

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

Quick Inspection Method for Earthquake Damaged RC Structures by Non-linear Numerical Simulation

上半 文昭¹・目黒 公郎²
Fumiaki UEHAN and Kimiro MEGURO

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 by comparing with the experimental result of change of natural frequency of the RC column due to damage and also actual earthquake damage to existing two-storied RC rigid frame viaduct. 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, quick 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。

特にセンサを設置するだけで、安全かつ簡単に、そして必要なときにいつでも測定できる常時微動測定による損傷度判定手法は、非常に有効な検査手法の一つと考えられる。しかしながら、構造物の損傷による振動特性の変化についてのデータは十分に得られておらず、常時微動測定を利用して構造物の損傷レベルを正しく推定することは、現状では不可能

である。そこで、著者らは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し、常時微動による簡易損傷度把握手法の検査精度の向上や適用範囲の拡張に取り組むことにした。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 (Applied Element Method, 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えた。まず、部材レベルの損傷による固有振動数変化のシミュレーションを実行し、次に1995年兵庫県南部地震で被災した実大構造物の損傷過程の追跡例を示す。そして最後に、即時損傷度判定基準の作成手順について考察する。

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(図-1)。列車走行振動試験は、列車の走行により発生する振動を測定することにより、構造物の固有振動数、揺れの振幅等を調べるもので、主に鉄道橋の桁の健全度判定に用いられている⁴⁾。衝撃振動試験は、構造物の剛性低下を評価するために、重錘や小槌等で構造物を打撃し、発生した衝撃振動から構造物の固有振動数を

求める試験である。主として構造物の基礎の健全度を判定する手法として活用されてきたが、高架橋の健全度判定方法も研究されている⁵⁾。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、構造物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、地震外力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。

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

常時微動測定等によって精度の高い構造物の即時損傷度判定を行うためには、構造物の損傷過程を正しく把握するとともに、損傷による振動特性の変化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挙動、及び損傷による振動特性変化を探る。

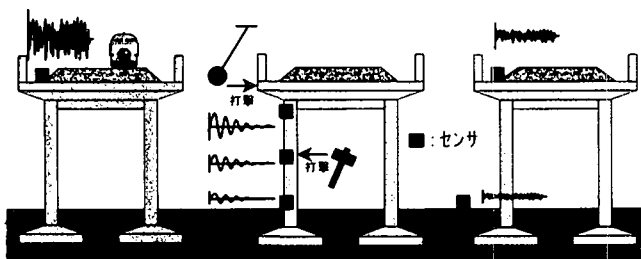


図-1 構造物の振動特性を利用した健全度把握手法

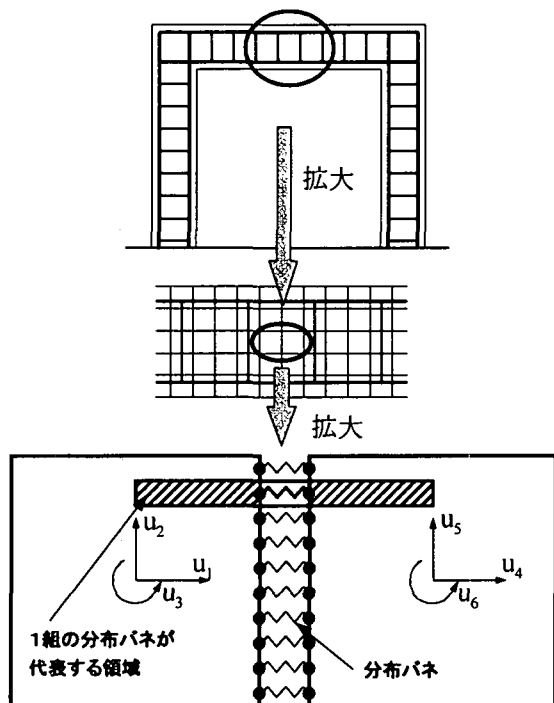


図-2 AEMにおける構造物のモデル化

本研究に適した解析手法には、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、構造物の損傷挙動を解析できることが求められる。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)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。2次元AEMでは、平面応力状態を仮定して3次元の対象物を図-2の様にモデル化する。各要素は法線方向とせん断方向の2種類のバネを1組とする複数の分布バネでつながれている。図-2に網掛けで示した部分の法線方向のバネ剛性 K_n 、せん断方向のバネ剛性 K_s はそれぞれ式(1)、式(2)で定義される。

