

# 重ね梁による小規模木造人道橋の振動実験

大江健介<sup>1</sup>・古川忠稔<sup>2</sup>・井上理恵子<sup>3</sup>・今井克彦<sup>4</sup>

<sup>1</sup>大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 博士前期課程  
(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail:kensuke@ga.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>2</sup>大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 学内講師

E-mail:furukawa@ga.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>3</sup>大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 博士前期課程

E-mail:rieiko@ga.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>4</sup>大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授

E-mail:karl@ga.eng.osaka-u.ac.jp

現在、日本の森林の多くは経済的理由により十分に間伐が行われておらず、森林荒廃が問題化している。著者らは、国産木材有効利用の観点から市場価値の低い普通材を用い、特殊ラグスクリューとジベルにより角材を接合する重ね梁の開発を行っている。本論文では、まず著者らが開発した重ね梁の概要を示し、本重ね梁を桁材に適用した小規模人道橋の加振実験の概要とその結果について報告する。加振実験は桁材完成時と橋板、手摺取り付け後の二回実施し、各々スイープ加振実験と正弦波加振による定常加振実験、自由振動実験を行った。そして上記実験結果の解析を通じて、ラグスクリューとジベルによる重ね梁接合効果の検証結果や、減衰性能や全体剛性に及ぼす構造材と非構造材の影響についても報告する。

*Key Words : Free Vibration Test, Excitation Test, Damping Factor, Layered Beam, Timber Structure*

## 1. はじめに

我が国は国土の約67%が森林に覆われており、そのうち約4割が人工林である。人工林では維持管理の為に定期的な間伐が不可欠であるが、間伐対象となる小中径木需要の減少、人件費高騰などの理由から間伐が十分に実施されていないか、あるいは間伐がなされても間伐材が森林内に放置されている為、森林荒廃が進んでいる。また、我が国の森林蓄積量は近年増加傾向にあるが国産材供給量は年々減少し、昭和35年には87%であった木材自給率が現在では20%を下回っている。更に、木材価格の低迷に伴って林業就業者は減少し続けており、健全な林業経営が行われているとは言い難い。これら森林荒廃や木材自給率の低下、林業就業者雇用の問題は、国土保全及び健全な森林経営上から解決が強く求められている。

この問題に対し、著者らは市場価値が低い普通材を構造材として用いることで高付加価値化する視点から解決法を見出そうと考え、普通材の高付加価値化の一手法として重ね梁の開発を行っている。<sup>1)2)</sup>

著者らが開発した重ね梁は集成材のように高級材を用いる必要がなく、低価格の普通材を利用することができる。また、製作にあたり高度な技術や設備が不要である為、製材作業所や建設現場で製作が可能であり、雇用確保の手段として有効であると考えられる。

本論文では、まず著者らが開発した重ね梁の概要を示した後、この重ね梁システムを用いて施工された小規模人道橋の概要を示す。次に、施工された小規模人道橋を実験対象とし、重ね梁システムの性能確認の為に実施された振動実験結果について報告する。

振動実験目的は、

- 1) 本システムによる重ね梁一体化効果の確認
- 2) 全体剛性や減衰特性に及ぼす構造材と非構造材の影響の検討
- 3) 振幅依存性を含む橋梁全体系としての動特性の確認

の3点であり、これらの確認の為、スイープ加振実験及び定常加振実験、自由振動実験を実施した。

## 2. 重ね梁の概要

著者らが開発した重ね梁の概要を図-1 に示す。本重ね梁は普通材を加工した角材を、図-1 に示す特殊形状のラグスクリューとジベルにより機械的に接合することで一体化している。尚、角材は図に示すフィンガージョイントにより長手方向に延長することができる。

図に示すように、ラグスクリューは積層される最下段角材の挿入部位のみがねじ切り加工されていて、ねじ部とスクリュー頭部の支圧により角材積層方向（図では上下方向）に圧縮力を与え、角材全体とジベルを一体化する。ラグスクリュー打込み位置は角材に予め下穴加工が施されており、打込み後はラグスクリュー頭部も木部に完全に埋没し、当て板等で金属部分の目隠しが可能である。また併用されるジベルも著者らが開発したもので、後述する締め付け治具により木部に圧入される圧入型のものであり、ジベル挿入位置は特に事前加工は要しない。

