

擬似的損傷を有する5層鉄骨試験体の構造損傷検出実験 - その2 直接層剛性同定手法による損傷検出 -

Structural Damage Detection on Five-story Steel Structure with Simulated Damage part2 Damage Detection Using Interstory-stiffness Identification Method

○正 中村 充 (大林組)、 森田 高市 (国総研)
竹脇 出 (京都大学)

Mitsuru NAKAMURA, Obayashi Corporation, 4-640 Shimokiyoto Kiyose, Tokyo
Koichi MORITA, National Institute for Land and Infrastructure Management
Izuru TAKEWAKI, Kyoto University

The applicability of a damage identification method for structures was examined through random vibration tests. The method is based on evaluation of interstory-stiffness. The proposed stiffness identification method requires only Fourier spectrum amplitudes of upper and lower floors of the story to be identified. The identification method successfully identified various simulated ‘damages’ to the structure, which were realized by extraction of brace members, columns or splice plates, yielding reduction of interstory-stiffness in wide range from 5 to 70 percent.

keywords : Damage Identification, Structural Health Monitoring, System Identification, Shaking Table Test

1. はじめに

本報告では、(その1)の損傷検出試験体による振動台実験結果に対して層剛性を直接同定する手法[1]を適用し、同定結果から層損傷同定を試みた結果について述べる。

2 層剛性同定手法

ここで適用した層剛性直接同定手法は以下の通りである。詳細は参考文献[1],[2],[3]を参照されたい。

建物を線形せん断剛性と線形粘性減衰ならびに線形履歴減衰^[4](複素減衰、あるいは構造減衰とも呼ばれる^[5])を有する N 質点系せん断モデルと考える。建物最上階から質点・要素番号を付けることとし、第 j 番目の質点質量を m_j 、第 j 番目要素の層せん断剛性、粘性減衰係数、履歴減衰定数をそれぞれ、 k_j 、 c_j 、 b_j とする。この N 質点系せん断モデルが水平地盤加速度入力 \ddot{z} を受ける際の周波数領域における運動方程式は以下のように記述できる。

$$(-w^2\mathbf{M} + i\mathbf{w}\mathbf{C} + \mathbf{K})\mathbf{U}(w) = \mathbf{F}(w)Z(w) \quad (1)$$

\mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} はそれぞれ次のような行列を表す。

$$\mathbf{M} = \text{diag} (m_1 \ m_2 \ \dots \ m_N) \quad (2a)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1^* & -k_1^* & & & \\ -k_1^* & k_1^* + k_2^* & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & -k_{N-1}^* & k_{N-1}^* + k_N^* \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & & & \\ -c_1 & c_1 + c_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & -c_{N-1} & c_{N-1} + c_N \end{bmatrix} \quad (2c)$$

$\mathbf{U}(w)$ は(3)式で示されるベクトル \mathbf{u} のフーリエ変換を、

$Z(w)$ は z のフーリエ変換を表す。ただし、 $k_j^* = k_j(1 + 2b_ji)$ 、 i は虚数単位、 u_j は第 j 質点の絶対水平変位をそれぞれ表す。

$$\mathbf{u} = \{u_1 \ u_2 \ \dots \ u_N\}^T \quad (3)$$

また、 $\mathbf{F}(w)$ は次のようなベクトルを表す。

$$\mathbf{F}(w) = \{0 \ 0 \ \dots \ i\mathbf{w}c_N + k_N^*\}^T \quad (4)$$

ここで、(1)式を次のように簡略表現する。

$$\mathbf{A}(w)\mathbf{U}(w) = \mathbf{F}(w)Z(w) \quad (5)$$

式中の $\mathbf{A}(w)$ は

$$\mathbf{A}(w) = \begin{bmatrix} a_1(w) & -b_1(w) & & & 0 \\ -b_1(w) & a_2(w) & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & -b_{N-1}(w) & a_N(w) \end{bmatrix} \quad (6)$$

ただし、

$$a_j(w) = -w^2m_j + i\mathbf{w}c_{j-1} + k_{j-1}^* + i\mathbf{w}c_j + k_j^* \\ = -w^2m_j + b_{j-1}(w) + b_j(w) \quad (7a)$$

$$b_j(w) = i\mathbf{w}c_j + k_j^* \quad (7b)$$

$\mathbf{U}(w)$ の第 j 成分 $U_j(w)$ は次のように求められる。

$$U_j(w) = \frac{\Delta_j(w)}{P_j(w)} Z(w) \quad (8)$$

ただし、 $P_j(w)$ は $\mathbf{A}(w)$ 行列の左上から定義した $j \times j$ 小行列の行列式を表し、 $\Delta_j(w)$ は $\mathbf{A}(w)$ の第 j 列を $\mathbf{F}(w)$ で置き換えた行列の行列式を表す。

