

橋梁用ケーブルの最近の話題と展望

三田村武*・中井 博**・渡邊英一***・
杉井謙一****

吊橋メインケーブルの種類、ワイヤ強度、架設工法、および斜張橋ケーブルの種類、設計上検討すべき項目について、それらの変遷と最近の動向を述べた。また、吊橋、斜張橋の双方のケーブルにつき、損傷例、検査方法、維持管理上の要点を示した。さらに、今後の展望として、錆びない、強い、軽いといった機能を有する、新しいケーブルの可能性について論じた。

Keywords : cable, state-of-the-arts, suspension bridges, cable-stayed bridges

1. はじめに

1988年4月に瀬戸大橋が開通し、さらに世界最長スパンの明石海峡大橋が、現在、施工中であるなど、わが国は、いままさに長大橋の黄金期にある。最近の長大橋は、そのほとんどが吊橋や斜張橋といったケーブル使用橋梁である。実施設計中の多々羅斜張橋（中央支間長890 m）や Messina 横断橋吊橋案（中央支間長3 000 m）に見られるように、ケーブル使用橋梁は、ますます長大化の傾向にある。

しかし、一方では、既設の橋梁のケーブルに、腐食や疲労が起因して損傷が現れ始めており、この種の問題に対する関心が高まってきている。ケーブル使用橋梁におけるケーブルは、生命線ともいべき重要な構造部材であり、設計・製作・架設・維持管理の各観点から、一層の検討が求められている。

このような状況のもとで、本文では橋梁用ケーブルの現時点における課題と今後の展望とについて調査を行った。まず、吊橋メインケーブルについては、その種類、ワイヤ強度、および架設工法に関する変遷と最近の動向を述べる。次に、斜張橋ケーブルについて、その種類や設計上検討すべき項目に関する変遷と最近の動向を述べる。つづいて、吊橋・斜張橋の双方のケーブルにつき、損傷例、腐食ワイヤの強度特性、検査方法、および維持管理上の要点を示す。さらに、今後の展望として、錆びないケーブル、より強いケーブル、より軽いケーブルの特性と可能性について論ずるものである。

なお本文中、PWS（プレファブ平行線ストランド）のマーキングによるサグ調整法、吊橋メインケーブルの

現場製作・直接引出工法、ケーブルの振動とその対策、ケーブルのクリープ・リラクセーションとその対策、腐食ワイヤの強度、およびケーブルの検査などに関しては、著者らの研究の成果であることを強調しておきたい。

2. 吊橋のメインケーブル

(1) ケーブルの歴史と種類

メインケーブルに鉄を使用した最初の吊橋は、1801年にアメリカの J. Finley により架けられた。ただし、ケーブルは鉄のチェーンであった。その後、1834年にドイツの Albert が鉄線のストランドロープを製造し、このワイヤロープが吊橋のメインケーブルとして使用されるようになった。

現在の長大吊橋のメインケーブルは、すべてワイヤを平行に束ねた平行線ケーブルとなっている。この平行線ケーブルの出現が吊橋の長大化に果たした役割は、非常に大きい。アメリカの J. A. Roebling は、1855年に完成した Niagara 橋で、平行線ケーブルの架設工法であるエアスピニング法を開発した。彼は、その後、この工法を Brooklyn 橋の設計に取り入れ、その遺志を継いだ息子の W. A. Roebling の手によって、平行線ケーブルによる最初の吊橋を 1883年に完成させた。

Brooklyn 橋の建設以来、アメリカの長大吊橋のメインケーブルは、そのほとんどが平行線ケーブルとなった。ところが、ヨーロッパでは、ワイヤロープが用いられ続け、1964年の Forth Road 橋に至り、ようやくアメリカの業者によりエアスピニング工法で平行線ケーブルが架設された。

平行線ケーブルのプレファブ化の試みは、1960年代にアメリカと日本とでほぼ同時に開始された。PWS が用いられた両国の最初の吊橋は、アメリカでは 1969年 New Port 橋¹⁾、日本では同じく 1969年の八幡橋²⁾である。しかし、その後、アメリカにおける PWS

* 正会員 (株) 神戸製鋼所 鉄構橋梁部 部長
(〒651 神戸市中央区協浜町 1-3-18)

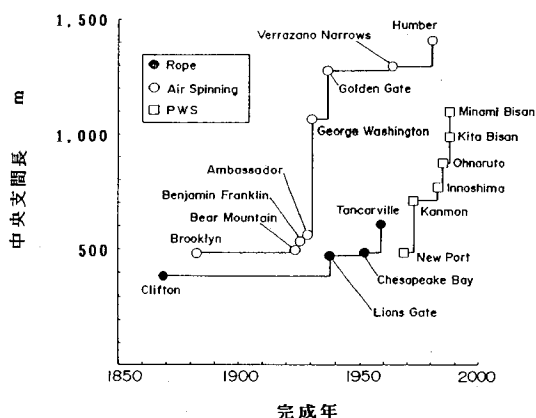
** 正会員 工博 大阪市立大学教授 土木工学科

*** 正会員 Ph.D. 工博 京都大学教授 土木工学科

**** 正会員 (株) 神戸製鉄所 鉄構橋梁部 課長

表一 各種ケーブルの特徴

項目	ワイヤロープケーブル	平行線ケーブル	
		エラスピニング	PWS
設計	・弾性係数が平行線ケーブルに比して不利となる。 ・ストランドロープ 14,000kgf/mm ² (137MPa) ・スパイラルロープ 16,000kgf/mm ² (157MPa) ・ケーブルを円形に整えるのに、外周の保護を促すためのフィラーが使用される。	・弾性係数 20,000kgf/mm ² (1962MPa) ・1ストランドの巻線本数を多くできる (300～500 程度) ・で、アングルレスでの定着面積を小さくできる。	・弾性係数 20,000kgf/mm ² (1962MPa) ・1ストランドの巻線本数は本筋線と少ないので、エラスピニングに比して定着面積は、若干大きくなる。
製作・輸送	・工場でロープを製作し、リールに巻いて輸送する。 ・ロープの構造ゆえに輸送のため、工場でプレテンションを施す。	・ストランドは現地のエラスピニングにより作られるので、輸送はワイヤコイル単位となる。 ・輸送の単位重量を小さく設定できるので、輸送効率がよい。	・工場でストランドを製作し、リールに巻いて輸送する。 ・長大橋向けは大型・大量となり、輸送上の制約が生じることがある。
架設	・工期・工数は、エラスピニングに比して有利である。	・工期は長く、工数も多い。 ・エラスピニングとワイヤコイル調整は、風の影響を受けやすい。	・工期・工数は、エラスピニングに比して有利である。 ・ストランドはキャットウォークに配されたローラー上を引き出されるので、風の影響を受けにくい。



