

モード解析を用いた骨組構造部材の剛性劣化の一同定法

(株) ウエスコ	正員	○田淵聡郎
(株) 大成建設		団博成
徳島大学工学部	フェロー	平尾潔
徳島大学工学部	正員	成行義文

1. まえがき

構造物はその供用期間中に地震などの過大荷重あるいは疲労現象等によって損傷を受ける。これを放置すれば崩壊などの重大な事故につながる恐れがあるため、このような構造物の損傷を早期に発見し、補修・補強を施すことは、その後の構造物の安全性にとって非常に重要である。それゆえ、近年、構造物の点検・補修マニュアル等が徐々に整備されつつあるが、これらは主に目視による点検であるため、構造物の損傷を見落とす恐れがあり、これに代わる精度のよい損傷評価法を開発する必要がある。

そこで本研究では、振動実験から比較的容易に得られる低次の振動モードを用いた実用的な損傷評価法を導くための基礎的研究として、各部材の剛性を未知数とした構造物全体の剛性マトリックスをもとに、モード解析により、損傷を受けた部材およびその損傷度を同定する方法を提案した。そして、せん断型骨組、はりに対する同定結果をもとに、本同定法の妥当性並びに有用性について検討した。

2. 解析手法

図-1 のような 3 層せん断型骨組において各層の部材剛性を未知数 $k_1 \sim k_3$ とした剛性マトリックスは次のように組み立てられる。

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ & k_2 + k_3 & -k_3 \\ \text{SYM} & & k_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

次に減衰自由振動方程式を立てると次式のようなになる。

$$\omega^2 [M] \{x\} + \omega [C] \{x\} + [K] \{x\} = \{0\} \quad (2)$$

ここで、式(2)の ω , $\{x\}$, $[M]$, $[C]$ および $[K]$ はそれぞれ固有円振動数、モード形、質量マトリックス、減衰マトリックスおよび剛性マトリックスである。

今、式(2)の質量マトリックス $[M]$ は構造物の損傷前後で変化しないものとし、減衰マトリックスが次式のようなレーリー減衰で表されるものとすれば、

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (3)$$

ここで α , β は定数である。

この方程式に含まれる未知数は剛性マトリックス中の $k_1 \sim k_3$ のみとなり、一つの測定モード（固有振動数、モード形）が既知であれば、未知数 3 個に対して 3 個の方程式が成立することになり、結局、測定が比較的容易である 1 次の測定モードから部材剛性 $k_1 \sim k_3$ を同定することができる。

3. 解析例

以下に、せん断型骨組およびはりに対する解析結果の例を示しておく。なお、本研究では、基礎的研究として、固有値解析により求めたモードを測定モードとして用いている。

3.1 せん断型骨組

図-2 に示す 7 層せん断型骨組についての数値計算例を示す。各部材の剛性および質量は次のようである。

$$m_1 \sim m_5 = 15, m_6 \sim m_7 = 12 (\times 10^3 \text{ kgf}) \quad k_1 \sim k_5 = 10, k_6 \sim k_7 = 8 (\times 10^6 \text{ kgf / m})$$

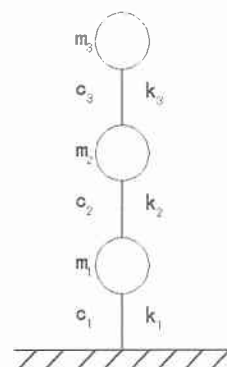


図-1 3層せん断型骨組

まず、損傷前の各部材の剛性 $k_1 \sim k_7$ を用いて式(1)と同様に、剛性マトリックスを組み立て、これと損傷前の1次モードを式(2)に代入すると、 $k_1 \sim k_7$ を未知数とした独立な方程式が7個できるから、これを解く(同定する)と、損傷前の各部材剛性が次のように求まる。

部材剛性	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
同定値	10.0	9.99	9.97	10.0	9.98	7.89	7.92
正解値	10	10	10	10	10	8	8

