

[1162] 部分構造と感度解析による鉄筋コンクリート橋の剛性推定に関する研究

今井富士夫*1・中沢隆雄*2・枝元宏彰*3

1. まえがき

最近、多年の供用によって損傷を受けた構造物の剛性値を推定するための手法がいくつか提案されている。新延らは感度解析を用いた最小自乗法に基づくはりの剛性推定法を提案し [1][2]、宮本らは感度解析手法を実橋梁に適用して、静的・動的の両面から剛性推定を行っている [4][5]。

これらは有限要素法を基にした解析法であり、分割要素個々の剛性を1つの感度変数として取り扱うため、損傷が分割された要素内に一様に分布する場合には精度の良い結果を得ることができるが、要素内に局所的な損傷が存在するときには損傷の剛性は把握できていないことになる。局所的な損傷による剛性変動を正確に把握しようとするならば、要素を細分化し、解の収束で判定する方法もあるが、それでは構造系全体の解析では多大な計算時間を要することになる。

ここで提案する部分構造と感度解析を併用する手法によれば、局所的な損傷の部位やその幅を把握することができ、しかも少数の要素で剛性を精度良く解析できることが明らかとなった。本論文では損傷を有する単純ばりの解析例により本法の有効性を確認するとともに、本法の実橋梁への適用に関する問題点についても言及している。

2. 感度解析と部分構造

本法は新延らが提案した感度解析法 [1] を採用している。ここではまずその手法を概説する。変位法による剛性方程式は一般に次式で与えられる。

$$\mathbf{K}(\mathbf{X}) \mathbf{Z} = \mathbf{F} \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m)^T$ は感度変数ベクトル、 $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)^T$ は節点変位ベクトル、 $\mathbf{F} = (F_1, F_2, \dots, F_n)^T$ は節点外力ベクトル、 $\mathbf{K}$ は剛性マトリックスで感度変数 X_i の関数である。ここでの感度変数は断面2次モーメントを考えている。

式(1)は感度変数 X_i の変動 δX_i に対して、以下のようになる。

$$\mathbf{K} \left(\frac{\partial \mathbf{Z}}{\partial X_i} \right) \delta X_i + \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial X_i} \right) \mathbf{Z} \delta X_i = \mathbf{0} \quad (2)$$

式(2)より、部材 i の感度変数 X_i の変動に対する節点変位の変動量すなわち感度係数は次式となる。

$$\frac{\partial \mathbf{Z}}{\partial X_i} = -\mathbf{K}^{-1} \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial X_i} \mathbf{Z} \quad (3)$$

節点 j の解析変位 Z_j に対応する測定変位を d_j とすると、両者の関係は

$$\Omega_j = d_j - \left(Z_j + \sum_{i=1}^m \frac{\partial Z_j}{\partial X_i} \delta X_i \right) \quad (4)$$

*1 宮崎大学助教授 工学部土木環境工学科、工博(正会員)

*2 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科、工博(正会員)

*3 (株)国土開発コンサルタント設計第1部部長(正会員)

変動量 δX_i は、 $\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \Omega_j^2$ が最小となるように決定する。すなわち、

$$\mathbf{B}^T \mathbf{B} \delta \mathbf{X} = \mathbf{B}^T (\mathbf{d} - \mathbf{Z}) \quad (5)$$

ここに、 $\mathbf{B}$ は感度係数から成る $(n \times m)$ のマトリックスで、要素は $B_{ij} = \frac{\partial Z_i}{\partial X_j}$ となる。 n は測定点数であり、 m は部材数である。

なお、解析変数はこれまでの報告を参考にして断面 2 次モーメントの逆数とした [2]。

次に構造全体から切り出された部分構造に感度解析の適用を図る。

図-1 (a) に示すような単純ばりから区間 $a b$ を切り出す。切り出された部分構造を単純ばりに置き換えるためには、作用する荷重は全体系でこの区間に作用していた外力に加えて、全体系で生じた点 a と点 b の曲げモーメントから成る回転力を図-1 (b) のように負荷する必要がある。また、変位は図-2 に示すような区間 $a b$ の相対変位 δ を使用する。

