

自動車を利用した少数主桁橋の緊急時減衰付加方法に関する解析的検討

Method for Temporarily Increasing Structural Damping of Plate Girder Bridges
using the Vehicle on its Girder

米田昌弘*

Masahiro YONEDA*

* 工博 近畿大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

Plate girder bridges have been recently planned and constructed in our country because of economical reason. Plate girder bridges are prone to oscillation due to wind such as a vortex excitation. Therefore, it will be necessary to investigate the countermeasures for the vortex excitation. These countermeasures are hardly installed when the bridge is opened, such as the various reasons, etc. In this paper, the temporary countermeasure is proposed to increase the structural damping using the vehicle on the bridge girder. Complex eigenvalue calculations are carried out for the plate girder bridge with the vehicle on its girder. It was ascertained from the numerical results that the proposed temporary method could be one of the useful countermeasures to improve aerodynamic stabilities of plate girder bridges.

Key Words : plate girder bridge, vortex-excitation, vehicle, damping, TMD

キーワード : 少数主桁橋, 渦励振, 自動車, 減衰, TMD

1. まえがき

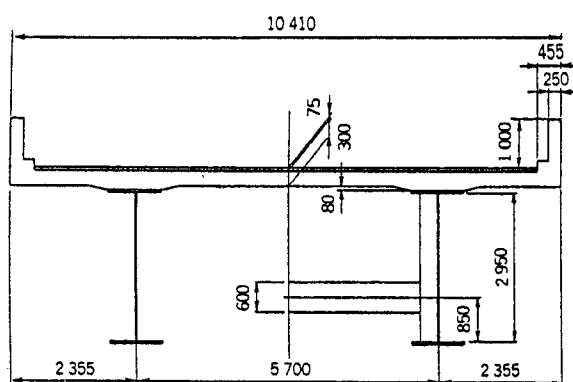
橋梁の製作費用や維持管理費用の削減を図るべく、近年では 2 主桁橋をはじめとする少数主桁橋の建設が増加しており、すでに支間長が 80m を超える事例も報告されている。少数主桁橋は同程度規模の桁橋と比較して構造減衰が小さく、渦励振が発現しやすい断面形状と相まって、自動車が走行する 25m/s~30m/s 程度以下の風速域において渦励振が発生する可能性がある¹⁾。ところで、橋梁とほぼ等しい振動数を有する自動車が渦励振の発現した橋梁上を走行した場合、共振現象で自動車の動的応答が増大し、自動車の走行性に重大な支障をきたすものと考えられる。また、実際、著者は、15 台の自動車を対象として固有振動数を計測し、自動車の固有振動数とほぼ一致する少数主桁橋が存在することを明らかにしている。さらに、渦励振が発現した少数主桁橋上を走行する自動車の動的応答解析を実施し、自動車ばね上部の加速度応答や接地圧減少率が大幅に増大する現象についても報告している²⁾。

一方、自動車と橋梁の固有振動数が比較的接近している場合、自動車が橋梁上を走行すれば、一種の TMD

として作用して橋梁の構造減衰が変化することも予想されるが、著者の知る限り、耐風工学の見地から、橋梁の構造減衰特性に及ぼす自動車の影響を論じた研究は未だ実施されていない。そこで、本研究では、まず、自動車が 2 主桁橋上を移動した場合（自動車を主桁上の各節点に停止させた場合）について複素固有値解析を実施し、橋梁の構造減衰特性に及ぼす自動車の影響について把握することとした。その結果、橋梁の固有振動数に近い約 10kN(約 1tonf)の自動車が橋梁の主桁上を走行する場合（自動車が中央点の主桁上に位置する場合の一般化質量比は、たわみ振動で 0.166%, ねじれ振動で 0.129%）、構造対数減衰率は最大で $\delta=0.005$ 程度も増加することがわかった。

少数主桁橋で実測された構造対数減衰率 δ の最小値は $\delta=0.02$ 程度である³⁾。したがって、自動車によって付加される構造減衰は、高々 $\delta=0.005$ 程度であるとは言え、橋梁の耐風性を検討する上で有意な減衰付加量であると考えられる。しかしながら、この減衰付加量は自動車が中央点を通過する瞬間に付加されるものであり、自動車 1 台の通行では渦励振が十分に制振される可能性は少ない。

ところで、風洞実験で渦励振の発現が予想されても、



図－１ 対象とした橋梁の断面形状と解析モデル

表－１ 対象とした２主桁橋の構造諸元

支間長 ℓ	重 量 w	重量慣性 モーメント I_θ	断面２次 モーメント I	(/Br.) ねじれ定数 J
75 m	154.0 kN/m	1500.9 kN・m ² /m	1.388 m ⁴	0.048 m ⁴

