

地震による鉄道構造物の損傷度簡易判定法

A simple technique for damage assessment of railway structures due to earthquake

上半文昭*・目黒公郎**

Fumiaki UEHAN and Kimiro MEGURO

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、鉄道構造物の被害をできるだけ迅速かつ正確に把握し、適切な復旧計画を策定しなければならない。そのため、これまでの目視検査に代わる簡易な損傷度把握手法の開発が望まれている。そこで、著者らは、常時微動測定等の振動測定と数値解析技術を利用した構造物の簡易損傷度判定法を開発を試みている。

ここでは、研究の第1段階として、研究の背景を説明するとともに、本研究で用いる数値解析手法の応用要素法(AEM)¹⁾の精度や特性について調べ、今後の研究への適用可能性を模索する。まず、実在する2層式RCラーメン高架橋を解析対象として、無損傷時の固有振動数や地震動入力による崩壊挙動をAEM解析により求め、観測結果と比較する。次に、構造物の損傷にともなう固有振動数の変化を調べ、本研究に用いるツールとしての有効性を確認する。

2. 研究の背景

2.1 振動特性を利用した構造物の検査手法

土木構造物の地震耐力や地震後の損傷度の把握は、地震災害に対する事前対策及び復旧対策にとって大変重要である。構造物の地震耐力の照査は設計図面に基づいて行われているが、施工不良や材料の劣化等のため、構造物が図面通りの耐力を持っているとは限らない。また、劣化や損傷の検査・診断は、目視を中心に行われているが、結果が目視担当者の技量に左右されるとともに、外見上の変化と地震時の被害との関係が明確になっていない。

一方、構造物に重錘をおつけて発生させた自由振動を測定する衝撃振動試験²⁾や、大地の常時の極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高感度のセ

ンサで観測する常時微動測定³⁾による検査手法も研究されている。これらの手法では、構造物の固有振動数等の振動特性を求めることができるので、これを利用すれば構造物の剛性を概算することが可能となる。すなわち、客観的な数値に基づいて検査時点での構造物の部材の劣化や損傷状況を示すことができるので、図面や目視による照査・検査の弱点を補える。

特に、常時微動測定は、加振の必要が無いので安全に、かつ短時間が測定できるため、地震直後の損傷度判定のツールとしても最適である。また、無人でのモニタリングが可能なことから、災害時の運転規制用の警報装置等への利用にも適しているため、常時微動を用いた検査技術のさらなる進歩が望まれている。

2.2 損傷度判定への数値解析の利用

構造物の振動特性を用いた損傷度判定手法の精度を向上するためには、構造物の損傷レベルと振動特性変化の関係を明らかにしなければならない。そのため、構造物の振動特性を利用した健全度評価の際には、従来は多くの構造物の測定結果に基づく統計的なアプローチ法がとられてきた²⁾。しかし、実大構造物の損傷による振動特性変化に関する測定データは未だに十分には得られていない。そこで、本研究では、数値解析を用いて構造物の損傷レベルと振動特性変化の関係を探ることにした。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レベルで十分な解析精度があるとともに、構造物の損傷を簡単に解析できる必要がある。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)¹⁾を採用した。AEMを用いれば、構造物の振動特性と損傷レベルの関係を解析的に示すことができる。そのため、新しい基準で設計された構造物や補強構造物等の新種の構造物の損傷度の判定基準も作成可能になる。また、振動特性と崩壊挙動を関係づけることもできるので、構造物の振動特性から、その構造物が

