

個別検討内容の報告 (No. 4)

- § 1. 題 目 橋梁の振動制御に関する調査研究
(副振動体を用いた磁気摩擦制振について)
- § 2. 日 時 昭和61年 9月19日
- § 3. 発表者 丸山 暉彦 <長岡技術科学大学 建設系>
- § 4. 概 要 磁気摩擦を利用した橋梁の制振方法について実験的に検討したものである。
- § 5. 意見等
- § 6. 備 考 本報告は電気通信学会電気音響研究会において口頭発表されたものである。

副振動体を用いた磁気摩擦制振について

The Magneto-friction Damping using Sub Vibrating Unit

吉川昭吉郎 田代 裕 高橋 修 丸山暉彦 小長井一男
S. Yoshikawa Y. Tashiro O. Takahashi T. Maruyama K. Konagai

長岡技術科学大学

The Technological University of Nagaoka

1. まえがき

構造物の振動抑制には、動吸振器、オイル・ダンパーなど、昔からさまざまな方法が提唱されている。

本研究室でも数年前より、振動体に磁石を付着し付着面に摩擦を発生させて制振を行う、磁気摩擦制振について研究を行っている。

この磁石の付着方法には二通りあり、一つは磁石のみを振動体に付着するだけの慣性方式、もう一つは振動体に磁石を付着する際、磁石自身が運動できないように他の構造物に固定してしまう拘束方式である。並木、高橋(彰)らは、比較的単純な構造物を用いてこの二つの方法に対して衝撃加振実験を行い、双方の方法で制振効果が認められたことを報告している^{1), 2)}。更に高橋(彰)は慣性方式の場合、摩擦力、磁石の質量及び外力の大きさが制振効果に大きく作用し、最も制振される最適な状態が存在することを明らかにしている³⁾。

昨年、我々は定常加振のもとで実験を行った結果、外力の振動数が高いときは、慣性方式、拘束方式双方で制振効果が認められたが、外力の振動数が低いときには拘束方式が有効であることを確認した。

今回は、これらの結果をもとに橋梁の振動の抑制に、磁気摩擦制振を適用することを考え、模型橋を用いて実験を行うことにした。

2. 概要

2-1 磁気摩擦制振とは

基本的な原理は、振動体にクーロン摩擦を発生させ、振動エネルギーを熱エネルギーに変換することにより振動を抑制するものである。この時摩擦力を得るために必要な摩擦面に垂直に働く力を磁石の吸着力から得ていることが、この磁気摩擦制振の特長である。そしてこの磁石の振動体への付着方法は、最初に述べたように二通りある。Fig-1(a)に慣性方式を、また(b)に拘束方式を示す。

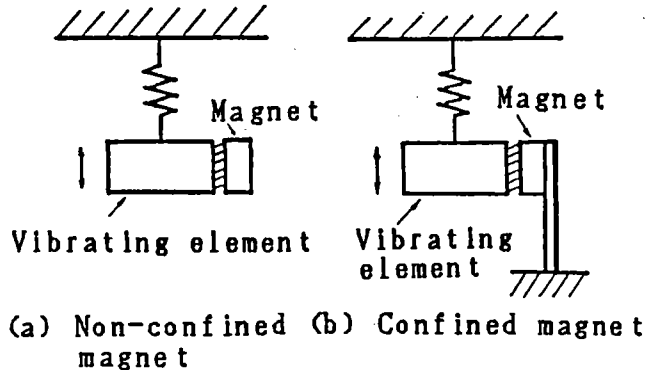


Fig-1 Two methods of attaching magnet.

今回、制振対象とした振動はたわみの振動であり、実際の橋梁では非常に低い振動数(数Hzのオーダー)となる。この場合、まえがきにも述べたように、拘束方式による磁気摩擦制振が有効である。

2-2 磁気摩擦制振の橋梁への適用

実験対象として用いた模型橋を、Fig-2に示

す。模型橋のスケール比は1/8である。図には後ほど説明する、副桁(sub girder)もあわせて示した。

まず、この模型橋を例に橋梁の主要部位の説明をする。

- ・床版(slab)：いわゆる道路の車両走行部分という。実橋では、鉄筋コンクリートの上にアスファルトが舗装されている。模型橋ではPSコンクリートを用いた。
- ・主桁(main girder)：床版を支えている桁という。実橋の場合、鋼鉄製であるが、模型橋では、軟鉄(SS41)を用いた。また、模型橋の主桁は3本あるが、以後の説明を簡便にするためにそれぞれの主桁に①、②、③と番号を割りふる。

