

1 序

1.1 はじめに

道路施設にしろ鉄道施設にしろ社会基盤施設と言われるものは、そのほとんどが多くの要素からなる「システム」である。施設全体がシステムとなっているだけでなく、構成要素の一つである橋梁のようなサブシステムもまた一つのシステムを構成している。

橋梁などの耐震設計は、これまで場合によっては動的解析などによりシステム全体の挙動を考慮をするが、基本的には設計基準に示された構造細目に従って構造要素ごとに設計するのが一般的であった。構造細目をベースにした要素ごとの設計は、設計者によらず一定レベルの耐震性能が確保しやすいというメリットがある。しかし一方、システムとしての耐震性能を確保するという設計が行いにくく、また各細目がどのようにシステム全体の性能に関連しているのかが不明確となりやすい。さらに、細目規定に合わない新技術や創意工夫が取り入れにくいという問題も生じ得る。

1995年兵庫県南部地震の被害では、神戸市内の橋梁とりわけ高架橋の多くに甚大な被害が生じた。大きな被害を受けた鉄道RCラーメン橋脚の中には、橋脚が不等高さのために3次元応答が発生し、特定の橋脚に被害が集中した例も見られた。総じて橋脚の被害が目立ったものの、金属支承が損傷を受けた道路橋の事例も非常に多く、さらに基礎の損傷、フーチングと橋脚をつなぐアンカーが損傷を受けた例も多く報告されている。支承の損傷により桁が支承からはずれ落ち、桁に大きな損傷が出た例も非常に多かった。また、支承が破損することにより橋脚が地震損傷から免れるという「支承ヒューズ」論が、地震の後、橋梁技術者の中で議論されることが多くあった。このヒューズ論は一部の高架橋の被害を説明するものの、高架橋全体の被害統計分析からは否定されている。支承が地震時にヒューズとして機能するように設計してきたわけではなく、ある意味では当然のことである。いずれにせよ、橋の損傷はいろいろな要素で起こること、ある要素の損傷が他の要素の損傷に影響を与えること、すなわち「橋はシステムである」ということが被害の上からはじめて認識された。

1996年12月には道路橋示方書が兵庫県南部地震の経験を受けて改訂され、極めて厳しい地震動に対しては非弾性挙動、すなわち損傷や残留変形を許容する設計へと移行した。そこでは動的解析が大幅に推奨されてはいるものの、水平保有耐力法という準静的な要素レベルでの照査が依然として上位な方法として位置している。また、損傷は基本的には橋脚に集中させ、桁・支承・基礎などの他の要素は基本的には残留損傷は残させないというキャパシティデザイン的な考え方が主体となっている。

地震のあと、世界的な流れともあいまって「性能照査設計」が次世代設計法として広く認識されている状況にある。性能照査設計とは、構造物全体が持つ施設としての機能に着目し、要求されている性能を満たす設計を志向する考え方で

ある。具体的には、構造細目にとらわれることなく、要求性能を満たす保有性能を経済性等の制約の中で達成することになる。また、そこでは要素単位ごとの性能ではなく、全体システムとしての性能のみが問われる。耐震設計は性能設計が適用しやすい分野の一つと考えられ、今後この面での研究開発が重要になると予想される。

厳しい地震動を受ける橋の耐震要求性能としては、「地震後に緊急車両が通行可能」、「復旧に要する期間が短い」あるいは「自動車・車両を橋上から落下させない」など、橋の置かれている状況に応じてさまざまなレベルがありうる。たとえば、修復が容易という要求性能に対しては、取り替えが容易な要素に意図的に損傷を集中させる設計が考えられるであろうし、地震後も緊急車両が通過可能という要求性能に対しては、損傷をある要素に集中させるよりも、むしろ構造システムに損傷を分布させシステム全体として地震に耐えるほうが好ましい設計であろう。

耐震基準の改訂により、金属支承の大型化、ゴム系支承の積極的採用により支承関連の費用の占める割合が相対的に増大した。また、基準の関係もあり、免震ゴム支承を用いる経済的メリットがあまりない状況にある。その結果、支承のない、桁と脚を剛結にした構造が増えつつあるが、これは自然な対応である。しかし、このことが橋の耐震要求性能から見て常に好ましいわけではない。

