

招待論文

**INVITED
PAPER**

招待論文

海峡横断道路プロジェクトを支える橋梁技術の動向

A PERSPECTIVE OF BRIDGE TECHNOLOGY FOR FUTURE STRAIT CROSSING ROAD PROJECTS IN JAPAN

横山功一

Koichi YOKOYAMA

フェロー 工博 建設省土木研究所耐震技術研究センター
長 (前 構造橋梁部長)
(〒305 茨城県つくば市旭1番地)

Key Words : *strait crossing, suspension bridge, design, construction, wind-resistant design, seismic design, foundations in deep sea*

1. はじめに

現在、わが国の代表的な海峡横断プロジェクトである本州四国連絡橋プロジェクトの明石海峡大橋、来島大橋、多々羅大橋などの建設工事が進められており、本プロジェクトは今世紀中に概成し、当初の計画である本州と四国が3ルートで結ばれることになる。

更に、わが国では、21世紀に向けて活力ある経済に支えられた「ゆとり社会」を実現するために、高規格幹線道路をはじめとする道路網の充実を図ることとしているが、全国的な視点からの広域経済圏の基盤を形成する新たな交通軸の必要性が議論されており、そのための新たな海峡横断道路計画が構想されている。

現在、建設省では地方建設局を中心として海峡横断道路調査を進めており、同時に土木研究所でも関係機関とともにプロジェクト実現のための技術的検討を進めている。

ここでは、今後の海峡横断プロジェクトに必要な技術を次のように特徴づける。

(1) 今後必要とされる海峡横断道路計画では本州四国連絡橋プロジェクトのレベルを上回る厳しさが想定され、従来の技術の延長線上では克服できない課題も多く、「不可能を可能にする技術」が必要になる。

(2) 今後、社会が高齢化・成熟化へ向かう中で、「経済性を重視し、機能と安全余裕度のバランスを考えた構造物を指向する技術」へ意識の切り替えが必要である。

そこで、初めにジブラルタル海峡をはじめとする世界各地ならびにわが国における海峡横断プロジェクトの構想、計画を紹介する。これらのプロジェクトの中にはトンネル計画案も検討されているものもあるが、ここでは橋梁に関するものに絞って示す。ここでは、これまでよ

りも地形、地質、水深、海象、気象などの設計・施工条件が厳しく、上部構造ではスパンの長大化、下部構造では大水深基礎の開発が必要になる。更に、建設プロジェクトの大型化から工費・工期面でも大幅な改善が要求される。そこで、海外の技術とわが国の従来の技術の特徴を認識した上で、これらの課題を克服するための設計・施工に係わる技術開発の方向、可能性を探ることとする。

2. 内外の海峡横断橋梁プロジェクト

現時点での世界の海峡横断プロジェクトを見てみると、工事中あるいは最近完成したものとしてデンマークのグレートベルト (Great Belt) 連絡、デンマーク～スウェーデン間のウルスンド (Øresund) 連絡、香港のツインマ (Tsing Ma) 橋などがあり、また計画あるいは構想中のものとしてはイタリアのメッシナ (Messina) 海峡、スペイン～モロッコ間のジブラルタル (Gibraltar) 海峡、ペーリング海峡などの連絡プロジェクトがある。

海外プロジェクトの中には中央スパンが2,000 mを超えるもの、水深・地盤条件が厳しいものもあり、ここでの検討は従来の技術を超えたものも見受けられ、わが国の今後の海峡横断プロジェクトの調査を進める上で参考になる点が多い。

(1) グレートベルトイースト橋

グレートベルト海峡連絡プロジェクトはコペンハーゲンのあるシェラン島とフューン島 (最短距離約 18 km, 最大水深 60 m) を結ぶ道路・鉄道建設である。グレートベルトイースト橋は、中央径間が1,624 mの3径間道路吊橋であり、1998年の完成を目指して工事が進められている。明石海峡大橋に次いで世界第2位の長大吊橋にな

るこの橋は、セバーン(Severn)橋で採用されて以来ヨーロッパを中心に多くの吊橋で採用されている流線形箱桁を採用している。従来アンカレイジは海岸線に近い良好な地盤に基礎をもうけていたのに対し、この場合には海峡の中央のやや地盤の悪い所に設置している。そのため海底面を掘削して楔型のストーンベッドを置き、アンカレイジ基礎下端に作用する力の方向が地盤に有効に働くようにしている。また、アンカレイジ躯体はプレキャスト工法によりコスト低減をはかっている。コンクリート主塔など我が国の吊橋技術と異なる点がみられる。

(2) ツインマ橋

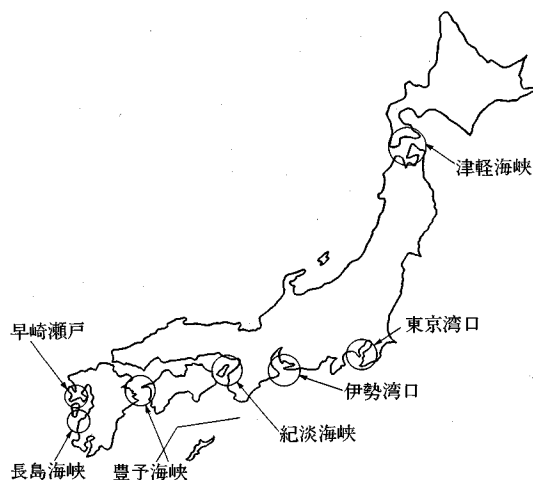
ランタオ島に建設される新空港と香港の中心部を結ぶ道路・鉄道幹線の一部を形成する吊橋で、隣接する斜張橋カプスイモン(Kap Shui Mun)橋とともに1997年の香港の中国返還までに完成する計画になっている。設計は英国の流れを受け継ぐもので、主径間1,377m、側径間は馬湾側と青衣側とで非対称となっている。補剛桁は連続構造で、馬湾側が固定になっており、水平変位は青衣側にのみ生じる。補剛桁は鋼床版を合成したダブルデッキ・トラス形式で、18mのハンガー間隔でラーメン形式の主横フレームが配置され、その間に4.5m間隔で中間横フレームが配置される。トラス側面には耐風対策としてフェアリングが取り付けられる。主塔は4層コンクリートラーメン構造で、スリップフォーム工法により施工された。

(3) メッシナ海峡連絡橋

メッシナ海峡連絡はイタリア本土とシシリー島を連絡するプロジェクトであり、1981年にはメッシナ公団が設立され調査・設計が進められている。橋梁案、トンネル案、水中トンネル案のフィージビリティ・スタディが行われ、安全性、コスト、工期、維持管理などの観点から橋梁案が選ばれた。海峡部の水深が深い(最大水深570m)、多くの断層がある、両岸からの海底勾配も急であることから、1スパンで海峡を跨ぐ単径間鉄道・道路併用吊橋で中央径間が3,300mとなる既往の長大橋をはるかに上回る規模の橋梁計画となっている。主塔は地震応答を小さくするために鋼製としており、補剛桁は耐風対策から既存の概念を打ち破る3本のボックス桁を横桁で連結するユニークな構造が考えられている。