次に、橋梁に対する具体的な制振システムを考える。まず、摩擦面の位置は橋梁のL/2点(L：橋梁支間長)とする。これは、車両の通行

によりこの点が第一モードの腹となり、最も変位が大きいと考えられるためである。

磁石の固定方法としてまず考えられるのは、拘束方式のモデルとしてFig-1(b)に示したように、大地に対して中間支柱などを設け固定するものである。Fig-3(a)は、中間支柱を橋梁に用いた場合を示す。しかし、この中間支柱は架橋場所の地形によって施工が困難となる場合が多いことや、美観の保全に問題が有り、実用的ではない。

そこで中間支柱に代わる方法として、副桁による磁石の固定方法を考えた。これはFig-3(b)に示すように、主桁と平行に別に桁を設け、そこに磁石を固定するものである。(以後この新たな桁を副桁、副桁を用いた制振方法を副桁制振、この制振システムを副桁制振機構とそれぞれよぶ。)なお、今回用いた副桁は、実際に施工可能と考えられる最大規模のものを1/8にスケール・ダウンしたものである。

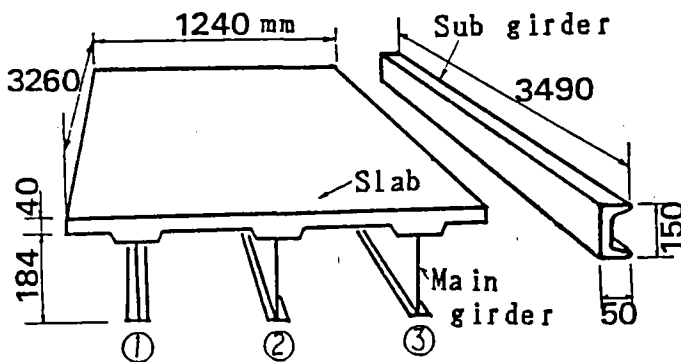


Fig-2 Model bridge.

2-3 副桁制振機構のメカニズム

この副桁は、主振動体である橋梁に対し一種の副振動体となる。従って橋梁及び副桁を最も単純な一自由度に置きかえ、この系をモデル化するとFig-4のようになる。

つまり、制振のメカニズムとして先に述べた振動エネルギーの摩擦による熱エネルギーへの変換の他に、主振動体の振動エネルギーが副振動体へ移行することによる制振の効果も考えられる。

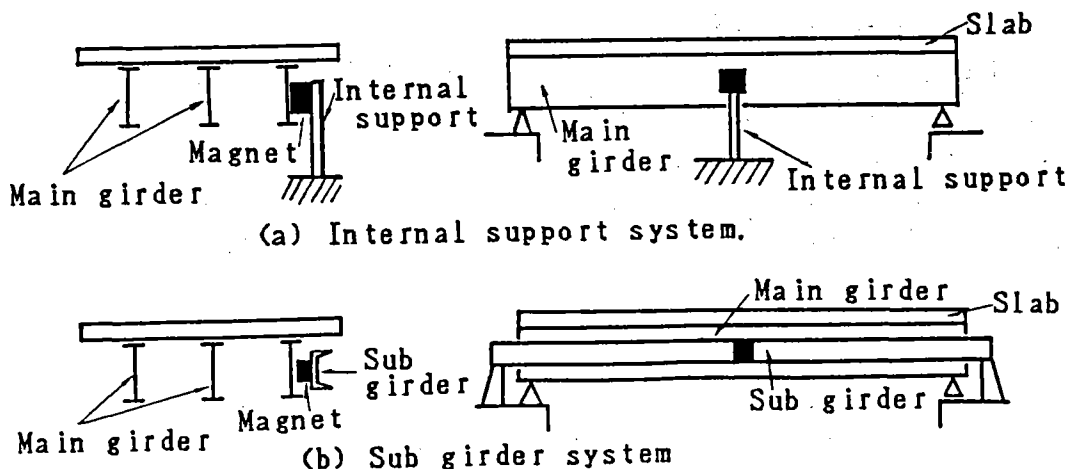


Fig-3 Two systems of magneto-friction.

3. 実際に実験で用いた副桁制振機構

3-1 磁石について

磁石は、直流電磁石でこの電磁石に摩擦面として、厚さ0.3mm、大きさ70x70mmステンレス鋼板 (SUS304) を貼りつけた。その外観をFig-5に示す。

模型橋には、主桁中央部に台座を介してこれを摩擦面とする、厚さ2mm、大きさ130x150mmの鉄板 (SS41) を固定する。

これら副桁-電磁石-主桁の位置関係を示したのがFig-6である。

3-2 磁石を用いるメリット

単に摩擦を得るのであれば、Fig-7 に示すようにバネなどを用いて機械的に、摩擦面と垂直に働く力を与えればよい。ところが、これでは主桁に水平方向の力学的な力が加わることになり主に垂直方向の荷重に重点をおいて考える橋梁の設計思想に反するものである。その点磁石の吸着力により摩擦を得ることは、主桁に力学的な力が働かないので非常に有利である。

