

耐震技術の今後の展望

Prospect of Seismic Technology

Ikeda Shoji
池田尚治*

まえがき

阪神淡路大震災は構造技術者を大平の夢から覚めさせるに十分な衝撃であった。我が国では1923年の関東大震災の経験を基本として全国津々浦々まで耐震設計が行われ日本中の構造物が世界で最も大きいと思われる水平震度を採用して耐震設計されてきただけに、阪神地域の甚大な被害はほとんど誰もが全く想像していなかったと言える。近年の大地震の被害としての新潟地震（1964年）、十勝沖地震（1968年）、宮城県沖地震（1978年）、あるいは最近のノースリッジ地震（1994年）などの例から類推すれば大地震による被害は全く予想できない訳ではなかったが、これらの地震の被害から今回の阪神地域の甚大な被害を予測できなかったことに関してはそれなりの論拠があると思われる。その論拠の主要な点は、今回の地震動が直下型でそのパワーが設計で想定したものの5～10倍のものであったからである。過去におけるこの地域の地震としては、400年前の1596年に大地震があり、伏見城の天主閣が大破して500人以上が圧死したのを含め4万人以上の死者が出たと記録されている。今回の兵庫県南部地震は実に400年ぶりに発生した大地震なのである。このような大地震が近代都市の直下に発生し甚大な被害を構造物に与えたことに立脚し今後の耐震技術の展望について述べてみたい。

1. 耐震に関する認識

我々は地球上で重力を受けて生活している。しかしながらこのことは至極当たり前で、日常このことをほとんど意識していない。ところが、自分自身が鉄棒にぶら下がって見ると如何に地球の引力、すなわち重力が大きいかを両腕で認識することができる。大地震のときにはこのような大きな力に匹敵するような力が水平に繰り返し生ずるのであるから、自分自身よりはるかに重い構造物がこれに耐えるためには余程の水平耐力が必要なのである。今回の地震における神戸海洋気象台での記録によれば、最大水平加速度は 818cm/sec^2 でありほぼ重力の加速度 (980cm/sec^2) に匹敵する値である。例えば話を単純化するために地震波の周期を0.4秒とし、0.2秒間 800cm/sec^2 の加速度が生ずるとすれば、0.2秒後には $800 \times 0.2 = 160\text{cm/sec}$ の速度が生ずる。この間の平均速度は 80cm/sec であるから、0.2秒間で地盤は $80 \times 0.2 = 16\text{cm}$ 水平に動くことになる。極

めて短い時間に左右水平に大地が16cmも繰り返し動くということを我々はまず認識する必要がある。また、これらの数字は地震波を積分して得た速度や変位とよく対応している。同時に上下方向にも一層速い周期で振動が生ずるのであり、単に重力のみが静的に作用している状態から地盤が突然このような振動状態を生ずるのであるから、これに対処することが如何に大変であるかが認識できる。

さて、大地震における地震動は20秒から60秒程度であった後は元の静的な重力の状態に戻るが、引き続いて相当な大きさの余震が頻繁に生ずることを忘れてはいけない。阪神大震災では大きな余震が来なかったことが幸いであった。今回の地震では大都市である大阪にも地鳴りとともに大きな地震動が生じたが、大きな被害はほとんど報告されていない。これは、構造物が耐震設計されていたお陰であって、もし我が国以外の大都市にこの程度の地震動が生ずれば壊滅的な被害を受けることになると思われる。即ち、今までの耐震設計の技術が大阪中心部を大きな震害から救ったと言えよう。このことを我々はもっと認識すべきである。

さて、今回の地震でほとんどの日本人および多くの外国人が地震に対する関心を持ち、色々の発言がなされ、また現在種々の対策が実行に移されている。ここでは筆者が地震直後から考えてきたことの一部を述べてみたい。まず、地震によって倒壊等の大被害を受けた構造物を眼前にして思ったことは、考え方を整理分類することが必要であり、分類として①大被害の主因、②被災の力学的な挙動、③被災に対する反省、および④被災から得た教訓、の4分類としてそれぞれを中心に思考をまとめるのがよいと思ったのである。ごく要点のみについてこれらを述べると、①の大被害の主因については地震動のパワーが設計で想定したものの5～10倍であったことであって、食事に例えれば3杯の御飯は食べられても30杯の御飯は食べられないことと同じである。②の力学的挙動については構造物の終局時の固有の特性が具現したことであって、力学的観点からこれを解釈することが可能である。③の反省については耐震研究への過去の取組み方、土木学会での活動、設計基準の改定、耐震設計に対する考え方、等多岐にわたっている。④の教訓については直下型の大地震に備える必要性が認識されたこと、地震被災後の早期復旧方法や被災地住民の生活の確保に関すること等、前述の①～③を踏まえて実に多くのこ

* 横浜国立大学 工学部 教授 工博

とが教訓として得られた。

以上のように分類して思考することにより、高架橋の倒壊現場における鉄筋のガス圧接部の破断、フープ筋の剝離などを目撃してこれらを倒壊の主因とするような短絡的な発想を防ぐことができる。工事の「手抜き」に責任を負わせるような発言もしばしば報道されたが、これについてはむしろ教訓としてとらえるのがよいと思われる。

