

# ケーブルの取替を前提とした斜張橋の初期コスト削減に関する研究

中 井 博

## A Study on Initial Cost Reduction of Cable-Stayed Bridges by Considering the Replacement of Cables

Hiroshi NAKAI

A series of this study were conducted during 2005 and 2006 by the sponsorships of FUT Research Promotion Fund. In past 2005, surveys concerning the replacements of cable of cable-stayed bridges and the corresponding basic analytical methods of cable-stayed bridges by considering the replacements of cables were executed numerically. In this year 2006, the possibility of initial cost reductions of cable-stayed bridges were evaluated and estimated by a lot of numerical calculations.

### 1. はじめに

斜張橋は吊橋とアーチ橋との中間的な支間長に適する橋梁形式として発展してきた。斜張橋は、桁と塔とを直接ケーブルで繋いだ橋梁形式であり、それらの部材を自由に組み合わせたり、また桁・塔部材の材料を適切に選定することにより、種々な立地条件に適した多種・多様な構造形式の斜張橋が採用されている<sup>1)</sup>。

上記のように斜張橋は、その構造の合理性から、数多く建設されてきた。しかし、それらの生命線とも云えるケーブルに腐食や疲労などの損傷が生じ、ケーブル取替えを実施した事例が散見される<sup>2)~3)</sup>。たとえば、独国のケールブラント橋では、亜鉛メッキしていないロックドコイルロープが使用されていたが、架橋位置が工場地帯であったため、工場の排気ガスの影響が大きく、供用後数年でケーブルは、ソケット近傍で発錆した。この腐食と風によるケーブル振動との複合原因で、ロープ素線には、破断が生じた。また、ベネズエラ国のマラカイボ橋では、ケールブラント橋と同様に、亜鉛めっきしていないロックドコイルロープが使用されていたが、架橋地点の海塩粒子と高湿度の影響を受けて、ケーブルの腐食が進行し、供用後数年で数本のケーブルが破断した。さらに、英国の斜めハンガーケーブルを有するセバーン橋(吊橋)とそれに隣接するワイ橋(斜張橋)では、建設後交通量が急増し、セバーン橋のハンガーロープ、およびワイ橋のケーブルに、疲労損傷が生じた。これらの橋梁では、全ケーブル、または一部のケーブルが取り替えられて、ケーブルが追加されるなどの構造系の改修が実施された。

一方、斜張橋の構造形式については、地盤条件、地形条件、および道路線形などの立地条件に合わせて、種々な形式のものが採用されている。たとえば、中央径間長に比べ側径

\* 建設工学科 土木環境工学専攻

間長が短い斜張橋では、径間割のアンバランスを解消するため、側径間が PC 桁で、中央径間が鋼桁である混合桁を用いた形式や、山間部では側径間側のケーブルを直接地盤にアンカーさせる型式などの斜張橋が採用されてきた。ところが、主径間長が 100~250 m の橋梁に着目すると、鋼床版箱桁橋や PC 箱桁橋の長支間化が進み、1970 年代には、斜張橋が経済的とされていたこの範囲の支間長においても、これらの桁橋形式が採用される機会が多くなってきている。したがって、斜張橋は、景観上の理由や桁下空間が厳しい等の特殊な条件下の場合を除いて、経済性の理由から採用される機会が少なくなってきており、中・小径間の斜張橋を対象に経済性に着目した構造形式の開発が望まれている。

本研究では、上記のケーブル損傷事例、およびコスト削減の必要性に鑑みて、図-1 に示す 3 径間連続斜張橋を対象に、ケーブルの取替を前提とした斜張橋の初期コストと維持管理コストの削減効果とについて検討した。具体的には、斜張橋のコスト削減対策、ケーブル剛性の低下による斜張橋の構造特性への影響、およびケーブル取替時の各部材への影響について調査・検討し、初期コスト、ならびに維持管理コストの削減効果について考察している。

