

GAを用いた近代木橋連結部の剛性および影響範囲の推定法について

On the Estimate Method of Stiffness and Influence Range of Connecting Joint of Modern Wood Bridge Using GA

○山本亮* 岩崎正二** 出戸秀明** 宮本裕** 五郎丸英博***

YAMAMOTO Ryo, IWASAKI Shoji, DETO Hideaki,
MIYAMOTO Yutaka and GOROMARU Hidehiro

*岩手大学大学院工学研究科 (〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5)

**岩手大学工学部建設環境工学科 (〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5)

***日本大学工学部土木工学科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1番地)

ABSTRACT The Purpose of this paper is to clarify the dynamic stiffness and influence range of connecting joints of modern wood bridge with glued laminated timbers. The behavior of connecting joints of this structure is described by 2-dimensional elastic spring model. The dynamic spring coefficients of the flexible element are estimated by combining Genetic Algorithm(GA) and the numerical impulse response analysis by means of using the measured acceleration waves of dynamic impact test for a connecting joint of arched pedestrian bridge with glued laminated timbers.

Keywords: 集成材、部材連結部、バネ要素、衝撃応答解析
glue laminated timber, connecting joint, spring element, impulse response analysis

1. はじめに

近年、集成材を主材料とする近代木橋が、歩道橋ばかりでなく車道橋にも見られるようになってきた。この背景には、木材加工技術の進歩に伴い、木材を集成材として利用することにより強度・品質が安定し長期耐久性に優れた大断面長大材の制作が可能になったことが挙げられる。また、木橋は鋼材やコンクリートなどの工業的材料とは異なり、地域特有の木材を用いることができる所以、完成した構造物は地域のランドマークとしての役割を果たすことが可能である。さらに、集成材を用いた木橋が数多く建設されることで、その地域の木材資源の有効的活用がなされ、地域の活性化に役立つとともに、今後、間伐材や不良材を用いた集成材の使途が広がることで、多大な経済効果があると考えられる。

集成材はひき板を積層圧縮接着して工業的に生産されるため、長大材や湾曲材が比較的容易に製造できるという利点がある。しかし、長大材や湾曲材は工場からの運搬が困難であることから、数部材に分割し現場で連結することが一般的である。従って集成材を用いた近代木橋は、各部材の接合部のほかに、分割された部材をつなぐ連結部が必要となり、その連結位置や連結方法が、構造物の静的特性や動的特性に多大な影響を与えるために、その剛性評価は非常に重要な問題となる。しかし、近代木橋の設計において連結部の剛性は剛結と考えることが一般的であり、その点に生ずる断面力に対して連結部のボルトのせん断剛性が十分耐えうるかどうかを検討するのみで、連結部の半剛結特性についてはあまり考慮されていない。また、近代木橋を対象とした接合部及び連結部に関する研究報告^{1) ~8)}は多くはなく、近代木橋連結部の半剛結特性を早急に明らかにしておくことが重要である。

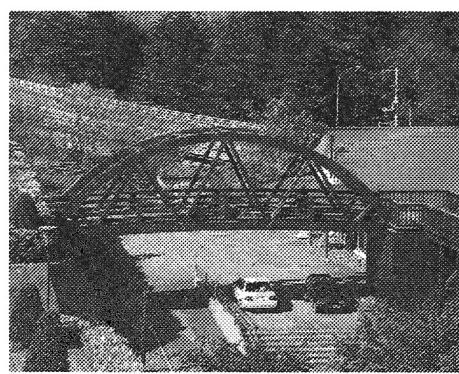


写真-1 思惟公園1号橋

著者らは文献4)において、連結部をバネ要素としてモデル化する方法を提案し、岩手県田野畠村思惟公園1号橋（写真一）の振動実験結果に数値解析解を収束させ、バネ定数を推定する最適化手法を提案した。しかし、最適化手法では木橋全体の振動実測が必要であり、構造物の架設後にしか適用出来ない。また、文献5)では、思惟公園1号橋の連結部の実大集成材梁試験体を作成し、室内打撃試験を行い、試験より得られた固有振動数と動的ヤング係数を振動数方程式に代入することによりバネ定数を逆算する、逆算手法を提案した。しかし、この逆算手法は、試験方法の変化により境界条件や支持条件が変わった場合は、そのつど振動数方程式を構成しなおす必要がある。これら文献4), 5)の問題を解決するために、文献7)では、室内打撃試験の加速度応答波形に衝撃応答解析解の加速度応答波形を収束させるバネ定数推定法を提案したが、実橋連結部への有効性については検討していなかった。