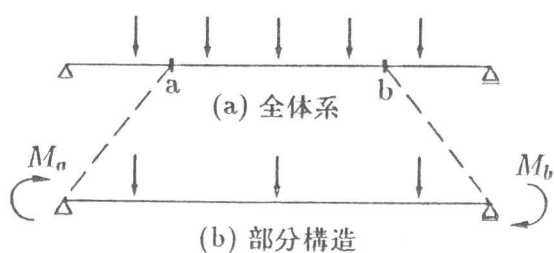


図-1 部分構造の荷重モデル

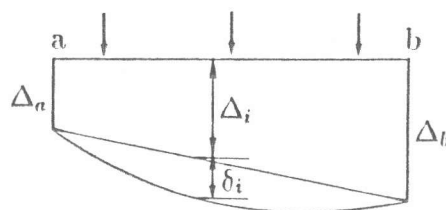


図-2 部分構造の変位モデル

3. 解析モデル

本章では前述の部分構造と感度解析を併用した剛性推定法の特徴と精度を検討するために、損傷を有する単純ばりを例に採り、解析を行う。

損傷は鉄筋コンクリート橋を想定して、図-3 に示すように、(a) ある区間に断面欠損が生じているような場合と (b) 曲げひびわれがはりの一部に分散しているような場合の 2 例を考えた。いずれの場合も損傷部の断面 2 次モーメントは損傷のない健全な断面の $1/2$ とした。

また (a) の損傷長さははり全長の $1/16$ で、(b) でのひびわれ幅と間隔ならびに分布幅はそれぞれ、はり全長の $1/320$ と $1/80$ および $1/8$ とした。

さらに、感度解析で使用する変位の測定値は有限要素法によって算定されたたわみとたわみ角を使用した。 (a) では要素分割を 256 分割し、(b) では 320 分割した。このときの荷重は中央

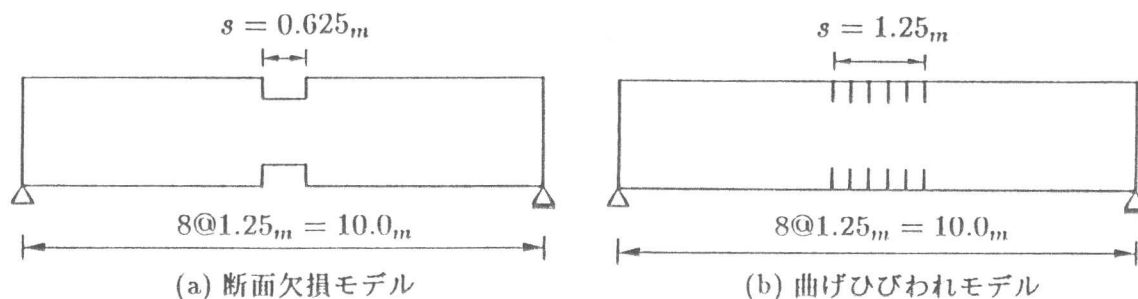


図-3 解析モデル

点と左右の1/4点の3点に個別に負荷した。このようにして得られた変位を、以後「理論測定値」と称することにする。

測定値にたわみ角も加えた理由は、曲率やたわみ角がたわみに比べて、損傷に対する感度特性が高い[3][6]とされているからである。このことについては解析事例のなかで紹介する。

4. 理論測定値による剛性推定

4. 1 感度係数

8分割された単純ばりの中央に集中荷重を負荷したときの感度係数を数個の節点について示したものが図-4である。(a)はたわみ、(b)はたわみ角の各成分についてである。図中の節点は図-5の全体系に関するものである。

たわみ成分に対する感度係数は緩やかに変化しながら、節点の近傍の要素で最大値を示している。すなわち、端部要素の感度係数はどの節点のたわみに関しても微小であることが読み取れる。

たわみ角については、節点の両端の要素で符号の反転を伴う急激な変化を示している。このことから、たわみ角がたわみに比べて剛性変動に敏感であることが判る。新延らは固有ベクトルに関して同様な考察をしている[3]。