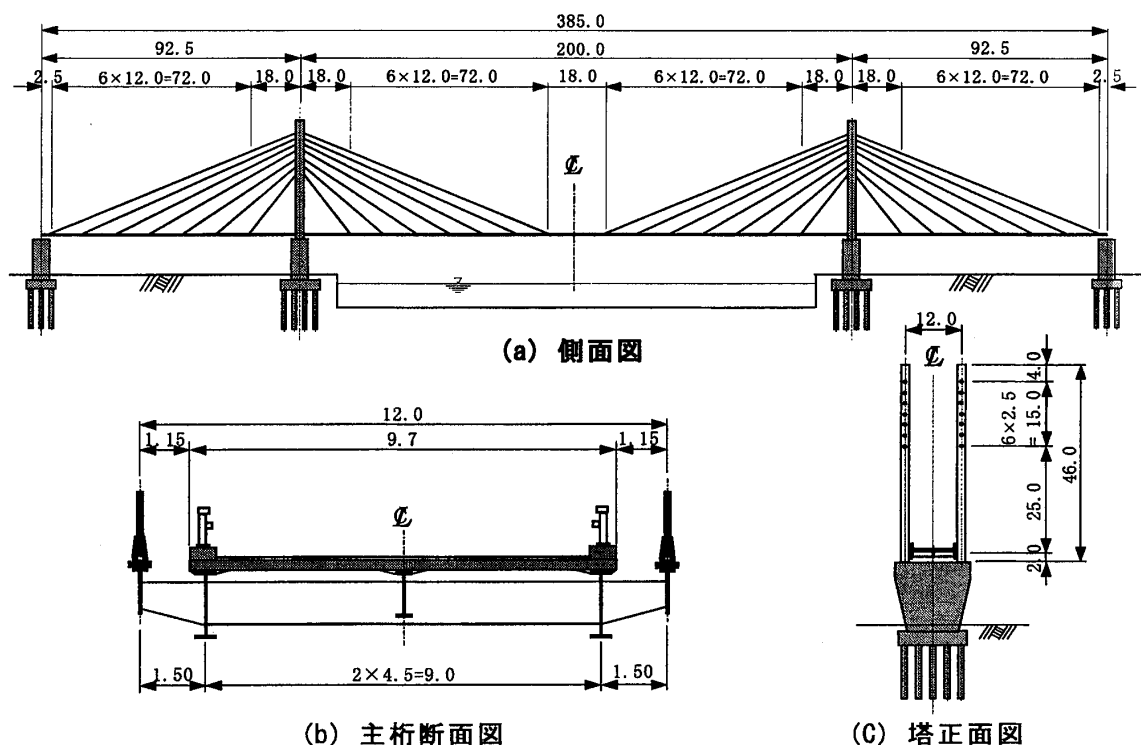


図-1 斜張橋一般図 (単位:m)

## 2. 斜張橋のコスト削減対策

橋梁のコスト削減対策としては、①材料費の削減、②構造の簡素化、③架設の簡易化、④維持管理の簡素化、また⑤長寿命化などの対策が挙げられる。斜張橋では、ケーブルのコストが高いため、ケーブル材料の削減が初期コストに大きく影響するものと考えられる。

ケーブル材料の削減に繋がる対策としては、活荷重の載荷方法とケーブル安全率の低減とが挙げられる。著者らが行った研究<sup>4)</sup>では、実働活荷重に基づく応答値と影響線載荷による応答値とを比較・検討して、現行の影響線載荷による解析方法では大き目の応答値を

与えることか研究成果として得られている。

一方、部材の安全率については、道路橋示方書<sup>5)</sup>によれば、桁、塔、橋脚などの鋼製部材の許容応力度は、降伏点 $\sigma_y$ 、および座屈強度に対して安全率 $\nu=1.7$ を基本に設定されている。これに対し、斜張橋のケーブルの許容値は、破断荷重を安全率 $\nu_c=2.5$ で割って算出すると規定されている。これは、活荷重や風の動的作用による振動を考慮して、ケーブルの疲労破壊に対して、桁や塔部材よりも大きい安全率が設定されている。これに対して、①活荷重振動による疲労については、影響線解析による応答値を基本に評価しているが、上記したようにこの応答値は大き目の値となっている、②疲労によるケーブルの損傷はソケット部で発生していたが、近年、高い疲労強度を持つソケットが開発され、斜張橋等で採用されている、また③風による振動に対しても空力安定性の良いケーブル断面や防振装置(ダンパー)が開発され、実橋で採用されている、さらに④ケーブルの安全率が $\nu_c \cong 2.0$ 程度あれば、鋼材の降伏に対する安全率 $\nu=1.7$ に対応する荷重状態(荷重係数 $\alpha=1.7$ )では、斜張橋全体の挙動はほぼ線形挙動することが報告されている<sup>6)</sup>、等のことから、本研究では、ケーブルの安全率を $\nu_c=2.0$ とした場合について調査・検討することとした。

