

鋼とコンクリートを組み合わせた鉄道橋用主桁の 騒音・振動低減効果に関する実験的研究

An experimental study on the noise and vibration reduction effect
of railway bridge girders combined with steel and concrete

保坂鐵矢*・光木香*・西海健二**・中村俊一***

Tetsuya HOSAKA, Kaoru Mituki, Kenji NISHIUMI and Shunichi NAKAMURA

* 日本鉄道建設公団 設計技術室 (〒100 東京都千代田区永田町 2-14-2)

** 新日本製鐵(株) 鋼構造研究開発センター (〒293 千葉県富津市新富 20-1)

*** Ph. D. 東海大学教授 工学部土木工学科 (259-12 神奈川県平塚市北金目 1117)

Experiments are carried out to verify that the noise and vibration levels of steel I-section girders and pipe girders for railway bridges could be reduced when they are combined with concrete or air mortar. Two instruments, a tapping machine and an impulse hammer, are used to hit and vibrate the test specimens. It is found from the tests using the tapping machine that the steel I-section's noise and vibration levels could be lowered 9 dB when concrete panels are attached to the web plate, and similar effects are also obtained for steel pipe girders when concrete or air mortar are filled inside the pipes. It is also found from the tests using the impulse hammer that damping ratio of steel I-section and steel pipe girders could be improved when they are combined with concrete.

Key Words: *Steel I-girder, Steel pipe girder, Concrete panel, Concrete-filled girders, Noise levels, Vibration levels, Tapping machine, Impulse hammer*

1. 緒言

鉄道用橋梁では列車走行時に発生する種々の騒音や振動に対する対策が不可欠である。これらの騒音・振動のうち代表的なものは車輪がレール上を走行するときに発生する転動音と、橋桁や橋脚が振動して発生する構造音である。一般に、鋼製の橋桁や橋脚はコンクリート製のものに比較して構造音のレベルが高く、近年は鋼製橋梁が敬遠される傾向にある。しかし、鋼製橋梁はコンクリート橋梁に比較して軽く、しかも施工期間が短いなどの利点を有しており、騒音・振動レベルを下げることであれば鋼製橋梁の鉄道橋への適用は十分可能である。本論文は、鋼桁の騒音・振動レベルを下げるために、鋼桁とコンクリートを組み合わせた橋梁用主桁を提案し、その騒音・振動低減効果を実験的に検証するものである。

対象とした橋梁主桁は、従来から利用されている鋼 I 桁のウェブにスタッドを溶接し、さらに用心鉄筋を配置したうえでコンクリートを現場打設した制振コンクリート桁^{1) 2)}、および著者らが開発中のコンクリート等を

内部に充填した鋼管桁³⁾である(図 1 参照)。鋼管や角鋼管は製鉄所で生産されるため、橋桁に組み上げるための溶接量は通常のプレートガーダーに比較して半分以下にまで減少できる。さらに、鋼管内部にコンクリートを充填すれば防音・防振効果も期待できるため鉄道橋用として有望である。ただし、コンクリート等を充填すると重量が増加するため、モルタルもしくはセメントペーストに発泡剤を加えた気泡モルタルの利用も有力である。気泡モルタルは、水セメント比や細骨材や発泡剤の割合を変化させることにより、比重を 0.5 から 1.5 程度まで自由にコントロールすることができ、しかも比較的安価であるため非常に魅力的な材料である⁴⁾。

これらの鋼とコンクリートを組み合わせた橋梁主桁の騒音・振動低減効果を把握するため模型桁を製作し、騒音・振動計測試験を実施した。実験には 2 種類の打音装置、軽量床衝撃音発生器(以下タッピングマシンと呼ぶ)およびインパルスハンマーを用いて、種々の試験体の騒音・振動低減効果の相対比較を試みた。

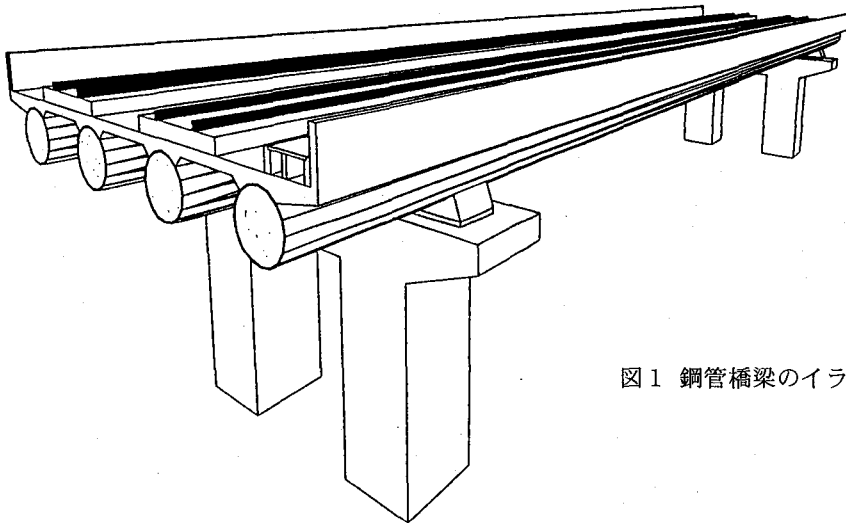


図1 鋼管橋梁のイラスト

2. 試験体の種類

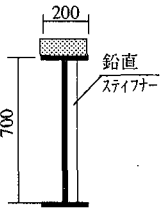
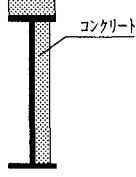
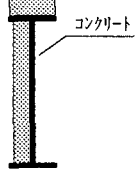
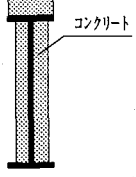
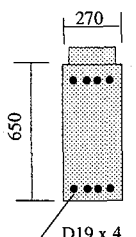
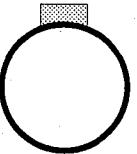
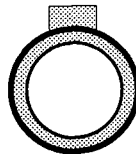
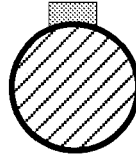
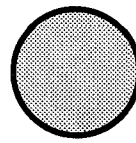
試験体は表1に示す9体であるが、これらは大きく3グループに分類される。鋼I桁を対象としたシリーズ(PN-1)、鋼管桁を対象としたシリーズ(PN-2)、RC桁(PN-3)の3シリーズである。

