

固有振動数と振動モードの変化を利用した 構造物損傷度評価の試み

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 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

²正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

これまで著者らは、最新の非線形構造解析手法である応用要素法(AEM)を用いてRC構造物の損傷による振動特性の変化を調べ、構造物全体系の1次固有振動数の低下に基づく損傷度の判定基準を作成することによって、簡単な振動モニタリングで地震直後の即時損傷度把握を行えることを示してきた。さらに、構造物の振動モード形状などにも着目して上記の研究を進展させ、構造物を構成する各部材レベルでの損傷位置や損傷程度を振動測定で評価できるようにすれば、応急復旧工法の選択時などに有効な構造物損傷度評価システムを開発できるものと期待している。ここでは、構造物各部の損傷レベルと振動特性の変化の関係を数値解析で分析して作成したデータベースと振動モニタリングを利用した構造物のより詳細な損傷度評価手法の開発に向けての基礎的検討を行った。

Key Words : quick damage inspection, expert system, Applied Element Method, earthquake damage, railway bridge

1. はじめに

地震によって鉄道土木構造物が被災すると、その損傷度を検査して適切な応急復旧工事を実施し、さらにその効果が十分であることを検査して確認するまで運転を再開できない。運転休止による損害や復旧工事費を抑えるためには、簡単に精度の高い構造物検査法が不可欠であろう。現在のところ、鉄道土木構造物の検査は主として技術者による目視検査に頼っているが、熟練技術者の不足、外側を補強材で巻き立て補強した構造物の増加など、目視による検査をとりまく環境は明るくない。

被害地震後に迅速な運転再開を目的として行われる応急復旧工事の工期を短縮するためには、構造物を構成する部材の中で補修・補強を必要とするものだけを効率的に抽出できる検査技術が必要になる。著者らはこれまで新しい非線形構造解析手法である応用要素法¹⁾による構造物全体系の損傷度と1次固有振動数低下の関係の分析結果を用いて、振動測定による構造物検査の精度を向上し²⁾、地震直後の損傷度把握システム³⁾への応用などを検討してきた。ここでは、これまでの研究を進展させ、振動測定で構造物の損傷箇所やその損傷程度を特定する手法を考える。これまで損傷度把握の指標として用いてきた構造物全体系の1次固有振動数に加えて、振動モード形状や高次の固有振動数などを指標として新たに導入し、それらが構造物の損傷によってどのように変化するかを数値解析で調べてデータベース化する。そのデータベースから構造物の損傷部位や損傷程度を特定するアルゴリズムを考えて損傷度評価システムの開発を試みる。本報告では、主要な鉄道構造物でありながら、近年の地震で大きな被害を受けているRCラーメン高架橋を対象として、構造物の損傷部位や損傷程度を特定できる、より詳細な損傷度評価手法の開発に向けた基礎的な検討を行う。

2. 応用要素法 (Applied Element Method: AEM)¹⁾

応用要素法(AEM)では、図-1 に示すように、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。各要素は法線バネとせん断バネを一組として構成された多数の要素間バネでつながれている。2次元解析の場合、各要素は水平、鉛直、回転の3自由度を有しており、分布バネを介して周囲の要素と力のやり取りを行う。RCの解析では、各分布バネには、コンクリートの材料モデルが適用される。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、バネが切れ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を適用したバネが配置される。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構造物の損傷挙動を構造物が倒壊に至るまで簡単に扱うことができる。また、鉄筋比を用いてRCの鉄筋の影響をコンクリート要素内に分散させることなく、実際の鉄筋位置に鉄筋バネとして配置できるので、鉄筋の降伏挙動に支配されるRC部材材端部の損傷挙動を十分な精度で解析できる²⁾。

