

路面凹凸を考慮した道路橋の走行車両による動的応答特性

DYNAMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF HIGHWAY BRIDGES
WITH ROADWAY ROUGHNESS UNDER MOVING VEHICLES川谷 充郎*, 西山 誠治**
Mitsuo KAWATANI and Seiji NISHIYAMA

Dynamic response of highway bridges to moving vehicles is theoretically analyzed taking account of road surface roughness and coupling vibration of bending and torsion. By using two-degree-of-freedom model with one front and two rear axles of vehicle, numerical results showed good agreement with field test results. Measured data of the recent field test on dynamic response of highway bridge to a dump truck show that the frequency of the girder's response varies due to velocity of a test vehicle. In this study the similar analysis is carried out to verify such phenomena.

In Newmark's β method of numerical integration, the time interval is defined as $1/5$ to $1/6$ of the least natural period of the analytical system. It is shown here that taking account of roadway roughness there are cases where such time interval is not sufficiently small to express the influence of roughness.

1. まえがき

走行車両による道路橋の動的応答について、従来より、強度設計に際して用いられる衝撃係数との関連において研究されてきた^{1), 2)}。さらに近年、自動車重量の増大とそのような大型車交通量の増加に伴い、道路橋の疲労損傷や振動使用性あるいは環境振動影響などが問題となり、走行車両による動的応答を扱う局面が増えてきた^{3), 4)}。

この種の現象を解析的に扱う場合、橋梁と車両のモデル化および解析手法に多くの提案がなされているが、要は、対象とする現象を工学的に要求される精度で解析的に表現できればよい訳である。文献5)では、道路橋を曲げとねじりを考慮した平面構造のはりにモデル化し、また、車両を前後輪を考慮した2自由度振動系にモデル化し、モード法による橋梁と走行車両の連成振動の微分方程式をNewmark- β 法により逐次積分して時系列応答を求め、これが実測結果と比較的良く一致することを示した。

ところで、阪神高速道路の梅田入路で行われた単純桁橋における試験車走行実験によれば、走行速度の変化に伴って主桁の動的応答の振幅および周波数も変化していた⁶⁾。このような実験結果の解析的な検証を行うために、文献5)と同様の手法で橋梁と車両の連成振動の理論解析を行う。また、走行車両の左右輪位置における路面凹凸の差異、ならびに車両解析モデルの後輪軸数が動的応答に及ぼす影響も調べる。

また、Newmark- β 法では、数値積分の時間間隔を振動系の最小固有周期の $1/5 \sim 1/6$ とすれば解の安定性および収束性が保証されるが、路面凹凸を考慮に入れると、これでは実際の現象を表現できない場合のあるこ

* 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

** 大阪大学大学院生 工学研究科前期課程土木工学専攻 (〒565 吹田市山田丘2-1)

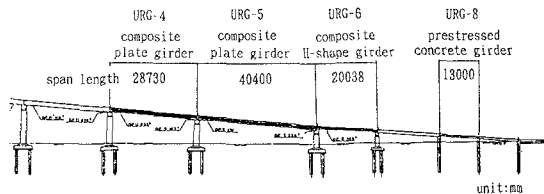


Fig.1 General view of test bridge

とを指摘する。なお、積分時間間隔の動的応答に及ぼす影響について、中島・津村が調べているが⁷⁾、ここでは、時間ステップにより車両の移動する距離と路面凹凸の間隔との関係から、適切な積分時間間隔について明らかにする。

2. 桁橋の走行荷重による動的応答解析⁵⁾

路面凹凸を有する桁橋の走行荷重下の曲げねじり連成振動をモード法により解析する。この際、桁橋は橋長にわたって等断面の棒モデルと仮定する。走行車両のモデルとして、車両モデルの違いが動的応答に及ぼす影響を調べるために、実際のダンプロックの軸数に合わせた前輪1軸ならびに後輪2軸を考慮した2自由度振動系のモデルと、後輪を1軸に簡易化したモデルを用いる。これより得られる橋梁と車両の連成振動の微分方程式を Newmark- β 法を用いて逐次積分し、橋の動的応答を求める。このとき、 $\beta = 1/4$ とし、各時間ステップにおける収束判定は加速度について $1/1000$ 以内とする。