鋼I桁のシリーズは、未対策の鋼I桁(PN-1A)、ウェブ片側に75mmの制振コンクリートを配置した試験体(PN-1B, 1C)、ウェブ両側に制振コンクリートを配置した試験体(PN-1D)の4体である。制振コンクリートは桁製作時にウェブ面に直接打設した。PN-1BとPN-1Cは同一試験体であるが、PN-1Bでは鋼板側で騒音・振動計測したのに対し、PN-1Cでは制振コンクリート側で計測した。鋼管桁のシリーズは、コンクリート非充填の鋼管桁(PN-2A)、鋼管を二重としその間にコンクリートを充填した二重鋼管桁(PN-2B)、気泡モルタルを充填した鋼管桁(PN-2C)、普通コンクリートを充填した鋼管桁(PN-2D)の4体である。RC桁は相対比較用として用い、矩形R

C桁(PN-3)である。

試験体の断面寸法は実構造物のほぼ1/2~1/3を目安とした。試験体の長さおよび外径寸法により発生する騒音・振動特性は厳密には変化するが、今回の試験では試験体の長さは1.5mとし、試験体の中央部から発生する騒音のみに着目した。コンクリート充填鋼管試験体(PN-2D)は外径609.6mm、板厚7.9mmとし、RC桁試験体(PN-3)の寸法はこのコンクリート充填鋼管試験体(PN-2D)の断面係数約20,000cm³にほぼ等しくなるようにした。非充填鋼管桁(PN-2A)の径および板厚はコンクリート充填鋼管試験体(PN-2D)と同一とし、鋼I桁(PN-1A)の寸法は非充填鋼管桁(PN-2A)の断面係数(2,217cm³)と同一となるように設定した。また、試験では打音時の転動音の影響を小さくするために、全ての試験体の上フランジ部にはコンクリートスラブを想定した厚さ100mm、幅200mmのコンクリートブロックを配置した。また、鋼管の端部にはダイヤフラムを設けた。

表1 試験体の種類

PN-1A (鋼板桁)	PN-1B (鋼板桁)	PN-1C (鋼板桁)	PN-1D (鋼板桁)	PN-3 (RC桁)
				
PN-2A (非充填鋼管)	PN-2B (二重鋼管)	PN-2C (発泡モルタル充填)	PN-2D (普通コンクリート充填)	
 φ 609.6 t7.9	 外鋼管 φ 609.6 t7.9 内鋼管 φ 457.2 t3.2	 φ 609.6 t7.9 発泡モルタル強度 3kgf/cm2	 φ 609.6 t7.9 コンクリート強度 240kgf/cm2	

使用した鋼板の材質は SS400, 鋼管は STK400 とした。普通コンクリートは圧縮強度 240kgf/cm^2 , 粗骨材最大寸法は 10mm とした。また, 気泡モルタルは比重約 0.5 , 圧縮強度約 3kgf/cm^2 とした。

3. タッピングマシンによる騒音・振動試験

(1) 試験方法

第一の試験では, 図 2 に示すように試験体をクレーンガーダーから吊り下げた状態で, 試験体上部にタッピングマシンを設置し衝撃を与え, 発生する騒音・振動を計測した。タッピングマシン⁵⁾は建築物の床の衝撃音レベルの測定に使用される高周波領域の振動・騒音発生装置であり, 直径 3cm の円筒形のハンマーが一直線上に 10cm 間隔で 5 個配列されている。ハンマー 1 個の重量は 500g であり, 5 個のハンマーが 4cm の高さから交互に自由落下して試験体を連続的に衝撃加振する。各ハンマーの衝撃時間間隔は 100ms , 衝撃速度は 88.5cm/s である。この

試験は, 列車走行時に加わる力および振動をタッピングマシンによって模擬したものであるが, 各試験体の相対的な構造音に着目した騒音・振動低減効果を評価することを主目的としているため, 列車走行時の加振力とタッピングマシンの加振力特性との厳密な整合性および発生騒音・振動レベルの絶対値についての評価は本論文の検討外とした。写真 1 と 2 にタッピングマシンによる実験状況を示す。

(2) 計測方法

図 2 には騒音および加速度の計測位置も示されている。騒音測定には周波数領域 2.6Hz から 20kHz が測定可能な 3 台のマイクを使用した。マイク 1, 2, 3 は, 試験体の側面からそれぞれ 10cm , 1m , 2m の位置に設置した。マイク 1 は試験体直近の音を計測して構造音のみを取り出すとともに, 加速度センサーで検出した試験体の振動との対応を検討することを目的とした。マイク 2, 3 は試

