

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1 静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)	飯野 夏輝, 金澤健司, 玉那 覇太, 吉澤 伊織, 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/110009571525

振動計測に基づく梁端剛性評価

その1 静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 振動台実験正会員 ○ 飯野夏輝^{*1}準会員 玉那覇太^{*1}正会員 佐藤大樹^{*1}正会員 金澤健司^{*2}準会員 吉澤伊織^{*1}正会員 北村春幸^{*1}

1. はじめに

鉄骨建物の耐震設計では、終局状態において梁端部に損傷を集中させて層崩壊を防止することを目標とする場合が多い。したがって、地震経験後に建物の構造健全性を診断するためには、梁端部の損傷状態を把握することが重要となる。しかし、構造物における実際の梁端部は耐火被覆等の2次部材に覆われているため、損傷の発見が難しい。そこで近年、建物の構造健全性を評価する手法として構造ヘルスマニタリングに関する技術の確立が進められている。

本報では、魚骨モデルを用いた振動計測に基づく梁剛性の評価手法を提案する。そして、部材解析モデルの静的解析結果を用いて魚骨モデルによる梁剛性の評価精度の検証を行う。

2. 魚骨モデルによる梁剛性評価手法

本研究で提案する手法では、図1に示すとおり、純ラーメン構造物の振動計測によって得られた慣性力および層間変位記録から魚骨モデル¹⁾を用いて梁剛性の算出を行う。ここで評価する梁剛性は、構造物の柱が、常に健全状態であると仮定した場合の梁剛性の評価である。

2.1 梁端部の回転角、梁剛性算出手法

本章では、魚骨モデルを用いた梁端部の回転角および梁剛性の算出式の導出を行う。図2に本報で扱う魚骨モデルと変数および座標系の定義を示す。本報においては計算の煩雑化を避けるため、全体座標系と局座標系の2つの座標系を用いた。図2より、X、Y軸で表される座標系が全体座標系であり、全体座標系における回転角および各層の変位をそれぞれ絶対回転角 θ と絶対変位 v とする。また、任意階において、全体座標系から下層の絶対回転角分だけ回転させ、任意階の柱脚と90度をなす軸を想定し、図中X'、Y'軸で表される座標系を局座標系とする。局座標系における回転角および各層の変位を相対回転角 θ' および相対変位 v' とした。