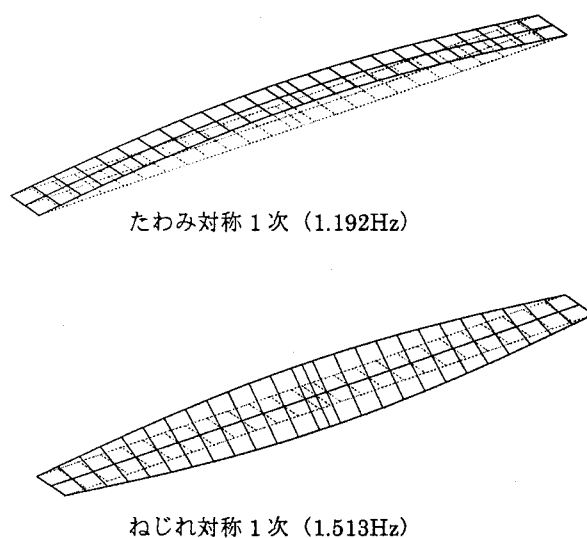
実際に発現するのは構造減衰や風向風速などの条件がすべて満足された場合のみに限られ、今までのところ実在する少数主桁橋において渦励振が発現した事例は報告されていない。それゆえ、風洞実験で渦励振の発現が予想されても、空力的対策や TMD などの構造的対策を設置できる治具だけを取り付けて実際の挙動を観察するケースも多い。しかしながら、この場合、渦励振が万が一でも発現すれば自動車の走行性は著しく低下し、重大な事故をまねく危険性がある。それゆえ、空力的対策や構造的対策を設置するまでの緊急対策について検討することは、少数主桁橋を設計・架設する上できわめて有用なことから考えられる。

上述した自動車 1 台による減衰付加効果を考慮すると、少数主桁橋で渦励振が発現した場合、構造諸元が全く同一の自動車 4 台を中央点の主桁上に駐車できれば、 $\delta=0.005 \times 4=0.02$ 程度の減衰増加（少数主桁橋で実測された最小の構造減衰を加え合わせると合計で 0.04 程度の対数減衰率）を期待でき、渦励振を十分に制振できる可能性がある。ただし、少数主桁橋の橋長によっては、橋の固有振動数とほぼ一致する自動車を準備するのは困難な場合も多い。そこで、本研究では、さらに、市販のトラックを利用し、荷台にマスを積載することによって固有振動数を調整する方法とその減衰付加効果についても解析的に検討することとした。その結果、上り線側橋梁と下り線橋梁が別々に架設され、それぞれが 2 車線以上を有する場合、市販トラックを利用する渦励振の緊急対策は有用な一手段になり

得るとの結果が得られたことから、ここにその検討結果を報告する。

2. 対象とした橋梁モデル

文献 1)には少数主桁橋の試設計例が報告されている。本研究では、試設計された橋梁諸元を参考にして、2 主桁の単純桁橋（橋長は 75m）を検討の対象とすることとした。なお、参考までに、橋長が 75m の単純桁橋では、構造減衰が小さい場合、通行規制されない 25～



図－２ たわみとねじれの基本固有振動モード

30m/s 以下の風速域において渦励振が発現する可能性があることを付記しておく。

対象橋梁の一般図と構造諸元をそれぞれ図-1および表-1に示す。また、立体骨組モデルの固有振動解析で得られた、鉛直たわみとねじれの基本固有振動モードを図-2に示す。なお、対象橋梁が2主桁橋であるにも係わらず、本研究で3主桁の立体骨組にモデル化したのは、2主桁のモデル化では所定の重量を主桁位置に付与すると極慣性モーメントが過大な値となるためである。そこで、左右の主桁部で所定の極慣性モーメントを満たすように重量を付加した後、所要重量からの不足分を中央の主桁部に付加させるものとした。したがって、中央の主桁部はダミー部材であり、全体の剛性には寄与していない。なお、図-2には鉛直たわみとねじれの基本固有振動数(1.192Hzと1.513Hz)も併記しているが、これらの値は橋梁部材をソリッド要素とシェル要素に分割した固有振動解析結果(鉛直たわみとねじれの基本固有振動数はそれぞれ1.191Hz、1.518Hz)¹⁾とも非常に良く一致している。

3. 乗用車による減衰付加特性

(1) 乗用車モデル

路面凹凸プロファイルを評価する指標として国際的に使用されつつあるIRI(国際ラフネス指数)⁴⁾は、図-3に示したクォーターカーモデルを用いたシミュレーション結果から算出する指標である。なお、クォーターカーモデルに対しては、以下のように車両諸元が規定されている⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} c_U / m_U &= 6.0 \\ k_L / m_U &= 653 \\ k_U / m_U &= 63.3 \\ m_L / m_U &= 0.15 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 c_U はばね上部(車体懸架装置)の粘性減衰係数、 k_U はばね上部(車体懸架装置)のばね定数、 k_L はばね下部(タイヤ)のばね定数、 m_U はばね上部質量(車輪1個で支持された車体の質量)、 m_L はばね下部質量である。