### 3. ケーブル剛性の低下による斜張橋の構造特性への影響

ケーブルの安全率を $\nu_c=2.5$ から2.0にすると、所要断面積は約20%小さくなり、ケーブル材料は20%削減できることとなる。しかしながら、斜張橋全体の剛性はケーブルの剛性に負うところが大きいため、ケーブル断面の減少により構造特性に悪影響を与えないか否かを調査しておく必要がある。そこで、図-2 および表-1 に示す7段ケーブルの斜張橋を対象に、ケーブル断面積を小さくした場合の斜張橋の構造特性について調査・検討した。

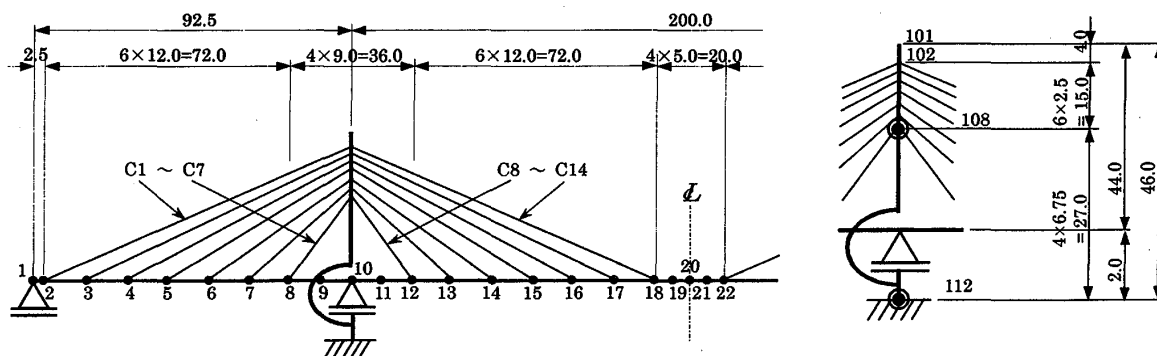


図-2 斜張橋の構造解析モデル

表-1 各部材の諸元

部材		断面積 $A$ (m <sup>2</sup> /Br.)	断面2次モーメント $I$ (m <sup>4</sup> /Br.)	弾性係数 $E$ (kN/m <sup>2</sup> )
桁		0.529	0.142	$2.0 \times 10^8$
塔		0.610	0.537	
ケーブル	取替を前提としない場合 ( $\nu_c=2.5$ )	0.00562 ~ 0.01162	—	$2.0 \times 10^8$
	取替を前提とした場合 ( $\nu_c=2.0$ )	0.00470 ~ 0.00932	—	