$$K_n = \frac{E \cdot d \cdot T}{a} \quad (1)$$

$$K_s = \frac{G \cdot d \cdot T}{a} \quad (2)$$

ここで、 d はバネの間隔、 T は要素の厚さ、 a はバネが代表する領域の長さ、 E 、 G はそれぞれ材料のヤング係数、せん断係数である。解析対象が鉄筋コンクリートの場合で、網掛けの領域に鉄筋が位置している場合には、この部分に限って鉄筋バネとコンクリートバネを並列で配置する。鉄筋バネの剛性は、鉄筋のヤング係数と奥行き方向に存在する鉄筋の総断面積を考慮して求める。

2次元解析の場合、各要素は水平、鉛直、回転の3自由度を持っている。図-3に示すように、ある1組の分布バネで結ばれた2つの要素を考える場合、各自由度に相当する剛性マトリクス (左上1/4) が、式(3)の様求められる。

$$[K_E] = \begin{bmatrix} \sin^2(\theta+\alpha)K_n & -K_n \sin(\theta+\alpha) \cos(\theta+\alpha) & \cos(\theta+\alpha)K_n L \sin(\alpha) \\ +\cos^2(\theta+\alpha)K_n & +K_n \sin(\theta+\alpha) \cos(\theta+\alpha) & -\sin(\theta+\alpha)K_n L \cos(\alpha) \\ -K_n \sin(\theta+\alpha) \cos(\theta+\alpha) & \sin^2(\theta+\alpha)K_n & \cos(\theta+\alpha)K_n L \cos(\alpha) \\ +K_n \sin(\theta+\alpha) \cos(\theta+\alpha) & +\cos^2(\theta+\alpha)K_n & +\sin(\theta+\alpha)K_n L \sin(\alpha) \\ \cos(\theta+\alpha)K_n L \sin(\alpha) & \cos(\theta+\alpha)K_n L \cos(\alpha) & L^2 \cos^2(\alpha)K_n \\ -\sin(\theta+\alpha)K_n L \cos(\alpha) & +\sin(\theta+\alpha)K_n L \sin(\alpha) & +L^2 \sin^2(\alpha)K_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

