

横風作用下における長大橋梁上の 鉄道車両に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON RAILWAY FREIGHT CARS IN LONG-SPAN
RAILWAY BRIDGES UNDER LATERAL WIND

西岡 隆*・塩尻 弘雄**・橋本 涉一***

By Takashi NISHIOKA, Hiroo SHIOJIRI and Shyoichi HASHIMOTO

1. はじめに

本州四国連絡橋の架橋建設が進むにつれて、従来未経験のさまざまな問題が提起され、これらの問題に対処するため数多くの研究が行われてきた。とりわけ長大鉄道橋としての問題解決のための研究は、本州四国連絡橋公団を中心として、さまざまな角度から検討が行われてきている¹⁾。本研究は、これらの研究の一環として、長大橋梁上を走行する鉄道車両に横風が作用する場合の影響を、鉄道車両の走行安定性の立場から検討を加えたものである。

長大橋梁を通過するときの横風に対する鉄道車両の走行安定性については、従来陸上を走行する車両の風荷重の影響を長大橋梁に拡張して検討が行われてきた。国枝^{2),3)}は曲線通過時の遠心力または風圧力による鉄道車両の転倒に対する理論解析を行い、曲線半径、カント、走行速度、車両振動、横風の風速などと関連づけて鉄道車両の転倒に対する危険性を検討している。その後本州四国連絡架橋の検討が行われるようになり、昭和41年に発表された鉄道建設公団本四連絡鉄道吊橋技術委員会の報告⁴⁾によると、陸上の最大カント曲線部に停車した車両に対する転覆の限界風速を基準とする現行規定が、長大吊橋にも適用可能であるとしている。しかし、橋梁上の車両に対する風力が陸上部における風力と一致するとは限らないこと、車両に作用する上向き力、たとえば車体揚力や橋梁のたわみによる慣性力の影響などが未知であることなどから、陸上部における転覆の基準を吊橋上の走行車両に適用することに対する疑問が生じ、種々の検討が行われた。これらの研究成果は昭和45年の同委

員会の報告に取りまとめられている⁵⁾。その報告によれば、吊橋中にある車両の転倒限界風速は、陸上におけるより明らかに低いが、国鉄の運転規制のための基準風速に比べると十分高いことが述べられている。さらに詳細な検討を行うため、昭和45年度以来日本国有鉄道では風洞実験を行い^{6)~8)}、さまざまな条件下における吊橋補剛桁内の車両に対する空気力を求め、通常の条件では20~30 m/sの基準風速で運転制御を行えば、危険はないという結論を得ている。

本論文はこれらの成果をふまえ、横風が作用する長大橋梁上の鉄道車両の走行安定性を風洞および振動台を用いて検討した実験の結果をまとめたものである。それらのうち風洞実験では、トラス内の2軸貨車に作用する風荷重の性状を解明するため車種、風上側補剛トラスの充実率、橋床の開床度、橋幅などが空気力の静的成分、変動成分に与える影響を調べた。さらに2軸貨車が橋梁上を走行している場合、これら空気力による車両の応答と安全な走行を検討するため、傾斜した模型軌道を設置した振動台上で、横風作用時のシミュレート模型実験を行った。

2. トラス補剛桁内の鉄道車両に関する 風洞実験

風洞実験は、基本的な立場から長大橋梁のトラス補剛桁内における特殊な風速分布、およびトラス背後の乱れによって、車両にいかなる空気力が作用するかを知ることにある。ここではできるだけ一般性のある結論を得るために、トラスの形状、寸法を種々変化させ、一方車両も車種、車間等を変化させて実験した。用いた風洞は東京大学工学部航空工学科のGöttingen型風洞で、吹出口直径は1.5 m、発生最大風速は50 m/sのものである。実験は最初に車両に作用する静的な風力を3分力天秤で測定し、その結果特に顕著な特性を示したものについ

* 正会員 工博 筑波大学助教授 構造工学系

** 正会員 工修 (財)電力中央研究所土木技術研究所

*** 正会員 工博 元・東京大学大学院工学系研究科学生(現・国鉄鉄道技術研究所)

て、トラス内部の風速分布を測定した。ついで、トラス背後の乱流成分を熱線風速計により測定するとともに、車両に加わる動的空気力を燐青銅板に貼付したストレーンゲージにより測定し、両者の関係の解明に努めた。

(1) 風洞実験に用いたトラスおよび車両模型

風洞実験に用いたトラスは、本州四国連絡橋の試算設計例の1つの1/20部分模型である。トラスの主要構成要素の影響をみるように、細部は大幅に省略し、主構、対傾構、上下横構および軌道部分からなっている(写真-1参照)。風の作用する方向は橋軸直角方向とし、使用する風洞の直径1.5mの中心から80%以内の領域に入るようにトラスの寸法を決定した。できるだけ一般性をもたせるため、模型トラスは次のように形状を変化させることができる。

(i) 風を最初にする主構全体の面積に対する部材

の占める面積の比率は、15%、30%、45%と変化させることができる。以後この比率を充実率と名付けることにする。

(ii) トラス横断面の幅は2段階に変化できる。すなわち、模型のトラス幅は98.5cm、148.5cmの2種とする。主構の高さはいずれも51.0cmとする。

(iii) 橋床部は通常開床であるが、適当な大きさの板を用いて、任意の開床度を造り出すことができる。ただし、実験では開床度100%と0%の2種類とした。

一方、車両の模型は、有蓋車の代表としてワラ1型貨車、無蓋車の代表としてトラ型貨車を選び、その1/20模型とした。その概略を図-1(a)、(b)に示す。図-1からも明らかなように細部はある程度省略している。車体が単体の場合と、前後に他の車両が存在する場合とは空気流が異なり、車両に作用する空気力が変化することを考え、同じ形状の半車体のダミー模型を作製し、測