(4) ジブラルタル海峡連絡橋

ジブラルタル海峡連絡計画は、スペインとモロッコ間のジブラルタル海峡を橋梁あるいはトンネルで結ぼうとするものであり、1980年スペインとモロッコが国際協定を結んだことから調査研究が本格化している。長短2ルートの橋梁案と1ルートのトンネル案が設定されてお



図一 国内の主な海峡横断プロジェクト

表一 国内の主な海峡横断プロジェクト

海峡名	海上距離	最大水深
津軽海峡	東側 約13km	270m
	西側 約19km	140m
東京湾口	約15km	80m
伊勢湾口	約20km	100m
紀淡海峡	約11km	120m
豊予海峡	約14km	200m
早崎瀬戸	約5km	120m
長島海峡	約2km	70m

り、西側のルートは大陸棚ルートと呼ばれ、全長28km、水深約300mとなっている。また、東側のルートは海峡ルートと呼ばれ、全長は14kmと大陸棚ルートよりもはるかに短くなっているが、最大水深は約900mと深くなっている。これまでに考えられている橋梁計画は、大陸棚ルートでは中央部に径間長3,500mの3径間を有する吊橋を建設するというもので、その場合は水深300mの基礎が必要になる。一方、海峡ルートでは中央部の水深の浅い(水深450m)箇所を利用して主径間5,000mの4径間吊橋を建設する計画が議論されている。潮流(最大6ノット)、波浪、風などの条件が厳しい。

なお、1995年5月に調査成果が取りまとめられ、トンネル案を優先し1997年より工事に着手する計画が公表された。

(5) 日本の海峡横断道路計画

一方、日本においても幾つもの海峡横断計画がある(図一、表一)。次世紀に向けて新たな交流圏域の形成による地域の活性化・振興を図る新交通軸について、第11

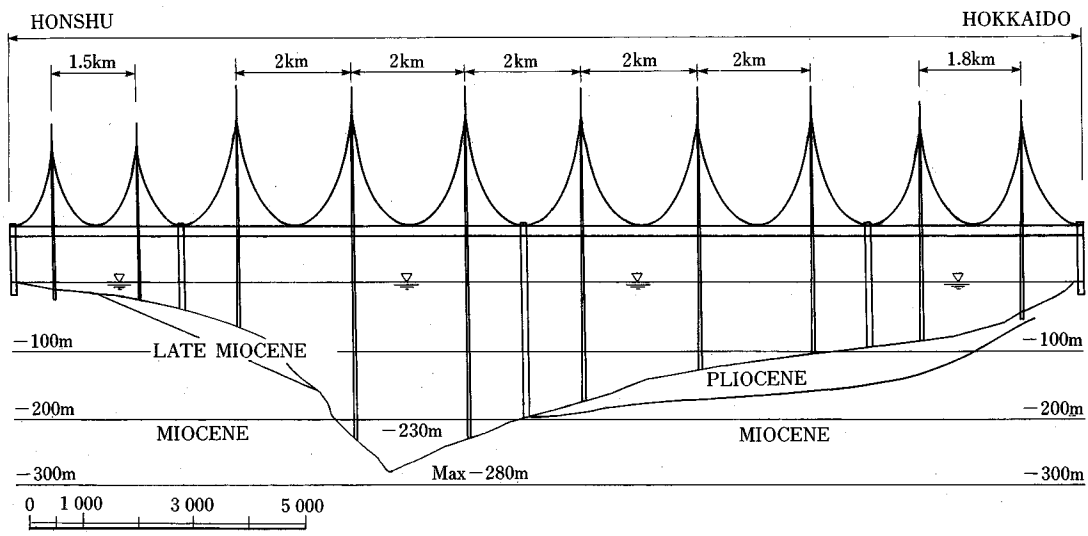


図-2 津軽海峡連絡橋梁の構想案³⁾

次道路整備五箇年計画では、「第2東京湾岸道路, 東京湾口道路, 大阪湾環状道路, 伊勢湾口道路等については, 地域の活性化施策の推進と併せて, 事業の具体化を図る. 関門海峡道路, 離島振興のための新たな海洋架橋等については, 具体化のための調査を進める. 西瀬戸地域, 有明湾岸地域や青函地域等, 全国的な視点からの広域経済圏の基盤を形成する新たな交通軸については, 長期的な視点から調査を進める」としている^{1),2)}.

これらの計画のある地点の地形, 地質, 水深, 海象, 気象条件を長大橋建設という観点から見てみると, 本州四国連絡橋の建設された瀬戸内海地方よりもかなり厳しい条件になっていると言える。即ち, 海峡幅が広く, 水深が深いことから全体の橋梁規模が大きくなり, スパンが明石海峡大橋と同規模があるいは更に長大化し, 径間数も3径間ではなく多径間にする必要性が高くなる場合がある。また, 基礎は水深の深い地点に建設されなければならない, 更に, 外海に面していることから台風や波浪の影響は大きく, 地震の発生域に近いことから耐震設計にも十分な注意を払わなければならない。

条件の厳しさを示す一例として, 国際会議で提示された津軽海峡連絡吊橋の構想³⁾を図-2に示す。

3. 2000 m 超級吊橋の特性

明石海峡大橋と同じ形式の3径間トラス補剛吊橋を基本構造とし, 従来技術を延長して試設計した2,000 mを超える吊橋の構造的な特性を調べ, 研究開発の方向性を探ることにする⁴⁾。

中央径間長と上部構造の単位長当りの自重の関係を示したものが図-3である。中央径間長が2,000 mを超え

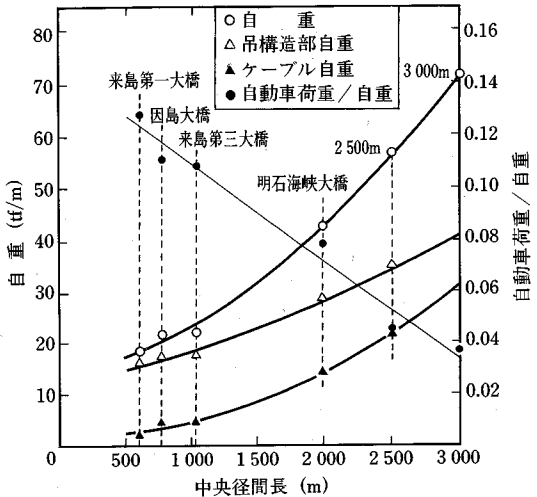
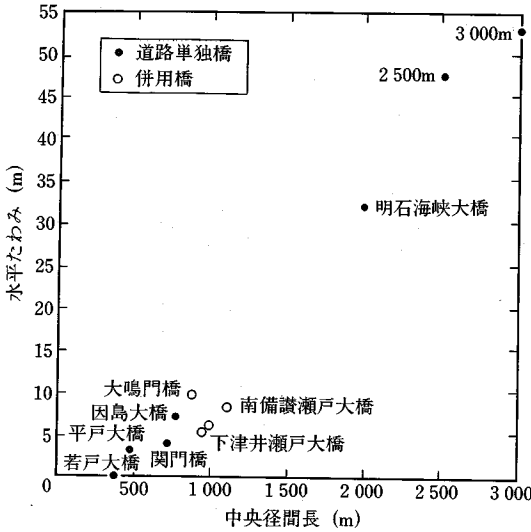


