



土 木 研 究 所 資 料

第1024号

橋の構造特性に関する調査報告書

—走行車両による桁橋の動的応答—

昭和50年3月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

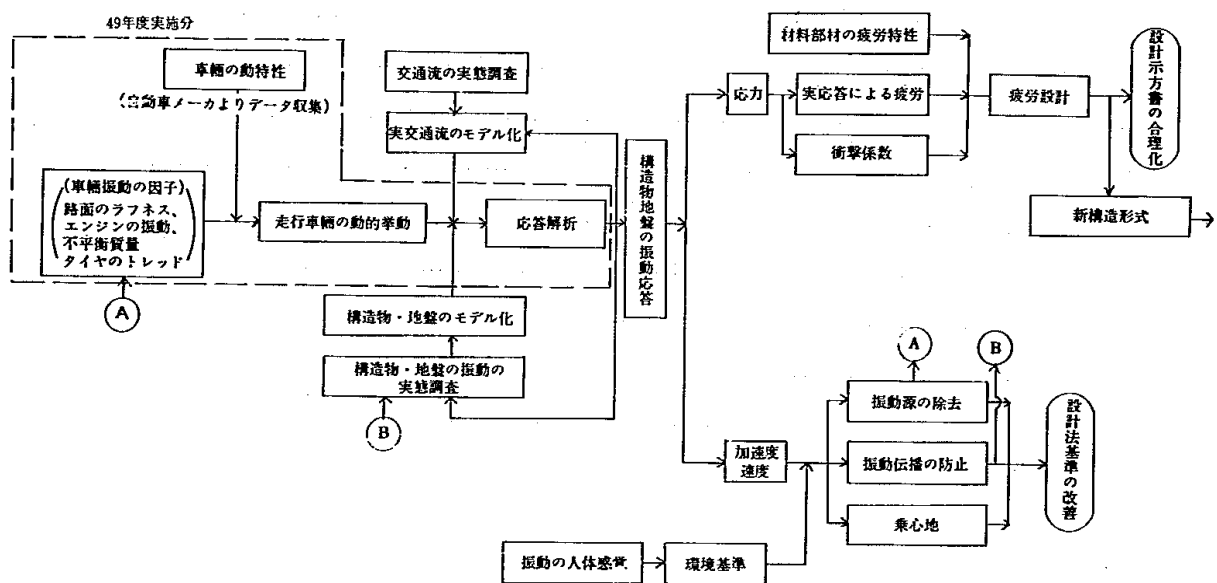
まえがき

昭和49年度に実施した道路事業調査“橋の構造特性に関する試験・調査”の成果を報告する。調査の内容は、路面凹凸の実測、走行時の自動車の動的接地荷重の測定と、桁橋（ゲルバー桁橋）の振動特性試験、および、単一車両載荷時の桁橋の動的応答解析であり、調査研究計画を示す流れ図（下図参照）の破線内に相当する。

構造研究室

室長 成田 信之
研究員 池村 雅司
室員 水口 辰夫

橋の構造特性（除薄肉構造物）・交通振動公害調査研究の流れ図



橋の構造特性に関する調査報告書

—走行車両による桁橋の動的応答—

目 次

ま え が き	1
1. 概 説	3
2. 路 面 凹 凸	3
3. 単一車の動的接地荷重	4
4. 桁橋の振動特性	5
4-1 実験対象橋の概要	5
4-2 実験方法	5
4-3 実験結果	6
4-4 理論解析	7
5. 単一車による桁橋の応答	9
6. 結 論	12
7. 今後の問題点	13
あ と が き	13
参 考 文 献	14
表	15
図	16
写 真	41

1. 概 説

新材料の開発および構造解析の進歩により、橋はますます可撓性をましつつある。また、経済の高度成長による需給の増大により、車両はますます大型化しつつある。このため従来あまり問題とならなかった荷重の動的影響は、橋の振動において顕著に表われるようになってきている。このような理由により、橋の動的問題である衝撃・疲労などについて再検討する必要が生じてきている。

橋の動的応答に関する研究は、従来、主としてけた上を通過する荷重による振動問題として理論的実験的研究が行われてきた。しかし、道路橋の動的応答は、主として走行する車両の動的な接地荷重（以後動的接地荷重と称する）によって誘起されるものであり、この動的接地荷重は、主として橋面の凹凸、段差によって起こるものである。したがって、道路橋の動的応答を求める場合には、橋面の凹凸、段差を含めて考えなければならない。³⁾

本報告書では、路面凹凸、動的接地荷重の実測結果より、その特性を求め、次に車両が橋梁に1台載荷した場合の動的係数（動たわみ/静たわみ）を実験および実測路面入力によるシュミレーションより求めた。この結果、路面凹凸については、パワースペクトルで表わした場合の勾配 n （パワースペクトルを $S_{20}(\omega) = a\omega^{-n}$ とした場合）は ISO/TC 108/WG 9 の規格案（図 1-1 参照）より大きく約 2.3 となること、路面周波数 ω で $\omega = 1/2\pi$ で折線としいることの根拠がないように思われることがわかった。

動的接地荷重については、車軸のひずみとパネ下加速度より求めたものは、起振機による加振実験より実用上十分な精度で求められること、また、一般路走行時の動的接地荷重は静荷重の約 20% 程度であることが明らかとなった。

単一車による桁橋の応答については、その動的係数が、実験値・計算値とも車速 60 km/h 付近までは車速とともに増大すること、路面凹凸の影響の大きいこと、載荷する車両の懸架パネ・タイヤパネのパネ定数が大きいほど大きくなること等がわかった。

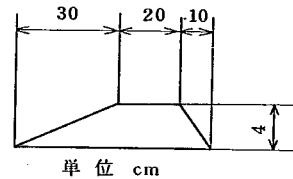
2. 路面の凹凸

47年度に開発した新型式のプロフィールメーターは、測定用車輪を路面に圧着させている機械系の共振振動数が約 25 c/s であり、系の共振を避けるために、走行速度が制約されて測定時の車速は高々 10 km/h に押えざるを得なかった。そこで本年度には以下のような変更により、測定用車輪を含む可動部の軽量化をおこない、測定時の走行速度の高速化をはかった。

- (1) アーム長を 1 m から 0.5 m と短くしたこと。
- (2) 測定用車輪を 128 ϕ $\times$ 38 H から 50 ϕ $\times$ 36 H と変更したこと。
- (3) 測定用車輪と相対変位計の接続をパイプからピアノ線に変更し、スプリングで吊る方式としたこと。

変更後の機械部の概略を写真1に示すが、このような改造により可動部重量は7.7 kgから約1.0 kgと軽量化され、固有振動数を2.8倍(約70 c/s)程度に増加することができた。

この性能を確認するため、右図に示す断面の踏板を使って走行実験をおこなった。その結果、図2・1の踏板通過時の波形記録で示すように30 km/h程度で走行しても十分の精度で路面の凹凸を計測できることがわかった。アーム長を短かくしたことにより、図2・2に示す円弧運動の影響が生ずるが凹凸量が±10mmの範囲では、その影響は十分小さいので、実用上は問題がないものと判断された。



改良したプロフィールメーターを用いて国道16号線市原市(上下車線、外側車線)で路面凹凸の実測をおこなった。走行速度は約20 km/hである。測定された路面凹凸波形の例を図2・3に、またこれより算出した路面凹凸のパワースペクトルを図2・4・1～3に示す。パワースペクトルの算出は、データーレコーダーに収録した路面凹凸記録をA/D変換し、電子計算機を用いて $Tu-Key$ の手法によりおこなった。また、前年度の報告書²⁾に従って算出した路面凹凸の超過確率・頻度分布を図2・5・1～3に示す。この結果、路面凹凸パワースペクトルを $S_{z0} = a \Omega^{-n}$ と表わした場合の勾配 n は、ISO/TC108/WG9(1972)(図1・1)に示された路面の分類の $n \div 1.8$ に比較して大きく、約2.3前後になると思われる。(ここに、 a は係数で路面の良否によって決まる値であり、 Ω は路面凹凸の波長 λ と $\Omega = 1/\lambda$ の関係があり路面周波数と呼ばれるものである。)しかしながら、今年度の測定結果は、良好なコンクリート舗装のみであるので具体的な路面凹凸パワースペクトルの定式化は、各種の舗装状態・路面状況における測定結果の収集をまっしておきたい。

3. 単一車の動的接地荷重

48年度の調査²⁾では、バネ下加速度と車軸のひずみから動的接地荷重を求める方法により、動的接地荷重が大型車前輪で車輪の下に設置したロードセルから求められたものに比較して約85%の精度で求められることがわかった。そこで今年度は、大型車後輪について前記方法を適用し、その有効性を検証した。試験方法は、大型車(2軸車、車両重量7.7 t、最大積載量6 t)を荷台に設置した起振機で加振し、この時発生する動的接地荷重を前記方法および車輪の下に設置したロードセルによって同時測定して検証するものである。(写真2参照)このようにして求められた動的接地荷重の周波数特性を図3・1に示す。これより動的接地荷重は、後輪についてもバネ下加速度と車軸のひずみから求める従来の方式を用いても、ロードセルから求めた値に比較して約90%の精度で求められるものと思われる。しかし、今回の資料も車が静止した状態でおこなったものであり、走行時の車両では、タイヤバネ定数の変化、タイヤ質量の不平衡の影響があるので、今後、走行車両重量計等によって検証しなければならない。

前記方法により、名四国道名古屋市で約50 km/hで走行中に発生する動的接地荷重の測定をお

こなつた。前記路面凹凸の場合と同様の手法で算出した動的接地荷重のパワースペクトルを図3・2・1, 2に, 超過確率・頻度分布を図3・3に示す。それによると動的接地荷重のパワースペクトルでは約 2.3 c/s 付近にピークがあるが, これはバネ上共振点に相当するものと思われる。また, 普通程度の路面性状である前記道路における動的接地荷重は, レベル超過確率分布の5%値によれば, ケースⅡ4を除いて約 $\pm 1.0 \text{ t}$ の範囲に入り, 静荷重(5.5 t)の約20%に相当することになる。

4. 桁橋の振動特性

4-1 実験対象橋の概要

実験は愛知県碧南市と西尾市を結ぶ県道西尾・新川港線の矢作川に架設された旧上塚橋の左岸側2径間を対象として実施した。本橋は昭和初期に架設された16径間ゲルバー桁橋であり, 実験終了後に架け換えのため解体された。本橋の全景および実験対象径間を写真3, 4に示す。

本橋の主な諸元を以下に示す。

橋	長	426.900m
支 間	割	20.700m + 14 @ 27.300m + 24.000m
幅	員	5.500m
主 桁	高	1.400m (支間中央), 1.878 (支点上)
橋	格	1 等 橋
床	版	鉄筋コンクリート床版 (12 cm厚)
舗	装	アスファルト舗装 (7 cm厚)

4-2 実験方法

実験項目は, 共振振動数・共振波形・構造減衰の計測 車両走行による主桁・縦桁・床版のひずみおよび主桁のたわみの計測である。以下で詳細について述べる。

(1) 共振振動数

2連式起振機(最大出力10 t, たわみ・振れ加振可能, 周波数範囲 $1 \sim 10 \text{ c/s}$)を左岸側第2径間の3/8点に設置してたわみおよび振れ加振し, この時の各測点の加速度をサーボ型加速度計により測定した。測点配置および計測ダイヤグラムを図4・1, 2に, 起振機設置状況, 加速度計設置状況および計測器配置状況を写真5~7に示す。

(2) 振動波形

共振振動数の場合と同様に起振機で加振し, 共振点付近で加振振動数を一定にし, ピックアップを順次移動した。

(3) 構造減衰

当初の予定では, 起振機の急停止後に生ずる自由振動の記録から減衰定数を求める予定であったが, 予想以上に減衰が大きかったため, 起振機の停止と同時に振動が止まり自由振動の記録がとれ

なかった。

(4) 車 両 走 行

左岸側より大型車（静的重量、前軸 4.9 t、後軸 7.3 t）を走行させ、その時に発生する主桁のたわみ、主桁、縦桁および床版のひずみを測定した。走行方法は、上流側車線、橋の中央について、車速約 20、30、40、50 km/h で各 2 回ずつ走行させた。その時、段差の影響を調べるため橋面上に前記プロフィールメーターの性能試験に用いた踏板を 3 枚置いた。また車両位置を明確にするためにロードスイッチを 4 個所に設置した。たわみの測定は、主桁下フランジと河川敷の杭に取り付けた変位計をピアノ線で連結（バネで緊張させた）しておこなった。主桁、縦桁および床版のひずみは、主桁・縦桁下フランジ下面、床版下面に貼付したストレインゲージより求めた。各測点配置、踏板位置およびロードスイッチ位置図を図 4・1 に計測ダイアグラムを図 4・2 に示す。また、変位計取付状況を写真 8 に示す。

4-3 実 験 結 果

(1) 共 振 振 動 数

データーを次のように整理した。

$$\text{実 変 位} \quad \eta_a = \ddot{\eta} / (2\pi f)^2 \quad \eta : \text{加速度 (gal)}, \quad f : \text{振動数 (c/s)}$$

$$\text{起振力 10 t 換算変位} \quad \eta_r = \eta_a \cdot 10 / F_f \quad F_f : f \text{ c/s における起振力 (t)}$$

実験より得られた共振曲線を図 4・3・1～3 に示す。これよりたわみ振動のピークは、約 2.8 c/s、4.7 c/s、6.5 c/s 付近にあり、約 2.8 c/s は張出し桁の対称 1 次振動に相当する。振れ振動については、約 5.35 c/s、5.70 c/s、6.75 c/s にピークが見られた。しかし、5.35 c/s と 5.70 c/s は、別個の共振点であるか否かについてはモードが得られていないため不明である。この点については、周波数分析手法を用いて現在検討中である。