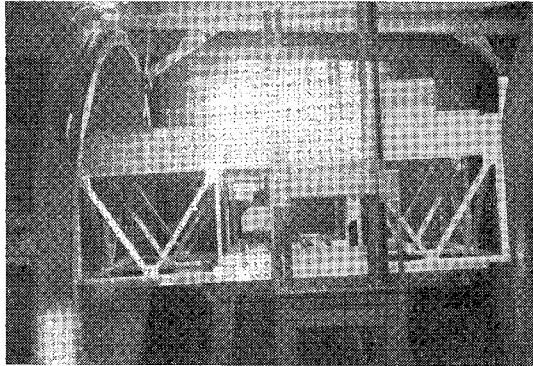


写真-1 風洞内に置かれたトラス部分模型と車両

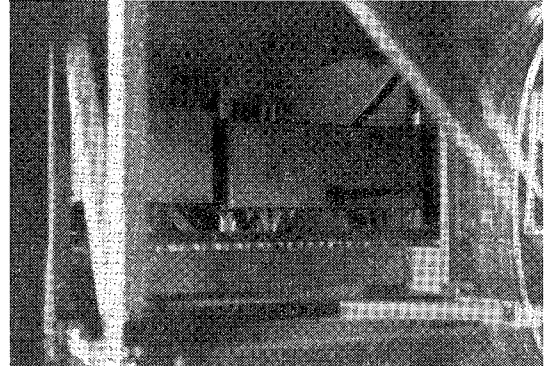


写真-2 ワラ1型模型貨車とそのダミー

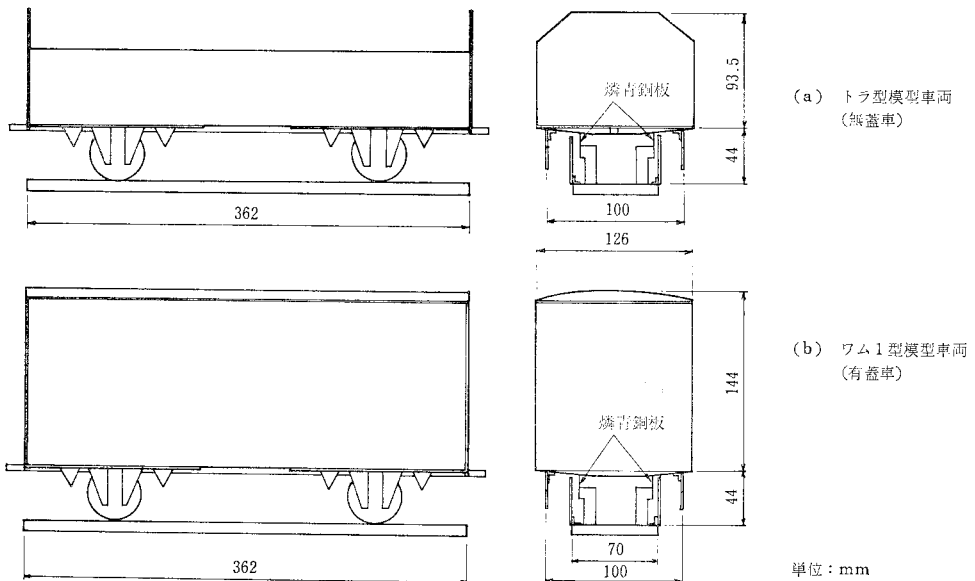


図-1 実験に用いた模型車両

定車両模型の前後に配置した(写真-2 参照)。なお、これらの車両は、いずれも角ばった形状をしていて、比較的 Reynolds 数の影響が小さくなるように工夫されている。

測定模型車両には 図-2 に示すように 3 分力天秤を取り付け、模型車両に作用する静的な空気力の 3 分力、抗力、揚力、モーメントを測定した。車体重心に生じる抗力、揚力、モーメントをそれぞれ D, L, M で表わすとすれば、これらは以下の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} D &= C_D \frac{\rho}{2} AV^2 \\ L &= C_L \frac{\rho}{2} AV^2 \\ M &= C_M \cdot h \frac{\rho}{2} AV^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 C_D, C_L, C_M はそれぞれの抗力係数、揚力係数、モーメント係数で、 ρ は空気密度、 A は車体水平方向投影面積、 V は風速、 h は車体高さを与えている。一般に車体重心と抗力、揚力から定められる風圧中心は一致しないと考えられるので、抗力、揚力によって重心回りのモーメントが作用することになる。模型はその設置場所の天井部に並列している 3 つの天秤に対して、図-2 のようにピアノ線によって取り付ける。さらに模型が風を受けて振動しないように重錘を吊り下げ、同時に水平風向き直角方向のピアノ線で引張っている。揚力は無風時と横風作用時のそれぞれ第 1 揚力天秤と第 2 揚力天秤の読みの差を加え合せた値から読み取ることができる。抗力は抗力天秤の無風時と横風作用時の読みの差に、前方斜め吊線のための補正係数をかけ、さらに吊線自体の抗力を差し引いて求めた。またモーメントは抗力と揚力の合力の基準点回りのモーメントを計算して求めている。基準点としては第 1 揚力天秤取付け位置の H_1, H_2 線上とした。このようにして求めた 3 分力のうち、揚力、抗力についてはそれぞれの値を動圧および風当り面積で除して、揚力係数、抗力係数を求めた。またモーメント係数はモーメントを動圧、風当り面積、および基準点からレール面上軌間中心線までの長さで除して

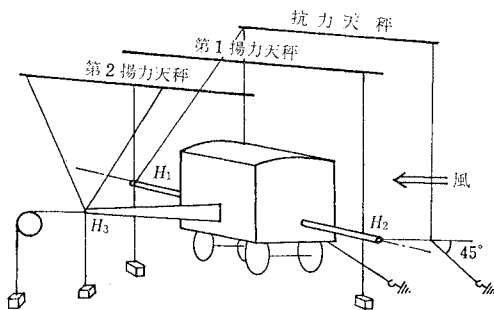


図-2 模型車両と 3 分力天秤

求めた。動圧 p は空気密度を ρ 、風速を V とすれば $p = \rho V^2 / 2$ で与えられる。ここで風速はマンメータのアルコール柱の高さをアルコール密度、水銀気圧計から求めた空気密度、測定位置を補正するための風洞係数、で補正して求めた。

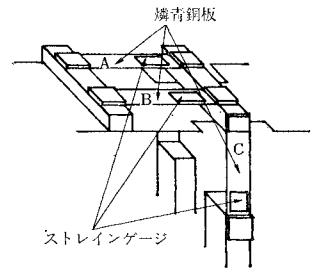


図-3 燐青銅板取付け位置 A, B, C

動的空気力は 図-3 に示すように車輪直上車体床面に取付けた燐青銅板に抵抗線ひずみ計を取り付け、その読みから測定できるように工夫されている。抵抗線ひずみ計は、燐青銅板 A, B に対してはおのおの表裏 2 枚、C については 1 枚を貼付した。2 組の車軸位置のおのおの A, B, C に貼付された 4 枚のゲージで 4 ゲージを組み、A と B の出力の和で揚力を、A と B の差でモーメントを、C で抗力を、それぞれ測定することができる。抗力、揚力、モーメントに対する感度を表-1 に示す。これによれば、モーメントを測定する A-B は多少揚力の影響を受けることがわかる。

