

# 道路橋の耐震設計

京都大学教授 山田 善一

## 1. まえがき

1989年10月17日米国ロマプリータ地震における高速道路の被害は、われわれに高速道路における地震の恐ろしさをまざまざと教えてくれた。わが国で同じような地震があった時にはどうであろうか？わが国では事情が異なると答えたいところだが、実際のところわが国の大都市での高速道路での経験がまったくない現状で、確信を持って答えることは出来ない。

設計という作業は、思いついたあるものに、具体的な形を与え、その着想の正しさを確認する事とされている。耐震設計は、構造物の設計の中で、特に耐震性の与え方とその検証を指す。しかし、大きい地震が起こる機会、何十年に1回あるいは全く地震に見舞われない構造物もあり、このような状況のもとでは検証の機会が極めて少ない。耐震性の解析や、実験である程度の検証は可能としても、最終的には実地震によらねばならないから、地震被害調査はこの点から非常に重要である。

構造物の耐震性に関して科学的な考察が行われるようになったのは、わが国では1891年濃尾地震以後であり、約100年が経過した。しかし大きい地震がある度に新しい形の震害を経験し、今後どのような被害が発生するかについてはある程度の予測は可能であっても、地震は常にわれわれの盲点を突いてくる。耐震設計のむづかしさもこの点にある。

阪神高速道路公団は、平成4年創立30年を迎えた。この間技術審議会委員、耐震設計小委員会委員、各個の長大橋の技術委員会委員などとして、公団の構造物の耐震設計にかかわることができ貴重な経験をする事ができた。30年前の公団創立のころは、丁度わが国でコンピューターが使われ始めた時代であり、コンピューターの利用を含めてこの間耐震工学は著しい進歩を遂げた。以下公団でのいくつかの事例を含めて、道路橋の耐震設計について考えてみたい。

## 2. 道路橋の耐震設計の歴史の変遷

わが国の道路橋の設計示方書に類するものが初めて出されたのは、1886年内務省令第13号である。勿論自動車のない時代であり、耐震設計に関する規定も

まったくない。1891年濃尾地震を境として、わが国の耐震工学の研究が始まり、1919年佐野利器により設計震度の考え方が示されてから、設計震度による耐震設計手法が継承されてきた。1923年関東大地震ののち1926年内務省道路法で初めて道路橋設計のための設計震度（0.15～0.4）が示された。1931年末広恭二のASC Eでの講演で米国では1932年から強震観測が始まり、1933年ロングビーチ地震で初の強震記録がとられている。その頃米国では、地震の危険度の高いところで、設計震度0.02(Riley Act) がとられている。米国の設計震度が最近まで低い値に抑えられてきたのは、この辺りに源を発するのかもしれない。1936年オークランド・ベイ橋が、1937年ゴールデンゲイト橋が完成したが、いずれも設計震度を主体とした耐震設計が行われ、それぞれ 0.1, 0.075が採用されている。米国の値としては大きいがいずれも日本の建築物の耐震設計を参考に決められたものである<sup>11)</sup>。1939年内務省道路橋示方書が初めて示方書の名で出され、震度（水平0.2鉛直0.1）が与えられた。1940年には有名なエルセントロ地震記録がとられている。1945年第二次世界大戦が終わるまでは、わが国はその主力を戦争に向けており、耐震工学はまったく空白の時代である。

1944年東南海地震、1946年南海地震と何れもM8クラスのプレート性巨大地震が発生した。1948年福井地震は、わが国の耐震工学の研究を推進する契機となった。ようやく強震計の必要性が認識され、1952年S M A Cによる強震観測体制がスタートした。世界的にも、1956年サンフランシスコ地震50年を記念して、世界地震工学会議（W C E E）がサンフランシスコで行われ、2回のわが国での開催を含めて<sup>12)</sup>、1992年の第10回マドリッドでの会議まで、この会議は世界の地震工学の発展に寄与してきた。1956年には戦後初めて鋼道路橋示方書が作られたが、この中では福井地震の震害を参考として、最大0.35の震度が与えられた。戦後10年間は形式的には1939年の示方書がそのまま適用されたことになっているが実はこの間は占領軍G H Qにより橋梁の設計が管理されており、AASHO示方書に近い設計が行われていた<sup>13)</sup>。戦前の示方書がドイツ式なのに比べ、1956年示方書以降現在まで荷重体系を中心として、米国式になったのは、このような理由による。

電子計算機が実用化されたのは、米国では1950年代、わが国では1960年代である。1960年日本で行われた第2回世界地震工学会議は、発表件数は70数件と現在の1000件を越える数に比べ少ないが、地震工学にコンピュータをとり入れた研究が発表された最初の国際地震工学会議であり、これから現在まで、耐震工学にコンピュータが果たした役割は極めて大きいものがある。

