

実験と解析に基づく下路式アーチ木車道橋の構造特性評価

Structural Performance of Through Arch Timber Highway Bridge Based on Experiment and Analysis.

○小川史彦* 本田秀行** 高木和芳***
OGAWA Fumihiko, HONDA Hideyuki and TAKAGI Kazuyosi

ABSTRACT The data on rigidity evaluation of modern timber bridge using glued laminated timber is insufficient in worldwide. Therefore, in this study static rigidity, strength, safety and dynamic characteristics of both timber highway bridges were investigated based on structure analysis and field test. The data on structural property and rigidity evaluation of the bridges are presented with results from both sides of the experiment and analysis.

keywords : 木橋、アーチ橋、実橋実験、動的特性、構造解析
timber bridge, arch bridge, dynamic characteristics, field test, structural analysis

1. まえがき

構造用集成材を使用した近代木橋の剛性評価に関するデータは、世界的にも不足している。そこで、本研究では下路式アーチ木車道橋である「栗飯戸橋」写真-1と「神の森大橋」写真-2に示す2橋に対して、設計時に集成材の物理的特性に関して仮定した諸数値を基に、設計活荷重相当の車両載荷による構造解析と実験データとの比較から、両橋の静的剛性、安全性等の検討を行った。また、動的挙動特性については、実測の応答速度、応答加速度をパラメータとした下路式アーチ木車道橋の振動性状の評価に加え、試験車走行時でのたわみ振動から動的増幅率、あるいは大型車両が通過した場合に受ける歩行者の反応を振動の観点から検討した。

以上のような実験と解析の両面から下路式アーチ木車道橋の検討によって、構造特性や剛性評価に検討を加えている。

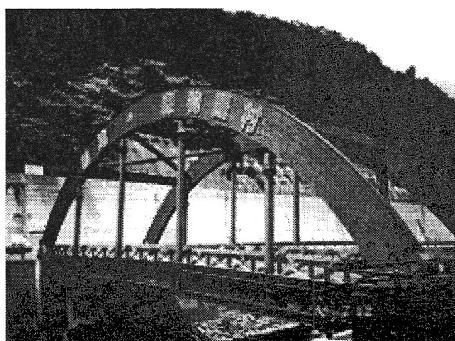


写真-1 栗飯戸橋

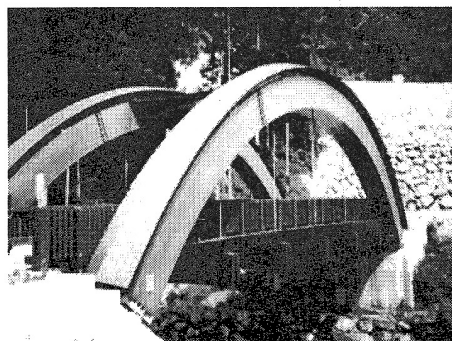


写真-2 神の森大橋

*金沢工業大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

**金沢工業大学環境系土木工学科 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

***トリスミ集成材株式会社建設本部 (〒587-0042 大阪府南河内郡美原町木材通 4-1-11)

2. 対象橋梁の概要

対象橋梁の設計概要を表-1に、対象橋梁の一般図を図-1に示す。

(1) 栗飯戸橋

栗飯戸橋は、奈良県黒滝村にあるスギ、ヒノキの産地として知られる吉野の里に、森林浴を目的に誕生した『黒滝森物語』への架け橋として建設された。この木橋は、ここを訪れる人たちを送迎する大型バスが通行可能なように、設計活荷重TL-20として設計されている。本橋は大断面構造用集成材を用いているが、一部に鋼材を使用しているハイブリット木車道橋である。アーチ部材および高欄には、地元産のヒノキをラミナ材とした集成材を使用している。防腐剤の加圧注入は、ラミナ材の時点で行われている。

