

I-9 入江プロムナード橋の

風洞試験について

室蘭市役所

田 中 利 彦

室蘭市役所

正員 能 町 淨 彦

北海道開発コンサルタント㈱

正員 勝 俣 征 也

北海道開発コンサルタント㈱

正員 外 山 義 春

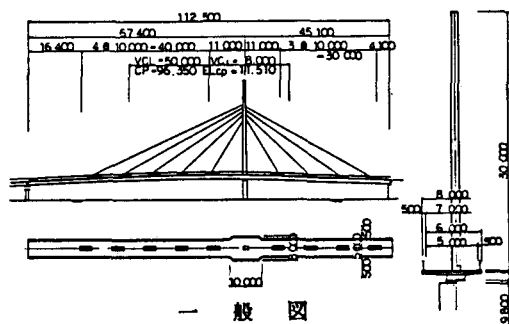
三井造船㈱

正員 池ノ内 昌 弘

1 概 論

1-1 ま え が き

室蘭市入江プロムナードは、一部埋立等により商業・業務地域として再開発された入江地区と鉄道によって分断されている既成市街地とを連絡し、歩行者通行線を確保して、街の活性化を計る目的で計画された歩行者専用道である。本報告書は、この鉄道を跨ぐ橋梁として計画された下記一般図に示す2径間連続斜張橋に関する「風洞試験」について報告する。



一 般 図

1-2 振動概要と試験目的

充腹形式の主桁断面を有する斜張橋は、過去の実例より空力的振動現象が発生する可能性をもっている。ただし本橋規模の橋梁における高風速域での破壊的・発散的振動については、比較的問題が少なく、低風速域で発生する限定振動（強制振動）が歩行者に不安感を与えることが予想される。空力作用と振動応答は一般にTable 1, 2のように分類されている。

即ち、高風速域での発散的振動の防止と、低風速域での限定振動を解消し、耐風安定性にすぐれた最適断面の選定を行なうことを目的とする。

なお、実施に際しては、架橋位置は幸いなことに、

室蘭地方気象台に非常に近いので気象資料の検討を行ない基本風速 (V_{10}) 及び降雪深 (H) を考慮した試験を実施した。

1-3 気象資料の検討

1-3-1 基本風速 (V_{10})

室蘭地方気象台観測による32年間 (1952年～1983年) のデーターにより、年最大風速値の統計を切断することなしにGringolten及びHazen の法則によりGumbelの最小二乗法により求めた。

結果は、100年間の再現期待値は、 $V = 36.75\text{m/s}$ となる。風速の鉛直分布補正は、べき法則によるものとし、指数 $\alpha = 1/3.5$ と仮定した。なお、測器の高さ (Z) は、観測期間に4回の変更があったためデーター数を重みとした平均値を求め $Z = 10.6\text{m}$ とした。よって $V_{10} = 36.2\text{m/s}$ となる。また設計風速 V_D は水平長さによる補正を行ない $V_D = 44\text{m/s}$ である。

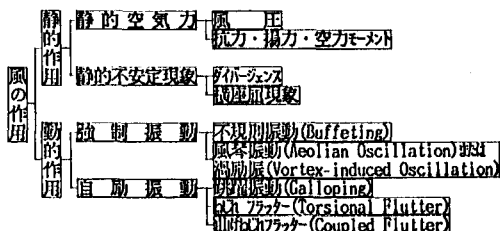


Table-1

振 動	モード	振 動 数	振 動
不規則振動	水平方向の振動 鉛直方向の振動 (はね振動)	不規則な2次元構造物の固有振動数は風速変動の rms 値の最大値付近の振動数に連続する。	不規則に変化し、初有効振動数1 風速の自乗に比例して増加する。
風琴振動	風向直角方向の振動 (はね振動)	構造物の固有振動数と一致する。	有間隔で共振風速をばらばらに消滅させる。
渦励振動	風向直角方向の振動	構造物の固有振動数と一致する。	有間隔で共振の大きさは、風速に比例する。
はねフラッター	はね振動	構造物の固有振動数に連続する。	急激に発達するため、風速に比例して増加する。
曲げはねフラッター	曲げはねの連成振動	構造物の固有振動数と連続する。	急激に増加する。