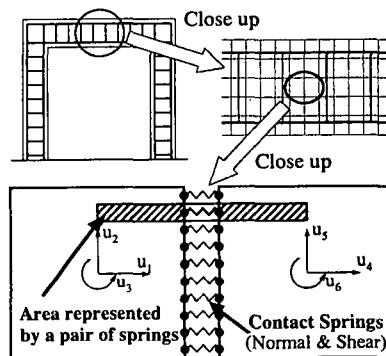


図-1 AEMの要素と分布バネ

3. RC 構造物の部材レベルの損傷度評価

3-1 鉄道 RC ラーメン高架橋部材の損傷度の定義

図-2 に RC 部材の荷重-変位関係の模式図を示す。鉄道分野では、軸方向鉄筋が降伏ひずみに達する変位点 B までを損傷レベル1, 最大荷重程度を維持する最大変位点 C までを損傷レベル2, 降伏荷重程度を維持する最大変位点 D までを損傷レベル3, それ以上の変位を受けたものを損傷レベル 4 と定義しており、それぞれの損傷度毎に施すべき補修工法が定められている⁴⁾。

3-2 損傷度評価システムの構築手法

損傷度評価システムの構築手法の概要を示す。

①部材の損傷挙動の解析

数値解析で構造物を構成する部材の損傷挙動を解析し、図-2 下図の様に、各損傷レベルに対応した部材の振動特性や剛性などを算出する。

②損傷箇所・程度の変化による損傷度評価指標の変化のパラメータスタディー

まず、対象構造物の損傷度評価に効果的であると考えられる評価指標(固有振動数、モード形状、減衰定数等)を選ぶ。次に①の結果を参考にして構造物の損傷箇所や損傷程度をさまざまに変化させた解析モデルを作成し、各指標の変化を分析する。その結果から損傷度評価に効果的であると思われる指標を選択する。

③効果的な振動モニタリング手法の検討

②の指標を得るのに効果的な振動測定法を考える。

④データベースを用いた損傷度評価

上部構造種別や寸法、地盤・基礎種別など毎に構造物の損傷レベルと評価指標の関係をデータベース化する。また、そのデータベースを利用して損傷度を判定するためのアルゴリズムを作成する。最終的に、振動モニタリング手法、損傷度評価のデータベース、及び判定アルゴリズムを統合し、損傷度評価システムを構築する。

4. RC ラーメン高架橋の柱上下端の損傷度評価

4-1 一層式鉄道 RC ラーメン高架橋

3-2 で紹介した損傷度評価システムの構築手順の一例として、RC ラーメン高架橋の柱上下端の損傷度評価方法を提案する。研究の初期段階であるので、構

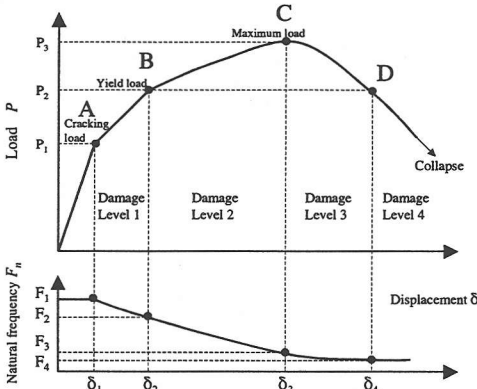


図-2 部材の荷重-変位関係と損傷レベル

造物を構成する部材数の少ない一層式の鉄道 RC ラーメン高架橋の線路直交方向断面を分析の対象とする。対象とする断面は単純な門型ラーメンであり、さらに問題を簡単にするために地盤及び基礎の影響は無視する。また、部材の損傷は柱端部の塑性ヒンジ部に集中し、左右の柱の損傷状況が等しいという仮定のもとで、柱の上下端それぞれの損傷度を把握する手法を検討する。

4-2 RC 部材の損傷挙動の解析

まず RC 高架橋を構成する柱部材の端部の荷重-変位関係を応用要素法による数値解析で調べる。図-3 に示す鉄道 RC ラーメン高架橋柱の供試体を正負交番载荷によって損傷させて部材基部の損傷による剛性の変化を調べる。材料特性を表-1 に示す。図-3 右に示す要素サイズ $10 \times 10 \text{ cm}$, 要素間バネ9本の AEM 要素を用いた柱部材モデルの上端部に交番载荷力を加える。交番载荷は柱部材の軸方向鉄筋が降伏する際の柱上端部の水平変位量 ($\delta_y = 1.25 \text{ cm}$) を基準にして、 $0.5\delta_y$, $1\delta_y$, $2\delta_y$, ..., $8\delta_y$ の計9ステップ行った。柱に作用する軸力は 784 kN とした。

