

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研究

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研究員) (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

²正会員 工博 東京大学生産技術研究所 国際災害軽減工学研究センター (同上)

著者らは、常時微動などの簡単な振動計測による簡易損傷度把握手法の開発に取り組んでいる。ここでは、構造物の損傷レベルと振動特性変化の関係を調べるツールとして、構造物の挙動を微小変形領域から大変形崩壊領域まで取り扱うことのできる破壊解析手法 (応用要素法: AEM) を採用し、今後の研究への適用可能性を調べた。まず、実在する2層式 RC ラーメン高架橋を対象として、固有振動数と崩壊挙動をシミュレーションし、観測記録に近い結果を得られることを確かめた。次に、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振動特性の変化を分析した。

Key Words : Applied Element Method, earthquake damage, railway bridge, damage evaluation, Kobe earthquake, collapse simulation

1. はじめに

土木構造物の日常の健全度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。構造物の劣化や損傷の検査・診断は、目視を中心に行われるが、鉄道分野では衝撃振動や常時微動等の構造物の振動を利用する手法が研究されてきた¹⁾。それらの検査手法は、検査担当者の知識や経験に左右されない客観的な結果が得られること、また構造物の常時無人モニタリングに適しており、災害時の運転規制等への応用も可能であること等から、さらなる発展が期待されている。

構造物の劣化、損傷レベルと振動特性変化との関係が明らかになり、詳細なデータベースにまとめられれば、常時微動などの簡単な振動計測によって、構造物の劣化、損傷程度を的確に把握できる可能性がある。しかし、実大構造物の損傷と振動特性変化に関する測定データは十分に得られていない。そこで、本研究では、構造物の損傷レベルと振動特性変化の関係を調べるツールとして、構造物の挙動を微小変形領域から大変形崩壊領域まで取り扱うことのできる破壊解析手法 (応用要素法: AEM)²⁾を採用することにした。

ここでは、研究の第1段階として、AEM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、固有振動数や地震動入力による崩壊挙動を調べ、観測結果と比較する。次に、高架橋モデルの損傷メカニズムを調べ、構造物の損傷レベルと固有振動数の変化について考察する。

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

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、このよう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。なお、手法の詳細については、文献1)を参照されたい。

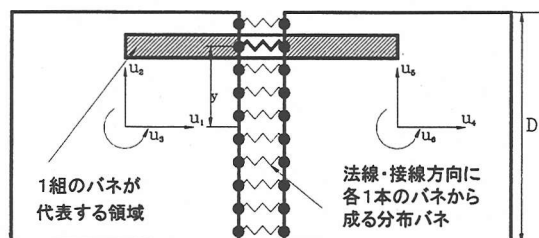


図-1 AEMの要素と分布バネ

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)

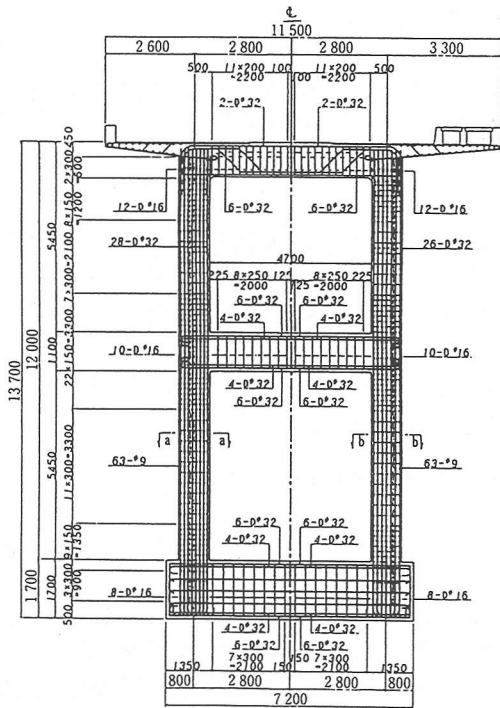


図-2 高架橋配筋図⁴⁾

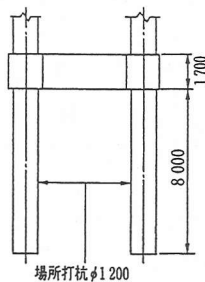


図-3 対象高架橋の基礎（場所打杭）

3. 2層式 RC 高架橋モデル

ここでは、図-2 に示す2層式RCラーメン高架橋を解析対象にする。対象高架橋を寸法18cm×18cm、要素間バネ本数10本の正方形要素でモデル化した。コンクリート及び鉄筋の特性は、実強度³⁾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。