4. 摩擦力の制御

クーロンの法則によれば、摩擦面に垂直に働く力と摩擦面間の動摩擦係数との積が摩擦力となる。はじめに述べたように、磁気摩擦制振の場合、摩擦面に垂直に働く力は、磁石の吸着力である。従って、所望の摩擦力を得るには、電磁石に流す電流を変化させ、吸着力を制御すればよい。

電磁石の吸着力の特性は、あらかじめ測定しておく。それによると、この電磁石は、電磁石-0.3mmステンレス鋼板-2mm鉄板からなる磁気回路において、磁気飽和なく起磁力 500 (AT) で 98 (N) の吸着力を得ることができる。

またステンレス鋼板と鉄板間の動摩擦係数も事前に測定した結果、0.24であった。

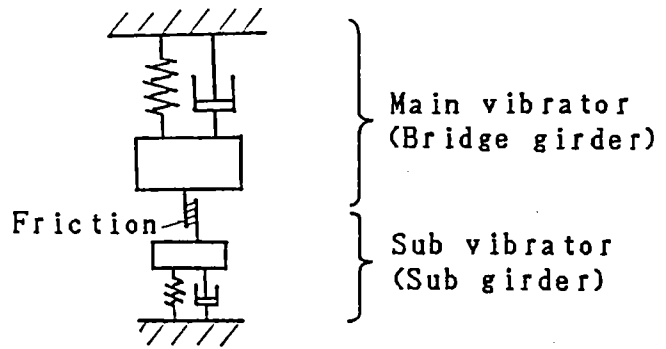


Fig-4 Model of complex girder system.

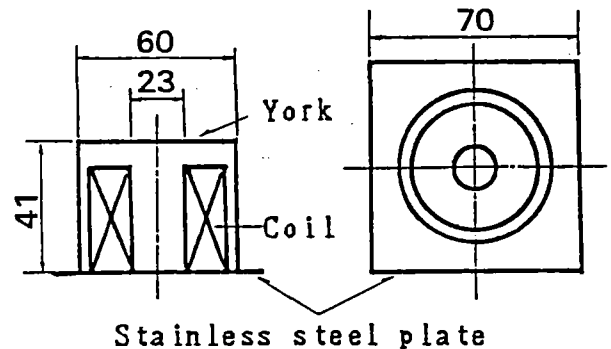


Fig-5 Electromagnet.

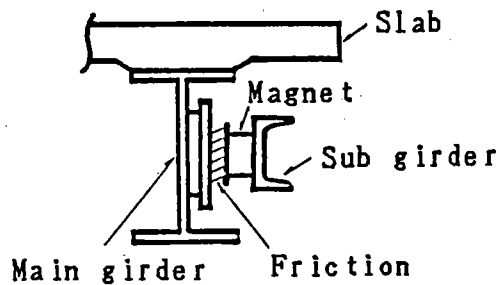


Fig-6 Magneto-friction system using sub girder.

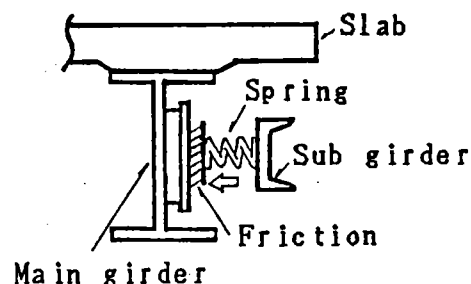


Fig-7 Friction by mechanical force.

5. 実験

以上述べた副桁制振の効果を次の二通りの実験から明らかにした。

5-1 定常加振実験

加振方法：大型車走行時にたわみの振動が励振されることを想定して、床版の中央を起振機によって正弦的に加振した。起振機の外観をFig-8に示す。これは、不平衡質量円板を対で用いることによって、円板の回転により発生する遠心力の水平方向成分を相殺し、垂直方向成分のみを得るものである。周波数は24.5(Hz)、起振機力は46(N) (0-Peak)である。

評価方法：任意の摩擦力に対して、各主桁のL/2点の加速度を測定し、加速度のレベルとして摩擦力0のときの値との比を(dB)で表した。

制振機構

- 1: 片側の主桁①に中間支柱を取付けた。
- 2: 片側の主桁①に副桁制振機構を取付けた。
- 3: 片側の主桁①に副桁制振機構を取付けた。ただし、この場合のみ副桁中央部に3個の電磁石を設け、摩擦面を3箇所とした。
- 4: 両側の主桁①、③に副桁制振機構を取付けた。

