

京コンピュータを活用した都市高速道路における 地震後の損傷推定に関する研究

森下宣明¹・中尾健太郎¹・野中哲也²

¹正会員 名古屋高速道路公社 総務部総務課（防災）（〒462-0844 名古屋市北区清水4-17-30）

²正会員 博（工） 株式会社耐震解析研究所（〒466-0059 名古屋市昭和区福江2-9-33）

1. はじめに

近年、南海トラフの連動型巨大地震の発生確率の高まりが指摘されている。都市高速道路のような連続高架橋からなる構造物においては、そのような大規模地震に対しては、事前の耐震補強の重要性は言うまでもないが、発生後の体制や被害予測システムの対応強化による二次被害の極小化も非常に重要であると考えられる。

名古屋高速道路は緊急輸送路として指定されており、被災地区の消防、救助活動および避難民への救援物資配送等の観点からきわめて重要な路線となる。そのために、発生後の名古屋高速道路を早期に使用するための素早い判断が道路管理者として求められることとなる。

高架橋の地震後点検支援システム（以下、「本システム」と呼ぶ）は、大規模地震直後の構造物の被害状況を推定し、高架道路の使用性の判断を早い段階で行うためのものである。具体的には、大地震発生直後、名古屋高速道路の数箇所にて観測された地震波を用いて、どの路線の構造物がどの程度被害を受けているかを推定し、点検箇所の優先度を示してくれるものである。

名古屋高速道路公社（以下、「公社」と呼ぶ）においては、兵庫県南部地震を受けて耐震補強を実施した路線37.9kmに対して、東日本大震災の発生より前の平成15年から本システムの開発を進め、平成17年に完成させ運用を開始している。本システムの構築にあたっては、耐震補強の際に作成した動的解析の骨組みモデルを有効的に利用している。本システムの内部処理としては、巨大地震等の想定される地震動を入力として、実際に地震応答解析を実施して

いる。耐震補強を施した対象路線の橋梁が約1,200経間（上下線一体桁の場合は一つの経間として計上）と膨大であるため、これまで通常のコンピュータを用いて長時間の解析を実施してきたが、今回はこの解析にスーパーコンピュータ「京」を活用しようというものである。本論文では、本システムの概要を説明し、試験的に「京」を使用したもので、その結果も紹介する。

2. 対象路線と地震計設置箇所

本システムの対象路線としては、図-1に示す路線のうち、兵庫県南部地震以前に設計・建設が完了、その後に耐震補強を施した都市環状線、楠線、東山

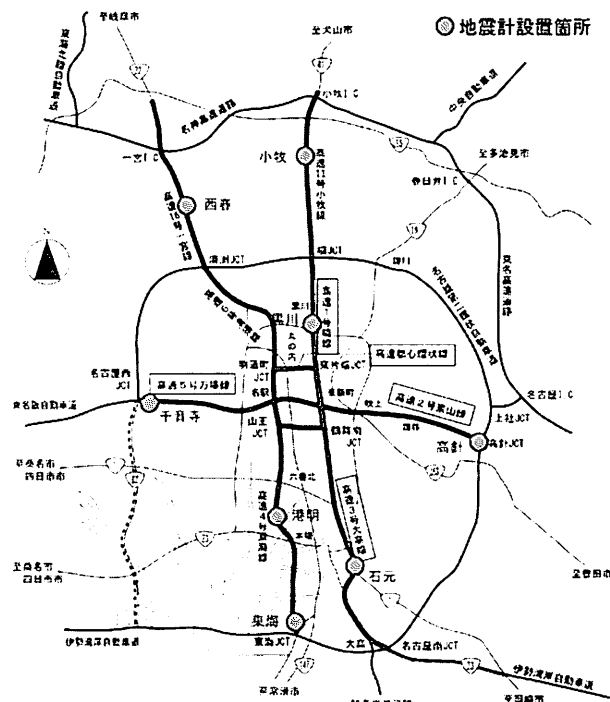


図-1 対象路線と地震計設置箇所

線、大高線、万場線の5つの路線を現時点では対象としている。また、同図には公社が設置した地震計も合わせて示している。

なお、名古屋高速道路にはトンネル・半地下構造も存在するが、本システムでは地震の被害を受け易い構造物として高架橋を対象とする。

3. 本システムの機能概要

(1) 判定処理

本システムは、大地震発生直後、地震計から取り込んだ観測地震波をもとに、事前に作成された対象路線内の実高架橋の動的解析モデルに対して、損傷推定、応答解析および判定処理を行い、すみやかに対象橋梁の損傷位置や程度を推定し、点検箇所や優先度を示すことを目的としている。本システムを用いた点検の流れを示すと図-2のようになる。

1次判定は、気象庁が発表する震度、および公社の地震計から得られた震度を参考に、本システムで予め震度階毎に作成・出力した名古屋高速道路点検支援マップ（図-3参照）を利用して、緊急車両の通行可否や点検の要否、および点検員の確保等の判断を行う。この処理では予め出力したものを利用するためシステムを地震直後に操作する必要はない。

