

調査と研究⑦

橋梁新素材に関する検討

Examination of New Materials for Long Bridge

橋梁小委員会*

1. 新素材の動向調査

日韓トンネル・呼子～沓岐間架橋計画案では、海峡部を世界最大級の吊橋で結ぶ計画が進められている。この規模の吊橋は死荷重占有率が80～90%と高く、より長大支間の橋梁を考えるには、主構造材の軽重化、高強度化が必要な条件となる。

本業務では、主ケーブル等の主要構造材について、新素材の動向を調査し、適用性を検討する。

1.1 金属材料

現在、本四連絡橋公団で架設中の吊橋は、主ケーブル材料として破断強度 $160\text{kg}/\text{mm}^2$ 、許容応力度 $64\text{kg}/\text{mm}^2$ の鋼線を使用している。構造材では、80キロ鋼 (HT80) $\sigma_y=7,000\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $\sigma_{ta}=3,600\text{kg}/\text{cm}^2$ までの鋼材が使用されている (表1)。

鋼材・鋼線メーカーでは、ケーブル材料として大径高強度鋼線の開発が進められており、引張り強度 $200\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上の亜鉛メッキ冷間線引き鋼線の製造が可能となっている。

鉄鋼材料は、実績、経済性から、今後も吊橋ケーブル材料として研究開発が進むものと考えられる。

鉄鋼材料の高強度の可能性と高張力鋼とじん性について図1、図2に示す。

吊橋主構造材は、単に強さだけでなく、軽くて強い材料が必要である。比強度 (強度/比重) で評価する場合、比重は、ベース金属によって決定されるため、鉄鋼材料は約7.8と不利である。

チタン合金は比重約4.5、アルミニウム合金では約2.7であり、鉄鋼材料と等強度を得るには、チタン合金約1/2、アルミニウム合金約1/3の強度で良いことになる。しかしながら、現時点での他の合金の価格は非常に高く、比強度当たり価

表1 大径亜鉛メッキ鋼線

強度 グレード	サイズ (mm)	0.7% 耐力 (kgf mm ²)	引張強さ (kgf mm ²)	伸び(%) GL=250mm	ヤング率 (kgf mm ²)	捻回値 (回)100d	3d巻付 (8回)	付着量 (g m ²)
180kgf mm ² 級	7.00	≥ 133	180 195	≥ 0.4	20,500	≥ 14	良	≥ 300
190kgf mm ² 級	6.00	≥ 140	190 205	≥ 4.0	20,500	≥ 14	良	≥ 300
200kgf mm ² 級	5.00	≥ 146	200 215	≥ 4.0	20,500	≥ 14	良	≥ 300
HBS G3501規格	5.00	≥ 118	160 180	≥ 4.0	—	≥ 14	良	≥ 300

*委員長、川崎偉志夫 (日本鋼管(株)重工事業部顧問)

格でも表2に示す様に、かなり高いといえる。

1.2 非金属新素材

非金属新素材の開発は近年非常に進み、鋼材以上の強度を有する高分子化学材料も数多く出現している。また金属材料に比べ比重が小さいため、比强度的に有利であることから、鋼材に換る材料として量産、使用され始めている。

表2 主要構造用材料の経済性の比較

材 料	強度(MPa)	比重	比強度当たりの価格
鉄 鋼	400	7.9	1.8
Al 合金	300	2.7	7.0
Ti 合金	600	4.5	30
セメント	(圧縮)18	2.3	0.8
Al ₂ O ₃ セラミックス	(圧縮)3800	3.9	7.2**
ポリプロピレン	35	0.9	6.9