*財団法人 鉄道総合技術研究所

**東京大学生産技術研究所 第5部

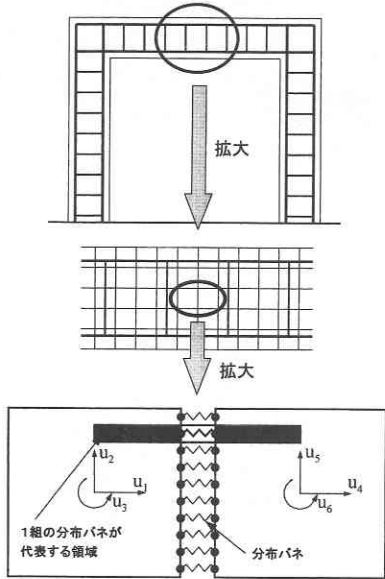


図1 AEMの要素と分布バネ

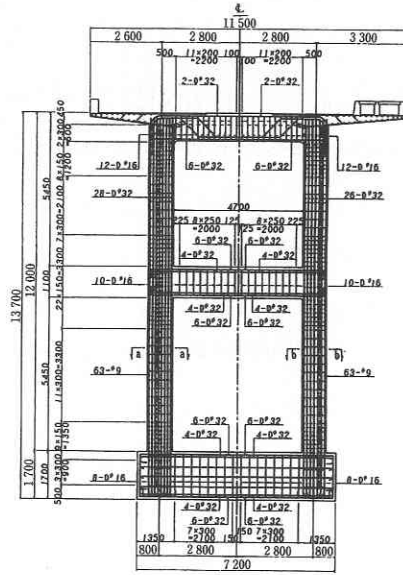


図2 高架橋配筋図⁴⁾

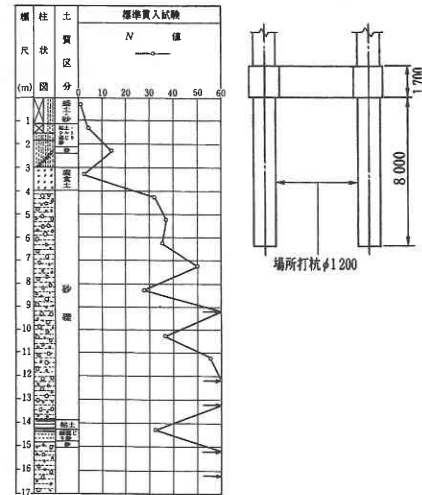


図3 地盤及び基礎⁴⁾

最終的に至るであろう崩壊モードを予測し、適切な補修・補強方法を提案することも可能になる。

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

応用要素法 (AEM) 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接線方向の2種類の分布バネでつながれている (図1)。2次元解析では、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のやり取りをする。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、クラックが自然に発生する。応用要素法は、この様なメカニズムによって、構造物の挙動を微小変形領域から大変形崩壊領域に至るまで解析できる。

4. 2層式 RC 高架橋の解析

4.1 対象高架橋 (山陽新幹線阪水高架橋)

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、図2に基づいて設計された中間梁を有する3径間連続ラーメン高架橋 (杭基礎)⁴⁾である。土質柱状図および基礎形状⁴⁾を図3に示す。図4に倒壊した阪水高架橋R7の被災状況⁴⁾を示す。なお、R7では、被災前の微動測定結果が得られており、その固有振動数は2.65 (Hz)であった。

4.2 高架橋モデル

対象高架橋を、寸法18 cm × 18 cm、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

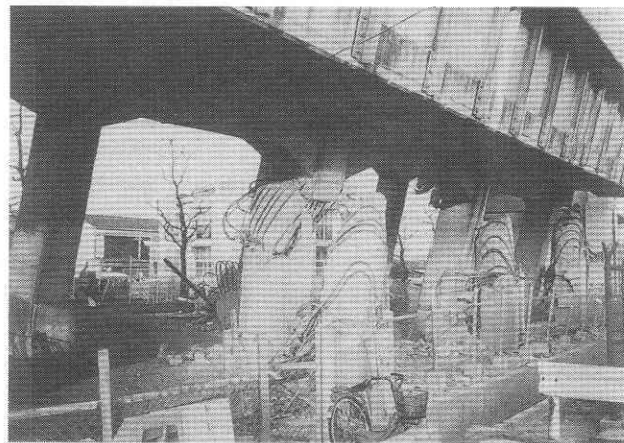


図4 被災状況図⁴⁾

表1 材料特性

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

の特性は、実強度⁵⁾を考慮して、表1の様に決めた。AEMでは、鉄筋を任意位置の要素間バネとして定義できるので、モデルの配筋は図2の配筋図に従ってほぼ忠実に再現している。

4.3 解析モデルの固有振動数

図4を参考にして求めた地盤反力係数から基礎に作用する地盤バネ定数を計算し⁶⁾、それらのバネと等価なバネをAEM要素で表現してモデルに付加した。この地盤-基礎バネの影響を考慮したモデルの固有振動数は2.60 (Hz)であり、実測値とほぼ一致した。

4.4 崩壊挙動の解析

解析モデルの地震応答解析を行う。図5に示すJR鷹取波(NS成分)⁷⁾を入力してその崩壊挙動を調べた。まず、入力波の2~5 (sec)の400 (Gal)レベルの加速度の繰り返し入力によって高架橋柱にひび割れが発達し、続く5~9 (sec)の長周期で振幅も600 (Gal)を上回る加速度の入力によって、高架橋は一気に倒壊した。