柱部材の荷重-変位関係を図-4 に示す。 $3\delta_y$ まで最大荷重程度を、 $5\delta_y$ まで降伏荷重程度を維持している。 $6\delta_y$ で軸方向鉄筋に破断が生じたため降伏荷重を下回り、 $8\delta_y$ 载荷中に柱の左端の軸方向鉄筋6本すべてが破断

表-1 材料特性

Concrete	Compressive strength	Young's Modulus
	30.0 MPa	28.0 GPa
Steel	Yield stress	Young's Modulus
Longitudinal bar	400 MPa	200 GPa
Stirrup	450 MPa	200 GPa

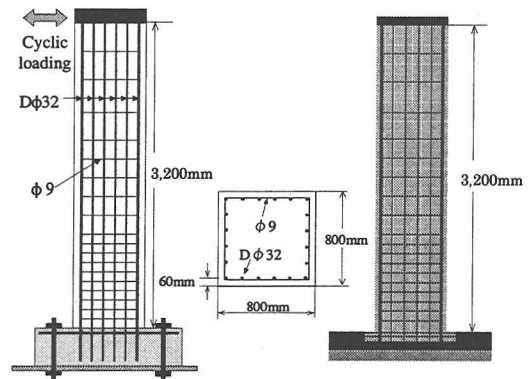


図-3 解析に用いた RC 柱供試体とその AEM モデル

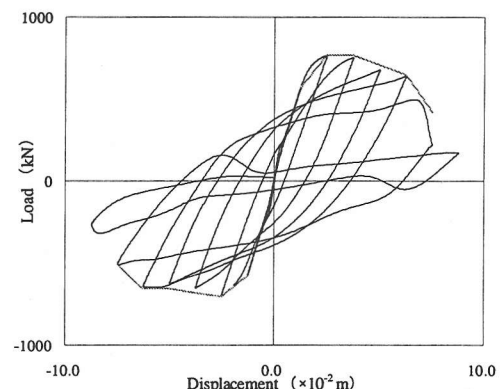


図-4 柱部材の荷重-変位関係

して最終状態に至った。図-5 に各载荷ステップ終了時の部材の1次固有振動数 F_n を無損傷時の固有振動数 $F_{initial}$ で正規化して示す。また図-4 から判断した部材の損傷レベルを図-5 中に示した。図-5 を参考にして、ここでは無損傷、損傷レベル1、損傷度レベル2、損傷レベル3、損傷レベル4に対応する塑性ヒンジ部の剛性を固有振動数がそれぞれ、100%、91%、64%、45%、28%に低下したときの剛性と定義して以下の分析を行う。

4-3 損傷程度の変化による振動特性変化のパラメータスタディー

ここでは、損傷による柱端部の剛性変化による1層式ラーメン高架橋の振動特性の変化を調べる。柱の1次振動数、2次振動数、及び1次振動モードの柱上端部と柱中央部の振幅比の3つを損傷度の評価指標とする。

RC ラーメン高架橋の桁部が十分に剛であり、かつ柱の損傷状況が左右対称であると仮定して、門型ラーメンを図-6 のような1本の柱にモデル化する。モデル化には要素サイズ $10 \times 10\text{cm}$ 、要素間バネ数9のAEM要素を用いた。境界条件はフーチング下面を完全固定、柱上端部を回転拘束とした。柱は 4-2 で用いたものと同じ断面及び材料特性を有しており、軸力の値も等しい。

