

2. 研究成果概要

ここでは、次章以降の各章の内容の要約および研究成果について述べる。

2.1 鋼橋の耐震設計技術の現状 (第3章)

本章では、阪神・淡路大震災後に発表された土木学会の耐震設計に関する第1次および第2次提言を踏まえ、その後作成された鋼構造物の耐震設計規準・指針の相互比較および鋼製橋脚の耐震設計技術の現状について述べた。本章の内容をまとめると以下ようになる。

(1) 土木学会の提言で鋼構造物の耐震設計に関連する項目は3グループに分けられる。

グループ1 (耐震性能) : 要求耐震性能として、構造安全性 (破壊阻止) のみならず重要な構造物に対しては地震後の使用性 (早期修復可能) を考慮する。

グループ2 (耐震照査) : 鋼構造物に対しても保有耐力や変形性能の照査を行う。

グループ3 (技術開発) : 高い変形性能を持つ鋼構造物の研究開発および免震・制震などの新技术を積極的に導入する。

(2) グループ1, 2の提言内容は、震災後策定された規準・指針に採用されている。構造安全性は保有耐力法、あるいは変形照査法によって照査される。一方、地震後の使用性に対する照査は、残留変位によって行われているが、最大応答変形量を用いて構造安全性と同じように照査する方法も採用されている。

(3) グループ3については、単柱式鋼製橋脚であれば、耐震性能を支配するパラメータは明らかにされ、それらを制御することにより変形性能の高い鋼製橋脚 (ハイダクティリティー鋼製橋脚) を設計することが可能である。

(4) しかしながら、コンクリート無充填単柱式橋脚は残留変位が大きくなる傾向 (特に、Ⅱ種地盤) があるので、地震後の使用性の観点からは不利である。

(5) 一方、コンクリート部分充填単柱式橋脚はそのようなことがないので、一般には、低強度コンクリートを柱の高さの20%から30%程度充填しておくのがよい。

(6) 地盤と橋脚が共振しない限り、地盤の影響を考慮して橋脚の固有周期を補正すれば、基部固定の橋脚の応答値に関する解析結果がそのまま使用できる。

2.2 鋼橋の耐震設計法に対する基本的考え方 (第4章)

従来の耐震設計法では、レベル1地震動 (中小地震) に対しては無損傷、レベル2地震動 (大地震) に対しては崩壊を免れるという2つの規定しか設けられてこなかった。それに対し、最近の規準では、その中間に設計地震動および構造物の重要度に応じて許容できる損傷度、すなわち地震終了後に必要とされる性能を規定した基準が設けられるようになってきた (性能照査型耐震設計基準)。この章では、大地震を対象とした耐震設計に関して、性能照査型の耐震設計法の基本的考え方、それに付随して必要になってくる耐震解析法および耐震照査法について述べた。本章の内容および研究成果をまとめると以下ようになる。