(2) 振 動 波 形

共振振動数実験の実変位と同様な方法で求めた振動波形を図 4・4 に示す。

(3) 構 造 減 衰

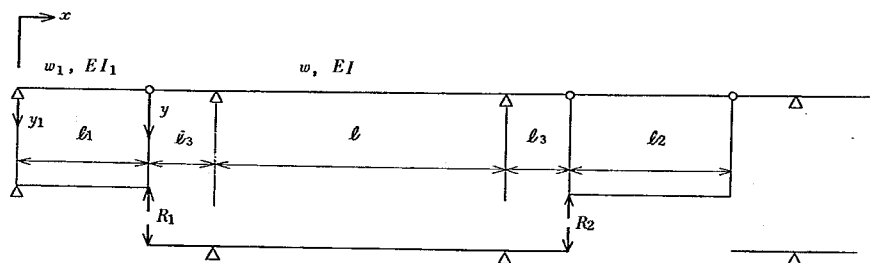
前記理由によって自由振動記録から求めることができなかったため、他の方法（例えばパワースペクトルより求める方法）を検討中である。

(4) 車 両 走 行

車両走行実験で得られた主桁の動たわみおよび動ひずみ記録の 1 例を図 4・5・1、2 に、縦桁および床版の動ひずみ記録の 1 例を図 4・5・3 に示す。なお、図 4・5・1 の静たわみとは、自動車の後輪位置を載荷位置とした時の測点の静的なたわみを表わし、影響線的な図である。この図に示すように静たわみと動たわみから推定される静たわみはよい対応を示さない。これは、車両走行時と静的載荷時の載荷位置のずれ、平滑走行の影響に起因するものと思われるが、詳細は現在検討中である。このため、静たわみを動たわみの平均たわみとして動的係数を求めた。この動的係数と車速の関係を図 4・6・1、2 に示す。この図から踏板なしの場合、動的係数は実験範囲内の車速では車速の増大と共に大きくなる傾向を示している。また、ここで得られた動的係数を「道路橋

示方書」の衝撃係数の値と比較すると、踏板のない場合、車速 40 km/h では、動的係数が衝撃係数の値より大きい。これは、橋面がパッチング、エクステンション等のため凹凸が大きいこと、車両が 1 台しか載荷していないため車両載荷台数による低減がないことに起因するものと思われる。踏板のある場合は、前述のような傾向を見つけることはほとんど困難であり、低車速（20 km/h 前後）での動的係数が著じるしく大きいことがわかる。これは、動的係数に与える路面凹凸の影響が大きいことを示すものと考えられる。

4-4 理論解析



上図のように、はりの軸に沿う座標を x 、 x 点におけるけたのたわみを y 、 y_1 はりの単位長さ当りの重量を w 、 w_1 、曲げ剛性を EI とすれば、自由振動中のけたの x 点における微小長さ dx 部分の力の釣合いを考えると

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}) + \frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

が成立する。ここで、曲げ剛性 EI が一定であると考えられる場合

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

この式(1)、(2)は、はりの曲げ振動の基礎微分方程式である。いま、はりのある固有振動数に対するたわみ形を次のように仮定する。

$$y = X_n(x) \cdot q_n(t) = X_n(A \cos w_n t + B \sin w_n t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

$X_n(x)$: x だけの関数で一般に基準関数と呼ばれる。

$q_n(t)$: 時間 t だけの関数で一般座標または基準座標と呼ばれる。

式(3)を式(2)に代入し、 $\lambda_n^4 = (w/g \cdot EI) \times w_n^2$ とすれば

$$\frac{d^4 X_n}{dx^4} - \lambda_n^4 X_n = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)は、 X だけの 4 階微分方程式でその一般解は、

$$X_n = C_1 \cos h \lambda_n x + C_2 \sin h \lambda_n x + C_3 \sin \lambda_n x + C_4 \cos \lambda_n x \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで、 $C_1 \sim C_4$ は境界条件によって決まる値である。

いま、境界条件および吊桁部と張出し桁部の連続条件は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} x = 0 & \quad ; \quad X_{n1} = 0, \quad \ddot{X}_{n1} = 0 \\ x = l_1 & \quad ; \quad \ddot{X}_{n1} = 0, \quad \ddot{X}_n = 0, \quad X_{n1} = X_n \\ x = l_1 + l_3 & \quad ; \quad X_n = 0 \\ x = l_1 + l_3 + l & \quad ; \quad X_n = 0 \\ x = l_1 + 2l_3 + l & \quad ; \quad \ddot{X}_n = 0 \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

式(6)を式(5)に代入すると

$$\left. \begin{aligned} C_1' + C_3' &= 0 \\ C_1' - C_3' &= 0 \\ C_1' \cosh \lambda_{n1} l_1 + C_2' \sinh \lambda_{n1} l_1 - C_3' \cos \lambda_{n1} l_1 - C_4' \sin \lambda_{n1} l_1 &= 0 \\ C_1' \cosh \lambda_n l_1 + C_2' \sinh \lambda_n l_1 + C_3' \cos \lambda_n l_1 + C_4' \sin \lambda_n l_1 \\ &\quad - C_1 \cosh \lambda_n l_1 - C_2 \sinh \lambda_n l_1 \\ &\quad - C_3 \cos \lambda_n l_1 - C_4 \sin \lambda_n l_1 = 0 \\ C_1 \cosh \lambda_n l_1 + C_2 \sinh \lambda_n l_1 - C_3 \cos \lambda_n l_1 - C_4 \sin \lambda_n l_1 &= 0 \\ C_1 \cosh \lambda_n (l_1 + l_3) + C_2 \sinh \lambda_n (l_1 + l_3) + C_3 \cos \lambda_n (l_1 + l_3) \\ &\quad + C_4 \sin \lambda_n (l_1 + l_3) = 0 \\ C_1 \cosh \lambda_n (l_1 + l_3 + l) + C_2 \sinh \lambda_n (l_1 + l_3 + l) \\ &\quad + C_3 \cos \lambda_n (l_1 + l_3 + l) + C_4 \sin \lambda_n (l_1 + l_3 + l) = 0 \\ C_1 \cosh \lambda_n (l_1 + 2l_3 + l) + C_2 \sinh \lambda_n (l_1 + 2l_3 + l) \\ &\quad - C_3 \cos \lambda_n (l_1 + 2l_3 + l) - C_4 \sin \lambda_n (l_1 + 2l_3 + l) = 0 \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

式(7)より $C_1' = C_3' = 0$, C_2' , C_4' , C_1 , C_2 , C_3 , $C_4 \neq 0$ であるから、振動数方程式は次のようになる。

$$\begin{vmatrix} \cosh \lambda_n l_1 & \sinh \lambda_n l_1 & -\cos \lambda_n l_1 & -\sin \lambda_n l_1 \\ \cosh \lambda_n (l_1 + l_3) & \sinh \lambda_n (l_1 + l_3) & \cos \lambda_n (l_1 + l_3) & \sin \lambda_n (l_1 + l_3) \\ \cosh \lambda_n (l_1 + l_3 + l) & \sinh \lambda_n (l_1 + l_3 + l) & \cos \lambda_n (l_1 + l_3 + l) & \sin \lambda_n (l_1 + l_3 + l) \\ \cosh \lambda_n (l_1 + 2l_3 + l) & \sinh \lambda_n (l_1 + 2l_3 + l) & -\cos \lambda_n (l_1 + 2l_3 + l) & -\sin \lambda_n (l_1 + 2l_3 + l) \end{vmatrix} = 0 \dots (8)$$

式(8)より λ_n を求めれば

$$w_n = \lambda_n^2 \sqrt{\frac{g E I}{w}}$$

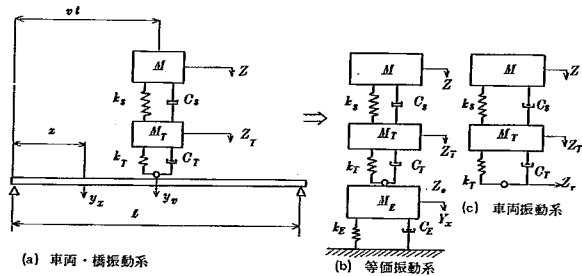
より、固有振動数が求まる。また、 λ_n を式(7)に代入し、 $C_2', C_4', C_1, C_2, C_3, C_4$ の1つを仮定すれば、各係数の値が決まり基準振動形が求まる。

計算により求めた固有振動数を表-1に、基準振動波形を図4・4に示す。計算による固有振動数と実験による共振動数は一致していないが、これは、本橋が昭和初期のものであり正確な断面寸法が得られなかったため、単位体積重量 w 、曲げ剛性 $E I$ を正確に算出することが出来なかったこと、等断面としたことに起因するものと思われる。

5. 単一車による桁橋の応答

一般に、自動車の振動は、上下振動にのみ着目すると図(C)のような2自由度系として考えることができる⁴⁾。車両が橋桁上に載荷した時の座標を図(a)のようにとる。

単純げた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



$$y = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) \cdot X_n(x) \quad \dots\dots (1)$$

となる。ここで、 $X_n(x)$ は単純ばりの場合

$$X_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \dots\dots (2)$$

で表わされ、一般座標 $q_n(t)$ も $n = 2$ 以上の項は小さくなるので省略すると、橋桁の動たわみは次式で表わされる。

$$y = q(t) \sin \frac{\pi x}{l} \quad \dots\dots (3)$$

いま、けたおよび車両の平衡位置を基準とし、 $E I$ をスパン全体について一定と考える。車両・橋系の位置エネルギー V 、運動エネルギー T およびレイリーの散逸関数 D は

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{EI}{2} \int_0^l \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{k_s}{2} (Z - Z_T)^2 + \frac{k_T}{2} (Z_T - y_v)^2 + (m + m_T) g \cdot y_v \\ T &= \frac{1}{2} \frac{w}{g} \int_0^l \dot{y}^2 dx + \frac{1}{2} m \dot{Z}^2 + \frac{1}{2} m_T \dot{Z}_T^2 \\ D &= \frac{1}{2} C \int_0^l \dot{y}^2 dx + \frac{1}{2} C_s (\dot{Z} - \dot{Z}_T)^2 + \frac{1}{2} C_T (\dot{Z}_T - \dot{y}_v)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

ここで,

w/g ; はりの単位長さ当り質量.

C ; はりの減衰係数

y_v ; 車両載荷点のはりの動たわみ

x_v ; 支点から車両載荷点までの距離

これらの式をLagrange の運動方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial V}{\partial q} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}} = 0 \quad \dots\dots (5)$$

に代入する。また車両マスの運動方程式より

$$\left. \begin{aligned} M_E \ddot{q} + C \dot{q} + k_E q - \{ k_T (Z_T - y_v) + C_T (\dot{Z}_T - \dot{y}_v) - (m + m_T) g \} \sin \frac{\pi x_v}{\ell} &= 0 \\ m \ddot{Z} + k_S (Z - Z_T) + C_S (\dot{Z} - \dot{Z}_T) &= 0 \\ m_T \ddot{Z}_T + k_S (Z_T - Z) + C_S (\dot{Z}_T - \dot{Z}) + k_T (Z_T - y_v) + C_T (\dot{Z}_T - \dot{y}_v) &= 0 \end{aligned} \right\} (6)$$

ここで

$$M_E = w \ell / 2g, \quad C_E = \frac{1}{2} C_\ell, \quad k_E = (EI \ell / 2) (\pi / \ell)^4$$

式(6)は図(b)の振動方程式を表わすことになる。そこで、この系を図(a)の車両・橋系の等価振動系とみなすことができる。なお、 q は固定として支間の中央を選べば、 $q = y_{1/2} \equiv y$ となり、支間中央の動たわみを表わすので式(6)は次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} M_E \ddot{y}_C + C_E \dot{y}_C + k_E y_C - \{ k_T (Z_T - y_v) + C_T (\dot{Z}_T - \dot{y}_v) + (m + m_T) g \} \sin \frac{\pi v \ell}{\ell} &= 0 \\ m \ddot{Z}_T + k_S (Z - Z_T) + C_S (\dot{Z} - \dot{Z}_T) &= 0 \\ m_T \ddot{Z}_T + k_S (Z_T - Z) + C_S (\dot{Z}_T - \dot{Z}) + k_T (Z_T - y_v) + C_T (\dot{Z}_T - \dot{y}_v) &= 0 \end{aligned} \right\} (7)$$

式(7)より y_C を求める。これには、(1)パワースペクトルを利用する方法、(2)時系列による方法があるが、ここではパワースペクトルを利用する方法を用いて、橋桁の応答を求める。

式(7)のままでは、計算が困難であるので、載荷位置も支間中央に固定し、また、動的たわみのみを考えると、

$$\left. \begin{aligned} M_E \ddot{y}_C + C_E \dot{y}_C + k_E y_C - k_T (Z_T - y_v) - C_T (\dot{Z}_T - \dot{y}_v) &= 0 \\ m \ddot{Z} + k_S (Z - Z_T) + C_S (\dot{Z} - \dot{Z}_T) &= 0 \\ m_T \ddot{Z}_T + k_S (Z_T - Z) + C_S (\dot{Z}_T - \dot{Z}) + k_T (Z_T - y_v) + C_T (\dot{Z}_T - \dot{y}_v) &= 0 \end{aligned} \right\} (8)$$

となる。この連立微分方程式で、自動車のタイヤは必ず路面に接触しているとすると、

$$y_v(t) = y_C(t) + Z_O(t)$$

となり、このことを考慮し、また、 $Z(t)$ 、 $Z_T(t)$ 、 $Z_O(t)$ 、および $y_C(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ $Z(i\omega)$ 、 $Z_T(i\omega)$ 、 $Z_O(i\omega)$ 、および $Y_C(i\omega)$ とし、

$$Z(0) = Z_T(0) = Z_O(0) = y_C(0) = 0$$

$$\dot{Z}(0) = \dot{Z}_T(0) = \dot{Z}_O(0) = \dot{y}_C(0) = 0$$

とする。このとき、式(8)は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} J_1(i\omega)Y_C(i\omega) - J_2(i\omega)Z_T(i\omega) + J_2(i\omega)Z_O(i\omega) &= 0 \\ J_4(i\omega)Z(i\omega) - J_3(i\omega)Z_T(i\omega) &= 0 \\ -J_2(i\omega)Y_C(i\omega) - J_3(i\omega)Z(i\omega) + J_5(i\omega)Z_T(i\omega) - J_2(i\omega)Z_O(i\omega) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