3. 解析モデル

3.1 桁橋モデル

対象橋梁は Fig. 1に示すような阪神高速道路梅田入路橋の内、支間長40.4mの単純桁である。その解析モデルをFig. 2に示し、構造諸元を Table 1に示す。動的応答解析で考慮するモード次数は、曲げ振動およびねじり振動ともに3次とした。

数値積分の時間間隔に関する解析では、実橋資料に基づいた60+60mの支間長を持つ2径間連続桁も対象とし⁸⁾、その構造諸元を Table 2に示す。この場合は曲げ振動だけを考慮し、モード次数は応答値の収束性を考慮して3次とした⁸⁾。

3.2 走行車両モデル

走行車両の解析モデルを Fig. 3に示す。試験車の前・後輪の測定値は 4.88tfと14.59tfであり、その振動特性は実測値に基づき Table 3のように決定した。また、数値積分の時間間隔に関する解析では、走行車両は設計活荷重L-20を考慮して、重量20tfで Table 3のような特性を持つものとする。

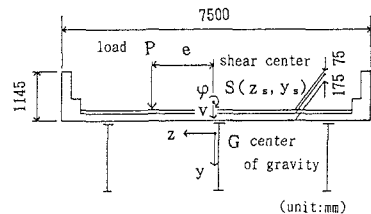


Fig.2 Sectional view of model girder

Table 1 Structural properties of test bridge

Span length	l	40.4(m)
Weight per unit length	m	7.706×10^2 (kg/m)
Ratio of Young's modulus	n	9.516
Ratio of shear modulus	n_s	8.565
Area of section	A	0.1415(m ²)
Moment of inertia of area	I_z	0.2122(m ⁴)
Polar moment of inertia		
$\times$ Weight per unit length	mI_z	6.0303×10^2 (kgm)
Torsion constant	J	0.3843×10^{-1} (m ⁴)
Warping constant	C_w	0.7900(m ⁶)
Damping constant		
for 1st and 2nd modes		0.02536
Natural frequency		
Bending vibration	1st	2.35(Hz)
	2nd	9.42(Hz)
	3rd	21.19(Hz)
Torsional vibration	1st	3.86(Hz)
	2nd	10.16(Hz)
	3rd	19.89(Hz)

Table 2 Structural properties of model girder

Span length	60+60(m)
Weight per unit length	5.288(t/m)
Moment of inertia of area	0.2883(m ⁴)
Damping constant	
for 1st and 2nd modes	0.02
Natural frequency	1st
	2nd
	3rd
	1.46(Hz)
	2.29(Hz)
	5.84(Hz)

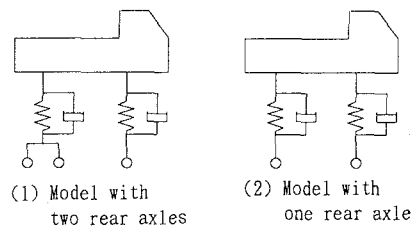


Fig.3 Model vehicle

Table 3 Dynamic properties of model vehicle

	Umeda Entrance	Continuous Br.
Weight	19.47(t)	20.0(t)
Degree of freedom	2	2
Natural frequency	3.3(Hz)	3.0(Hz)
Moment of inertia	58.22(tm ²)	50.94(tm ²)
Damping Constant	0.03	0.03

