

非線形構造解析による RC構造物の地震時即時損傷度判定基準作成の試み

上半 文昭¹ ・ 目黒 公郎²

¹正会員 工修 鉄道総合技術研究所（東京大学生産技術研究所，〒153-8505東京都目黒区駒場4-6-1）

²正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所（同上）

This paper discusses the quick inspection technique for earthquake damaged railway bridges using vibration measurement and new numerical model for nonlinear analysis of structures. The accuracy of the *Applied Element Method* (AEM), used in this study, is verified through the seismic response simulation of existing two-storied RC rigid frame viaduct and the study on the change of natural frequency of the RC column due to damage. Next, the methodology to obtain the relation between the change in natural frequency and damage levels of real structures is discussed.

Key Words: damage inspection, Applied Element Method, microtremor, collapse simulation

1. はじめに

鉄道システムを地震によるダウン状態から速やかに復旧させるためには、地震直後の迅速な被害状況の把握と適切な復旧計画の策定が不可欠である。構造物に被害が発生した場合には、その損傷度を把握して適切な補修工法を選択し、迅速に復旧工事を遂行しなければならない。現在のところ、構造物の損傷度の把握は目視を中心に行われているが、外見上の変化と構造物の健全度の関係は必ずしも明確では無く、判定結果が担当者の技量に左右されてしまう。

一方、構造物に重錘等をぶつけて発生させた自由振動を測定する衝撃振動試験¹⁾や、大地の常時の微小な震動を外力として微小な振幅で振動する構造物の挙動を測定する常時微動測定による検査手法²⁾も研究されている。これらの手法は、固有振動数等の客観的な数値に基づいて検査時点での構造物の健全度を示すことができ、目視による検査の弱点を補うことができる。

著者らは、センサを設置するだけで安全かつ簡単に測定できる常時微動測定による損傷度判定手法が最も有用な検査手法の一つと考えており、最新の非線形構造解析技術を用いて構造物の損傷と振動特性の変化との関係を分析することにより、その検査精度の向上や適用範囲の拡張に取り組んでいる。ここでは、鉄道RCラーメン高架橋の固有振動数の変化に着目した損傷度判定を対象として、本研究で用いる数値解析手法である応用要素法 (AEM)³⁾の精度を検証し、微動測定と数値解析を利用した損傷度判定手法の判定基準の作成法について考察する。まず、

1995年兵庫県南部地震で被災したRCラーメン高架橋を解析して、崩壊挙動の追跡精度を調べる。次にRC供試体の損傷による固有振動数変化をシミュレーションし、柱の損傷による固有振動数変化の解析精度を調べる。最後に、即時損傷度判定基準の作成手順についての考えを示す。

2. 振動特性を利用した構造物の健全度把握

鉄道分野では、列車走行振動測定、衝撃振動試験、常時微動測定等の振動特性を利用した構造物の健全度把握手法が研究されてきた。列車走行振動試験では、列車の走行により発生する振動を測定することにより、高架橋の固有振動数、揺れの振幅等を調べる。衝撃振動試験は、柱の剛性低下を評価するために打撃による衝撃振動から構造物の固有振動数を求める試験である。常時微動測定では、高架橋上と地盤上での微動の同時測定結果を分析して、高架橋の固有振動数等の地震動増幅特性を推定する。常時微動測定の長所としては加振の必要が無いため測定が効率的に行えること、大きな地震を受けて損傷した構造物でも安全に測定できること、無人でのモニタリングが可能であること等が挙げられる。

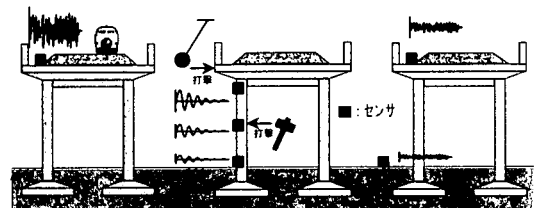


図1 振動特性を利用した健全度判定手法

3. 構造物即時損傷度判定への数値解析の利用

3-1 数値解析の利用

常時微動測定を用いた構造物の即時損傷度判定手法の精度を向上するには、構造物の損傷・崩壊挙動を正しく推定し、損傷レベルと損傷による振動特性変化の関係を明らかにする必要がある。そこで本研究では、数値解析を用いて構造物の損傷・崩壊挙動、及び損傷による振動特性変化を探る。本研究に適した解析手法は、常時微動レベルの微小な変形領域で十分な解析精度があるとともに、構造物の損傷・崩壊挙動を解析できることが望ましい。ここでは、それらの条件を満たす解析手法として、微小変形領域から大変形崩壊領域までの構造物の挙動を取り扱うことのできる応用要素法 (AEM) ³⁾ を採用した。

