

土木研究所資料

斜張橋の耐震性に関する研究

—(その3)斜張橋の地震応答に及ぼす入力位相差の影響—

Seismic Design Procedure of Cable-Stayed Bridges
—Part 3. Effect of Multiple-Support Excitations on
Seismic Response of Cable-Stayed Bridges—

昭和63年4月

建設省土木研究所
地震防災部耐震研究室

Copyright © (1988) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

斜張橋の耐震性に関する研究

—(その3)斜張橋の地震応答に及ぼす入力位相差の影響—

耐震研究室 室長 川島 一彦

研究員 運上 茂樹

吾田 洋一

要 旨

近年、大規模特殊事業関連の道路において長大スパンの斜張橋が採用される事例が急増している。これは、斜張橋が軟質な地盤上に建設される中長大橋として構造的に適しているとともに橋梁技術の進歩に伴ない長大スパン化が可能となったためである。しかしながら、斜張橋に対しては従来震害経験がなく、また、振動実験、強震観測等による動的特性の把握も十分でないのが実情であり、早急に斜張橋の動的特性を取り入れた耐震設計法の開発が必要とされている。

本報告は、斜張橋の地震応答特性の調査を目的とし、地震動の箇所別の違いを、地震動自体は箇所ごとに同一であるが、入力位相差があると仮定することによって表現し、その影響の傾向と程度を把握するために試算により検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード：斜張橋、耐震設計、地震応答特性、入力位相差

目 次

1. 概 要	1
2. 斜張橋の地震応答解析手法及び解析ケース	2
2.1 入力位相差を考慮した地震応答解析手法	2
2.2 解析モデル	4
2.3 入力地震動	8
2.4 解析ケース	12
3. 解析結果	13
3.1 固有振動特性及び最大地震応答の分布	13
3.2 最大応答値に及ぼす入力位相差の影響	30
4. 結 論	39
参 考 文 献	40

1. 概 要

近年、大規模特殊事業関連の道路において長大スパンの斜張橋が採用される事例が急増している。これは、斜張橋が軟質な地盤上に建設される中長大橋として構造的に適しているとともに、橋梁技術の進歩に伴ない長大スパン化が可能となったためである。しかしながら、斜張橋に対しては、従来震害経験がなく、また、振動実験、強震観測等による動的特性の把握も十分でないのが実情であり、早急に斜張橋の動的特性を取り入れた耐震設計法の開発が必要とされている。

公共土木施設は、長大橋梁のように一般に長手方向に細長い構造物が多い。従来の耐震設計では、構造物に作用する地震入力は、同一であると仮定しているが、地盤の振動は周辺の地形・地盤条件等の影響を受けるとともに伝播特性の影響も受け、一般に箇所ごとに同一ではない。このような箇所別の地震動の違いは、想定する2点間の距離が長くなる程一般には大きくなると考えられるために、長大橋梁のような細長い構造物に影響を与えることが予想される。

既往の研究によれば、入力地震動の箇所別の違いを地震動自身は箇所ごとに同一であるが、位相差があると仮定することによって表現した場合、同一の地震動が作用すると仮定した場合に比較して、変位応答はあまり変わらないが、断面力応答は一般に大きくなると指摘されている。^{1), 2), 3), 4)} また、河野ら⁵⁾は、中央支間350 mの斜張橋に対して入力位相差の影響を検討しており、これによれば、地震動の伝播速度が500 m/sec～1500 m/secで最もその影響が大きく、特に主塔部では大きな応答を示すと指摘している。

本報告は、斜張橋の地震応答特性の調査を目的とし、地震動の箇所別の違いを前述のように地震動自体は箇所ごとに同一であるが、入力位相差があると仮定することによって表現し、その影響の傾向と程度を把握するために、試算により検討した結果をとりまとめたものである。

2. 斜張橋の地震応答解析手法及び解析ケース

2.1 入力位相差を考慮した地震応答解析手法^{1),6)}

n 次元多質点フレームモデルの運動方程式は次式で与えられる。ここで、式中の文字のアンダーラインは、マトリックスもしくはベクトルを示すものである。

$$\underline{M} \ddot{\underline{u}}_t + \underline{C} \dot{\underline{u}}_t + \underline{K} \underline{u}_t = \underline{0} \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

ここで、

$\underline{M}, \underline{C}, \underline{K}$: 地盤及び構造物の質量行列, 減衰行列, 及び剛性行列

$\ddot{\underline{u}}_t, \dot{\underline{u}}_t, \underline{u}_t$: 時刻 t における地盤及び構造物の絶対加速度ベクトル, 絶対速度ベクトル, 及び絶対変位ベクトル

この力学系の支点すなわち基盤面が強制変位を受ける場合には、基盤面における変位を加えることにより、全体の変位ベクトル $\underline{u}_t^c$ を次式のように表すことができる。

$$\underline{u}_t^c = \begin{Bmatrix} \underline{u}_t \\ \underline{u}_t^b \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

ここで、

$\underline{u}_t^b$: 基盤面における n^b 個の拘束された変位ベクトル

$\underline{u}_t^c$ は便宜的に基盤面に強制変位を受けない静的な釣り合い状態を考えた擬静的な変位ベクトル $\underline{u}_s^c$ と動的な変位ベクトル $\underline{u}^c$ に分けて考えることができ、次式のように表わされる。

$$\underline{u}_t^c = \begin{Bmatrix} \underline{u}_t \\ \underline{u}_t^b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \underline{u}_s \\ \underline{u}_s^b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \underline{u} \\ \underline{u}^b \end{Bmatrix} = \underline{u}_s^c + \underline{u}^c \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

ここで、擬静的な変位ベクトルの定義から次式が成り立つ。

$$\underline{u}^b = \underline{0} \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

n^b 個の支点変位をつり合い方程式に含めると式 (2-1) の運動方程式は次式のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \underline{M} & \underline{M}^b \\ (\underline{M}^b)^T & \underline{M}^{bb} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\underline{u}}_t \\ \ddot{\underline{u}}_t^b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \underline{C} & \underline{C}^b \\ (\underline{C}^b)^T & \underline{C}^{bb} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\underline{u}}_t \\ \dot{\underline{u}}_t^b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \underline{K} & \underline{K}^b \\ (\underline{K}^b)^T & \underline{K}^{bb} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{u}_t \\ \underline{u}_t^b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \underline{0} \\ \underline{0} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots (2-5)$$

ここで上添字 b は基盤面にかかわる量を示している。式 (2-5) から、 n 箇の自由度に対する運動方程式は次式となる。

$$[\underline{M} \ \underline{M}^b] \begin{Bmatrix} \ddot{\underline{u}}_t \\ \ddot{\underline{u}}_t^b \end{Bmatrix} + [\underline{C} \ \underline{C}^b] \begin{Bmatrix} \dot{\underline{u}}_t \\ \dot{\underline{u}}_t^b \end{Bmatrix} + [\underline{K} \ \underline{K}^b] \begin{Bmatrix} \underline{u}_t \\ \underline{u}_t^b \end{Bmatrix} = \underline{0} \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

上式に式 (2-3) 及び式 (2-4) を代入すると次式を得る。

$$\underline{M} \ddot{\underline{u}} + \underline{C} \dot{\underline{u}} + \underline{K} \underline{u} = - [\underline{M} \ \underline{M}^b] \begin{Bmatrix} \ddot{\underline{u}}_s \\ \ddot{\underline{u}}_s^b \end{Bmatrix} - [\underline{C} \ \underline{C}^b] \begin{Bmatrix} \dot{\underline{u}}_s \\ \dot{\underline{u}}_s^b \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

ここで、上式右辺第2項は、右辺第1項に比較して一般に小さいので計算に際しては省略するのが普通である。また、基盤にかかわる質量行列 $\underline{M}^b$ も集中質量系モデルではゼロとなるため式 (2-7)

は最終的に次式となる。

$$\underline{M} \ddot{\underline{u}} + \underline{C} \dot{\underline{u}} + \underline{K} \underline{u} = -\underline{M} \ddot{\underline{u}}_s \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

一方、擬静的変位ベクトルの定義から、

$$\underline{K} \underline{u}_s + \underline{K}^b \underline{u}_s^b = \underline{0} \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

であるから、次式が成り立つ。

$$\underline{u}_s = -\underline{K}^{-1} \underline{K}^b \underline{u}_s^b = -\underline{B} \underline{u}_s^b \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

ここで、マトリックス $\underline{B} (= \underline{K}^{-1} \cdot \underline{K}^b)$ は支点での拘束変位ベクトルから、擬静的変位ベクトルを計算するための行列である。したがって、式(2-10)を式(2-8)に代入することにより運動方程式は次式で表わされる。

$$\underline{M} \ddot{\underline{u}} + \underline{C} \dot{\underline{u}} + \underline{K} \underline{u} = \underline{M} \underline{B} \ddot{\underline{u}}_s^b \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

ここで、一般に支点における入力外力として加速度で与えられるのが普通であるから、支点変位 $\underline{u}_s^b$ を求めるためには次式のように加速度ベクトルの時間に関する重積分が必要となる。

$$\underline{u}_s^b = \iint \ddot{\underline{u}}_s^b dt dt \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

2.2 解析モデル

斜張橋の解析モデルは、多質点離散型線形骨組構造としてモデル化した。

斜張橋特有の問題としてケーブルのモデル化が挙げられ、ケーブルのサグの影響による非線形性による影響が指摘されている。本検討においては、この非線形は考慮せず軸力のみを受け持つ線形部材としてモデル化した。

斜張橋は、桁構造、塔構造、ケーブル形状等の変化により、多様な構造系を造り出すことが可能であるが、本検討では、その中の構造例として、1本の主塔を有する2径間連続斜張橋、及び2本の主塔を有する3径間連続斜張橋を対象とした。2径間連続斜張橋モデルとしては、東京外かく環状道路の一環として荒川調節池を渡河する位置に計画されている幸魂橋⁷⁾を基本としてモデルの諸元を定めた。幸魂橋は、橋長380 m及び主桁に剛結された高さ80 mの独立1本柱形式の主塔を有する鋼斜張橋である。また、3径間連続斜張橋モデルとしては、名古屋臨海地域に架設された名港西大橋⁸⁾を基本とした。名港西大橋は、橋長758 m及び高さ122 mのA型主塔を有する長大鋼斜張橋であり、塔と桁とは橋軸方向に対してケーブルを用いた弾性支持とされている。幸魂橋及び名港西大橋の一般図をそれぞれ図2.1及び図2.2に示す。

解析に際しては、2次元平面モデルとして橋軸方向及び橋軸直角方向の2方向をそれぞれ加振方向とした。図2.3は、2径間連続斜張橋の解析モデルを示したものである。ここで、橋軸方向については、両端の橋軸方向の支持条件が自由であることから、両端の橋脚及び基礎はモデルに含めていないが、橋軸直角方向については、これを考慮してモデル化に含めている。同様に、図2.4は3径間連続斜張橋の解析モデルを示したものである。名港西大橋は図2.2に示したようにA型主塔を有しているが、解析に際しては2次元モデルとしているため、主塔部分の断面諸定数は次のように決定した。

$$\left. \begin{aligned} \bar{A} &= A_1 + A_2 \\ \bar{I}_x &= (I_{x1} + a_1^2 A_1) + (I_{x2} + a_2^2 A_2) \\ \bar{I}_y &= (I_{y1} + a_1^2 A_1) + (I_{y2} + a_2^2 A_2) \\ \bar{I}_z &= I_{z1} + I_{z2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-18)$$

ここで、

$\bar{A}, \bar{I}_x, \bar{I}_y, \bar{I}_z$: 解析に用いた主塔部分の断面積(m^2)及び断面2次モーメント(m^4)

$A_i, I_{xi}, I_{yi}, I_{zi}$ ($i=1, 2$) : 主塔の各脚($i=1, 2$)の断面積(m^2)及び断面2次モーメント(m^4)

a_i ($i=1, 2$) : 主塔中心線から各脚の中心線までの距離(m)

また、塔と桁との橋軸方向の固定は、PCケーブルによる弾性固定とされているが、ここでは弾性ケーブルを線形のばね要素としてモデル化している。

解析モデルの節点数及び部材数は、2径間連続斜張橋の橋軸方向モデルについては、節点数31、部材数45、橋軸直角方向モデルについては、節点数41、部材数57とした。3径間連続斜張橋の橋軸方向及び橋軸直角方向モデルについて、節点数はそれぞれ49及び59、部材数は64及び76とした。

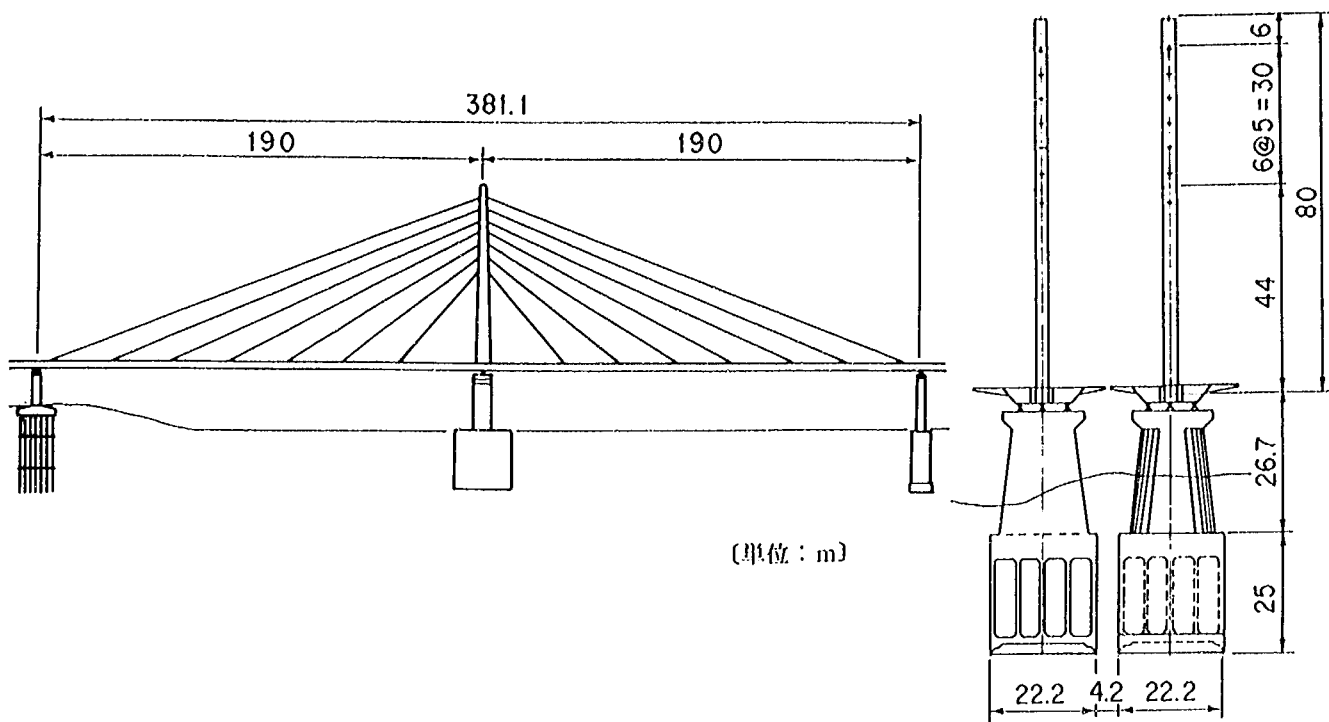


圖 2.1 幸魂橋一般圖

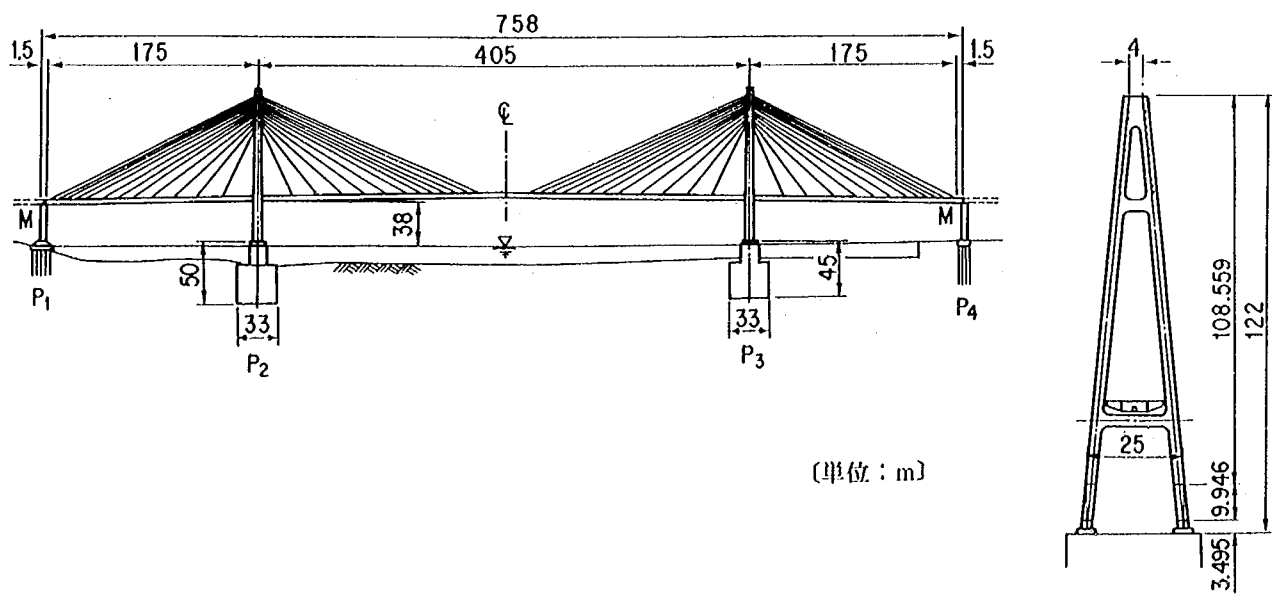
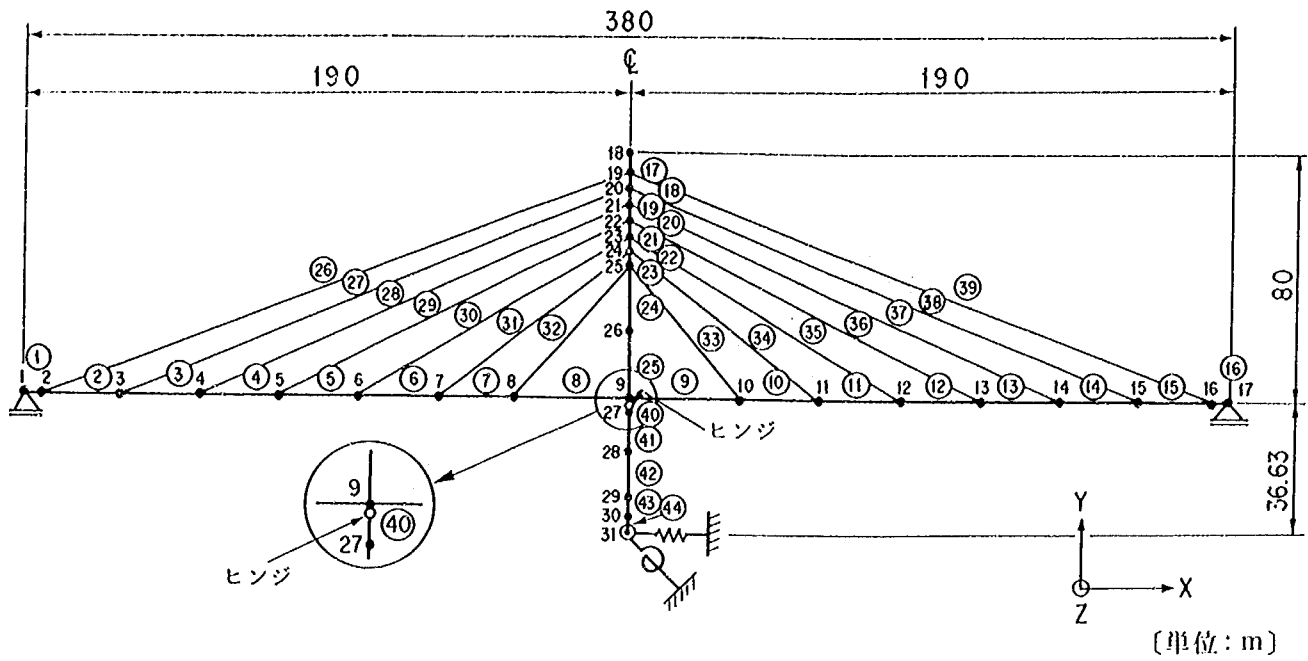
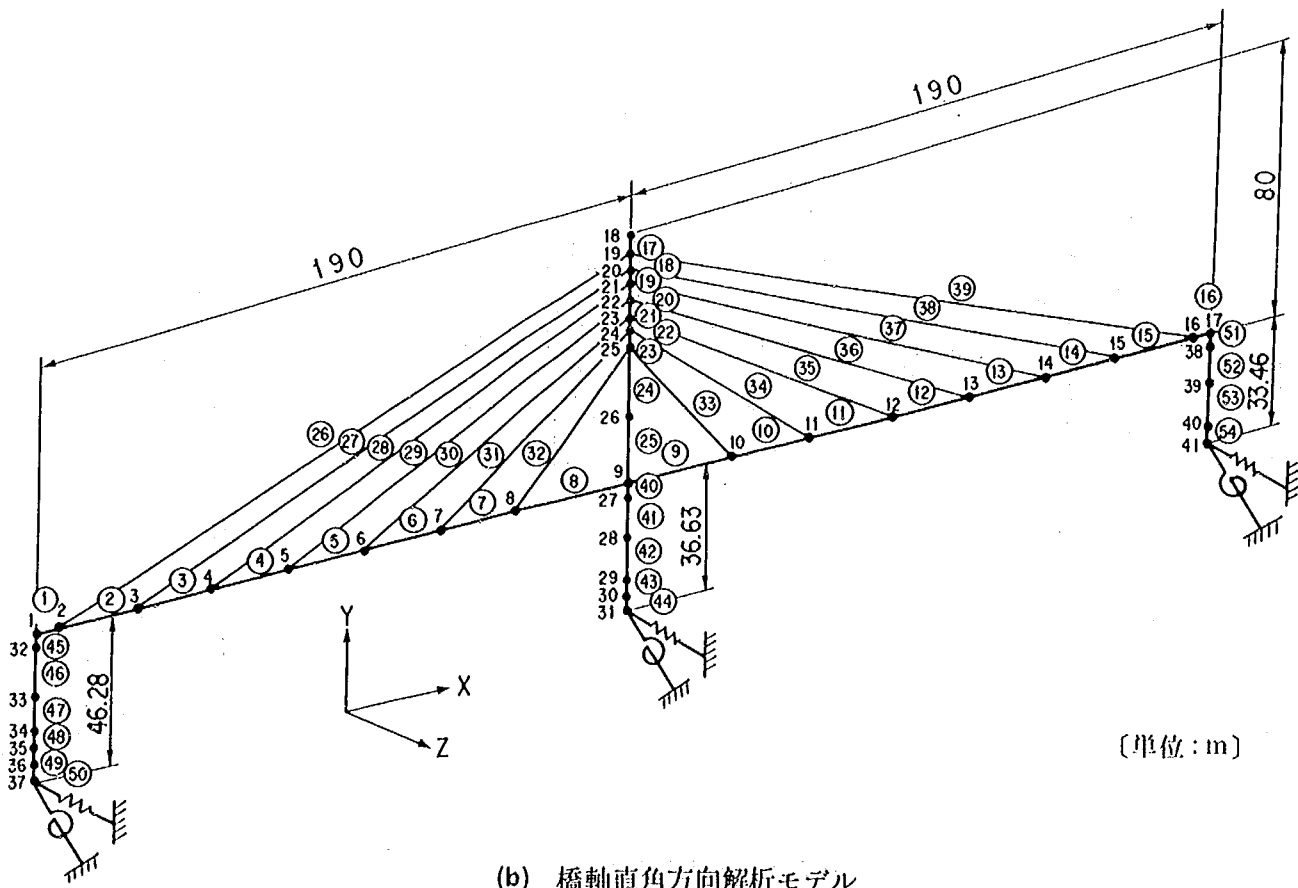