動的空気力は模型自身の振動によって変化し、また乱流中では固有周期と一致する成分の存在により共振を起こす可能性があるため、可能な限り車体を軽く、かつ燐青銅板の剛性を高くして、車体の固有振動数を高める必要がある。測定結果によれば、有蓋車の 1 次の固有振動数は 24.3 Hz、無蓋車では 62.5 Hz を示し、有蓋車では実験中ローリングの共振現象がみられた。

(2) 静的空気力測定のための風洞実験

3 分力係数に影響を与える要因として、主構トラスの充実率、迎角(トラスおよび車両は一体と考える)、トラス幅、開床度、車両間隔、車種の 6 要因を選び、それぞれ表-2 に示す水準を考え、合計 144 通りの場合について実験を行った。無風状態で各天秤の値を読み、以後

表-1 動的空気力の測定感度

力	C	A+B	A-B
抗力	214.1 × 10 ⁻⁶ /kg	25.8 × 10 ⁻⁶ /kg	-8.2 × 10 ⁻⁶ /kg
揚力	0.6 × 10 ⁻⁶ /kg	-408.0 × 10 ⁻⁶ /kg	-30.4 × 10 ⁻⁶ /kg
モーメント	3.71 × 10 ⁻⁶ /kg	23.0 × 10 ⁻⁶ /kg	223.0 × 10 ⁻⁶ /kg

表-2 要因と水準

要因	トラス充実率 (%)	迎角 (°)	トラス幅	開床度 (%)	車両間隔 (cm)	車種
水準	15	+4	広	0	広 (12)	トラス型
	30	0				
	45	-4	狭	100	狭 (4)	ワラ型

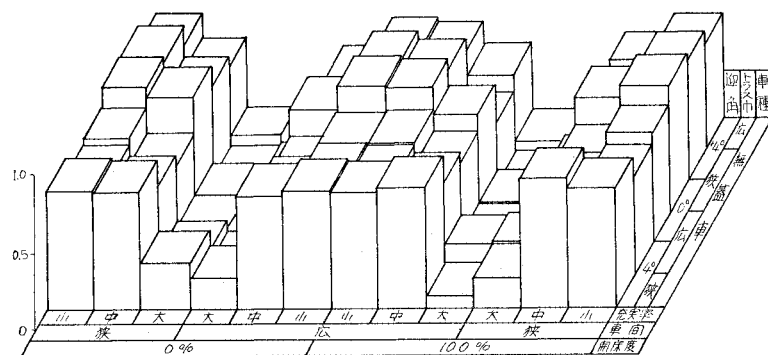
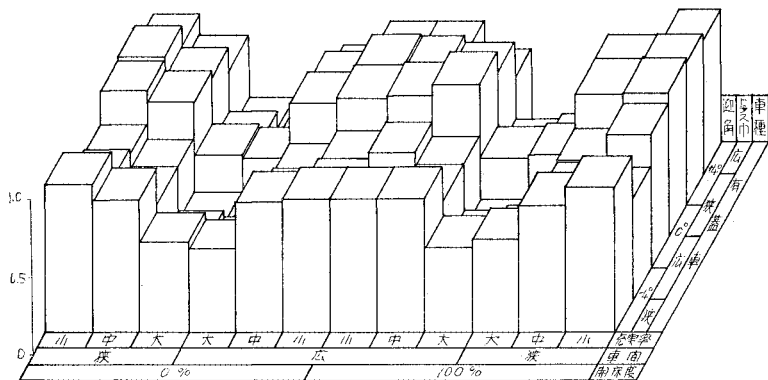


図-4 抗力係数 D の分布

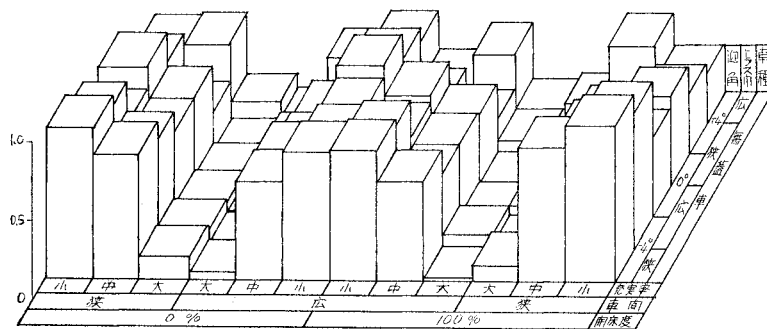
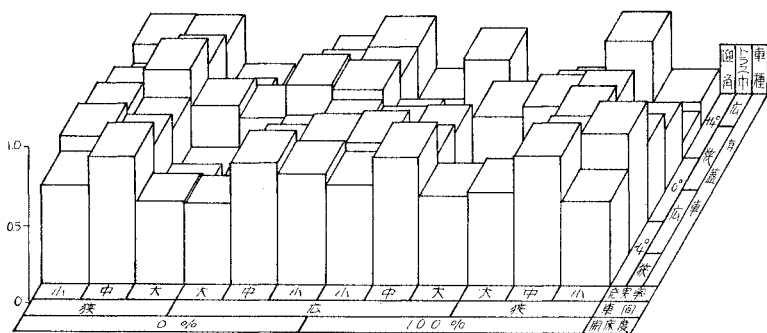
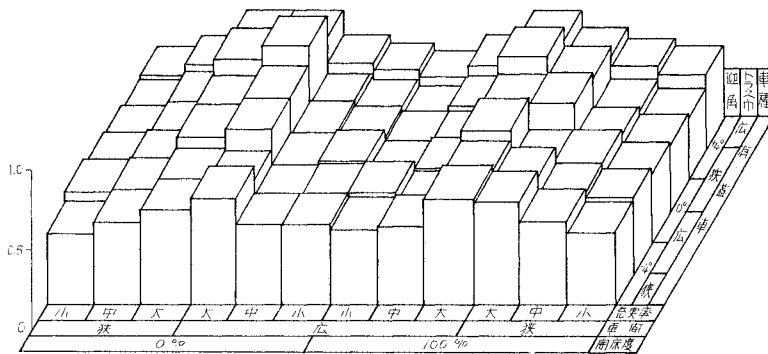