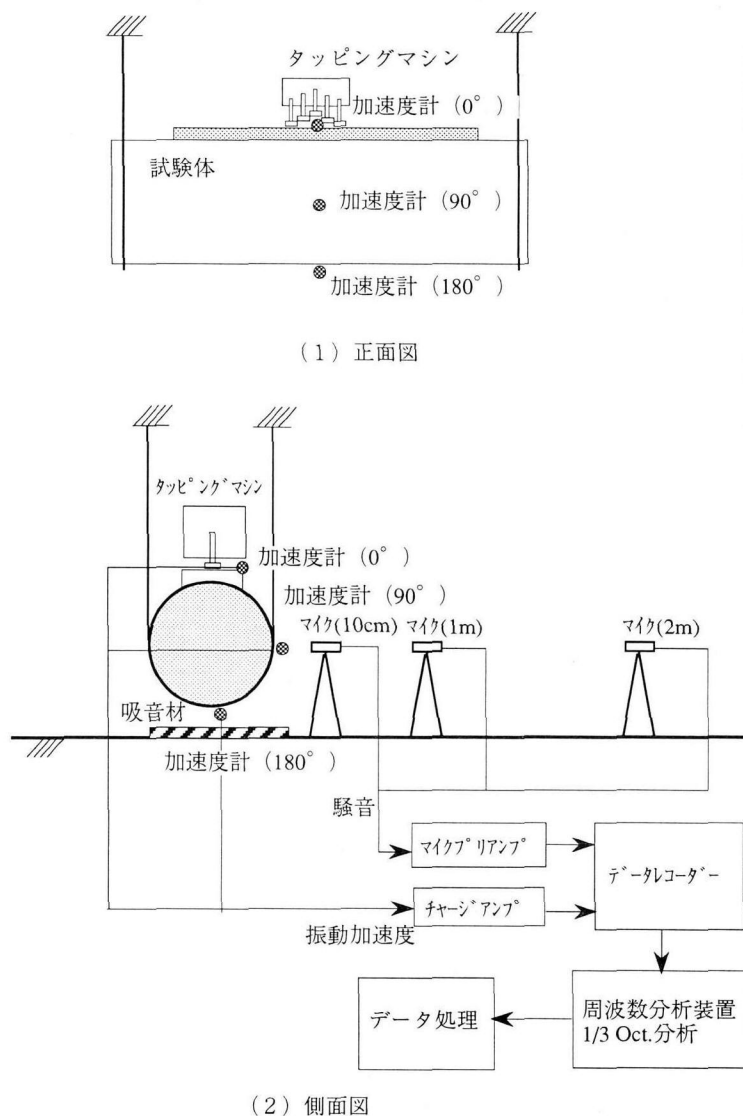


図 2 タッピングマシンおよび計測器配置

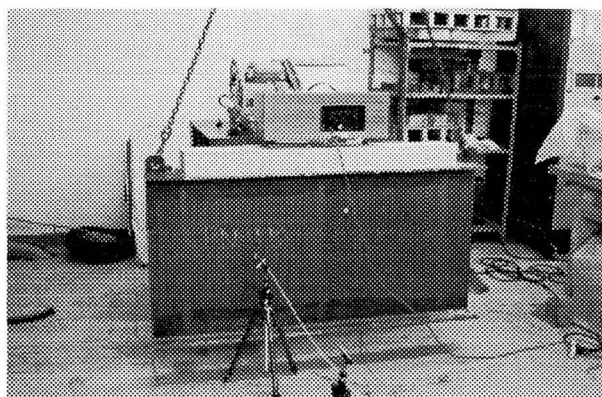


写真 1 タッピングマシンによる実験状況 (PN-1A)

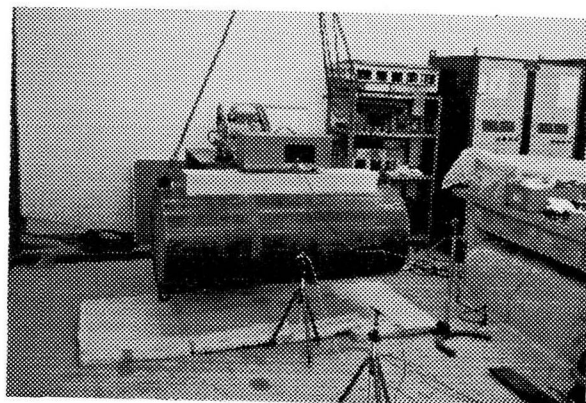


写真 2 タッピングマシンによる実験状況 (PN-2A)

験体からの騒音レベルの距離減衰効果の検討を目的とした。

加速度測定には周波数領域 0.1Hz から 16.5kHz の領域が測定可能な 3 台の加速度センサーを使用した。加速度センサーは試験体の中央断面内の 3 力所、すなわち上部 (0°), 側面 (90°), 下部 (180°) に設置した。側面部センサーは、騒音収集マイク 1 と近接しており、騒音レベルと加速度レベルの対応が検討できる。上部センサーは加振面となるコンクリートブロック上に設置し、加振力の大きさを検討できるようにし、下部センサーは加振点と反対側での振動を観察し下面からの音の発生状況を確認できるようにした。

一般に騒音測定試験は音響試験室を用いて行うことが望ましいが、今回は試験体の極近傍から発生する騒音のみに対象を限定し、通常の構造試験室を用いた。試験体の直下には、床面からの反射音を防止するために吸音材(グラスウール)を敷いた。また、暗騒音をなるべく排除するため、外部騒音が小さい静かな時間帯を用いて実験を行った。また、タッピングマシンの打撃力は試験体を吊り下げているクレーンガーダーに有意な振動を起こさせるレベルには達していなかった。

(3) 騒音および振動レベルの測定結果

タッピングマシン打撃時に試験体から 10cm, 1m, 2m の位置にセットしたマイク 1, 2, 3 で得た騒音のオーバーオール値を図 3 に示す。騒音レベル L_p (dB) は式 (1) と定義した。

$$L_p = 10 \log_{10} (I/I_0) \quad (1)$$

ここで、 I : 測定された音の強さ (W/m^2), I_0 : 基準となる音の強さ $10^{-12} (W/m^2)$ である。これらは得られた生データを聴感の周波数特性とみなせる A 特性⁶⁾で補正したデータである。マイク 1, 2, 3 の順で騒音レベルが下がる傾向にあるが、3 本の線はほぼ同一の傾向を示している。10cm 位置のマイク 1 の結果に関して各試験体間の騒音オーバーオール値を比較すると、未対策の鋼 I 桁 (PN-1A) の騒音レベルが 97.7dB, コンクリート非充填鋼管桁 (PN-2A) が 96.4dB と最も高く、コンクリート桁 (PN-3) は 78.4dB と最も低い。やはり、通常言われているとおり鋼桁はコンクリート桁に比べて騒音レベルが高いことが確認できる。一方、鋼 I 桁の片側にコンクリートパネルを取り付けた試験体では、鋼ウェブ側の測定データ (PN-1B) で 88.9dB, コンクリートパネル側で 87.6dB と未対策桁 (PN-1A) に比較してそれぞれ 8.8dB および 10.1dB 低下した。さらに、ウェブ両側にコンクリートパネルを取り付けた試験体 (PN-1D) の騒音レベルは 84.4dB であり 13.3dB も低下した。また、二重管 (PN-2B) の騒音レベルは 87.5dB, 気泡モルタル充填鋼管桁 (PN-2C) は 89.1dB, コンクリート充填桁 (PN-2D) は 83.6dB となり、コンクリート

