

木製中路式アーチ車道橋の構造特性

Structural characteristics of half through arch timber highway bridge

○中田雄太* 本田秀行** 植野芳彦***

NAKADA Yuta, HONDA Hideyuki and UENO Yoshihiko

*金沢工業大学大学院 環境土木工学専攻(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇ヶ丘 7-1)

**工博 金沢工業大学 環境・建築学部 環境土木工学科(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇ヶ丘 7-1)

*** (株)長大 新事業開発室(〒103-0014 東京都中央区日本橋蛸殻町 1-20-4)

ABSTRACT The purpose of this study is to inspect the structure performance of half through arch timber highway bridge. The subjected bridge is Yusuvara Bridge constructed in Kochi prefecture on 2007. To investigate design factors, static and dynamic performance, vibration serviceability, rigidity of arch bridge and store of initial data for maintenance, the static and dynamic field tests of the subjected bridge were done with one dump truck in August 2007. The structural performance on static and dynamic behaviors were investigated in the terms such as deflection, response vibration, dynamic characteristics, dynamic increment factor and vibration serviceability. Furthermore, from the comparison of dynamic characteristics between the subjected bridge and 22 modern timber bridges measured by authors in the past in Japan, this study gives a valuable data to evaluate dynamic performance, dynamic characteristics and impact factor for modern timber highway bridges.

Keyword : 木製中路式アーチ車道橋, 構造特性, 近代木橋

half through arch timber highway bridge, structural characteristics, modern timber bridge

1. まえがき

近年、わが国における大断面構造用集成材を使用した木橋の建設技術はめざましい発展を遂げており、スパンの長大化と多形式化に向かっている。しかしながら、わが国の近代木橋の歴史は20年ほどで、欧米に比べて近代木橋の歴史が浅い。そのため、設計法や現場施工技術の信頼性を大幅に向上させるための研究開発が必要である。

現在、鋼橋やコンクリート系橋梁に対する維持管理上の諸問題の分析方法や将来の予測方法は急速に技術開発が進められている。しかし、近代木橋に関してはあまり議論が進んでいない。特に、長大化する近代木車道橋においては、木材の経年的な劣化も考えられるため、載荷試験や振動試験による健全度の評価法は必要不可欠である。また、完成直後の実橋における実験データは、将来の維持管理上の初期値として非常に貴重な情報になる。

本研究で対象とした檜原橋は、高知県に架設されている橋梁である。そして、集成木材橋梁ではわが国で最大規模を誇る木製中路式アーチ車道橋である。今後の長大スパン化における形式選定に供する設計資料として、本橋の静的および動的な観点から構造特性を明らかにすることの意義は極めて高い。このことから、本研究では、本橋を対象に、静的実験および動的実験を実施し、実験で得たデータ分析の結果と3次元構造解析結果の両面から本橋の構造特性に検討を加える。

2. 対象橋梁

本研究で対象とした檜原橋は、高知県高岡郡檜原町に町産の木材の有効活用、木材のPR、地域の活性化などを目的として架設された木製中路式アーチ車道橋である。対象橋梁の設計概要を表-1、全景写真を写真-1、一般図を図-1に示す。

表-1 設計概要

橋種	車道橋
形式	中路式アーチ橋
橋長	29.8m
アーチ支間長	28.0m
幅員	車道 5.0m 歩道 2.0m
設計活荷重	A活荷重
使用部材	主にスギ集成材

