

1
土研資料 第1233号
ST. 18
ST. Section

土木研究所資料

橋の構造特性に関する試験調査報告書(II-1976)

昭和52年3月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

序

本報告書は昭和51年度に実施された「橋の構造特性に関する試験調査・橋の走行荷重と動的応答に関する試験調査」の成果をとりまとめたものである。

内容は、路面凹凸を有する単純桁橋上を1台の車両が走行した時の、主桁の動的応答を数値計算により求めたものである。また、路面凹凸と自動車動的付加荷重の実測調査も実施したが、解析が終了していないので、調査概要のみ報告することとした。

昭和52年3月

構造研究室	室長	成田信之
	研究員	桂樹正隆
	室員	江本勝

目 次

序

1. はじめに	1
2. 単純桁橋の衝撃係数に関する調査	2
2.1 調査目的	2
2.2 理論式の誘導	2
2.3 数値計算	4
2.4 結果および考察	6
2.5 結 論	6
2.6 今後の問題点	6
参 考 文 献	6
3. 路面凹凸および動的付加荷重実測調査	8
3.1 調査目的	8
3.2 調査概要	8
3.3 解析方針	8
参 考 文 献	9

表

図

1. は じ め に

経済の高度成長による需給の増大、道路網の整備により、自動車の大型化および走行速度の高速化が顕著な傾向にある。このため自動車が路面に加える荷重は益々苛酷となっており、時には舗装の破損、橋梁床版の破損を招く恐れがある。また、最近の橋梁は新材料の開発および構造解析の進歩のため可撓性が増しつつあり、この自動車荷重により大きな変形を示すこともある。これらの問題に対処するため、自動車荷重の性質を明らかにするとともに、車両走行に伴う橋梁の動的応答を明らかにするための調査を実施した。

さて、自動車が道路を走行すると、路面の凹凸あるいはたわみ性のために、自動車は上下・左右・前後に動揺し、自動車の各部には絶えず変動する力が作用する。この現象を道路側より見れば、路面にはタイヤ面を介して常に変動する自動車荷重（＝自動車の静重量＋動的付加荷重）が作用することとなる。この荷重は走行する自動車の構造特性（重量、バネ定数、振動の減衰性など）、走行速度、路面の凹凸度およびたわみ性の影響を受ける。特に路面凹凸の影響は大きく、段差部では大きな自動車荷重が発生するのは周知の通りである。したがって自動車荷重の性質を考える際には、路面凹凸の性質との関係を明らかにする必要がある。このため、本年度は路面凹凸と動的付加荷重の実測調査を実施し、路面凹凸パワースペクトルを用いた路面性状の評価、および路面凹凸と動的付加荷重の関係の把握を試みたが、まだ解析が終了していないので、本報告書にはその調査概要だけを第3章に記載した。

次に、この自動車荷重がもたらす影響の1つとして、橋梁主桁のたわみ衝撃係数の問題を取り扱った。即ち、路面凹凸を有する単純桁橋上を、2自由度系に置換した車両1台が走行したときの主桁の動的応答および衝撃係数を数値計算で求め、衝撃係数に与える路面凹凸、車両走行速度および橋梁長の影響について考察を加えた。この結果は第2章で詳述する。

2. 単純桁橋の衝撃係数に関する調査

2.1 調査目的

走行車両による橋梁の動的応答については、古くから多くの理論的実験的研究が行なわれ、衝撃係数、疲労強度、および歩行者の振動感覚などに関する研究成果が数多く発表されている。しかし、これらの論文ではその数値計算に際して路面の凹凸が考慮されているものも多いが、路面凹凸の良否が衝撃係数等に与える影響を扱ったものはほとんどない。道路橋示方書においても、衝撃係数の算出式は支間長だけの関数で表わされており、路面凹凸は考慮されていない。前章でも述べた様に路面凹凸の良否が自動車荷重の大きさに与える影響は大きく、したがって衝撃係数におよぼす影響も大きいと考えられる。本調査では、この点を明らかにすることを主目的としている。

2.2 理論式の誘導

前項の目的を達成するために、シミュレーション法による数値計算を行なった。本節ではその理論式の誘導を示す。

過去の論文では自動車を1自由度系のモデルに置換したものが多い。しかし普通に見られる滑らかな路面凹凸に伴って発生する自動車荷重は、バネ上質量の振動数(2~4 Hz)に相当するものが卓越するものの、段差部等で路面凹凸高が急激な変化を示すところではバネ下質量の振動数(10~15 Hz)に相当するものが卓越する傾向にある。したがって自動車モデルとして1自由度系を用いるのは妥当でなく、本調査では2自由度系を用いることとした。

路面凹凸をもった単純桁橋(単位長さ当り重量・曲げ剛性一定)上を2自由度系に置換した単一車が等速走行したときの、橋梁の任意着目点の応答および自動車の動的付加軸重(=自動車荷重-静重量)を求めるために座標を図-2.1のようにとる。ここで、

m_1 :	バネ上質量	m_2 :	バネ下質量
k_1 :	懸架バネ定数	k_2 :	タイヤバネ定数
c_1 :	懸架部粘性係数	c_2 :	タイヤ部粘性係数
z_0 :	路面の凹凸高	z_1 :	バネ上質量の変位
z_2 :	バネ下質量	z_3 :	桁の変位

である。

単純桁のたわみを一般座標 $q_n(t)$ と基準関数 $x_n(x)$ を用いて表わすと、

$$z_3 = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) \cdot x_n(x) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

となる。

つぎに自動車・橋梁系の運動方程式をエネルギー法より求める。車両・橋梁の位置エネルギーを V 、運動

エネルギーをT、散逸エネルギーをDとすれば、

$$V = \frac{EI}{2} \int_0^{\ell} \left(\frac{\partial^2 z_3}{\partial x^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} k_1 (z_1 - z_2)^2 + \frac{1}{2} k_2 (z_2 - \bar{z})^2 - m_1 g \bar{z} - m_2 g \bar{z} \quad (2.2)$$

但し、 $\bar{z} = z_3 + z_0$ 、EI : 曲げ剛性

$$T = \frac{1}{2} \cdot \frac{w}{g} \int_0^{\ell} (\dot{z}_3)^2 dx + \frac{1}{2} m_1 (\dot{z}_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{z}_2)^2 \quad (2.3)$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot c_3 \int_0^{\ell} (\dot{z}_3)^2 dx + \frac{1}{2} c_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2)^2 + \frac{1}{2} c_2 (\dot{z}_2 - \dot{\bar{z}})^2 \quad (2.4)$$

但し、w : 橋の単位長さ当り重量、 c_3 : 橋の減衰定数

となる。式(2.1)～(2.4)をラグランジエの運動方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial V}{\partial q} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}} = 0$$

に代入すれば次の方程式を得る。

$$\ddot{q}_n + 2\beta_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n + \frac{2g}{w\ell} \{ k_2(\bar{z} - z_2) - m_1 g - m_2 g + c_2(\dot{\bar{z}} - \dot{z}_2) \} \cdot \sin \frac{n\pi x}{\ell} = 0 \quad (2.5)$$

ここで、

$$\beta_n = \frac{c_3}{2\omega_n (w/g)}, \quad \omega_n = \left(\frac{n\pi}{\ell} \right)^2 \sqrt{\frac{EIg}{w}}$$

である。一方車両の運動方程式より、

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_1 (z_1 - z_2) = 0 \quad (2.6)$$

$$m_1 \ddot{z}_2 + c_1 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_1 (z_2 - z_1) + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{\bar{z}}) + k_2 (z_2 - \bar{z}) = 0 \quad (2.7)$$

となり車両の動的付加荷重Pは次式で与えられる。

$$P = c_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_1 (z_1 - z_2) - m_2 \ddot{z}_2 = -m_1 \ddot{z}_1 - m_2 \ddot{z}_2 \quad (2.8)$$