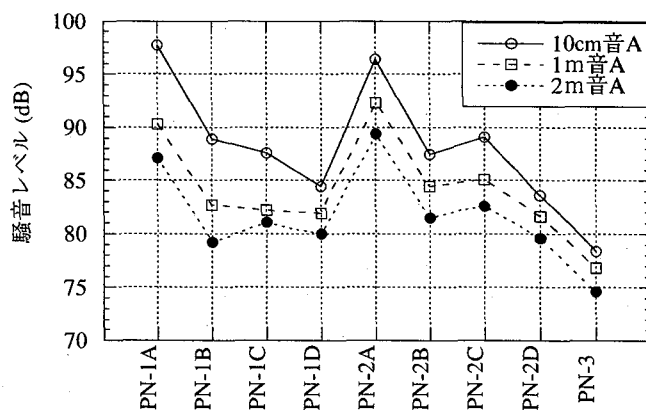


図 3 騒音オーバーオール値

非充填鋼管桁 (PN-2A) に比べてそれぞれ 8.9dB, 7.3dB, 12.8dB 低下している。したがって、RC 桁の 78.4dB には及ばないものの、コンクリートと組み合わせることにより鋼 I 桁および鋼管桁とも騒音レベルを低減することが可能であることが認められた。

次に、タッピングマシンによる打撃時に得られた各試験体の振動レベルのオーバーオール値を図 4 に示す。振動レベル VAT (dB) は式 (2) と定義した。

$$VAT = 20 \log_{10} (a/a_0) \quad (2)$$

ここで、 a : 測定された振動加速度 (m/s^2), a_0 : 基準となる振動加速度 $10^{-5} (m/s^2)$ である。図中には試験体の中央断面内の試験体上部 (0°), 側面 (90°), 下部 (180°) に設置したセンサーにより計測された 3 種類のデータを示した。タッピングマシン打撃部である試験体上部 (0°) の RC 台座面の振動レベルはすべての試験体で 103.2~106.8dB の間にあり、タッピングマシンによる加振力がほぼ一定であることを示している。

試験体側面の振動レベル (90°) をみると、未対策の鋼 I 桁 (PN-1A) が 111.0dB, コンクリート非充填鋼管桁 (PN-2A) が 113.2dB であり、騒音レベルと同じく他の試験体よりかなり大きい値を示している。一方、鋼 I 桁の片側にコンクリートパネルを取り付けた試験体では、鋼ウェブ側の測定データ (PN-1B) で 94.0dB, コンクリートパネル側で 85.8dB, ウェブ両側にコンクリートパネルを取り付けた試験体 (PN-1D) では 89.2dB とそれぞれ 17.0dB, 25.2dB および 21.8dB 低下した。また、二重管 (PN-2B) の振動レベルは 92.4dB, 気泡モルタル充填鋼管桁 (PN-2C) は 101.7dB, コンクリート充填桁 (PN-2D) は 96.9dB となり、コンクリート非充填鋼管桁 (PN-2A) に比べてそれぞれ 20.8dB, 11.5dB, 16.3dB 低下している。RC 桁の振動レベルは 93.0dB であり、コンクリートパネルを取り付けた鋼 I 桁や二重管桁はこれと同等以下になっており、コンクリートと組み合わせることの効果が大きいことがわかる。

試験体下面の振動レベル(180°)と側面の振動レベル(90°)との関係は必ずしも明確でない。多くの試験体では側面と下面の値がほぼ一致しているが、PN-1A, PN-1C, PN-2D, PN-3 では両者の値がかなり異なっている。部材内での振動伝播経路の違いが影響していると考えられるが、この点の解明については今後の課題とした。

振動レベルと騒音レベルの比較を図5に示す。両者とも単位は dB ではあるが基準値が異なるため絶対値の比較はできないが、前述したように未対策の鋼 I 桁とコンクリート非充填鋼管桁がいずれも他より高いことが理解できる。また、コンクリートパネルを取り付けた鋼 I 桁や二重管桁は振動レベルでは RC 試験体と同等以下になっているが、騒音レベルではいずれも RC 試験体には及ばない。この原因としては、試験体表面の材質に基づく音響放射率の違いが影響していると推定できる⁷⁾。すなわち、コンクリートは鋼と振動レベルが同じでも、音響放射率が小さいため騒音レベルは低くなると考えられる。

一般に、構造物の質量が大きいほど振動が減衰しやすいために騒音レベルは低いと言われている。そこで、各試験体の質量と 10cm 位置で計測した騒音レベル(A 特性)の関係を図6に示す。この図では、鋼板面での計測値とコンクリート面での計測値を各々表示しているが、

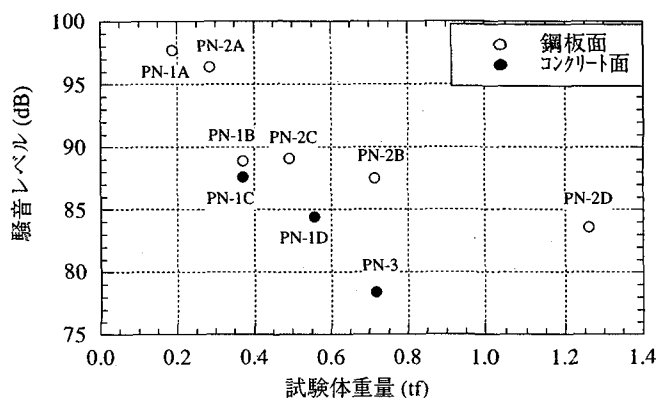


図6 質量による騒音レベル

全体的な傾向としては質量が大きいほど騒音レベルが低下すると言える。さらに、質量が同じ場合では、コンクリート面での騒音レベルの方が鋼板面での値より小さいことが理解できる。これは、前述したようにコンクリートの音響放射率が鋼より優れるためである。ただし、図4の PN-3 の試験結果に見られるようにコンクリート試験体では下面より側面での振動・騒音レベルが小さくなる可能性があることには注意する必要がある。

(4) 騒音レベルの周波数特性の比較

鋼 I 桁試験体および RC 桁試験体のタッピングマシンによる加振試験により得られた 10cm 位置における騒音レベルの周波数特性を図7に示す。ここでは、周波数特性を論ずるため A 特性に変換せず、生データを使用している。未対策の鋼板桁 (PN-1A) では、1kHz~8kHz の高周波数領域において他の試験体より高い騒音レベルにある。100Hz~160Hz にもピークはあるが、他の試験体には全く見られないため、これは構造音ではなく周囲の暗騒音であると推定された。ウェブ片側にコンクリートパネルを配置することにより (PN-1B, 1C)、この 1kHz~8kHz の高周波数領域で騒音レベルが約 8dB 低下し、ウェブ両側にコンクリートを配置することにより (PN-1D) さらに約 3~5dB 低下した。