以上、四種類の場合について行った。中間支柱は基準の状態、副桁制振をこの中間支柱と比較し評価した。

測定系のブロック図をFig-9に示す。

5-2 衝撃加振実験

加振方法：大型車の橋梁進入時及び退出時を想定し、ゴムタイヤの落下による衝撃加振を行う。加振点は定常加振の場合と同じく床版中央で、加振力は937(N)である。

評価方法：任意の摩擦力に対し、真中の主桁L/2点の加速度減衰波形から、最大値の1/10となるまでの時間(この時間を減衰時間と定義する)をもって評価した。

制振機構

両側の主桁①、③に副桁制振機構を取付けた。

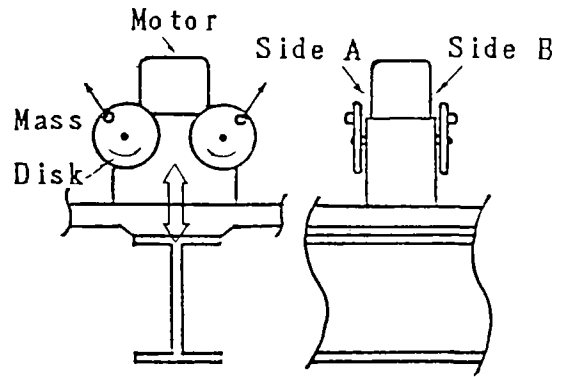


Fig-8 Vibrator.

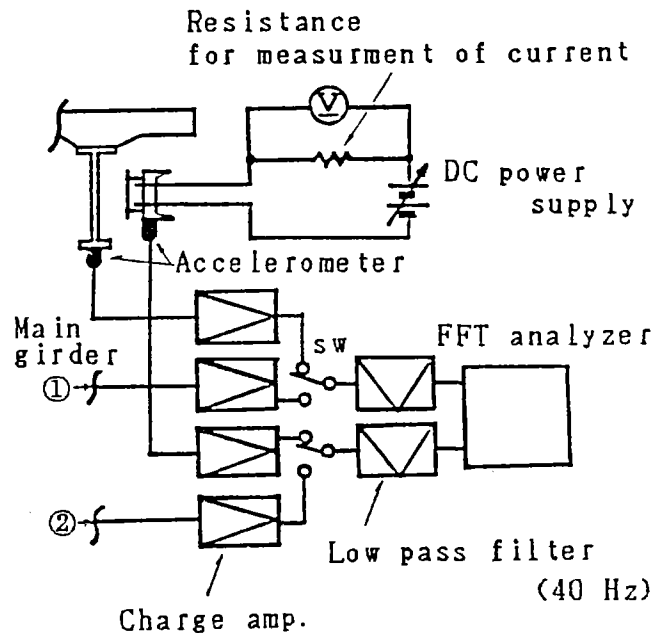


Fig-9 Block diagram of measurement system.

6. 結果及び検討

6-1 定常加振

6-1.1 中間支柱の場合

結果をFig-10に示す。なお摩擦力は30(N)程度まで変えたが、加速度のレベルに変化がみられないので、図の表示は摩擦力10(N)までとした。また図中の摩擦力とは、磁石1個当りに発生する摩擦力をいう。(以後の6-1.2,4の結果についても同様)

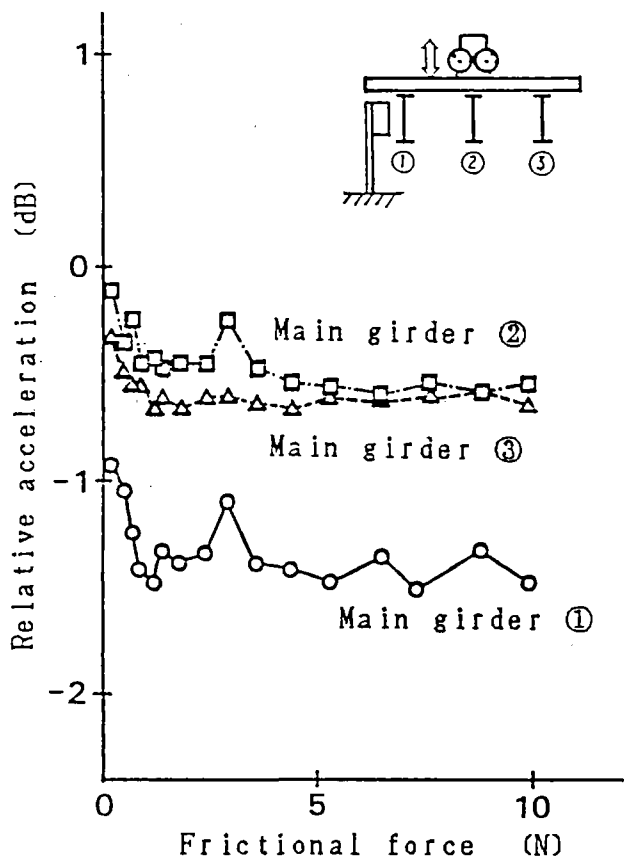


Fig-10 Relative acceleration.
(Using internal support system)

