

# 長大橋に関する最近の話題

大阪大学工学部土木工学科 小松 定夫

## まえがき

新年を迎え晴々しい気分でご稿の構想を練っている最中に、昭和48年度における本州四国連絡橋の3路線同時着工の予算措置が決定したというニュースが報ぜられた。最近はとかく暗いニュースが多いなかで、工事総額1兆2,900億円、工期13年という世紀の大事業に託する国民の期待は大きく膨らんだものと思われる。

橋の本来の役割が庶民的であるということからくる親近感がそうさせるのであろうと思われるが、昔から絵画、小説、映画になって人々から愛好されてきた。筆者は海外出張の際に立寄って長大橋の英姿をまのあたりに眺めたとき、しばらくその壮観さと厳肅さに胸を打たれた経

験がある。そのような長大橋の悠然とした姿には、機能性に対する親近感と共に、何とも言えない安定感と特有の威厳を覚えたのである。またその遠景には優雅で芸術的な格調の高さが認められ、人々の目を奪うものがある。

さて世界で最も長い橋から10傑を選び出すと表1のとおりである。これらはいずれも吊橋である。橋にはいろいろな構造形式があるが、スパン長（橋脚と橋脚の間隔）が700m以上ともなると、現在の材料と橋梁技術では、従来の他の型式の橋を経済的にかけることは極めて困難である。吊橋がこのように長大橋に適している理由は荷重の大部分をケーブル（直径5mmの鋼線を何万本も束ねたもの）の引張力で吊り上げ

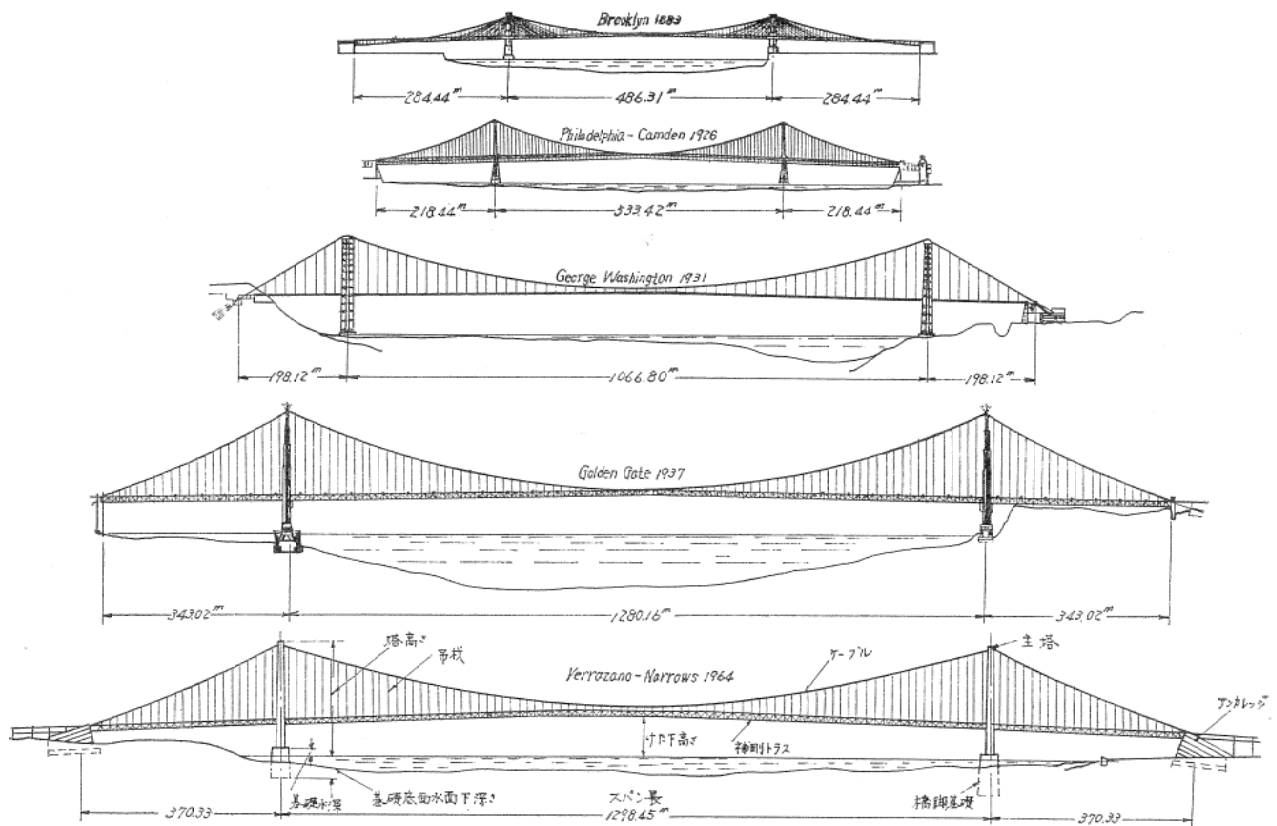


図1. 吊橋の変遷

表1 1973年における世界長大橋10傑

| 順位 | 橋 名               | 工期<br>(月) | 使用状態                         | スパン長<br>(m) | 塔 高 さ<br>(m) | 塔橋脚の<br>基礎水深<br>(m) | 基礎底面の<br>水面下深さ<br>(m) | 航路部<br>けた下高<br>(m) | 総鋼材重量<br>(t)<br>吊橋部(A) | コンクリ<br>ート総量<br>(m <sup>3</sup> ) | 設 加 速 度<br>(g)            | 計 設<br>設計風速<br>(m/sec) | 塔重量B<br>(t)      |
|----|-------------------|-----------|------------------------------|-------------|--------------|---------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------|
| 1  | Verrazano-Narrows | 70        | 2層<br>12車線                   | 1,298       | 192.0        | 13.1                | 51.8                  | 69.5               | 163,931<br>(132,102)   | 434,900                           | 考慮せず                      | 31.9                   | 48,184<br>(0.36) |
| 2  | Golden Gate       | 52        | 上<br>6車線                     | 1,280       | 210.4        | 24.4                | 30.5                  | 67.1               | 88,307<br>(83,663)     | 297,400                           | 静的設計<br>水平0.075           | 34.9                   | 38,936<br>(0.47) |
| 3  | Mackinac          | 48        | 上<br>4車線                     | 1,158       | 157.0        | 42.7                | 63.1                  | 45.1               | —<br>(38,018)          | 356,500                           | 考慮せず                      | 45.1                   | 11,794<br>(0.31) |
| 4  | Bosporus          | 42        | 上<br>6車線                     | 1,074       | 165.0        | 0                   | 19.0                  | 64.0               | —<br>(19,200)          | 51,000                            | 静的設計<br>水平0.1             | —                      | —                |
| 5  | George Washington | 48        | 2層<br>14車線                   | 1,067       | 170.5        | 4.6                 | 21.3                  | 64.9               | 148,998<br>(101,866)   | 174,500                           | 考慮せず                      | 34.9                   | 41,841<br>(0.41) |
| 6  | Salazar           | 45        | 上<br>4層<br>下<br>4層<br>複<br>線 | 1,013       | 181.5        | 27.4                | 79.2                  | 75.0               | 72,600<br>(38,030)     | 263,000                           | 動的設計<br>0.12              | 49.2                   | 13,960<br>(0.37) |
| 7  | Forth Road        | 73        | 上<br>4層<br>式<br>線            | 1003        | 150.0        | 7.0                 | 29.0                  | 45.7               | 39,624<br>(30,480)     | 71,900                            | 考慮せず                      | 49.2                   | 6,096<br>(0.20)  |
| 8  | Severn            | 64        | 上<br>4層<br>式<br>線            | 988         | 121.9        | 9.8                 | 19.8                  | 36.6               | —<br>(18,796)          | 96,300                            | 考慮せず                      | 44.7                   | 2,743<br>(0.15)  |
| 9  | New Tacoma        | 30        | 上<br>4層<br>式<br>線            | 853         | 140.8        | 41.1                | 68.6                  | 66.1               | —<br>(26,265)          | —                                 | 考慮せず                      | 55                     | 4,854<br>(0.18)  |
| 10 | 関 門 大 橋           | 60        | *)上<br>6層<br>式<br>線          | 712         | 135.0        | 3.9                 | 23.0                  | 61.0               | 28,000<br>(19,050)     | 150,000                           | 動的設計<br>水平0.15<br>鉛直0.075 | 54                     | 5,654<br>(0.30)  |