2次判定は、大地震発生後、観測地震波を本システム内に読み込み、観測地震波の特性の分析を行う。そして観測地震波の特性に最も近い人工地震波を選択し、人工地震波による高架橋の応答特性および判定結果をもとに構造物の損傷程度を推定する。2次判定においては、前述の1次判定に比べ、点検が必要と判断した根拠や点検箇所の範囲を拡大して表示することになる。なお、この2次判定に利用する人工地震波の生成やその応答特性の算出処理については、後述する。

さらに、3次判定では、実際に観測された波形を用いて応答解析を実施して、この応答解析結果をもとに詳細な判定を行う。そのため、2次判定より判定精度は高い。

(2) 本システムによる損傷推定箇所

本システムでの損傷推定は、基礎や橋脚、支承、落橋防止システム等耐震上重要な箇所を対象としており、図-4および表-1に示す箇所である。大地震発生後の路上点検では、点検支援マップの内、路上点検マップを使用し、路下点検では梁上点検マップおよび路下点検マップを使用することになる。

(3) 各判定とその活用の例

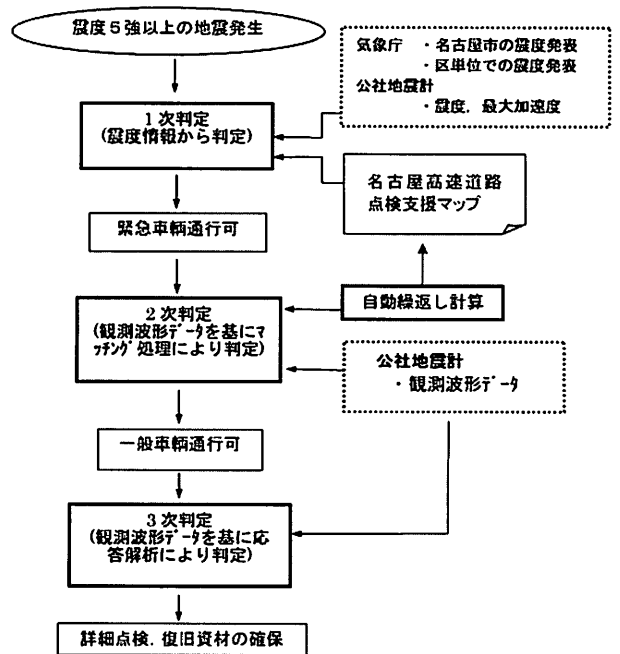


図-2 点検の流れとシステムの大きな流れ

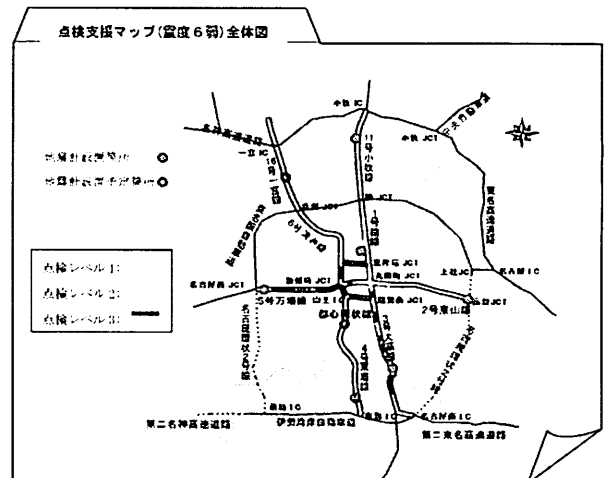


図-3 名古屋高速道路点検支援マップのイメージ

まず、1次判定とその想定活用例について示す。災害対策本部（以下、「本部」）より、点検支援マップ（紙ベース）をもとに、点検者へ点検の指示を出す。点検者は、その指示を基に、まず巡回車上より、損傷している可能性があるところを重点的に点検し、路上の段差、障害物がないかどうか把握を行う。また、別の点検者は、構造物の異常や損傷がないかどうか、路下および梁上の点検作業を行う。路上、梁上および路下の点検支援マップの例を図-5に示す。

次に2次判定の活用例を示す。2次判定においては、点検支援システムを稼働させて、観測された地震波を分析し蓄積している波形とマッチング処理を行い、損傷している場所やその程度を推定する。1次判定に比べ、高い推定精度の情報が出力される。

