

【寄稿論説】

ケーブル材料の進歩と吊構造橋梁

Development of the Cable Material and Suspended Bridge

埼玉大学工学部建設工学科教授, 工博
Professor of SAITAMA University, Dr.Eng.

田 島 二 郎
Jiro TAJIMA



1. はじめに

昨年(61年)の夏, 土木学会中部支部作成中の「中部の土木史」の一節のために, 藤橋や籠渡しの資料をいくつか調べた。また, 7月の日本鋼構造協会大会の研究集会の「吊構造の進歩」のテーマの中で, ケーブル材料の進歩について数十分の発表を行った。そこでは金属ワイヤを初めてケーブルに使った吊橋から, 現在の材料での限界と思われる吊橋, 複合ケーブルまでにふれた。今回この論説を書くに当ってはその両者をベースとしたが, 改めて川田社長の労作になる「吊橋の文化史」(1983年3月, 技報堂出版)をひもとき, 巧みな筆致で莫大な文献からまとめられたそれに多くのものを教えられた。吊橋の系譜についてはそれに尽きるものであるが, 以下にケーブル材料の変遷のみに着目してざっと歴史をたどり, 今後の問題についてふれてみたいと思う。

2. 藤橋・籠渡しの頃

飛び石, 風倒木に頼った橋の源の他に, 兩岸に渡した自然の材料によるケーブルを利用した川渡りの方法も, 橋の発生形態のひとつとして古くから在ったようである。

張り渡された1本のケーブルにすがって, 強い, 巧みな手さばき足さばきで対岸に渡る綱渡り——現在のレスキュー隊のそのように——から, 主索に籠をぶらさげてそれに乗る, もうひとつ張った引き綱あるいは控え綱によって移動する籠渡し, 数条の主綱の上に細い丸木などで踏面を作り, そこを渡る藤橋などである。

その起源は, アフリカのジャングルに狩猟時代をそのままの生活を営む部属の中にもその橋が残っているように, 随分古くからのものであり, アジアからアフリカに亘って広く伝えられている。

ケーブルの材料としては, 藤, かづらをそのまま撚っ

たものと, 竹や竜舌蘭, 柳などの丈夫な天然の繊維を撚ったものなどがあつた, その太さは直径20cmに達するという記述もあり, 人の胴まわりほどもあろうかと表現されているものもある。ウエスト60cmのプロポーションなら十分それと比べられる太さである。

かづらの強さがどの位あるか調べたことはない。写真-1は数年前祖谷のかづら橋架替のときのものを人づてに入手したもので, 今も書棚の一隅に置いてある。その引張試験をととも思うが, 少々小さすぎるようでまだ果していない。



写真-1 かづらの一片

藤橋は数条の主綱のため, 1本の太さは籠渡しのそれより細くできる。写真-2は絵画に見るそれで, 集中荷重のために数十%の傾斜になっており, 手すりのないその上を果して渡れるのだろうか。もちろんこのような絵は相当デフォルメされているとして, 10%位の傾斜でも

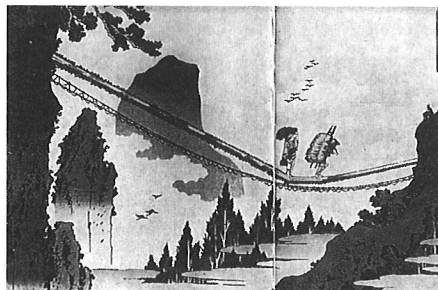


写真-2 飛驒の藤橋(北斎)

揺れるこの橋では危険この上ない。この場合、主綱にかかる力は1トン前後。安全率を考えれば相当丈夫な綱が必要になる。PC吊床版橋が今日のその姿である。

藤づるの橋には、この絵のように手すりのないものでなく、両側にも同様数条の索を張ったものがある。この場合だとそれらが協同して働けば、それだけ耐力は増す。さらに索の支点を床を作るものと上層のそれとを分け、後者を高い所に選べば効率は上る。祖谷のかづら橋はそのひとつの形で、近代の吊橋、斜張橋に近付いた構造形を示してくる(写真-3)。

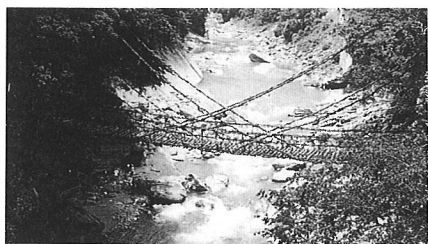


写真-3 祖谷のかづら橋(1979年撮影, 田島)