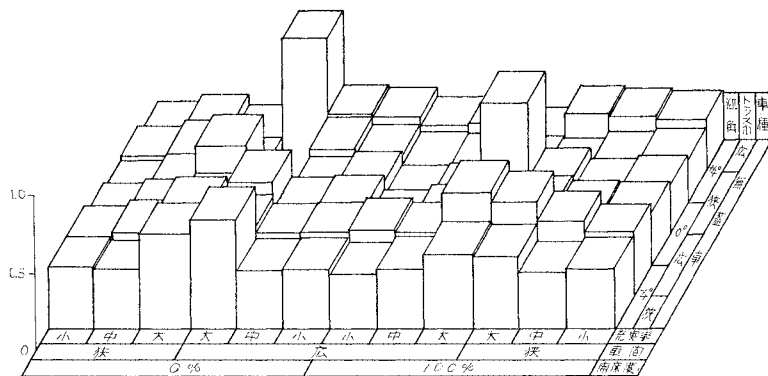
図-5 揚力係数 L の分布

20 m/s まで 順次 5 段階に 風速 を 変化 させ て Reynolds 数 による 各 係 数 の 変 化 を 測 定 し た 結 果 ， す べ て の 場 合 に つ い て 読 み 取 り 誤 差 の 範 囲 内 で 直 線 的 に 変 化 し て い る こ と が 確 か め ら れ た の で ， Reynolds 数 による 変 化 は 無 視 し 得 る も の と 判 断 し た ． し た が っ て ， 3 分 力 係 数 は 各 風 速 段 階 に お け る 5 つ の 値 か ら ， 最 小 自 乗 法 に よ っ て 求 め て い る ．

図-4 から 図-6 に 実 験 の 結 果 得 ら れ た 静 的 空 気 力 に よ る 3 分 力 係 数 を 示 す ． 図-4 から 図-6 に よ っ て ， 3 分 力 係 数 の 大 略 の 傾 向 は 読 み 取 る こ と が 可 能 な が ， 多 く の 要 因 が 交 差 し て 各 因 子 の 影 響 が 判 然 と 理 解 し に 可 ない ． そ こ で 6 つ の 要 因 を 用 い て ， 6 元 配 置 法 に よ っ て 各 因 子 の 単 一 の 影 響 お よ び 2 因 子 交 互 作 用 を 求 め た¹⁰⁾ ． 6 元 配 置 法 に よ る 計 算 結 果 を 表-3 から 表-6 に 示 し た ． 表-



(a) 有蓋車



(b) 無蓋車

図-6 モーメント係数の分布

表-3 (a) 抗力係数 (1 因子効果)

要因	水準	各水準効果	水準間分散
車種	有蓋車	0.0920	0.0169
	無蓋車	-0.0920	
迎角	0	0.0067	0.0005
	+4°	-0.0351	
	-4°	0.0284	
トラス幅	広	-0.0647	0.0084
	狭	+0.0647	
充実率	15%	0.2085	0.0392
	30%	0.1100	
	45%	-0.3185	
車間	狭	0.0242	0.0012
	広	-0.0242	
開床度	0%	0.0063	0.0001
	100%	-0.0063	

残差の分散 0.00526

表-3 (b) 揚力係数 (1 因子効果)

要因	水準	各水準効果	水準間分散
車種	有蓋車	+0.0375	0.0028
	無蓋車	-0.0375	
迎角	0	+0.0066	0.0096
	+4°	-0.1415	
	-4°	+0.1349	
トラス幅	広	-0.0114	0.0003
	狭	+0.0114	
充実率	15%	+0.1394	0.0216
	30%	+0.0996	
	45%	-0.2384	
車間	狭	0.0281	0.0015
	広	-0.0281	
開床度	0%	-0.0346	0.0024
	100%	+0.0346	

残差の分散 0.0199

表-3 (c) モーメント係数 (1 因子効果)

要因	水準	各水準効果	水準間分散
車種	有蓋車	+0.1915	0.0733
	無蓋車	-0.1915	
迎角	0	-0.0580	0.0002
	+4°	-0.2032	
	-4°	+0.2613	
トラス幅	広	-0.0291	0.0017
	狭	0.0291	
充実率	15%	0.0227	0.0013
	30%	0.0192	
	45%	-0.0419	
車間	狭	+0.0052	0.0001
	広	-0.0052	
開床度	0%	-0.0050	0.0001
	100%	+0.0050	

残差の分散 0.00243

表—4 (a) 抗力係数 (2 因子効果)

因 子	水準間分散	因 子	水準間分散
車 種×迎 角	0.000 23	迎 角×開 床 度	0.000 02
車 種×トラス幅	0.002 98	トラス幅×充 実 率	0.000 37
車 種×充 実 率	0.001 86	トラス幅×車 間	0.000 01
車 種×車 間	0.000 04	トラス幅×開 床 度	0.000 03
車 種×開 床 度	0.000 04	充 実 率×車 間	0.000 05
迎 角×トラス幅	0.000 48	充 実 率×開 床 度	0.000 02
迎 角×充 実 率	0.000 50	車 間×開 床 度	0.000 01
迎 角×車 間	0.000 07		

残差の分散 0.001 48

表—4 (b) 2 因子交互作用による因子効果

要 因	水 準	水 準 効 果	
車 種×充 実 率	有 蓋 車	充 実 率 15%	-0.034 9
		充 実 率 30%	-0.013 4
		充 実 率 45%	0.048 3
	無 蓋 車	充 実 率 15%	0.034 9
		充 実 率 30%	0.013 4
		充 実 率 45%	-0.048 3
車 種×トラス幅	有 蓋 車	トラス幅広	-0.027 3
		トラス幅狭	0.027 3
	無 蓋 車	トラス幅広	0.027 3
		トラス幅狭	-0.027 3

(表—4 (a) の分散結果から特に効果の著しい要因につき各水準効果を示したものを)

表—5 (a) 揚力係数 (2 因子効果)