1964年、新幹線の開業、高速道路のスタート、東京オリンピックと共に、新潟地震がおり、地盤の液状化が耐震設計上極めて重要な課題としてとり上げられるようになった。またこの地震以後、橋梁における落橋を防ぐことの重要性が見直された。この年米国ではアラスカ地震があり、地滑りの形で、地震による地盤災害が注目された。この年に出された AASHO 示方書<sup>14)</sup>で初めて設計震度がとり上げられ、0.02~0.06が採用された。この年はまたわが国で超高層建築が初めて建設された年でもある。また同年には鋼道路橋設計示方書が改訂されたが、設計震度はそのまま残された。

1971年米国ロスアンゼルス近郊でサンフェルナンド地震があり、高速道路を中心として、落橋を含めてかなりの被害がおこった。小さい震度の米国の示方書は初めて見直されることとなり、1973年カリフォルニア道路橋耐震規定が決められほとんどそのままの形で、1975年 AASHTO 示方書にとり入れられた<sup>15)</sup>。サンフェルナンド地震では、ライフライン系の震害が初めて総合的にとり上げられ、道路網もその一環として重要性が認識された。1971年にはわが国の道路橋示方書の改訂が行われ、前の示方書の最大 0.35の震度は、0.2を中心とした値に変えられた。このような改訂のひとつの理由は先の震度が余りにも大きく、実際の設計結果が経済的に成り立たなくなったためで、同様のことが鉄道橋でも行われている。1971年示方書から初めて動的な考え方が、耐震設計にもとり入れられるようになり、修正震度法が初めて採用されたほか、さきの新潟地震の教訓から、落橋に対する構造詳細が示された。

1977年には建設省ではいわゆる新耐震設計法が総プロの成果として出され2段階設計が建築、土木共にとり入れられることとなった。1978年には宮城県沖地震があり、道路橋にもかなりの被害があったが、新耐震設計法にこの震害を考慮して新しい示方書が1980年作られた。この中には、2段階設計として変形性能の照査がとり入れられている。米国でも、1981年 A T C 6 ができ1983年 AASHTO 示方書にとり入れられた。1982年新耐震設計法の主旨をとり入れた建築基準法が新しく決められた。1985年にはメキシコ地震、1989年にはロマプリーエータ地震がおり、地震工学上貴重な教訓を与えてくれた。わが国では、1990年道路橋の示方書が改訂された。

1980年以降のわが国の道路橋示方書では、2段階設計の後段として、鉄筋コンクリート橋脚に対し変形性能の照査を行うこととしている。鋼橋脚に対しては、照査の規定が示されていない<sup>16)</sup>。実際鋼構造では、軸力に対し座屈現象が起り、変形性能が十分とは考えられない点が指摘されている。筆者は土木学会鋼

構造委員会の中に研究小委員会を作り、この点の検討を進めているが、その後多くの研究者の関心を集め、各所で問題の解決に向けて集中的な研究が進められている。

### 3. 道路橋の耐震設計の諸問題

関東大地震後わが国の道路橋は多くの震害を経験した。しかし戦前はわが国の長距離輸送の中心が鉄道と海運によっていたので、道路の被害はそれほど重要視されなかった。1948年福井地震以降特に橋梁の震害が大きくなり上げられるようになった。1960年代になり、コンピューターを使った解析手法が飛躍的な進歩を遂げ、耐震工学上の多くの課題が解決されてきた。以下そのうちの幾つかについて述べる。

#### 3.1 地盤－構造物系の解析

1960年代、有限要素法などの解析手法の発展により、計算機の応用が容易に行われるようになり、地盤・構造物を含めた系の解析が著しく進歩した。このような解析結果を参考として、基礎と地盤の相互作用をバネで近似し比較的容易に地盤の影響をとり入れた設計が可能になってきた。長大橋梁にあっては、それぞれの橋梁の地盤条件をとり入れた解析と耐震設計が行われるようになった。これらについては後述する。

#### 3.2 非線形構造解析の応用

耐震設計の2段階設計の後段すなわち巨大地震にたいする構造物の応答特性を把握するためには、地震の動的作用に対する構造物の非線形応答特性がわかっていなければならない。実際の地震に対する被害の様子や、大型の模型による破壊実験などが、参考となるが、複雑な構造物の模型を作るのは容易ではない。また解析だけでこれを求めるには、ヒステリシス特性の与え方に極めて難しい問題がある。最近ハイブリッド解析の応用により、比較的容易に応答を求めることが可能になりつつある。筆者が行っているハイブリッド解析の装置を、写真1、2に示す。これは鋼構造の地震に対する極限性状を求め、地震応答を評価するための実験である。