Table-2

1-3-2 積雪モデルの想定

降雪状態では、橋梁構造の断面形状を変化させるため耐風安定性を一般に劣化させるものと予想される。よって本試験では排雪、ロードヒーティング計画等を考慮して積雪深ではなく日最大降雪深 (H_{24}) の状態と、この日に起る最大風速の関係を試験モデルのひな型として選び試験した。

基礎資料は、3・1同様室蘭地方気象台観測値より、下記の日における24時間内における降雪深 (H_{24})、及び日最大風速 (V_{24}) を調査した。堆雪形状は実際にはかたよりが生ずるものと考えられるがここでは考慮せず対称形状とし以下の2 ケースを試験のモデルとした。

1) 降雪深の日最大値の順位が1～5位 (年間) までの日

2) 北電の電線着雪現象の起った日

3) 12月～3月 (各年) で年最大風速を示した日

モデル	日最大風速 V_{24}	日降雪深 H_{24}	雪の単位重量 γ
1	8.2m/s	46cm	0.116g/cm ³
2	18.2m/s	22cm	0.298g/cm ³

1-4 風洞試験項目と風洞試験フロー

試験は、二次元剛体部分模型を用いて、「2自由度ばね支持試験」、「三分力試験」を行なった。

試験の対象とした実橋基本断面は (Fig-1) に示すMODEL-A, B, C の3 TYPEである。MODEL-B, C は、MODEL-A にフェアリングを取りつけたものである。

添加物としては1) 高欄、2) フラワーボット、3) 鉄道用防護板 (高欄に板を取りつける。)、4) 降雪 $H=22$ cm、5) 降雪 $H=46$ cmである。基本断面と添加物の組合せを行ない最適断面を決定する試験計画フローは (Fig-2) に示す通りである。

なお、試験は、下記要領に準じて行なった。

「本州四国連絡橋 風洞試験要領・同解説」(S55)
「耐風設計基準・同解説」(S51)

1-5 耐風安定性の判定基準

1-5-1 自励振動の設計限界風速 V_{cr}

無降雪時における限界風速 V_{cr} は、「試験要領」にもとづき、設計風速 V_D の1.2倍とした。よって本橋の場合は、 $V_{cr} = V_D \times 1.2 = 52$ m/sとなる。

降雪時については、降雪深 $H=22$ cm、 $H=46$ cmに

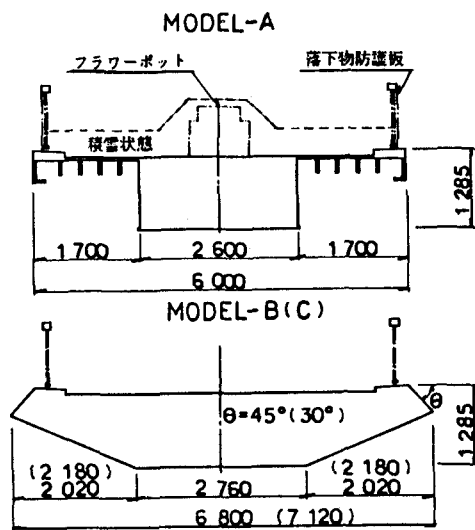


Fig-1

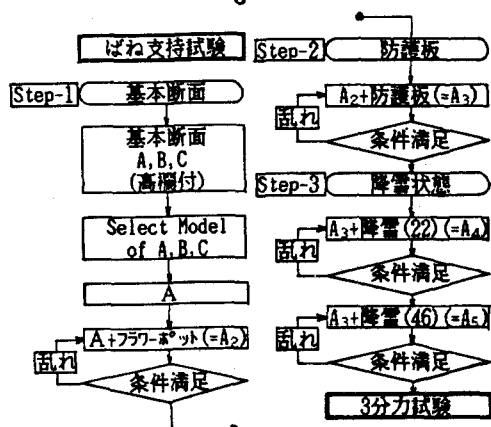


Fig-2

対しての基本風速を参考値としてそれぞれ18.2m/s、8.2m/sとし、限界風速を $V_{crH=22}=26$ m/s、 $V_{crH=46}=12$ m/sとした。

1-5-2 限定振動に対する判定

本橋のような箱桁断面の場合、 $0^\circ \sim \pm 7^\circ$ の迎角に対して振動が全く発生しないようにすることは、困難と考えられる。限定振動に対しては、1) 通行者の恕限度、2) 疲労破壊の可能性の両面から安定性の評価を行なうのが一般的である。