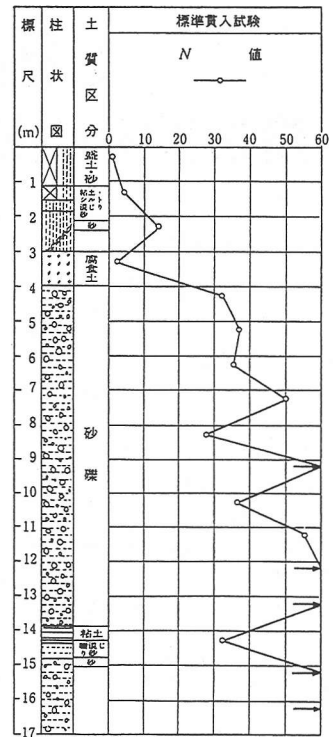


図-4 土質柱状図

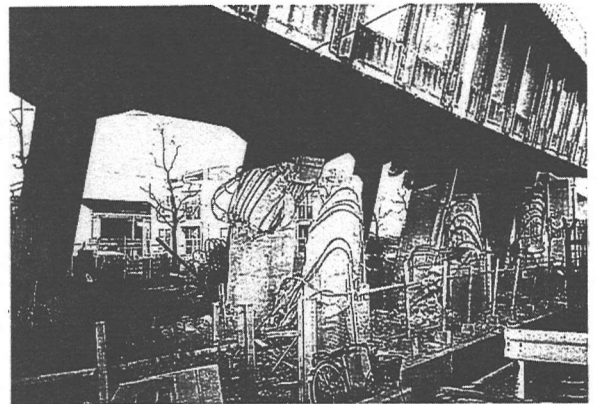


図-5 被災状況図

4. モデルの検証

(1) 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）である。基礎形状および土質柱状図⁴⁾を図-3、図-4に示す。図-5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。

(2) 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⁵⁾、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、実測値とほぼ等しい。

(3) 崩壊挙動

解析モデルの地震応答解析を行う。図-6 に示す J R 鷹取波 (NS 成分)⁶⁾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あわせて図-7 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) では完全に落橋しており、図-5 の実被災状況と似た破壊形態を示している。

5. 損傷メカニズムと固有振動数の変化

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 J R 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。

