

新素材と鋼線とからなるハイブリッド・ケーブルを用いた 斜張橋、およびニールセン・ローゼ橋の耐荷力特性について

Load Carrying Capacity of Cable-Stayed and Nielsen-Lohse Bridges by
Using Hybrid Cables Consisting of New Fiber Materials and Steel Wires

中井 博*・北田俊行**・内田 諭***・江藤徹郎****・田中克弘*****・稚山正幸*****

Hiroshi NAKAI, Toshiyuki KITADA, Satoshi UCHIDA, Tetsuo ETO, Katsuhiro TANAKA and Masayuki AKIYAMA

- * : 工博 大阪市立大学 教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
- ** : 工博 大阪市立大学 助教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
- *** : 大阪市立大学大学院 工学研究科 前期博士課程 土木工学専攻 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
- **** : 三井造船(株) 鉄構建設事業本部 大分鉄構工場 設計部 (〒870-03 大分市大字日吉原 3)
- ***** : 工修 日本電子計算(株) 大阪支店 技術営業部 (〒552 大阪市淀川区西中島 2-12-11)
- ***** : (株)神戸製鋼所 都市環境本部 構造技術部 (〒657 神戸市灘区岩屋中町 4-2-15)

Investigated in this paper is the possibility of application of a new hybrid cable consisting of both carbon or aramid fibers and steel wires to cable-stayed and Nielsen-Lohse bridges. First of all, the outline of mechanical properties of the new materials is described. Next, a design method of cross section of the new hybrid cables is proposed on the basis of the factors of safety 1.7, 3.0 and 1.1 against yield limit state of steel wires, ultimate limit state of hybrid cables and hazard state corresponding to breaking point of new materials by the accidents, respectively. The possibility of the application of the new hybrid cables to these bridges are confirmed through elasto-plastic and finite displacement analysis of two types of cable-stayed bridge models with single and three layered as well as one Nielsen-Lohse bridge model.

Key Words : hybrid-cable, carbon fiber, aramid fiber, steel wire, ultimate strength, yield strength, hazard, limit state, design method, cable-stayed bridge, Nielsen-Lohse bridge

1. まえがき

最近、鋼線に比べ著しく軽量で、引張強度が高い炭素繊維、およびアラミド繊維など、いわゆる新素材と称せられる各種の繊維が、開発されている。これらの新素材は、上記の利点以外に、鋼に比べて塩害に対して強いこと、非磁性であること、および炭素繊維の場合の線膨張係数が極めて小さいことの長所も有するため、これらの新素材を建設材料として用いるための研究・開発が盛んに行われつつある¹⁾。

わが国においては、橋梁、とくに長大橋のケーブルには、鋼線が使用材料の主流を占めている。しかしながら、鋼線には、重量の増大、疲労割れ、ならびに腐食の発生という欠点があり、これらが鋼橋の長大化と耐用年数とに課題を残している。これらの新素材を鋼線の代替品として用いれば、長大橋のスパン長や耐用年数は、飛躍的に向上することが期待される。最近、海峡を横断する超長大橋の構想があり、これらに新素材を巧みに用いれば、この計画の実現が促進される可能性が大きいものと考えられる。

上述の新素材のうち、アラミド繊維は、鋼に比して剛性が低いので、剛性が問題とならない強度部材、たとえ

ば吊橋やアーチ橋の吊材に適していると考えられる。一方、炭素繊維は、高い剛性と強度とが要求される部材、たとえば吊橋、および斜張橋のケーブルに用いるのが得策であると思われる。

具体的には、アラミド繊維のケーブルを用いた斜張橋(中央支間長 63m の歩道橋)²⁾がイギリスで、また炭素繊維のケーブルを試験的・部分的に用いた斜張橋(最大支間長 63m)³⁾がスイスで建設されている。

しかし、これらの新素材を用いたケーブルの本格的な実用化を可能に至らしめるためには、さらなる工夫が必要であると思われる。すなわち、たとえば、これら新素材が脆性である欠点と鋼線が腐食するという欠点とを互いにカバーし、両者の利点がともに発揮できるように、鋼線の周りを新素材で覆うハイブリッド・ケーブルの開発が不可欠である。

本論文においては、このようなハイブリッド・ケーブルを鋼橋に利用するため、以下の諸点を明らかにすることを目的として実施した研究成果をとりまとめている。

- ①引張を受けるハイブリッド・ケーブル素線の機械的性質を、モデル化する。
- ②ハイブリッド・ケーブル素線の降伏、および破断等に

対して経験的に設定した安全率の妥当性について検討する。

③ハイブリッド・ケーブルの伸び剛性が、斜張橋、およびニールセン・ローゼ橋の耐荷力に及ぼす影響を明らかにする。

④ハイブリッド・ケーブルを斜張橋、およびニールセン・ローゼ橋に適用した場合の得失を、明確化する。

なお、本研究で対象とした橋梁モデルの耐荷力を求める計算には、鋼骨組構造物の弾塑性有限変位解析を行うための専用プログラムである EPASS⁴⁾を用いた。

2. 新素材、およびハイブリッドケーブルの機械的性質

2.1. 新素材、および鋼線の機械的性質

本研究の目的は、炭素繊維と鋼より線、または炭素繊維、あるいはアラミド繊維と鋼線とを使ったハイブリッド・ケーブル素線からなるケーブルを斜張橋、あるいはニールセン・ローゼ橋に適用した場合の得失について検討することにある。

そこで、炭素繊維、アラミド繊維、鋼線、および鋼より線のそれぞれに対する応力-ひずみ曲線は、個別に模式的に、図-1のように描ける。

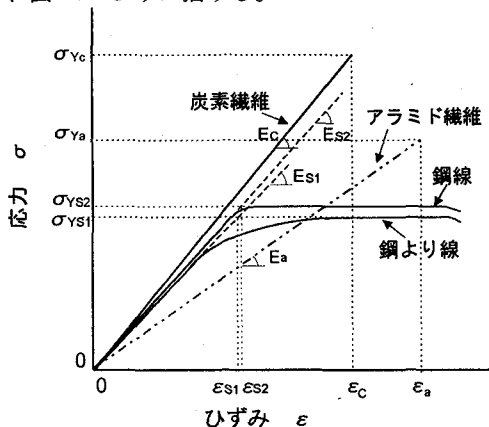


図-1 各材料の応力-ひずみ曲線

この図に示すように、鋼線、および鋼より線は、一般に、バイ・リニア形、あるいはトリ・リニア形の材料特性を呈する。

本研究で用いる炭素繊維、アラミド繊維、鋼線、および鋼より線の破断強度 σ_y 、およびヤング係数 E は、表-1で与えられるものとする。

表-1 各材料の機械的性質⁵⁾

		$\sigma_y(\text{kgf/cm}^2)$		$E(\text{kgf/cm}^2)$	
鋼 線		σ_{YS2}	16,000	E_{YS2}	2.00×10^6
	鋼より線	σ_{YS1}	14,000	E_{YS1}	1.95×10^6
炭 素 繊 維	T400H	σ_{Yc}	45,000	E_{Yc}	2.55×10^6
	M40J		45,000		3.85×10^6
	T700S		50,000		2.35×10^6
	T300		36,000		2.35×10^6
アラミド繊維		σ_{Ya}	35,000	E_a	1.00×10^6