(2) 神の森大橋

神の森大橋は、愛媛県広田村に架設されている。近代木車道橋としては、わが国最初の本格的な一等木造車道橋(林道橋)であり、村内材を使用している。アーチ幅は110 cm にもなるが、アーチ断面が大きくなったのは、剛性を高めるためにアーチ部を箱型にしているためである。また、耐用年数は最低30年といわれており、まさに最新技術が集結した橋梁である。しかも素材が木であるために周りの景観にうまく溶け込み、木の温かさが感じられる橋梁である。

3. 実験概要

実験は橋梁の剛性および振動性状を把握するために、試験車載荷試験、常時微動測定試験、砂袋落下衝撃試験、試験車走行試験の4試験を行った。図-2に対象橋梁の各測定点を示す。図中の記号●A₁～●A₁₀は橋梁の振動を計測するサーボ型振動速度計を示し、() 内のVは鉛直方向、Hは水平方向の振動計測を示している。■D₁、■D₂は橋梁の振動変位を計測する振動変位計を、▲S₁～▲S₅は、鉛直方向の静的たわみの測定点を示している。

(1) 試験車載荷試験

図-3に試験車の載荷ケースを示し図-3に試験風景を示す。栗飯戸橋では試験車約29tf (Truck1)と約26tf (Truck2)のダンプトラックを2台用い、単独載荷(Truck1: 偏心・幅員中央載荷)と2台並列載荷を行い、神の森大橋は試験車1台約20tfのダンプトラックの単独載荷(偏心・幅員中央載荷)を行い、

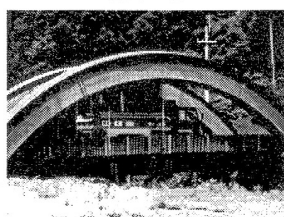


写真-3 静的載荷試験

表-1 設計概要

	栗飯戸橋	神の森大橋
竣工念	平成6年2月	平成6年5月
実験日	平成12年7月12日	平成12年9月
橋種	車道橋	
橋格	一等木車道橋(林道橋)	
形式	タイドアーチ橋	2ヒンジアーチ橋、(プレストレス木床版)
橋長	26.5m	26.36m
支間長	24.6m	23.0m
幅員	8m (有効幅員 7m)	8m 幅員 (有効幅員 5m)
設計活荷重	TL-20	
衝撃係数	0.25	
主要部材	ヒノキ集成材、バツ材 米マツ集成材、鋼材	スギ集成材
舗装	材木	弾性舗装

