

## 実験と解析に基づく中路式アーチ木車道橋（おおさる橋）の構造特性

Structural Characteristics of Timber Arch Highway bridge Based on Experiment and Analysis

○草薙 貴信\* 壁村 秀水\*\* 小川 史彦\*\*\* 本田 秀行\*\*\*\*

KUSANAGI Takanobu, KABEMURA Hidemi, OGAWA Fumihiko and HONDA Hideyuki

**ABSTRACT** The static and dynamic field tests of arch timber highway bridge (Oosaru Basi) had been done, and then the static and dynamic characteristics were investigated. This study presents the structural characteristics and structural rigidity based on the field tests and three dimensional static and eigenvalue analyses.

**Keywords:** 木橋、アーチ橋、実橋実験、動的特性、構造解析

*timber bridge, arch bridge, field test, dynamic characteristics, structural analysis*

### 1. はじめに

わが国の構造用集成材を用いた近代木橋の架設は欧米に比べて架設実績が少なく13年程の最近のことである。そのため、剛性評価に関する構造特性値は、あまり実験が行われてないこともあり、データが不足しているのが現状である。

本研究は中路式アーチ木車道橋として、わが国最大級の木床版を用いた「おおさる橋」に対してさまざまな視点から、静的・動的実験を行い、その実験データの分析を行った。さらに、3次元静的構造解析および固有値解析を実施し、その結果を基に剛性評価、静的強度、振動特性、設計係数などの検討を行った。そして、今後の長大スパン木橋における設計資料として、実験と解析の両面から本橋の構造特性を明

らかにした。  
表-1、図-1、  
図-2 に対象  
橋梁とした  
「おおさる橋」  
の設計概要、  
写真、一般図  
を示す。

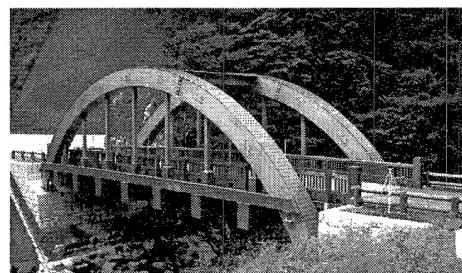


図-1 おおさる橋全景

表-1 設計概要

橋種	車道橋
橋格	1等林道橋
形式	中路式2ヒンジアーチ橋 (プレストレス木床版)
橋長	28.0 m
支間長	25.6 m
アーチ支間長	25.6 m
幅員	5.5 m (車道幅員)
設計活荷重	25(A)
衝撃係数	0.25
舗装	弾性アスファルト舗装
使用部材	主に杉集成材

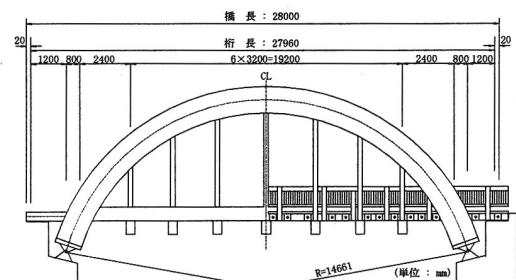


図-2 おおさる橋一般図

\*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)

\*\*(財)林業土木コンサルタンツ技術研究所 (〒370-0851 群馬県高崎市上中居町42-1)

\*\*\*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)

\*\*\*\*金沢工业大学 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)

## 2. 実験の概要

本橋に対して5種類の実験を行った。常時微動測定試験では、橋梁に外力荷重がない状態で、自然の微振動に対する橋梁の応答速度を約5分間連続測定行った。砂袋落下衝撃試験では、30kgの砂袋を約1mの高さから落下させることにより、本橋に鉛直、ねじれ加振を与えた。試験車両は約20tfのダンプトラックを2台用い、静的載荷試験では試験車1台載荷(偏心、幅員中央載荷)と2台並列載荷を行った。図-3～図-4に車両載荷位置を示す。図-5に走行試験時の各測定点を示す。▲は静的載荷試験における測定点を示す。●はサーボ型速度計による速度と加速度の測定点でVは鉛直方向、Hは水平方向である。■は振動変位計の測定点である。試験車両走行試験、アーチ部材振動挙動試験では1台単独走行、2台連行走行共に下流側車線を走行させ実施した。試験車両走行試験では、本橋の応答加速度、応答速度および応答変位の測定を行った。アーチ部材振動挙動試験では、アーチ部材と床版の振動特性を把握する為に、アーチ部材の3L/4点にサーボ型速度計を取り付け、アーチ部材の鉛直、水平、橋軸方向と床版の鉛直、水平方向の振動加速度を測定した。また、走行速度は車両走行試験に対して1台単独走行の時は30km/h、20km/h、10km/h、徐行、2台連行走行の時は15km/h、10km/h、徐行、またアーチ部材振動挙動試験に対して1台単独走行の時は30km/h、10km/h、2台連行走行の時は18km/h、10km/hである。図-6～図-9は測定状況を示す。