式(2.5)～(2.6)の多元連立微分方程式を解けば $q_n, \bar{z}_1, \bar{z}_2$ が求まり、これを式(2.1), (2.8)に代入することによって橋梁の任意着目点の応答および車両の動的付加荷重を求めることができる。しかし、この微分方程式を解析学的に解くのは困難であるので、ルンゲ・クッター・ギル法によって数値計算することとした。この時の初期条件としては、車両が橋梁片端部をスタートする $t=0$ のときに、自動車・橋梁系のいかなる部分も運動していないものと考え、

$$\begin{aligned} t=0 \text{ のとき} \quad & z_1 = z_2 = q_n = 0 \\ & \dot{z}_1 = \dot{z}_2 = \dot{q}_n = 0 \\ & \ddot{z}_1 = \ddot{z}_2 = \ddot{q}_n = 0 \end{aligned}$$

とした。

2.3 数 値 計 算

(1) 衝撃係数の定義および着目点

主桁たわみの衝撃係数 i は次式で定義した。

$$i = \frac{(\text{動的たわみの最大値})}{(\text{静的たわみの最大値})} - 1 \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

したがって、動的たわみが最大値を示す時の車両位置と、静的たわみが最大値となる時の車両位置は必ずしも一致しない。また、衝撃係数 i は橋梁上の着目点の位置によってその値が異なるが、今回の計算においては車両が進入する方の桁端部からの距離が $\ell/2$ の点 ($1/2$ 点、 ℓ : 支間長) および $\ell/4$ の点 ($1/4$ 点) を着目点とした。

(2) 橋 梁 諸 元

数値計算に用いた単純桁橋の支間長は $\ell = 20, 30, 40, 50$ m のものであり、その諸元は表-2.1 にまとめた。これらの数値は文献 1) より引用したものである。

(3) 車 両 諸 元

数値計算に用いた車両諸元を表-2.2 に示す。この諸元は当研究室が実施した路板走行実験結果から定めたパラメータ値²⁾を用いて、総重量が 10 ton となるように定めたものである。

(4) 路 面 凹 凸

路面凹凸は文献 3) を参考にして、平均値 0 の定常確率ガウス過程としてモデル化した。すなわち、路面凹凸高は

$$z_o(x) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(\omega_k x + \phi_k) \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

但し、 $a_k^2 = 4 \cdot S_{z_o}(\omega_k) \cdot \Delta\omega$ $S_{z_o}(\omega)$: 路面凹凸パワースペクトル
 $\Delta\omega = (\omega_u - \omega_g) / N$ ω : 路面凹凸の空間円振動数 (rad/m)
 $\omega_k = \omega_g + (k - 1/2) \cdot \Delta\omega$ ω_u, ω_g : ω 軸の上、下限値
 N : 十分大きな正整数
 ϕ_k : 0 と 2π の間の一様乱数

で表わされる。今回の数値計算では、 $\omega_u = 10 \times 2\pi$, $\omega_g = 0.01 \times 2\pi$, $N = 1000$ を用いた。また $S_{z_o}(\omega)$ は、路面凹凸パワースペクトルによる路面評価基準 (ISO/TC108/WG9) (図-2.2 参照) を参考に次式を表わすこととした。

$$S_{z_o}(\Omega) = a \cdot \Omega^{-2} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

ただし、 $\Omega = \omega / 2\pi$: 路面凹凸の空間周波数 (c/m)

a : 路面凹凸の良否によって定まる定数

ここで、路面凹凸は3種類のものを用いるために、aの値を次のように定めた。

路面凹凸の種類	a の 値
A	0.05066
B	0.20264
C	0.81057

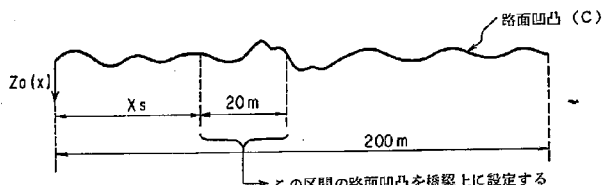
このようにしてシミュレートされた路面凹凸から、Tukey法によりパワースペクトルを求めた結果を図-2.3に示す。

(5) 積分の時間ピッチ

さて、実際の数値計算に際しては積分の時間ピッチ (Δt) が問題となる。この点を検討するために、 $\ell=20\text{m}$ の橋梁、Cの凹凸を用いて試算を行なった。この時、橋梁の振動モードは3次までを用いることとし、 Δt を3次モード固有周期 (0.0178秒) の $1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32$ に変化させて i を求めた。結果を図-2.4に示す。この試算結果から、 $\Delta t=0.003$ 秒とすれば充分であると判断した。

(6) 路面凹凸の一様性の検討

(4)によりシミュレートされた路面凹凸は、その求め方から理解できるように200mの区間を1サイクルとした周期性をもつ。したがって、数値計算を行なう場合、この200mの長さの凹凸高シリーズのうちどの部分が橋梁にあたるかによって、 i の値が異なる心配がある。そこで、 $\ell=20\text{m}$ の橋梁およびCの凹凸を用い、車両走行速度 $V=16\text{m/s}$ のときの $1/2$ 点および $1/4$ 点の衝撃係数 i を、橋梁上に想定する路面凹凸を $X_s=0, 25, 50, \dots, 175\text{m}$ に変化させて i の値を求めた。



結果を表-2.3に示す。本表から i の値にバラツキが多く、同じパワースペクトルをもった路面凹凸であっても、橋梁支間長程度の短区間の路面凹凸が有する性質は様でないことが理解される。

そこで、 $X_s = n \cdot \Delta X$ ($n=0, 1, 2, \dots, N; (N+1) \cdot \Delta X = 200$) のときの i を1つのサンプル値と考え、このサンプル値 $N+1$ 個から最大値 ($i_{\max}$)、平均値 ($\bar{i}$)、最小値 ($i_{\min}$)、標準偏差 (σ_i) および変動係数 (δ_i) を求めることとした。この場合でも ΔX の値をどの程度小さくすれば $\bar{i}$ 、 σ_i の値が安定するかを検討する必要がある。この検討結果 (表-2.4) から $\Delta X=1\text{m}$ を用いることとした。したがって、200個のサンプル値から $i_{\max}$ 、 $\bar{i}$ 、 $\dots$ の値を求めたことになる。

2.4 結果および考察

数値計算は、橋梁5種×路面凹凸3種×走行速度7種=105ケース行なった。計算結果を表-2.5(1)~(4)にまとめた。これを支間長および路面凹凸別に図示したのが図-2.5(1)~(4)である。なお、 $\ell=20\text{m}$ において1/4点の $\bar{i}$ が常に1/2点のそれよりも大きかったので、 $\ell \geq 30\text{m}$ においては1/4点のみに着目した。

(1) $\bar{\sigma}_i$ について

サンプル値のばらつきの度合を示す $\bar{\sigma}_i$ に考察を加える。表-2.5によれば $\bar{\sigma}_i$ は20%~47%の間に分布しており、そのばらつきが大きいのが理解される。また、路面凹凸が良い程 $\bar{\sigma}_i$ は大きくなるが、車速の増加に伴う $\bar{\sigma}_i$ の変化は ℓ によって異なり、 $\ell=20, 30\text{m}$ では増加の傾向を示すのに対し、 $\ell=40, 50\text{m}$ では $V=10, 12\text{m/s}$ のあたりが最大値をもつ。このように $\bar{\sigma}_i$ は路面凹凸、車速、および支間長の影響を受けて複雑な変化を示すが、その値が全般的に大きいのが注目される。