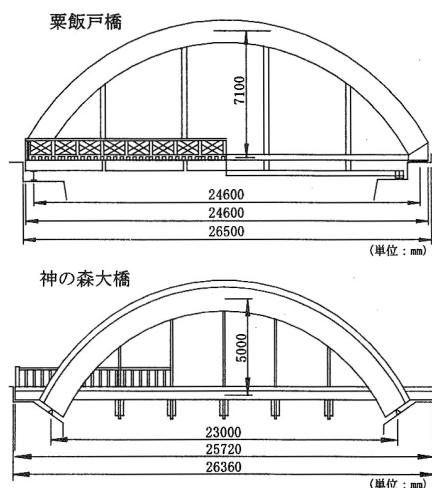


図-1 対象橋梁の一般図

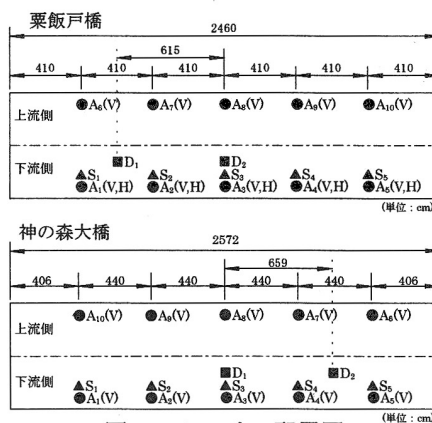


図-2 センサー配置図

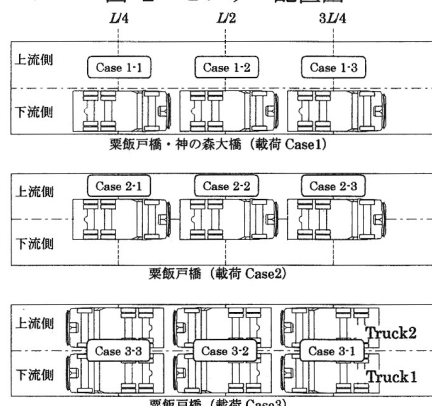


図-3 試験車の載荷ケース

鉛直たわみ値を測定した。

(2)常時微動測定試験

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を測定し、固有振動数および振動モードを求めた。

(3)砂袋落下衝撃試験

30kg の砂袋を約 1m の高さから落下させることにより衝撃力を与え、測定された減衰自由振動波形から減衰定数を求めた。衝撃加振点としては、スパン $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 点の幅員中央と偏心の計6箇所で行った。

(4)試験車走行試験

図-4 に車両走行試験ケースを示す。栗飯戸橋は走行速度約 15km/h で1台単独走行、2台並列走行を行った。神の森大橋は走行速度約 20km/h で幅員中央走行のみを行い動的応答速度、動的応答加速度、動的応答変位の波形から動的増幅率や橋梁に対する一つの使用性を評価した。走行速度については栗飯戸橋と神の森大橋の両橋ともに周辺の道路構造から見て最大に近い速度である。

4. 試験結果

4. 1 静的特性

図-5 に载荷ケース2の静的たわみ値と解析値を、図-6 に载荷ケース2の静的構造解析の一例を示す。実験結果から、栗飯戸橋の試験ケース 2-2 で最大 7.0mm、神の森大橋は試験ケース 1-2 で最大 6.7mm のたわみを得た。

実験値と試験車相当の荷重を解析モデルに载荷することにより得られた解析値とを比較し、両橋梁の有する剛性および解析モデルの剛性の検討も行った。その結果、実験値と解析値が共によく一致し解析モデルの妥当性が確認できた。橋軸方向の鉛直たわみ性状は、両橋共に下路式アーチ橋としての構造的な力学特性を明確に示している。これは、橋軸方向の曲げ剛性が均一に分布していることである。すなわち、栗飯戸橋に於いては、タイドアーチ骨組み構造を構成している主桁など構造用集成材の接合部および木床版が精度よく連結されているものと判断される。一方、神の森大橋においても、下路式アーチ構造を構成している箱型断面のアーチ部や吊棒との結合部など構造用集成材の接合部および木床版の PC 鋼棒に精度よく張力の施工がされているものと判断され得る。