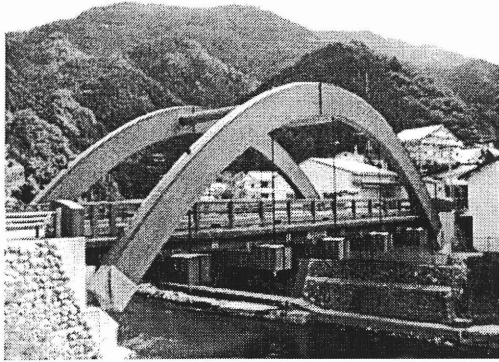


写真-1 対象橋梁の全景

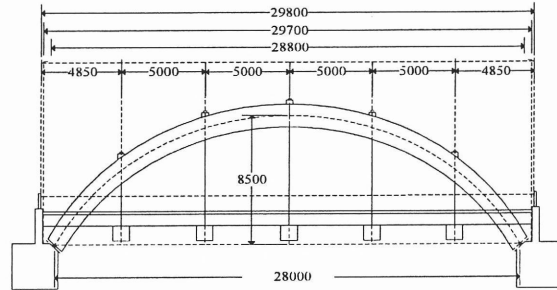


図-1 一般図

3. 実験概要

本実験では、静的試験の静的載荷試験、動的試験の常時微動測定試験、砂袋落下衝撃試験、試験車両走行試験、その他の実験として路面凹凸測定試験を行った。行った実験項目を表-2、実験時のセンサーの配置図を図-2に示す。図中の記号▲(S₁~S₉)はオートレベル計で橋梁の静的たわみを計測する測定点である。

●(A₁~A₇)はサーボ型振動速度計であり、橋梁の振動を計測する測定点である。■(D₁~D₂)はゲージ型リング式変位計で橋梁の振動たわみを計測する測定点である。なお、Vは鉛直方向、Hは水平方向を示す。

表-2 実験概要

静的実験	静的載荷試験
動的実験	常時微動測定試験
	砂袋落下衝撃試験
	試験車両走行試験
その他実験	路面凹凸測定試験

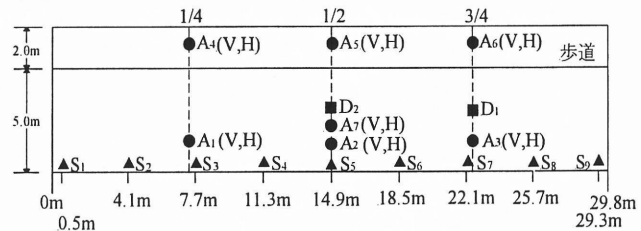


図-2 センサー配置図

3.1 静的試験

静的載荷試験では、約 20tf のダンプ車 1 台を載荷させ、鉛直たわみを 0.1mm 以下の精度で測定した。実験風景を写真-2に示す。

3.2 動的試験

常時微動測定試験では、橋梁に外力荷重としての加振源がない状態で、自然の微振動に対する橋梁の応答速度、応答加速度を測定した。砂袋落下衝撃試験では、約 30kg の砂袋を約 50cm の高さから落下させることにより、橋梁に純粹の鉛直曲げやねじれ加振を与え、その時の応答速度を測定した。試験車両走行試験では、試験車両を 1 台走行させた時の応答速度、応答加速度、

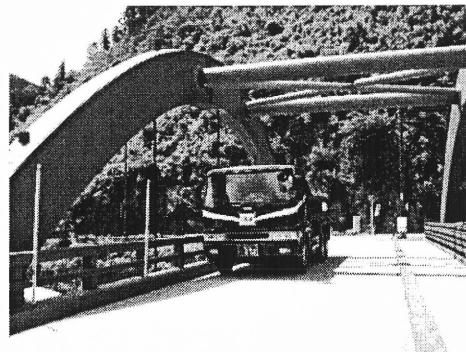


写真-2 静的載荷試験

応答変位を測定した。なお、本橋の架設場所の制約から、試験車両の速度は徐行、10km/h、20km/hである。写真-3、4に実験風景を示す。



写真-3 砂袋落下衝撃試験



写真-4 試験車両走行試験

4. 実験結果

4.1 静的特性

静的載荷試験での試験車両の載荷位置を図-3、各載荷ケースにおける実験たわみ値と解析たわみ値を図-4に示す。図中の●印はオートレベル計で測定された静的たわみ値であり、実線がそれらの値に対応する解析値である。解析は直交異方性格子構造として3次元に構造モデル化して、金沢工業大学計算機センター所有のMSC/NASTRANを用いて行った。

本実験で測定された正(鉛直の下方方向)の最大たわみ値を見ると、1/4 点に載荷した載荷ケース(ST.type3)の測定点 S_3 での 6.8mm である。

本実験で得られた静的たわみ値の一般的な事項として、例えばスパン 1/4 点に鉛直の正のたわみが生じた時、3/4 点では負のたわみが生じる基本的なアーチ形式の構造上の特性が見られ、橋軸方向の曲げ剛性が均等に分布していることが認められる。従って、本橋はアーチ部材等の部材接合部がうまく施工されており、アーチ形式の骨組み構造になっていることが判断された。また、これらの静的たわみ図から、実験値と解析値の両者に若干の誤差はあるが、形状はよく一致している。このことから、本橋の有する実際の剛性と解析モデルでの剛性は整合性があるものと判断された。

