

本州四国連絡橋 技術調査委員会 の 技術的検討 の 概要

本州四国連絡橋
技術調査委員会

はじめに 世間で四国へわたる橋をかけろということが議論され始めてから、かれこれ 10 年になる。

戦争に負けて、4つの大きな島だけになってしまった今日、これらの島々の間を自由にゆききできるためのトンネルなり橋なりが欲しいとはだれでもが願っていることである。

九州へ渡る鉄道トンネルは戦前からある。国道トンネルは戦前戦後をかけて苦しい年月をへて完成したが、もう交通がたてこんできて新しい架橋計画が急速に進められている。北海道へ渡るためのトンネルも導孔の掘削が進められている。四国へ渡る橋だけが取り残されるべきはすのものではない。

本州四国連絡橋となると瀬戸内海を横断して架橋しなければならず、そこにある島々を渡って架橋するとしても、その径間長は世界一流の長大なものとなってくる。その大きな架橋地点をどこに選ぶかで大変ちがってくるが、いくら短く考えても主塔間隔 850 m 以上の吊橋が必要であり、箇所によっては 1500 m のものを架設しなければならなくなる。また海中の基礎のことを考えても、海底下 50 m 以上の深さまでさげなければならない箇所もある。加うるに、海外の長大橋では考えなくてもよいような強い風力、地震力を考えなければならない。このように考えてくると、これが計画にあってはきわめて慎重な、ゆきとどいた技術検討が必要だということになる。

それで日本国有鉄道は道路・鉄道併用橋を対象として昭和 30 年度から、建設省は道路橋を目的として昭和 34 年度から調査に着手してこられたが、昭和 36 年秋になり建設省と日本国有鉄道とは本州四国連絡橋に関する技術的検討を土木学会へ共同委託してこられた。この申し入れを受けた土木学会は、問題の重要性を鑑み、その内部に「本州四国連絡橋技術調査委員会」を設置し、昭和 37 年 1 月からこれら審議に着手した。

この計画は世界的規模のもので、技術的にもいろいろな難問をかかえておるので、これが審議には土木工学専門の分野ばかりでなく、広く地質、気象、地震、航空、金属材料などの関係分野の学識経験豊かな方々にお集まり願うことにした。

具体的な検討を行なう組織として、① 基礎に関する専門部会、② 上部構造に関する専門部会、③ 耐風設計小委員会、④ 耐震設計小委員会、等を順次組織し、今日までに延 270 回あまりの会合を開き、それぞれの分野での専門的検討を重ねてきた。

本委員会の仕事は三つの段階にわかれる。

第一の段階は、本州四国連絡橋の計画にあたって、いかなる設計を行なうべきかの決定である。

わが国に前例のない長径間の構築が必要であることと、諸外国にくらべて格段に大きな風と地震とを考えねばならないこと、橋梁基礎の設計施工についていろいろなむずかしい問題があることなど、これらに対処する方針を定めるために「上部構造設計指針」、「下部構造設計指針」、「耐風設計指針」、「耐震設計指針」を作成した。

第二の段階は、橋梁配置計画である。橋梁の大きさ、形式、基礎の構造等

は、各調査路線ごとに多種多様であることはまぬがれないが、いずれも前掲設計指針に基づいたものでなければならぬ。現在委託者側から提出された案を中心として、具体的に計画を検討している。

第三の段階は、本州四国連絡架橋の技術的可能性と問題点の検討である。

この点については、今日までに「1500m級の吊橋上部構造建設は技術的に可能であると考えられ、水深50m、大きな潮流のもとでの深い海中基礎も今後の検討で技術的に可能な方法が見出しうると考える」との結論に達している。

また、鉄道・道路の併用橋に関しても、「鉄道車両の走行が吊橋におよぼす影響も、吊橋の挙動が鉄道車両におよぼす影響も、解決の方策が得られる」との結論に達している。

以上、今回本委員会から委託者側へ「第1次報告書」ならびに付属資料として「耐風設計指針解説」、「鋼材調査」をとりまとめ提出するに当たり、今日まで委員会の進めてきた仕事の概略を述べた次第である。

四国へ渡る橋がいつ実現されるかわからないが、今日までわれわれが検討してきたこと、これから行なう最終審議とが国産の材料と、わが国の技術力を中心としての連絡橋実現に役立つ日がくれば幸いである。

(委員長 青木楠男・記)

1. 本州四国連絡橋技術調査委員会の目的と構成ならびに委員会の検討経緯

(1) 本州四国連絡橋技術調査委員会の目的と構成

本州四国連絡橋技術調査委員会は、「土木学会の方針のもとづき、建設省および日本国有鉄道（昭和39年3月以降は日本鉄道建設公団）の行なう本州四国連絡橋調査について技術的な検討を行なう」ことを目的としている。なお、この委員会の存置期間は昭和36年度以降おおむね4カ年とされている。

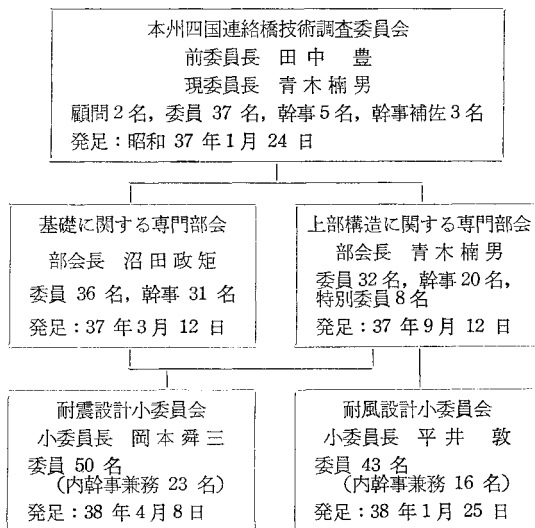
表一に、この委員会の構成を模式的に示す。

(2) 委員会の検討経緯

委員会は、昭和37年1月24日の第1回委員会以来約4年間に7回開催され、各部会、各小委員会の審議事項の総合的検討および調整ならびに建設省、日本国有鉄道および日本鉄道建設公団の調査の検討を実施してきた。

