

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	振動計測に基づく梁端剛性評価：その2 動的記録を用いた魚骨モデルによる梁端剛性評価
Title	
著者(和文)	玉那 覇太, 金澤健司, 飯野 夏輝, 佐藤 大樹, 北村春幸
Authors	Kenji KANAZAWA, daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 82, No. ,
Citation(English)	, Vol. 82, No. ,
発行日 / Pub. date	2012, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009571526

振動計測に基づく梁端剛性評価

その2 動的記録を用いた魚骨モデルによる梁端剛性評価

構造—振動

鉄骨建物 梁損傷 構造ヘルスマニタリング
梁剛性 震動台実験準会員 ○ 玉那覇太^{*1}正会員 金澤健司^{*2}正会員 飯野夏輝^{*1}正会員 佐藤大樹^{*1}正会員 北村春幸^{*1}

1. はじめに

前報（その1）¹⁾では、純ラーメン構造に対する魚骨モデルを用いた梁剛性の算出式を提案し、3次元FEMモデルによる静的解析結果を用いてその精度を確認した。その結果、建物の水平変形のうち、曲げ変形のみを考慮したモデルに対する梁剛性の評価は精度が高く、曲げ、せん断、軸変形を考慮したモデルに対しての評価には誤差が確認された。

本報（その2）では、前報（その1）¹⁾の静的評価を動的評価へと拡張する。図1に本報の流れを示す。図1より、はじめに3次元FEMモデル（3Dモデル）の動的解析結果に基づき、梁剛性の評価を行い精度の確認を行う。その際、3つの異なる手法を用いて動的記録を魚骨モデルに適用する。その後、3Dモデルによる損傷シミュレーションを行い、魚骨モデルによる梁剛性の低下感度を検証する。最後に、2007年度E-ディフェンス震動台実験における鉄骨高層建物試験体の観測記録を用いて、加振実験に伴う試験体の梁剛性の変化を評価した。

2. モデル概要

図2および図3に、本検討で用いた3Dモデルと魚骨モデルの概要を示す。ここで、3Dモデルは、4層の純ラーメンの構造物の上にコンクリート錘が3層積載された2007年度E-ディフェンス鉄骨高層建物試験体²⁾を模擬したモデルであり、線形モデルを仮定した。各フレームの断面寸法は前報（その1）¹⁾の表1に示した。また、検討用の魚骨モデルは、下層4層を回転バネによってモデル化し、上層3層はせん断バネによってモデル化した³⁾。ここで、魚骨柱の剛性は3Dモデルにおける柱1本の剛性とした。すなわち、魚骨モデルに入力される水平力は、部材モデルに入力された水平力の6分の1の値となる。

3. 動的記録の適用方法および結果

動的記録における荷重（加速度）と層間変位の時刻歴記録には、建物のもつ減衰により位相差が生じるため、それらの記録を提案式に直接用いると正確な剛性を評価できない。そこで、本章では、動的記録を提案魚骨モデル