ここで

$$J_1(i\omega) = (-M_E\omega^2 + k_E + k_T) + i\omega(C_E + C_T)$$

$$J_2(i\omega) = k_T + i\omega C_T$$

$$J_3(i\omega) = k_S + i\omega C_S$$

$$J_4(i\omega) = (-m\omega^2 + k_S) + i\omega C_S$$

$$J_5(i\omega) = (-m_T\omega^2 + k_S + k_T) + i\omega(C_S + C_T)$$

式(9)より、 $Y_C(i\omega)$ と $Z_O(i\omega)$ の関係について解けば、

$$Y_C(i\omega) = \frac{-J_2(i\omega)\{J_2(i\omega)J_4(i\omega) + J_3(i\omega)^2 - J_4(i\omega)J_5(i\omega)\}}{J_2(i\omega)^2 J_4(i\omega) + J_2(i\omega)\{J_3(i\omega)^2 - J_4(i\omega)J_5(i\omega)\}} Z_O(i\omega) \dots (10)$$

と表わされる。

ここで

$$H_{yzo}(i\omega) = \frac{-J_2(i\omega)\{J_2(i\omega)J_4(i\omega) + J_3(i\omega)^2 - J_4(i\omega)J_5(i\omega)\}}{J_2(i\omega)^2 J_4(i\omega) + J_1(i\omega)\{J_3(i\omega)^2 - J_4(i\omega)J_5(i\omega)\}} \dots (11)$$

とすれば、 $H_{yzo}(i\omega)$ は $y_C(t)$ と $Z_O(t)$ の間の伝達関数を表わす。さらに式(10)をパワースペクトル密度 $S_y(\omega)$ で表わせば、各パワースペクトル密度関数は、

$$S_y(\omega) = \overline{H_{yzo}(i\omega)} \cdot H_{yzo}(i\omega) \cdot S_{zo}(\omega) \dots (12)$$

と表わされる。

パワースペクトル密度関数 $S_y(\omega)$ と相関関数 $R(\tau)$ とは互いにフーリエ変換で表わされ、その相関関数 $R(\tau)$ のパラメータ τ が0の時の相関関数が二乗平均 $\bar{y}^2$ を表わす。すなわち、

$$\bar{y}^2 = R(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_y(\omega) d\omega \dots (13)$$

ここで、この過程が正規分布であり、平均値が零であるとすれば、この $\overline{y^2}$ がこの関数の標準偏差 $(S.V.)$ の二乗、すなわち、分散を意味するから、

$$(S.V.) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_y(\omega) d\omega} \quad \dots\dots (18)$$

となる。このことは関数 y の振幅の少なくとも68.27%がこの $(S.V.)$ 値の範囲に含まれ、さらに2 $(S.V.)$ をとれば y の95.45%、3 $(S.V.)$ をとれば、 y の99.74%がこのうちに含まれることになる。

この方法を利用して、路面凹凸パワースペクトル(図5・1・1～3)入力による橋桁の動たわみ(2 $(S.V.)$ の値を採用した。)を求め、路面凹凸パワースペクトル、スパン、車両および車速の違いによる動的係数の変化について求めた。シュミレーションに使用した車両諸元を表2に示す。(実在するのは、車両(A)だけで他車両は(A)より想定したものである。)橋の諸元は土木研究所標準設計より算出したもので表3に示す。また入力路面凹凸パワースペクトルは、国道16号線市原市で実測したものをを用いた。これを図5・1、動的係数の変化を図5・2・1～3に示す。

この結果より動的係数は、車両の懸架バネおよびタイヤバネのバネ定数により大きく変化し、バネ定数が大きくなると大きくなる。また、車速60 km/h前後までは車速とともに大きくなる傾向にある。路面凹凸のパワースペクトルによる動的係数の変化は、3種類の路面凹凸パワースペクトルがよく似ているため明瞭でない。スパンによる変化は、50mの値が、30mの時の値より大きくなり、従来の理論の逆になっている。これは、車両が1台しか載荷していないことに起因するものと思われるが詳細は今後の研究に待ちたい。

路面凹凸のパワースペクトルを図5・1に示すような直線で近似した時の動的係数の変化を図5・3・1、2に示す。これより、路面凹凸のパワースペクトルを直線で近似した場合は、バラツキの中心線を取れば、実測路面凹凸パワースペクトルを用いた場合に比べ動的係数は80%程度となる。しかし、パワースペクトルにピークを持つ場合は、1本の直線で近似することに問題がある。

6. 結 論

本報告に述べた路面凹凸、車両の動的接地荷重および単一車両による桁橋の動的応答・動的係数に関する理論的・実験的な調査の結果以下のことが明らかとなった。

(1) 路面凹凸について

路面凹凸をパワースペクトルで表わし、ISOの規格案(ISO/TC108/WG9)と比較すると、直線の勾配 n (路面凹凸パワースペクトルを $S_{zo}(\Omega) = a \Omega^{-n}$ とした場合)がISOの規格案より大きくなり、 $n=2.3$ 前後の値になる。また、路面周波数 Ω を $1/2\pi$ で折線としていることの根拠がなく、路面凹凸のパワースペクトルに明確なピークがない場合は、今回のデーターによれば大略を把握するには直線近似で十分と思われる。しかし、具体的な提案は、データーの集積をまっておこないたい。

(2) 単一車の動的接地荷重

起振機による振動試験から考えると、動的接地荷重は、バネ下加速度と車軸のひずみから求める方法により大型車後輪に対しても十分な精度で適用し得ることがわかった。以上前年度の大型車前輪における試験結果²⁾を合わせ大型車前・後輪について、前記動的接地荷重測定方法が実用上問題のないことが明らかとなった。

一般路走行における動的接地荷重について、今回用いた実験車では後輪において、レベル超過確率の5%値をとると静荷重の約20%程度であり、約2.3 c/s の周波数に卓越振動数がある。これは、バネ上固有振動数に相当するものと思われる。

(3) 桁橋の動的応答・動的係数について

桁橋の動的係数は、一般走行の場合には、実験値・計算値とも車速60 km/h付近までは車速とともに増大する。一方、路面に踏板を置いた場合の動的係数は踏板のない場合に比較して一般には大きく、特に、車速20 km/h付近で踏板の影響を顕著に受ける。また、車速による変化はあまり見られない。このことは、桁橋の動的係数が路面凹凸段差により大きな影響を受けることを示し、その割合は低車速ほど著しい。

車両の懸架バネ、タイヤバネは、動的係数に大きな影響をおよぼし、2つのバネのバネ定数が大きいかほど動的係数は大きくなる。

7. 今後の問題点

(1) 路面凹凸について

路面凹凸評価に対するISOの規格案は、折線とする必要性はなく、勾配も緩くとりすぎているように思われるので、各種の舗装における数多くのデーターの集積をおこないISOの規格案を再検討する必要がある。

(2) 動的接地荷重について

動的接地荷重の測定方法は、静止時の車両については実用上十分な精度で求められることがわかったので、今後、走行時車両のタイヤ質量の不均衡による影響、タイヤバネ定数の変化等についての検証が必要である。

(3) 桁橋の動的応答・動的係数について

車両走行実験における動たわみの平均値と静たわみの実測値が一致していなかった。そこでこの問題は今後、平滑走行を含む動たわみ波形の計算等によって比較検討がなされなければならない。また、動的係数については実際の橋に載荷する複数の車両を考慮し、交通流を含めたシミュレーションにより検討をおこなう必要がある。

あ と が き

今回の調査は、当研究室各位の協力によりおこなったものであり、特に山田恒雄技官には実験に

際し多大な労を願った。また、旧上塚橋の実験を実施するにあたっては、愛知県土木部道路建設課橋梁係長蛇川氏、同県知立土木事務所橋梁係長江口氏、石川氏の御協力を得た。ここに記して感謝の意を表わすとともに、今年度の問題点を早急に解決し、路面凹凸評価の限界値の設定等を早急に実現させたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 成田・池村；路面凹凸と自動車荷重（Ⅱ），建設省土木研究所，（'73）
- 2) " ； " （Ⅲ）， " （'74）
- 3) 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
 Ⅸ148 （'67）
- 4) 平尾・近藤・亘理・山本；理論自動車工学，山海堂

表・1 共振振動数

次 数	計 算 値			実 験 値
	λ_n	w_n	f_n	
1	0.0987	14.77	2.35	2.80
2	0.213	68.78	10.95	—
3	0.315	150.43	23.94	—
4	0.350	185.71	29.56	—

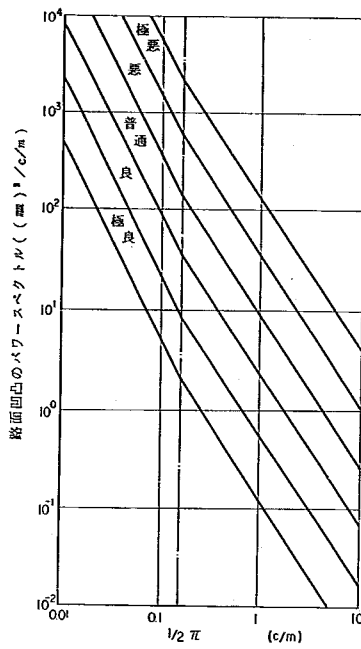
表・2 車 両 諸 元

項 目	単 位	車 両 (A)	車 両 (B)	車 両 (C)	車 両 (D)	車 両 (E)
総 重 量	t	9.51	6.27	11.17	9.51	9.51
バネ上質量	kg・s ² /m	828.6	500.0	1000.0	828.6	828.6
バネ下質量	kg・s ² /m	141.8	140.0	140.0	141.8	141.8
懸架バネ定数	kg/m	220000	110000	220000	300000	220000
タイヤバネ定数	kg/m	435000	435000	300000	435000	600000
懸架部 粘性係数	kg・s/m	1350	742	1483	1577	1350
タイヤ部 粘性係数	kg・s/m	157	156	130	157	184

表・3 橋 梁 諸 元

項 目	単 位	$\ell = 30\text{m}$	$\ell = 50\text{m}$
ス パ ン	m	30	50
単位長さ当り重量	kg/m	2587	2720
曲 げ 剛 性	kg・m ²	0.1242×10^{10}	0.4220×10^{10}
減 衰 定 数	—	0.02	0.02
固 有 振 動 数	c/s	3.79	2.45

注；幅員は3mである。



パワースペクトルと評価基準
ISO/TC108/WG9
(Poc. №5, 1972)

図 1・1 パワースペクトルと評価基準
(ISO/TC108/WG9)
(Poc. №5, 1972)

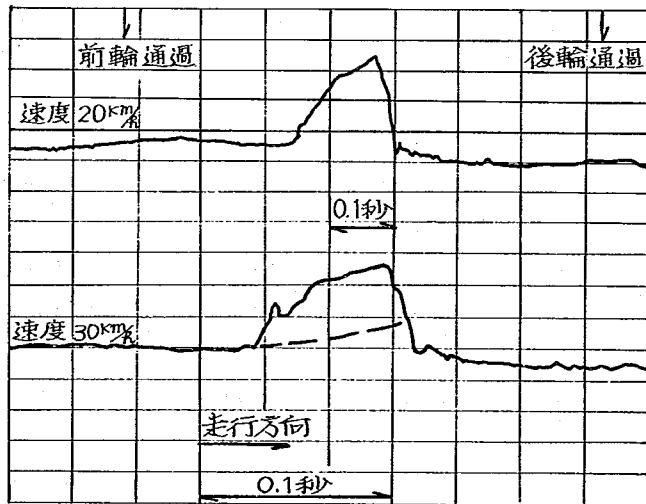
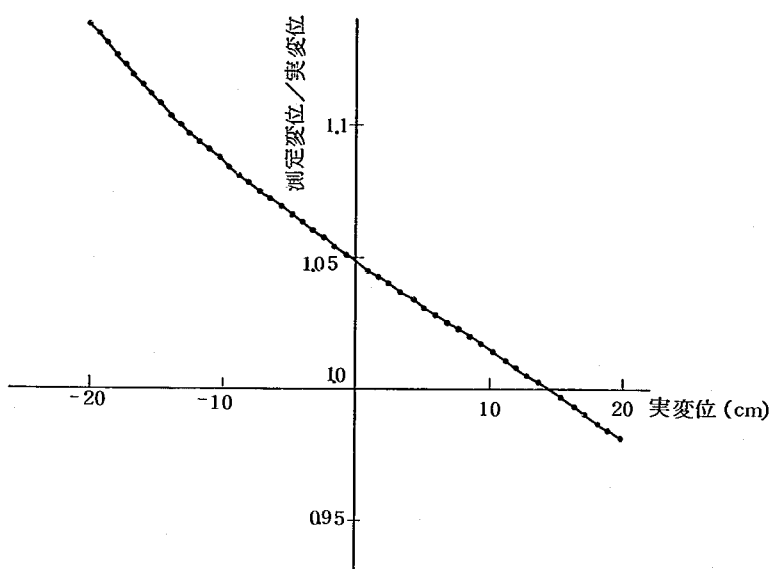
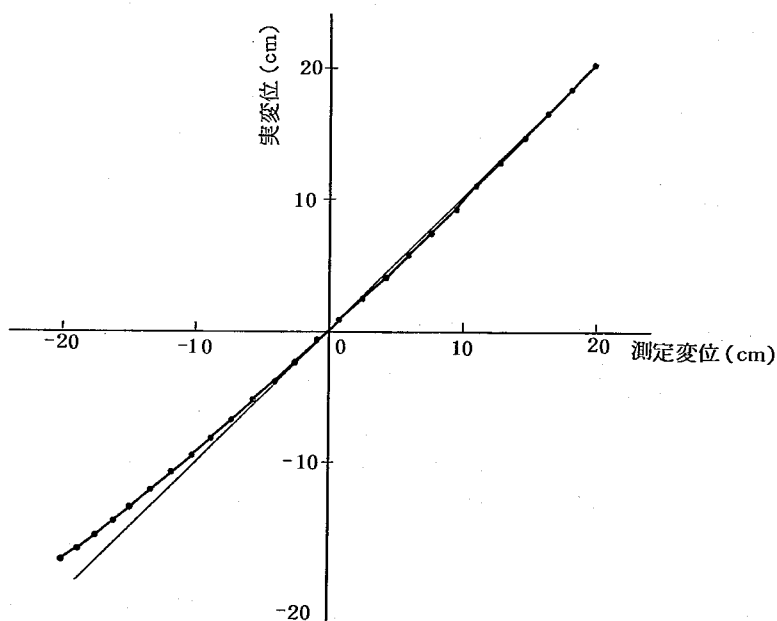