本橋の場合は、恕限度の観点から許容加速度を0.125Gとし、たわみ振動の場合の判定に用いることとした。ねじり振動については、共振風速域がかなり高風速となることが予想されるため、とくに問題はないとする。

MODEL	特 徴
A	基本型 (無図)
B	基本型にフェアレングを取り付けた状態
C	MODEL-Bにフェアレングを取り付けた状態
AF	MODEL-Aにフェアレングを取り付けた状態
AFP	MODEL-Aにフェアレングを取り付けた状態
AF22	MODEL-Aにフェアレングを取り付けた状態
AF46	MODEL-Aにフェアレングを取り付けた状態
AFPI	MODEL-Aにフェアレングを取り付けた状態
AFPI22	MODEL-Aにフェアレングを取り付けた状態
AFPI46	MODEL-Aにフェアレングを取り付けた状態

Table-3

MODEL	A, AF, AFP, AFPI	AF22, AFPI22	AF46, AFPI46	B	C	試験範囲
縮尺	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/100 以上
模型寸法×模型高 (B)	0.3333m × 0.0714m	0.3333m × 0.0715m	0.3333m × 0.0909m	0.3777m × 0.0714m	0.3956m × 0.0714m	
模型高 (B)	0.3333m	0.3333m	0.3333m	0.3777m	0.3956m	
模型高/模型幅	4.78	4.78	4.21	4.21	4.02	2.0 以下
模型高/有効測定部高	0.111	0.111	0.126	0.126	0.132	0.4 以下
流速率	2.9 ~ 3.2 %	3.0 ~ 3.3 %	3.4 ~ 3.6 %	2.9 %	2.9 %	5 % 以下
代表値 (B) 注			0.3333m			

Table-4

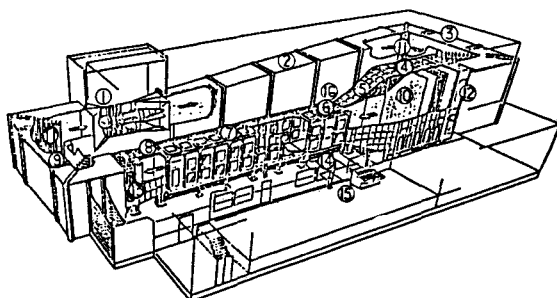
2 試験方法

2-1 風洞試験模型

本試験に用いた模型は、縮尺 1/18 の二次元剛体模型で MODEL-A を 1 体製作した。MODEL-B, C は A にフェアレングを取り付けることにより整形した。

付属物はすべて着脱可能な構造とし、(Table-3) に示した 10 個の MODEL を作製した。

模型の主要諸元を (Table-4) に示す。



- ① 送風機
- ② 第1屈折翼
- ③ 第1回流翼
- ④ 集気筒
- ⑤ 縮流翼
- ⑥ 測定翼 (可動カート)
- ⑦ 測定翼 (固定)
- ⑧ 第2回流翼
- ⑨ 第2回流翼
- ⑩ 鼓風格子、スクリーン
- ⑪ コーナーベーン
- ⑫ 鼓風機
- ⑬ 吸込管
- ⑭ 昇降装置
- ⑮ 計測室
- ⑯ 変動風発生装置 (着脱可)

Fig-3

2-2 使用風洞装置

- 1) 名 称 ; 三井造船 K.K 構造物用低風速風洞
- 2) 形 状 ; 水平回流閉鎖型
- 3) 測定部付法 ; $H=3.0m$, $B=2.0m$, $L=20.0m$
- 4) 性 能 ; 風速範囲 0.3 ~ 20m/s
風速分布 $\pm 0.2\%$ 以下
乱れ強さ 0.1% 以下
静圧勾配 1.9% 以下

風洞装置の概観図を (Fig-3) に示す。

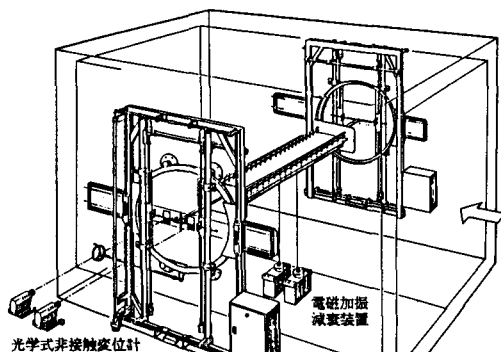


Fig-4

2-3 ばね支持試験

2-3-1 試験装置

ばね支持試験に用いた試験装置の概要を (Fig-4) に示す。本装置は模型を風路内に置き、風路側壁外から支持棒を介して上・下 4 本・左右合計 8 本のコイルバネで吊り、模型が自由に、たわみ・ねじれの 2 自由度で振動できるようにしたものである。コイルバネ固定部は全方向に移動でき、模型の取り付け高さ、ねじれ剛性などが、調整可能となっている。

