

CALTRANS における橋梁構造物の 非線形解析ガイドラインについて

株式会社クレアテック 大瀧 健

1. はじめに

構造物の複雑な挙動を再現する上で、数値解析は欠かせないツールであり、解析手法も年々高度化してきている。また、優れたプリポストの出現によって、多くのエンジニアが容易に数値解析を行えるようになる一方で、得られた解析結果の信頼性をいかに確保するかということについて、V&V (Verification & Validation) という方法論のもとに議論されていることは前報¹⁾で述べたとおりである。国内外でもこの動きは活発であり、その成果は各種委員会活動やガイドラインの出版によって情報発信されている^{2)~5)}。また、解析結果にばらつきが生じる大きな要因の一つが解析対象のモデル化の違いであることが指摘されており⁶⁾、モデル化のルールについての共通認識を持つことが重要である。そこで、ここではカリフォルニア交通局(CALTRANS)より出版されている「橋梁構造物の非線形解析ガイドライン」⁷⁾ (以下、ガイドライン) を取り上げ、解析の前提条件やモデル化のルール、解析手法の選定等についてどのようにまとめられているのかを概説する。

2. ガイドラインの構成

本ガイドラインは、標準的な高速道路橋や立体交差等の耐震設計、耐震性能評価に必要な数値解析モデルの作成および解析手法について、一般的な推奨事項を取りまとめたものである。そこでは橋梁の現実的な地震時挙動を把握するためには非線形解析が必要不可欠であり、かつ質量分布や形状特性、軸力変動等を考えた場合、3次元モデルとすることが推奨されている。一方、解析が高度化するほど計算量が増えるとともに結果の解釈が難しくなり、また計算結果がパラメーターの設定に対して敏感となるため、エンジニアは非線形解析の基本概念を明確に理解し解析モデルを作成す

ることが求められる。以上のことを総合的に検討した結果として、本ガイドラインは解析モデルの複雑さと、対応する結果の精度のバランスを考慮することによって、解析モデル作成における推奨事項をとりまとめている。

第2章「Bridge Modeling」では構造形状の簡素化、要素と材料の定義、質量と境界条件の割り当てなどに関する一連の推奨事項について述べ、橋脚の塑性ヒンジのモデル化における必要事項、境界条件や基礎のモデル化について記載されている。

第3章「Bridge Analysis」ではモード解析やプッシュオーバー解析、応答スペクトル解析、時刻歴解析を実施するための手順とパラメーターについて述べるとともに、解析で得られた結果を検証するための方法論についても述べている。なお、本ガイドラインは設計を目的とするものではなく、橋梁に要求される耐震性能を評価するための非線形解析の実践的な手順を示すことにある。ここでは、ガイドラインに記載されている橋梁構造物の耐震解析のためのモデル化について、主要な点を抜粋して報告する。

3. 解析モデルの作成ルール

3.1 形状寸法と要素分割

まずモデル化を始めるにあたって必要となる橋梁全体系の構造、形状等を表す各種寸法、断面情報等のパラメーターに加えて、橋梁を構成する柱、梁等の各種部材や境界条件の挙動を定義するための配筋情報や材料物性値、基礎、支承等の条件が列挙される。次にモデルの全体座標系および要素ごとの座標系を推奨している(図-1)。また、断面中心を軸線とした3次元骨組みモデルを基本としているが、解析対象によってはシェル要素や骨組み要素を格子状に組み合わせたモデルへ拡張することも想定している。

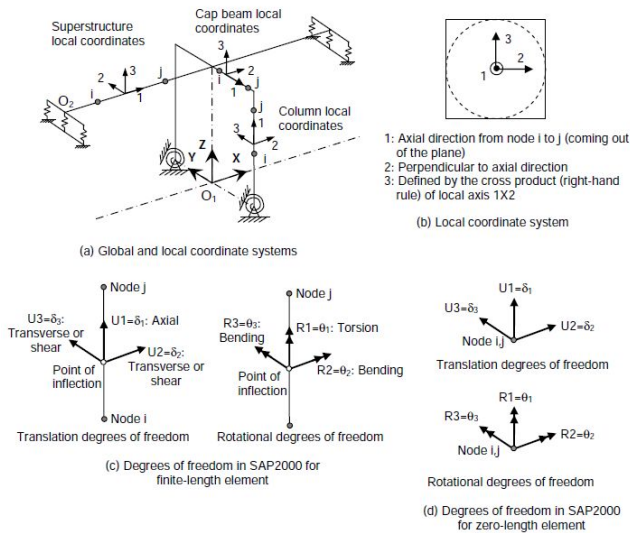


図-1 モデル座標系

骨組みモデルの節点は部材断面の軸線に沿って配置し、要素分割は分担長に応じて質量が割り当てられるため、質量の分散性を考慮して等分割を基本とし、最低5分割することを推奨している