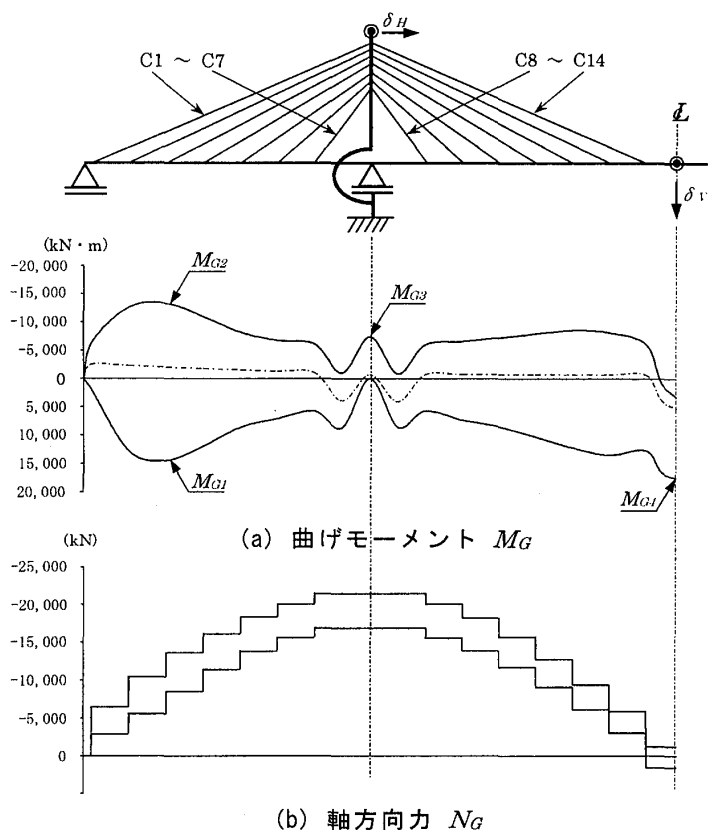


図-3 主桁の断面力図 ( $\nu_c=2.5$ )

死・活荷重による解析結果を図-3、図-4、および表-2～表-5に示す。ケーブルの断面積を小さくすると、桁、および塔の変位量・断面力は、大きくなっている。その影響が最も顕著に現れているのは、桁のたわみ  $\delta_V$  である。上記のように安全率を  $\nu_c=2.5 \rightarrow 2.0$  とすることにより、ケーブル断面積は約 20% 小さくなる。桁のたわみ  $\delta_V$  の増分量は 17% となっており、このことからケーブルの剛性が斜張橋全体の剛性に及ぼす影響が大きいことがわかる。なお、安全率を  $\nu_c=2.0$  とした場合でも、桁のたわみ  $\delta_V$  は、道路橋示方書で規定されている許容たわみ ( $L/400$ ) を満足している。

桁、および塔の曲げモーメント  $M$  については、ケーブル断面積を小さくすることによる  $M$  の増分量は最大でも 7~9% 程度である。桁、および塔に軸方向力  $N$  も作用するが、ケーブル断面積の差異による  $N$  の変動は、ケーブル張力(表-6 参照)と同様であり、ほとんど変動がない。したがって、曲げモーメント  $M$  は増大するが、桁、および塔を構成する部材断面への影響は僅少である。

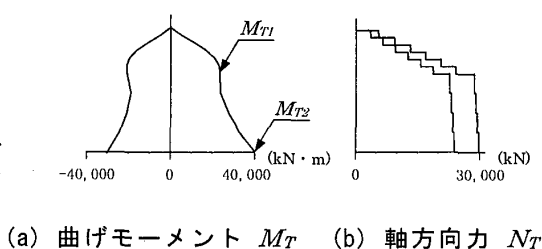


図-4 塔の断面力図 ( $\nu_c=2.5$ )

表-2 活荷重による変位量  $\delta$  (mm)

着目点	① $\nu_c=2.5$	② $\nu_c=2.0$	②/①
$\delta_V$	395 (1/506)	461 (1/434)	1.17
$\delta_H$	226 (1/204)	233 (1/198)	1.03

【備考】  
 ( )内の数値は、 $\delta_V/Lc$ ,  $\delta_H/h$  を示す。  
 $Lc$ : 中央径間長(200m),  $h$ : 塔高(46m)

表-3 桁の曲げモーメント  $M_G$  (kN/m/Br.)

着目点	① $\nu_c=2.5$	② $\nu_c=2.0$	②/①
$M_{G1}$	13,157	14,381	1.09
$M_{G2}$	-13,002	-13,384	1.03
$M_{G3}$	-7,347	-7,485	1.02
$M_{G4}$	16,103	17,504	1.09

表-4 塔の曲げモーメント  $M_T$  (kN/m/Br.)

着目点	① $\nu_c=2.5$	② $\nu_c=2.0$	②/①
$M_{T1}$	23,723	23,373	0.99
$M_{T2}$	37,969	40,738	1.07

表-5 ケーブル張力  $T$  (kN/Br.)