圖 2.2 名港西大橋一般圖

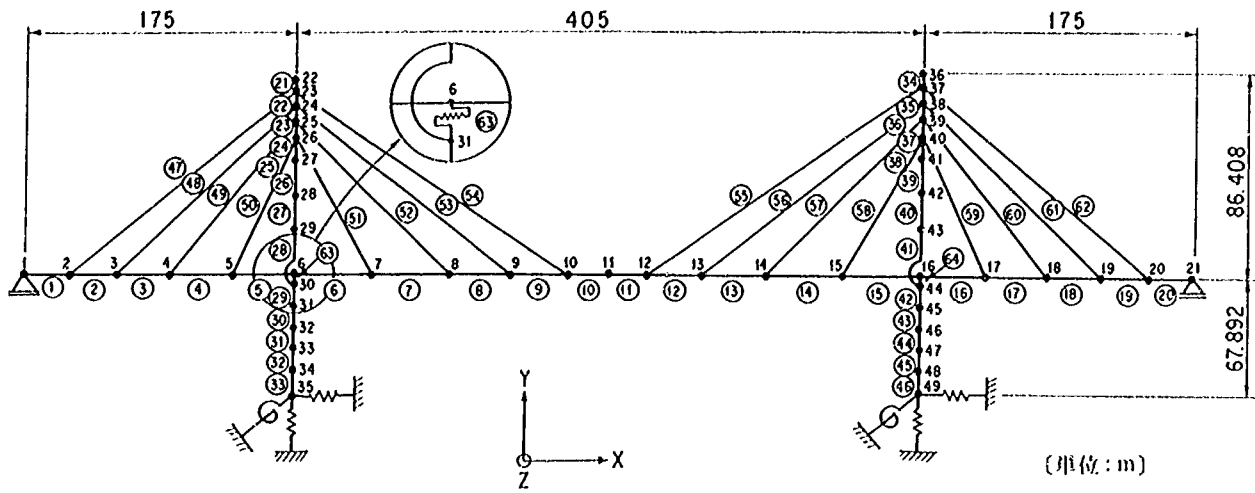


(a) 橋軸方向解析モデル

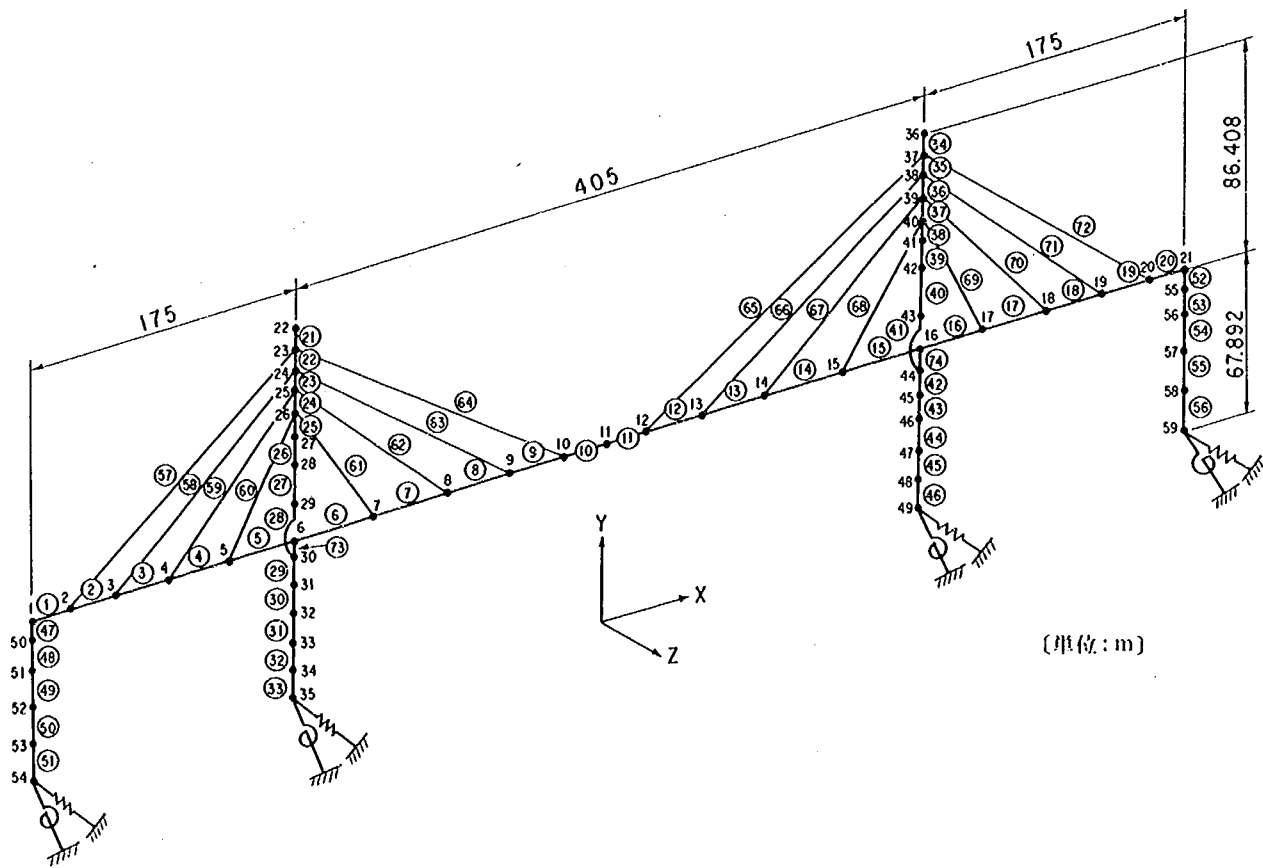


(b) 橋軸直角方向解析モデル

図 2.3 2 径間連続斜張橋解析モデル



(a) 橋軸方向解析モデル



(b) 橋軸直角方向解析モデル

図 2.4 3 径間連続斜張橋解析モデル

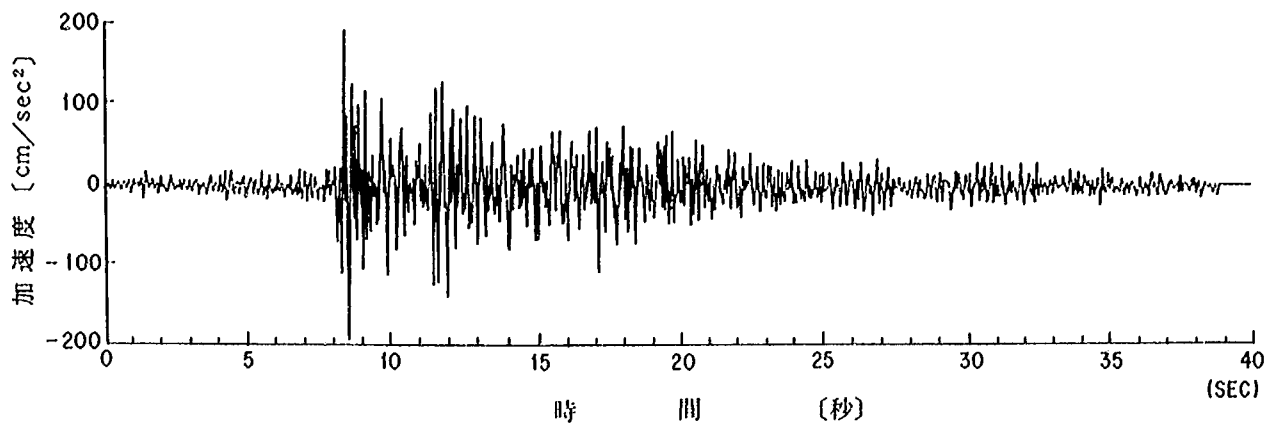
2.3 入力地震動

解析に用いた入力地震動は、表 2.1 に示すように 1978 年宮城県沖地震 ($M7.5$, $\Delta=80\text{ km}$) による開北橋周辺地盤上の記録 (以下開北橋記録と呼ぶ)、1968 年日向灘沖地震 ($M7.5$, $\Delta=100\text{ km}$) による板島橋周辺地盤上の記録 (以下板島橋記録と呼ぶ)、及び 1983 年日本海中部地震 ($M7.7$, $\Delta=110\text{ km}$) による津軽大橋周辺地盤上の記録 (以下津軽大橋記録と呼ぶ) の 3 波形である。ここで、開北橋記録は 1 種地盤、板島橋記録は 2 種～3 種地盤、及び津軽大橋記録は 4 種地盤上の記録である。

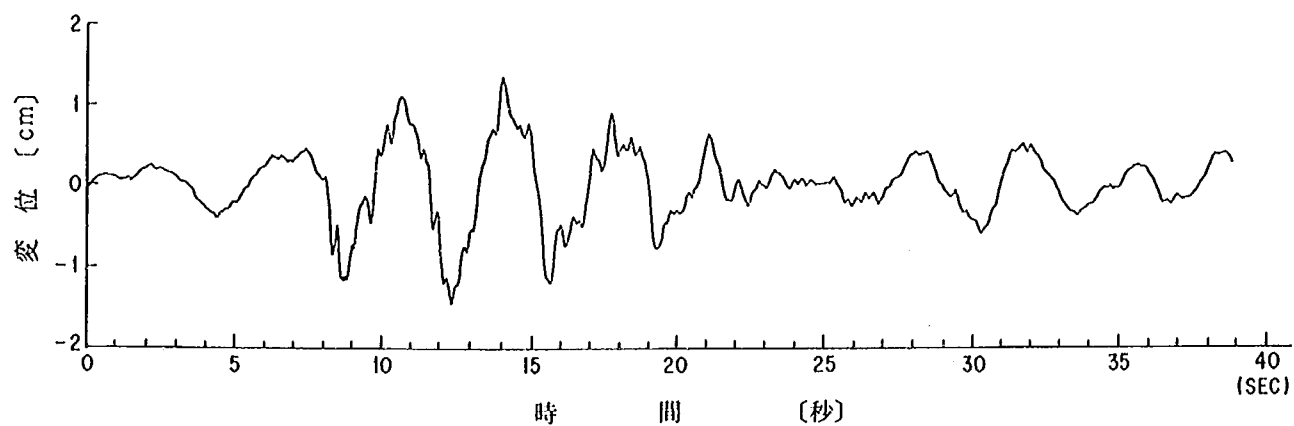
各記録の加速度波形、変位波形、加速度応答スペクトル、及び変位応答スペクトルを図 2.5～図 2.7 に示す。地震動の入力レベルは、記録時の値をそのまま用いることとした。

表 2.1 入力地震動

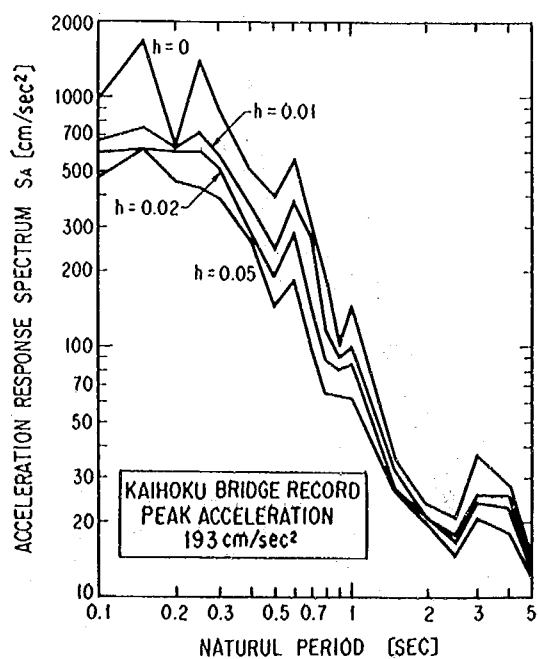
No	地震名	発生年月日	マグニチュード M	震央距離 Δ (km)	記録場所	記録時 最大加速度 (cm/sec^2)	最大変位 (cm)
1	宮城県沖地震	1978年6月12日	7.4	80	開北橋周辺地盤上 (1種地盤)	193	1.48
2	日向灘沖地震	1968年4月1日	7.5	100	板島橋周辺地盤上 (2種～3種地盤)	439	3.34
3	日本海中部地震	1983年5月26日	7.7	110	津軽大橋周辺地盤上 (4種地盤)	278	11.7



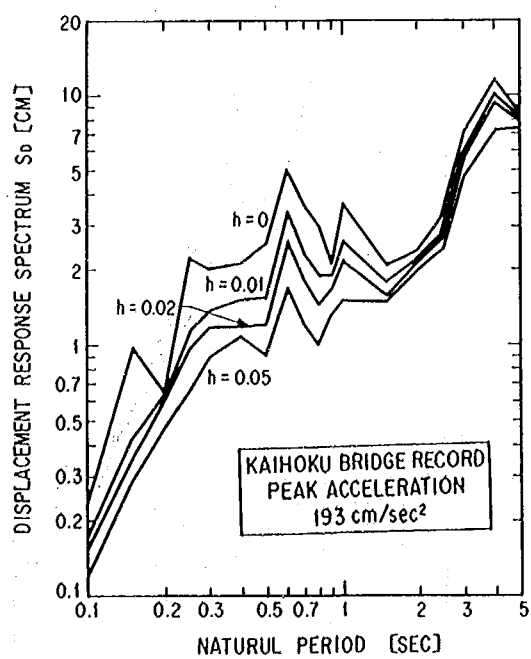
(a) 加速度波形



(b) 変位波形



(c) 加速度応答スペクトル



(d) 変位応答スペクトル

図 2.6 入力地震動 (開北橋記録)