祖谷のかづら橋は弘法大師遍歴の際の創始とか、平家の落武者が架けたとか云われているが、前者なら1100年以上も昔のことになる。

籠渡しで渡れる長さは、古記録によれば最大50m程度であったであろう。大綱長50間(90m)という記録もあるが、これはアンカーまでの長さも含めた全長を云っているのかも知れない。

3. 鉄製チエン、アイバーの採用

傷み易く、1~2年、3年程で取替えなければならぬ前記の天然の材料のケーブルから、耐久性のある鉄のケーブルを用いた橋へと進歩する。その発生は中国かインドか、議論があるようである。なお、中国では紀元前200年頃に既に鉄のチエンを用いた吊橋が在ったと云われ、その支間は120mにも達していたと云う。

西洋の吊橋は、16世紀頃はなおロープを用いた吊橋のようで、鉄製のアイバー状リンクを用いた吊橋の提案は17世紀に入ってから、鉄製チエンが実用されたのは18世紀も1/3もすぎた頃であり、東洋に比べてはるかに遅れていた。

当時は鍛接で継ぎ合されていたであろうリンクから成るチエンは、鉄の材質の不十分さのためもあり、しばしば風や雪、あるいは通行する荷重に耐えられずに破断し、落橋の憂き目を見た。

19世紀に入り、吊橋の技術はヨーロッパから渡ってアメリカでまた大きく進んだ。1807年、ワシントン・ポトマック川の吊橋には、直径32mmの鍛接ロッドのリンクが用いられたが、支間は38.6mであった。またこの頃には

斜張橋あるいは斜張橋と吊橋との混合形態のものも建設されている。

ケーブル材料は、鍛造ロッドを連ねたリンクの主索から、フラットバーを用いたアイバーリンクの主索へと進む。支間も百数十mにまで達している。この時代の吊橋は、今日でも心配った維持管理により、その姿を我々に伝えている(写真-4)。



写真-4 テームズ川のアルバート橋(1873年)

斜索はフラットバー、ロッドの鉛直ハンガーもある混合形式(1980年8月撮影, 田島)

日本では東京隅田川の清洲橋にそれを見ることができ。ただし、竣工は1928年、主索のフラットバーは50キロ級のデューコール鋼である(写真-5)。



写真-5 隅田川の清洲橋(1977年9月撮影, 田島)

4. ワイヤケーブルの橋に

最初のワイヤケーブルを用いた吊橋は、1816年にアメリカで架けられた。それぞれ3本の真鍮製ワイヤロープを用いた2本のケーブルを用い、支間は123.6mである。しかし、架けられたその冬に、雪と氷の重さに耐えられず崩壊した。

鉄製ワイヤロープを用いた吊橋の最初はフランスで、1823年のことである。焼なまし鉄線でラッピングされ、ワニス塗装が施された。英米流のチエンケーブルに対し、

フランスではワイヤケーブルの吊橋が特に多く、19世紀半ばまでで数十橋架けられていた。

当時はチエン方式とワイヤロープ方式との両工法が並列して進んでいたが、チエンの場合その材質的なあるいは製作時の出来方などから何処かに弱点を持つものがあると、それによりケーブル強さは支配されるので、多数のワイヤを束ねたものの方が良い、というのがフランスでそれを採用するグループの考え方であった。

一方、この頃やはりフランスでワイヤケーブルにおける素線の空中架線による施工が開発された。この工法が定着するまでにはかなりの年月を要しはしたが、これにより、プレファブストランドの製作および架設のための取扱い、塔頂での曲げによる二次応力の問題などに対する解決策が見出され、ワイヤケーブルによる大型の吊橋への道が開かれて行く。

鋼製ワイヤをケーブルに始めて用いた橋は、ニューヨークのブルックリン橋で、1883年竣工である。ここではまた防錆の手段として亜鉛メッキが施されたのも初の試みである。以後、長大吊橋の主ケーブルは亜鉛メッキを施した平行線ケーブルが定着して行く。