因 子	水準間分散	因 子	水準間分散
車 種×迎 角	0.000 25	迎 角×開 床 度	0.000 75
車 種×トラス幅	0.000 86	トラス幅×充 実 率	0.000 81
車 種×充 実 率	0.011 16	トラス幅×車 間	0.000 02
車 種×車 間	0.000 08	トラス幅×開 床 度	0.000 63
車 種×開 床 度	0.000 53	充 実 率×車 間	0.000 39
迎 角×トラス幅	0.001 49	充 実 率×開 床 度	0.001 37
迎 角×充 実 率	0.001 15	車 間×開 床 度	0.000 03
迎 角×車 間	0.000 03		

残差の分散 0.006 36

3 (a)~(c) は 1 因子の影響を示し、表—4 から表—6 までは 2 因子交互作用のうち、特に影響の大きなもののみを示している。

表—3 (a) に示す抗力係数についてみれば、トラスの充実率、車種、トラス幅の影響が大きいがわかる。充実率については、充実率が増すほど抗力係数は低下していて、常識的な推定と一致している。車種については有蓋車の方が抗力係数が大きい。この傾向をさらに詳細に解析するために、表—4 (b) に示す抗力係数に対する 2 因子交互作用の因子効果のうち、車種×充実率の項に着目すると、有蓋車、無蓋車ともに充実率の増加につれて抗力係数が減少するものの、この傾向は有蓋車の方が小さいことがわかる。したがって、無蓋車の方がトラス内部の特殊な風速分布の影響を受けやすいことを示している。表—4 (a) の 2 因子交互作用では車種×充実率のほかに車種×トラス幅の影響が大きい。一般にトラス幅が狭くなるほど抗力係数が増加するが、特に有蓋車では

表—5 (b) 2 因子交互作用による因子効果

要 因	水 準	水 準 効 果	
車 種×充 実 率	有 蓋 車	充 実 率 15%	-0.101 88
		充 実 率 30%	-0.007 18
		充 実 率 45%	+0.109 07
	無 蓋 車	充 実 率 15%	+0.101 88
		充 実 率 30%	+0.007 18
		充 実 率 45%	-0.109 07
迎 角×トラス幅	0°	トラス幅広	-0.005 40
		トラス幅狭	+0.005 40
	+4°	トラス幅広	+0.041 02
		トラス幅狭	-0.041 02
	-4°	トラス幅広	-0.035 62
		トラス幅狭	+0.035 62
充 実 率×開 床 度	15%	0%	-0.039 35
		100%	+0.039 35
	30%	0%	+0.005 09
		100%	-0.005 09
	45%	0%	+0.034 25
		100%	-0.034 25

(表—5 (a) の分散結果から特に効果の著しい要因につき各水準効果を示したものを)

表—6 (a) 揚力係数 (2 因子効果)

因 子	水準間分散	因 子	水準間分散
車 種×迎 角	0.000 01	迎 角×開 床 度	0.000 04
車 種×トラス幅	0.003 55	トラス幅×充 実 率	0.000 57
車 種×充 実 率	0.000 48	トラス幅×車 間	0.000 05
車 種×車 間	0.000 09	トラス幅×開 床 度	0.000 02
車 種×開 床 度	0.000 04	充 実 率×車 間	0.000 02
迎 角×トラス幅	0.000 07	充 実 率×開 床 度	0.000 01
迎 角×充 実 率	0.000 02	車 間×開 床 度	0.000 00
迎 角×車 間	0.000 01		

残差の分散 0.000 62

表—6 (b) 2 因子交互作用による因子効果

要 因	水 準	水 準 効 果	
車 種×トラス幅	有 蓋 車	トラス幅広	-0.029 80
		トラス幅狭	0.029 80
	無 蓋 車	トラス幅広	0.029 80
		トラス幅狭	-0.029 80
車 種×充 実 率	有 蓋 車	充 実 率 15%	0.013 59
		充 実 率 30%	0.011 76
		充 実 率 45%	-0.025 35
	無 蓋 車	充 実 率 15%	-0.013 59
		充 実 率 30%	-0.011 76
		充 実 率 45%	-0.025 35
トラス幅×充 実 率	トラス幅広	充 実 率 15%	0.020 96
		充 実 率 30%	0.005 17
		充 実 率 45%	-0.026 14
	トラス幅狭	充 実 率 15%	-0.020 96
		充 実 率 30%	-0.005 17
		充 実 率 45%	0.026 13

(表—6 (a) の分散結果から、特に効果の著しい要因につき各水準効果を示したものを)

この傾向が大きく現われる。この原因は、有蓋車と無蓋車でトラス背後の伴流の受け方に相違があることによるものと思われる。抗力係数の 1 因子効果からも明らかな

ように、抗力に関しては開床度の影響はほとんど無視できるものと思われる。

表-3 (b) の揚力係数については充実率のほかに、迎角による影響が大きい。一般的な傾向は迎角が大きほど、揚力が減少している。再びこれを表-5 (a) に示す2因子交互作用でみると、迎角×トラス幅、迎角×充実率、迎角×開床度の項が迎角×車種、迎角×車間と比べて大きく、車両の揚力係数に及ぼす迎角の影響がトラスに帰因することが推測される。特に迎角×トラス幅では迎角が増すときにはトラス幅が狭い方が安全で、迎角が負のときには逆にトラス幅が広い方が安全になる。そのほかに揚力係数に対する2因子交互作用では、車種×充実率、充実率×開床度の項が大きい。揚力係数に対する車種×充実率の傾向は抗力係数に対する傾向と一致している。充実率が小さく、かつ開床の状態では揚力係数がやや低くなるが、これは床と車両下部の間に速い流速を作り出すことによるものと思われる。

最後にモーメント係数であるが、表-3 (c) に示すように車種による項が大きい。これはモーメントの基準点がレール面軌間中心線にあるため、有蓋車と無蓋車の風圧中心までの距離の相違によるものと思われる。モーメント係数の2因子交互作用として、車種×トラス幅の影響が大きい。トラス幅の相違によって、伴流の発達度が異なり、車高の高い有蓋車と低い無蓋車では、伴流の影響が異なってくるためと考えられる。

3分力係数全体についてみると、1因子効果に関する限り、開床度の項を除いて同じ傾向がみられる。一般に揚力係数は他の係数に比し、1因子効果、2因子効果を差し引いても、かなり大きな分散が存在しており、その発生機構が多くの因子の交互作用によっていることが想像される。