4.2 固有振動特性

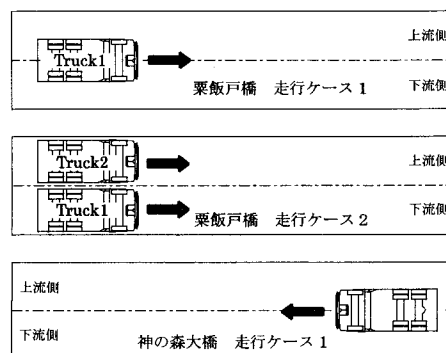


図-4 試験車走行ケース

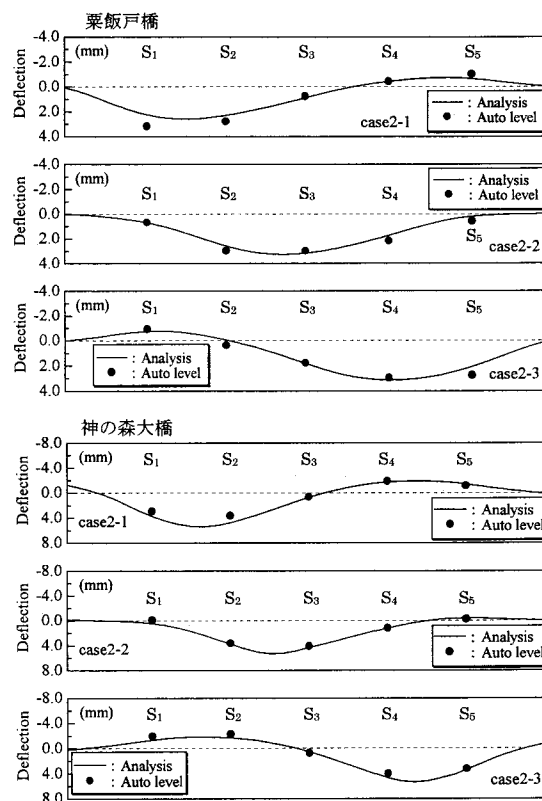


図-5 車両载荷試験のたわみ例

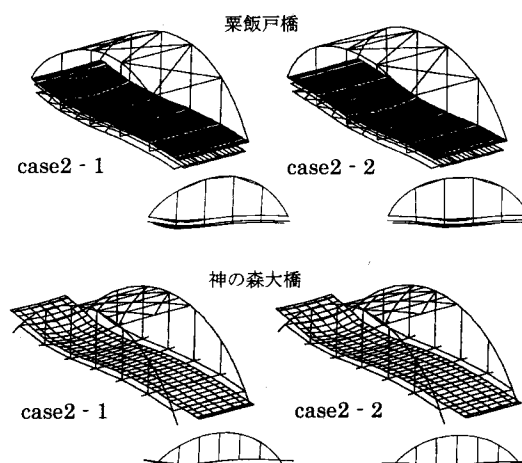


図-6 静的構造解析のたわみ例

表-3 に常時微動測定試験と固有値解析から得られた固有振動数および、解析から得た振動モードの一例を掲示する。

栗飯戸橋のスペクトル分析の結果から、特にねじれ1次の 5.86 (Hz)、水平曲げ1次振動モードの 7.10 (Hz)、鉛直曲げ1次振動モードの 7.13 (Hz)、鉛直曲げ2次振動モードの 7.63 (Hz)、ねじれ2次振動モードの 10.64 (Hz)の卓越が顕著となっている。実験値と解析値の両者は、比較的によく一致しているため解析モデルの妥当性が検証された。また、一般の鋼アーチ橋に用いられる固有振動数を概算的に算定する式 $f=154.8 \times L^{-10.57}$ (Hz) (L: アーチ支間長) より支間長 24.6mの鋼アーチ橋の基本振動数は5.24 (Hz)と算定すると栗飯戸橋は一般の鋼アーチ橋とほぼ同等の固有振動数であることが言える。

神の森大橋のスペクトル分析の結果から、特に鉛直曲げ1次振動モードの 4.98 (Hz)、鉛直曲げ2次振動モードの 6.64 (Hz)、ねじれ1次振動モードの 7.42 (Hz)、鉛直曲げ3次振動モードの 9.67 (Hz)、ねじれ2次振動モードの 12.11 (Hz)の卓越が顕著となっている。水平曲げや、アーチ部材のみの固有値は、解析値のみである。実験値と解析値を比較すると、ほぼ同等な値が出ているため、解析モデルの妥当性が検証された。また、栗飯戸橋と同様に一般の鋼アーチ橋に用いられる固有振動数を概算的に算定する式 $f=54.8 \times L^{-10.57}$ (Hz) (L: アーチ支間長) より支間長 23mの鋼アーチ橋の基本振動数は 5.6 (Hz)と算定すると、本橋は一般の鋼アーチ橋とほぼ同等の固有振動数であることが言える。

表-3 固有振動数と減衰定数

振動次数	振動モード	固有振動数(Hz)		減衰定数	固有振動モードの一例		
		実験値	解析値				
栗飯戸橋	1 アーチ水平振動	—	2.86	—			
	2 ねじれ1次	5.86	6.17	0.006			
	3 水平曲げ1次	7.10	6.43	—			
	4 鉛直曲げ1次	7.13	7.05	0.009			
	5 鉛直曲げ2次	7.63	7.79	0.004			
	6 ねじれ2次	10.64	11.12	0.011			
	7 水平曲げ2次	15.00	12.38	—			
神の森大橋	1 アーチ水平振動	—	2.36	—			
	2 鉛直曲げ1次	4.98	4.82	0.022			
	3 鉛直曲げ2次	6.64	7.28	0.016			
	4 ねじれ1次	7.42	7.78	0.016			
	5 水平曲げ1次	—	8.08	—			
	6 鉛直曲げ3次	9.67	11.12	0.016			
	7 ねじれ2次	12.11	12.05	0.009			