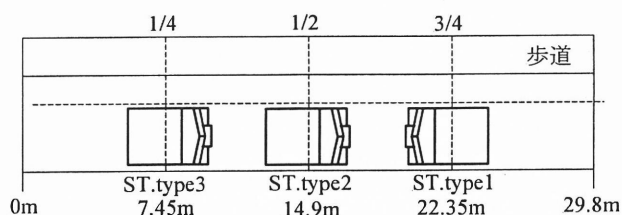


図-3 車両載荷位置

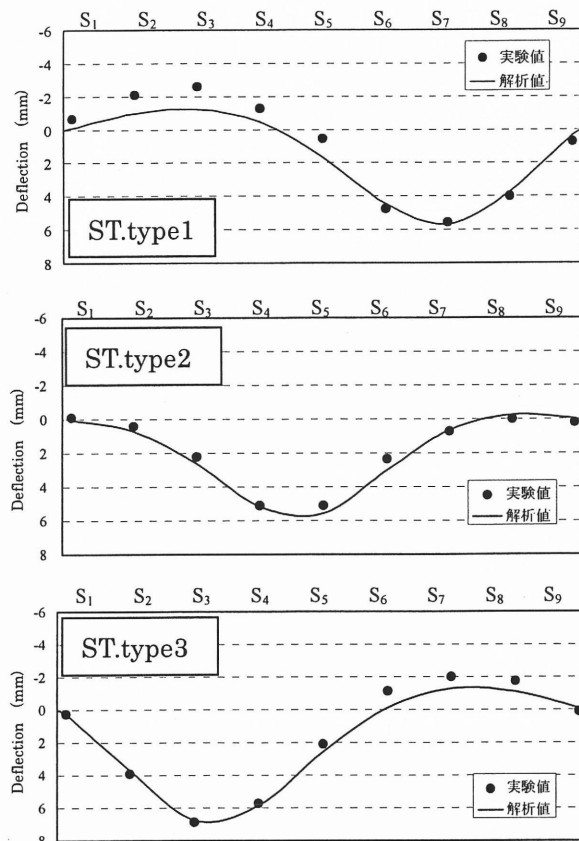


図-4 載荷ケースによる静的たわみ一例

4.2 振動挙動

図-5 に常時微動測定試験における応答速度の一例を、図-6 に砂袋落下衝撃試験における応答速度の一例を示す。試験車両の走行経路を図-7 に示す。そして、試験車両走行試験(走行ケース 1 走行速度 20km/h)の各測定点で得られた応答速度波形を図-8, 応答加速度波形を図-9, 応答振動変位波形を図-10 に示す。

実験で得られた最大応答速度は20km/h(走行ケース 1)での2.90cm/s, 最大応答加速度は同走行ケースの 94.31cm/s^2 である。図-2, 7より試験車両は $A_3 \cdot A_6, A_2 \cdot A_5, A_1 \cdot A_4$ の順に通過する。図-8, 9の波形より, $A_1 \cdot A_4$ (1/4点)と $A_3 \cdot A_6$ (3/4点)の測定点が $A_2 \cdot A_5$ (1/2点)と比較して最大値が大きい値を示している。これは、試験車両が走行中のパワースペクトルから、本橋の基本固有振動数(鉛直曲げ逆対称1次)である4.79Hzが顕著に見られることで、アーチ橋としての構造特性が明確に確認された。また、図-10の測定点 D_1, D_2 での振動変位波形より、測定点 D_1 では、車両が橋台A側から走行した時に D_1 が下方方向に変形して明瞭な正の振動変位が生じ、車両が橋梁中央部から橋台B側に移動した時に D_1 は上方方向に変形して負の振動変位が生じ、アーチ橋の構造特性が検証された。

