

## 特別講演 I

# 橋梁と大地震

京都大学名誉教授 山田 善一

### 1. はじめに

1995年1月17日、あのいまわしい兵庫県南部地震から、すでに5年半以上がすぎた。6500名以上の犠牲者をだし、未曾有の都市災害と言われ、まだかなりの問題を残しながらも、復旧はほぼ完了したかに見え、淡路島での花博は成功に終わりそうである。本四公団の明石海峡大橋、阪神高速道路公団の橋梁などいくらか復旧に関係したが、復旧にかけられた当事者各位の絶大な努力が特筆されねばならない。またこの地震に関して、地震被害、復旧、将来にむけての提言など、多くの報告書や、論文(たとえば<sup>1) 2) 3)</sup>)が発表され地震工学上貴重な成果が蓄積された。

この地震の三年前、阪神高速道路公団技報<sup>4)</sup>に、高速道路の耐震性について、米国のロマブリュエーター地震を踏まえ、わが国高架橋の耐震設計に対する懸念を述べたが、この答が2年後に出されようとは夢想だにできなかった。

地震国では、これまで多くの地震により、貴重な人命の損失と、物質的被害を被ってきた。世界には殆ど地震の起こらない地域が多くあり、この意味では極めて不公平に創られている。残念ながら、わが国は、地震の活動度の極めて高い地域にきにあり、台風、洪水、火山の噴火などとともに、自然災害と共生していかなければならない運命にある。

20世紀の前半は、地震に対する工学的研究が芽生え、主として米国、日本で研究が進められた。本文末に日本、米国を中心とした濃尾地震、サンフランシスコ地震以降の主な被害地震と道路橋の耐震設計の変遷について年表を掲げている。この表は耐震工学の進歩を日米を中心に説明するためのもので、全世界を網羅したものではない。

近代的地震工学のスタートは、1956年サンフランシスコ地震50周年を記念してサンフランシスコで開かれた世界地震工学会議(WCEE)であろう。この会議は第2回(東京・京都)から世界各国で4年に一度開催され、本年(2000年)2月の第12回(オークランド)まで、世界の地震工学発展のコアとなってきた。発表論文の数も、最初の頃は数十編であったものが、瞬くうちに1000編を越え、第12回会議では1428編であるが、これは約2800編の応募論文から、会議日程などを考慮して、絞り込まれたものである。論文数のみでは判断出来ない点もあるが、半世紀の間の地震工学の進歩をある程度伺うことが出来る。

地震とその被害の形は、地震毎で異なるとともに、大地震ごとに新しい形の地震被害が起こっている。われわれは常に新しい形の地震被害を経験しながら、つぎの地震工学、耐震工学の発展に結びつけてきた。最近のハイテク装置を使った、大規模の実験装置でも、実際の地震を再現することは出来ない。<sup>5)</sup>

本年2000年は、国際防災の旬年(IDNDR)の最後の年に当たる。第12回WCEEでも、10の課題別分野のなかで第一に採り上げられたのが、発展途上国における地震工学である。日米のような先進国では、この間に衝撃的な大地震に見舞われたこともあり、国全体の防災化が、かなり進められたが、発展途上国ではまだ多くの問題を抱えている。次の世紀にむけて、早急に解決することが必要である。

### 2. 主な被害地震とその教訓

地震被害の形が地震工学の進歩に大きい役割を果たしたことは既に述べたが、以下の大地震について特に地震工学上重要と思われる事項に関して調べてみる。

(a) 濃尾地震 1891年10月28日 M8.0 わが国で発生した最大の内陸地震であり、根尾谷をとおり大断層を生じ、現在もその址が残されている。Milneの詳細な写真を含む報告がある<sup>6)</sup>。この報告の写真に

よると、当時既に開通していた、東海道本線にも大きい被害があったことが示されている。この地震の規模は兵庫県南部地震をはるかに越え、現在の震度階では震度7(飯田波率による換算震度<sup>7)</sup>)の区域が震源の北北西から南南東に長さ約100 km、幅約20kmに及んでいる。

(b) サンフランシスコ地震 1906年4月17日 M8.25 サンフランシスコ北を震源とし、長さ270マイル、ずれ21フィートに及ぶ有名なサンアンドレアス断層の活動により起こったアメリカでは最大級の地震であり、約700名の人命が失われた。この地震はまた、4日間に及ぶ火災が発生したことでも有名である。わが国で火災の重要性を認識するのは、関東大地震の結果まで持ち越された。<sup>8)</sup>