3-2 応用要素法 (Applied Element Method, AEM) ³⁾

応用要素法 (AEM) では、解析対象を仮想的に分割した要素の集合体として取り扱う。各要素は法線方向とせん断方向の2種類の分布バネでつながれている (図2)。2次元解析の場合、各要素は水平、鉛直、回転の3自由度を持っており、分布バネを介して周囲の要素と力をやり取りする。各分布バネには、コンクリートの材料モデル (図3) が適用されている。分布バネが代表する領域の材料がその領域に作用する応力に耐えられなくなると、バネが切断してクラックが自然に発生する。また、鉄筋位置には鉄筋の材料モデル (図3) を適用したバネを並列に配置する。鉄筋バネは降伏応力に達すると降伏し、さらに破断応力に達すると破断する。応用要素法は、この様なメカニズムによって微小変形領域から大変形崩壊領域までの構造物の挙動を解析できる。

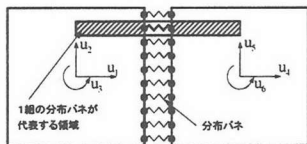


図2 応用要素法の要素と分布バネ

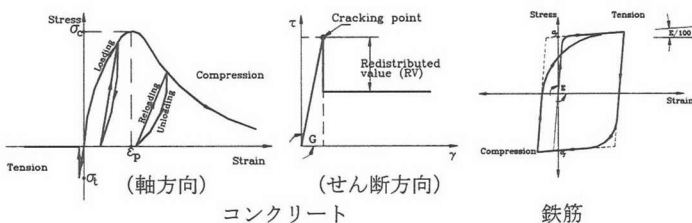


図3 コンクリート及び鉄筋の材料モデル

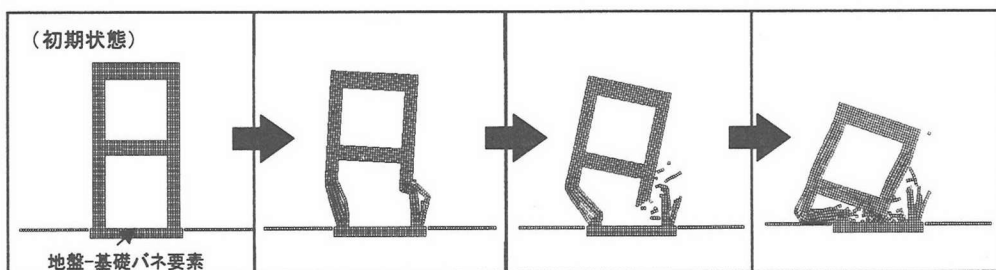


図6 破壊のシミュレーション結果

3-3 崩壊挙動の解析精度の検証⁴⁾

兵庫県南部地震で倒壊した阪水高架橋を対象にして数値解析を行う。同高架橋は中間梁を有する3径間連続ラーメン高架橋 (杭基礎) である。図4に倒壊した阪水高架橋R7の被災状況⁵⁾を示す。AEM解析の際には、対象高架橋を、寸法18cm×18cm、要素間分布バネ数10の正方形要素でモデル化した。コンクリート及び鉄筋の材料特性は、実強度⁶⁾を考慮して表1の様に決めた。モデルの配筋は実構造物の配筋図⁵⁾ (図5) をほぼ忠実に再現した。地盤および基礎⁵⁾の影響を考慮したモデルの固有振動数は同高架橋R7の被災前の実測値とほぼ一致した。JR鷹取波 (NS成分) ⁷⁾ を入力して崩壊挙動を調べたところ、図4とほぼ等しい破壊形状を得た (図6)。