そこで文献8)においては、実橋連結部近傍の局部曲げ打撃試験を実施し、数値固有振動解析から得られる固有振動数が実測固有振動数に一致するように、バネ定数等を遺伝子としたGAを用いてバネ定数を推定する手法を提案した。しかし、加速度応答波形や減衰定数、振動モードについての検討は行っていない。

そこで本論文では、鋼板挿入型ボルト接合連結部を有する集成材梁試験体を作成し、ボルトの締め付け力を変化させた曲げ打撃試験を行い、得られた実測固有振動数および実測加速度応答波形に数値固有振動解析解と衝撃応答解析解を収束させる、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化手法を適用することにより連結部の動的剛性の推定を行う。また、実橋連結部近傍の局部曲げ打撃試験に対しても同様のGA法を適用し、実橋連結部の動的剛性および振動に及ぼす影響範囲の推定を行う。

2. 部材連結部のバネ要素を用いたモデル化

本論文の対象である思惟公園1号橋の部材連結部は、写真一に示すように集成材内に $1000 \times 60 \times 9(\text{mm})$ の鋼板4枚を挟んで、両側から12本のボルトで固定する鋼板挿入型ボルト接合となっている。1号橋の連結部はアーチ部と下弦材に計8ヶ所設置されているが、他の部材との接合ではなく、長大部材だけの極めてシンプルな構造となっている。本論文では、文献5)と同様に集成材梁試験体の曲げ打撃問題を取り扱うため、1号橋の部材連結部は半剛結の特性を有するものと考え、図一に示す2次元バネ要素にモデル化し解析を行った。

このバネ要素の剛性マトリックスは次式のように表される。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_z & 0 & -K_z & 0 \\ K_{\theta y} & 0 & -K_{\theta y} & 0 \\ K_z & 0 & K_z & 0 \\ Sym. & & & K_{\theta y} \end{bmatrix}$$

ここで、 $K_y(N/\text{mm})$ はせん断バネ定数を、 $K_\theta(N \cdot \text{mm}/\text{rad})$ は回転バネ定数を表している。

また、バネ要素においては質量マトリックスは考慮しない。

3. 室内曲げ打撃試験の概要と結果

室内曲げ打撃試験は、幅180mm、高さ450mm、長さ2880mmの集成材梁試験体を2本のロープで吊り、試験体の一端をインパクトハンマーにより一定加振力で鉛直方向に打撃加振し、連結部を挟んだ反対側にピックアップを取り付け、加速度応答波形を測定した。試験体を吊すロープの位

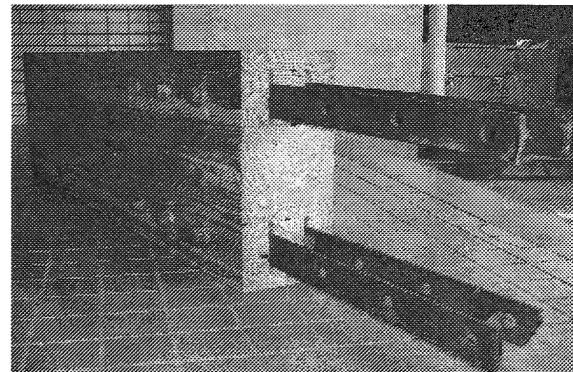


写真-2 ボルトを外した状態の部材連結部

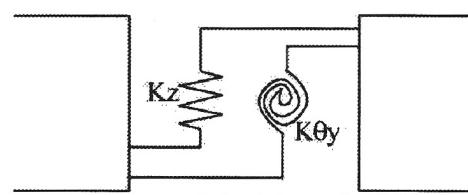


図-1 バネ要素モデル図

置は、両端自由の梁の曲げ1次振動モードの節となるところとした。

また、連結部無し試験体、鋼板挿入型ボルト接合を有する試験体（以下、ボルトタイプ）、鋼板挿入型ドリフトピン接合を有する試験体（以下、ドリフトタイプ）の、連結方法が異なる3種類の試験体で曲げ打撃試験を行った。室内曲げ打撃試験の概要を図-2に示す。