4. 路面凹凸

梅田入路橋の路面凹凸は、3 mプロフィールメーターにより追い越し車線において大型車の左右輪通過位置を想定して、2測線について5 cm間隔で測定された。3 mプロフィールメータは、基準台車により記録計の位置を決め、その基準高さからの測定車輪の上下動を測定するものである。基準高さ設定用の測定台車のスパン長が3 mであることより、測定可能な路面波長は非常に短い。そこで、今回は2 m間隔のレベル測量により長波長の路面凹凸を補って、水準線を基準とした路面凹凸を算出した。なお、梅田入路橋には8.5%の直線勾配がついているが、路面凹凸は勾配を除いて算出した。その結果を Fig. 4に示す。これより、中央側の測線では短波長成分の凹凸があり、他方、高欄側の測線では長波長成分が卓越しており、左右輪位置の路面凹凸がかなり異なっている。次に、これらの2測線、およびそれらの平均値の路面凹凸データから、高速フーリエ変換法によりパワースペクトル密度を算出したものを、車両の乗り心地から規定された ISOの路面凹凸評価基準と共に Fig. 5に示す。この際、車両のタイヤの接地長を考慮して25cmごとに平滑化を行っている。これより、高欄側は $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ c/m}$ の長波長でのパワーが若干高く、また中央側は $10^{-1} \sim 10^0 \text{ c/m}$ の波長域でのパワーの若干高いことが分かり、凹凸波形において見られた左右輪位置における卓越波長の差異がスペクトルからも分かる。さらに、ISO 評価基準より、全体的に梅田入路の路面凹凸は比較的良好な路面状態であることが分かる。

また、連続桁の解析には豊里大橋で実測された10cm間隔の路面凹凸データを用いた⁹⁾。これから、20cmの平滑化を行い、パワースペクトル密度を算出したものを Fig. 6 (1)に示す。豊里大橋には

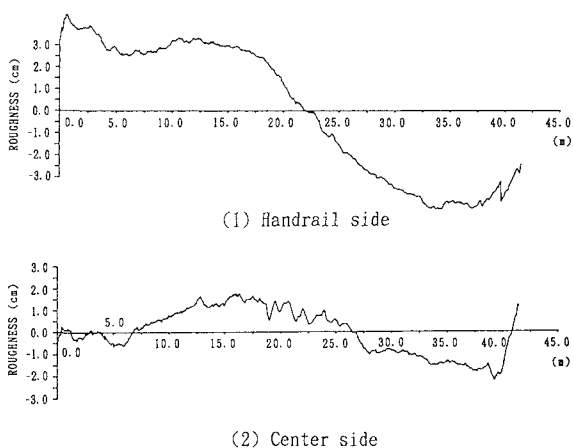


Fig.4 Profile of road surface roughness at Umeda Entrance

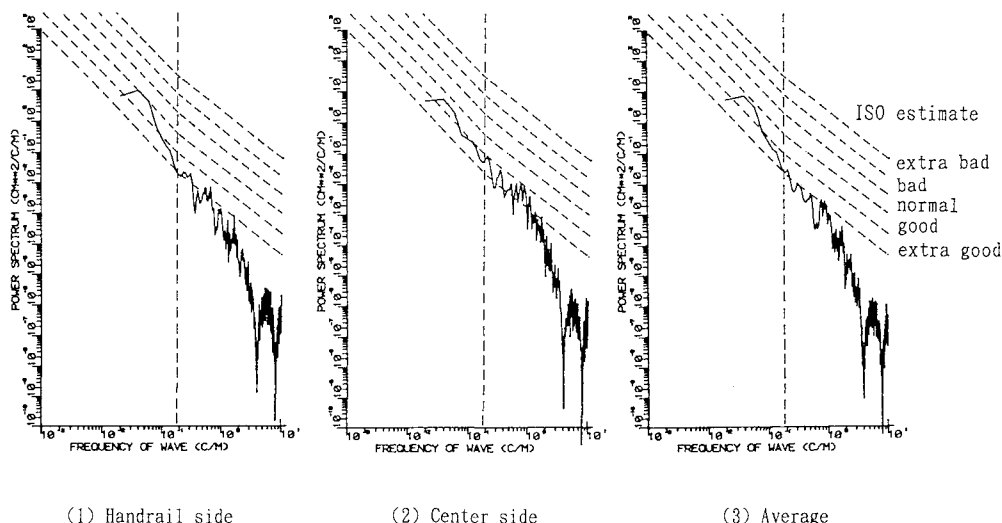


Fig.5 Power spectrum of road surface roughness at Umeda Entrance

70cm余りのキャンバーが付いており、その影響で長波長成分の路面凹凸のパワーが高くなっている。連続桁の解析には、豊里大橋の路面凹凸から120mの範囲を用いたので、その部分のパワースペクトル密度を算出し、Fig.6 (2)に示す。120mの範囲は斜張橋の側径間から中央径間にかけてで、キャンバーの影響が小さくなり、Fig.6 (1)と比べて長波長成分のパワーが下がっている。ISOの評価基準より豊里大橋の路面凹凸も比較的良好な状態であることが分かる。

