

炭素繊維強化プラスチックケーブルを用いた斜張橋の経時挙動解析

大阪市立大学工学部 学生員
大阪市立大学工学部 正 員

城岡正和
山口隆司

大阪市立大学工学部 正 員
(株)日本工業試験所 正 員

北田俊行
ルイザ・伯子・一瀬

1.まえがき 炭素繊維強化プラスチック（CFRP）ケーブルは、高強度、高耐食性の特徴を有し、比重が鋼材の 1/5 程度と軽量であり、省力化施工につながる材料として、近年注目されている。このようなことから、CFRP ケーブルは、斜張橋やニールセン橋への適用が期待されている。しかし、一般にケーブルおよびその定着部は、時刻の経過とともに、初期ひずみが増加してゆくクリープ、および初期応力が低減してゆくリラクセーションを引き起こし、橋梁全体に悪影響を及ぼすおそれがある。そこで、本研究では、このような粘弾性挙動に起因する橋梁全体の变形と応力との経時挙動を考慮できる構造解析プログラムを用いて、CFRP ケーブルを有する斜張橋と通常の鋼ケーブル（平行ワイヤストランド）を用いた斜張橋との 2 通りに対して数値解析を行い、経時挙動の比較を行った。そして、解析結果をもとに、CFRP ケーブルの斜張橋への適用性について検討した。

2.鋼ケーブルの粘弾性体へのモデル化 鋼ケーブルの粘弾性挙動の最も簡単なモデルとしては、Fig. 1 に示すバネ要素とフォークト要素とが直列に結合した線形粘弾性 3 要素モデルが対応する。ここで、 E_1 、および E_2 は各バネ要素のヤング係数を、また η はダッシュポットの粘性係数である。このモデル全体のひずみ ε はバネ要素のひずみ ε_e とフォークト要素のひずみ ε_c との和である。そして、バネ要素とフォークト要素とにかかる応力 σ は等しいことから、構成則は以下ようになる。

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = -\frac{E_2}{h} \varepsilon_c + \frac{s}{h} \quad (1)$$

3.CFRP ケーブルの粘弾性体へのモデル化 CFRP ケーブルのリラクゼーションカーブ¹⁾を Fig. 2 に示す。このリラクゼーションカーブより、非線形最適化手法を用いてケーブルの応力 σ とクリープひずみ ε_c との関係式を以下のように決定した。本解析では、CFRP ケーブルの経時挙動に対しては、以上の式を用いるものとする。

$$\frac{Ds}{s_0} = 0.0675(\log_{10} t)^2 + 0.1885 \log_{10} t + 0.1685 \quad (2)$$

4.解析プログラムの構築 本解析プログラムのフローチャートを Fig. 3 に示す。その流れとしては、まず、時刻 t_0 における平面骨組構造解析を行う。次に、時刻 $t = t_0 + \Delta t$ における各ケーブルの張力増分を得るために、差分法によってケーブルの時間依存挙動解析を行う。これにより得られた各ケーブルの張力増分 Δf_{ic} を用いて、時刻 $t = t_0 + \Delta t$ における平面骨組構造解析を行う。以上により、時刻 $t = t_0 + \Delta t$ における橋梁全体の挙動が得られる。その後、設定時刻までこれらの演算を繰り返す。

