

# 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

鉄道総合技術研究所（東大生研） 正会員 上半 文昭  
東京大学生産技術研究所 正会員 目黒 公郎

## 1. 研究の背景と目的

大規模地震災害発生時に適切な復旧対策を講じるためには、地震被害の迅速かつ確かな把握が必要不可欠である。そのため、各種の機関で地震被害予測システムの研究がなされてきた<sup>1)</sup>。鉄道総研でも、被害予測・復旧支援システムのプロトタイプ HERAS-II を開発した<sup>2)</sup>。HERAS-II では、個々の構造物の被害推定精度を向上させるために、常時微動測定等から得られた構造物の振動特性の被害予測への積極的な活用を試みたが、その被害推定精度はまだ十分とは言えない。

もし被害の把握のみが目的なのであれば、地震動や構造物の特性から被害を“推定する”システムを構築するよりも、“被害そのものを検出する”システムを構築する方が効果的だと考えられる。そこで、ここでは、振動測定と非線形構造解析を利用した RC 構造物の地震被害把握システムについて考察する。非線形構造解析によって構造物の損傷による固有振動数変化を事前に解析しておくことにより、常時微動測定を利用して構造物の損傷度を把握可能なシステムを提案する。

## 2. 地震時早期被害把握システムに用いる要素技術

### 2-1 応用要素法<sup>3)</sup>

本研究では、非線形構造解析手法として応用要素法 (AEM) を用いる。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 1)。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だけでなく、コンクリートのクラックや鉄筋の降伏・破断等の RC 構造物の損傷とそれに伴う固有振動数の変化を簡単に関係づけられる。

構造物が損傷すると、剛性の低下から一般に固有振動数が低下する。この AEM を用いて構造物の損傷に

よる固有振動数の低下を事前に解析しておけば、損傷した構造物の固有振動数を計測するだけで、その損傷度を把握できる。

### 2-2 常時微動測定

常時微動は、大地の常時の極微小な震動である。構造物もこの常時微動を振動源として微小な振幅で振動しており、この振動の卓越振動数から構造物の固有振動数を精度良く推定できることを、著者らも確かめてきた<sup>4)</sup>。常時微動測定では、常時微動以外に特別な振動源を必要としないので、ただセンサを設置するだけで無人で安全に構造物の振動特性をモニタリングできる特長を持つ。

### 3. 構造物の損傷による固有振動数変化の AEM 解析

RC 構造物の損傷による固有振動数変化の解析への AEM の適用例を示す。RC 供試体を用いて損傷による固有振動数変化を調べた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 2) を正負交番載荷によって損傷させ、各損傷レベル (各載荷サイクル終了時) における柱の固有振動数を重錘を用いた衝撃振動試験によって調べている<sup>5)</sup>。材料試験から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、同供試体の損傷による固有振動数変化を解析した。

図 3 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。4 y 以降では解析値よりも実験値の方が若干小さくなる。これは、実験で用いた軸方向無載荷の RC 柱では、クラック幅が大きくなると入力変位 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って剛性が下がるためと考えられる。また、実験では 7 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。より精度の高い解析を行うには、これらの点をモデルに反映させる必要がある。なお、ここでは部材の縮小モデルに対する解析結果を示したが、地盤、基礎を含めた実構造物の解析でも、その損傷挙動を正しく追跡できることを別途確認している<sup>6)</sup>。この様に、AEM を用いて RC 構造物の損傷による固有振動数変化を精度良く解析できる。

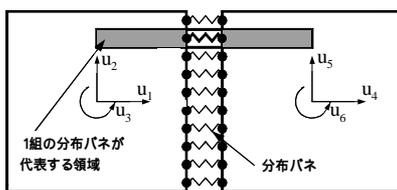


図 1 AEM の要素と分布バネ

表 1 材料試験結果

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

キーワード：被害予測，復旧支援，リアルタイムモニタリング，非線形構造解析，応用要素法，常時微動

連絡先 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東大生研 B 棟, TEL: (03) 5452-6437, E-mail: [uehan@incede.iis.u-tokyo.ac.jp](mailto:uehan@incede.iis.u-tokyo.ac.jp))

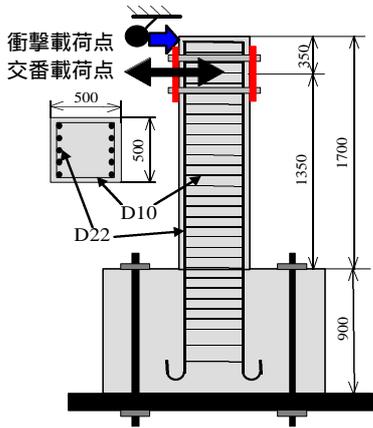


図2 供試体形状及び配筋

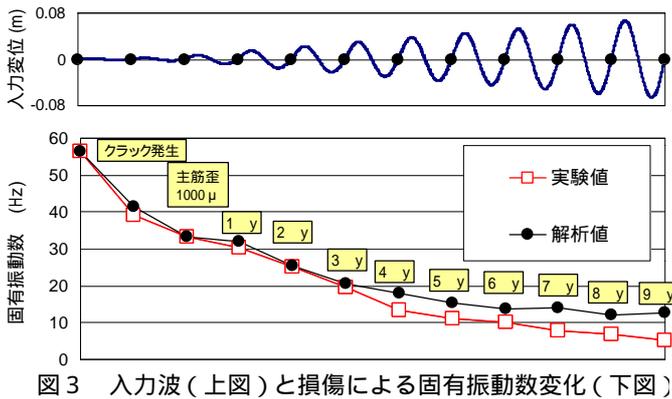


図3 入力波(上図)と損傷による固有振動数変化(下図)