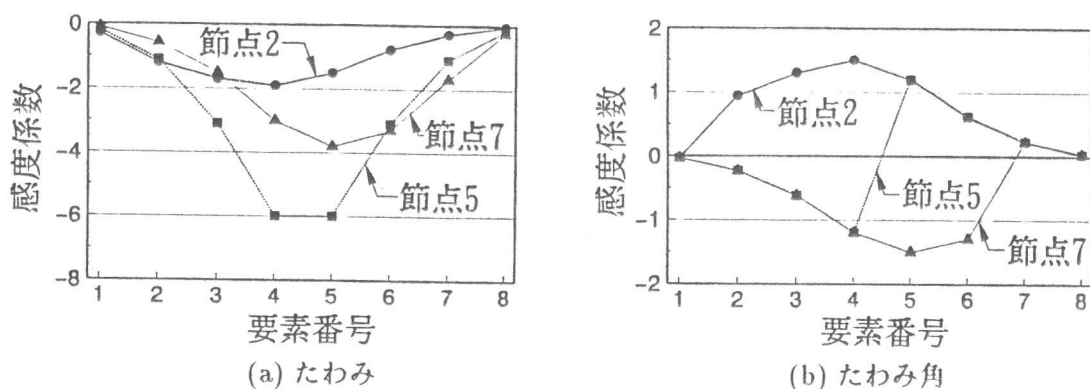


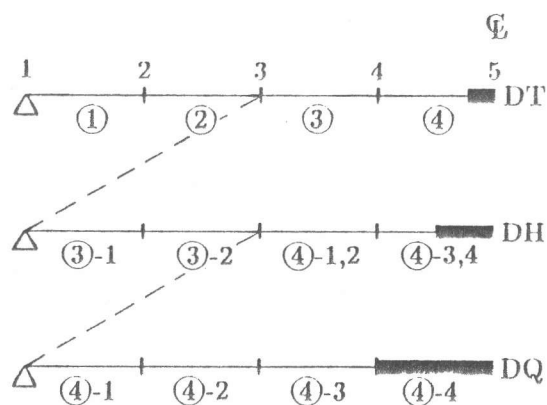
図-4 感度係数

4. 2 断面欠損のある単純ばり

図-5は解析での分割要素と損傷幅の関係をはり半分について示したものである。ここに、DTははり全体を解析対象としたものであり、DHはDTの第3と第4要素を部分構造として切り出したもの、DQはDTの第4要素を切り出したものである。

図から明らかなように、損傷はDTでは第4要素の端部1/4区間に位置するものであり、DHでは第4要素の半分に位置することとなり、損傷幅は要素長とは一致していない。DQでは損傷が第4要素全体に一樣に分布している状態となる。

表-1はこれら3者の剛性推定の結果を表示し



■ : 損傷部分

図-5 損傷と要素分割

たものである。表中のD
Fはたわみを、SLはた
わみ角を、DSは両者の
変位を測定値として取り
扱ったことを示すもので
ある。

まず、損傷が要素内に
一様に分布する部分構造
DQの解析結果から3つ
の測定値に対する解の精
度について検討を行う。

SLとDSでの誤差は最大でも0.1%に過ぎず、十分な精度を有している。しかしながら、たわみ
によるもの(DF)については欠損部分では誤差は0.3%程度であるが、端部に10%以上の誤差
が生じている。

次に、損傷が要素内の1部に存在するDTとDHについてみる。たわみのみを測定値としたDF
の結果では損傷を包含した要素に隣接する要素に極めて高い値を示しているが、たわみ角を測定値
に使用するSLとDSの解にはこのような傾向は見受けられず、その結果はあたかも妥当な結果の
ように見受けられる。この事実は、測定値にたわみのみを使用すれば、解析要素内の損傷の有無が
検索でき、しかも損傷幅も明確に把握できることを示唆するものである。しかしながら、DFの解
析では端部に大きな誤差も生じる。これは前述の感度係数の考察に見られるように、たわみに対す
る感度係数が緩やかでかつ端部ではそれらの値が小さいことに起因している。