着目点	① $\nu_c=2.5$	② $\nu_c=2.0$	②/①	
側径間	C 1	3,641	3,547	0.97
	C 3	2,023	1,986	0.98
	C 5	1,803	1,768	0.98
	C 7	1,534	1,521	0.99
中央径間	C 8	1,529	1,510	0.99
	C 10	1,791	1,769	0.99
	C 12	2,138	2,111	0.99
	C 14	3,216	3,181	0.99

#### 4. ケーブル取替時の検討

ケーブル取替時に各部材の応力が厳しくなる最上段ケーブル(C1, および C14)を対象に, 表-6, および図-5 に示すケーブル取替時のケースについて検討を行った. 最上段ケーブルの構成については, 1 箇所あたりのケーブルを 1 本で構成した場合とケーブルの取替を前提に 2 本で構成した場合とを考えた. そして, 2 本で構成した場合には, そのうちの 1 本のケーブルを取り替える状態を想定した. また, ケーブル張力が最も大きくなる側径間の最上段ケーブルについては, ケーブル断面積を  $1/2A_0$  ( $A_0$ : 表-1 に示すケーブル断面積) とした状態で, 活荷重による影響線解析を行った.

表-6 ケーブル取替時の検討ケース

検討 ケース	取替 ケーブル		ケーブル取替時の 断面積 $A_c$ (m <sup>2</sup> )	ケーブル開放力 $T_R$ (kN/Br.)	活荷重 $L$
CASE-1	C1	1 本構成	0.00932→0	4,652	—
CASE-2		2 本構成	0.00932→0.00466	2,326	—
CASE-3	C14	1 本構成	0.00932→0	4,652	—
CASE-4		2 本構成	0.00932→0.00466	2,326	—
CASE-5	C1	2 本構成	0.00932→0.00466	—	影響線載荷

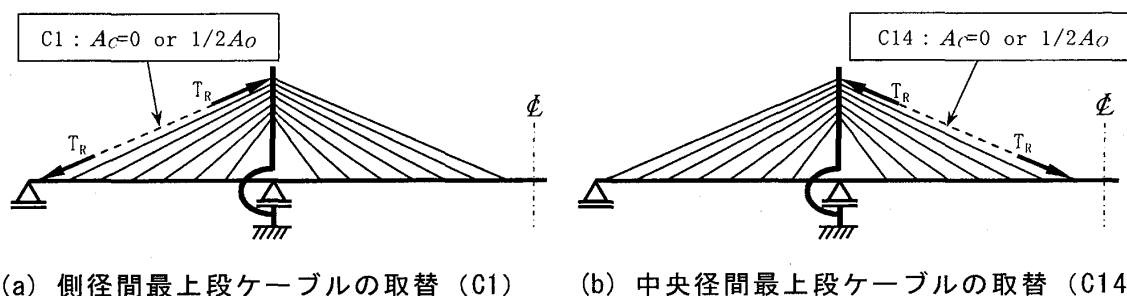


図-5 ケーブル取替時の断面積と開放力

ケーブル取替時の解析結果を, 表-7, および表-8 に示す. 表-7 でケーブルを 1 本構成とした場合 (CASE-1 および CASE-3) では, ケーブルの開放力により桁と塔には大きな曲げモーメントが作用する. しかし, ケーブルを 2 本構成とした場合には, 開放力が  $1/2$  と小さくなること, また残りの 1 本がケーブルの機能を補足することから, ケーブル開放力による断面力は著しく軽減されている. とくに, 側径間最上段ケーブルの塔を支える機能は大きいことから, ケーブルの取替を考えると, 2 本構成としておく効果は大きい.

表-8 は側径間の最上段ケーブル(C1)を 2 本構成としたときの取替時の死・活荷重による断面力を示すが, 桁と塔の曲げモーメントの増分量は最大でも 13%程度に留まっている. したがって, 取替時の許容応力度の割増係数を架設時と同様に 25%とすると, 強度上の問題はないと判断できる. ケーブル張力については, 取替ケーブルの C1 とその隣の C2 とで増大しているが, C2 の増分は 6%程度と僅かである. 取替ケーブルの C1 についても, 増分量は 17%程度であり, 許容応力度の割増係数(25%)を考えると, 問題ないことがわかる.