上部構造の回転慣性は、特に橋軸直角方向の応答に及ぼす影響が大きいため重要である。また、ねじりが主要な振動モードとなる場合には橋脚の回転慣性についてもこれを設定する必要があるとしている (図-2)。

$$M_{xx} = \frac{Md_w^2}{12} = \frac{(m/L)L_{trb}d_w^2}{12}$$

$$M_{zz} = \frac{1}{2}MR_{rot}^2 = \frac{(m/L)L_{trb}D_c^2}{8}$$

図-2 上部構造および橋脚の回転慣性

3.2 上部構造のモデル化

上部構造は基本的に弾性範囲内に留まることを想定して設計されるため、ひび割れを想定した等価剛性を持つ線形梁要素としてモデル化する。一般的に断面緒元はプログラム内で自動計算されるが、せん断有効面積は上部構造の変形モードに大きく影響する場合があるのでその定義には注意を要する。また、曲げ剛性やねじり剛性についても有効剛性 ($I_{eff} = 0.5I_g \sim 0.75I_g$) を使用するが、プレストレストボックスガーダーのように正曲げと負

曲げで有効剛性が大きく異なるようなケースでは全断面有効 ($I_{eff} = I_g$) とすることを推奨している。また、橋脚近傍におけるボックスガーダー等の上部構造については、せん断遅れによる剛性低下を有効幅に基づいて評価することとしている。

3.3 橋脚のモデル化

鉄筋コンクリート橋脚の剛性はひび割れを想定した有効剛性 (曲げ: $I_{eff} = M_y/E\phi_y$; ねじり: $J_{eff} = 0.2J_g$) を基本とする。橋脚に作用する曲げモーメントは構造形式および境界条件等によって様々であるが、常時荷重を考慮した静的解析によって、モーメント分布を把握することにより、想定される塑性ヒンジの発生個所を特定することができる。理想化された塑性ヒンジ領域は、塑性モーメント及び曲率が一定と仮定した塑性ヒンジ長 L_p を有する独立した要素でモデル化する。(図-3)

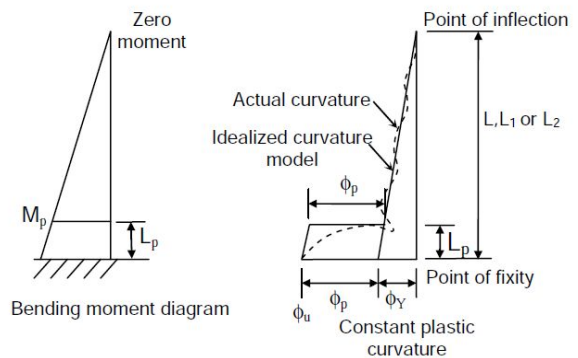


図-3 塑性ヒンジの設定

塑性ヒンジ領域に設ける非線形特性の設定位置は塑性ヒンジの中央に一箇所とするか、 $L_p/2$ の端部2箇所に設定する場合があるが (図-4)、いずれも同様な結果が得られる。

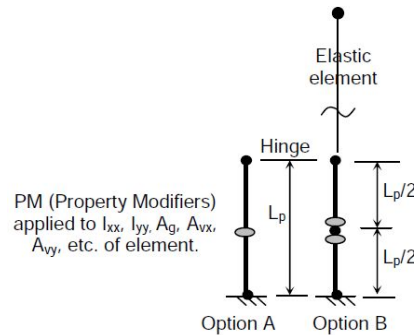


図-4 塑性ヒンジ領域のモデル化

なお、非線形時刻歴解析において、収束性の問題が発生した場合の解決方法として、剛性低下後

の勾配をユーザーが応答解析の結果を見ながら調整する方法のほかに、塑性ヒンジ領域の要素分割をある程度小さくして、節点に付加的な回転質量（実質的な応答に影響を与えないよう、 $1e-3$ 以下）を与える手法を紹介している。