クォーターカーモデルを採用すれば、一般には公表されていない自動車の諸元を明確に設定できるという利点を有する。しかしながら、クォーターカーモデルは、その名の通り、車輪1個とそれに支持された車体部分をモデル化しており、車両重量そのものは実際の1/4となっている。そこで、本研究では、クォーターカーモデルの重量などを4倍した自動車モデルを採用することとした。乗用車を想定し、ばね上部重量を

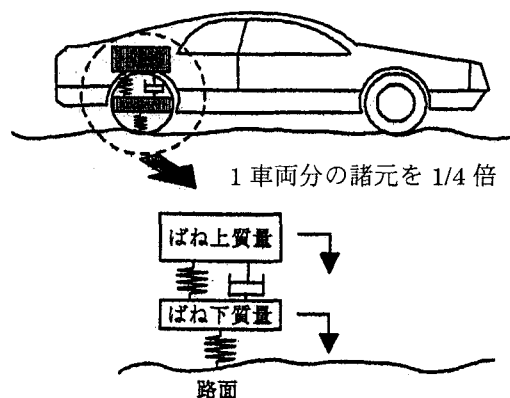


図-3 クォーターカーモデル

表-2 乗用車モデルの諸元

重 量	9.612 kN
ばね定数	62.036 kN/m
減衰係数	5.880 kN・s/m
減衰固有振動数	1.173 Hz
減衰定数	0.377

9.61kN(0.980tonf)と仮定すれば、クォーターカーモデルのばね上部重量は2.403kN(1/4された値)となる。この条件のもとで、式(1)を満足するように設定した自動車モデルの諸元(クォーターカーモデルの重量などを4倍した諸元)を算出できる。ただし、ばね下部(タイヤ部)の重量はばね上部(車体部)の重量と比べて非常に小さいことから、本研究では自動車をばね上部(車体部)のみの1自由度系にモデル化するものとした。1自由度系にモデル化した乗用車の諸元を表-2に示す。ここに、表中に示した減衰固有振動数と減衰定数は、複素固有値解析を実施して算出した値である。表-2からわかるように、本章で対象とした乗用車の固有振動数(厳密には減衰固有振動数) f_U は $f_U = 1.173\text{Hz}$ となっているが、この値は一般的な乗用車のばね上部振動数と考えられてきた1.2Hz~1.5Hzのほぼ下限値に対応するものである。なお、乗用車をばね下部(タイヤ部)とばね上部(車体部)の2自由度系にモデル化した場合の1次固有振動数は $f_U = 1.165\text{Hz}$ であり、ばね上部(車体部)のみの1自由度系にモデル化した場合の固有振動数と大きな差異は認められなかった。したがって、乗用車を1自由度系にモデル化しても、次節以降に示す結果に大きな差異は生じないと考えている。

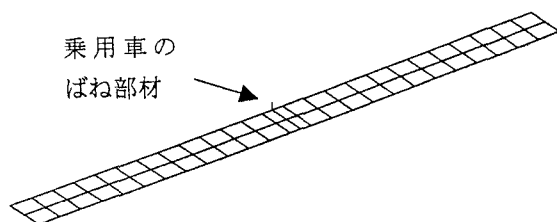


図-4 乗用車を中央点の主桁上に停車させた場合の解析モデル

(2) 解析結果と考察

渦励振の発現した橋梁上を乗用車が走行する場合、当然のことながら乗用車と橋梁はいずれも振動した状態となるが、このような振動状態を対象として複素固有値解析を実施するのは困難である。そこで、本研究では、前節で仮定した乗用車1台を主桁上の各節点で静止させた状態を検討の対象とすることとした。参考までに、主桁上の支間中央点に乗用車1台を停止させた解析モデルを図-4に示す。なお、この図において、支間中央点の主桁上から高さ方向に突き出た棒部材が乗用車のばね部材に対応し、図示されていないがこの上に乗用車の重量が付加されている。また、図-5は乗用車1台を中央点の主桁上に停止させた場合の固有振動解析結果を示しているが、この図から、乗用車を主桁上に停車させると、乗用車の卓越振動（振動数は1.273Hz）に加え、乗用車の上下振動をともなった鉛直たわみ振動とねじれ振動が生じ、それぞれの固有振動数は1.184Hz、1.515Hzとなっていることがわかる。なお、TMDを設置した場合、主桁とTMDの振動方向が異なる2つの振動モードが生じることが知られている。これに対し、図-5の固有振動解析結果はTMDを設置した場合の一般的な知見と異なっているが、これは表-2に示したように乗用車の固有振動数が規定されており、TMDを設置する場合のように最適な振動数調整がなされていないことによる。参考までに、自動車のばね上部重量だけを10.78kN（1.1tonf）とした場合には、図-6からわかるように主桁とTMDの振動方向が異なる2つの振動モードが確かに生じていることがわかる。ただし、一般に市販されている乗用車を利用して緊急の減衰付加対策を提案する本研究の主旨を考えた場合、TMDの設計理論⁶⁾にもとづく最適な振動数調整は実現できないと考えるのが妥当であろう。それゆえ、以下では、表-2に示した諸元を有する乗用車を利用するものとして、構造減衰の付加効果について解析的な検討を実施することとした。