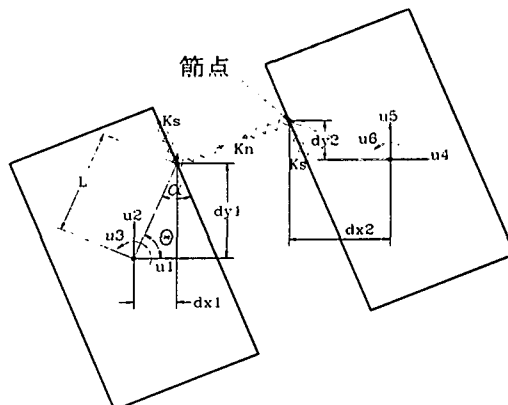


図-3 2要素間の1組の分布バネ

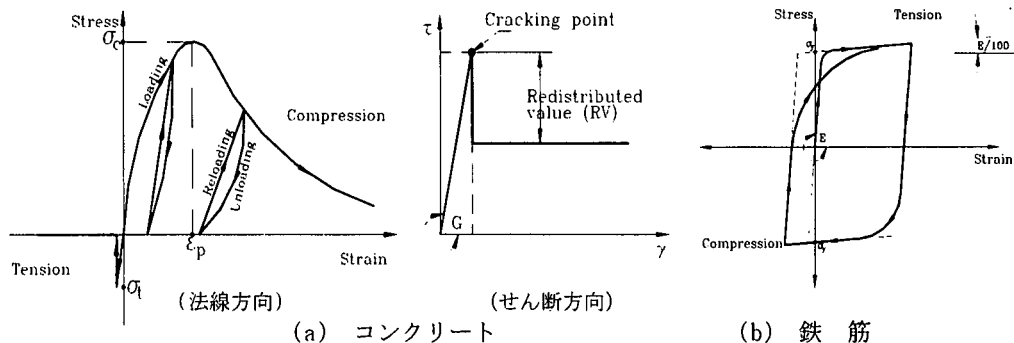


図-4 鉄筋コンクリートの解析に用いる材料モデル

式(3)は、1組の分布バネに対する剛性マトリクスであり、要素全体の剛性マトリクスは、それぞれの要素の周りの全バネの剛性マトリクスの和で求められる。

本研究では、圧縮荷重下のコンクリートの材料モデルとして、図-4(a)の前川モデル⁶⁾を採用している。引張荷重を受けるコンクリートの材料モデルは、引張強度に達するまでは初期剛性をもっているものと仮定し、クラック発生後は0と仮定する。鉄筋については、図-4(b)の材料モデルを用いた。

各分布バネの位置での主応力値が材料の強度を超えると、バネが切断してクラックが自然に発生する。各分布バネの位置における主応力の値は、次の様に計算している。図-5の点(A)におけるせん断応力 τ および法線応力 σ_1 は、それぞれせん断バネ、法線バネのひずみから計算する。 σ_1 は、点(B)と点(C)における σ_1 を用いて式(4)によって計算する。

$$\sigma_2 = \frac{x}{a} \sigma_B + \frac{(a-x)}{a} \sigma_C \quad (4)$$

主応力 σ_p は式(5)で計算される。

$$\sigma_p = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right)^2 + (\tau)^2} \quad (5)$$

図-5中の β は式(6)で求められる。

$$\tan(2\beta) = \left(\frac{2\tau}{\sigma_1 + \sigma_2} \right) \quad (6)$$

主応力 σ_p と材料の強度を比較し、主応力が強度を超える場合には、法線バネ、せん断バネの両方を切断する。バネの切断によって開放される力は、次の解析ステップで周囲の分布バネに再分配される。

応用要素法では、要素の衝突や再接触問題も取り扱える⁷⁾。図-6に示すように、衝突や再接触問題を扱う際には、接触判定の簡便さと、この変形レンジでは要素の角は応力集中等でなくなっていると考えられることから、要素形状を円形と仮定する。接触する2要素間には法線バネとせん断バネからなる衝突バネを新たに付加する。衝突バネの法線バネの方向は2要素の重心を通る方向で、せん断バネの方向は仮定した2つの円弧の接線方向となる。法線バネの剛性は式(7)で求める。

$$K_n = \frac{E \cdot d \cdot t}{D} \quad (7)$$

ここに、 E はヤング係数、 t は要素の厚さ、 D は要素重心間の距離、そして d は2要素の最大交わり量であり、要素の大きさの0.1倍と仮定している。せん断バネの剛性は法線バネの0.01倍と仮定している。これらのバネは、要素が接触していれば存在し、要素が離れると取り除かれる。

応用要素法は、このよう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。このAEMの長所を生かせば、構造物の倒壊が周囲に与える影響の分析、本震によって損傷した構造物の余震による崩壊可能性の分析など、本研究の適用範囲をさらに拡張できるものと期待している。