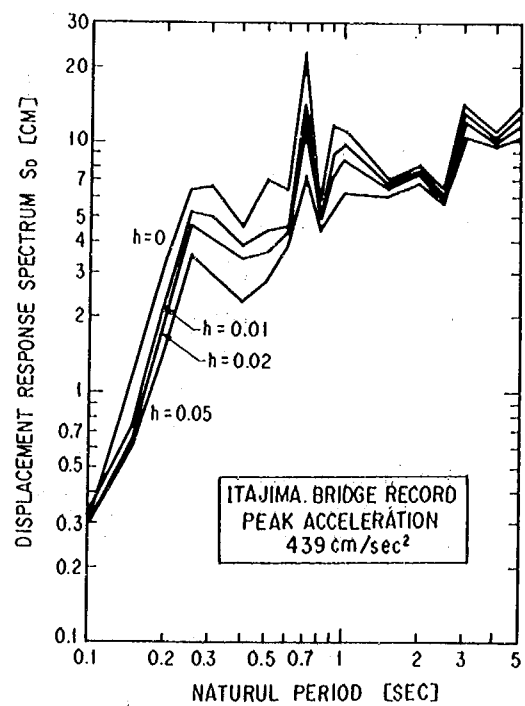
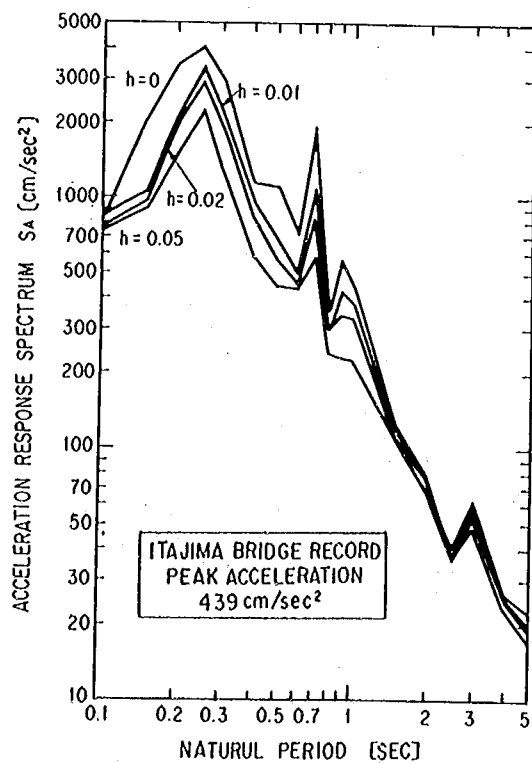
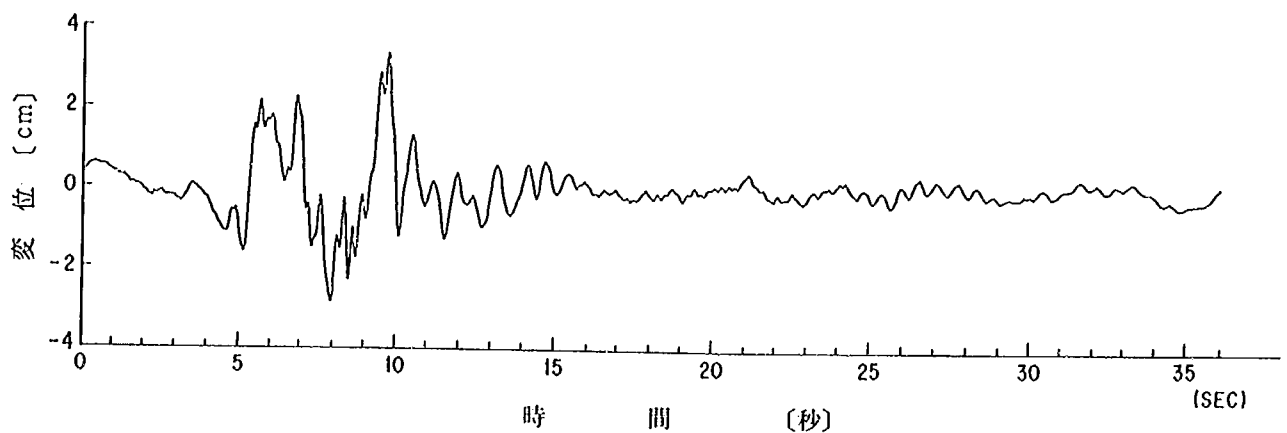
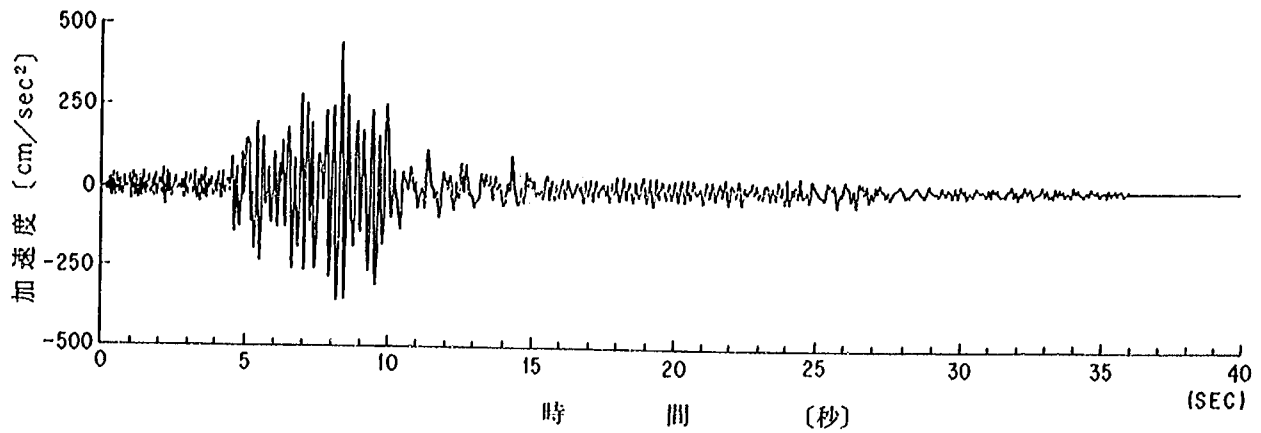
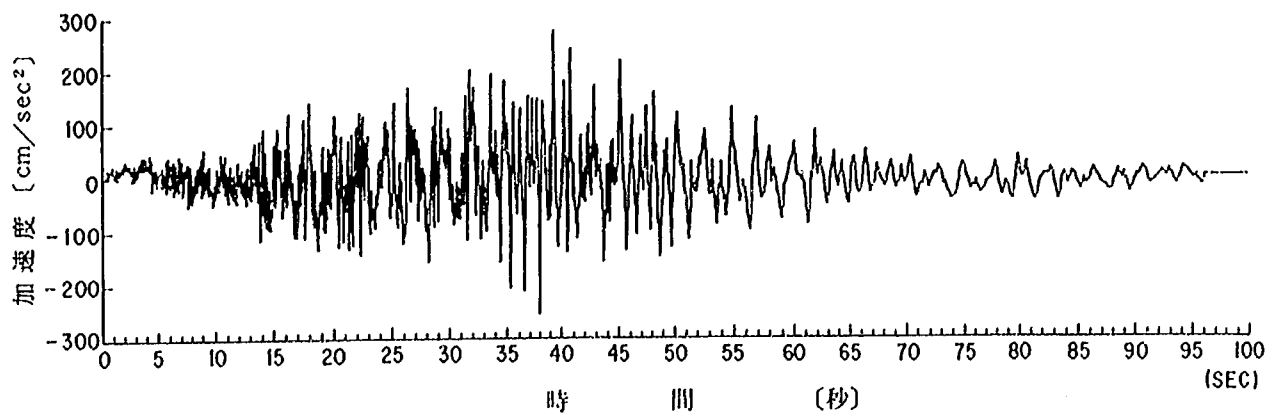
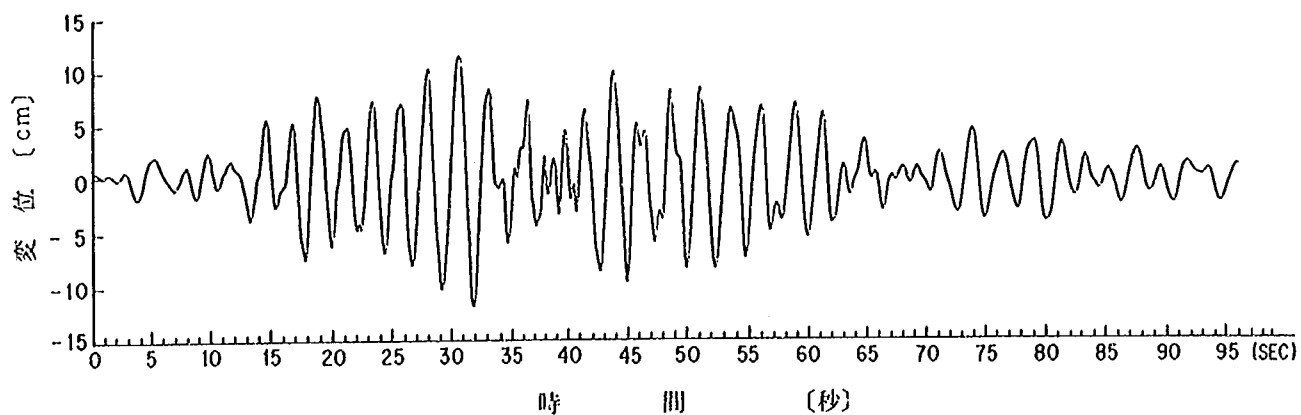


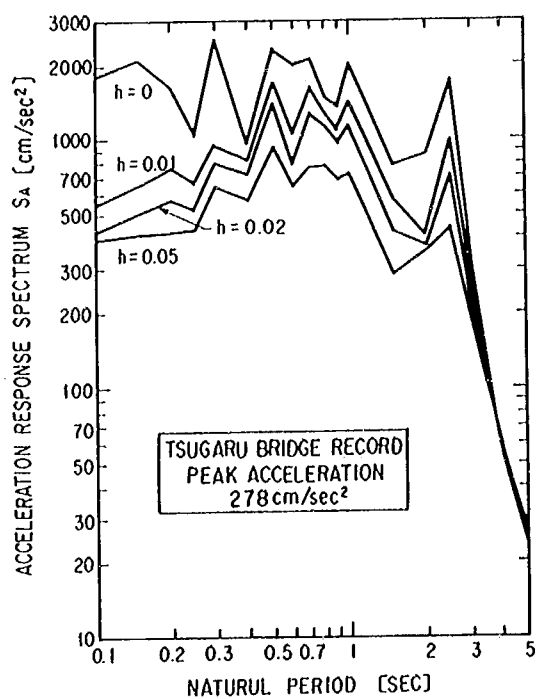
図 2.6 入力地震動 (板島橋記録)



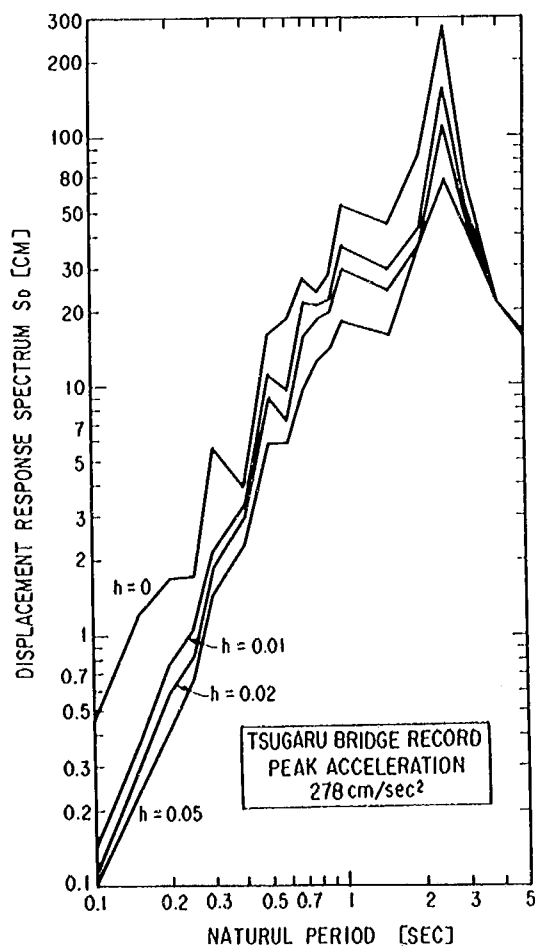
(a) 加速度波形



(b) 変位波形



(c) 加速度応答スペクトル



(d) 変位応答スペクトル

図 2.7 入力地震動（津軽大橋記録）

2.4 解析ケース

解析ケースは、表 2.2 の通りである。ここで、名港西大橋は橋軸方向に対して、塔と桁はケーブルを用いた弾性固定とされているが、ここでは塔と桁を完全固定とした場合についても解析を行った。なお、幸魂橋の橋軸方向については、両桁端の支持条件が自由であることから検討対象外とした。動的解析は、時刻歴解析法により行い減衰定数は全モードに一律 2 % を仮定した。

表 2.2 解析ケース

(a) 解析対象橋及び加振方向			(b) 解析及び入力条件	
解 析 対 象 橋		加振方向	入 力 条 件	
2 径間連続斜張橋		橋軸直角方向	入力地震動	開北橋記録 板島橋記録 津軽大橋記録
3 径間連続 斜 張 橋	塔 ～ 桁	橋 軸 方 向		
	弾性固定	橋軸直角方向	減衰定数	全モード 2 %
	塔 ～ 桁	橋 軸 方 向	地震動の 伝播速度	100, 200, 500, 1000, 2000, 4000, 同位相 (m/sec)
	固 定	橋軸直角方向		

3. 解析結果

3.1 固有振動特性及び最大地震応答の分布

(1) 固有値解析結果

2 径間連続斜張橋及び 3 径間連続斜張橋に対する固有値解析結果をそれぞれ表 3.1 及び表 3.2 に示す。これらは、有効質量比で 95% を越える振動次数までを示しており、後述する応答計算には、これらの次数を全て考慮した。

表 3.1 によれば、幸魂橋解析モデルの基本固有周期は、橋軸方向に対しては 2.85 秒、橋軸直角方向に対しては 2.56 秒となる。また、刺激係数及び有効質量比を見てみると、一般に桁橋等の通常の橋梁では低次の振動モードが大きくなる場合が多いが、斜張橋については、高次の振動次数、例えば橋軸方向については 5 次、13 次、16 次、橋軸直角方向では 15 次、18 次においても大きな値となることが注目される。このことは、斜張橋では、桁橋等の通常の橋梁とは違い、応答計算では高次のモードまでを考慮する必要のあることを示している。

また、表 3.2 によれば、名港西大橋解析モデル（弾性支持）の基本固有周期は、橋軸方向に対しては 3.89 秒、橋軸直角方向に対しては 4.39 秒と非常に長い。ただし、名港西大橋の実橋振動実験結果によると、対応するモード形の周期はそれぞれ 3.1 秒及び 3.8 秒となる。計算結果が振動実験結果と異なる理由は、ここでは主塔のモデル化に際し、式（2-18）を用いるとともにケーブル本数を実橋よりも少なくしたためと考えられる。ただし、本検討の目的は名港西大橋自体の振動特性調査にあるのではなく、斜張橋一般の振動特性の検討にあるため、上記の固有周期の違いについては特に問題としなかった。また、表 3.3 は、塔と桁を固定とした場合の名港西大橋解析モデルの固有値解析結果を示したものであるが、弾性固定の場合と比較してみると剛性が増加した分だけ固定の場合が全体的に周期が短くなっている。

表 3.1 幸魂橋解析モデルの固有値解析結果

振動次数	橋 軸 方 向							橋 軸 直 角 方 向			
	固有周期 〔秒〕	刺 激 係 数		有 効 質 量		有効質量比〔%〕		固有周期 〔秒〕	刺 激 係 数 橋軸直角方向	有 効 質 量 橋軸直角方向	有効質量比〔%〕 橋軸直角方向
		橋軸方向	上下方向	橋軸方向	上下方向	橋軸方向	上下方向				
1	2.85	1.9	0.0	4	0	0.1	0.0	2.56	9.0	81	1.2
2	1.29	-0.0	21.1	0	445	0.0	64.8	1.13	27.3	744	10.7
3	0.93	-2.4	-0.0	6	0	0.2	0.0	0.80	20.9	438	6.3
4	0.75	0.0	6.8	0	46	0.0	6.8	0.72	-4.3	19	0.3
5	0.63	-29.5	0.0	872	0	23.7	0.0	0.71	-5.9	34	0.5
6	0.50	-2.6	0.0	7	0	0.2	0.0	0.68	6.2	39	0.6
7	0.45	-0.0	-8.6	0	75	0.0	10.9	0.46	14.2	201	2.9
8	0.31	0.3	0.0	0	0	0.0	0.0	0.38	10.3	105	1.5
9	0.29	-0.0	1.0	0	1	0.0	0.1	0.37	-1.6	2	0.0
10	0.24	3.4	0.0	12	0	0.3	0.0	0.37	3.8	14	0.2
11	0.23	5.0	0.0	25	0	0.7	0.0	0.26	0.8	0	0.0
12	0.23	0.0	-1.1	0	1	0.0	0.2	0.26	1.8	3	0.1
13	0.21	-28.1	-0.0	790	0	21.4	0.0	0.25	-8.8	77	1.1
14	0.19	2.1	0.0	4	0	0.1	0.0	0.22	-18.8	352	5.1
15	0.19	-0.0	3.3	0	11	0.0	1.6	0.20	55.1	3040	43.7
16	0.18	-44.3	-0.0	1965	0	53.3	0.0	0.20	-1.5	2	0.0
17								0.20	-6.2	38	0.6
18								0.18	-32.2	1033	14.9
19								0.17	1.7	3	0.0
20								0.17	-0.2	0	0.0
21								0.17	3.3	11	0.2
22								0.15	2.6	7	0.1
23								0.15	-0.4	0	0.0
24								0.15	-19.9	395	5.7
						計	99.9	84.3			
							97.5		計	95.5	

表 3.2 名港西大橋解析モデル（塔～桁弾性固定）の固有値解析結果

振動 次数	橋 軸 方 向							橋 軸 直 角 方 向			
	固有周期 〔秒〕	刺 激 係 数		有 効 質 量		有 効 質 量 比〔%〕		固有周期 〔秒〕	刺 激 係 数 橋軸直角方向	有 効 質 量 橋軸直角方向	有 効 質 量 比〔%〕 橋軸直角方向
		橋軸方向	上下方向	橋軸方向	上下方向	橋軸方向	上下方向				
1	3.89	0.0	9.1	0	83	0.0	0.5	4.39	16.6	276	1.7
2	2.94	12.5	-0.0	156	0	1.0	0.0	1.57	0.3	0	0.0
3	2.49	32.2	-0.0	1039	0	6.6	0.0	1.13	25.7	66.0	4.0
4	1.86	0.0	17.3	0	298	0.0	1.9	1.03	-1.0	1	0.0
5	1.64	0.8	0.0	1	0	0.0	0.0	0.91	-5.4	29	0.2
6	1.40	0.0	19.1	0	364	0.0	2.3	0.87	23.3	542	3.3
7	1.21	-0.7	0.0	0	0	0.0	0.0	0.83	5.7	33	0.2
8	1.03	-0.0	4.3	0	18	0.0	0.1	0.65	-18.7	349	2.1
9	1.00	-0.4	-0.0	0	0	0.0	0.0	0.56	7.2	51	0.3
10	0.89	-0.0	-7.5	0	56	0.0	0.4	0.53	-7.8	61	0.4
11	0.70	-0.2	-0.0	0	0	0.0	0.0	0.45	1.1	1	0.0
12	0.59	-1.0	1.5	1	2	0.0	0.0	0.44	-16.8	281	1.7
13	0.51	15.9	0.1	253	0	1.6	0.0	0.41	62.2	3863	23.3
14	0.48	1.3	5.4	2	30	0.0	0.2	0.39	-8.6	74	0.4
15	0.48	3.4	-1.3	11	2	0.1	0.0	0.39	-8.9	79	0.5
16	0.44	7.5	-0.2	56	0	0.4	0.0	0.39	24.6	604	3.6
17	0.44	-2.6	-1.7	7	3	0.0	0.0	0.32	-12.1	146	0.9
18	0.41	44.9	-0.2	2014	0	12.7	0.0	0.31	-4.2	17	0.1
19	0.39	22.5	-1.1	504	1	3.2	0.0	0.30	21.5	460	2.8
20	0.38	48.6	1.9	2364	4	14.9	0.0	0.29	75.7	5729	34.5
21	0.37	39.2	-1.8	1535	3	9.7	0.0	0.27	35.0	1223	7.4
22	0.33	0.1	88.0	0	7739	0.0	49.8	0.26	45.5	2068	12.5
23	0.31	-0.1	83.2	0	6929	0.0	44.6				
24	0.29	0.8	-0.2	1	0	0.0	0.0				
25	0.27	-59.3	-0.1	3518	0	22.2	0.0				
26	0.26	-66.0	0.0	4361	0	27.6	0.0				
						計	99.98	99.9			
							99.9			計	99.7

表 3.3 名港西大橋解析モデル（塔～桁固定）の固有値解析結果

振動次数	橋 軸 方 向						
	固有周期 〔秒〕	刺 激 係 数		有 効 質 量		有 効 質 量 比 (%)	
		橋 軸 方 向	上 下 方 向	橋 軸 方 向	上 下 方 向	橋 軸 方 向	上 下 方 向
1	3.75	0.0	-1.7	0	89	0.0	0.6
2	2.93	-1.6	-0.0	94	0	0.6	0.0
3	1.83	-0.0	-2.8	0	305	0.0	2.0
4	1.65	1.2	0.0	58	0	0.4	0.0
5	1.54	-6.4	0.0	1208	0	7.6	0.0
6	1.40	0.0	2.7	0	351	0.0	2.3
7	1.19	0.8	0.0	37	0	0.2	0.0
8	1.03	-0.0	-0.6	0	18	0.0	0.1
9	1.00	0.1	-0.0	0	0	0.0	0.0
10	0.89	-0.0	1.1	0	56	0.0	0.4
11	0.70	-0.0	-0.0	0	0	0.0	0.0
12	0.57	0.1	-0.5	0	3	0.0	0.0
13	0.48	-0.3	0.0	4	0	0.0	0.0
14	0.48	-0.0	-0.9	0	30	0.0	0.2
15	0.44	0.0	-0.3	0	3	0.0	0.0
16	0.42	8.4	-0.0	987	0	6.2	0.0
17	0.40	-5.0	0.1	1069	1	6.8	0.0
18	0.38	-11.5	-0.4	2605	3	16.5	0.0
19	0.37	7.9	-0.2	1755	2	11.1	0.0
20	0.33	-0.0	-3.9	0	7752	0.0	49.9
21	0.31	0.0	4.0	0	6907	0.0	44.4
22	0.31	7.3	-0.4	698	2	4.4	0.0
23	0.30	0.1	-0.8	0	10	0.0	0.1
24	0.29	-0.3	-0.0	3	0	0.0	0.0
25	0.27	2.8	0.0	3259	0	20.6	0.0
26	0.26	1.9	-0.0	4046	0	25.6	0.0
計						99.99	99.88
						99.9	

(2) 最大地震応答の分布

時刻歴解析による桁及び塔の最大変位及び最大断面力の分布を図 3.1～図 3.12に示す。これらは最大応答値の絶対値を示したものであり、同一時刻に得られたものではない。ここでは、地震動の伝播速度について 100 m/sec, 1000 m/sec 及び同位相入力の場合の 3 ケースについて示している。これより、以下のことが指摘される。

- 1) 地震動の伝播速度 3 ケースの応答値を比較してみると、解析モデル、入力地震動により、入力位相差を考慮した方がより大きい値が算出されたり、同位相の場合が大きくなったりとその傾向は異なる。
- 2) 名港西大橋についてみると、入力位相差を考慮した場合に桁の変位応答値が特に大きな違

いが生じており、位相速度が遅いほど小さくなる傾向を有している。ただし、この場合に開北橋記録、板島橋記録を入力とした時の桁の曲げモーメントは位相速度によって変化していないが津軽大橋記録を入力とした時は変位と同じ傾向を有している。

3) 斜張橋の耐震設計上重要となる主塔部分の曲げモーメントに着目すると以下ようになる。

a) 幸魂橋

桁より上の主塔には、あまり大きな曲げモーメントは生じていないが、桁より下の橋脚には大きな曲げモーメントが三角形状に生じている。これは、幸魂橋の支持形式は主塔と桁が剛結されており、上部構造の慣性力が橋脚部分に受け持たれるためである。