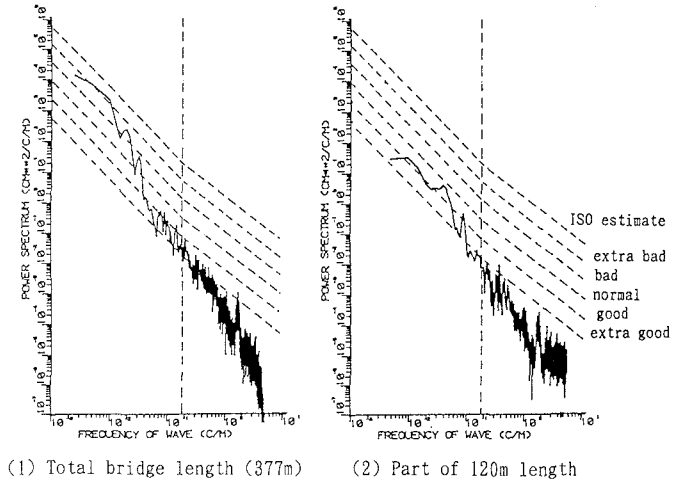


Fig.6 Power spectrum of road surface roughness at Toyosato Ohhasei

5. 動的応答解析結果

5.1 実験結果との比較

走行速度を実測値に合わせて、17.1、22.0、31.7 km/hと変化させて解析した場合の応答波形の例を、対応する実測波形と共にFig.7に示す。車両の移動に伴い、応答振幅の時間的に変化していく実測における様子が、解析でも表現されていることが分かる。また、これらの波形より得られた動的増幅率 DIFと応答の振動数をFig.8に示す。これより、DIF および応答の振動数について、解析結果は実測結果と良く一致している。なお、DIF の定義については参考文献5)を参照されたい。