模型の迎角については、本装置全体を模型といふように橋軸まわりに回転させることにより与えた。模型の加振および、所要減衰力の付加には、模型とはピアノ線を介して接続され風路外に設置された電磁加振減衰装置を用いた。

項目	実 測	模型目録値	実測値	実 測	模型目録値	実測値	実 測	模型目録値	実測値
縮尺		1/18			1/18			1/18	
質量 (kg/m)	3.992×10^{-3}	12.32	12.26	4.126×10^{-3}	12.73	12.74	4.126×10^{-3}	12.73	12.78
固有特性 (Hz)	1.313×10^{-2}	1.251×10^{-2}	1.250×10^{-2}	1.335×10^{-2}	1.329×10^{-2}	1.329×10^{-2}	1.335×10^{-2}	1.329×10^{-2}	1.335×10^{-2}
減衰係 (H _z)	0.82		0.73	0.849		0.89	0.849		0.89
振動数比	3.494		3.49	3.49		3.49	3.49		3.49
減衰係率	4.1		4.0	4.0		4.0	4.0		4.0
対数減衰率			10.2			10.2			10.2
対数減衰率		0.02	0.020		0.02	0.020		0.02	0.020
対数減衰率		0.02	0.020		0.02	0.019		0.02	0.020

Table-5.1

項目	実 橋	模型目標値	実 験 値	実 橋	模型目標値	実 験 値	実 橋	模型目標値	実 験 値	実 橋	模型目標値	実 験 値
AF, APP, APPL	AF, APP, APPL	AF, APP, APPL	AF	APP	APPL	AF, APP, APPL	AF, APP, APPL	AF, APP, APPL	AF, APP, APPL	AF, APP, APPL	AF, APP, APPL	AF, APP, APPL
1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18
質量 (kg/m)	3.82×10^3	12.32	12.32	12.32	12.32	12.32	4.354×10^3	13.47	13.46	4.285×10^3	13.26	13.19
振動モード (Hz)	1.313×10^{-2}	1.251×10^{-2}	1.249×10^{-2}	1.251×10^{-2}	1.251×10^{-2}	1.251×10^{-2}	1.330×10^{-2}	1.267×10^{-2}	1.262×10^{-2}	1.328×10^{-2}	1.265×10^{-2}	1.266×10^{-2}
振動数 (Hz)	0.852	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	0.827	2.61	2.61	0.833	2.64	2.64
振動数比	4.1	5.16	5.16	5.16	5.16	5.16	3.471	6.13	6.13	3.474	6.12	6.12
減衰率	4.2	5.69	5.69	5.69	5.69	5.69	4.2	5.69	5.69	4.2	5.69	5.69
対数減衰率	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Table-5,2

2-3・2 試験条件

模型は、幾何学的相似のほか以下に無次元量を実橋のデータに関する値と相似させる必要がある。

- 1) 慣性パラメータ $\theta / \rho B^4$, $M \eta / \rho B^2$
- 2) 風速パラメータ $V / N \theta B$, $V / N \eta B$
- 3) 構造減衰率 $\delta \theta$, $\delta \eta$

ここで、

θ ; 極慣性モーメント, $N \theta$; ねじれ振動数
 $M \eta$; 質 量, $N \eta$; たわみ振動数
 B ; 代 表 幅, ρ ; 空気密度
 V ; 風 速

実橋、模型目標値、実験値を試験実施MODEL についで (Table-5) に示す。なお、1) 対象試験モードは、通常不安定振動の発生風速が低次モードほど低いことから一次モードとした。2) 実橋の振動数比は4.1で、模型試験でこの値を維持することは難しいものとなる。よって実橋では、たわみとねじれの連成振動の発生は、希れである点を考慮して2.2~2.4程度とした。3) 2) と関連して風速倍率もたわみ、ねじれにおいて異なる。4) 試験風速ピッチは、安定風速域では、実風換算で4~5m/s、不安定風速域では1~2m/sピッチとして計測精度を高めた。

