

大阪市立大学工学部 正 員 中井 博
三井造船(株) 正 員 江藤徹郎
(株)神戸製鋼所 嶋山正幸

大阪市立大学工学部 正 員 北田俊行
日本電子計算(株) 正 員 田中克弘
大阪市立大学大学院 学生員 ○内田 諭

1. まえがき 最近、表-1に示すように、鋼線に比べて著しく軽量で、引張強度の高い種々な炭素繊維が開発されている。そこで、鋼線とこれらの炭素繊維とを組み合わせれば、炭素繊維の脆性であるという欠点がカバーできる。本研究においては、この点に着目して、鋼線の周りを炭素繊維で覆ったハイブリッド・ケーブル¹⁾を考案し、それを長大斜張橋に適用した場合の耐荷性・安全率を、弾塑性有限変位解析²⁾によって検討した。
2. ハイブリッド・ケーブルの限界状態と安全率 文献1)と同様に、以下の3つの限界状態について、それぞれ異なる安全率 ν を設定した。すなわち、①鋼線の降伏限界状態に対しては $\nu_Y=1.7$ 、②終局限界状態に対しては $\nu_U=3.0$ 、また③何らかの理由で炭素繊維が破断するハザード状態に対しては $\nu_R=1.1$ を設定する。図-1には、ハイブリッド・ケーブルを用いた橋梁のケーブル素線の模式的な荷重-ひずみ曲線を、上記の安全率 ν とともに例示する。ここで、図中の D は死荷重、 L は活荷重、そして PS はプレストレス力を意味する。
3. ハイブリッド・ケーブル断面の設計 ハイブリッド・ケーブルの断面積比の決定は、各限界状態における力のつり合い条件式にもとづくこととした。

まず、鋼ケーブル・モデルの鋼線の断面積を $A(\text{cm}^2)$ 、降伏点を $\sigma_{YS}(\text{kgf/cm}^2)$ 、および安全率を $\nu=2.5$ とみなすと、ケーブルの引張強度 P は、次式で与えられる。

$$P=A \sigma_{YS}=2.5 P_0$$
 (1)

ここに、 P_0 は、ケーブルの許容引張力である。

つぎに、ハイブリッド・ケーブルの鋼線、および炭素繊維の断面積を、それぞれ $A_S(\text{cm}^2)$ 、および $A_C(\text{cm}^2)$ とすると、ハザード状態における力のつり合い条件式は、次式で与えられる。

$$1.1 P_0 = \sigma_{YS} A_S$$
 (2)

また、炭素繊維の引張強度を σ_C とすると、終局限界状態における力のつり合い条件式は、次式となる。

$$3.0 P_0 = 1.1 P_0 + \sigma_C A_C$$
 (3)

さらに、降伏限界状態における力のつり合い条件式は、鋼線の降伏ひずみ ε_{SI} 、また鋼線、および炭素繊維のヤング係数をそれぞれ、 E_S 、および E_n とすると、

$$1.7 P_0 = \varepsilon_{SI} (E_S A_S + E_C A_C)$$
 (4)

で与えられる。それらの式による試設計を行った結果によると、炭素繊維の断面積は終局限界状態で決定されることがわかった。

4. 解析モデル 図-2には、実際の長大斜張橋の解析モデルを示す。主桁、および塔は、安全率 $\nu=1.7$ で設計している。ケーブル断面積は、鋼ケーブル・

モデルの鋼線の安全率 $\nu=2.5$ 、およびハイブリッド・ケーブルの安全率 $\nu=3.0$ を満たすように設計している。なお、この解析モデルでは、主桁、および塔に弾塑性箱形断面梁・柱要素、またケーブルに弾塑性ロッド要素を用いた²⁾。そして、この解析モデルのケーブルに鋼線を用いた①鋼ケーブル・モデル、ハイブリッド・ケー

表-1 ケーブル材料の機械的性質

項 目	降伏点 $\sigma_{YS}(\text{kgf/cm}^2)$	ヤング係数 $E(\text{kgf/cm}^2)$
鋼 線	16,000	2.00×10^6
炭素繊維	50,000	2.35×10^6

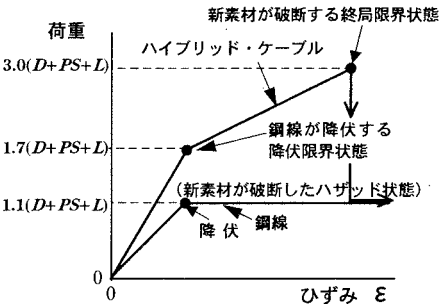


図-1 ハイブリッド・ケーブル素線に対する模式的な荷重-ひずみ曲線

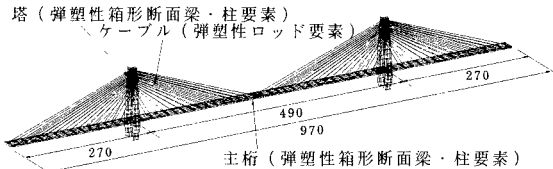


図-2 解析モデル (寸法単位: m)