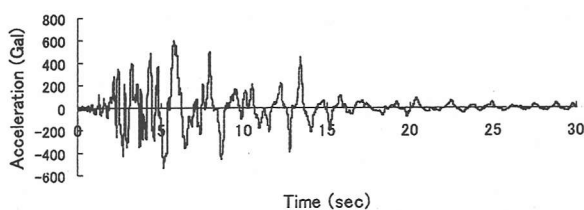


図-6 入力波

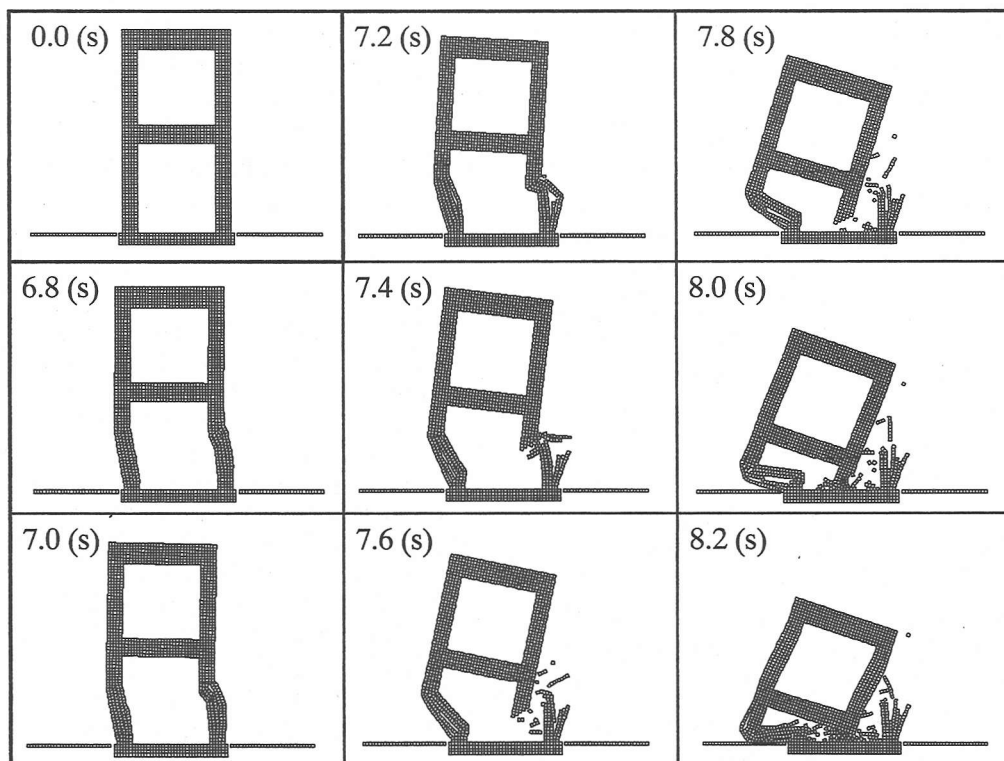


図-7 阪水高架橋モデルの崩壊挙動の AEM シミュレーション

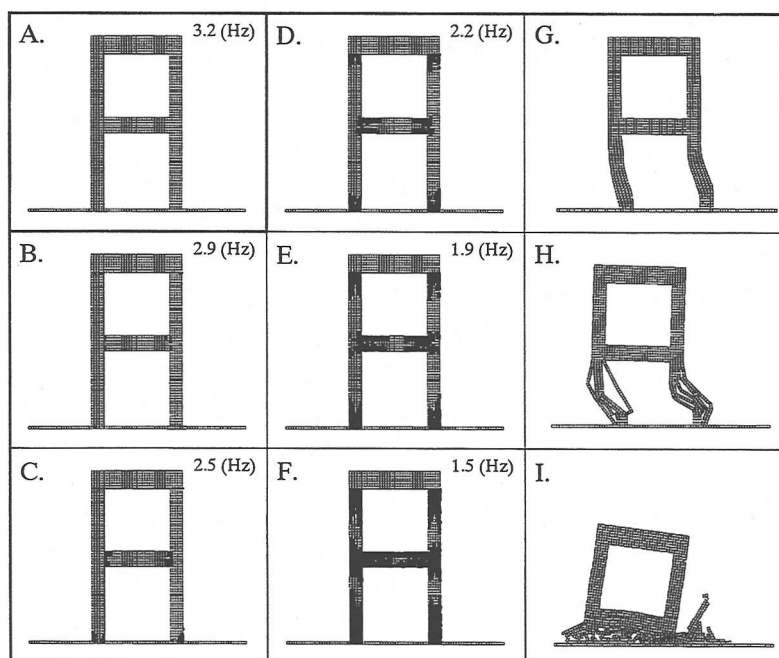


図-8 損傷状況の推移と固有振動数の変化 (Aは初期状態, B～F においては図中の黒い部分が損傷箇所, 橋軸直角方向)

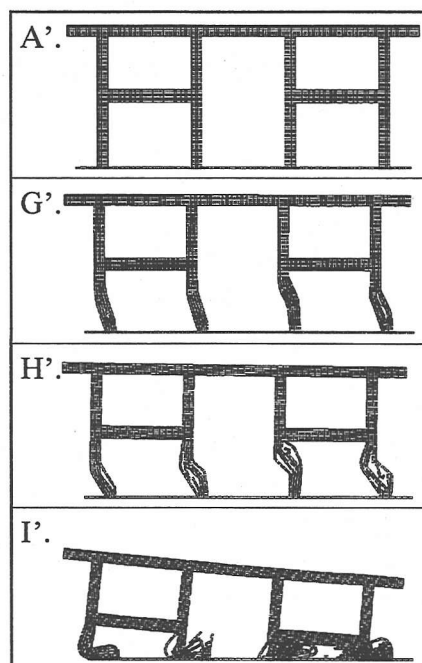


図-9 損傷状況の推移 (橋軸方向)

図-8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大し始め(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大すると(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-8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あると判断できる。

図-9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-8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発展し、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。

6. まとめ

ここでは、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。

参考文献

- 1) 例えば、中村豊、田母神宗幸、小林俊夫：洗屈に伴う橋脚振動特性の変化 - 常時微動と衝撃振動試験の比較 -, 土木学会第48回年次学術講演会, I-107, 1993.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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) 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.
- 6) 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.