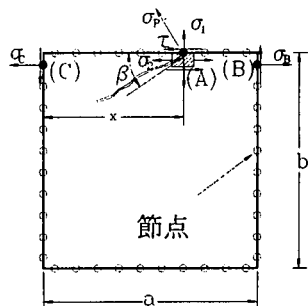


図-5 各バネの位置における主応力の求め方

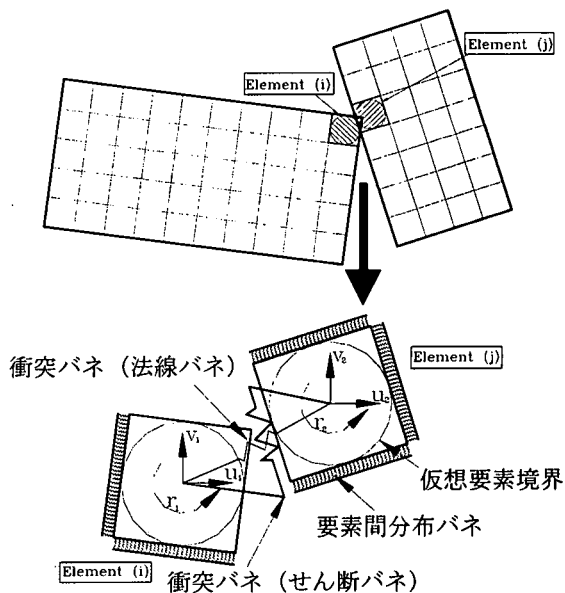


図-6 衝突・再接触の取り扱い

4. 部材の損傷による固有振動数変化の解析⁹⁾

部材の損傷による振動特性変化のAEMによる解析精度を調べるために、RC供試体を用いた実験のシミュレーションを行う。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⁹⁾。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-1の通りである。供試体は寸法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が、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サイクル载荷とした。図-8の上段が供試体に与えた変位で、下段が実験と解析による一次固有振動数の変化の比較である。4 δ_y 以降、解析値が実験値よりも若干高い振動数を示す傾向にあるものの、解析結果は実験結果をよく追跡できていることがわかる。

図-8の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(サイクル途中)が入力変位の周期よりもさらに小刻みに変化しているのは、载荷位置の変位が大きくてコンクリートのクラックが開いている状態で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(変位が小さくなった時)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。

4 δ_y 以降では解析値よりも実験値の方が固有振動数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7 δ_y 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。なお、これらの点は、今後モデルに反映させ、よりいっそうの精度向上をはかる予定である。