図 2・1 踏板通過時の波形記録



プロフィールメーター測定輪の円弧運動による誤差



プロフィールメーター補正曲線

図 2. 2 プロフィールメーター測定輪の円弧運動による補正



图 2 · 3 国道 16 号線市原市路面凹凸波形

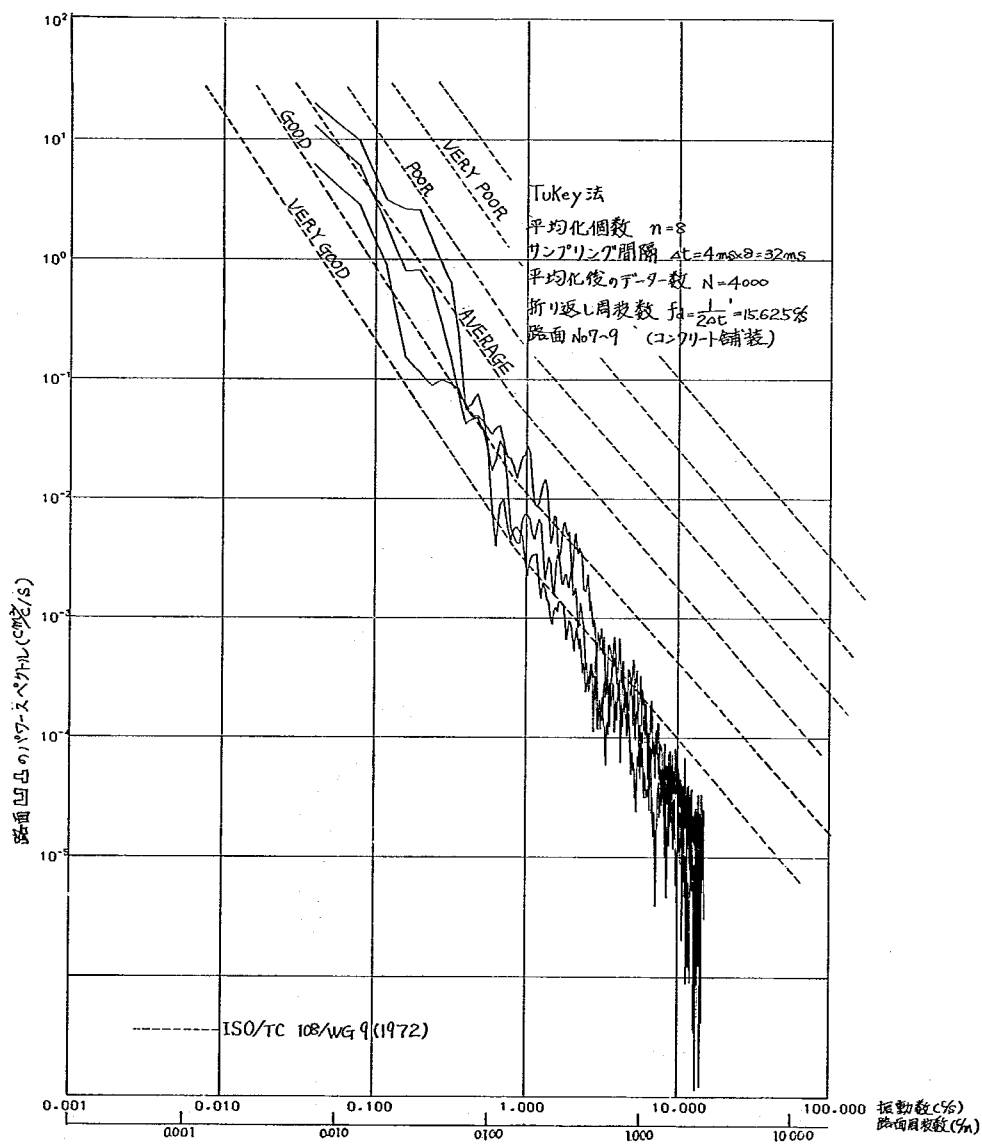


図 2・4・1 国道 16 号線市原市 (下り車線) 路面凹凸のパワースペクトル

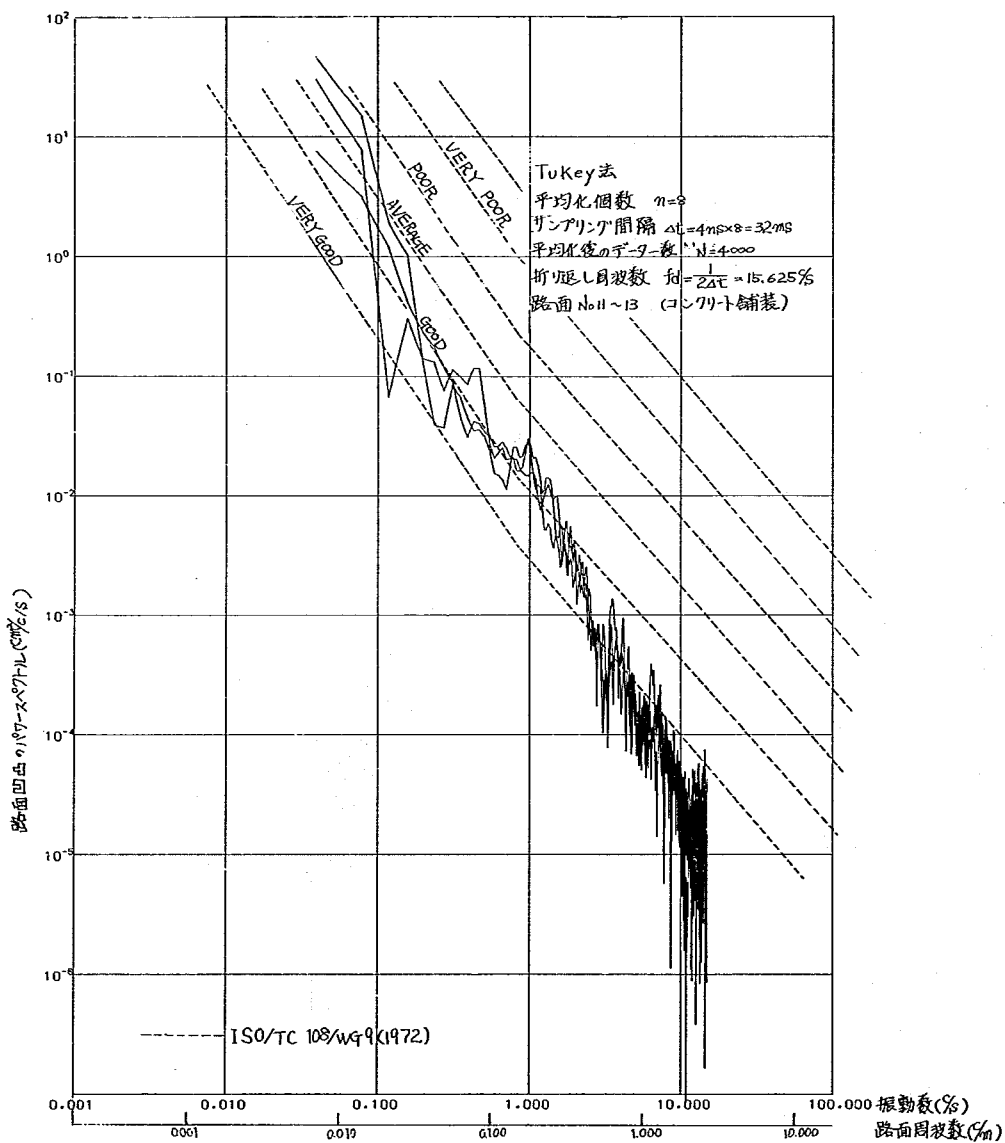


図 2・4・2 国道 16 号線市原市 (上り車線) 路面凹凸のパワースペクトル

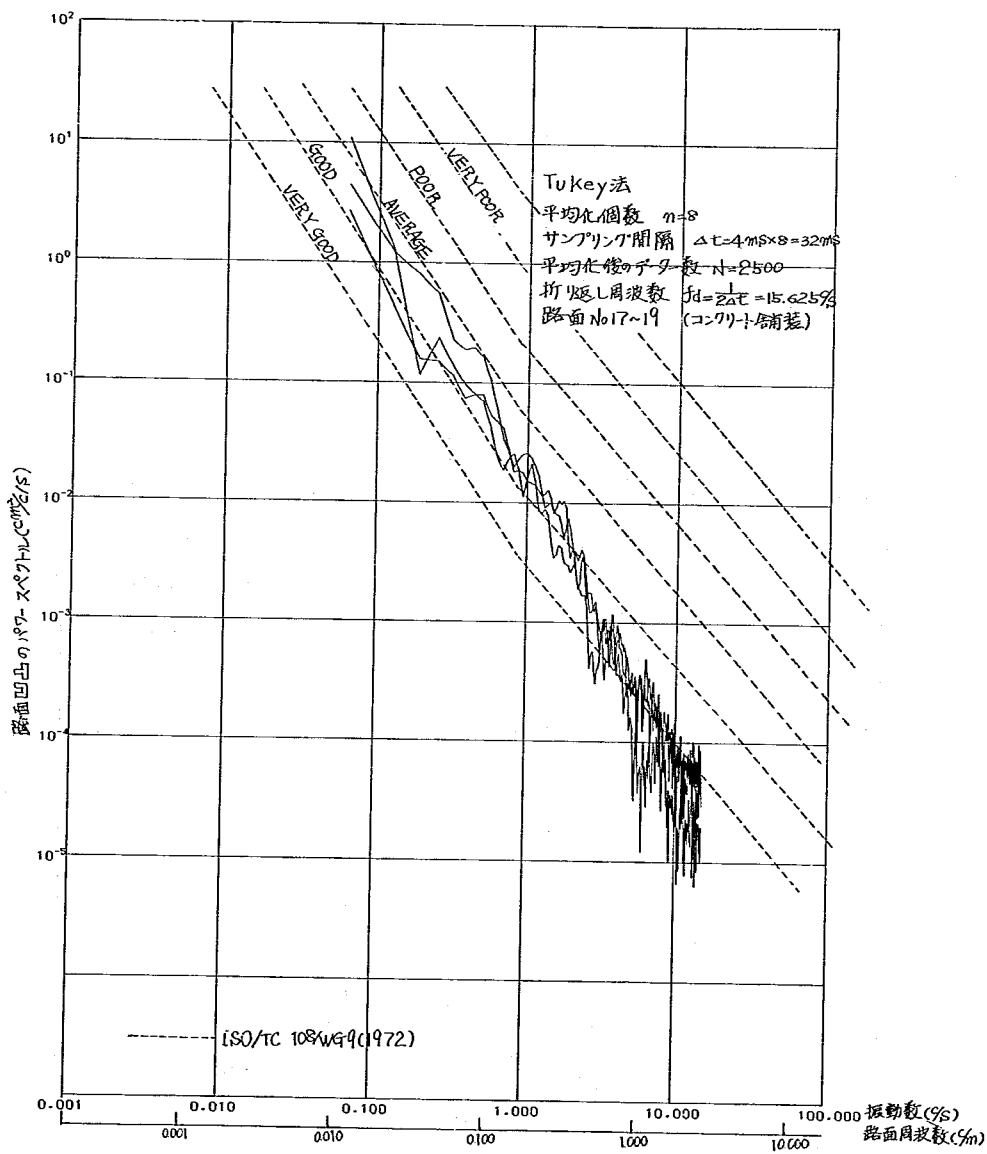
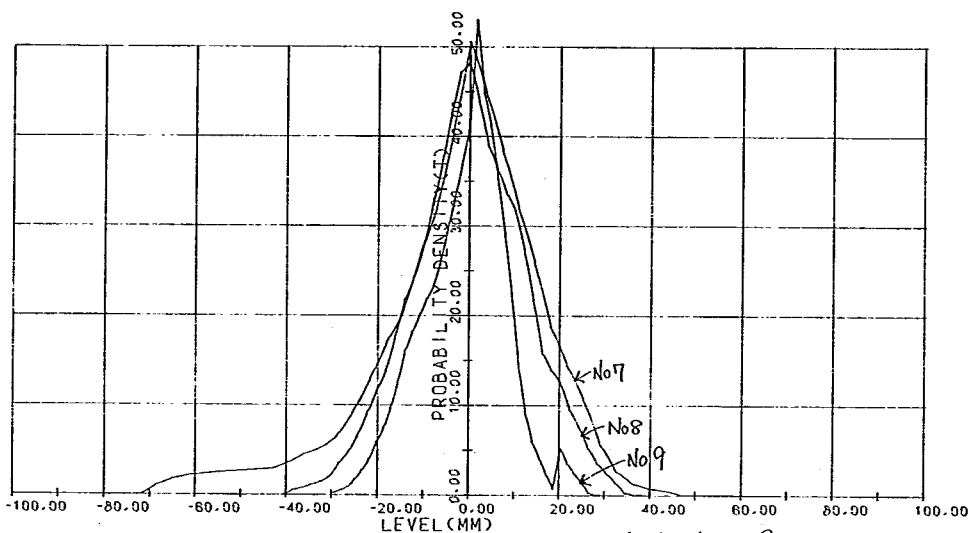