表－1に、ブルックリン橋以降の長大吊橋の主ケーブルワイヤの強さと安全率を示す。

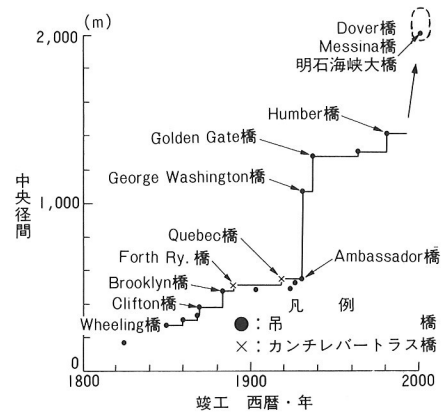
表－1 ワイヤの強さと安全率

橋 名	完成年	ワイヤ径 (mm)	引張強さ (kg/mm ²)	許容応力 (kg/mm ²)	安全率		
					米	英	日
Brooklyn	1883	4.75	112	33	3.3		
Williamsburg	1903	4.88	141	—			
Manhattan	1909	4.95	148	51	2.9		
Bear Mountain	1924	4.95	151	—			
Delaware	1924	4.98	151	55	2.7		
George Washington	1931	4.98	155	58	"		
S.F.O. Bay	1936	—	"	"	"		
Golden Gate	1937	4.95	"	"	"		
Bronx Whitestone	1939	—	"	"	"		
Tacoma Narrows	1949	4.98	"	"	"		
Delaware Memorial	1951	—	"	"	"		
Mackinac	1957	—	"	"	"		
Walt Whitman	1957	—	158	"	"		
Verrazano Narrows	1964	4.98	158	61	2.6		
Forth Road	1964	4.98	155	62		2.5	
Severn	1966	4.98	155	70		2.2	
Salazar	1966	5.00	156	—			
New Port	1969	5.13	155	61	2.5		
Bosporus	1973	5.00	160	70		2.3	
関門	1973	5.04	"	56			2.9
Humber	1981	—	"	70		2.3	
因島	1983	5.17	"	56			2.9
大鳴門	1985	5.37	"	64			2.5

これをみると、ワイヤの強さは112kg/mm² (資料により数kg/mm²異なる) から20年にして141kg/mm²と25%向上したが、以後80年間で十数%しか強度は上っていない。安全率はアメリカでは3.3から2.5に、イギリスではさらに2.2程度まで低まった (ボスポラス橋もイギリス系に入れてある)。日本では、主ケーブルの二次応力その他を検討し

た上で、大鳴門橋からやっとアメリカ並みにまで達した。ドイツには平行線ケーブルを用いた長大吊橋はないが、DINでは引張強さに対し2.2、0.2%耐力に対し1.5の安全率を規定している。

近代吊橋は、ピアノ線という強力な引張材を得て、吊橋の挙動に対する認識の深まりと共に、次々とその支間を伸ばして来ている。図－1は、各時点で最大支間長となった橋を年代と共に示したものである。この間39年間にわたってはカンチレバートラス橋に最大支間の座をゆずったが、他の期間は吊橋が第1位を占めている。



図－1 各時代の最大支間の橋

吊橋の支間は何処まで伸びられるのだろうか。これについてかつて試算された報文によると、現状の材料を用いるとすると、4,000m位が実用的限界となる。明石海峡大橋が1,990m、イタリアのメッシナ海峡で検討されている吊橋が3,300m。現在のシステムをとった吊橋はそろそろその限界に近付いて来たようである。

5. ケーブルの防食

ここ100年の間、長大吊橋主ケーブルの防食方法は亜鉛メッキワイヤにラッピングという方法が定着している。そしてその方法で今日まで100年の間耐えている、という実績は在る。

一方、ここ30年来、現代の長大橋の一形式として急速にその地位を占めつつある斜張橋では、ロックドコイルロープの採用から、平行線ケーブルでは合成樹脂ラッピングが試みられ、さらにポリエチレン管のカバーなどのワイヤラッピングよりは防食効果が高いと考えられる工法が開発され、斜張橋ではそれが多くなって来た。

素線はピアノ線、それに亜鉛メッキ、あるいはPC鋼より線が用いられ、ポリエチレン管との間にセメントミルク等を注入したもの、素線間にやわらかい防錆剤を充填し、あるいは鋼線をテープで巻いた上にポリエチレン管を直にかぶせた非注入タイプ、小ストランドをポリエチレンでカバーし、それを束ねるなどいくつかの方式

である。図-2はその断面の概念図である。これらは1ストランドで2,400tから3,200t程度の引張荷重のものまでメーカーのカatalogには示されている。

吊橋主ケーブルの防食方法に比べて、はるかに入念な対策が施されたものと云えよう。

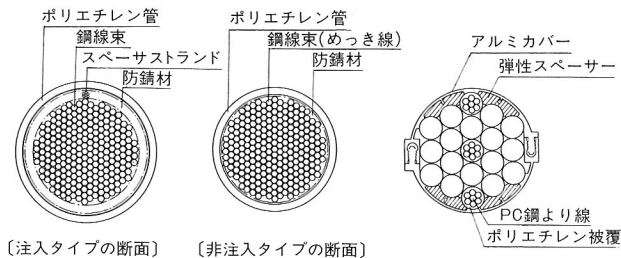


図-2 ポリエチレンカバーのケーブル

吊橋主ケーブルの防食方法として、1984年のIABSE大会セッション7に、ドイツから興味ある論文が寄せられている。ワイヤ37本または61本のプレファブ六角平行線ストランドを張り渡すものであるが、リールから引き出す際に120°に予熱され、合成樹脂でワイヤ間の空隙を充填する。張り渡す途中でそれは適当に固まり、塔頂サドル上での曲げの影響はうまく樹脂のクリープで緩和されるという。六角形のストランドをきちんと束ねて円形とすればよく、いわゆる強く締めるようなスキージングは必要ない。外周の凹凸は樹脂で埋め、あとはワイヤラッピングもする。この方法は実大の実験でも確められていると云う。