第1回委員会においては委員会の目的、運営方針など具体的な問題について審議され、昭和37年5月21日の第2回委員会および昭和38年5月22日の第3回委

表一 本州四国連絡橋技術調査委員会の構成



員会においては、各部会、各小委員会、建設省、日本国有鉄道それぞれの前年度および当該年度の調査について検討が行なわれた。昭和39年5月22日の第4回委員会においては前回同様の検討が行なわれたほか、この委員会を建設省および日本鉄道建設公団の計画段階における調査が完了するまで存置すること、および昭和40年3月に第1次報告書を取りまとめることが決定され、昭和40年3月31日の第5回委員会および昭和40年5月20日の第6回委員会において第1次報告書案の審議が行なわれた。昭和41年3月30日の第7回委員会においては、とくに建設省および日本鉄道建設公団の立案した橋梁配置計画などの検討ならびに第1次報告書に補足すべき事項についての審議が行なわれた。

2. 基礎に関する専門部会における検討の概要

(1) 審議方針および審議経過

基礎に関する専門部会は昭和37年3月12日に発足し、地形地質の調査と橋梁基礎の構造・工法の2つの専門事項について審議することとなった。

部会はこれらの項目を審議するために、下部構成として幹事会を持った。幹事会は部会の事務遂行のために設置され、委託者側である建設省、日本鉄道建設公団、日本国有鉄道の関係職員で構成された。審議が進むにつれて、地盤、設計、施工の各項目について幹事のみでなく部会の委員をふくめての事前審議が必要となり、地盤、設計、施工の各調査幹事会を発足させた。

第1回部会開催以来、昭和41年3月30日までの間に部会10回、幹事会39回、調査幹事会26回を開催

し審議を進めた。審議された主な事項はつぎのとおりである。

- ① 海底地質の工学的性質の調査方法の検討
- ② 各ルートの地形および地質構成の解明
- ③ 海底地質の工学的性質の検討
- ④ 下部構造設計指針の検討
- ⑤ 耐震設計指針の検討
- ⑥ 海外の長大橋下部構造の施工法に関する検討
- ⑦ 各ルートの気象・海象についての検討
- ⑧ 下部構造試案に対する施工法の検討
- ⑨ 掘削機械、作業足場などに関する検討
- ⑩ 施工上の問題点およびその解決法についての検討

以上の審議成果として、下部構造設計指針、下部構造の検討、および自然条件についての中間報告をとりまとめ、あわせて本州四国連絡橋の基礎に関する技術的可能性と設計ならびに施工に関する問題点について委員会に具申した。

(2) 下部構造設計指針の概要

すでにわが国においては支間 367 m の若戸橋が建設され、この程度の吊橋の下部構造の設計には経験を持っている。しかし本州四国連絡橋の対象となる支間 1500 m 級の吊橋はもちろんのこと、支間 400 m を越す長大橋の下部構造に対する設計指針は現在のところない。

この意味から、長大橋の下部構造設計指針を取りまとめることは基礎に関する専門部会の大きな仕事の一つであった。

以下設計指針の内容を簡単に紹介するが、この内容は調査の段階で作業上の要請から、暫定的に定められたものが多く、すべてにわたって解決されているとはいえない。今後各方面での調査研究が進められ、その内容が部会において討議されて改訂されることになるであろう。

指針を作成するに当たって、問題になったのは、設計荷重、特に波力、地震の影響、船舶の衝突力の問題と、許容応力度では水中コンクリートに関係した事項、許容応力度の割増しの問題であった。もちろん構造物の安定の問題は、設計の基本的態度につながるもので、慎重に審議された。

なおこれらの問題のうち耐震設計に関連する事項については、一括して耐震設計小委員会に付託され、専門的審議が重ねられた。

a) 波圧の計算

水深の大きな箇所での構造物に作用する波圧は、水深 30 m より深い位置では無視することにし、Sainflou の式を修正して使用することにした。

b) 船舶の衝突力

橋脚の設計に予想する船舶の衝突力は、防舷材設計の

場合と考え方を変え、衝突船舶の停止距離を考慮して求めることにした。

c) 許容応力度

多量に使用することが予想され、一般には規定の無い、水中コンクリートについては、つぎのように明記した。

「水中コンクリートは施工条件によって品質が左右されるので、施工実験などを行なって適切な許容応力度を定めなければならない」

特に水中コンクリートでは、打継目の強度が問題であり、現在調査試験が行なわれているが、中間段階にあるため許容応力度として数字を掲げるのをやめ、将来の問題として残すことにした。また水中コンクリートでの鉄筋の付着についても問題があり、今後の調査が望まれるが、現状において、

「異形鉄筋またはこれに準じた鋼材の場合には、鉄筋コンクリートとして設計してよい。この場合、付着応力度について十分検討しておかなければならない」

と規定した。

許容応力度の割増しについても議論のあったところであったが、地震時ならびに暴風時に対して 50% の割増しを認め、船舶の衝突時については Check Load と考え、降伏点に対して多少の余裕を見込む値にまで引きあげることとして 65% の割増しを認めた。

d) 安定条件

常時垂直荷重に対しては底面の地盤支持力のみで安定でなければならぬとし、地盤の許容支持力は試験によって求めた降伏支持力に対して安全率 2 を確保することにした。またこの場合、沈下量を考慮して許容支持力を求めるよう注意を喚起した。常時水平荷重に対しては基礎底面における地盤の支持力および底面の摩擦抵抗のみによってとらせ、基礎底面上の荷重合力の作用点は底面の核内にあるようにした。この場合、底面に作用する鉛直反力は許容支持力を超えてはならないし、また底面における摩擦抵抗力は水平力の最大値の 2 倍以上としなければならぬとした。吊橋のケーブルを定着するアンカーには常時において非常に大きな水平力が働くが、この水平力によって時間的に変形が進行する、いわゆるクリープ現象を生ずる恐れがあるので、暫定的に基礎底面より上方の周囲の土砂の抵抗を無視して安定計算をすることにした。もちろん、今後の調査が進み経時変形に対する推定ができるようになれば、この規定は改善されよう。