乗用車1台を主桁上の各節点で静止させた状態につ

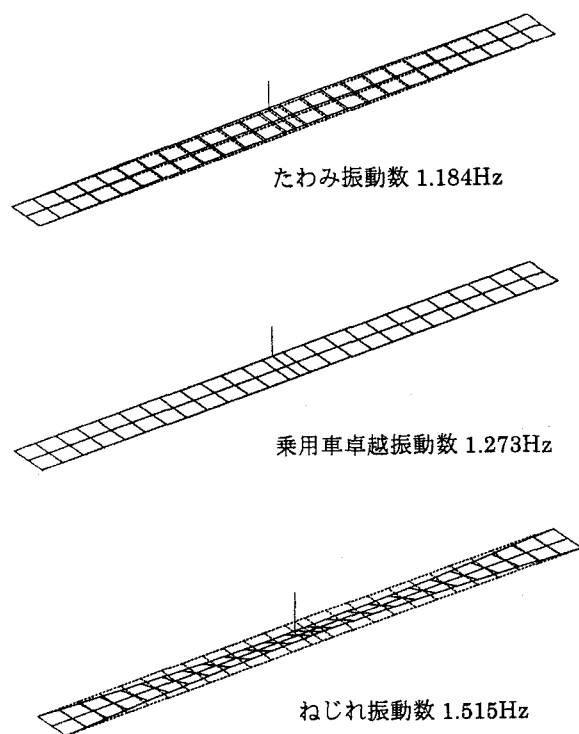


図-5 乗用車を中央点の主桁上に停止させた場合の固有振動解析結果

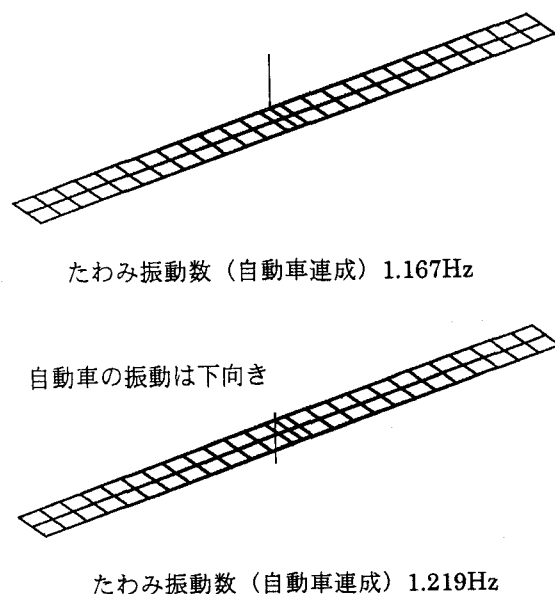
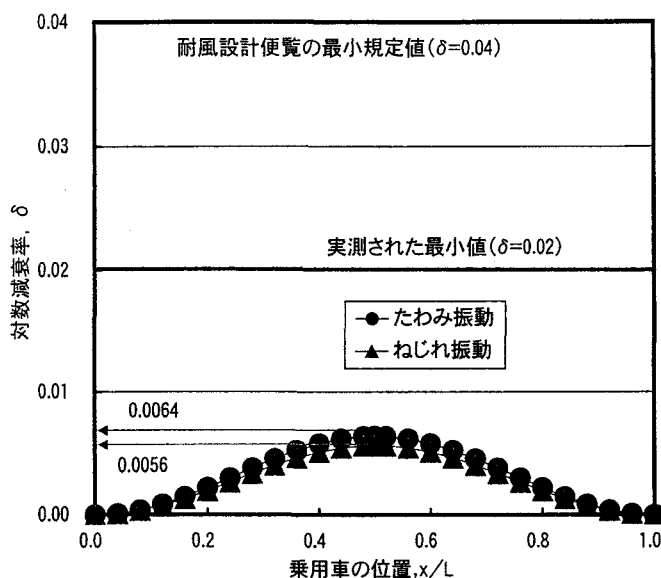


