

# 本州四国連絡橋・耐震に関する研究

鋼構造委員会 本州四国連絡橋耐震研究小委員会

## 1. 連絡橋の耐震研究の経緯

本州四国連絡橋の耐震設計に関しては、土木学会においても昭和 37 年 1 月以来 5 か年有余にわたって、委員会（委員長 岡本舜三教授）で研究審議し、昭和 42 年 7 月に研究報告書にまとめて出版した。ただし、最終報告においても、耐震設計の合理化の必要性が強調されているほか、構造物への入力震動の表現にも少しくあいまいな点もあり、かつ地盤と下部構造との動的特性の考え方も煮つまりにくかった点のあったことは否めない。そこで、昭和 45 年 5 月には、以上の諸問題のうち、「地震動」と「地盤と下部構造の動的特性」に関して再検討の要ありとの意見に対応して、土木学会耐震工学委員会に「本州四国連絡橋耐震合同委員会」を設置し、昭和 42 年度にはまだ取り入れられなかった研究成果を利用しつつ「地震動」と「地盤と下部構造の動的特性」の研究を行なうことにした。合同研究会としたのは、この委員会は耐震工学委員会のみでなく、連絡橋に関係ある日本道路公団、日本鉄道建設公団および本州四国連絡橋公団（昭和 45 年 7 月発足）の関係部局員およびにその他の有識者が本研究会に参加したためである。本研究会は昭和 46 年 6 月に報告書をまとめ、本州四国連絡橋に考慮すべき地震動は地震の規模、震央距離、地震からの深さによる振動の減衰などを考慮し 180 gal とすること、また剛体基礎、たわみ性基礎などの差によって、構造物の減衰常数を変化せしめること、前者の減衰常数を 10%、後者のそれを 2~5% とすることなどを決め、研究成果の概要としてとりまとめた。

このような過去の経緯をふまえて、実施作業の迫ってきた本州四国連絡橋の耐震設計は、計画設計の煮つまりと平行して、耐震設計の改訂ならびに未詳部分の再検討が迫られ、本州四国連絡橋公団は昭和 46 年 6 月に土木学会に連絡橋の耐震設計の調査研究を委託した。学会は調査研究機関として、「本州四国連絡橋耐震研究小委員会」を発足させた。

本小委員会は具体的には次に述べるテーマを主たる研究対象とし、約 3 か年間で研究成果をとりまとめ、昭和 42 年の耐震設計指針の増補・改訂をめざすことにした。

### (1) 地震入力の問題の解明

震央距離の近い地震については、今までの調査研究ではまだ十分には明らかにされていないので、この近距離地震の特性の研究を行なうこと、スパンの大きい連絡橋の諸構造物の固有周期は、今までの土木構造物の固有周期に比してかなり長くなるので、長周期地震の周期、位相差、振幅の研究と観測方法を確立させること、および構造物への地震入力の大きさを決める条件を解明することが必要である。

### (2) 地盤と下部構造の動的特性に関連する問題の解明

一般に、地盤中の構造物は両者の相互作用によって振動周期、減衰特性などが決定される。これらは構造物基礎の動的設計を行なうときに重要な問題であるが、この土と基礎との相互作用の研究は生れてまだ日が浅いうえに、連絡橋の基礎は過去の経験・データの乏しい構造であり、かつ基礎の上部は必ずしも硬い岩のみとは限らないなどの条件があり、基礎の振動特性の解明ならびに耐震計算手法の検討が必要である。さらに、新しい基礎形式で過去に十分な討議がなされていなかった多柱基礎についても詳細に検討しなければならないと考えている。

### (3) 吊橋、トラス橋など支間 200 m を越える橋の耐震設計法のまとめ

昭和 42 年度の報告書では、主として吊橋が研究対象に選ばれたので、長大アーチ橋などは詳細には報告されていなかった。しかし、実施設計が近づくにつれてこの種の構造の出現が予想されるようになってきたこと、あるいは高橋脚をもつ連続桁、あるいは単純桁の連続構造も予想されてきたので、吊橋も含めて、アーチ橋、高橋脚橋、PC 長大橋などの耐震設計手法を研究確立する必要がある。

以上の 3 つのテーマは簡単に表現すると地震入力、下部構造および上部構造の耐震設計ということになり、相互に関連しあうテーマであることはいうまでもない。

## 2. 研究対象と研究方法

上述の3つのテーマを調査研究していくために、小委員会の研究組織として、それぞれのテーマに対応して、3つの作業部会を設け、テーマ順に第1、第2、第3グループと名づけ、主査として、第1は伯野元彦助教授(東大地震研)、第2は後藤尚男教授(京大工学部)、第3は栗林栄一室長(建設省土研)に依頼することにした。作業部会のメンバーは一、二の例外を除いて小委員会の委員があたり、委員のなかには複数の作業部会のメンバーを兼ねる人も幾人かいる。