4.3 減衰特性

表-3 に各振動モードに対する減衰定数を示し、図-7 に橋梁の減衰自由振動波形の一例を示す。

減衰定数 h の算定には次式を用いた。

$$\delta = \log_e \left(\frac{X_{i+1}}{X_i} \right) \quad h \doteq \frac{\delta}{2\pi} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに δ は対数減衰率、 X は振幅である。

栗飯戸橋の減衰定数の 0.006 は同形式同支間長のアーチ系鋼橋とほぼ同じ程度の値となっている。

すなわち、床組みに鋼縦桁、鋼横桁、吊材にパイプ型の鋼材が使用されているなどから、鋼橋に近い構造であることに起因しているものと考えられる。従って、本橋に鋼材が使用されたことによって、鋼橋とほぼ同等な値が得られたものと考えられ、本実験での値はこれらの構造的な特性に起因していると思われる。

神の森大橋の減衰定数は 0.022 が得られた。過去のデータより求められた支間長と減衰定数の関係式 $h = 0.12 / \sqrt{L}$ (L: アーチ支間長) から判断すると、支間長 23m での減衰定数は 0.025 であり、本橋の減衰定数は妥当な値と言える。しかしながら、若干ではあるが小さい値が得られ

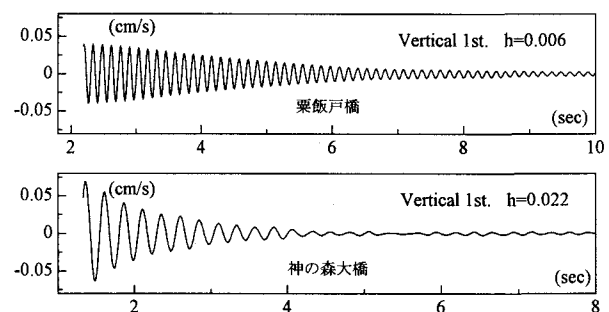


図-7 減衰自由振動波形の一例

たのは、本橋の構造において一般の鋼アーチ橋に見られるような縦桁がなく床桁のみという構造的な特性によるものと考えられる。

粟飯戸橋と神の森大橋は、ほぼ同じ支間長であるが、実験から得られた減衰定数は、決して近い値とは言えない。しかし一般的に鋼などの短支間橋梁でも構造減衰値の幅が 0.003～0.060 のように広いことが確認されているため¹⁾、両橋梁の減衰定数は妥当な値と思われる。

本実験で得た減衰定数の値はアーチ支間長 24.6m のタイドアーチ橋、アーチ支間長 23.0m の 2 ヒンジ集成材アーチ橋に対する一つの値である。減衰定数は橋梁形式や支間長などの要因が関係しなかつ木材の場合は、定量的な評価を行うための測定データが不足している。下路アーチ形式集成材橋梁の合理的な設計法、耐震性能、健全度などの評価に減衰定数の値は重要な因子となることから、今後、多くの同形式集成材橋梁で実験を行い、そのデータの蓄積に基づく統計分析によって定量的に評価していくことが必要である。

4.4 動的増幅率（衝撃係数）

図-8 に試験車走行試験から得られた動的応答波形の一例を示し、図-9 に動的増幅率の各測点の平均値および最大値を示す。

動的増幅率 i の算定には次式を用いた。

$$i = \frac{(y_{dy,max} - y_{st,max})}{y_{st,max}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

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

粟飯戸橋において、試験車 1 台が約 15km/h で走行した場合の最大動的増幅率は、0.101 であった。試験車 2 台の並行走行の場合での最大動的増幅率は、0.096 の値を得た。