(3) トラス内の変動風と貨車の動的空気力

3分力実験によってトラス内の貨車に作用する静的空気力のおよその性状が明らかにされた。それらのうち特に著しい影響を与えた因子に着目して、トラス内の風速分布を測定するとともに、変動風速と貨車に作用する動的空気力の測定を行った。風速の測定はトラス内の任意の点に熱線風速計を固定するためのトラバース装置を設け、この装置にピトー静圧管とマンオメータを用いてあらかじめ検定された熱線風速計の検出部を取り付けた。用いた熱線風速計はIAM-60/28111型およびDISA-SSA01型の2種で、熱線風速計に付属するリニアライザはFLA-60/28-7110型を使用している。熱線風速計の出力から、平均電圧、変動電圧(RMS値)を直接読み取り必要な場合にはデータ・レコーダに記録した。熱線風速計から読み取った平均電圧を V 、変動電圧を ΔV^2 で表

わせば、平均風速 \bar{u} 、および変動風速 $\overline{\Delta u^2}$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$\bar{u} = K \{ (\bar{V}^2 - V_0^2)^2 + (6\bar{V}^2 - 2V_0^2)\Delta V^2 \}$$

$$\overline{\Delta u^2} = K \{ 4\bar{V}(\bar{V}^2 - V_0^2)\Delta V - (6\bar{V}^2 - 2V_0^2)(\Delta V^2 - \overline{\Delta V^2}) \}$$

ただし、 K は熱線風速計の熱伝達率を表わし、実験から求められる定数である。また V_0 は無風時の出力電圧を表わしている。風速の測定点は図-7に示すように原点を車両中心部、軌間中心線上にとって、車両進行方向9.5 cm, 33.5 cmの2断面とし、各断面内の上下方向に2 cm ずつの間隔で、車両風上側に3点(58.0, 38.3, 12.5 cm)、風下側2点(-10.1, -22.6 cm)とした。トラス前面の風速はほぼ16 m/sとした。

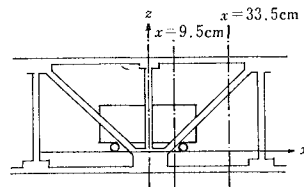
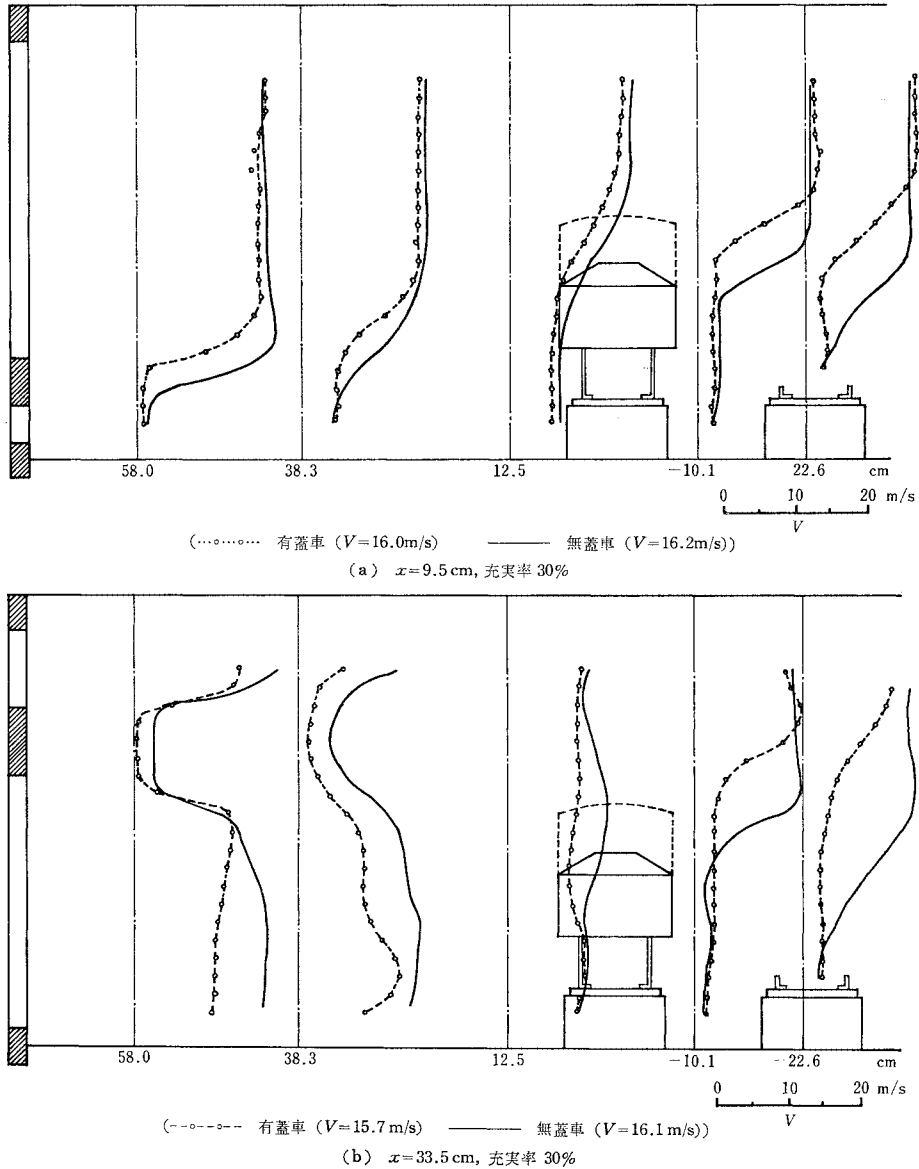


図-7 風速の測定断面

空気力の測定は車軸位置の燐青銅板に貼付した抵抗線ひずみ計の読みから求めた(表-1参照)。燐青銅板による測定では、揚力、抗力、モーメントの分離が完全でなく、3分力天秤のような精度は望めないが、動的追従性に優れている。