(1) 設計時に構造物に要求される性能は、要求耐震性能マトリックスの形にまとめられる。

これは、地震動および構造物の重要度に応じて、構造物に付与すべき性能を表現したものである。

- (2) 耐震性能の照査（照査性能）は，構造安全性（安全または破壊）および地震後の使用性（損傷度に応じて5段階）について行われる。
- (3) 耐震設計に用いられる解析法を，解析の種類（静的，静的繰り返し，動的），幾何学的非線形性，および材料的非線形性に応じて11種類に分類した（表4.3.1）。
- (4) さらに，通常の設計段階で用いられる解析法の範囲を明確にした（表4.3.3）。
- (5) 設計段階では，局部座屈は解析で考慮せず，終局状態の判定のみに用いる立場を明確にした。
- (6) Pushover解析（<Static><N2>解析）は，耐震設計上多くの有用な情報（終局変位，終局強度，復元力特性など）を与え，この解析の電算プログラムの整備が重要である。
- (7) $P-\Delta$ 効果を解析に考慮しなくても良い範囲をECCSの基準に基づき明らかにした。
- (8) 構成則として，3種類のレベル（ $\sigma-\varepsilon$ モデル， $M-\Phi$ モデル， $H-\delta$ モデル）を挙げ，それぞれの特徴を比較検討した。その結果，汎用性などの点で， $\sigma-\varepsilon$ モデル（ファイバーモデル）が優れ，将来的にはこのモデルに移行するのが望ましい。
- (9) 性能照査は，基本的には，応答値(S) \leq 限界値(R)の形で行われる。
- (10) 構造安全性照査には，“力”を用いる保有耐力法と“変形量”を用いる変形照査法があるが，考え方が明解な変位あるいはひずみを指標とする変形照査法が優れている。
- (11) 地震後の使用性照査は，残留変位によって行われているが，残留変位を正確に求めることが困難な現状から，構造安全性照査と同じように，最大変位および最大ひずみに基づく変形照査法も検討すべきである。
- (12) 使用する解析方法に基づき，耐震照査法を4種類（経験式に基づく方法，静的解析法，静的/動的解析併用法，動的解析法）に分類し，それぞれの方法および特徴を概説した。
- (13) 1次モードが卓越する構造物に対しては，限界値 R をPushover解析，応答値 S を1自由度系の動的解析で求める静的/動的解析併用法（図A.3.1）が優れている。
- (14) 1次モード卓越の条件は，式(A.4.1)により判定することができる。
- (15) 1自由度系構造物に対しても静的/動的解析併用法は有効で，図4.7.1に設計フローが示されている。
- (16) 高次モードの影響が大きい多自由度構造物の場合は，<Dynamic><N2>解析による地震応答解析を実施し，その終局判定に破壊基準（破壊ひずみ）を導入する動的解析法の適用が有望であるが，今後さらに詳細な検討が必要である。

2.3 耐震解析法とベンチマーク（第5章）

極大地震時に構造物の損傷を制御するためには，地震時の終局状態に至るまでの挙動を予測することが重要である。このような終局時には構造物が塑性化し，変形も大きくなることから従来設計に用いられてきた微小変位弾性解析では対応できず，材料的非線形性と幾何学的非線形性を考慮した複合非線形解析による必要がある。本章では複合非線形解析を実務で実施する上での，障害を少しでも取り除くことを目的に各種の検討を行った。なかでも，非線形解析の経験の少ない技術者が解析の妥当性を検証できるための信頼のおけるベンチマークを，鋼製橋脚の静的非線形解析や動的非線形解析さらに高架橋システムの動的非線形解析において提供することが大きな目的の一つであった。本章の研究成果をまとめると以下のようになる。