次に、1層および6層が30%損傷した場合($k_j = 0.7k_j, k_6' = 0.7k_6$)について損傷前と同様に、損傷後の部材剛性を同定すると次のようになる。

部材剛性	k_1'	k_2'	k_3'	k_4'	k_5'	k_6'	k_7'
同定値	6.98	9.95	9.98	9.97	9.98	5.63	7.84
正解値	7	10	10	10	10	5.6	8

そしてこのようにして得られた損傷前後の部材剛性の変化を次式で定義する剛性変化率 CR により比較する。

$$CR_j = k_j' / k_j \quad j = 1, 2, \dots, 7 \quad (4)$$

剛性変化率	CR_1	CR_2	CR_3	CR_4	CR_5	CR_6	CR_7
同定値	0.69	0.99	1.00	0.99	1.00	0.71	0.99
正解値	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	1.0

これより、1層および6層が30%損傷していることがわかる。

3.2 単純ばり

図-3に示す単純ばりに対する数値計算例を示す。各部材の剛性および質量は以下の通りである。

$$m_1 \sim m_4 = 1.267 \text{ (t/m)} \quad k_1 \sim k_4 = 378000 \text{ (t} \cdot \text{m}^2)$$

この単純ばりの場合、正確には、回転角5個とたわみ3個の計8個の自由度があるが、振動実験で回転角のモードを測定することは非常に困難である。そこで本研究では、実用性を考慮し、式(2)における回転慣性を無視して、次の式(5)から回転角の項を消去した式(6)の縮合剛性マトリックスを用いることにより、近似的に変位に対するモードのみから部材剛性を同定することとした。

$$[K] = \begin{bmatrix} [K]_{rr} & [K]_{rs} \\ [K]_{sr} & [K]_{ss} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[K]_r = [K]_{rr} - [K]_{rs} [K]_{ss}^{-1} [K]_{sr} \quad (6)$$

ここで、 r は変位、 s は回転角、 $[K]_r$ は縮合剛性マトリックスである。

このようにすると図-3の単純ばりの縮合剛性マトリックスは 3×3 のマトリックスになり、これと一つの測定モードを式(2)に代入すると、独立な方程式が3個できるが、未知数の総数は部材①～④の剛性 $k_1 \sim k_4$ の4個となるため、このはりの場合には1次および2次モードから部材の剛性を同定することになる。その一例として、第②部材が30%損傷した($k_2' = 0.7k_2$)と仮定し、せん断型骨組の場合と同様に各部材の剛性変化率を求めると次のようになる。

剛性変化率	CR_1	CR_2	CR_3	CR_4
同定値	1.04	0.68	1.03	0.95
正解値	1.0	0.7	1.0	1.0

これより第②部材が30%損傷していることがわかる。

4. あとがき

以上のことより、構造物の損傷評価に対する本同定法の有効性が示された。すなわち、本同定法では、せん断型骨組のように、その変形に回転角の項を含まない構造物については、1次モードのみから正確な損傷評価、すなわち損傷を受けた部材とその程度が同定できる。また、はりのように、その変形に回転角の項を含む構造物についても、回転慣性を無視して回転角を消去した縮合剛性マトリックスを用いることにより、変位のための1次および2次モードだけから、かなり精度よく損傷評価ができる。したがって、本同定法は、構造物の損傷の発見とその補修・補強の際の目安として有用であると言える。

5. 参考文献

Hongying Yuan: MODAL ANALYSIS INSPECTION FOR DAMAGE ASSESSMENT OF STRUCTURES

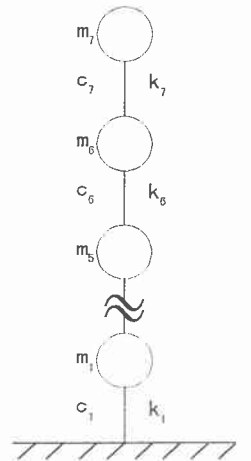


図-2 7層せん断型骨組

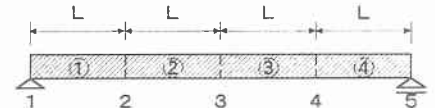


図-3 単純ばり