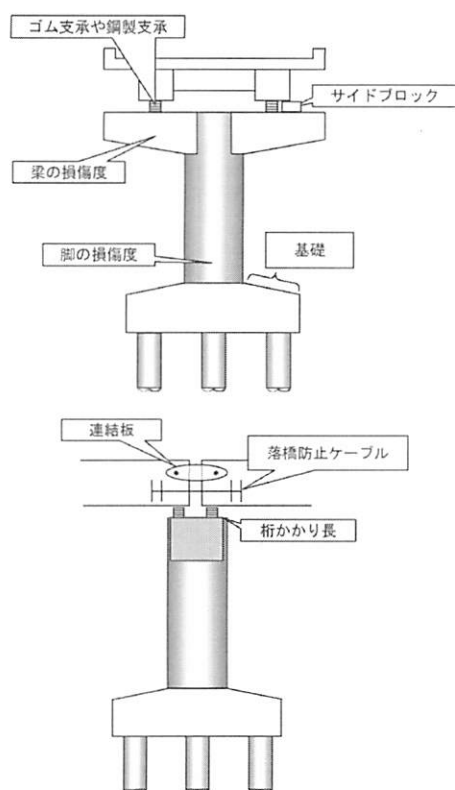


図-4 本システムの点検箇所

表-1 本システムの評価項目

点検	マップ種類	点検支援システムの評価項目	想定される損傷状況
路上	路上点検マップ	桁遊間 連結板 落橋防止ケーブル	路上の段差, 障害物 高欄, 地覆の ずれ
路下	梁上点検マップ	ゴム支承 鋼製支承 サイドロック	支承の変形, 破壊
	路下点検マップ	桁かかり長 柱の損傷度 梁の損傷度 アンカーおよび 基礎	柱, 梁および 桁の損傷 柱基部近辺の 地盤の異常

その情報をもとに、本部から、点検者へ点検の指示を出し、詳細に点検業務を行う。図-6に、点検支援システムを稼働させて、2次判定を行っている出力イメージを示す。

最後に3次判定の想定活用例について説明する。3次判定では2次判定と同じ観測地震波を用いるが、2次判定と3次判定の差は、判定処理の方法において異なる。過去の計算結果を用いて観測波形と最も近い結果を示すのが2次判定であり、観測された地震波による応答解析を実施し、その結果をもとに詳細な判定処理を行うのが3次判定である。そのため、判定精度を考慮して安全係数が2次判定と3次判定



図-5 1次判定で用いる点検支援マップの例

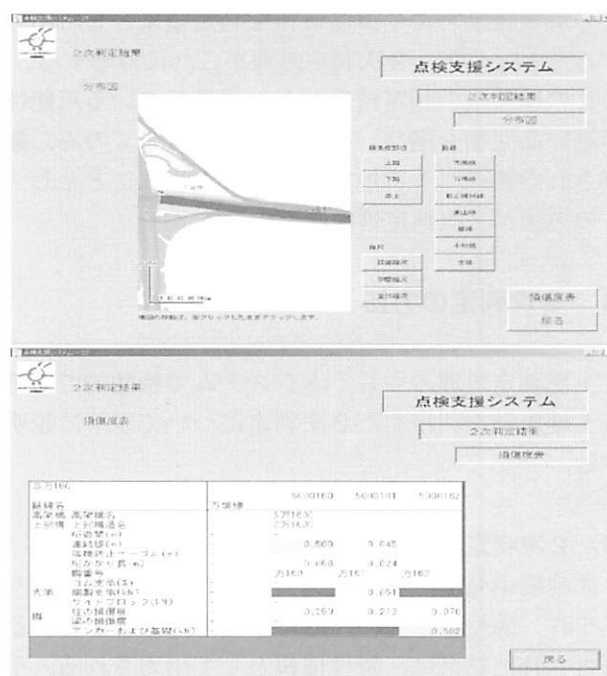


図-6 2次判定における本システムの表示例

で異なり、判定結果にも多少の差がでてくる。3次判定の方が、2次判定に比べ、システムが必要と判断した点検箇所は少なくなり、また、その判定精度は高くなっている。

この3次判定は、高架橋が損傷した高架橋に対して、復旧用資機材の調達や応急復旧の計画および実施のためにある程度時間をかけて行うことを想定している。

4. 本システムの判定処理の考え方

本システムは、予め用意した解析モデルに対して、地震計から読み込まれた観測地震波を用いて応答解析を行い、その解析結果をもとに損傷位置や程度を推定するというものである。その処理概要を示すと、図-7のようになる。

名古屋高速道路では、これまで数多くの耐震設計や耐震補強を進めてきており、その時に作成した上部構造、下部構造を含む全体系の動的応答解析モデルを用いて、効率よく本システムの解析モデルを作成することになっている。応答解析で使用する入力地震波については、地震計から読み込まれた観測地点の波形が基本になる。

しかし、この方法にて、全ての対象路線の地震応答解析を実施すると膨大な時間を必要とするため、大地震直後には利用できない。そのため、本システムでは判定処理をすばやく行うために、予め数多く生成した人工地震動に対する動的解析を実施し、その解析結果および損傷情報を格納しておいて、大地震後に、実際の地震動と動的特性が近い波形を選び、その解析結果および損傷情報を判定結果として出力することとした。2次判定処理がこれに対応する。

この速報版の判定結果から、損傷している可能性が高い高架橋を選び、その高架橋に対してのみ、観測された波形による地震応答解析を行うこととし、この方法が3次判定処理に対応する。