2.2 局座標系における柱の曲げモーメントの算出

図3に提案魚骨モデルの概要を示す。また、図4に任意層（以降、 j 層とする）における反力図を示す。 j 層に

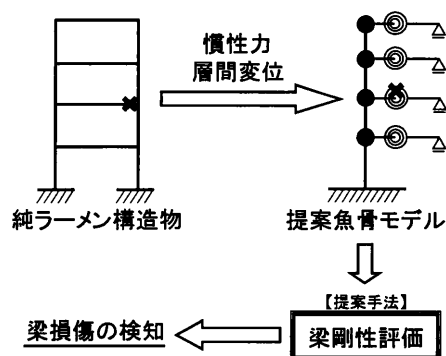


図1 本研究の位置づけ

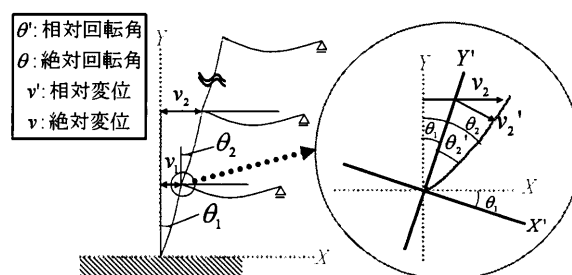


図2 座標系の概要

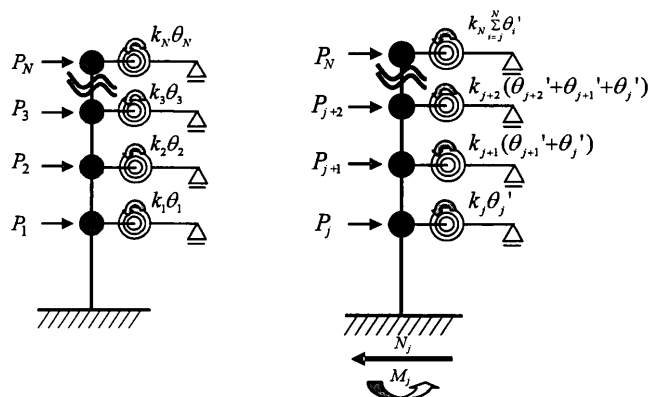


図3 全体座標系

図4 局座標系における反力図

おける水平および曲げ反力は以下の式で示される。

$$M_j = P_j \cdot h_j + P_{j+1} \cdot (h_j + h_{j+1}) + P_{j+2} \cdot (h_j + h_{j+1} + h_{j+2}) + \dots + P_n \cdot (h_j + h_{j+1} + \dots + h_n) - \left\{ k_j \theta_j' + k_{j+1} (\theta_j' + \theta_{j+1}') + \dots + k_n \sum_{i=j}^n \theta_i' \right\} \quad (1)$$

$$N_j = \sum_{i=j}^N P_i \quad (2)$$

ここで、 P_j : j 層水平荷重、 h_j : j 層階高、 k_j : j 層回転剛性、 θ'_j : j 層梁相対回転角とする。また、相対回転角 θ' は絶対回転角 θ を用いて以下の式より変換した。

$$\begin{aligned} \theta_j &= \sum_{i=1}^j \theta'_i, \quad \theta_{j-1} = \sum_{i=1}^{j-1} \theta'_i \\ \theta_j - \theta_{j-1} &= \sum_{i=1}^j \theta'_i - \sum_{i=1}^{j-1} \theta'_i = \theta'_j \end{aligned} \quad (3)$$

よって、 j 層における柱の曲げモーメントは以下の式で表される。

$$M_j = N_j \cdot x - M_j \quad (4)$$

2.3 相対回転角 θ' および相対変位 v' の算出

(4)式より、弾性曲線式を用いて j 層における相対回転角 θ' 、相対変位 v' を算出する。弾性曲線式は(5)式で表される。

$$\ddot{v}(x) = \dot{\theta}(x) = -\frac{1}{E_j I_j} M_j \quad (5)$$

(4)、(5)式より、相対回転角 θ' 、相対変位 v' は以下のよう求められる。

$$\theta'(x) = -\frac{1}{E_j I_j} \int M_j dx = -\frac{1}{E_j I_j} \left\{ \frac{x^2}{2} \sum_{i=j}^N P_i - x \left(\sum_{i=j}^N P_i \sum_{k=1}^i h_k - \sum_{i=j}^N k_i \sum_{k=1}^i \theta'_k \right) \right\} + C_1 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v'(x) &= -\frac{1}{E_j I_j} \int \int M_j dx^2 = -\frac{1}{E_j I_j} \left\{ \frac{x^3}{6} \sum_{i=j}^N P_i - \frac{x^2}{2} \left(\sum_{i=j}^N P_i \sum_{k=1}^i h_k - \sum_{i=j}^N k_i \sum_{k=1}^i \theta'_k \right) \right\} \\ &\quad + C_1 x + C_2 \end{aligned} \quad (7)$$

局座標系における境界条件より、積分定数 $C_1 = 0, C_2 = 0$ となる。ここで、(6)、(7)式に $x = h_j$ を代入すると、 j 層の梁柱接合部の相対回転角 θ' 、相対変位 v' は、

$$\theta'_j = -\frac{1}{E_j I_j} \left[\frac{h_j^3}{2} \sum_{i=j}^N P_i - h_j \left(\sum_{i=j}^N P_i \sum_{k=1}^i h_k - \sum_{i=j}^N k_i \sum_{k=1}^i \theta'_k \right) \right] \quad (8)$$

$$v'_j = -\frac{1}{E_j I_j} \left[\frac{h_j^3}{6} \sum_{i=j}^N P_i - \frac{h_j^2}{2} \left(\sum_{i=j}^N P_i \sum_{k=1}^i h_k - \sum_{i=j}^N k_i \sum_{k=1}^i \theta'_k \right) \right] \quad (9)$$

で表される。

2.4 絶対回転角 θ および梁剛性 k の算出

絶対回転角 θ を算出するにあたり、(8)、(9)式における k に関する項を以下の式により削除する。

$$v'_j - \frac{h_j}{2} \theta'_j = \frac{h_j^3}{12 E_j I_j} \times \sum_{i=j}^N P_i \quad (10)$$