表-1 材料試験結果

コンクリート	柱部	7-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

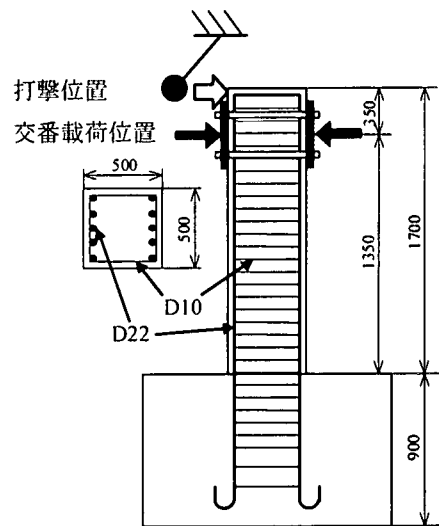


図-7 供試体形状及び配筋

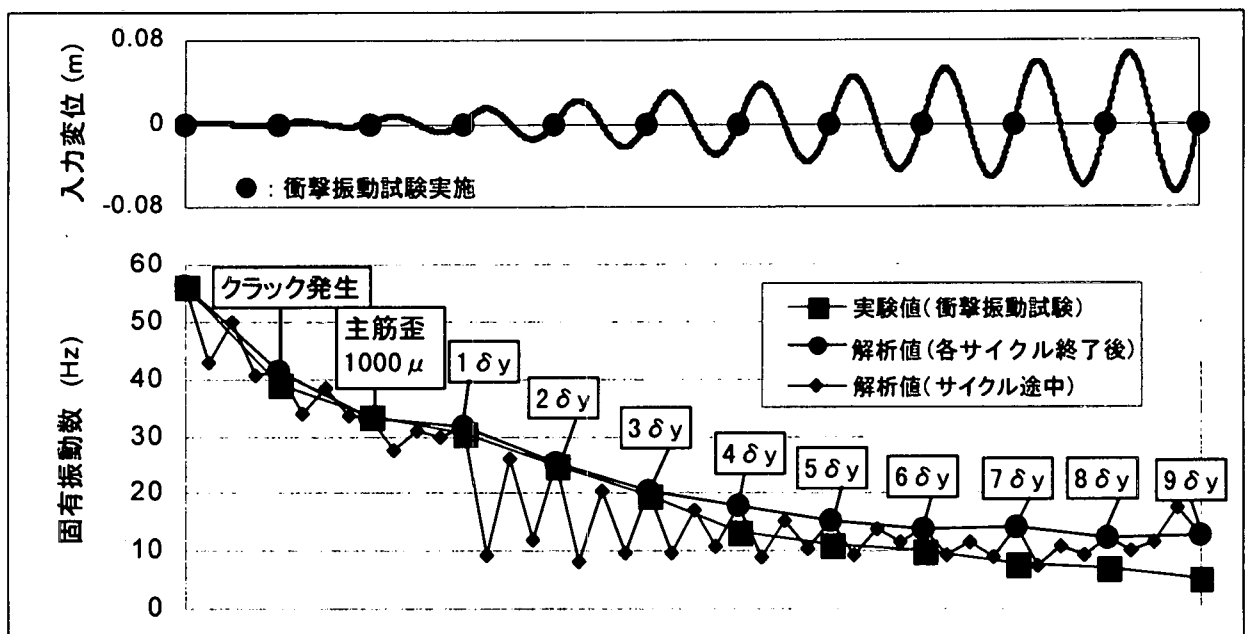


図-8 入力変位(上図)と供試体固有振動数の変化(下図)

5. 実大構造物の解析¹⁰⁾

複雑な実大構造物の損傷挙動の解析精度を調べるために、1995年兵庫県南部地震で倒壊した阪水高架橋を対象と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-9に倒壊した阪水高架橋R7の被災状況¹¹⁾を示す。AEM解析の際には、対象高架橋の線路直交方向の変形は全て等しいと仮定し、平面応力状態の仮定のもとに、対象高架橋の線路直交方向断面を寸法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¹²⁾を考慮して表-2の様に決めた。モデルの配筋は実構造物の配筋図¹¹⁾（図-10）をほぼ忠実に再現している。図-11に示す地盤および基礎¹¹⁾の影響を考慮するために、高架橋モデル下部に地盤-基礎バネ¹³⁾を配置した。モデルの固有振動数は2.60Hzで同高架橋の被災前の実測値（2.65Hz）とほぼ一致した。なお、基礎バネの影響を考慮しない場合の高架橋の固有振動数は3.20Hzであった。

次に、図-12に示すJR鷹取波（NS成分）¹⁴⁾を入力してモデルの損傷挙動を調べた。解析結果の一部を図-13に示す。図-13の(a)は解析モデルの初期状態を示しており、(b)～(e)は損傷領域の進展状況、(f)～(h)は崩壊状況を示している。図-13(b)～(e)の黒塗りの部分が損傷部分（AEMモデルの要素間分布バネが切断した部分）である。各損傷レベルでの固有振動数の計算結果も同図中に示した。このようにAEMを用いれば、構造物の損傷レベルとその損傷レベルでの固有振動数とを結びつけることができる。モデルの崩壊形状(h)は図-9とほぼ等しく、AEMを用いて構造物の複雑な損傷・崩壊挙動を追跡できることも確認された。

なお、局所的な損傷と固有振動数の変化を結びつけるだけであれば、有限要素法（FEM）を代表とする他の数値解析法を用いても可能と思われる。しかし、3章末でも述べた様に、本研究の目的としては、特に強い地震動を受けた際に高架橋が崩壊して周囲に及ぼす影響や、損傷を受けた構造物が余震によつ