ここに、機械的性質に関する記号については、図-1を参照にされたい。

2.2. 新素材を用いたハイブリッド・ケーブルの機械的性質

ハイブリッド・ケーブルには、図-2(a)に示すように、鋼線、または鋼より線のまわりを新素材素線で束ねたものと、図-2(b)に示すように、鋼線、または鋼より線を新素材と充填材であるエポキシ樹脂とで覆ったハイブリッド・ケーブル素線数本を束ねた2種類のものが考えられる。

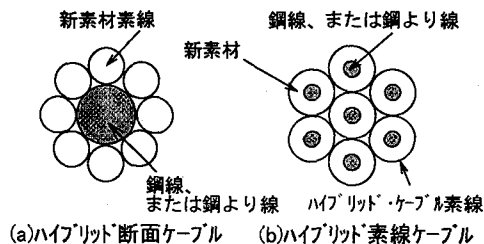


図-2 ハイブリッド・ケーブルの種類

新素材の応力-ひずみ曲線は直線で、また鋼線、および鋼より線の応力-ひずみ曲線は歪硬化のないバイ・リニア形でモデル化する。すると、このようなハイブリッド・ケーブル素線の応力-ひずみ曲線は、模式的に、図-3のように描ける。なお、縦軸の数字1.1、1.7、および3.0は以降の2.3で説明する安全率である。

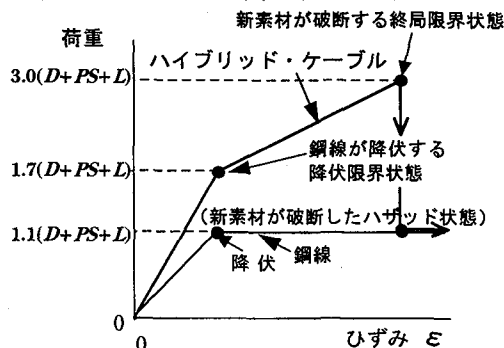


図-3 ハイブリッド・ケーブル素線における荷重-ひずみ曲線の一例

2.3. 安全率の設定方法

新素材は、現時点で品質のばらつきが大きい。そのため、構造部材として用いる場合には、安全率 ν を大きくとって(たとえば、終局限界状態に対しては、 $\nu=3.0$ 程度)、図-3に示すように、以下の3つの限界状態について照査するものとした⁶⁾(図-3において、 D は死荷重、 L は活荷重、また PS はプレストレスを意味する)。

降伏限界状態：鋼線、あるいは鋼より線が降伏する降伏限界状態で、安全率は、鋼主桁と同様に、 $\nu_y=1.7$ とする。

終局限界状態：鋼線、あるいは鋼より線はすでに降伏し、新素材が破断する終局限界状態で、安全率は、 $\nu_u=3.0$ とする。

ハザード状態：事故などによって、新素材が破断したハザード状態で、その状態でも橋梁が崩壊しないように安全率は、 $\nu_R=1.1$ とする。

3. ハイブリッド・ケーブル断面積比の決定

ハイブリッド・ケーブルの新素材と鋼線との断面積比は、各限界状態における力のつり合い条件式にもとづいて決定することとした。

まず、鋼ケーブルを用いたモデルの鋼線の断面積を $A(\text{cm}^2)$ 、降伏点を $\sigma_{YS}(\text{kgf/cm}^2)$ 、また安全率を ν とすると、ケーブルの引張強度 P は、次式で与えられる。

$$P=A \times \sigma_{YS}=\nu \times P_0 \quad (1)$$

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、および新素材の断面積を、それぞれ $A_S(\text{cm}^2)$ 、および $A_n(\text{cm}^2)$ 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。

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

また、新素材の引張強度を σ_{Yn} 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。

$$3.0P_0=1.1P_0+\sigma_{Yn} \times A_n \quad (3)$$

さらに、降伏限界状態における力のつり合い条件式は、鋼線の降伏ひずみを ε_S 、また鋼線、および新素材のヤング係数をそれぞれ E_S 、および E_n とすると、

$$1.7P_0=\varepsilon_S(E_S A_S+E_n A_n) \quad (4)$$

で与えられる。それらの式を用いて、鋼線と4種類の炭素繊維とを用いたハイブリッド・ケーブル素線の断面に関する試設計を行った結果を、表-2に示す。

表-2 種々な限界状態に対する4種類のハイブリッド・ケーブル素線の実安全率

種類	実安全率 A_n/A_S	ハザード状態 での安全率	降伏限界状態 での実安全率	終局限界状態 での安全率
T400H	0.61	1.1	1.96	3.0
M40J	0.61	1.1	2.40	3.0
T700S	0.55	1.1	1.81	3.0
T300	0.77	1.1	2.09	3.0
アラミド	1.09	1.1	1.7	3.72
期待する安全率		1.1	1.7	3.0

同表によると、これら4種類の炭素繊維を用いたハイブリッド・ケーブル素線の断面構成は、終局限界状態、およびハザード状態における安全率より定めれば、降伏限界状態に対する安全率 $\nu_Y=1.7$ をも満たしていることがわかる。

また、鋼線とアラミド繊維とからなるハイブリッドケーブル素線のアラミド繊維と鋼線との断面積比は、ハザード状態、および降伏限界状態における安全率より定めれば、終局限界状態での実安全率が、 $\nu_U^*=3.72$ となり、終局限界状態における安全率 $\nu_U=3.0$ を満たすことがわかった。

4. 橋梁のケーブルへの適用

ハイブリッド・ケーブルを適用した橋梁の耐荷性を明らかにするために、斜張橋については、主桁の強度によって終局強度が決定される1段ケーブルの斜張橋モデル、またケーブルの強度によって終局強度が決定される3段ケーブルの斜張橋モデルの2つのモデルを用いて、弾塑性有限変位解析を行った。

4.1. 1段ケーブルの斜張橋

(1) 解析モデル

図-4には、耐荷性の検討に供した鋼ケーブルを用いた1段ケーブルの斜張橋モデル⁷⁾を示す。なお、このモデル橋は、道路橋示方書⁸⁾にしたがって設計されたものであり、主桁、および塔の安全率は、1.7で設計されている。また、主桁と塔とは、完全に独立した構造となっている。

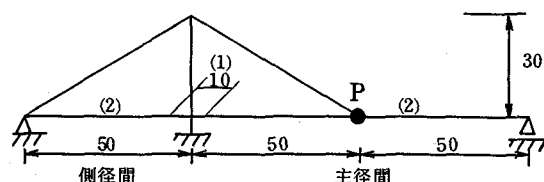


図-4 1段ケーブルの斜張橋モデル (寸法単位:m)

