.09
	17	-0.05	0.04	0.12	-1.28	12.05	-0.68
	22	0.33	0.04	-0.08	-0.09	-0.69	5.57
	3	-0.30	0.15	0.25	-0.08	-0.01	0.13
	8	-2.70	1.15	2.92	-0.30	0.03	0.21
	13	-1.72	-0.02	3.60	-0.56	-0.06	0.01
	23	1.80	0.67	-0.55	3.37	0.81	0.14
	28	4.12	1.57	-0.53	2.65	3.23	1.10
	34	5.45	1.96	-0.59	1.20	3.50	2.88

表- 3 最適化結果

	パターン 1	パターン 2	パターン 3	パターン 4
ケーブル張力(tf)	30	30	30	20
節点変位(mm)	30	30	30	25
導入時期	2年後	3年後	4年後	4年後
ケーブル 1(mm)	70.2	59.0	57.6	49.2
ケーブル 2(mm)	54.6	46.0	44.8	38.4
ケーブル18(mm)	-	-	-	18.6

表- 4 シム調整例

	1	2	3	4	5	6
1	4.12	5.24	5.23	5.26	5.51	5.76
2	3.43	2.95	3.03	3.31	4.23	4.48
3	1.81	1.33	1.30	1.33	0.98	-
4	0.54	-	-	-	-	-
5	0.0	-	-	-	-	-
6	0.0	-	-	-	-	-
7	0.0	-	-	-	-	-
8	0.0	-	-	-	-	-
9	0.0	-	-	-	-	-
10	0.0	-	-	-	-	-
11	0.0	-	-	-	-	-
12	1.32	1.30	1.08	-	-	-
13	1.09	1.16	1.12	1.11	-	-
14	0.89	0.93	-	-	-	-
15	1.00	1.03	1.01	-	-	-
16	1.06	1.12	1.11	1.11	-	-
17	1.11	1.10	1.11	1.11	-	-
18	0.73	0.68	-	-	-	-
19	0.28	-	-	-	-	-
20	0.0	-	-	-	-	-
21	0.0	-	-	-	-	-
22	0.0	-	-	-	-	-
	22	10	8	6	3	2
	0.640	0.635	0.640	0.641	0.672	0.752

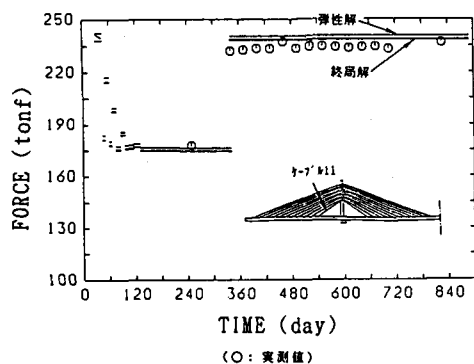


図- 3 ケーブル11の張力変化と実測値 (実際)

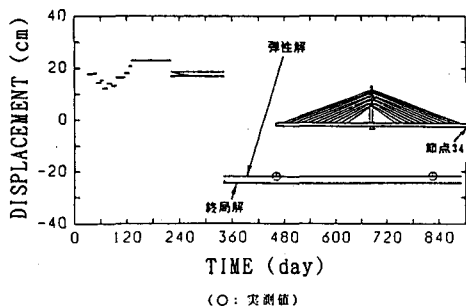


図- 4 節点34の変化と実測値 (実際)

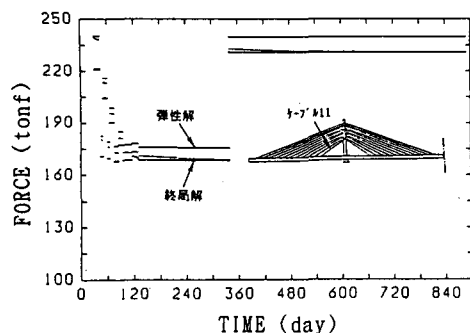


図- 5 ケーブル11の張力変化 (シミュレーション)