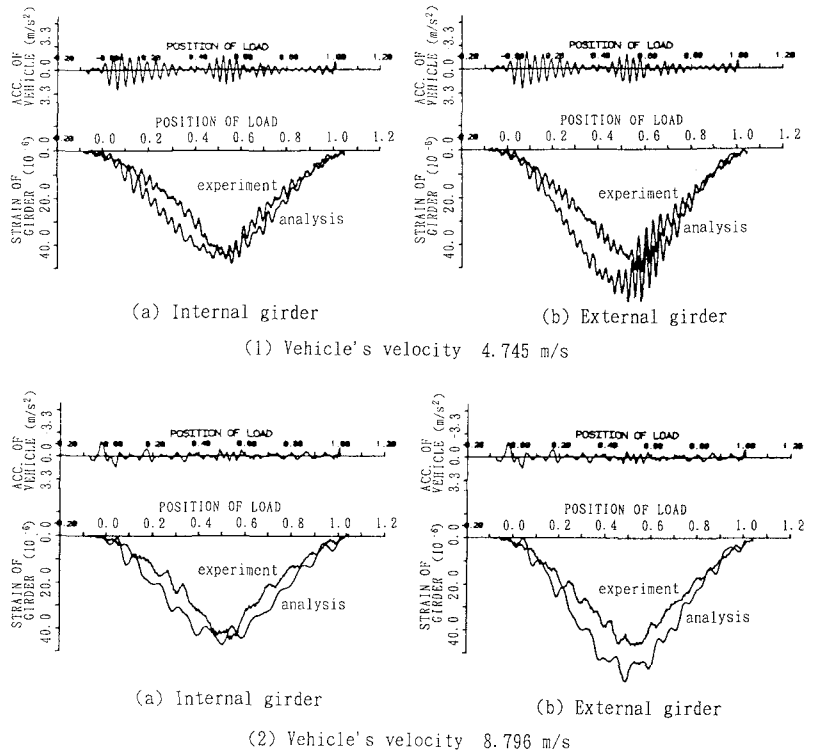


Fig.7 Time history of dynamic response to vehicle model with two rear axles

5.2 路面凹凸の測線の相違による影響

高欄側と中央側、およびそれらの平均値の路面凹凸を用いて解析した場合の応答波形の例を Fig.9に示す。Fig.9 (1) では、左右輪位置の凹凸の平均値を用いた場合の応答波形は、高欄側および中央側の凹凸を用いた場合の平均的な応答波形になっていることが分かる。また、Fig.9 (2) では、高欄側あるいは中央側の凹凸を用いた場合は実測波形よりもかなり大きな振幅があらわれているが、左右輪位置の凹凸の平均値を用いると振幅は小さくなり実測波形に近くなることが分かる。以上より、車輪の片側位置の路面凹凸のみを用いるよりも、左右輪位置の路面凹凸の平均値を用いた方が実際の現象を的確に表現できることが分かる。