2-3・3 計測及びデータ整理

ばね支持試験装置を用いて自由振動法により風路の中での模型の振動応答を計測し、振幅、振動数、減衰率を求めた。計測データは、ペン書きレコーダによるモニター記録とともにデータレコーダに収録した。データの処理結果は、風速-振幅図、風速-迎角図を作成し、耐風安定性の評価に供した。

2-4 三分力試験

2-4・1 試験装置

模型、風洞は、ばね支持試験と同じものを用い、

三分力をストラット型六分力天秤により測定した。

2-4・2 試験条件、計測及びデータ整理

試験MODEL はAPP, APPLの2つとした。基本風洞風速は、10m/s、15m/sの2ケースで実施し、下記の三分力を迎角 $-15^\circ \sim +15^\circ$ まで 1° 毎に計測した。揚力係数 $C_L = P_L / 1/2 \rho V^2 B$
 抗力係数 $C_D = P_D / 1/2 \rho V^2 A_n$
 モーメント係数 $C_M = M / 1/2 \rho V^2 A_n B$
 ここで P_L 、 P_D 、 M 、 A_n は、それぞれ単位長さ当りの揚力、抗力、ピッチングモーメント、投影面積である。

結果は、各係数と迎角の関係で図示した。

3 結 果

3-1 ばね支持試験

試験結果を各断面毎に風速(V)、たわみ(η)、ねじれ(θ)とを図として表した。その一部を (Fig-5~12) に示す。V- η, θ 図の迎角の違いは、記号によって区別してある。V- η 図縦軸は、たわみ無次元片振幅(η/B)及び実橋換算片振幅(η_p)で示し、横軸は風洞風速(Vm)、実橋換算風速(Vp)

ばね支持試験結果一覧表			
MODEL	自由振動	固定振動	備考 (実施迎角)
A	安定	$\alpha=+3^\circ V=10 \sim 14 \text{ m/s}$ $\eta_{\max}=20 \text{ mm} < \eta_a$	$\eta_a=0.125G=43 \text{ mm}$ (0, ± 3)
B	$\alpha=+3^\circ V=54.3 \text{ m}$ $> V_{cr}$	$\alpha=+3^\circ V=10 \sim 15 \text{ m/s}$ $\eta_{\max}=73 \text{ mm} > \eta_a$ No good	$\eta_a=43 \text{ mm}$ $V_{cr}=52 \text{ m/s}$
C	$\alpha=+3^\circ V=53.4 \text{ m}$ $\alpha=+5^\circ V=57.1 \text{ m}$ $> V_{cr}$	$\alpha=0^\circ V=12 \text{ m/s}$ $\eta_{\max}=15 \text{ mm} < \eta_a$ $\alpha=+3^\circ V=11 \sim 16 \text{ m/s}$ $\eta_{\max}=73 \text{ mm} > \eta_a$ No good	(0, ± 3) $\eta_a=43 \text{ mm}$ $V_{cr}=52 \text{ m/s}$
AF	安定	$\alpha=+5^\circ V=10 \sim 14 \text{ m/s}$ $\eta_{\max}=43 = \eta_a$	(0, $\pm 3, \pm 5$)
APP	安定	$\alpha=+5^\circ V=10 \sim 13 \text{ m/s}$ $\eta_{\max}=17 \text{ mm} < \eta_a$	$\eta_a=43 \text{ mm}$ (0, $\pm 3, \pm 5$)
APPL	安定	安定	(0, $\pm 3, \pm 5$)
AP22	安定	安定	(0, $\pm 3, \pm 5$)
AP46	安定	$\alpha=-3^\circ V=9 \text{ m/s}$ 付近 $\eta_{\max}=10 \text{ mm} < \eta_a$	$\eta_a=43 \text{ mm}$ (0, ± 3)
APPL	安定	安定	(0, $\pm 3, \pm 5$)
APPL22	安定	安定	(0, $\pm 3, \pm 5$)
APPL46	安定	$\alpha=0^\circ V=10 \sim 13 \text{ m/s}$ $\eta_{\max}=27 \text{ mm} < \eta_a$	$\eta_a=43 \text{ mm}$ (0, $\pm 3, \pm 5$)

