

8. 今後の研究課題

新技術小委員会・耐震設計WGの最終報告書・4.2節には、数頁にわたって、鋼製橋脚、基礎・橋脚アンカー、支承、落橋防止装置、上部構造、橋梁システムなどの構造要素に関して、さらに、橋梁の地震時挙動、耐震診断・耐震補強、各種耐震設計法、将来展望などの各分野に関して、多くの研究課題がまとめられている。その内、鋼構造物の耐震設計に関する各種研究課題は本委員会に引き継がれ、一部の課題に関しては、十分な検討がなされ、実務に活かされつつある。しかし、その多くは、未だに継続検討の対象であり、今後の一層の研究活動が望まれるところである。

以下に、設計法、耐震性能評価法、新素材等の活用などの点において残された課題を、設計法、耐震性能評価法、新技術の活用と言った分類で、特に最重要課題に対して再度まとめ直す。

8.1 設計法に関する課題

8.1.1 鋼製橋脚における課題

- (1) これまでの多くの研究は、単柱形式の鋼製橋脚であったが、最近、ラーメン形式の鋼製橋脚、すなわち多自由度系構造物に対する耐震設計の具体化が精力的に進められている。しかし、ラーメン梁腹板、隅角部の変形限界性能の解明、腹板のせん断変形ならびにせん断降伏を取り入れた設計法の開発に研究の余地がある。
- (2) 単柱形式においても、逆L型橋脚に代表されるような異形な構造形式を有し、曲げ変形挙動のみばかりでなく、質量あるいは剛性偏在によるねじり変形の影響も考慮しなければならない橋脚の耐震設計法の整備が望まれる。
- (3) 中詰めコンクリートを考慮した耐震設計法は、十分実務で採用されており、その反面、基部の根巻きコンクリート、土被りによる拘束度を挙動に反映させるべきとの考えもある。
- (4) 鋼製橋脚の一層の耐震構造としての活用の際して、局部座屈により強度劣化する領域まで活用する設計法の具体化が上げられるが、これを実現するには安定あるいは補修など耐力以外の観点からの限界状態を明確にする必要がある。

8.1.2 今後の検討が必要な橋梁形式

- (1) 耐震性能向上のため、高架橋の多くは、上部構造を連続化し、多径間連続橋梁として設計されることが多くなった。このような形式においては、支承部、すなわち、金属・ゴム・免震支承、制震装置、落橋防止装置のモデル化、特に、多径間連続橋の各橋脚上での最適な反力分散方法の基本的考え方などを明確にすべきである。
- (2) 一方で、上部、下部、基礎、支承および落橋防止装置など橋梁全体を総合的に考え、システム全体の耐震性能の評価基準を明らかにするとともに、バランスの取れた耐震設計法を開発していく必要がある。
- (3) 以上のような比較的連続的な構造系ではなく、特殊橋梁としてアーチ橋、特に、中路段式、上路式アーチ橋の耐震照査法の開発を早急に進めなければならない。

- (4) 長周期構造物である斜張橋および吊橋においては、現在降伏を許さない設計法をとっているが、部分降伏を認めるような基準の可能性を検討して、経済的な設計が進められるかどうかの研究が不可欠である。

8.1.3 地盤との相互作用に関する課題

- (1) 構造系を上下方向で捉える場合、比較的明確な上部構造に比べて、アンカー部および基礎は、不確定要素の高い構造部材と考えられる。この構造要素に対して橋脚の保有耐力を上回る耐力をこれらの部材に持たせるという現行設計法の考えから離れ、橋脚の Demand (応答値) を基本に、それに多少の余裕を持たせたキャパシティーデザインの可能性を追求することも必要であろう。
- (2) 地震入力的大小にも影響する地盤のモデル化、バネモデルによる表現、サブストラクチャ法による上下部連結による分離構造設計などの適用性を詳細に検討する必要がある。
- (3) 上部構造の復元力レベルのみで、基礎構造に作用する地震力の最大値が評価できる訳でなく、適切な減衰力の評価もあって、基礎構造物の設計に必要な地震時荷重の算定が可能となる。特に、Pushover 解析等の静的解法に基づく設計法では、正しい減衰力の評価が不可能で、何らかの簡易的な評価手法の構築が望まれる。