## 3. 実験結果

### (1) 静的特性

図-10に静的載荷試験の一例として、本橋のスパンL/4点(ST.type 1-1)に対する実験値と解析値および静解析モデルを示す。静的載荷試験は、本橋の有する剛性および解析モデルの剛性を確認するために行った。その結果、実験値と解析値の両者はよく一致していることが認められる。試験車1台載荷の実験ケースで得られた静的たわみの値から一般的な事項として、スパンL/4点に鉛直の正(鉛

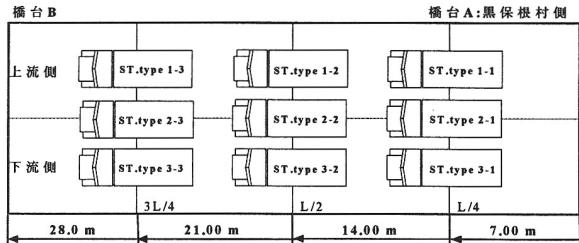


図-3 車両載荷位置 (ST.type1～ST.type3)

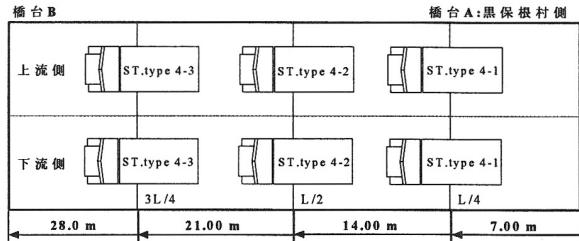


図-4 車両載荷位置 (ST.type4)

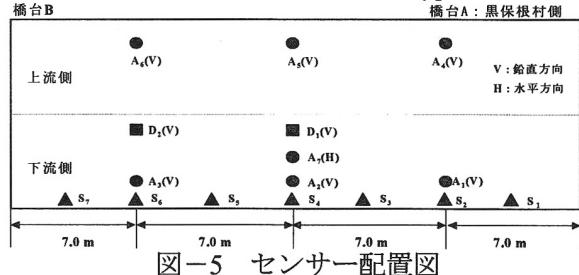


図-5 センサー配置図

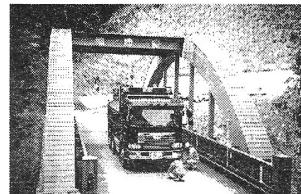


図-6 静的載荷試験



図-7 砂袋落下衝撃試験



図-8 試験車両走行試験  
(1台単独走行)

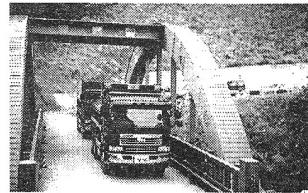


図-9 試験車両走行試験  
(2台連行走行)

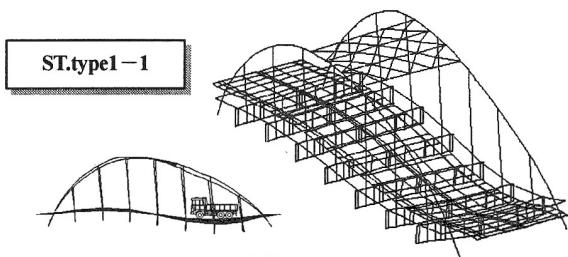
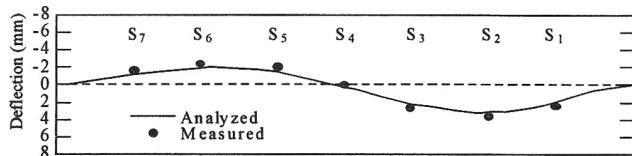