すべての主桁で制振効果が認められる。加速度のレベルは、どの主桁でも摩擦力1(N)まで低下し、以後中間支柱の取付けられた主桁①で約-1.4(dB)、主桁②、③では約-0.6(dB)でそれぞれ一定となっている。

6-1.2 副桁制振 (主桁①) の場合

結果をFig-11に示す。副桁制振を設けた主桁①では中間支柱以上の制振効果が認められているが (加速度のレベルは摩擦力1.5(N)以上で約-1.8(dB))、反対側の主桁③では逆に振動が増している。(加速度のレベルは摩擦力1.5(N)以上で約0.6(dB)一定)

6-1.3 副桁制振(主桁①,磁石3個)の場合

結果をFig-12に示す。図は制振機構を設けた主桁①の加速度のレベルである。磁石1個当たり発生する摩擦力が5(N)以降で、約-3.8(dB)の制振効果が得られている。即ち、電磁石を1個しか用いない場合の2倍以上の効果である。

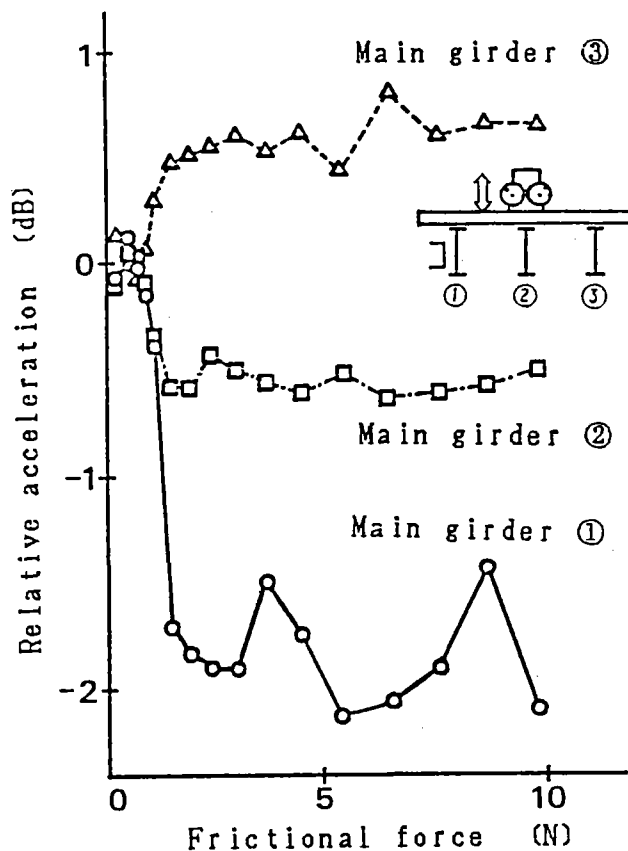


Fig-11 Relative acceleration.
(Applying magneto-friction to main girder ①)

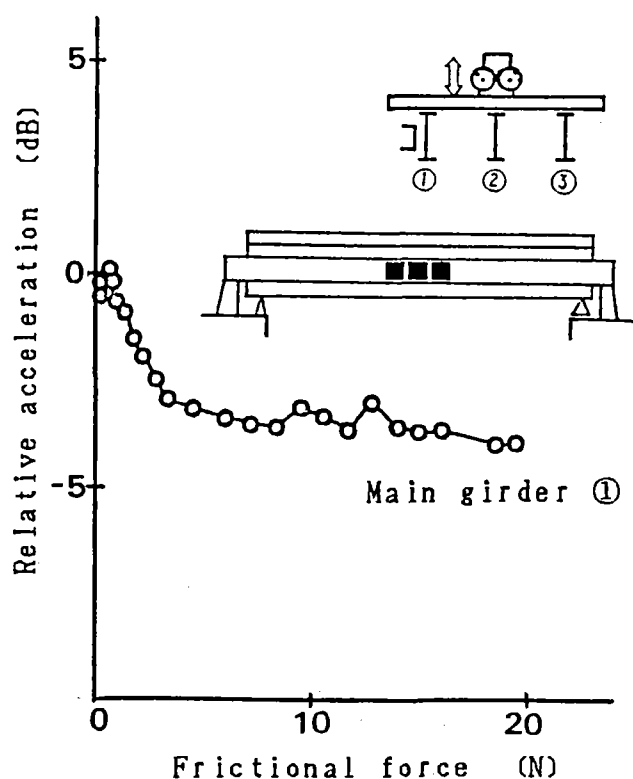


Fig-12 Relative acceleration.
(Applying three magneto-friction pieces to sub girder ①)