(2) $\bar{i}$ と車速の関係

図-2.5によれば、各図面とも車速の増加とともに $\bar{i}$ が単調増加しているのが読みとれる。また、その増加の増合は、高車速領域程ゆるやかである。

(3) $\bar{i}$ と路面凹凸の関係

路面凹凸の良否が $\bar{i}$ に与える影響は非常に大きいことが図-2.5からわかる。路面凹凸がAのときの $\bar{i}$ と路面凹凸がBおよびCのときの $\bar{i}$ の比を求めた結果が表-2.6であり、この表による $\bar{i}$ の比は、車速および支間長の影響をほとんど受けず、路面凹凸Bでは約2.1、路面凹凸Cでは約4.6である。路面凹凸高では、路面凹凸BはAの2倍、CはAの4倍であるので、 $\bar{i}$ はこの倍率より大きい比率を示しており、いかに路面凹凸の影響が大きいかが理解できる。したがって、衝撃係数の基準値を定める場合には、路面凹凸の良否というパラメーターを加えるのが合理的と考えられる。

(4) $\bar{i}$ と ℓ の関係

図-2.6に $\bar{i}$ と ℓ の関係を路面凹凸別に図示した。不規則振動論を用いた従来の研究成果^(4),5)によれば、1台の車両走行に伴う衝撃は、車両と橋梁の振動の連成を無視し車両の接地力を定常ランダム外力と仮定した場合には、車両と橋梁の固有振動数比が1に近いときに橋梁の応答が実測データに合わないほど過度に大きくなるが、車両と橋梁の振動の連成を考慮した場合には、両者の振動数比が1に近づくにつれて橋梁の応答は大きくなるものの、過度になることはないとされている。今回の数値計算では、その手法としてシミュレーション法を用いたが、図-2.6に結果を示すように車両パネ上質量と橋梁の固有振動数比が1近くなると考えられる $\ell=50\text{m}$ においても $\bar{i}$ の増加は見られず、むしろ $\bar{i}$ は ℓ の影響を受けないものと考えられる。

2.5 結 論

前節の考察から、単一車両走行による橋梁の衝撃係数を以下のようにとりまとめた。

走行速度については2.4(2)より、 $V=7.20\text{KM/H}$ の結果を用いれば十分安全であると考えられる。また、2.4(1)で述べた $\bar{i}$ のサンプル値のばらつきを考慮して、衝撃係数を $\bar{i}+2\bar{\sigma}_i$ で表わすこととする。この結

果を図-2.7に示す。

2.6 今後の問題点

- (1) 前節で衝撃係数に与える路面凹凸の良否の影響がいかに大きいを示したが、計算に用いた路面凹凸は仮想のパワースペクトルからシミュレートしたものであり、現存する舗装路面との対比が不十分である。したがって、完成直後の舗装路面のパワースペクトルが大体どれ位の値をもっているのか、またその経年変化による劣化がどの程度であるのか、さらに舗装面の悪化の限度等を明らかにすることにより、我々が考慮すべき衝撃係数の最大値が明確になるものと考えられる。
- (2) 今回は1台の車両が走行したときの衝撃係数を求めたものであり、この結果を設計に用いるべき基準として拡張するためには、載荷台数による衝撃係数の連続効果を明らかにする必要がある。このためのプログラム開発は今年度終了しており、数値計算は来年度行なう予定である。
- (3) 今回の計算では、伸縮継手部に生じ易い段差を考慮に入れなかった。段差部を車両が通過したときに発生する自動車荷重は非常に大きく、これが衝撃係数に与える影響は小さいと考えられるものの、伸縮継手部付近の床版に対しては苛酷な荷重となる可能性がある。幸い今回用いた計算手法がシミュレーション法であり、この問題についての取扱いが簡単である。したがって来年度はこの点についても検討を加える予定である。

参 考 文 献

- 1) 山田・小堀：活荷重に対する道路橋の動的応答——衝撃係数——に関する考察、土木学会論文集、No 148, 1967-12
- 2) 成田・桂樹・野中：自動車走行にともなう道路の騒音と振動、自動車技術、Vol. 30, No. 12, 1976
- 3) 星谷・中根：橋の振動による心理的反応の理論解析、土木学会論文報告集、No 246, 1976-2
- 4) 小堀・梶川：単一動荷重に対する道路橋の振動感覚、土木学会論文報告集、No 248, 1976-4
小堀・梶川：振動感覚を評価するためのアーチ橋の動的スペクトル、土木学会論文報告集、No 251, 1976-7
- 5) 吉村・彦坂・内容：単一走行車両による道路橋の非定常ランダム応答の解析、土木学会論文報告集、No 258, 1977-2

3. 路面凹凸および動的付加荷重実測調査

3.1 調査目的

路面凹凸の評価の指標として、従来道路関係者の間ではTCR (Total cumulative roughness)、RI (Roughness Index)、およびPrI (Profile Index)等が用いられてきた。これらの評価基準として、日本道路公団、高速道路調査会がまとめたものを表-2.7に示す。しかし、路面凹凸に起因して発生する自動車荷重の大きさの研究を進めるにあたっては、路面凹凸をパワースペクトル表示の方が良い。しかし表-2.7に示した評価基準と、路面凹凸パワースペクトルの相関を扱った研究は少く、前章2.6(1)で述べた問題が常に生じてくる。なお、図-2.2に示したISO規格案も表-2.7との対応が明確ではない。

また、路面凹凸をパワースペクトル ($P_x(f)$) 表示した場合、自動車の動的付加荷重のパワースペクトル ($P_y(f)$) は次式で表現される。

$$P_y(f) = |A(f)|^2 \cdot P_x(f) \quad A(f) : \text{伝達関数}, f : \text{c/s} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

したがって、 $A(f)$ を求めれば路面凹凸および車速が自動車荷重に与える影響を明らかにすることが可能である。

以上の考えから、路面凹凸と動的付加荷重の実測を行ない、 $P_x(f)$ を用いた路面凹凸評価法の確立および伝達関数 $A(f)$ を求めるための調査を実施することとした。

3.2 調査概要

調査は路面凹凸調査と動的付加荷重調査に分類される。

路面凹凸調査では、千葉・茨城県内の一般道路30ヶ所において、1ヶ所あたり100mの調査区間を設定し、まず3mプロファイルメーターによる路面凹凸測定を行なった。しかしこのプロファイルメーターでは長い波長の路面凹凸を測定することが不可能であり、パワースペクトル表示のための記録としては不十分であるので、当研究室が所有する高速プロファイルメーター⁶⁾による路面凹凸測定も同時に実施した。またこの区間内で試験車(三菱ローザB216)を20, 30, 40 KM/Hの速度で等速走行させ、この時に発生する後車軸(軸重2.5 ton)の動的付加荷重を実測した。動的付加荷重の実測方法は文献7)を参照されたい。

3.3 解析方針

3mプロファイルメーターの記録は、3.1で述べた従来の路面凹凸の評価指標で整理し、一方高速プロファイルメーターの記録から路面凹凸パワースペクトルを求める。この両者を比較することにより、路面凹凸パワースペクトルによる路面凹凸評価法の確立を計る。

また、動的付加荷重記録をスペクトル分析した結果を用い、自動車荷重と路面凹凸の伝達関数を決定する。これらの解析作業は現在進行中であり、結果は次回報告することとしたい。

参 考 文 献

- 6) 成田・池村・水口：プロフィールメーターの開発、土木技術資料、Vol. 16, No. 8
- 7) 成田・池村：路面の凹凸と自動車荷重(Ⅲ)、土木研究所構造研究室、1974-3

表-2.1 橋梁諸元

スパン	$l =$	20 m	30	40	50
単位長当重量	$w =$	2420.0 kg/m	2586.7	2670.0	2720.0
曲げ剛性	$EI =$	$6.21 \times 10^{12} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$	1.242×10^{12}	2.441×10^{12}	4.220×10^{12}
減衰定数	$h_1 =$	0.02	0.02	0.02	0.02
固有振動数 (1次モード)		6.230 Hz	3.786	2.934	2.450
" (2次 ")		24.922 Hz	15.144	11.754	9.800
" (3次 ")		56.074 Hz	34.073	26.446	22.049