図-10 静的特性の一例

直下方向) のたわみが生じた時、 $3L/4$  点では負(鉛直上方向) のたわみが生じるという、基本的なアーチ形式の構造上の特性が認められた。

また、図-11に本橋の静解析によって同定された3次元構造解析モデルに、本橋の設計時での活荷重と同じ荷重強度と載荷方法になるよう端部の床版に載荷した時の載荷図と着目点を示す。その結果、アーチ部材において最大たわみ値 8.65mmを得た。また、床版においては最大たわみ値 8.69mmを得た。これらの値とアーチ部材の設計たわみ値 10.32mm と床版の設計最大たわみ値 12.60mm を比較すると、解析値は設計値のいずれよりも小さい。すなわち、本橋完成後の実質的な静的鉛直の曲げ剛性が、アーチ部材で 1.2 倍、床版で 1.4 倍程大きいことを意味している。従って、本橋は車両等の活荷重に対する実際の抵抗強度と安全性が設計時より大きいことを示していると判断され得る。

## (2) 固有振動数と固有振動モード

表-2 に本橋の固有振動数の実験値と解析値を示す。図-12に解析結果による振動モード形状 (Mode1~Mode4) を示す。本橋の動的試験より 7 個の卓越した固有振動数、振動モードが得られた。それらの固有振動数、振動モードは、アーチ部材のみが水平に挙動する 1 次振動がアーチ水平曲げ対称 1 次振動モードの 2.59Hz であり、橋梁全体が鉛直方向に挙動する振動モードは 2 次振動の鉛直曲げ逆対称 1 次振動モードの 4.00Hz、4 次振動の鉛直曲げ対称 1 次振動モードの 6.64Hz、7 次振動の鉛直曲げ対称 2 次振動モードの 11.43Hz である。橋梁全体がねじられるような挙動をする振動モードは 3 次振動のねじれ逆対称 1 次振動モードの 6.34Hz、6 次振動のねじれ対称 1 次振動モードの 9.67Hz である。また、橋梁全体が水平方向に挙動する振動モードは 5 次振動の水平曲げ対称 1 次振動モードの 6.73Hz である。

固有振動特性を他の道路橋と比較するため、通常のアーチ系鋼橋の鉛直曲げ逆対称 1 次の固有振動数を概算的に算定する式<sup>1)</sup>  $f=154.8L^{-1.057}\text{Hz}$  ( $L$ : アーチ支間長) を用いて本橋の基本固有振動である鉛直曲げ逆対称 1 次振動モードを概算すると、本橋のアーチ支間長は 25.6m であるから 5.03Hz を得る。この値と本橋の鉛直曲げ逆対称 1 次の固有振動数 4.00Hz を比較すると、約 1.3 倍小さい値を示した。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、鉛直振動に関しては約 1.3 倍程小さい値を示すが、同アーチ支間長のアーチ系鋼橋とほぼ同等の鉛直曲げ剛性を有しているものと判断できる。

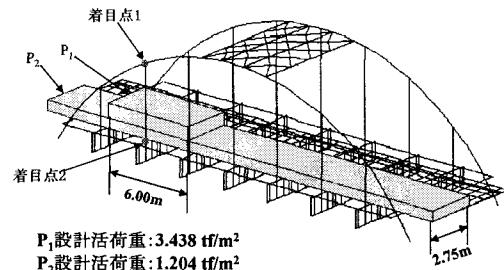
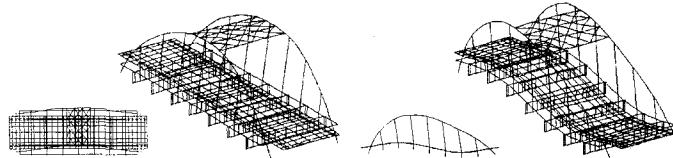


図-11 設計活荷重載荷図と着目点

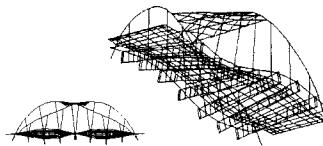
表-2 固有値と固有振動モード

振動 次数	振動モード	固有振動数(Hz)			解析値	
		実験値				
		常時微動	砂袋落下	走行試験		
1	アーチ水平曲げ対称1次	—	—	2.59	2.57	
2	鉛直曲げ逆対称1次	4.08	4.00	—	3.92	
3	ねじれ逆対称1次	6.25	6.34	—	6.17	
4	鉛直曲げ対称1次	6.64	6.64	—	6.88	
5	水平曲げ対称1次	6.91	6.73	—	6.91	
6	ねじれ対称1次	9.72	9.67	—	9.64	
7	鉛直曲げ対称2次	11.25	11.43	—	11.71	