また、地震動の伝播速度の影響については、伝播速度が遅い場合に応答が最大値をとる場合、同位相入力の場合に応答が最大値をとる場合と入力地震動、変位、断面力等の応答値の種類により異なるが、分布形状はおおむね同一であり入力位相差の影響は比較的小さい。

b) 名港西大橋

i) 橋軸方向

① 桁と塔を弾性固定した場合

桁から上の塔の中央部分で曲げモーメントは最大値をとり、桁から下では曲げモーメントは直線的に増加する。これは、弾性ケーブルを介して地震時水平力が主塔及び基礎に伝達されるためである。入力位相差を考慮した場合には、伝播速度が遅い方が応答値は相対的に小さくなる。

② 桁と塔を固定した場合

曲げモーメントは、桁から上の塔の中央部分と桁と塔の結合点の2ヶ所が極値(最大値)をとる。また、桁から下では曲げモーメントは直線的に分布する。入力位相差の影響は桁と塔を弾性固定した場合とほぼ同様である。ただし、板島橋記録を入力した場合、塔基部の断面力だけは伝播速度の遅い方が大きくなる。

ii) 橋軸直角方向

曲げモーメントは、塔全体にわたってほぼ直線的に増加する。また、曲げモーメントは、津軽大橋記録を入力とした時を除けば、位相差を考慮しない場合の方が大きい。

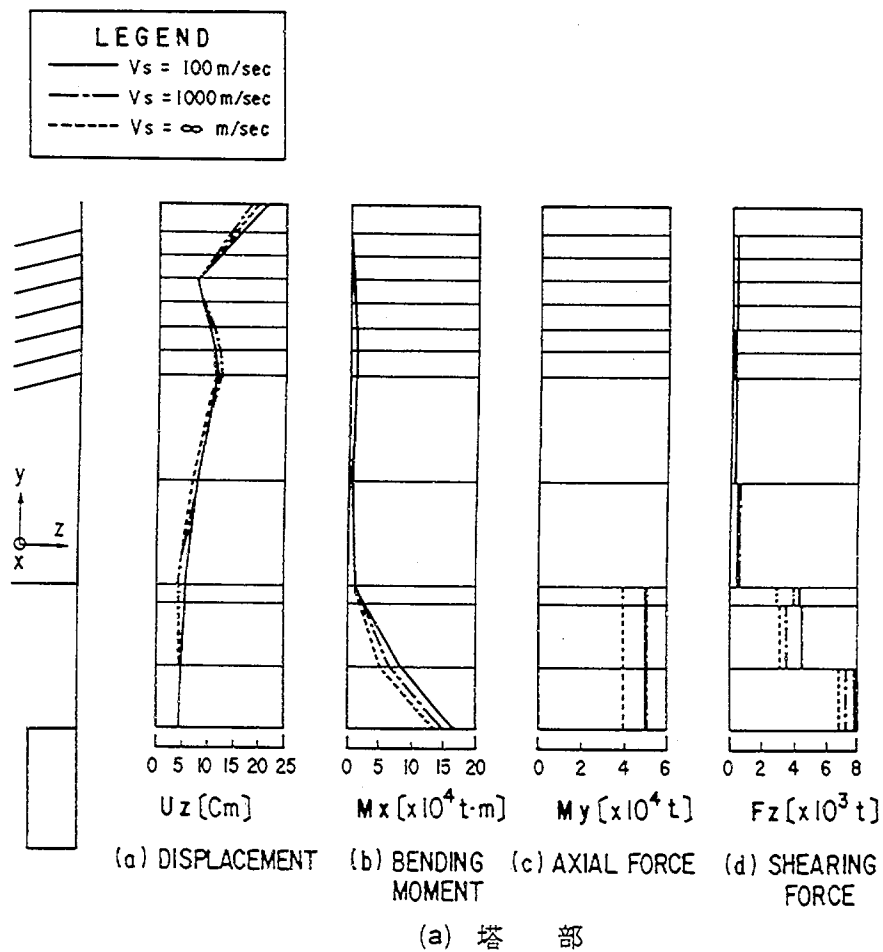
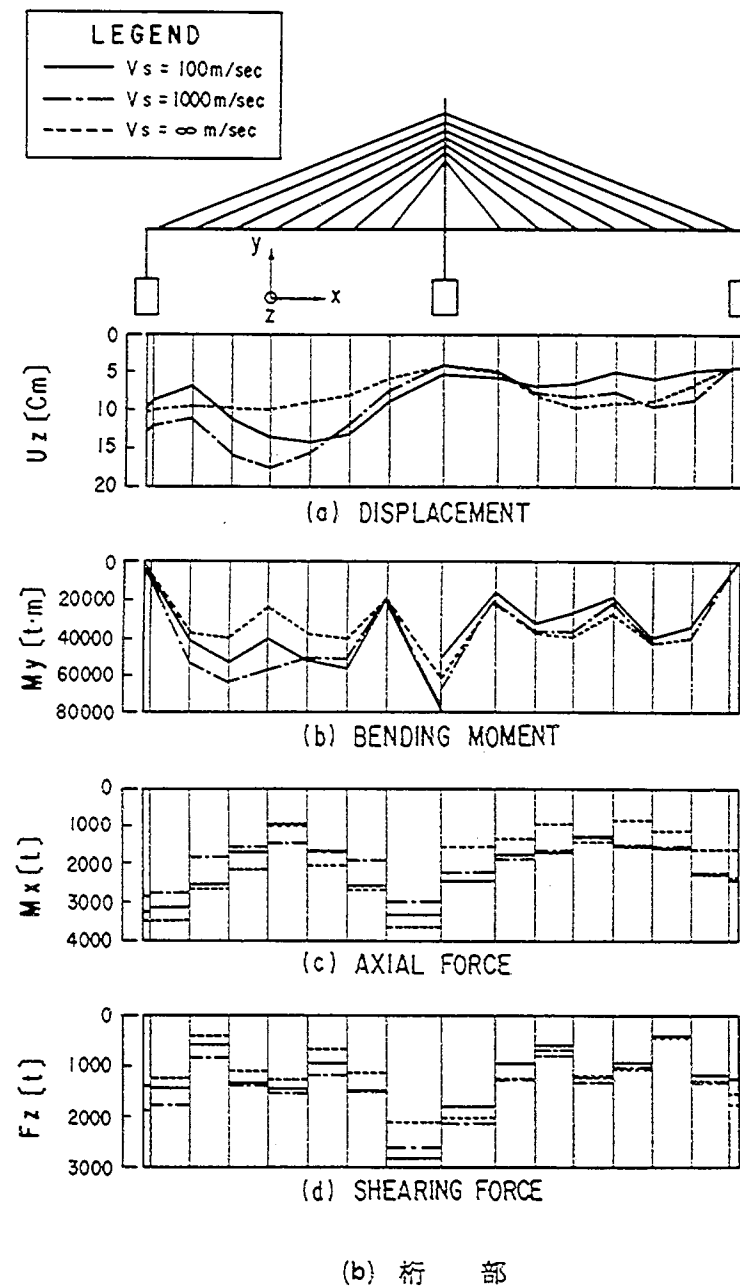


図 3.1 最大地震応答の分布
(幸魂橋橋軸直角方向加振, 開北橋記録)



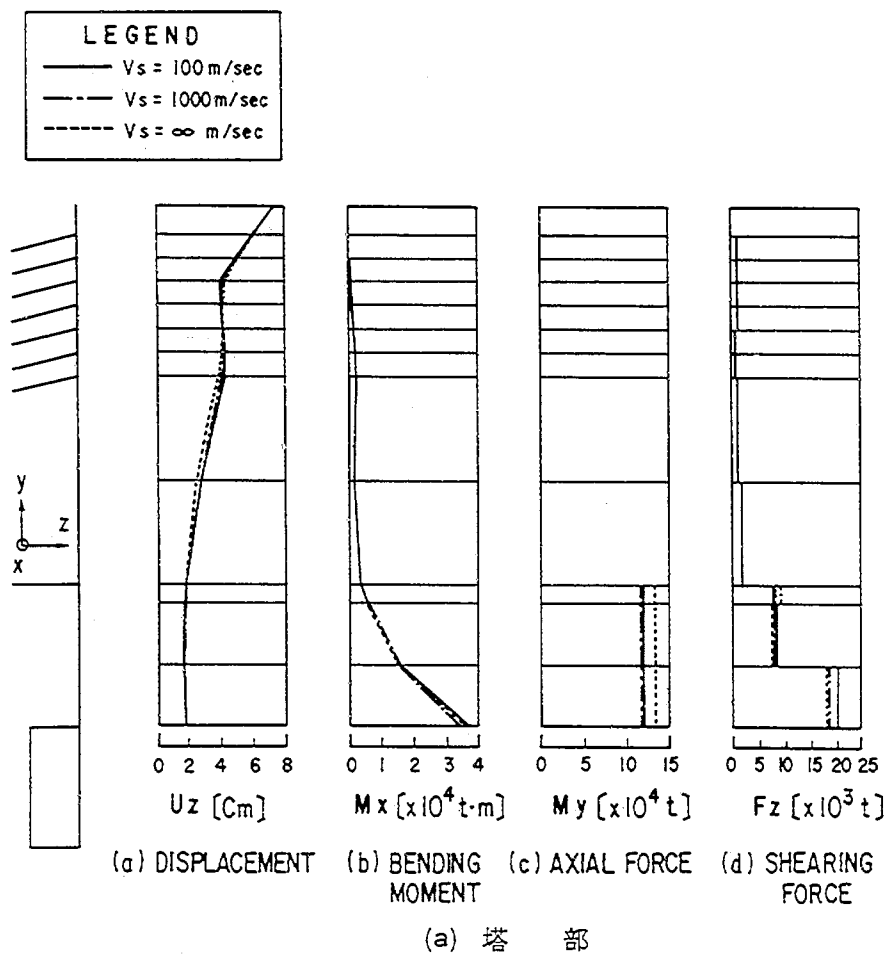
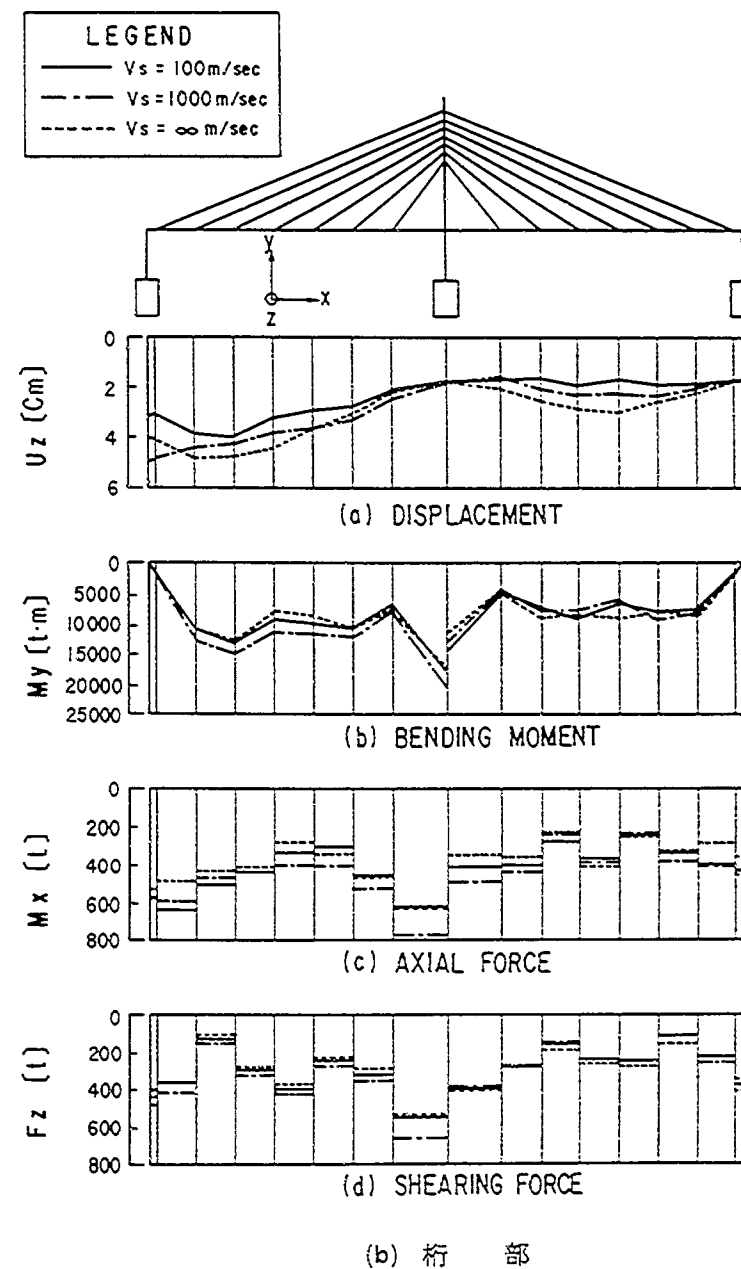


図 3.2 最大地震応答の分布
(幸魂橋橋軸直角方向加振, 板島橋記録)



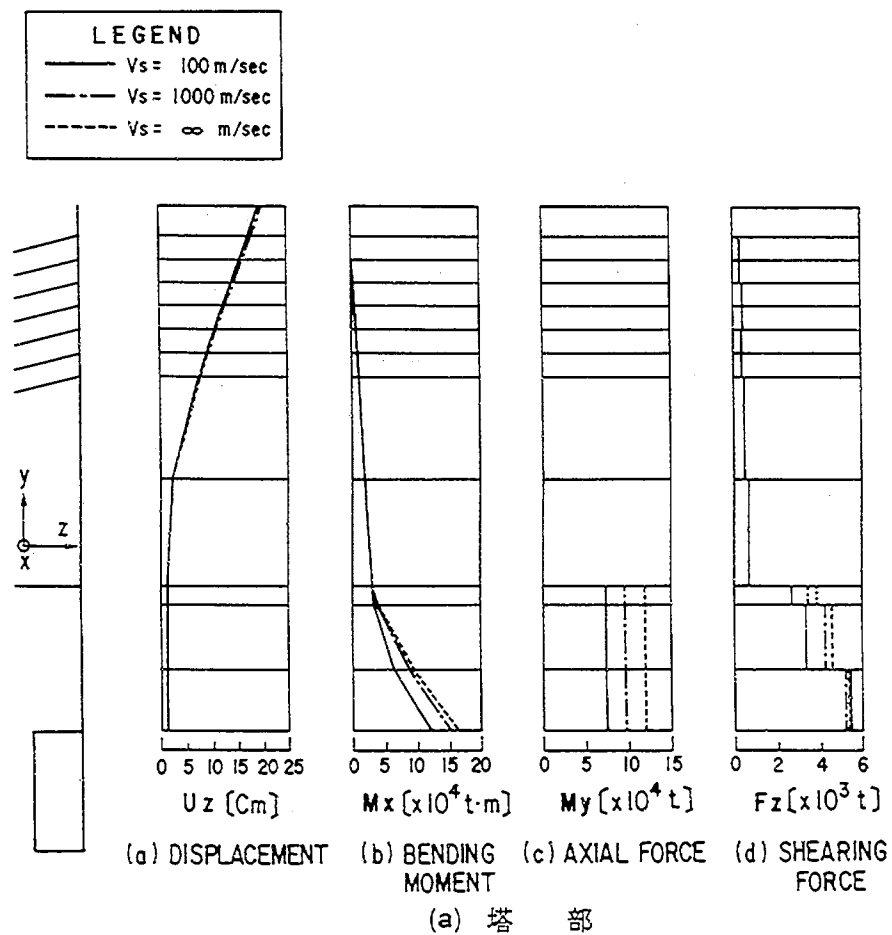
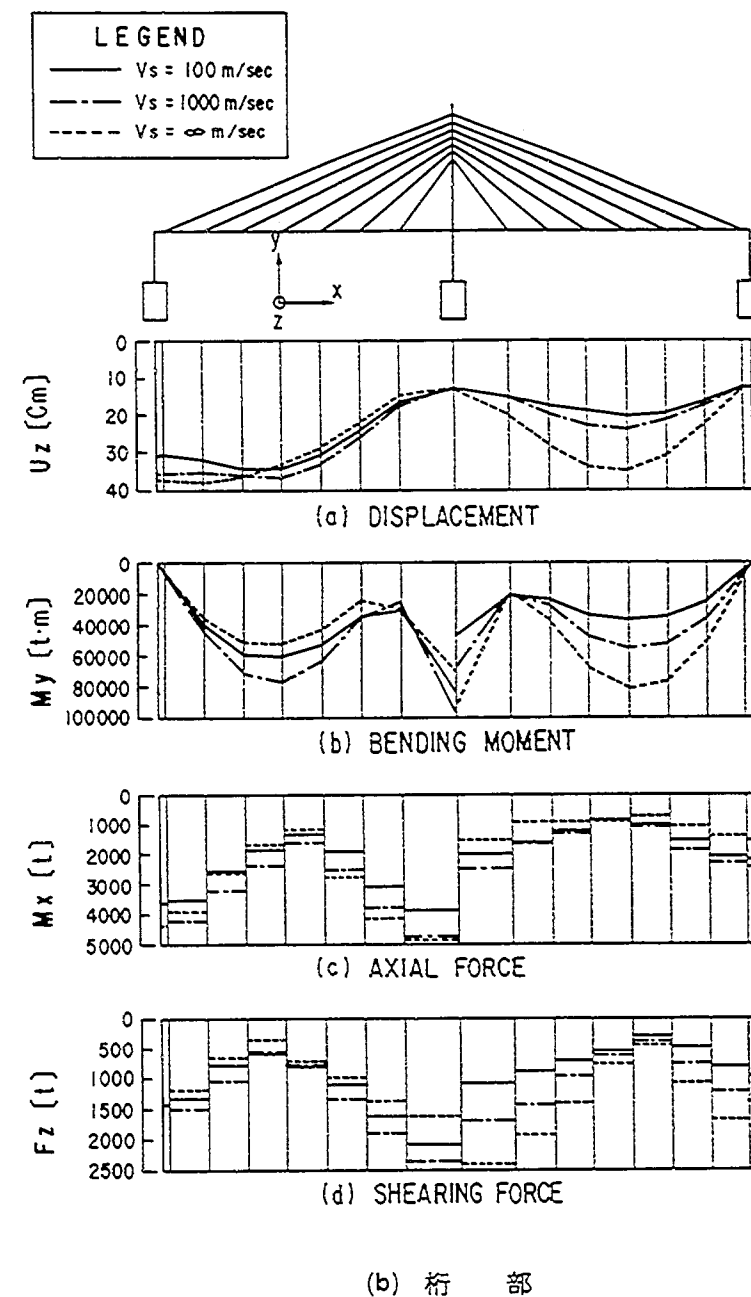
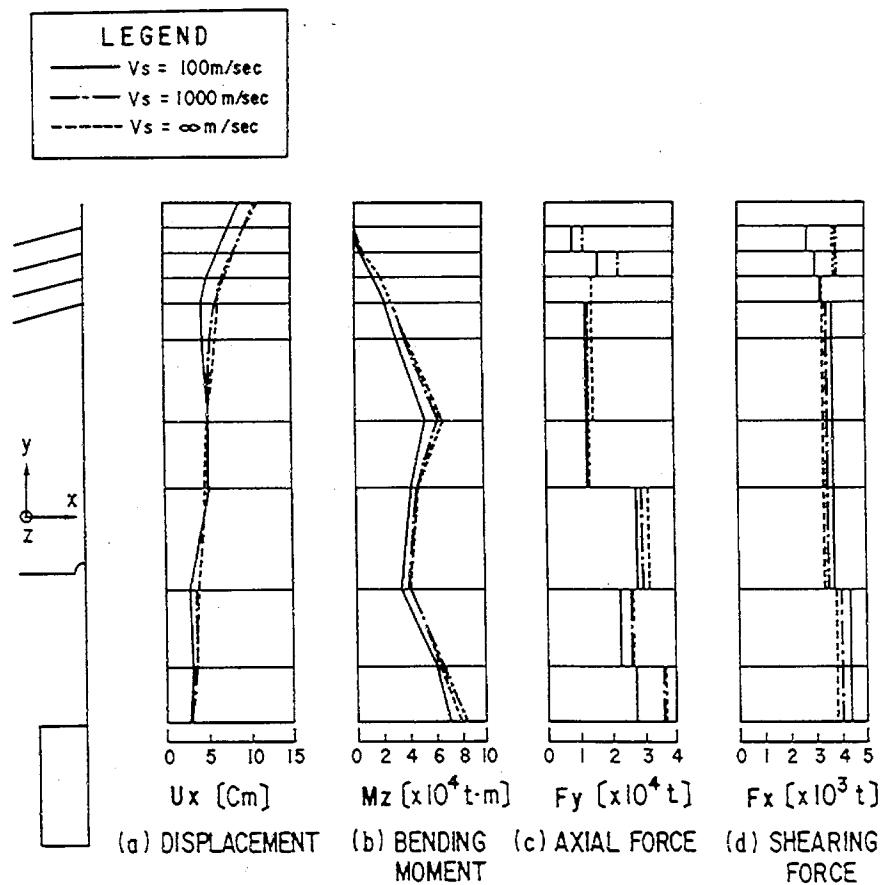