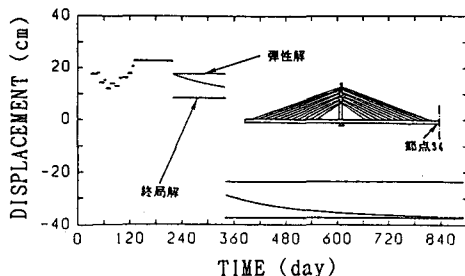


図- 6 節点34の変化 (シミュレーション)

最適シム調整に関しては、2, 3, 4年後に調整すると仮定し最適化を行っている。竣工3年後に調整した場合の単位シム調整による影響マトリックスの抜粋を表- 2に示した。なお、この表中の節点はそれぞれケーブルの取付点になっている。また誤差に関してはケーブル張力で30(tf)、節点変位で30(mm)として行い、4年後は20(tf)、25(mm)での最適化も行った。各パターンの結果を表- 3に、最適化の様子を表- 4に示す。また、調整を含めた経時変化の様子を各パターンのケーブル11について図- 7～10に、節点34について図-11～14に示す。

4. 考察

まず経時変化については解析精度による誤差は多少あるものの、経時挙動についてはほぼその様子を表せていると思われる。

単位シム調整の影響線マトリックスはケーブル張力については調整ケーブルが大きく変化し、他はその10%以下となっている。ケーブルの取付点もそのような傾向にあるが、ケーブル1を調整した場合は節点34の変化が最大になっている。これは橋梁の形状からタワーを介して節点34の変化が大きくなったと思われる。

また表- 4から希求水準を変化させた場合、基準を厳しくすると調整に要するケーブルの数が多くなっている。これは、調整作業量の増加を意味することになるので、作業量と誤差の精度のかねあいで調整を決定する必要がある。調整時期については、今回離散的にしか結果が求まっていないが、竣工2年後と3年後の間では調整量に差があるのに対し、3年後と4年後の間では差があまり無い。これからこのモデル橋では3年後以降は時期による調整の差はあまりみられないということが言える。

5. 結論

本研究では数値解析による斜張橋の経時挙動の予測、その結果をふまえたシム調整最適化を行い、長期的維持管理法について解析を行った。以下にその結論を述べる。

- (1) 経時挙動予測については実測データとの比較からほぼ良好な結果が得られることがわかった。
- (2) シム調整時期による調整量の差は挙動の収束状態により異なるが、ある時点を超えると調整の効果はほとんど変わらなくなり、今回は3年後でよいと思われる。
- (3) シム調整について、調整本数は調整誤差を操作することで増減することができ、この両面から調整の仕方を決定する必要がある。

6. 参考文献

- 1) 渡邊 英一・亀井 正博・井下 泰具・中出 収；実物大ケーブルを用いたクリープ・リラクセーション試験、構造工学論文集、Vol 36A、(1990)
- 2) 渡邊 英一・亀井 正博・若林 保美・楠葉 誠司；架設段階を考慮した斜張橋のケーブルのリラクセーション予測、構造工学論文集、Vol 36A、(1990)
- 3) 古川 浩平・井上 幸一・中山 弘隆・石堂 一成；多目的計画法を用いた斜張橋の架設時精度管理システムに関する研究、土木学会論文集、第374号、(1986)

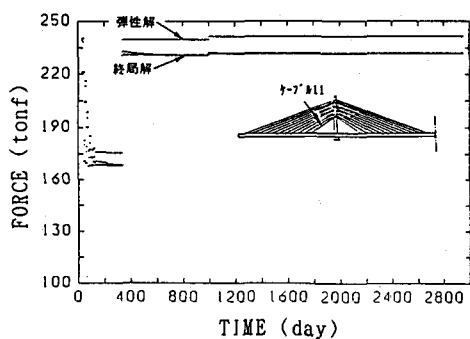


図- 7 ケーブル11の張力変化 (パターン1)

