

第4編 橋梁システムの動的解析と耐震性（第4分科会）

1. 概要

1995年兵庫県南部地震以後、橋をシステムとして扱い、その耐震性を検討しようとする機運が高まっている。また、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。

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。

計算機の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。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・橋脚・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、線形域であればともかく、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。

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、取り組むべき課題は多い。

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、それに対する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との関係については体系的な検討がなされて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.

報告書の目次は以下の通りであり, 2章以降の概要をその後に記す.

1. 序
 - 1.1 はじめに
 - 1.2 報告書の内容
2. 橋梁の非線形動的解析の現状
 - 2.1 橋梁全体系解析の概要
 - 2.2 上, 下部構造のモデル化
 - 2.3 基礎・地盤のモデル化
 - 2.4 非線形梁要素
 - 2.5 鋼材の弾塑性モデル
 - 2.6 減衰の取扱い
3. 動的解析モデルの精緻化に向けて
 - 3.1 動的相互作用を考慮した基礎・地盤モデル
 - 3.2 各種鋼製橋脚モデルの精度と適用限界
 - 3.3 支承・落橋防止システムのモデル化
4. 各種プログラムによる高架橋の非線形動的解析
 - 4.1 解析プログラムの機能比較
 - 4.2 解析モデル
 - 4.3 非線形動的応答解析の比較
 - 4.4 サブストラクチャー法による解析
 - 4.5 全体系と単柱の応答比較
 - 4.6 ファイバーモデルの適用範囲に関する検討
5. 橋梁システムの地震応答特性の把握
 - 5.1 上路式補剛アーチ橋の地震時面内終局挙動
 - 5.2 曲線橋(1) - 大規模地震時における最悪地震入力方向の簡易推定法 -
 - 5.3 曲線橋(2) - 曲率半径の影響 -
 - 5.4 曲線橋(3) - コヒーレンスを用いた最悪地震入力方向の推定法 -
 - 5.5 曲線橋(4) - 負反力に関する検討 -
 - 5.6 逆L形橋脚を有する高架橋(1) - 橋軸方向復元力特性と地震時終局挙動 -
 - 5.7 逆L形橋脚を有する高架橋(2) - ゴム支承の影響 -
6. 高架橋システムの耐震性に関する検討
 - 6.1 感度解析と部分構造モデルの妥当性の検討
 - 6.2 支承条件の差異が連続高架橋システムの地震応答性状に及ぼす影響
 - 6.3 2方向免震を考えた高架橋の応答

2. 橋梁の非線形動的解析の現状

橋梁システムの全体モデルを作成する上での基礎的事項について記述している. 自分で

プログラムは作成しなくとも、設計技術者が TDAP などの特化されたプログラム、場合によっては ABAQUS などの汎用プログラムを使って、橋梁システムの地震応答を計算する機会は今後増えると予想される。このようなときに、各構造構成要素をどの程度にモデル化しておくべきかの包括的情報を与える意義は大きいと考えられる。2章はこのような背景のもとに書かれたものである。

橋梁全体系の耐震解析に関する基本的事項や留意点などを 2.1 節で解説し、一般に使われている桁、橋脚、ゴム支承などの各構造要素のモデル化を 2.2 節で説明している。基礎・地盤系に関しては、簡便さと精緻さにおいて、現段階ではもっともバランスが取れているサブストラクチャー法による相互作用を考慮した地震応答の扱い方を 2.3 節で詳述している。すなわち、基礎・地盤系と橋梁系を分離し、まず地盤と基礎のモデルで相互作用の影響を考慮した有効地震動を求め、次に、基礎・地盤系を鉛直・水平・回転の等価バネに置き換えて橋梁系の地震応答を求めるプロセスを説明している。この方法は計算時間という意味では最も実用的な手法である。一般の高架橋では相互作用の影響はよほど地盤がやわらかくない限り、その影響が少ないことを数値計算の上から示している。