神の森大橋の実験では、試験車両 1 台センターライン約 20km/h 走行を行った。その結果、0.198 の最大値を得た。

設計衝撃係数の検証は、車を橋面に満載状態で並べるのに対して、本実験では 1 台単独または、2 台並行で走行していることから、両者を比較することは困難である。しかし、短支間橋梁であり衝撃係数を一つの応答係数と考えた場合、本実験値は日常交通流において最も過酷な走行状態で得られた値であり、設計衝撃係数の 0.25 より低い値を示すことから、両橋は安全側に評価された値が設計で採用されているものと思われる。しかし、走行車両の進入において、伸縮継手での段差による衝撃力の影響によってかなり大きい動的増幅率の値を示す場合も考えられる。従って、走行車両の動的荷重作用による、構造用集成材を

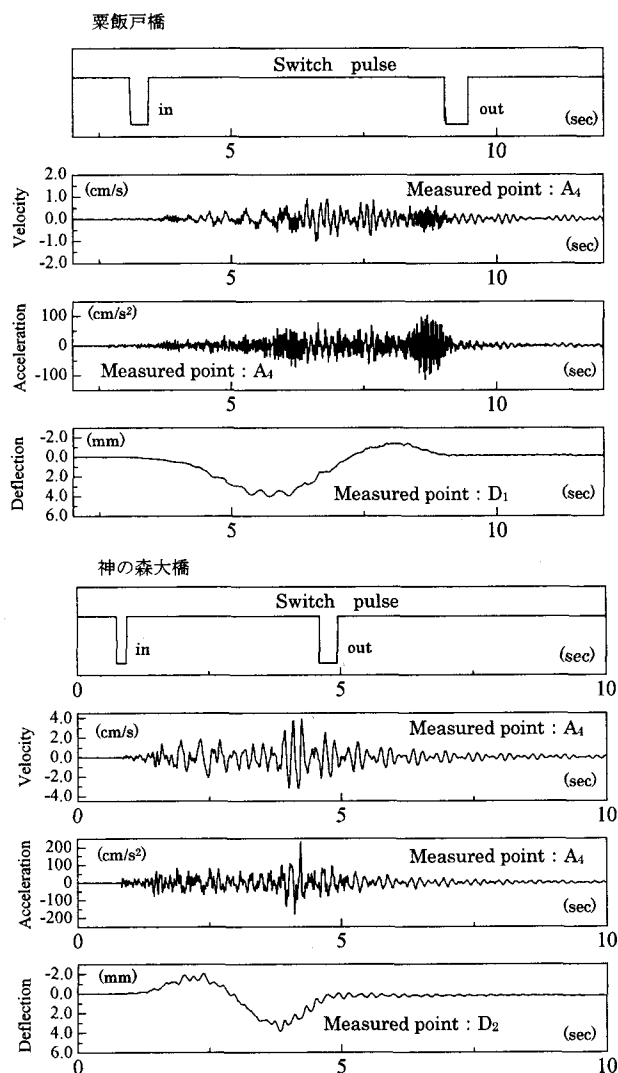


図-8 車両走行における応答波形

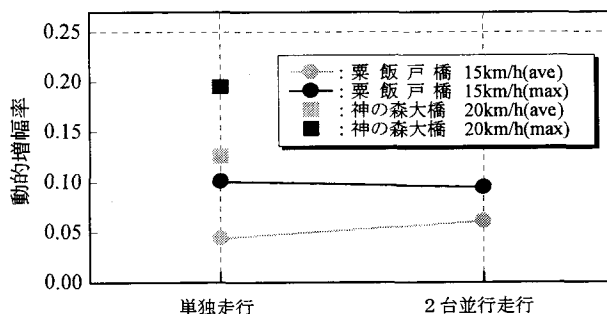


図-9 動的増幅率

使用した橋梁の動的影響がほとんど研究されていない現状においては、衝撃係数を一つの応答係数として考え安全側に評価されている 0.25 の設計衝撃係数を工学的に妥当値とすることも認容され得るが、今後実験的および解析的研究によって下路式アーチ木車道橋に対する合理的な設計衝撃係数を検討していく必要がある。