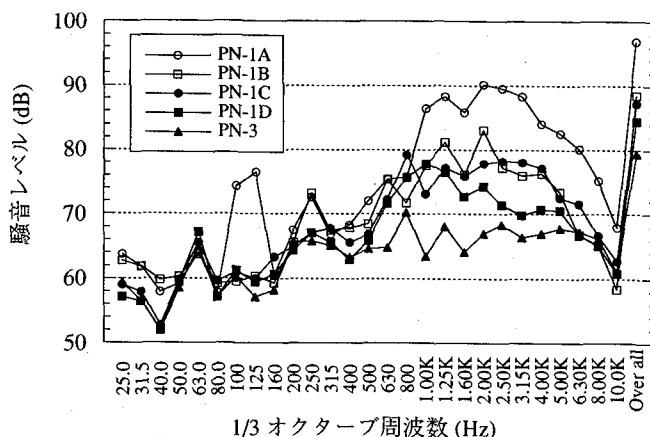


図7 騒音レベルの周波数特性(鋼 I 桁, RC 桁)

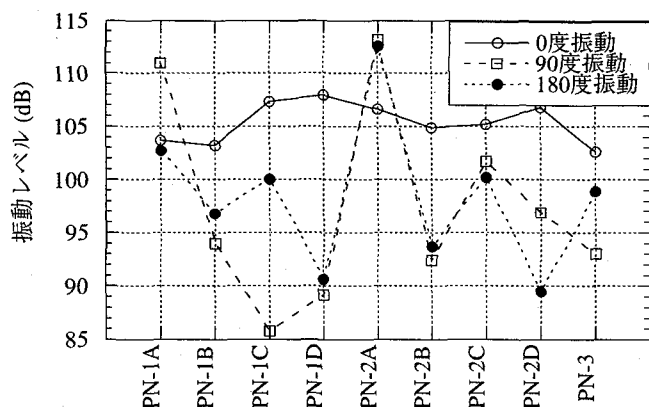


図4 振動オーバーオール値

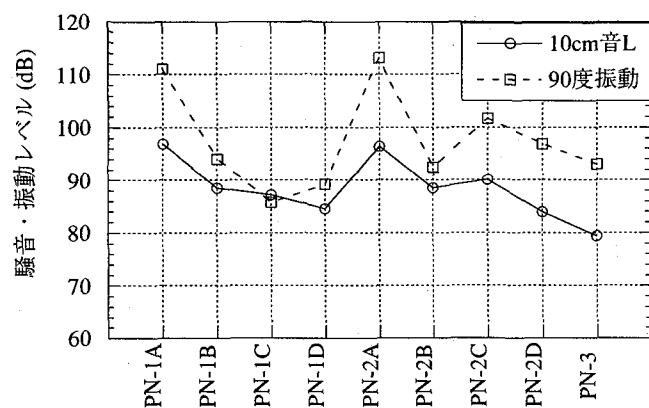


図5 騒音と振動オーバーオール値の比較

同様に、鋼管桁試験体およびRC桁試験体の騒音レベルの周波数特性を図8に示す。非充填の鋼管桁(PN-2A)では200Hz～8kHzの広い周波数領域において他の試験体より高い騒音レベルにある。しかし、二重鋼管(PN-2B)または気泡モルタルを充填すること(PN-2C)により100Hz～400Hzの領域と1kHz～8kHzの2つの領域で騒音レベルが約10dB低下した。また、普通コンクリートを充填することにより(PN-2D)全体的にさらに約3dB低下しており、コンクリート充填の効果が確認できる。

(5) 距離減衰

騒音は空気中に拡散するため、騒音レベルは距離とともに低減する。本試験で得られた10cm, 1m, 2mの3カ所での騒音レベルの測定結果を図9, 図10, 表2に示す。当然、全ての試験体で減衰効果が出ており、10cmと1mの間で1.6dBから7.4dB, 1mと2mの間では1.1dBから3.5dB低減している。

図9の鋼I桁のシリーズに着目すると、未対策鉄桁(PN-1A)と片側コンクリート鋼板側計測(PN-1B)が距離による減衰効果がやや高い。一般に、高周波数の騒音は距離減衰の影響が大きいと言われており、図7と8に示したようにこの2体とも500Hz～4kHzの高周波数領域での騒音レベルが高くなっているため距離減衰が大きくなったと推定できる。一方、図10の鋼管桁のシリーズでは試験体間の距離減衰に大きな差はみられない。

音源が点音源か線音源かによって距離減衰の推定式は異なる⁹⁾。点音源である場合には、式(3)により距離が2倍になれば6dB低下することとなる。一方、音源が線音源の場合には式(4)により距離が2倍になれば3dB低下することとなる。したがって、表2に示した1mと2mの位置における騒音レベルの差は各試験で差があるものの、約2～3dB低下していることから本試験の音源は線音源に近いと考えられる。

$$L_p = L_w - 10\log_{10}4\pi - 10\log_{10}r^2 \tag{3}$$

$$L_p = L_w - 8 - 10\log_{10}r \tag{4}$$

ここで、L_p:音源から距離rの音圧レベル(dB), L_w:音源のパワーレベル(dB), r:音源からの距離(m)である。

4. インパルスハンマーの打撃による振動実験

(1) 試験方法

第二の実験はインパルスハンマーを用いた打音試験である。実験の様子を写真3に示す。インパルスハンマーは通常のかなづちのような形状であるが、先端のチップ部に加振力を検出できるセンサーを埋め込んである⁹⁾。これで通常のハンマーと同じ要領で試験体を打撃すると、ホワイトノイズの振動を発生できる。このインパルスハンマーにより試験桁端部の側面を打撃し、試験桁中

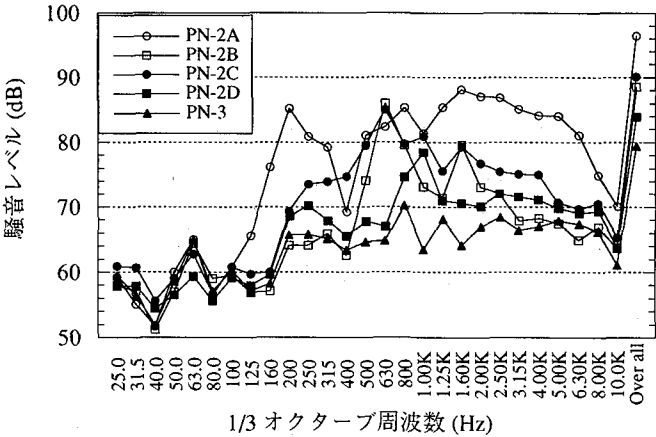


図8 騒音レベルの周波数特性(鋼管桁, RC桁)