8.1.4 地震荷重の入力形態に関する課題

- (1) 発生する地震動の予測方法は、理論的にも整備されてきた現状ではあるが、その特性が構造物に及ぼす影響の変動は、極めて大きく、現状のように標準波形が3波形用意され、照査量が平均的に許容値内に収まれば良いとする設計法は、構造物の耐荷力・変形能の予測精度と比しても非常に誤差がつきまとう設計法と思われる。構造物の応答の精確な予測、ならびに応答の変動を評価した安全係数の設定など今後の研究課題が残されている。
- (2) 一方で、地震動は、任意一方向のみに生じるものでなく、水平2方向および上下動を加えて、合計3方向地震動として考えるべきと考えられる。現行の道路橋示方書では、各水平方向の地震動の重ね合わせに関しては、何ら規定されていないが、諸外国の基準では、CQC (Complete Quadratic Combination) ルール、30% (Percentage, 40%もある) ルールなどにより、多自由度系の構造物の耐震設計、多方向地震動入力の構造物の耐震設計が取り入れられている。しかし、これらは、不規則振動論をベースにした弾性応答に基づくもので、非弾性応答、構造物の二軸強度・変形能設計とも関連付け、合理的な入力地震動の組み合わせ、安全率の設定が望まれる。

8.1.5 橋梁の重要度に関する課題

- (1) 現行の道路橋示方書による重要度の区分では、現実には殆どの鋼製橋脚がB種の橋となっており、必ず残留変位の照査を実施することとなる。しかし、タイプIIのように極めて稀にしか発生しない地震動に対して、全ての橋脚を地震後も使用可能な状態に保持しておくことは、経済性を勘案すると必要ないと思われる。地震直後の避難経路や復興のために必ず使用できるような状態にしておかなければならない路線以外は、

橋脚の物理的な崩壊のみを防止できれば良いとも考えられる。

- (2) 兵庫県南部地震において、RC 橋脚では残留変位が大きなもの(橋脚高の 1/100 を超えたもの)を補修することはできなかった。しかし、鋼製橋脚では熱するなりジャッキなどで強制的に押すなどにより補修できる可能性が有り、鋼製橋脚の簡易補修方法とその残留耐力に関して確認する必要がある。重要路線における早期復旧に対しては、このような補修方法も勘案した耐震設計の整備が望まれる。

8.2 性能評価法に関する課題

8.2.1 実験的評価法

来るべき性能照査型設計法の導入に備えて、設計法の整備はもとより、構造物の性能評価法として繰り返しおよびハイブリッド地震応答実験手法の標準化を推し進めるべきである。そのためにも、大学、各研究機関での実験法のデータベース化、各実験法における誤差要因の整理、誤差の定量化を進め、それらをまとめて実験的評価法のマニュアルを作成し、これらの情報の公開を一層進めるべきである。その一貫として、同一形状の供試体を使った並列実験により、研究機関の実験装置相互の精度チェックも必要であろう。

8.2.2 解析的評価法

- (1) 静的/動的解析プログラムの整備、特に第 5 章で取り上げたベンチマーク問題より広範囲の問題に対する更なる検討が必要である。
- (2) 特に、性能照査型設計法における検証用(研究用)プログラムについて整備が必要であり、非線形解析による計算例、設計例の蓄積と問題点の公開方法、非線形解析の設計への適用に関する教育プログラムの整備が望まれる。
- (3) その他、具体的に早急な検討課題として以下のものが上げられる。

時刻歴応答解析における減衰の取扱い

- ・各比例減衰マトリックスを用いた場合の構造系のエネルギー応答の比較検討を行って解析的検討に推奨される減衰の取扱いを整備すべきである。
- ・また、構造物-基礎-地盤系の減衰要因を把握し、その信頼できるモデルの構築が行われるべきである。

鋼製橋脚のモデル化

- ・コンクリートを充填した鋼製橋脚において中詰めコンクリートと鋼板との連成を考慮した解析法の確立、すなわち断面形状の違いによる中詰めコンクリートの強度変動、付着特性の考慮などより現実的なモデル化の指針策定が望まれる。
- ・ラーメン橋脚などの多自由度系の鋼製橋脚の合理的な動的解析モデルの開発が望まれる。特に、ラーメンの面内挙動においては、柱部材の軸力変動が非常に顕著となり、それらの影響を取り入れた鋼製橋脚の復元力モデルの開発が望まれる。
- ・鋼製橋脚の終局限界に関連して、繰り返し荷重下の鋼製橋脚の亀裂発生過程の解析および崩壊に至る詳細な解析手法の確立が急がれるべきである。