なお、ドリフトタイプの試験体は、ボルトタイプ試験体のボルトを取り外し、ピンだけ残した物である。室内曲げ打撃試験より得られた3種類の試験体の鉛直方向加速度応答波形と曲げ1次振動モードを図-3～図-5に示す。また、それぞれの加速度波形のフーリエスペクトルより得られた固有振動数と減衰定数を表-1に示す。なお、図-3は連結部の無い試験体の試験結果を、図-4はボルトタイプの連結部を有する試験体の試験結果を、図-5はドリフトタイプの連結部を有する試験体の試験結果を示している。

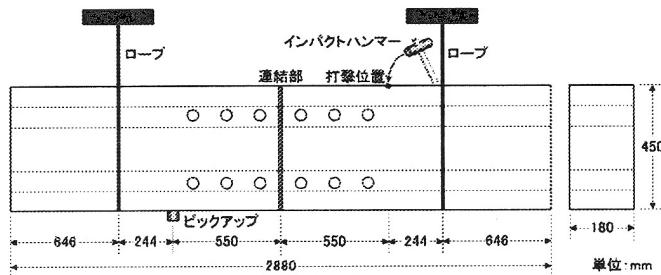


図-2 室内曲げ打撃試験概要

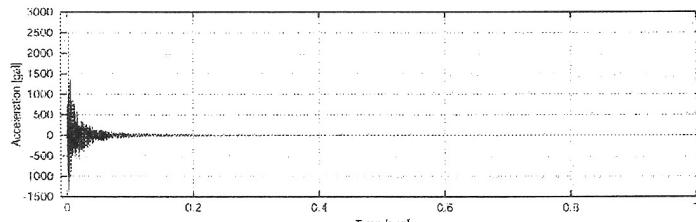


図-3 連結部無し試験体の加速度応答波形と曲げ1次振動モード

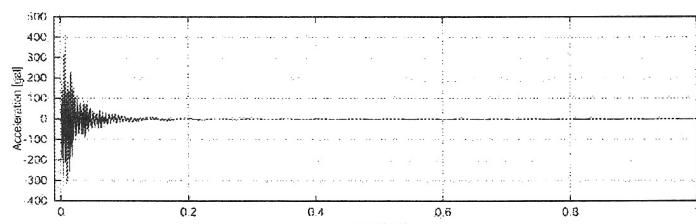


図-4 ボルトタイプ連結部試験体の加速度応答波形と曲げ1次振動モード

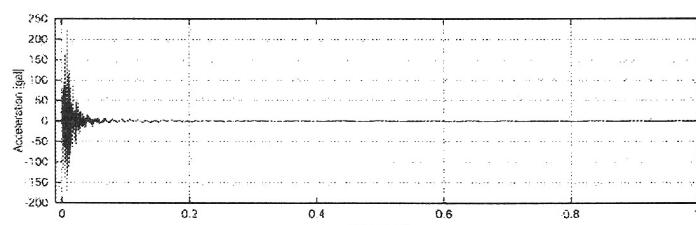


図-5 ドリフトタイプ連結部試験体の加速度応答波形と曲げ1次振動モード

表-1 室内曲げ打撃試験における固有振動数と減衰定数

固有振動数 (Hz)			
次 数	連結部無し	ボルトタイプ	ドリフトタイプ
1 次	227	116	107
2 次	492	201	178
3 次	740	—	—
4 次	988	—	—
減衰定数			
1 次	0.525×10^{-2}	1.202×10^{-2}	1.535×10^{-2}

図-3～図-5の曲げ1次振動モードを見ると、連結部の無い試験体のモードはなめらかに変化しているが、連結部を有する試験体のモードは、連結部位置で急激に変化していることがわかる。この現象は、ボルトタイプ連結部よりもドリフトタイプ連結部の試験体の方が大きいようである。また、加速度応答波形および表-1に示す減衰定数の結果から、連結部無し、ボルトタイプ連結部、ドリフトタイプ連結部の試験体の順に、減衰性能が増加していることがわかる。また、固有振動数に関しても、連結部無し、ボルトタイプ連結部、ドリフトタイプ連結部の試験体の順に、固有振動数が減少している。これらの結果は、連結部のボルトの締め付け力の関係と対応しており、締め付け力が少なくなるほど試験体の動的剛性が低下し、減衰性能が増加することを示している。