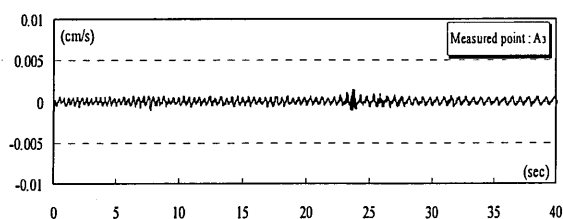


図-5 常時微動測定試験における応答速度波形

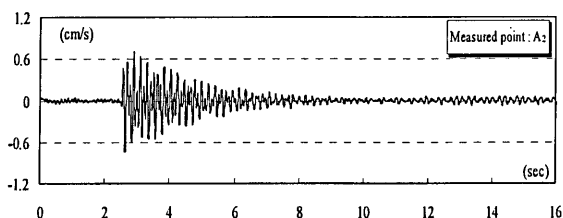


図-6 砂袋落下衝撃試験における応答速度波形

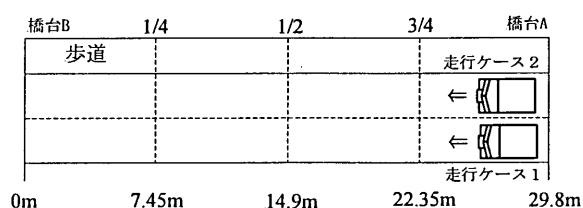


図-7 試験車両の走行経路

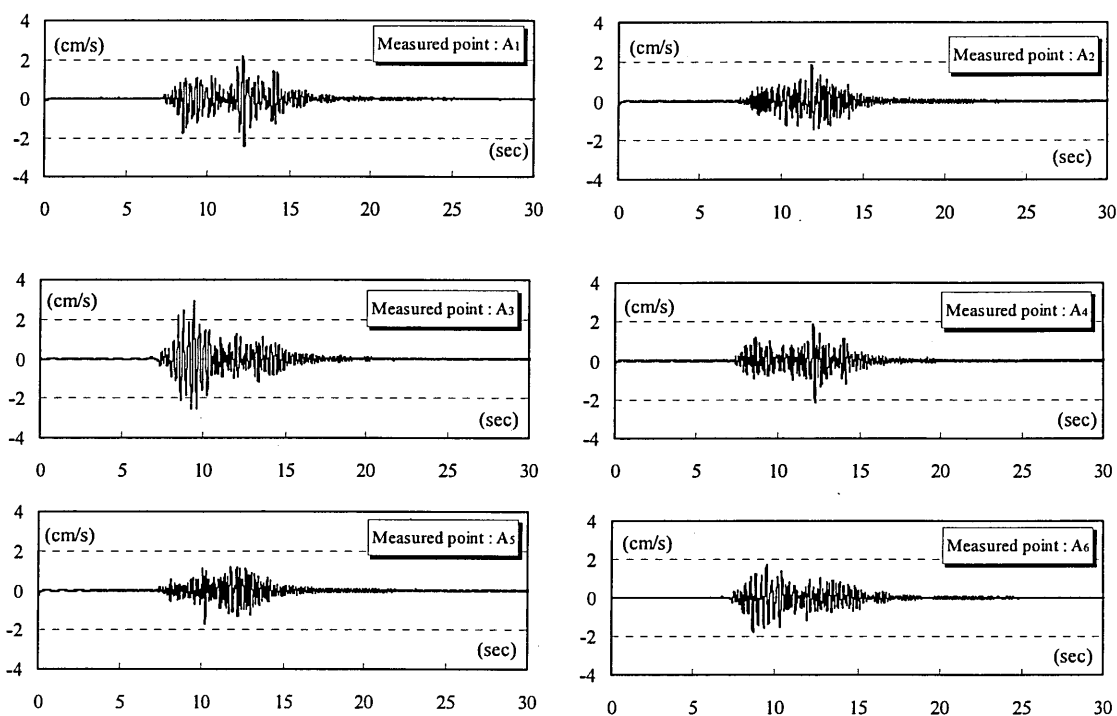


図-8 試験車両走行試験における応答速度波形一例 (走行ケース 1)