\*)暫定4車線

( ) 内, 上部構造のみ

補剛トラス, ( ) 内  
B/Aに対して

ているところにある。これらの鋼線の破断強さは、けた橋やアーチなどに使われる板素材（S M50）の破断強さの3倍以上ある。その上、ケーブルには、けた橋やアーチのように曲げが作用しないので、力学的効率は極めてよい。このような理由から、今日世界最長は New York の Verrazano-Narrows 橋の1298mである。（図1）

関門大橋は今年度中に完成の予定であるが、やっと10位に喰い込んだところである。もっともこの順位がそのまま、その国の橋梁技術のレベルを表わしているとは言えない。適当な架設地点、国の経済力と架橋の必要性、為政者の建設意欲を燃やすにたりる政治的背景などが伴わない限り、その偉観を地上に現わすことができない。

現にドイツを初めとする E C 諸国、カナダなどにおける橋梁工学のレベルは非常に高く、特にドイツでは写真1に示す優美さと経済性を兼備する新形式の斜張橋を近代橋梁の仲間入りさせたという偉大な功績を残している。

その他、大戦後、ドイツの橋梁工学は中小スパン橋梁の先駆的役割を果たしてきたことは否定できない。にもかかわらず技術面以外の理由で、実力を十分発揮できず、世界長大橋の一角に割り込む機会がないのは、誠に残念なことであろうと思われる。それに比べて今日、わが橋梁界は非常に恵まれた立場にあると言わねばならない。

### 1500m級吊橋への挑戦

現在、世界各国で実施計画がなされ、着工が確実なものを選び出して、1986年すなわち本州

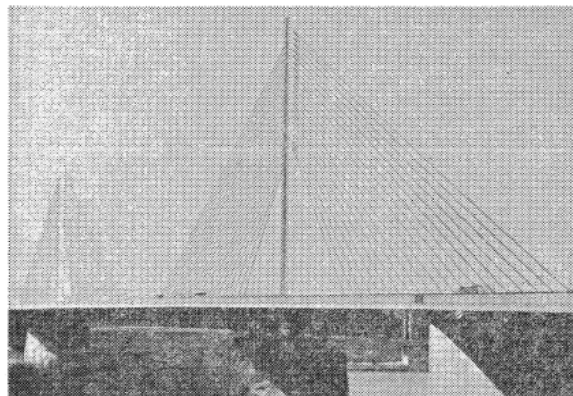


写真1 Bonn-Nord 橋の全景

四国連絡橋の全路線完成予定年度までに完成すると思われる長大橋の21位までを列举すると、表2のとおりである。その時期には明石海峡大橋（1,514m）が首位の座に踊り出ると同時に、10橋までがわが国において新しく完成されるのである。

しかもすべてわが国の橋梁技術陣が最近ようやく経験した本格的な長大橋である関門大橋を遙かに上まわる大ききで、明石海峡大橋に至っては、一挙に2倍のスパン長に飛躍するという急成長を成し遂げねばならない、必ずしも短い橋から順次着工し、時間をかけ経験を積んで1橋ずつ完成させてゆくというのではなく、むしろ長大なものは工期が長いので早い目に着工することになる。したがって過去の経験から、かなり大幅な外挿を余儀なくされるわけである。

元来、橋梁建設にはマスプロ的性格が薄く、ことに長大橋ともなれば、まったくの注文製産であるので実物による試行錯誤的改良法は不可能である。それゆえに、過去10年以上にわたり、この外挿を目標にして、各種の調査や試験データの積重ねや緻密な学問的考察と技術的検討のため多くの時間をかけて着々と準備が進められてきた。表1の設計条件の欄からもわかるように、わが国の架橋地点では、長大橋の死命を制すると考えられる地震と台風という自然の悪条件が重なっているという点から、単に既往の諸外国の技術に追従するという態度を放棄して、われわれ自身の手を汚して自信という宝石を探しあてねばならないわけである。かくして、わが国橋梁工学の真価が問われるときが到来したといえよう。

このようなタイミングを考え、長大橋に関するいくつかのトピックについて述べることにする。

### 高度な構造解析理論の進歩

吊橋の主要部材は図1に示すようにケーブル、塔、補剛トラス（または補剛けた）、吊材、橋脚基礎、アンカレッジであるが、アンカレッジと橋脚基礎を下部構造といい、その他を上部構造という。

一般に双一対の上部構造を路面の両側に並列

表2 1986年における世界長大吊橋の予想

| 順位 | 橋名                | スパン長<br>(m) | 所在地                      |
|----|-------------------|-------------|--------------------------|
| 1  | 明石海峡大橋            | 1514        | 明石, 日本                   |
| 2  | Humber            | 1396        | Kingston-upon-Hull, 英    |
| 3  | Verrazano-Narrows | 1298        | New York, 米              |
| 4  | Golden Gate       | 1280        | San Francisco, 米         |
| 5  | Mackinac          | 1158        | St. Ignace, 米            |
| 6  | 南備讃瀬戸大橋           | 1110        | 坂出, 日本                   |
| 7  | Bosporus          | 1074        | Istanbul, トルコ            |
| 8  | George Washington | 1067        | New York, 米              |
| 9  | Salazar           | 1013        | Lisbon, ポルトガル            |
| 10 | 来島第3大橋            | 1008        | 今治, 日本                   |
| 11 | Forth Road        | 1006        | Queenferry, 英            |
| 12 | Severn            | 988         | Beachley, 英              |
| 13 | 下津井瀬戸大橋           | 909         | 児島, 日本                   |
| 14 | 因島大橋              | 907         | 因島, 日本                   |
| 15 | 多々羅大橋             | 887         | 大三島, 日本                  |
| 16 | 北備讃瀬戸大橋           | 869         | 坂手, 日本                   |
| 17 | 来島第1大橋            | 867         | 大島, 日本                   |
| 18 | New Tacoma        | 853         | Puget Sound, 米           |
| 19 | 大鳴門橋              | 808         | 鳴門, 日本                   |
| 20 | 関門大橋              | 712         | 下関, 日本                   |
| 20 | Angostura         | 712         | Giudad Bolivar,<br>ベネズエラ |

させ、その間に床組、横つなぎ材を設けて上方に床版を載せるのが典型的な吊橋構造である。

(図1)そこで路面に載った重量(荷重)は、まず床版に支持され、床組から補剛トラス、吊材、ケーブル、塔を経て、橋脚基礎あるいはアンカレッジに順次、力が伝達される。その際の構造各部に生ずる応力や変形量の計算については、双1対の上部構造のうちの片側の平面構造系をとり出して荷重を補剛トラスに作用させて、図1に示すような平面構造系と仮定し、構造解析を実施するのが従来の一般的解法であった。

実際には全体が立体骨組構造系を構成している。したがって床面に載った荷重に対して立体構造系として抵抗している。

ところが本州四国連絡橋の中でも明石海峡大橋、備讃瀬戸大橋などは道路鉄道併用橋であるために、重い列車荷重が片側に偏載するので、立体構造解析を行なって、従来よりも合理的な設計をすることが重要である。長大吊橋のように部材の総数が龐大な立体構造物に対しては通常の大変形骨組構造解析法では、現存の大型電子計算機を利用しても十分な計算精度をうることが難しい。

そこで本州四国連絡橋技術委員会解析分科会において筆者は非常に精度のよい吊橋の大変形立体解析法を提示し、自動車、列車荷重、風荷重に対する設計の合理化を推進することを提案した。