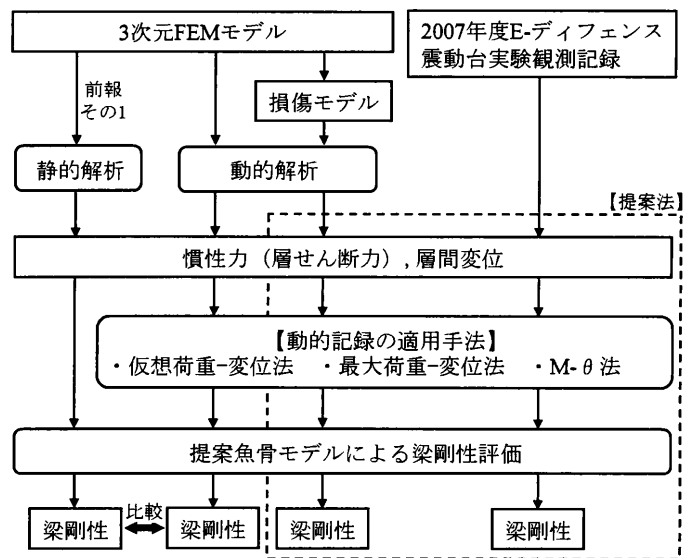


図1 本報の流れ

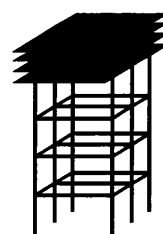


図2 3Dモデル概要

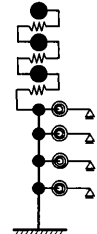


図3 魚骨モデル概要

ルに適用させるために用いた3つの評価手法を示す。以下に、前報（その1）で示した梁剛性の算出に用いる式を再度示す。

$$\theta_j = -\theta_{j-1} - \frac{h_j^2}{6EI} \times \sum_{i=j}^N P_i + \frac{2}{h_j} (V_j - V_{j-1}) \quad (1)$$

$$K_j = \frac{h_j}{2\theta_j} \sum_{i=j}^N P_i + \frac{1}{\theta_j} \left(\sum_{i=j}^{N-1} P_{i+1} \sum_{l=j}^i h_{l+1} - \sum_{i=j}^{N-1} K_{i+1} \theta_{i+1} \right) - \frac{EI}{\theta_j h_j} (\theta_j - \theta_{j-1}) \quad (2)$$

ここで、慣性力 P は各層重量と各層床加速度を掛け合わせることで求められる。以下で、柱梁の曲げ、せん断、軸変形を考慮したMSJモデルを例に挙げて、3つの評価手法を試してみる。また、4層部に関しては、上部のコンクリート錘の影響により評価が難しいため、梁剛性の評価は1~3層について行った。

3.1 仮想荷重-変位法

この手法では、動的解析より得られた層間変位と層せん断力の時系列データより j 層の層剛性 K_j を算出し、各層に仮想的な水平力 P_j を作用させた場合に発生する層間変位 X_j を求め、それら P_j と X_j を代表値とすることで (1)、(2) 式における P と V に用いる。図 4 に代表値の算出概要を示す。ここで、層剛性 K_j は建物頂部の変位データが元の静止位置を出て戻るまで（以下、半ループ）の期間中に各層が描いた荷重と変位のデータに最小二乗法を用いた値とした（図 4(a)）。入力に用いた仮想的な水平力 P_j は A_i 分布に基づいて設定した。

図 5 に以上の手法を用いて算出した梁剛性の結果を示す。図中の 3 本の灰色太線は、前報（その 1）図 11 の MSJ モデルを用いた静的記録による梁剛性の評価結果を併せて示している。図 5 によると、全体的に評価した梁剛性の値には時間によって変動するばらつきがみられる。応答データと照合した結果、応答の小さい期間に評価結果にばらつきが生じており、頂部応答が約 20mm を越える期間においては安定していた。これは、応答振幅の小さい半ループ中には、各層の荷重-変位関係のプロット数が少なくなるため、評価した層剛性にばらつきが生じることが原因である。また、静的記録との誤差は、評価の安定した期間(50~90s)において、1層と3層で約 1%、2層で約 6%となった。

3.2 最大荷重-変位法

この手法は、荷重-変位関係の半ループ中における最大層せん断力 Q_j と最大変位 X_j を用いた梁剛性の評価手法である。図 6 に各代表値の算出概要を示す。前節における仮想荷重-変位法と同様に、建物頂部の荷重-変位関係の半ループにおける各層の最大層せん断力 Q_j および最大層間変位 X_j をそれぞれ代表値として定め、提案式に適用した。また、この手法では層せん断力が求まるため、使用した式は前報（その 1）で示す (14) 式の形となる。図 7 に本手法による梁剛性の評価結果を示す。

図 7 によると、各層の梁剛性はどの期間においても安定した評価結果が得られていることが確認できる。また、静的記録との誤差は、1層で約 3%、2層で約 7%、3層ではほぼ 0%であった。

3.3 M-θ 法

この手法は、梁端モーメントおよび回転角を用いた梁剛性の評価手法である。図 8 に算出概要を示す。まず、動的データに対してバンドパスフィルタを適用し、建物の 1 次固有振動数成分のみを抽出した時刻歴応答結果を得る。それら時刻歴応答結果を(1)、(2)式に適用することで位相差を考慮しない梁剛性を算出し、以下の式を用いて柱頭および柱脚の曲げモーメントを求めた。

$$M_j = h_j \sum_{i=j}^7 P_i - \sum_{i=j}^7 P_i \sum_{i=j}^i h_i + \sum_{i=j}^4 K_i \theta_i \quad (3)$$