(c) 関東大地震 1923年9月1日 M7.9 わが国の首都圏で発生した最大級の地震で、特に火災の怖さをまざまざと教えてくれた地震である。また建物被害と地盤の関係も明瞭に現れた地震である。この地震の被害の重要性から、東京帝国大学に、地震研究所が設立された。また1924年には、市街地建築物法に設計震度の考え方が取り入れられた。

(d) 福井地震 1948年6月28日 M7.3 戦後、南海地震(1946.12.21, M8.0)に次いで大被害が発生した地震で、地震動も大きく、気象庁震度階に新たに7が加えられた。鉄筋コンクリート構造物や橋梁の被害も顕著であった。この地震を契機に強震観測の必要性が認識され、1952年から実施に移されたが、アメリカに遅れること丁度20年である。<sup>9)</sup>

(e) アラスカ地震 1964年3月28日 M8.4 最大規模の地震で、大きい地滑りが発生し、津波による被害もあった。アンカレッジ市内の組み立て建築の被害や、空港の被害もかなりあった。

(f) 新潟地震 1964年6月16日 M7.5 鉄筋コンクリートアパートの倒壊や、昭和大橋の落橋など地盤の液状化の影響が顕著に現れた地震である。以前の地震でも幾らかその徴候が示されていたとはいえ、液状化現象が注目され、その研究が一挙に活発となる契機となった。4日に及ぶ石油タンクの火災も、新しい形の地震被害として注目された。

(g) 1968年十勝沖地震 1968年5月16日 M7.9 特に鉄筋コンクリート構造の被害が注目された。柱の剪断に対する弱さが目立ち、帯鉄筋の重要性が認識された。この地震を契機として、土木・建築ともに鉄筋コンクリート構造の設計と基準が見直された。

(h) サンフェルナンド地震 1971年2月9日 M6.6 地震規模はそれほど大きくはないが、高速道路高架橋の落橋が顕著であり、米国の道路橋示方書の耐震設計が見直される結果となった。また市街地のライフラインの被害も多く、地震を契機としてライフライン地震工学という新しい分野が作られた。多くの地震記録が採れ、耐震工学上重要な資料となった。<sup>10)</sup>

(i) 宮城県沖地震 1978年6月12日 M7.4 近代都市に起こった地震として、多くの教訓を残してくれた。ライフラインを総合的に考えることや、復旧対策の重要性が改めて認識されることとなった。

(j) 日本海中部地震 1983年5月26日 M7.7 日本海側の地震で、日本海から押し寄せた津波で、100名以上の人命が失われるとは、誰も予測できなかったに違いない。新潟での周期10秒近くの長周期地震動も注目に値する。

(k) メキシコ地震 1985年9月19日 M8.1 震源から350kmも離れたメキシコシティでかくも大きい震害が発生するとは、誰も想像出来なかったことであろう。狭帯域の地震動に対して、共振する振動数を持った構造物では、耐震設計の考え方を、根本的に変える必要がある。

(l) ロマプリエータ地震 1989年10月17日 M7.1 2層の高架橋でサンフェルナンド地震以前の示方書で設計され、ヒンジの多い構造物の地震に対する問題点を明らかに示す結果となった。道路の崩壊によって多数の人命が失われた。<sup>11)</sup>

(m) ノースリッジ地震 1994年1月17日 M6.8 サンフェルナンド地震の近く、ロスアンゼルスにより近い地震で、橋梁の被害も大きく、カリフォルニア州の耐震設計を別に考える契機となった。<sup>12)</sup>

(n) 兵庫県南部地震 1995年1月17日 M7.2 (説明は不要であろう)

以上幾つかの主な地震と、これらから得られた教訓を挙げたが、勿論これ以外にも多くの被害地震があり被害から学ぶことも少なくない。過去の大地震から得られた多くの教訓のうちその主なものを総括すると、次のようになる。

(1) 地盤により、構造物の壊れ方が異なり、地盤と構造物の相互作用の把握が重要である。(2) 液化化現象は、構造物の地震被害に大きい影響を与える。(3) 山岳を含め地形の変状による被害が大きい。(4) 火災、津波など2次災害の影響が大きい。(5) 狭帯域の地震動の起こる可能性の検討とその対策。(6) 鉄筋コンクリート構造の設計法と剪断破壊に対する考慮の重要性。(7) 耐震構造、特に免震、制震構造の研究の必要性。(8) ライフラインの計画、設計、復旧の総合的研究の重要性。(9) 地震観測網の充実と、計測機器の開発。(10) 耐震設計法や耐震工法(特に発展途上国での)の見直し。