表1 解析モデルに与えた材料特性

| コンクリート | |
|---------------------------|---------------------|
| ヤング率 (kN/m ²) | 2.8×10 ⁷ |
| 圧縮強度 (kN/m ²) | 3.2×10 ⁴ |
| 引張強度 (kN/m ²) | 2.4×10 ³ |
| 鉄筋 | |
| ヤング率 (kN/m ²) | 2.1×10 ⁸ |
| 降伏応力 (kN/m ²) | 3.5×10 ⁵ |

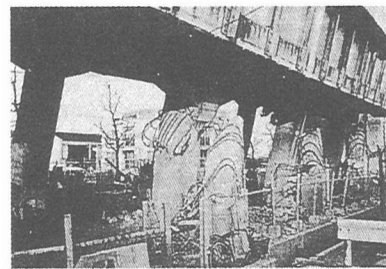


図4 阪水高架橋被災状況

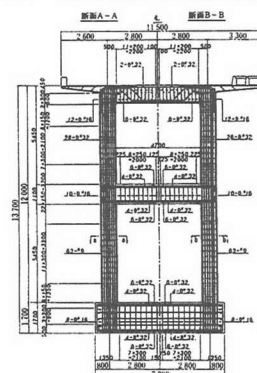


図5 高架橋形状及び配筋

3-4 固有振動数変化の解析精度の検証

RC供試体を用いた損傷による固有振動数変化の実験をシミュレーションする。実験では、鉄道RCラーメン高架橋柱の1/2モデルの供試体(図7)を正負交番载荷によって損傷させ、各損傷レベルにおける柱の固有振動数を30kgの重錘を用いた衝撃振動試験によって調べている⁸⁾。材料試験によって得られたコンクリート及び鉄筋の材料特性は表2の通りである。供試体を寸法5cm×5cm、要素間分布バネ数10の正方形要素でモデル化した。実験では各ステップ3サイクルの载荷を行い、ステップ終了後に衝撃振動試験を行って固有振動数を求めている。数値解析では各ステップ3サイクル载荷の場合と1サイクル载荷の場合とで結果に大きな差がなかったため、1サイクル载荷の場合の結果を示す。図8の上段が供試体に与えた変位で、下段が一次固有振動数の変化の実験値と解析値の比較である。解析結果は実験結果をよく追跡できている。

図8下段には载荷サイクル途中の固有振動数の解析値も示した。固有振動数の解析値がギザギザと変化しているのは、柱の変位が大きくなってクラックが開いている場合にはクラック面でのコンクリートバネの剛性が0となるが、一度開いたコンクリートのクラックが閉じたとき(変位が小さい時)にはコンクリートバネが剛性を取り戻す様モデルが設定されているためである。

4δy以降では解析値よりも実験値の方が小さくなっていく。これは、実験で用いた軸方向無载荷のRC柱では、クラック幅が大きくなると変位0付近の位置でもクラックが閉じにくくなり、クラック面での力の伝達が小さくなり剛性が下がるためだと考えられる。また、実験では7δy以降で、コンクリートのかぶりの剥落が顕著となるが、解析ではその影響を考慮していない。今後、これらの点をモデルに反映させ、よりいっそうの精度向上をはかる予定である。

表2 材料試験結果

| コンクリート | 柱部 | フーチング部 |
|---------------------------|----------------------|----------------------|
| ヤング率 (kN/m ²) | 2.19×10 ⁷ | 2.21×10 ⁷ |
| 圧縮強度 (kN/m ²) | 2.85×10 ⁴ | 2.87×10 ⁴ |
| 引張強度 (kN/m ²) | 2.25×10 ³ | 2.77×10 ³ |
| 鉄筋 | D22 | D10 |
| ヤング率 (kN/m ²) | 1.93×10 ⁸ | 1.81×10 ⁸ |
| 降伏応力 (kN/m ²) | 4.21×10 ⁵ | 3.85×10 ⁵ |

4 実構造物の損傷度判定基準作成の手順

構造物の損傷度判定基準を作成するには、前節で供試体を対象にして行った検討を拡張すれば良い。基本的な作成手順は次の通りである。

- (1) 対象とする構造物のモデル化。
- (2) 静的荷重または周期特性の異なる地震波の入力による損傷・崩壊パターンの把握。
- (3) 各損傷レベルでの固有振動数の計算。
- (4) 損傷度判定基準の体系化。