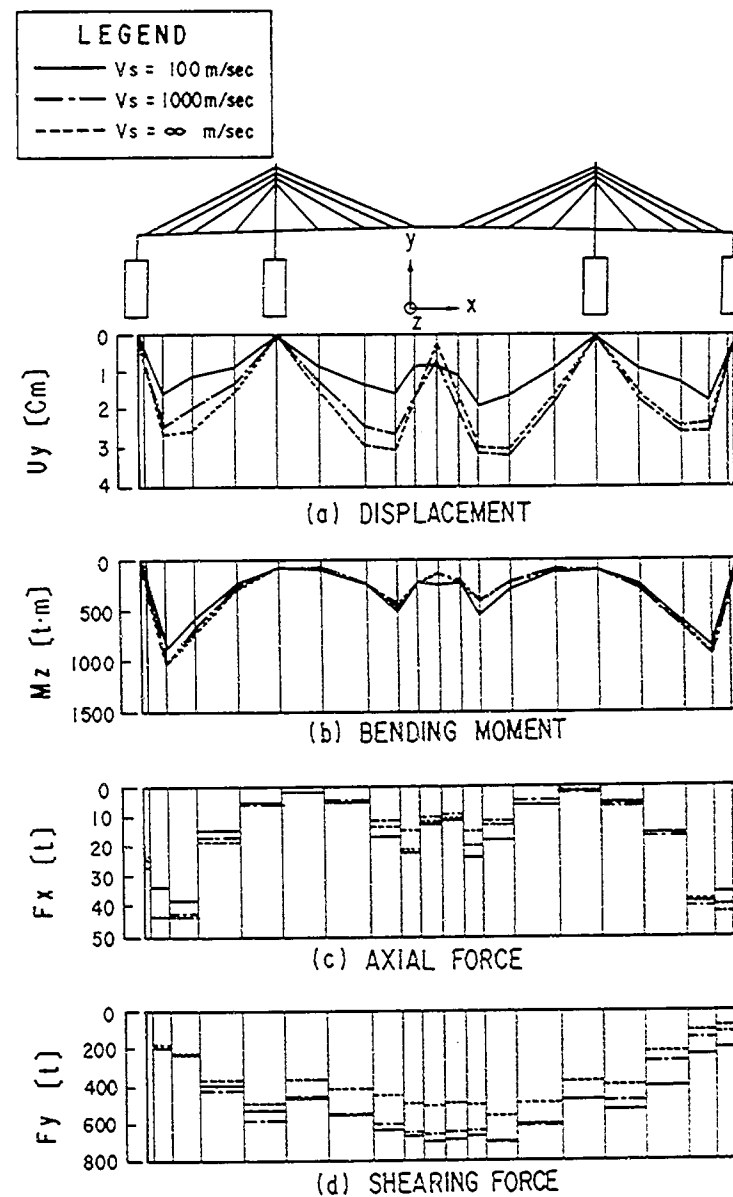
図 3.3 最大地震応答の分布
(幸魂橋橋軸直角方向加振, 津軽大橋記録)





(a) 塔 部

図 3.4 最大地震応答の分布
(名港西大橋橋軸方向加振, 塔~桁弾性固定, 開北橋記録)



(b) 桁 部

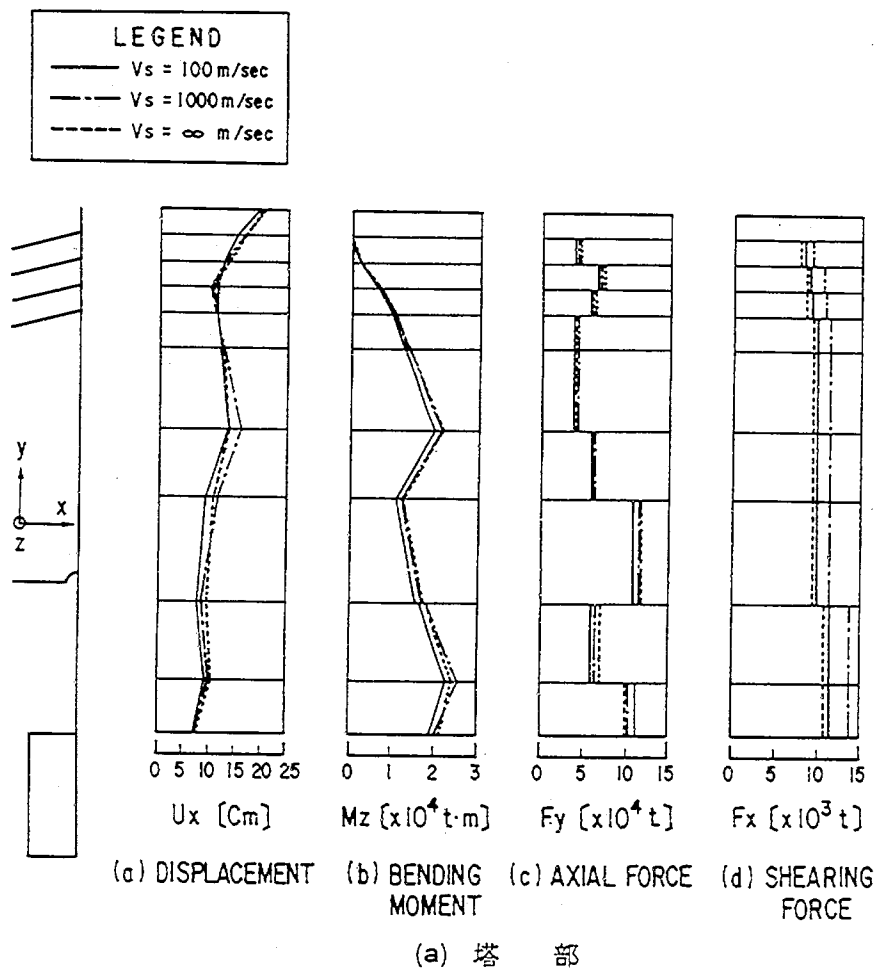
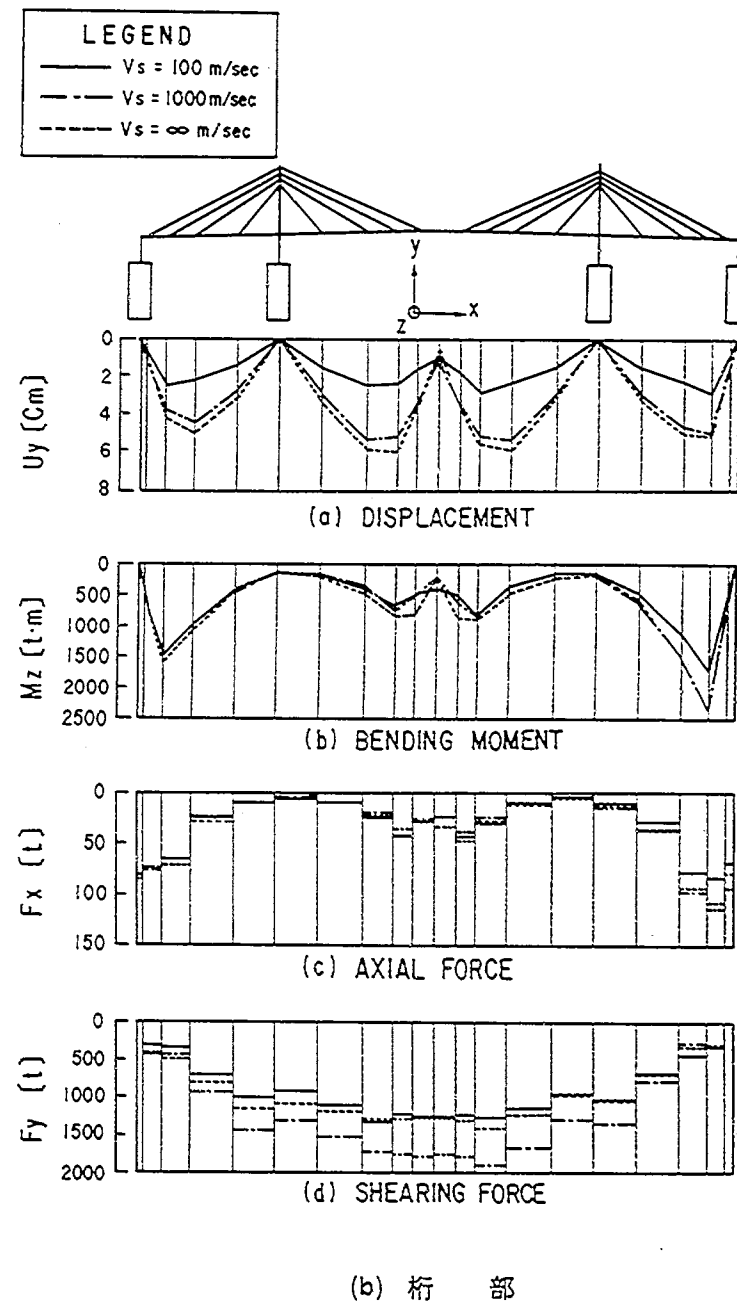


図 3.5 最大地震応答の分布
(名港西大橋橋軸方向加振, 塔～桁弾性固定,
板島橋記録)



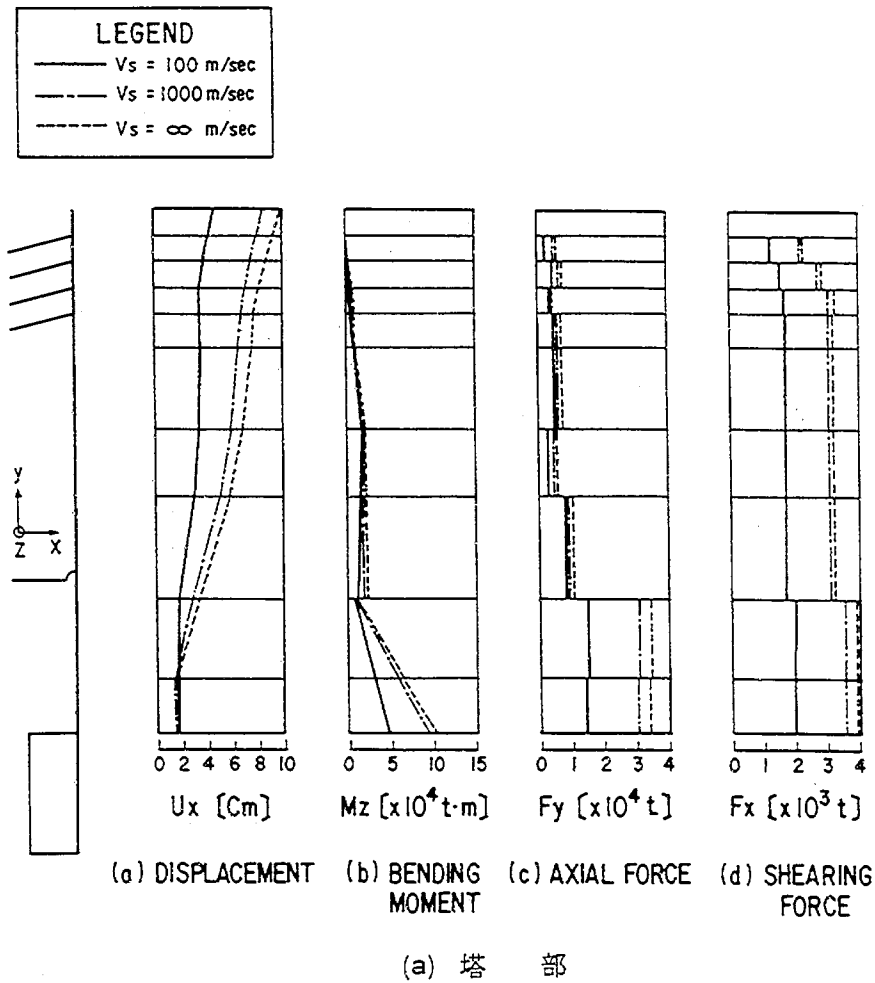
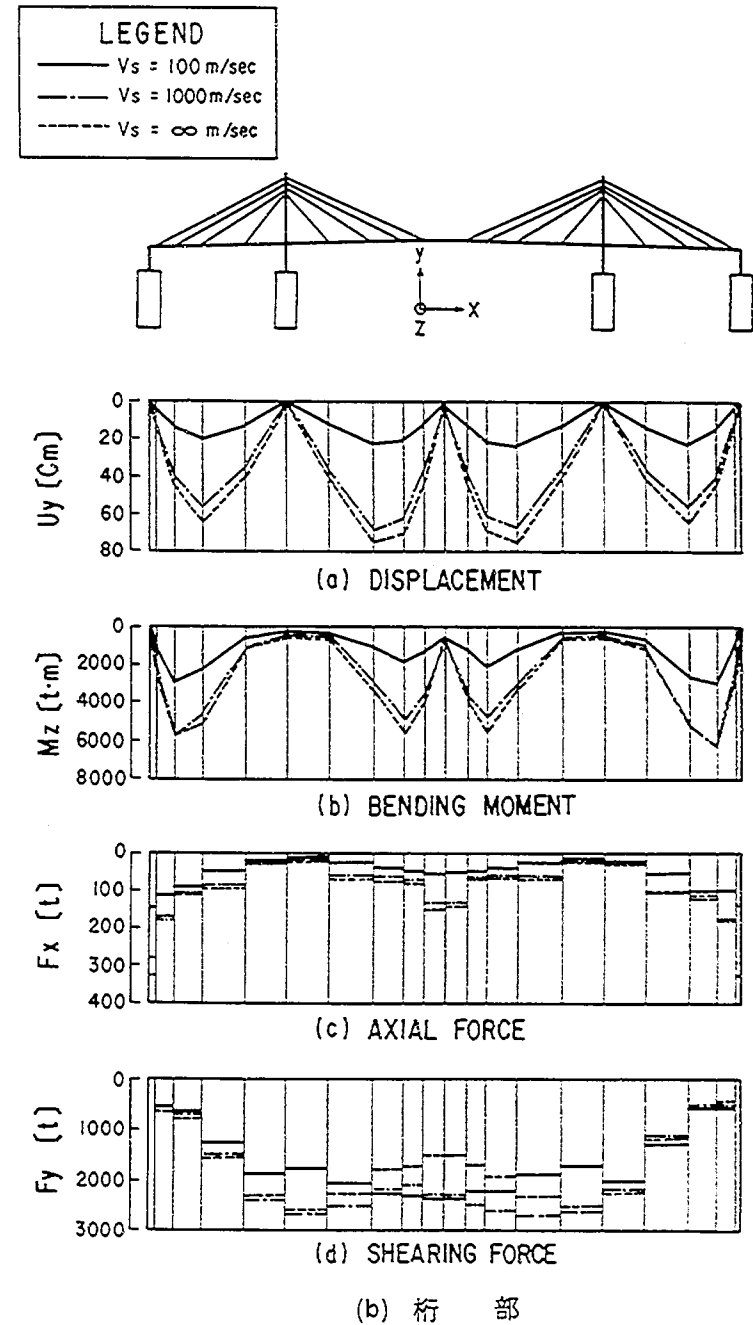


図 3.6 最大地震応答の分布
(名港西大橋橋軸方向加振, 塔～桁弾性固定,
津軽大橋記録)



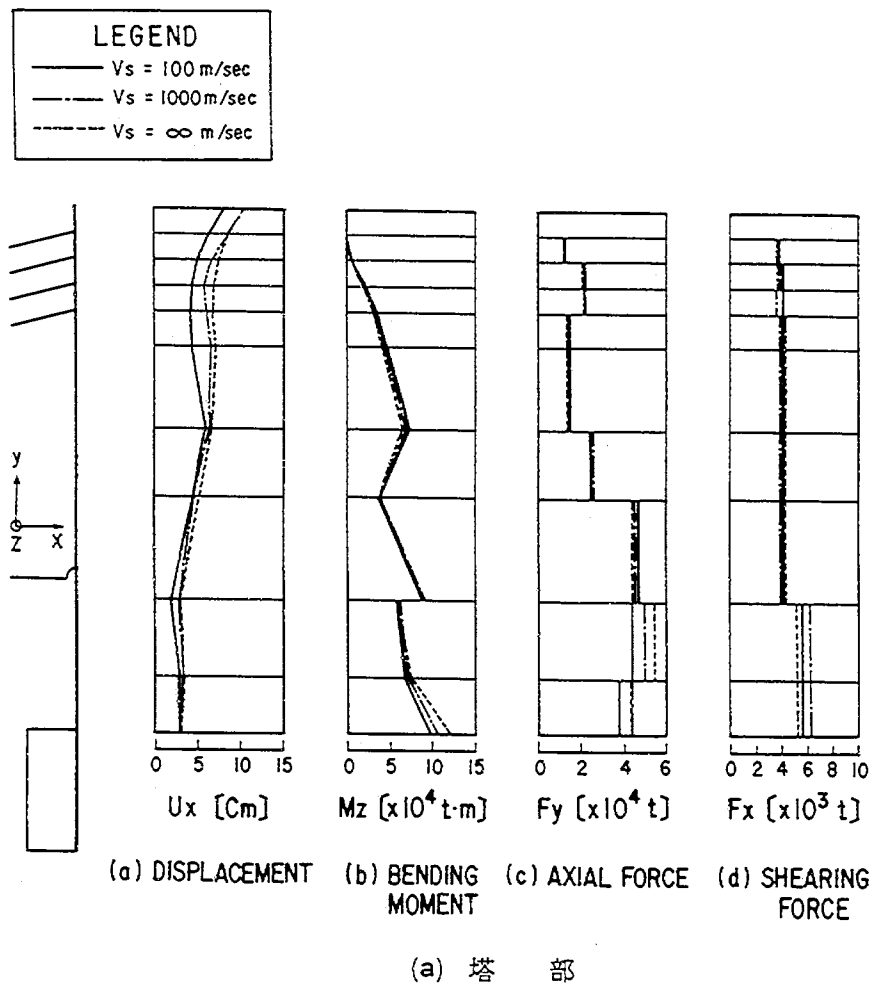
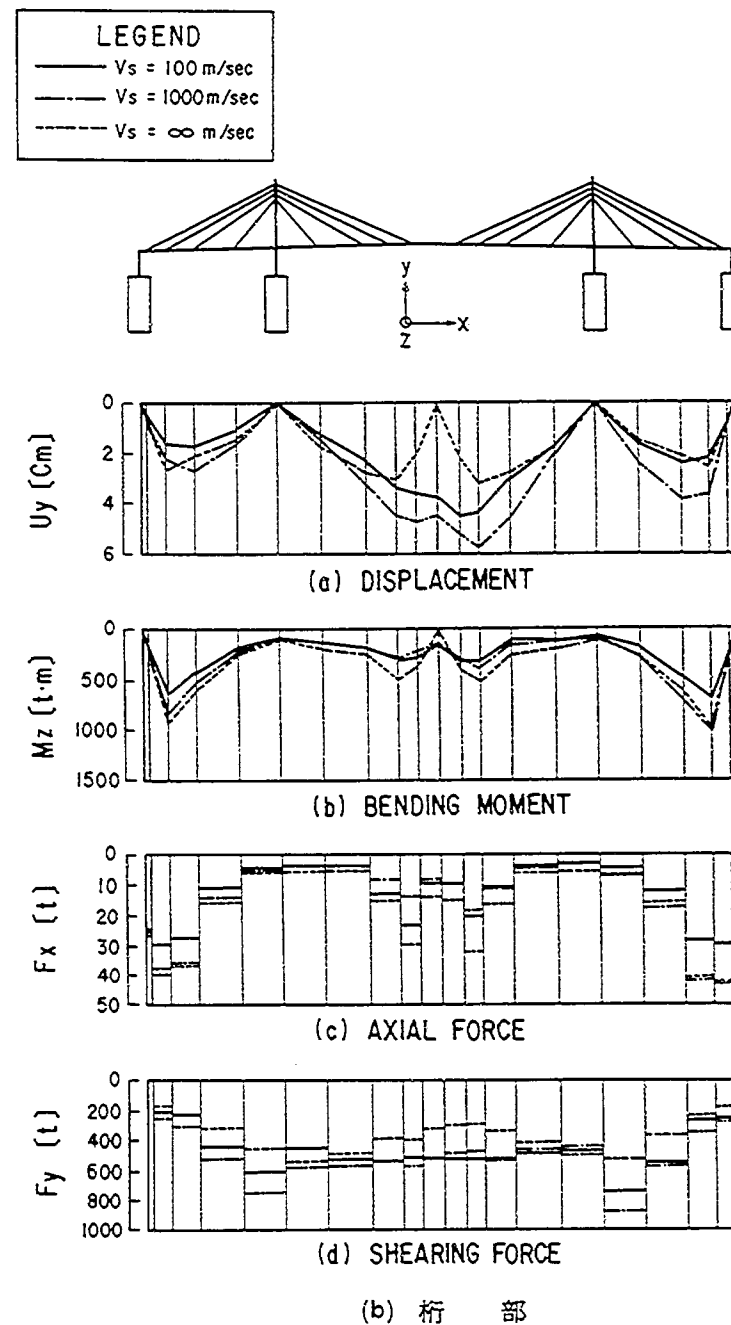