表-2.2 車両諸元とパラメーター値

バネ上質量	m_1	8757/98 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$)
懸架バネ定数	k_1	220200 (kg/m)
懸架部粘性定数	c_1	12630 ($\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}$)
バネ下質量	m_2	1243/98 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$)
タイヤバネ定数	k_2	846900 (kg/m)
タイヤ部粘性定数	c_2	2073 ($\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}$)
バネ上振動数	$(\nu_1) : \sqrt{k_1/m_1}$	15.7 (rad/s)
懸架部減衰定数	$(\beta_1) : c_1/(2\nu_1 m_1)$	0.45
バネ下振動数	$(\nu_2) : \sqrt{k_2/m_2}$	81.7 (rad/s)
タイヤ部減衰定数	$(\beta_2) : c_2/(2\nu_2 m_2)$	0.01
バネ上バネ下質量比 (R_m)	$: m_2/m_1$	0.142

表-2.3 路面凹凸の一様性の検討 (X_s の影響)

X_s (m)	衝撃係数 i	
	$\frac{1}{4}$ 点	$\frac{1}{2}$ 点
0	0.379	0.298
25	0.429	0.298
50	0.814	0.863
75	0.439	0.439
100	0.186	0.202
125	0.556	0.614
150	0.510	0.402
175	0.549	0.519

$\ell = 20 \text{ m}$, 路面凹凸 C, $V = 16 \text{ m/s}$

表-2.4 路面凹凸の一様性の検討 (Δx の影響)

ΔX (m)	$\frac{1}{4}$ 点				$\frac{1}{2}$ 点			
	$i_{\min}$	$\bar{i}$	$i_{\max}$	σ_i	$i_{\min}$	$\bar{i}$	$i_{\max}$	σ_i
0.25	0.090	0.456	0.854	0.1592	0.045	0.411	0.923	0.1635
0.50	0.090	0.456	0.854	0.1591	0.077	0.411	0.918	0.1635
0.75	0.125	0.461	0.848	0.1601	0.045	0.416	0.916	0.1639
1.00	0.090	0.457	0.848	0.1601	0.099	0.411	0.916	0.1638
1.25	0.145	0.457	0.848	0.1573	0.111	0.412	0.923	0.1625
1.50	0.125	0.464	0.848	0.1625	0.098	0.420	0.916	0.1652
2.00	0.156	0.455	0.824	0.1580	0.116	0.408	0.863	0.1641
2.50	0.151	0.464	0.814	0.1584	0.128	0.421	0.863	0.1599
3.50	0.125	0.483	0.764	0.1611	0.098	0.435	0.759	0.1644
5.00	0.177	0.438	0.814	0.1441	0.151	0.401	0.863	0.1485

$\ell = 20 \text{ m}$, 路面凹凸 C, $V = 16 \text{ m/s}$

表-2.5(1) 衝擊係數計算結果一覽表(支間長 $L=20\text{ m}$)

		18.0KM/H (5.0M/S)		28.8KM/H (8.0M/S)		36.0KM/H (10.0M/S)		43.2KM/H (12.0M/S)		50.4KM/H (14.0M/S)		57.6KM/H (16.0M/S)		72.0KM/H (20.0M/S)	
路面凹凸	諸 値	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点
A	最小 値	0.038	0.034	0.021	0.022	0.031	0.033	0.033	0.018	0.027	0.004	0.003	0.004	0.024	0.001
	平均 値	0.092	0.086	0.111	0.103	0.122	0.115	0.126	0.116	0.125	0.119	0.129	0.122	0.141	0.132
	最大 値	0.164	0.156	0.250	0.242	0.224	0.220	0.264	0.263	0.249	0.247	0.298	0.296	0.342	0.317
	標準偏差	0.0268	0.0272	0.0393	0.0399	0.0382	0.0372	0.0451	0.0457	0.0483	0.0501	0.0533	0.0563	0.0622	0.0638
	変動係数	0.291	0.316	0.354	0.387	0.313	0.324	0.367	0.394	0.386	0.421	0.413	0.462	0.441	0.483
B	最小 値	0.094	0.071	0.056	0.067	0.082	0.075	0.087	0.066	0.058	0.024	0.027	0.023	0.053	0.009
	平均 値	0.194	0.185	0.237	0.227	0.261	0.252	0.263	0.253	0.267	0.256	0.274	0.263	0.291	0.280
	最大 値	0.326	0.315	0.501	0.485	0.438	0.440	0.527	0.526	0.477	0.484	0.586	0.575	0.650	0.623
	標準偏差	0.0524	0.0534	0.0775	0.0779	0.0707	0.0702	0.0873	0.0878	0.0946	0.0985	0.1041	0.1089	0.1210	0.124
	変動係数	0.270	0.289	0.327	0.343	0.271	0.279	0.332	0.347	0.354	0.385	0.380	0.414	0.416	0.443
C	最小 値	0.210	0.157	0.199	0.202	0.182	0.171	0.199	0.163	0.157	0.089	0.096	0.064	0.176	0.046
	平均 値	0.411	0.397	0.507	0.491	0.553	0.536	0.557	0.542	0.577	0.553	0.592	0.567	0.623	0.603
	最大 値	0.649	0.632	1.002	0.969	0.868	0.881	1.055	1.052	0.933	0.958	1.163	1.134	1.286	1.249
	標準偏差	0.1006	0.1038	0.150	0.151	0.134	0.135	0.171	0.171	0.182	0.192	0.201	0.212	0.236	0.242
	変動係数	0.245	0.262	0.296	0.308	0.242	0.252	0.307	0.316	0.315	0.347	0.340	0.374	0.379	0.401

表-2.5(2) 衝擊係數計算結果一覽表(支間部 $L=30\text{ m}$)

		18.0KM/H (5.0M/S)		28.8KM/H (8.0M/S)		36.0KM/H (10.0M/S)		43.2KM/H (12.0M/S)		50.4KM/H (14.0M/S)		57.6KM/H (16.0M/S)		72.0KM/H (20.0M/S)	
路面凹凸	諸 値	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点	1/4 点	1/2 点
A	最小 値	0.017		0.025		0.023		0.034		0.031		0.031		0.018	
	平均 値	0.085		0.101		0.105		0.113		0.118		0.123		0.129	
	最大 値	0.163		0.187		0.217		0.228		0.243		0.262		0.296	
	標準偏差	0.0266		0.0367		0.0398		0.0446		0.0476		0.0569		0.0604	
	変動係数	0.313		0.363		0.379		0.395		0.403		0.463		0.468	
B	最小 値	0.068		0.047		0.046		0.071		0.081		0.070		0.042	
	平均 値	0.181		0.219		0.224		0.242		0.255		0.262		0.275	
	最大 値	0.324		0.374		0.427		0.454		0.468		0.527		0.562	
	標準偏差	0.0506		0.0691		0.0782		0.0859		0.0912		0.1103		0.1146	
	変動係数	0.280		0.316		0.349		0.355		0.358		0.421		0.417	
C	最小 値	0.187		0.154		0.136		0.146		0.213		0.176		0.163	
	平均 値	0.389		0.477		0.487		0.523		0.554		0.569		0.595	
	最大 値	0.649		0.748		0.848		0.906		0.917		1.065		1.093	
	標準偏差	0.0952		0.1250		0.1427		0.1627		0.1684		0.2094		0.2169	
	変動係数	0.245		0.262		0.293		0.311		0.304		0.368		0.365	

表-2 5 (3) 衝擊係數計算結果一覽表 (支間長 $L = 40\text{ m}$)