4. 実橋連結部の曲げ打撃試験概要と結果

実橋連結部近傍の曲げ打撃試験は、室内連結部曲げ打撃試験同様、インパクトハンマーにより一定加振力で鉛直方向に打撃加振した。

打撃位置の両側にピックアップを取り付け、応答加速度を測定し、そのフーリエスペクトルから1次～4次の固有振動数と減衰定数を読みとる。実際には、思惟公園1号橋（写真-1）の連結部近傍を対象に、図-6に示すような打撃位置、ピックアップ位置（図中P1～P3）に基づき曲げ打撃試験を行った。

実橋連結部近傍の曲げ打撃試験より得られた3ヶ所の位置での加速度応答波形、フーリエスペクトルを図-7～図-9に示す。図-7は図-6に示すピックアップ位置P1の試験結果を示し、図-8、図-9は、それぞれ打撃位置から連結部と反対側のピックアップ位置P2、P3の試験結果を示している。また、図-7～図-9に示すフーリエスペクトルより得られた固有振動数と減衰定数を表-2に示す。

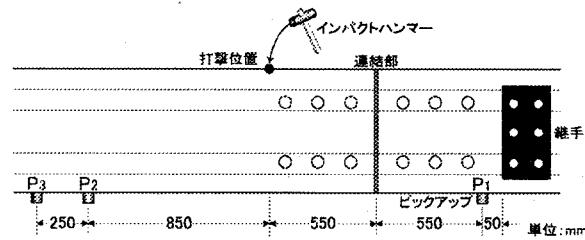


図-6 実橋連結部近傍の曲げ打撃試験概要

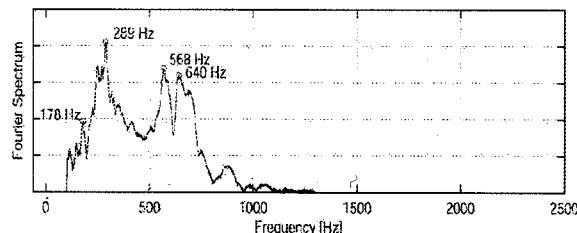
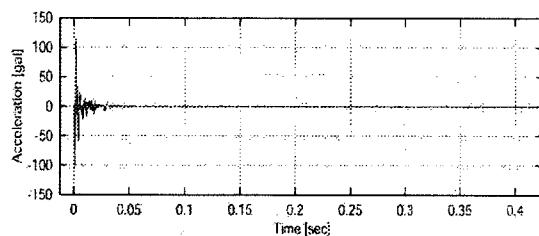


図-7 ピックアップ位置 P1 の加速度応答とフーリエスペクトル

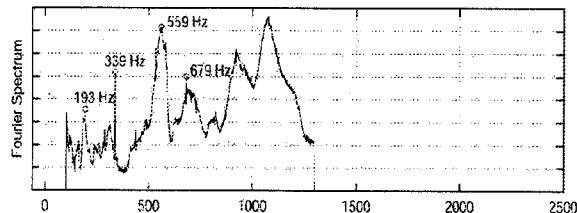
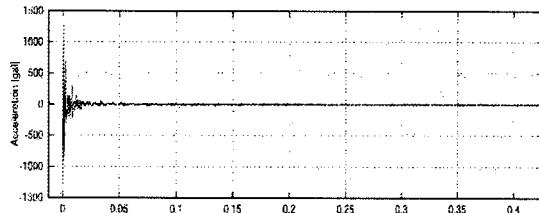