橋脚の塑性ヒンジ領域におけるモーメント曲率関係を求める解析では、コンクリートの応力ひずみ曲線はコアコンクリートおよびかぶりコンクリートそれぞれについて Mander et al(1988)モデル⁸⁾を使用することを推奨している。また、鉄筋の応力ひずみ関係には降伏後のひずみ硬化を考慮したモデルとすることとしている。解析の結果得られたモーメント曲率関係は図-5のようになるが、これを次の手順でバイリニアモデルとし、履歴特性の包絡線とする。

- 原点と初降伏点 (ϕ_y, M_y) を結ぶ直線を初期勾配とする
- 鉄筋あるいはコンクリートの終局ひずみに対応する終局点 (ϕ_u, M_u) と初降伏モーメント M_y の間で図-5に示す面積が等しくなる塑性モーメント M_p を求める
- 橋脚の公称曲げ降伏耐力 M_{ne} を算定し、初期勾配上の公称降伏点 (ϕ_Y, M_{ne}) を求める
- 原点 (0, 0)、公称降伏点 (ϕ_Y, M_{ne})、塑性耐力点 (ϕ_u, M_p) を結ぶ折れ線をバイリニアモデルとする

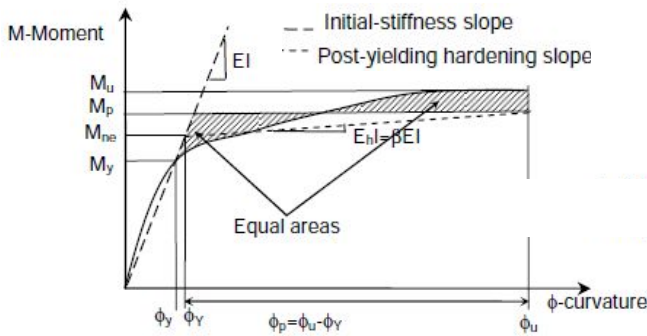


図-5 モーメント曲率関係

3次元解析では構造系が立体的に挙動するため、橋脚断面には変動軸力が作用し、また主軸（橋軸、橋軸直角）方向以外に外力が作用するケースが生じるため、橋脚の非線形特性を設定するうえで、これらを適切に反映することとしている。2軸曲げおよびMN相関による軸力変動を考慮した復元力特性を用いない場合にはファイバーモデル（図-6）を使用することを求めている。

ただし、ファイバーモデルではせん断やねじり特性が基本的に弾性扱いとなることに注意する。また、鉄筋のひずみ硬化を考慮した応力ひずみ関係を用いる場合、せん断力等は M_u に対応した応答が算出されるため、目的によってはスケールダウン (M_p/M_u) を行う等の評価を要する。

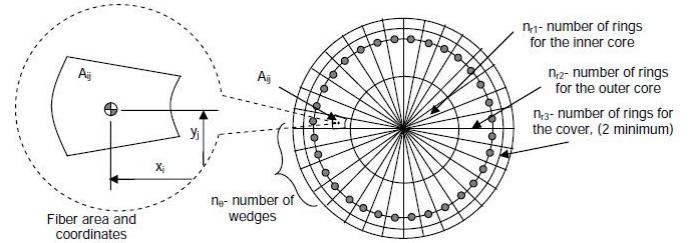


図-6 ファイバーモデルによる断面分割例

3.4 境界条件

地盤と基礎の動的相互作用は、橋梁の応答に及ぼす影響が大きい。ガイドラインではこの動的相互作用の影響すべてを考慮することは実用的ではないが、技術者は動的相互作用が橋梁系の支持ばねへ及ぼす影響やエネルギー散逸をもたらすことを認識しておく必要があるとしている。したがって橋脚基礎には基礎ばねを設定することを基本とし、散逸減衰として 15~20% を考慮することとしている。基礎ばねは基礎の形式や地盤条件等に応じて、ピン支持とするかばね支持とするかなど、適切に設定する必要があるが（図-7）、基礎の拘束度合いが橋脚のモーメント反曲点位置や作用せん断力に影響を及ぼすことを認識したうえで解析目的に応じて決定する必要がある。