また、この結果から次のことが考察できる。磁石1個当り5(N)の摩擦力が発生したとすれば副桁1本当り $5 \times 3 = 15$ (N)の摩擦力が発生したと考えて良いであろう。ところが、6-1.2の電磁石を1個だけ用いた副桁の実験では、摩擦力を15(N)としても、主桁の加速度のレベルは、約-1.8(dB)であった。従って、制振効果を左右する要因は単に摩擦力だけでなく、摩擦面の面積(今回の実験では一つの摩擦面は 49 (cm^2))やあるいは摩擦面の位置も影響してくるのではないかと考えられ、この点は今後の課題として説明して行きたい。

6-1.4 副桁制振(主桁①, ③)の場合

結果をFig-13に示す。副桁制振機構を片側の主桁のみにに取付けた場合には、その主桁のみに効果がみられたが、両側の主桁に取り付けることによりすべての主桁で効果が認められた。加速度のレベルは、摩擦力1.5(N)まで低下し、以後多少の変動はみられるものの主桁①では約-1.5(dB)主桁②, ③では約-1(dB)でそれぞれ一定となっている。

ここで、橋の中央を加振し橋の両側に同じ制振機構を取付けたにもかかわらず、主桁①、③の結果に差があるのは、模型橋の構造が完全に左右対称な造りでないためと考えられる。これは、主桁①と③の測定システムの入換え、副桁制振機構の入換え、起振機のA面とB面の反転(Fig-8 参照)を施し、それぞれについて実験を行ったところ、いずれの場合もFig-13と同様の結果が得られた。故に、主桁①、③の結果の差は、人為的な問題によるものでなく模型橋そのものの特性と判断した。

続いて制振機構を両側の主桁①, ③に取付けたときの、主桁①とこの主桁に設けられた副桁の加速度のレベルをFig-14に示す。図より主桁①は加速度のレベルが低下しているが、副桁は逆に増加していることがわかる。このことは、副桁制振が摩擦による振動エネルギーの熱エネルギーへの変換の他に、副桁へのエネルギーの移行による制振効果を持つことを、表していると考えられる。

またFig-15の(a)~(c)は主桁①と副桁の加速度波形の例である。(a)で摩擦力が働いていな

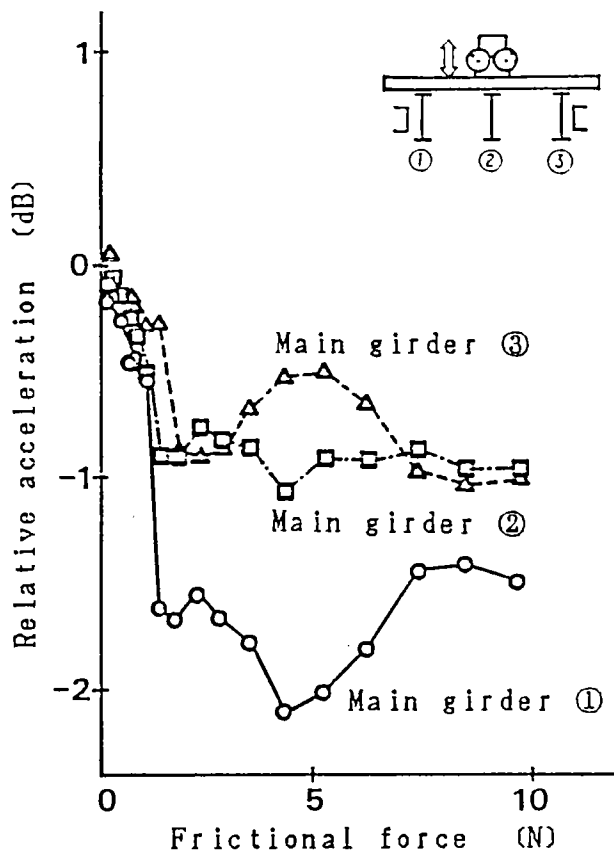


Fig-13 Relative acceleration. (Applying magneto-friction to main girder ① and ③)