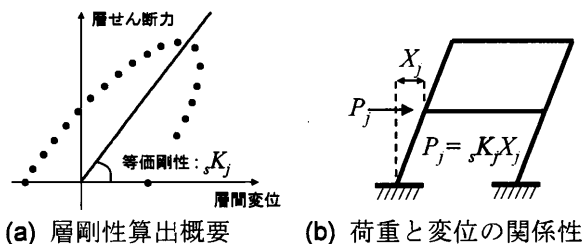


図 4 仮想荷重-変位法概要

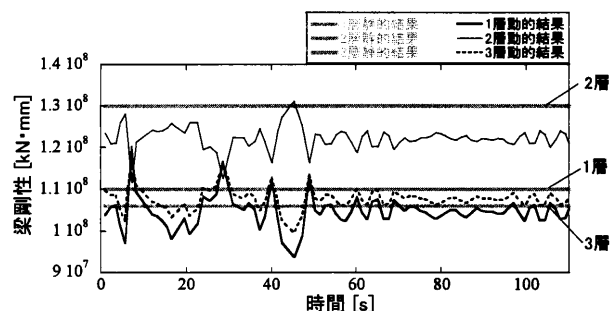


図 5 仮想荷重-変位法による梁剛性評価結果

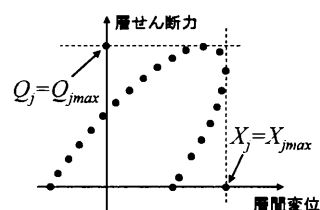


図 6 最大荷重-変位法概要

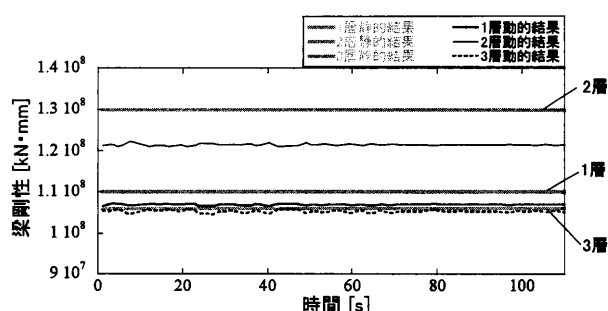
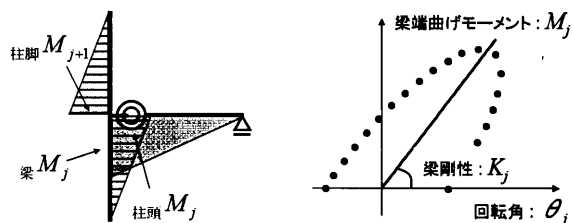


図 7 最大荷重-変位法による梁剛性評価結果



(a) 梁端モーメント概要 (b) M-θ 関係

図 8 M-θ 法概要

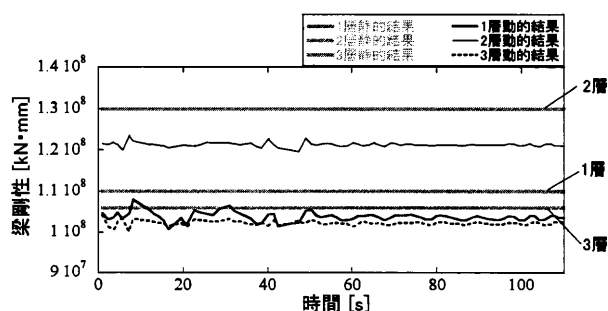


図 9 M-θ 法による梁剛性評価結果

$$M_j = -\sum_{i=j}^7 P_i \sum_{l=j}^i h_l + \sum_{i=j}^4 K_i \theta_i \quad (4)$$