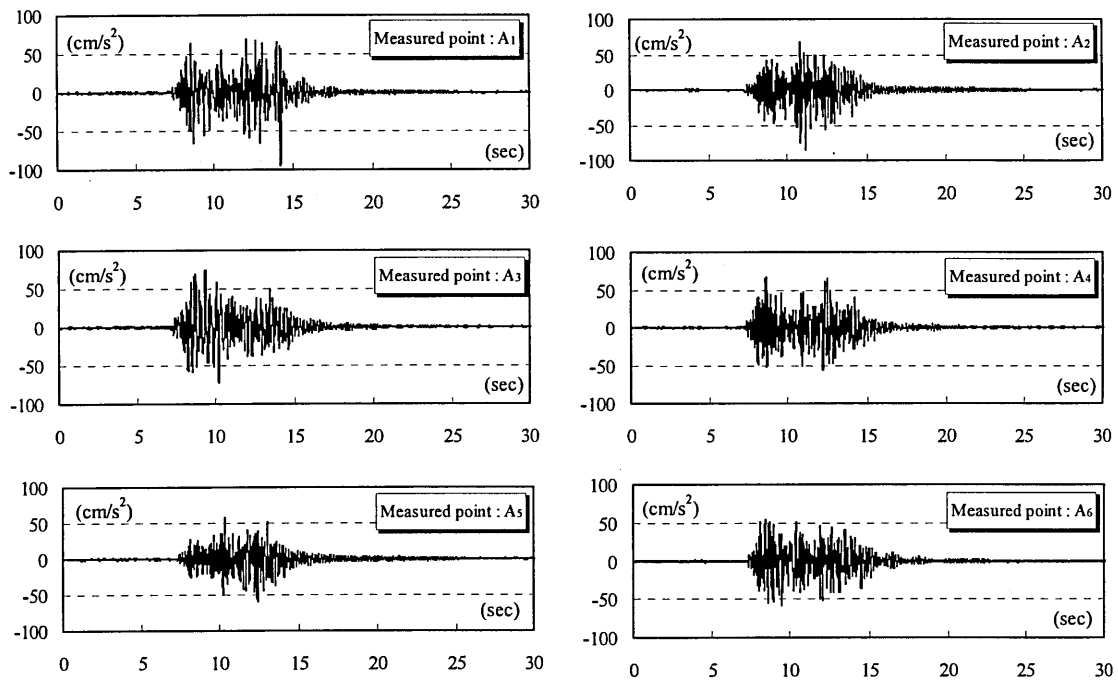


図-9 試験車両走行試験における応答加速度波形一例（走行ケース 1）

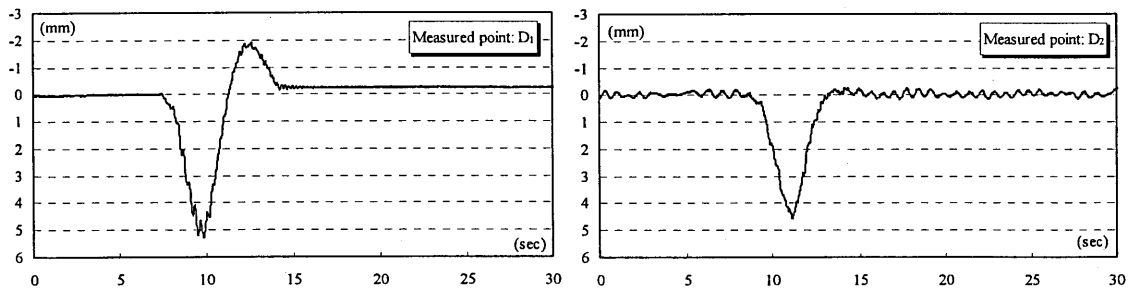


図-10 試験車両走行試験における応答変位波形一例（走行ケース 1）

4.3 固有振動数と振動モード

表-3 に本橋の固有振動数の実験値と 3 次元固有値解析で得た解析値を示す。図-11 に固有値解析での振動モードを 6 次振動までを示す。表-3 より 6 次振動以降では若干の差異が見られるが、5 次振動まではよく一致していることから、解析モデルの妥当性が検証された。

表-3 対象橋梁の振動特性

振動次数	振動モード	固有振動数 f_i (Hz)		減衰定数 h_i
		実験値	解析値	減衰自由振動
1	アーチ水平対称1次	1.25	1.26	0.0133
2	鉛直曲げ逆対称1次	4.79	4.79	0.0062
3	鉛直曲げ対称1次	5.30	5.23	0.0016
4	ねじれ逆対称1次	7.71	7.61	0.0038
5	水平曲げ対称1次	8.30	8.46	0.0018
6	ねじれ対称1次	9.64	10.67	0.0064
7	ねじれ対称2次	12.65	14.23	0.0013