崩壊挙動の顕著であった6.8 (sec)から8.2 (sec)までの崩壊過程を0.2 (sec)刻みに、崩壊前のモデル形状と合

わせて図6に示す。解析結果では、6 (sec)頃から下層の柱のせん断破壊が進行し、図示した6.8 (sec)では、第一層の層間変位が20 (cm)に達している。7.0~7.4 (sec)では、せん断破壊がさらに進み、鉄筋が座屈し、高架橋上部が右側に傾き始め、大きなせん断力に絶えられなくなった下層部右側の柱が破断している。7.6~8.0 (sec)では、高架橋上部が傾きを増しながら落下し、左側の柱は座屈・崩壊し、破断した下層右側の柱が地面に衝突している。8.2 (sec)では下層部が完全に崩壊しており、図4の実被災状況と似た破壊形態を示している。

4.5 損傷レベルと固有振動数変化の関係

前節では、高架橋の崩壊挙動のみを示したが、ここでは、高架橋に生じるひび割れの進展状況にも着目し、損傷による固有振動数の変化を調べる。地盤及び基礎の影響を除き、上部構造の損傷による固有振動数の変化を議論するために、解析モデルは剛基盤上の高架橋とした。上部構造は前節で用いたものと同一である。また、ここでは、橋軸直交方向と橋軸方向の損傷メカニズムの違いを調べるため、橋軸方向についても解析を実施した。入力した地震波は橋軸直交方向、橋軸方向ともにJR鷹取波(NS成分)である。要素間バネが切れている領域をひび割れ領域として追跡し、損傷した状態での固有振動数も求めた。