地震時の安定については、耐震設計指針によることとし、暴風時および船舶の衝突時の水平荷重に対しては、つぎのように規定した。

すなわち、この場合には基礎底面より上方の周囲の土砂の抵抗を考慮してよいことにし、地盤反力係数の値お

よびその分布は、地盤の実情に応じて、定めるものとした。周囲の土砂の影響を考えると、地盤反力の最大値は許容支持力以下とし、抵抗力の合算は作用水平力の2倍以上と規定した。

一方、船舶の衝突時には衝突力による転倒と同時に鉛直軸を中心とする回転について検討するように注意が喚起された。

(3) 構造形式の検討

橋梁予定地点における自然条件が明らかになるにつれて、検討の対象とする規模は模式的にみ�つぎのようなものになった。

橋梁スパン	500 m	1 000 m	1 500 m
橋梁位置の水深	20 m	30 m	50 m

これに対して、わが国および外国での施工例を対比すると

施工例	わが国	外国
スパン	367 m	1 300 m
水深	15 m	44 m

となり非常に大きな飛躍になることがわかるが、この数字から考えて外国の例が参考になると考え、諸外国の施工例についての検討から作業が始められた。

しかし実際には諸外国にくらべて、

- ① 複雑な地形、地質のもとの工事になる
- ② 潮流が早く水深が大きい
- ③ 台風の常襲地帯である
- ④ 地震を考えると耐震設計からきまる寸法が巨大になり施工が困難になる
- ⑤ 船舶航行からの制約を受ける

などの点から見て、比較にならぬほど困難な状態にあり独自の検討が望まれた。

検討作業として、各調査担当機関において締切工を用いたフーチング基礎、曳舟沈設を応用するケーソン基礎、何本かの比較的小形のウエルを沈設し上部を連絡する多柱式基礎についての調査、設計が行なわれ、施工用の足場、掘削機械についても詳細な検討が進められている。これらの一連の基礎形式は、多くの橋脚予定地点の自然条件に適應した工法として選択され、それぞれの地点において、詳細な施工計画がたてられ技術的な検討が加えられつつある。

これら担当機関の手による取りまとめ結果は、改めて、部会において審議されることになっているが現在作業中であり、発表できるまでに至っていない。

(吉田 巖・記)

3. 上部構造に関する専門部会における検討の概要

(1) 審議方針および審議経過

上部構造に関する専門部会は、本州四国連絡橋のうち長大橋梁の上部構造の構造・工法、耐風性および耐震性の検討を目的として昭和 37 年 9 月 12 日に発足し、昭和 41 年 3 月 30 日までに部会 13 回、幹事会 35 回（うち材料調査幹事会 4 回）ならびに幹事打合会を開催し審議を行なってきた。発足に当って定められた審議方針はつぎのとおりである。

- ① 検討の対象とする橋の種類は、道路単独橋および道路・鉄道併用橋とする
- ② 耐風性と耐震性については、その重要性から小委員会を設けて検討する
- ③ 当面は、設計指針の作成を中心として上部構造の検討を行なう

審議された主な事項はつぎのとおりである。

- ① 建設省、日本国有鉄道（昭和 39 年 3 月以降は日本鉄道建設公団）の実施する調査計画に対する検討
- ② 耐風設計小委員会および耐震設計小委員会の設置とその調査方針の検討
- ③ 材料調査幹事会の設置（上部構造に関する専門部会の幹事会として開催）とその調査方針の検討
- ④ 建設省、日本国有鉄道（日本鉄道建設公団）の実施する試算設計の基本事項と、設計指針の事前検討およびその成果に対する検討
- ⑤ 併用吊橋の車両走行安定性、衝撃などについての検討
- ⑥ 関係各県の調査資料の検討
- ⑦ 海外の長大橋に関する検討
- ⑧ 耐風設計指針および耐震設計指針の検討
- ⑨ 上部構造設計指針の検討
- ⑩ 上部構造形式の検討
- ⑪ 吊橋上部構造の耐震設計と下部構造の耐震設計の主塔基部における連続性の検討
- ⑫ 各ルートにおける橋梁計画ならびに主要な橋梁の構造形式の検討
- ⑬ 第 1 次報告書の設計指針の補足および改訂

以上の審議成果として、昭和 40 年 3 月には第 1 次報告書に対する上部構造設計指針、耐風設計指針、耐震設計指針、上部構造形式の検討に関する報告書、および鋼材調査報告書を取りまとめ本委員会に具申した。また昭和 41 年 3 月 30 日には、委員会、上部構造に関する専門部会、基礎に関する専門部会の合同委員会において、上記第 1 次報告書に対する補正および改訂案、各ルート