主桁、および塔の断面を、図-5に示す。また、主桁、塔、およびケーブルの断面諸定数を、表-3に示す。

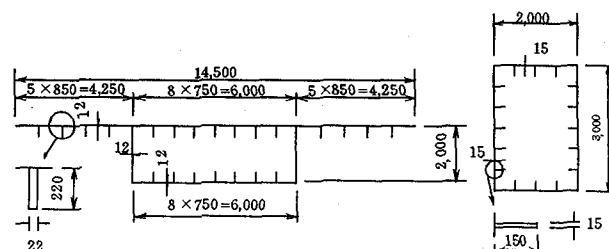


図-5 1段ケーブルの斜張橋モデルの主桁、および塔断面 (寸法単位:mm)

表-3 1段ケーブルの斜張橋の断面諸定数、および材料定数

項目	A_S (m^2)	I (m^4)	E (kgf/cm^2)	σ_Y (kgf/cm^2)
解析モデル				
塔	0.1860	0.2409	2.1×10^6	2,400
主桁	<1> 0.4005	0.2993	2.1×10^6	3,600
	<2> 0.4005	0.2993	2.1×10^6	2,400
ケーブル	0.0172	—	2.0×10^6	16,000

ここに、 A_S : 断面積 I : 断面二次モーメント
 E : ヤング係数 σ_Y : 降伏点

この鋼ケーブルを用いたモデル（以下、鋼ケーブル・モデルという）を基本にし、鋼ケーブルの代わりにハイブリッド・ケーブルを用いたモデル（以下、ハイブリッド・ケーブル・モデルという）を作成する。これらのモデルの主桁、および塔の断面諸寸法は、表-3に示す鋼ケ

ープル・モデルと同じものとする。

ハイブリッド・ケーブルには、鋼線と炭素繊維との組み合わせたものを用いた。また、この解析モデルでは、ハイブリッド・ケーブルを鋼線ケーブルと炭素繊維ケーブルとの2本に分離した。そして、これらが、それぞれ同一節点を結ぶ線に取り付けられているものと考え、解析モデルを作成した。また、これらの解析モデルでは、塔、および主桁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。

1 段ケーブルの斜張橋モデルで用いたハイブリッド・ケーブルでは、鋼線と4種類の炭素繊維との組み合わせを対象とした。すなわち、鋼線と炭素繊維 T400H、炭素繊維 M40J、炭素繊維 T700S、および炭素繊維 T300 との組み合わせのハイブリッド・ケーブルを用いた。ハイブリッド・ケーブルの断面設計は、式(1)～式(3)を用いて行った。また、断面設計において各材料の機械的性質は、表-1に示す値を用いた。

鋼ケーブル、および4種類のハイブリッド・ケーブルの設計断面積、および剛比を、表-4に示す。この表中の係数 γ は、次式で与えられるケーブルと桁との剛性の比を表すパラメーターである⁹⁾。すなわち、

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

ここに、 E_{cb} : ケーブルのヤング係数

ΣA_{cb} : 全ケーブルの断面積の合計

E_G : 主桁のヤング係数

I_G : 中央径間部の主桁の断面二次モーメント

L_T : 橋長

表-4 ケーブルの設計断面積(1 段ケーブルの斜張橋)

項目	鋼線の断面積 $A_s(\text{m}^2)$	炭素繊維の 断面積 $A_c(\text{m}^2)$	剛比 γ
ケーブル			
鋼ケーブル	0.0172	—	2.46×10^3
ハイブリッド・ケーブル			
鋼線 + T400H	0.0079	0.0048	2.01×10^3
鋼線 + M40J	0.0079	0.0048	2.46×10^3
鋼線 + T700S	0.0079	0.0044	1.86×10^3
鋼線 + T300	0.0079	0.0061	2.15×10^3

(2) 載荷荷重と解析方法

以上の1 段ケーブルの斜張橋の解析モデルに、死荷重 D 、活荷重 L_d 、およびケーブルのプレストレス PS とを次式にしたがって比例・漸増載荷し、終局限界状態に至るまでの挙動を追跡した。

$$L_a = \alpha (D + PS + L_d) \quad (6)$$

ここで、係数 α は、設計荷重に対する倍率を表す荷重パラメーターである。また、死荷重 D 、および活荷重 L_d の載荷方法、ならびに載荷荷重は、図-6、および表-5に示すとおりとした。なお、表-5には、死荷重 D 、およびプレストレス PS によるケーブル軸力も示している。

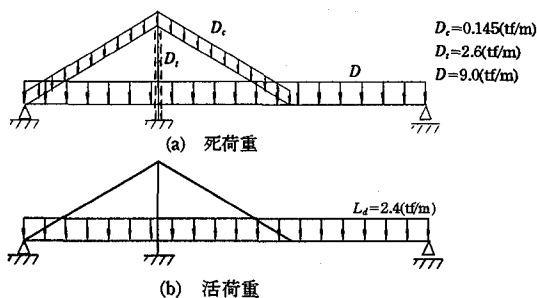


図-6 載荷方法(1 段ケーブルの斜張橋)

表-5 載荷荷重(1 段ケーブルの斜張橋)

項目 モデル	死荷重 $D(\text{tf/m})$	活荷重 $L_d(\text{tf/m})$	$D + PS(\text{tf})$
塔	2.6	—	—
主桁	9.0	2.4	—
ケーブル	0.145	—	875.0

(3) 解析結果と考察

鋼ケーブル・モデル、ハイブリッド・ケーブル・モデル、および、そのハザード状態におけるモデルに対して弾塑性有限変位解析を行った。また、ハイブリッド・ケーブル・モデルのケーブルについては、鋼線と4種類の炭素繊維との組み合わせを対象とした。

表-6には、終局限界状態におけるケーブルの引張応力を示している。図-7にはケーブルの引張力を、また図-8にはケーブル取付け点Pの主桁の鉛直方向変位を横軸にとり荷重パラメーターを縦軸にとってプロットしている。

表-6 終局限界状態において発生する引張応力

応力度 ケーブル	主径間側 (kgf/cm^2)		側径間側 (kgf/cm^2)	
	鋼線	炭素繊維	鋼線	炭素繊維
ハイブリッド・ケーブル				
鋼線 + T400H	$16,000 = \sigma_{YS}$	$32,334 < \sigma_{YC}$	$16,000 = \sigma_{YS}$	$30,605 < \sigma_{YC}$
鋼線 + M40J	$16,000 = \sigma_{YS}$	$34,641 < \sigma_{YC}$	$16,000 = \sigma_{YS}$	$33,198 < \sigma_{YC}$
鋼線 + T700S	$16,000 = \sigma_{YS}$	$29,696 < \sigma_{YC}$	$16,000 = \sigma_{YS}$	$27,571 < \sigma_{YC}$
鋼線 + T300	$16,000 = \sigma_{YS}$	$32,334 < \sigma_{YC}$	$16,000 = \sigma_{YS}$	$30,605 < \sigma_{YC}$
ハザード状態	$16,000 = \sigma_{YS}$	—	$14,762 < \sigma_{YS}$	—
鋼ケーブル	$16,000 = \sigma_{YS}$		$15,558 < \sigma_{YS}$	