Mode1:アーチ水平曲げ対称1次 Mode2:鉛直曲げ逆対称1次



Mode3:ねじれ逆対称1次



Mode4:鉛直曲げ対称1次

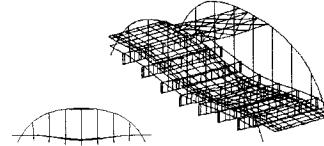


図-12 解析による振動モード

動的試験から得られた固有振動数と振動モードから、アーチ部材の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、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ねじれ、水平方向の曲げ剛性が大きいことを意味している。

また、本橋の固有値解析による解析値と振動モードは、実験から同定された固有振動数、振動モードと同等な値および形状が認められるため解析モデルの妥当性が検証された。

### (3) 減衰定数と減衰特性

表-3に本実験で測定された減衰定数を示す。減衰定数  $h$  の算出には、次式<sup>1)</sup>を用いた。

ここに、 $\delta$  は対数減衰率、X は振幅である。

本橋を代表する減衰定数  $h$  は、鉛直曲げ逆対称 1 次振動モードの 0.0096 と考えられる。構造用集成材を使用した木車道橋は、橋梁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。しかし、鋼橋やコンクリート橋に用いられる減衰定数と支間長の関係を概算的に算出する式<sup>2)</sup>  $h = 0.12/\sqrt{L}$  (L:支間長) を用いて概算すると、本橋のアーチ支間長は 25.6m であるから  $h=0.024$  を得る。この値と本橋の減衰定数を比較すると、一般的な鋼橋やコンクリート橋梁の値よりはるかに小さい値を示す。このことは、本橋の床組構造に縦桁がなく横桁(床桁)のみで床版を支えており、その床版をアーチ部材で吊っている床組の橋軸方向荷重分配があまり期待できない構造上の形式に起因していると考えられる。

#### (4) 動的增幅率 (衝擊係數)

橋梁の設計で用いる衝撃係数は、設計活荷重の割増し係数、いわゆる実質的な荷重係数である。一方、この衝撲係数は、走行荷重が橋梁に与える動的影響としての応答係数の一つとも考えられる。

この衝撃係数を一つの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。

従来の近代木車道橋の設計では、橋梁の形式別、あるいは設計箇所での適用支間長を考慮しない一定値である 0.25 の設計衝撃係数が用いられている。近代木車道橋に関しては、設計実績もあまり多くなく検討に要する基礎データも少ないことから、上述した一つの応答係数として衝撃係数を評価し、そして 0.25 値の妥当性を論議した方が、工学的に有用なように思われる。

実測での動的増幅率に対しては、本橋の設計で用いられた衝撃係数 0.25 との厳密な比較・検討は困難である。それは、設計衝撃係数はあくまで設計活荷重（等分布荷重）に対する動的影響と設計法で

表-3 本実験で得られた減衰定数

振動モード	振動数(Hz)	減衰定数
鉛直曲げ逆対称1次	4.00	0.0096
ねじれ逆対称1次	6.34	0.0112
鉛直曲げ対称1次	6.64	0.0095
ねじれ対称1次	9.67	0.0088
鉛直曲げ対称2次	11.43	0.0163

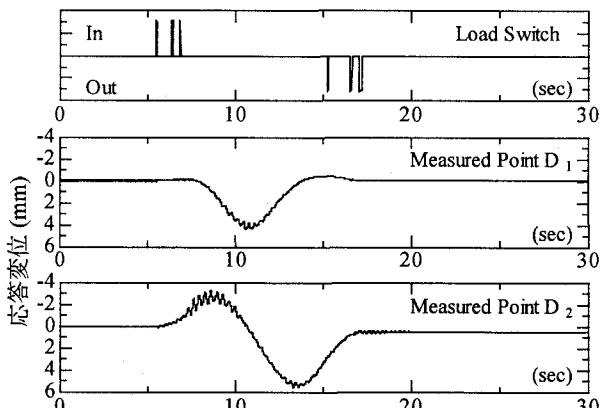


図-13 動的応答変位（1台単独走行・徐行）

定義されており、設計活荷重を実橋の実験で忠実に再現することは非常に困難であることによる。

図-13 に本実験での動的応答変位の一例を示す。また、表-4 に車両走行試験時での各試験ケースにおける動的増幅率を示す。動的増幅率  $i$  の算定には、次式<sup>1)</sup> を用いた。