Table-6

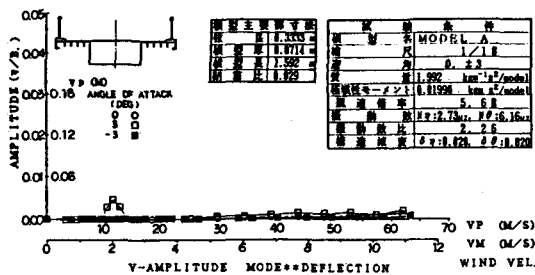


Fig-5

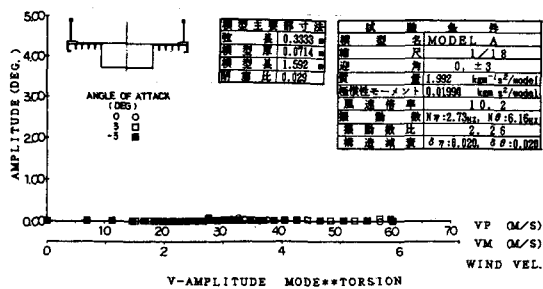


Fig-6

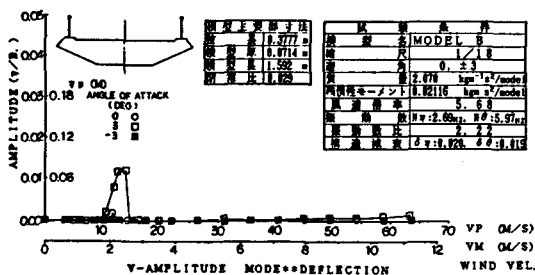


Fig-7

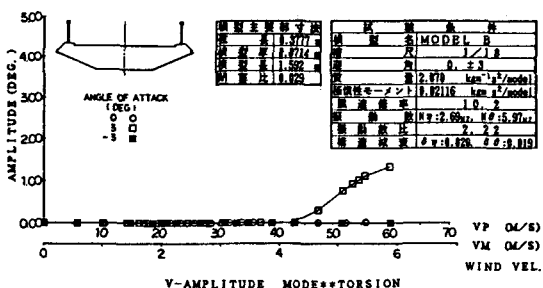


Fig-8

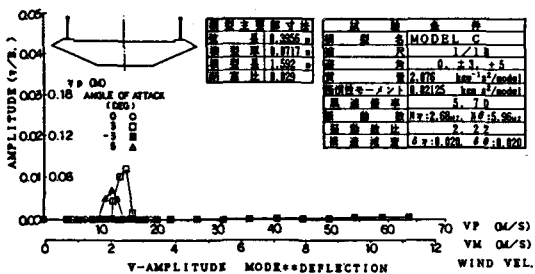


Fig-9

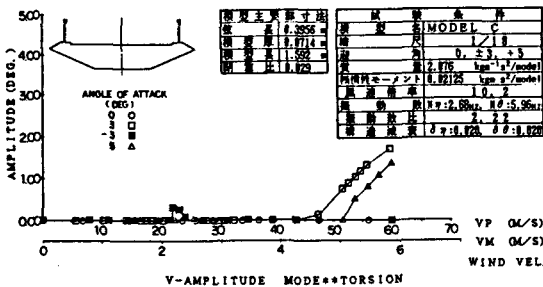


Fig-10

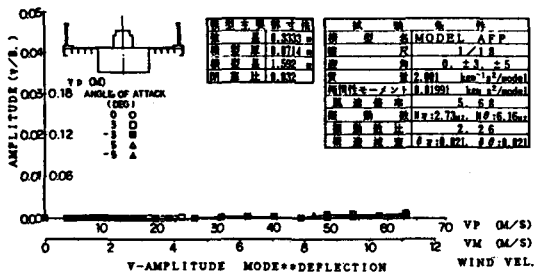


Fig-11

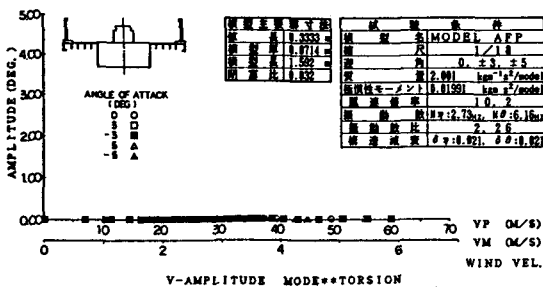


Fig-12

を示す。また、 $V-\theta$ 図縦軸は、ねじれ片振幅(θ)を示し、横軸は $V-\eta$ 図に同様である。

(Table-6) に各断面毎の試験結果を一覧表として示す。

3-2 三分力試験結果

MODEL-AFP, AFPLの2 MODEL に対し、風速 $V=10$, 15m/s の2ケース実施したが、風速による差は、ほとんど生じなかった。MODEL-AFPLの $V=10$, 15m/s の3分力係数-迎角図を (Fig-13) に示す。