5. 2次判定の方法

上記判定処理のうち、本システムで特徴的である、人工地震動を利用した2次判定について以下に説明する。

(1) 2次判定の概要

大地震が発生すると、地震計から観測波形が取り込まれ、速やかにその波形の動的特性が分析される。分析された結果は、特性情報として出力される。その特性情報としては、最大加速度、周波数特性、継続時間および応答スペクトルなどが挙げられる。例として、仮定の観測波形とその応答スペクトルを示すと図-8のようになる。この図から、周期が0.35秒、0.75秒近辺の高架橋の応答値が大きくなるという特性がわかる。

この特性情報をもとに、波形マッチング処理が行われ、数多く人工地震波のなかからもっとも動的特性が近い波形を選ばれる。例えば、応答スペクトル

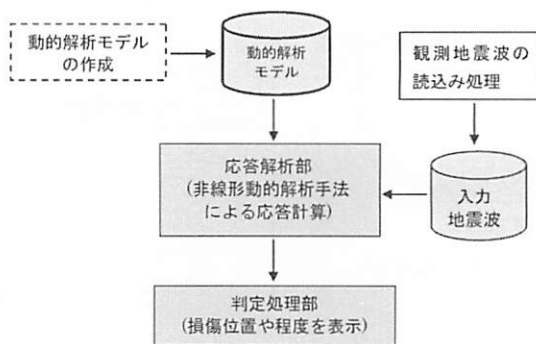
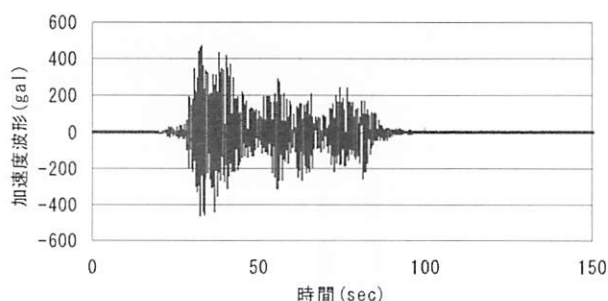
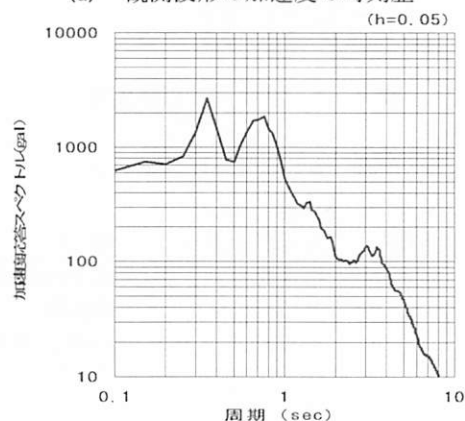


図-7 本システムの大きな流れ



(a) 観測波形の加速度の時刻歴



(b) 応答スペクトル

図-8 観測波形とその特性

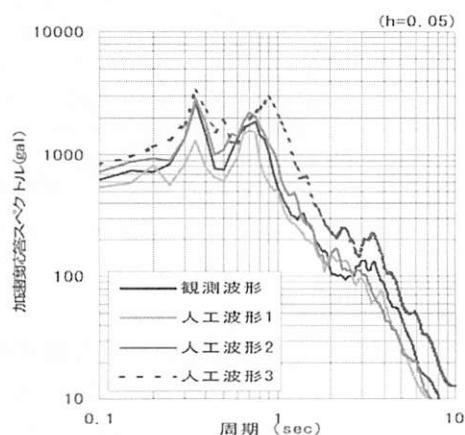


図-9 マッチング処理に用いる応答スペクトル

を用いてのマッチング処理としては、図-9に示すようなグラフから判定される。このグラフは、先ほどの仮定の観測地震波と後述するような方法で作成し

た人工地震波のそれぞれの応答スペクトルを示している。この例では、人工波形2がもっとも近く、マッチングしたと判定されたことになる。

(2) 自動繰り返し計算（2次判定処理の事前準備）

図-10に示すように、大地震が発生するまで、自動的に人工地震波の生成、動的解析および損傷の判定を、人手を介さず繰り返し行う。すなわち、各路線の高架橋に対して、大地震発生直前まで、さまざまな地震を「体験」させておくことにする。図内の人工地震波以外の処理は、前述の図-7とほぼ同じである。この人工地震波は、震源断層から作成する地震波である。

具体的には、図-11に示すようになる。まず、ひとつの断層パラメータから強震動生成プログラムにより工学基盤面上（1km単位）の波形を生成し、その波形を地盤解析プログラムにより各高架橋位置および地震計位置で地表面波形を求める。次に、地表面波形を入力とする高架橋の地震応答解析を実施して、その解析結果をもとに判定する。最後に判定結果を保存して、次の断層パラメータを設定し直して再度、同様な処理を繰り返す。

(3) マッチング処理

大地震が発生すると、地震計から観測波形が取り込まれ、その波形の特性情報として出力される。この特性情報をもとに、地震計の位置で波形マッチング処理が行われ、数多く人工地震波のなかからもっとも動的特性の近い波形が選ばれる。このようにして選ばれた波形の解析結果および損傷情報を、2次判定結果とする。以上の処理をフローで示すと図-12のようになる。