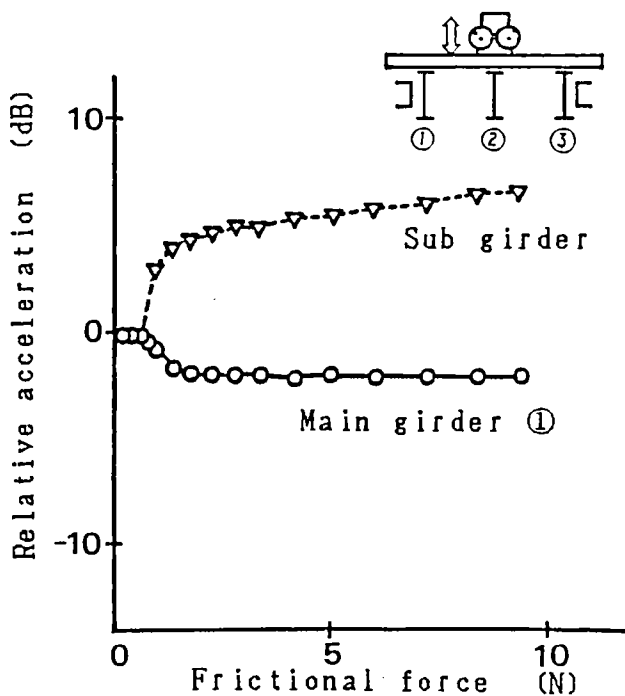
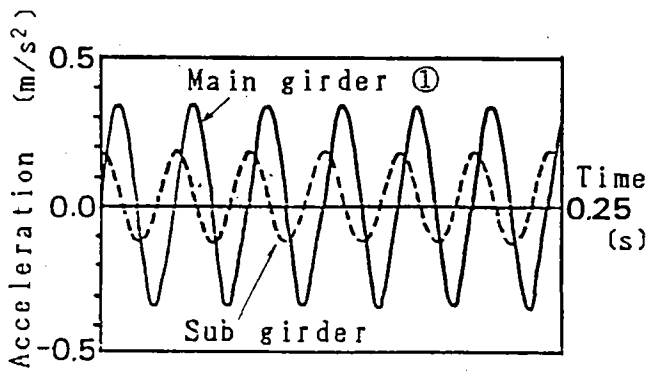
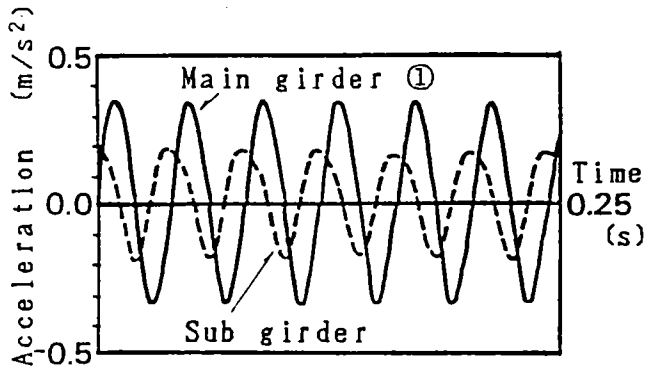


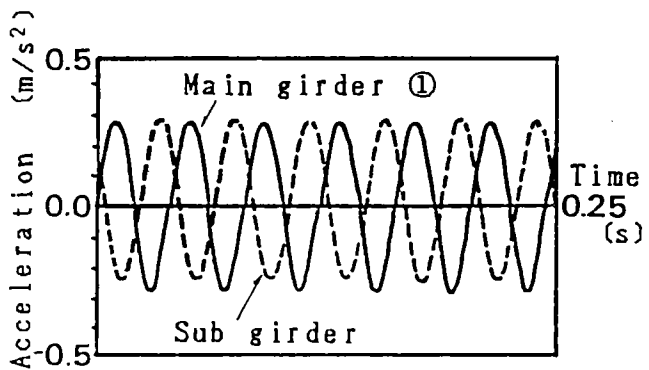
Fig-14 Relative acceleration. - main and sub girder. (Applying magneto-friction to main girder ① and ③)



(a) Frictional force : 0 (N)



(b) Frictional force : 0.5 (N)



(c) Frictional force : 9.7 (N)

Fig-15 Acceleration histories.

いにもかかわらず、副桁が振動しているのは、橋の振動が橋台から副桁へ伝わるためである。(b)は摩擦力が働き始めた時のものであり、副桁の波形にゆがみが認められる。(c)は主桁の加速度のレベルが、ほぼ一定となったときの波形である。主桁と副桁の位相差が180度に近くなり、振幅は主桁では小さく、副桁では逆に大きくなっている。