ここで、 $P_j(w)$ は以下のような漸化式関係を満足する。

$$P_j(w) = a_j(w)P_{j-1}(w) - b_{j-1}^2(w)P_{j-2}(w) \quad (9)$$

なお、(9)式ならびに以下に示す(11)、(12)式の証明は

ここでは省略するが、参考文献[6]中に粘性減衰のみを対象とした場合についてラプラス変換に基づく同等の式に対する証明が示されているので、そちらを参照されたい。

次に、 $Q_j(\omega)$ を次式のように定義する。

$$Q_j(\omega) = \frac{b_j(\omega)}{i\omega} \left[1 - b_j(\omega) \frac{P_{j-1}(\omega)}{P_j(\omega)} \right] \quad (10)$$

$Q_j(\omega)$ に $-i\omega U_{j+1}$ を乗じると第 j 要素に作用する層せん断力をフーリエ変換した表現となる。

このとき、 $Q_j(\omega)$ は次のような漸化式を満足する。

$$Q_j(\omega) = \frac{b_j(\omega)}{i\omega} \frac{i\omega m_j + Q_{j-1}(\omega)}{i\omega m_j + \frac{b_j(\omega)}{i\omega} + Q_{j-1}(\omega)} \quad (11)$$

さらに次式の関係が成立する。

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{Q_j(\omega)}{i\omega} = m_1 + m_2 + \dots + m_j \quad (12)$$

これらの式から以下のような定理を導くことができる。

[定理] $\{m_j\}$ が既知であり、 \ddot{z} 、 \ddot{u}_N が観測され、それらのフーリエ変換である $\ddot{Z}(\omega)$ 、 $\ddot{U}_N(\omega)$ が求められているとき、 k_N 、 b_N は唯一に決定される。

[証明] 以下の証明中では、 (ω) を省略して表記する。まず(8)式より次式が成立する。

$$U_N = \frac{\Delta_N}{P_N} Z \quad (13)$$

(4)、(7b)と P_j の定義から、 Δ_N の演算を実行すると、

$$\Delta_N = b_N P_{N-1} \quad (14)$$

ここで注目すべき点は、 $j=N$ の時に P_j を定義する行列の3重対角性が保持され、 Δ_N が比較的容易に表現できることである。このことが N 番目の質点の加速度が観測されている時に剛性と履歴減衰定数が唯一に同定できることと関連している。

(14)式を(13)式に代入すると次式が得られる。

$$\frac{U_N}{Z} = \frac{b_N P_{N-1}}{P_N} \quad (15)$$

Q_j の定義(10)式から、

$$Q_N = \frac{b_N}{i\omega} \left[1 - b_N \frac{P_{N-1}}{P_N} \right] \quad (16)$$

(16)式を変形して

$$b_N \frac{P_{N-1}}{P_N} = 1 - \frac{i\omega}{b_N} Q_N \quad (17)$$

(17)式に(11)式を適用すると次式が得られる。

$$b_N \frac{P_{N-1}}{P_N} = 1 - \frac{i\omega m_N + Q_{N-1}}{i\omega m_N + \frac{b_N}{i\omega} + Q_{N-1}} \quad (18)$$

さらに、(18)式の右辺の演算を実行して、

$$b_N \frac{P_{N-1}}{P_N} = \frac{b_N}{i\omega} \frac{1}{i\omega m_N + \frac{b_N}{i\omega} + Q_{N-1}} \quad (19)$$

(19)式と(15)式から次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{Z}{U_N} - 1 &= \frac{Z - U_N}{U_N} = \frac{i\omega}{b_N} \frac{i\omega m_N + \frac{b_N}{i\omega} + Q_{N-1}}{1} - 1 \\ &= \frac{i\omega}{b_N} \{i\omega m_N + Q_{N-1}\} \end{aligned} \quad (20)$$

(20)式の逆数を取り、(7b)式を用いると、

$$\begin{aligned} \frac{U_N}{Z - U_N} &= \frac{b_N}{i\omega} \frac{1}{i\omega m_N + Q_{N-1}} \\ &= \frac{i\omega c_N + k_N^*}{i\omega} \frac{1}{i\omega m_N + Q_{N-1}} \end{aligned} \quad (21)$$