#### 3.3 免震、制振装置の道路橋への応用

橋梁の支承に各種の免震ゴムを用いた免震支承は、橋梁の固有振動周期を長くし、地震力を軽減できるほか、ゴムの持つ減衰性能を耐震上利用することができ、今後その利用が多くなるものと考えられる。また温度変化による支点の移動を分散でき、騒音対策上悪い影響のあるジョイントを少なくし、超多径間

連続橋を可能にする点でも有効である。現在、鉛プラグ入りゴム支承 (LRB) , 高減衰ゴム支承 (HDR) , 滑りによる摩擦と減衰ゴムの併用型支承 (SRB) などが用いられている。この種の支承は最初ニュージーランドで開発され、十数年前から実用に供されている<sup>(7)</sup>。筆者の研究室では、ゴム支承に対するハイブリッド実験により、ゴム免震支承をもつ橋梁の地震応答を求める研究を進めて

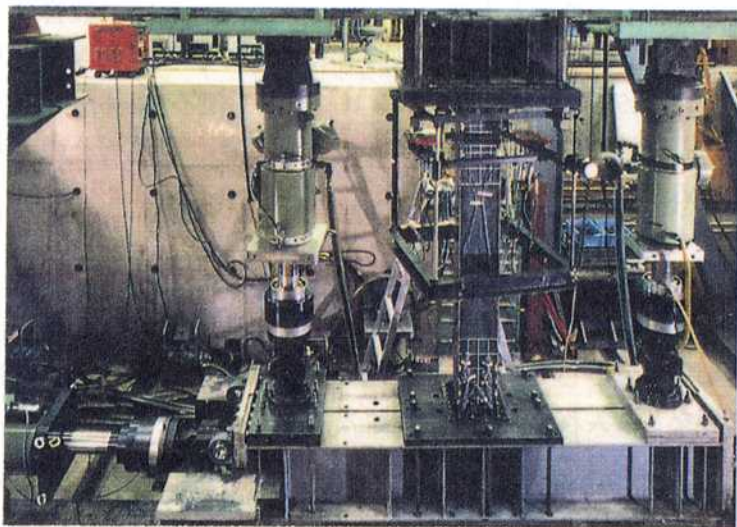


写真-1 3基のアクチュエーターと載荷システム



写真-2 計算機と制御装置

いる。ゴムの高減衰性を利用した免震のほかに、最近各種の制振装置が、建築物や、橋梁に応用されるようになった。この際パッシブ制振、アクティブ制振があり、それぞれ特徴があることが知られているが、パッシブ、アクティブを組み合わせたハイブリッド制振の将来性も期待されている。阪神高速道路公団でもすでに東神戸大橋の塔の建設中での制振にパッシブ制振装置が用いられ、本州四国連絡橋公団でも明石海峡大橋の塔などに応用が考えられている。

#### 4. 長大橋の耐震設計

阪神高速道路公団では、昭和49年供用を開始した港大橋を初め、斜張橋では大和川橋梁、天保山大橋、東神戸大橋、新猪名川大橋など多くの長大橋を建設してきた。これらの長大橋の耐震設計は、それぞれの橋梁に適した方法がとられており、ここ30年間における耐震工学の進歩と共に、常に新しい手法が適用されている。以下簡単に振り返ってみたい。

##### (1) 港大橋

港大橋はわが国で最初に超高張力鋼を用いた長大スパンのトラス橋であり、本橋の耐震設計も超高張力鋼の適用で初めてバランスのとれたものとなった。さらに本橋では、詳細な固有振動解析と応答スペクトルによる動的解析の適用により、従来の震度法と異なる耐震設計が行われた。このような新しい材料と手法の適用により、耐震設計で断面が決まったトラス部材をほとんどなくすることが可能になった。これが本当の意味での耐震設計であると考えている。ただこの時点では地盤を伝達する地震動を解析的に求めることは行われていない。

##### (2) 大和川橋梁

本公団で初めて造られた斜張橋である。ハープ式ケーブルを持ち、ケーブルの数の少ない斜張橋で、最近のマルチケーブル式から見ると、古典的な斜張橋とも言えるが、建設当時昭和57年にはわが国第一の斜張橋であった。本橋の特長は橋軸方向に対し、橋脚の弱軸方向が24度傾斜し極端な斜橋となっている点である。したがって橋脚を通して入ってくる地震力も斜橋の影響を受け、複雑な応答を示すことになる。本橋では種々の方向の地震に対して検討が行われた。

