

橋 と 震 害

久 保 慶 三 郎

§ 1. まえがき 過去数回の大地震によって、橋もかなり被害を受けてきた。関東大地震を契機にして胎動状態にあった耐震設計が示方書に規定され、地震力として水平地震力と垂直地震力とを考え、ともに自重に震度という常数を乗じたものを静力学的に構造物に載せる設計方法が用いられてきた。しかしながら昭和23年の福井地震を境にして、従来全国一率であった震度が地域別の震度が変わってきた。すなわち統計的な見方から過去にほとんど大地震のなかった九州と、しばしば大地震を経験している東京・横浜または名古屋地区等とが、同じ震度では不経済な設計になるので、全国を4地区に分けて震度を別々に規定されるようになってきた。これと同時に構造物の地震時の振動が研究されて、構造物の剛性、高さおよび基礎の状態等によって震度をさらに細分して規定するようになり、また一方構造物の耐震性を動力学的に検討しようとする研究も行なわれ始めた。震度は0.1~0.4のものが使用され、0.4ははなはだまれで、特に重要と考えられた構造物の設計に使用された。設計計算に用いられる水平震度は普通は0.2で、垂直震度は0.1である。しかしながら構造物は垂直方向の荷重に対しては十分の耐力を発揮するが、水平方向の荷重には比較的弱い傾向があるので、構造物の断面・寸法が、地震荷重できまってしまう例も多い。

橋の震害と申しても、いわゆる桁、トラスの部分、換言すれば橋の上部構造の震害と、それより下の下部構造の震害とがあり、前者の震害は転落を除いてはほとんどまれで、施工が非常に悪い鉄筋コンクリート桁に亀裂が生じた例が二三あるのみである。ここで主として解析するのも下部構造である。

しかしながら、震度のみでは震害を説明し論ずることができない。1例で申せば福井地震の際の震源地に近い丸岡で神社の花崗岩製の鳥居が真中から切れて、片方は倒れていたが、残った半分は片足で立っていた。もちろん鳥居の支持はそれほど固定が十分ではなかった。静力学的に言うと非常に小さい水平力で倒れるものと推論される片足の鳥居は極端な例かも知れないが、同一の寸法、高さの橋脚が隣り同志で、一方は亀裂が入り、他は無被害という例はかなりの数の実例が存在する。これらも簡単な理論で申せば同一の被害状況を示さねばならないであろうが、現実には基礎地盤の相違等によって異なった被害が発生する。

それゆえに従来は震度が耐震設計の最も重要な鍵であ

ったが、設計法が静力学から動力学に移行しつつある現状と、震度だけでは説明しにくい被害実例等のために、震度の矛盾が解析され、また基礎地盤、構造物の種別等によって、震度も変化すべきであるとの議論が起こってきた。かくして震度は複雑な要素を含んできて、一般的に震度を規定することは早急に解決できそうにないと思われる。

ここにおいて、古きを温める意味において、もう一度過去の大地震の被害を分析し、耐震設計法の再認識というか、再検討というか、ともかく現在使用されている設計法の矛盾を調査し、被害の実体を把握し、耐震設計法の合理化進歩を計ろうとした。現在までのところ十分に解析が進んだわけではないが、二三の結果について述べる。

§ 2. 橋の震害例 初めに、橋脚、橋台の震害について説明する。前述のごとく、橋の上部構造の震害は数少ないものであるが、福井地震の板垣橋、中角橋、南海地震の四万十橋等のように鉄筋コンクリート桁または鉄桁、トラスが橋脚からはずれて、墜落した例がある。とくに福井市内にあった板垣橋の桁は、桁方向にはずれないで橋と直角方向にずれて、そのうち1本の桁は完全に墜落し、他の一本は半分橋脚上に残っていた。この例は珍しいものである。

また今市地震の場合には、東武鉄道の大谷川橋梁の支点到に被害があった。この桁はドイツ製で、いわゆる耐震工法が施されていないまま使用していたために、トラスの支点的ロッカーが倒れて、トラスは横倒しになったロッカーの上に乗ってしまった。地震の規模も小さかったので、大きい被害にはならなかったが、耐震工法の必要性を痛感させる被害例である。