* (kg当たりの価格) (強度、比重)
 ** 研磨費を含まず〔須藤一著：材料システム学、内田老鶴圃、(1986) p.23〕

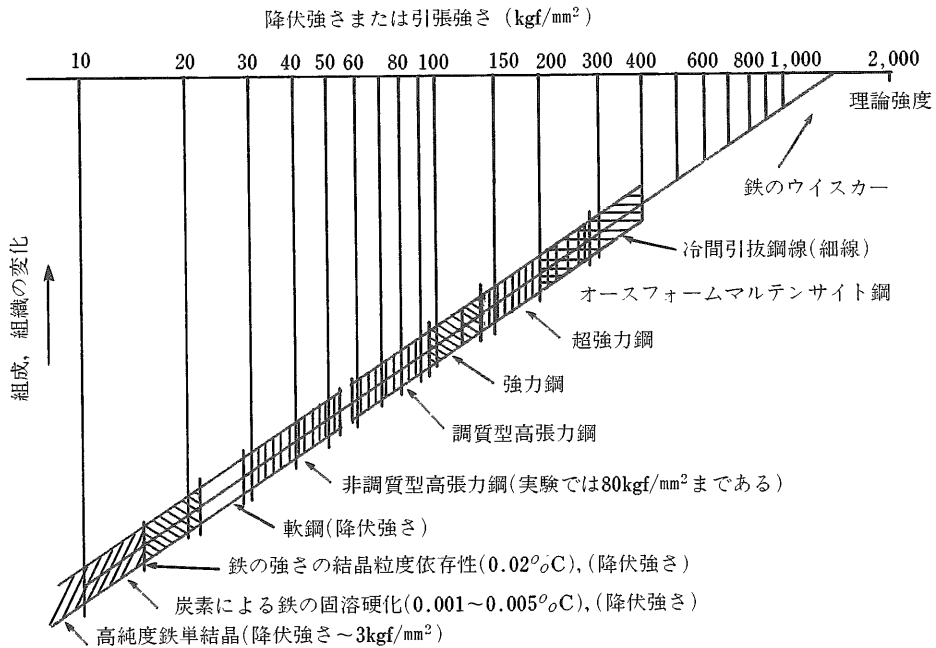


図1 鉄鋼材料の強度

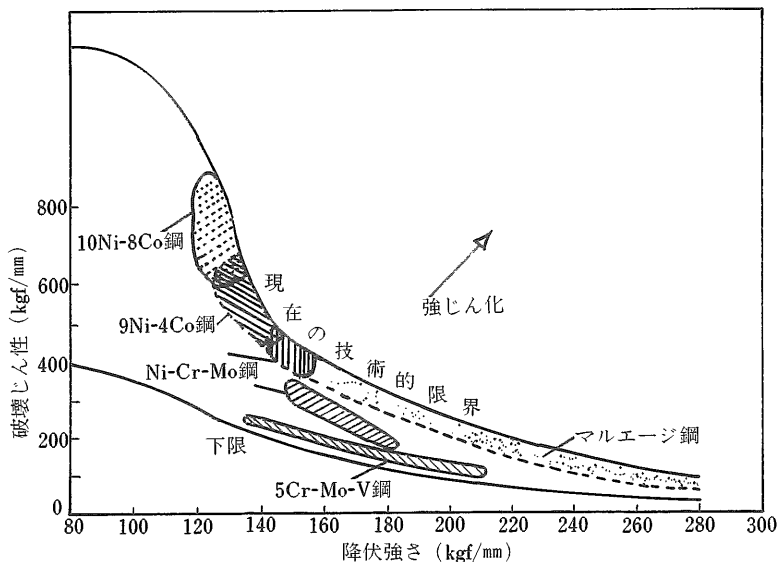


図2 超強力鋼の強度とじん性の関係

吊橋のケーブル材料としては、引張強さと同時に適度な延性と加工性が必要である。現在、ロープ・ケーブル用材料としてデュポン社のケブラー®(アラミド繊維)が有名で、既にワイヤーロープに変わる材料として量産・使用されている。炭素系その他の各種繊維は、強度特性等で既にケブラー繊維を上回るものも開発されているがロープケーブル材料として生産されているものは少ない。

1.3 長大橋への適用性

金属材料に比して、非金属材料は比重が小さく、従って同一強度でも比強度が高いのが特徴である。こうした材料は、長大橋のように自重の占める割合が大きい構造物には有利である。また、高耐食性であることも大きい利点である。特に、炭素繊維を使った強化プラスチック(CFRP)や芳香族ポリアミド繊維を使った強度プラスチック(ケブラー)は軽量高強度材料という点においてその代表例であり、近い将来、長大橋に使用され得ると考えられる。