橋梁システムの耐震解析は、非線形梁要素を用いた有限要素法で行うのが実務では標準的である。その際に使用される梁要素は大別して、 $M-\phi$ 要素とファイバー要素に分けられる。2.4 節では、この2種類の梁要素の違いを、その基本的な定式化に立ち返って解説している。また、鋼製橋脚などの非線形耐震解析を行う際に考慮しなければならない弾塑性挙動は 2.5 節で扱い、まずその基礎となる塑性論を概説した上で、耐震解析で使われることの多い代表的な鋼材の繰り返し塑性モデルを解説している。さらに、動的解析で重要な役割を果たす減衰モデルについても 2.6 節で丁寧に説明している。

3. 動的解析モデルの精緻化に向けて

さらに進んだ解析を行う場合のモデル化について述べている。

3.1 節では、基礎・地盤系の解析に関して、まず群杭の効果を取り入れた解析法を、例題を通して示している。また、実際に供用されている一般的な橋脚を解析対象として、現行の道路橋示方書にしたがったモデルと、サブストラクチャー法によるモデルを作成して動的応答解析が行われている。2つのモデルによる応答解析結果を比較しているが、両者はかなり近いものとなっている。これは、地盤の剛性に比べて橋脚の剛性が小さかったためと考えられている。さらに、基礎近傍の非線形性の取扱いについても記されている。

鋼製橋脚の耐震性検討においては、シェル要素、梁要素を用いた有限要素モデルや一自由度系のばね・マスモデルによる解析が行われている。3.2 節では、まずこれらのモデルの概要を記した後、鋼製 T 形円形断面橋脚を解析対象として種々のモデルで数値計算を行い、比較検討を行っている。既存の橋脚をもとに作成したこの解析モデルは、板厚が高さ方向に変化する変断面構造となっている。静的荷重下での検討結果より、シェル要素による解析では要素分割や構成則モデルが座屈モードに影響を及ぼし、最大耐力以降の荷重-変位曲線に違いが出ることで、局部座屈の影響が小さい最大耐力点までは梁要素による解析でも良好な結果が得られることなどが示されている。また兵庫県南部地震時に記録された加速度を用いた動的解析では、静的荷重下の座屈モードと必ずしも一致しないこと、2パラメータモデルとシェル要素による結果は良く一致したこと、梁要素による解析やバイリ

ニア型の一自由度ばね・マスモデルでも主要地震動の応答特性については良好な結果が得られたことなどが報告されている。

兵庫県南部地震以降、使用されることが多くなったゴム系支承のモデル化は、実務においては等価剛性、等価減衰を考慮することで対応しているが、研究レベルでは、微小振幅領域から大振幅領域まで整合的かつ精緻に履歴特性を再現するモデルが重要である。このような観点から、粘性、ハードニング、剛性低下などの複雑な影響を統一的かつ比較的少ないパラメータで表せるモデルを3.3節で紹介している。この節では、さらに、摩擦力、すべり支承、金属支承、桁の衝突、落橋防止システム、桁連結装置のモデル化についても言及している。

4. 各種プログラムによる高架橋の非線形動的解析

標準的な都市内高架橋を選び、9種類のプログラムを用いて非線形応答解析を行っている。これらのプログラムは、汎用構造解析（商用）、耐震解析（商用）、耐震解析（自己開発）の3つに分類される。また、ここでは主に梁要素による解析を行っているが、使用した要素にはファイバーモデルとM-φモデルの両方がある。4.1節では、各プログラムの機能を表にまとめるとともに、それぞれの特徴に関するコメントを記している。解析モデルの3径間連続高架橋について4.2節で詳述した後、各プログラムによる地震時応答解析結果の比較検討を4.3節で行っている。入力地震波による応答の違いについても触れている。

サブストラクチャー法では、基礎・地盤剛性が橋梁系と基礎・地盤系の間の相対変位から相互作用力への周波数伝達関数として表されるため、時刻歴応答解析を行う場合には、周波数領域での関係を時間領域で等価な構造モデルと地震入力に置き換える必要がある。

4.4節ではその具体的な置換方法を示して数値計算を行い、道示モデルによる結果との比較も行っている。一様な整形地盤上にある本解析条件下では、基礎・地盤のモデル化の違いは解析結果に大きな影響は及ぼさなかった。