における橋梁計画ならびに主要橋梁の構造形式について検討を行なった。

(2) 上部構造設計指針の概要

指針は建設省、公団の行なう当面の予備調査における概略設計を対象として作成されたものである。したがって、適用範囲も各ルートの主橋梁の構造形式と目されている鋼吊橋に限定されている。以下その主な内容についてのべる。

a) 鋼道路吊橋および鋼道路・鉄道併用吊橋の設計に適用する。耐風設計、耐震設計については別に指針を定めているが、構造物の安全度はこの指針で統一した考え方でまとめられている。適用支間は明示されていないが、おおむね中央支間 1500 m 程度までを対象としている。

b) 地震や風の影響は、本橋の重要度、規模などを勘案し、再現期待値 100 年程度の規模のものを考慮している。

c) 活荷重については、将来の交通の需要、走行分布、構造の特性などを考慮して、道路部、鉄道部それぞれについて規定している。

d) 使用材料としては、平行線ケーブル用素線、HT 70/80 などの従来の示方書にはない高強度の鋼材までを含んでいる。

e) 許容応力度の設定に当っては、材料の設計基本強度という概念を設け、すでに豊富な使用経験をもっているもの、または、それと同等と考えられるものについては、その材料の保証降伏点を設計基本強度とし、HT 70/80 や平行線ケーブル用素線のように橋梁への適用性を現在調査中であるものは、その材料の保証降伏点にある率をかけて低減して設計基本強度としている。このような方法をとることによって、高強度鋼を従来の材料と等しい安全率で取扱うことができるように考えられている。なお安全率は原則として 1.7 と定めている。表-2 にその例を示す。

表-2

	鋼種	板厚 t (mm)	保証降伏点 または耐力 σ_y (kg/cm ²)	設計基本強度 σ_D (kg/cm ²)	設計許容軸方 向引張応力度 σ_{td} (kg/cm ²)
非 調 質 鋼	SS 41	$t \leq 40$	2400	2400	1400
		$t > 40$	2050	2050	1200
	SM 41	$t \leq 50$	2400	2400	1400
		$t > 50$	2050	2050	1200
鋼	SS 50	$t \leq 40$	2800	2800	1700
	SM 50	$t \leq 50$	3200	3200	1900
	HT 36/50	$t \leq 50$	3600	3600	2100
調 質 鋼	HT 50/60	$t \leq 50$	5000	4760	2800
	HT 63/70	$t \leq 50$	6300	5480	3200
	HT 70/80	$t \leq 50$	7000	6090	3500

f) 地震時の許容応力度の割増しは、構造物の地震時の挙動がまだ十分に明らかにされていないことと、重要度および被害を受けた場合の再建、補修の困難さ、船舶航行への影響などを考慮して、従来の示方書の 70% 増しより低い 45% 増しとしている。つぎに各種の荷重の組合わせに対する割増し率を示す。

表-3

設計対象	荷重の組合わせ	許容応力度の 割増し (%)
補剛トラス	$D+(SE)+T+L$	0
	$D+(SE)+T+W$	35
	$D+(SE)+T+L_W+W_L$	25
	$D+(SE)+T+L_{EQ}+EQ$	45
	ER	35
横構	W	35
	EQ	45
ハンガー	$D+T+L+I$	0
ケーブル 塔	$D+T+L$	0
	$D+(SE)+T+L$	0
	$D+(SE)+T+W$	35
	$D+(SE)+T+L_W+W_L$	25
	$D+(SE)+T+L_{EQ}+EQ$	45
ケーブルアンカー	ER	35
	$D+T+L$	0
	$D+T+W$	25
	$D+T+EQ$	35

上記荷重の組合わせの記号はつぎのとおり

D : 死荷重
 L : 活荷重
 L_W : 風荷重載荷時の活荷重
 L_{EQ} : 地震荷重載荷時の活荷重
 T : 温度変化
 W : 暴風時風荷重
 W_L : 活荷重載荷時の風荷重
 EQ : 地震荷重
 ER : 架設時の荷重
 SE : 支点移動の影響
 I : 衝撃

(3) 上部構造形式の検討

上部構造形式の検討は、このような規模の橋梁では設計、施工とともに検討すべきであるが、施工に関する資料が十分ととのっていないため、設計に重点をおいて検討が行なわれた。つぎにその概要をのべる。

a) 道路部および鉄道部の構成は図-1 に示すとおりである。

b) 各種構造形式の適用については、つぎのような中間結論を得た。

① 中央支間長 500~1500 m の橋梁の構造形式

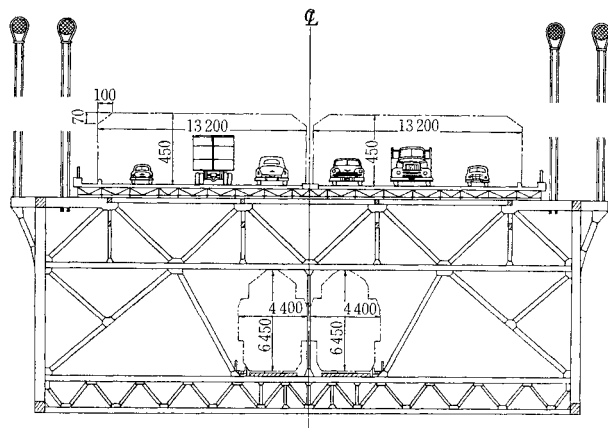
この規模の橋梁の構造形式としては吊橋が適当である。

道路単独橋の場合には 2 ヒンジ補剛トラス吊橋、道路・鉄道併用橋の場合には 2 ヒンジ補剛トラス吊橋、連続補剛トラス吊橋、あるいはたわみ剛度を増すために、これらにステイを設けた形式のうち経済的なものが適当な形式といえよう。

② 中央支間長 500 m 以下の橋梁の構造形式

この規模の橋梁の構造形式として、第一に吊橋とカンチレバートラス橋があげられるが、カンチレバートラス

図一1



ス橋は架設の面で、航路の条件、地形など吊橋よりも制約をうける場合が多い。第二に連続トラス橋とアーチ橋があげられるが、これらは吊橋やカンチレバー トラス橋以上に航路の条件、地形、下部構造の条件、架設の条件などにより、それらの可能性が大きく左右されるため、これらの条件が有利な場合には、吊橋やカンチレバー トラス橋とそれぞれのもつ限界スパンの範囲で同等の経済性をもつ構造形式といえよう。