図-8 ピックアップ位置 P2 の加速度応答とフーリエスペクトル

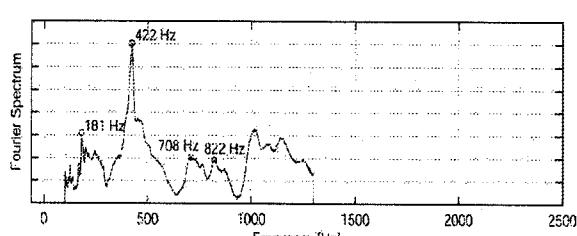
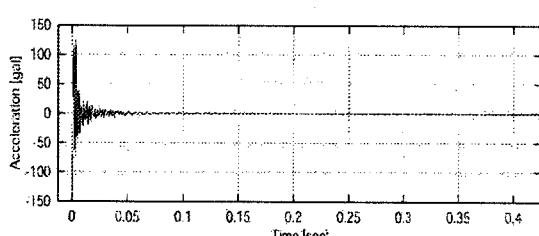


図-9 ピックアップ位置 P3 の加速度応答とフーリエスペクトル

表一2 実橋連結部近傍の曲げ打撃試験における固有振動数と減衰定数

次 数	固有振動数 (Hz)		
	P1	P2	P3
1 次	178	193	181
2 次	289	339	422
3 次	568	559	708
4 次	640	679	822
減衰定数			
1 次	4.427×10^{-2}	4.784×10^{-2}	2.640×10^{-2}

図一7～図一9の加速度応答波形および表一2の減衰定数を見ると、ピックアップ位置P1とP2は同じような減衰性能を持ち、ピックアップ位置P3は他の2つとは異なる減衰性能を持つことがわかる。また、ピックアップ位置P1とP2の1次～4次の固有振動数はほぼ一致しているが、ピックアップ位置P3の固有振動数は他の2つとは傾向が異なっている。

これらのことより、実橋連結部の影響はピックアップ位置P2、すなわち、連結部中央部から接合部方向へ1400mm付近まで及んでいることが明らかとなった。

5. GAと衝撃応答解析を用いた動的バネ定数の推定法

GAは、最適化、適応、学習のための方法論として、1985年以降注目され始め、工学分野だけでなく、多方面にわたり応用されるようになってきている。自然界では、子供を産むことや遺伝子の突然変異などで、より環境に適応した生物が生き残る。このような「適応、淘汰の繰り返しにより、より環境に適応した遺伝子が残っていく」という考え方をモデル化したものがGAであり、広い探索領域において最適解または準最適解を求めるために非常に有効であると考えられている。

本論文では、この「広い探索領域において最適解または準最適解を求めるために非常に有効である」というGAの特徴を利用して、GAを連結部の動的バネ定数の推定に用いる。具体的なGAの適用方法として、室内曲げ打撃試験体を取り上げると、連結部にバネ要素を用いた試験体モデルを作成し、減衰定数およびバネ要素のせん断バネ定数、回転バネ定数を遺伝子列として持つ個体群を考える。そして、固有振動数と加速度応答波形について、実測値と解析値の誤差が最小となるように、以下に示す目的関数(OBJ)を用いて適応度を評価する。

$$OBJ_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{(f_E(i) - f_A(i))^2}{f_A(i)^2}}}{N}$$

$$OBJ_2 = \frac{\frac{(a_E - a_A)^2}{(a_E)^2} + \frac{(b_E - b_A)^2}{(b_E)^2}}{2}$$

$$OBJ = \frac{OBJ_1 + OBJ_2}{2}$$

ここで、 $f_E(i)$ は曲げ打撃試験より得られた*i*次の固有振動数であり、 $f_A(i)$ は固有振動解析より得られた*i*次の固有振動数である。また、 a_E 、 b_E は曲げ打撃試験より得られた加速度応答波形の包絡線近似関数の係数であり、 a_A 、 b_A は衝撃応答解析より得られた加速度応答波形の包絡線近似関数の係数である。

なお、実橋連結部のバネ定数を推定する場合は、衝撃応答解析のための解析モデルがわかつてない。従って、バネ要素のバネ定数の他にモデル長や両端の境界条件が遺伝子列として加わることとなり、モデル長の結果から実橋連結部近傍の影響範囲も推定することが可能となる。

6. 室内連結部の動的剛性評価

ボルトタイプの連結部を有する試験体およびドリフトタイプの連結部を有する試験体の、室内曲げ打撃試験結果を本手法へ適用し、連結部方法の違いによる動的バネ定数の違いを明らかにする。

解析に用いた要素分割図を図-10に、解析緒元を表-3に示す。図-10中の△印はピン支承を表す。ここで、ピン支承としたのは、文献5)と同様に、試験体を吊っている位置で支承が生じていると考えたためである。