図 3.7 最大地震応答の分布
(名港西大橋橋軸方向加振, 塔～桁固定, 開北橋記録)



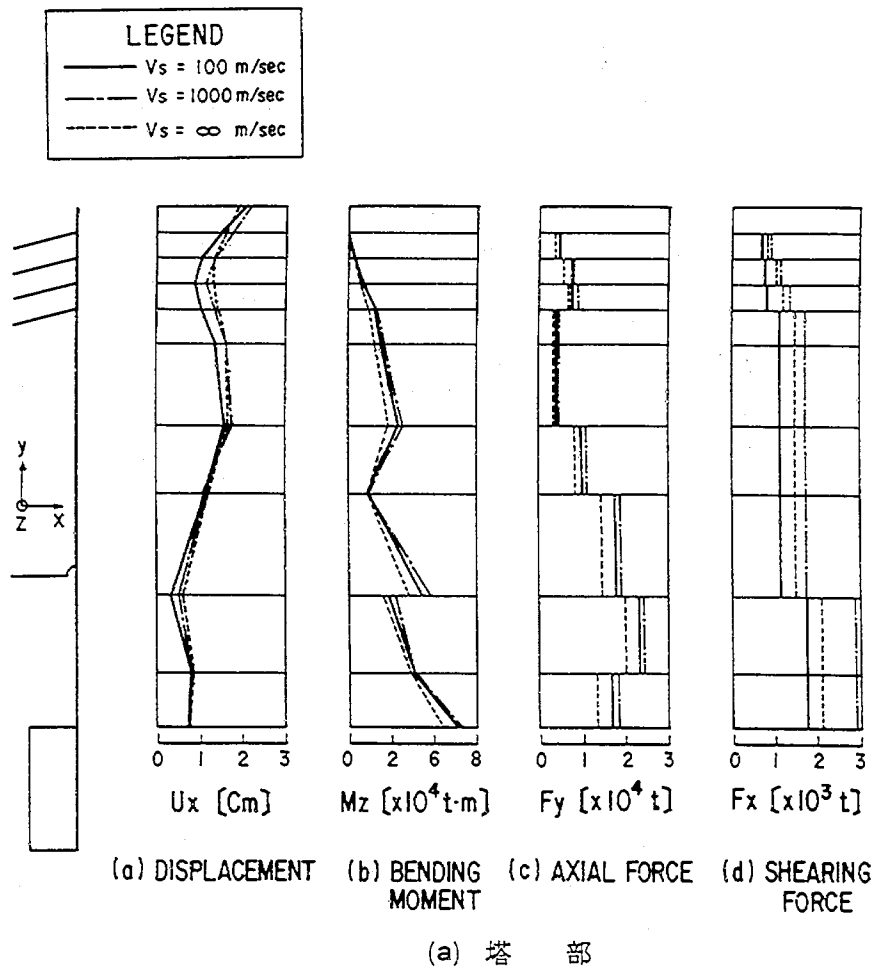
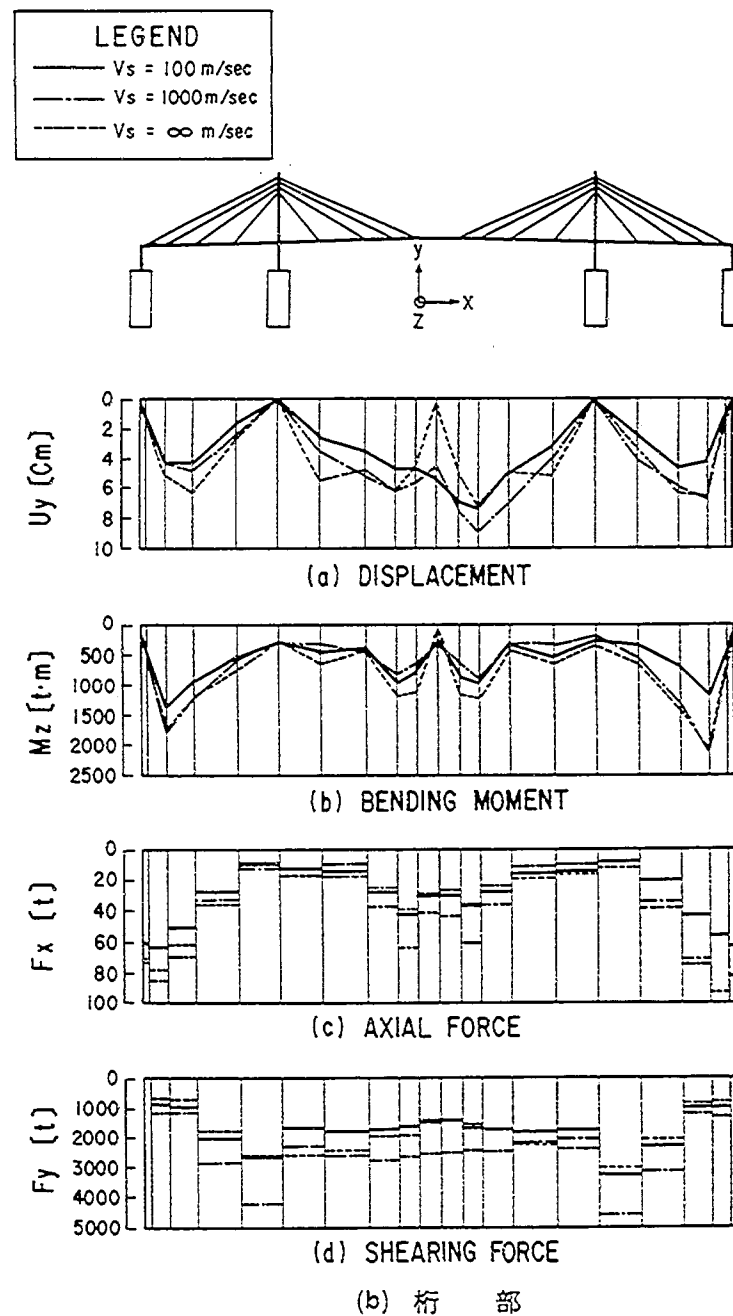


図 3.8 最大地震応答の分布
(名港西大橋橋軸方向加振, 塔～桁固定, 板島橋記録)



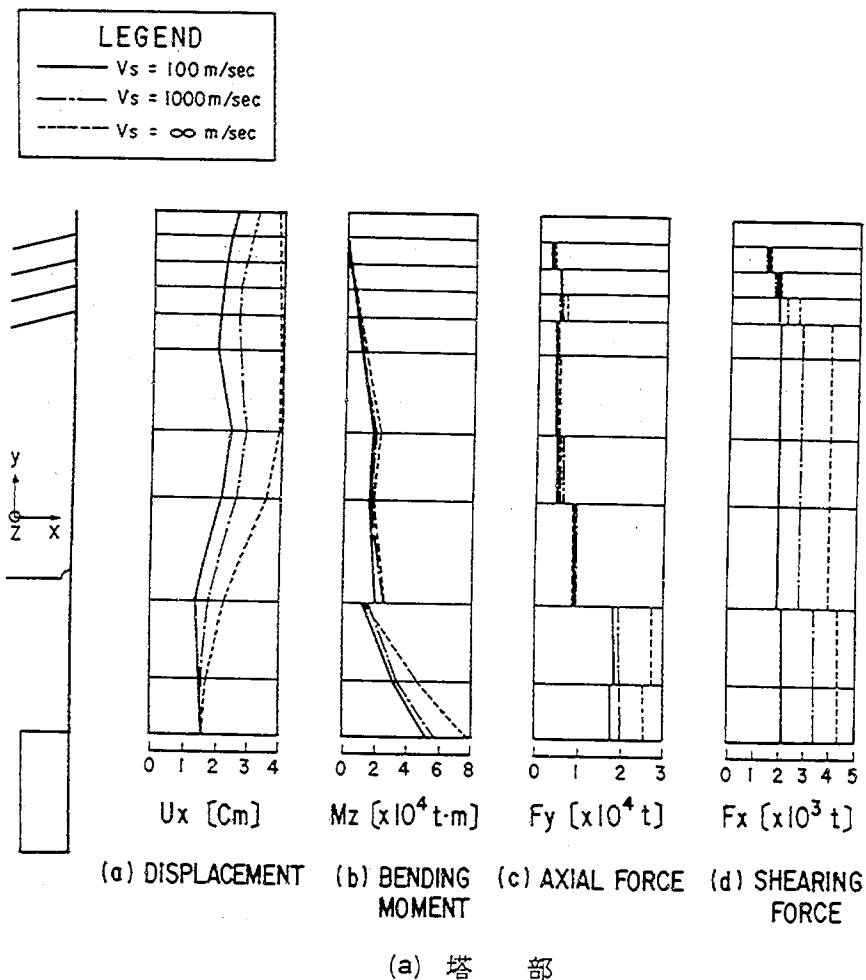
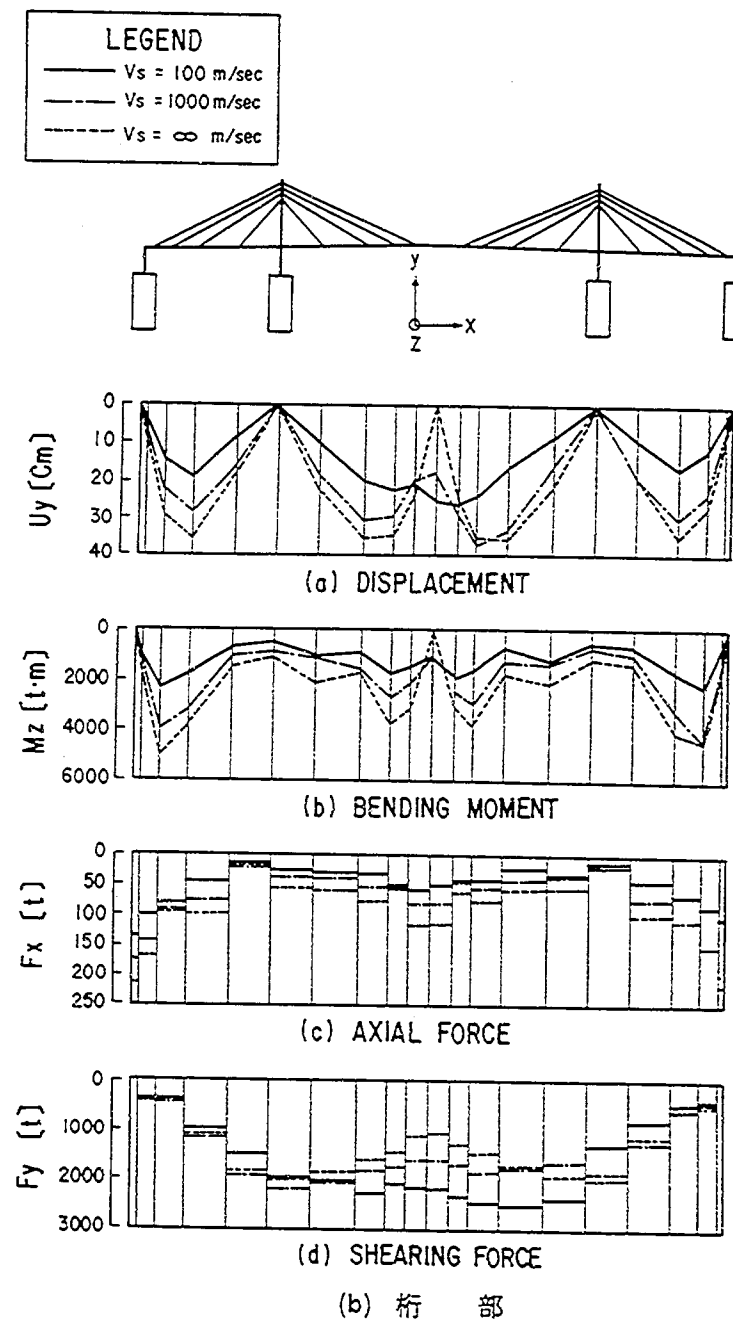


図 3.9 最大地震応答の分布
(名港西大橋橋軸方向加振, 塔～桁固定, 津軽大橋記録)



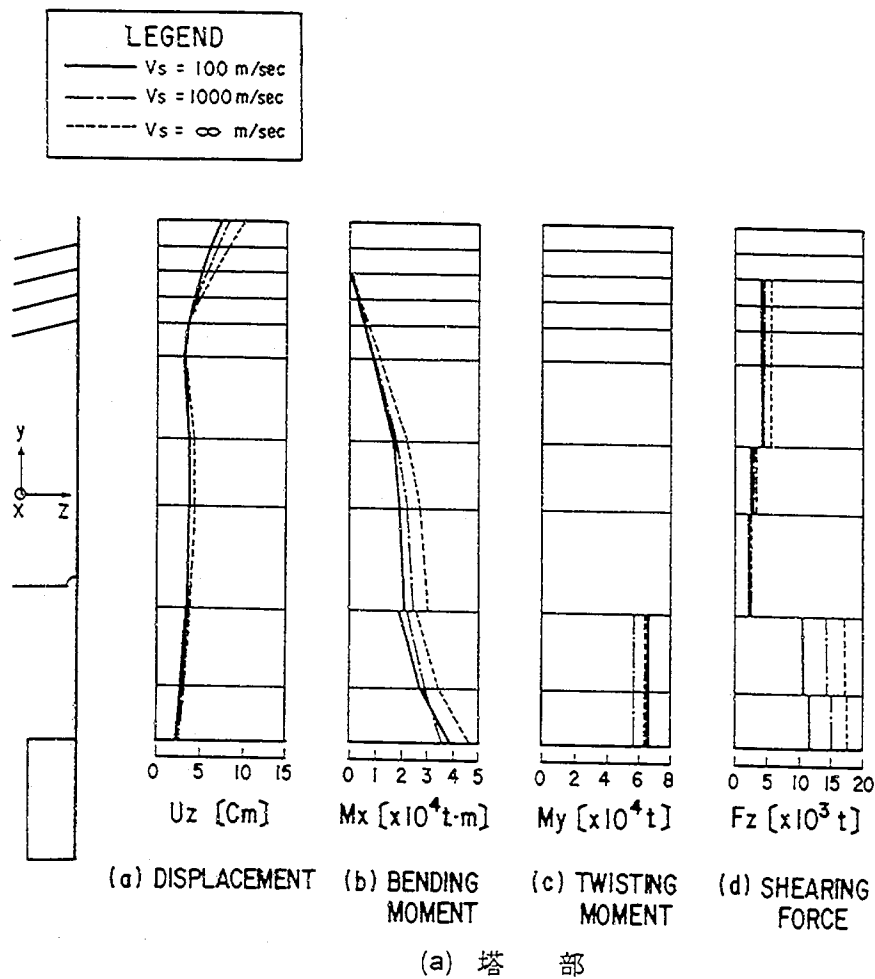
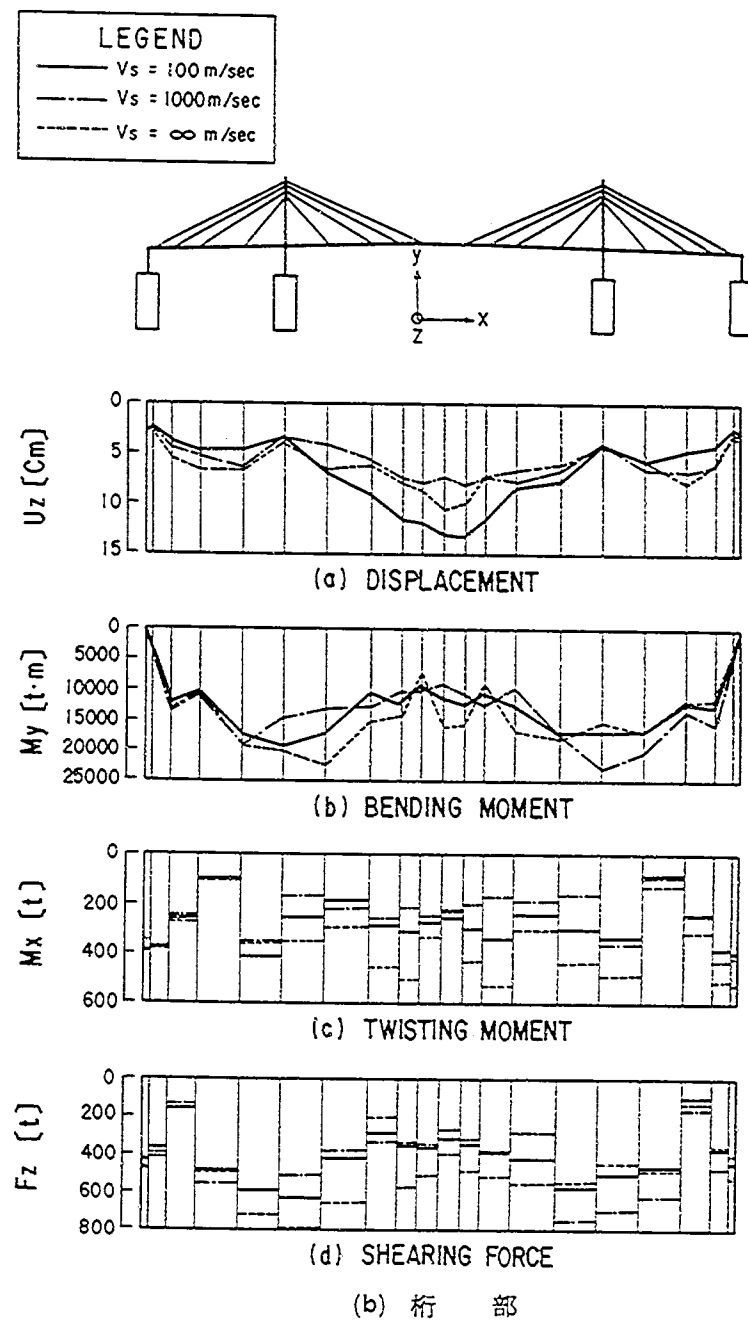


図 3.10 最大地震応答の分布
(名港西大橋橋軸直角方向加振, 開北橋記録)



