

1. 地震時保有水平耐力法の現状と課題

1.1 地震時保有水平耐力法の始まり

従来、橋梁を始めとする構造物の耐震設計は、0.2 ～ 0.3 程度の水平震度を用いた震度法を基本に行われてきた。震度法は、構造物の地震時の動的な振動現象をこれと等価な静的な水平力に置き換えて断面力や変位を算出する耐震計算法である。震度法は、従来は主に構造物の弾性域の振動特性を表現する計算法として用いられてきており、その現象や結果の理解が非常に明快で、かつ、簡便な耐震計算法である。このため、1923 年関東地震の後に各種の構造物の耐震設計法として取り入れられて以来これまで長い間用いられてきたものである。

昭和 39 年の新潟地震以降蓄積されてきた強震観測記録によれば、実際の大地震の際には 0.2 ～ 0.3 g 程度の振動応答ではなく、これよりもはるかに大きな振動応答が構造物に生じていることが明らかにされている。このように設計で想定した地震力をはるかに越えるような地震応答が観測されているにもかかわらず、必ずしも大きな被害が構造物に確認されない場合も多く見られた。これに対しては、震度法と許容応力度法との組み合わせにより耐震設計した構造物は、終局的な耐力や変形性能を考慮すれば、結果として設計で想定している地震力を越えるような地震力に対しても耐えられるというように理解されてきた。

ただし、0.2 ～ 0.3 程度の水平震度を用いた震度法による耐震設計の考え方では、どのような大地震を考慮して、構造物のどこに損傷が生じて、構造物に最終的にどのようなパフォーマンスを発揮できるのかが明確ではない。さらに、大地震時でも構造物には 0.2 ～ 0.3 程度の水平震度相当の振動しか生じず、また、大地震時でも構造物はどこまでも弾性挙動を示すという錯覚を招く。このため、どのような構造にすれば耐震性を向上させることができるかといった工夫の必要性がなくなることにつながる恐れを招く。実際の地震時に想定される構造物の挙動を適切に把握することによって初めて耐震性の高い構造物の設計が可能になると考えられ、例えば、地震時には構造物のこの部材に損傷が生じるのでここはねばり強い配筋細目にしておく必要がある、橋軸方向の水平変位が大きくなるので桁端部に変位制限構造を設けて過大な変位を防ぐ、等の具体的な対処が可能になると考えられる。

このような実際の地震時の構造物の挙動を考慮して耐震設計を行う考え方は、1980 年代から変形性能の照査、地震時保有水平耐力の照査として、道路橋示方書を始めとする構造物の設計基準に取り入れられてきた。地震時保有水平耐力という用語としては、1990 年の道路橋示方書耐震設計編において「鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査」の規定として取り入れられ、ここでは、1 本柱形式の鉄筋コンクリート橋脚を対象として、1923 年関東地震における東京周辺における地震動のようにまれに起こる大きな地震に対して、塑性化を考慮した限界状態設計法の 1 つの耐震設計法として規定された。

その後、1995 年兵庫県南部地震による各種の構造物の甚大な被害経験から、構造系のじん

性の確保の重要性が強く認識されたことを受け、例えば、橋梁では従来の鉄筋コンクリート橋脚だけではなく、地震の影響の大きい橋脚、基礎、支承部、落橋防止システムなどの構造部材等に適用を広められると同時に、照査法ではなく設計法として位置付けが明確にされ、地震時保有水平耐力法として規定されてきている。

1.2 構造物の破壊現象と地震時保有水平耐力法の位置付け

例えば、曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚の損傷は、一般に、ひびわれの発生、ひびわれの進展、かぶりコンクリートの剥離、軸方向鉄筋の座屈・破断あるいは圧縮側コンクリートの圧壊と進展して、最終的に破壊に至る過程をたどる。また、このような損傷の進展に応じて、鉄筋コンクリート橋脚の変形状況と水平耐力特性が支配される。一般的な単独1本柱形式の鉄筋コンクリート橋脚の場合には、弾性状態から、軸方向鉄筋の降伏により水平耐力が一定になり、その後のかぶりコンクリートの剥離や軸方向鉄筋の座屈・破断等により水平耐力が低下するというように、損傷の進展とともに水平抵抗が変化する。このため、構造物に損傷が生じるということに立ち入って耐震設計を行う地震時保有水平耐力法を適用するためには、このような構造物の挙動（損傷の進展、水平耐力～水平変位特性、部材や構造物の終局限界・設計上の許容限界等）を十分に把握することが基本となる。

地震時保有水平耐力法を構成する要素技術としては、①地震動の設定、②地震応答の推定、③限界状態の照査、という大きく3つの要素から構成される。構造物の損傷が進展することを考慮するため、上記のように、地震応答の推定においても、限界状態の照査においても、構造物の非線形履歴挙動に支配されるため、この影響を十分に把握することが最も基本になることになる。

1.3 地震時保有水平耐力法の今後と課題

地震時保有水平耐力法を構成する、①地震動の設定、②地震応答の推定、③限界状態の照査、という3つの要素技術において基本となる非線形応答の推定法や構造物の非線形履歴特性とその数学モデル化法、限界状態の評価やそのモデル化法等については、本報告の本章以降において、現状と最近の研究が示されているところである。また、実務においても、例えば、橋梁の耐震設計では道路橋示方書や鉄道設計標準、また、地下構造物などにおいても従来の弾性設計と並ぶ基本的な耐震設計法として構造物の非線形挙動を考慮した地震時保有耐力法が取り入れられてきている。

しかしながら、地震時保有耐力法の歴史は浅く、構造物の非線形挙動の評価、限界状態の評価などまだ今後研究すべき課題が多く残されている。構造物の非線形挙動を考慮して耐震設計を行う地震時保有耐力法に関する今後の研究としては、以下のような研究領域が考えられる。

1) 耐震設計体系に関する研究

(性能設計法、変位ベース設計法、エネルギーベース設計法、信頼性設計法、

キャパシティデザイン)

- 2) 各種条件下におけるRC・鋼構造部材・基礎・支承等の限界状態の評価法
(材料・部材実験研究、材料の応力～ひずみモデル、損傷解析モデル、載荷履歴特性、複合部材、3次元荷重、基礎～地盤構造、支承モデル)
- 3) 構造物の非線形地震時挙動の評価法
(荷重低減係数法、プッシュオーバー解析法、動的解析法)
- 4) 構造物全体系の耐震設計法・性能照査法に関する研究
(地盤の地震応答、非線形動的解析法、破壊解析法、各種橋梁構造物・港湾構造物の性能照査、免震構造、マルチヒンジ系構造の応答推定、衝突挙動)
- 5) 各種設計指標のばらつきが構造物の耐震信頼性に及ぼす影響
- 6) 新耐震構造
(高じん性構造、高耐力構造、損傷制御構造、高復旧性構造、複合構造)

【参考文献】

- 1.1.1) 川島一彦、長谷川金二、長島博之、小山達彦、吉田武史：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の開発に関する研究、土木研究所報告第190号、1993
- 1.1.2) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告、1995

(運上 茂樹、星隈 順一)