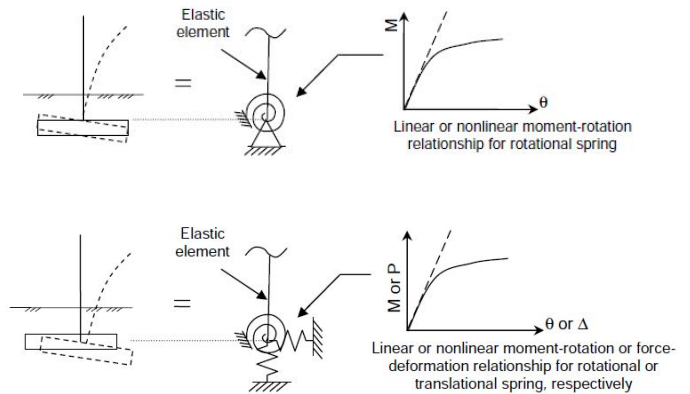


図-7 基礎ばねのモデル化

上部構造の両端をピンローラー境界（橋台をモデル化しない）とした場合、橋梁の耐震性能は塑性ヒンジの形成とその塑性変形能によって決まり、プッシュオーバー解析によって橋軸方向および橋軸直角方向の耐力および変形性能の下限値を計算することができる。このような解析により解析モデルの妥当性を検証することができるが、上部構造端部の拘束条件によって単柱形式の場合とラーメン形式の場合で橋脚のモーメント分布が大きく異なるので注意する必要がある（図-8）。

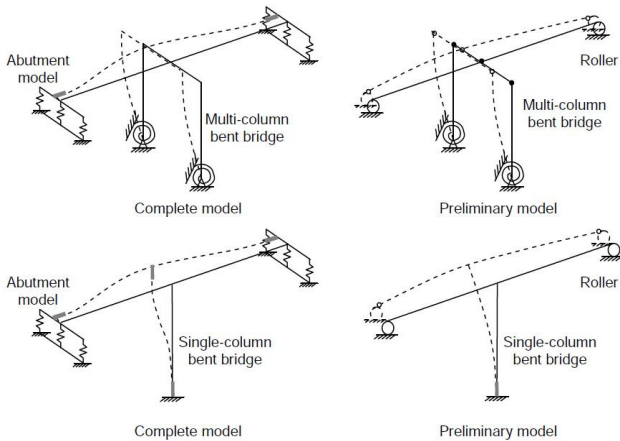


図-8 上部構造端部の支持条件の影響

一般的に上部構造のスパン長が短く剛性が高い場合には、土圧や地盤の非線形性が橋梁系の応答に与える影響が大きいため、上部構造と橋台を連結する支承、橋台を構成する部材（パラペット、ウイング、杭、土圧等：図-9）の抵抗を直列あるいは並列に連結したばねでモデル化することを推奨している。例えば橋台の（土重量を含めた）質量は橋梁系の振動モードに大きく影響するため、プッシュオーバー解析の荷重パターンのみならず、時刻歴応答解析の結果にも影響を及ぼす。