図一 各種ケーブルによる吊橋最大支間長による更新

の使用は、1973 年の 2nd Chesapeake Bay 橋にその例をみるにすぎない。むしろ PWS は日本で開花し、関門橋で用いられてから、本四連絡吊橋などで、主流な工法となってきた。

吊橋のメインケーブルとして使用される各種ケーブル（ワイヤロープケーブル、エラスピニング平行線ケーブル、および PWS 平行線ケーブル）の特徴を、表一に示す。ワイヤロープケーブルは、取扱いが容易である。しかし、平行線ケーブルにくらべて、弾性係数が劣るといった短所がある。平行線ケーブルでは、エラスピニング工法あるいは PWS 工法を使おうとも両者の間に品質的な差異はない。ところが、ケーブル架設工期に限って言えば PWS 工法が有利であるといわれている。

それぞれのタイプのケーブルによる吊橋の最大支間長の記録更新の歴史を、図一に示す。ワイヤロープケーブルでは、1959 年の Tancarville 橋（フランス）以降、スパンの記録更新がみられない。アメリカ第一の Verrazano Narrows 橋やイギリス第一の Humber 橋は、ともにエラスピニング工法により架けられたものである。PWS 工法では、アメリカの New Port 橋以後、すべて日本において支間長およびケーブル長さの記録更新がなされている。

表二 亜鉛めっきワイヤの強度変遷

橋名	完成年	国名	素線径 mm	引張強度 kgf/mm ²	許容応力度 kgf/mm ²
Brooklyn	1883	USA	4.75	112 (1,098MPa)	33 (324MPa)
Williamsburg	1903	USA	4.88	141 (1,383MPa)	—
Manhattan	1909	USA	4.96	144 (1,412MPa)	51 (500MPa)
Bear Mountain	1924	USA	4.96	151 (1,481MPa)	—
George Washington	1931	USA	4.98	155 (1,520MPa)	58 (569MPa)
Golden Gate	1937	USA	4.96	155 (1,520MPa)	58 (569MPa)
Verrazano Narrows	1964	USA	4.98	155 (1,520MPa)	61 (598MPa)
Forth Road	1964	UK	4.98	155 (1,520MPa)	62 (608MPa)
Severn	1966	UK	4.98	155 (1,520MPa)	70 (688MPa)
Newport	1969	USA	5.13	158 (1,549MPa)	61 (598MPa)
Bosporus I	1972	Turkey	5.00	160 (1,569MPa)	70 (688MPa)
関門橋	1973	日本	5.04	160 (1,569MPa)	58 (569MPa)
Humber	1981	UK	5.00	160 (1,569MPa)	70 (688MPa)
因島大橋	1983	日本	5.17	160 (1,569MPa)	56 (549MPa)
大鳴門橋	1985	日本	5.37	160 (1,569MPa)	64 (628MPa)
瀬戸大橋	1988	日本	5.37 下津井 5.18 北瀬 5.12 南瀬	160 (1,569MPa)	64 (628MPa)
Bosporus II	1988	Turkey	5.38	160 (1,569MPa)	70 (688MPa)

表三 亜鉛めっきワイヤの仕様の比較

項目	HBS C3501-1979	AISI-1977	ASTM A586-68
機械特性			
めっき線の外径 mm	5 φ	4.98 φ	5 φ
外径の許容差 mm	±0.06	+ 0.10, - 0.08	±0.06
偏芯差 mm	0.06 以下	—	0.06 以下
引張強度 kgf/mm ²	160 ~ 180 (1,569 ~ 1,765MPa)	155 以上 (1,520MPa)	155 以上 (1,520MPa)
0.7%全伸び耐力 kgf/mm	118 以上 (1,157MPa)	112 以上 (1,098MPa)	112 以上 (1,098MPa)
伸び %	4.0 (G.L.-250mm)	4.0 (G.L.-250mm)	4.0 (G.L.-250mm)
巻付け試験	3d+8回	3d+1回	3d+2回
ねじり試験	14以上	—	—
亜鉛めっき			
亜鉛付着量 g/m ²	300 以上	305 以上	305 以上
めっき付着性	5d+2回	5d+1回	5d+2回
めっきによる線径増加量 mm	0.12 以下	—	—
めっき用亜鉛	純亜鉛	—	純亜鉛
直線性			
フリーコイル径 m	4.0 以上	十分まっすぐな寸法	—
フリーリングリフト mm	150 以下	十分まっすぐな寸法	—

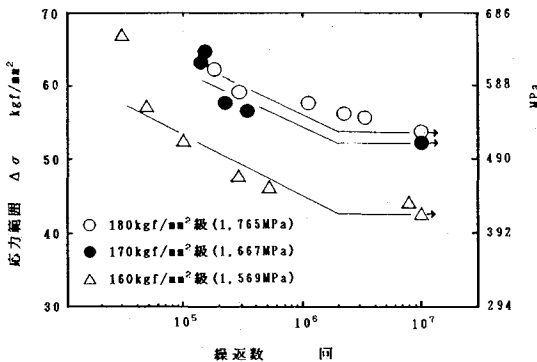
(2) ワイヤ強度

平行線ケーブルに使用される亜鉛めっきワイヤの強度は、Brooklyn 橋当時 112 kgf/mm² (1 098 MPa) であった。それが現在では、160 kgf/mm² (1 569 MPa) にまで上昇している。これら亜鉛めっきワイヤ強度の変遷は、表二のとおりである。

平行線ケーブル用亜鉛めっきワイヤに関する規格としては、わが国の本四公団 (HBS)、アメリカ鉄鋼協会 (AISI)、およびアメリカ材料試験協会 (ASTM) のものがある。これらの仕様の比較を、表三に示す。現在、日本では 160 kgf/mm² (1 569 MPa) 以上、またアメリカでは 155 kgf/mm² (220 000 psi/1 520 MPa) 以上の

表—4 現行高炭素鋼と Si 添加鋼の比較

項 目		現行高炭素鋼	Si添加鋼	
		160kgf/mm ² 級 (1,569MPa)	170kgf/mm ² 級 (1,667MPa)	180kgf/mm ² 級 (1,765MPa)
機械特性				
引張強度	kgf/mm ²	166.9 (1,637MPa)	179.3 (1,758MPa)	188.5 (1,849MPa)
0.7%全伸び耐力	kgf/mm ²	135.5 (1,329MPa)	140.6 (1,379MPa)	142.4 (1,396MPa)
伸び	%	6.8	6.9	6.8
巻付け試験結果		良	良	良
ねじり回数	回	22.5	23.3	25.2
めっき特性				
亜鉛付着量	g/m ²	336	318	377
線径増加	mm	0.097	0.083	0.100
外観		良	良	良



図—2 Si 添加鋼の疲労特性

引張強度の亜鉛めっきワイヤが使用されている。

許容応力度の設定は、各国により多少の差異がある。最近の吊橋に対しては、アメリカで 61 kgf/mm² (598 MPa)、イギリスで 70 kgf/mm² (686 MPa)、また日本で 64 kgf/mm² (628 MPa)、にとっている。