柱上下端部に塑性ヒンジ部を設け、無損傷(D0)、無損傷を除く損傷レベル1(D1)、損傷レベル2(D2)、損傷レベル3(D3)、損傷レベル 4(D4)の5種類の損傷レベルに相当する剛性を与えて、1次固有振動数、2次固有振動数、1次モードの柱上端部と柱中央部の振幅比の3指標の変化を調べた。結果を表-2 にまとめる。

結果を見ると、1次(または2次)固有振動数の低下から構造物全体系の損傷程度を、1次振動モードの柱上端部と柱中央部の振幅比から上下端の損傷程度の比率を推定できるので、両者を指標として用いれば柱上下端の損傷度を判定できるものと考えられる。

4-4 効果的な振動モニタリング手法の検討

(1)振動モニタリング手法の検討

1次振動モードの柱上端部と柱中央部の振幅比を損傷度評価の指標として用いることにしたので、柱中央と柱上部にセンサを設置しての衝撃振動試験をモニタリング手法として選択することにする。適当な測定事例データを有していないので、数値シミュレーションで振動測定方法、及びデータの分析方法を説明する。

(2)衝撃振動試験のシミュレーション

左右の柱の下端にD1レベル相当、上端にD3レベル相当の損傷度を与えた1層式ラーメン高架橋モデル(図-7)を損傷度判定の対象にする。柱断面および材料特性は図-3、表-1と同じであり、桁部の質量は160tとした。高架橋の天端部に衝撃を与え、柱上端部、及び中央部の振動を調べた。図-8、図-9 に速度応答波形とそのスペクトルを示す。応答波形には柱の1次と2次の振動成分が含まれており、1次は 2.38Hz、2次は 26.6Hzであった。1次モード成分の柱上部と中央部の振幅比は 3.4であった。なお、同高架橋の無損傷時の1次固有振動数は 3.99Hz、2次固有振動数は 69.6Hzであった。