また、梁端部における曲げモーメントは次式で表される。

$$M_j = M_{j-1} - M_{j+1} \quad (5)$$

以上より算出した梁端部の曲げモーメントおよび回転角により図 8(b)に示すような M-θ 関係が得られ、関係の半ループごとに最小二乗法を用いて等価剛性を算出し、その等価剛性を梁剛性とした。

図 9 に梁剛性の評価結果を示す。図 9 によると、時刻歴上での評価結果のばらつきも少なく、どの期間においても概ね安定した結果が得られている。各層の誤差は、1 層で約 4%、2 層で約 7%、3 層で約 1%であった。

4. 梁破断損傷シミュレーション

部材解析モデルにおける梁端部の剛性を低下させることで、模擬的に損傷を再現したモデルを作成し、魚骨モデルによる梁剛性低下の感度を検討する。梁端部の損傷は、部材解析モデルの梁端部に入れた回転バネの曲げ剛性を健全時の 1/10 に低下させることで再現した。以上の方法により、梁端部の損傷箇所や損傷数をパラメトリックに変化させたモデルを複数作成し、動的解析を行った。ここで、梁剛性の算出には前章で述べた 3 つの手法のうち最大荷重-変位法を用いた。また、各損傷パターンにおいて用いた 3D モデルは曲げ変形のみを考慮したモデル (M モデル) と柱梁の曲げ・せん断・軸変形を考慮したモデル (MSJ モデル) について検討を行った。

図 10 に損傷のパターンと梁剛性の低下率を示す。図中に示す数値は、健全なモデルを基準とした損傷後の各層梁剛性の低下率を示している。それぞれの損傷パターンによる結果によると、M モデルと MSJ モデルでともに、

損傷層において大きく梁剛性が低下していることが確認できる。その一方で、非損傷層における梁剛性にはほぼ変化が見られない。損傷層における梁剛性低下率は両モデルで概ね等しい値を示しており、各層における剛性低下感度も、層による違いは見られなかった。

5. 実大建物を用いた梁剛性評価

本章では、実大建物の震動台実験における観測記録を用いて本研究で提案する魚骨モデルによる梁剛性の評価を試みる。

5.1 試験概要

対象建物は、2007 年度 E-ディフェンス震動台実験における高層鋼構造建物試験体²⁾とする。図 11 に試験体の平面図と立面図、観測位置および試験終了時における損傷箇所を示す。本実験での主な入力地震動は、三の丸波等の長周期地震動の他、試験の進行に伴う試験体の線形範囲の特性の変化を把握するため、主要な地震動の前後においてホワイトノイズ加振が行われている。観測概要としては、各階 2 箇所において加速度と層間変位の観測が行われた。サンプリング周波数は 200Hz である。また、加振実験では、試験体短辺 (X 方向) および長辺 (Y 方向) の梁端部に破断が生じるまで三の丸波加振が繰り返し行われており、X 方向の梁破断後、Y 方向のみに 2 度三の丸波加振を行ったことで Y 方向の梁にも破断が発生した。

5.2 試験体梁剛性の評価結果

本研究の提案法を用いて試験体 1~3 層の梁剛性の評価を行う。全ての評価はホワイトノイズ加振における観測記録を用いる。ここで、各層の慣性力は各階床加速度計の平均値と各階重量を掛け合わせて求め、層間変位は各階 2 つの変位計の平均値を用いた。また、魚骨モデルの