上述のように、現在の吊橋では、引張強度 155~160 kgf/mm² (1520~1569 MPa) 級の亜鉛めっきワイヤが用いられている。しかし、より長大化しようとする吊橋のニーズにこたえるためには、ワイヤのさらなる高強度化が必要である。このような要求に対して、Si の添加により、現行の高炭素鋼から 10~20 kgf/mm² (98~196 MPa) 強度アップした 170 kgf/mm² (1667 MPa) 級、あるいは 180 kgf/mm² (1765 MPa) 級の亜鉛めっきワイヤが試作されている^{3), 4)}。

Si 添加鋼の特徴は、現行の高炭素鋼に比して、C と Si とが増量添加されていることである。Si はフェライト強化元素であり、鉛パテンティング材の強度を引き上げるとともに、亜鉛めっき処理時のワイヤの強度低下を防ぐことができる。C は、Si と同様に、鉛パテンティング材の引張強度の増加に有効な元素である。

表—4 には現行の高炭素鋼との Si 添加鋼との機械的性質、および、めっき特性の比較を示す。Si 添加鋼の伸び、捻回値、および巻付け特性は、現行材と比較して

遜色なく良好である。また、めっき特性も、特に問題点が認められない。

図—2 は、Si 添加鋼の疲労特性を示したものである。疲労強度も、現行の高炭素鋼に比べて向上していることがわかる。

明石海峡大橋のメインケーブルには、180 kgf/mm² (1765 MPa) 級の亜鉛めっきワイヤが使用され、破断強度に対して 2.2 の安全率が採用される予定である⁵⁾。

(3) 平行線ケーブルの架設工法

現在採用されている平行線ケーブルの架設工法には、エアスピニング工法と PWS 工法とがある。このうちエアスピニング工法には、欧米で行われているオーソドックスなエアスピニングと日本で開発された低張力エアスピニングとがある。これらの工法の差異を示し、さらに最近提案されている改良案や新工法について述べる。

a) エアスピニング工法

エアスピニング工法は、ワイヤを現地で一本ずつ、フリーハング相当の張力で糸を紡ぐように張り渡している。数百本の束（ストランド）にし、さらにストランド数十本をまとめてケーブルに成形する方法である。オーソドックスなエアスピニングでは、ワイヤを一本張り渡すたびに、ワイヤのサグ調整を実施し、同一ストランド内のワイヤの長さに差異が生じないようにする。さらに、ストランドとなった時点で、そのサグ調整を行い、所定のエレベーションにセットする。しかし、この工法ではワイヤのサグ調整とスピニングとを同時に行うため、風の強い日には、ワイヤのサグ調整がネックとなって、スピニングができなくなってしまうという問題がある。

そこで、ワイヤのサグ調整を行わなくてもよい工法として、低張力エアスピニング工法が開発された⁶⁾。本工法では、スピニング時のワイヤのバックテンションをフリーハング相当の張力よりも低く設定し、スピニングされたワイヤをキャットウォーク上に設置されたフォーマーに載せて行くことにより、ワイヤの長さを揃えるものである。これにより、ワイヤのサグ調整が不要で、調整はストランドのサグ調整のみでよかった。さらに、風がある程度強い日でも、スピニングが可能で、稼働率の向上が図れるようになった。この低張力エアスピニング工法は平戸大橋、および下津井瀬戸大橋に採用された。

b) PWS 工法

ワイヤを現地で一本ずつ張り渡してストランドを作るエアスピニング工法に対し、ワイヤ百本程度のストランドを工場であらかじめ作っておき、現地でキャットウォーク上を引き出す方法が PWS 工法である。先に述べたとおり、これはアメリカと日本とでほぼ同時期に開発された工法^{1), 2)}である。しかし、アメリカでは国内の長大橋の建設が減少したこともあり、あまり発達せず、

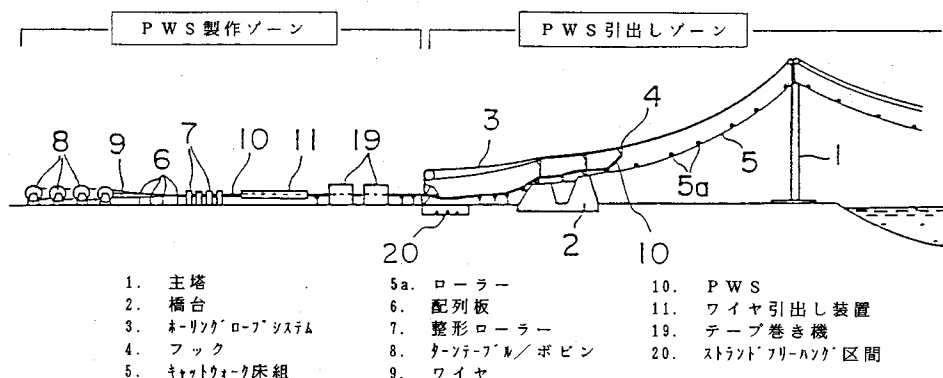


図-3 新工法（現場製作・直接引出工法）の概念図

当時、長大橋建設の機運が強かった日本で発達した。関門橋をはじめ、本州四国連絡橋の吊橋のケーブルのほとんどがこのPWS工法により架設されている。

あらかじめストランドを工場で作るPWS工法の適用限界が全長どの程度の吊橋か、という疑問が出てくるのが当然である。これに対し、最近実施された超長尺のPWSの製作・展開実験では、全長4000メートルのPWSの製作、および引き出しが可能であるとの結果が得られている⁷⁾。

PWS工法では、ストランドを輸送しなければならず、1ストランド当たりのワイヤ本数を無闇に増加できない。このためエアスピニング工法に較べて、PWS工法のストランドの本数は必然的に増すことになる。したがって、ストランドのサグ調整の回数が多くなり、ストランドのサグ調整の簡略化が是非とも必要になってくる。

c) PWSのマーキングによるサグ調整方法

ストランドのサグ調整は、塔頂サドル部、およびスプレーサドル部において、ストランドを移動させることにより行われる。仮に、塔頂サドルとスプレーサドルとにマーキングを施しておき、これに対応するようにPWSにも製作時に精度をよくマーキングを施せば、双方のマーキングを合わせて架設することにより、ストランドのサグ調整を省略できる。これがPWSのマーキングによるサグ調整方法と呼ばれるものである。

この方法は、南備讃瀬戸大橋の一部のストランドに適用され、良好な結果を得ている⁸⁾。

d) 新工法：現場製作・直接引出工法

上では、エアスピニング工法とPWS工法につきその改良方法などについて述べた。どちらの工法も、ますます長大化する吊橋の基本的要求に対して、次の問題点が生じている。すなわち、エアスピニングではワイヤを1本、もしくは、せいぜい2～4本ずつスピニングするので、工期が長くなる。また、PWS工法では、ストランド1本あたりの重量が大きくなり、輸送上の問題がクローズアップされてくる。