小委員会の運営は、作業部会の設置により、作業部会の作業と小委員会の作業との二本立てで行なわれ、作業部会は原則として隔月に開催し、研究テーマの調査解析を行ない、次の月の小委員会で作業部会の研究成果を全員で検討したり、作業方針の決定を行なうことにした。これを要するに作業部会と小委員会とは表裏一体として作業が進められるように企画し運営された。昭和46年6月から翌年3月までの間に、小委員会は5回、第1、第2、第3グループはそれぞれ9、6、5回の作業部会をもった。このほか、茨城県筑波の国立科学技術防災センターの大型振動台によるケーソン基礎および多柱基礎の実験の見学会を開催した。

小委員会の活動目標は、本州四国連絡橋に適用されるように進歩した。また、よりすぐれた世界的な耐震設計指針の作成を最終目標にしていることはいうまでもないが、短い年月の間に高度、かつむずかしい問題をすべて解明しつくすことは至難なことであるので、初年度では指針の合理化に最も関連ある問題を対象とし、可能な限り厳密に調査研究し、また討議を繰り返し、解析結果の一般化が可能になるように心がけた。

本年度の研究課題として、各グループの取り上げたものは、第1グループでは、近距離地震の震害の特性、設計に用いるべき地震の最大加速度、第2グループでは、井筒ケーソン基礎の実験結果ならびに計算モデルとその問題点、多柱基礎の実験結果の検討、第3グループでは長大トラス橋の耐震設計手法の開発、高橋脚の動的解析計算例の検討、アーチ橋、PC橋の耐震性の問題点などであった。

## 3. 第1グループの研究成果

本州四国連絡橋に影響を及ぼす地震として、震央距離は最短距離で150 km あるが地震規模の大きい( $M=8$ )地震と、震央距離は近いが地震規模はそれほど大きくない( $M=7$ )地震との2種類のもの、昭和42年の報告

書にすでに明らかにされている。また、一般土木構造物では、 $M=6$ 以下の地震の場合は震央距離が0(地震の直上にある場合)でも震害が発生しないことが過去の震害の統計調査から明らかにされている。しかし、 $M=7$ ぐらいの規模の地震の震害と震央距離との関係はあまり明瞭でなかった。そこで、近距離の地震で $M=7$ 程度の地震11件を選び、構造別、距離別の震害を調べた。

選んだ地震は静岡地震( $M=6.3 \cdot 1935$ 年)、河内大和地震( $M=6.4 \cdot 1936$ 年)、男鹿半島地震( $M=7.0 \cdot 1939$ 年)、鳥取地震( $M=7.4 \cdot 1934$ 年)、三河地震( $M=7.1 \cdot 1945$ 年)、和歌山県中部地震( $M=7.0 \cdot 1948$ 年)、福井地震( $M=7.3 \cdot 1948$ 年)、今市地震( $M=6.7 \cdot 1949$ 年)、北美濃地震( $M=7.0 \cdot 1961$ 年)、宮城県北部地震( $M=6.5 \cdot 1962$ 年)、えびの地震( $M=6.1 \cdot 1968$ 年)の計11件であり、いずれも $M=7$ 前後で、内陸か陸地に近いところに震源があり、震害記録がよく残っているものである。

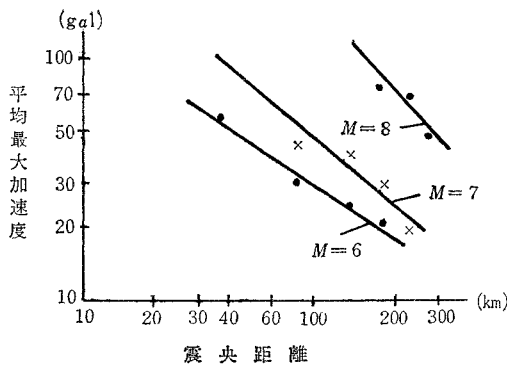
震害を適切に評価するため、震害等級を決め、0(無被害)、1(軽微なもの)、2(中程度のもの)、3(重大な震害または震害度の多い場合)とし、構造物として、地盤、河川、道路および鉄道、および橋梁とし、震央距離は10 km以内、10~20 km、20 km以上の3段階に分けて調査した。

調査結果では $M=7$ 程度の地震では半径10 km以内がひどい被害を受け、10~20 kmでは中程度の被害、20 km以上では墓石とか土関係に多少の被害がでる程度になっていることがわかった。また、ここでいう震源は、気象庁の発表の震源位置では被害分布がうまく説明できない地震もあったので、被害中心を震源と考えて整理した。このことは地震学的にみても肯定されることで、震源とは単に岩の破壊の始まる場所であって、その後いかなる方向に岩の破壊が進展するかによって震害の分布も異なってきて、必ずしも震源を中心とする同心円的には分布しないわけであり、とくに震央距離に近いところの震害を調べるときに震源の取り方が重要な問題になる。