現時点での問題点は、大量使用の場合のコスト

表3 各種繊維の特性

名 称	商 品 名	メ ー カ ー	比 重	直 径 (μ)	強 度 (kg/mm^2)	弾性率 (kg/mm^2)		
炭 素 繊 維	GRAFIL AS	COURTAULOS	1.82	9	270	19400		
	XAS		1.82		326	23500		
	パイロファイル HTS	三菱レイヨン	1.77		300	24000		
	HMS		1.87		260	34000		
	トレカ	T-300	東 雷	1.74	8	280	24000	
		T-400		1.74		420	24000	
		M-40		1.84		210	40000	
	カーボン	Z-2	日本カーボン	1.73	6	300	20000	
		Z-3		1.77	8	280	23000	
	ベスファイト	HT	東邦ベスロン	1.77	7	310	24000	
		ST		1.77		7	350	24000
		HM		1.82		6.6	250	35000
	マグナマイト	AS-4	住化-ハーキュレス	1.77	7-9	315	22500	
		HMS-4		1.85		240	35000	
		HTS-4		1.66		295	27000	
MCF-A		1.80		270		22000		
ボロン	B-W	AVCO BORON	AVCO(米)	2.6	100	350	40000	
シリコン カーバイド	SiC-W	SiC Filament ニカロン	SNPE(仏)	3.4	100	330	45000	
	SiC		日本カーボン	2.5	10	250	18000	
アルミナ	Al_2O_3	SAPHICON	TYCO(米)	4.0	250	240	46000	
		SAFFIL	ICI	3.4	3	100	10000	
		NEXTEL	3 M	2.5	11	175	15000	
		住化アルミナ	住友化学	3.2	9	250	25000	
		Fiter F P	DUPONT	3.9	19	220	39000	
シリカ	SiC_2	Astroquartz	J.P.Stevens	2.2	9	70	7000	
			(米)	2.2	0.8	650		
				2.2	10	420		
芳香族系	KEVLAR-29 KEVLAR-49	DUPONT	1.44	12	280	6350		
			1.45	12	280	13300		
ガ ラ ス	E S		2.54	10	250	7700		
			2.48	10	350	8900		

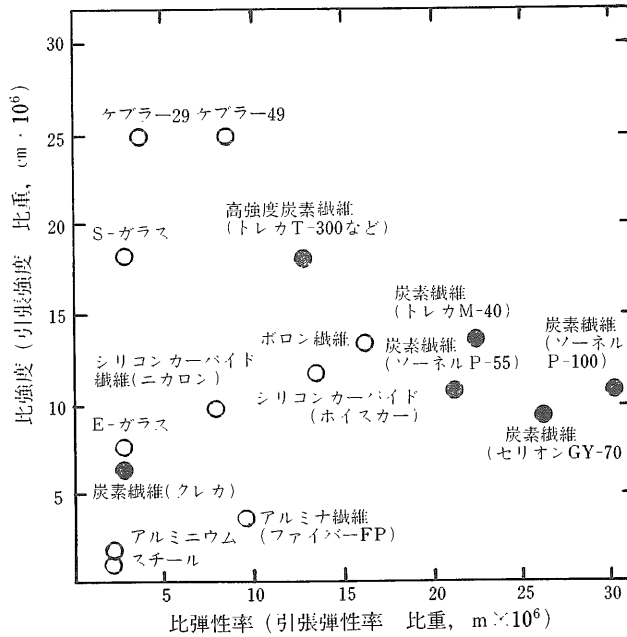


図3 各種繊維の比強度及び比弾性率

表4 代表的な繊維材料の特性比較

材 料 名	タイプ又は組成	密 度 〔g cm ³ 〕	繊維直径 〔μm〕	引張り強度 〔kg・mm ² 〕	最高使用温度 〔℃〕
カーボン繊維	PANベースHT	1.70~1.77	7~9	270~340	} 3650
	" HM	1.82~1.87	7~9	210~250	
	ピッチベース	2.0~2.1	5~10	200	
アラミド系繊維	ケブラー-29 (R)	1.44	12	250	262
	ケブラー-49 (R)	1.45	12	340	260
	HM-40 (R)	1.39	12	300	—
ボロン繊維	B, W	2.57	140	380	2300
ガラス繊維	Eガラス	2.6	8~12	340	700
	Sガラス	2.55	8~12	440	840
炭化ケイ素系繊維	SiC W	3.5	100	340	} 2690
	SiC	2.55	10~15	290	
アルミナ繊維	α 単結晶質	3.9	250	235	} 2040
	α 多結晶質	3.4	3	100	
	α "	3.9	20	140	
	γ "	3.2	17	250	
金 属 繊 維	タングステン	14.9	10	390	3400
	モリブデン	10.2	25	220	2620
	鋼	7.74	13	430	1400
セラミックスウイスキー	α-アルミナ	3.96	3~10	1960	2040
	炭化ケイ素	3.18	1~3	1960	2690
	B ₄ C	2.52	—	240	—
カーボンウイスキー	グラファイト	2.2	0.1~1	1960	—
金属ウイスキー	クロム	7.2	—	880	—
	鉄	7.8	—	1010	1540
	銅	8.9	—	170	—

が非常に高いことと、大断面構造の製作が困難であるという点であろう。

既に、海外の報文によれば、ジブラルタル海峡の横断橋計画や、廃案にはなっているがドーバー海峡の横断橋計画にCFRPを使用することにより超長大支間の橋梁を可能とする案も提案されている現状である。

2. 新素材ケーブル

長大吊橋の主ケーブルに、新素材ケーブル（ケブラー）を使用した場合のケーブル径およびアンカレイジに作用する水平力を、鋼ケーブル使用の場合と対比して試算する。

2.1 許容引張応力の仮定

鋼ケーブルの許容引張応力度（ σ_{ta} ）は、引張強度 160kg/mm^2 を安全率2.5で除して、 $\sigma_{sa}=64\text{kg/mm}^2$ とする。