製作方法としては、まず最下段の角材の所定位置に節を避けるようジベルを配置し、その後、順次上段の角材を下段角材に上載し、同様にジベルを配置する。次に図-2 に示すように、ボルトを軽く締め付けることで幅方向のずれを調節する。ずれ調節後に締め付け治具を設置し、図-3 に示す油圧ジャッキ等を用いジベルを角材に圧入する。角材間の隙間がなくなり、ジベルが完全に圧入されたことを確認してから、ラグスクリューを打込み全体を一体化する。

尚、大断面重ね梁など材間せん断力が大きくなる場合は、部分的あるいは全長に渡って接着剤を併用することも可能である。この場合、気泡混入による接着力低下を防ぐ為、接着面に包帯を敷き、包帯に接着剤を浸透後、接着剤を用いない場合と同様にジベルを圧入し、ラグスクリューで固定する。

更に、本工法では油圧ジャッキ等により角材を強制変形させた後ジベルを圧入し、ラグスクリューを打込むことで曲線形状の重ね梁製作が可能であることも確認されている。



図-2 製作状況（ずれを調節）  
フィンガージョイント部分を赤で示す



図-3 製作状況（油圧ジャッキによりジベルを圧入）

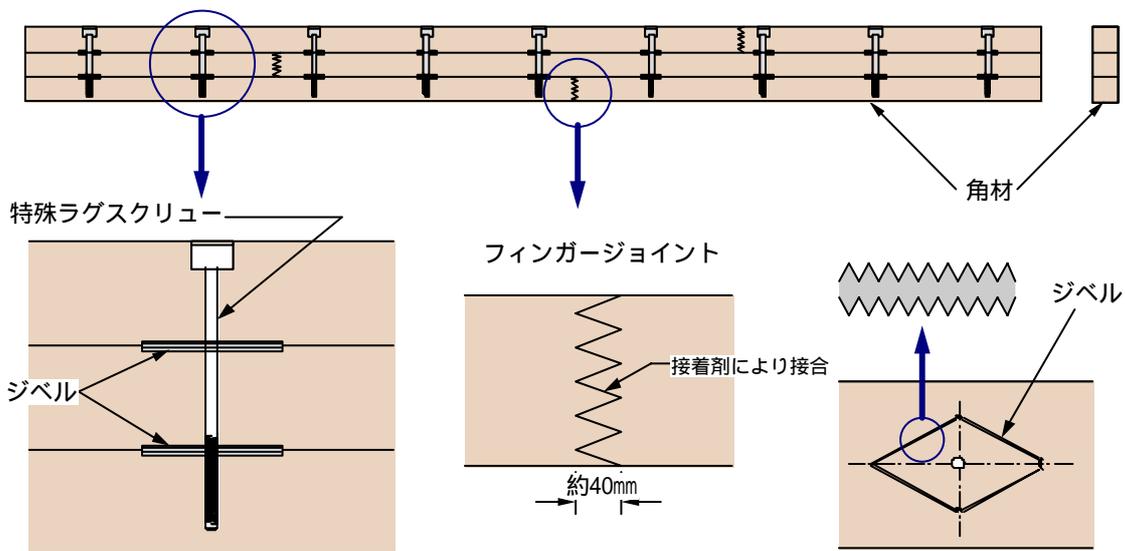


図-1 重ね梁概要

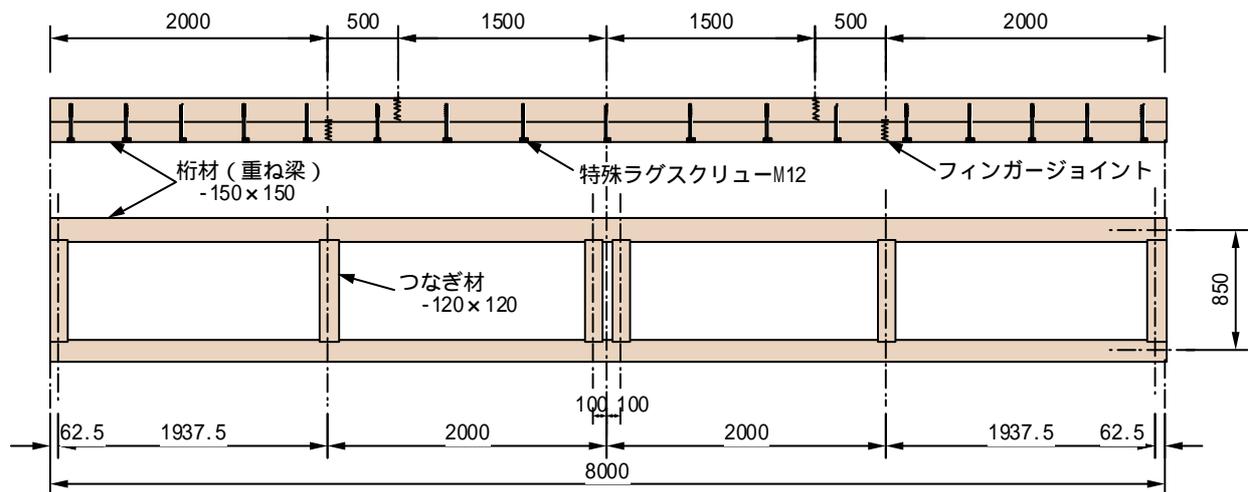


図-4 構造材骨組図



図-5 桁材完成時の試験対象構造物



図-6 支持部分周辺

### 3. 試験対象小規模人道橋

試験対象は、兵庫県立三木山森林公園内に建設されたスパン 8m の小規模木造人道橋である。本橋は、図-4、図-5 に示す通り二本の直線主桁をもつ単純桁橋となっており、桁材とつなぎ材で構成されていて、前述の重ね梁は、主桁材のみ（150mm×150mm の角材を二段重ね）に採用されている。木材はいずれも兵庫県産の桧材が用いられ、フィンガージョイントは図-4 に示す位置に採用されている。また、橋桁は図-6 に示すように、両端部で L 型の鉄板とボルトによりコンクリート基礎部分に固定されている。