そこで、新しい試みとして、現場でPWSを製作しつつ、ダイレクトにキャットウォーク上へ引き出してしまおうという工法が考えられる⁹⁾。本工法の概念図を、図-3に示す。図の左側から説明すると、ワイヤコイルをターンテーブル、もしくはボビン（8）にセットし、ワイヤ（9）を配列板（6）と整形ローラー（7）に通して六角形に成形したのち、テープシー징機（19）によってテープリングする。それ以降は、通常のPWS架設と同様である。

ただし、PWSを製作しつつ引き出してしまうための工夫として、ワイヤ引き出し装置（11）とストランドのフリーハング区間（20）とを設けてある。すなわち、ワイヤ引き出し装置は、ストランド内のワイヤの長さにばらつきを生じさせないための装置である。また、フリーハング区間はホーリングシステムの動きとPWS製作ラインの動きとを相互に干渉させないための緩衝ゾーンである。

本工法によれば、次のようなメリットがある。

- ① エアスピニング工法のデメリットである工期の問題を、PWS工法同様に、クリアーできる。
- ② PWS工法と相違し、大型・大重量のPWSリールの輸送を行わなくてよい。

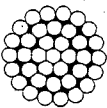
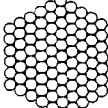
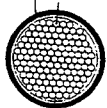
ただし、本工法による場合には、現場で短時間にストランドのソケット付けを行うことと、そのためのスペースが必要である。

3. 斜張橋のケーブル

(1) ケーブルの種類

斜張橋のケーブルは、ストランドを単一、もしくは複数を束ねて構成される。使用されるストランドは、撚り線タイプのものとは平行線タイプのものとは大別できる。まず、撚り線タイプには、スパイラルロープ、あるいはロックドコイルロープがある。また、平行線タイプにはPWS、グラウト型ポリエチレン管付ストランド、およびノングラウト型ポリエチレン被覆ストランドがある。このうち、ノングラウト型では、リーリング・アン

表—5 斜張橋ケーブルの種類²⁵⁾

ケーブルの種類と形状 項目	撚り線タイプ		平行線タイプ		
	ストランドロープ	ロックドコイルロープ	PWS	グラウトタイプ	ノングラウトタイプ
				<押線> スベーク ストランド <くめつき線> ポリエチレン管 	
素線		亜鉛めっき鋼線	亜鉛めっき鋼線	押線	亜鉛めっき鋼線
素線の引張強度 kgf/mm^2	130~150 (1.275~1.471MPa)	130~150 (1.275~1.471MPa)	160 (1.569MPa)	165 (1.618MPa)	160 (1.569MPa)
ヤング係数 kgf/mm^2	16,000 (1576Pa)	16,000 (1576Pa)	20,000 (1960Pa)	20,500 (2016Pa)	20,000 (1960Pa)
端処理	亜鉛めっき	亜鉛めっき	亜鉛めっき	鋼球+1層樹脂めっき	鋼球+1層樹脂めっき あるいは 亜鉛+1層樹脂めっき
防食方法	素線の亜鉛めっき + 塗装	素線の亜鉛めっき + 塗装	素線の亜鉛めっき + グリッド + 塗装 * *あるいは3層樹脂めっき	グラウト + ポリエチレン管	素線の亜鉛めっき + グラウト + ポリエチレン管

リーリグ時のケーブル断面形状の崩れを防止するために、力学的特性が低下しない範囲で軽い撚りが施されている。それぞれのストランドの特徴を、表—5²⁵⁾に示す。スパイラルロープはイギリスで、ロックドコイルロープは西ドイツで、また平行線ストランドは日本でその使用実績が多い。

(2) ケーブルの最近の動向

a) ケーブルの配置

本格的な斜張橋の出現と発展とは第二次世界大戦以降のことであり、比較的歴史が浅い。しかし、この間のケーブルの変化は著しい。ケーブル段数は少数から多数へ、またケーブル断面は大断面から小断面へ、斜張橋の長大化に伴い変遷している。初期の少段数で、大断面のケーブルは、長大吊橋のメインケーブルに由来し、吊橋と同様にサドルが設置された。この大断面ケーブルは、ストランドを束にし、一体化した束ねケーブルである。この種の束ねケーブルでは、現場での束ね作業や、定着のためのスプレーに困難があったため、あえてケーブルを束ねず単に平行に並べただけの群ケーブルの例もある。最近の大型斜張橋では、桁への応力の分散、施工・維持管理上、そして美観の理由から、マルチケーブル方式が一般に採用されており、太径の単一ストランドそのものをケーブルとするものも多い。

b) ケーブルの疲労設計

吊橋のメインケーブルでは、疲労があまり問題とならない。しかし、斜張橋のケーブルでは、疲労のことを設計時に十分配慮しておかなければならない。ケーブルの疲労は、DIN-1073¹⁰⁾に準拠して照査されることが多い。DIN-1073 によるケーブルの疲労照査式は、次のとおりである。

$$\max(\sigma_g + m\sigma_p + \sigma_s) \leq \sigma_{fa}$$

ここに、 σ_g : 死荷重による応力 (衝撃を含む)

σ_p : DIN-1072 の活荷重による応力 (衝撃を含む)

σ_s : 軌道車両の荷重による応力 (衝撃を含む)

m : 0.5 橋格 60 の場合

0.8 橋格 30, およびそれ以下の場合

σ_{fa} : 疲労に対する許容応力度で、以下のようにとられている。

平行線ストランドの σ_{fa} :

$$k < 1.118 - \frac{620.9}{B_N} \text{ のとき } \sigma_{fa} = \frac{250}{1 - 0.895k}$$

$$k \geq 1.118 - \frac{620.9}{B_N} \text{ のとき } \sigma_{fa} = 0.45 B_N$$

ロックドコイルロープの σ_{fa} :

$$k < 1.116 - \frac{531.5}{B_N} \text{ のとき } \sigma_{fa} = \frac{200}{1 - 0.896k}$$

$$k \geq 1.116 - \frac{531.5}{B_N} \text{ のとき } \sigma_{fa} = 0.42 B_N$$

ただし、 B_N : ストランドの引張強度 (MPa)

k : 応力比 ($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)

疲労を考慮する必要のないときの許容応力度を求める際、 B_N に掛ける係数が平行線ストランドの場合 0.45、またロックドコイルロープの場合 0.42 と差異があるのは、次の理由による。すなわち引張試験を行うと、実際の破断荷重と計算上の破断荷重との差異が、平行線ストランドの場合、3% 以下と小さいが、ロックドコイルロープの場合 5~8% 程度も低下するという試験データがあり、これに準拠するものである。

c) 防食

かつての斜張橋のケーブルは、吊橋のメインケーブルと同様に、ラッピングと塗装による防食が行われていた。その後、プラスチックカパリングの時代を経て、現在では、グラウトタイプのポリエチレン管被覆、ノングラウトタイプのポリエチレン被覆の実績が多くなってきた。