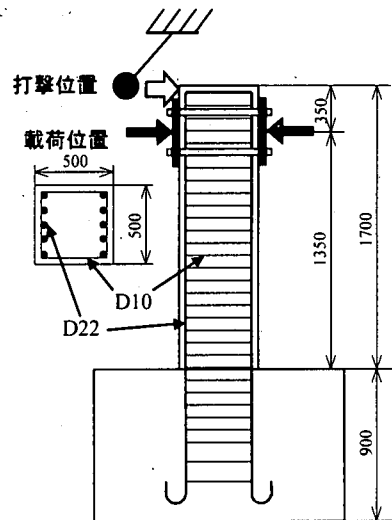


図7 供試体形状および配筋

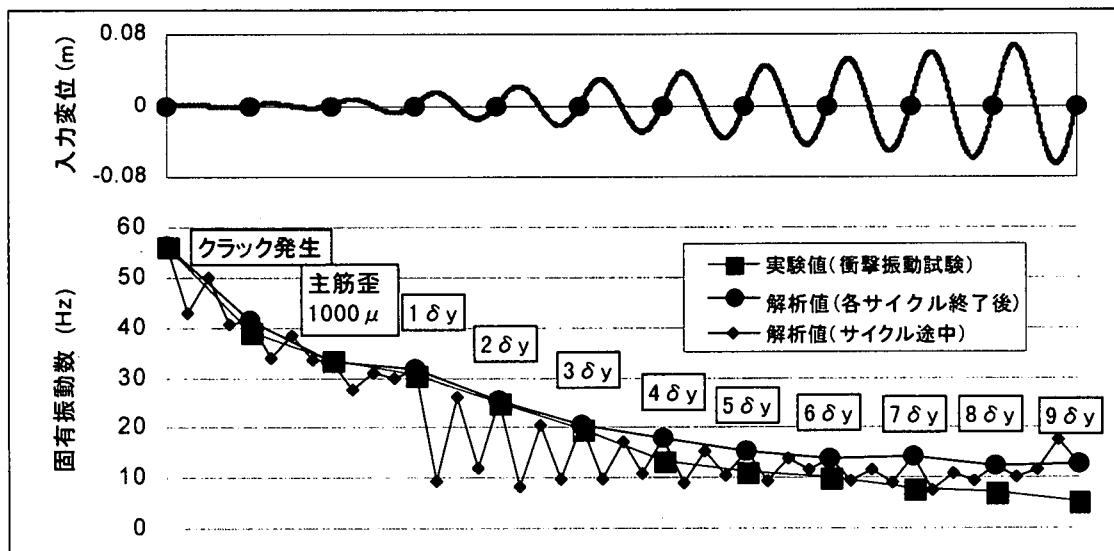


図8 入力変位(上)と固有振動数の変化(下)