図-6 乗用車の重量を10.78kN（1.1tonf）とした場合の固有振動解析結果



図－7 乗用車位置と付加される構造減衰の関係

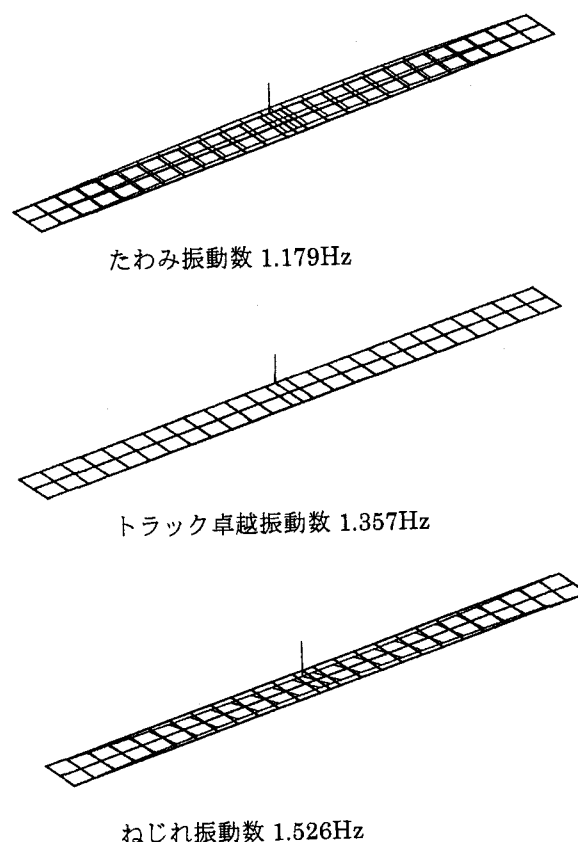
いて複素固有値解析を実施した。その解析結果を図－7にまとめる。なお、この図において、横軸は橋端からの乗用車位置 x と全長 L (75m) との比を表している。また、少数主桁橋で実測された構造対数減衰率 δ の最小値 $\delta=0.02$ および耐風設計便覧⁷⁾ の桁橋に対する最小規定値 $\delta=0.04$ も併記している。

図－7からわかるように、乗用車が中央点（モード振幅が最大となる位置）に近づくにしたがって減衰付加効果は増大している。また、 $x/L=0.5$ では、たわみ振動で $\delta=0.0064$ 、ねじれ振動で $\delta=0.0056$ もの増加が認められることもわかる。なお、参考までに、 $x/L=0.5$ での一般化質量比を計算すれば、たわみ振動で 0.166%、ねじれ振動で 0.129%である。少数主桁橋で実測された構造対数減衰率 δ の最小値は $\delta=0.02$ 程度であることを考えた場合、自動車 1 台によって付加される構造減衰は高々 $\delta=0.005$ 程度であるとは言え、この値は、耐風設計上、有意な減衰付加量であると考えられる。さらに、少数主桁橋で渦励振が発現した場合、構造諸元が全く同一の自動車 4 台を中央点の主桁上に駐車すれば、たわみ振動で $\delta=0.0064 \times 4=0.0256$ 、ねじれ振動で $\delta=0.0056 \times 4=0.0224$ もの増加を期待でき、渦励振を制振することも十分に期待できると考えられる。

4. トラックを利用する減衰付加方法

(1) トラックのモデル

乗用車の重量は高々 10kN (約 1tonf) 程度であり、少数主桁橋の橋長によっては、橋の固有振動数とほぼ一致する乗用車を準備するのは困難な場合もある。そこで、本章では、市販トラックの荷台にマスを積載す



図－8 付加重量 9.81kN を積載した 2 トントラックを中央点の主桁上に停止させた場合の固有振動解析結果

ることによって固有振動数を調整する方法を提案し、その有用性を検討する。

本研究では車体重量が 19.6kN (2.0tonf) のトラックを対象とする。トラックの車両諸元についても乗用車と同様に一般には明らかにされていないことから、ここでは、文献 2) で計測した軽トラックの固有振動数 1.651Hz と一致するようにトラックの車両諸元を設定した。ただし、トラックを TMD として利用する場合、粘性減衰係数によって減衰付加効果は変化すると予想される。そこで、ここでは、粘性減衰係数を $C=2.94\text{kN}\cdot\text{s/m}$ (0.3tonf $\cdot\text{s/m}$) $\sim$ 17.64kN $\cdot\text{s/m}$ (1.8tonf $\cdot\text{s/m}$) で変化させることとした。なお、マスを積載しないトラックの (非減衰) 固有振動数は 1.651Hz であることから、トラックの減衰定数 h を乗用車と同じ $h=0.377$ とした場合、粘性減衰係数 C は $C=15.63\text{kN}\cdot\text{s/m}$ (1.6tonf $\cdot\text{s/m}$) となることを付記しておく。