そこで、全体系(DT)から部分構造のDQまで全てののはりの解析で、端部2つの断面2次モー
メントを同一感度変数として取り扱ってみた。その結果が表-2である。

このようにすると、測定値にたわみのみを使用したときの特性すなわち要素の1部に損傷を包含
している場合には隣接の要素に過大な値を示すという傾向は損なわれることなく、端部の精度も向
上できている。特に、部分構造D
Qでは誤差が0.3%以下に低減し
ている。

以上の結果から、損傷の有るは
りの剛性推定を行うには、まず測
定値にたわみのみを使用して損傷
の部位と長さを検索する。その後
にたわみ角あるいはたわみとたわ
み角の複合したものを測定値とし
て使用すれば、精度のよい結果が
得られるものと思われる。

表-1 断面欠損モデルの剛性推定値

要素		①	②	③-1	③-2	④-1	④-2	④-3	④-4
真解		1.0	1.0	1.0		1.0			0.5
DT	DF	2.0000	0.6714	1.6230		0.6972			
	SL	1.0030	1.0060	1.0070		0.7860			
	DS	0.9860	1.0200	1.0510		0.7620			
DH	DF	—		1.7780	0.6972	1.8250		0.5776	
	SL	—		1.0020	1.0020	1.0010		0.6611	
	DS	—		1.0050	1.0090	1.0100		0.6539	
DQ	DF	—		—		1.1410	0.9001	1.0520	0.4974
	SL	—		—		0.9993	1.0010	1.0000	0.4999
	DS	—		—		1.0010	0.9991	0.9989	0.4998

表-2 感度変数を修正した断面欠損モデルの剛性推定値

要素		①	②	③-1	③-2	④-1	④-2	④-3	④-4
真解		1.0		1.0		1.0			0.5
DT	DF	0.9156		1.2490		0.7247			
	SL	1.0050		1.0080		0.7859			
	DS	1.0130		1.0530		0.7617			
DH	DF	—		0.9633		1.2640		0.6028	
	SL	—		0.9997		1.0010		0.6624	
	DS	—		1.0070		1.0050		0.6547	
DQ	DF	—		—		0.9974	1.0040	0.4996	
	SL	—		—		1.0000	1.0000	0.5000	
	DS	—		—		1.0000	1.0000	0.5000	

4. 3 曲げひびわれが分布する単純ばり

本節では、鉄筋コンクリートばりの曲げひびわれによる損傷を想定した図-3(b)のモデルに

についての解析結果について考察する
(表-3)。

解析でのひびわれ幅は全長 L の $1/320 = 3\text{cm}$ 強と現実のひびわれ幅に比べて大きい、計算目的が曲げひびわれが分布しているような部位の平均的な剛性の推定であることから、ひびわれ幅の大きさは特に問題ではないと思われる。

解析に先だって、解析モデルの測定値や損傷部位の平均断面2次モーメントを先述したように単純ばりを320分割して算定した。表-3の真解は上記の計算で単純ばり全体にひびわれが生じているようにして得たたわみに、はり理論を適用して得た平均断面2次モーメント値である。

断面欠損のある単純ばりの解析結果と同様に、損傷の部位と長さを検索するにはたわみによる測定値使用が有効であり、剛性推定にはたわみ角を使用すれば、ほとんど誤差なく算定できている。

5. 実構造への適用

本法の実構造物への適用性について検討する。解析モデルには図-3(a)を採用する。

実橋梁の静的変位データで比較的入手し易いものはたわみであるが、桁1本あたりの測定点には限りがある。

ここで、実験的に得られたデータはたわみのみで、かつ測定点もはり全体の8等分割点の両支点を除く7節点であると仮定する。この場合、部分構造の解析には必要な測定変位の数を欠くことになる。そこで、測定点間のたわみを3次のスプライン関数にて補間し、256等分点のたわみ補間値から差分法よりたわみ角を算定した。このようにして得られたたわみとたわみ角を以後、「補間測定値」と称する。

補間測定値により剛性推定を行った結果が表-4である。

表より明らかなように、要素内の1区に損傷が存在する全体系DTの解析では損傷を包含した要素の隣接要素の断面2次モーメントが過大となる現象が3つのいずれの測定値に関してもみられる。また、DTを細分化したDHではそのような傾向はみられず、むしろ端部の値が過大となっている。