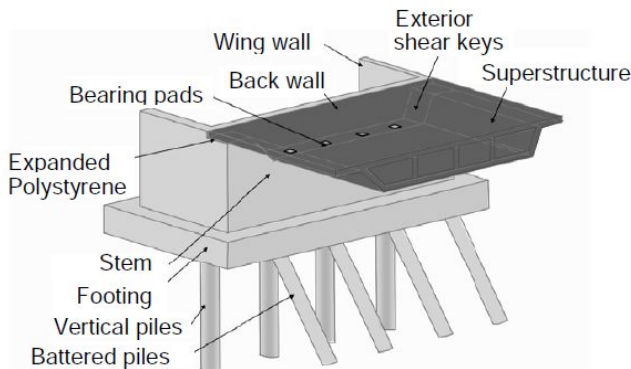


図-9 橋台を構成する部材

橋台を詳細にモデル化するためには、質量、剛性、非線形履歴挙動等のすべての主要な抵抗メカニズムを表現する要素が必要となる。これらは図-10に示すように、上部構造の中心に接続された長さ d_w （上部構造の幅）の剛な要素を介して橋軸方向、橋軸直角方向、および鉛直方向にそれぞれ非線形特性を反映したばねを設定することによってモデル化することができる。ここに、橋軸方向および橋軸直角方向の非線形ばねは、支承、せん断キー、ギャップ、ウイング、堅壁、杭、および背面土の抵抗を直列あるいは並列系とした一連のばねモデルとし、鉛直方向の非線形ばねは支承および基礎系の鉛直剛性を考慮したモデル（図-11）とすることができる。また、支承やギャップが均等に配置されている等、単純な場合には、これらを簡略化して、その剛性や強度を代表させたばねに置き換えることもできる。さらに橋軸方向の支承をローラーとし、橋軸直角方向のせん断キーの抵抗を無視することも考えられる。

以上のように橋脚と上部構造、橋脚と基礎、基礎と地盤等に付与すべき境界条件は、橋梁全体系の安定性や解析目的と解析精度のバランスを考慮して詳細にモデル化するのが望ましいが、特に基礎と地盤については、橋台背面土の影響やこれらの動的相互作用の影響など不明な点も多く、さらなる調査研究が必要であるとしている。

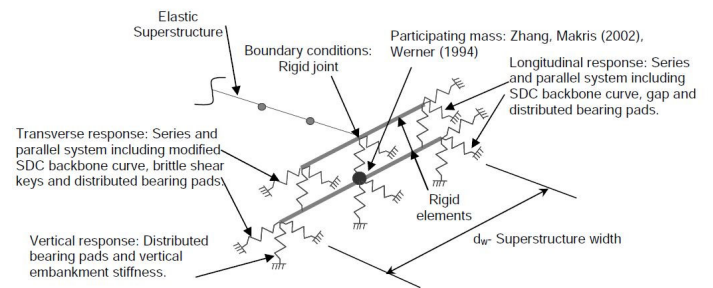


図-10 橋台の詳細モデル

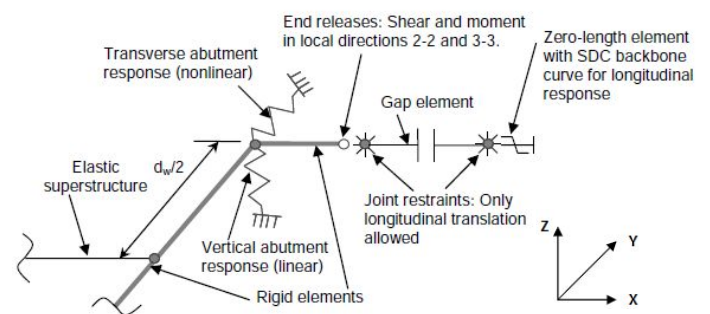


図-11 橋台を構成する非線形ばね

3.5 その他

ガイドラインではその他の解析上の注意点として、減衰、P- Δ 効果、伸縮継手等について言及している。減衰については通常の鉄筋コンクリート橋脚では3~5%、プレストレスト上部構造を有する橋梁では5~7%、強震動下で履歴応答が想定される橋梁では7~10%の減衰定数が推奨されている。また、基礎構造では8~20%を提示している。幾何非線形性やP- Δ 効果を通常の橋梁において考慮することは少ないが、地震時において大変形が想定される橋梁についてはこれらを考慮することにより、橋脚の耐力低下やそれに起因する橋梁の構造的不安定性を特定することができる。上部構造セグメント間における伸縮継手の開閉は、荷重経路に影響を与える非線形性と不連続性をもたらし、したがって橋の動的応答に影響を与えるため、これをギャップ、フック、またはマルチリニア等の非線形ばねでモデル化することを推奨している。