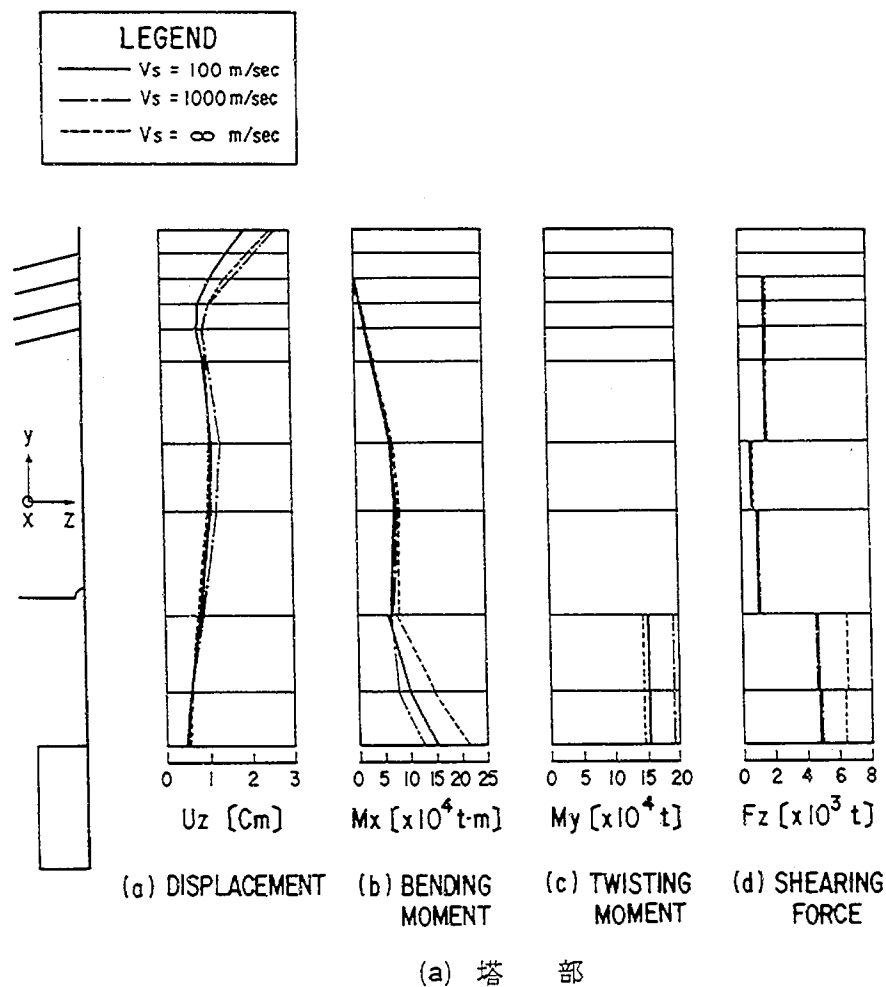
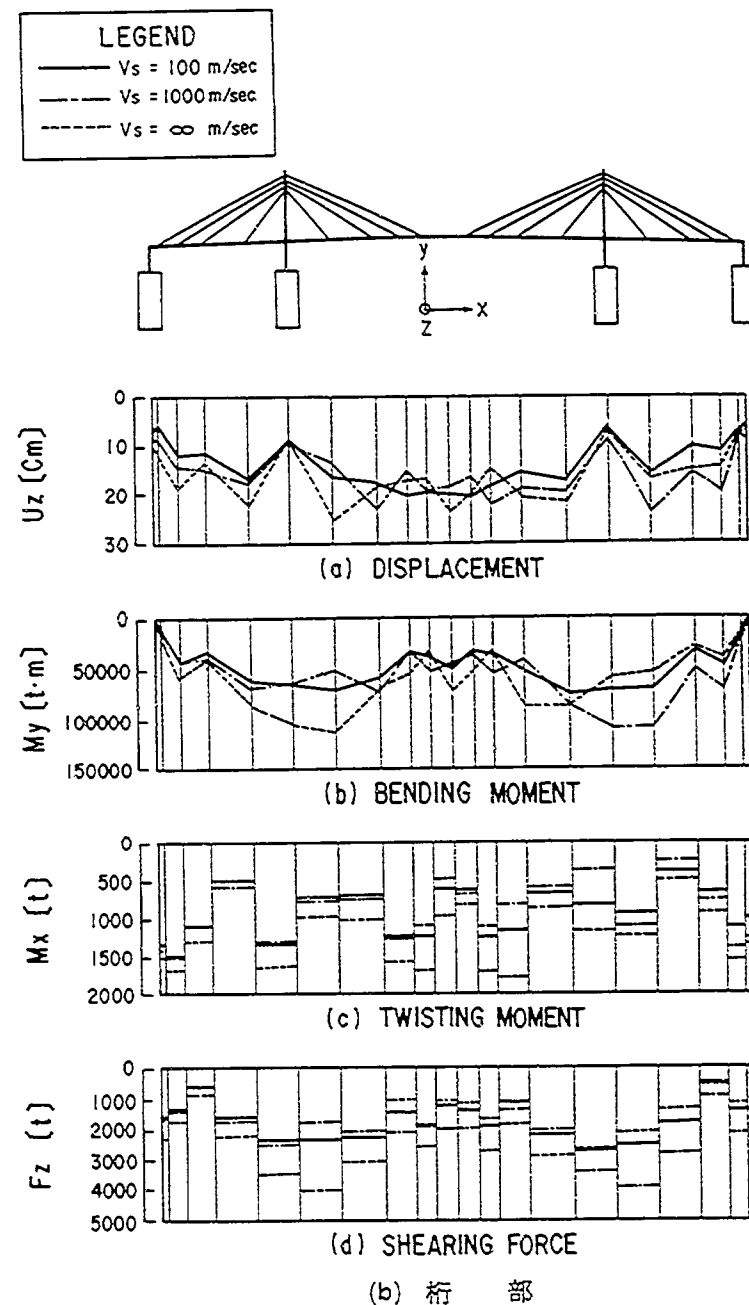


図 3.11 最大地震応答の分布
(名港西大橋橋軸直角方向加振, 板島橋記録)



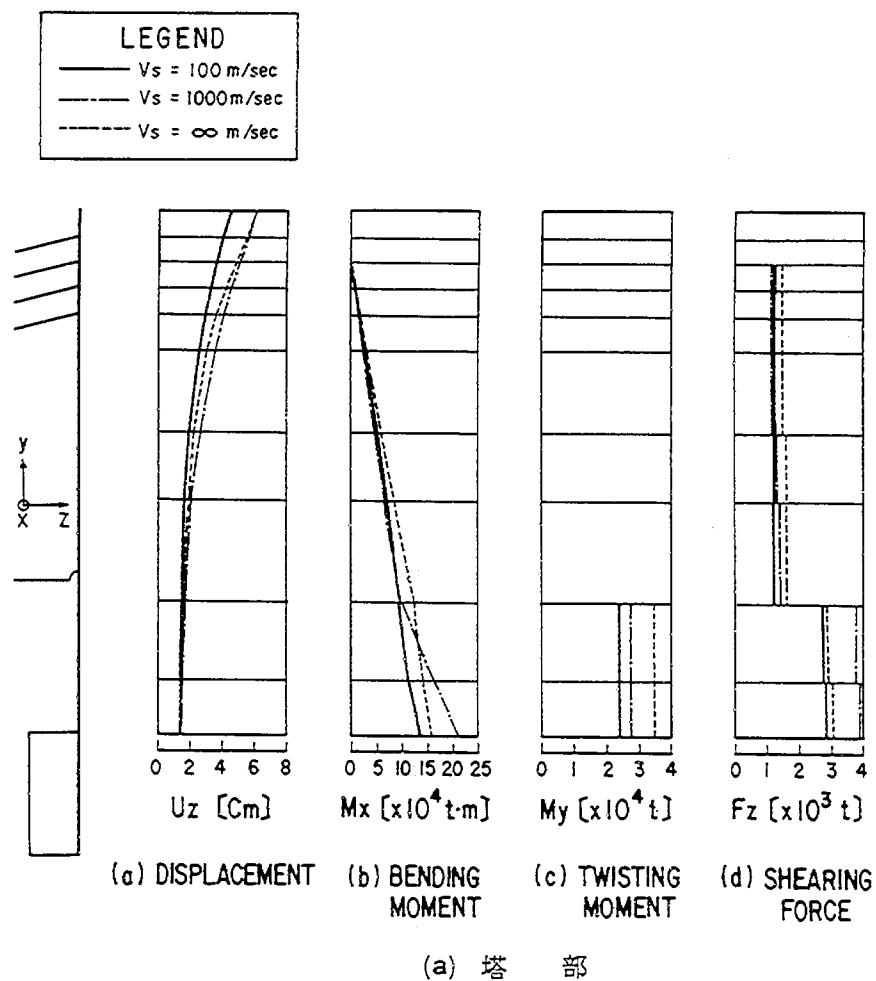
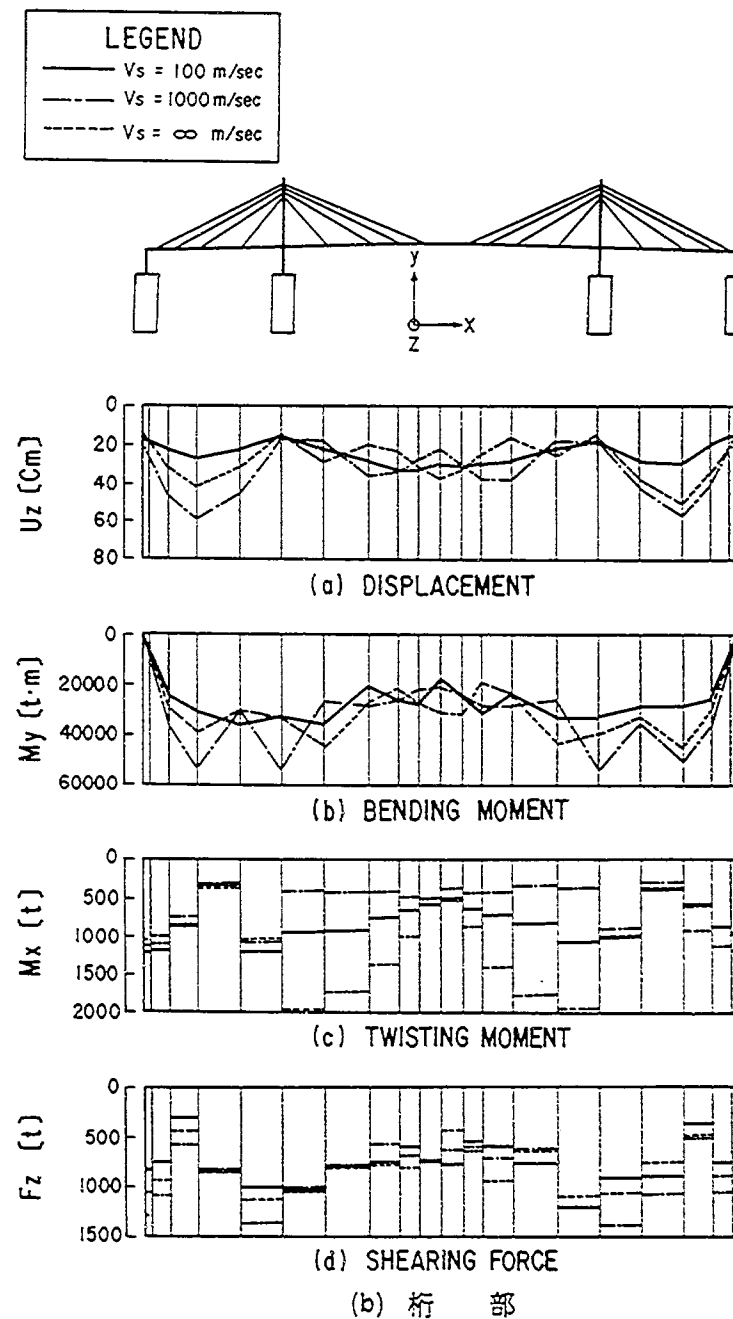


図 3.12 最大地震応答の分布
(名港西大橋橋軸直角方向加振, 津軽大橋記録)



3.2 最大応答値に及ぼす入力位相差の影響

地震の影響が支配的となる塔基部の断面力に着目して、数種の地震動の伝播速度に対し最大断面力を示したのが表 3.4～表 3.7 である。また、この断面力を通常の動的解析に用いられる同位相入力の場合を基本としてその比を図示したのが図 3.13～図 3.16 である。これより、以下のことが指摘される。

- (1) 地震動の伝播速度の変化による応答値の変化は、入力地震動によって大きく異なる。また、同一の入力地震動を入力した場合でも応答値の変化は地震動の伝播速度の変化によって敏感に変わり、一定の傾向は示さない。これは、解析対象橋の固有振動特性と入力地震動の特性が複雑に関係し合うためと考えられる。
- (2) 断面力に対する伝播速度の影響が最も敏感で特に大きな変化を示すのが、橋軸方向については軸力、橋軸直角方向についてはねじりモーメントである。
- (3) 入力地震動の違いに着目すると、津軽大橋記録の場合には、どの解析モデルについても地震動の伝播速度が約 2000 m/sec のところではほぼ同位相入力と等しくなるのに対し、開北橋記録については、 $2000\sim 4000\text{ m/sec}$ 以上の範囲、また板島橋記録については、 4000 m/sec まででは収束傾向が認められない。津軽大橋記録については、図 2.7 に示したように比較的長周期の卓越した地震動であり、このため、位相速度 2000 m/sec 程度となるとほぼ同位相入力と同じ状態になると考えられる。
- (4) 斜張橋の設計上重要となる塔基部の曲げモーメントに着目すると今回の解析の範囲では、位相差を考慮した場合に剛体入力に比較して最大で約 3 割程度大きくなる場合がある。
- (5) 名港西大橋の橋軸方向について塔と桁の結合方法を弾性固定にした場合と固定にした場合を比較してみると、曲げモーメントについては、開北橋記録、板島橋記録を入力した場合に塔と桁を固定とした場合の方がそれぞれ 1.5 倍、2.1 倍程度大きくなっているが、津軽大橋記録を入力とした場合には約 0.75 と逆に小さくなっている。

また、入力位相差に対する影響については、津軽大橋記録については、塔と桁を弾性固定とした場合、固定とした場合ともに同様の傾向を示すが、開北橋記録、板島橋記録については特にねじりモーメントが固定の場合に変化が大きくなっている。

表 3.4 橋脚基部最大断面力と地震波の伝播速度の関係
(幸魂橋橋軸直角方向加振)

断面力 入力地震波 伝播速度 (m/s)	曲げモーメント [tf・m]			せん断力 [tf]			ねじりモーメント [tf・m]		
	開北橋	板島橋	津軽大橋	開北橋	板島橋	津軽大橋	開北橋	板島橋	津軽大橋
100	36,772 (1.02)	170,000 (1.21)	123,554 (0.74)	2,039 (1.12)	7,814 (1.14)	5,451 (0.99)	11,869 (0.88)	49,620 (1.25)	73,972 (0.61)
200	34,535 (0.95)	174,296 (1.24)	182,628 (1.09)	1,649 (0.90)	7,698 (1.12)	6,117 (1.12)	12,797 (0.95)	60,344 (1.52)	106,462 (0.88)
500	33,348 (0.92)	167,092 (1.19)	152,837 (0.91)	1,965 (1.08)	7,756 (1.13)	5,785 (1.06)	12,009 (0.89)	61,477 (1.54)	68,137 (0.56)
1,000	33,829 (0.93)	150,312 (1.07)	157,578 (0.94)	1,862 (1.02)	7,214 (1.05)	5,222 (0.95)	11,727 (0.87)	50,541 (1.27)	96,661 (0.80)
2,000	36,176 (1.00)	169,055 (1.20)	170,831 (1.02)	1,712 (0.94)	7,471 (1.09)	5,642 (1.03)	10,683 (0.79)	49,814 (1.25)	107,455 (0.89)
4,000	39,703 (1.10)	179,350 (1.28)	169,637 (1.01)	1,887 (1.03)	7,739 (1.13)	5,573 (1.02)	11,360 (0.85)	35,406 (0.89)	117,252 (0.97)
同位相入力	36,042 (1.00)	139,812 (1.00)	166,381 (1.00)	1,818 (1.00)	6,815 (1.00)	5,452 (1.00)	13,360 (1.00)	39,688 (1.00)	120,120 (1.00)

注) ()内の数値は、同位相入力に対する比を示す。

表 3.5 塔基部最大断面力と地震波の伝播速度の関係
(名港西大橋橋軸方向加振, 塔～桁弾性固定)

加振方向	断面力 入力地震波 伝播速度 (m/s)	曲げモーメント [tf・m]			せん断力 [tf]			軸 力 [tf]		
		開北橋	板島橋	津軽大橋	開北橋	板島橋	津軽大橋	開北橋	板島橋	津軽大橋
橋 軸 方 向	100	7,146 (0.89)	18,736 (0.89)	47,047 (0.45)	274 (0.76)	1,111 (1.12)	1,437 (0.41)	43 (1.13)	114 (1.06)	201 (0.51)
	200	8,197 (1.02)	24,404 (1.16)	83,835 (0.80)	337 (0.93)	1,029 (1.03)	2,805 (0.81)	53 (1.39)	164 (1.53)	341 (0.87)
	500	7,764 (0.96)	17,932 (0.85)	63,614 (0.61)	334 (0.92)	973 (0.98)	1,988 (0.58)	45 (1.18)	165 (1.54)	298 (0.76)
	1,000	8,380 (1.04)	20,068 (0.95)	92,755 (0.89)	361 (1.00)	1,016 (1.02)	3,068 (0.89)	40 (1.05)	137 (1.28)	359 (0.92)
	2,000	9,490 (1.18)	23,582 (1.12)	100,237 (0.96)	294 (0.81)	1,304 (1.31)	3,406 (0.99)	49 (1.28)	187 (1.74)	370 (0.94)
	4,000	9,668 (1.20)	19,920 (0.94)	101,861 (0.97)	345 (0.95)	1,261 (1.27)	3,437 (1.00)	42 (1.10)	173 (1.61)	380 (0.97)
	同位相入力	8,009 (1.00)	21,033 (1.00)	104,086 (1.00)	360 (1.00)	991 (1.00)	3,425 (1.00)	38 (1.00)	107 (1.00)	390 (1.00)

注) ()内の数値は, 同位相入力に対する比を示す。

表 3.6 塔基部最大断面力と地震波の伝播速度の関係
(名港西大橋橋軸方向加振, 塔～桁固定)

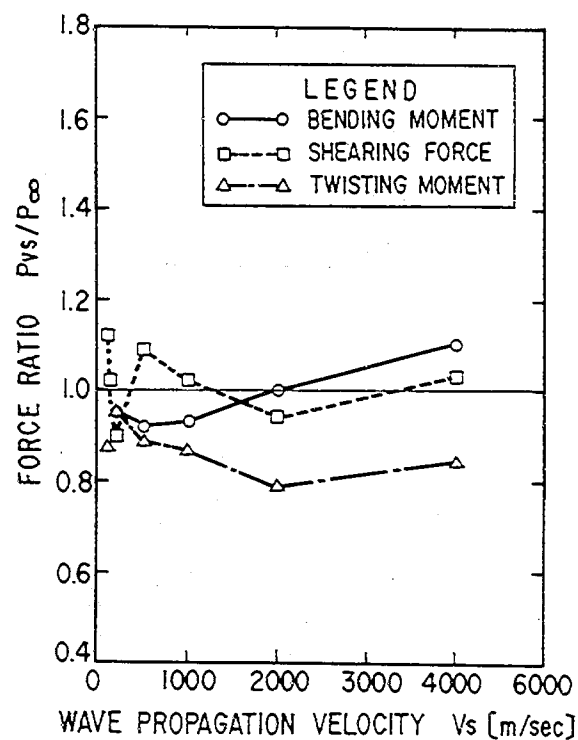
加振方向	断面力 入力地震波 伝播速度 (m/s)	曲げモーメント [tf・m]			せん断力 [tf]			軸 力 [tf]		
		開北橋	板島橋	津軽大橋	開北橋	板島橋	津軽大橋	開北橋	板島橋	津軽大橋
橋 軸 方 向	100	9,864 (0.81)	52,667 (1.18)	52,468 (0.68)	386 (0.89)	1,707 (1.29)	1,765 (0.70)	57 (1.10)	170 (0.85)	216 (0.50)
	200	11,304 (0.93)	50,258 (1.12)	59,452 (0.77)	416 (0.96)	1,684 (1.27)	2,065 (0.82)	93 (1.80)	243 (1.15)	367 (0.85)
	500	11,641 (0.96)	45,490 (1.02)	42,309 (0.54)	522 (1.21)	1,676 (1.27)	1,252 (0.50)	74 (1.42)	256 (1.21)	322 (0.74)
	1,000	10,580 (0.87)	53,120 (1.19)	56,498 (0.73)	437 (1.01)	1,830 (1.38)	2,001 (0.80)	62 (1.20)	291 (1.38)	339 (0.78)
	2,000	11,725 (0.97)	52,961 (1.18)	68,670 (0.88)	440 (1.02)	1,845 (1.39)	2,286 (0.91)	55 (1.05)	222 (1.05)	433 (1.00)
	4,000	11,467 (0.95)	57,356 (1.28)	76,359 (0.98)	416 (0.96)	2,118 (1.60)	2,519 (1.00)	59 (1.14)	306 (1.45)	462 (1.07)
	同位相入力	12,133 (1.00)	44,811 (1.00)	77,690 (1.00)	432 (1.00)	1,325 (1.00)	2,508 (1.00)	52 (1.00)	211 (1.00)	432 (1.00)

注) ()内の数値は, 同位相入力に対する比を示す。

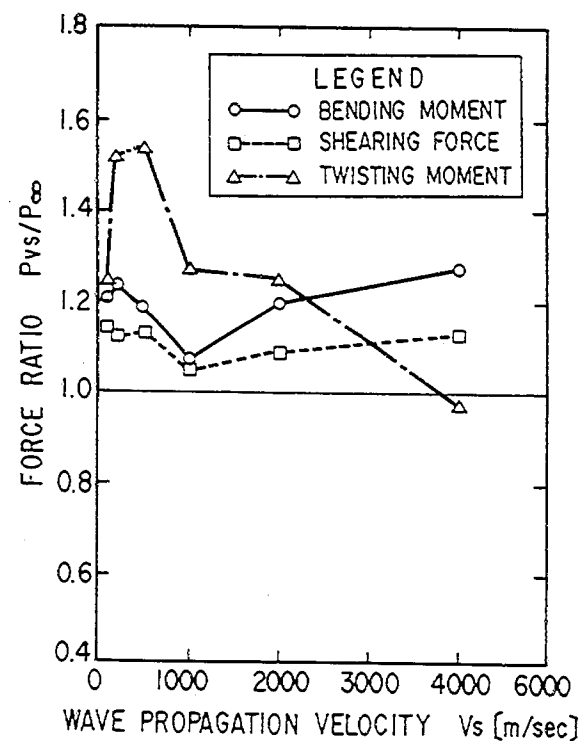
表 3.7 塔基部最大断面力と地震波の伝播速度の関係
(名港西大橋橋軸直角方向加振)