橋の震害は主として下部構造に発生するものであり、それらの被害としては橋脚の水平亀裂、倒壊、沈下、傾斜、斜めの亀裂、アンカーボルトの切断、折曲、橋台の傾斜、転倒、胸壁の亀裂等である。十分の基礎をもつ橋台では水平亀裂の発生することもしばしばあるが、一般には橋台の被害としては、傾斜、転倒が比較的良好に発生する被害である。アンカーボルトの切断、胸壁の移動等は地震力を推定するのに利用されるが、大きい被害ではない。アンカーボルトは普通は $\phi 19 \sim \phi 25$ であるから、1本のボルトで9t~15t位の耐力をもつ(単剪断)。それゆえにきれた本数から橋台、橋脚の頂部に作用する最大力が推定される。実際の被害例について計算すると40t

～50t という力が作用していることになることがわかり、これは上部構造の自重に水平震度(0.2～0.3)を乗じた値よりはるかに大きいものである。しかしすべての橋梁において常に推定される水平力が上部構造の重量に水平震度を乗じた値よりはるかに大きいかというと、しからざる例も数多く存在するので、橋脚の構造、基礎地盤、上部構造等の関数として下部構造頂部に働く水平力が与えられるのではないかと考えられる。

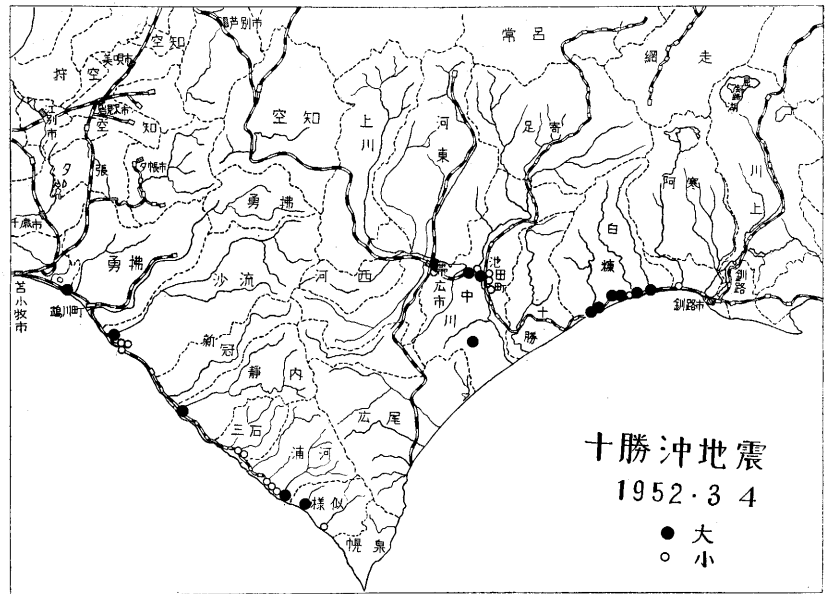
橋脚の被害としては水平の亀裂が比較的発生しやすいものではないかと思われるが、無筋コンクリートの施工目地に発生したものが多し。しかし最近では施工目地に鉄筋を挿入したりしているので、この種の被害も少なくなると思われる。

以上が橋の震害の概要であるが、橋の被害と震度階との関係について、昭和28年の十勝沖地震について調べた。中央気象台発表の震度分布図上に被害橋梁を大被害と小被害とに分けてplotしたのが第1図である。この図から次のことが推論される。

- 1) 震度階IV (25～80 gal, 1 gal = 1 cm/sec²)以下の地域には震害が発生していない。木橋は別である。
- 2) 震度階V (80～253 gal)の地域では小被害が主である。
- 3) 震度階VI (253～450 gal)の地域になると、2)とは逆に大被害の橋が比較的多くなっている。