橋梁の震害の特徴としては、木橋を除いた場合に震害を受け易いのは橋台、橋脚、支柱、基礎工、上部構造の順であるように推察した。

設計に用いるべき地震動の最大加速度については、十分な調査が終了したわけではないが、ある地点での平均最大加速度と、震央距離およびマグニチュードの関係を46件の地震でとれた656地点の強震記録を利用して整理すると図のような結果となることが明らかにされた。

昭和42年度および46年度報告書に記載されている、 $M=7$ の近距離地震と $M=8$ の遠距離地震の加速度値が科学的に説明されるようになり、 $M=8$ で震央距離150 kmの地震は100年に1~2回発生することが予測



(46 地震の集計による)

平均最大加速度と震央距離、マグニチュードとの関係

され、最大加速度が 175 gal を越える確率は 10% であるが、 $M=7$  で震央距離 50 km の地震は 100 年に 3~4 回発生し、最大加速度が 175 gal を越える確率は約 5% であることになる。

近距離の中規模地震では震害が発生するのが震央距離が 20 km 以内であるから、震央距離を縮めると連絡橋に震害が発生するであろう地震の発生確率は低下するがそのときは大きい加速度を考えねばならなくなる。この点は、来年度に詳細に研究されるべき問題であろう。

#### 4. 第 2 グループの研究成果

井筒またはケーソン基礎の動的特性の調査研究は、佐倉の小型井筒および関門の実大橋脚基礎の振動実験結果の検討の形で進められた。前者は軟い地盤、後者は硬い岩盤中の基礎であり、振幅の大きさも前者はかなり大きいのに反し、後者は微小振動であるなど両者に共通点が認めにくく、さらに解析方法も前者がバネ-マス系、後者は有限要素法を用い連続体としている点などの相違が指摘される。ケーソン基礎の動的特性解明のための統一的手法を決めるまでには至らなかったが、この問題についての研究のポテンシャルは大いにあげることができ次年度以降の主要テーマの 1 つである多柱基礎とケーソン基礎との比較まで発展するものになっていると考えられる。

多柱基礎についても、筑波の振動台による実験、土研の実験、1/20 模型の実験、東洋大学における実験などが詳細に検討された。多柱基礎には解明されなければならない問題があること、その研究方法が討議されたが、最終的結論を得るには至らなかった。以下に、6 件の採択された実験結果の検討の主要点を列記する。

国鉄佐倉の井筒実験は、小型ケーソンの動的性状を検討した結果、井筒は剛体、地盤は線形バネ、減衰常数は 20%、付加質量は外径の 2 倍程度の土の質量を考えると、

ロッキング振動の実験結果を説明できるが、なお若干の検討すべき問題が残っていることがわかった。関門橋の橋脚の振動実験により大型ケーソン基礎の振動について討議したが、隣接構造の構造物の影響が大きく、ケーソン基礎自身は剛体とみなしてさしつかえないとの結論を得た。

大型振動台を用いてケーソンおよび多柱基礎の 1/100 模型で詳細な振動実験が行なわれたので、この結果から地盤をゴム材料で模型化することの妥当性と、設計計算に用いる計算式の精度の確認の可能性が、明らかにされた。しかし、今回の実験では、多柱基礎に比して、ケーソン基礎の剛度が高い結果を得たが、これについてはさらに調査することにした。

土研構内で  $\phi 500$  の杭 9 本 (地上長さは 2.2 m, 地中長さは 14.85 m) の多柱基礎をつくり、静的載荷試験、自由振動試験、強制振動試験を行なった。この実験では前列の杭の分担率は中央列の後列のそれより高いことが判明したが、実構造物に実験結果を適用するときには、相関性や相似性が明らかにされなければならない点が指摘された。振動周期を求めるために静的バネの値を用いるべきか否かについては、さらに検討の要があるとの意見があった。この構造物の減衰常数は 8% であった。

東洋大学で行なわれた多柱基礎に関する実験では、地上 1 m 地下 4.5 m の模型の構造で、静的載荷試験、自由振動試験、強制振動試験が前述の実験同様に行なわれた。静的バネの動的解析については土研と同様の結果であり、付加質量が鍵となっている。減衰常数は 3~5% であった。杭径は 30  $\phi$  と 20  $\phi$  である。

多柱基礎の荷重分担については、鋼製モデルを用いて鉛直載荷、両者の組合せ載荷およびねじり載荷の各試験を行なったが、実験結果の解析をまっけて、さらに検討することにした。その他、杭の水平抵抗に及ぼす杭間隔の影響があるが、連絡橋の多柱基礎にこの理論を適用するには、今後さらに条件を広げた場合の実験結果との比較が必要であるとの結論を得た。