さらに、損傷長さと要素長が一致するDQでも十分な解は得られておらず、たわみやたわみ角の入力の差異について理論測定値を使用した場合のような精度に対する違いは見受けられない。DHとDQで推定された断面2次モーメントは、支点側から中央部の損傷に向かって滑らかに移行するように

表-3 曲げひびわれモデルの剛性推定値

要素		①	②	③-1	③-2	④-1	④-2
真解		1.0	1.0	1.0		0.8333	
DT	DF	1.3610	0.8847	1.1150		0.8700	
	SL	1.0010	1.0020	1.0020		0.9043	
	DS	0.9957	1.0050	1.0130		0.8954	
DH	DF	—	—	0.9464	1.0380	0.9889	0.8339
	SL	—	—	1.0010	0.9998	1.0000	0.8333
	DS	—	—	0.9996	1.0000	1.0010	0.8333

表-4 補間測定値による剛性推定値

要素		①	②	③-1	③-2	④-1	④-2	④-3	④-4
真解		1.0		1.0		1.0			0.5
DT	DF	0.9319		1.2060		0.7313			
	SL	1.1030		1.1300		0.7472			
	DS	1.0460		1.1050		0.7400			
DH	DF	—		1.2470		0.8443		0.6634	
	SL	—		1.1920		0.8665		0.6657	
	DS	—		1.2020		0.8688		0.6622	
DQ	DF	—		—		0.8546	0.6964	0.6166	
	SL	—		—		0.8601	0.6852	0.6319	
	DS	—		—		0.8590	0.6827	0.6298	

なっている。この原因としては、少数の点のたわみによる補間で、実際のたわみやたわみ角の変動を滑らかにしたためだと考えられる。

本法の剛性推定に対する適用性は理論測定値を直接に利用した第4章の結果から十分であることが判明している。よって、実橋梁の適用に関する問題は、少数の測定たわみからの中間部たわみの補間法ならびにたわみ角の精度の良い算定法を見いだすことにあるものと思われる。

6. あとがき

本論文では感度解析に部分構造を併用した剛性推定法を提案し、損傷を有する鉄筋コンクリート橋への本法の適用性を検討するために、単純ばりを例に採り、剛性(断面2次モーメント)の解析を行った結果を報告している。取り扱った損傷は一定の幅の断面欠損と曲げひびわれが密に存在するような場合である。得られた結果を要約すると、以下ようになる。

- (1) 本法を使用すれば、損傷の部位と長さを検索でき、かつ精度の良い剛性推定が可能となる。
- (2) 損傷の部位と長さの検索には、測定データとしてたわみを使用すべきである。
- (3) 剛性推定の測定データとしては、たわみよりもたわみ角が有利である。
- (4) 曲げひびわれが密に分布する断面についても、平均的な剛性が算定できる。
- (5) 実橋梁への本法の適用には、少数のたわみデータからの精度の良い補間法とたわみ角の算定法を開発する必要がある。

本法は格子桁構造にも簡単に応用できる。現在、格子桁モデルに対する計算も行っており、次の機会に報告する予定である。

参考文献

- 1) 台原 直・新延泰生・矢島基臣・松井邦人 : 感度解析を用いた逆解析によるはり構造物の剛性推定、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集1、pp.594-595、1989.10
- 2) 新延泰生・松井邦人・菊田征勇 : 骨組構造物の応答感度係数の特性、土木学会論文集、I-20、No.450、pp.75-83、1992.7
- 3) 榎本覚雄・新延泰生・矢島基臣 : 骨組構造物の剛性変動に対する固有ベクトル成分の感度特性、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集1、pp.1198-1199、1992.10
- 4) 宮本文穂・前田敏也・熊谷 稔・前田 強 : コンクリート橋の安全性評価と補修・補強法の検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.2、pp.245-250、1989
- 5) 宮本文穂・森川英典・久保田裕二 : 既存コンクリート橋の損傷評価に対する動的感度解析の適用、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp.905-910、1991
- 6) 水澤富作・高木信治 : 曲率変化に基づくはり構造物の損傷評価について、構造工学論文集、Vol.13A、pp.21-29、1992.3