以上、ガイドラインの第2章「Bridge Modeling」で詳細に説明されている「標準橋」の主なモデル化のルールをまとめると図-12のようになる。

4. 解析手法について

モデル化が終了した後、剛性、固有周期、モード形状等によって作成した解析モデルが妥当であるかを確認し、耐震解析によって橋梁の耐震性能を評価することになる。

ここで、橋梁の非線形挙動の評価は橋梁の重要度や要求性能、幾何形状、地盤条件等によって異なるが、非線形動的解析には多大な計算と解析の労力が必要となるため、線形解析や静的非線形解析によって補完し、検証することが重要となる。すなわち、地震動、地盤と構造物の動的相互作用、構造物の非線形特性等の不確実性によって生じる動的解析における各種の誤差は、設計上は様々な係数によって補償されているが、より現実的な結果が求められる耐震性能評価においては、技術的考察と判断によってその原因を特定する必要があることから、簡略化した解析モデルや解析手法によって多面的に検証することを推奨している。

そこでガイドラインでは、橋梁の重要度に応じて表-1に示す解析手法を適宜選択して検証することとしており、それぞれの解析手法の特徴や適用性等について詳細に記載している。特に重要な

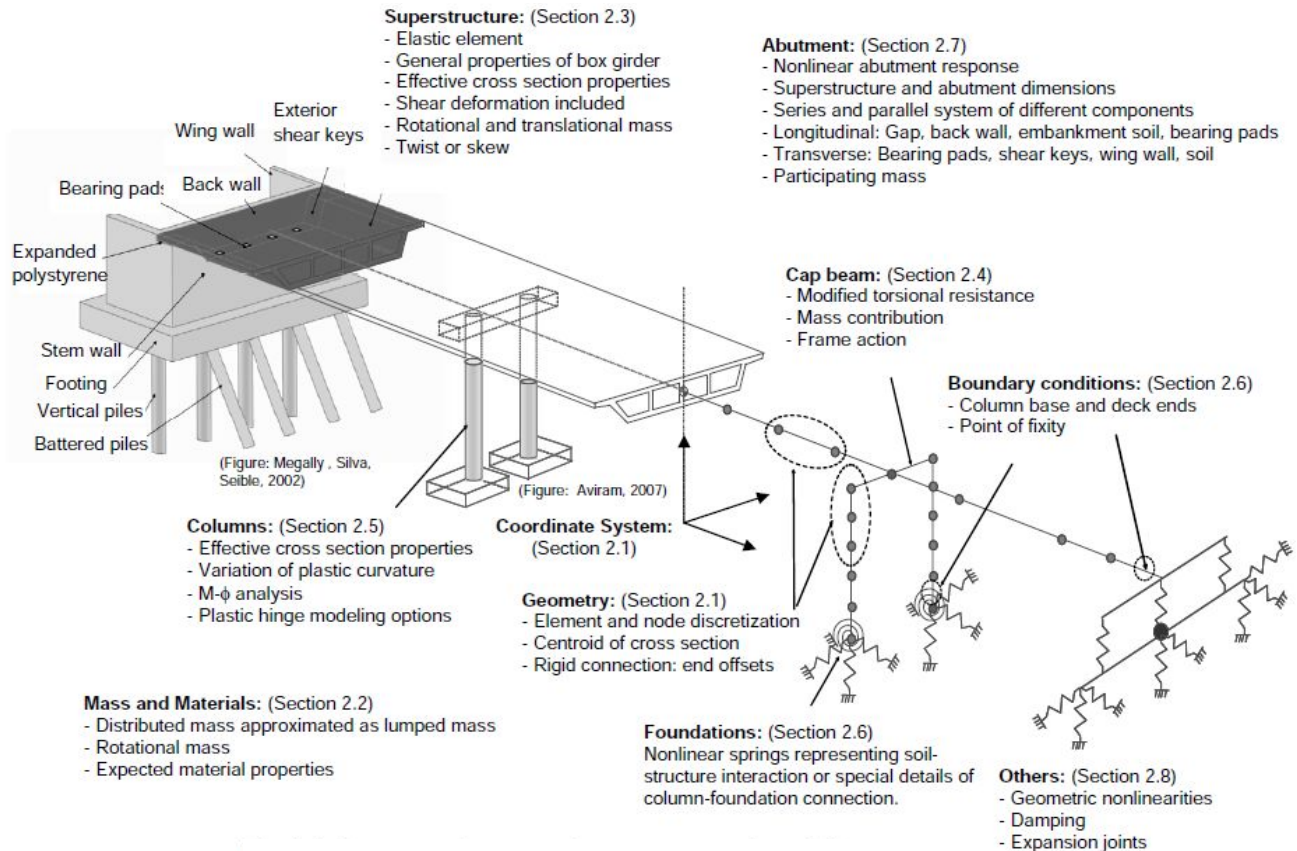


図-12 橋梁の構造要素とモデル化の考え方

橋梁については非線形動的解析に加えてプッシュオーバー解析を行うことを推奨している。

表-1 橋梁の重要度と解析タイプ

Bridge Classification	Nonlinear Static		Dynamic		
	Equivalent Static Analysis (ESA)	Incremental Static Analysis (Pushover)	Response Spectrum Analysis (RSA)-Linear	Time History Analysis (THA)-Direct integration	
				Linear	Nonlinear
Ordinary Standard	A	R	A	A	A
Ordinary Nonstandard	N	R	A	A	R
Important	N	R	A	A	R

N: Not acceptable analysis type
A: Acceptable analysis type
R: Acceptable and strongly recommended analysis type, not necessarily comprehensive

動的解析結果は使用する地震動特性の影響を受けるため、複数の想定地震動を作用させる必要があり、一般的には橋軸方向及び橋軸直角方向に地震動を作用させることによって、それぞれ最大応答値を得ることができる。しかしながら、対象構造物が3次元的に複雑な形状を有する場合には、地震動の入力角度を変えた複数の解析を行うか、あるいは地震動の3方向成分を同時に入力する等の解析を行う必要がある。解析で得られた最大応答値は入力地震動が3波形の場合には3波平均値もしくは3波中の最大値、7波形の場合には得られた結果の中央値を用いて評価することとしている。

最後に数値解析モデルは材料非線形性および幾何学的非線形等の影響を直接反映するものであって、得られた結果は、作用させた地震動に対する応答値の妥当な近似にすぎない。したがってエンジニアは結果の解釈に細心の注意を払う必要があると述べている。なお、ガイドラインに示される材料物性値やその他の算定式等は適宜 SDC2004⁹⁾、ACI318¹⁰⁾、ATC-32¹¹⁾、AASHTO¹²⁾等の基準を参照するようになっている。

5. おわりに