図-3 中央径間長と自重および自動車荷重と自重の比

るに従い, 上部構造の単位長当りの自重は急激に増加する。その中でも, 単位長さ当たりのケーブル自重の増加は, 吊構造部に比べて著しい。また, 同図には自重に対する自動車荷重の比率もプロットしているが, 中央径間長が増加するに従って自重に対する自動車荷重の割合は低下し, 3,000 m 吊橋では4%程度になり, その影響は小さいことが分かる。超長大吊橋では吊橋全体系の剛性がケーブルによってもたらされ, 中央径間長の増加に伴いケーブルが負担する荷重の中でケーブルの自重が占める割合が大きくなるという特性がある。

明石海峡大橋の中央径間長を上回る吊橋の実現のためには, 先ず初めに吊構造部の自重を小さくすることが大切であり, 明石海峡大橋で開発されたものより高強度か



図一四 中央径間長と水平たわみの関係

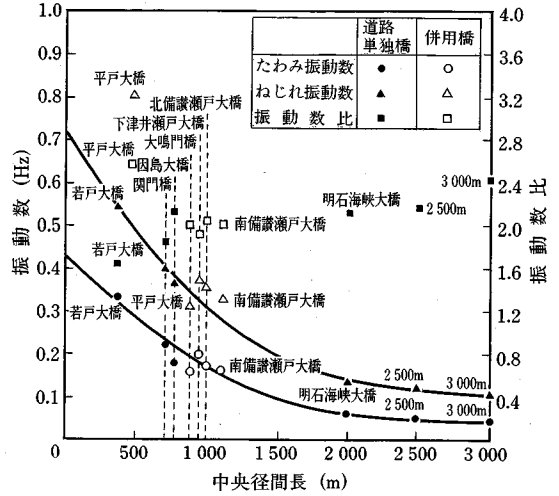
つ軽量で信頼性の高いケーブル材料を開発することならびに超長大橋の応答に対応した安全率(特に、ケーブル)の見直しが重要になる。

中央径間長と風荷重による水平方向たわみの関係を示したものが図一四である。中央径間長の増加に従い水平方向たわみが増加し、風荷重が支配的な荷重となり、補剛桁や塔基部断面が風荷重で決定されるようになる。このため、上部構造の風荷重の低減が重要課題になり、また強風時の自動車走行性の確保等についても検討が必要である。

更に、上部構造の安全性に大きく関係するものとして、風による発散振動(フラッター)がある。フラッターの発現には、振動数、振動モードなどの構造特性と風による振動外力に関係する空力特性が影響を及ぼす。図一五は中央径間長と振動数の関係を示したものであり、中央径間長の増加とともに、たわみ、ねじれ振動数は低下する。従来、補剛桁にトラス構造あるいは箱桁構造を用いることにより剛性を確保してきたが、超長大吊橋では補剛桁の剛性を高めることは、断面が大きくなるとともに重量が増加し効率的でなくなる。そこで、構造的な対策として吊橋全体系の剛性を高めるためのケーブル構造、制振対策の開発が重要になる。また、空力的な対策として箱桁を基本としつつも更に耐風性の良い補剛桁形状の開発が必要になってくる。

次に、下部構造については、プロジェクトが構想されている地点によっては、水深が深く、海底面付近に良好な支持地盤がない場合も想定され、海洋型地震の発生域の近傍に位置するものもある。

水深の深いところにおける基礎形式としては、従来から用いられている設置ケーソン基礎のような直接基礎タ



図一五 中央径間長と固有振動数の関係

イプが有望であろう。このような基礎の場合でも、基礎の平面寸法が著しく巨大なものとなるため、基礎の内部を中空にするかあるいは断面を絞る等、基礎の自重の軽減を図るための設計・施工上の工夫が必要である。

耐震設計では、本州四国連絡橋などの従来の長大橋と異なって、より近距離の大規模地震を対象としなければならない。従って、先ず第1に従来の距離減衰式の適用外となる断層域近傍での地震動特性を正しく評価できる設計用入力地震動を設定しなければならない。次に、基礎の安定照査(滑動、転倒、支持力等)については、従来の静的照査法では基礎は巨大化するおそれがあり、このため明石海峡大橋、来島大橋の転倒照査に取り入れられて基礎寸法の縮小が図られた動的照査法を発展させて、滑動、滑動+転倒、支持力等の現象を総合的にとらえた動的照査法を開発する必要があると考えられる。なお、構造が大型化することから、地震入力の位相差の影響、上部構造への地震の影響等も課題と考えられる。

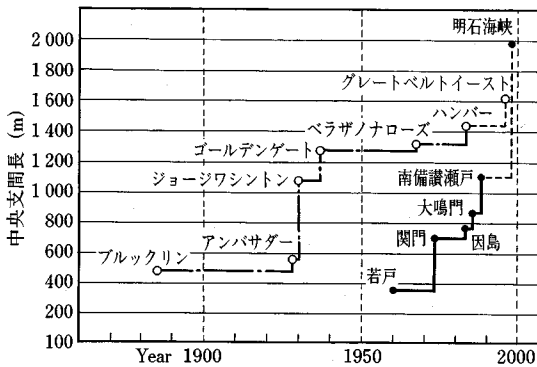
更に、上下部構造共通の課題であるが、構造規模が大きくなることや、外洋に面していることから風、波浪等により稼働率が低下するため、施工における工期・工費の面で大幅な改善が必要になる。

4. わが国の吊橋建設技術の特徴

(1) 技術の発展

わが国の吊橋技術は、図一六のスパンの変遷を見ても明らかなように、世界に遅れてスタートしたが、明石海峡大橋の建設でトップに立とうとしている。諸外国の吊橋技術と比較すると我が国の技術にはユニークな点が見受けられる。

本州四国連絡橋調査は昭和30年代後半に本格化し、



図一6 吊橋支間長の変遷

建設省と国鉄から委託を受けた土木学会は昭和41年中間報告をとりまとめ、設計指針⁵⁾が作成された。その後、昭和45年に本州四国連絡橋公団が発足し、各種設計基準が整備され工事が本格化した。海外のプロジェクトでは長大橋の設計はコンサルタント、一部は専門家に委ねられるケースが多く、設計基準としてとりまとめられた例は少ないようである。