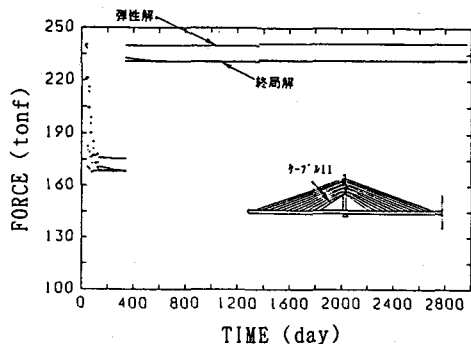


図- 8 ケーブル11の張力変化 (パターン2)

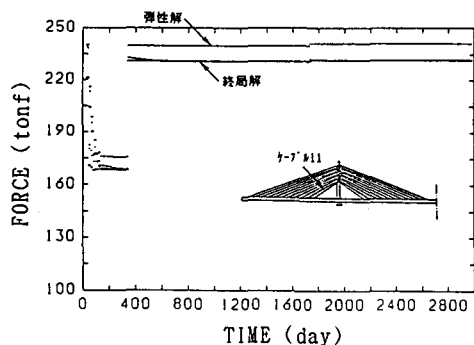


図- 9 ケーブル11の張力変化 (パターン3)

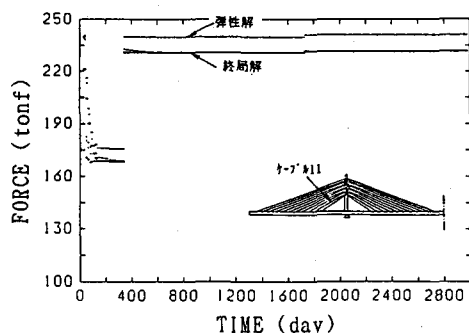


図- 10 ケーブル11の張力変化 (パターン4)

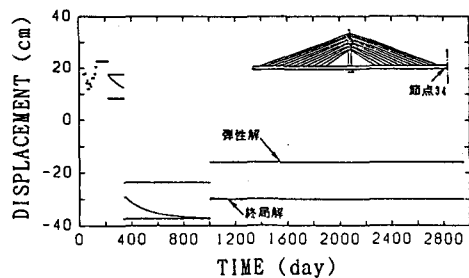


図- 11 節点34の変化 (パターン1)

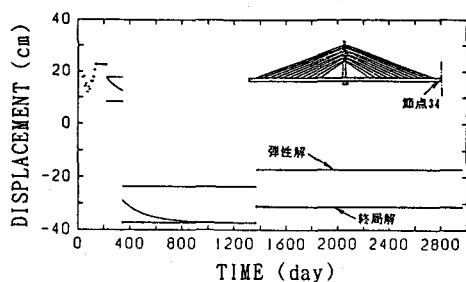


図- 12 節点34の変化 (パターン2)

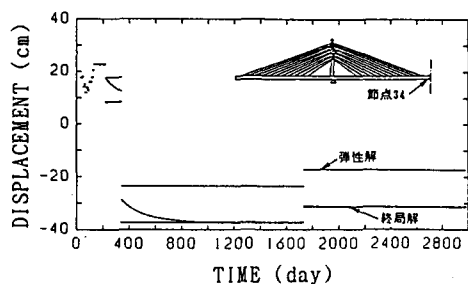


図- 13 節点34の変化 (パターン3)

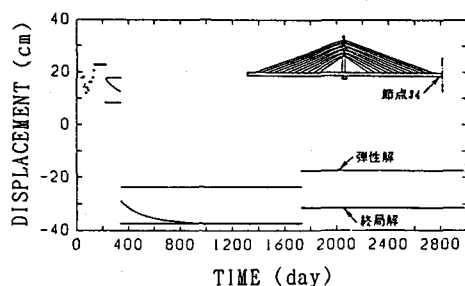


図- 14 節点34の変化 (パターン4)