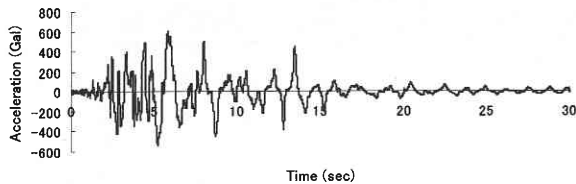


図5 入力波

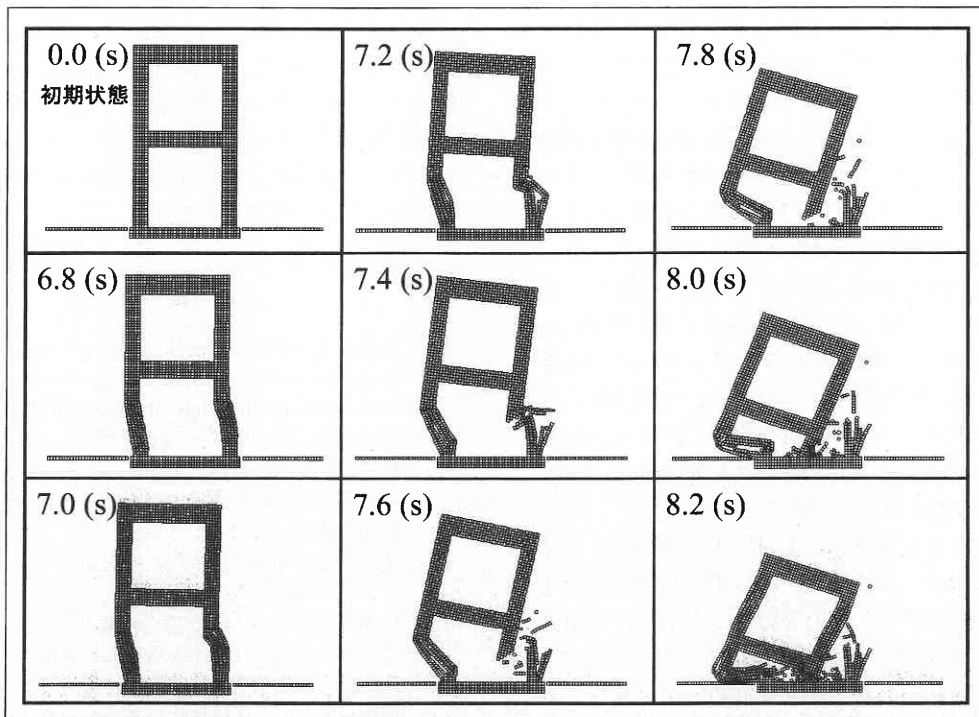


図6 阪水高架橋モデルの崩壊挙動のAEMシミュレーション

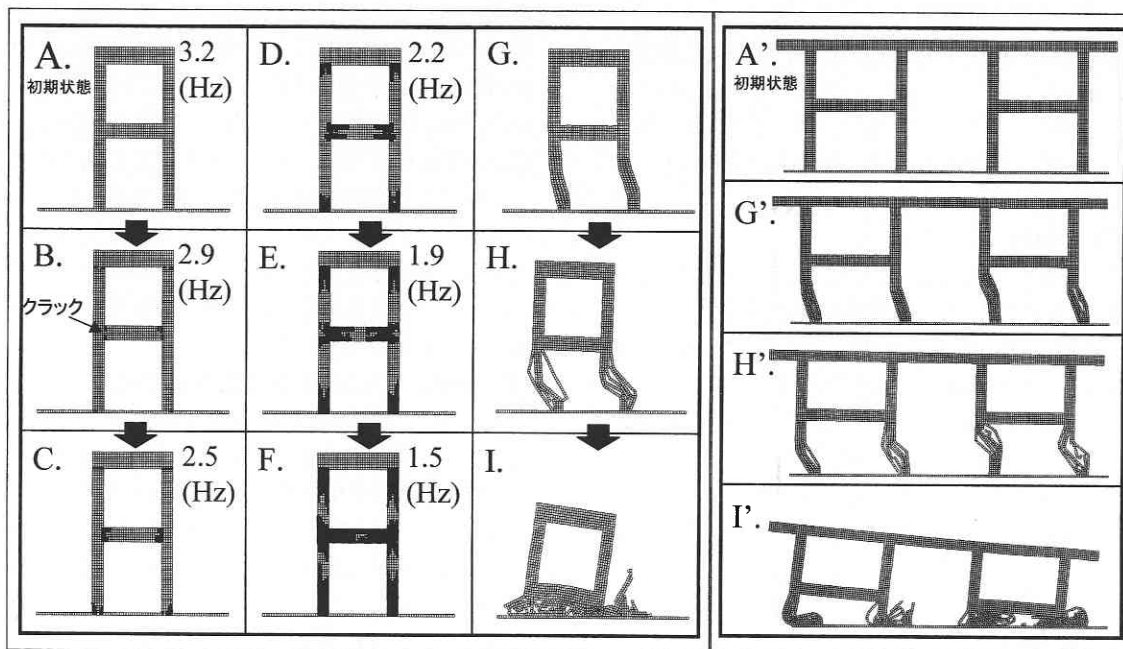


図7(a) 損傷状況の推移と固有振動数の変化 (Aは初期状態, B~Fにおいては図中の黒塗りの部分が損傷箇所, 橋軸直角方向)

図7(b) 損傷状況の推移 (橋軸方向)

図7(a)のA~Fに橋軸直交方向断面のひび割れ領域の発展状況と固有振動数変化を示す。また、同図G~Iに崩壊挙動の概要を示す。損傷前的高架橋(A)の固有振動数は3.2(Hz)であった。まず、柱とはりの接合部にわずかなクラックが発生し(B)、中間梁部と下層の柱下端部のひび割れ領域が拡がり始め(C)、ひび割れ領域幅が柱幅を上回ってさらに拡大している(D, E)。ひび割れ領域が柱の大半にまで拡がると(F)、大きな斜めひび割れに発展する。下層部の柱は断面を保てなくなり、帯筋が破断してせん断破壊し、崩壊挙動をとり始める(G)。下層部の柱が崩壊して自重を支えられなくなり(H)、最終的に下層部が完全に崩壊する(I)。

図7(a)から、ひび割れ領域の拡大による固有振動数の低下が確認できる。ひび割れ領域の大きさから推測すると、固有振動数の低下が2.5(Hz)程度までは、それほど大きな損傷ではなく、低下がそれ以上になると、柱基部等でのせん断破壊の危険性があり、特に1.5(Hz)程度まで低下している場合には崩壊の危険性が高いと判断できる。

参考までに、図7(b)に橋軸方向の崩壊挙動を示す。図中のG', H', I'はそれぞれ図7(a)のG, H, Iとはほぼ同じステップの崩壊挙動である。ここでは、隣接する高架橋との連結効果や衝突の影響は考慮していないこともあり、橋軸直交方向との損傷メカニズムの顕著な差はみられなかった。柱の上下端部及び中間梁部からひび割れ領域が進展し、下層部の柱がせん断破壊して崩壊した。なお、損傷前の固有振動数は3.0(Hz)であった。

5. ま と め

本報では、2層式RC高架橋を対象として、応用要素法(AEM)によるシミュレーションを実施し、同手法を用いて構造物の線形挙動から大変形崩壊挙動までを追跡できることを確認した。また、構造物の損傷レベルと固有振動数変化の関係を分析する手法を示し、構造物の損傷による固有振動数の低下を確かめた。今後は、ここで得られた成果を応用し、振動測定による簡易損傷度把握手法の精度向上をはかっていく予定である。

(1999年8月10日受理)

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 Research Center, IIS, Univ. of Tokyo, No.30, pp.103-116, 1997.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物, 丸善, 1997.
- 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. 23 d, 1996.