6. 本システムの地震動

本システムでは、前述した図-10内の人工波形の生成部において、震源断層を考慮した地震動が自動的に作成される。具体的には、あらかじめ設定した各断層パラメータ、地盤特性などから、強震動生成プログラムによって工学基盤面での波形を生成し、その波形を等価線形解析等により地表面波形へ変換する。強震動の作成手法としては、要素地震を確率論的に求める統計的グリーン関数法を採用した。なお、対象構造物が長周期構造物ではないことおよび地震動作成に時間を要することから、理論的評価法までは用いなかった。

また、断層パラメータの中で不確定要素の強い立

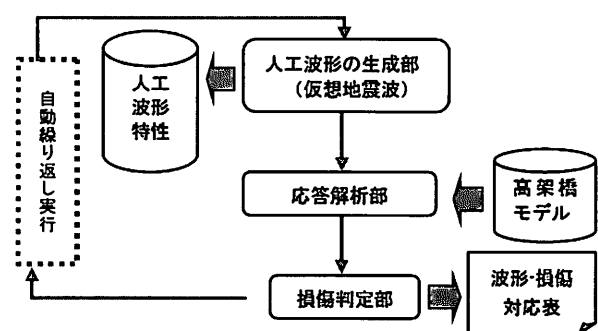


図-10 自動繰り返し計算のフロー

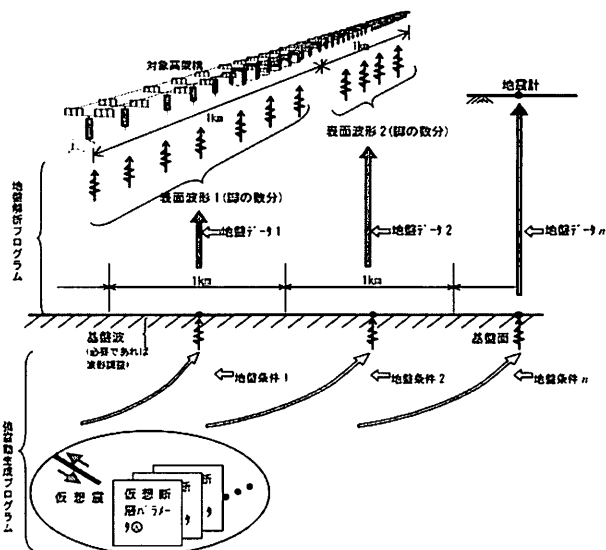


図-11 震源断層から高架橋までの地震応答解析

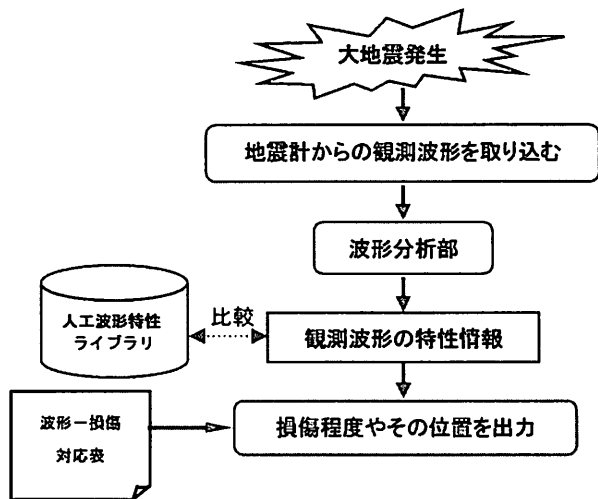


図-12 2次判定の処理（事前準備）

ち上がり時間、断層の破壊速度、位相角等に対しては、文献1)、2)をもとに値を変更して数多くの地震波を作成した。起こる確率がほとんどない値をランダムに設定しているわけではない。そのために、このようにして生成された波形は、数は多くなるが、どの波形も、今後、起こり得る地震の波形と考えられる。

7. 解析モデル

(1) モデル化方針

本システムが対象とする全路線を合計すると37.9kmにもなり、その路線上の高架橋に対して、耐震設計で用いられる非線形動的解析と基本的には同じ方法で地震応答解析を実施する。解析モデルは、過去の耐震補強等で作成した解析モデルをできるだけ活用するが、隣接の高架橋の影響、点検箇所の支承等の損傷を考慮する必要がある、通常の動的解析モデルと異なる配慮を要する。

(2) 高架橋モデル

通常の動的解析では、図-13に示すような1連の高架橋をモデル化し、隣接桁は等価な質量とバネで置き換えるのが一般的である。しかし、このモデル化では、正確に桁間の挙動が表現できない。

本システムでは、桁が衝突するかどうか、PCケーブルが作動するかどうか非常に重要であるため、図-14に示すように点検対象高架橋の隣接高架橋を含めて3連の高架橋をひとつの解析モデルの単位とする。ただし、ランプやジャンクション等のように複雑な高架橋に対しては、一体的に挙動を表現する必要がある橋梁単位を考慮してモデル化する。