(21)式の両辺に $(i\omega)^2$ を乗じて $\omega \rightarrow 0$ とすると、

$$\begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{(i\omega)^2 U_N}{Z - U_N} &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(\frac{i\omega c_N + k_N^*}{m_N + \frac{Q_{N-1}}{i\omega}} \right) \\ &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(\frac{i\omega c_N}{m_N + \frac{Q_{N-1}}{i\omega}} \right) + \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(\frac{k_N^*}{m_N + \frac{Q_{N-1}}{i\omega}} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

(22)式に(12)式を適用すると、

$$\begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{(i\omega)^2 U_N}{Z - U_N} &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(\frac{k_N^*}{m_N + \frac{Q_{N-1}}{i\omega}} \right) = \frac{k_N^*}{m_N + \sum_{k=1}^{N-1} m_k} \\ &= \frac{k_N^*}{\sum_{k=1}^N m_k} = \frac{k_N(1 + 2b_N i)}{\sum_{k=1}^N m_k} \end{aligned} \quad (23)$$

(23)式は絶対水平変位について示されているが、 $\ddot{Z}(\omega) = -\omega^2 Z(\omega)$ 、 $\ddot{U}_N(\omega) = -\omega^2 U_N(\omega)$ の関係を用いて次式のように絶対水平加速度についても成立することを示すことができる。

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{(i\omega)^2 \ddot{U}_N}{\ddot{Z} - \ddot{U}_N} = \frac{k_N(1 + 2b_N i)}{\sum_{k=1}^N m_k} \quad (24)$$

(24)式の実部より層せん断剛性 k_N が、虚部より履歴減衰定数 b_N が同定される。(証明終了)

ここでの特徴は、一つの評価式の実部と虚部として層剛性と履歴減衰定数が同時に評価できることである。また、(24)式の結果は任意の層について成立することが明らかであり、ある層の上下質点の観測結果のみからその層の物理パラメータを同定する事ができるというのが、この手法の利点である。

同様の手法で、層粘性減衰定数・層履歴減衰係数を、対象層の上下質点の加速度フーリエ振幅のみから同定することが可能である[1]。

この手法は以下のような特徴を有する。

- ・ 同定対象層の上下層における観測結果のみから、対象層の物理パラメータを推定することができ、既往の方法では必須であった全層同時観測結果を必要としない。
- ・ フーリエ変換のみにより対象層の物理パラメータを評価することが可能であり、複雑な計算を必要としない。
- ・ 結果が振動数 0 Hz への極限值として求められることから、広い振動数範囲の測定結果を必ずしも必要としない。
- ・ 既往の同定手法では必ずしも保証されていなかった同定結果の唯一性が、提案手法では保証されている。

3 損傷検出試験体への適用

前項で述べた層剛性同定手法を、(その1)のランダム波加振実験結果に適用した。

同定に際しては、各層に設置された加速度計の記録を用い、各ケースとも 40.96 秒分のデータを用いている。振動数 0 Hz での極値推定は、ケースごとに採用する振動数範囲を適宜決定し、2次関数近似を用いて推定した。

Fig.1 に、(24)式左辺極限值中の実部の値を振動数の関

数としてグラフ化したものを、全層間柱無し(非損傷)のケースについて各層ごとに例として示す。

さらに、さまざまな損傷ケースについて得られた層剛性を、Table 1~Table 3にまとめて示す。表中の()内には、各同定結果を該当層の非損傷時の剛性に対する比率として求めたものを示す。間柱付と間柱無しのケースに対する表中、薄い網掛けと濃い網掛けを施した部分は、それぞれ非損傷状態に対して5~10%の剛性低下、10%以上の剛性低下が見られた層を示している。同じく、ブレース付のケースではそれぞれ10~20%の剛性低下、20%以上の剛性低下が見られた層を示している。さらに、Fig.2~Fig.4に各表の剛性低下率をグラフにしたものを示す。

層剛性の同定結果を概観すると、まず各ケースの非損傷状態においては、間柱付の場合は17~20tonf/cm、間柱無しの場合は9~11.5tonf/cm、ブレース付の場合はややばらつくが30~40tonf/cm程度の値が得られている。