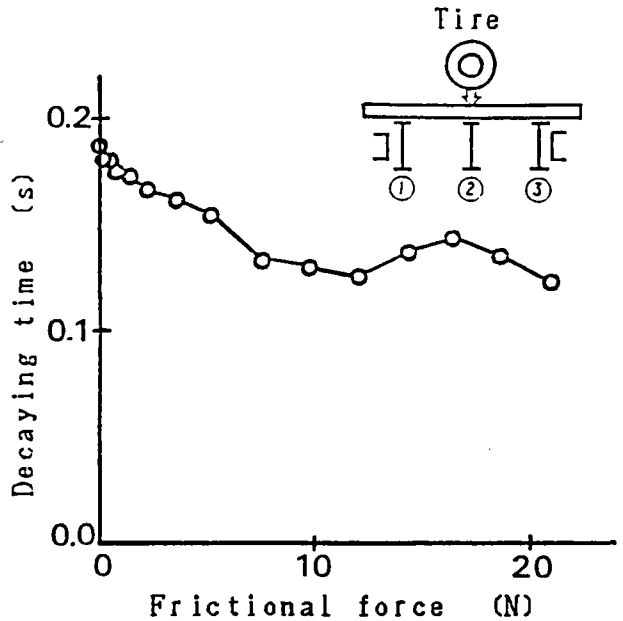
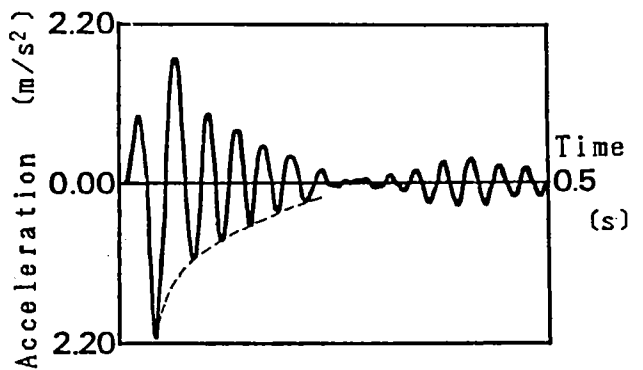
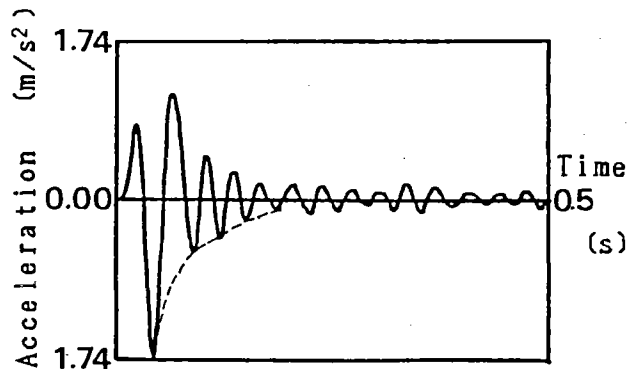


Fig-16 Time to decaying amplitude by a factor of 1/10. (Applying magneto-friction to main girder ① and ③)



(a) Frictional force : 0 (N)



(b) Frictional force : 12 (N)

Fig-17 Acceleration histories.

6.2 衝撃加振

結果をFig-16に示す。衝撃的な外力に対しても制振効果が確認された。減衰時間は、摩擦力12(N)のとき摩擦力が働いていない場合の約2/3に減少している。

Fig-17には、摩擦力が働いていないときと摩擦力12(N)のときの加速度減衰波形を示す。図中の点線は包絡線であり、この包絡線が最大値の1/10となるまでの時間を減衰時間として読みとった。双方の波形を比較しても摩擦力により減衰時間が短くなっていることがわかる。

7. あとがき

橋梁の振動を抑制する現実的な方法として副桁制振を考え、模型橋を用いた定常加振実験、衝撃加振実験から、その制振特性を明らかにした。以下に結果を要約する。

- (1) 定常加振に対して、3個の電磁石を中央に設けた副桁を片側の主桁に取付けることにより、1個の電磁石が設けられている副桁を同様に用いた場合の2倍以上の制振効果を得た。(副桁の取付けられた主桁で加速度のレベルは磁石1個のとき約-1.8(dB) 磁石3個のとき約-3.8(dB))この結果は副桁制振の性能向上の可能性を裏付けるものであり、同時に制振効果に対する摩擦面積、位置の影響についての検討が、今後の課題の一つとなった。
- (2) 副桁制振機構を両側の主桁に設けることにより、橋全体の制振が可能となる。(加速度のレベルは、橋全体で約1~1.5(dB))
- (3) 橋の振動が抑制されると、逆に副桁の振動が大きくなる。これは、副桁制振のメカニズムが摩擦による振動エネルギーの熱エネルギーへの変換のほか、副桁への振動エネルギーの移行にもよることを表していると考えられる。
- (4) 衝撃加振でも、副桁制振の効果が確認された。(減衰時間は、摩擦力12(N)で摩擦力の働いていないときの2/3に減少)

今後は、この副桁制振機構の実用化を考え、任意の橋梁に対する制振機構の規模の推定を可能にしたい。具体的には、本文 Fig-4に示すモデルの解析が一つの方法であるが、各振動体の諸定数の選定が難しい問題である。

謝辞

本研究に対して、起振機の借用並びに実橋に関するデータを御提供頂いた、日本道路公団構造技術課、試験所構造研究室の皆様、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 吉川昭吉郎、並木修二、”すべり摩擦を利用した振動吸収の実験”，電子通信学会技術研究報告，EA82-68，(1983年5月)
- 2) 高橋 彰，吉川昭吉郎，”衝撃振動に対するすべり摩擦制振の効果”，電子通信学会技術研究報告，EA83-34，(1983年9月)
- 3) 高橋 彰，吉川昭吉郎，”すべり摩擦に対する各種パラメーターの影響”，電子通信学会技術研究報告，EA84-47，(1984年10月)