試験対象の人道橋は前項に示した手順で、下穴加工以外の総ての工程を市民参加ワークショップにより行った。その結果、重ね梁の製作が熟練技術に依存せず、1 日程度の短時間で可能なことが確認された。しかし、橋梁架設地点で梁の積層を行ったことや、施工時点で用いたジベル形状に起因するジベル圧入の不良が若干あり、重ね梁間に最大 1mm 程度の間隙が生じている。尚、この問題については後日ジベル形状を改良することにより解決がなされている旨を付記する。床板・手摺取付後（2 次部材がある時）の試験対象構造物概形を図-7 に示す。



図-7 床板・手摺取付後の試験対象構造物

### 4. 実験概要

振動実験は本システムによる重ね梁一体化効果の検証や、非構造材が構造体全体の剛性や減衰特性に与える影響などを把握する為に、桁材完成時と床板・手摺取付後の両時点で、スイープ加振実験及び定常加振実験、自由振動実験を実施した。

加振はリニアモーター型加振機（1基あたり最大推力430N、質量60kg、図-8参照）2基をスパン中央下面に取り付け、可動部推力により構造物に2基同位相の正弦波を入力して振動を励起した。尚、加振



図-8 リニアモーター型加振機

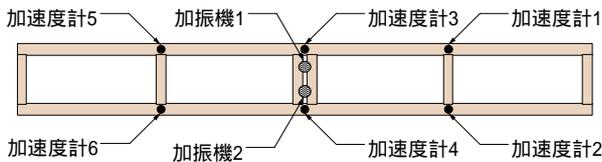


図-9 加速度計・加振機取り付け位置

方向は各実験とも鉛直方向のみとした。構造物応答は加速度計（東京測器研究所製ARJ-100A-T）により鉛直方向加速度を計測し、多チャンネルデジタル動ひずみ測定器（東京測器研究所製DSW-30A）を介してPCに計測データを収録した。加速度計の取り付け位置及び加振点を図-9に示す。