従来の空隙あるままの主ケーブルをラッピングしたものでは、完全な気密は保てず、この方法はそれに対するひとつの改良としての示唆を与えるものと思う。

空隙に湿気を吸込む、空隙を伝って水気が通るなどに対して、防錆作用のある液体、粘性体を塔頂から流下させる、ドライエアを送るなどの方法を検討したという話も以前聞いたことがあるが、どんなものであろうか。

ドライエアを送る方法がアンカレイジ内や箱桁内で有効なことは、デンマークのリトルベルト橋、ファロー橋で実証されており、大鳴門橋でもアンカレイジ内の除湿が良い効果をあげている。

支間の長大化に伴い主ケーブルの所要量はどんどん多くなる。それに対してワイヤの強さをただ上げて量を減らそうという手段では、飛躍的な吊構造の発展には至らない。またその際、従来の防食方法のみで果して良いのか気になるところである。ワイヤの材質に対する新たな視点からの検討も必要であろう。

6. 新素材ケーブル

New Civil Eng.の3月20日号に、ケブラーロープを用いると、支間5kmの吊橋が可能であるとの記事があった。

ここで考えているケーブル材料は、引張強さ195kg/mm²、ヤング率1.2×10⁶kg/cm²で、重量は鋼の1/7である。Financial Timesでも昨年始め、ドーバー海峡横断計画に対し、同じく4,500mの吊橋を連ねる案もあると報じていた。

「ケブラー」は米国デュポン社によって、1973年に開発された芳香族ポリアミド繊維で、その商標である。また、アラミド繊維は米国公正取引委員会連邦通商委員会によって芳香族ポリアミドに命名された名称である。これは、従来のナイロン、脂肪族ポリアミドと区別するためと考えられる。表-2にケブラーと他繊維等との物性を比較して示す。

表-2 ケブラーと他繊維等との比較

種 類	ケブラー-29	ケブラー-49	ナイロン	テトロン	E-HTS ガラス	ワイヤ
項 目						
引張強さ (kg/mm ²)	282	282	84	102	245	200
" (g/D)	22	22	8.2	8.2	—	—
モジュラス (kg/mm ²)	6,300	13,000	560	1,400	7,000	20,000
破断時の伸び率 (%)	4.0	2.4	18.0	10.0	3.5	1.1
密 度 (g/cm ³)	1.44	1.45	1.14	1.35	2.55	7.86

海峡横断プロジェクトのひとつジブラルタル計画でも、炭素繊維複合材料を用いた8.4kmの吊構造橋梁の試算がある。スイスEMPAのU.Meierの論文である。これだけの支間をとると、海峡の最も狭い所をひとつの橋で渡ることができると云う。この橋の場合、吊橋よりは斜張橋形式がむしろ良いとしており、主桁にも複合材料の採用を考えている。

表-3に炭素繊維の概要を示す。強度、弾性からの別、原料からの別などにより製品の特徴が異っている。

表-3 炭素繊維のタイプ別特性

項目		単位	原料	タイプ	GP		HP			
					ピッチ	HT		HM		
						PAN	ピッチ	PAN	ピッチ	
比重					1.6~1.7	1.74~1.82	1.98	1.82~1.85	2.02~2.03	
直径	μ				10~12	7~9	9	7~9	8	
引張強さ	kg/mm ²				85~120	250~350	250	230~250	210	
引張伸び	%				2.2~2.4	1.0~1.3	1.2	0.6	0.45	
引張弾性率	10 ³ kg/mm ²				3~5	20~26	21	35~40	38~52	
線膨張係数	10 ⁻⁶ /°C				1.7	-0.7	—	-1.2	—	
体積抵抗	10 ⁻³ Ω-cm				5.5~15	1.6	—	0.8	—	

写真-6は、写真-1のかづらと共に置いてある炭素繊維複合ケーブルである。橋梁用ケーブル材料としてその機能を考えたの今後の開発に期待したいもののひとつである。

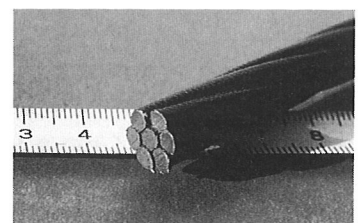


写真-6 CFCC