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

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。

試験車が単独走行時の試験ケースの場合、RU.type4-3 (30km/h) の測定点 D<sub>2</sub> で 0.1364 が最大値を示している。試験車が 2 台連行走行の試験ケースの場合では、RU.type7-2 (15km/h) の測定点 D<sub>1</sub> で 0.1680 が最大値を示している。以上のように、本橋の各試験ケースに対する動的増幅率の最大値は、0.1364～0.1680 程度であった。

試験車両の走行において、単独走行の RU.type4 (30km/h)、2 台連行走行の RU.type7 (15km/h) で得られた動的増幅率は、日常の交通流においてはかなり過酷な荷重走行状態から得られた値である。従って、この時に生じる橋梁の動的増幅率は、一つの応答係数として、実際的な動的影響の実態を評価し得るものである。このことから、実測での動的増幅率の最大値 0.168 を応答係数としての衝撃係数と評価すると、設計衝撃係数の 0.25 より小さく、本橋の衝撃係数は安全側に評価された値が用いられているものと思われる。

### (5) 振動使用性（歩行者の振動感覚）

図-14 に試験車走行試験における応答速度の最大値と各速度ケースにおける平均値と振動の恕限度を示す。恕限度では、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<sup>3)</sup>もしている。通常、使用性に対する恕限度として、応答速度の最大値による 2.4cm/s、すなわち歩行者が「少し歩きにくい」と反応する基準が多く用いられている。

本実験で得た応答速度の最大値と平均値を基に、本橋の使用性を評価する。図-14 より 1 台単独走行、2 台連行走行ともに応答速度の最大値を除いて振動感覚を考えた場合、「振動を明確に感じる」程度の振動感覚を得た。また、試験車が 1 台単独走行（徐行）する際に橋梁の固有振動数と試験車両の固有振動数との共振が考えられるため若干大きい値の応答速度が得られた。

以上の観点から、一般的な大型車両と通常の走行速度による橋梁振動を受ける歩行者の感覚は、「振動を明確に感じる」程度の反応であり、本橋の使用性に関しては特に問題がないものと判断できる。

### (6) アーチ部材振動挙動試験

図-15、図-16 に試験車両走行試験における各測定点の応答加速度を示す。本実験では橋長 3L/4 点の床組の応答加速度と同測定点におけるアーチ部材の応答加速度を比較し検討を行った。

表-4 本実験より得られた動的増幅率  
(最大値、平均値、総平均値)

	Case	測定点	$i$ (最大値)	$i$ (平均値)	(総平均値)
単独走行	RU.type1 (徐行)	D <sub>1</sub>	0.0537	0.0432	0.034
		D <sub>2</sub>	0.0364	0.0248	
	RU.type2 (10km/h)	D <sub>1</sub>	0.0569	0.0487	0.039
		D <sub>2</sub>	0.0345	0.0294	
2 台連行走行	RU.type3 (20km/h)	D <sub>1</sub>	0.0812	0.0571	0.041
		D <sub>2</sub>	0.0453	0.0241	
	RU.type4 (30km/h)	D <sub>1</sub>	0.1164	0.1097	0.109
		D <sub>2</sub>	0.1364	0.1081	
2 台連行走行	RU.type5 (徐行)	D <sub>1</sub>	0.0670	0.0376	0.035
		D <sub>2</sub>	0.0358	0.0320	
	RU.type6 (10km/h)	D <sub>1</sub>	0.1335	0.0790	0.055
		D <sub>2</sub>	0.0362	0.0303	
2 台連行走行	RU.type7 (15km/h)	D <sub>1</sub>	0.1680	0.1096	0.080
		D <sub>2</sub>	0.0990	0.0512	