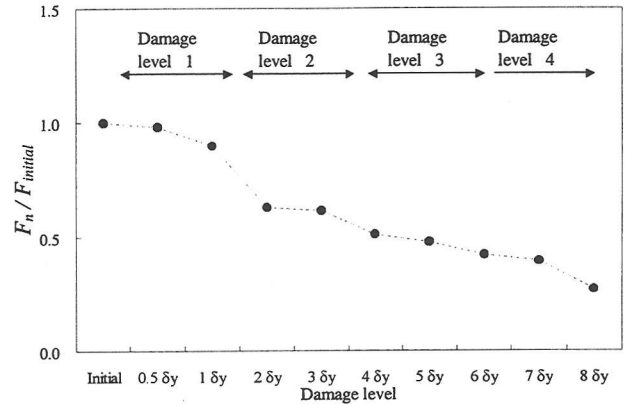


図-5 損傷レベルと固有振動数変化

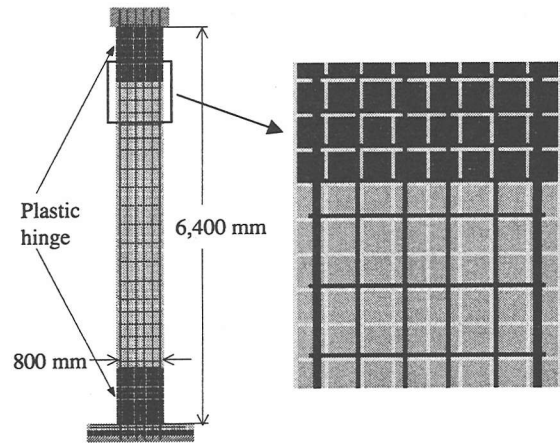


図-6 一層式 RC ラーメン高架橋の解析モデル

表-2 部材上下端の損傷レベルと指標の変化

Top	D0	D1	D2	D3	D4	
Bottom	4.02	3.83	3.18	2.46	1.51	1st F_n
	70.2	67.2	55.3	27.9	19.8	2nd F_n
	2.02	2.11	2.46	3.78	9.9	Top/Middle
D0	3.83	3.64	3.03	2.38	1.49	1st F_n
	67.4	64.5	53.2	26.9	18.8	2nd F_n
	1.94	2.02	2.35	3.49	8.77	Top/Middle
D1	3.17	3.02	2.5	2.06	1.4	1st F_n
	55.7	53.5	45.1	23.7	15.4	2nd F_n
	1.71	1.77	2.02	2.71	5.79	Top/Middle
D2	2.41	2.34	2.04	1.77	1.3	1st F_n
	28.4	27.3	23.8	20.2	11.6	2nd F_n
	1.36	1.4	1.59	1.99	3.67	Top/Middle
D3	1.45	1.43	1.35	1.27	1.06	1st F_n
	20.6	19.4	15.8	11.8	7.59	2nd F_n
	1.11	1.12	1.2	1.34	1.96	Top/Middle
D4						

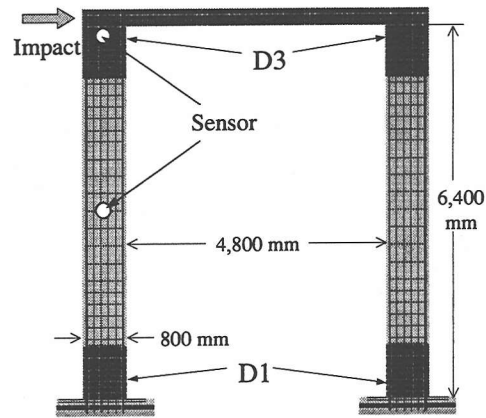


図-7 損傷度判定対象の高架橋モデル

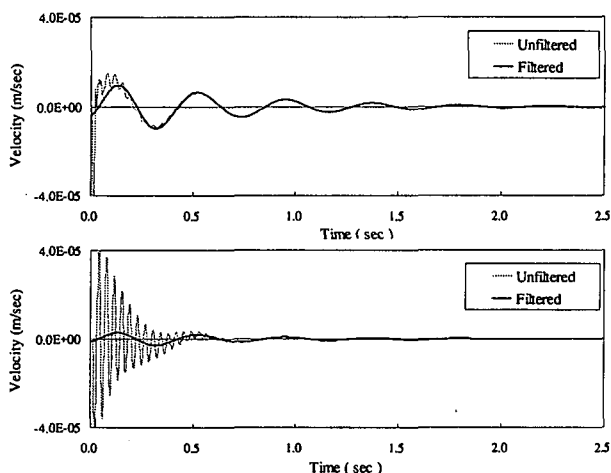


図-8 柱上端部、中央部の速度応答波形

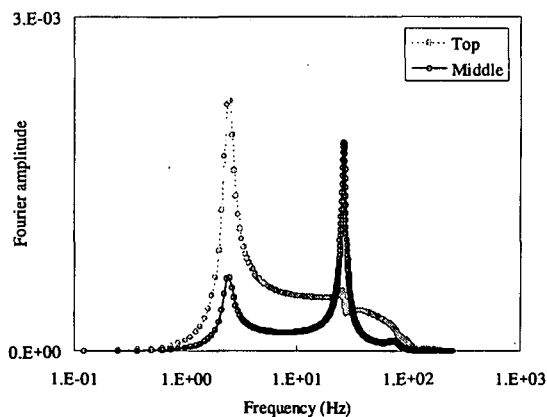


図-9 柱上端部、中央部の速度応答波形のスペクトル

4-5 データベースを利用した損傷度判定

表-2の結果に基づくデータベースを利用して4-4(2)で得られた振動測定結果から対象高架橋モデルの柱上下端の損傷度を判定する。図-10、図-11に表-2の結果をまとめたノモグラムを示す。図-10は、柱上端部と中央部の1次モード振幅比と柱上下端の損傷度の関係を表しており、図-11は1次、2次の固有振動数の変化と柱上下端の損傷度の関係を表している。まず、図-10で柱上端部と柱中央部の1次モード振幅比が3.4であるので、対象高架橋の損傷パターンは柱上部D3ー下部D1の組み合わせか、柱上部D4ー下部D3の組み合わせのみとなる。次に図-11で1次固有振動数が59.6%に低下していることを考慮すると、柱上部の損傷度がD4のラインとは交差しないので、上下の損傷度は柱上部がD3、下部がD1の組み合わせのみとなる。2次固有振動数の変化(38.2%)を用いても同じ結果が導かれる。このようにモデルに与えておいた損傷度を振動測定結果のみから評価できることが確認された。