### 3. 橋梁の耐震設計

耐震設計で、どの程度の設計地震動を対象に設計するかは、その構造物の重要性、現在及び将来の社会を取り巻く環境などにより異なってくる。構造物の設計を地震に対しほぼ100%近く安全のように設計するならば、おそらく無骨な構造物が乱立し、日常そこに生活するものにとっては決して快適な空間とは言えないであろう。経済上も構造物に与えられる耐震性には限度がある。耐震設計のレベルと手法をどのように選ぶか常に重要な課題である。

#### 3.1 日本の場合

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。1939年内務省道路橋示方書が初めて示方書の名でだされ設計震度(水平0.2 鉛直0.1)が与えられた。1945年第二次世界大戦が終わるまでは、わが国ではその主力を戦争に向けていて耐震工学は殆ど空白の時代であった。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りようやく強震計の必要性が認識され、1952年SMA Cによる強震観測体制が発足した。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。

1964年、新潟地震がおり、地盤の液化化が耐震設計上極めて重要な課題として採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。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大きく、実際の設計結果の経済性が問題となったためであり、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、耐震設計にも取り入れられるようになり、修正震度法が採用されたほか、さきの新潟地震の教訓から、落橋にたい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合技術開発プロジェクトの成果として提案され、2段階設計が建築、土木共に採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段階設計の一つとして、変形性能の照査がとりいれている。1990年道路橋の示方書が改訂された。

1995年の兵庫県南部地震の結果、耐震設計のかんがいの見直が必要となり、復旧仕様をばさんで、1996年12月道路橋示方書の改訂と共に、新しい耐震設計編が示された。改正された主な点は、(1)内陸性直下型地震が、対象として採り入れられたこと(2)保有耐力法のなかに性能設計の考え方が入れられたこと(3)鋼製橋脚にも許容塑性率が盛り込まれたこと(4)免震設計が章として挙げられたことなどであろう。

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、ゴムの持つ減衰機能を耐震上利用することができる。また温度変化による支点的移動を分散でき、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り、今後の発展

が期待されている。

### 3.2 米国の場合

1931年末広恭二の米国土木学会での講演で強震観測の重要性を述べてから、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採られている。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) であり、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年サンフランシスコオークランド・ベイ橋が、1937年世界最長のスパンを持つ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、これらは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>13)</sup> 1940年には有名なエルセントロ地震記録が採られている。戦後AASHTO 示方書はほぼ4年ごとに改訂されてきたが、1964年版で初めて設計震度が採り上げられ、0.02-0.06 が採用された。ロマプリエータ地震で落橋したサイプレス高架橋は、設計震度0.06である。1971年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 示方書に採り入れられた。1981年 A T C 6<sup>14)</sup> ができ 1983 年 AASHTO 示方書にとり入れられた。1989年のロマプリエータ地震の被害はより高いレベルの耐震設計を要求し、1988年米国地質調査所 (USCGS) が決めた再現期間 475年地震危険度図をもとにした震度が、1992年示方書及び耐震補強指針からとり入れられた。1983年示方書に比べ、震度の大きさ、図の細密さにかかなりの差がある点興味深い。カリフォルニア州ではロマプリエータ地震以降より厳密な耐震規定の必要性が認識され州独自の Caltrans BDS (1993) を採用した。<sup>15)</sup> ここではカリフォルニア州鉱山地質局の岩盤加速度値の危険度図によっており、200 以上の活断層が反映されている。さらに最近Caltran に対する A T C -32が採用され、相対変移、変形性能が積極的にとり入れられている。また再現期間2000年地震危険度図が基本になっている。<sup>16)</sup>

### 3.3 長大橋梁の耐震設計

つり橋や、斜張橋など長大橋の耐震設計については、米国における戦前のつり橋の例は先に説明したが、電子計算機による長大橋の耐震解析が初めて発表されたのは、1960年第2回世界地震工学会議である。<sup>17)</sup>

本四連絡橋を対象とした調査が、1961年から土木学会で始められ、実験や数値解析の結果を参考として、耐震設計指針 (1967) が作られた。その後同公団では、耐震設計基準 (1977) を制定してその後の長大橋の耐震設計の基準とした。現在わが国の殆どの公共企業体の長大橋の耐震設計は、この基準を参考としながら、その後の研究成果を取り入れ、個々の長大橋について、それぞれの特徴を取り入れながら、耐震設計の方法を決めている。明石海峡大橋が、架設途中で大地震に遭遇したのは、特筆すべきできごとであった。<sup>18)</sup>