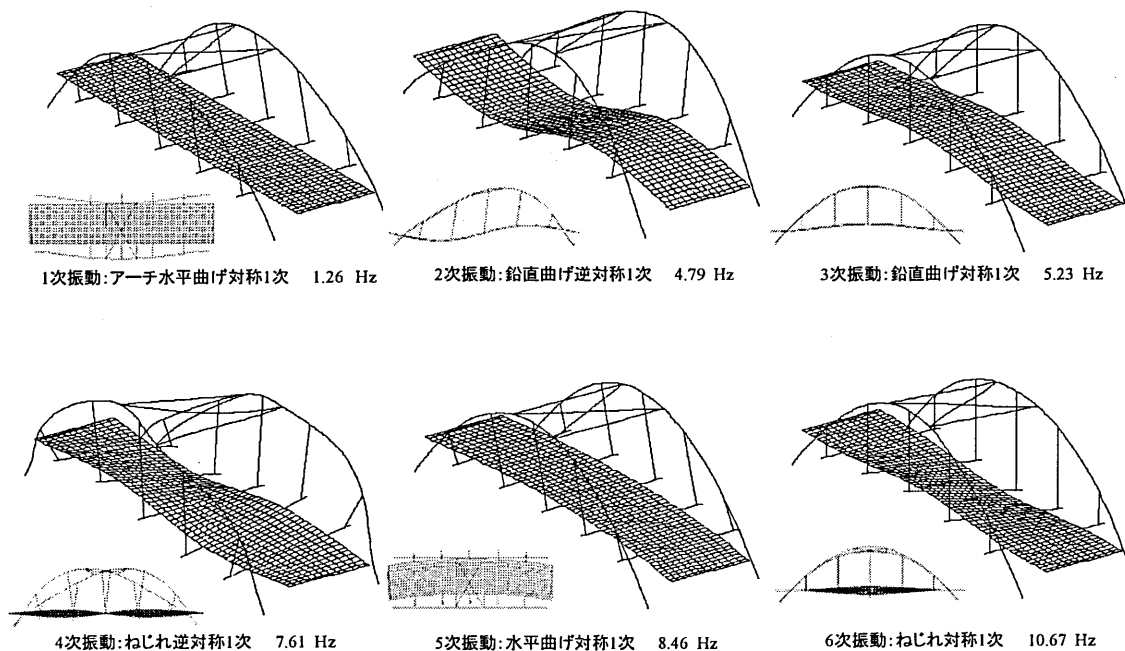


図-11 解析の振動モード

図-12 は、近代木橋に対する最大支間長と実験から得られた鉛直曲げ基本固有振動数との関係を示している。本橋の固有振動特性を他の道路橋と比較するため、一般の橋梁やコンクリート系橋の1次固有振動数を概算する次式¹⁾を用いて評価した。

$$f_1 = 100/L \text{ (Hz)} \quad \dots (1)$$

式(1)を用いて本橋の鉛直曲げ基本固有振動数を概算すると、3.57Hzを得る。この値と本橋の鉛直曲げ逆対称1次振動の4.79Hzを比較すると、同等以上の値となる。すなわち、固有振動数は橋梁の全体的な剛性と密接な関係があることから、本橋は一般的な道路橋とほぼ同等以上の鉛直曲げ剛性を有しているものと判断される。

動的实验から得られた固有振動数と振動モードから、アーチ単独の水平振動を除けば、最初に振動しやすいのが鉛直方向で、次いでねじれ方向および水平方向の振動性状を示している。このことは、アーチ支間長の大きい本橋の場合、鉛直方向の曲げ剛性より、RC床版や縦桁が配置されていることから、ねじれ、水平方向の曲げ剛性が大きいことが確認された。