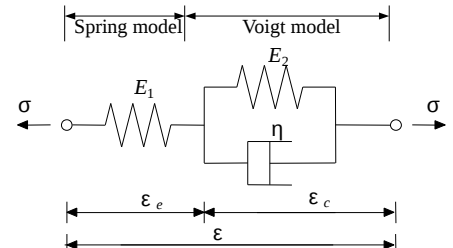


Fig. 1 Three-element model

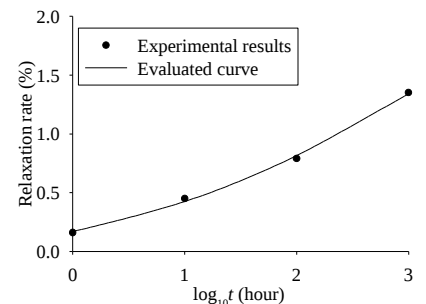


Fig. 2 Relaxation rate vs. time

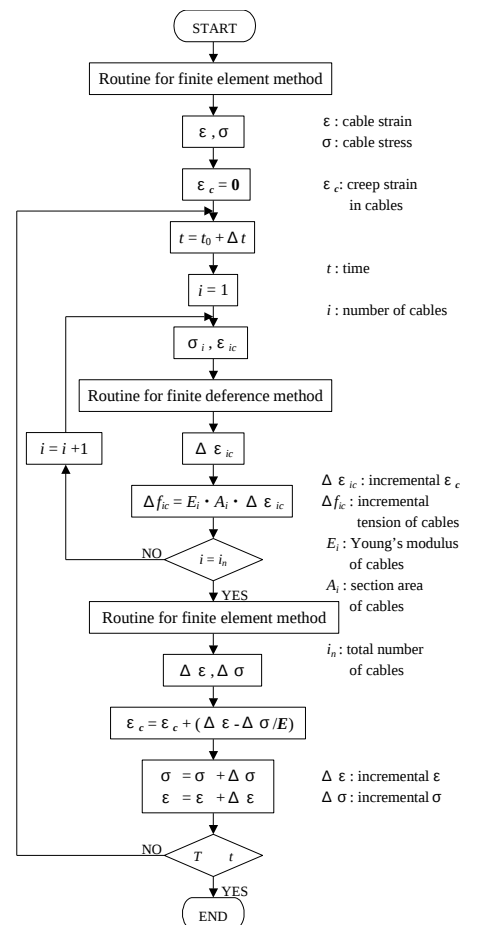


Fig. 3 Flow-chart of program

Key Words: 粘弾性, 経時挙動, CFRP ケーブル, リラクセーション

連絡先: 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138 大阪市立大学工学部・土木工学科 Tel. 06-6605-2735 Fax. 06-6605-2765

5. CFRP ケーブルを用いた斜張橋の経時挙動解析 Fig. 4 に示す斜張橋の解析モデル²⁾を設定し、本プログラムを用いて経時挙動の解析を行った。ただし、構造物の対称性を考慮して Fig. 5 に示すハーフモデルに対して数値解析を行った。断面諸量と材料特性^{1) ~ 3)}とを Table 1 に示す。また、全部材の死荷重の中でケーブルが占める死荷重の割合を Table 2 に示す。

6. 解析結果とその考察 解析結果を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。ただし、CFRP ケーブルに関しては、実験データが 1,000 時間までであるため、解析も 1,000 時間で終了するものとした。Fig. 6 は支間中央部の鉛直下方向変位の変化状況を示す。横軸は時間、縦軸は変位を初期変位で除したものである。これより、鋼ケーブルを用いた場合は、0.3 年後に初期変位の約 2.5 倍で変位が収束することがわかる。一方、CFRP ケーブルを用いた場合は、初期変位の 4 倍以上で変位が収束すると予想される。Fig. 7 は、側径間の最上段ケーブルの張力の変化を示す。横軸は時間、縦軸は張力を初期張力で除したものである。鋼ケーブルを用いた場合は、0.3 年後に初期張力の 0.9957 倍で張力が収束する。一方、CFRP ケーブルを用いた場合は、初期張力の 0.994 倍程度で収束すると予想される。

7. 結論 本研究で得られた主な結論を以下に示す。

1) 斜張橋ケーブルのクリープ・リラクゼーションによる橋梁全体の経時挙動に着目すると、鋼ケーブルの方が CFRP ケーブルよりも有利であるが、その差は実用レベルにおいてはほとんど問題とならない程度である。したがって、CFRP ケーブルを用いることで、死荷重を大幅に減少することができることから、CFRP ケーブルは、斜張橋のケーブル材として有用である。

2) 本研究では、CFRP ケーブルを用いた斜張橋の経時挙動の解析を行ったが、リラクゼーション率に対する実験データ

が限られているため、最終状態に至るまでの解析を行うことはできなかった。したがって、最終状態を知るためには、より期間の長い長期持続引張試験を行い、その結果をもとに経時挙動解析を行う必要がある。