筆者は、1958年神戸市が初めて明石海峡大橋の調査研究を始めてから、1999年3ルート全橋完成まで、本四連絡橋に関係したが、その間本四以外 (主に阪神高速道路公団) のいくつかの長大橋の耐震設計にもかかわった。主なものを次に挙げる。

- (1) 港大橋 世界第3位の長大キャンティレバートラス橋であるが、地震国としては1位である。詳細な固有値解析と応答スペクトルによる動的解析、並びに超高張力鋼の適用によりバランスの採れた耐震設計が可能になった。
- (2) 大和川橋梁 当時わが国第一の斜張橋であった。本橋の特長は、極端な斜橋で橋脚を通過して入る地震入力も複雑になり、種々の方向の地震に対し検討された。
- (3) 天保山大橋 地震入力について、地域性を考えた詳細な検討が行われた。斜張橋の桁の固定方法は、両タワーのたわみ性を考慮に入れ、2点固定としている。
- (4) 東神戸大橋<sup>19)</sup> 全支点フリーという構造形式をとり、新しく開発したオイルダンパーを使った斜張橋である。地震では被害を受けたが、交通遮断することなく修復できた。
- (5) 新猪名川大橋 P C斜張橋で初めて2段階設計が試みられた。

#### 4. おわりに

20世紀も後わずかで終わる。今世紀前半で芽生え、後半で多くの地震被害を踏まえ、各種の研究環境に恵まれて進歩してきた地震工学、耐震設計もまだ多くの問題点を残している。とくに(1)耐震性と経済性(コスト削減への要望)の関係、(2)耐震性と構造景観のかかわり(最近 Earthquake Aesthetics という用語も生まれている<sup>20)</sup>)、(3)免震構造を含めた新しい耐震構造の創造(新構造形式へのブレークスルー)、(4)地震の特性(地震動か地盤変動か)と耐震設計、など今後に残された問題は少なくない。<sup>21)</sup>

伊豆諸島では脅威の群発地震が継続しているが、わが国ではここ数年巨大地震には襲われていない。耐震補強もほぼ出来上がってきているが、次の大地震にたいする備えと危機対策を怠ってはならない。

#### 参考文献

- 1) 土木学会・日本建築学会・地盤工学会・日本地震学会・日本機械学会編「阪神・淡路大震災調査報告」全26巻
- 2) 土木学会関西支部、(70周年記念出版)「大震災に学ぶ」(1998)
- 3) 阪神高速道路公団、「大震災を乗り越えて」(震災復旧工事誌)(1997)
- 4) 山田善一「道路橋の耐震設計」阪神高速道路公団「技報」第12号(年報)、特別論文、(1992)
- 5) G. W. Housner, Earthquake Engineering Research-1982, Committee on Earthquake Engineering Research, NATIONAL ACADEMY PRESS (1982)
- 6) J. Milne, W. K. Burton and K. Ogawa, The Great Earthquake of Japan (1891)
- 7) 飯田汲次、明治24年10月28日濃尾地震の震害と震度分布、愛知県防災会議地震部会、昭和54年3月
- 8) G. Hansen & E. Condon, Danial of Disaster, The Untold Story and Photographs of the San Francisco Earthquake and Fire 1906, CAMERON and COMPANY, (1989)
- 9) よみがえる福井震災、福井震災50周年記念事業「世界震災都市会議」開催実行委員会 (1998)
- 10) P. C. Jennings (ed.), ENGINEERING FEATURES OF THE SAN FERNANDO EARTHQUAKE FEBRUARY 9, 1971, California Institute of Technology (1971)
- 11) G. W. Housner, COMPETING AGAINST TIME, 1989 Loma Prieta Earthquake (1990)
- 12) G. W. Housner, THE CONTINUING CHALLENGE, Caltrans (邦訳) 挑戦はつづく1994年1月17日ノースリッジ地震による道路橋被害に関する耐震諮問委員会報告書(応用地質株式会社訳)
- 13) Raab, N. C., and H. C. Wood, Earthquake Stresses in the San Francisco-Oakland Bay Bridge, Transaction ASCE, 106, 1363-1390 (1941)
- 14) SEISMIC DESIGN GUIDELINES FOR HIGHWAY BRIDGES, ATC-6 (1981)
- 15) Seismic Design Criteria for Bridges and Other Highway Structures, Report NCEER-97-0002 Also refer as ATC-18, (1997)
- 16) ATC-32 Improved Seismic Design Criteria for California Bridges: Provisional Recommendations, Applied Technology Council (1996)
- 17) Konishi, I and Y. Yamada, Earthquake Responses of a Long Span Suspension Bridge, Proc. of the 2 WCEE, 2, 863-878 (1960)
- 18) 鳥海隆一、明石海峡大橋への影響、橋梁と基礎、30、8、78-79、(1996) (この号は特集「橋梁の耐震・免震」で多くの貴重な論文・資料が載せられている)
- 19) Yamada, Y., et al. Earthquake-resistant and wind-resistant design of the Higashi-Kobe Bridge, CABLE-STAYED BRIDGES, (Ed. M. Ito) 397-416 (1991)
- 20) Yashinsky, M., Earthquake Aesthetics, BRIDGE, No. 2, 38-42 (1996)
- 21) 山田善一編著、耐震構造設計論、京都大学学術出版会、(1997)