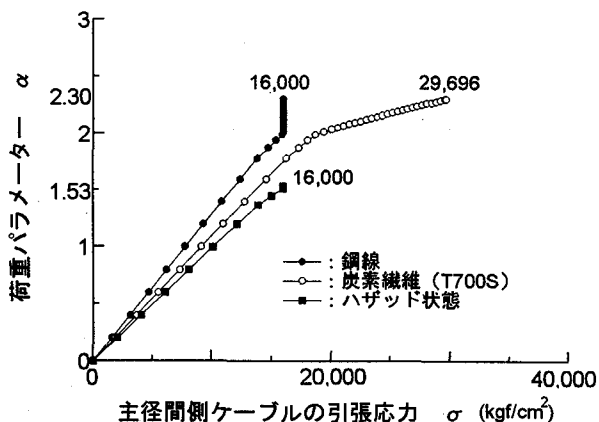


図-7 ケーブルの引張力-荷重パラメーター曲線(1 段ケーブルの斜張橋)

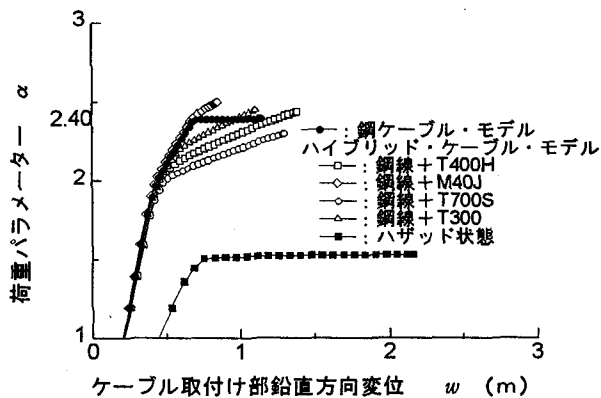


図-8 ケーブル取付け点Pの荷重パラメーター鉛直方向変位曲線（1段ケーブルの斜張橋）

以上の図表によると、弾塑性有限変位解析の結果、鋼ケーブル・モデルでは、主径間側のケーブルの降伏によって終局限界状態に至っている。これに対して、ハイブリッド・ケーブル・モデルでは、塔、および主桁がケーブルよりも先に全塑性状態となる。そして、ケーブルの炭素繊維は、まだ破断には至っていないことがわかる。さらに、4種類のハイブリッド・ケーブル、および鋼線を利用した5つの斜張橋モデルの3つの限界状態に対する荷重パラメーターを、表-7にまとめた。

表-7 ハイブリッド・ケーブル、および鋼ケーブルを斜張橋に適用した場合の各限界状態における荷重パラメーター（1段ケーブルの斜張橋）

項目	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	2.46×10^3	—	2.40	2.40
ハイブリッド・ケーブル 鋼線+T400H	2.01×10^3	1.53	2.31	2.44
鋼線+M40J	2.46×10^3	1.53	2.49	2.50
鋼線+T700S	1.86×10^3	1.53	2.03	2.30
鋼線+T300	2.15×10^3	1.53	2.39	2.45
期待する安全率		1.1	1.7	3.0*

*:ただし、ケーブルに対する安全率

上表によると、ハザード状態では、荷重パラメーターが $\alpha_R=1.53$ となった。この値は、設定した安全率である $\nu_R=1.1$ を大きく上回っている。これは、完成系とハザード状態におけるモデルとにおいて構造系が変化し、ハザード状態におけるモデルにおいて剛比を表すパラメーター γ が 1.13×10^3 と完成系の場合に比べて著しく低下したためと考えられる。また、降伏限界状態に対する荷重パラメーターは、それぞれ2.31、2.49、2.03、および2.39となり、設定した安全率 $\nu_Y=1.7$ を満たしている。

また、同表からわかるように、すべてのハイブリッド・ケーブル・モデルにおいては、主桁が安全率1.7で

設計されているのに対して、ケーブルが3.0の安全率で設計されているため、ケーブルよりも先に主桁の断面が全塑性状態に達して終局限界状態に至った。そのために、ハイブリッド・ケーブルのそれぞれの終局荷重パラメーター α_U が2.44、2.50、2.30、および2.45となった。このようにハイブリッド・ケーブル・モデルの終局荷重パラメーターが、鋼ケーブル・モデルの終局荷重パラメーター $\alpha_U=2.4$ に近い値となり、ハイブリッド・ケーブルに対して設定した終局限界状態の安全率 $\nu_U=3.0$ にまで達しなかった。

本研究で解析に用いた4種類のハイブリッド・ケーブルのうち、鋼線と炭素繊維T700Sとを組合わせたハイブリッド・ケーブル・モデルの終局荷重パラメーターのみが、鋼ケーブル・モデルの終局荷重パラメーターを下回っている。これは、鋼線と炭素繊維T700Sとを組合わせたハイブリッド・ケーブル・モデルでは、他の3つのハイブリッド・ケーブルモデルに比較して、ケーブルの剛比が鋼ケーブルよりもかなり小さく、主桁の分担する荷重が大きくなる。しかも、対象とした1段ケーブルの斜張橋モデルは、主桁がケーブルよりも先に全塑性状態に達して、終局限界状態に至っているためである。

また、同表によると、4種類のハイブリッド・ケーブルの終局荷重パラメーターは、剛比との関連が深いと考えられる。これは、ハイブリッド・ケーブルのケーブル断面を設計するときに、荷重分担を考慮せず、材料の引張強度、および剛性のみに着目したためであると考えられる。

4.2 3段ケーブルの斜張橋

(1) 解析モデル

図-9には、ここで検討対象とした3段ケーブルの斜張橋で、鋼ケーブルを用いたモデルを示す⁷⁾。このモデル橋は、道路橋示方書⁸⁾にしたがって設計された斜張橋である。また、主桁、および塔の安全率は、1.7で設計されている。

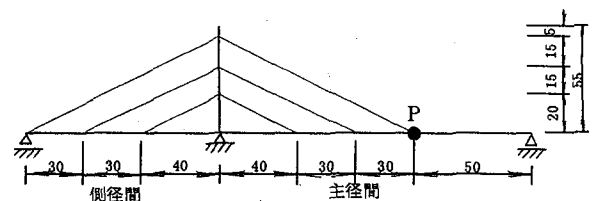


図-9 3段ケーブルの斜張橋モデル(寸法単位:m)

ただし、主桁断面は、この斜張橋の終局強度がケーブルによって決定されるように、図-5に示した1段ケーブルの斜張橋の断面と同じ断面、すなわちこのモデルの場合、若干、大きな断面を用いた。また、塔、主桁、ならびにケーブルの断面諸定数、および材料定数を、表-8に示す。