図-9 阪水高架橋被災状況

て崩壊する問題を扱う必要があることからAEMを用いている。

表-2 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

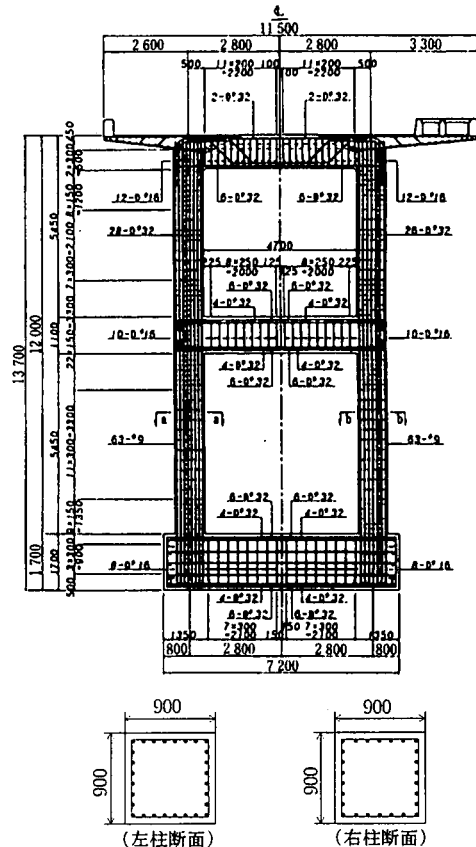


図-10 高架橋形状及び配筋

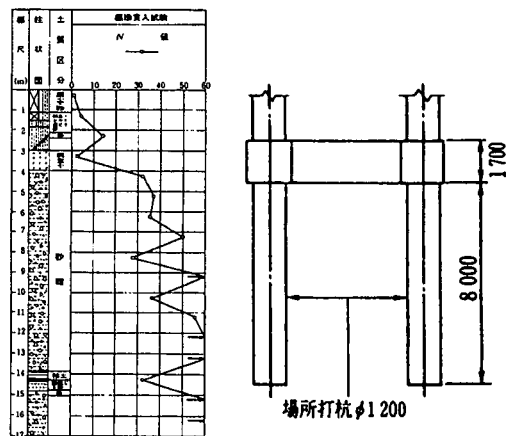


図-11 地盤及び基礎

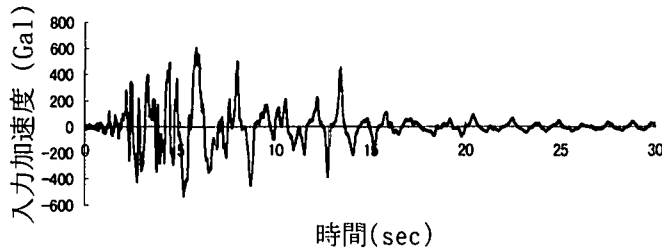


図-12 入力加速度 (JR鷹取NS成分)