被害地震と耐震設計言十の変遷 (道路橋を中心として) 00072659	の設計見直し、せん断破壊と配力鉄筋
日本	修正震度法
1891 濃尾地震 (8.0内) 死者222	1971 道路橋示方書耐震設計編 0.1~0.24
1906 震度法 (佐野 耐震家屋構造論)	修正震度法
1916 震度法 (佐野 耐震家屋構造論)	1973 建設省新耐震設計法 (土木・建築共に2段階設計の重要性)
1919 道路法、都市計画法、河川法など	1978 宮城県沖地震 (7.4海) ライフライン
1923 関東大地震 (7.9海) 142,000	1980 道路橋示方書 変形性能照査 (鋼構意は必要なしとした)
1924 建築基準法 $k=0.1^{(a)}$	1981 ATC-6 (1983の示方書にとり入れ)
1926 道路構造に関する細則案ではじめて震度法がとり入れられた。	1982 新建築基準法 保有耐力 1g
1931 末広博士が米国土木学会で強震記録の重要性のつき講演。強震観測開始 (1932)	1983 日本海中部地震 (7.7海) 津波 死者 103 長周期地震動
1933 ロングビーチ地震 初の強震記録 本格的耐震工学の研究が始まる。	1985 Bay Bridge竣工 設計震度 0.1 (日本の建築基準を参照して決められた)
1936 Bay Bridge竣工 設計震度 0.1 (日本の建築基準を参照して決められた)	1988 Golden Gate Bridge竣工 震度0.075
1937 Imperial Valley 地震 ElCentro記録	1989 道路橋示方書耐震設計編
1939 内務省鋼道路橋示方書 水平震度0.2 鉛直 0.1	1990 動的解析、保有耐力 1g
1940 道路橋示方書耐震設計マニュアル	1992 道路橋示方書 (マドリッド)
1943 鳥取地震 (7.2内) 死者1083	1993 釧路沖地震 (7.8海) 津波230
1944 東南海地震 (7.9海) 998	1994 北海道南西沖地震 (7.8海) 津波230
1945 三河地震 (6.8内) 1961	北海道東沖地震 (8.1海)
1945 第二次世界大戦終結 (戦時中は日米ともに耐震の研究は中断した)	三陸はるか沖地震 (7.5海)
1946 南海地震 (8.0内) 1330	道路橋示方書の改定 (主として活荷重、B荷重・A荷重)
1948 福井地震 (7.1内) 3769	1995 兵庫県南部地震 (7.2内) 6000以上
1950 新建築基準法 高さに対する震度の割り増し	[兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様]
1952 SMACプログラム (強震観測)	1996 耐震技術開発状況報告書の基本概念 (土木学会・鋼構造委員会) コンクリート標準示方書・耐震設計編 (土木学会)
1955 鋼道路橋示方書 震度 0.1~0.35	道路橋示方書 (12月)
1956 (戦後の橋梁の設計はGHQが支配)	耐震設計編 (性能設計への指向)
1957 I-880 完成 (1989 Loma Prietaが1/4地震で崩壊)	1998 建築基準改正案 (第142回通商国会) 明石海峡大橋開通 (本四Aルート完成)
1960 電子計算機実用期に入る	2000 本四Eルート (神戸しまなみ海道) 全橋完成
1964 新潟地震 (7.5海) 液状化現象 超高層建築許可	
1968 十勝沖地震 (7.9) 鉄筋コンクリート	
	第11回WCEE (アカプルコ)
	道路橋耐震補強指針の改訂 (5月)
	第12回WCEE (オークランド)