一般に道路単独橋の場合には吊橋およびカンチレバートラス橋が、道路・鉄道併用橋の場合には、比較的剛度の大きいカンチレバー トラス橋が適当な形式といえる。

(4) 鋼材調査の概要

連絡橋には各種の高強度鋼、平行線ケーブル用鋼線を含め大量の鋼材の使用が予想される。しかしながら、常用の鋼種を除きそれらの橋梁への適用性あるいは国産で所要の質、量を満たしうるかは十分検討されていないので、使用しうる材料の範囲を調査し、それらについて橋梁への適用性を明らかにして、設計の際にそれぞれを適切に使用できるように、あらかじめ調査することになった。このため上部構造に関する専門部会に材料調査幹事会が設けられ、鋼材調査を行なっている。この中間成果として、第1次報告書付属資料として鋼材に関する報告書が作成されている。この報告では HT 70/80 までの各鋼種について、それらの機械的性質、疲れ強さ、溶接性、防食、部材の連結などについて検討し、概略設計に使用可能と考えられる鋼種を明らかにし、かつ平行線ケーブル用鋼線については、国産の試作品の品質は目標仕様を十分満たしていることを認めている。しかしながらまだ多くの問題があり、実際に使用するまでにはさらに多くの試験研究によって、その適用性および鋼材メーカー、製作メーカーに対する適確な要求を明らかにする必要があることを指摘している。 (多田安夫・記)

4. 耐風設計小委員会

(1) 審議方針および審議経過

耐風設計小委員会は、本州四国連絡橋の耐風設計に関する基本方針の確立を目的とし、昭和 38 年 1 月に発足した。いうまでもなく、わが国は世界有数の台風常襲地域に位置し、年平均の台風上陸回数は 4.4 回にも達している。本州四国連絡橋の計画は、可撓性に富む長径間吊橋を除外して考えることはできないが、旧タコマ橋の例にもみられるように、このような吊橋は風の動的な影響を受けやすいため、十分に安全な耐風設計方法を求

めておかなければならない。このため、小委員会ではつぎの諸点に関する既往の諸研究の成果の収集、検討を通じて調査を進めることとした。

- ① 架橋地点における最大平均風速の生起確率
- ② 風速の鉛直分布形状(海上風を含む)
- ③ 瞬間風速の時間的・空間的分布ならびに風速評価時間と風速との関係
- ④ 変動風速のパワー スペクトル
- ⑤ 構造物の形状と空気力および空気力係数の関係
- ⑥ 吊橋の弾性不安定現象とその限界風速
- ⑦ 吊橋の風による自励振動とその限界風速
- ⑧ 変動風速による吊橋の不規則振動
- ⑨ 架設中における風の影響

これらの諸点は土木工学だけではなく、気象、航空、統計等の各分野に関係するので、小委員会はこれらの分野の専門家で構成され、調査活動の結果の集約として

- ㉓ 本州四国連絡橋の耐風設計に関し拠るべき基準を示すため、耐風設計指針を作成すること
- ㉔ 現在までの諸研究の成果を総括するとともに、指針の内容の基礎的な考え方を明らかにするため、耐風設計指針解説書を作成すること
- ㉕ 今後の研究調査の便をはかるため、耐風設計に関する文献抄録集を作成すること

を目標として運営された。

発足以来現在までに開かれた小委員会は 24 回、幹事会は 40 回に達し、昭和 39 年 9 月には耐風設計指針(1964)を、昭和 40 年 5 月には同解説書をまた昭和 40 年 10 月には耐風設計に関する文献抄録集を上梓することができた。

しかしながら、吊橋の耐風設計に関しては、将来における研究の発展に期待すべき未解決の問題も含まれているため、指針には暫定的な値を示すにとどめた部分も多い。したがって、現在の耐風設計指針は 1964 年という

時点におけるものであって、小委員会としては、今後の活動を通じ、その内容の充実を進めてゆきたいと考えている。

(2) 耐風設計指針および解説書の特色と内容

短い支間長の橋梁（道路橋では150 m以下、鉄道橋では120 m以下）を対象とした従来の示方書では、他の荷重にくらべて風の影響力が小さいため、風荷重に関しては特定の風速（道路橋で55 m/sec、鉄道橋で52 m/sec）と抗力係数（道路橋では1.6、鉄道橋では1.8）を想定して、単位面積または単位橋長当りの風圧を定めるにとどまっているが、これとくらべて、今回の耐風設計指針および解説書はつぎのような特色を持っている。

① 構造物の耐用年数を考慮した再現期間における風速期待値を設計風速の基本としたこと

構造物の耐用年数 a と、考慮すべき最大風速の再現期間 R との関係は次式で与えられる。

$$R = \frac{1}{1 - q^{1/a}}$$

ここに、 q は最大風速の母集団から任意に a 回の抽出を行なった場合、各回とも抽出値が耐用年数内に考慮すべき期待値をこえない確率で、構造物の重要度、建設費などの条件から定められるべき値である。現在のところ、この値を客観的に決定できないので、その値は設計者の判断によることとしているが、少なくとも再現期間が100年以上になるようにすべきであろう。任意の再現期間における期待値を求めるためには、瀬戸内海地方における既往の風速観測資料にもとづく期待値分布図を指針に添えることとしている。

② 構造物の高度により、設計風速を修正するよう定めたこと

任意地点における風速は高度とともに増加し、その増加の割合はべき法則にしたがう。べき法則の指数の値は地表粗度により変化するので、指針では架橋地点の観測にもとづいて定めるように規定するとともに、観測のない場合に設計者の判断を助けるため、各種の地表状況に対応する指数の値を表示してある。

③ 構造物の規模（支間長・高さ）に応じて設計風速を修正するよう定めたこと

瞬間風速は一定ではなく時間的にも空間的にも絶えず変動している。したがって、任意時刻に構造物の全長にわたって吹く風速の平均値の最大は、構造物の長さにより変化し、支間長が増加すれば減少する。指針にはこの関係を近似的に求めた値を表示し、風速修正の便宜をはかっている。