層損傷を想定した各ケースにおける同定結果については、間柱付きのケースでは、間柱を抜いた層において非損傷状態(間柱付き)に比べて約40%の顕著な剛性低下が見られる。一方、その他の層では剛性の変化が見られず、剛性の低下により損傷(間柱除去)を検出できることがわかる。

ブレース付のケースでは、やはりブレース除去層で65~70%という大きな剛性低下が見られる。その他の無損傷層においては結果がややばらついて傾向が見られるが、層剛性の低下という形で損傷(ブレース除去)を判別できる。

間柱を抜いた状態で梁や柱に損傷を想定した細工を施したケースでは、明らかな層剛性の低下が見られる層もあるが、損傷に関わらずほとんど剛性変化が見られない層もある。

例えば、1層ないし3層の梁スプライスを除去した場合、除去した層とその上の層において15~20%程度の剛性低下が見られるほか、5層の梁スプライスを除去した場合、5層で10%程度の剛性低下が見られる。また、1層柱のスプライスを除去した場合、除去の程度に応じて5~10%程度の剛性低下が見られる。その他の損傷に対しては明確な層剛性の低下は評価できず、特に、梁損傷のケースでは、いずれの層における損傷でも層剛性に有意な低下は見られなかった。

4 まとめ

以上の結果から、以下のような知見を得ることができた。

- ここで適用した層剛性同定手法により、層剛性の低下という形で損傷を検出する可能性が示された。
- 間柱やブレースが除去された場合、40~70%という大きな層剛性の低下が見られる。
- 純ラーメン構造では、梁や柱のスプライスが除去された場合、5~20%程度の剛性低下が見られる。また、梁のスプライスが除去された場合では、該当層とその上層の両方において同程度の層剛性低下が見られる。
- 純ラーメン構造において、梁フランジに亀裂を入れた程度の損傷に対しては、ここで適用した手法では剛性低下(すなわち損傷)を検出することは出来なかった。

謝辞

本研究は日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」(委員長：小谷俊介 東京大学教授)のセンサー部会(主査：北川良和 慶応義塾大学)における研究の一環として実施されたものである。関係各位に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- [1] 中村充, 竹脇出, 安井謙, 上谷宏二: 限定された地震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同定, 日本建築学会構造系論文集, 第528号, pp.75-82, 2000.2
- [2] 竹脇出, 中村充, 安井謙, 上谷宏二: 1次元せん断棒有限要素モデルと限定された観測地震動を用いたシステム同定, 構造工学論文集, Vol.46B, pp.453-461, 2000.3
- [3] Takewaki, I, and M.Nakamura: Stiffness-damping simultaneous identification using limited earthquake records, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.29, pp.1219-1238, 2000
- [4] Nashif, A.D., D.I.G.Jones and J.P.Henderson: Vibration Damping, John Wiley & Sons, 1985.
- [5] 柴田明徳: 最新 耐震構造解析, 森北出版, 1981.
- [6] Udawadia, F.E., D.K.Sharma and P.C.Shah: Uniqueness of Damping and Stiffness Distributions in the Identification of Soil and Structural Systems, J. of Applied Mechanics, ASME, 45, 181-187, 1978.