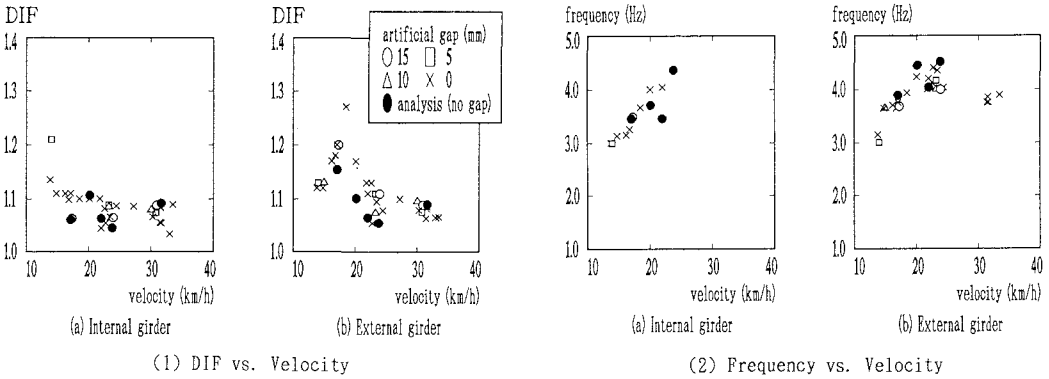


Fig.8 Comparison between field test results and analytical ones

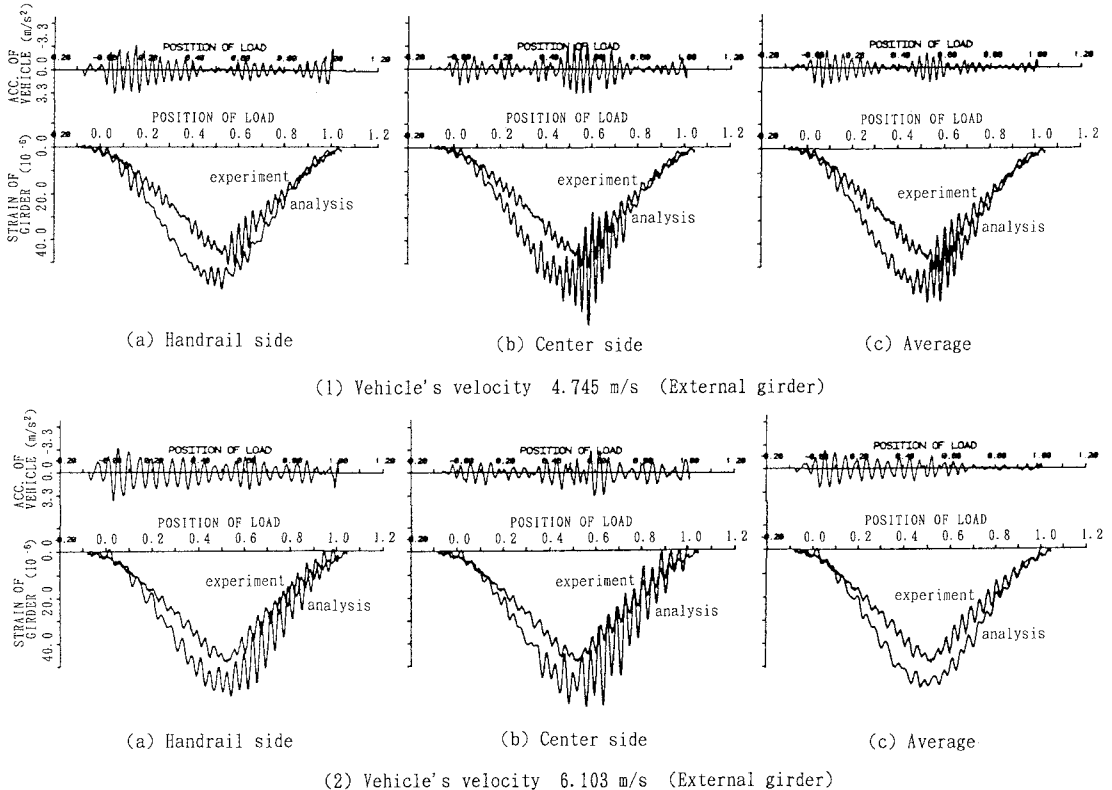


Fig.9 Time history of dynamic response under difference of road surface roughness

5.3 車両解析モデルの後輪軸数の影響

車両解析モデルの後輪を1軸とした場合の応答波形の例をFig. 10に示す。また、この場合のDIFの値を後輪2軸の場合の解析値ならびに実測値とともにFig. 11に示す。Fig. 10より、後輪を1軸とすると、後輪2軸の場合より応答波形の振幅がかなり大きくなり、実測値との差異が大きくなっていることが分かる。また、

Fig. 11では後輪2軸の場合のDIFが実測値とよく一致しているのに対して、後輪1軸の場合はそれらよりもかなり大きな値を示していることが分かる。以上より、車両走行による動的応答解析を行う場合、車両モデルは実際の車両の軸数を忠実に反映しなければならないことが分かる。

6. 数値積分の時間間隔について

Newmark-β法では、逐次積分の刻み時間間隔は解析系内の最小固有周期の1/5～1/6程度としている。路面凹凸を考慮した場合、逐次積分の1ステップで移動する車両の距離により、路面凹凸特性をとらえられない場合があるために、積分の時間間隔を解析対象系内の最小固有周期の1/5、1/10、1/20、1/40と変化させて、解析を行った。

6.1 単純桁橋の場合

積分間隔を変化させて解析を行った結果の一例をTable 4に示す。これより、積分の解析系内の最小固有周期 T_L と時間間隔 Δt との比 $T_L/\Delta t=5$ ではほぼ解は収束していることが分かる。 $T_L/\Delta t=5$ のとき、車両が1ステップで進む距離は路面凹凸間隔の5 cmよりも大きい、車両の接地長を25 cmと仮定し、5 cm間隔の路面凹凸データを5個づつ移動平均して解析を行っていることより、その影響は少ないと考えられる。実験結果との比較を行った前章の解析では $T_L/\Delta t=5$ としていたが、これは妥当であったと考えられる。

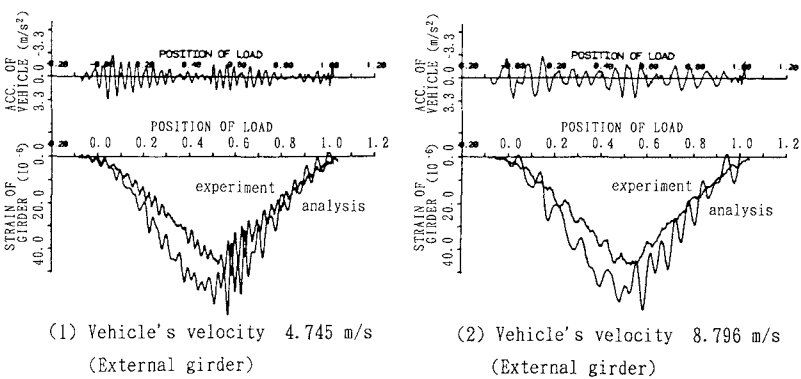


Fig.10 Time history of dynamic response to vehicle model with one rear axle

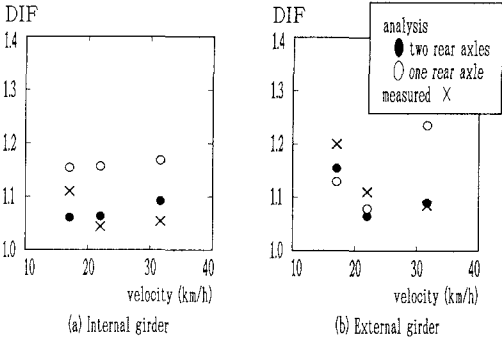


Fig.11 Comparison of DIF between vehicle model with one rear axle and that with two rear axles