路面凹凸	諸 値	18.0KM/H (5.0M/S)		28.8KM/H (8.0M/S)		36.0KM/H (10.0M/S)		43.2KM/H (12.0M/S)		50.4KM/H (14.0M/S)		57.6KM/H (16.0M/S)		72.0KM/H (20.0M/S)	
		¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点
A	最小値	0.034		0.027		0.034		0.029		0.022		0.028		0.036	
	平均値	0.089		0.101		0.109		0.115		0.120		0.127		0.134	
	最大値	0.150		0.177		0.175		0.224		0.228		0.228		0.243	
	標準偏差	0.0254		0.0328		0.0352		0.0499		0.0505		0.0498		0.0451	
	変動係数	0.285		0.325		0.323		0.434		0.421		0.392		0.337	
B	最小値	0.077		0.060		0.109		0.090		0.080		0.073		0.094	
	平均値	0.191		0.215		0.235		0.250		0.258		0.270		0.283	
	最大値	0.299		0.350		0.352		0.445		0.444		0.453		0.463	
	標準偏差	0.0470		0.0632		0.0642		0.0946		0.0958		0.0926		0.0752	
	変動係数	0.246		0.294		0.273		0.378		0.371		0.343		0.266	
C	最小値	0.198		0.171		0.244		0.225		0.228		0.254		0.280	
	平均値	0.404		0.467		0.504		0.547		0.558		0.586		0.593	
	最大値	0.596		0.698		0.707		0.887		0.877		0.907		0.902	
	標準偏差	0.0865		0.1114		0.1140		0.1739		0.1764		0.1609		0.1365	
	変動係数	0.214		0.239		0.226		0.318		0.316		0.275		0.230	

表-2 5 (4) 衝擊係數計算結果一覽表 (支間長 $L = 50\text{ m}$)

路面凹凸	諸 値	18.0KM/H (5.0M/S)		28.8KM/H (8.0M/S)		36.0KM/H (10.0M/S)		43.2KM/H (12.0M/S)		50.4KM/H (14.0M/S)		57.6KM/H (16.0M/S)		72.0KM/H (20.0M/S)	
		¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点	¼ 点	½ 点
A	最小値			0.046		0.030		0.043		0.026		0.015		0.032	
	平均値			0.101		0.104		0.114		0.119		0.123		0.132	
	最大値			0.180		0.218		0.210		0.231		0.210		0.240	
	標準偏差			0.0293		0.0481		0.0425		0.0439		0.0444		0.0423	
	変動係数			0.290		0.463		0.373		0.369		0.361		0.321	
B	最小値			0.111		0.077		0.120		0.087		0.049		0.094	
	平均値			0.216		0.230		0.244		0.256		0.259		0.269	
	最大値			0.357		0.439		0.419		0.453		0.420		0.455	
	標準偏差			0.0543		0.0889		0.0820		0.0793		0.0839		0.0740	
	変動係数			0.251		0.387		0.336		0.311		0.324		0.275	
C	最小値			0.273		0.222		0.275		0.298		0.156		0.279	
	平均値			0.465		0.510		0.525		0.550		0.552		0.556	
	最大値			0.712		0.883		0.838		0.916		0.839		0.930	
	標準偏差			0.0955		0.1589		0.1515		0.1521		0.1557		0.1442	
	変動係数			0.205		0.312		0.289		0.277		0.282		0.259	

表-2.6 $\bar{i}$ への路面凹凸の影響(14点)
(路面凹凸Aのときの $\bar{i}$ を1とした比)

路面 凹凸	車速V(KM/H) 支間長 ℓ (m)	18.0	28.8	36.0	43.2	50.4	57.6	72.0
B	20	2.11	2.14	2.14	2.14	2.14	2.12	2.06
	30	2.13	2.17	2.13	2.14	2.16	2.13	2.13
	40	2.15	2.13	2.16	2.17	2.15	2.13	2.11
	50		2.14	2.21	2.14	2.15	2.11	2.04
C	20	4.47	4.57	4.53	4.53	4.62	4.59	4.42
	30	4.57	4.72	4.64	4.63	4.69	4.63	4.61
	40	4.54	4.62	4.62	4.76	4.65	4.61	4.43
	50		4.60	4.90	4.61	4.62	4.49	4.21

表-2.7 TCR, RI, PrIの評価基準

(a) TCR (高速道路調査会)

TCR値	評 価
0 ~ 100 cm/km	smooth
100 ~ 160	transition
160 以上	rough

(b) TCR (日本道路公団)

TCR値	評 価
0 ~ 80 cm/km	優
80 ~ 160	良
160 以上	可

(c) RI (高速道路調査会)

RI 値	評 価
0 ~ 50 cm/km	優
50 ~ 100	良
100 ~ 200	可
200 以上	不可

(d) PrI (高速道路調査会)

PrI 値	評 価
0 ~ 16 cm/km	優
16 ~ 90	良
90 以上	可

(土工部分)

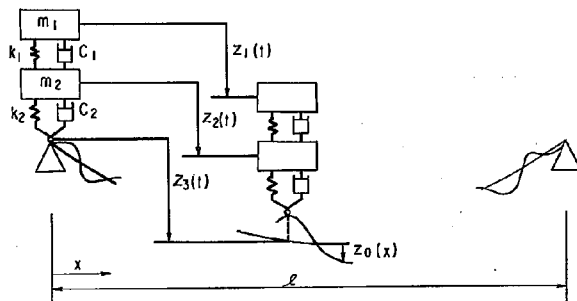


図-2.1 座 標

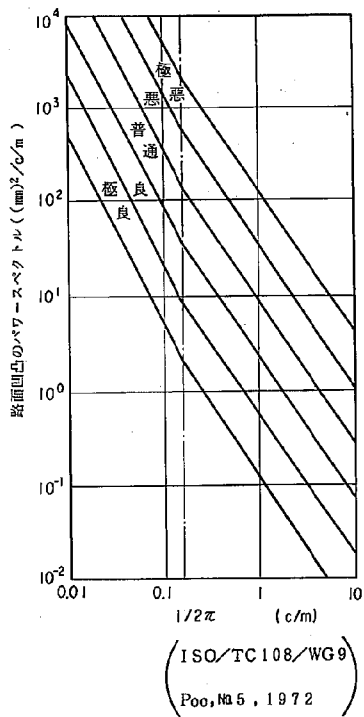


図-2.2 パワースペクトルと評価基準

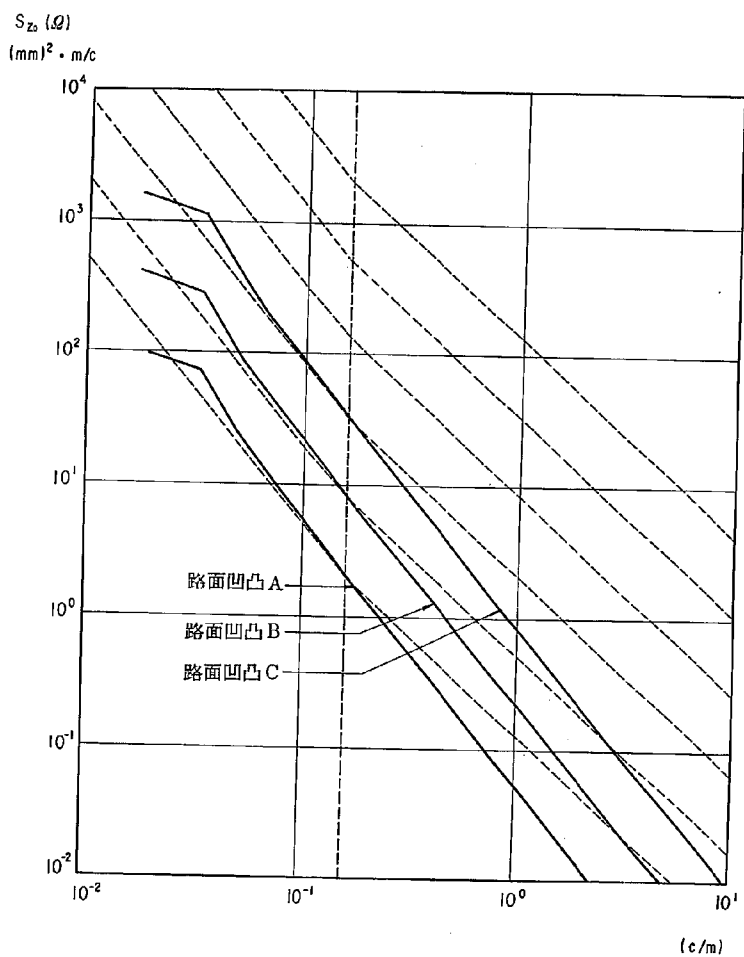


図-2.3 路面凹凸パワースペクトル (A, B, C)