材 料

長大橋の技術的な問題点の1つに高級鋼材の開発と適材適所にこれを利用するということが挙げられる。

まず上部構造の板要素に使用される鋼材については、引張強さ70および80kg/mm<sup>2</sup>を有する溶接性の良好な高張力調質鋼材HT70, HT80の適性化、使用板厚の増大製作加工法の問題などがある。長大橋においては、できるだけ強度の大きい鋼材を用いて自重を、極力小さくすることがスパン長を伸ばす有効な手段である。本四連絡橋の設計試案では補剛トラス、塔などにこれらの高張力鋼の活用が予定されている。

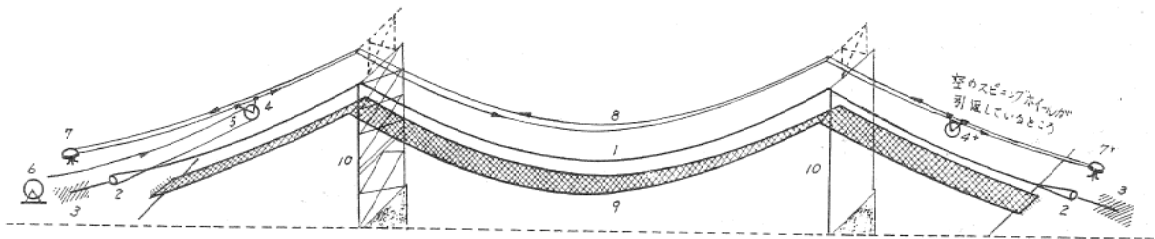
HT70および80鋼材は炭素、マンガン、珪素、銅のほかに、モリブデン、ヴァナジウムを成

分に含め、焼入、焼戻しの処理を施したものである。それで、軟鋼(SS41)などにくらべて

(1) 靱性に乏しいので、応力集中や疲労について設計上、特別の配慮が必要である。(2) 切欠きに敏感で、ぜい性破壊を起こしやすい。

(3) 溶接の際に溶け込み部(一般にボンド部という)は製造過程における焼戻し温度以上に加熱されるので、高温の熱履歴を受け脱炭層という軟化部となりやすい。すると溶融部の中に逆に高炭素配合のペーナイト組織が生じ、ぜい化する。そこでたとえば南港連絡橋においては、HT80の溶接入熱量を50,000 Joule/cm以下に制限し、予熱を行いMIG溶接を採用している。

いっぽうケーブルは直径5mm位のワイヤを何万本も束ねて製作する。(図11)したがってケ



- 1. ケーブル 2. ケーブル シュー 3. アンカレッジ
- 4. スピニングホイール 5. 張渡されるワイヤ (ライフワイヤ)
- 7. ホーリングロープ 駆動装置 8. ホーリングロープ 9. キャットウォーク(足場)
- 10. 塔

図2. ケーブル スピニング

表3 既設吊橋のケーブル, ワイヤ

| 橋 名               | 竣工年  | スパン長 (m) | 規格引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> ) | ケーブル直 径 (mm) | 単位橋長あたり重量 (t/m) |
|-------------------|------|----------|------------------------------|--------------|-----------------|
| Brooklyn          | 1883 | 486      | 106.9                        | 394          | —               |
| Williamsburg      | 1903 | 488      | 140.6                        | 476          | —               |
| Manhattan         | 1909 | 448      | 144.1                        | 527          | —               |
| Ambassador        | 1928 | 564      | 151.2                        | 489          | —               |
| George Washington | 1931 | 1,067    | 154.7                        | 911          | 17.7            |
| Verrazano-Narrows | 1964 | 1,298    | 154.7                        | 911          | 17.0            |
| Forth Road        | 1964 | 1,006    | 157.5                        | 603          | 4.2             |
| Severn            | 1966 | 985      | 157.5                        | 508          | 2.7             |
| Salazar           | 1967 | 1,013    | 157.5                        | 586          | 3.9             |

ケーブルの素材としてのワイヤは吊橋にとって、いわば命綱であって全重量がこれにかかっている。したがってワイヤの引張強さがスパンの長大化を推進するための支配的因子である。一世紀にわたるワイヤの引張強さの進歩を表3に掲げる。

本四連絡橋技術調査委員会においては、ワイヤの引張強さを最低、 $160\text{kg}/\text{mm}^2$ 、平均 $165\text{kg}/\text{mm}^2$ とするのが適当だとしている。現在の製鋼能力からいえば  $175\text{kg}/\text{mm}^2$  くらいのワイヤの製造は可能である。しかしマsproに移行した場合にいかに強度のばらつきを少なくするかが問題となる。またワイヤの継手部が弱点となるなどの問題も残されている。そのような考え方から  $165\text{kg}/\text{mm}^2$  が決まった。

### ケーブル

ケーブルの架設工法は2通りある。図2に示すスピニング工法がその1つである。スピニングホイールにワイヤを1本ずつ引掛けて放物線上に何万回も繰返し張渡す。たとえば Verrazano-Narrows 橋の場合、ワイヤの総本数は、144,432本であるのでケーブル張渡しの期間は実に丸1カ年を要している。

ところが最近 P.P.W.S. 工法が米国の Bethlehem Steel 会社で考案された。これはワイヤを予め工場で作成した小束(ストランド)に束ねて、アンカレッジ間の必要長さにプレハブで製作し、両端にソケットをつけておく。これを直径約2mのリールに巻きつけ、現場に搬入する。現場の足

場で展開しながら、1ストランドごとにまとめて張渡し両端のソケットをアンカレッジに埋込み固定する工法である。

関門大橋ではワイヤ91本でプレハブストランドを1本つくり、154ストランドで1本のケーブルを構成する P.P.W.S. 工法を採用した。この工法により工期の大幅な短縮が期待できる。

### 吊材 (ハンガー)

図1に示すように吊材をケーブルから鉛直にぶらさげ、これで補剛トラスを吊るのが、従来一般に用いられていた。最近英国の Severn 橋・トルコの Bosphorus 橋では、吊材を交互に逆向きに傾斜させてケーブルと補剛けたとで3角形の骨組形状を構成するという新形式吊橋が設計架設された。図3(a)は、斜吊材型式として計画設計された英国の Humber 橋である。このような斜吊材型式は従来の鉛直吊材型式にくらべて全構造系のねじり剛性が大きく、偏載荷重に対し耐荷力が大きくなり、また風による崩壊の原因になるようなねじり振動を生じにくいという点で有利である。

### 補剛けた

従来の吊橋は、図1に示すように吊構造にトラス型式すなわち補剛トラスを用いる。これは棒状部材を3角形の骨組形状に構成したものである。ところが英国では、図3(b)に示すような扁平な中空六角形薄肉閉断面の補剛けたが考案された。