金属支承であればヒューズ的に振る舞い、ゴム支承であればより大きな変形を許容し、橋脚・基礎の地震力の負担を減らす方向が考えられるが、その時には、伸縮装置を含めた隣接桁の衝突に対するスマートな処理法の開発が欠かせない。また、落橋防止システムの目的は理解できるものの、その要求性能は極めてあいまいであり、設計照査体系になじまない規定となっている。支承とそのまわりのデバイスの改善はシステムとしての耐震性能の向上に大きく寄与できる可能性が高いが、研究開発の緒がついたばかりであり今後の大きな展開が期待される。

要求性能の違いに応じて適切な構造システムが設計できるためには、構造系全体の強震時挙動を正確に予測できるツールが必要である。極限状態における個々の要素の挙動、すなわち地盤や橋脚の非線形性はもとより、支承の大変形、場合によってはその破損とそれに伴う桁のすべり・衝突などの不連続な現象をも取り入れた精緻なモデルを持つことが要求される。

計算機的能力が急速に発展し、既存のプログラムソフトにより全体系の地震時挙動のシミュレーションも計算可能な時代ではある。実際の橋梁は曲がっていたり、構造特性が橋軸方向に変化しているなど、3次元性の強い地震応答を示すものが多い。特性の異なる構造要素から成るといっても、その非線形地震応答特性には要素間の力のやりとりが複雑に絡んでくる。このような状況の中で、全体システムの耐震解析により設計を行おうとする志向は自然であり、その要求も強い。それはそれで好ましいことではある。しかし、高架橋などでは、地盤・基礎・脚・支承などの一つ一つの構造要素の力学的特性が大きく異なっており、そのために一つの要素のモデル化の誤差が全体の挙動を大きく変えてしまう可能性も高い。橋梁系全体の解析となると、線形域あればともかく、非線形域での検討

の経験が少なく、我々の中でまだ感覚がつかめていないというのが実状であろう。すなわち、論文・報告で発表されている、あるいは設計で行われている全体系の解析シミュレーションがどれほど真の現象に近いのかと問われたとき、残念ながら自信を持って答えられないのが現状である。

上述のように、意図的に支承を壊す耐震構造など、高度でかつ信頼性のある耐震構造のメニューを増やすためには、精緻な全体系予測モデルが欠かせない。

なお、設計という立場から考えれば、全体橋梁システムの非線形地震応答の評価は手間と時間の面から負担も大きい。精度とのバランスの中でいかに全体系のモデルをいかに単純化するか、たとえば等価線形系モデルの活用などは設計技術の立場からも大きな課題である。

1.2 報告書の内容

橋梁システムの耐震設計の課題としては

- (1) 長手構造物であり，その入力地震動の考え方の整理
- (2) 構造要素のモデルの精緻化
- (3) 震度VIIレベルの地震動による全体系の応答予測手法の確立
- (4) 激震時に損傷を許容したときの損傷と性能との関係の整理
- (5) 各要素への損傷配分の考え方

などがあり，取り組むべき問題は多い。

本研究委員会では鋼系橋梁を主たる対象として，橋梁をシステムとしてとらえたときの地震応答の予測を主課題とし，そのためのモデル化に関する基礎的な情報をまとめ上げるとともにシステムを考えた橋梁の耐震設計に関わるいくつかの重要な問題を抽出し，それに対しての検討結果を報告する。

現在，汎用プログラム，橋梁などの構造物の地震応答に特化したプログラムなどが利用できる状況にあるが，個々の要素のモデル化と全体挙動のとの関係については体系的な検討がなされいないのが現状である。そこで，ここでは(1)橋梁を構成する各要素の非線形特性とそのモデル化に関する現状把握を行い(2, 3章)，(2)各計算機コードを用いて共通例題の高架橋システムを解き(4章)，全体系システムの地震時挙動予測の基礎情報を与えることを目指している。

5章以降の後半では，「橋梁システムの地震応答・耐震性」において重要と思われる課題を抽出し，それについての検討結果を記述する。