④ 架橋地点の局地的条件を重視し、現地観測の結果にもとづいて設計風速を定めるよう規定したこと

風の吹き方は強風時においても地形地物の影響を受けやすいので、最終的には設計風速は、架橋地点における風速分布、風速の変化程度等の現地観測にもとづいて定めなければならない。しかしながら、観測による値を求めるには時間を要するので、指針には一般的な参考値も記している。

⑤ 構造物の構成部分別に異なった抗力係数を用いて風圧力を求めるよう規定したこと

風により構造物に作用する静的空気力は、構造物の形状、寸法、相対位置等により異なるので、最終的には模型実験で

求めなければならない。しかしながら、抗力（いわゆる風荷重）については、既往の系統的実験例も多いので、かなり正確に一般的な値を示すことができる。本指針ではケーブル、ハンガー、補剛桁など構造物の各部分別に抗力係数の参考値を与えている。揚力や回転モーメントは模型実験によらざるを得ない。

⑥ 吊橋の弾性不安定現象および自励振動現象に対する限界風速の基準を示すとともに、風に対する吊橋の動的応答の解析と風洞模型実験を行なうよう務めたこと

旧タコマ橋の落橋以来、数多くの研究者による注目すべき研究成果はあるが、吊橋はその形状が複雑で解析的に扱いかいにくい点もあって、風に対する空力弾性学的応答に関しては不明な点が多く、最終的には風洞模型実験により解明せざるを得ない。したがって本指針では、航空分野を含む既往の諸研究成果にもとづき、動的現象に対する限界風速の暫定的基準値を定めるとともに、動力学学的解析をも行なうよう要望し、解説書において諸家の解析方法の概要を紹介している。

⑦ 架設中に考慮すべき風速の再現期間を定めたこと

架設中の独立した主塔や連結前の補剛桁は風により振動を起こしやすく、また架設作業中のケーブル素線は風によって乱されて工事の遂行に支障を与える。このように吊橋にとっては架設中の風の影響も無視することのできない要素である。しかしながら、工事期間は構造物の耐用年数にくらべてはるかに短かいので、設計風速のように大きな風速を考える必要はない。このため、本指針では架設中に考慮すべき風速の再現期間を30年としている。

以上にのべた特色のいくつかは、諸外国の同種の規定とくらべても遜色のないものであり、耐風設計小委員会としては、内外の最新の研究成果をできる限りとり入れて作成したこの耐風設計指針および同解説書が、今後の耐風設計方法の進歩に多少とも資するところがあるものと期待している。
(大久保忠良・記)

5. 耐震設計小委員会

(1) 審議方針および審議経過

a) 審議方針

耐震設計小委員会は、本州四国連絡橋の耐震設計に対する基本方針の確立を目的としている。

瀬戸内海およびその周辺は、わが国全体からみれば比較的地震のおだやかな地域ではあるが、この地域に吊橋のような長大橋梁を設ける場合には、地震の構造物におよぼす影響は相当大きなものになるので、この地域における地震動の特性、地盤条件などを考慮して、変形しやすい上部構造と剛で大規模な下部構造について、それぞれに応じた耐震設計法の確立が要請されている。

このため小委員会は、重要事項として選定されたつぎの6項目について、資料の収集、整理、検討などによる調査活動を開始し現在にいたった。

- ① 架橋地点における地震動
- ② 設計に考慮する地震動

- ③ 水・土砂・基礎地盤に関する問題
- ④ 吊橋の耐震設計
- ⑤ その他の構造物の耐震設計
- ⑥ 地震時における材料・構造の極限強度と安定性

b) 審議経過

委員会は昭和 38 年 4 月 8 日の第 1 回小委員会以来現在までに 10 回の小委員会と、36 回の幹事会の開催を通じて調査活動を進めてきた。

この間昭和 39 年 4 月には、それまでの成果をまとめた耐震設計小委員会報告書の草案を編集し、また 40 年 1 月には、耐震設計指針の総論を作成した。さらに現在までに指針各論の原案をまとめ、指針にもとづく試算設計を行ない、指針の再検討に着手した。

(2) 耐震設計指針の概要

耐震設計指針は総論と各論とにわかれ、おのおのつぎの構成からなっている。

総 論	各 論
1. 総則	7. 下部構造
2. 設計の基本方針	8. 吊橋
3. 架橋地点に考えるべき地震	9. その他の構造
4. 震度法による設計	
5. 動的解析	
6. 設計上の安全率	

以下に指針の主要な項目に関し簡単に紹介する。

a) 設計の基本方針

長径間橋梁、あるいは細長い塔のように基本固有振動周期の長い構造物に対しては、構造物の動的特性、観測による地震動の特性などにもとづいた応答を考えた修正震度法により、基本設計を行ない、これに動的解析による検討を加えることとしている。この場合、構造物の基本固有振動数が 1.5 cps をこえるものについては、従来の震度法により、基本設計をしてもさしつかえないとしているが、震度法と動的解析との関連については、さらに調査を進める予定である。

b) 架橋地点に考えるべき地震

架橋地点で考えるべき地震は、近距離地震としては、100 年当り 3~4 回の発生が予想される Mag 7 前後の規模のもの、また遠距離地震としては、紀伊半島沖および土佐沖において 100 年当り 1~2 回の発生が予想される Mag 8~8.5 の規模のものが対象とされている。

c) 震度法による設計

設計に用いる基準水平震度は、第 3 紀層またはそれ以前の古期岩層に基礎をおく場合に 0.2 とし、架橋地点の範囲内では、地域による差異は考えない。なお構造物の高さによる水平震度の割増しを考慮するものとして、鉛直震度は水平震度の 1/2 としている。