(3) 点検箇所のモデル化の方針

対象とした点検箇所については、その点検箇所の地震時の挙動が十分に表現できるように解析モデルを作成する必要がある。一般的な動的解析では、これを意識してモデル化は行われていない。また、本システムでは、前述したように巨大地震まで想定しているため、点検箇所の破壊挙動まで表現できるモデル化を行う必要がある。例えば、ピン支承でPCケーブルや桁かかり長が点検項目として重要な場合には、このピン支承の破壊後の挙動が表現できるようにモデル化する^{3)~8)}。ただし、このような破壊後の挙動を表現するモデル化は、剛性が負の領域が現れ解析時間が増大したり収束性が悪くなるため、必要な場合にだけこのようなモデル化を行うことにした。

この破壊メカニズムが表現できるピボット支承およびモデル化した支承の履歴曲線を図-15(a)に示す。このモデルは、スリップ型の完全弾塑性モデルであるが、再載荷時には除荷されたときのラインを通るようになっている。剛性の2次勾配はなしとし、初期遊び量DS0は省略してもよい。また、ピボット支承と制震ブレースとを組み合わせで使用する場合には、変位を精度よく求める必要がある、正確に初期遊び量DS0を設定しなければならない。このモデル

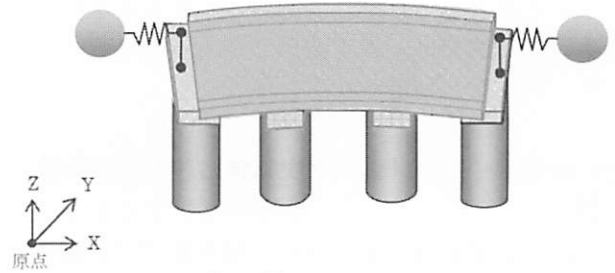


図-13 通常の動的解析における高架橋のモデル化

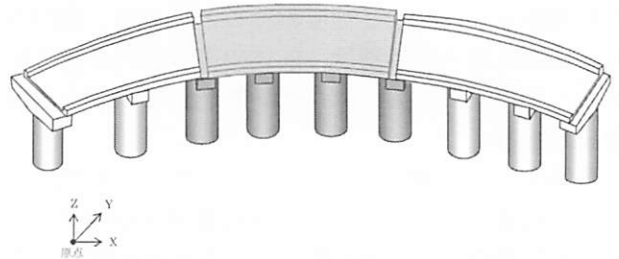
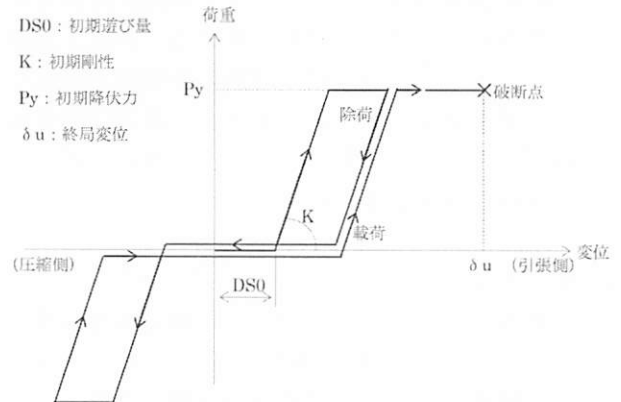
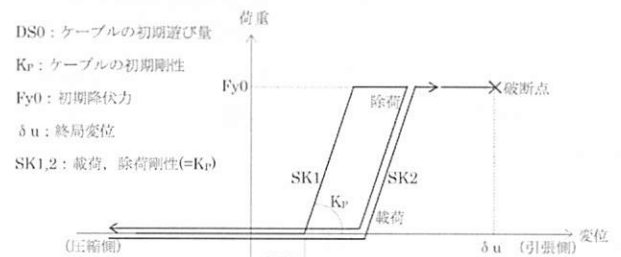


図-14 本システムにおける高架橋のモデル化



(a) ピボット支承の履歴モデル



(b) PC ケーブルの履歴モデル

図-15 破壊を考慮したモデル

を定義するための初期遊び量、初期降伏力、終局変位等は、公社がこれまで実施してきた実験結果をもとに決定している^{9),10)}。ピボットローラー支承や可動BPB支承についても、初期遊び量の設定を変更することで、同様にモデル化が可能である。

また、PCケーブル(桁間連結装置)の履歴曲線を図-15(b)に示す。本モデルは、相対変位によってケーブルの効果が表れるまでの初期遊び量を考慮したモデルであり、再載荷時には除荷されたときのラインを通る非線形性を表す。