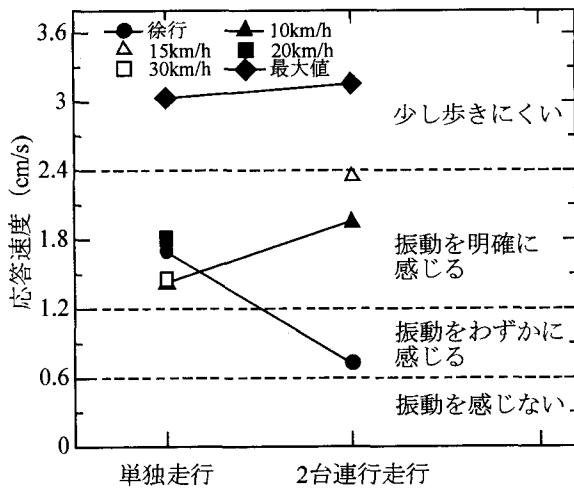


図-14 振動感覚の恕限度

先ず、本橋のアーチ部材の振動挙動測定試験を検討した結果、基本固有振動モード（鉛直曲げ逆対称1次振動モード）において固有値解析結果と同様に、吊り材を介して床版とアーチ部材が連成する挙動が確認された。また、アーチ部材の応答加速度のスペクトルには、常時微動測定試験、砂袋落下衝撃試験より得られた、鉛直曲げ逆対称1次、ねじれ逆対称1次における固有振動数とほぼ同等な値が得られることでも、その挙動を物語っている。

次いで、アーチ部材の鉛直方向の応答加速度は、床版の鉛直方向の応答加速度とほぼ同等の応答レベルを示すことが認められた。しかし、アーチ部材の水平方向の応答加速度では、振動波形で認められるように、応答レベルが鉛直方向より極めて大きなパルス状の特異な波形を示している。この現象の評価は非常に困難であるが、車両がL/4点、L/2点、3L/4点付近を通り過ぎたとき、アーチ部材の負荷（軸力）によって継手部が瞬間にずれを生じているものと思われ、この瞬間的なずれとねじれ車両走行試験によるアーチ部材の水平振動とが連成されたことに起因しているものと考えられる。

#### 4. おわりに

実橋実験と解析の両方から構造特性を検討した結果、本研究の対象橋とした「おおさる橋」の静的剛性評価、静的強度、振動特性を明らかにすると共に、設計条件の妥当性を検証した。また、今後の維持管理等のための初期値データも蓄積することができた。近代木橋の構造特性を同定する方法として用いたモデル化に対しては若干の検討を要するが、本研究の実橋実験と解析の有用性が確認された。

最後に、本橋の実験ご協力を賜りました群馬県および（財）林業土木コンサルタント技術研究所の橋本所長を始め関係者各位に感謝の意を表します。なお、本研究の一部は、平成12年度文部省科研費・基礎研究C（No.11650497）の助成を受けて行ったことを付記する。

#### 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、1993.10.
- 2) 加藤雅史：橋梁の振動調査法とその適用に関する研究、学位論文、pp. 73-74, 1984.7.
- 3) 小堀・梶川：橋梁の人間工学的評価、土木学会論文報告集、No. 230, pp. 23-31, 1974.10.

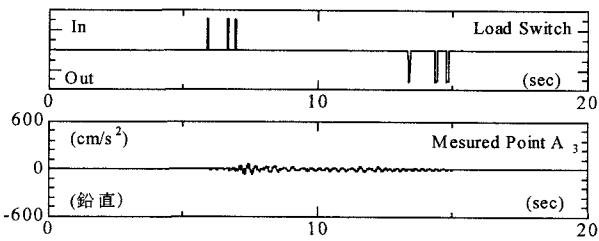


図-15 走行試験による床組の応答加速度

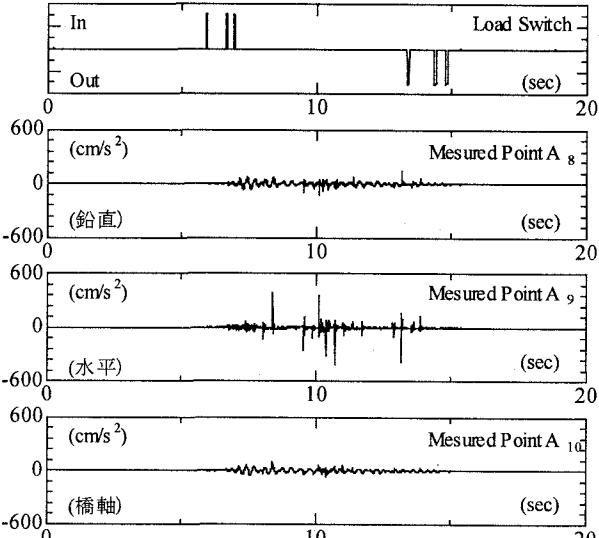


図-16 走行試験によるアーチ部材の応答加速度