地中構造物に働らく地震時土圧としては比較的剛性の

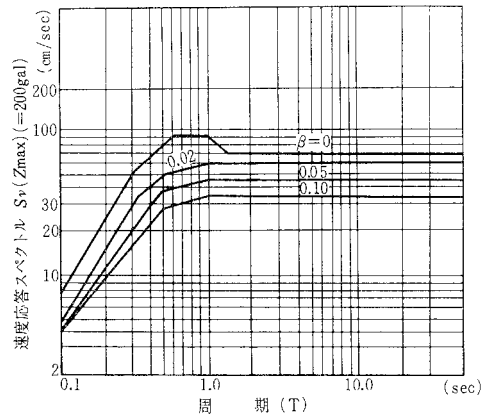
大きい構造物が表層地盤を貫ぬいて堅固な基盤に基礎を置く場合、地震時の表層地盤変位を仮定し、構造物と地盤との間の相対変位と地盤のバネ常数とに応じた地震時土圧を考えている。地震時の表層地盤の変位は層厚、地盤の性質、地震の規模などに応じて、その数値および深さ方向の分布なども異なり、確定的な数値は現在のところははっきりしない。とりあえず、表層地盤の変位は表面で 15 cm、底面で 0 の直線分布と想定したが、これらについてはさらに検討中である。

地震時水圧は、水中橋脚の模型振動実験にもとづいて、深さの立方根に比例する動水圧分布を震度、橋脚の断面形状、運動の状態などに応じて考えている。

d) 動的解析

構造物の動的な耐震計算は強震の速度応答スペクトルによる解析を主体とし、この結果を想定する強震に対して検算する二段がまえの方法としている。速度応答スペクトルは、わが国で最近数年間に得られた 20 成分の水平地震動記録を解析した結果をもととして、建設省土木研究所において作成した 図-2 に示す速度応答スペクトル曲線による。耐震検算に用いる地盤動としては、架橋地点付近で得られた代表的な地震記録と、1940 年 El Centro における南北方向の強震記録を最大加速度 200 gal に縮小、または拡大したものを用いる。

図-2 速度応答スペクトル曲線



動的な土の作用は地盤各層ごとに、その周囲の土の重量バネ常数および減衰作用を考慮するものとし、水の作用は前述の動水圧を仮想質量に換算したものを用いる。

動的解析における地震動は、一般に橋軸方向および横方向について考えるものとし、吊橋上部構造では 6 次程度まで、その他の形式の長径間橋梁および細長い構造物については 4 次程度までの固有振動数、およびこれに対応する基準振動形を考慮することとしている。

e) 設計上の安全率

地震と組み合わせる荷重は台風時、温度変化最高時など

の異常時を除き、常時一般の場合に作用していると考えられる荷重とする。構造物の安定計算においては、地盤の許容支持力は常時の 50% 増しとするが、地震時降伏支持力の 3/4 以下とし、滑動安全率は一般に 1.5 以上とし、滑動により重大な影響を受ける構造物では、さらに安全率を大きくとる。

部材の地震時応力は、鋼材は弾性限界以内、を原則とし、その他の材料は土木学会の関連示方書による。

なお、地震時の上部および下部構造の変位・変形に対しては、橋梁全体として変形上も支承が無いことを確かめることとしている。

(田村浩一・記)

6. 本州四国連絡橋の技術的可能性と問題点

第 1 次報告書においては、架橋の技術的可能性に関する主な検討の対象をもっともきびしい条件における中央径間長 1500 m 級の吊橋および大形の海中基礎におき、技術的可能性を左右する問題の所在を明らかにし、より経済的、合理的な建設計画を樹立するため、解明すべき問題点を指摘している。以下報告書に述べられた要旨を報告する。

(1) 本州四国連絡橋の技術的可能性

中央支間長 1500 m 級の吊橋の上部構造の建設は技術的に可能であると考えられ、約 50 m の水深で大きな潮流のもとでの深い海中基礎の建設は、今後の調査検討により、技術的に可能な方法を見出しうるものと考えられる。つぎに個々の問題について述べる。

a) 上部構造に関する技術的可能性

材料については、ケーブル素線の試作試験、HT 70/80 までの鋼材の特性調査が一応完了した段階にあり、実施までには生産および使用の実績を積むことにより、さらに信頼すべき資料の集積が期待されるので、ほぼ国産の材料で建設が可能と考えられる。

設計については、設計指針に示された設計震度および風圧に対して十分設計できるものと推定され、また 2 ヒンジ補剛トラス吊橋形式の場合、耐風安定性の面でもほぼ満足できる構造が得られるものと推定される。道路・鉄道併用橋については、鉄道車両の走行が吊橋におよぼす影響ならびに、吊橋の挙動が鉄道車両運動におよぼす影響が主な問題と考えられるが、解決の方策が得られるものと推定される。したがって、設計上もっとも問題の大きい耐震性、耐風性および道路・鉄道併用橋の問題を含めて設計が可能であると考えられる。

製作については、国内メーカーにおいて十分可能な範囲と考えられ、架設については吊橋の平行線ケーブルの架設が未経験であり、架設時の強風に対する対策に問題

があるが、今後の検討が進めば技術的に十分可能と考えられる。

b) 基礎に関する技術的可能性

基礎の構造・寸法を支配するもっとも大きな要因は、基礎自身に作用する地震力である。今後解明さるべき問題点が残されているが、おおむね設計しうる範囲にあるものと推定され、設計面において技術的可能性を大きく左右するほどの問題はなからうと考えられる。

施工の問題は自然条件の支配的影響を受け、施工方法いかに経済性を大きく左右する。対象となる自然条件は他の国に比してきびしく、自然条件に関するより詳細な調査と施工方法に関する綿密な検討を必要とするのが現状であり、大形の海中基礎施工の技術的可能性を論ずることは時期尚早である。しかしながら、海上ボーリング作業の現況、現在までの試算結果、過去の施工例などから考えれば、今後の調査検討によって具体的な施工方法を見出しうるものと考えられる。