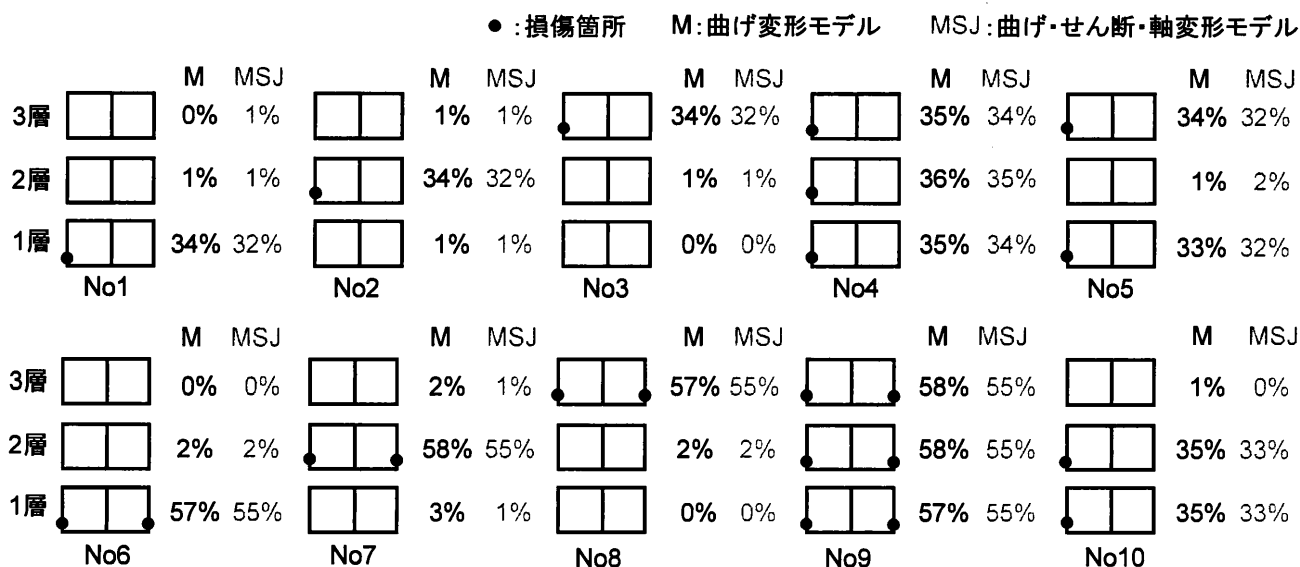


図 10 損傷パターンと最大荷重-変位法により推定した梁剛性の低下率の関係

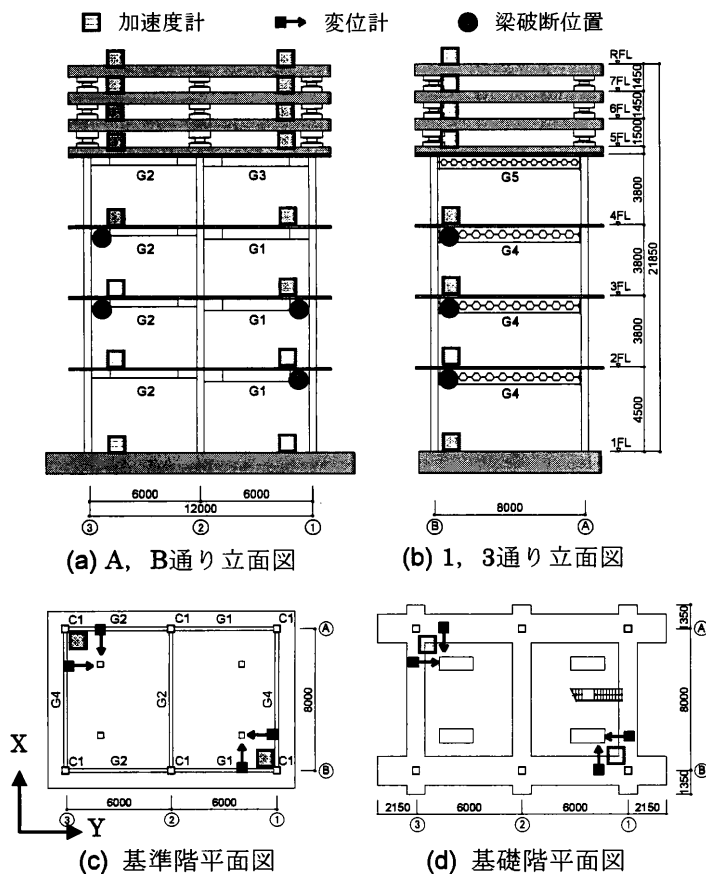


図11 試験概要、観測位置および梁破断位置

代表柱の剛性には試験体の柱1本分の剛性を用いた。よって、魚骨モデルの各層に入力される慣性力も観測値に1/6をかけた値を用いている。梁剛性の評価にはM-θ法を用いた。