グラウトタイプのポリエチレン管被覆は、1980年代のほとんどの斜張橋に採用されており、1988年に開通したひつ石島橋・岩黒島橋のケーブルにその例がみられる。しかし、このタイプのケーブルでは、現場でグラウト作業が必要となり、工期上不利となる。このことから、最近では、ノングラウトタイプのポリエチレン被覆が主流となりつつある。ポリエチレン被覆の場合、最も耐候性がよいのは黒色であるが、美観上の観点から、その上に着色を施すことが試みられつつある。

防食の基本として当然のことながら、湿気をケーブル内に侵入させない配慮と、中に湿気をこもらせない配慮とが大切である。

d) ケーブルの振動とその対策

斜張橋ケーブルで問題となる振動には、

- ① ウェークギャロッピング
- ② 渦励振（風琴振動）
- ③ ギャロッピング
- ④ レインパイブレーション

がある。①のウェークギャロッピングは、ケーブルが2本並列して置かれるような場合に生じ、前列のケーブルの後流の風の乱れによって後列のケーブルが振動を興すものである。この振動は、2本のケーブルの距離を離すことによって防止することができる。②の渦励振は、ケーブル自体から渦が離脱することにより生じる変動空気が原因で起こる振動である。これの防止対策としては、部材の振動数と同振動数・逆位相の振り子で慣性力を打ち消して制振できるストックブリッジ減衰器を取り付ける方法や、ひれを取り付けたり、あるいはワイヤロープを巻き付けて制振する空力的手段がある。③のギャロッピングは、円形断面の送電線に氷雪が付着して長円形になったときに振動するのと類似の現象で、自励振動の一種である。自励振動の防止策としては、ケーブル相互を緊結し剛性を増す方法や、断面形状を改善するのが一般に行われている。

これらの3つの振動は、以前から問題になっており、上述のように対策が講じられている。ところが、④のレインパイブレーションは、最近使用されることの多くなったポリエチレン被覆ケーブルで問題となっている現象で、雨水と風とが原因となって引き起こされる振動である。現在、多くの研究者により現象の解明と防止対策との検討が行われている最中である。それらによると、ケーブルをつたう雨水が横風とバランスして水みちを作り、その水みちを流れる雨水が見かけのケーブル断面形

状を変化させることによる一種のギャロッピングであるとする説が有力である。その対策としては、ケーブルの中間をワイヤロープで連結する方法、ケーブル基部にダンパーを設ける方法、あるいはケーブルを被覆しているポリエチレンの表面に突起を付ける方法などが考えられている^{11), 12)}。

e) ケーブルのクリープ・リラクセーションとその対策

斜張橋をはじめニールセン橋の場合、設計時にプレストレスをコントロールし、主桁の曲げモーメントの改善や橋全体の剛性の調節を行うことができる。これらの橋梁形式では、架設時にケーブルの張力調整を行い、設計どおりの状態を現場で再現させる必要がある。そのため、架設時のケーブル張力の調整は、非常に慎重に行われている。最近では、ファジー理論を用いて、より効率良くシム調整量を算定しようとする試みも行われている¹³⁾。

ケーブル全体としてのクリープ・リラクセーションは、ケーブル本体のものとソケット部のものとに起因するが、この割合についてはまだ解明されていない。しかし、ケーブル系橋梁では、将来のケーブル伸びや、張力減少を精度よく予測しなければならない。検討の一つの方法として、これらの現象も考慮したプログラムを用いて、電算機によるシミュレーションを行っておき、将来、ケーブルの再調整が必要となるのか否か、もし必要であるなら、何時、どの程度実施するかを調べておけば、維持管理を行う際に役立つであろう。

ラプラス逆変換を用いて、橋梁全体系の経時的挙動をシミュレーションする手法が開発されており、現在、種々なケーブル使用橋梁について、パラメトリック解析が進められている¹⁴⁾。

4. ケーブルの損傷と維持管理

(1) 損傷例

Brooklyn 吊橋で、100年以上、Strömsund 斜張橋で35年供用されてきており、それらを含めて、現存するケーブル使用橋梁は数百を数える。これらの橋梁の中には、ケーブルが損傷し、維持管理上問題となっているものも少なくない。文献によって調査することができる損傷例を部位ごとに整理すると、表—6（吊橋メインケーブル）、表—7（吊橋ハンガーロープ）、および表—8（斜張橋ケーブル）のように整理される。

損傷は、そのほとんどが腐食であり、これが原因となってケーブルの強度低下を引き起こす。また、吊橋の斜めハンガーや斜張橋ケーブルは一般に発生応力の振幅が大きく、疲労破断の危険性がある。とくに、端部をソケット止めされたストランドやロープでは、ソケットとの剛性差により二次応力が生じるので、留意しておかなければならない。

表—6 吊橋メインケーブルの損傷例

橋名 (完成年)	損傷原因	対 策	
		部分取替え	全面取替え
Wheeling (1850)	腐食	○	
Brooklyn (1883)	腐食	○	
Williamsburg (1903)	腐食	○	
Manhattan (1909)	腐食	○	
U.S. Grant (1927)	腐食	○	○

表—7 吊橋ハンガーロープの損傷例

橋名 (完成年)	損傷原因	対 策	
		部分取替え	全面取替え
Wheeling (1850)	腐食	○	○
Brooklyn (1883)	腐食	○	○
Manhattan (1909)	腐食	○	○
U.S. Grant (1927)	腐食	○	○
G. Washington (1931)	腐食	○	○
Golden Gate (1937)	腐食	○	○
1st Delaware (1951)	腐食	○	○
Severn (1966)	腐食、疲労		○

表—8 斜張橋ケーブルの損傷例

橋名 (完成年)	損傷原因	対 策	
		部分取替え	全面取替え
Maracaibo (1962)	腐食		○
Wye (1966)	腐食、疲労		○
Köhlbrand (1975)	腐食		○