(2) 今後の問題点

本州四国連絡橋のより経済的、合理的な建設計画を樹立するために解明すべき問題点を列挙すれば、つぎのとおりである。

a) 道路・鉄道併用橋に関する問題点

① 鉄道車両が吊橋におよぼす影響、すなわち鉄道荷重による吊橋の変形と動的効果の問題

② 吊橋の挙動が車両運動におよぼす影響、すなわち車両走行の安全性および乗客の乗心地の問題

b) 外力の明確な把握

① 架橋地点における風の特性、特に海峡部における風の収束など

② 架橋地点における地震の特性、特に強震記録の収集解析および深層と表層との地震動特性の関係

③ 風が誘起する外力の評価、すなわち風が構造物におよぼす空気力の問題

④ 地震動が誘起する外力の評価、すなわち動水圧、動土圧特に土粒子中の間げき水の挙動の問題

c) 地盤の工学的性質の把握

① 設計に用いる地盤の支持力、せん断強さ、弾性係数、地盤係数などの決定のための現位置試験方法の開発、室内実験と現位置試験との結びつけ、試験結果の実構造物への適用方法などの問題、ならびに地震時における構造物とその周囲の土の挙動、地盤係数、減衰定数、鉛直支持力、受働土圧、地盤の横抵抗などの問題

② 海底断層の配置、性状など

③ 水深が大きく、潮流、波浪の影響をばげしくうける海上での安全、確実、迅速かつ大量のボーリング作業を行なうための移動性の高い堅固な海上足場の開発、な

らびに砂礫あるいははもろい軟岩に対する有効確実なサンプリング方法の開発

d) 構造物の動的性状の究明

地盤の性質、構造物の形式、部材の接合方法などを考慮した構造物の固有周期、減衰常数などの動的特性、構造減衰を増加させて振動を抑制する方法の検討、特に吊橋の動的応答および動的安定性ならびにマシブな構造物の地震時の挙動、高さ方向の震度分布をなどの問題

e) 構造物に付与すべき安全度と設計における規定の方法、特に構造形式、構造部分、荷重の組合わせ、材料の種類、設計法に応じたより合理的な規定の方法

f) 上部構造に関する問題点

① 材料；鋼材の具備すべき条件を明らかにすること、とくに高応力のくり返しに対する疲れ強さの問題および、この条件を備えた大量の鋼材を定められた期間に確実に入手しうるかどうかの問題

② 設計；吊橋に必要な耐風安定性を保ちながら死荷重を軽減する方法、たわみ、勾配変化などの制限とその必要性、暴風時における吊橋補剛トラスの変化、変形を考慮した設計法、地震時における基礎地盤の変形を考慮した構造物の挙動の把握と設計法、カンチレバートラス橋、連続トラス橋、アーチ橋などの適用支間の限界、道路単独橋における複橋床構造の経済性、高強度鋼の部材接合法

③ 施工；架設地点の自然条件、船舶航行などの条件を考慮した各種構造形式の具体的な架設法、高強度鋼を用いた部材の製作

g) 基礎の設計に関する問題点

① 耐震設計

② 施工時の荷重

③ 吊橋アンカレッジの設計、特に荷重条件、変位などのほか施工条件を考慮した安定に対する合理的な設計

h) 基礎の施工に関する問題点

① 潮流、波浪、風などの大きな影響のもとでの巨大なケーソンの曳航、沈設

② 海底掘削法、特に水深の大きな場所における大量の掘削土量の処理、硬質地盤の経済的な掘削

③ 水中コンクリートの施工、特に打設能力の向上、硬化熱の処理、水中打継目の設計・施工、材料の分離防止

④ 大潮時の潮流、台風時の風、波浪および潮流、季節風ならびに霧などの自然条件の把握と、これらに対応した工程計画

⑤ 航行の安全を確保して工事を行なうための航行規制および安全施設

⑥ 施工体制

あとがき

建設省および日本鉄道建設公団は、この委員会の審議成果を基礎として近く本州四国連絡橋の計画段階における調査をとりまとめることとされており、この委員会も引続きこの調査が完了するまで存置されることとなっているので、今後の問題点に対する検討が加えられ、着実な解明がはかられるものと期待される。またこの委員会の成果は単に長大橋に関する技術のみでなく、わが国土木技術水準の向上に大きな貢献を果たすことを信じて疑わない。

(とりまとめ・山根 孟、杉田秀夫、田尻文宏)

昭和 39 年度土木学会賞に輝く

若戸橋調査報告書・同工事報告書

日本道路公団編・土木学会発行

夢のかけ橋の話題が現実一步ちかづいたのは、若戸橋の貴重な経験があるからです。東洋一の規模を誇る若戸大橋は、昭和 13 年に内務省下関土木出張所によって調査が行なわれ、戦争により中断したが、昭和 30 年 10 月建設省によって調査が再開された。そして昭和 31 年 4 月の日本道路公団の設立と同時に、調査は建設省から公団にひきつがれ、32 年度一杯まで地形測量、ボーリング地質調査、経済調査、港湾調査、吊橋の静的模型実験、風洞試験、耐震試験、鋼材鋼索試験、アンカーブロック光弾性試験等が行なわれ、つづいて基礎大型ケーソン施工、吊橋主塔の架設、ケーブル用ロープの製作と架設等の工事が実施され、37 年 9 月に完成したものである。

本書は、この調査の段階から完成に至るまでのすべて事項を詳細に記述するとともに図面として世界の長大橋の比較例などもそう入されていますので単に工事報告書としてだけでなく、今後の参考としてぜひご購入下さい。

体裁：B5判 調査報告書 920 ページ } 合本・豪華製本・限定出版のため残部僅少。再版不能です。
工事報告書 1248 ページ }

定価：30 000 円（送料共）