表- 8 3段ケーブルの斜張橋モデルの断面諸定数、および材料定数

項目	A (m ²)	I (m ⁴)	E (kgf/cm ²)	σ _Y (kgf/cm ²)
解析モデル				
塔	<1> 0.2010	0.2595	2.1×10 ⁶	3,600
	<2> 0.2640	0.3365	2.1×10 ⁶	3,600
	<3> 0.3500	0.4386	2.1×10 ⁶	3,600
主桁	0.4005	0.2993	2.1×10 ⁶	3,600
ケーブル	上段 0.0195	—	2.0×10 ⁶	16,000
	中段 0.0153	—	2.0×10 ⁶	16,000
	下段 0.0153	—	2.0×10 ⁶	16,000
ここに、 A : 断面積 I : 断面二次モーメント E : ヤング係数 σ _Y : 降伏点				

鋼ケーブル・モデルを基本とし、鋼ケーブルに代わり、ハイブリッド・ケーブルを用いたハイブリッド・ケーブル・モデルを作成した。このハイブリッド・ケーブル・モデルの主桁、および塔の断面寸法は、鋼ケーブル・モデルと同一とした。

また、これらの解析モデルでは、塔、および主桁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。

鋼ケーブル・モデルの弾塑性有限変位解析の結果、このモデルの各ケーブルの降伏荷重パラメータには、ばらつきがあった。そのため、すべてのケーブルの安全率が、ほぼ 2.5 となるように各断面を、若干、修正してみた。このようにケーブルの断面を修正したモデルを、鋼ケーブル修正モデルとした。鋼ケーブル修正モデルの各ケーブルの断面積を、表- 9 に示す。この鋼ケーブル修正モデルの終局荷重パラメータ α_U は、2.55 となった。

表- 9 鋼ケーブル修正モデルのケーブルの断面積、および材料定数(3 段ケーブルの斜張橋)

項目	A _S (m ²)	E (kgf/cm ²)	σ _Y (kgf/cm ²)
解析モデル			
ケーブル	上段 0.0154	2.0×10 ⁶	16,000
	中段 0.0163	2.0×10 ⁶	16,000
	下段 0.0116	2.0×10 ⁶	16,000
ここに、 A _S : 断面積 E : ヤング係数 σ _Y : 降伏点			

ここで、3 段ケーブルの斜張橋モデルで用いたハイブリッド・ケーブルでも、鋼線と 4 種類の炭素繊維との組み合わせを対象とした。すなわち、鋼線と炭素繊維 T400H、炭素繊維 M40J、炭素繊維 T700S、および炭素繊維 T300 との組み合わせのハイブリッド・ケーブルを用いた。

鋼ケーブル、および 4 種類のハイブリッド・ケーブルの設計断面積、および剛比を、表- 10 にまとめた。

表- 10 ケーブルの設計断面積、および剛比(3 段ケーブルの斜張橋)

ケーブルの種類		鋼線の 断面積(m ²)	炭素繊維の 断面積(m ²)	剛比 γ
鋼ケーブル		上段	—	7.17×10 ³
		中段	—	
		下段	—	
ハイブリッド・ケーブル	鋼線＋ T400H	上段	0.0042	4.87×10 ³
		中段	0.0044	
		下段	0.0031	
	鋼線＋ M40J	上段	0.0042	5.96×10 ³
		中段	0.0044	
		下段	0.0031	
	鋼線＋ T700S	上段	0.0037	4.50×10 ³
		中段	0.0040	
		下段	0.0028	
	鋼線＋ T300	上段	0.0052	5.19×10 ³
		中段	0.0055	
		下段	0.0039	

(2) 載荷荷重と解析方法

上で示した 3 段ケーブルの斜張橋の解析モデルに、死荷重 D と活荷重 (L_c 、および L_d)、およびプレストレス PS とを比例・漸増載荷し、終局限界状態に至るまでの挙動を追跡した。死荷重 D 、ならびに活荷重 L_c 、および L_d の載荷方法、ならびに載荷荷重を、図- 10、および表- 11 に示すように設定した。なお、表- 11 には、死荷重 D 、およびプレストレス PS によるケーブル軸力も示している。

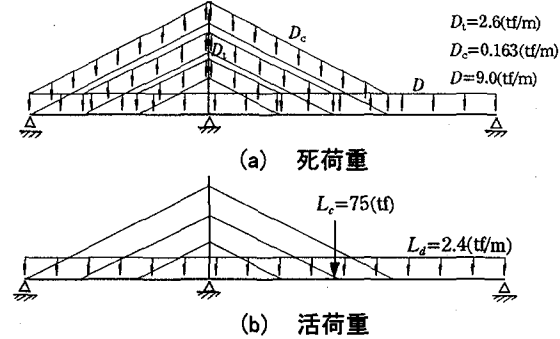


図- 10 載荷方法(3 段ケーブルの斜張橋)

表- 11 載荷荷重(3 段ケーブルの斜張橋)

項目	死荷重 D (tf/m)	活荷重		D + PS (tf)
解析モデル		L _c (tf)	L _d (tf/m)	
塔	2.6	—	—	—
主桁	9.0	75.0	2.4	—
ケーブル	上段 0.163	—	—	805.0
	中段 0.129	—	—	604.0
	下段 0.129	—	—	705.0

(3) 解析結果と考察

鋼ケーブル・モデル、ハイブリッド・ケーブル・モデル、および、そのハザード状態におけるモデルに対して弾塑性有限変位解析を、実施した。

4種類のハイブリッド・ケーブル、および鋼線を用いた斜張橋の挙動を比較するため、表-12には3つの限界状態における荷重パラメーターを、図-11にはケーブルの引張応力と荷重パラメーターとの関係を、また図-12にはケーブル取付け点Pの主桁の鉛直方向変位と荷重パラメーターとの関係を示す。

表-12 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各限界状態における荷重パラメーター (3段ケーブルの斜張橋)

項目 ケーブル	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	7.17×10^3	—	2.76	2.84
ハイブリッド・ケーブル				
鋼線+T400H	4.87×10^3	1.41	1.89	2.75
鋼線+M40J	5.96×10^3	1.41	2.15	2.70
鋼線+T700S	4.50×10^3	1.41	1.81	2.77
鋼線+T300	5.19×10^3	1.41	1.89	2.77
期待する安全率		1.1	1.7	3.0*

*: ただし、ケーブルに対する安全率

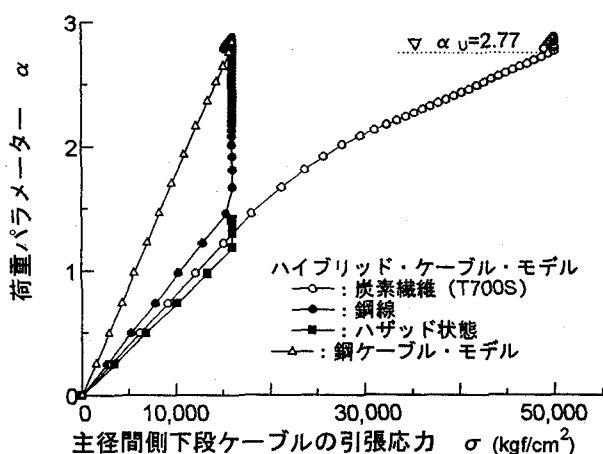


図-11 ケーブルの引張応力-荷重パラメーター曲線 (3段ケーブルの斜張橋)