4.4 減衰定数

各振動モードに対する減衰定数を表-3、減衰自由振動波形の一例を図-13に示す。

減衰定数の算出には、次式²⁾を用いた。

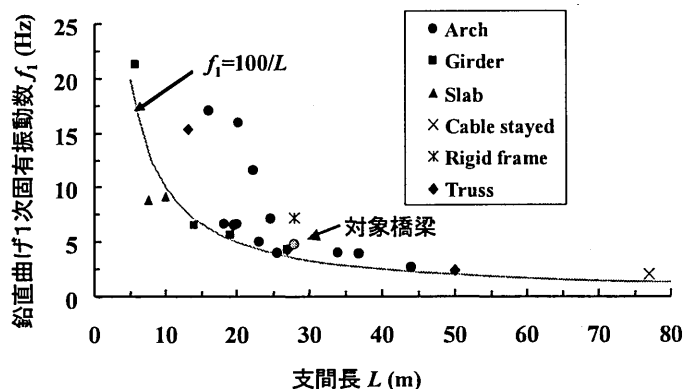


図-12 支間長と鉛直曲げ1次固有振動数

$$\delta = \log_e(X_{i+1}/X_i), h \doteq \delta / 2\pi \dots (2)$$

ここに、 δ は対数減衰率、 X_i は振幅である。

図-14 に、最大支間長と鉛直曲げ基本固有振動数に対する減衰定数の関係を示す。本橋の鉛直振動に対して重要な減衰定数 h は、減衰自由振動波形より得られた鉛直曲げ 1 次振動モードの 0.0062 と考えられる。構造用集成材を使用した木車道橋は、構造形式や支間長などの要因が関係し、また実測データが不足しているため定量的な評価は困難であるが、鋼橋やコンクリート橋に用いられる減衰定数と支間長 $L(m)$ との関係は次式³⁾によって概算できる。

$$h = 0.12 / \sqrt{L} \dots (3)$$

式(3)を用いて算出すると、 $h=0.023$ を得る。この値と本橋の減衰定数 0.0062 を比較すると、一般的な鋼橋やコンクリート橋の値より小さい値を示す。これは、下路・中路式アーチ橋と同様に、本橋の構造が床組をアーチ部材で吊っている構造上の特性に起因していると思われる。

4.5 動的増幅率

動的増幅率 i の算出には次式³⁾を用いた。

$$i = (y_{dy,max} - y_{st,max}) / y_{st,max} \dots (4)$$

ここに、 $y_{dy,max}$ は最大動的たわみ応答値、 $y_{st,max}$ は最大静的たわみ応答値である。

動的増幅率 i は、試験車両走行試験において、測定点 D_1 、 D_2 での振動変位計での応答波形から式(4)を用いて算出した。

図-15 は、従来の近代木橋の設計衝撃係数 0.25、参考文献 4) で提案している衝撃係数 $i=16/(30+L)$ 、鋼橋での一般的な概算式 $i=20/(50+L)$ と実橋実験より得られた実験値(0.085)を比較したものである。本橋においては、支間長に対して設計衝撃係数 0.25 を下回っている。また、本橋の実験値が、他の近代木橋の実験値と比較して小さい理由としては、本橋の架設地点状況から、試験車両の走行速度 20km/h が限界の速度であったことが影響していると思われる。設計衝撃係数との単純な比較は困難であるが、動的増幅率を一つの動的応答係数(衝撃係数)と考えた場合、本橋は安全側に評価された設計値が用いられていることが検証された。