図 2・4・3 国道 16 号線市原市 (上り車線) 路面凹凸のパワースペクトル

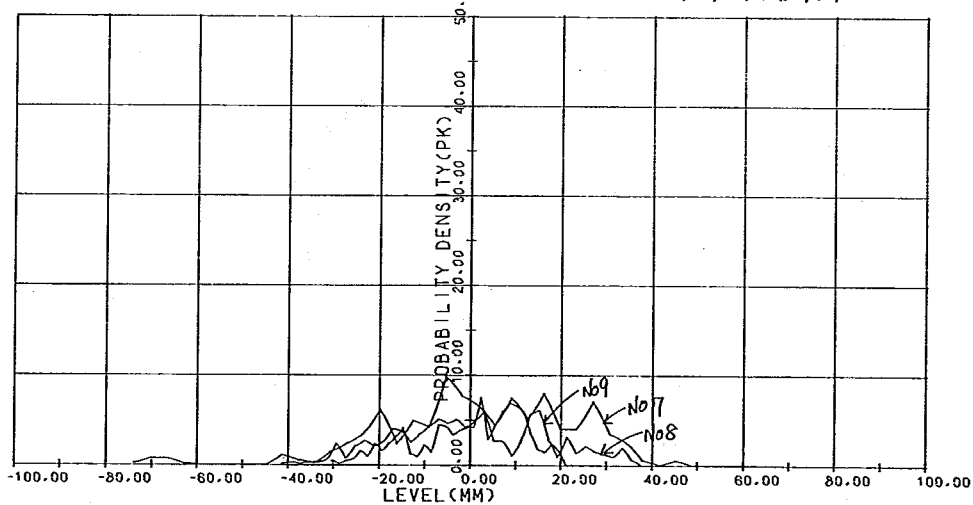


レベル超過確率

路面 No.7~9

平均化後データ数 $N=4000$

サンプリング間隔 $4\text{ms} \times 8 = 32\text{ms}$



レベル超過頻度

NDX=10 NDI=10 NX=1 MTDI=1

図 2・5・1 国道 16 号線市原市路面凹凸確率・頻度分布

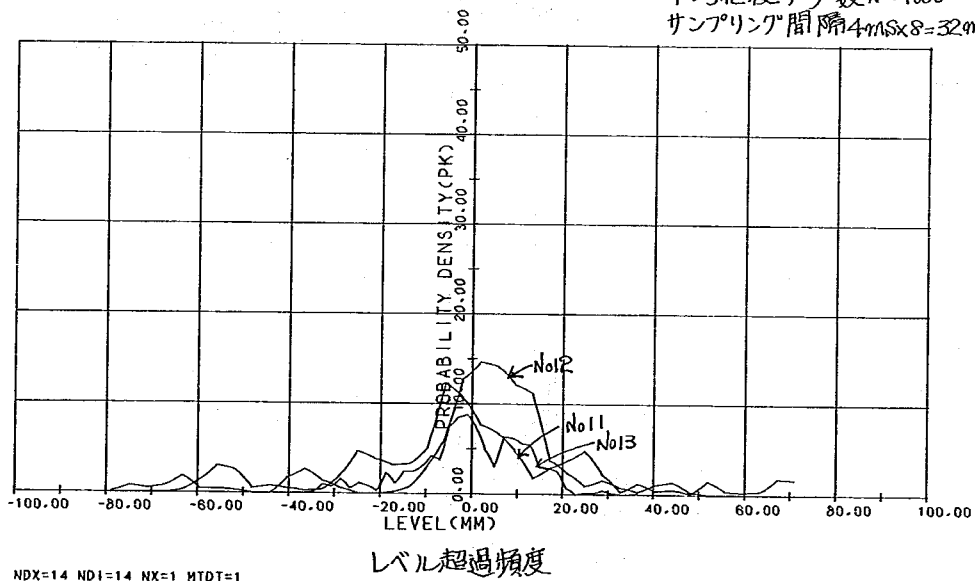
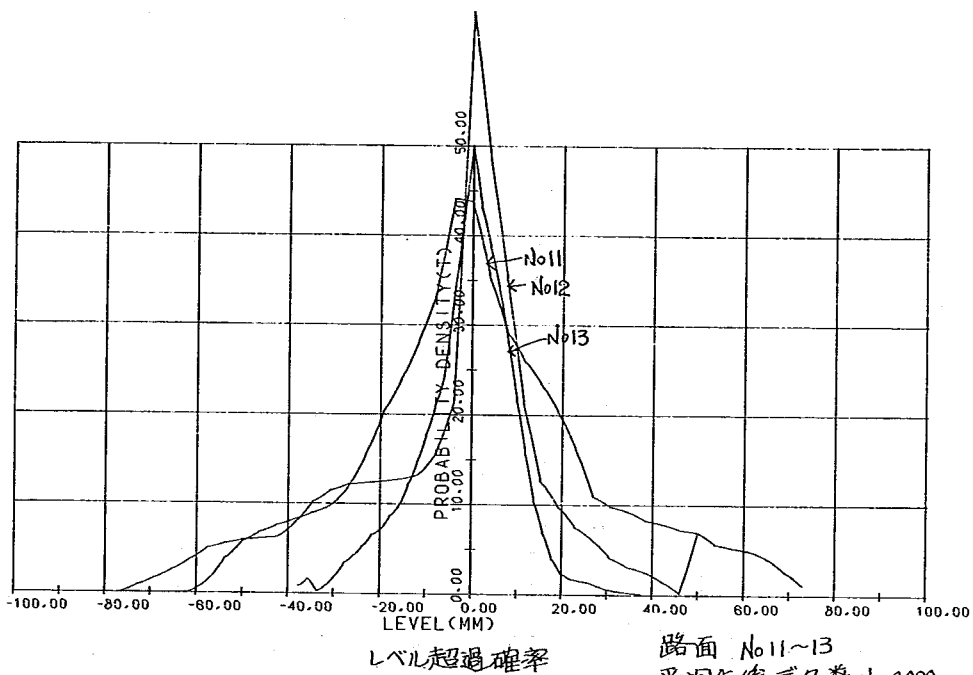
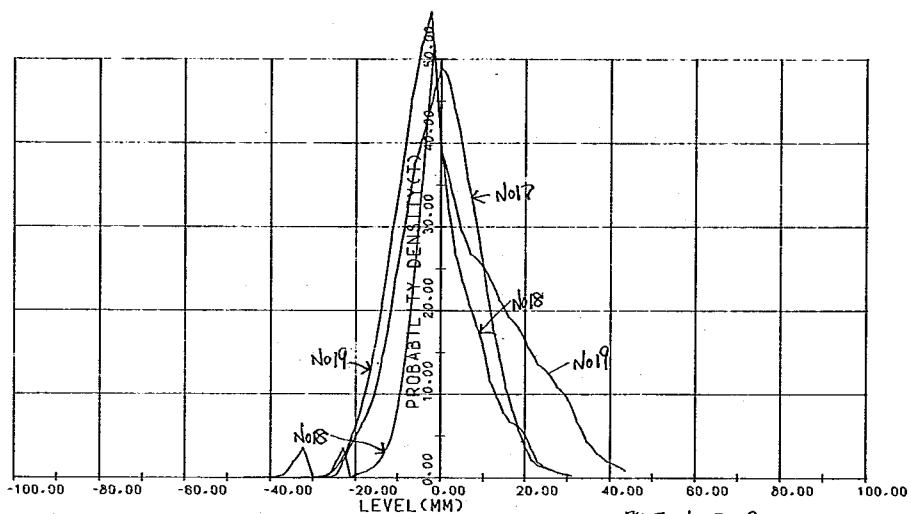