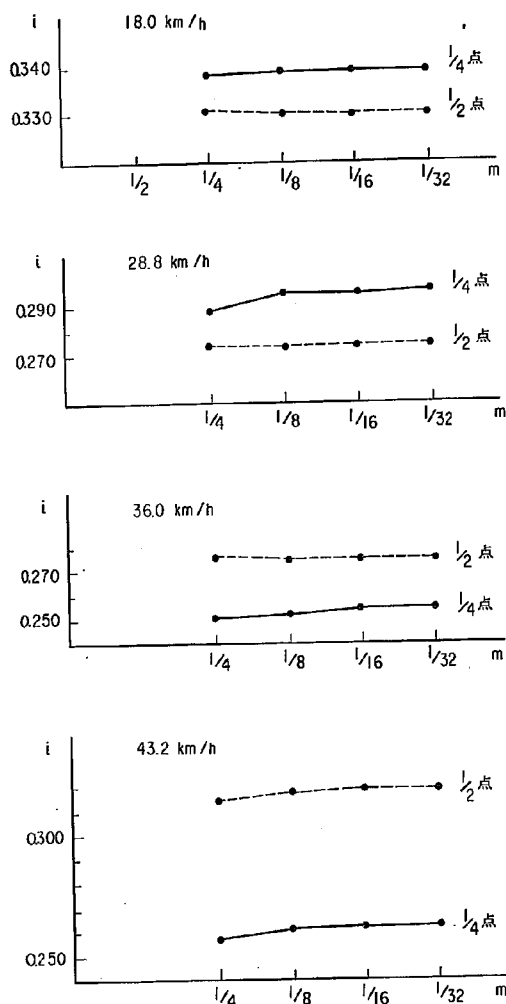


図-2.4 積分の時間ピッチ(Δt)の影響($l=20$ m, 路面凹凸C)

$$(\Delta t = 0.0178 \times m \text{ 秒})$$

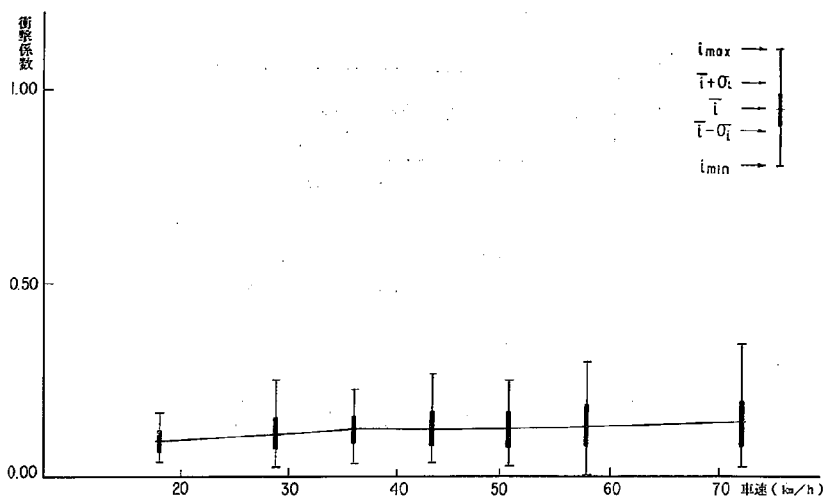


图-2.5(1) 衡乘係数 ($l = 20$ m, 路面凹凸A, $\frac{1}{4}$ 点)

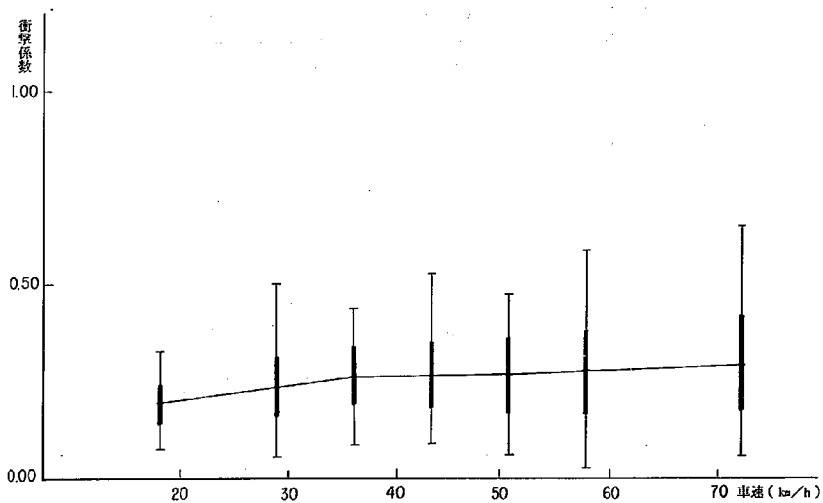


图-2.5(2) 衡乘係数 ($l = 20$ m, 路面凹凸B, $\frac{1}{4}$ 点)

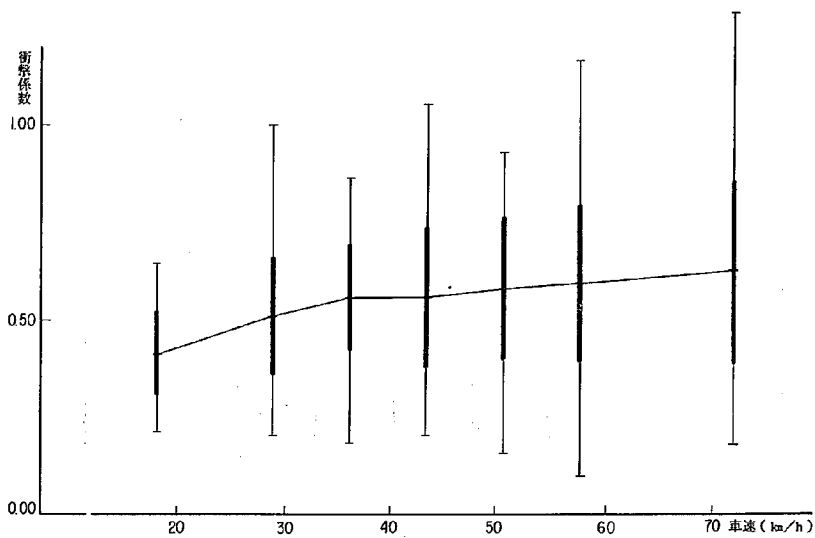


圖-2.5(3) 衝擊係數 ($\ell = 20$ m, 路面凹凸C, 1/4点)

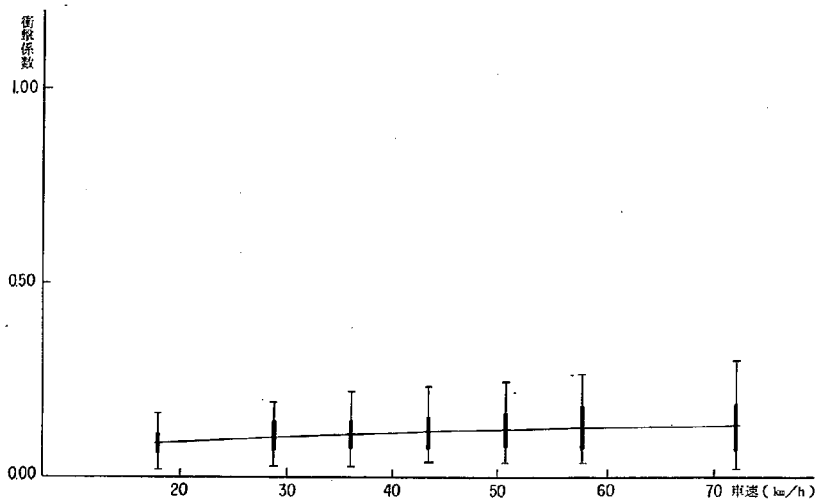


圖-2.5(4) 衝擊係數 ($\ell = 30$ m, 路面凹凸A, 1/4点)