以上 7 件の研究結果の検討を詳細に行なったが、相互に共通的なものと相反するものがあり、いずれも重視しながら、再検討を加えるとともに、必要によってはその後の実験的研究の報告結果などを参考にしながら、地盤と下部構造のモデル化、応答解析と耐震設計との結びつきなどについて、考察を進めていく予定である。

#### 5. 第 3 グループの研究成果

第 3 グループとしては、本年度は主として、長径間トラス橋の耐震設計と高い橋脚をもつ橋の耐震設計法について討議を進め一応の成果を得た。また、アーチ橋、吊

橋、PC橋などの耐震設計については予備的な検討を進め、文献資料などを調査し、問題点を指摘するにとどめた。以下に少しく詳細に研究成果を述べる。

長大トラス橋の耐震設計の手法については、大阪の南港橋の設計の手法が研究の対象になり、十分な討議の結果は南港橋方式が現在最も推しようされる方式であるとの結論を得た。この方式では、まず橋を多質点系に置換し、振動モード、振動周期を求め、定着径間、吊径間および塔部で応答に最も関与するモードを明らかにし、修正震度法の考え方を用いて静的地震荷重を決め、静的計算により部材力を精査する手法である。この手法で問題とされるところは、この方法が弾性計算を基本にしていること、振動モードなどの解析がかなり面倒であることが指摘された。また、振幅が大きくなってきたときの部材の座屈など細部の検討の必要性も強調された。

高い橋脚の耐震設計の手法については、道路協会指針、土木学会指針ならびに日本道路公団指針が比較検討されさらに広島大橋（下部構造の全長が75.7m、全長1020m）および浦戸大橋（中央スパン230m、全長600mのデビダーク橋）の動的解析結果と静的解析結果とを比較した。その結果、弾性応答の計算結果のみではなく、さらに非弾性応答に考察を進める必要があるが、道路協会の指針は、それほど大きな誤差は生じないであろうとの結論を得た。

アーチ橋については、ねじれ振動の評価、振動による

座屈の検討が必要とされると考えられるが、過去の震害経験にかんがみ、耐震性の高い構造形式といえようし、次年度に本格的調査研究を行なう予定である。

吊橋主塔については、昭和42年指針と昭和46年度研究概要との相違点が検討され、結論として塔と基礎とを一体として多質点系で置換する方法が推しようされたが地盤のバネ常数などは第2グループの成果を利用することとした。

## 6. あとがき

46年度は、上述の報告のように連絡橋の耐震研究の問題を提起し、できるだけ詳細にかつ厳密に分析し、新しい研究成果をくみ上げるべく努力してきた。そのため、耐震設計指針の増補改訂の作業が47年度以降になっている感がある。しかし、実体は指針改訂の線にそって調査研究が進んでいるので、表面的な指針の改訂作業はないかのごとく見られるが、長径間トラス橋の耐震設計の手法、近距離地震の考え方など、指針にすぐ取り入れられるまでに進んだ部分もあり、進展途上の問題も逐次、指針の形にいつでもなりうるように小委員会は運営されるものと思われる。

最後に熱心に討議に参加し、調査研究を推進して下さった委員・幹事の諸兄に深甚の謝意を表して、本報告を終わりたいと思う。  
(委員長/執筆・久保慶三郎)

# 橋 1970-1971

定価 1700 円 (〒170) 一括の場合、送料は安くなります。

A4判 102 頁・一部カラー刷・特上クロース製

土木学会田中賞受賞作品および応募作品を中心にとりまとめられた上記図書がこのたび刊行の運びとなりました。通巻5冊目です。本書は、その内容の一つにその年に完成した主要橋梁一覧を掲載しておりますが、橋梁工学のすう勢を知る上での最適な資料かと思えます。また、展望記事には図・写真を入れ、橋梁の設計をする上の参考ともなるかと考えられます。

### ● 本号の内容 ●

横断歩道橋/1970 年度田中賞作品部門受賞作品・神戸大橋・加古川橋梁・富士川水管橋/鋼橋 1970 年の展望・荒川大橋・豊里大橋・笠戸大橋・新築井大橋・三頭橋・丸山大橋・芝浦橋・天王寺駅構内跨線道路橋・原口架道橋・アルミニウム合金歩道橋・油圧降下装置付手延架設機/コンクリート橋 1970 年の展望・上関大橋・多摩川橋梁・吉井川橋梁・神島大橋・丹沢橋梁・万国博覧会東ゲート橋・万国博覧会9号歩道橋・東関東自動車道の高架橋および跨高速道路橋/1970 年竣工主要橋梁一覧/橋梁建設における省力化/選考経過報告