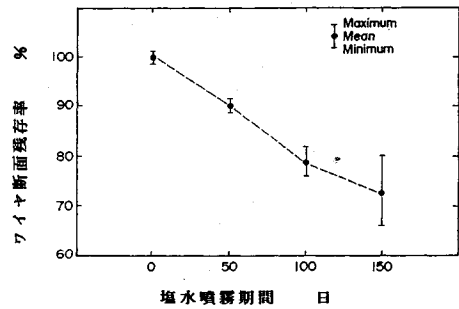
(2) 腐食ワイヤの強度

腐食はワイヤの著しい強度低下を引き起こす。ところが、これに関する研究はあまり多くない。

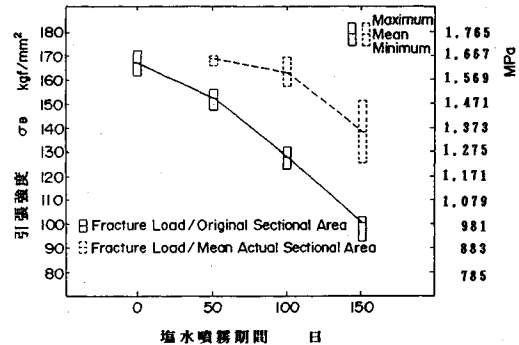
塩水噴霧装置を用いて人工的な腐食ワイヤが作成され、静的強度、および疲労強度について調べられた例¹⁵⁾を以下に示す。図—4には塩水噴霧試験期間とワイヤ断面積との関係を、図—5には静的強度の変化を、そして図—6には疲労強度の変化を示す。また表—9は、ワイヤ残存断面積、静的強度、および5%破壊確率強度の関係をまとめたものである。この表より、静的強度はほぼワイヤ残存断面積に比例して減少するが、疲労強度は急激に低下することがわかる。

ケーブルはワイヤの集合体であり、通常の場合、個々のワイヤ強度を加算すれば、ケーブルの強度になる。しかし、腐食したケーブルの強度を評価する場合には、腐食したワイヤー本ずつの強度を加算したとしても、正當にケーブルの強度を評価したことにはならないので、注意する必要がある。まったく腐食のないワイヤは、全長にわたり十分な延性を有する。しかし、腐食したワイヤは、腐食部分における局所的な断面積減少のため、応力集中を生じ、見かけ上、脆性的に破断してしまう。このため、腐食したケーブルを引張ると、腐食が激しく、強度低下の大きいワイヤの方から順次破断していき、ワイヤー本ずつの強度を加算した数値に見合うだけの強度をケーブルとして発揮できない。

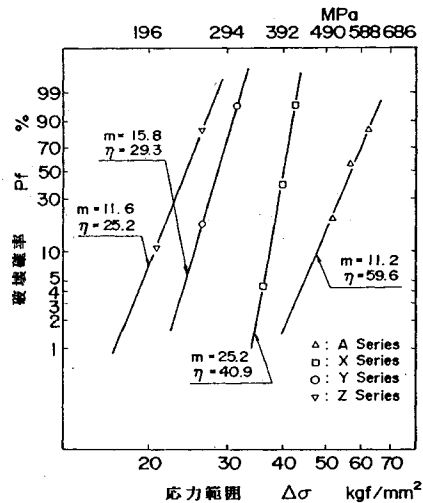
この現象を裏づける試験結果¹⁶⁾があるので、次に紹介する。試験は、腐食したケーブル①と腐食していないケーブル②(供試体はともに PWS-75) について行われ、



図—4 塩水噴霧期間とワイヤ断面減少との関係



図—5 塩水噴霧期間とワイヤ静的強度低下との関係



図—6 腐食ワイヤの疲労強度 (2変数ワイブル分布とみなした評価結果)

表—9 腐食ワイヤの強度のまとめ

項 目	供試体塩水噴霧日数			
	0日	50日	100日	150日
残存断面積平均値	100%	91%	79%	73%
みかけの静的強度の平均値 kgf/mm²	168 (1,648MPa)	152 (1,491MPa)	128 (1,253MPa)	100 (981MPa)
残存率	100%	90%	76%	60%
みかけの疲労強度の平均値 kgf/mm² (破壊確率5%の $\Delta\sigma$)	45 (441MPa)	37 (363MPa)	25 (245MPa)	19 (189MPa)
残存率	100%	82%	56%	42%

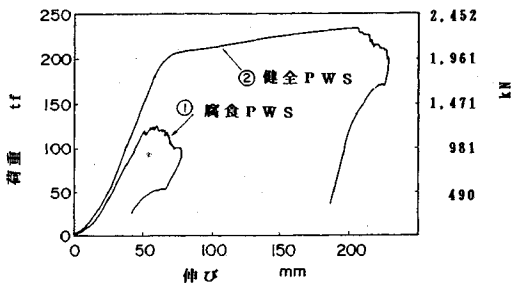


図-7 PWSの引張試験結果

その結果が図-7に示されている。腐食したケーブル①の残存断面積は、最も腐食の激しい箇所では、腐食していないケーブル②の77.2%である。しかし、引張試験の結果によると、腐食していないケーブル②が最大238.5 tonf (2 339 kN)の耐力を示したのに対し、腐食したケーブル①の耐力は、②の53%の126.5 tonf (1 241 kN)にすぎない。

(3) ケーブルの検査

ケーブルの検査方法としては、目視検査が一般的である。検査結果を定量的に表現できないので、いまひとつ信頼性に欠けるとの意見もある。しかし、簡便な方法であり、現状を直観的にすばやく把握できるので、適用実績は多い。吊橋のメインケーブルでは、Golden Gate橋やBrooklyn橋などの検査が目視により行われている^{17)~19)}。ケーブル内部を調べる際には、楔を打ち込み、ケーブルを割った状態で目視、もしくはBoroscopeと呼ばれる胃カメラのようなもので観察したと報告されている。

非破壊的に検査する方法も、いくつか行われている。腐食の程度を調べる方法としては電磁探傷法によるもの^{16), 20)}がある。これは、ケーブルを飽和状態になるまで磁化し、断面欠損部から漏洩する磁束の密度を検出することによって、断面欠損の大きさを知ろうとするものである。また、化学的に腐食の有無を調べる方法としては、ケーブル内部の滞留水を分析した例がLions Gate橋で報告されている²¹⁾。

そのほか、ワイヤの断線を検出する方法があり、アコースティックエミッションによるもの²²⁾と、超音波探傷法によるもの²³⁾とが報告されている。前者は、ワイヤが破断する音響をキャッチするものである。また、後者は、ワイヤ端から超音波を入射し、ワイヤ破断面から反射エコーをキャッチすることにより、断線の有無を調べるものである。

(4) ケーブル維持管理上の要点

ケーブルの維持管理は、設計段階も含めて、次の諸点に注意しておく必要がある。

- ① ケーブルの点検・補修を行うための接近手段を設計当初から考慮しておく。
- ② ケーブル損傷の主なものは、腐食と疲労とである。

十分な防食設計のほか、斜張橋ではケーブル定着部近傍の2次応力についての検討が必要である。

- ③ 最近の傾向としては、ケーブルの損傷・劣化に備えて、ケーブルの交換が可能な全体構造の設計を当初から行っておくべきとの意見が強い。
- ④ ケーブル点検の着目箇所は、次のとおりである。
 - ・吊橋メインケーブル=中央支間センター，吊橋ハンガーロープ=基部，および斜張橋ケーブル=基部など水のたまりやすい箇所
 - ・ケーブルの主塔や主桁への導入部など，ケーブルへの雨水の侵入路となる所
 - ・ケーブル被覆材の変状
 - ・ケーブルバンドのずれ，あるいはボルトのゆるみ
 - ・ケーブル張力の変化