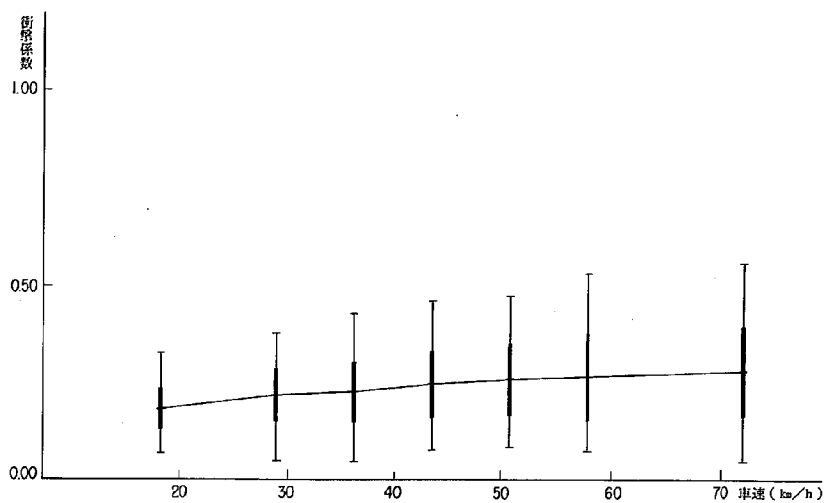


圖-2.5(5) 衝擊係數 ($\ell = 30$ m, 路面凹凸B, $\frac{1}{4}$ 點)

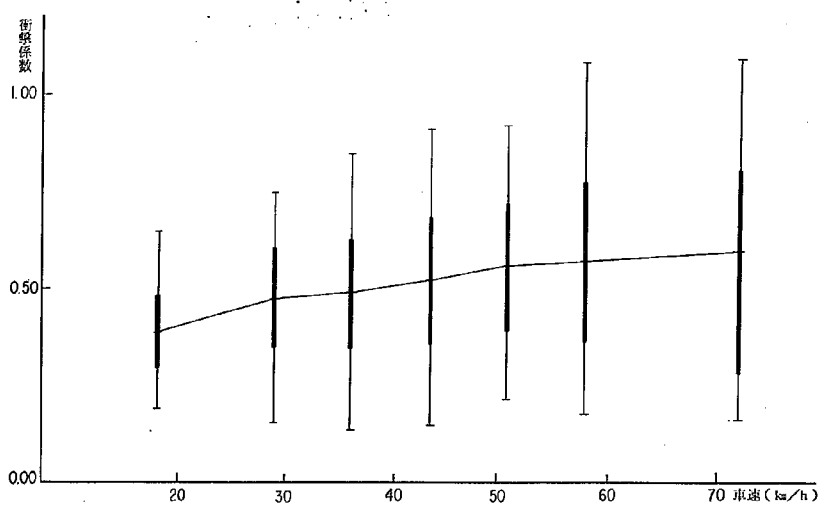


圖-2.5(6) 衝擊係數 ($\ell = 30$ m, 路面凹凸C, $\frac{1}{4}$ 點)

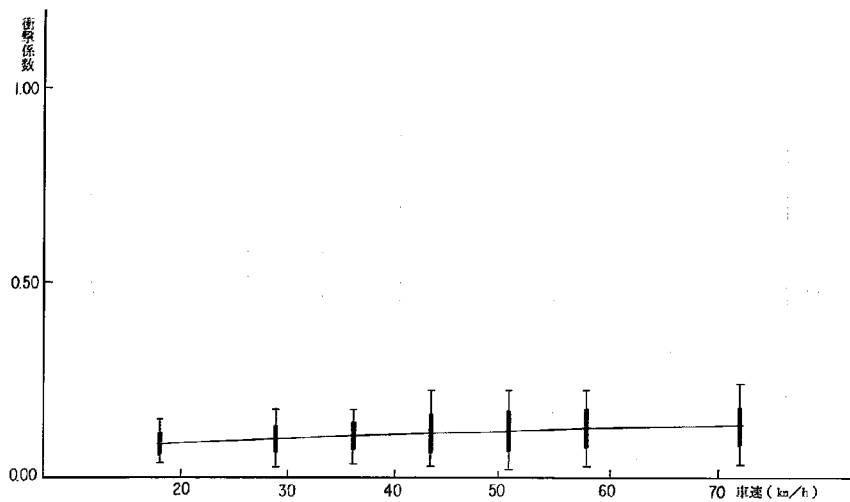


圖-2.5(7) 衝擊係數 ($l = 40$ m, 路面凹凸A, $\frac{1}{4}$ 点)

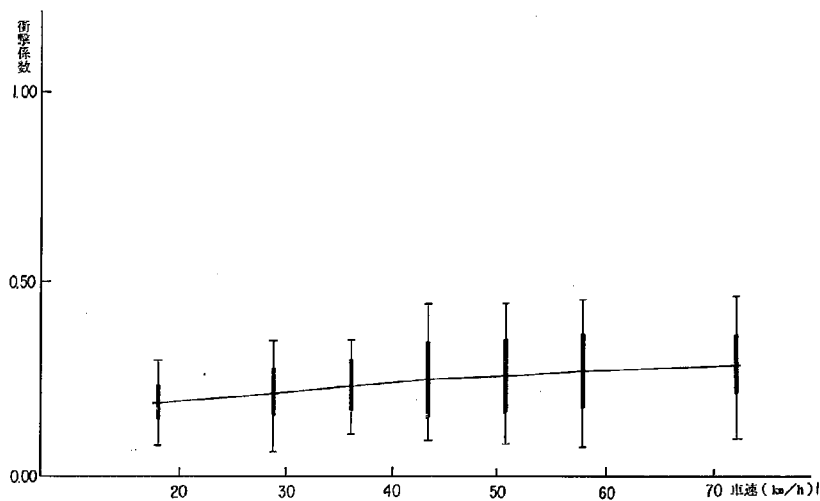


圖-2.5(8) 衝擊係數 ($l = 40$ m, 路面凹凸B, $\frac{1}{4}$ 点)

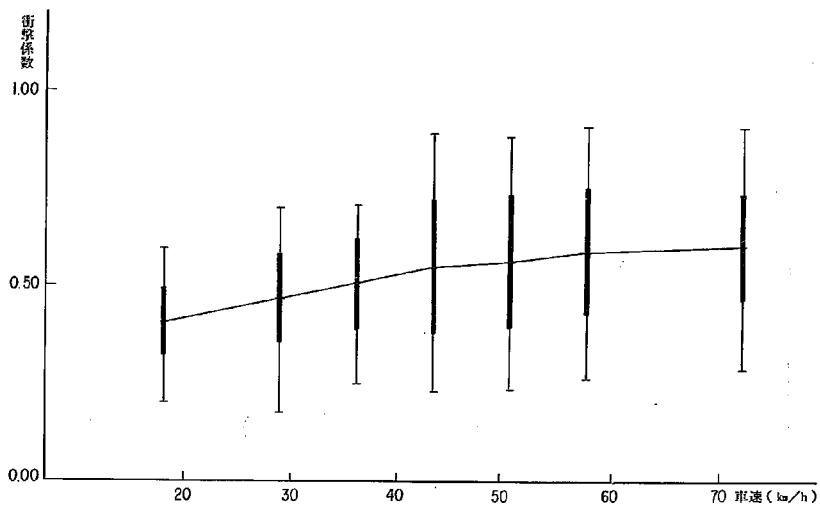


图-2.5(9) 衝擊係數 ($\ell=40$ m, 路面凹凸 C, $\frac{1}{4}$ 点)