8. 京コンピュータを活用した地震応答解析

(1) 計算方法

高架橋の解析モデルは、前述したように点検対象の高架橋を含めて3連の高架橋をひとつの解析モデルとして作成している。例えば、高架橋 n を点検対象とした場合の高架橋解析モデルは、高架橋 n の両サイドを含めた3連の高架橋（高架橋 $n-1$, n , $n+1$ ）となる（図-16参照）。同様に、隣の高架橋 $n+1$ を点検対象とした場合は、高架橋 n , $n+1$, $n+2$ の3連の高架橋をモデル化することになる。点検対象高架橋 n とした場合の高架橋解析モデルと点検対象高架橋 $n+1$ とした場合の高架橋解析モデルでは、この図のように作成する高架橋の解析モデルが重複する。したがって、本システムの対象路線全体の地震応答解析の方法としては、3連の高架橋をひとつの解析モデルとして、路線全体を高架橋の数だけ計算することになる。

地震応答解析を京コンピュータ上で実行する場合には、いかに並列に計算するかが重要であり、本研究では、路線全体の高架橋に対して、前述のひとつの解析モデルに分けて、並列に計算する方法を採用した。路線全体の高架橋を分割せずに一度に路線全体を京コンピュータ上で計算する方法¹¹⁾も提案されているが、対象とする高架橋と隣接高架橋の衝突等の挙動が路線上で遠く離れた高架橋には影響しない（ただし、本解析モデルの3連の高架橋では不十分な場合があるが）ことから、このように分けて独立に計算しても本システムにおいては問題ないと判断した。したがって、完全に独立に並列計算できることから、本計算方法が本システムには適していると思われる。

具体的には、対象路線からこの3連の高架橋を取り出して、京コンピュータのひとつの計算ノードに割りつける。すなわち、合計で約300橋の各解析モデルに対して、それぞれの計算ノードを割りつけて同時に並列計算することになる。なお、計算ノードとは、計算するCPUのようなものであり、ひとつの計算ノードが1台の高性能パソコンに相当する計算能力を有する。

(2) 計算実施

対象路線の高架橋に対して、内陸直下型地震のひとつの地震波（30秒間）を用いて、試験的に京コンピュータ上で実施してみた（ジョブ情報：実施日2015/06/18, JOB ID=2873887, 使用プログラム：SeanFEM）。その結果、計算時間は約300の高架橋

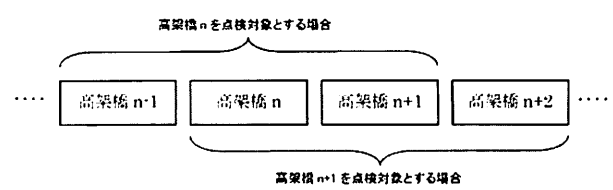


図-16 高架橋解析モデルのモデル化範囲

で78分であった（ジョブの投入や結果出力も含めているため、実際の地震応答解析のみの計算時間はさらに短い）。使用した計算ノードは384である。今回、試験的に使用したノード数は、京コンピュータとしては少ない方であり、1000ノード以上使うのが京コンピュータらしい使い方である。よって、まだ高架橋を増やす余裕がある。

代表的な高架橋モデルの解析結果の一部を図-17に示す。この図は、京コンピュータ上で地震応答解析した結果において最大応力が発生した時点のスナップショットである。また、この図から、各高架橋のモデルの解析規模が異なり、いろんな種類の高架橋で対象路線が構成されていることがわかる。京コンピュータ上で同時にこれらの解析モデルを並列計算することになるが、このように解析規模が異なっているため、全体の計算時間がもっとも大きな解析モデルの計算時間で決まってしまう。そのため、可能であれば、できるだけ同程度の大きな解析モデルに分けるのが望ましいことになる。

9. まとめ

本論文では、地震発生後の高架橋の点検業務を効率よく行うために、公社が開発して運用してきたシステムの概要説明をして、試験的に京コンピュータによる地震応答解析の計算を試みた。

2次判定処理の事前準備である自動繰り返し計算（図-10）を、これまで通常のワークステーション5台を並列化（PCクラスタ）して実施していた。当時、1つの波形を入力として対象路線全体の高架橋の地震応答解析をするのに、約20日間を要していた（統計的グリーン関数法による地震動の計算は含まない）。それを考えると、まだ試験的ではあるが、従来の20日分に相当する計算量を78分で実施する京コンピュータでの計算スピードは驚異的である。さらに、高架橋の数が増えても、計算ノードが増えるだけであり、全体の解析時間は、ほとんど増加しないと予想している。よって、本システムにおける解析モデルの地震応答解析は、独立に並列計算できるため、京コンピュータ上での並列化効率は非常に優れているという。