§3. 震害の発生 地震時の構造物の運動状況はおそらく複雑極まりないものであり、それによって起こる震害の実体の解析は難問題であろう。これらのことから考えると、橋脚の1本の水平亀裂も複雑難解の運動の結果発生したものであろう。これらの運動の実際はつまびらかに知るべくもないが、地震時に画かれたと思われる桁の軌跡その他からその概略が推察される。

関東大地震の際の馬入川橋梁(道路橋)の井筒の移動状況もその1例であろう。関東大地震の発生した当時馬入川橋梁はまだ工事半ばであり、橋脚の基礎になるべき井筒が地中に埋め込まれた状態であった。もちろん橋梁であるから、地震前の井筒は整然と2列に並んでいたものと思われるが、地震後は井筒の列は乱れて、各井筒の間隔もまちまちになっていた。これは地震中に各井筒が激しい運動をして、相対的に移動し地震の終了とともに落ち着いたものと考えられる。馬入川橋梁付近は地盤も



第 1 図

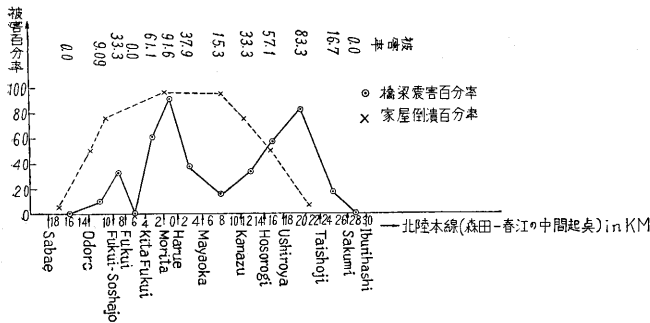
悪く、激震時には地盤が流動化するようにまでなったのではないかと思われ、すぐ下にある東海道本線の馬入川橋梁(鉄道橋)の橋脚は大半が折損してしまった。

しかしながら東海道本線馬入川橋梁の橋脚の被害を注意してみると、東京寄りの4本の橋脚は、倒壊していない。これは最近の地盤調査の結果と対照すると、この倒壊していない4本の橋脚付近は地盤が他のものより良好であったことが判明した。地盤の良否が震害と密接な関係がある1例であろう。十勝沖地震の際の日高国浦河町でも、埋立地上の家屋の倒壊率が、在来地盤上の家屋の倒壊率よりかなり大きかった。

いままでは地震時に橋脚およびその基礎がいかに複雑な運動をするかについて、馬入川橋梁の例を挙げて説明したが、橋桁も複雑な運動をしているようである。またある場合には複雑な運動の末、橋脚をはずれて、墜落するのであろう。

十勝沖地震の際の音別川橋梁は単純桁橋であったが地震後に隣り同志の桁の端部を調べたところ、お互いにぶつかりあった、新しい跡が残っていたことが報告されている。普通、桁と桁とは数cm離れているのであるから両者がぶつかったとすれば、数cm位は地震時に桁が運動していることが想像される。アンカーボルト、その他桁の落ちないような設計は耐震設計の重要な一問題であろう。

構造差と橋の震害との関係を調べるために橋の震害率と家屋の倒壊率との関係を調べた。一般の家屋は多少の差はあっても、大体似た構造のものが多いので、その倒壊率は地震の強さのパロメータであると考えられる。福井地震の北陸本線の駅間の橋梁総数と震害橋梁数とが報



第 2 図 福井地震 国鉄北陸本線の橋梁震害百分率 (駅間の橋梁—1 m 以上)

告されていたので、その駅間の鉄道橋梁震害率と家屋の倒潰率との関係を示したのが第 2 図である。水平軸は距離をあらわし、震央と考えられている森田駅春江駅の中点(厳密な意味での震央ではないが)を原点とした。また橋梁の震害率も駅と駅との間での値であり、大小さまざまな駅間距離についての値に対するものではあるが、第 2 図から結論されることは次の通りである。