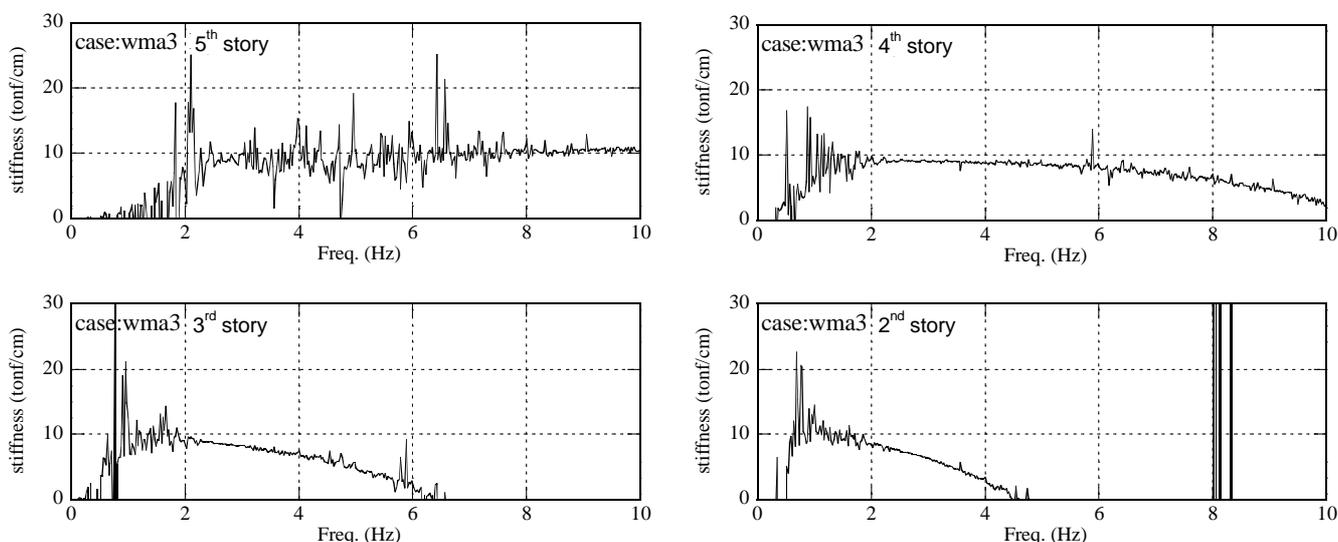


Fig.1 Plots of real-part of function (24) for damage-less case without studs

Table-1 Identified interstory-stiffness
(Case-1: with studs) [tonf/cm]

simulated damage	5th story	4th story	3rd story	2nd story	1st story
no damage	16.7 (1.00)	18.0 (1.00)	18.8 (1.00)	19.9 (1.00)	20.1 (1.00)
w/o studs 5 th story	10.2 (0.61)	18.7 (1.04)	19.0 (1.01)	20.5 (1.03)	19.9 (0.99)
w/o studs 3 rd story	16.4 (0.98)	18.5 (1.03)	11.5 (0.61)	19.7 (0.99)	20.7 (1.03)
w/o studs 1 st story	16.3 (0.98)	17.9 (0.99)	18.8 (1.00)	20.3 (1.02)	12.3 (0.61)

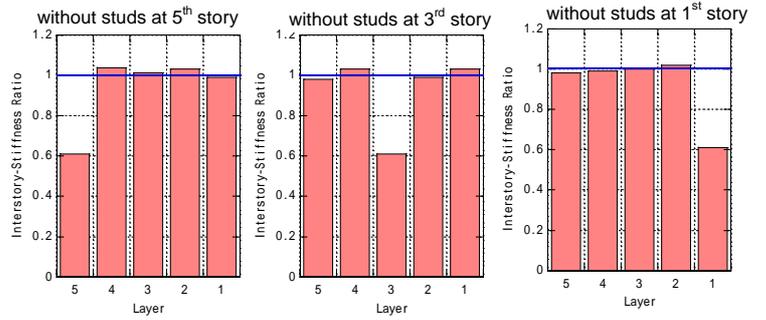


Fig.2 Identified interstory-stiffness ratio
(Case-1: with studs)

Table-2 Identified interstory-stiffness
(Case-2: without studs) [tonf/cm]

simulated damage	5th story	4th story	3rd story	2nd story	1st story
no damage	8.8 (1.00)	9.9 (1.00)	10.0 (1.00)	10.3 (1.00)	11.5 (1.00)
w/o splice 5 th story	8.0 (0.92)	10.2 (1.03)	10.2 (1.02)	10.2 (0.99)	11.6 (1.01)
loose bolts 5 th story	9.0 (1.03)	9.1 (0.92)	10.0 (1.00)	10.3 (1.00)	11.6 (1.01)
w/o splice 3 rd story	8.8 (1.01)	8.1 (0.82)	8.6 (0.86)	10.3 (1.00)	11.8 (1.03)
w/o splice 1 st story	9.2 (1.05)	9.8 (0.99)	10.0 (1.00)	8.8 (0.86)	9.4 (0.81)
w/o bolts 1 st story	9.1 (1.04)	9.8 (0.99)	9.9 (0.99)	10.3 (1.00)	11.6 (1.01)
beam damage 5 th story	9.0 (1.03)	9.7 (0.98)	10.0 (1.00)	10.3 (1.00)	11.6 (1.01)
beam damage 3 rd story	9.0 (1.03)	9.8 (0.99)	9.7 (0.97)	10.3 (1.00)	11.6 (1.01)
beam damage 1 st story	9.1 (1.04)	9.8 (0.99)	9.9 (1.00)	10.1 (0.98)	11.3 (0.98)
w/o col. splice(half) 1 st story	8.8 (1.01)	9.9 (1.00)	9.9 (0.99)	10.4 (1.01)	10.9 (0.95)
w/o col. splice(full) 1 st story	9.1 (1.04)	9.6 (0.96)	9.7 (0.98)	10.0 (0.97)	10.3 (0.90)