5. 今後の展望

新しいケーブルに求められる性質としては、
 ・錆びにくい／錆びない ・強い ・軽い
 といったことがあげられよう。それぞれにつき、以下で論じる。

(1) 錆びないケーブル

錆びないケーブルを求める声は強く、最近では、新素材を用いたケーブルに対する関心が集まっており、各種ファイバーを樹脂で固めた複合材(FRP)が検討されている。使用されている代表的なファイバーとしては、グラスファイバー、アラミド繊維、および炭素繊維である。繊維の種類、ならびに含浸する樹脂の種類などにより、そのFRPとしての性質は、相当左右される。その概略の目安は、表-10のとおりである。これらの新素材ケーブルが実橋に使われた例も出はじめており、錆びないケーブルの可能性は高まってきているが、安全性についての検討が期待される。

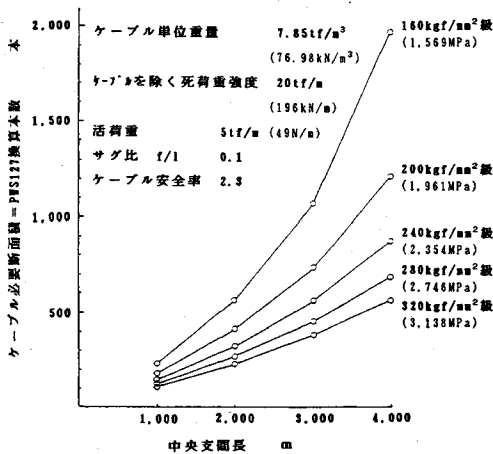
(2) より強いケーブル

明石海峡大橋の設計では、従来の160 kgf/mm² (1 569 MPa)級のワイヤから20 kgf/mm² (196 MPa)アップした180 kgf/mm² (1 765 MPa)級のワイヤを用いることと、安全率の見直しを行うことにより、ダブルケーブルからシングルケーブルへの変更が可能になった。このように、ケーブルの強度上昇のメリットは大きく、吊橋のスパンの更新に対しても重要な因子となる。

ケーブル強度と吊橋中央支間長との関係を、便宜上、安全率・補剛桁の死荷重・サグ比を一定に保ち、概略計算してみると、図-8のようになる。ケーブル強度の増加により、わずかなスパンが伸びる可能性があることがわかる。しかし、高強度ワイヤを用いると、従来の材料に較べて、ケーブル断面積は小さくて済むことになる。そのため、腐食に対して敏感になるので、注意が必要がある。

表—10 新素材を用いたFRPの性質

項目	グラスFRP	アラミドFRP	炭素FRP
引張強度 kgf/mm^2	130 (1.275MPa)	150 (1.471MPa)	170 (1.667MPa)
ヤング係数 kgf/mm^2	5,000 (49GPa)	7,000 (69GPa)	15,000 (147GPa)
疲労特性	良くない	良好	良好
リラクゼーション特性	良くない	良好	良好
耐アルカリ性	良くない	良好	良好
比重	1.5 ~ 2.0 程度		



図—8 吊橋中央支間におけるケーブル高強度化のメリット

(3) より軽いケーブル

高強度化と同様に、ケーブルの軽量化は、吊橋支間長の長大に効果的である。上記と同様な便宜上の仮定を設けて、ケーブル単位重量と吊橋中央支間長との関係を概略計算してみると、図—9のようになる。この図から、軽量化が、強度の上昇と共に、支間長の延長に寄与することがわかる。

ケーブル軽量化のメリットは、斜張橋の場合にも顕著である。長大化する斜張橋では、ケーブルが長くなり、サグの影響が大きくなる。たとえば、主径間 900 m の斜張橋の場合、最大ケーブル長は約 450 m にもなり、鋼ケーブルであれば、4~5 m のサグが生じる。いま、ケーブルの水平投影長を $l=420$ m、またケーブルの応力を $\sigma=40 \text{ kgf/mm}^2$ (392 MPa) と仮定し、Ernst の式²⁴⁾

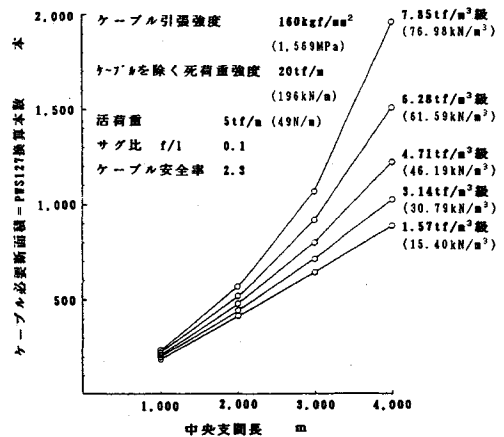
$$\frac{E_{eq}}{E} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma^2 l^2 E}{12 \sigma^3}}$$

を用いて、等価弾性係数 E_{eq} と元のヤング係数 E との比 E_{eq}/E を求めてみる。鋼ケーブルでは

$$E_{eq}/E = 0.7794$$

となり、直線ケーブルの約 8 割まで見掛けのヤング係数が低下することになる。しかし単位重量が鋼の 1/5 程度の炭素 FRP ケーブルでは

$$E_{eq}/E = 0.9888$$



図—9 吊橋中央支間におけるケーブル軽量化のメリット

となり、見掛けのヤング係数はほとんど低下しない。これより、単位重量の小さいケーブルを用いることにより、長大斜張橋の斜材を効果的なものとして行うことができることがわかる。

しかし、ケーブルを軽量化すると、ケーブル自体の振動が問題となる可能性が十分に予測できるので、この方面の検討が重要である。

6. ま と め

本文では、橋梁用ケーブルの現状の課題と今後の展望について調査を行った。まず、吊橋メインケーブルに関する技術は、その起源も古い、現在でも製作・架設両面で技術開発が進んでいる。つぎに、斜張橋ケーブルは、吊橋に比べてまだ歴史が浅いこともあり、種々な技術的課題が一つ一つ解決されている段階にあるといえよう。さらに、吊橋、および斜張橋のいずれにおいても、腐食や疲労に起因するケーブルの損傷例が現れはじめており、今後、検討を加えるべき課題である。そして、将来の展望として新素材を用いたケーブルが実現する可能性は、大きいと考えられる。ところが、土木材料として必要不可欠な長期間にわたる耐久性の検討がまだ行われていないことや、伸びが小さいこと、および塑性域がないことなどのデメリットもあり、現状では是非を論じることにはできない。しかし、それらのうちで可能性があるものとしては、耐食性、高強度・高弾性、軽量の観点から、炭素繊維の FRP が有望でありそうである。