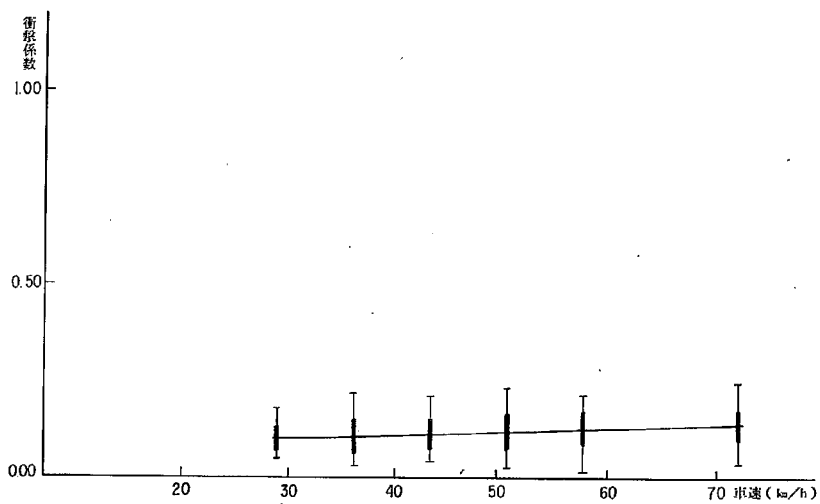


图-2.5(10) 衝擊係數 ($\ell=50$ m, 路面凹凸 A, $\frac{1}{4}$ 点)

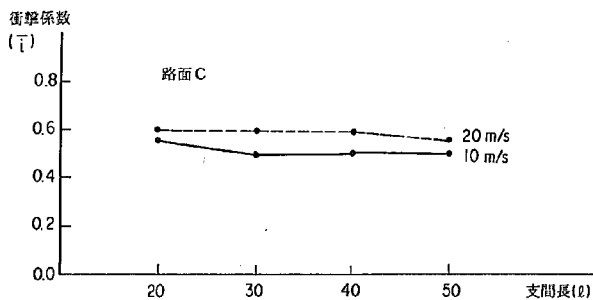
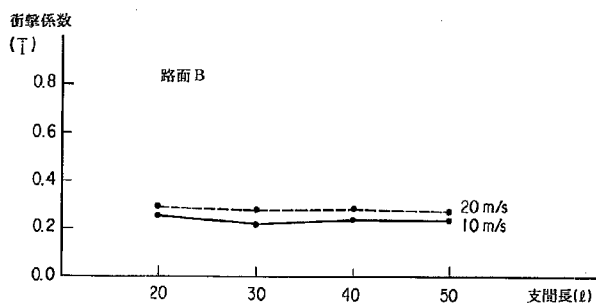
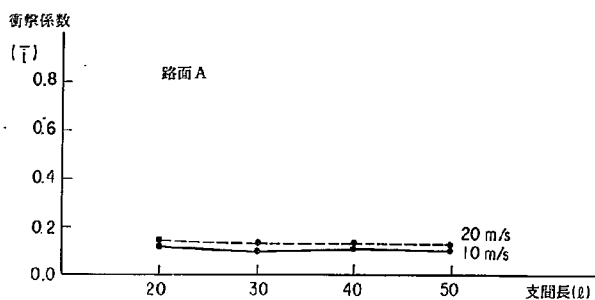


図-2.6 $\bar{i}$ と l の関係 (1/4点)

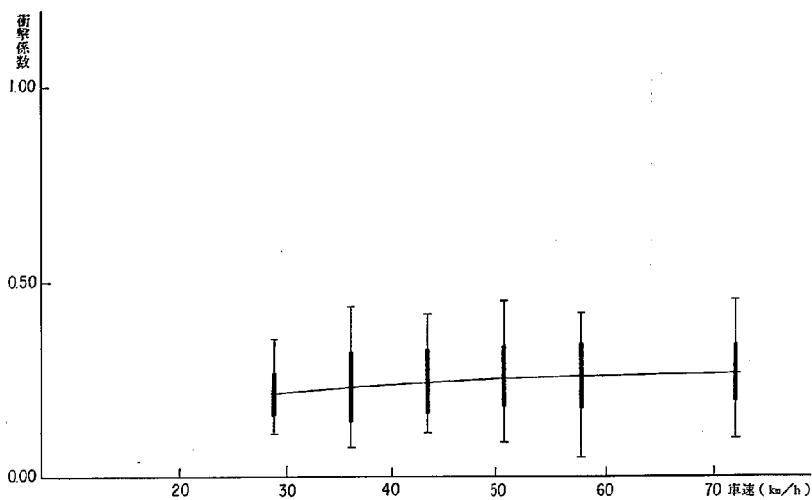


圖-2.5(1) 衝擊係數 ($\ell = 50$ m, 路面凹凸B, $\frac{1}{4}$ 点)

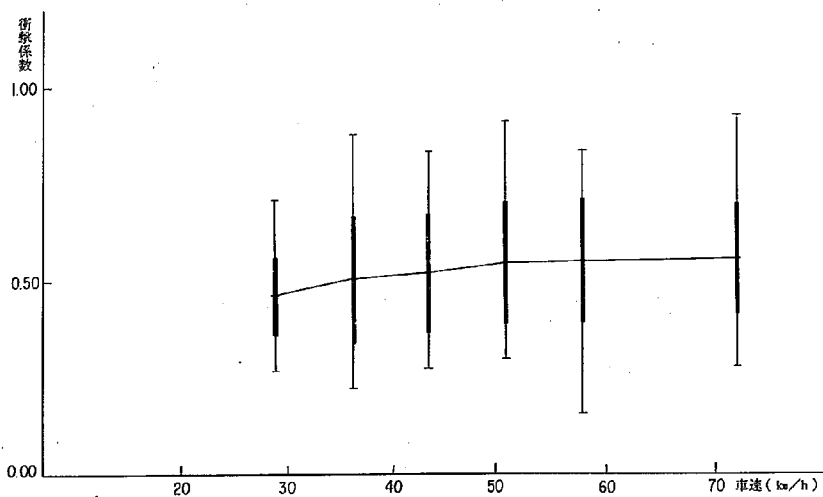


圖-2.5(2) 衝擊係數 ($\ell = 50$ m, 路面凹凸C, $\frac{1}{4}$ 点)

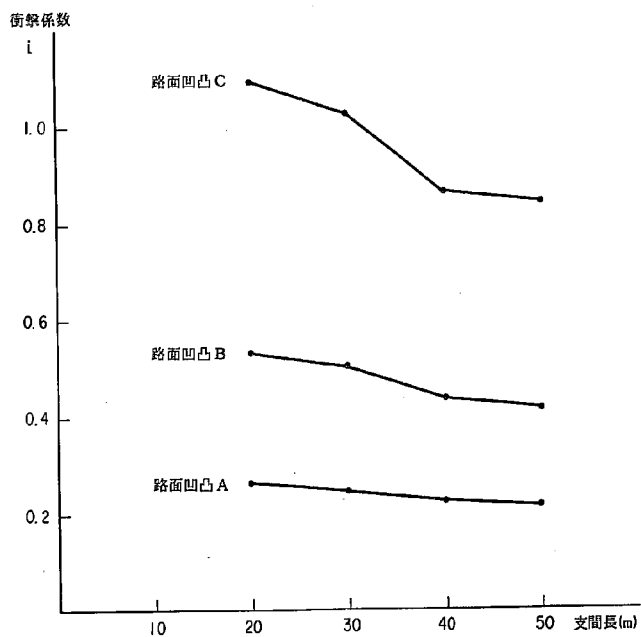


圖-2.7 單一車走行時衝擊係數 ($i = \bar{i} + 2\sigma_i$)