図 2・5・2 国道 16 号線路面凹凸確率・頻度分布

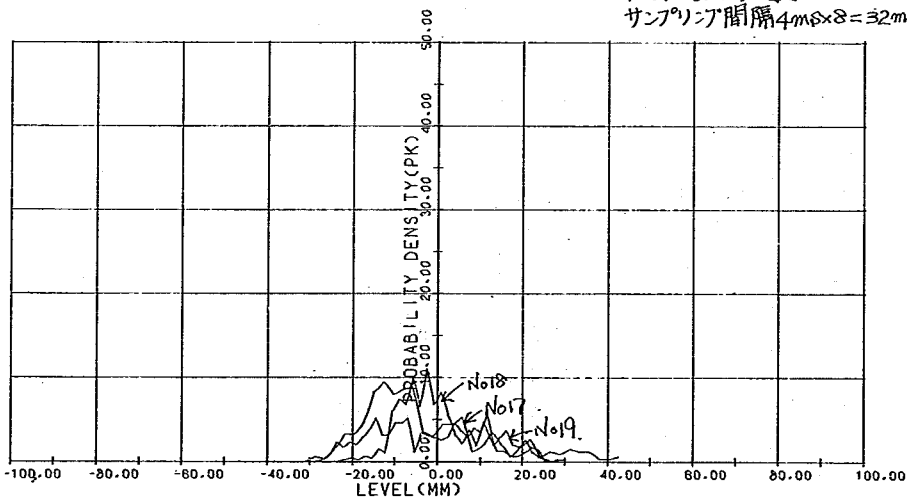


レベル超過確率

路面 No. 17~19

平均化後データ数 $N=2500$

サンプリング間隔 $4ms \times 8 = 32ms$



レベル超過頻度

NDX=20 NDI=20 NX=1 MTOT=1

図 2・5・3 国道 16 号線市原市路面凹凸確率・頻度分布

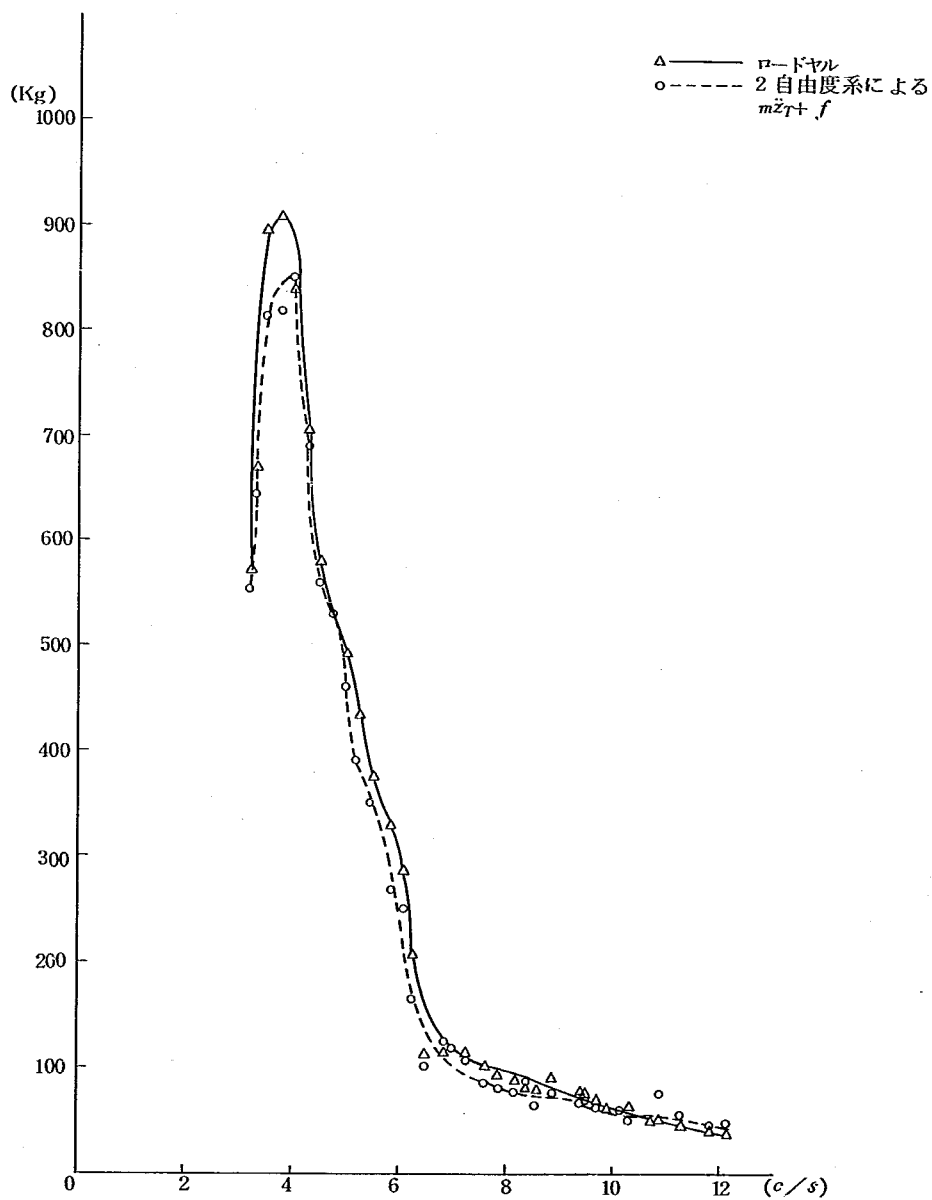


図 3 . 1 動的接地荷重の周波数特性

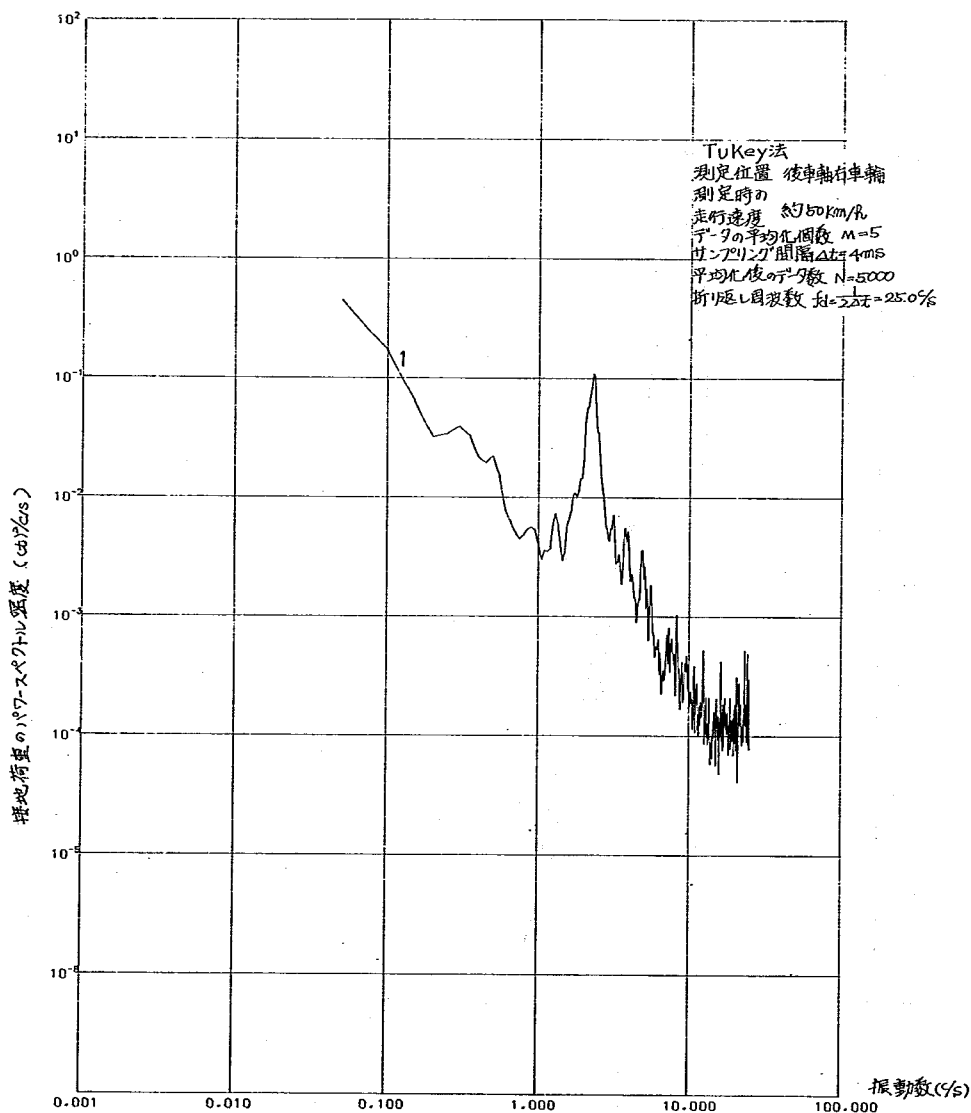


図 3・2・1 名四国道名古屋の接地荷重のパワースペクトル

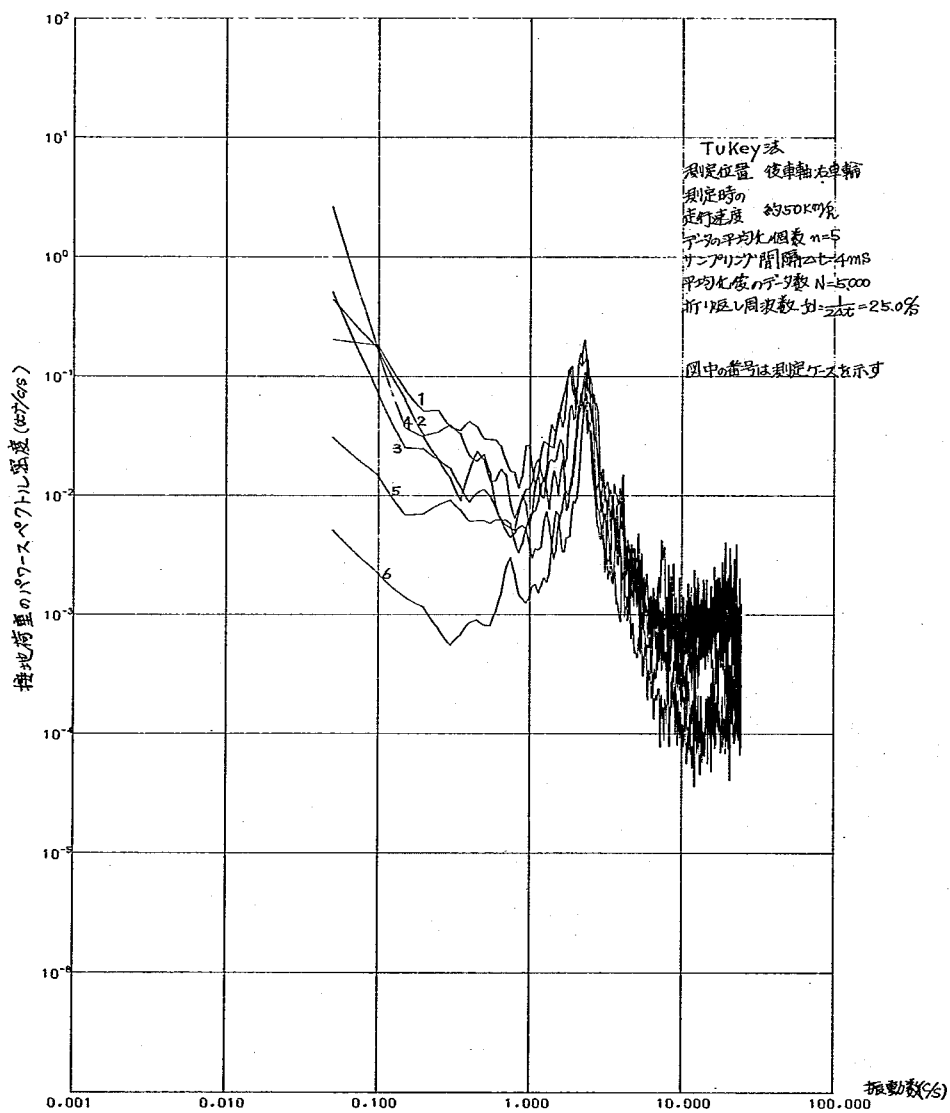


図3・2・2 名四国道名古屋の接地荷重のパワースペクトル

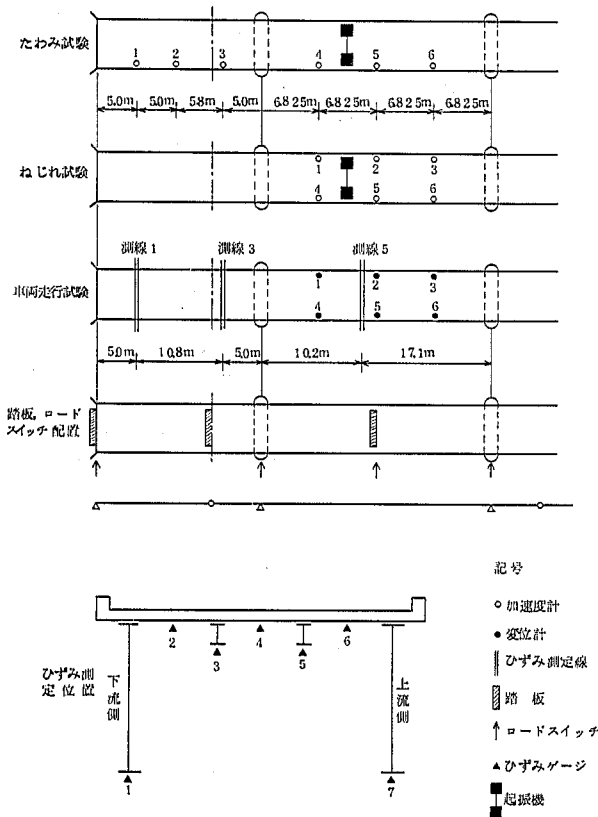


図 4・1 測 点 配 置

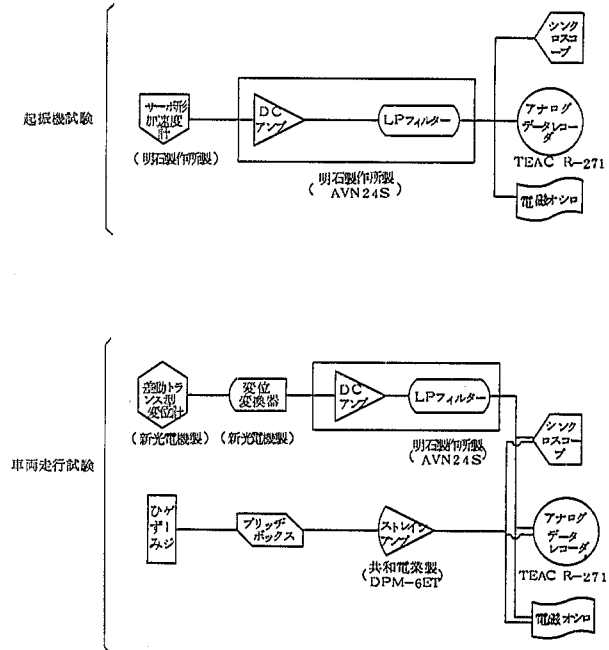


図 4・2 計測ダイアグラム

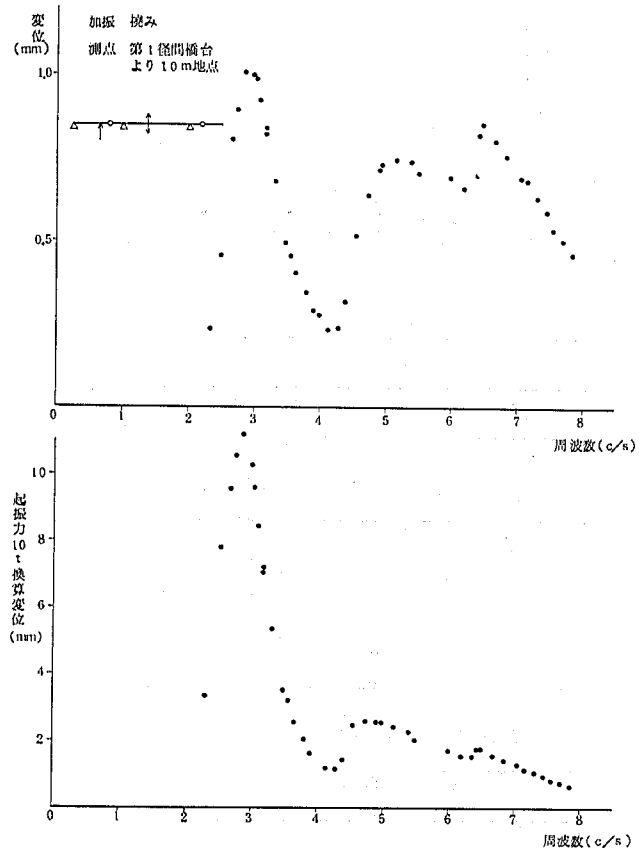


図 4・3・1 共 振 曲 線

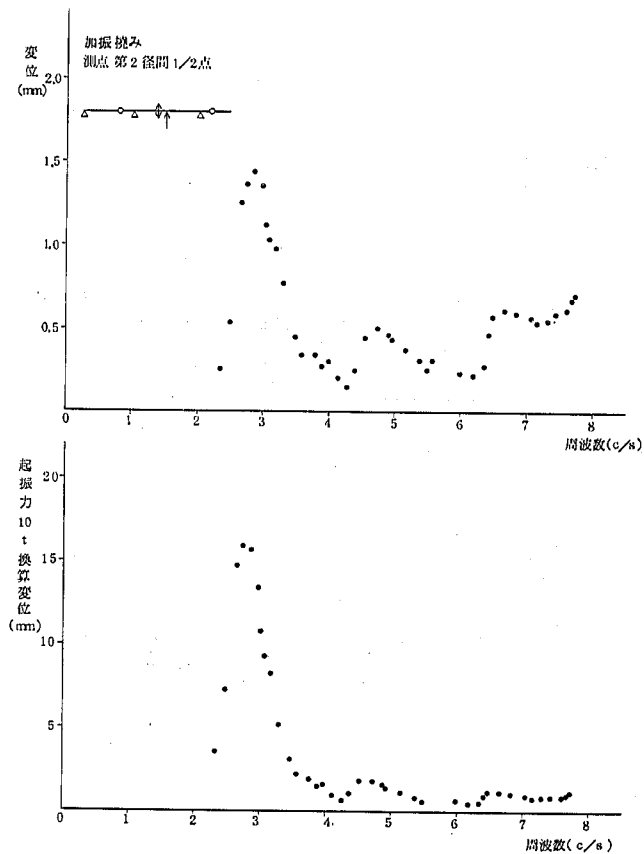


図 4・3・2 共 振 曲 線

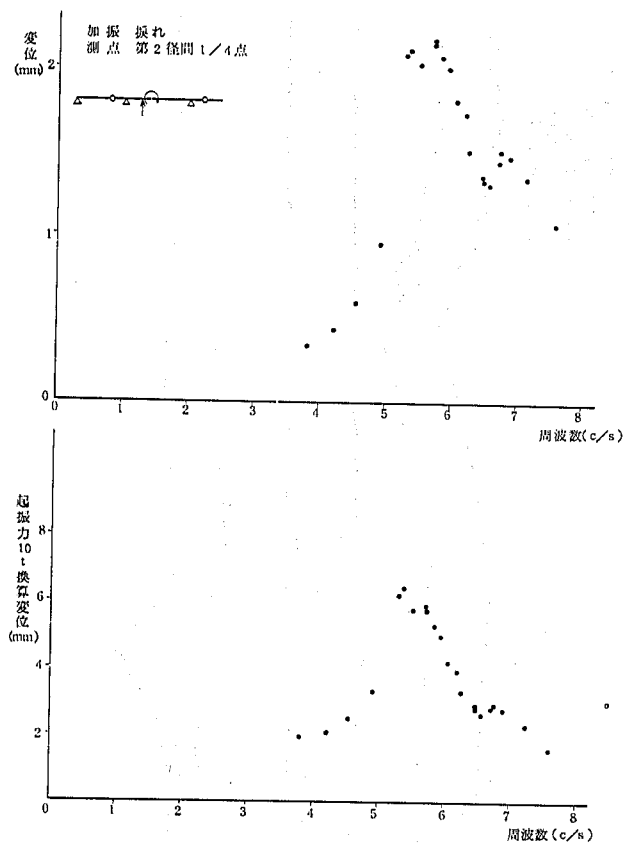


図 4・3・3 共振曲線

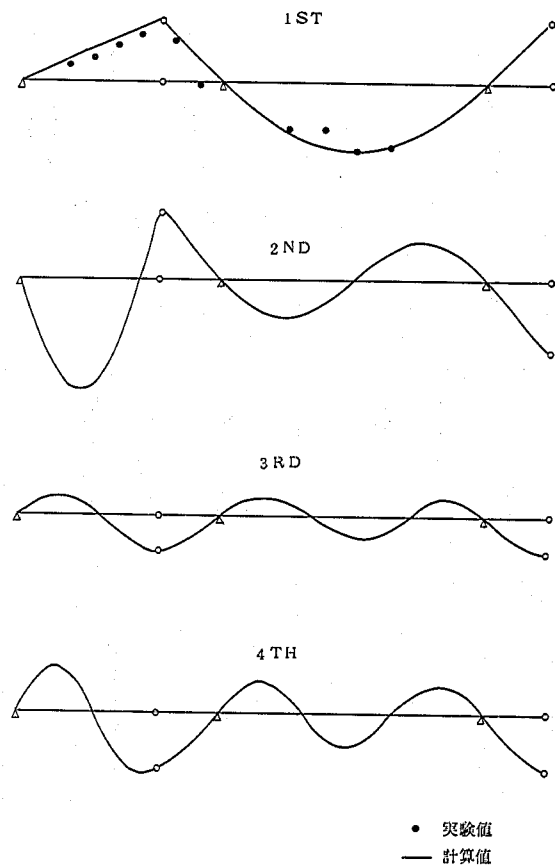


図 4・4 基準振動波形

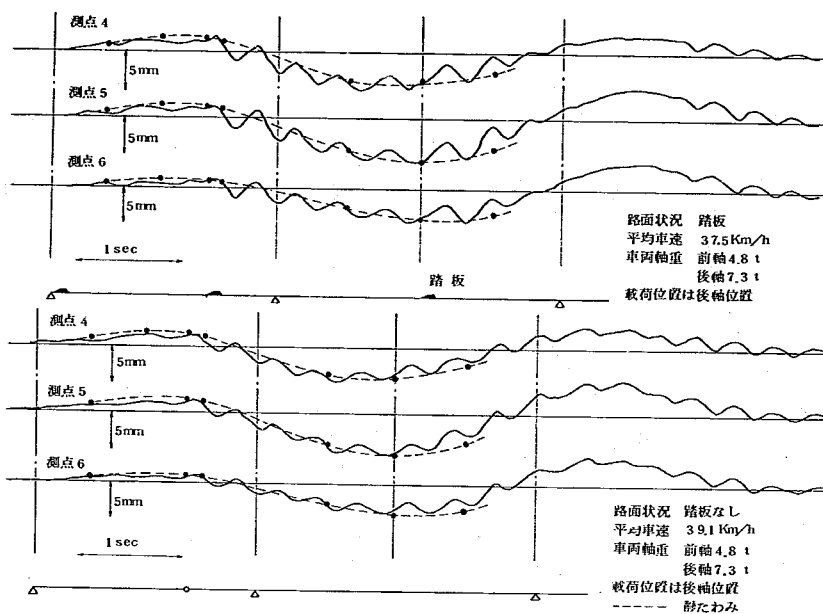


図 4・5・1 主桁動たわみ