(2) 解析結果と考察

対象橋梁の鉛直たわみとねじれの基本固有振動数はそれぞれ 1.191Hz、1.518Hz であることから、トラックの荷台に 9.81kN (1.0tonf) のマスを載せて、トラックの (非減衰) 固有振動数が 1.355Hz (鉛直たわみとねじれの基本固有振動数の平均値) となるように調整す

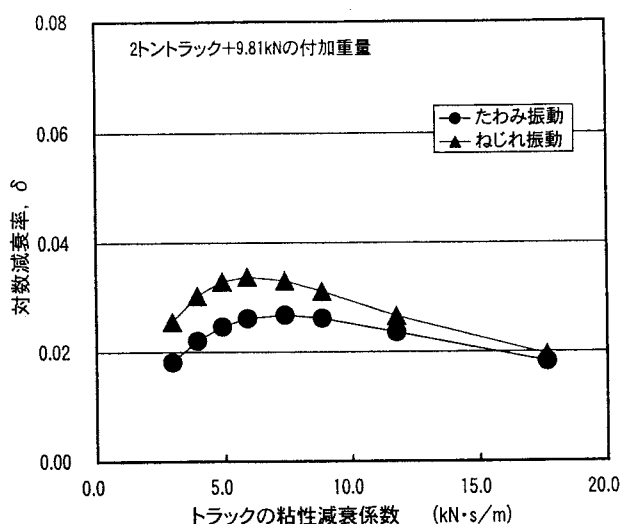


図-9 2トントラック（付加重量 9.81kN）によって付加される構造減衰

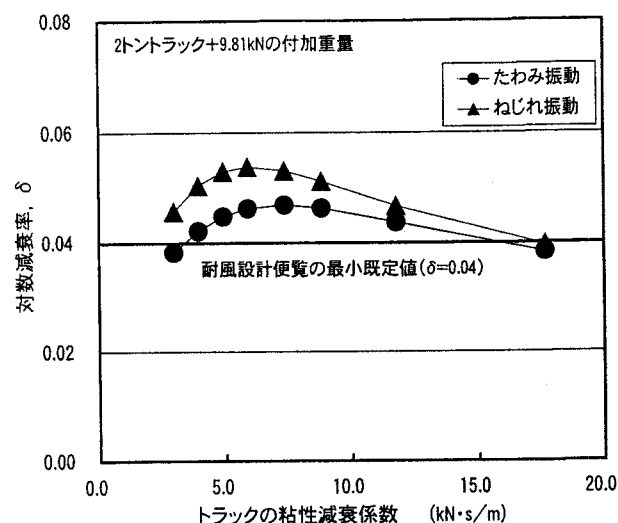


図-10 2トントラック（付加重量 9.81kN）によって付加される構造減衰（ $\delta=0.02$ を加算）

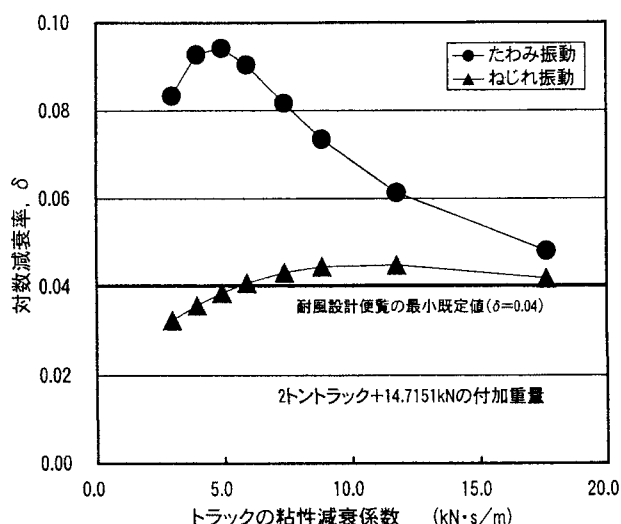


図-11 2トントラック（付加重量 14.715kN）を停車させた場合の構造減衰（ $\delta=0.02$ を加算）

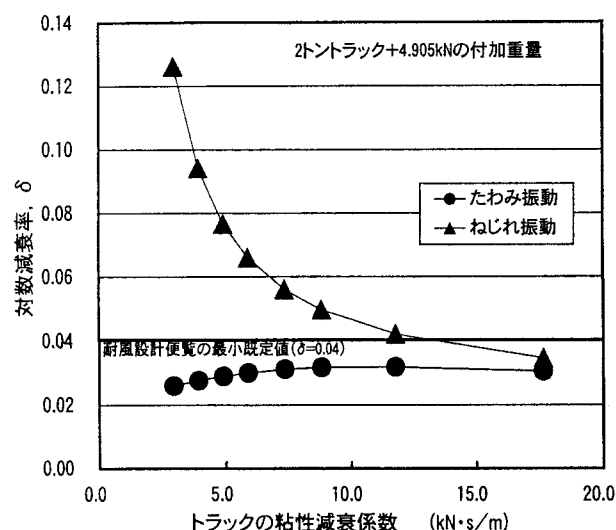


図-12 2トントラック（付加重量 4.905kN）を停車させた場合の構造減衰（ $\delta=0.02$ を加算）

るものとした。参考までに、この2トントラック1台（付加マスは9.81kN）を $x/L=0.5$ の主桁上に停車させた場合の固有振動解析結果を図-8に示す。図-8から、前章の乗用車を設置した場合と同じく、この場合にも、トラックの卓越振動（振動数は1.357Hz）に加え、トラックの上下振動をともなった鉛直たわみ振動とねじれ振動が生じ、それぞれの固有振動数は1.179Hz、1.526Hzとなっていることがわかる。すなわち、ここでの検討も、TMDの設計理論にもとづく最適な振動数調整が完全に行われていないことに留意が必要である。

9.81kN(1.0tonf)のマスを積載したトラック1台を $x/L=0.5$ の主桁上に駐車させた場合について複素固有

値解析を実施した。得られた解析結果を図-9に示す。また、図-9の解析結果に $\delta=0.02$ （少数主桁橋で実測された構造対数減衰率の最小値）を加えた結果を図-10にまとめる。図-10から、減衰付加効果はトラックの粘性減衰係数によって変化しているが、 $C=2.94\text{kN}\cdot\text{s/m}$ （0.3tonf・s/m）で鉛直たわみ振動、 $C=17.64\text{kN}\cdot\text{s/m}$ （1.8tonf・s/m）で鉛直たわみ振動とねじれ振動の構造減衰が $\delta=0.04$ を若干下回るものの、その他の粘性減衰係数では $\delta=0.04\sim0.05$ もの構造減衰を有していることがわかる。