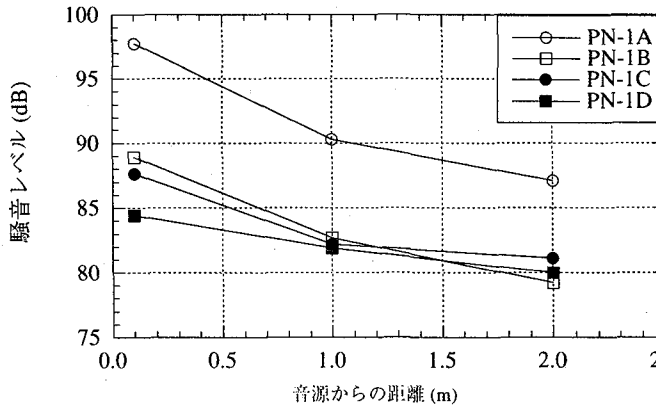


図9 距離減衰(鋼I桁)

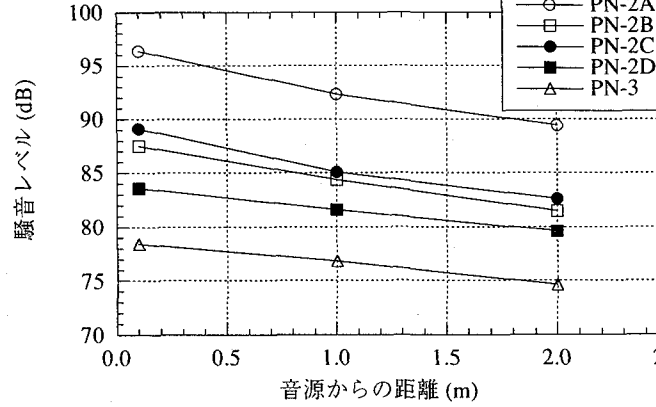


図10 距離減衰(鋼管桁, RC桁)

試験体	騒音低減(dB)	
	0.1-1.0m	1.0-2.0m
PN-1A	7.4	3.2
PN-1B	6.2	3.5
PN-1C	5.4	1.1
PN-1D	2.5	1.9
PN-2A	4.1	2.9
PN-2B	3.1	2.9
PN-2C	4.0	2.5
PN-2D	2.0	2.0
PN-3	1.6	2.2

表2 距離減衰

中央部の加速度センサーで振動を計測し、部材の振動伝達関数を求める。そして、この結果より試験体のダンピング性能、振動レベル、共振点の数を評価する。

振動伝達関数 A/F はインパルスハンマーの加振力 F と、試験体中央側面の加速度センサー（90°）で計測した振動加速度 A を用いて、

$$A/F = 20 \log_{10} VA/VF \quad (5)$$

と定義した。ここで、 VA :測定された加速度の電圧レベル、 VF :インパルスハンマー打撃力の電圧レベルであり、いずれも全ての試験体に同一の電圧レンジを用いた。この式からもわかるように、ここで定義した振動伝達関数はあくまで試験体間の相対値を比較するものであり、その絶対値には物理的な意味はない。

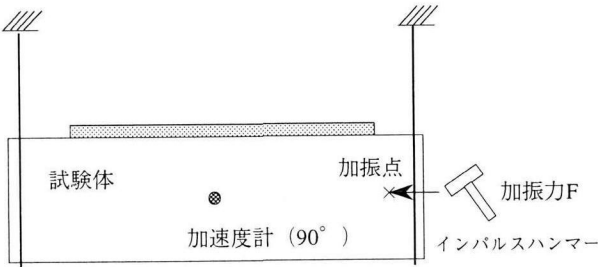


図 11 インパルスハンマー打撃位置および計測位置

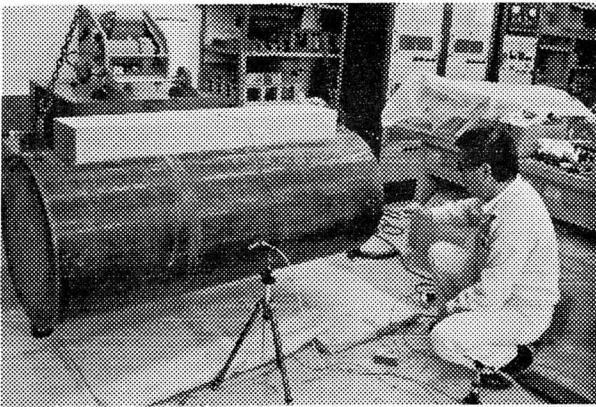


写真 3 インパルスハンマーによる試験状況

(2) 計測結果

得られた振動伝達関数を図 12 から図 18 に示す。図 12 の未対策の鋼 I 桁試験体 (PN-1A) の振動伝達関数では、低周波域から高周波域まで共振点が多数存在し、そのレベルは他の試験体計測結果より高い。さらに、鋭い共振波形を示しており、ダンピング性能が小さいことを示している。一方、片側にコンクリートを配置した試験体 (PN-1B) の図 13 の振動伝達関数では、全周波数領域で共振点が少なくなっている。これは、音源の数が少ないことを意味している。さらに、振動レベルも低く、波形が丸

みを帯びてダンピングが大きくなっていることが理解できる。

同様の傾向がコンクリートを充填した鋼管に関してもうかがえる。図 14 の非充填鋼管桁 (PN-2A) に比較して、図 15, 16, 17 の振動伝達関数では、共振点の数が減り、振動レベルも低く、波形が丸みを帯びてダンピングが大きくなっている。とくに、図 15 の二重鋼管 (PN-2B) では振動レベルが図 18 のコンクリート桁 (PN-3) とよく似た傾向にある。

これらの振動伝達関数のピーク波形からハーフパワー法により各試験体の減衰定数を求めた。その最大値と最小値を図 19 に示す。この図から、鋼 I 桁および鋼管桁の減衰定数は 0.001-0.01 であるが、鋼 I 桁にコンクリートパネルを配置する、もしくは鋼管にコンクリートを充填することにより、試験体の減衰定数は 0.01-0.1 となり、10 倍程度増加することが確認できた。