実験手順としては、まずスイープ加振を行い共振点をおおまかに把握した後、共振点付近の応答を定常加振実験により詳細に計測した。また、自由振動実験は、構造物を共振周波数で加振した後に加振機を急停止することにより行った。

計測条件は、スイープ加振実験ではサンプリング周波数500Hzで100秒間の計測、定常加振実験ではサンプリング周波数1000Hzで15秒間の計測とした。また、自由振動実験ではサンプリング周波数1000Hzで30秒間の計測とした。

## 5. 実験データの処理

### (1) スイープ加振実験

スイープ加振実験により得られた加速度時刻歴データをフーリエ変換してフーリエ振幅スペクトルを描き、得られた振幅スペクトルピーク近傍に理論的な1自由度の共振曲線の相似形を最小二乗近似させて減衰定数及び減衰固有振動数を算定した。尚、加速度データはスパン中央部に設置した加速度計3及び4のデータを採用した。加速度計3のデータから推定された共振曲線の一例を図-10及び図-11に示す。

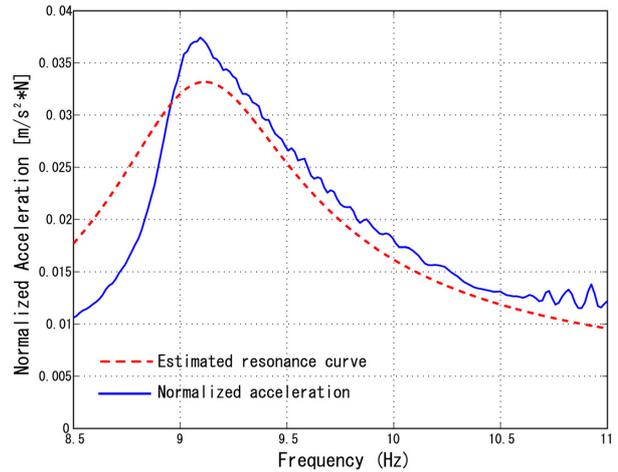


図-10 共振曲線の一例 スイープ加振実験  
(2次部材無し、1次モード)

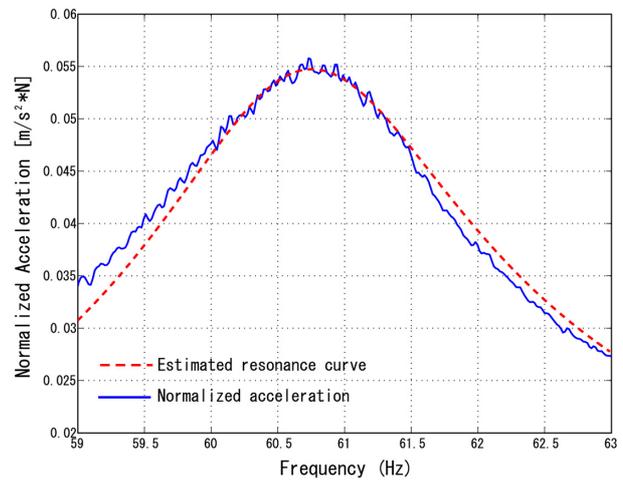


図-11 共振曲線の一例 スイープ加振実験  
(2次部材無し、3次モード)

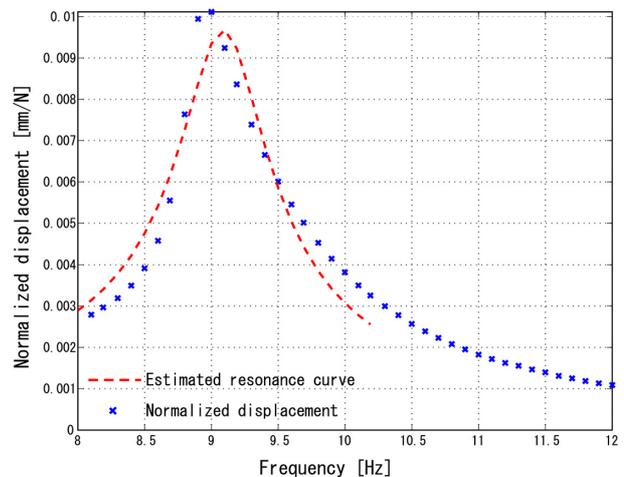


図-12 共振曲線の一例 定常加振実験  
(2次部材無し、1次モード)