本州四国連絡橋に関連した技術開発については、設計、施工、材料、施工法などの幅広い分野においてその動機、内容、成果について取りまとめが行われている⁶⁾。本州四国連絡橋の建設技術は明石海峡大橋を目標にその技術開発が進められてきたと言っても過言ではない。本四プロジェクトが始められるまでは、中央支間1,990mを有する上部構造、潮流の厳しい水深50mへの基礎の設置などの技術は確立されておられないばかりかそのような吊橋の建設が可能かどうかさえ不確かな状態であった。本四公団では因島大橋、大鳴門橋、瀬戸大橋の建設を通じてこれらに必要な各種の技術を開発し、より厳しい条件下での工事が安全で確実に出来るようになった。わが国の吊橋技術の特徴としては、このようなアプローチを辿ってきた点をあげることが出来る。

(2) 外国との比較

海外の代表的な長大吊橋4橋(第2ボスボラス(Fatih Sultan Mehmet Koprusu)橋、グレートベルトイースト橋、ツインマ橋、メッシナ橋)の工費・工期を表-2にまとめた。また以下にこれらの橋の設計と施工に係わる特徴的な事項をわが国の技術を踏まえながら掲げた。

a) 設計全般

第2ボスボラス橋を除き、限界状態設計法を採用している。第2ボスボラス橋およびグレートベルトイースト橋の活荷重は、本四活荷重より大きい値を採用している。架設誤差、基礎の移動・回転は設計荷重として取り扱われていない様である。第2ボスボラス橋およびメッシナ橋は、死荷重完成時にセットバックしており、鉛直荷重

最大時に鉛直になる値をとっている。

b) 全体構造

グレートベルトイースト橋は別にして、海上工事を避けるため主塔部を極力陸上部に設けている。そして、側径間でのハンガーの設置に工夫を施している。

c) 主塔

コストが低いということでコンクリート塔が選択されている例が多い。メッシナ橋では地震時反力を小さくするために鋼製主塔にしており、日本と同様である。第2ボスボラス橋とメッシナ橋の鋼製主塔の場合、水平継手は引張ボルト継手であり、塔基部はコンクリート下部への埋め込み構造である。引張ボルトの水平継手は架設時に足場を必要としない大きなメリットがあり、塔基部を埋め込み構造にすると基礎上面の研磨が不要となる。

d) 主ケーブル

全てAS (air spinning) 工法で施工あるいは施工が計画されている。PWS (prefabricated parallel wire strand) は現在限られたメーカーのみしか供給しておらず、現地条件などに基づく比較の結果からAS工法が選定された。

e) ケーブル・アンカレイジ

日本は一括架設を前提とした後面支圧タイプのアンカーフレームであるのに対し、欧州ではAS工法のため引張バーを用いたアンカーである。

後面支圧にするか引張バーにするかは別にしても、日本の場合には一体ブロックにするため重量が大となっている。

f) 補剛桁

補剛桁は、箱桁が基本である。フラッターの照査風速の設定およびフラッター発振風速の定義にもよると思うが、箱桁の方がトラス桁に比して軽いということが理由になっている。また、製作コストも含めた比較もされている。

また、補剛桁を連続にしている、走行性の向上と伸縮継手の省略を図っている。この時、グレートベルトイースト橋とメッシナ橋では、主塔部に鉛直支持を設けていない。

(3) 技術の評価

新しい技術を評価することは難しいことである。土木技術の場合は構造物の寿命も長く、もともとばらつきのある大きな環境条件もその間に大きく変化するためである。一つの事例としてセバーン橋の例をとりあげる。

1966年英国セバーン橋(主径間988m)は補剛桁に従来のトラス桁に代わって流線形箱桁を、また従来の鉛直平行ハンガーに代わり斜めハンガーを採用し、米国流のそれまでの吊橋とは全く異なる新機軸を生み出したものとして注目を浴びた⁷⁾。流線形箱桁はその後、デンマーク

表-2 海外のプロジェクトの工期・工費

橋梁名	諸元	工期	工費	備考
第2ボスポラス橋 ¹⁾	中央支間1,090m 橋長 1,510m	1985.12 ~1988.11 (3年間)	358百万 USD (約375億円)	第2工区37kmの 工費
グレートベルト イースト橋 ²⁾	中央支間1,624m 橋長 2,700m	1991.10 ~1997.10 (6年間)	54億 DKK (約900億円)	本橋とアプローチ 部6.8km
ツィンマ橋 ³⁾	中央支間1,377m 橋長 2,132m	1992.5 ~1997.5 (5年間)	(約1,100億円)	
メッシナ橋 ⁴⁾	中央支間3,300m 橋長 5,070m	(9年間)	33,860億 IL (約2,200億円)	

- 1) IHI 技報28-2号に掲載、契約通貨による精算額。()内は、1USD = ¥105換算。
 2) グレートベルト公団の1994.11Press Release金額。()内は、1DKK = ¥16.05換算。
 3) 日経コンストラクション1993.12.24による。円換算レートは不明。
 4) メッシナ海峡会社資料による。()内は、1IL = ¥0.064換算。
 *上記円換算には、1994年2月時点のレートを使用した。

のリトルベルト (Little Belt) 橋、トルコのボスポラス (Bosporus) 橋、第2ボスポラス橋、世界最長の英国の吊橋ハンバー (Humber) 橋等に採用され吊橋上部構造の新しい流れになっている。

セバーン橋の設計者である Gilbert Roberts 卿は、リスボンでの吊橋に関する国際会議において、セバーン橋の特色を次のように説明し、同規模のフォース道路橋と比較して2/3の工事費で実現したとして従来の設計からの革新を強調した。

- ①空力特性の改善：トラスを使用したり、開床部を設けたりして、風によって生ずる渦を分散させるような方法とは別に、断面を流線形にすることにより、剛性の増加に加えて、渦が発生しないようにする。
- ②抗力係数の低減：風荷重はトラスの1/3となり、塔が小さくできる。
- ③軽量化による経済化：箱断面はあらゆる方向の作用応力に同時に有効に働くことができ、別々に働く部分のあるトラス断面に比べて鋼重が少なくてすむ。吊構造部の重量が減ると、ひいてはケーブル、塔、アンカレイジが小さくてすむ。
- ④塗装面積の減少：外側の塗装部分が非常に少なくなり、箱桁内部が密閉されているので補修不要。
- ⑤斜めハンガーによる構造減衰増加：振動時の吊材のヒステリシスを利用してエネルギーを吸収し、構造減衰を増加させる目的で、各吊材を三角形を形成するように傾斜させて配置した。