ここで、相対変位 v' を絶対変位 v へ変換する概要図を図5に示す。また、局座標系の下で求めた相対変位 v'_j は微小変位であることから $v_j \times \cos \theta_{j-1} = v'_j$ と近似することができ、絶対変位 v_j は以下の式で示される。

$$v_j = v'_j + v_{j-1} + h_j \theta_{j-1} \quad (11)$$

よって、(3)、(10)、(11)式より絶対回転角 θ は次式で表される。

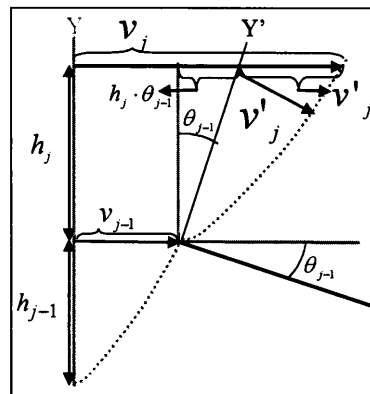


図5 局座標系から全体座標系への変換概要

$$\theta_j = -\theta_{j-1} - \frac{h_j^3}{6 E_j I_j} \times \sum_{i=j}^N P_i + \frac{2}{h_j} (v_j - v_{j-1}) \quad (12)$$

次に、梁剛性 k は(3)、(8)式より以下のように求まる。

$$k_j = \frac{h_j}{2 \theta_j} \sum_{i=j}^N P_i + \frac{1}{\theta_j} \left(\sum_{i=j}^N P_i \sum_{k=1}^i h_k - \sum_{i=j}^N k_i \sum_{k=1}^i \theta_{i-1} \right) - \frac{EI}{h_j \theta_j} (\theta_j - \theta_{j-1}) \quad (13)$$

また、(12)、(13)式は層せん断力 Q を用いて以下のように表される。

$$\theta_j = -\theta_{j-1} - \frac{h^2}{6 EI} \times Q_j + \frac{2}{h_j} (v_j - v_{j-1}) \quad (14)$$

$$k_j = \frac{h_j}{2 \theta_j} Q_j + \frac{1}{\theta_j} \left(\sum_{i=j}^N Q_{i-1} h_{i-1} - \sum_{i=j}^N k_{i-1} Q_{i-1} \right) - \frac{EI}{\theta_j h_j} (\theta_j - \theta_{j-1}) \quad (15)$$

3. 静的解析記録を用いた魚骨モデル提案式の検証

本章では、3次元 FEM モデル（以下、3D モデル）の静的解析結果により、提案する魚骨モデルを用いた梁剛性の評価を行い、その評価精度を検討する。図6に検討の流れを示し、図7に本検討で用いる3Dモデルを示す。本モデルは、短辺方向 $8\text{m} \times 1$ スパン、長辺方向 $6\text{m} \times 2$ スパンの平面形状を持つ4層建物を想定した。なお、本報では、短辺方向（X方向）について検討結果を示す。

ここでは、手法A、手法B、手法Cの3つの手法を示し、それぞれの手法に基づいて算定した回転角と梁剛性の比較を行う。まず、手法Aで、解析モデル諸元である柱スパン、柱の断面2次モーメント、ヤング係数を用いて梁剛性Aを算出した。以上のように設計値より求まる梁剛性Aは、梁自身の剛性が得られるため、本研究における梁剛性の正解値として定めた。また、梁端部における回転角は静的解析結果から直接得られ、回転角Aとして定義した。

手法Bでは、静的解析より算出される柱のせん断力および層間変位を用いて(14)式より回転角Bを算出した。その後、算出された回転角Bを用いて(15)式より梁剛性Bを求めた。以上の手法Bによって算出される回転角Bおよび梁剛性Bはフレーム毎の回転角および梁剛性を算出している。

手法Cでは、静的解析より算出される層せん断力を柱本数で除し、柱1本当たりが平均的に負担するせん断力を

算出した。算出したせん断力と層間変位から(14)式を用いて回転角 C を算出し、(15)式より梁剛性 C を求めた。以上の手法 C によって求まる梁剛性 C は、柱のせん断力よりも容易に観測が可能な層せん断力を用いたため、より簡便な評価手法として各層の平均的な梁剛性を算出できる。このため、これを提案法とする。ここで、魚骨モデルにおける魚骨柱の剛性はどの手法においても、3D モデルにおける柱 1 本の剛性とした。