次に、トラックの積載重量を14.715kN（1.5tonf）、4.905kN（0.5tonf）とした場合についても、それぞれ同様に複素固有値解析を実施することとした。ちなみ

に、積載重量を 14.715kN (1.5tonf) とした場合の (非減衰) 固有振動数は 1.254Hz, 4.905kN (0.5tonf) とした場合の (非減衰) 固有振動数は 1.484Hz であり、それぞれ主桁のたわみ振動 (振動数は 1.192Hz) とねじれ振動 (振動数は 1.513Hz) にきわめて近い振動数を有する場合を想定している。複素固有値解析結果およびその結果に $\delta=0.02$ (少数主桁橋で実測された構造対数減衰率の最小値) を加えた構造減衰を図-11, 図-12 に示す。これらの図から、より正確な振動数調整を実施した場合には、付加される構造減衰の最大値は大幅に増加していることがわかる。しかしながら、構造減衰を最大とする最適粘性減衰係数が明確に存在し、トラックの粘性減衰係数が最適粘性減衰係数と大きく異なった場合には十分な減衰付加効果を期待できないことも予想される。トラックの粘性減衰係数は、一般には明らかにされていない。それゆえ、市販トラックを利用する緊急の減衰付加方法を採用する場合は、着目する主桁の固有振動数に接近させることは重要ではあるが、粘性減衰係数に対するロバスト性を考えると、TMD の設計理論にもとづく最適な振動数調整を厳密に実施しない方が望ましい場合があると考えられる。

以上の検討結果から、上り線側橋梁と下り線橋梁が別々に架設され、それぞれが 2 車線以上を有する場合、市販トラックを利用する渦励振の緊急対策は有用な一手段になり得ると十分に言えよう。

5. まとめ

本論文は、乗用車が少数主桁上を走行する場合の構造減衰特性を把握するとともに、市販トラックを利用する渦励振の緊急対策法を提案し、その有用性を解析的に検討したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 乗用車 (減衰固有振動数は 1.173Hz) が支間長 75m の 2 主桁橋上 (たわみとねじれの基本固有振動数はそれぞれ 1.184Hz, 1.515Hz) を移動した場合 (自動車を主桁上の各節点に停止させた場合) について複素固有値解析を実施した。その結果、橋梁の固有振動数に近い約 10kN (約 1tonf) の自動車が支間中央点の主桁上を走行する場合、一般化質量比はたわみ振動で 0.166%, ねじれ振動で 0.129% であるにも係わらず、たわみとねじれの構造対数減衰率はそれぞれ最大で $\delta=0.005$ 程度も増加することがわかった。