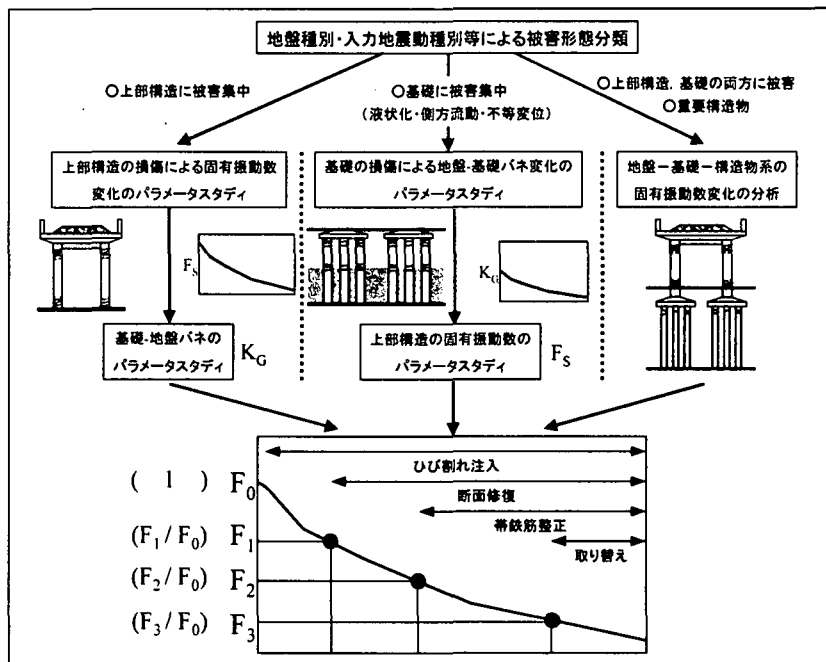


図9 損傷度判定基準の作成手順

特定の構造物の基準を作成する場合には、地盤-基礎-構造物系について上記の手順で分析すれば、損傷度の判定基準を作成することができる。しかし、数多くの構造物の判定基準を作成する際に、地盤-基礎-構造物のあらゆる組み合わせを対象にしたパラメータスタディを行うのは非効率的である。そこで、高架橋周辺の地盤種別等から構造物の被災状況を推定して、次の様に異なる手順で判定基準を作成する。

①基礎の損傷を無視できる場合

上部構造物の損傷による固有振動数変化のパラメータスタディを実施する。得られた固有振動数変化に地盤-基礎パネによる固有振動数低減の影響を考慮して判定基準を作成する。なお、1995年兵庫県南部地震の際には鉄道高架橋の基礎は殆ど無被害であったと報告されており、この作成法がもっとも標準的な手法となる。

②損傷が基礎に集中すると考えられる場合

基礎の損傷による地盤-基礎パネの変化のパラメータスタディを実施する。得られた地盤-基礎パネの変化を利用して全体系の固有振動数変化を求め、基礎の損傷の判定基準を作成する。この手法は、側方流動等の発生可能性が高い軟弱地盤上の構造物に適用する。

③上部構造及び基礎の両方が損傷する場合

全体系の解析を実施し、基礎と上部構造の両方が損傷する場合の固有振動数変化を調べる。

応用要素法による解析では、ひび割れの進展、鉄筋の降伏・破断等の構造物の損傷度と固有振動数の変化を直接的に結びつけることができる。また、各損傷度に対する補修工法については実験的研究が進められている⁹⁾ので、上記の手法によって適切な損傷度判定基準が作成されれば、常時微動測定を利用

した補修工法の選択も可能になる(図9)。

5. まとめ

本報では、微動測定等の振動測定とAEM解析を利用した構造物の即時損傷度判定基準の作成手法にして考察した。今後は、実構造物の損傷度判定基準の作成に取り組む。また、本研究成果を発展させ、これまでの被害予測システムに代わる、即時被害把握システムの開発や構造物の劣化度判定手法の開発に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 西村昭彦, 棚村史郎: 既設橋梁橋脚の健全度判定に関する研究, 鉄道総研報告, Vol. 3, No. 8, 1989. 8.
- 2) 中村豊: 総合地震防災システムの研究, 土木学会論文集, No. 531/I-34, pp. 1-33, 1996. 1.
- 3) Meguro K. and Tagel-Din H.: A new efficient technique for fracture analysis of structures, Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, IIS, Univ. of Tokyo, No.30, pp.103-116, 1997.
- 4) 上半文昭, 目黒公郎: 2層式ラーメン高架橋の簡易損傷度把握手法に関する基礎的検討, 第25回地震工学研究発表会論文集, 第2分冊, pp. 845-849, 1999.
- 5) 土木学会: 阪神・淡路大震災調査報告・土木構造物の被害・第1章橋梁, 丸善, 1996.
- 6) 日本コンクリート工学協会近畿支部: 土木コンクリート構造物の震災対策に関する研究委員会報告書, 1999.
- 7) 中村豊, 上半文昭, 井上英司: 1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II), JR地震情報No. 23d, 1996.
- 8) 下野一行, 渡辺忠朋, 佐藤勉: 鉄筋コンクリート部材の損傷評価に関する一考察, 土木学会第52回年次学術講演会概要集I-A, pp. 402-403, 1997.
- 9) 田中寿志, 瀧口将志, 佐藤勉: RC部材の損傷レベルの評価, 鉄道総研報告第13巻第4号, pp. 5-8, 1999.