ケブラーの許容引張応力度（ σ_{ka} ）は、鋼ケーブルの伸びと同程度の伸びを許すものとして、許容引張応力を仮定するものとし、次式により求める。

$$\sigma_{ka} = \sigma_{kmax} \times \frac{1}{fs} \times \frac{Ek}{Es}$$

ここに、 σ_{kmax} : ケブラーの引張強度

($= 28,000\text{kg/cm}^2$)

Ek : ケブラーの弾性係数

($= 1.3 \times 10^6\text{kg/cm}^2$)

Es : 鋼ケーブルの弾性係数

($= 2.0 \times 10^6\text{kg/cm}^2$)

fs : 2.5

上式より、 $\sigma_{ka}=7.35 \times 10^3\text{kg/cm}^2$ となる。

2.2 吊橋ケーブル径および水平張力の試算

3 径間吊橋の中央支間が $3,000\text{m}$ の（図4）ケースと $4,500\text{m}$ のケースを例にとり、ケーブル径および張力を概算で求める。

概算にあたって、補鋼桁の自重は支間長に関係なく一定とし、ケーブルの自重のみが支間長の影響を受けるものと仮定する。また、活荷重は道路の分布荷重のみを考慮し、線荷重および鉄道荷重は無視する。

水平張力（H）は次式より求める。

$$H = \frac{W_o + A\gamma c}{8f} \times \ell^2 \times \alpha$$

ここに、 W_o : 補鋼桁の自重+道路分布活荷重
($= 45.0\text{t/m/橋}$)

A : ケーブル断面積

γc : ケーブル単位重量

鋼ケーブル : 7.85g/cm^3

ケブラー : 1.50g/cm^3

α : 補正係数で1.4とする。

f : サグ長で $1/9$ とする。

ℓ : 中央支間長

ケーブルの断面積 A は、ケーブルの許容引張力 $H_a = \sigma_{ta} \cdot A$ を、 $H = H_a$ として、上式より求める。

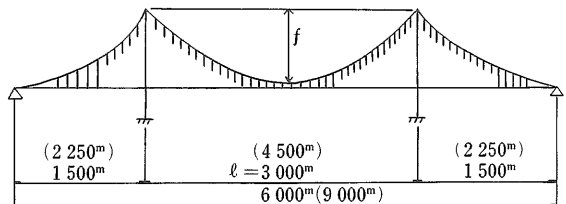


図4 吊橋の諸元

表5 ケーブル径、水平張力の比較

中央支間長	ケーブル径		水平張力 橋	
	鋼ケーブル	ケブラー	鋼ケーブル	ケブラー
3,000 m	1.8 m	1.4 m	506,000 t	118,000 t
4,500 m	3.9 m	1.8 m	2,420,000 t	372,000 t

但し、ケーブル径は4本 橋とした場合の1本の径、水平張力は1橋当たりである。

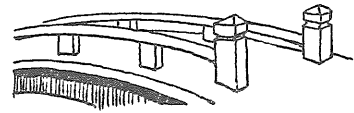
ケーブル径 (D) は、次式より求める。

$$D = 2\sqrt{\frac{A}{(1-\kappa)\pi}}$$

ここに、 κ は空隙率で、鋼ケーブルの場合 $\kappa = 0.22$ 、ケブラーの場合 $\kappa = 0.50$ と仮定する。

鋼ケーブル使用の場合と、ケブラー使用の場合のケーブル径および水平張力は、表5のようになる。

表5より、ケーブル径は鋼ケーブルでは、中央支間4,500mのケースでは、施工不可能に近い大径となっている。また、水平張力は鋼ケーブルに比しケブラーロープでは極端に小さくなり、アンカレッジの計画規模も小さくてよいことになる。



まさに名作、ワイヤレスカーソルの画期的タブレット

世界初のワイヤレスカーソルを実現。その結果、最大の操作性を発揮
金属板上からのデジタイズも可能
メンテナンスフリー(着磁作業不要) 世界随一の読取り高さ

WT-4400

(WT-シリーズ)

汎用タイプ タブレット	WT-4400
液晶搭載型 タブレット	WT-4010
静電吸着盛付 タブレット	WT-4400SE
ライトパネル付 タブレット	WT-5000LP
タブレット搭載 システムデスク	WT-7400/8400

従来不可能とされていた数々のことが、アモルファス合金の採用により解決されました。

特許出願件数.....120件
(’86年5月現在)

新製品 マウスモード付 小型タブレット **WT-460M**
(好評発売中)