この新しい構造も良いことばかりではなく、供用後、
 a) 風によるハンガーの振動、b) 舗装の破損、c) 桁の疲労損傷などいくつかの弱点が見つかり、大掛かりな補修工事が必要になった。

風によるハンガーの振動に対しては、供用開始後、ダンパー制振対策とハンガー端部構造の改良が行われた。

その後、交通量が40,000台/日(30%が大型車)と大幅に増加し、補剛桁に疲労損傷が発生した。原因は大型車の増加であり、1962→1976年で14倍、車重は40%増であった。補修工事⁸⁾は、①鋼床版下面の溶接のやり直し(デッキプレートと縦リブの間の隅肉溶接のやり直しは延長21km)、②主塔内部の補強(内部に4本の鋼管建て込み)、③斜めハンガー340本全ての交換などであり、この補修工事には約6千万ポンド(約90億円)という巨額の経費が必要とされた。

大掛かりな補修工事の故に新技術を非難することは容易である。しかしそこからは新しい進歩は生まれません。偉大な挑戦に対する評価の難しさの貴重な事例を提示している。

5. 技術的検討課題と研究の動向

今後の技術開発は従前のように見習うべき手本がなく、独自の発想、思想、価値判断が求められる。特に、明石海峡大橋を2~3割程度上回る規模の吊橋は、明石海峡大橋と同様の構造を基本としても設計は不可能ではないが、高齢化・成熟化を迎えるこれからの社会・経済に対応した合理的かつ経済的な設計は難しい。これらより、着眼点としては「より経済的合理的な構造の開発、および工費の低減・工期の短縮を目指した建設技術の開発」が重要になる。

工期短縮の重要性を建設中の利息についてみたのが図-7である。工期を11年から6年に短縮することにより、約13%の事業費削減が可能となる。この様なことから東京湾口道路技術調査委員会では、「工費・工期の大幅な削減」を目標に掲げて、これを実現するための技術について検討を進めている。

現在のところ、プロジェクトが構想されている海峡部



図-8 斜めケーブル併用形式

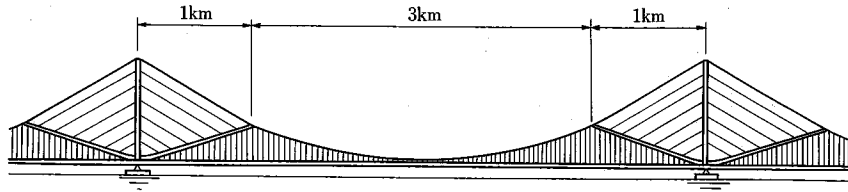


図-9 ジブラルタル海峡連絡吊橋 (T.Y.Lin)

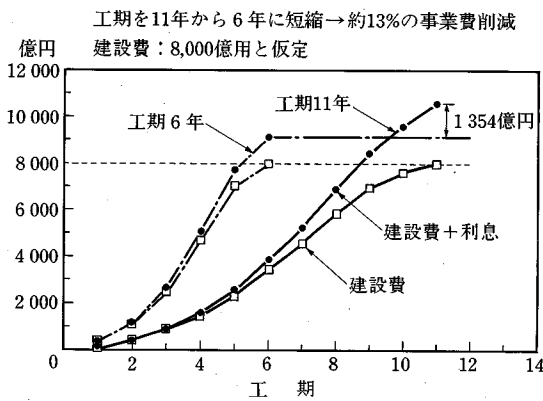


図-7 工期短縮による建設利息低減

の自然条件は必ずしも十分に把握されておらず、特に、重要度の高い地形、地質条件に関しては不明な点が多い。このため、設計条件に関係する自然条件の調査や試設計を進めながら技術的課題の解決に当たっていかねばならないが、ここでは、各プロジェクトで構想される大規模構造物を実現するための技術的課題およびその研究動向を総括的に述べることにする。

(1) 全体構造

計画を進める前に、構造物が持つべき機能、耐久性、安全度などの設計の前提条件の整理が重要になる。長大橋の耐用年数は、設計段階で明確に規定することは難しい。ブルックリン (Brooklyn) 橋の様に、補修補強することにより 100 年を経過してもニューヨークの重交通を担っているものもある。耐久性や強風・地震などの荷重の大きさは時間のファクターである。また、強風・地震時などの異常時に橋梁の応答レベルをどこまで許容するか、機能をどこまで確保するのかも構造設計に大きく影響を及ぼす。これらの検討には必然的に限界状態設計法をベースに考える必要があるであろう。

また、構造形式として斜めケーブルを併用した形式 (図-8) は、Dischinger が 1938 年に提案しているが、主塔の前後は補剛桁を斜めケーブルで吊り、残りの区間を主ケーブルからハンガーで吊る形式であり、剛性を高める効果、施工を早める効果が期待される。

図-9 はジブラルタル海峡 5,000 m 吊橋案⁹⁾として T.Y.Lin が提案したものであり、ケーブル構造を工夫したものである。この構造は橋脚から 1,000 m の補剛桁を斜めのストラットで支持し、吊橋の見かけの支間を低減しようとするものである。この構造では、1,000 m のストラットの先端が支点のように作用するため、橋梁全体としては 3,000 m の吊橋と動的にも静的にも同じ挙動を示すことになるとしている。

(2) 上部構造

上部構造については自重を減らすことが第一の課題であり、次に全体剛性を高めるためにケーブルシステムの活用が検討課題である。

また、設計法に関連して、超長大吊橋では死荷重強度の比率が活荷重よりも圧倒的に高まることから、死活荷重比に係わる安全率の見直しが必要である。この場合、ケーブルを例にとると、信頼性設計法の考え方に従えば、所要の安全性を確保しつつケーブルの安全率を小さくすることができ、結果としてケーブル断面を減少できる。また、限界状態を与える要因を分析することにより安全率の見直しが可能である。

限界状態設計法の書式により明石海峡大橋の主ケーブルの安全率をみてみると次式のようなになる。

$$0.78T \geq 1.6 \times T_{(1.05D+1.5L+T)} \quad (1)$$

ここで、 T ：破断強度、 $T_{(1.05D+1.5L+T)}$ ：荷重係数 (D ：1.05、 L ：1.5、 T ：1.0) を考慮して計算した設計張力これを許容応力度設計法の書式に書き直すと次式のようなになる。

$$0.78T \geq 1.6 \times 1.086 T_{(D+L+T)} \quad (2)$$

表-3 クロスハンガーの効果

桁形式		1箱桁 (H=4 m)			1箱桁 (H=7 m)			無補剛桁		
		なし	ケーブル	鋼	なし	ケーブル	鋼	なし	ケーブル	鋼
固有振動数 Hz	水平1次	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.033	0.033	0.034
	鉛直1次	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055
	ねじれ1次	0.126 (T1)	0.142 (TH1)	0.144 (TH1)	0.147 (T1)	0.147 (TH1)	0.150 (TH1)	0.107	0.130	0.134
	ねじれ2次	0.207 (T2)	0.186 (T1)	0.191 (T1)	0.159 (T2)	0.202 (T2)	0.208 (T1)	0.164	0.154	0.165
フラッター風速(m/s)		43.2	61.7	63.3	61.3	71.9	81.4	38.7	66.2	65.1
応答振動数(Hz)		0.089	0.138	0.139	0.108	0.120	0.137	0.127	0.103	0.136
フラッターモード		対称	逆対称	逆対称	対称	対称	対称	逆対称	対称	逆対称