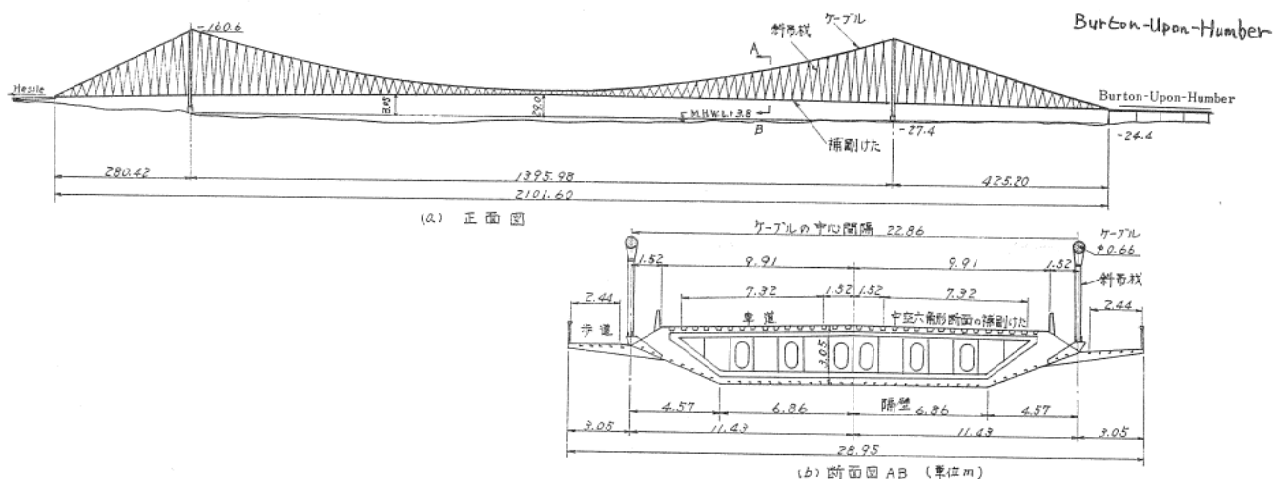


図3. Humber 橋の計画案

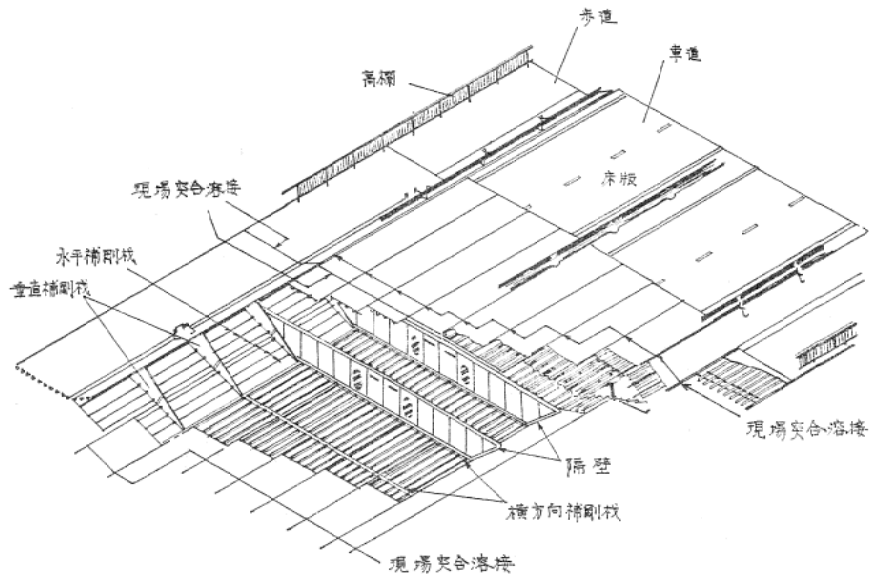


図4. 薄肉閉断面補剛けたの構成

すでに Severn 橋、Bosporus 橋において実現されており、Humber 橋においても計画されている。このような薄肉閉断面けたは図4に示すように、4枚のプレートを舟底形に組み、縦横に補剛材を等間隔に配置したもので非常に大きいねじり剛性を有する。それでこの型式の補剛けたを用いることにより風によるねじり振動が生じにくくなる。上述の3つの吊橋はいずれも斜吊材と薄肉閉断面けたを併用しているので、耐風安定性が良好とされている。たとえば Severn 橋の2次元風洞実験の結果によれば完成後、風速65.7m/secまでフラッター現象が生じないことが認められた。

補剛トラスには2ヒンジトラスと連続トラスがある。連続補剛トラス吊橋というのは、塔のところで補剛トラスが門型の塔の間を貫通連続する型式であり、2ヒンジ吊橋は塔のところで補剛トラスを切って不連続にする型式である。2ヒンジ吊橋にすると列車荷重による端部の折れ角すなわち鉄道線路の傾斜角の不連続が著しい。たとえば本四連絡大鳴門橋では4.0%位になる。国鉄技術研究所における走行実験によると、脱線など列車走行に支障がないためには、これ以下にするのがよい。いっぽう連続補剛トラス型式にすると折れ角2.23%となり、十分安全性が保証される。

連続補剛トラス型式の欠点は、塔のところの

支点に非常に大きい反力が生じ、しかも荷重の位置によって、その反力の方向が上向きになったり下向きになったりする。たとえば大鳴門橋の場合、上向き4,000 ton、下向き3,000 ton という値となる。それで大きい両振り繰返し応力による部材の疲労の問題に十分注意せねばならない。また連続補剛トラス吊橋にすると2ヒンジ吊橋の場合より一般に鋼材重量が重くなる。たとえば明石海峡大橋について、2ヒンジ吊橋にすると、108,000 ton であるが、連続にすると135,000 ton 位になる。

### 主塔

主塔の鋼材重量は表1の最右欄に示すように、上部構造全体の2～5割に達する。特にわが国のように耐震設計を必要とする場合には、主塔に大きい地震力が作用するので、この割合は大きくなる。さらに自重、自動車・列車荷重、温度変化、風、地震などの不利な組合せが同時に作用する場合について主塔を設計するが、その際、従来は単に線型弾性構造物として設計々算していたにすぎない。しかし主塔の変形量、反力と荷重の関係が非線型であること、溶接残留応力などの不整因子を含むことなどを考慮して弾塑性解析により主塔の極限強度を調べ、それに対して安全率がどの位あるかを照査することが重要である。

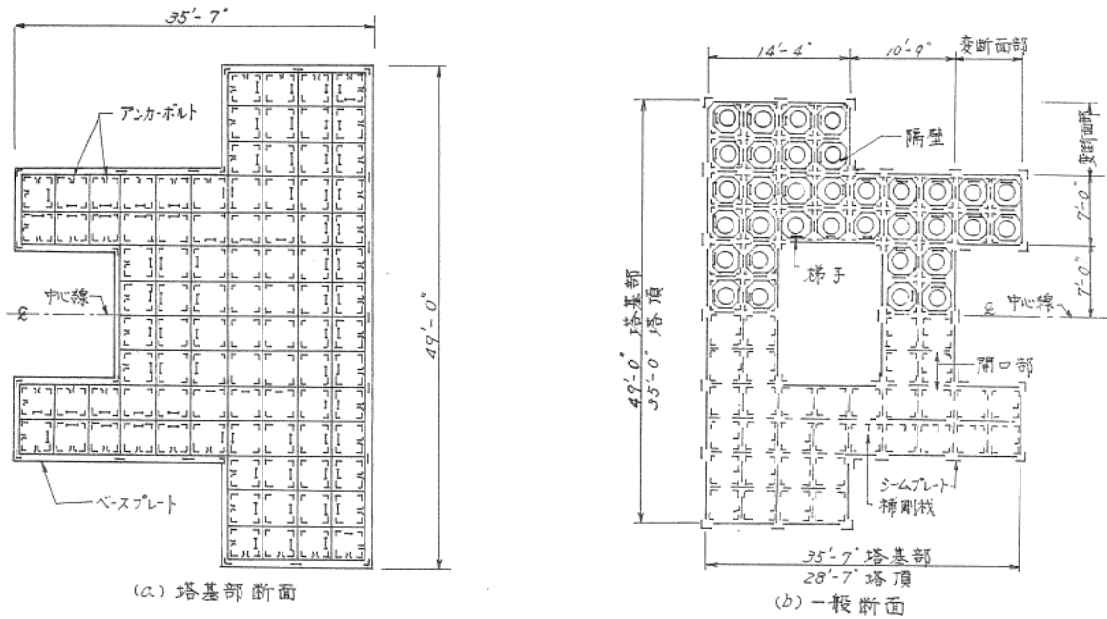


図5. (a) 主塔の横断面 Verrazan-Narrows 橋

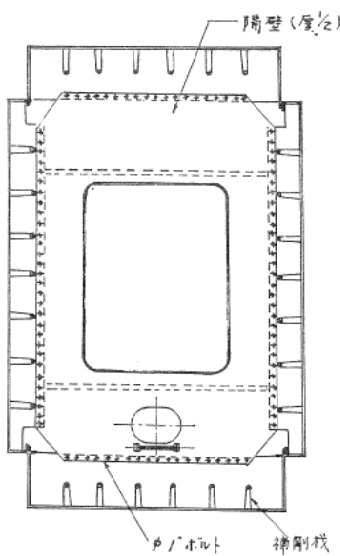


図6. Severn 橋の塔の横断面 (隔壁のある断面)