ブルを用いた②ハイブリッド・ケーブル・モデル、そしてハイブリッド・ケーブル中の炭素繊維が破断した③ハザード状態モデルの3つに対して、弾塑性有限変位解析²⁾を行った。なお、対象とした荷重の組み合わせは、死荷重、活荷重、およびプレストレスである。このうち、活荷重は、満載するものとした。そして、これらの設計荷重を、荷重パラメーター α によって比例・漸増载荷した。

5. 解析結果とその考察 解析結果を、表-2、および図-3に示す。なお、これらの表において、剛比 γ は、次式で与えられるものである。

$$\gamma = E_{cb} \Sigma A_{cb} \cdot L_T^2 / (E_G I_G) \quad (5)$$

ここに、 ΣA_{cb} ：ケーブルの断面積の合計、 L_T ：橋長

E_{cb} ：ケーブルのヤング係数、 E_G ：主桁のヤング係数、

I_G ：中央径間部の主桁の断面2次モーメント

これらの解析結果によると、以下の諸点が明らかとなった。

(1)表-2によると、ハザード状態における終局荷重パラメーターは、 $\alpha_R=1.34$ である。そのため、設定した安全率 $\nu_R=1.1$ を、満たしていることがわかった。同様に、

降伏荷重パラメーター α_Y についても1.96となり、設定した安全率 $\nu_Y=1.7$ を満たしていることがわかった。

(2)終局限界状態においては、ハイブリッド・ケーブル・モデルの場合、炭素繊維が破断せずに、先に主桁が降伏し始め、その断面が全塑性状態に至った。また、ハイブリッド・ケーブル・モデルでは、終局荷重パラメーターが $\alpha_U=2.52$ となり、 $\nu_U=2.5$ とした鋼ケーブル・モデルの終局荷重パラメーター $\alpha_U=2.83$ から、減少する結果となった。これは、ハイブリッド・ケーブル・モデルの場合、ケーブル剛比が鋼ケーブル・モデルの場合と比べて小さいために、主桁にかかる分担荷重が大きくなり、早い段階で主桁に全塑性状態が発生し、終局限界状態に至ったためと考えられる。

(3)図-3によると、ハイブリッド・ケーブル・モデルでは、終局限界状態において、鋼ケーブル・モデルよりも大きな変位が生じることがわかる。これは、ハイブリッド・ケーブルの伸び剛性が鋼ケーブルに比べて小さくなり、橋梁全体のたわみ剛性が低下するためであると考えられる。

6. まとめ ハイブリッド・ケーブル内における鋼線と炭素繊維との断面積比の決定には、鋼線、および炭素繊維の材料としての引張強度、およびヤング係数のみならず、長大斜張橋に適用した場合のケーブルに対する剛比 γ についても、考慮する必要がある。すなわち、ハイブリッド・ケーブルを用いた長大斜張橋の場合、その剛比を鋼ケーブル斜張橋と同程度になるように、ケーブル本数を増すとともに、主桁断面を小さくするなどの工夫が必要である。

なお、本研究は、平成7～9年度の文部省・科学研究費補助金・基盤研究B(1)(研究代表者：中井 博)の研究活動の一環として行っているものである。

参考文献 1)中井 博・北田俊行・内田 諭：ハイブリッド・ケーブルの斜張橋への適用に関する基礎的研究、

平成8年度土木学会関西支部年次学術講演会・講演概要集、pp. I-60-1～2、平成8年5月15日。

2)北田俊行・大南亮一・丹生光則・田中克弘：ケーブルを用いた鋼橋の耐荷力解析用の汎用プログラム開発、構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、日本鋼構造協会、第13巻、pp. 89～94、1989年7月。

表-2 ハイブリッド・ケーブル、および鋼ケーブルを用いた斜張橋のケーブル剛比、および各限界状態における荷重パラメーター

項目 モデル	剛比 γ	ハザード荷重 パラメーター α_R	降伏荷重パラ メーター α_Y	終局荷重パラ メーター α_U
鋼ケーブル	6.763×10^5	—	2.67	2.83
ハイブリッド・ケーブル	2.625×10^5	1.34	1.96	2.52
期待する安全率**		1.1	1.7	3.0

*：ハザード状態モデルでは $\gamma=1.592 \times 10^5$

**：ただし、ハイブリッド・ケーブルに対する安全率

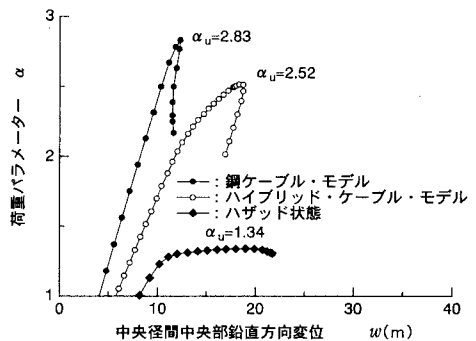


図-3 荷重パラメーター鉛直方向変位曲線