表-7 ケーブル取替時の死荷重による断面力

項目	死荷重	CASE-1		CASE-2		CASE-3		CASE-4		
		開放力	取替時	開放力	取替時	開放力	取替時	開放力	取替時	
桁の曲げモーメント $M_G$ (kN・m/Br.)	$M_{G2}$	-2,047	-11,758	-13,805	-4,293	-6,340	4,105	2,058	1,585	-462
	$M_{G3}$	-734	644	-90	235	-499	574	-160	222	-512
	$M_{G4}$	5,185	3,393	8,578	1,239	6,424	9,942	15,127	3,839	9,024
塔の曲げモーメント $M_T$ (kN・m/Br.)	$M_{T1}$	0	14,229	14,229	5,196	5,196	-9,274	-9,274	-3,581	-3,581
	$M_{T2}$	0	36,517	36,517	13,334	13,334	-7,735	-7,735	-2,987	-2,987
ケーブル張力 $T_C$ (kN/Br.)	C 1	4,652	-4,652	0	-1,699*	2,953*	-1,123	3,529	-434	4,218
	C 2	3,271	1,700	4,971	621	3,892	-503	2,768	-194	3,077
	C 3	3,025	943	3,968	344	3,369	-238	2,787	-92	-2,933
	C12	3,025	-98	2,927	-36	2,989	1,109	4,134	428	3,453
	C13	3,271	-424	2,847	-155	3,116	1,632	4,903	630	3,901
	C14	4,652	-1,228	3,424	-448	4,204	-4,652	0	-1,796*	2,856*
	[備考] 1. $M_{Gi}, M_{Ti}, C_i$ は図-3 および図-4 を参照 2. 開放力：表-6 に示すケーブル開放力 $T_R$ を図-4 に示すように作用させたときの断面力 3. 取替時：死荷重 ( $D$ ) と開放力 ( $T_R$ ) とによる合計の断面力 4. CASE-2 と CASE-4 (2 本構成) の※印のケーブル張力は、ケーブル 1 本分の値である。									

表-8 ケーブル取替時(C1:2本構成)の死・活荷重による断面力

項目		① 通常時			② 取替時(CASE-2,5)			②/①
		死荷重	活荷重	合計	死荷重	活荷重	合計	
桁の曲げモーメント $M_G$ (kN・m/Br.)	$M_{G2}$	-2,047	-16,428	-17,677	-6,340	-13,721	-20,061	1.13
	$M_{G3}$	-734	-6,751	-7,250	-499	-6,771	-7,270	1.00
	$M_{G4}$	5,185	12,319	18,743	6,424	12,812	19,236	1.03
塔の曲げモーメント $M_T$ (kN・m/Br.)	$M_{T1}$	0	23,374	23,374	5,196	22,736	27,932	0.98
	$M_{T2}$	0	40,738	40,738	13,334	44,051	57,385	1.06
ケーブル張力 $T_C$ (kN/Br.)	C 1	4,652	2,443	7,722	2,953*	1,563*	4,516*	1.17*
	C 2	3,271	1,141	5,033	3,892	1,462	5,354	1.06
	C 3	3,025	946	4,315	3,369	993	4,362	1.01
	C12	3,025	1,197	4,186	2,989	1,185	4,174	1.00
	C13	3,271	1,165	4,281	3,116	1,122	4,238	0.99
	C14	4,652	1,1709	5,913	4,204	1,644	5,848	0.99
[備考] 1. $M_{Gi}, M_{Ti}, C_i$ は図-3, および図-4 を参照。 2. 取替時の死荷重は、死荷重 ( $D$ ) とケーブル開放力 ( $T_R$ ) とによる合計の断面力。 3. 取替時の活荷重は、C1 ケーブルの断面積を $1/2A_0$ として、影響線載荷による算出した断面力。 4. C1 (2 本構成) の※印のケーブル張力は、ケーブル 1 本分の値である。 また、比率 (②/①) は、ケーブル 1 本分に対する値を示している。								