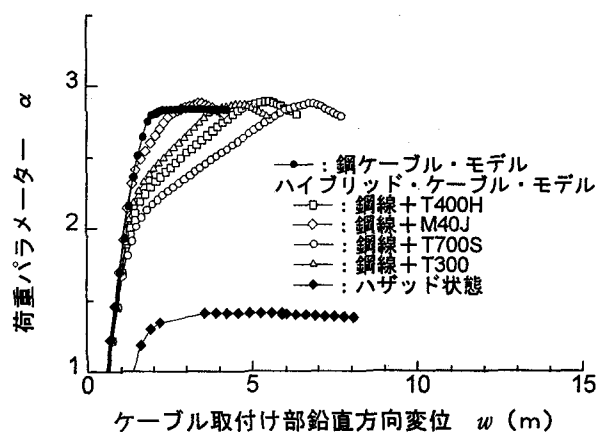


図-12 ケーブル取付け点Pの荷重パラメーター-鉛直方向変位曲線 (3段ケーブルの斜張橋)

これらの図表によると、ハザード状態では、荷重パラメーターが $\alpha_R=1.41$ となっている。そして、1段ケーブルの斜張橋の場合と同様に、この値は、設定した安全率である $\nu_R=1.1$ を大きく上回っている。これは、完成系とハザード状態におけるモデルとにおいて構造系が変化し、ハザード状態におけるモデルのケーブルの剛比を表すパラメーター γ が 2.73×10^3 と完成系の場合に比べて著しく低下したためと考えられる。

降伏限界状態では、適用した4種類のハイブリッド・ケーブルすべてにおいて、降伏荷重パラメーター α_Y がケーブルの降伏限界状態に対して設定した安全率 $\nu_Y=1.7$ を満たしていることがわかる。そして、終局荷重パラメーター α_U は、鋼ケーブル・モデルの終局荷重パラメーター $\alpha_U=2.84$ にほぼ等しい。また、炭素繊維の破断が、終局限界状態に至らせしめている。これは、3段ケーブルの斜張橋モデルでは、橋梁全体の終局強度がケーブルによって決定されるように、主桁断面に大きなものを採用しているためである。

また、降伏限界状態では、主径間側の中段ケーブル、または下段ケーブルの鋼線が降伏していた。一方、終局限界状態では、側径間側の下段ケーブルの炭素繊維が破断し、終局限界状態に至っていた。この状態でも、主径間側の上段ケーブルの炭素繊維は、破断に至らなかった。これは、死荷重、および活荷重を増やしてゆくと、塔が主径間側に傾き、そのために主径間側の上段ケーブルの分担荷重が低下したためであると考えられる。

このように、3段ケーブルの斜張橋モデルでは、終局限界状態が側径間側の最下段ケーブルで決まっているため、このケーブルの断面積をもう少し大きくすることによって、終局荷重パラメーターを効率よく引き上げることができるものと考えられる。

そこで、表-12より、剛比と終局荷重パラメーターとを比較すれば、ハイブリッド・ケーブル・モデルにおいては、終局荷重パラメーターの差異は見られなかった。

これは、1段ケーブルの斜張橋と異なる傾向を呈しているためである。すなわち、1段ケーブルの斜張橋モデルでは、ケーブルの強度が十分に発揮できず、ケーブルより先に主桁、および塔が降伏し終局限界状態に至った。そのために、伸び剛性の大きいケーブルを用いた方が、主桁が分担する荷重が少なくなり、終局荷重パラメーターが大きくなった。しかし、3段ケーブルの斜張橋モデルでは、ハイブリッド・ケーブルの引張強度が、十分発揮できたためであると考えられる。

また、以上の図表よりわかるように、3段ケーブルの斜張橋モデルで設定したすべてのハイブリッド・ケーブル・モデルの場合、終局限界状態においては、鋼線を用いたモデルよりも、鋼線が降伏したのち、大きな変位が生じている。これは、ハイブリッド・ケーブルの伸び剛性が鋼線に比べて小さくなり、そのために橋梁全体のたわみ剛性が低下したためと考えられる。

4.3. 剛比と斜張橋の橋長との関係

図-13には、斜張橋の橋長と剛比との関係を示す。

また、図中の直線は、国内の調査結果を最小2乗法により近似されたもので、次式で与えられる⁹⁾。

$$\log \gamma = 3.52 + 2.75 \times 10^{-3} L_T \quad (7)$$

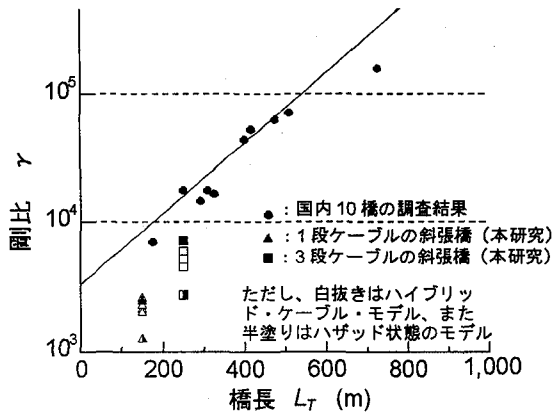


図-13 斜張橋の橋長と剛比の関係⁹⁾

この図によると、今回の検討に適用した鋼ケーブル・モデルのケーブル剛比は、既存の斜張橋の剛比と大きく異なることがわかる。しかし、ここで対象としたハイブリッド・ケーブルの斜張橋モデルの剛比は、鋼ケーブルの斜張橋と比較すると、若干、小さいことがわかる。

4.4. ニールセン・ローゼ橋

(1) ニールセン・ローゼ橋の解析モデル

図-14には、支間長が254mで、ケーブル本数が1アーチ構面内で39本のニールセン・ローゼ橋の解析モデル^{10) 11)}を示す。また、この解析モデルのアーチリブ、および補剛桁の断面を、図-16に示す。

また、このモデルのアーチリブ、および補剛桁は、安全率1.7で設計されている。

さらに、道路橋示方書によると、ニールセン・ローゼ橋の鋼ケーブルの安全率は疲労を考慮して $\nu=3.5$ とされている。いま、鋼ケーブルの安全率が2.5のとき、ハイブリッド・ケーブルの安全率は3.0に設定している。したがって、ニールセン・ローゼ橋のハイブリッド・ケーブルの安全率は $4.2 (=3.5 \times 3.0 / 2.5)$ とした。