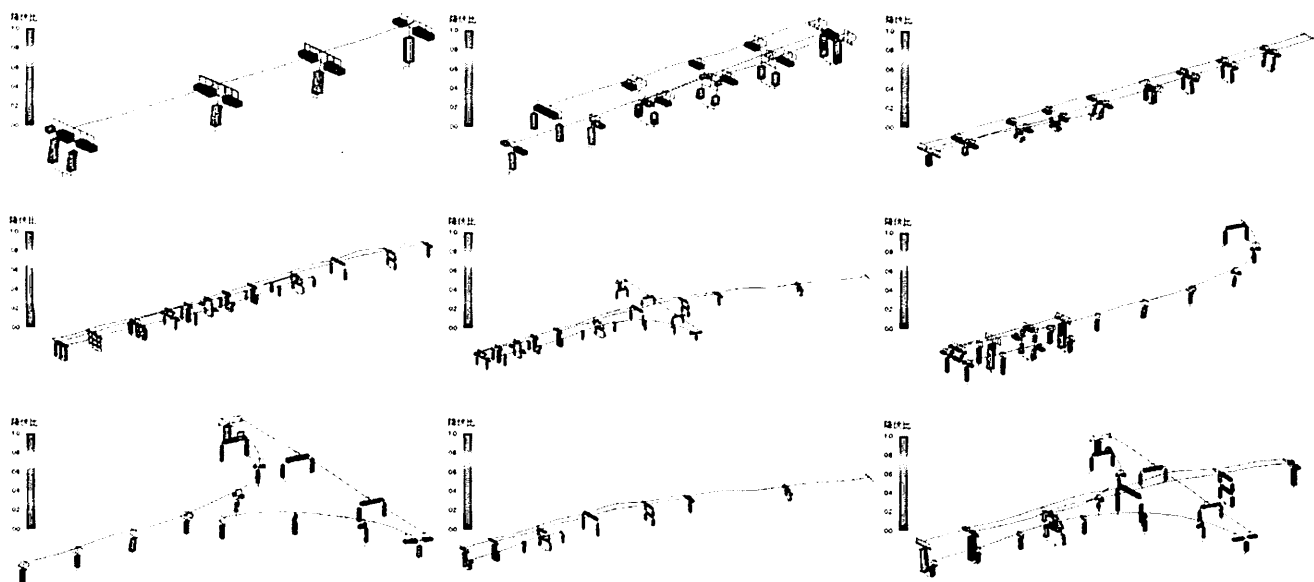


図-17 京コンピュータで実施した解析結果の一部

このように短時間で全路線の高架橋の地震応答解析が実施できれば、想定外の巨大地震を含めて、数多くのいろんな地震波で計算ができ、判定精度がさらに向上すると思われる。さらにこのような計算スピードであれば、地震後の被災状況にもよるが、京コンピュータを使って観測地震波で直接計算すれば、速やかに3次判定することも考えられる。

現在、公社では、本システムの処理能力の向上や機能拡張などに向けた改良検討を進めており、拡張機能の検討などでの試解析においては、京コンピュータの利用による解析時間の大幅な短縮は、非常に有効で作業能率、作業短縮に効果を発揮するものと期待される。

10. 謝辞：本論文の8章の解析結果は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです（課題番号：hp150102）。また、構造解析プログラムSeanFEMを「京」上での実行および高速化するにあたり、一般財団法人 高度情報科学技術研究機構の小久保達信氏らにいろいろとご指導をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎：強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法一、京都大学防災研究所年報，第47号A，2004。
- 2) 原田隆典：震源断層から一貫して捉えた地盤・基礎・長大構造物系の応答評価とその予測法，平成16年度-平成18年度科学研究費補助金基盤研究(C)研究成果報告書，2007。
- 3) 前野裕文，森下宣明，野中哲也：高架橋の耐震設計法の一

考察，第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp. 33-42，2000。

- 4) 木納利和，森下宣明，前野裕文，野中哲也，折野明宏：ゴム支承およびP Cケーブルの非線形特性を考慮した連続高架橋の動的解析，第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp. 69-74，2002。
- 5) 日本道路公団：設計要領 第二集 橋梁設計編 5章，2000。
- 6) 梶田幸秀，渡邊英一，杉浦邦征，丸山忠明，永田和寿：鋼製支承の破損を考慮した連続高架橋の地震時応答性状と落橋防止装置の有効性の検討，構造工学論文集，Vol.45A，pp. 903-914，1999。
- 7) 川島一彦，庄司学：衝突衝撃用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果，土木学会論文集，No.612/I-46，pp. 129-142，1999。
- 8) 梶田幸秀，西本安志，石川信隆，香月智，渡邊英一：桁間衝突現象のモデル化に関する一考察，土木学会論文集，No.661/I-53，pp. 251-264，2000。
- 9) 長谷川秀也，前野裕文，澤田敏幸，青木徹彦，水野 豪，大畑和夫，生野英治：既設鋼製支承(BP-A)の水平耐荷力に関する実験的研究，土木学会第57回年次学術講演会，2012。
- 10) 長谷川秀也，前野裕文，長坂康史，野中哲也，折野明宏：既設鋼製支承(BP-A)の水平耐荷力に関する解析的研究，土木学会第57回年次学術講演会，2012。
- 11) 吉野廣一，野中哲也，本橋英樹，金治英貞，鈴木威，ハツ元仁，中村良平：京コンピュータによる高架橋の広域3次元地震応答シミュレーション，第17回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2014。