5. ケーブルの取替を前提とした時のコスト削減効果

上記検討で対象とした 3 径間連続斜張橋 (橋長  $L=385m$ ) のケーブル安全率による初期コストを比較したものを図-6 に示す。この図では、 $\nu_c=2.5$  としたときの橋梁全体コストを 1.0 としている。安全率を  $\nu_c=2.0$  と小さくすることによりケーブルコストは約 20% 削減されるが、橋梁全体では削減効果は 4% 程度と少ない。これは、この規模の斜張橋では、橋梁全体に占めるケーブルコストの割合が小さいためである。しかし、図-7 に示すように、支間長  $L$  が大きくなるとケーブル材料は  $L$  のほぼ二乗に比例して増大するため、橋梁全体に占めるケーブルコストの割合は大きくなる。したがって、ケーブルの安全率を小さくすることによる初期コスト削減効果は支間長が大きくなりほど顕著となる。

また、ケーブルの取替を前提に斜張橋の計画・設計を行うことにより、万が一、ケーブルが損傷した場合には補修工事が容易となり、維持管理コストが大幅に削減される。

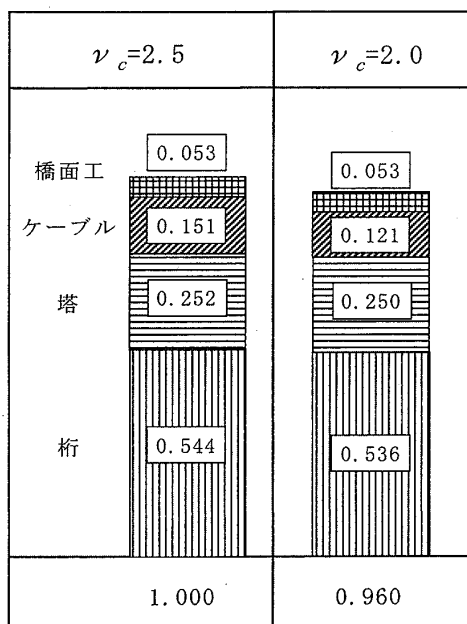


図-6 ケーブルの安全率による初期コスト比較

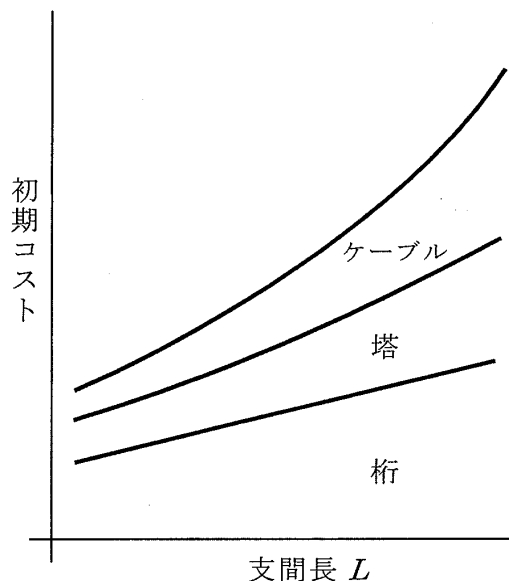


図-7 支間長 L による初期コストに占める各部材コストの変動

本検討では、最上段ケーブルを2本構成とする案を提案したが、図-8に示すように、ケーブル張力が大きくなる上段部のケーブルを蜜に配置する方法がある。この配置では、上段部ケーブル1本あたりの張力を小さくでき、取替時のケーブル開放力による断面力を軽減させることができる。また、各段ケーブルの必要断面積を統一できることから、ケーブルコストが削減され、さらにケーブル定着構造の均一化、および架設時のケーブル張力の導入やその管理の統一化などにより、製作・架設コストの削減が期待できる。

ケーブルの定着構造については、写真-1に示すように、ピン形式の簡易な定着構造の採用により、製作・架設コストの削減が期待できる。

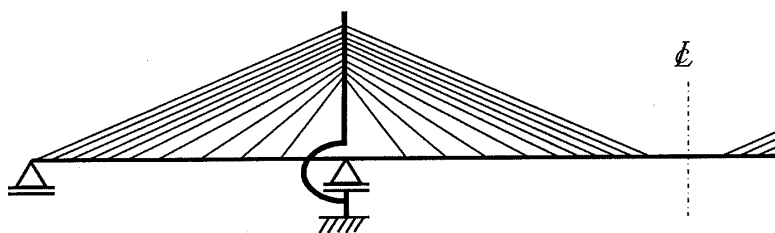
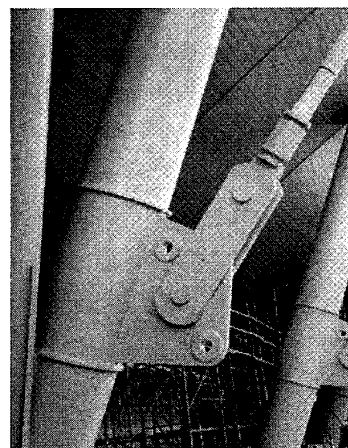