また、上の分類的思考に加えて現在までの耐震に関する技術的進歩の過程を把握しておくことが重要である。土木学会のコンクリート標準示方書では1978年の宮城県沖地震による橋脚の被害を教訓として従来からのコンクリートの許容せん断応力度を大幅に低減するとともに鉄筋の段落としに関する設計法や最小せん断補強鉄筋の量を昭和55年版(1980年版)で規定した。また、昭和61年のコンクリート標準示方書の改定に際しては新たに耐震設計の章を設け次のような規定を設けた。即ち、耐震設計の原則として「地震時の安全性と地震が終わった後の構造物の供用性能」を指標とする世界に先駆けた規定としたのである。地震力については応答を考慮して通常の構造物では2倍の応答倍率が生ずるものとし、これを地震後に要求される供用性能に応じて低減する方式が規定された。また、柱の基部には少なくとも0.2%の横方向鉄筋を配置することも規定されている。したがって、このような規定によって設計されたコンクリート橋脚は今回の地震に対しても相当の安全度や靱性を保つことができたと思われる。

日本道路協会の道路橋示方書においても既に1.0gに対する地震時保有水平耐力の照査が行われており、大地震時の橋梁の安全性の確保が図られてきたのである。しかしながら、残念なことに今回大きな被害を受けたコンクリート橋脚は旧基準によって設計されていたことにより設計地震力を大幅に超える地震に対して大きな損傷を受けたのである。ここで注意すべきことは、旧基準で設計された構造物に0.2g程度の地震動が生じた場合には十分安全であることが実験によって確かめられていることである。

土木学会では今回の地震の後に「耐震に関する提言」を行ったが、本来このような提言は大地震の被災発生の前に行うべきものであって、現時点ではむしろ何故このような提言がもっと前に行えなかったのか、あるいは土木学会における耐震に対する取組み方のどこに問題があったのか、といった反省が必要であり、反省の声が聞かれないのは残念である。また、10年も前に規定したコンクリート標準示方書の耐震設計の概念がもっと妥当に評価されるべきであると考えられる。

日本の大学の土木工学科では最近まで鉄筋コンクリート柱の水平加力実験を行える施設をほとんど持っておらず、鉄筋コンクリートの実験と言えば従来は梁の実験が主であった。筆者も柱の実験ができるようになったのは約15年前からである。このような貧弱な研究体制が何故続いたのか反省する必要がある。

2. 耐震技術の展望

世の中は経済的に豊かになっており、人間生活も相当に

快適になってきた。このような状況のもとで耐震技術を考えるとき、地震に対する安全性や震後の供用性は時代と共に変化してきて当然であろう。一方、世の中には地震以外にも危険は多くあり、全体としてバランスのとれた安全性が社会に求められることになる。地震による被害のうち、今回の阪神地域の被災に含まれなかったものの一つに津波がある。単に構造物の水平抵抗や靱性を高めても津波や大火災に抵抗することはできない。また、直下型の大地震は300年以上に1回程度発生するようであるから、構造物の用途の変化や材料の寿命等の事柄も含めて考えなければならない。したがって、ある程度のパワーの地震を設計想定地震とし、それでカバーできない場合には保険で対応するのがよいと思われる。

経済性に関する検討を事前に行う必要があるが、今後の標準的な水平震度としては、現在の0.2gの50%増しの0.3gとし、これに応答による増幅を2倍として考えるのがよいと思われる。これに地震後の構造物の供用性能に対応した限界状態による係数を掛ければよいのである。この地震力は海洋型の大地震によるものであって地震動を受ける地域は広範であるため、地震後の構造物の供用性能が重要である。このように設計された重要構造物に直下型の0.8gクラスの地震が作用しても、靱性率が5程度あれば十分に安全性が確保される。また、積極的に免震工法や減衰作用を取り入れることも肝要であろう。

地震のようにその最大のものの予測が困難な場合には、限界状態設計法の概念によって設計することが特に重要であると思われる。道路橋示方書の耐震設計編も早く限界状態設計法へ移行することが望まれる。

今後大いに議論が進められなければならないものとして地震発生中の供用性能の検討が掲げられる。社会基盤構造物が今後ますます複雑化、高度化する方向に対して、このような地震発生中の供用性能の追求が一種の制約条件として必要である。

耐震構造に関しては新しい構造形式の発想も必要である。橋脚の軸方向にプレストレスを導入すれば地震時の復元性を確保しながら共振現象を回避できるので、今後はこの種の橋脚の採用を望みたい。これに関しての手法は現在鋭意検討が進められている。また、高強度鉄筋の採用や新素材などによるせん断補強も有効である。

今回の阪神地域の橋梁の地震による被災は、設計で想定した地震力を大幅に超える地震動によって橋脚がせん断破壊したこと、あるいは鉄筋の段落とし部の悪影響に誘発されてせん断破壊したことが主因であることに留意しつつ、前述の反省点や教訓を十分に生かして今後の耐震技術を発展させることが肝要と思われる。

1750年には英国のロンドンで地震が発生し、1755年には米国のボストンでも地震が発生した。同年にはポルトガルのリスボンで大地震が発生し6万人もの死者が出ている。このように大地震は世界中で生ずる可能性があるため、今回の阪神地域の大震災を十分研究し、一刻も早く世界に最新の耐震情報を伝達することが必要と思われる。