- (1)耐震設計における非線形解析の現状を整理した。解析手法の解説などを行い耐震解析に対する共通の認識が形成されるように配慮した。さらに、高架橋を具体例として、モデル化や開発された非線形解析の適用法などについて説明した。高架橋の耐震設計で特に重要な構造要素である橋脚やアンカー部についてはより詳しく述べた。また、時刻歴応答解析における減衰の設定方法についてもまとめた。
- (2)単柱、逆L形、1層および2層ラーメン橋脚のPushover解析に用いるはり要素による静的非複合線形解析(材料的非線形性+幾何学的非線形性)においては、解析法や解析ソフトの差によらずほぼ同一の解が得られ、信頼におけるベンチマークが提供できた。解析ソフトの信頼性を検討する場合、このベンチマークに対して終局時の相対誤差が3%~5%以内であればよいと考えられる。なお、非線形解析では解が収束していることを確認することが重要である。
- (3)局部座屈を考慮した鋼製橋脚の静的繰返し解析では、等方硬化則、移動硬化則、修正2曲面モデルおよび3曲面モデルによる解析結果の比較を行った。薄肉断面鋼製橋脚の場合、4つの構成則モデルは、水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線を十分な精度で予測できることが示された。一方、厚肉断面鋼製橋脚に従来の構成則モデルを適用するとき、履歴曲線はもとより、その包絡線にもかなり違ったものが予測されることを指摘した。これに対し、修正2曲面モデルと3曲面モデルは、薄肉断面だけではなく厚肉断面にも非常に良い精度で荷重-変位履歴特性を表せる。したがって、薄肉断面から厚肉断面までの鋼構造物の繰返し弾塑性解析を精度良く実施するためには、材料レベルで十分に検討をなされた構成則を用いることが肝要である。その意味で、現在の所、修正2曲面モデルと3曲面モデルを用いることは適切であると考えられる。
- (4)動的非線形解析では、小さな復元力の誤差であっても構造物の振動特性を変化させるため、地震波によっては誤差が非常に大きく増幅される場合もあり、静的解析より誤差が大きくなる潜在的な可能性を持っている。したがって、今回示した各種解析法や解析ソフトによる解析結果は静的解析に比べ、やや広い範囲にばらつき、静的解析のような明確なベンチマークを示すことはできなかった。このようなばらつきが避けられない動的解析ソフトの妥当性を検証するための基準については今後さらなる検討が必要である。また、動的解析を設計に用いる場合、解析法によりばらつく可能性のある計算値を設計でどのように評価するかも今後の問題である。
- (5)鋼製橋脚の非線形解析に用いる構造モデルとして、はりモデル、1自由度系モデル、板・シェルモデル等がある。さらにこれらのモデルに用いる材料構成則や復元力モデルも複数提示されているので、構造モデルと材料モデルの組み合わせを考えるとかなり多くの解析モデルが可能となる。それぞれの解析モデルは適用範囲が明らかに異なっており、これらを十分理解した上で適用しなければ鋼製橋脚の終局挙動を正確に予測することはできない。各種解析モデルの適用範囲は、構造パラメータや変位量などで規定される解析範囲により定量的に設定するのが望ましい。
- (6)はり理論を用いた単柱式橋脚の耐震解析での幾何学的非線形性の影響について定量的に検討した。その結果、保有水平耐力法に用いられる静的非線形解析においては支配パラメータを明らかにし幾何学的非線形性が無視できる範囲を明確にした。動的非線形解析においては入力地震動の影響が大きく、静的解析のように最大応答変位、残留変位が微

小変位解析に比べ必ずしも増加するわけではないが、幾何学的非線形性に起因する橋脚剛性の低下と振動特性の変化の相乗作用により、幾何学的非線形性の影響が静的解析に較べかなり大きく現れる潜在的な可能性を持っている。したがって、幾何学的非線形性を無視する場合にはより慎重な検討が必要である。

- (7) 現在、非線形解析は特殊な技術であるとの認識があるが、近い将来、計算機のさらなる進歩により、一般化するのは容易に想像できる。一方で、非線形解析に線形解析と同じレベルの精度を確保するためには線形解析に比べ、非常に多くの配慮と経験が必要であり、このような点について設計技術者の理解を深めることが重要である。非線形解析は実務での適用の歴史が浅いため、今後とも継続的に非線形解析による計算例、設計例を蓄積するとともにその問題点を積極的に公開し、解決することも必要であろう。

2.4 耐震設計ガイドライン（第6章）

本章では、鋼製橋脚および鋼橋一般の耐震設計法の現状について取りまとめている。特に、単柱形式の橋脚については、実務者の設計指針となるような記述とし、また設計計算例をも付けるようにして、それを見ながら従前および最新の設計法の理解をしていただくように配慮した。本章の研究内容・成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 鋼製橋脚および鋼橋一般の耐震設計法および照査法のフローの概要を示した。
- (2) 単柱形式の橋脚の設計・照査法について述べた。その中でも、単柱形式の橋脚の設計・照査法のコンセプトをまとめ、基本設計の段階では、難しい非線形時刻歴応答解析が不要となり、震度法のみで設計できる範囲のあることを述べた。
- (3) 震度法、および非線形時刻歴応答解析法による鋼製橋脚の具体的な設計事例をまとめた。ここでは、特に、非線形時刻歴応答解析が不要となり、震度法のみでの設計でほぼ妥当な断面が求まる範囲と照査値の余裕量とを示した。これにより、提案する範囲内の通常の鋼製橋脚であれば、基本設計の段階では非線形時刻歴応答解析が不要となり、非線形時刻歴応答解析は、詳細設計時に行えばよい。この点が、本委員会・設計WGの大きな成果といえる。
- (4) 道路橋示方書および新技術委員会の方法に準拠した震度法、保有水平耐力度法、および非線形時刻歴応答解析法による、コンクリートを部分充填した鋼製橋脚の設計事例を示した。ここでは、レベル1の地震に対して鋼製断面を震度法により設計しておけば、レベル2の地震に対する保有水平耐力度法および非線形時刻歴応答解析法による照査は十分に満足されることを示した。
- (5) ラーメン橋脚の耐震設計・照査法について取りまとめた。その中で、地震後の点検・補修の点から見た、柱とはりの好ましい損傷順序、および面内方向に地震力を受けるラーメン橋脚の耐震設計法の設計コンセプトについての試案をとりまとめ、今後の設計の参考資料とした。
- (6) また、コンクリートを部分充填した柱を有するラーメン橋脚の震度法、保有水平耐力度法、および非線形時刻歴応答解析法による1つの設計・照査事例を紹介し、今後の参考資料とした。