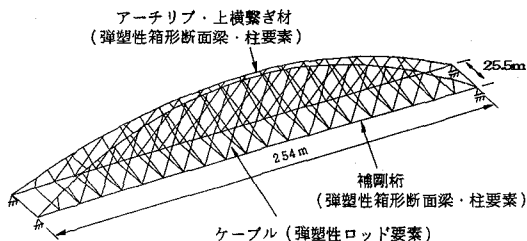


図-14 ニールセン・ローゼ橋の解析モデル
(ケーブル本数39本)

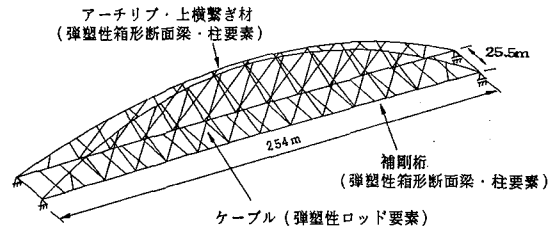


図-15 ニールセン・ローゼ橋の解析モデル
(ケーブル本数24本)

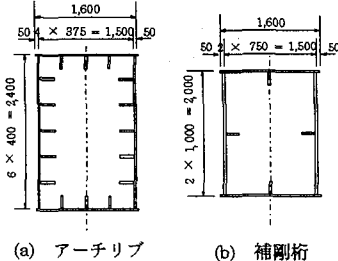


図-16 アーチリブ、および補剛桁の断面(寸法単位:mm)

このニールセン・ローゼ橋を基本にして、以下の4種類の解析モデルを作成した。すなわち、①解析モデルのケーブルに鋼線を用いた鋼ケーブル・モデル、②ハイブリッド・ケーブルを用いたハイブリッド・ケーブル・モデル、③ハイブリッド・ケーブルを用いたモデルのハイブリッド・ケーブル中の鋼線の断面積を1/2に減らし、その強度低下分だけ炭素繊維、あるいはアラミド繊維を増加させて断面を設計したハイブリッド・ケーブル1/2モデル、ならびに④ニールセン・ローゼ橋のケーブル本数を24本に減少させた図-15に示すケーブル本数減少モデルの4つを作成した。また、炭素繊維には、T700Sを用いた。

なお、これらの解析モデルでは、アーチリブ、上横繫ぎ材、および補剛桁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) 載荷荷重と解析方法

このニールセン・ローゼ橋の解析モデルに、死荷重 D と活荷重 P 、および p とを比例・漸増載荷し、終局限界状態に至るまでの挙動を追跡した。死荷重 D 、および活荷重 P 、および p の載荷方法は、図-17に示すように設定した。

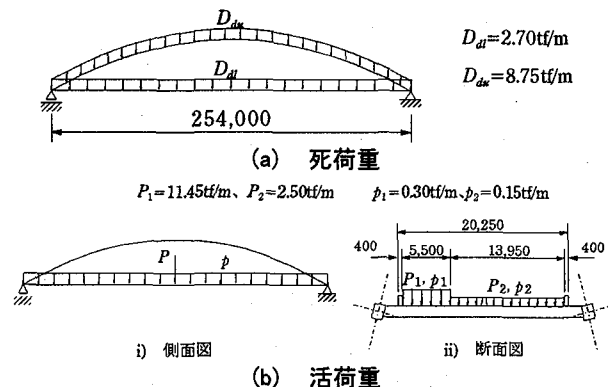


図-17 載荷方法(ニールセン・ローゼ橋)(寸法単位:mm)

表- 13 ハイブリッド・ケーブル、および鋼ケーブルを用いたニールセン・ローゼ橋の断面諸定数と終局荷重パラメーター

モデル	項目	鋼線の断面積 $A_s(\text{cm}^2)$	新素材の断面積 $A_n(\text{cm}^2)$	伸び剛性 $EA(\times 10^6 \text{kgf})$	終局荷重パラメーター α_u
鋼ケーブル・モデル		21.17	—	42.34	2.32
・ハイブリッド・ケーブル・モデル					
鋼線+炭素繊維		9.314	5.149	30.73	2.29
鋼線+アラミド		9.314	10.144	28.77	2.28
ハザード状態(鋼線のみ)		9.314	—	18.63	2.13
・ハイブリッド・ケーブル1/2モデル					
鋼線(1/2)+炭素繊維		4.658	6.639	24.92	2.28
鋼線(1/2)+アラミド		4.658	19.456	28.77	2.29
ハザード状態(鋼線1/2のみ)		4.658	—	9.32	1.29
・ケーブル減少モデル					
鋼線+アラミド		9.314	10.144	28.77	2.12
ハザード状態(鋼線のみ)		9.314	—	18.63	1.61

(3) 解析結果とその考察

4 種類の解析モデルの挙動を比較するために、図- 18 にはアーチクラウンの荷重パラメーター橋軸直角方向変位曲線を、また表- 13にはハイブリッド・ケーブル、および鋼ケーブルを用いたニールセン・ローゼ橋の断面諸定数と終局荷重パラメーターを示す。

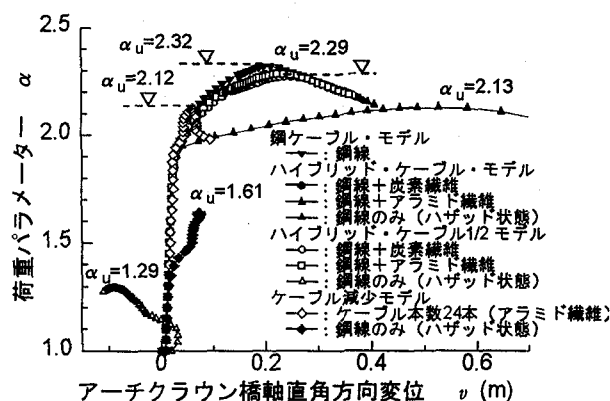


図- 18 アーチクラウンの荷重パラメーター橋軸直角方向変位曲線(ニールセン・ローゼ橋)

これらの図によると、ハイブリッド・ケーブル・モデルと鋼ケーブル・モデルとを比較すれば、終局荷重パラメーター、およびアーチクラウンの橋軸直角方向変位 v については、あまり差異が見られなかった。これは、ニールセン・ローゼ橋の場合、ケーブルの伸び剛性の終局強度に与える影響が少ないためであると考えられる。また、ハイブリッド・ケーブル・モデルのハザード状態においては、荷重パラメーターが $\alpha_R=2.13$ と設定した安全率 $\nu_R=1.1$ を大きく上回る結果となった。

ハイブリッド・ケーブル 1/2 モデルについては、鋼線と炭素繊維、および鋼線とアラミド繊維とを組み合わせた場合の終局荷重パラメーター α_u が、それぞれ 2.29、および 2.28 となり、鋼ケーブル・モデルとの差異が見られなかった。また、ハイブリッド・ケーブル 1/2 モデルの

挙動については、鋼ケーブル・モデルの挙動とあまり著しい変化が見られなかった。しかし、ハザード状態については、図- 18によると、このハイブリッド・ケーブル 1/2 モデルの変形モードが他のモデルと異なり、荷重パラメーターが $\alpha_R=1.29$ となった。しかし、ハザード状態に対して設定した安全率 $\nu_R=1.1$ を、満たしている。