#### 4. 地震時早期被害把握システムの提案

RC鉄道高架橋等を対象とした地震被害把握システムの構築方法の概要を示す。

##### 4-1 損傷度判定基準の作成

次の手順で対象とする構造物の損傷度判定基準を作成する。

- (1) 対象とする構造物の数値モデルの作成。
- (2) 損傷による固有振動数変化の解析。
- (3) 各損傷レベル(鉄道分野における構造物の健全度区分<sup>7)</sup> AA, A, B, C, S等)の境界に対応する固有振動数を算定し、損傷度の判定基準とする。

##### 4-2 地震被害把握システムの構成(図4)

###### (1) センサユニット

構造物に設置するセンサユニットは、微動センサ、演算処理装置及び通信装置で構成される。中央司令等に設置した集中管理部からの指示または地震動等をトリガとして構造物の微動を計測し、構造物の固有振動数または損傷度を集中管理部に送信する機能を有する。

###### (2) 集中管理部・表示部

集中管理部・表示部はセンサユニットと情報をやりとりする通信装置、受けた情報を蓄積するデータベース及び視覚的に被害状況を把握するための表示装置で構成される。地震発生直後に各センサユニットの情報を収集してデータベース化するとともに、被害の規模と空間的分布を視覚的に表示する。

#### 5. 提案システムの長所と問題点

提案したシステムを用いれば地震被害の規模や空間的分布を中央司令等に居ながらにして瞬時に把握できるようになるため、これまでより迅速かつ的確な復旧対策を講じられるようになる。また、構造物の破壊挙動

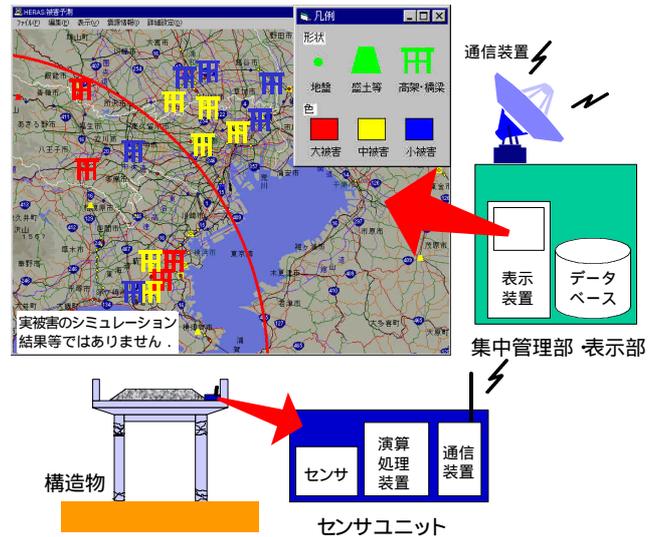


図4 地震被害把握システムの概要

までを追跡可能な AEM を解析手法として用いているので、本震によって損傷した構造物の余震による崩壊危険度の分析や、構造物崩壊による周辺の道路閉塞の発生危険度の評価等、さまざまな分野への応用の可能性を秘めている。

ただし、構造物の耐用期間中に数回程度しか起きない大地震に対する被害把握にこれだけのシステムを構築しても、投資に対する効果が得られない可能性がある。しかし、同システムは平常時にも構造物の経年劣化に対するヘルスマonitoring装置として利用可能であること、中小地震の際にも構造物の損傷が軽微であることを早期に確認でき、ダウンタイムの短縮に役立つ可能性があること等、大地震時以外にもその付加価値を見出すことができる。また、近年の計測技術、通信技術等の進歩は著しく、各種装置の低コスト化、メンテナンスフリー化もよりいっそう進むものと期待されることから、本提案システムは決して非現実的なものではないと思われる。

#### 6. まとめ

非線形構造解析と振動測定技術を利用した構造物の地震時早期被害把握システムを提案した。今後は、被害の把握精度向上を図るとともに、劣化度の把握手法の開発、実システムの試作等にも取り組みたい。

#### 参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会リアルタイム地震防災研究小委員会: 第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp. 5-62, 土木学会, 1999.
- 2) 上半文昭, 佐藤新二, 井上英司, 富田健司: 災害予測復旧支援システム“New HERAS”の開発, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 3445-3450, 1998.
- 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) F. Uehan, K. Meguro: Vulnerability assessment of jacketed viaduct using microtremor measurement & numerical simulation, Proceedings of 12<sup>th</sup> World Conference of Earthquake Engineering, 2000.
- 5) 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 -A, pp.402-403, 1997.
- 6) 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.
- 7) 鉄道総合技術研究所: 構造物保守管理の標準・同解説コンクリート構造, 研友社, 1987.