

第3編 鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化 (第3・5分科会)

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、その後に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のようなになる。

(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. 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次のようになる。

(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、通常的设计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。

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なになる。

- (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、信頼の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。

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のようなになる。

- (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。そこでは、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。

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のようになる。

- (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。

6. 今後の研究課題（第8章）

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まとめる。

6.1 設計法に関する課題

鋼製橋脚

- (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，逆し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荷力以外の観点からの限界状態を明確にする必要がある。

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。

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) 地震入力の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。

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である。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場合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2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。

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あり、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。

6.2 性能評価法に関する課題

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。

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

- ・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。
- ・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。

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。

6.3 新技術の適用

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。

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。

6.4 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。そうなれば、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、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。