提案法の検証では、図 6 に示す比較(1)において、回転角 A と回転角 B の比較を行い、回転角評価式の精度検証を行う。次に、比較(2)では、梁剛性 A と梁剛性 B の比較を行うことで、梁剛性算出式の精度を検証した。最後に、比較(3)により梁剛性 A と梁剛性 C の比較を行うことで、平均的に評価した梁剛性が実際の梁剛性に対してどのような値を示すのかを確認した。

ここで、本報で提案する梁剛性算出式は、柱、梁の曲げ変形のみを考慮しているため、柱、梁のせん断変形および軸変形が混在する実際の構造物では、提案魚骨モデルによる梁剛性に誤差が生じることが考えられる。そこで、これらのせん断変形および軸変形が梁剛性の評価に及ぼす影響を確認するため、柱梁の曲げ変形のみを考慮した 3D モデル(以下、M モデル)と、柱梁の曲げ、せん断および軸変形を考慮した 3D モデル(以下、MSJ モデル)の 2 つのモデルについて検討を行った。両モデルを用いて評価した梁剛性を比較することで、せん断変形と軸変形による梁剛性への影響を明らかにする。

3.1 M モデルによる回転角、梁剛性の評価結果

M モデルを用いて算出した評価結果の比較を行う。図 8 に回転角と梁剛性の結果を示す。図 8(a)では回転角の比較を行い、横軸は静的解析におけるステップ数を示し、縦軸は回転角を示す。図 8(a)によると全ての frame で回転角 A 、 B は各層で一致している。次に、図 8(b)より、梁剛性 A 、 B について同様の比較を行う。図 8(b)によると、全ての frame で梁剛性 B の値は各層で梁剛性 A と良く対応していることが確認できる。また、frame2 の梁剛性の値は frame1、3 の値に比べ低く評価されており、梁せいの異なる梁に対する梁剛性評価も精度良く再現できていることがわかる。以上のことより、曲げ変形のみを考慮した M モデルによる提案魚骨モデルを用いた梁剛性評価は有効であることを確認した。

続いて、平均的な梁剛性の評価結果について述べる。図 9 に frame1~3 における梁剛性 A と各層で平均的に評価した梁剛性 C を併せて示す。また、図中の破線は frame1~3 の梁剛性 A の平均値である。図 9 によると、平均的に評価した各層の梁剛性 C はどの層においても frame1、3 と frame2 の梁剛性 A の間に収まっていることが確認できる。詳細には、frame1~3 の梁剛性 A の平均値よりも平均的に評価した梁剛性 C は全体的に低い値を示しており、1~3