Table 4. DIF and distance that vehicle moves in one step at Umeda Entrance.

Least natural period T_L	0.04718 (sec)			
Vehicle's velocity V	8.796 (m/sec)			
Space of road surface roughness	0.05 (m)			
$T_L/\Delta t$	5	10	20	40
Δt (sec)	0.00944	0.00472	0.00236	0.00118
$V \times \Delta t$ (m)	0.083	0.042	0.021	0.010
DIF*	1.090	1.092	1.092	1.092

* Bending moment at span center (external girder)

6.2 連続桁橋の場合

連続桁橋において車両の走行速度を 10m/sec, 20m/sec とし、積分の時間間隔を変化させて解析した結果を Fig. 12 に示す。ここで、縦軸は DIF であり、横軸は $T_L/\Delta t$ である。路面平滑の場合、走行速度に関わらず DIF の値は $T_L/\Delta t = 5$ で十分に収束している。しかし、路面凹凸を考慮すると、速度 10m/sec では、DIF の値は $T_L/\Delta t = 5, 10$ では十分に収束せず、中間支点上の曲げモーメントにおいて $T_L/\Delta t = 20$ になってようやく収束する。走行速度 10.0m/sec のとき、逐次積分の 1 ステップで車両の進む距離を Table 5 に示す。積分の時間間隔を、 $T_L/\Delta t = 5, 10, 20$ と小さくしていくと、1 ステップで車両が進む距離はそれぞれ 34.2, 17.1, 8.6cm と小さくなっていき、 $T_L/\Delta t = 20$ になって初めて路面凹凸間隔の 10cm より小さくなる。路面凹凸を考慮すると、 $T_L/\Delta t = 20$ まで積分間隔を小さくして初めて解が安定することから、1 ステップで進む距離が路面凹凸の間隔よりも大きいときは、路面凹凸の影響を完全に表現できていないと考えられる。

また、走行速度 20m/sec では車両の進む距離は $T_L/\Delta t = 40$ ではじめて 10cm 以下になるが、これよりも積分の時間間隔の大きい $T_L/\Delta t = 20$ で解がほぼ安定している。これは路面凹凸の間隔と共に走行速度による動的な影響も関係しているためと考えられる。

以上より、路面凹凸を考慮していないときは、積分の時間間隔は解析系内の最小固有周期の $1/5 \sim 1/6$ 程度でよいが、路面凹凸を考慮するときは、解析系内の最小固有周期だけでなく、1 ステップで移動する車両の距離からも積分の時間間隔を決定しなければならないと考えられる。