4.5節では、全体系と単柱モデルで時刻歴応答解析を行い、比較検討している。変位の差は橋軸方向の解析で最大5%、橋軸直角方向で最大14%、応答塑性率については、橋軸方向で最大6%、橋軸直角方向で最大13%となっており、大きな差は生じていない。

4.6節では、橋脚をシェル要素でモデル化して3径間連続高架橋の橋軸方向地震応答解析を行い、梁要素（ファイバーモデル）による結果と比較している。最大変位で9%、残留変位で31%の差が生じているが、残留変位の値は許容値（橋脚高さの1/100）よりもかなり小さなものである。この地震応答解析での最大応答変位は、静的繰り返し載荷における95%耐力点の変位を少し越えた値であることから、95%耐力点程度までの最大応答変位であれば、ファイバーモデルで最大応答変位を算出しても約10%以内の誤差に収まると考えられている。

5. 橋梁システムの地震応答特性の把握

橋梁システムの具体例として、上路式補剛アーチ橋、曲線橋、逆L形橋脚を有する高架橋を取り上げて検討している。曲線橋、逆L形橋脚の高架橋は複数の節で扱われているが、各節の副題が示すように着目点が異なっている。各橋梁システムについて得られた結果の

一部を以下に記す。

5.1節では、ライズ比を変化させた上路式補剛アーチ橋の地震時面内終局挙動が検討されている。その結果、上路式補剛アーチ橋の地震終局挙動は補剛桁の弾塑性挙動に大きく影響されること、条件によっては補剛桁の塑性化が進行しアーチ部の損傷が軽減されること、地震動の水平成分にほぼ支配されること、幾何学的非線形性考慮の有無がその動的挙動に大きな影響を与えることなどが指摘されている。

5.2節では、地震荷重の入力方向を30度ごとに変化させて、4径間曲線ラーメン橋のプッシュオーバー解析と非線形動的解析が行われている。2種類の解析において、最大応答が生じる方向は概ね一致するため、あらかじめプッシュオーバー解析で最悪入力方向を算定し、計算時間のかかる非線形動的解析はその入力方向についてのみ実施すれば良いと考えられる。

5.3節では、曲率半径が異なる9つの4径間曲線ラーメン橋のプッシュオーバー解析と非線形動的解析を行っている。各橋梁においては、種々の地震荷重入力方向を考慮している。解析結果として、曲率半径の増加とともに動的解析における最大応答ひずみは減少したが、静的解析における最大ひずみは増加した。各橋脚における地震荷重の最悪入力方向は、動的解析と静的解析でよく一致した。橋梁H（曲率半径800m、交角6度）を直線橋と見なして解析しても、固有振動数や各橋脚に生じる最大ひずみの誤差は1%以下であることなどが報告されている。

5.4節では、コヒーレンスを用いた最悪地震入力方向の推定法を提案している。解析モデルには、一箇所だけがピン支承で、他はローラー支承である多径間連続高架橋を取り上げ、コヒーレンスを指標として直線橋の最悪地震入力方向を精度よく推定できること、曲線橋についても高々±20度の誤差で推定可能であることなどを示している。

5.5節では、4径間連続の曲線高架橋の静的弾塑性解析および非線形動的解析を行っている。端支点はピン・ローラー結合、中間支点はピン結合で、特に支点反力に着目して検討を行い、動的応答解析における負反力は死荷重反力に比べ中間支点で3倍程度、端支点では10倍以上になること、動的解析と静的解析では応答特性に大きな違いがあり、支点反力に限っても、静的解析で地震時応答を十分に把握するのは難しいことなどが指摘されている。