注：ねじれ振動モードの T はねじれ振動，TH は水平連成ねじれ振動を示す。

ここで、 $T_{(D+L+T)}$ ：設計張力

式(2)を次のように変形し、許容応力度法での安全率 2.2 が得られる。

$$T/2.23 \geq T_{(D+L+T)} \quad (3)$$

従来の許容応力度法による安全率が 2.5 であったのに対し、明石海峡大橋では 2.2 とした。さらに、安全係数 1.6 に関する要因を腐食、遅れ破壊、社会的重要性その他の要因に分解し、それぞれの安全係数を決定していく検討が行われている。

他方、ケーブル用高強度材料の開発も同様な効果をもたらす。

上部構造の耐風設計としては、上部工にとって支配的な風荷重の低減と風による発散振動（フラッター）に対する耐風対策の開発が最重要課題になる。

風荷重の影響を減少させるためには、トラス桁に代えて箱桁を採用することがあげられる。ただしセバーン橋のような流線形箱桁を採用するのみでは、明石海峡大橋を上回る規模の超長大橋では所要のフラッター特性が確保されないおそれがあり、併せて最適化が図られねばならない。更にケーブル、ハンガー、塔の風荷重を低減させるような対策も必要である。

次に、フラッター対策としては、空力的対策として桁構造の改善があり、箱桁を基本にして新しい桁形状を追求する必要がある。具体的な検討の方向としては、橋桁の中央部に開口部を持つ箱桁、すなわち 2 箱桁形式吊橋が検討されている。また、構造的対策としては、質量・振動数の改善があり、塔の剛性増加によりあるいはケーブルシステムにより全体の剛性を高めるクロスハンガーなどの方法が考えられる。対策の 1 例として図-10 のようなクロスハンガーがある。そして、2,500 m 吊橋の試算設計においてクロスハンガーによる固有振動数の増加、フラッター発現風速の向上に対する効果を表-3 で

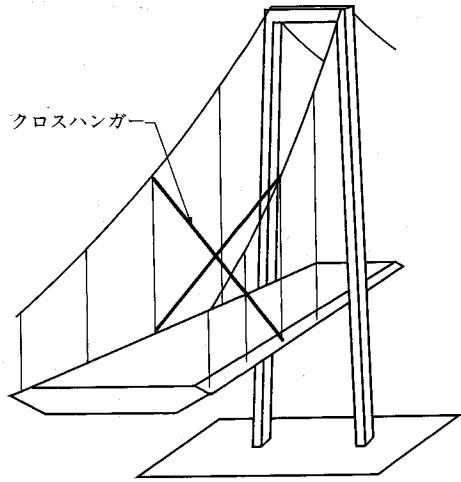


図-10 クロスハンガー形式

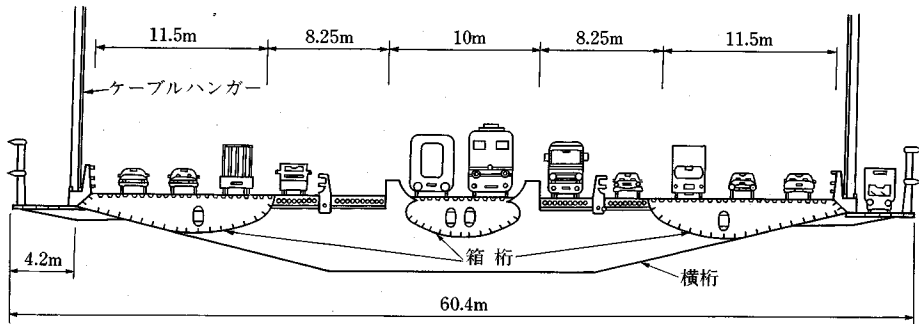
比較した。また、対策として構造的空力的な 3 次元効果を利用することも考えられている。

図-11 にメッシナ橋で想定されている補剛桁を示す。鉄道 2 車線と鉄道のサービスに用いられる道路が 2 車線中央に配置され、道路として 3 車線と緊急用車線が桁の両側に配置されている。これは、高風速時の風による振動に配慮したものであり、幅員は 60.4 m と大きくし、3 本のボックスを横桁で結んで桁間にギャップを配置し、また桁端の形状を工夫した空力的対策のユニークな構造になっている。

また長期的な研究課題としては耐風アクティブコントロールがあり、現在基礎的な研究が進められている。

(3) 下部構造

基礎の設計において地盤の強さ等を表す定数（地盤定数）の評価は重要な項目である。通常はボーリングによ



標準断面図

図-11 メッシナ海峡連絡吊橋

表-4 主塔基礎形式比較表

設置ケーソン式基礎	プラットフォーム式基礎 (PC型枠ケーソン)	ツインタワー式基礎 (PC型枠ケーソン)

りサンプルを採取したり、载荷試験等を実施して地盤定数を評価するが、大水深下での地盤調査はより労力と時間を要す。このため、音波、電磁波等を使った間接的な調査法も重視する必要がある。また、本州四国連絡橋プロジェクトの実績をベースに、地質調査法(地盤定数の設定法)の見直しが必要である。

本州四国連絡橋では比較的硬質な岩盤が海底面から近いところにあったためにこの地盤を支持地盤とし、表層の軟弱地盤を全面掘削し、基礎を支持地盤上に直接設置する設置ケーソン工法が用いられた。この工法は約50mの水深での施工は明石海峡大橋で経験済みであり、水深70m程度までは施工可能と考えられるが、水深が深くなると自重が大きくなり不経済となるので、基礎内部を中空にしたり、あるいは断面を絞込み等の検討が必要である。具体的にはプラットフォーム式基礎、ツインタワー式基礎が考えられ、それらの概要が表-4に示されている。