図12に試験経過に伴うX方向およびY方向での梁剛性の評価結果を示す。横軸は試験経過に伴うホワイトノイズの加振ケースを示す。図12によると、XとY方向とともに梁破断発生前後において大きく梁剛性が低下していることが確認できる。詳細にみると、X方向において1~3層の梁端部にそれぞれ1箇所破断が生じ、それに対する各層での梁剛性の低下率は破断損傷前後を比較すると、1層で73%、2層で13%、3層で93%であった。一方、Y方向では1層で1箇所、2層で2箇所、3層で1箇所の梁破断が生じており、それに対する各層での梁剛性の低下率は1層で28%、2層で44%、3層で19%となった。以上のように、Y方向においては梁破断数と梁剛性低下率に良い相関が見られた。一方で、X方向については、梁剛性低下率の推定値と実際の破断数の層方向分布は一致しないが、梁破断による剛性低下の有無は検出されている。なお、X方向とY方向とともに、2層の梁剛性が他層に比べて高いのは、前報(その1)でも述べたように、提案法は建物の水平変形のうち曲げ変形のみを考慮しており、その他の柱梁のせん断・軸変形を考慮していないため

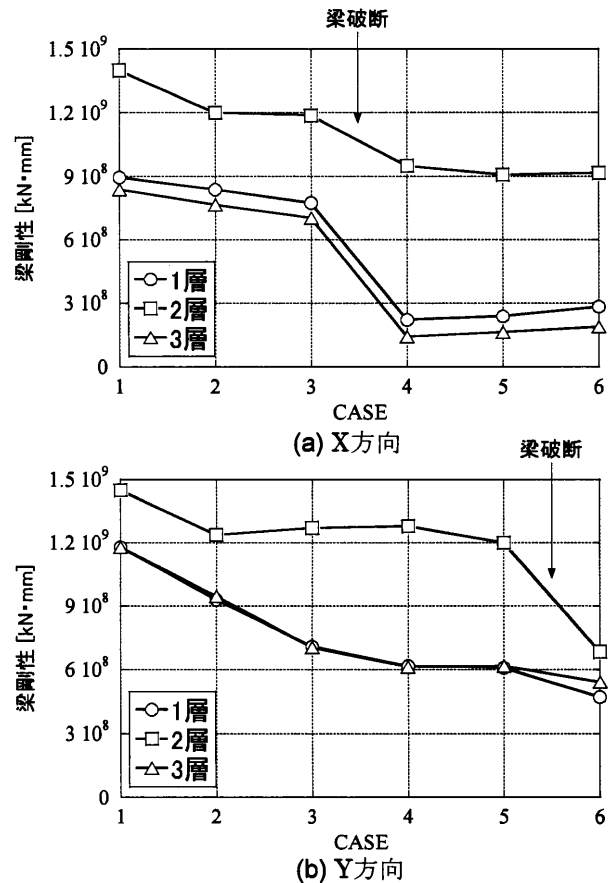


図12 M-θ法により推定した梁剛性の推移

あると思われる。

6. まとめ

前報(その1)に引き続き、本報(その2)では、魚骨モデルによる梁剛性評価を動的手法に拡張した。その際、動的記録の適用方法を3種類示し、その精度の検証を行った。また、3次元FEMモデルを用いた損傷シミュレーションを行い、破断層の違いによる梁剛性低下感度を確認した。最後に、実大建物の観測記録を用いた梁剛性評価を行い、発生した梁破断に伴う梁剛性の低下を確認した。今後は、建物のせん断変形および軸変形を加味することでより精度の高い梁剛性の評価が行えるものと思われる。

参考文献

- 1) 飯野, 金澤ほか: 振動計測に基づく梁端剛性評価 その1 動的記録を用いた魚骨モデルによる梁端剛性評価, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2012.3.
- 2) 井上, 長江ほか: 高層建物の耐震性評価に関するE-ディフェンス実験-その1~11, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C1, pp.823-832, pp.873-884, 2008.9
- 3) Xiaodong Ji, Gregory L. Gervais, etc: Seismic Damage Detection of a Full-Scale Shaking Table Test Structure, ASCE/ JAN. 2011

*1 東京理科大学理工学部建築学科

*2 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 博士(工学)