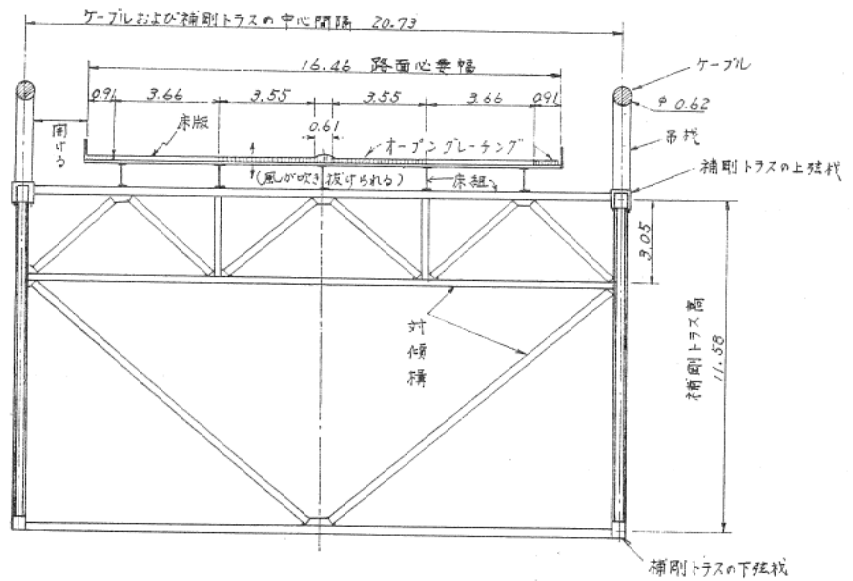


図7. 吊構造の横断面 (単位 m) (Mackinac Straits橋)

主塔の片側の柱の横断面（水平面で切断した断面）を大別すると、Verrazano-Narrows 橋（図5）のように多数の小室からなる中空断面の型式と、Severn 橋、Forth Road 橋（図6）のように多数の補剛材を有する1室の中空箱型断面の型式とがある。後者の場合、非常に軽量となる。この場合、残留応力や初期たわみを持つ補剛材付き板の弾塑性座屈について安全性を照査する必要がある。

### 耐風設計

長大吊橋は風圧を受ける面積が大きいので、一般に設計に際しては暴風により風速の自乗に比例する静的風圧力が上部構造に作用することを考慮して水平方向に曲げられて破壊しないように注意する。そのため長大化すればするほど補剛トラスの中心間隔を路面の必要幅より大きくせねばならない。（図7）たとえば明石海峡大



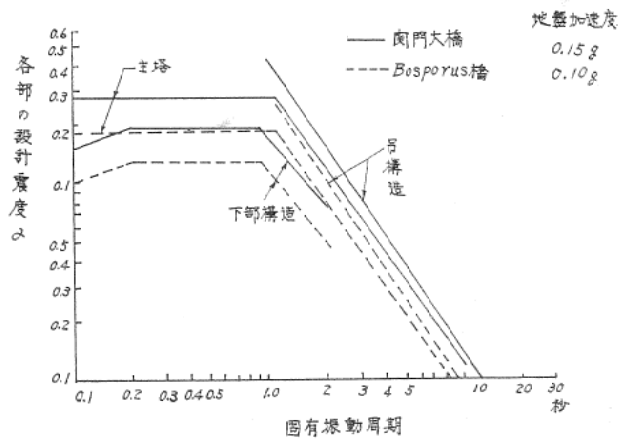


図8. 修正震度法による各部の設計震度

橋は6車線道路を載せるので路面必要幅は31m位でよいのであるが、風圧に耐えるために36mの幅になる。

また吊橋は風の中で振動しやすい可撓性の構造物である。しかもその振動性状も、限界風速以上になると振動が止めどなく増幅してゆく。

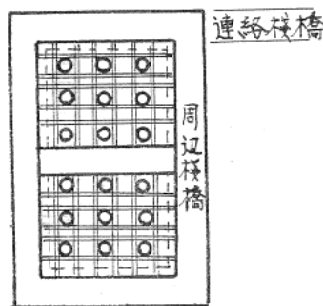
これはいわゆる発散振動（1種のフラッター現象）であるため崩壊の原因となる。吊橋は航空機の翼断面のような滑らかな流線形でなく、多数の長方形断面をもつ部材からなる図7のような複雑な横断面形状をもっているので翼理論や空力弾性論の適用が難しい。そのため長大吊橋の設計に際しては、その都度、模型による風洞実験によって、その空気力学的性状を明確に把握し、耐風安定性を保証することが重要となる。

補剛トラス型式の場合には、床版と補剛トラスの間を図7のようにあけ、かつオープングレーティング（細かい格子構造）を中央部に設けて、風が上下に自由に吹き抜けられるようにするとフラッターが起りにくい。本四連絡橋は図7の型式に近い。