中空式設置ケーソンあるいはツインタワー形式基礎は設計上浅い剛体基礎として取り扱われるが、その設計で用いる支持力・変形量には次のような課題が考えられる。

①支持力算定で地盤を完全剛塑性体と仮定しているため、地盤のせん断強度の拘束圧依存性、ひずみ依存性、

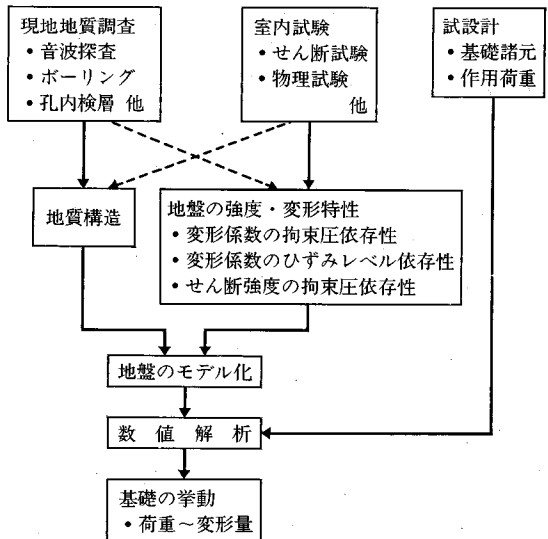


図-12 基礎の支持力・変形量検討手順

異方性、地盤の破壊の進行性などを考慮することが出来ず、設計においては一般に地盤のせん断強度を小さめに設定している。

②変形量の算定では、地盤を弾性体と仮定し、平板载荷試験などにより求めた変形係数を基本としているが、これは大きなひずみレベルでの計測値となっているため、実橋梁の基礎に対しては基礎の変形量を過大に評価する傾向がある。

③支持力と変形量とが関係づけられておらず、基礎の過大な変形を制限するため許容支持力が定められない。

これに対し、最近の研究成果により土の強度・変形特性を詳細に測定することが可能となってきた。そこで、基礎の設計法の合理化を図るために図-12に示すような現地地盤物性を精密にモデル化した有限要素法解析を用いた検討が行われている。

一方、軟弱地盤が厚く、支持地盤層が海底面から深い位置にある場合、あるいは水深が深く条件が厳しい場合

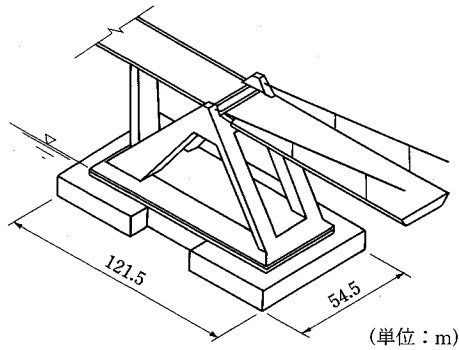


図-13 グレートベルトイースト橋アンカレッジ

には、大水深・軟弱地盤に対する新しい基礎構造の開発が求められる。

図-13はグレートベルトイースト橋のアンカレッジの構造を示したものであるが、従来アンカレッジは海岸線に近い良好な地盤に基礎をもうけていたのに対し、この場合には海峡の中央のやや地盤の悪い所に地盤改良をして設置している事例である。

水深100mを超える深い箇所での長大吊橋基礎の建設は石油掘削プラットフォームの技術が参考になるであろうと注目されている。プラットフォームには鋼製ジャケット構造、コンクリート製重力式基礎、あるいは浮体構造などがある。現在ノルウェーで建設中の北海等で進められている石油掘削に用いられるプラットフォームの1つは、TROLLと命名されたもので、北海の302.9mの水深に設置される4本シャフト構造の重力式コンクリート・プラットフォームで、その高さは369.4mである。もう1つのプラットフォームHEIDRUNは浮体構造を海底にアンカーするTLP(Tension Leg Platform)であり、上載荷重65,700ton、コンクリート量の増加に対し軽量コンクリートを用い、水深は345mの位置に設置される。ジブラルタル橋梁案の基礎としては水深300~500mの箇所に建設しなければならないので、重力式コンクリート構造ははじめ幾つかの案が提案されている。

(4) 耐震設計

平成7年兵庫県南部地震は、明石海峡が震源であり、工事中の明石海峡大橋は長大橋として初めて大地震を経験した。地震により地盤が変位し基礎は水平に1mほど移動したが、幸い補剛桁の架設前であったため、補剛桁長さを調整して製作することによって対処できた。完成系が今回と同様な地震変位を受けた場合の挙動には大きな関心が寄せられたが、計算によれば主部材の応力増加は僅かであり、大きな機能損傷には至らなかったと推定される。正確な地震時の応答記録が得られていないのは

残念ではあるが、この事例は長大吊橋の耐震設計に貴重な実証データを提供した¹⁰⁾。

地震後、土木学会からは今後の耐震設計に関して提言¹¹⁾がなされている。また、各種構造物の耐震設計基準の見直し作業が進行中であり、道路橋についても道路橋示方書の改訂作業が進められており耐震設計の基本的な方向がまとめられている。

長大橋梁の耐震設計法も基本は道路橋示方書とは変わらないが、架設地点と構造の特性を反映したものにする必要がある。

現在議論されている耐震設計法の枠組みとしては、2段階に設計用入力地震動を設定し、それぞれに照査規定を設けるというものである。すなわち、第1レベルとしては「構造物の設計上の供用期間内に発生する可能性が比較的高い地震動に対し、交通機能を阻害するような損傷を防止する」、第2段階としては「建設地点においてまれに発生する大きな地震動に対し、機能復旧可能な損傷は許すが崩壊は防止する」この場合、第2レベルの地震動としては、海洋性の巨大地震や活断層から生じるいわゆる直下地震を想定する。

設計用入力地震動の設定には、地震記録の統計処理による方法以外に、断層モデルによる方法、震源近傍での強震記録に基づく方法などが考えられるがそれぞれの方法は特質を有しており、設定方法についてはこれからの課題であろう。

また、基礎の地震時安定照査法は、従来一般に剛体基礎の場合地盤を線形バネとして表現した剛体2自由度系モデルによる応答スペクトル法によって行われていた。この方法では設計地震動レベルが大きくなった場合に地盤的非線形性が反映されず必要以上に大きな基礎となる欠点がある。剛体基礎の場合地盤の剛性と減衰性についてひずみ依存性が現れることが明確になっており、これを考慮した設計法の開発が進められている。

水深が深くなると基礎に作用する地震時動水圧が非常に大きくなることが指摘されており、現在の動水圧の考え方をそのまま水深100mを超える基礎に適用することが妥当か否かを実験と理論解析により検討している。

また、上部構造に対しても、中央径間の増加に伴い上部構造の減衰性能が低下し、このため上下部構造共に地震時の変形が大きくなり、損傷を生じることも心配されるため、上部構造の減衰性能を向上させるような制震技術の開発も研究されている。具体的には、主塔横梁~補剛桁間、タワーリンク軸受け部、橋台~側径間補剛桁間にダンパーを取り付けて高減衰化するというアイデアである。

(5) 製作、架設、施工

超長大吊橋では構造規模が大きくなり、部材も大型化

し、作業条件が厳しく稼働率も低下することから、工期・工費が増大するため、製作施工面での改善が求められる。共通事項としては、工期工費面で合理化できる構造・工法の採用、ラップ工事の採用、施工精度の見直しなどがある。