2.5 既設鋼製橋脚の耐震補強事例（第7章）

日本道路協会、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社、福岡北九州高速道路公社より、既設鋼製橋脚の耐震補強要領あるいは関連資料の提供を受けて、補強方法の整理を行った。本章の内容をまとめると以下ようになる。

- (1)各団体とも補強工法はコンクリート充填が基本であり、地震時保有水平耐力法により耐震性を評価していることがわかった。ただし、アンカー部が損傷を受けると橋脚よりも補修・補強が困難であるからアンカー部の耐力が橋脚の耐力より劣る場合には、橋脚の耐力は増加させず変形性能のみを増加させる鋼断面補強を行うこととしている。
- (2)コンクリート充填高さについては、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、福岡北九州高速道路公社は道路橋示方書のコンクリート充填橋脚に準じた評価を行い、鋼断面が降伏しない高さまでコンクリートを充填するとしている。
- (3)名古屋高速道路公社は土木学会・新技術小委員会の方法を適用して、柱の基部にコンクリートを部分充填した鋼製橋脚の耐震性を評価できるものとしている。
- (4)鋼断面補強の基本思想は縦方向補剛材および横方向補剛材で補剛された補剛板の変形性能と強度を改善することで、すべての団体とも同じである。ただし、既設橋脚が建設された当時の道路橋示方書Ⅱ・鋼橋編の座屈関連規定に違いがあり、各団体の鋼断面補強方法はこの違いを反映したものになっている。
- (5)首都高速道路公団では板パネルの座屈パラメータが大きい場合に縦方向補剛材を追加し、さらに変形性能の改善が必要な場合には縦方向補剛材の剛度アップや横方向補剛材の追加を行う。
- (6)阪神高速道路公団では首都高速道路公団の補強方法の他に、座屈パラメータが制限値以内にある場合の変形性能改善方法として角補強を取り入れている。
- (7)名古屋高速道路公社では建設時期が比較的新しいため、縦方向補剛材の剛度アップを基本としている。福岡北九州高速道路公社も比較的新しく、補剛板の変形性能改善法は角補強を基本としている。
- (8)耐震性の評価法は各団体とも地震時保有水平耐力法が基本であり、動的解析を併用して照査している。ただし、阪神高速道路公団と福岡北九州高速道路公社は鋼断面補強に対して地震時保有水平耐力法は適用せず、動的解析によるものとしている。
- (9)すべての団体の耐震補強要領においても、アンカー部を補強することには制約が多く工事規模大きくなることから、できるだけアンカー部の補強を避ける方法が検討されている。したがって、既に道路橋示方書に取り入れられていることであるが、新設橋脚においてはアンカー部の耐力に余裕を持たせておく必要がある。
- (10)既設橋脚の補強として採用されたコンクリート充填は極めて容易であるので、鋼製橋脚はある意味では補強の容易な構造である。今後、新設橋脚あるいは橋梁システム全体に対しても補修・補強の容易な構造を予め考えておくのが望ましい。当然のことながら、基準に示された地震動に対して破壊しないように、または限定された損傷以内となるように設計するのであるから、想定地震動の範囲内では補強、大きな補修は必要ないかもしれない。しかし、工学的には、想定以上の地震動発生の可能性や、予想外の挙動による損傷にも対処できるように、補修・補強のための技術開発（工法や現実の挙動をより忠実に再現する解析法など）を進める必要がある。