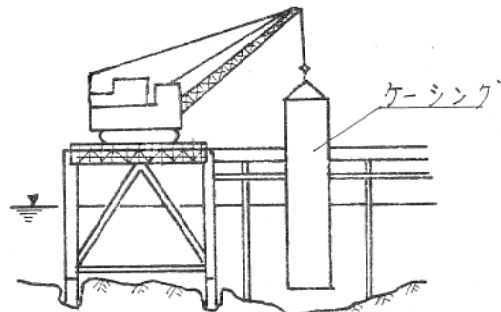
### 耐震設計

表1に挙げた長大吊橋において、耐震設計が

#### ① 棧橋築造及び施工作業台取付



#### ② ケーシング建設



#### ③ 支柱基礎掘削

#### ④ 支柱基礎コンクリート打設

#### ⑤ 頂版コンクリート打設

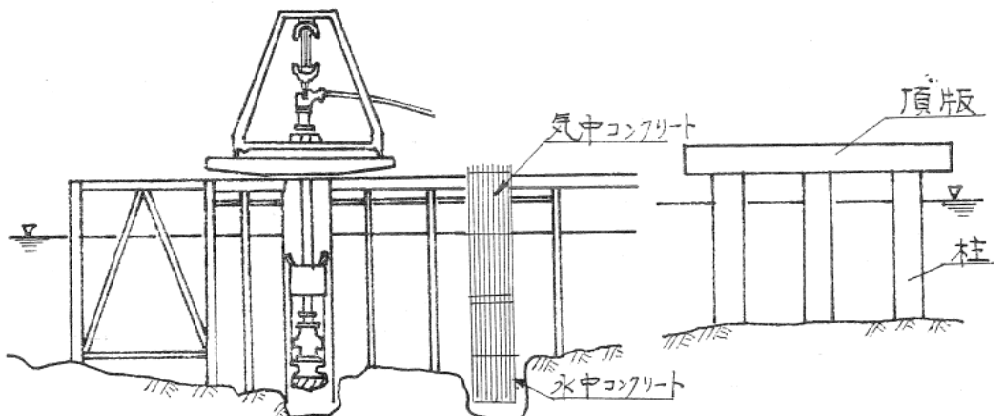


図9. 多柱基礎工法

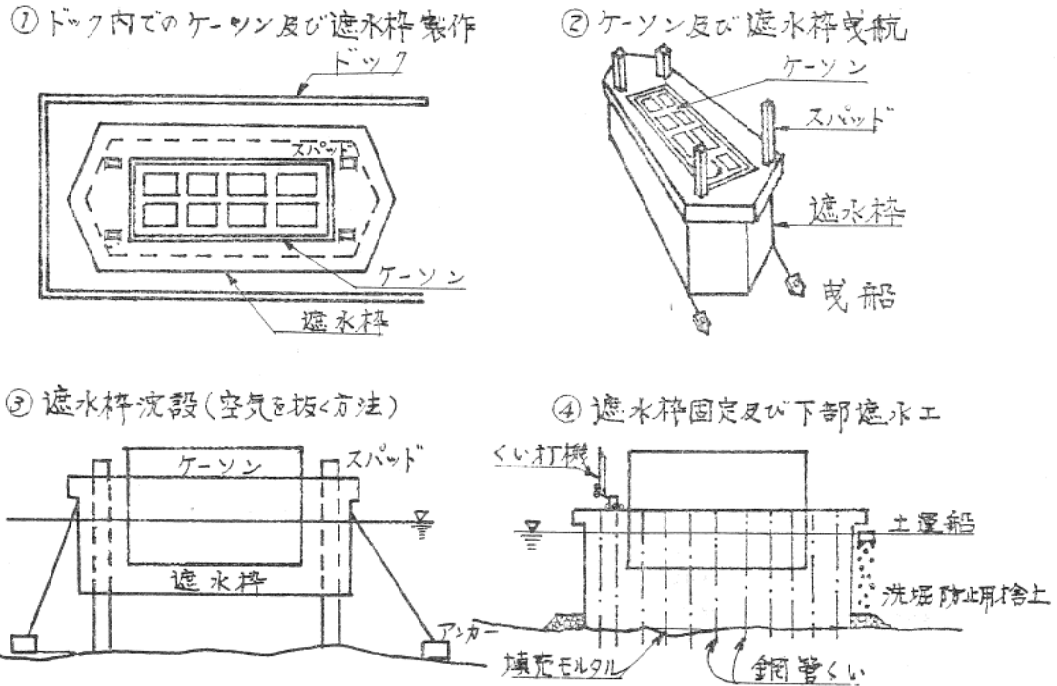


図10. 遮水枠ケーシング工法

実施されたのは地震地帯にある4橋のみである。そのうち静的設計というのは、その地域で経験した地震動の大きさを基準にして、重力 $g$ の $\alpha$ 倍の地震力が構造物の各部に静力学的に作用するものとして $\alpha$ （設計震度）を表1に示す値に仮定して設計する古典的方法である。それに対して動的設計とは過去に実測された代表的な地震波を表1の加速度をもつ地震波としてシュミレートし、計算機の中で構造モデルに作用させて構造物の動的応答を数値解析し、変形量や応力を調べ、安全性を検討する方法である。

代表的地震波としては、米国のElcentro地震、California地震、新潟地震などが用いられる。

また基本計画のための迅速簡易計算法（応答を考慮した修正震度法）は実用性が高く、関門大橋・本四連絡橋に應用されている。構造物の地震に対する応答加速度は、その固有振動周期によってかなり相違する。周期が1秒以下のもの、たとえばアンカレッジや橋脚基礎ケーソンのようなマッシブな剛体に近い構造部分や塔基部は比較的地震の影響を受けやすい。それに反し、長周期の部分たとえば ケーブルや補剛トラスのような吊構造は地震に対して応答が鈍感である。

関門大橋・Bosporus 橋について修正震度法により各部の設計震度を計算すると図8のとおりである。

耐震設計によって主塔の強度、下部構造のロッキング（だるま運動）および迂りに対する安定性などについて検討する。

本四連絡橋においては、基礎地盤で180galすなわち0.18gの地震加速度を生ずる場合を考慮することになっている。これは日本列島の太平洋岸から150kmほど離れたところを通っている外側地震帯におけるマグニチュード8の地震および瀬戸内海でのマグニチュード7の地震を想定した場合の架橋地点の地震である。この地震により主塔基部で動的影響のため振動が拡大されて0.4ないし0.5gの地震力が作用する。

#### 下部構造

下部構造については水面下にある場合には、設計よりむしろ施工に多くの問題がある。本四連絡橋では大型基礎が70基ばかりあって、その8割は従来の工法により、2割は新工法が採用される。

最も難工事といわれている明石海峡大橋のような水深が深いところがあり、大別して次の4

種の工法が行なわれる。ちなみに明石海峡は水深50m潮流8ノットのところで基礎工事が行なわれる。

(1) 多柱基礎工法は凹凸が激しく、比較的硬い岩層が露出する場所に適する。直径10mの柱を9本立て、その上に頂盤を設置して机のような形状にし、その上に塔を立てる。塔基礎に適した工法である。(図9)

(2) 遮水枠ケーソン工法はアンカレッジのような剛体基礎の場合で、比較的支持層が深く、ある程度、掘削を要するときに用いる。遮水枠で静水域をつくり、波、風、潮流の影響を避けてケーソン(潜函)を据付ける。(図10)

(3) 設置式ケーソン工法は比較的岩盤が早く出るところに用いられる。まず岩の上の砂の堆積層をサンドポンプで取除き、その下の比較的軟かい海底岩を掘削する。掘削法にはいろいろ考えられるが、関門大橋ではグラブ式浚渫船が使われた。本四連絡橋でも、これを大型化したものが使われる。グラブの重量は90ton, 1把み9m<sup>3</sup>の容量をもっている。岩が硬い場合には、ロータリ式掘削機を使う。それができると、鋼製ケーソンの重壁のところに、スパッド(上げ下げできる脚)をつけ、スパッドをアンカレッジにアンカーして着底する。そして底面との隙間にプレキャストコンクリート(骨材をまず詰めておき、隙間にセメントモルタルのミルクを圧入するもの)を詰める。

この工法は明石海峡大橋の淡路よりの塔基礎および備讃瀬戸大橋に採用される。

(4) 築堤工法は比較的海岸に近い水深の浅い場所に用いられる。鉄の枠で囲って、ケーソンをその中に引込み、ケーソンの下を掘って沈めてゆく方法で、従来から行なわれている。

明石海峡大橋のアンカレッジは淡路側で鋼材41,000ton, コンクリート630,000m<sup>3</sup>, 本州側で33,000ton, 540,000m<sup>3</sup>である。

尾道一今治ルートでは比較的浅いところが多いので、多数の鋼管を立て込んで周辺を締切り、その中を掘ってコンクリートを打ち込み、その上に橋脚を立てる、いわゆる掘込み鋼管締切り工法を実施する。

一般に漁業権の問題があるので、硬い岩にハ

ッパをかけるとき、エアバルブカーテンを用いて水圧を1/10位に低減して魚に影響がないようにする。

海中作業をいかに確実かつ能率よく行なうかは重要な問題である。瀬戸内海は非常に汚れてきたし、マリンスノウのため海中深いところでは投光器を用いても乱反射して見とおしがきかない。海底での視界は僅かに2~3mである。また水深による生理的影響から水深50mになると潜水作業が僅かに30分、60mでは実質作業時間がないという状態である。このことを考えると海中作業のために長時間海中で作業できる潜水装置の開発が大切である。また海中における火薬の取扱いについても慎重な調査がなされた。

さらに水中カメラとテレビを用いて、海中作業の要所を目で直接状況確認することも大切である。

## 架 設

長大橋のような巨大構造物になると、規模の大きい重い構造部分を簡単に処理できる能力をもつ架設用機械の開発に力を注ぐことが急務となる。これによって大ブロック架設工法を促進させることが重要である。すなわち機械化の単位を大きくしてゆき、工事を迅速化することによって気象条件の影響による能率低下を極力回避することが工費節減、安全性確保につながる。

大ブロックの架設工法というのは、まず橋梁構造物をいくつかの大ブロックに分割する計画をしておいて、ブロック別に工場で組立て製作完了し、でき上がったいくつかのブロックを大型バージに載せ、海上を工場から現場まで運搬する。そして大型フローティングクレーンで一括吊上げをして構造物の所定の筒所に組み込んでゆく工法である。

ニュージーランド・ハーバー橋の架設工事には、わが国の工場で組立てた大型ブロック(長さ110m, 400ton)を1度に3本~4本ずつ海路9000km, 40日間の航海をし、これを7往復分輸送し、オークランド港の現場で、能力250ton, 揚程60mの大型フローティングクレーン2

台で共吊りして現場組立てを行なった。

南港連絡橋においても、来年2月頃に中央部約 3,000 ton を一括吊上げすることになっている。

### 防食

長大橋は海上に架設される場合がほとんどである。特にわが国の気象条件は防食の点では最悪であって根本的対策を要する。管理事務所長の話によると Golden Gate 橋では常に事務所直属の常勤塗装班がいて年がら年中、橋のどこかでペンキ塗り作業をしている。