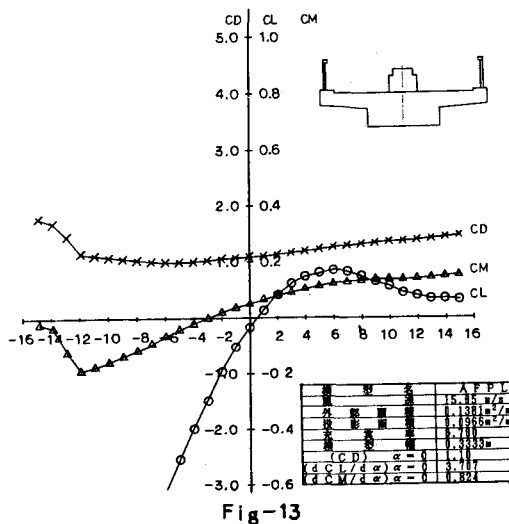


Fig-13

4 結 論

入江プロムナード橋の2径間連続斜張橋に対する耐風安定性を検証するため実施した二次元剛体部分模型による風洞試験結果をまとめると以下の点を揚げることができる。

- 1) 基本MODEL-A, B, C において、フェアリング付のMODEL-B, C は限定振動が発生し不安定であり、基本MODEL としてAを選択する。
- 2) フラワーポット設置時 (AF) に、微少な限定振動が発生するが、安定である。
- 3) 鉄道用防護板設置時 (AFP) は、(AF) 時の限定振動が消え、安定である。
- 4) ブラケット部化粧板としての下面プレートを取りつけても安定である。(AFPL)
- 5) 降雪時の $H=22\text{cm}$ (AF22, AFPL22) においては安定である。 $H=46\text{cm}$ (AF46, AFPL46) におい

て微少な限定振動がみられるが許容値以下で、他の迎角及び、自励振動については安定である。

- 6) 三分力試験 (AFP, AFPL) より、 $\alpha=0^\circ$ 時抗力係数 C_D は、AFPLがやや小さい。
- 7) モーメント係数 C_M の、勾配の急変がない。(ダイバージェンスへの配慮)
- 8) C_D は正の値である。 C_M , C_L 曲線は、右上り勾配であり、変曲点は、対象とすべき迎角外である。(自励振動への配慮)
- 9) 以上の結果よりMODEL-A シリーズにおいて問題となる自励振動、限定振動は発生せず安定である。
なお、一般に主桁断面にはフェアリング等がある型式が耐風安定性上優れているといわれ、実施例も多い。本橋においてフェアリング無しのA-Typeが耐風性において良好であった理由としては、以下の点が推測できる。
- 1) ロードヒーティング計画があり、死荷重強度が大きく剛性が高い橋梁である。
- 2) 鉄道用防護板、高欄、フラワーポット等の付属物が橋軸方向に断続的に配置してあるので渦の混合が平均的に行われている。
- 3) 主桁形状 (箱桁) と鋼床版の張り出し量のバランスが良い。

5 あとがき

斜張橋の振動特性に関する今日の問題点を「1 概論」にて、試験目的と合せて述べたが、本橋の風洞試験を終えて、以下の点が指摘できよう。

「歩道橋のように幅員の狭い斜張橋は一般に主桁断面の幅厚比が小さい。このような主桁断面をもつ橋梁の耐風安定性を高めるための方法は、従来から行なわれているフェアリング等の設置による改善と平行して、[高欄形状、フラワーポット、すそかくし板等]の付属物による気流の乱れを利用する方法がある。」

おわりに、本試験を実施するにあたり、御協力、御指導下さいました皆様に紙上よりお礼を申し上げ「入江プロムナード橋風洞試験報告」と致します。

以 上