加振方向	断面力 入力地震波 伝播速度 (m/s)	曲げモーメント [tf・m]			せん断力 [tf]			ねじりモーメント [tf・m]		
		開北橋	板島橋	津軽大橋	開北橋	板島橋	津軽大橋	開北橋	板島橋	津軽大橋
橋 軸 直 角 方 向	100	38,698 (0.82)	150,030 (0.69)	133,280 (0.86)	1,162 (0.67)	4,843 (0.76)	2,811 (0.92)	657 (1.04)	1,537 (1.06)	2,394 (0.69)
	200	40,690 (0.87)	158,760 (0.73)	130,310 (0.84)	1,529 (0.88)	5,062 (0.79)	3,080 (1.01)	463 (0.73)	1,838 (1.27)	2,190 (0.63)
	500	37,404 (0.80)	188,630 (0.87)	159,520 (1.03)	1,414 (0.81)	5,289 (0.82)	3,970 (1.30)	464 (0.74)	1,544 (1.07)	2,664 (0.77)
	1,000	35,859 (0.76)	125,650 (0.58)	209,820 (1.35)	1,509 (0.87)	4,893 (0.76)	3,887 (1.28)	564 (0.90)	1,912 (1.32)	2,735 (0.79)
	2,000	44,746 (0.95)	236,600 (1.09)	144,670 (0.93)	1,405 (0.81)	7,564 (1.18)	2,835 (0.93)	713 (1.13)	1,934 (1.34)	2,682 (0.78)
	4,000	37,388 (0.80)	119,420 (0.55)	158,430 (1.02)	1,543 (0.89)	4,099 (0.64)	3,145 (1.03)	635 (1.01)	1,895 (1.31)	3,229 (0.93)
	同位相入力	46,961 (1.00)	216,990 (1.00)	155,140 (1.00)	1,743 (1.00)	6,412 (1.00)	3,046 (1.00)	630 (1.00)	1,447 (1.00)	3,459 (1.00)

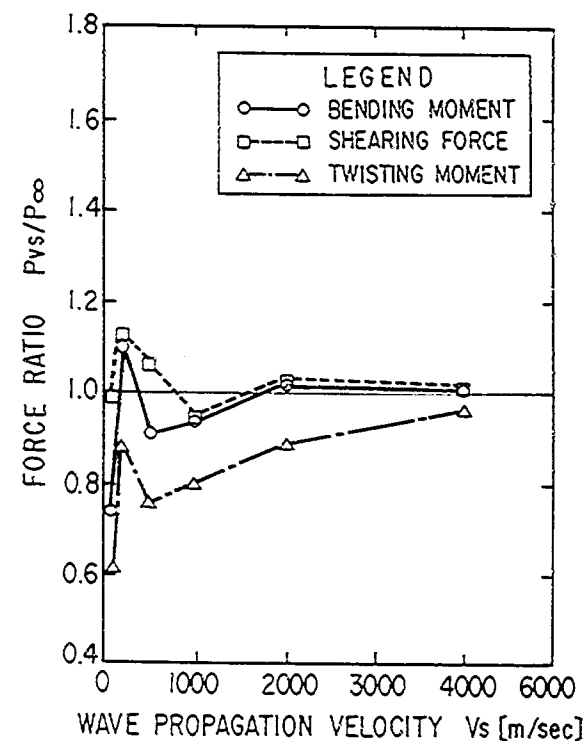
注) ()内の数値は、同位相入力に対する比を示す。



(a) 開北橋記録

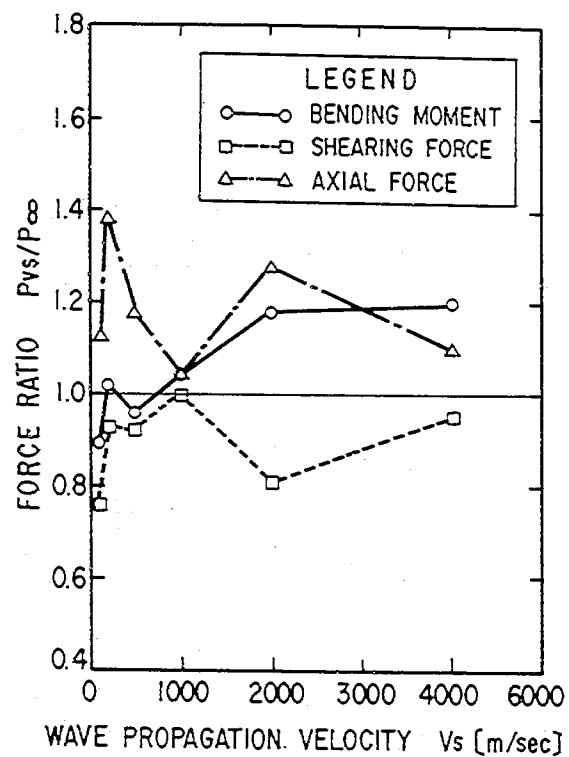


(b) 板島橋記録

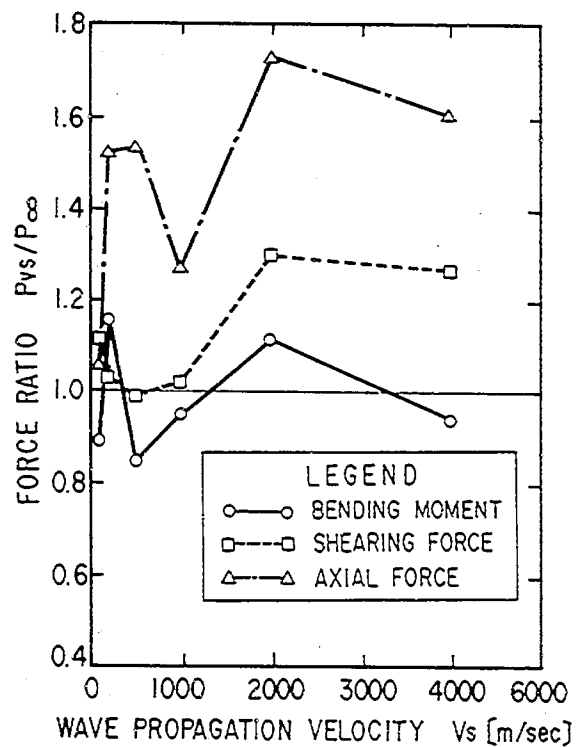


(c) 津軽大橋記録

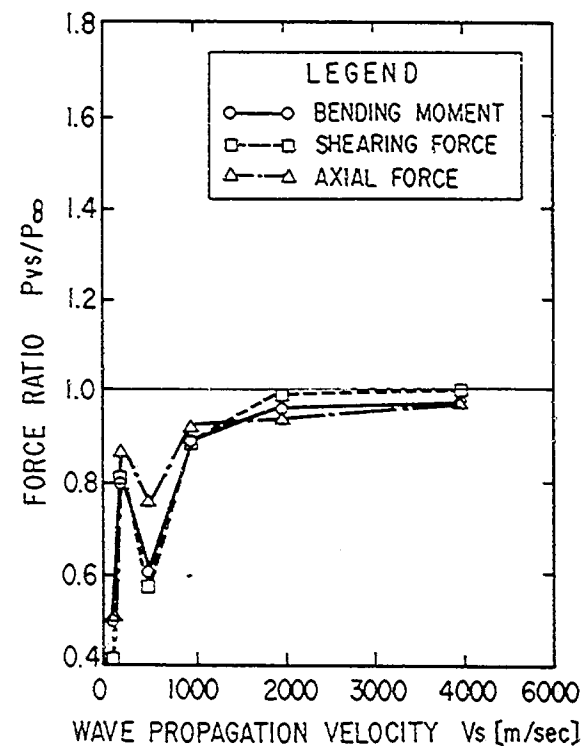
図 3.13 橋脚基部の最大断面力比と地震波の伝播速度の関係
(幸魂橋橋軸直角方向加振)



(a) 開北橋記録

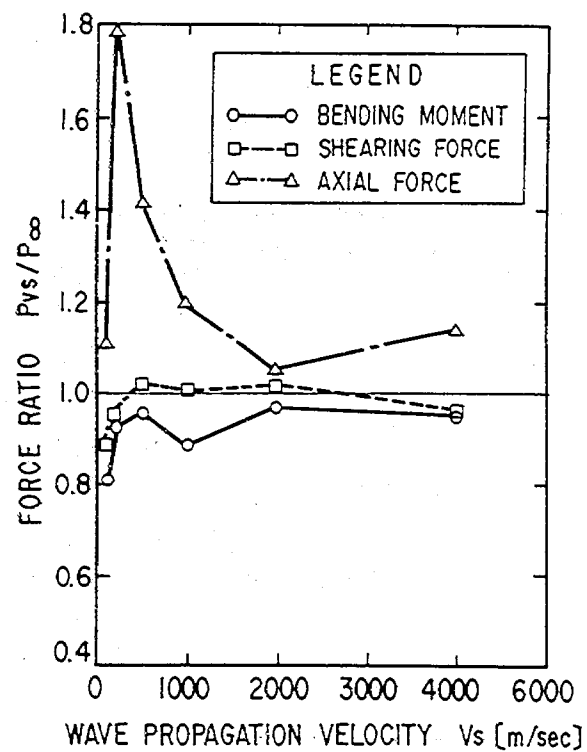


(b) 板島橋記録

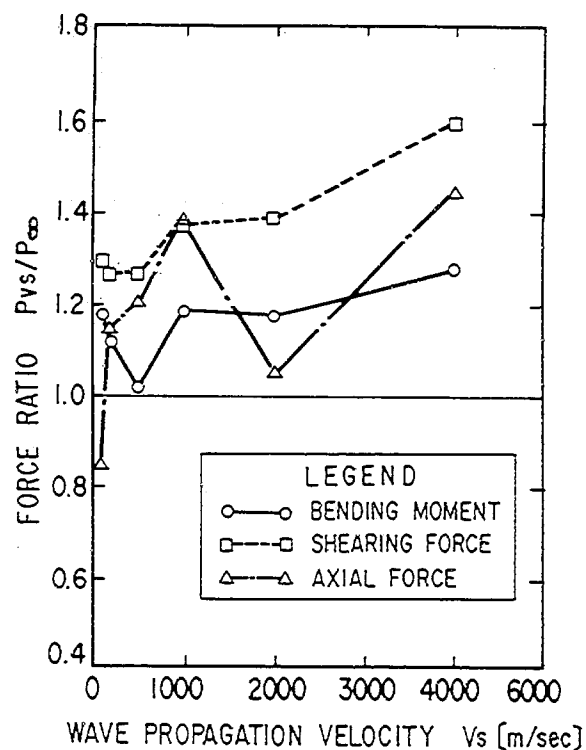


(c) 津軽大橋記録

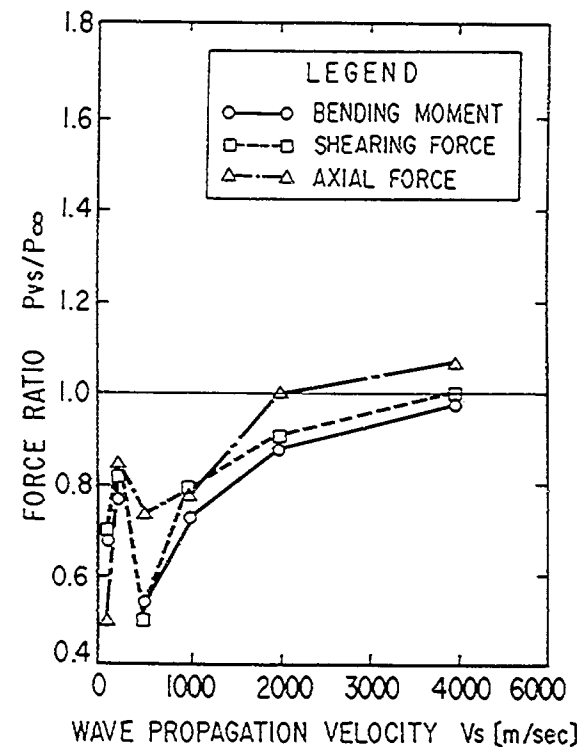
図 3.14 塔基部の最大断面力比と地震波の伝播速度の関係
(名港西大橋橋軸直角方向加振, 塔~桁弾性固定)



(a) 開北橋記録

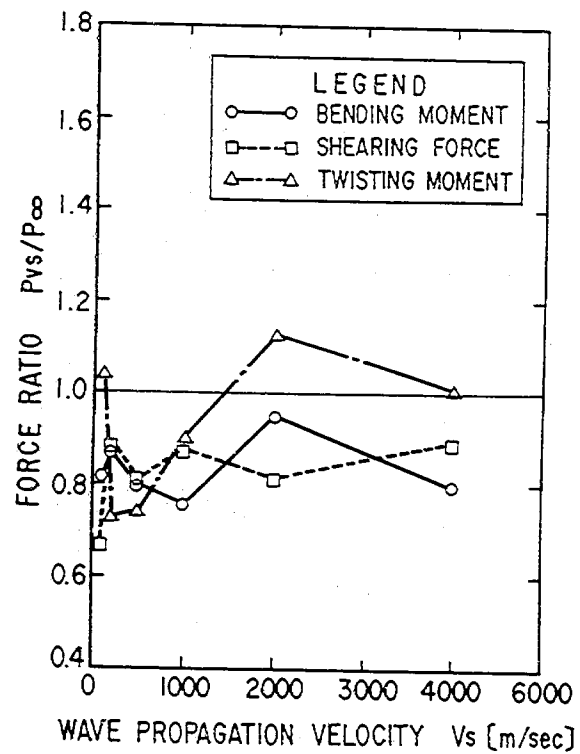


(b) 板島橋記録

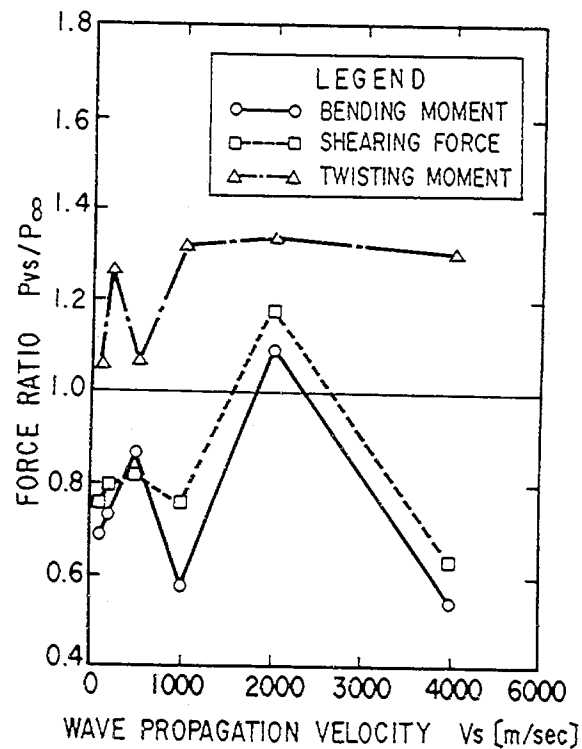


(c) 津軽大橋記録

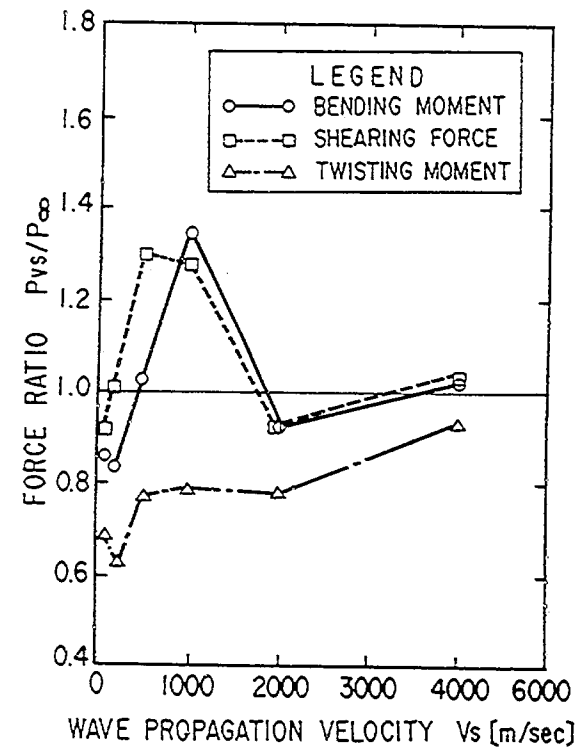
図 3.15 塔基部の最大断面力比と地震波の伝播速度の関係
(名港西大橋橋軸直角方向加振, 塔～桁弾性固定)



(a) 開北橋記録



(b) 板島橋記録



(c) 津軽大橋記録

図 3.16 塔基部の最大断面力比と地震波の伝播速度の関係
(名港西大橋橋軸直角方向加振)

4. 結 論

地震動の箇所別の違いが斜張橋の地震応答に及ぼす影響を、地震動自体は同一であるが、入力位相差があると仮定することによって表現してその傾向と程度を把握するために試算により検討したものである。

本検討結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 地震動の伝播速度の変化に対する応答値の変化は、入力地震動によって大きく異なり、一定の傾向は示さない。これは、入力位相差の影響と解析モデルの固有振動特性とが複雑に影響し合うためと考えられる。
- (2) 解析に考慮した3種類の地震動のうち、比較的長周期に卓越成分を有する津軽大橋記録を入力した場合には、伝播速度が 2000 m/sec 以上と同位相入力の場合とはほぼ等しい結果を与えるが、短周期の卓越する開北橋記録及び板島橋記録を入力した場合には、伝播速度が少なくとも 4000 m/sec まででは、同位相入力の場合とに等しくなる傾向は見られない。
- (3) 斜張橋の耐震設計上重要となる塔基部の曲げモーメントに着目した場合、入力位相差を考慮した場合には最大で約3割程度大きな値となる場合がある。
- (4) 実構造物を考えた場合、地盤条件、地形条件が各基礎で異なり、地震動の作用が異なることは明らかであり、また、その時の応答値は、同位相入力よりも大きくなる場合もあることから、地震動の箇所別の違いがどのように生じ、また、設計にどう反映していくかについて今後検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 大久保忠良, 荒川直士, 川島一彦: 地震動の箇所別の違いが構造物の地震応答に及ぼす影響, 土木技術資料 24-10, 1982
- 2) 小坪清真, 原田譲二: 各支点に異なる地震波をうける橋梁の応答解析, 土木学会論文報告集第175号, 1970
- 3) 土岐憲三, 今村 聡: 進行地震波動による連続高架橋の応答解析, 第16回土木学会地震工学研究発表会, 1981
- 4) 山田善一, 竹宮宏和, 河野健二: 多スパン連続高架橋のランダム地震応答解析, ー入力位相効果についてー, 第16回土木学会地震工学研究発表会, 1981
- 5) 吉原 進, 河野健二: 入力位相差を考慮した構造物の地震応答解析, 第6回日本地震工学シンポジウム, 1982
- 6) 栗林栄一, 川島一彦, 柴田松雄: 沈埋トンネルの軸線上の断面力及び変位の地震応答解析法に関する研究, 土木研究所資料第1193号, 昭和52年3月
- 7) 建設省関東地方建設局北首都国道工事事務所, (財)国土開発技術研究センター: 幸魂橋設計施工技術検討報告書, 昭和60年3月
- 8) 日本道路公団名古屋建設局: 名港西大橋工事誌, 昭和61年3月
- 9) 川島一彦, 邇上茂樹, 吾田洋一: 斜張橋の耐震性に関する研究, ー(その2)地震応答に及ぼす減衰定数の影響ー, 土木研究所資料第2489号, 昭和62年3月

斜張橋の耐震性に関する研究
—(その3)斜張橋の地震応答に及ぼす
入力位相差の影響—

ISSN 0386-5878
土研資料第2630号
昭和63年4月(1988)
川島一彦・運上茂樹
吾田洋一

要 旨

近年、大規模特殊事業関連の道路において長大スパンの斜張橋が採用される事例が急増している。これは、斜張橋が軟質な地盤上に建設される中長大橋として構造的に適しているとともに橋梁技術の進歩に伴ない長大スパン化が可能となったためである。しかしながら、斜張橋に対しては従来震害経験がなく、また、振動実験、強震観測等による動的特性の把握も十分でないのが実情であり、早急に斜張橋の動的特性を取り入れた耐震設計法の開発が必要とされている。

本報告は、斜張橋の地震応答特性の調査を目的とし、地震動の箇所別の違いを、地震動自体は箇所ごとに同一であるが、入力位相差があると仮定することによって表現し、その影響の傾向と程度を把握するために試算により検討した結果をとりまとめたものである。

キーワード：斜張橋，耐震設計，地震応答特性，入力位相差

郵便はがき

四十円切手
をはいて
さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

耐震研究室 御中

No. 103

No. 103

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第 2630 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名

印