関門大橋の鋼材表面積は 170,000m<sup>2</sup> で、平均 4 回塗りとして 700,000m<sup>2</sup> となる。明石海峡大橋では 2,000,000m<sup>2</sup> 以上と見積られる。それで完全に塗装するのに塗料約 1,200 ton を要する、したがってその塗装維持費は龐大なものである。

長大橋に適した長期耐久性の塗装方法の代表的なものはつぎのとおりである。

- (1) 無機質ジンクリッチペイント (100~125 ミクロン)  
厚塗り型塩化ビニール樹脂塗料 (125 ミクロン)
- (2) 無機質ジンクリッチペイント (100~125 ミクロン)  
厚塗り型エポキシ樹脂塗料 (1,000 ミクロン)
- (3) 有機質ジンクリッチプライマー (100 ミクロン)

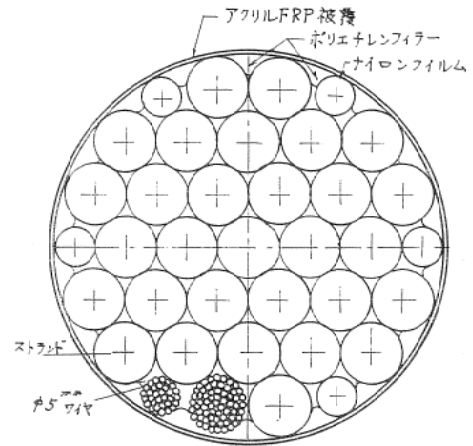


図11. ケーブルの樹脂被覆

厚塗り型塩化ゴム塗料 (125 ミクロン)

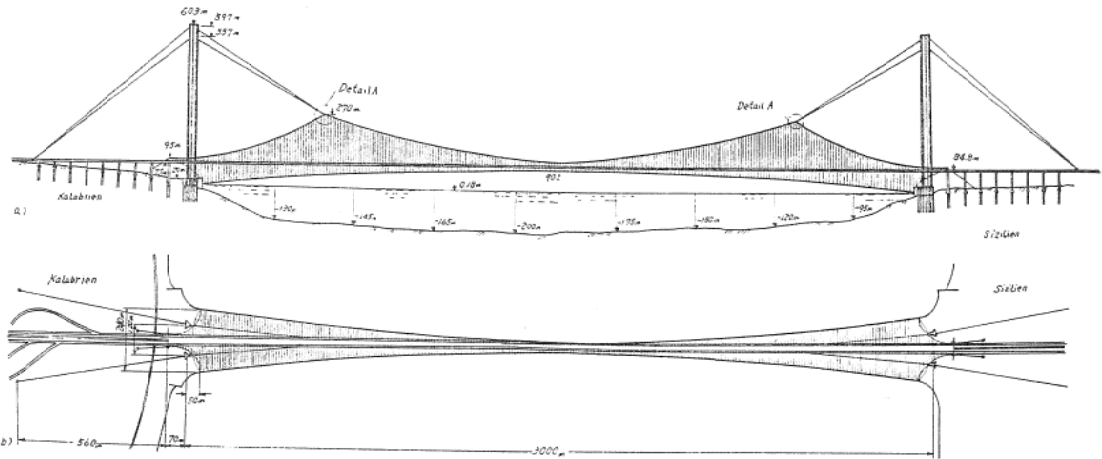
(4) 亜鉛メタリコンまたはアルミメタリコン 100~125 ミクロン) 特殊フェノール樹脂 M I O 塗料 (125 ミクロン)

(1), (2) は米国, (3), (4) はヨーロッパ諸国で実績が多い。

(4) は塗料のみでなく金属溶射を基本にした長期防食塗装系である。

以上は一般鋼材部分についてであるが、鋼材そのものについても強度の高い耐候性鋼材の開発と活用法の問題が重要である。

ケーブルの防食には従来、ワイヤーをケーブルのまわりに密にぐるぐる巻きつけて、その外側にペイントを塗るワイヤーラッピング法を用いていたが、最近ではプラスチック被覆法が用いられる。これはまず polyethylene cable filler で図11のようにケーブルの空隙を埋め、ナイロ



(a) 平面図, 正面図

図12. Messino 大橋の設計試案

(b)正面部分図

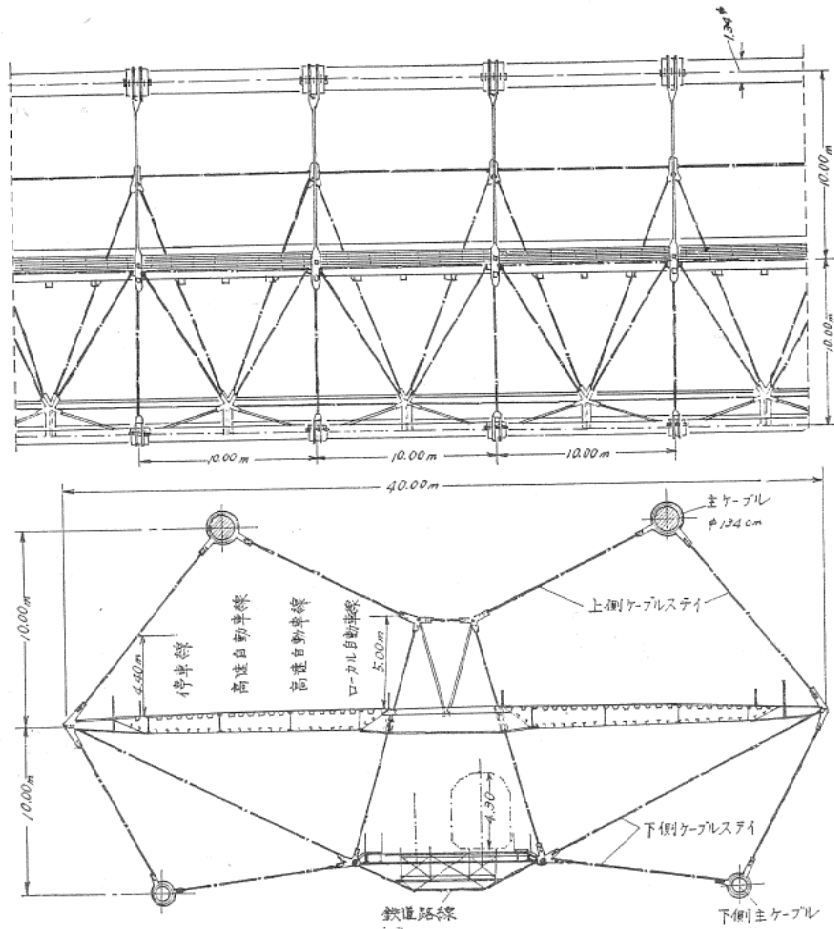
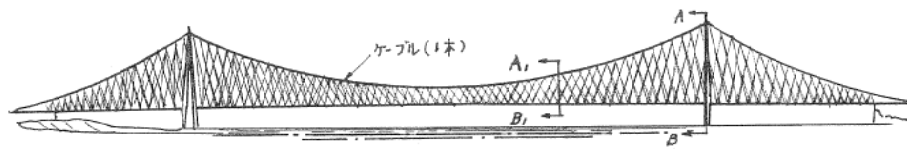
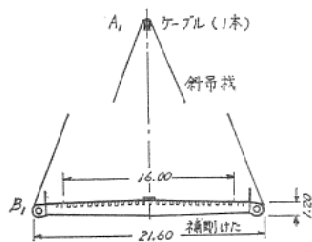


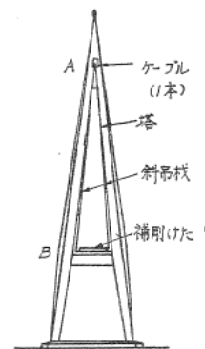
図12. (b)横断面図



(a) 正面図



(c) 吊橋構造横断面  $A_1 B_1$



(b) 塔部横断面  $A B$

図13. モノケーブル吊橋

ン膜でカバーし、ガラス繊維で補強した Acrylic-resin をケーブルの周囲に被覆する。その外面にアクリル液耐候性被膜を塗布する。この方法が実施されるまでには10年以上も供試体につい