4-6 エキスパートシステムの構築

4-2～4-5と同様の手順で構造種別、地盤及び基礎種別などを考慮していくつかのデータベースを作成し、そのデータベースを利用して損傷度を評価するためのアルゴリズムを考えてプログラム化すれば、損傷度評価のエキスパートシステムを構築できる。

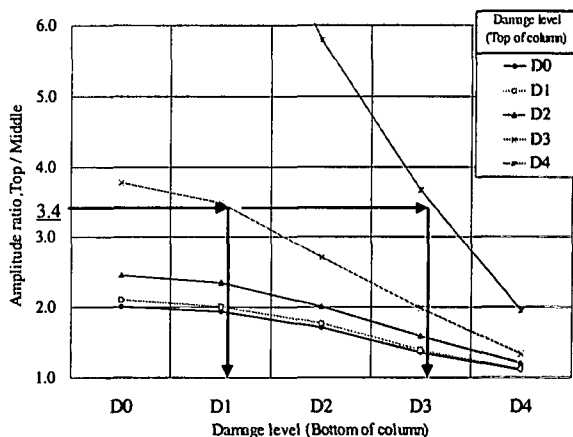


図-10 1次モード振幅比と柱端部の損傷度の関係

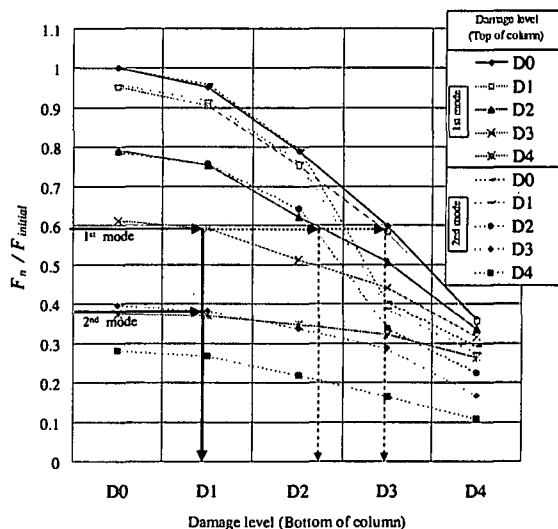


図-11 固有振動数の変化と柱端部の損傷度の関係

5. ま と め

振動モニタリングによる構造物検査の適用範囲の拡大をめざして、構造物を構成する部材レベルの損傷箇所や損傷程度を把握するための基礎的な検討を行った。ここでは、研究の初期段階であるので単純な1層式 RC 鉄道ラーメン高架橋の柱上下端の損傷度評価を対象として、その妥当性を検証した。実構造物の詳細な損傷度判定を行うためには、2層式 RC ラーメン高架橋の分析方法、地盤及び基礎の影響の考慮、3次元の考慮など検討すべき課題が多数存在するので、それらを今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Meguro K. and Tagel-Din H.: A new efficient technique for fracture analysis of structures, *Bulletin of Earthquake Resistant Structure*, IIS, Univ. of Tokyo, No.30, pp.103-116, 1997.
- 2) 上半文昭, 目黒公郎: 非線形構造解析による RC 構造物の即時地震損傷度判定法に関する一考察, 土木学会応用力学論文集, Vol.3, pp. 621 - 628, 2000.
- 3) 上半文昭, 目黒公郎: 応用要素法による鉄道構造物の損傷度評価と地震時被害把握システムへの応用, 土木学会鉄道路力学論文集, Vol.5, pp. 25 - 30, 2001.
- 4) 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.