図-8 取替を考慮したケーブル配置の例



[写真提供：神鋼鋼線工業㈱]

写真-1 簡易なピン形式のケーブル定着構造の例

## 6. まとめ

本研究では、既設吊構造の橋梁におけるケーブル損傷に関する調査を踏まえ、ケーブルの取替を前提とした斜張橋のコスト削減対策について検討した。検討結果を纏めると、つぎのとおりである。

- ① ケーブルの取替を前提とすれば、安全率を  $\nu_c=2.0$  とすることが可能である。
- ② 安全率を  $\nu_c=2.0$  とし、ケーブル断面積を約 20% 小さくした場合について、死・活荷重による構造解析・部材設計を行った結果、橋梁全体の剛性は低下するものの、変位や部材応力の増加は問題とならないこと、また桁、および塔部材については、 $\nu_c=2.5$  で設計した部材断面と大差ないことが確認できた。なお、ケーブル断面積の減少に伴い、ケーブル定着構造を小さくできる。
- ③ 安全率を  $\nu_c=2.0$  として、設計した部材断面を用いて、ケーブル取替時の検討を行った結果、張力の大きい上段部ケーブルを 2 本で構成することにより、ケーブル取替時に発生する各部材の超過応力は、許容応力度の割増範囲内(架設時の 25% を想定)に十分収まることが確認できた。
- ④ ケーブル安全率  $\nu_c$  を 2.5 と 2.0 とした場合のコスト比較を行い、安全率を  $\nu_c=2.0$  とすることによる初期コストの削減効果を示した。また、本検討結果を踏まえて、ケーブル安全率を  $\nu_c=2.0$  とすることによる初期コスト、ならびに維持管理コストの削減効果についても考察した。
- ⑤ 斜張橋のコスト削減対策に繋がるケーブル配置、および定着構造を提案した。

## 謝辞

本研究を行うに当たり、平成 17 年度から平成 18 年度の 2 年間にわたって福井工業大学の学内特別研究費を受けた。まず、このことに対して、深甚の謝意を表す。つぎに、平成 17 年度の調査研究においては当時の(株)神戸製鋼所の杉井謙一博士、また平成 18 年度の調査研究においては総合技術コンサルタント(株)の野口二郎博士の絶大なる調査・研究に対するご協力を得た。ここに記して、両氏には、厚くお礼を申し上げる次第である。

## 参考文献

- 1) 土木学会 鋼構造委員会 鋼構造進歩調査小委員会 (編): 鋼斜張橋 - 技術とその変遷 -, 鋼構造シリーズ 5, 土木学会, 1990.
- 2) 成田 信、上坂康男 共訳: 西ドイツ交通省局道路建設局・橋梁その他構造物の損傷事例集、土木施工・臨時増刊、1986 年 6 月.
- 3) 上坂 淳、松田 浩 共訳: 西ドイツ交通省局道路建設局・橋梁その他構造物の補修・補強事例集、土木施工・臨時増刊、1990 年 4 月.
- 4) 北田俊行, 中井 博, 野口二郎, 岩廣真悟: 実働活荷重に基づいた連続桁橋, および斜張橋設計用の活荷重モデルについて, 構造工学論文集, Vol. 44A, 土木学会, pp. 71-80, 1998.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編・II 鋼橋編, 丸善, 1996.
- 6) 野口二郎, 北田俊行, 引口 学: 斜張橋の部材安全率と橋梁全体の終局強度との関係, 構造工学論文集, Vol. 37A, 土木学会, pp. 137-146, 2001.

(平成19年 3 月22日受理)