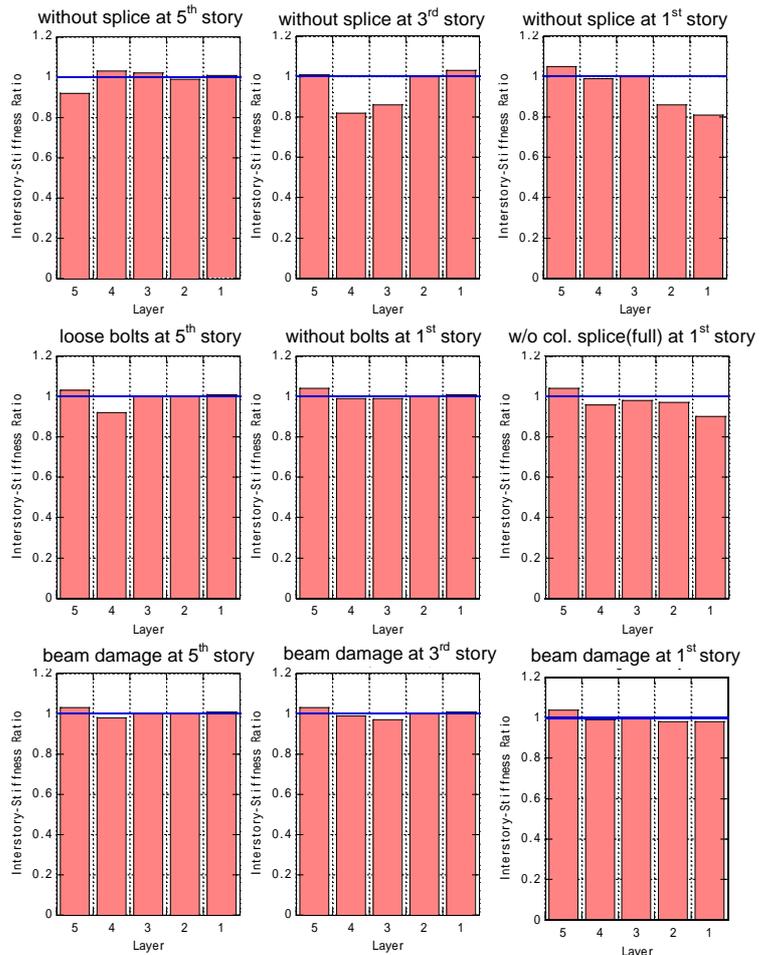


Fig.3 Identified interstory-stiffness ratio
(Case-2: without studs)

Table-3 Identified interstory-stiffness
(Case-3: with braces) [tonf/cm]

simulated damage	5th story	4th story	3rd story	2nd story	1st story
no damage	30.5 (1.00)	33.0 (1.00)	38.2 (1.00)	40.6 (1.00)	34.9 (1.00)
w/o braces 5 th story	10.6 (0.35)	29.7 (0.90)	41.2 (1.08)	42.0 (1.03)	46.5 (1.33)
w/o braces 3 rd story	32.1 (1.05)	30.6 (0.93)	11.2 (0.29)	39.0 (0.96)	48.7 (1.40)
w/o braces 1 st story	32.8 (1.08)	34.0 (1.03)	38.8 (1.02)	38.2 (0.94)	11.7 (0.34)

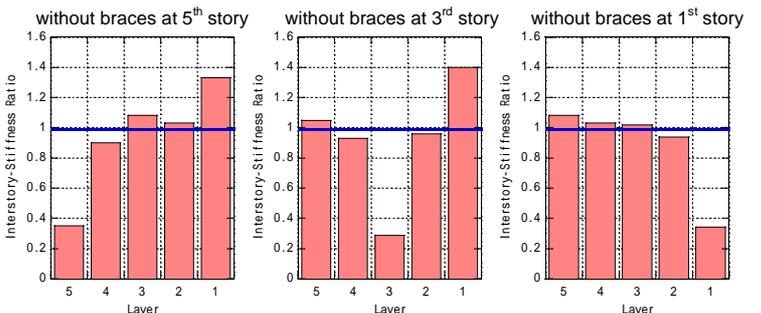


Fig.4 Identified interstory-stiffness ratio
(Case-3: with braces)