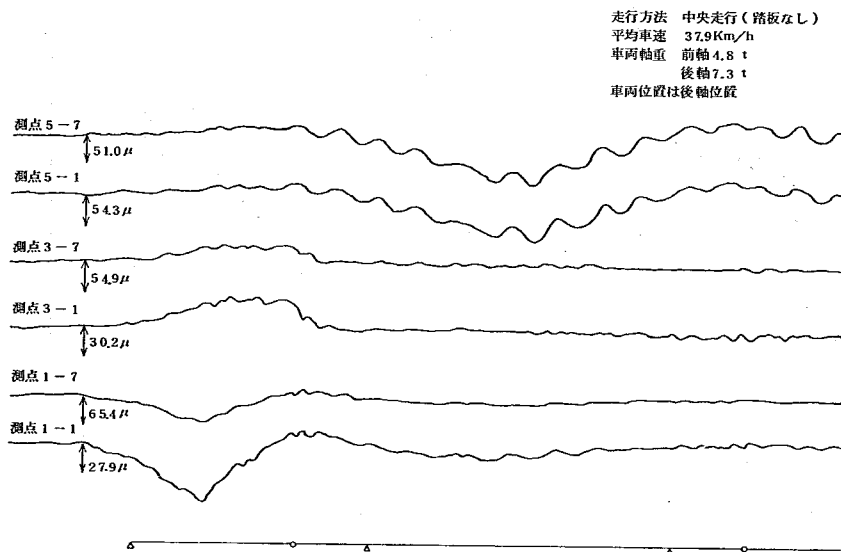


図 4・5・2 主桁動ひずみ

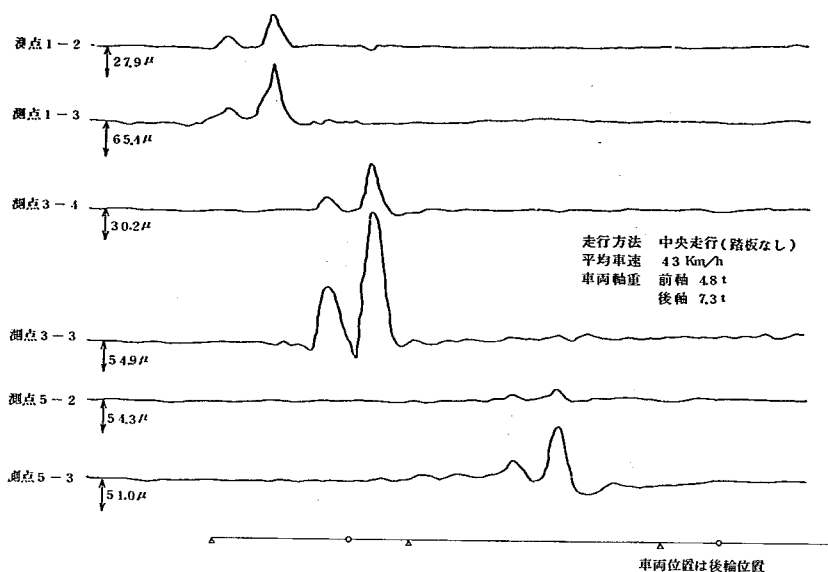


図 4・5・3 床板・縦桁動ひずみ

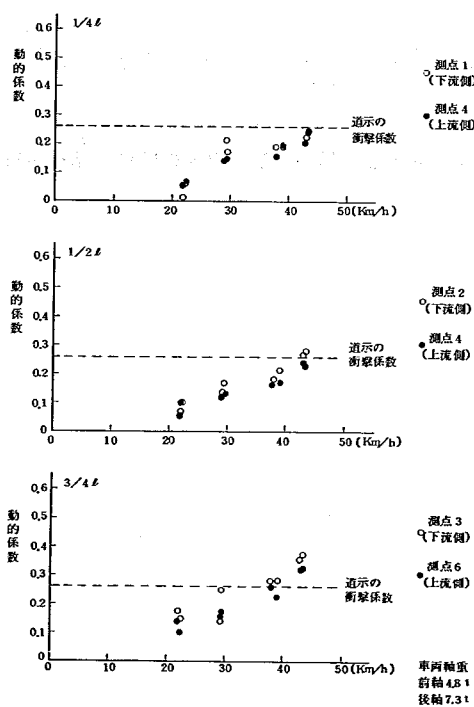


図 4・6・1 動的係数—車速の関係

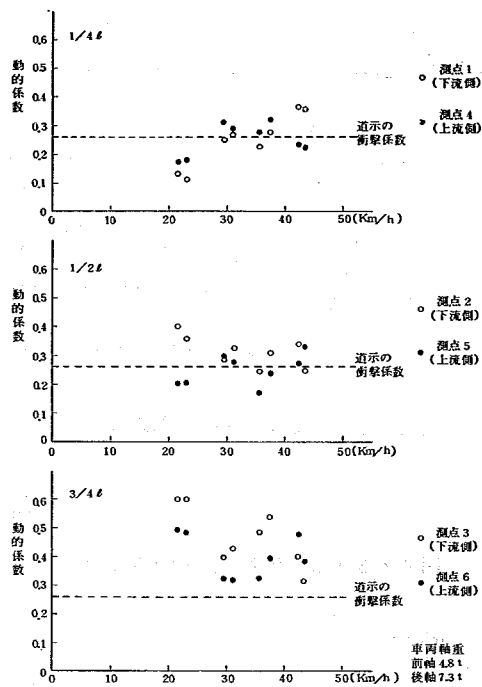


図 4・6・2 動的係数一車速の関係（踏板走行）

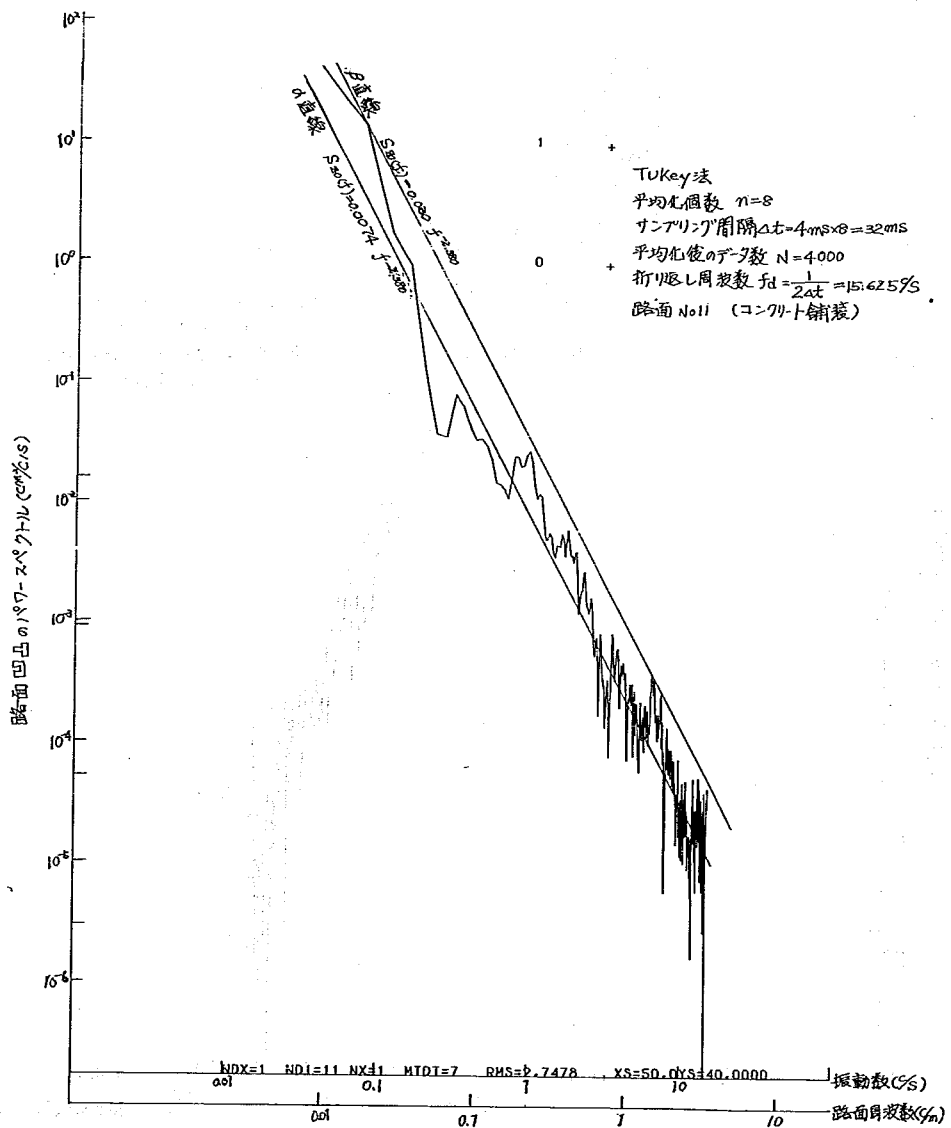


図 5・1・1 国道 16 号線市原市 (上り車線) 路面凹凸のパワースペクトル

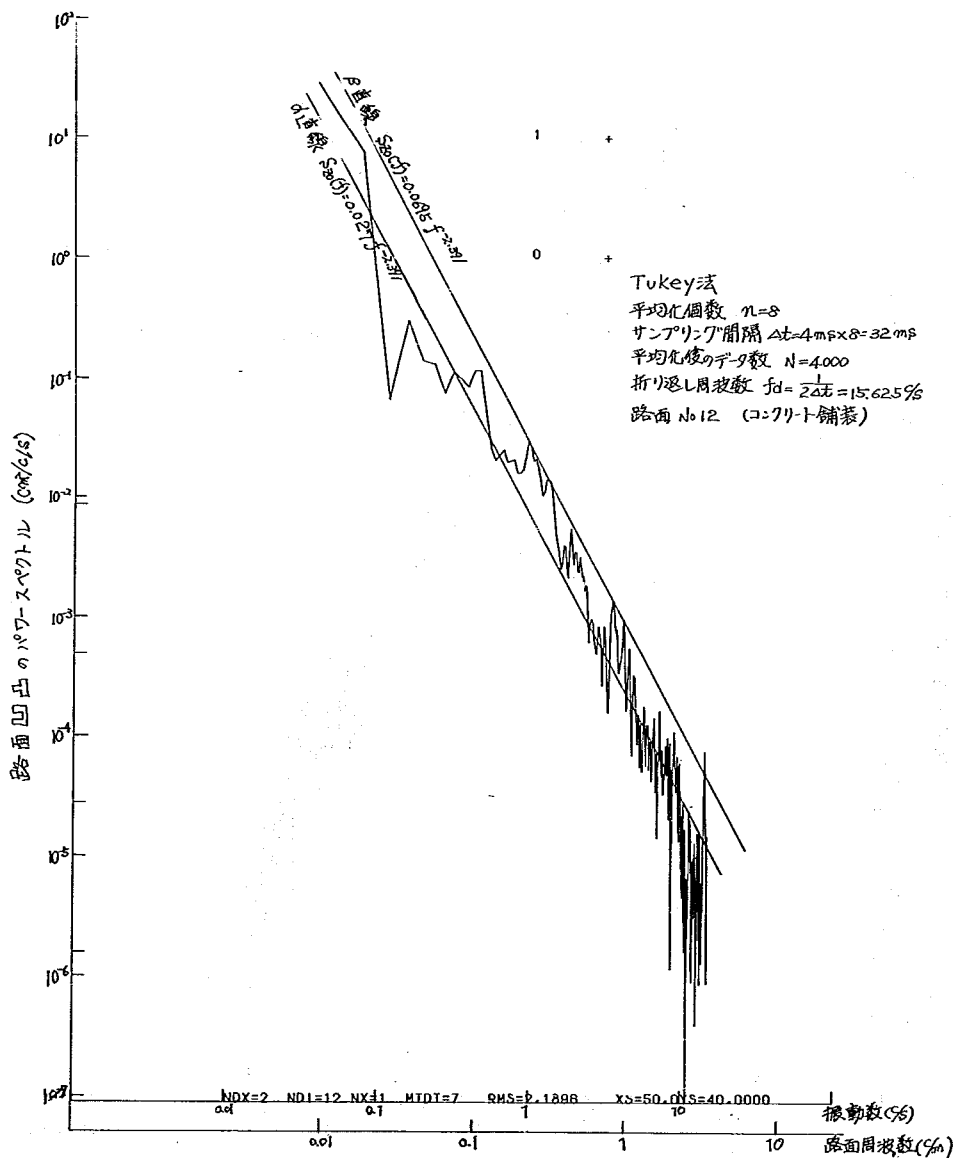


図5・1・2 国道16号線市原市(上り車線)路面凹凸のパワースペクトル

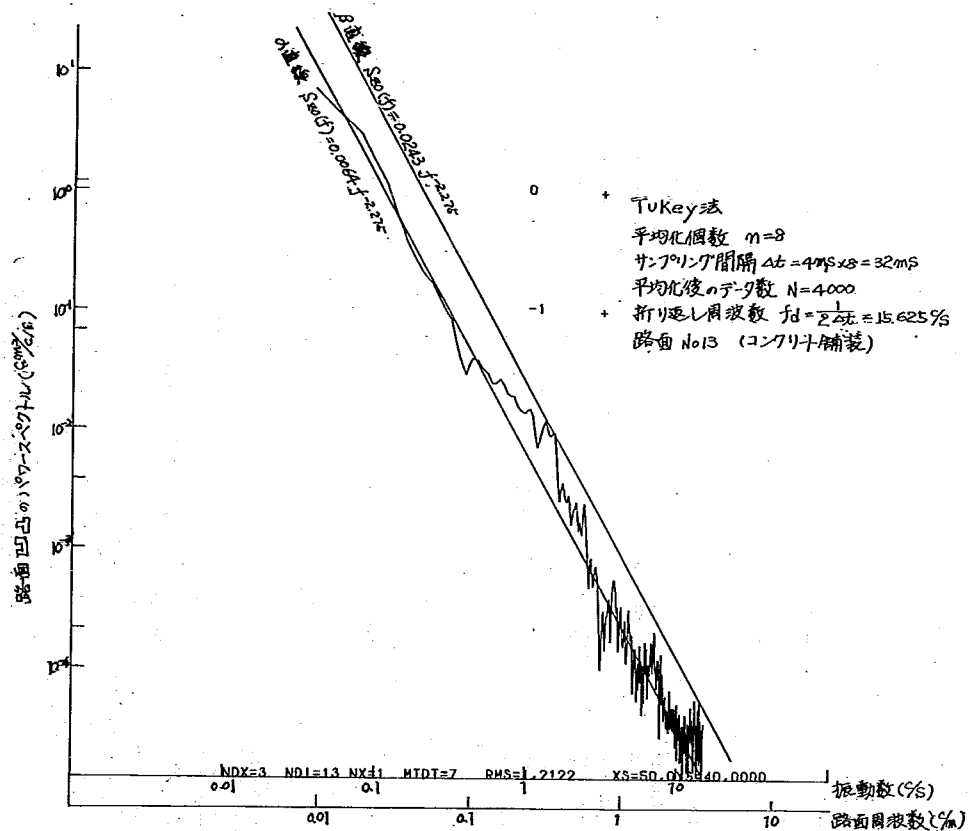


図5・1・3 国道16号線市原市(上り車線)路面凹凸のパワースペクトル

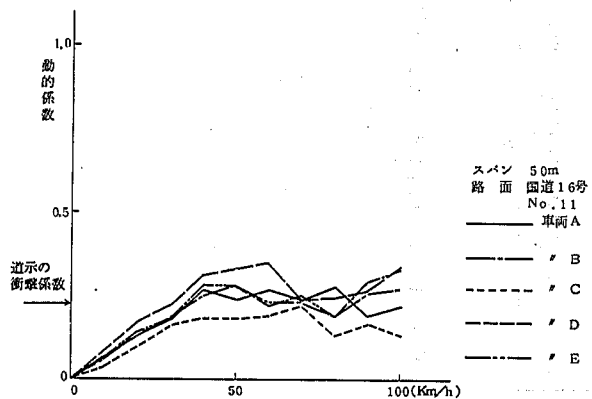
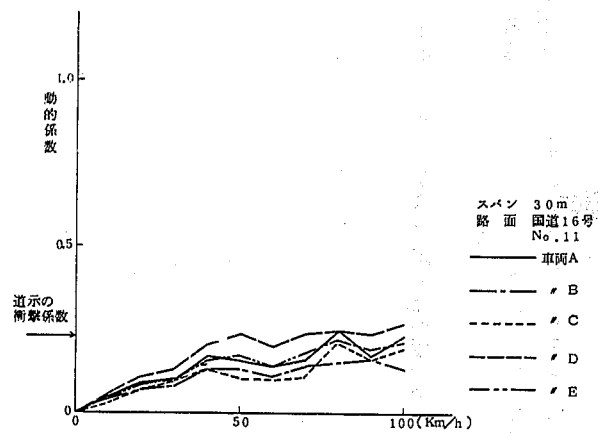


図5・2・1 動的係数

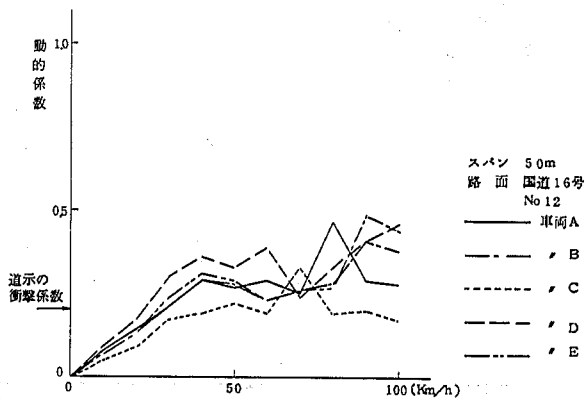
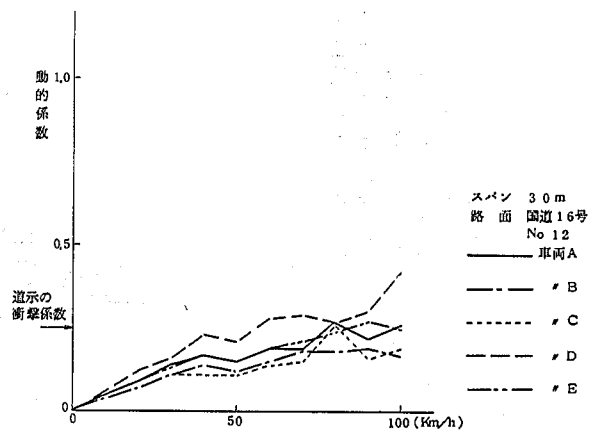


図5・2・2 動的係数

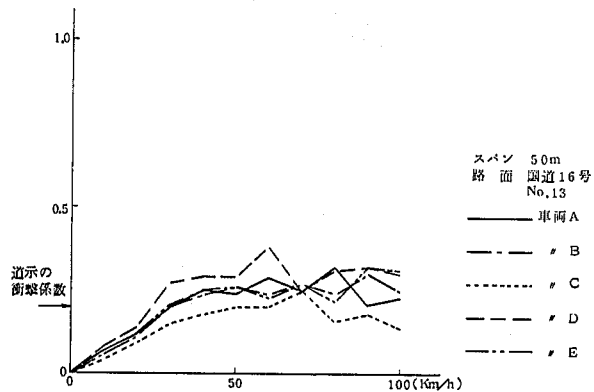
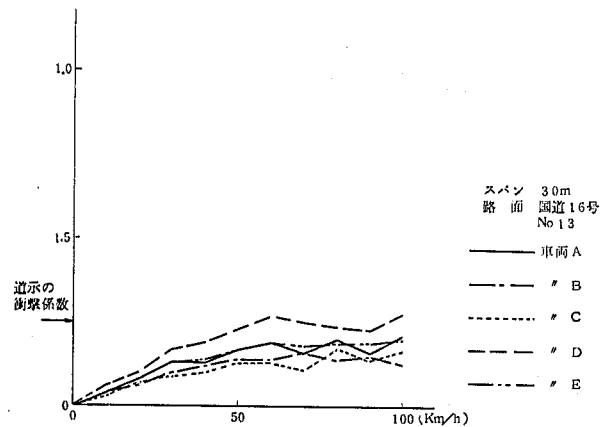


図5・2・3 動的係数

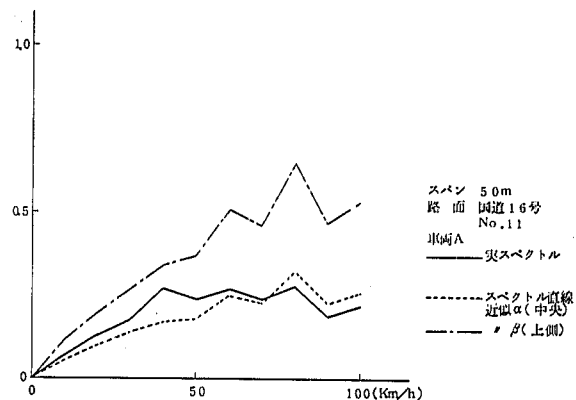
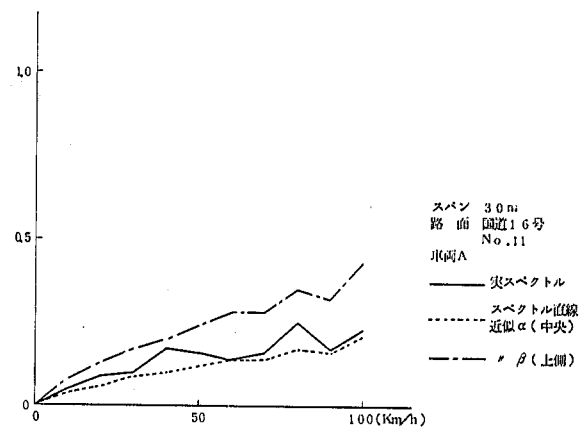