鋼製橋脚アンカー部のモデル化

- ・橋脚における課題と同様に、軸力変動のあるアンカー部の復元力モデルの開発が望まれる。

高架橋のモデル化

- ・高架橋システムの解析においては、固定・可動支承、水平反力分散型のゴム支承、免震支承などをモデル化する必要があるが、それらの復元力特性の骨格曲線や履歴法則に関するデータの蓄積を早急に行う必要がある。
- ・同様に、耐震連結装置、桁間衝突などのモデル化に必要な復元力特性に関するデータの蓄積が望まれる。
- ・信頼性が高く、また、取扱い易い基礎・地盤のモデルの構築も必要と考えられる。
- ・これらを統合することで、支承、桁、耐震連結装置、基礎・地盤などを含めた信頼できる高架橋システムの3次元モデルの構築へと発展できる。

ベンチマーク問題と解析例、および各種解析手法の適用限界

- ・複合非線形動的解析ソフトの妥当性を検証するための基準の設定が不可欠で、評価する量は最大応答値なのか、それとも時刻歴曲線そのものなのかを早急に検討する必要がある。
- ・一方で、実構造物の性能確認では、固定・可動支承、水平反力分散型のゴム支承、免震支承を有する高架橋システムの3次元耐震挙動に基づく必要があり、これらのデータの蓄積が一層進められるべきである。ここでは、別途、鋼製橋脚の各種解析モデルの適用限界の明確化と定量化もあわせて議論されるべきであると考えられる。特に、繰り返し作業の伴う設計の省力化のためにも、現在多用されている微小変位解析の適用限界を明確にする必要がある。

8.2.3 耐震診断

- (1) 地震後の復旧を迅速に進めるためには、損傷度指標としての“Damage Index”と実際の損傷形態（観察可能なもの）との相関をより精密に明らかにし、目視点検あるいは非破壊検査のためのガイドラインを構築する必要がある。
- (2) 一方で、新設の橋脚あるいは橋梁システム全体は、地震後の点検、補修、補強がし易い構造として、あらかじめ設計する必要がある。

8.3 新技術の適用

8.3.1 制震構造

- (1) 従来から耐震構造と言った形で構造物の地震時安全性を問うて来た。しかし、地震動の大きさの不確定性から、安全性の確保と経済性の確保が相反する設計思想となり、経済性を重要視するあまり再三の構造物の地震時損傷に至った。これに対して、制震構造の技術開発は、1)減衰効果を増すデバイスを付加的に取り付けて受動的な免震を行う技術開発と 2)能動的に構造物に力を加えて構造物に入力される地震力を相殺する技術に大別される。後者は、エネルギー供給と言った問題点があるため、前者の方が、より実務的には信頼ある技術となっている。

- (2) これを更に進めるならば、柔剛混合構造の採用が有望と考えられる。例えば、主体構造は、弾性範囲にとどまり、付加的構造系が制震ダンパーとして機能し、塑性変形などによるエネルギー吸収、ひいては残留変形の低減へと結び付けようとするものである。

8.3.2 新素材、高機能鋼材の活用

- (1) 新素材、高機能鋼材などを活用した新しい構造形式の開発を一層進めるべきである。例えば、剛性部材と有効なエネルギー吸収部材とを組合わせたハイブリッド構造は、地震後の残留変形を小さくするのに効果がある。
- (2) 軽量の FRP (Fiber Reinforced Plastic) などの高強度、破断までの弾性挙動 (2~3%ひずみ) を活用することで鋼材の塑性ひずみ量を制限することなども可能である。

8.4 その他

- (1) 近い将来、構造物の設計は性能設計に移行することは間違いのないところである。そうならば、耐震設計はますます高度になり、通常的设计段階でも、複雑な非線形動的解析が避けられないようになる。性能設計への移行をスムーズに行うためには、1. 序論で述べたように解析手法・解析ソフトの整備、ベンチマークの作成、実験手法の標準化、各種ガイドラインの作成等が重要である。それとともに、技術者においては、それらを十分理解し、間違いなく使いこなせるように自己研鑽につとめることが肝要である。
- (2) 現行の橋梁設計では、上部構造および下部構造の設計・施工に携わる技術者が、お互いに設計のための情報交換はするものの、橋梁全体をどうすべきかといった観点から、それぞれの設計・施工を総合的に進められる体制ではない。総合工学である土木構造物の設計・施工においては、下部構造-支承-上部構造を一体として設計・施工できる技術者の養成と体制作りが不可欠であるとともに斬新な発想の基での技術開発が推し進められる環境作りが望まれる。