本報では、数値解析モデルを作成するうえで参考となる CALTRANS のガイドラインをレビューした。ここでは概要の記述となったが、エンジニアとして橋梁構造物をモデル化する際に注意すべき点が詳細に述べられるとともに、SAP2000¹³⁾および OpenSees¹⁴⁾による解析例、検証例が掲載されており、説得力のあるものとなっている。道路橋示方書の耐震設計偏¹⁵⁾やその他の設計例等においても解析モデルの考え方や事例の記述があるが、橋梁構造物の特性や設計思想において日米の違いはあるにせよ本ガイドラインを参考として、より合理的で妥当性のある解析モデルを作成することが重要であり、また解析結果の信頼性向上に寄与す

るものとする。

参考文献

- 1) 大瀧 健：数値シミュレーションにおける信頼性の確保について、(株)クレアテック第8回技術発表報告会講演論文集，2020.7.
- 2) 日本計算工学会：工学シミュレーションの品質マネジメント第3版，2017.3
- 3) 日本原子力学会：シミュレーションの信頼性に関するガイドライン:2015，2016.7
- 4) 地盤・構造物の非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法の体系化に関する研究小委員会・活動報告,土木学会地震工学委員会第1回研究会,2020.5
- 5) 日本コンクリート工学会：コンクリート工学におけるシミュレーションの検証と妥当性確認に関するFS委員会, JCI-TC195F
- 6) 後藤芳顕：構造設計における FEM 解析の高度化と信頼性向上，第15回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文集，2012.8
- 7) CALTRANS：Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California,2008.8
- 8) Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of the Structural Engineering, 114(ST8): 1804–1826.
- 9) Caltrans Seismic Design Criteria 2004
- 10) ACI 318 (2005). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. ACI Committee 318. American Concrete Institute, Michigan.
- 11) ATC (1996). Improved seismic design criteria for California bridges: provisional recommendations. ATC Report No. ATC-32. Applied Technology Council.
- 12) American Association of State Highway and Transportation Officials (2002). AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges. 17 edition. AASHTO, Washington, D.C.
- 13) SAP2000: <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>
- 14) OpenSees: <http://opensees.berkeley.edu>
- 15) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2017.12