なお、表-3中の動的ヤング係数 E_d は、文献5)に従い、連結部の無い試験体の曲げ打撃試験より得られた1次固有振動数(227Hz)を、次式に代入して算出した。

$$E_d = \frac{(2\pi f_1)^2 I^4 \rho A}{\lambda_1^4 I}$$

ここで、 f_1 は連結部の無い試験体の曲げ打撃試験より得られた1次固有振動数を、 I は曲げ打撃試験体の長さを表している。 λ_1 は両端自由梁では4.73となる。

次に、本手法により推定されたバネ定数をまとめると、表-4のようになる。

表-4 動的バネ定数推定結果

連結方法	$K_z(N/mm)$	$K_{\theta y}(N \cdot mm/rad)$
ボルトタイプ	6.550×10^3	3.063×10^{10}
ドリフトタイプ	5.106×10^3	1.703×10^{10}

これらの結果より、せん断バネ定数 K_z については、固有振動数の結果より考察されたとおり、ボルトタイプの連結部を有する試験体の方がドリフトタイプの連結部を有する試験体よりも剛性が高くなつた。回転バネ定数 $K_{\theta y}$ については、文献5), 文献8)に示されているように、剛結に近い状態となつていると考えられる。

また、固有振動数および減衰定数について整理した表-5より、本手法によって推定されたバネ定数を用いて算出された固有振動数は、室内試験結果とほぼ同様の値となり、減衰定数に関しては、両試験体ともに、室内試験結果に比べて小さく算出された。

表-5 室内打撃試験結果と解析結果の固有振動数(Hz)と減衰定数の比較

ボルトタイプ連結部					
	1 次	2 次	3 次	4 次	減衰定数
試験結果	116	201	—	—	1.202×10^{-2}
解析結果	131	194	601	678	1.871×10^{-3}
ドリフトタイプ連結部					
	1 次	2 次	3 次	4 次	減衰定数
試験結果	107	178	—	—	1.535×10^{-2}
解析結果	117	176	598	658	0.933×10^{-3}

7. 実橋連結部の動的剛性評価

実橋連結部の曲げ打撃試験より得られたピックアップ位置P1の試験結果を本手法に適用して、実橋連結部の動的剛性評価を行う。ここで、実橋連結部の曲げ打撃試験結果より、実橋連結部は、その影響範囲を持つことが明らかになった。そこで、解析モデルのモデル長を「モデル長可変域」として遺伝子情報に加え、実橋連結部の影響範囲の推定も同時に進行。また、解析モデルがアーチ部材の一部となるため、左右端の境界条件を明確に設定して解析を行うことが出来ないため、左右端の境界条件も遺伝子情報として設定することとした。

解析に用いた解析モデルを図-11に、実橋における連結部とモデル長可変域の関係を図-12に示す。

また、解析緒元を表-6に示す。ここで、動的ヤング係数は、連結部の無い室内曲げ打撃試験の1次固有振動数を用いて算出した値⁵⁾を使用している。

これらの解析条件を適用して行った、GAを用いた実橋連結部の動的剛性評価における設計変数の解析結果を表-7に、固有振動数と減衰定数の結果を表-8に示す。

表-7 実橋連結部剛性評価における設計変数の結果

設計変数	推定結果
$K_z(N/mm)$	1.403×10^4
$K_{\theta y}(N \cdot mm/rad)$	3.436×10^{10}
連結部中央からのモデル長 (mm)	1650mm
右端境界条件	x, z 方向拘束
左端境界条件	x, z, θ 方向拘束

表-8 実橋連結部打撃試験結果と解析結果の固有振動数 (Hz) と減衰定数の比較

	固有振動数				減衰定数
	1 次	2 次	3 次	4 次	
試験結果 P1	178	289	568	640	4.427×10^{-2}
解析結果	169	313	541	706	2.129×10^{-2}

バネ定数の推定結果を見ると、せん断バネ定数については室内曲げ打撃試験結果より推定されたバネ定数よりも大きな剛性となつたが、回転バネ定数については、室内曲げ打撃試験結果より推定された結果と同様に剛結に近い状態となつた。