参考文献

- 1) 鹿島建設(株)，新日本製鐵(株)，新日鐵化学(株)，鈴木金属工業(株)：CFRP ストランドの 9 本マルチ（200tf 級）疲労試験と外ケーブル PC 部材への適用実験，報告書，1994 年 10 月。
- 2) 内田 諭：新素材と鋼線とで製作されたハイブリッド・ケーブルの橋梁構造物への適用，修士論文，大阪市立大学大学院，1998 年 3 月。
- 3) 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・リラクゼーション試験，構造工学論文集，Vol. 36A，土木学会，1990 年 3 月。

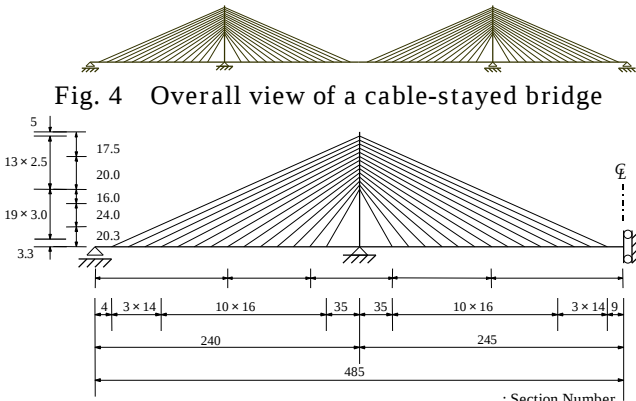


Fig. 5 Dimensions and boundary conditions of the half-model (unit in m)

Table 1 Section modulus and material properties

Cross	Section No.	E (N/mm ²)	A (m ²)	I (m ⁴)	E_2 (N/mm ²)	η (year ⁻¹ N/mm ²)
Girder		2.06×10^5	1.302	2.258	-	-
		2.06×10^5	1.179	1.996	-	-
		2.06×10^5	1.449	2.365	-	-
		2.06×10^5	1.317	2.269	-	-
		2.06×10^5	1.045	1.767	-	-
Tower		2.06×10^5	0.640	4.538	-	-
		2.06×10^5	0.781	5.583	-	-
		2.06×10^5	0.800	5.818	-	-
		2.06×10^5	0.847	6.167	-	-
		2.06×10^5	0.996	6.754	-	-
	Cable No.					
Steel Cable	(1)	1.92×10^5	1.74×10^{-3}	2.40×10^{-3}	8.87×10^6	4.38×10^5
	(2) ~ (11)	1.92×10^5	1.20×10^{-3}	1.15×10^{-3}	8.87×10^6	4.38×10^5
	(12) ~ (14)	1.92×10^5	5.81×10^{-3}	2.69×10^{-6}	8.87×10^6	4.38×10^5
CFRP Cable	(1)	1.18×10^5	8.39×10^{-3}	5.60×10^{-6}	?	?
	(2) ~ (11)	1.18×10^5	5.59×10^{-3}	2.49×10^{-6}	?	?
	(12) ~ (14)	1.18×10^5	2.80×10^{-3}	6.22×10^{-7}	?	?

Table 2 Dead Load

	全死荷重(kN)	ケーブル死荷重(kN)	ケーブル割合(%)
鋼ケーブル	57,639	4,379	7.60
CFRPケーブル	53,456	196	0.37

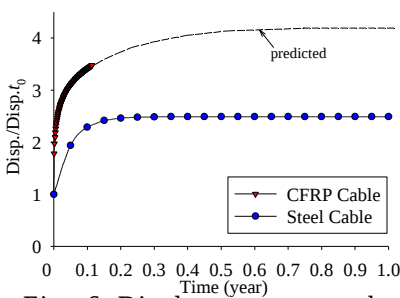


Fig. 6 Displacements at the center of the bridge

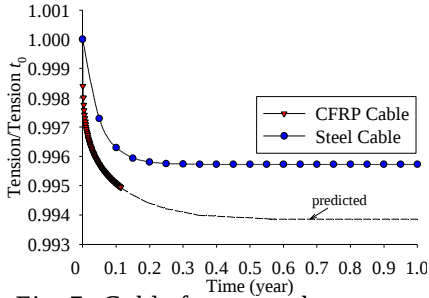


Fig. 7 Cable forces at the upper of the side span