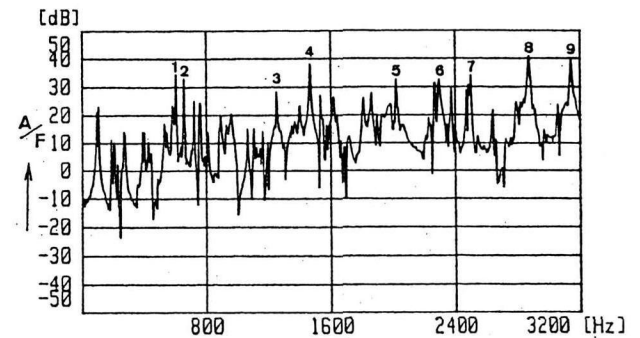


図 12 振動伝達関数 (PN-1A)

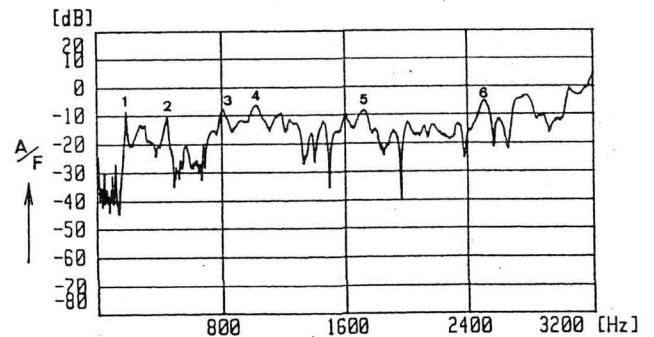


図 13 振動伝達関数 (PN-1B)

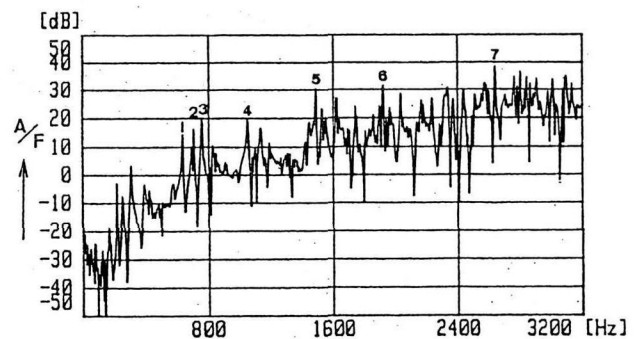


図 14 振動伝達関数 (PN-2A)

このように鋼桁にコンクリートを組み合わせれば、共振点の数を減らし、振動レベルを低下し、さらにダンピング性能も向上できることがインパルスハンマーを用いた試験により明らかとなった。

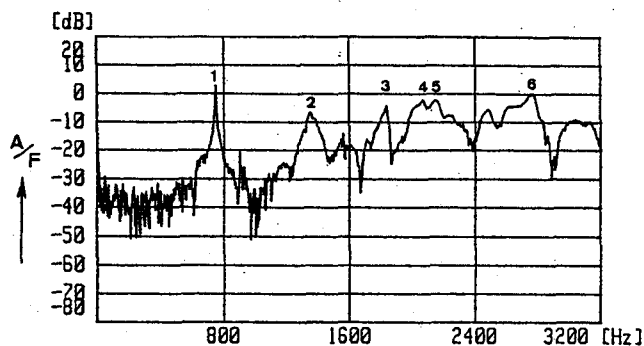


図 15 振動伝達関数 (PN-2B)

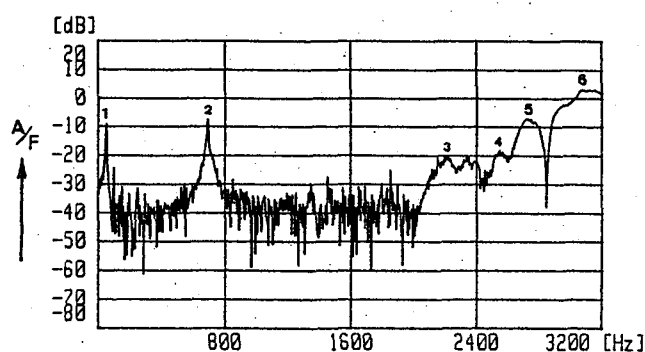


図 16 振動伝達関数 (PN-2C)

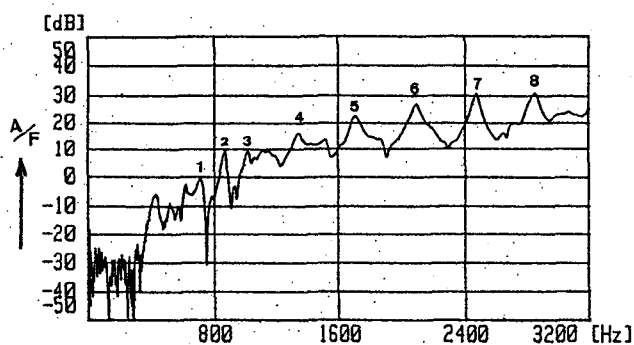


図 17 振動伝達関数 (PN-2D)

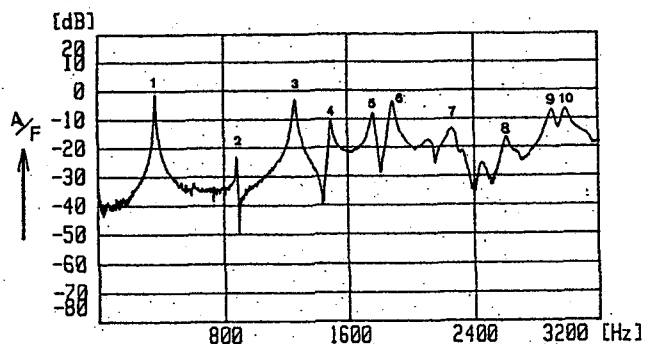


図 18 振動伝達関数 (PN-3)