て試験されており、その結果から見積って50年間は十分耐候性、耐久性が維持されるものといわれている。この防食法は紫外線により変質し易い従来のペンキ塗装にくらべて極めて優れているといえる。

長期的管理上、一定期間ごとの定期補修のために移動足場、検査廊、吊具、電気、水道、圧搾空気の配管、配線などを恒久的な塗装用設備として橋梁に取り付けておく必要がある。

未来の橋

3 kmの幅をもつ Messina 海峡を渡りイタリア本土とシシリー島を結ぶ長大橋の懸賞設計が募集され、イタリアから125、米国8、イギリス3、フランス3、ドイツ、スイス、アルゼンチン、ソマリア各1の応募作品が提出された。その中に図12のような画期的なデザインが1等に当選した。ローマ大学教授 Sergio Musmei 博士の作である。スパン長3,000mで、1躍、明石海峡大橋の2倍近くになる。海峡の水深は

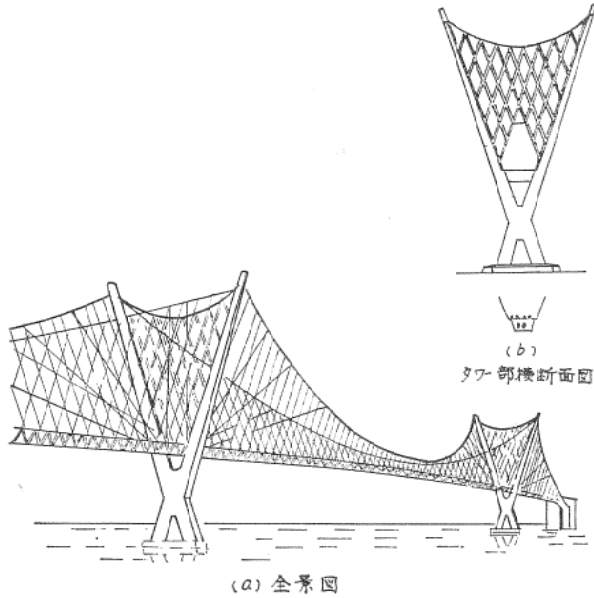


図14. Cramer 博士の道路・鉄道併用吊橋

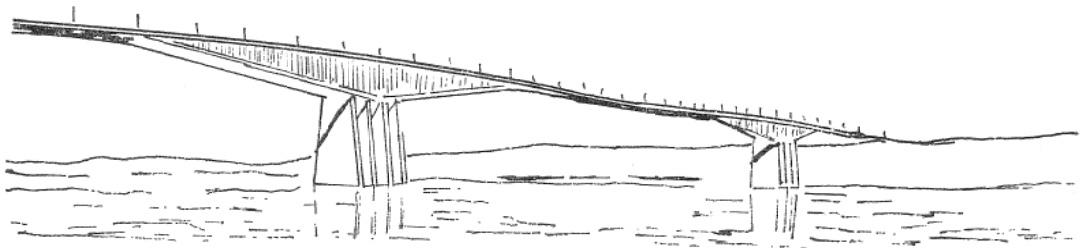


図15. 吊床版橋

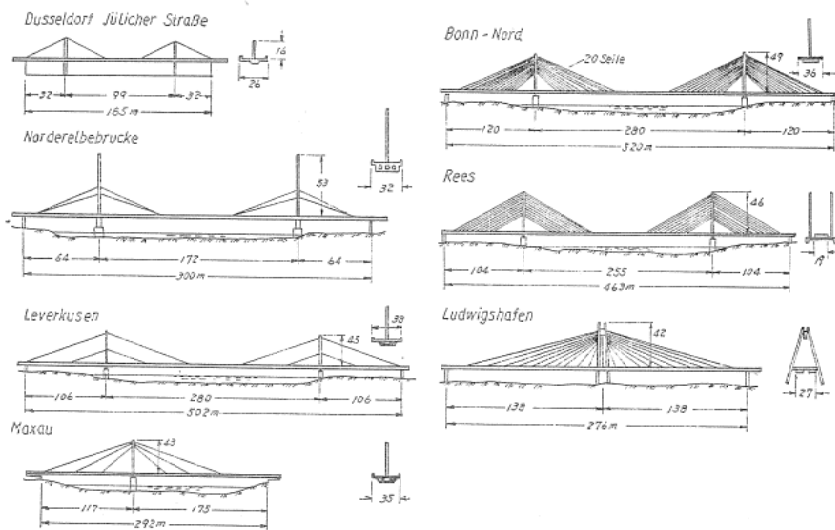


図16. ドイツの斜張橋

250mで、潮流は3 m/secである。そのため海中基礎構造物に対して動力学的影響があるものと考えられる。その上、海峡は強風が吹き、かつ地震多発地帯で1908年の Messina地震を経験している。また船舶の航行が甚しい。このような立地条件のため海中に塔を立てることを回避して、dual type 吊橋という新形式を採用したものである。この型式は、通常の吊橋の主ケーブル以外に下側にサブケーブルを設け、これにプレストレス引張力を導入しておくものである。主塔の高さは600mで横断面はY型2重中空断面である。

しかし実施にあたっては、かなり多くの問題点を含んでいるが、示唆に富んだ設計である。

○ 図13はドイツの Leonhardt 教授（シュツットガルト工科大学）が Rhein 河の Emmerich 橋の設計に応募したものである。メインケーブルは普通両側に2本または4本張渡されるのであるが、この設計は太いケーブルを1本のみ中央Aのところから張渡し、吊材は斜傾して横断面方向に3角形状を形成する。補剛けたは非常に扁平な薄肉閉断面でけた高はわずかに1mである。風に対する静的耐荷力および動的安定性についてそれぞれシュツットガルト工科大学および英国々立物理研究所で実験が行なわれ好結果がえられている。

○ 図14も Salazar 橋の競争設計に際して Kramer 博士が提案した道路・鉄道併用吊橋 スパン長1,140 mである。主塔はX字型にしている。ケーブルは上方で大きくひろがっていて吊材が傾斜しているため耐風安定性が大きいということである。

図15は Bosphorus 橋のために Finterwalder 博士が設計した吊床版橋である。厚さわずか30cmのプレストレスコンクリート床版を400mの間隔に配置されたT型橋脚の先端で引張り吊り上げたものである。コンクリートにプレストレスを導入して予め圧縮応力を初期応力として持

たせるために直径26mmの高張力鋼棒2,600本を使って締めつける。

### 斜張橋

吊橋と同様に塔を立て、ケーブルを斜方向におろして連続けたの中間点を引張り上げる斜張橋は約15年前頃、ドイツにおいて近代橋梁の新形式として登場した。(図16)

この型式は吊橋とけた橋の中間的な力学的特性をもつもので、適用されるスパン長は現在100~360mくらいの範囲である。しかし近い将来、高級鋼材の利用、合理的設計によりさらに長大化される可能性がある。実際、大阪市土木局においては、この型式では世界最長スパン(420m)の斜張橋を大阪北港に建設の計画があると本年の年頭に発表した。基本設計についての技術的調査を筆者が指導することになっている。

### むすび

バベルの塔の昔から人間の巨大さへの憧憬は尽きることがない。土木工学は高いダム、長いトンネル、長大橋という形でつきつぎとこの夢を果たしてくれる。これらの構造物には単に巨大さのみを誇示するバベルの塔のような空しさが微塵もない。社会生活の近代化に役立つ機能性を持ち、立派に社会資本として人々に認識され、愛好されるという喜びがある。ことに長大橋は自然の風光の中に、主役となつては入り込んでゆく。人々はその景観をめで、機能美をみいだす。かくして長大橋は文明の里程碑として、ながく記録の中に生き残ってゆくことであろう。

本文を通じて、少しでも読者諸賢がこの方面に対してご関心を持たれるようになれば幸甚である。

なお本州四国連絡橋公団においては1,800m級の吊橋の試算設計も併せて行なっていることを付言しておく。