- 1) 家屋倒潰率は震源地近くで高く、ある距離離れると急激に減少する。これは倒潰率の高いところは福井平野の沖積地で、急激に減少するのは、震央からの距離がはなれると同時に丘陵地に入ってゆくからである。
- 2) 橋梁の震害率は震源地付近で最高の値は示しているが、一般には震央からの距離の簡単な関数では表わし得ない。
- 3) 家屋倒潰率が高いにもかかわらず、橋の震害率の低い区間がある。これは平野を走っている鉄道で、橋脚、橋台ともにあまり高い構造物が少なかったことに原因しているものと考えられる。
- 4) 牛の谷駅、細呂木駅付近では、家屋倒潰率とは逆に、橋の震害率が高くなっている。この付近は築堤が多く、地表からの高さの高い橋が多かったことに原因しているのではないと思われる。なお、この付近の築堤も著しい沈下が起こっていた。

5) 土木構造物の場合は、構造物の高さ、基礎地盤、材料等個別別であり、そのために震央からの距離とともに震害率が単純に減少するのではなく、一度減少し、さらに再び大きくなることがあり、基礎地盤の地震の強さのみでは、構造物の耐震性を論ずることができないのではないと思われる。逆にいうと、震度 0.2 で設計しても、十分強震に耐える構造物を作り得ることが判った。

§ 4. あとがき 現在までのところ、震度は耐震設計の基準であり、震度を大きくとって設計すれば地震に強い構造物ができると考えられている。震度を大きくすれば、現行設計法では寸法の大きい構造物が設計されることになり、したがって工費もそれだけ多く要する耐震性の高い構造物が建造されるであろう。しかしその逆は必

ずしも真ではなく、震度を小さくとも、十分耐震性の高い構造物を作り得ると思う。

震度とともに耐震設計に重要な役割を演じているのは許容応力である。一般に地震荷重に対する許容応力は各国とも割増をしている。その理由は地震荷重は短期間に構造物に作用する荷重だからであるが、その割増率は外国では 33.3% が多く、わが国では 15~70% で、大体 50% である。許容応力が実際の破壊応力より小さければ小さいだけ、構造物の安全性が大きくなるので、地震時の安全性が増す。ゆえに、コンクリートの施工継目に鉄筋を挿入すれば、継目の

強度は著しく改良されるので、僅かな鉄筋によっても地震時の破壊から構造物を守ることができる。

震害と特に密接な関係があるものに基礎地盤がある。基礎の力学は最近著しい進歩を遂げたが、動力学的性質は未解決のことも多く、特に地震時の性質は十分には解析されていないので、この方面の研究が進むと、地震時の基礎の運動も明らかにされ、耐震設計も合理化されてくるであろう。特に地震時の土圧は非常に難しい問題で、外力として構造物に作用する地震時土圧の実体が明らかにされれば、橋台、擁壁等の設計法も進歩発展するであろう。

耐震設計法は現在までのところ、震度法、すなわち構造物の重量に震度を乗じた力を水平に載せて設計計算を行なう方法を採用している。しかし減衰係数の小さく、地震の波と共振するおそれのある構造物、たとえば吊橋のごときでは、震度法で設計することはすでに行詰りを感じさせるものがあり、動力学的設計法が研究されている。地震荷重のごとき本来動力学的で、しかも非常に複雑な力の荷重を静力学的計算になおしている点は、はなはだ便利な点であるが、そこに本質的無理が生じていることは明らかであるが、これに変わるべきものとしては、アナログコンピュータによる動的設計計算が、アメリカで主として、実施されている。アメリカでは大地震の地盤の運動の記録をもっており、その記録を設計すべき建物の基礎地盤の地震動と考えて設計を行なうわけであるが日本の場合には地質が複雑であるので、1カ所で採った地震記録を他の場所に応用することはおそらく不可能であろう。たとえば東京の下町の強震の記録は東京の山手のそれとはまったく異なったものであろう。それゆえにアナログで計算を進めるには、各地の強震記録が必要であり、特に破壊的な大地震の際の地盤振動の記録が必要である。

震度法が進歩改良されてゆくことは確実であろうし、次第に新しい形の耐震設計法が産まれるかも知れない。

(1960. 4. 13)