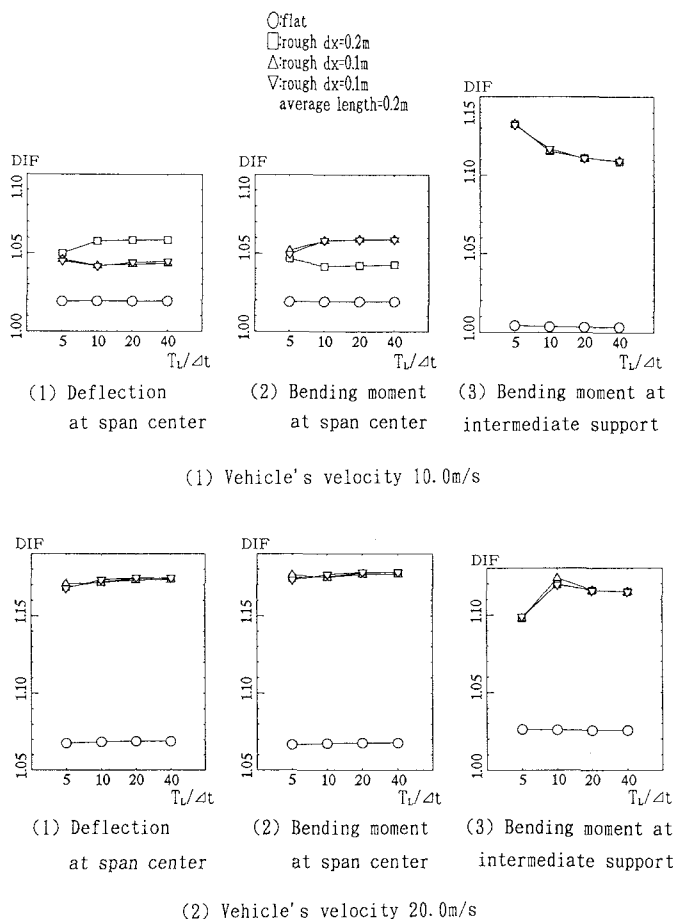


Fig. 12 Effect of time interval of numerical integration on DIF

Table 5. DIF and distance that vehicle moves in one step at Continuous Bridge.

Least natural period T_L	0.1712 (sec)			
Vehicle's velocity V	10.0 (m/sec)			
Space of road surface roughness	0.10 (m)			
$T_L/\Delta t$	5	10	20	40
Δt (sec)	0.0342	0.0171	0.0086	0.0043
$V \times \Delta t$ (m)	0.342	0.171	0.086	0.043

7. 結論

本研究では、走行車両による道路橋の動的応答解析について、次の事項を明らかにした。

- (1) 曲げとねじりを考慮した桁橋の動的応答解析結果を実測値と比較すると、動的増幅率DIFおよび応答の振動数についてよく一致することを示した。
- (2) 走行車両による動的応答解析において、車輪の片側位置における路面凹凸のみを用いるよりも、左右輪位置の路面凹凸の平均値を用いた方が実測値と良く合うことを示した。
- (3) 車両解析モデルの軸数は実際の車両の軸数を忠実に反映しなければならないことを示した。
- (4) Newmark- β 法における積分時間間隔は、解析系内の最小固有周期だけでなく、車両が1ステップで移動する距離からも決定されなければならない。

参考文献

- 1) 川谷充郎・嶋田玲志：桁橋の自動車走行による不規則振動と衝撃係数，土木学会論文集，第398号／I-10，pp.303-309，1988.10.
- 2) 横山功一・井上純三：自動車走行モードと道路橋の衝撃係数，土木学会論文集，第422号／I-14，pp.391-394，1990.10.
- 3) 梶川康男・沖野 真・吉川 実・杵本正信：高架橋と周辺地盤の交通振動予測と制振効果，土木学会 構造工学論文集，Vol.35A，pp.597-605，1989.3.
- 4) 深沢泰晴・杉山俊幸・中原和彦・水上浩之：車両走行時に道路橋から放射される低周波音の基本特性，土木学会 構造工学論文集，Vol.37A，pp.945-956，1991.3.
- 5) 川谷充郎・小松定夫・佐々木孝：走行自動車荷重を受けるプレートガーダー橋の動的応答特性に関する研究，土木学会論文集，第392号／I-9，pp.351-358，1988.4.
- 6) 難波宗行・川谷充郎・林 秀侃・中村一平・西星匡博：各種短支間道路橋における自動車走行実験，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集，I-375，1990.9.
- 7) 中島章典・津村直宜：車両・橋梁系振動問題のためのシミュレーション法についての一考察，土木学会 構造工学論文集，Vol.38A，pp.781-788，1992.3.
- 8) 川谷充郎・嶋田玲志：桁橋の構造諸元実態調査と走行荷重による不規則振動，土木学会 構造工学論文集，Vol.34A，pp.721-730，1988.3.
- 9) 川谷充郎・西山誠治・木本明男・井下泰具・中出 収：斜張橋の走行荷重下の動的応答に関わる路面凹凸特性，土木学会平成4年度関西支部年次学術講演会講演概要，I-55，1992.5.

(1992年9月21日受付)