##### (3) 天保山大橋

本橋の耐震設計から、さきに阪神高速道路公団で特別委員会を設け検討された「阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究 1986」において定められた阪神地域における入力地震動が具体的に用いられるようになり、これに各橋梁の建設地点での地盤を含めたローカルな影響をとり入れた設計用の加速度応答

スペクトルが使われるようになった。本橋ではまた2本のタワーと桁とを固定し、いわゆる2点固定として地震力の分散を図っている。

#### (4) 東神戸大橋

本橋の耐震設計にも、先の特別委員会の成果が用いられ、それに本橋のかなり深いところからの地盤構造を考慮した地震応答スペクトルが設計に用いられている。本橋では更に全支点橋軸方向にフリーという構造をとり、これによって両タワーを支える基礎の寸法を天保山橋梁で採用された2点固定の場合に比べ40×35mから32×35mに縮小することが可能になった。本橋ではまた橋軸方向の減衰を確保するための、ベーン型オイルダンパーを開発し、補剛トラスの両端に設置している。

#### (5) 新猪名川大橋

本橋は阪神高速道路公団最初のPC斜張橋である。本橋の耐震設計にはコンクリート構造に対する2段階設計法がすでに示方書などで示されていることから、本橋に適した地震力に対し、2段階の設計並びに照査が行われた。本橋はまた大和川橋梁と同じ24度の斜角をもった斜張橋で、地震に対し複雑な応答を示す。

### 5. むすび

以上、道路橋の耐震設計と阪神高速道路公団における数橋の長大橋の耐震設計を概略ふり返えた。すでに述べたように道路橋の耐震設計は地震工学の発展と共にここ数十年間にその手法がかなりの変化を遂げ、今後もさらに発展して行くであろう。構造物の非線形領域までを設計にとり入れる2段階設計も、今後このように設計された構造物が実際の大地震に遭遇して初めてその手法の正当性が検証されるものであり、研究の結論はかなり長期間を経た将来まで持ち越される。鋼構造を初めとして、構造物の動的な外力の作用に対する極限性状の研究がまだ不十分な分野では、研究の推進と共に、具体的に設計にとり入れる方法について検討されねばならない。

ヒンジの多い不静定次数の小さい構造物が地震に対し脆弱であることは、ロマプリエータ地震の高速道路の震害を始め、多くの地震で経験されているところであり、構造形式の選択が耐震上極めて重要である。都市内高速道路では空間利用の立場からその構造形式には自ら制約があるが、今後も耐震的な道路網を造るための努力が必要である。

長大橋の耐震設計は特別な実験を行わなくとも、計算機を利用した数値解析

的方法で十分な時代になっている。ただつり橋や斜張橋のタワーは上部構造の重量の殆どすべてを受け持っており、2段階設計を含めて、長大橋の耐震性に関する研究の主題となるものと考えられる。

構造設計、特に耐震設計における設計規準のあり方もまた重要である。いたずらに安全側の設計規準を設定すると、構造物としてアンバランスなものができ上がることもあり得る。特にゴムなどの免震装置が設計の中にとり入れられる場合には、装置の持つ特性が十分生かされるような指針が与えられることが必要であろう。

耐震設計全般を通じて、どのような設計規準が優れているかについても、今後の研究課題として重要である。でき上がった構造物が同じであれば、なるべく簡単な規準と簡単な設計方法が良いと考えられるが、その基準をどこに置くかが問題となる。

最近、耐震工学に関する研究が盛んであり、研究者の数も急激に増えている。全体としての研究のレベルを上げることが今後の課題であろう。

## 註

- 1 この点はオークランド・ベイ橋の耐震設計の報告で述べられている。この場合震度0.1は許容応力の割増しなしで使われるので、割増しを考えるとほぼ0.2に相当する。
- 2 世界地震工学会議はわが国では第2回(1960)、第9回(1988)の2回、何れも東京・京都で行われた。
- 3 筆者が学生のころ(1950)には橋梁工学の講義の中では1939年の示方書が使われ、AASHOの荷重体系もプリントで与えられ講義された。
- 4 この頃のAASHO示方書は4年ごとに改訂されていた。
- 5 この示方書以後は4年のごとの改訂間隔は守られていない。
- 6 1980年示方書の解説では、鋼構造は靱性があり、照査の必要性がない様に述べられていた。新しい示方書では、解説にこのような記述はない。
- 7 筆者が初めてLRBをふくめて、ニュージーランドの免震の資料に接したのは、第10回IABSE大会(東京1976)である。