この衝撃係数を一つの動的応答係数とする論旨は、車両が 1 台や 2 台で橋面上が満載状態になるような、特に短支間

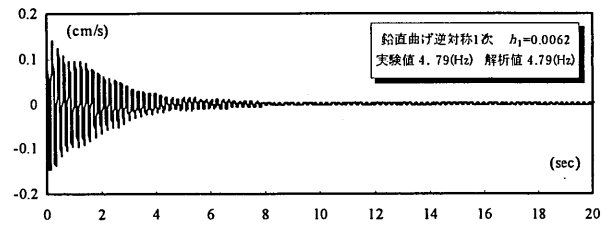


図-13 減衰自由振動波形の一例

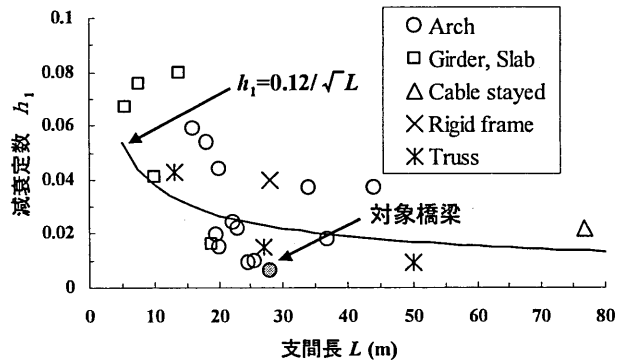


図-14 支間長と減衰定数

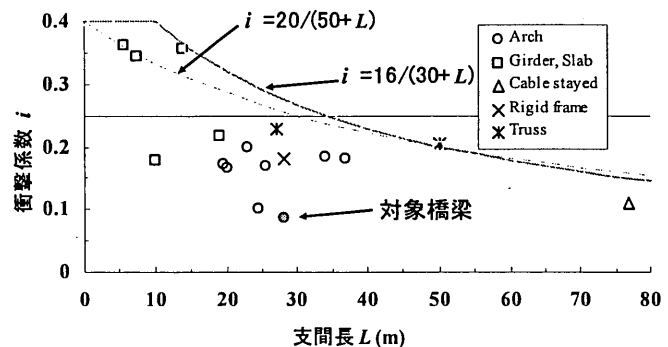


図-15 支間長と衝撃係数

長橋梁である近代木車道橋に有効な考え方である。すなわち、設計活荷重の車両走行状態ではなく、日常的な交通流において生じる橋梁の動的影響を考えて、実際的な動的増幅率を応答係数として衝撃係数を評価する考え方である。

4.6 振動使用性

わが国で多く用いられている主な振動使用性の評価法は、小堀・梶川ら⁵⁾の研究成果に基づき振動速度から評価が行われる。この評価法には、振動速度の最大値で評価する方法と振動速度の実効値で評価する方法がある。図-16, 17は、日常的に起こりうる最大速度(20km/h)で車両が走行した時の最大値と実効値における各応答速度と振動の忍限度を示す。忍限度では、橋梁振動により歩行者が歩行時に受ける振動感覚から、橋梁に対する一つの使用性を評価するため、振動感覚の一般的な分類をしている。図-16より、最大値による評価法では、「少し歩きにくい」に属している測定点もあるが、大半が「振動を明確に感じる」に属している。また、図-17の実効値による評価法では、測定点の大半が「振動をわずかに感じる」に属している。

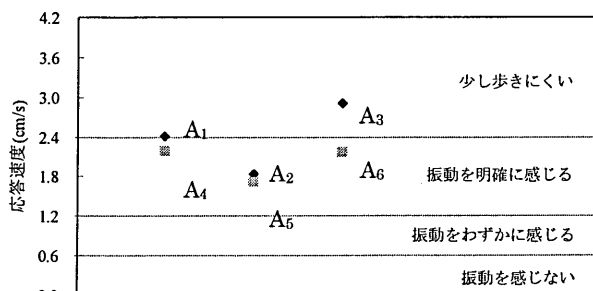


図-16 最大値に対する忍限度

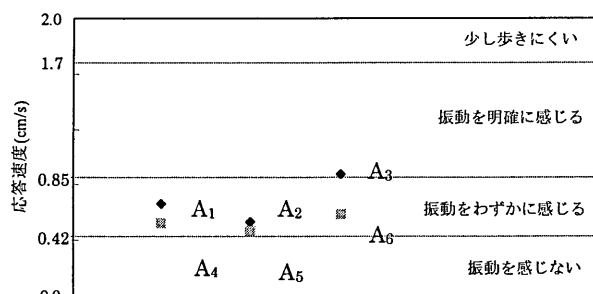


図-17 実効値に対する忍限度

従って、本橋での振動感覚が「歩きにくい」となることは考え難いと判断でき、本橋の架設地点での日常交通量を考えると、本橋の振動使用性として特に問題は無いものと判断される。

5. あとがき

本研究では、実橋実験と解析から構造特性を検証した結果、実験値と解析値とに整合性のある結果が得られたと同じに、わが国で最大規模である木製中落式アーチ車道橋に対して、静的および動的の観点から構造特性に検討を加えた。本研究で示した静的および動的特性に関する値や知見が近代木橋の維持管理や設計係数値の評価に参考になれば幸いである。今後は、本橋の走行車両による3次元動的応答解析を行い、解析的に動的応答特性を検討して行く所存である。

参考文献

- 1) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，pp.103-114,1993年10月。
- 2) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析，技報堂出版，pp.34-35,1993年10月。
- 3) 加藤雅史：橋梁の振動調査法とその適用に関する研究，名古屋大学学位論文，pp.73-74,1984年7月。
- 4) 木橋技術の手引き 2005：3.作用編 (4)衝撃荷重，土木学会鋼構造委員会・木橋技術小委員会，pp.52-53,2005年7月。
- 5) 小堀為雄・梶川康男・城戸隆良：振動感覚を考慮した歩道橋の設計，橋梁と基礎，Vol.8, No.12, pp.23-29,1974年12月。