(2) 定常加振実験

定常加振実験により得られた加速度時刻歴データを積分して変位時刻歴を求め、変位振幅最大値を加振力最大値で正規化したものを各周波数毎にプロットし共振曲線を描いた。次に、その共振曲線のピーク近傍に理論的な1自由度共振曲線の相似形を最小二乗近似させて減衰定数及び減衰固有振動数を算定した。尚、加速度データはスパン中央部に設置した加速度計3及び4のデータを採用した。加速度計3のデータから推定された共振曲線の一例を図-12及び図-13に示す。

(3) 自由振動実験

自由振動実験により得られた加速度時刻歴データを1次モードについては1~100Hz、3次モードについては30~100Hzの範囲でバンドパスフィルタ処理を行い、自由振動時刻歴波形を抽出した。そして、この自由振動波形の正側波形のゼロクロス間の最大値に対数減衰曲線を最小二乗近似させ減衰定数を算定した。尚、減衰固有周期は振動波形のゼロクロス間隔の平均値とした。加速度計3及び4のデータから推定された自由振動波形と対数減衰曲線の一例を図-14に示す。

6 . 実験結果のまとめ及び考察

前項で述べた手法により推定された減衰固有振動数及び減衰定数を表-1に示す。この時、共振点における各測定点での加速度比と変位の比が等しいことから、実験から得られた共振点での加速度データを時刻毎にプロットすることでモード形状を確認し、これに基づき各応答ピークのモード次数を決定した。

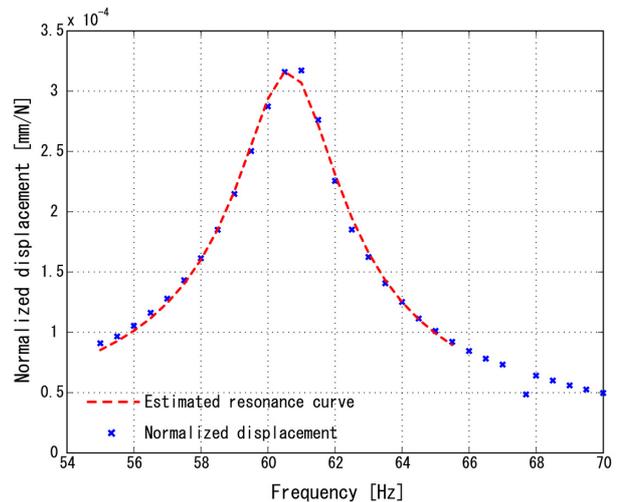


図-13 共振曲線の一例 定常加振実験 (2次部材無し、3次モード)

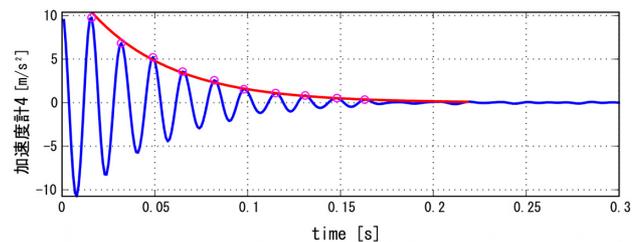
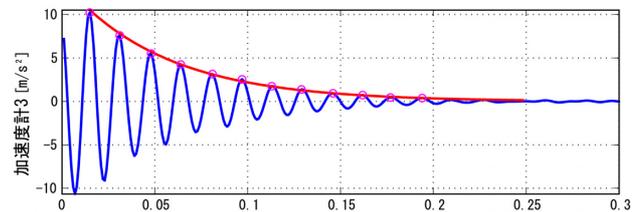