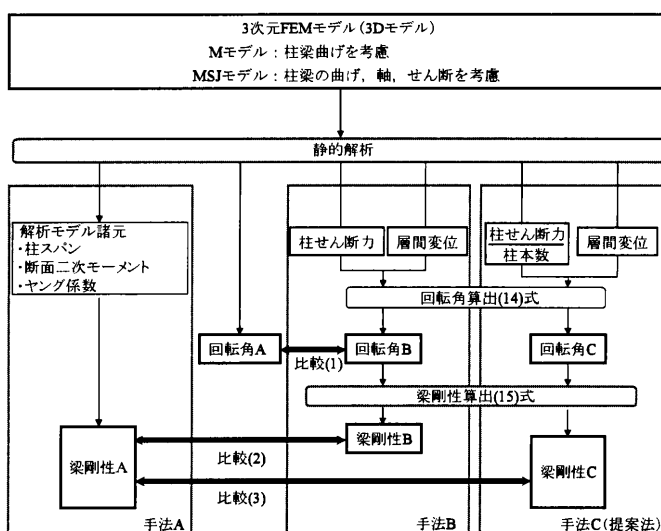


図 6 精度検証フローチャート

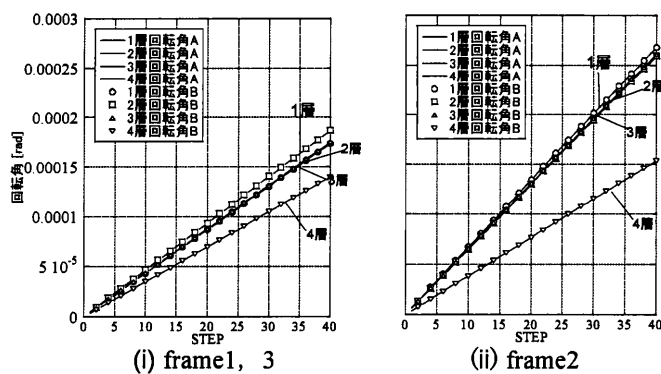
表 1 部材断面詳細

層	frame1,3	frame2
4	H-650x199x9x14	H-400x200x8x13
3	H-800x199x10x15	H-400x200x8x13
2	H-650x199x9x14	H-400x200x8x13
1	H-650x199x9x14	H-400x200x8x13
柱	□-400x400x25	□-400x400x25

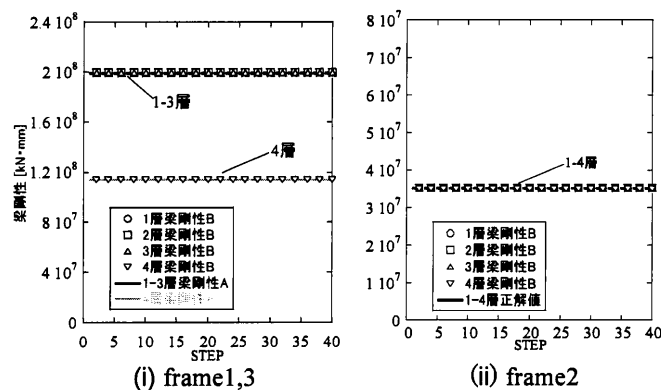
(※単位: mm)

(※単位: mm)

図 7 3次元 FEM モデル



(a) 回転角



(b) 梁剛性

図 8 M モデルによる回転角と梁剛性評価結果

層において約 7%, 4 層において約 4%低い値を示した。

3.2 MSJ モデルによる回転角と梁剛性の評価結果

MSJ モデルを用いて算出した回転角と梁剛性の評価結果の比較を行う。図 10 に算出された回転角（比較 1）と梁剛性（比較 2）の算出結果を示す。まず、図 10(a)によると、回転角 B と回転角 A はいずれの層でも一致していないことが見てとれる。詳細には、frame1 の結果では、1, 3 層の回転角 B が A よりも高く、2, 4 層は低い結果となった。一方、frame2 の結果をみると、全ての層で回転角 B の値が A を上回る結果となった。これらは、提案した魚骨モデルがせん断変形および軸変形を考慮していないため、両者による変形の増大が回転角に現れているものと思われる。また、各層での誤差は 1, 3 層において大きく、2, 4 層において小さい（frame1 では回転角 A を下回っている）結果となった。回転角は(14)式の性質上、1 層で生じた回転角の誤差が上層の 2 層の誤差を緩和し、次に求まる 3 層にてまた誤差が生じるといった結果となった。それは、図 10(b)に示す梁剛性における評価結果でも同様であり、1, 3 層での梁剛性 B が梁剛性 A より大きく下回る値を示し、2, 4 層での梁剛性 B は梁剛性 A に近い値を示している。

ここで、図 11 に M モデルと MSJ モデルより求まる平均的な梁剛性の評価結果である梁剛性 C を比較した図を示す。図 11 をみると、1, 3 層においては MSJ モデルの梁剛性は M モデルに比べ大きく下回る値をとり、2, 4 層では、M モデルと MSJ モデルの梁剛性が比較的近い値を示していることが分かる。以上のように、平均的な梁剛性の評価結果も、1, 3 層においてせん断変形および軸変形による誤差が多く含まれ、2, 4 層では緩和されていることが見てとれる。

4. まとめ

本報では、魚骨モデルを用いた梁剛性の評価手法を提案し、静的記録を用いた精度の検討を行った。その結果、M モデルを用いた精度検討においては、提案魚骨モデルによる梁剛性評価の有効性が示されたが、MSJ モデルにおいては梁剛性の評価にばらつきが生じることが確認された。今後は、せん断変形と軸変形の影響も加味した梁剛性の評価手法の確立が必要である。後報その 2 では、動的記録に拡張した魚骨モデルによる梁剛性の評価結果について述べる。