(2) 少数主桁橋で実測された構造対数減衰率 δ の最小値は $\delta=0.02$ 程度である。したがって、乗用車 1 台によって付加される構造減衰は、高々 $\delta=0.005$ 程度であるとは言え、この値は耐風性を検討する上で有意な減

衰付加量であると考えられる。ただし、この減衰付加量は乗用車が中央点を通過する瞬間に付加されるものであり、乗用車 1 台の通行では渦励振が十分に制振される可能性は少ないと考えられる。

(3) 少数主桁橋で渦励振が発現した場合、構造諸元が全く同一の自動車 4 台を中央点の主桁上に駐車すれば、たわみ振動で $\delta=0.0064 \times 4=0.0256$ 、ねじれ振動で $\delta=0.0056 \times 4=0.0224$ もの増加を期待でき、渦励振を制振できることも十分に期待できると考えられる。ただし、少数主桁橋の橋長によっては、橋梁の固有振動数とほぼ一致する自動車を準備するのは困難な場合もあることから、市販のトラックを利用し、荷台にマスを積載することによって固有振動数を調整する方法を提案してその有用性を検討した。

(4) 車体重量が 19.6kN (2.0tonf) のトラックの荷台に 9.81kN (1.0tonf) のマスを積載したトラック 1 台 (非減衰固有振動数は 1.355Hz) を支間中央点の主桁上に駐車させた場合について複素固有値解析を実施した。その結果、減衰付加効果はトラックの粘性減衰係数によって変化するが、比較的範囲の広い粘性減衰係数域において、対象とした橋梁には $\delta=0.02 \sim 0.03$ 程度の減衰付加を期待できることがわかった。

(5) トラックの積載重量を 14.715kN (1.5tonf) および 4.905kN (0.5tonf) として、トラックの振動数を主桁のたわみ振動 (振動数は 1.192Hz) とねじれ振動 (振動数は 1.513Hz) に接近させた場合についても同様の検討を実施した。その結果、振動数調整をより正確に実施すれば、付加される構造減衰の最大値は大幅に増加するが、構造減衰を最大とする最適粘性減衰係数が明確に存在し、トラックの粘性減衰係数が最適粘性減衰係数と大きく異なった場合には十分な減衰付加効果を期待できないことがわかった。それゆえ、市販トラックを利用する緊急の減衰付加方法を採用する場合は、着目する主桁の固有振動数に接近させることは重要ではあるが、粘性減衰係数に対するロバスト性を考えると、TMD の設計理論にもとづく最適な振動数調整を厳密に実施しない方が望ましい場合があると考えられる。

本論文で提案した市販の乗用車やトラックを利用する渦励振の緊急対策法は、きわめて安価であり、少数主桁橋に対する有用な減衰付加手法の一つになり得ると考えられる。ただし、その実用化にあたっては、実橋での検証が不可欠であることから、実橋実験なども踏まえて実用化研究を実施していく所存である。本論文が、橋梁設計に携わる実務技術者にとって示唆に富んだ有益な技術資料になることを心から願う次第である。

参考文献

- 1) 山田 均, 上島秀作, 枝元勝哉, 台原 直, 澤田繁樹, 篠原修二: 少数主桁橋梁の耐風性, 橋梁と基礎, Vol.36, No.2, pp.37~42, 2002 年 2 月.
- 2) 米田昌弘: 渦励振が発現した少数主桁橋上を走行する自動車の動的応答特性, 土木学会論文集, 第 721 号/VI-57, pp.139~151, 2002 年 12 月.
- 3) 渡辺二夫, 播金昭浩, 黒田健二, 成田直矢: 長支間鋼少数主桁橋梁の耐風性, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, I-478, pp.955~956, 2002 年 9 月.
- 4) 笠原 篤, 加藤昌太郎: 国際ラフネス指数, 舗装, Vol.26, No.7, pp.24~26, 1991 年 7 月.
- 5) マイケル W.セヤーズ (笠原 篤, 関口幹夫, 加藤昌太郎 訳): 道路縦断プロファイルからの IRI の算出 (上): 舗装, Vol.31, No.7, pp.21~27, 1996 年 7 月.
- 6) 山口宏樹: TMD に関する 2, 3 の考察, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.773~780, 1991 年 3 月.
- 7) 日本道路協会編: 道路橋耐風設計便覧, 1991 年 7 月.

(2003 年 9 月 12 日受付)