図-14 自由振動波形と対数減衰曲線の一例 (2次部材無し、1次モード)

表-1 推定結果一覧

実験	2次部材無			2次部材有		
	減衰固有振動数[Hz]	減衰定数[%]	入力[N]	減衰固有振動数[Hz]	減衰定数[%]	入力[N]
スイープ加振実験	9.43	2.49	39			
	9.18	3.85	78	11.0	11.9	196
	9.10	4.10	118			
	8.98	4.46	157	10.9	11.4	196
	60.9	2.19	157	59.7	5.67	196
定常加振実験	9.11	3.67	157	11.4	8.89	157
	60.7	2.47	157	58.8	6.91	157
自由振動実験	9.50	4.59	78	12.6	7.06	98
	9.30	4.40	78			
	9.39	4.51	157	12.5	6.60	98
	9.32	4.58	157			
	62.5	5.41	157	12.6	7.24	196
	62.0	5.28	157			
	61.1	4.90	314	12.5	7.18	196
61.3	5.17	314				

※網掛けが3次モード、その他が1次モードの推定値を表す

実験及び解析から得られた1次モード形状を図-15に、同3次モード形状を図-16に示す。

表-1より、本構造の1次モード減衰固有振動数は2次部材が無い場合で9Hz程度、2次部材がある場合で12Hz程度であり、3次モードの減衰固有振動数は2次部材の有無に係わらず、概ね60Hz程度であると推定された。また実験から推定された各次モードの固有振動数は実験手法に依存せずほぼ一定値となることが確認できた。

これに対し、減衰定数は実験手法によって推定結果にばらつきが生じたものの、全体的傾向としては概ね2次部材がある場合の方が大きくなる傾向が見られた。尚、1次モードの減衰定数は、2次部材が無い場合で2.5～5%程度、2次部材がある場合で7～9%程度であると推定された。

### (1) 重ね梁一体化効果の確認

重ね梁一体化効果の確認は、重ね梁が完全に剛接されて一体化しているとみなし、一本の等価な角材と仮定して求めた解析的な固有振動数と、2次部材が無い場合の実験で得られた固有振動数を比較することで行った。解析には汎用有限要素法解析ソフトANSYSを用い、本構造物の支持条件が明確でない為、単純梁の支持条件及び両端ピン支持と仮定し解析を行った。尚、解析に用いたヤング係数と密度は参考文献<sup>3),4)</sup>に準拠し、ヤング係数は8.82[GPa]、密度は実験当日の気候等を考慮して含水率が約20%であると仮定して460[kg/m<sup>3</sup>]とした。また、解析対象領域を一辺5cmの正六面体ソリッド要素に分割して解析し、加振機の質量は桁材中央部に、つなぎ材の質量は各々の位置に付加質量の形で考慮した。その結果、単純梁の支持条件で1次、3次モードの固有振動数はそれぞれ6.89Hz、63.9Hzとなり、両端ピン支持の条件で1次、3次モードの固有振動数はそれぞれ10.4Hz、72.5Hzであった。これに対し実験結果から求められた1次、3次モードの固有振動数はそれぞれ9.2Hz、61Hz前後となった。

ここで、桧材のヤング係数にばらつきがあることが報告されていることから<sup>5)</sup>、ヤング係数が7.0[GPa]であるとして同様の解析を行うと、両端ピン支持の条件で1次モードの固有振動数は9.28Hz、3次モードは64.6Hzとなり、実験から得られた値と近い値となった。

以上の検討から、構造物の支持条件は概ね両端ピン支持であると考えられる。よって、本構造の桁材のヤング係数が普通構造材の基準値よりも低い可能性があるが、重ね梁はほぼ一体化された挙動を示していると考えられる。ただし、より詳細で信頼性の高い検討を行う為には、ジベルの本数やピッチを変数として、境界条件や材料条件をより明確にした形での追加実験や桧材の静的な曲げ試験、更には重ね梁と同一断面を有する単一材との比較検討が今後必