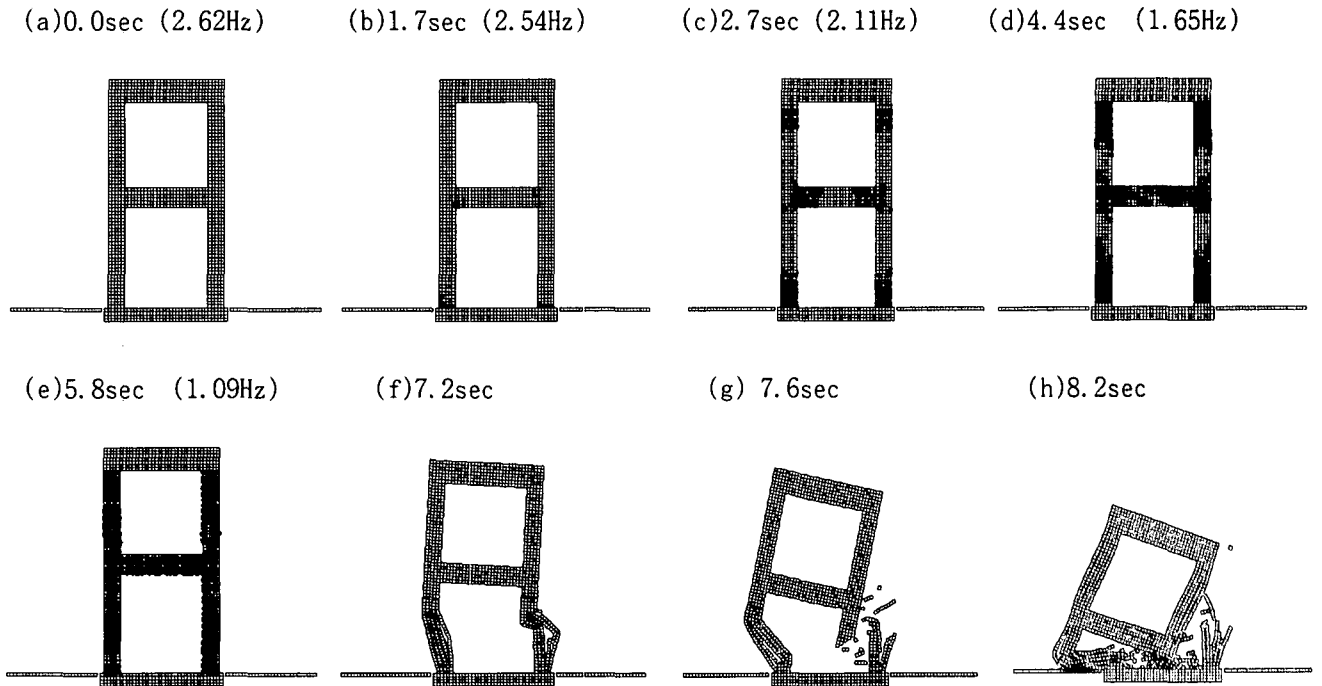


図-13 解析モデルの損傷・崩壊挙動の進展

6. 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、4章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。

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を行えば、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ー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や基礎と上部構造物の設計強度のバランス等を考慮して、地震時の各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(図-14)。

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ーを実施する。得られた固有振動数変化に地盤-基礎バ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になると考えられる。

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-基礎バネの変化のパラメータスタディーを実施する。得られた地盤-基礎バ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。

この様にして、損傷度判定基準が作成されていれば、常時微動測定等の簡便な振動測定で構造物の損傷度を把握できるようになる。従来の目視による損傷度検査は熟練した検査担当者が検査を行わなけれ

ばならないが、常時微動測定であれば比較的簡単に測定できるので経験の浅い技術者でも損傷度判定を行えるようになる。また、目視することが難しい基礎の損傷度や鋼鉄等で被覆された補強RC構造物の補強材内部のRC部材の損傷度¹⁵⁾も把握可能になるという利点がある。

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¹⁶⁾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-14)。

また、このような固有振動数変化に基づく損傷度判定基準を作成しておけば、常時微動等の無人モニタリングシステムを用いて損傷度を把握できるようになる。つまり、現地に検査人員を派遣する必要のない無人での常時損傷度把握システムが構築可能であり、地震直後のリアルタイム被害把握に有力なツールになると期待される¹⁷⁾。