5.6節では、剛性の高い鋼製支承を介して逆L形橋脚に支持された3径間連続高架橋モデルが橋軸方向の地震力を受ける場合の解析を行い、逆L形橋脚の変形挙動を検討している。比較のため、単柱モデルなどの解析も行っている。なお、この解析モデルの各橋脚上には支承が2つずつ設置されている。解析結果より、逆L形橋脚で支持された高架橋では、橋脚のねじり変位は小さいが、その一方で、橋脚の横梁上の2つの支承の橋軸方向反力の作用方向は逆になり、橋脚柱に近い支承の水平反力は非常に大きなものになること、横梁の水平面内の回転を拘束した単一逆L形橋脚モデルにより、高架橋システムにおける逆L形橋脚の挙動ならびに横梁上の支承反力を精度良く算定できることなどが示されている。

5.7節では、支承形式の違いが及ぼす影響を検討している。ゴム支承はばねでモデル化し、ばね定数を変化させて解析を行っている。解析モデルは逆L形橋脚を有する3径間連続高架橋で、各橋脚上には支承が2つずつ設置されている。ケース1（支承条件：弾性－固定－弾性－弾性）の場合、固定条件の橋脚上にある2つの支承には逆方向の水平反力が

作用し、橋脚柱に近い方の支承には大きな反力が作用すること、ケース2（支承条件：弾性－弾性－弾性－弾性）の場合は、同じ橋脚上の2つの支承に作用する水平反力の差は小さくなること、ばね定数の増加により固有振動数が増加するとともに、入力地震動の特性にもよるが、橋脚天端の変位、基部反力も増加する傾向があること、ばね定数が小さい場合には桁の変位が大きくなることなどが報告されている。

6. 高架橋システムの耐震性に関する検討

高架橋システムの耐震性に関して、種々の観点から検討を加えている。

6.1節では、4章で取り上げた3径間高架橋を解析対象として、その部分構造モデルと全体系の解析を行い、部分構造モデルの妥当性を検討している。また、設計パラメータに対する応答値の感度（設計パラメータの変化に伴う応答値の変化率）にも着目している。検討結果として、部分構造モデルは全体系の挙動を比較的よく表しているが、地震入力方向が橋軸直角方向の場合の差は大きいこと、最大応答変位に関する感度は全体系モデルと部分構造モデルでほぼ同じ傾向を示すこと、残留変位の感度は全体系モデルと部分構造モデルで大きく異なること、バイリニア型応力－ひずみ関係の2次勾配に関する最大応答変位、残留変位の感度は小さいことなどを挙げている。

6.2節では、3径間連続高架橋システムについて、まず鋼製橋脚および種々の支承の設計手順を説明し、その設計例を示している。次に、設計した各タイプの支承を有する高架橋システムに大地震が作用した場合の弾塑性地震応答性状を数値解析により検討し、橋脚に生じる最大変位、最大水平力などを相互に比較している。その結果、上部構造の最大変位や橋脚の挙動などの耐震性の観点から、免震支承を有する高架橋システムの合理性が改めて確認された。ただし、免震支承を有する高架橋システムでは、単柱式橋脚にモデル化して、その弾塑性地震応答性状を推定するのは難しいことが指摘されている。

さらに、4章の高架橋システムを対象として、可動、固定支承を、水平反力分散支承あるいは免震支承に取り替え、それが橋軸方向大地震時応答性状に及ぼす影響を検討している。その結果、エネルギー吸収性能をもたない水平反力分散支承を有する場合には、橋脚の塑性化の程度もほとんど変化せず、上部構造の水平変位は非常に大きくなるなど、好ましくないことが報告されている。これに対して、設計時に非免震橋として、免震支承のエネルギー吸収性能を期待していないものの、橋脚にとっては免震支承を有する場合に有利であることが確認されている。ただし、この場合においても、上部構造の水平変位が大きくなる点には注意する必要がある。

6.3節では、支承の2方向動的特性を考慮に入れた解析モデルを構築している。高精度の支承モデルを用いることで、2方向入力時の橋梁全体系の3次元挙動をより高い精度で再現することが可能になっている。特に、免震時には、支承の応答が卓越して現れるため、全体系の解析においては、本節のような取り扱いが適当であると考えられる。4章の3径間連続高架橋を用いて解析を行い、大振幅時には2方向入力の影響が顕在化すること、橋脚が弾性域にとどまっている範囲内では2方向入力の影響は軽微であることを確認している。