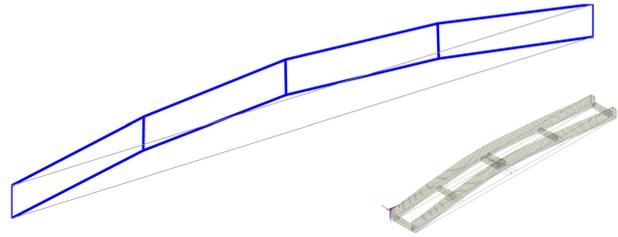


図-15 1次モード形状  
(右下は解析により得られた1次モード形状)  
(482KB AVI画像アニメは[ここをクリック](#))

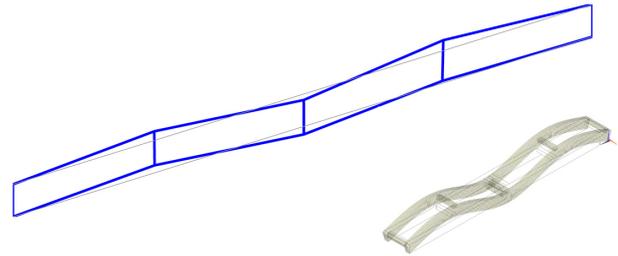


図-16 3次モード形状  
(右下は解析により得られた3次モード形状)  
(502KB AVI画像アニメは[ここをクリック](#))  
応答の大きさは実際のものとは異なる

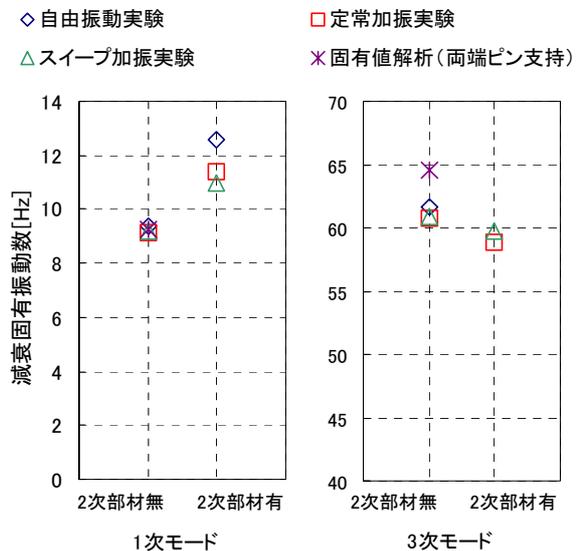


図-17 減衰固有振動数分布

要であると結論づけられる。

### (2) 全体剛性や減衰特性に及ぼす構造材と非構造材の影響

図-17に2次部材がある場合と無い場合での、1次モード、3次モード減衰固有振動数の変化を示す。1次モードの固有振動数は、2次部材がある場合の方

が2次部材が無い場合よりも3割程度大きい値となった。これは床板及び手摺を設けたことで、構造物の自重増大と、2次部材を設けたことによる曲げ剛性の増加の両者のうち、剛性増加の影響がより顕著だったことが原因と考えられるが、3次モードでは顕著な固有振動数の変化が生じておらず、詳細は今後の検討課題である。

次に、実験結果から推定した減衰定数の分布を図-18に示す。推定した減衰定数が実験の種類によりばらつくのは、解析時に共振曲線のフィッティングの精度があまりよくなかったことが考えられる。今回の解析では減衰効果は粘性減衰により代表させて考えているが、実際には履歴減衰等が生じている可能性も考えられる。また、2次部材がある場合の減衰定数の方が、2次部材が無い場合の減衰定数よりも大きくなる傾向が見られた。この現象は特に1次モードにおいて顕著であり、減衰メカニズムに依存しているものと考えられる。ただし、各次モードとも2次部材取り付けにより減衰定数が増加していることから、基本的には接合部分での摩擦により減衰が大きくなっていると考えられる。尚、本構造物では、高次モードの減衰定数の方が大きくなるといった傾向は特に見られなかった。