図5・3・1 動的係数

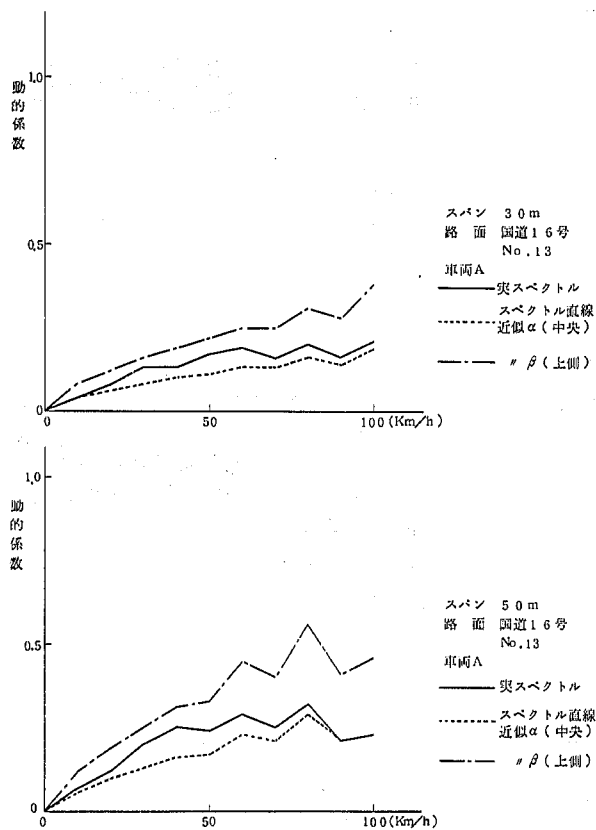
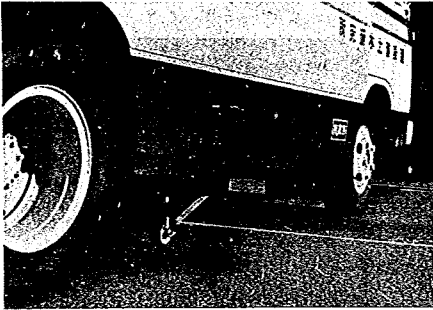
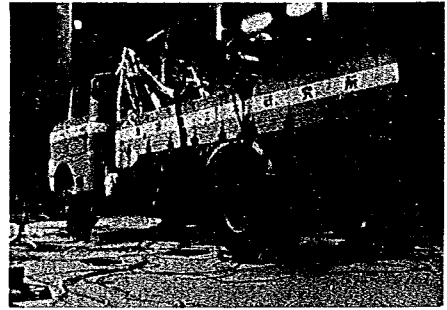


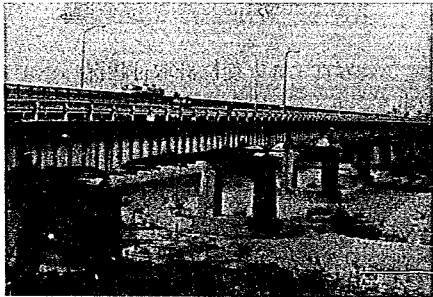
図 5・3・2 動的係数



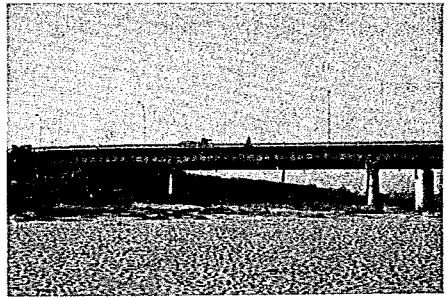
写真・1 プロフィールメーター機械系



写真・2 接地荷重測定状況



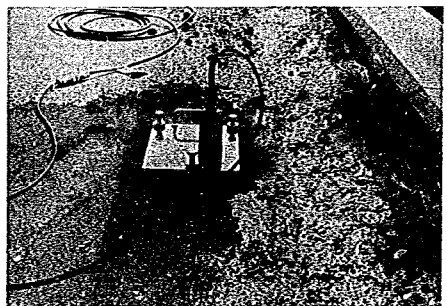
写真・3 上塚橋全景



写真・4 上塚橋実験対象径間



写真・5 起振機設置状況



写真・6 加速度設置状況



写真・7 計測器配置状況



写真・8 変位計取付状況

橋の構造特性に関する調査報告書
—走行車両による桁橋の動的応答—

土研資料第1024号
昭50年3月(1975)

成田信之、池村雅司、水口辰夫

キーワード 路面の凹凸、動的係数、振動、
応答シュミレーション、動的接地荷重

要旨 路面凹凸、走行車両の動的接地荷重を測定し、そ
の特性を求めた。

また、単一車両による橋梁の動的係数を実験およびシュ
ミレーションより求め、動的係数に与える各種要素の影響
を検討したものである。

郵便はがき

は十
円切
手を
いっ
て下
さ

2 8 0 - □ □

建設省土木研究所
構造研究室
御中

千葉県千葉市穴川
四丁目十二番五二号

No. 4

No. 4

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第1024号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印