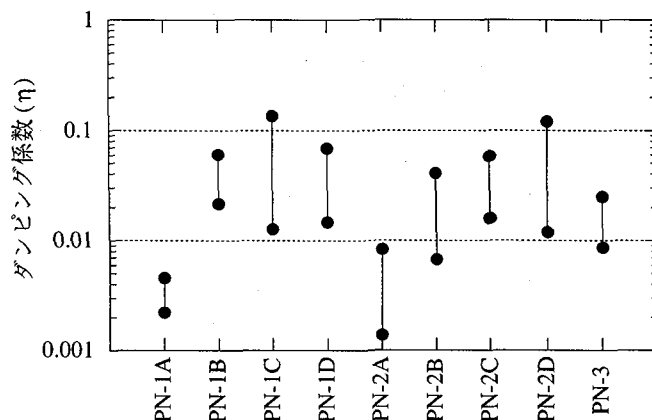


図 19 ダンピング性能比較

5. 結言

鉄道橋用の鋼 I 桁および鋼管桁を対象とし、鋼とコンクリートを組み合わせた橋梁主桁の騒音・振動低減効果を把握するため模型桁を製作し、騒音・振動計測試験を実施した。実験には タッピングマシンおよびインパルスハンマーを用い、試験体の騒音・振動低減効果の相对比较を試みた。

タッピングマシンによる模型試験体の打音試験では、以下のことが明らかとなった。

- (1) 未対策の鋼 I 桁試験体はコンクリート桁試験体に比較して約 19dB 高い騒音レベルであったが、制振コンクリートをウェブに設置することにより約 9-11dB 程度騒音レベルが低減した。
- (2) コンクリート非充填の鋼管桁もコンクリート桁より約 18dB 程度高い騒音レベルであったが、二重鋼管または気泡モルタルの充填により約 7dB~9dB 騒音レベルが低減した。さらに普通コンクリートを充填鋼管桁では、非充填桁と比較して約 13dB 騒音レベルが低減した。
- (3) 振動レベルでも、未対策の鋼 I 桁およびコンクリート非充填鋼管桁が他の試験体よりかなり大きい値を示した。一方、鋼 I 桁の片側に制振コンクリートを取り付けた鋼 I 桁試験体、二重管試験体、気泡モルタル充填鋼管桁、コンクリート充填桁、コンクリート非充填鋼管桁に比べて 10-20dB 程度低下した。とくに、制振コンクリートを取り付けた鋼 I 桁や二重管桁は RC 桁の振動レベルと同等以下であった。
- (4) 振動レベルと騒音レベルの比較した場合、制振コンクリートを取り付けた鋼 I 桁や二重管桁は振動レベルでは RC 試験体と同等以下になっているが、騒音レベルではいずれも RC 試験体には及ばない。この原因としては、試験体表面の材質に基づく音響放射率の違いが影響していると推定できる。

- (5) 全体的な傾向としては質量が大きいほど騒音レベルが低下した。さらに、質量が同じ場合では、コンクリート面での騒音レベルの方が鋼板面での値よりも小さかった。
- (6) 周波数分析の結果では、鋼 I 桁に制振コンクリートを配置することにより 1kHz～8kHz の高周波数領域の騒音レベルが低減し、鋼管内に気泡モルタルおよび普通コンクリートを充填することにより 100～400Hz と 1～8kHz の広い周波数領域の騒音レベルが低減した。
- (7) 試験体側面から 10cm, 1m, 2m の 3カ所での騒音レベルの測定結果により、10cm と 1m の間で約 1.6dB から 7.4dB, 1m と 2m の間では 1.1dB から 3.5dB 低減し、線音源に近い減衰性能を示した。

インパルスハンマーによる模型試験体の打音試験では、以下のことが明らかとなった。

- (1) 未対策の鋼 I 桁試験体の振動伝達関数では、低周波域から高周波域まで共振点が多数存在し、そのレベルは他の試験体計測結果よりも高く、鋭い共振波形を示した。一方、片側にコンクリートを配置した試験体の振動伝達関数では、全周波数領域で共振点が少なく、振動レベルも低く、ダンピングが大きいため波形が丸みを帯びていた。
- (2) コンクリートを充填した鋼管の振動伝達関数でも、非充填鋼管桁に比較して共振点の数がへり、振動レベルも低く、波形が丸みを帯びてダンピングが大きくなった。とくに、二重鋼管では振動レベルはコンクリート桁とよく似た傾向にあった。
- (3) 振動伝達関数のピーク波形からハーフパワー法により求めた各試験体の減衰定数は、鋼 I 桁および鋼管桁で 0.001-0.01, 鋼 I 桁にコンクリートパネルを配置した試験体や鋼管にコンクリートを充填した試験体では 0.01-0.1 となり、10 倍程度増加した。

以上の 2 つの実験結果より、橋桁の制振性能に関して以下のことが明らかになった。

- (1) 現在開発中の普通コンクリートを充填した鋼管桁の制振性能は、従来鋼鉄道橋で用いられてきた制振コンクリート鋼 I 桁とほぼ同等である。
- (2) 現在実橋で用いられている片側ウェブのみに制振コンクリートを設置した鋼 I 桁は、両側ウェブに制振コンクリートを設置してもその制振性能はほぼ同等であると推定された。
- (3) 本実験では、コンクリート桁の制振性能がコンクリートと組み合わせた鋼桁より若干優れていた。しかし、実際には鋼桁上にコンクリート床版が打設されているため、実構造物では両者の差異はさらに縮まると予想される。

以上、鋼橋の騒音振動性能の向上にはコンクリートとうまく組み合わせることが有効であることを実証した。今後、実験および解析の深度化や、実橋での測定などを実施し、新しい合成構造形式の省力桁の開発を進めていく所存である。

最後に、本実験の実施およびデータ解析に日鐵テクノロジー（株）の座間芳正氏から多大な協力を得た。ここに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団：鋼橋防音工の設計施工の手引き, 1987. 6.
- 2) 小林進, 保坂鐵矢：制振工を施した合成桁の施工, 鉄道土木, 16 巻 11 号.
- 3) 保坂鐵矢, 中村俊一, 西海健二：鋼管桁の曲げ耐力および R C 床版とのずれ止めに関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 43A, 1997. 3.
- 4) 横田聖哉, 三島信雄：気泡混合軽量土を用いた人工軽量地盤, 土と基礎, 1996. 5.
- 5) JIS A 1418：建築物の現場における床衝撃音レベルの測定方法.
- 6) JIS Z 8731：騒音レベル測定方法.
- 7) 白木万博：騒音防止設計とシミュレーション, 応用技術出版.
- 8) 日本音響材料協会：騒音対策ハンドブック, 技法堂.
- 9) 田中基八郎, 三枝省三：振動モデルとシミュレーション, 応用技術出版.