図-8 (a), (b) は車両進行方向9.5 cm, 33.5 cmの位置での、それぞれ有蓋車、無蓋車の風速分布を示したものである。トラスの背後ではトラスの存在によって極端に差のある平均風速は下流では徐々に回復するが、車両位置ではまだ十分に回復していない。無蓋車ではトラス伴流に入る割合が有蓋車と異なり、トラスの充実率の影響を受けやすいことが考えられる。また、図-8 (a) と (b) を比較すれば明らかなように、トラス斜材の位置の相違によって、風速分布が異なっている。車両位置を図-7に示す位置から21 cm移動させた場合の実験結果によれば、静的空気力は20%近くの増加を示している。したがって、車両がトラスの部材に対し、どの位置を走行しているかによって、風圧が変化するものと思われる。いいかえれば、車両が走行する際、風圧が周期的に変動することになり、周期的な強制力を受けることが考えられる。

図-9 (a), (b) は有蓋車に作用する抗力およびモーメントの静的成分、変動成分の無次元係数、および静的成分に対する変動成分の比率と風速の関係を示したものである。3分力天秤を用いた静的実験の結果からも明らかなように、それぞれ抗力およびモーメントの静的成分 F_s, M_s は、風速が変化しても一定の値を示している。しかし変動成分 F_D および M_D は、風速の増加とともに、減少する傾向がみられ、そのうえ風速に対する変動



図—8 風 速 分 布

成分のばらつきも大きい。おそらくこの傾向はトラス背後の伴流の位置が風速に応じて変化することによるものである。

図—10 (a), (b) は静的成分, 変動成分のトラス充実率に対する変化の様態を示したものである。有蓋車については充実率が 0, 15, 30, 45% のおのおのに対し, 静的成分, 動的成分の変化を求めたが, 無蓋車については充実率 30% のときの値のみを示した。これらの図からも明らかなように, 充実率が増加するにつれて, 空気力の静的成分は, 抗力, モーメントともに減少しているが, 変動成分はむしろ増加している。その増加の割合はトラス充実率が 30% を超えると減少する傾向にある。

おそらく, 充実率が増加するにつれて, 前面のトラスにさえぎられて静的成分が減少するのに対し, かえってより大きな乱れが発生し, 変動成分が増加するものと思われる。無蓋車の場合, 同じ条件の有蓋車より変動成分の比率が大きい。図—8 (a), (b) の風速分布からも推察されるように, 無蓋車では伴流内に入る割合が大きいためであろう。以上の実験結果はいずれも開床度 100% の場合であるが, 同一条件下での開床の場合の実験結果によれば, 有蓋車では抗力およびモーメントの静的成分に対する変動成分の比率はそれぞれ 15.7%, 15.3% を示し, 変動成分は開床の場合と比べ安全側にあることが判明した。

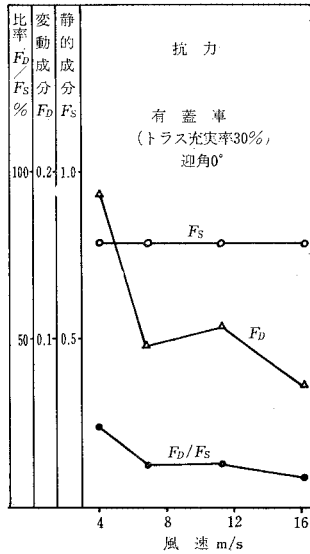


図-9 (a) 風速と抵抗力の静的成分, 変動成分の関係

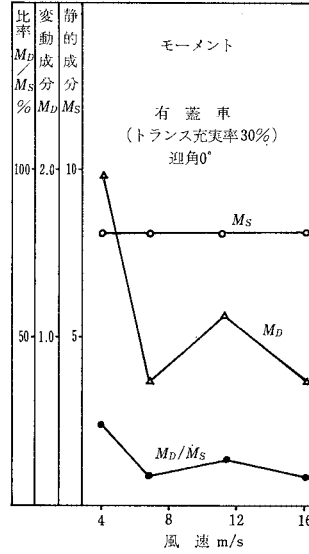


図-9 (b) 風速とモーメントの静的成分, 変動成分の関係

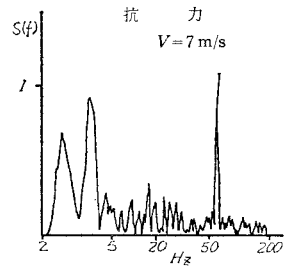
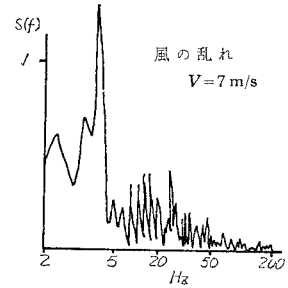


図-11 風の乱れと抵抗力のパワースペクトル (無蓋車)

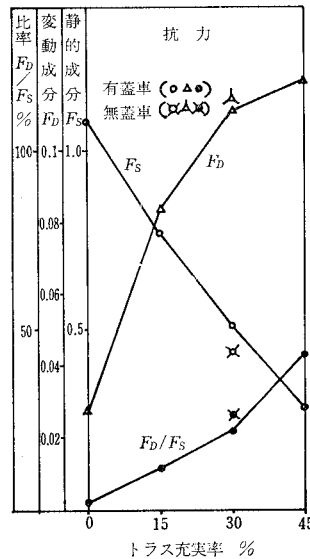


図-10 (a) トラス充実率と抵抗力の静的成分, 変動成分

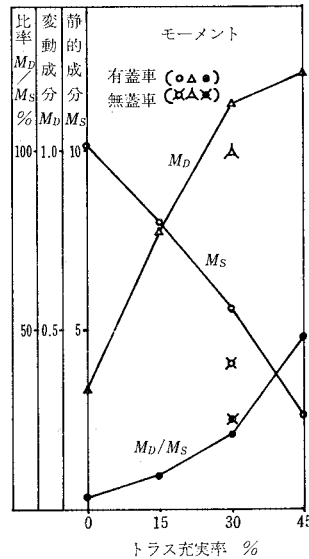


図-10 (b) トラス充実率とモーメントの静的成分, 変動成分

ついで磁気テープに記録した風速, 動的空気力について, パワースペクトラムを計算した. 測定した変動風には 200 Hz 程度まで有意な成分を含むため, 0.002 秒のサンプリング間隔で読み取った. 計算機の容量の制限から, データ長は 2 秒としたことにより, 低周波成分にはやや誤差を含むものと思われる. 周波数分析のうち, 無蓋車の前方における風の乱れのスペクトルと, そのときの抵抗力のスペクトルを 図-11 に示す. 風の乱れのスペクトルは無蓋車前方の最も乱れの強い場所でのものである. 風速 V はトラス前面で 7 m/s の場合について示し

ている. 一般的な傾向として, 風速が増加するにつれて, 風の乱れには高周波成分が多くなるが, ピークの振動数は必ずしも風速に比例していないようである. それぞれの風の乱れに対する無蓋車の抵抗力のスペクトルには 62 Hz の位置にピークが存在するが, これは変動風によって生じた車体のローリングである. この部分を無視すれば, 抵抗力は風の乱れのスペクトルと同じ傾向を示し, 風速が増加するにつれて, 高周波成分が増加する傾向を示す.