参考文献

- 1) 小川厚治, 加村久哉, 井上一朗: 鋼構造ラーメン骨組みの魚骨形地震応答解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, No. 521, pp119-126

*1 東京理科大学建築学科

*2 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 博士(工学)

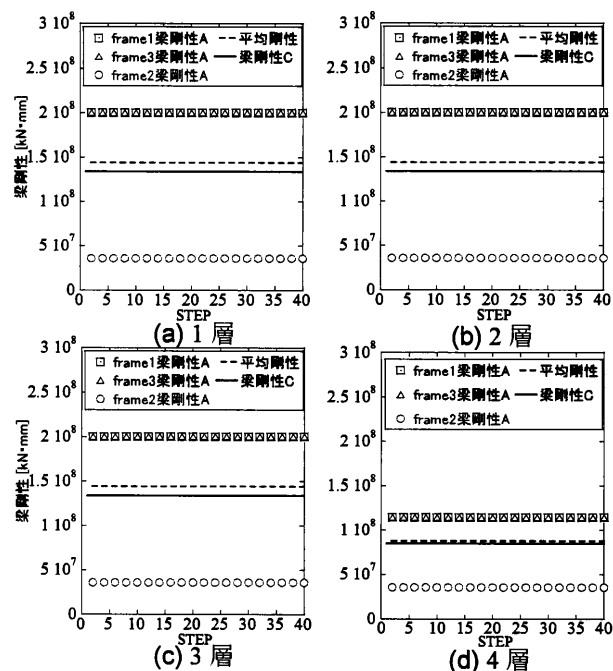


図 9 M モデルによる梁剛性 C の評価結果

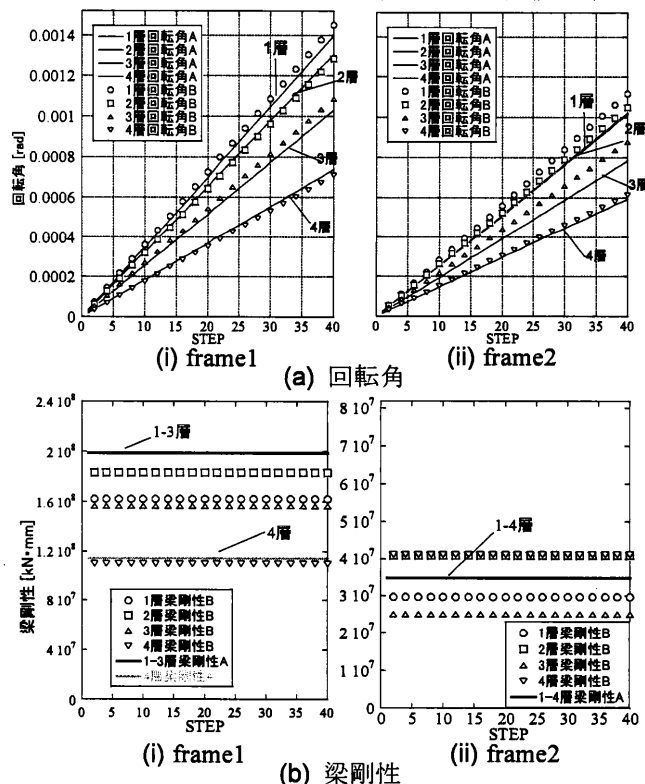


図 10 MSJ モデル回転角と剛性算出結果

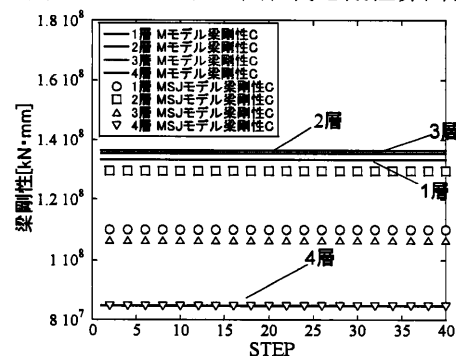


図 11 せん断・軸変形を考慮した評価梁剛性