### (3) 固有周期や減衰定数の振幅依存性

2次部材無しの場合の時点における1次モード周辺でのスイープ加振実験は、動特性の振幅依存性を考察するために入力レベルをパラメータとし、複数回実施した。この結果より得られた固有周期と減衰定数の変化を図-19に示す。図より、入力加振力が大きくなるほど減衰固有振動数は小さく、減衰定数は大きくなるといった振幅依存性が現れている。加振力の増大とそれに伴う応答振幅の増大が、固有振動数の低下と減衰定数の増加をもたらすことから、この現象は実験対象橋梁の上下方向変位に対する復元力特性が、軟化型の履歴を伴う形状であることを示唆しているとも考えられる。ただし、この復元力特性が木材自体の復元力特性に起因するものか、あるいはジベルのスリップに起因するものかを明らかにするには、今後の検討が必要であると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたって大阪大学本保忠司実験助手には多大な御助力を賜りました。

また、実験の際には兵庫県立三木山森林公園の職員の皆様に大変お世話になりました。

ここに厚く御礼申し上げます。

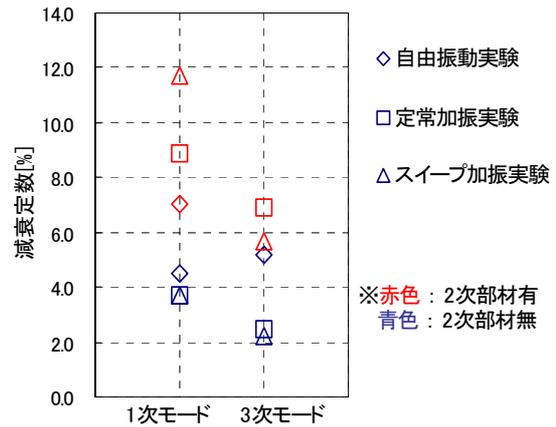


図-18 減衰定数分布

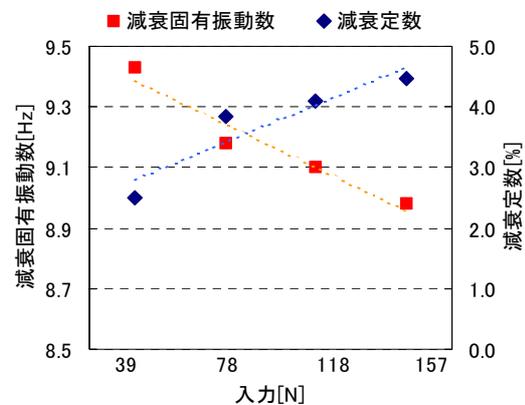


図-19 入力加振力と減衰固有周期及び減衰定数

### 参考文献

- 1) Imai, K., Furukawa, T., et. al.: Development of the KT-Wood Space Truss System with round timber as a new material, Spase Structrues 5 Vo.1, Thomas Telford, pp.155-160.
- 2) 今井克彦 他：重ね梁接合部のせん断耐力に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.513-516, 2003.
- 3) 日本建築学会：木質構造設計規準, 丸善, pp.167-168, 1996
- 4) 岡野健：木材のおはなし, 日本規格協会, pp.26-30, 1999
- 5) 今井克彦 他：小中径木の材料機械的特性とこれに基づくスペースフレームの開発に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp.447-480, 2003

(2003.6.30 受付)

## DYNAMIC LOADING TESTS OF A SMALL FOOTBRIDGE USING LAYERED BEAM AS STRUCTURAL MEMBER

Kensuke OE, Tadatoshi FURUKAWA, Rieko INOUE, Katsuhiko IMAI

A lot of forests in Japan fall into disrepair because of economic reason at the present day. Therefore, authors develop an innovative layered beam system, which consists of beams joined by particular lagscrews and dowels from the environmental viewpoint and for the efficient use of forest resources. In this paper, outline of the developed layered beam system, and the result of dynamic loading tests will be described. Steady excitation test, free vibration test and sweep excitation test were carried out.

Both the effect of connection using the lagscrews and the dowels and the effect of structural members and nonstructural members on damping capabilities and stiffness are evaluated by experimental approach.