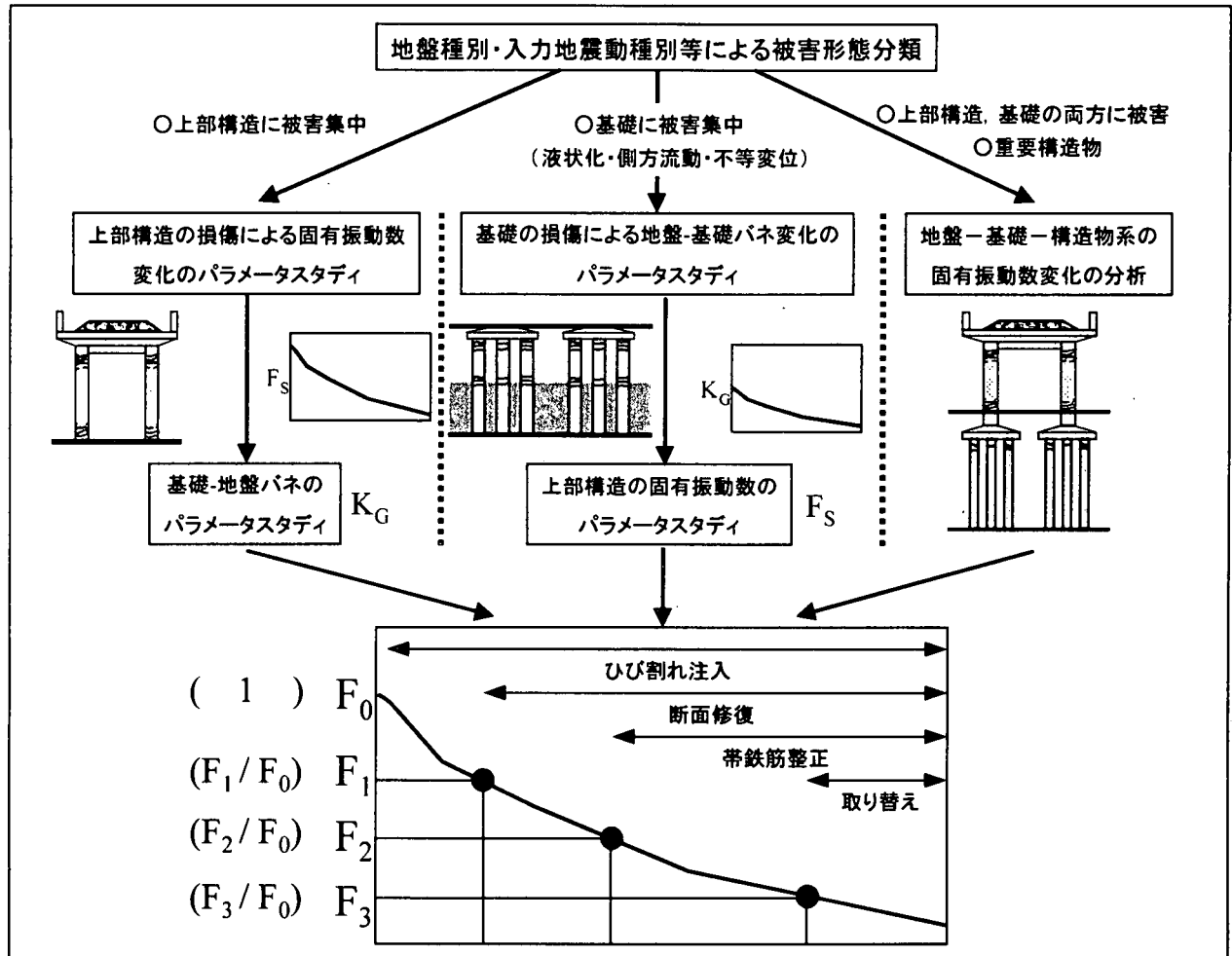


図-14 損傷度判定基準の作成手順

7. まとめ

本報では、AEMによる非線形構造解析を用いて、常時微動測定等の振動測定を利用した構造物の即時損傷度判定手法の精度向上方法について考察した。まず、AEMの解析精度を確認し、次に損傷度判定基準の作成手順について述べた。今後は、実構造物の損傷度判定基準の作成を試みるとともに、大変形・破壊挙動までを解析できるAEMの長所を生かして、構造物の倒壊が周囲に与える影響の分析、本震によって損傷した構造物の余震による崩壊可能性の分析等も行いたい。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、地震被害危険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.
- 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.
- 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) 杉舘政雄, 市川篤司, 小柴明弘, 阿部充: 橋梁診断システムにおける鋼橋の健全度診断評価手法, 鉄道総研報告, Vol. 8, No. 8, 1994.
 - 5) 西村昭彦: ラーメン高架橋の健全度評価法の研究, 鉄道総研報告, Vol. 4, No. 9, 1990.
 - 6) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂, 1991.
 - 7) Tagel-Din H. and Meguro K.: Applied element simulation for collapse analysis of structures, *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, IIS, Univ. of Tokyo, No.32, pp.113-124, 1999.*
 - 8) 上半文昭, 目黒公郎: 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, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp. 19-22, 2000.
 - 9) 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.
 - 10) 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.
 - 11) 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.
 - 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) 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.
 - 15) Uehan F., Meguro K.: Vulnerability assessment of jacketed viaduct using microtremor measurement & numerical simulation, *Proceedings of 12th World Conference of Earthquake Engineering, 2000.*
 - 16) 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.
 - 17) 上半文昭, 目黒公郎: 非線形構造解析を活用した地震時早期被害把握システムの提案, 土木学会第55回年次学術講演会概要集, I-A20, 2000.

(2000年4月21日受付)