しかしながら、いたずらに新しいものばかりを追いかけるのではなく、既設の鋼製ケーブルの点検やメンテナンス業務の中から、より合理的な材料のあり方、施工法の改善などを探っていくことも重要な課題である。

参 考 文 献

- 1) Birdsall, B. : Main cables of Newport Suspension Bridge,

- Proc. of ASCE, Vol.97 No.ST-12, pp.2825~2835, Dec. 1971.
- 2) 三田村武・守 國夫・川田忠樹・堀米 昇・野村国勝：パラレルワイヤーストランド工法による八幡橋の施工，橋梁と基礎，Vol. 3, No.8, pp. 17~25, 1969 年 8 月。
 - 3) 石岡千里・池田辰雄・隠岐保博・山田幸男：本四架橋と鋼材，R&D 神戸製鋼技報，Vol. 38, No. 1, pp. 23~25, 1988 年 1 月。
 - 4) 高橋稔彦・今野信一・佐藤 洋・落合征雄・野口義哉・芹川修道・俵矢与文：橋梁ケーブル用高強度亜鉛めっき鋼線の開発，製鉄研究，第 332 号，pp. 53~58, 1989 年 1 月。
 - 5) 飯島武明・辰巳正明・森山 彰：高強度鋼線を用いた吊橋ケーブルの設計，土木学会第 44 回年次学術講演会第 1 部，pp. 552~553, 1989 年 9 月。
 - 6) 坂本良一・俵矢与文：エラスピニング工法によるケーブル工事—平戸大橋一，道路，通巻 418 号，pp. 41~48, 1975 年 12 月。
 - 7) 三田村武・穂山正幸・遠藤鷹光・杉井謙一・桑本俊一：4 000 m 級 PWS の製作・展開実験，R&D 神戸製鋼技報，Vol. 38, No. 1, pp. 46~47, 1988 年 1 月。
 - 8) Matsuzaki, M., Uchikawa, C., Mitamura, T. : Advanced Fabrication and Erection Techniques for Long Suspension Bridge Cables, Construction Engineering and Management, Journal of ASCE, Vol.116 No.1 pp.112~129. MAR. 1990.
 - 9) Mitamura, T., Sugii, K., Akiyama, M. and Nishi, T. : A New Cable-Erection Method for Suspension Bridges, 3rd East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Shanghai, China, Apr. 1991. (in press)
 - 10) DIN 1073 Stahlerne Strassenbrucken · Berechnungsgrundlagen, Jul. 1974.
 - 11) 横山功一・日下部毅明：斜張橋ケーブルの風による振動と対策，橋梁と基礎，Vol. 23, No. 8, pp. 75~84, 1989 年 8 月。
 - 12) 松本 勝・白石成人・辻井正人・平井滋登：斜張橋ケーブルの空力振動に関する研究，土木学会論文集，第 416 号／I-13, pp. 225~234, 1990 年 4 月。
 - 13) 古田 均・亀井正博・金吉正勝・田中 洋：ファジー理論を応用したケーブル張力の最適調整法，システム最適化に関するシンポジウム講演論文集，pp. 147~154, 1989 年 11 月。
 - 14) Niwa, Y., Nakai, H., Watanabe, E. and Yamada, I. : On Long-Time Behavior of Cables in Cable-Stayed Bridges, Proc. of JSCE, No.368, pp.45~55. Apr. 1986.
 - 15) 佐々木佳男・木内 晃・新家 徹・湊 理宙・西 壽樹・杉井謙一：腐食ワイヤの疲労強度解析，R&D 神戸製鋼技報，Vol. 38, No. 1, pp. 63~66, 1988 年 1 月。
 - 16) Fujinaka, Y., Hanasaki, K., Tsukada, K., Yoshioka, N. and Sugii, K. : Magnetic Inspection of P.W.S. Ropes, Proceedings of 11th World Conference on Non-Destructive Testing, Las Vegas, U.S.A., pp.154~161, Nov. 1985.
 - 17) Ammann & Whitney Consulting Engineers : Golden Gate Bridge/Report on Inspection of Condition of Major Structural Units, Nov. 1969.
 - 18) Birdsall, B. : Preparing the Brooklyn Bridge for 1st Second Century of service, Annals New York Academy of Sciences, Vol.424, pp.93~105. May. 1984.
 - 19) Instrument Inspects Brooklyn Bridge Cables, Civil Engineering, p.124, Sep.1986.
 - 20) Hanasaki, K., Tsukada, K., Fujinaka, Y., Mitamura, T., and Sugii, K. : A Magnetic Method to Measure Metallic Cross-Sectional Area of Corroded Steel Wire, Proc. of 12th World Conference on Non-Destructive Testing, Amsterdam, Netherland, pp.1270~1272, Apr. 1989.
 - 21) Buckland, T. : The Lions' Gate Bridge—Investigation, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.8, pp.241~256, Aug. 1981.
 - 22) Robert, J. and Brachet-Rolland, M. : Survey of Structures by Using Acoustic Emission Monitoring, IABSE Symposium, Washington DC, Final Report, pp.33~38, Nov. 1982.
 - 23) 亀井正博・岩崎全良・杉井謙一・高松弘行：北港連絡橋ハンガーケーブルの維持管理，橋梁と基礎，Vol. 21, No. 5, pp. 29~34, 1987 年 5 月。
 - 24) たとえば小西一郎編：鋼橋，設計編Ⅱ，丸善，p. 991, 1976 年 1 月。
 - 25) Watanabe, E., Kamei, M., Mitamura, T. and Sugii, K. : Recent Development in Bridge Cables, Proc. of 2nd KAIST-Kyoto Univ. Joint Seminar/Workshop on Civil Engineering, Kyoto Japan, pp.103~114, Apr. 1989.

(1991.3.5 受付)

RECENT TOPICS ON BRIDGE CABLES AND FUTURE PROSPECTS

Takeshi MITAMURA, Hiroshi NAKAI, Eiichi WATANABE and Ken-ichi SUGII

Recently a considerable number of cable-based bridges such as suspension bridges and cable-stayed bridges have been constructed, and several cases of bridge damage and repair or replacement of cables have been reported. Cables are the most important members in cable-based bridges ; their further investigation, therefore, is deemed to be necessary for the future development of the bridges. Presented in this paper are the subjects and the future prospects of the cables of cable-based bridges. Firstly the changes and the trends on the main cables of suspension bridges are stated, secondly those on the stay cables of cable-stayed bridges. Thirdly on both types of bridges, the instances of cable damage, the strength of corroded wires, the inspection methods of cables, and the point of cable maintenance are mentioned. Furthermore the significance and the possibility of new cables are discussed as future prospects : rust-free cables, stronger cables and lighter cables.