上部構造では製作基準・検査基準の見直し、仮組立の省略、架設部材の大型化、架設サイクルの短縮、仮設備の合理化、キャットウォークの簡素化あるいは省略、ケーブルのサグ調整法の見直し、補剛桁の直下吊り工法などである。

下部構造についても、水中作業の機械化・減少化、高強度コンクリートの利用、コンクリート工事の高速施工、高波浪下・大水深下での施工効率の向上などが必要である。

6. 今後の技術開発の方向

超長大橋への取り組みには従来の技術レベルを超える課題が多く、建設省では平成3年度より「海峡横断道路プロジェクト技術調査委員会」(吉田巖委員長)における審議、報告を受けて調査を進めている。また、平成5年に策定された「道路技術五箇年計画」¹²⁾でも超長大橋に関係する課題として地質調査法、大水深基礎、耐風設計、耐震設計の4課題が取りあげられており、建設省ばかりでなく、大学、民間との連携により、開発目標、スケジュールを明確にして技術開発を進めていくこととしている。具体的な調査推進のために、東京湾口、伊勢湾口、紀淡海峡架橋などに関する技術検討委員会等を設置しあるいは設置が予定されており、固有の技術課題の検討を行っている。

昭和30年代後半から本格化した本四架橋調査により、わが国の吊橋技術は世界最長の明石海峡大橋を建設できるまでに発展した。しかし、これからの超長大橋プロジェクトの実現のためには、今までのアプローチとは少し変えた考え方を取り入れなければならないように思われる。

それは、吊橋全体系の挙動を考えて最適化を図ることであり、「全体系としてクリティカルになる荷重は何か?」、「どの様な破壊モードが重要か?」を考え、上部、下部、耐風、耐震などの設計のバランスを取る必要がある。ここで採用される吊橋構造は、荷重条件に耐える構造からより状況を制御する方向に変わるのであろう。本四連絡橋の建設前には長大橋の設計施工事例が少なく、設計・施工に細心の注意が必要とされた。しかし、本四連絡橋を経験することによりノウハウが蓄積された。従って次の超長大橋の設計施工では、これらのノウハウを生かし技術革新が出来る。その結果として、安全で、無駄のない、バランスのとれた構造が可能になると考えられ

る。このためには技術ばかりでなく、ベースとなる意識革新、すなわち新しい吊橋技術の時代に入るとの認識、が必要であろう。

また、道路・自動車交通を取り巻く環境も変化してきており、ITS(高度道路交通システム)の研究も急速に進んでいる。これからの吊橋が計画され完成する頃には、自動運転などの技術が実用化しているかもしれない。それに合わせた吊橋構造は新しいものになるであろう。

そのような検討の中で、積極的に新しい技術が考えられて良いであろう。一例を挙げると、浮力の利用¹³⁾やアクティブ制御であり、それらの超長大橋への適用可能性については基本的な検討から始める必要がある。但し、未知の領域の課題には必ず予測可能性が問題になり、新しい挑戦には必ず新しい問題が発生する可能性があることに留意しなければならない。「撓度理論」の適用によるタコマ・ナローズ(Tacoma Narrows)橋の落橋のような動的耐風安定問題がよい例であろう。

なお、ここでは取り上げなかったが大型建設プロジェクトを進める上では、事業形態、組織、業務分担と責任、社会環境条件との調整などが大きな課題であり、具体化が図られる中でこの方面の検討を深めていくことが必要である。

7. おわりに

ここでは現在進められている海峡横断道路プロジェクト技術調査の中で将来の海峡横断道路に必要なとされる橋梁(吊橋)技術について紹介し、将来の技術の方向について概観した。将来の方向についてはいろいろな考えがあり、論文も多数発表されているが、ここでは十分議論されていない。ここでの記述は筆者のフィルターを通したものである点に注意いただきたい。

海峡横断道路プロジェクト技術調査委員会では、今後の技術開発を次のようにまとめている。

「既往の実績を2~3割程度上回る範囲の大規模構造物をより経済的・合理的に計画するために、向こう数年間、中期的な目標として体系的に取組む必要がある。また、長期的課題に対しても、技術開発の当該の課題を解決するばかりでなく、既存の技術の合理化、効率化をもたらすと考えられることから、21世紀初頭を目標に、今から研究に着手しておくことが必要である。」

これら長大橋梁技術のフィージビリティは常にトンネルと比較されるが、最近橋梁、トンネル以外の新しい構造形式も注目されている。すなわち、海中に基礎をもうけないフローティングタイプ橋梁、あるいは水中浮遊式トンネルであり、前者については米国、ノルウェーで実績があり、後者についてはわが国でも最近熱心に研究が行われている。これらは海峡横断道路プロジェクトに適

用するにはまだまだ課題が多いが、将来の課題としてとらえておく必要がある。

参考文献

- 1) 第11次道路整備五箇年計画, (1993.5 閣議決定)
- 2) 中神陽一: 新交通軸の形成に向けた建設省の取り組み, 道路, No. 644, 1994.10.
- 3) I.Yoshida and Y.Nojiri: A Proposal for Deep Undersea Foundations for Future Large Suspension Bridges, Int. Conf. on Cable-Stayed and Suspension Bridges, Deauville, France, 1994.10.
- 4) 建設省土木研究所; 海峡横断道路プロジェクト技術調査委員会報告書, 土木研究所資料第3205号, 1993.8.
- 5) 本州四国連絡橋技術調査報告書, 土木学会・本州四国連絡橋技術調査委員会, 1967.7.
- 6) 本州四国連絡橋の技術開発, 本州四国連絡橋公団, (財)海洋架橋調査会, 1991.12.
明石海峡大橋の技術, 本州四国連絡橋公団
- 7) G.Roberts: The Severn Bridge a new principle of design, Proc. Symposium on Suspension Bridges, Lisbon, 1966.11.
- 8) A.R.Flint: Strengthening and refurbishment of the Severn Crossing, ICE Civ. Engng., 57-65, May, 1992.
- 9) T.Y.Lin & Philip Chow: Gibraltar Strait Crossing-A Challenge to Bridge and Structural Engineers, Structural Engineering International, 2/91.
- 10) 兵庫県南部地震の明石海峡大橋への影響調査報告書, 本州四国連絡橋公団, 1995.8.
- 11) 土木学会: 土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」(1996.1.10), 土木学会誌, Vol. 81, No. 2, 1996.2.
- 12) 建設省道路局; 道路技術五箇年計画, 1993.6.
- 13) 藤原稔, 谷口信彦, 大野静男, 中西雅時: 超長大橋梁(ジブラルタル海峡連絡橋)の検討——GSP長大橋梁分科会活動とセミナーの成果——, 橋梁と基礎, Vol. 28, No. 7, 1994.7.

(1996.6.14 受付)