また、実橋連結部の影響範囲であるモデル長可変域の推定結果を見ると、連結部中央から1650mmと、実橋打撃試験結果より若干長めの結果となつたが、傾向的には良い結果が推定されて



図-11 実橋曲げ打撃試験要素分割図

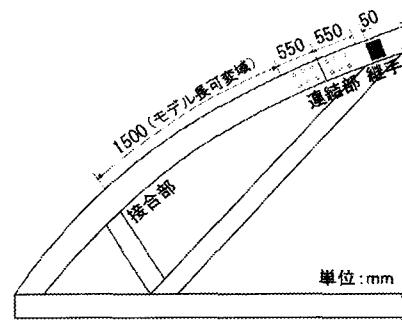


図-12 実橋連結部モデル長可変域

表-6 実橋曲げ打撃試験解析緒元

断面積 $A(mm^2)$	9.900×10^4
断面2次モーメント $I(mm^4)$	1.670×10^9
動的ヤング係数 $E_d(N/mm^2)$	6.994×10^3
単位体積質量 $\rho(kg/mm^3)$	5.612×10^{-10}

いると考えられる。

固有振動数の推定結果は、実橋連結部のピックアップ位置P1の結果とほぼ一致する結果を得ることが出来たが、減衰定数の推定結果を見ると、試験結果よりも若干小さめの減衰性能を有するという結果となった。

8. 結論

本論文では、連結部を有する集成材梁を用いて、ボルトの締め付け力を変化させた室内曲げ打撃試験を行うとともに、実橋連結部近傍の局部曲げ打撃試験を実施し、得られた実測固有振動数および加速度応答波形に数値解析結果が一致するように、GAを用いて減衰定数や動的バネ定数などを推定する方法を提案した。

本論文で提案した推定法を室内曲げ打撃試験結果へ適用したところ、集成材連結部の動的剛性評価法として十分有効であることがわかった。しかし、減衰定数の推定結果は、試験結果よりも小さめの減衰性能を示した。

また、解析モデル長、境界条件を遺伝子として加え、現場局部曲げ打撃試験結果へ本手法を適用したところ、今回対象とした実橋連結部の動的剛性および影響範囲を推定することが可能であることがわかった。しかし、こちらの減衰定数についても、室内曲げ打撃試験結果同様、小さめの減衰性能を示す結果となり、今後の検討課題と考え、本手法のさらなる改善を目指したい。

今後、他の形式の連結部や実橋での3次元的な打撃試験を行い、それらの試験結果にGAを用いた本手法を適用し、さらなる検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 横川和人、福田裕、今野和近、木造橋に用いた継手システムの実験的研究、構造工学論文集、Vol.37A, pp.1075-1082, 1991
- 2) 佐々木直也、坪田張二、丸山則義、小林創、大断面集成材とケーブルによるハイブリッド・ドーム構造の開発（その3）一大断面集成材接合部の曲げ載荷実験一、鹿島技術研究年報、第39号、pp.103-106, 1991
- 3) 薄木征三、小松幸平、鍵和田功、佐々木貴信、集成材アーチリブのΠ形挿入鋼板を用いたドリフトピン接合、構造工学論文集、Vol.41A, pp.915-922, 1995
- 4) 出戸秀明、五郎丸英博、岩崎正二、宮本裕、土田貴之、集成材を用いたアーチ形式歩道橋の振動実測と解析、構造工学論文集、Vol.40A, pp.1321-1330, 1994
- 5) 出戸秀明、五郎丸英博、岩崎正二、宮本裕、山口隆之、集成材木歩道橋の連結部の実大局部実験と解析、構造工学論文集、Vol.41A, pp.923-933, 1995
- 6) 林川俊郎、須志田健、小幡卓司、佐藤浩一、GAを用いた木造アーチ形式歩道橋の構造同定に関する研究、構造工学論文集、Vol.44A, pp.1211-1218, 1998
- 7) 山本亮、岩崎正二、出戸秀明、五郎丸英博、宮本裕、集成材連結部の衝撃応答解析に基づく動的剛性評価について、木橋技術に関するシンポジウム論文集、pp.49-54, 2001
- 8) 山本亮、岩崎正二、出戸秀明、五郎丸英博、宮本裕、GAを用いた集成材連結部の動的剛性評価、構造工学論文集、Vol.49A, pp.881-888, 2003