4.5 使用性

図-10 に本実験で得た応答速度の各試験ケースでの平均値、並びにセンサー別の平均値を示す。また橋梁振動による歩行者が歩行時に受ける振動感覚でもって、橋梁に対する一つの使用性を評価するために、歩行者が歩行時に受ける振動感覚の一般的な分類³⁾も同時に示す。栗飯戸橋の測定値は試験車走行試験ケース 1、ケース 2 共に「振動を明確に感じる」程度の反応であった。また、過酷な走行条件になるにつれて応答速度が大きくなっていることも分かる。

神の森大橋では、すべてのセンサーの位置において「少し歩きにくい」、または「歩きにくい」という反応の値が測定され、特に L/4 点、3L/4 点で大きい値が測定された。これは、本橋の床組構造に縦桁がなく床桁のみで床版を支えていることや、舗装が工事車両によって極端な不陸路面になっていることなどが原因と考えられる。また、この図中の最大値は、継手部での段差の影響が含まれているものであり、前述したように、継手部に生じる走行車両の衝撃力は継手部での段差量に直接比例し、通常、橋梁自体の振動より 2~3 倍以上の大きさになる事が多くの実験や解析で認められている。

以上のことから、取り付け路面の整備が行われ、継手部での段差の影響が少なくなる場合、実験値よりも大きな値は検出されないものと考えることができ、日常の使用性においては特に問題がないものと思われる。

5. まとめ

本研究は、「栗飯戸橋」と「神の森大橋」の 2 橋に対する静的試験および動的試験によって得た実験値と構造解析の両面から、対象橋梁における構造剛性や振動特性を検討し、下路式アーチ木車道橋に対する基礎的データを提示した。なお、4.4 節でも述べたように、合理的な設計衝撃係数の検証が必要であることも課題として残されている。今後、走行車両による両橋の動的応答解析を進め、衝撃係数の評価を検討していく所存である。

最後に、本研究の一部は H11 年度文部省科研費・基盤研究 C(No.11650497) の助成で行った。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1)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、1984.7.
- 2)橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技法堂出版、1993.10
- 3)小堀・梶川：橋梁の人間工学的評価、土木学会論文集、No.230, pp.23-31,1974.10.

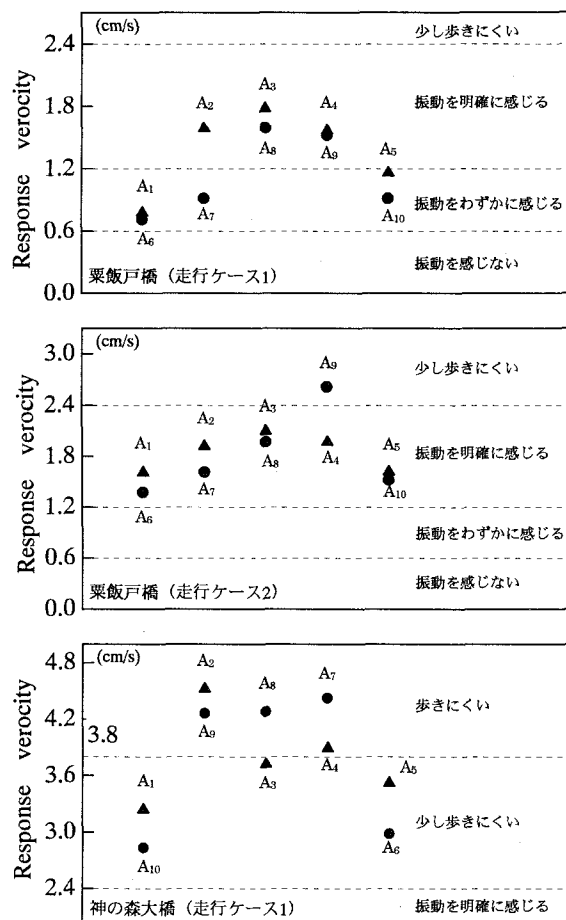


図-10 忍限度