また、ケーブル減少モデルの終局荷重パラメーターについては、鋼ケーブル・モデルの終局荷重パラメーターが $\alpha_u=2.32$ からわずかに低下し、 $\alpha_u=2.12$ となった。これは、アーチリブ、補剛桁、および上横繋ぎ材の断面については、ケーブル本数 39 本のニールセン・ローゼ橋モデルの断面をそのまま用いたために、終局強度が低下したものと考えられる。

5. まとめ

本研究においては、鋼線と炭素繊維、あるいは鋼線とアラミド繊維とからなるハイブリッド・ケーブルの断面を、①降伏限界状態、②終局限界状態、および③新素材が破断するハザード状態に対して、それぞれ 1.7、3.0、および 1.1 の安全率を設定して設計し、それらを斜張橋、およびニールセン・ローゼ橋へ適用した場合の得失について、弾塑性有限変位解析によって検討した。

本研究で得られた主な結論をまとめると、以下に示すとおりである。

(1) 斜張橋に適用した場合

i) 斜張橋においては、完成系とハザード状態における構造系とが異なる。そのために、ハザード状態においては、完成系に比較して、ケーブルの荷重分担が低下し、荷重パラメーター α_R が期待する 1.1 を大きく上回り、1.53 (1 段ケーブルの斜張橋モデル)、および 1.41 (3 段ケーブルの斜張橋モデル) も確保できる結果となった。したがって、ハザード状態の安全率を $\nu_R=1.1$ からもう少し大きくして、供用者に安心感を与える方向

で、ハイブリッド・ケーブルを有効利用する設計方法も考えられる。

ii)(1)のi)のことを踏まえて、降伏限界状態、終局限界状態、およびハザード状態における安全率の再検討を、行う必要がある。

iii)主桁の強度で橋梁の終局強度が定まる場合には、剛比が大きい、すなわち荷重分担率の高いハイブリッド・ケーブルを用いた方が主桁に作用する分担荷重が小さくなり、橋梁全体の終局強度が向上することがわかった。

iv)ハイブリッド・ケーブルの炭素繊維の破断によって橋梁の終局強度が定まる場合、橋梁全体の終局強度は、剛比にほとんど影響されない。しかし、終局限界状態においては、剛比の高いハイブリッド・ケーブルを用いる方が主桁、および塔の変位が小さくなり、有利であることがわかった。

v)本研究で用いたハイブリッド・ケーブルの鋼線と炭素繊維との断面積比を決定するためには、鋼線、および炭素繊維の材料としての引張強度、および剛性のみならず、斜張橋に用いた場合の荷重分担率についても、考慮する必要があることがわかった。

vi)ハイブリッド・ケーブルを用いる斜張橋の場合、終局限界状態において安全率 3.0 で設計するケーブルが安全率 1.7 で設計する主桁と同時に破断するか、あるいは破断に近い状態に至るように、今後、鋼ケーブルの斜張橋に比してケーブル本数を増し、主桁断面を小さくするなどして、ケーブル剛比を、ここで検討した値よりも大きくする工夫が必要である。

(3)ニールセン・ローゼ橋に適用した場合

i)道路橋示方書の考え方にしたが、疲労を考慮して、ハイブリッド・ケーブルの設計安全率を $4.2(=3.5 \times 3.0/2.5)$ とした。解析の結果、鋼ケーブル、およびハイブリッド・ケーブルのいずれを採用しても、アーチリブによって終局強度が決定されるため、橋梁全体の終局強度は、ほとんど変化がなかった。したがって、ハイブリッド・ケーブルの設計安全率は、たとえ疲労を考慮したとしても、もうすこし低減できる可能性があることがわかった。

ii)ニールセン・ローゼ橋にハイブリッド・ケーブルを適用した場合は、ケーブル剛性のニールセンローゼ橋の終局強度に及ぼす影響が少ないために、ハイブリッド・ケーブル中の鋼線の断面積を 1/2 に減らしたハイブリッド・ケーブルについても適用可能であることが明らかとなった。

(4)以上のことより、ハイブリッド・ケーブルの橋梁への適用は、十分に可能であると考えられる。

本研究では、新素材の強度と剛性ととの発現率が 100% のハイブリッド・ケーブルが製作できるとの前提のもとに、ハイブリッド・ケーブルの斜張橋、およびニールセン・ローゼ橋への適用の可能性について主に耐荷力の面から検討を加えた。しかしながら、ハイブリッド・ケーブルを用いた斜張橋、およびニールセン・ローゼ橋を実現するためには、今後、以下の諸点について、検討する必要がある。すなわち、①発現率の高いハイブリッド・ケーブルの製法、②定着構造、③疲労強度、④クリープ特性、⑤運搬法、および⑥炭素繊維を用いたハイブリッド・ケーブルの場合の電食の問題などである。

なお、本研究は、平成 8～9 年度に文部省科学研究費補助金・基礎研究(B)(1) (代表者：中井 博)としての研究補助を受けて行ったものであることを付記する。

参考文献

- 1)奥川淳志：新素材を使った吊橋のケーブル、海峡横断、第 2 号、(財)海洋架橋調査会、pp.16～pp.17、1995 年 7 月
- 2)Links to a Tee : New Civil Engineer, 13, pp.20～pp.23 August 1992
- 3)COMPOSITE CABLES, Carbon fibre has staying power, Bridge design & engineering, Vol.1, No.1, pp.35～pp.36, January, 1996
- 4)北田俊行・大南亮一・丹生光則・田中克広：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の開発、構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、第 13 巻、日本鋼構造協会、pp.89-94、1989 年 7 月
- 5)高性能炭素繊維トレカ、商品資料、PD-YN3、1991 年 11 月
- 6)中井 博・北田俊行・三田村 武・石坪高典：橋梁用ハイブリッド・ケーブルの開発に関する基礎的研究、平成 7 年度土木学会関西支部年次学術講演会・講演概要集、pp.1-79-1～2、平成 7 年 5 月 20 日
- 7)北田俊行・野口二郎・丹生光則・狩野正人：鋼斜張橋の耐荷力解析におけるプレストレスの取扱いに関する一考察、鋼構造工学における数値的解析法シンポジウム論文集、第 18 巻、日本鋼構造協会、pp.371～376、1994 年 6 月
- 8)(社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、I 共通編、II 鋼橋編、平成 8 年 12 月
- 9)(社)建設コンサルタンツ協会・近畿支部：斜張橋の実績調査報告、pp.30～pp.31、昭和 57 年 8 月 1 日
- 10)阪神高速道路公団：新浜寺大橋工事誌(4号湾岸線)、平成 5 年 12 月
- 11)阪神高速道路公団・(財)災害科学研究所：新浜寺大橋を用いたパラメトリック解析結果、平成 5 年 3 月

(1997 年 9 月 26 日受付)