以上の風洞実験から, トラス内を通過する 2 軸貨車に作用する空気力の性状が明らかにされた. トラス内の貨車に作用する空気力を, 静的成分と動的成分に分類すると, 静的成分についてはトラスの充実率が増加するほど空気力は小さくなり,

ついで開床度, トラス幅, 迎角, 車間等により変化を示す. しかしトラスの存在しない場合と比較して, 特に危険はみられない. 一方, 動的成分については, トラスによって発生した風の乱れの影響を受け, トラスの充実率が増加するほど大きくなり, トラスがない場合の最大 10% 程度に達する. 車両がトラス内を通過するときには, トラス橋軸方向で静的空気力が異なることから, 一種の周期的外力を受けることになる. 仮にトラス格点間隔を 10 m とすると, 時速 50~80 km/h で走行する場合, この周期外力の振動数は 1.0 から 2 Hz 程度に

なり、貨車の低心ローリング、高心ローリングの固有振動数の範囲内に入る。この変動分は静的空気力の最大20%程度に達するから、その効果は無視することができない。

このような性状を示す風荷重が、トラス内を通過する鉄道車両に作用するとき、車両が安全に走行するためには、風荷重に対する車両の応答を明らかにすると同時に、運転規制のための限界風速内で車両の安定な走行が得られるかどうかを明らかにしなければならない。そこで風洞実験について、1/5 模型車両を用いて横風作用時の車両走行安定性を検討するため、傾斜した軌道によるシミュレート実験を行った。

3. 傾斜軌道によるシミュレーション

鉄道車両に作用する風圧力と等価な外力を発生させる方法として、傾斜軌道が考えられる。図-12 (a) に鉄道車両に横風が作用し車両に抗力 D 、揚力 L 、モーメント M が作用している状態を、図-12 (b) に直線軌道においてカントを与え、片側レールが一定角 α だけ高くなった傾斜軌道を示す。図-12 (b) の傾斜軌道では、車体重心点 A は正規の車体重心点 O から e_0 だけ偏心させてある。またこのときの車体全重量 P は、図-12 (a) に示す正規の車体重量 W とは異なる大きさをもっている。図-12 (a) において、 e は車体重心 O と風圧中心間の距離である。したがって図-12 (a) と (b) の力学的な対応は次式によって与えられるであろう。

$$\left. \begin{aligned} P \cos \alpha &= W - L \\ P e_0 \cos \alpha &= M \\ P \sin \alpha &= D \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

すなわち、傾斜軌道において、角度 α 、車体重量 P 、偏心量 e_0 を適当に与えることによって、抗力 D 、揚力 L 、モーメント M が作用するときの車両の状態をシミュレートできることになる。式 (1)、式 (2) からこれら3つの変数の関係を求めれば、

$$\left. \begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{D}{W-L} = \frac{n}{1-\beta n} \\ P &= \sqrt{(W-L)^2 + D^2} = W \sqrt{(1-\beta n)^2 + n^2} \\ e_0 &= \frac{M}{W-L} = \frac{\tau n}{1-\beta n} h \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 β, τ, n の値はそれぞれ $\beta = L/D = C_L/C_D$, $\tau = M/Dh = C_M/C_D$, $n = D/W$ を与えている。

一般に抗力、揚力、モーメントの大きさの組合せは、風洞実験の結果からも明らかなように、風速、トラスの充実率、車種などによって異なり、一義的に決定することができない。そこで傾斜軌道実験では、国鉄の運転規制のための基準風速の上限、30 m/s を風速の目安とし

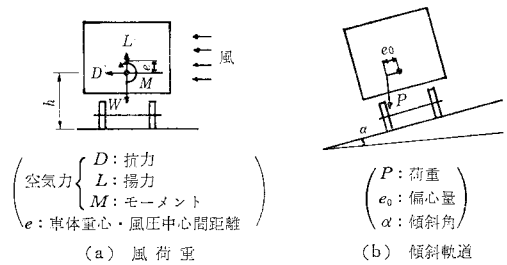


図-12 風荷重と傾斜軌道による外力の関係

て、3分力の値を決定した。3分力を計算するにあたって用いた3分力係数は、先に述べた風洞実験の結果や従来の研究成果^{7),8)} から得られた値のほぼ最大値を用い、 $C_D=1.2, C_L=0.5, C_M=0.5$ とした。これらの係数は同時に最大値をとることはなく、たとえば文献 8) によれば、抗力係数 C_D の最大値はほぼ 1.2 であるが、揚力係数 C_L が最大となるときの抗力係数 C_D の値は 0.63 となっている。また、揚抗比 $\beta = C_L/C_D$ の値の最大値は先の風洞実験の結果によれば、1.0 以上の値を示したものもある。このように3分力係数の値は実験の条件によって変化し、同時に最大値を示すことはまれであるが、傾斜軌道の実験では横風作用時の極限状態での車両の安定性を検討するため、上述の値を採用した。

モーメント係数 C_M については車体風圧中心の位置が問題となる。風圧中心が車体中心鉛直軸上にあるとして、車体重心に対する風圧中心の距離を e とすれば、モーメント係数 C_M と抗力係数 C_D の比 $C_M/C_D = \tau$ は式 (1) および $D = Me$ の関係から、

$$\tau = \frac{C_M}{C_D} = \frac{e}{h} \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。すなわち C_M/C_D の比は車体風圧中心、車体重心間距離 e と車体重心高さ h の比で表わされる。

実験では以上の条件のもとに軌道のカントを $\tan \alpha = 0.1$ に定め、その他の諸定数を決定した。その結果 $n = 0.0952, P = 0.957 W, e = 0.05 h$ の値を得た。

(1) 実験装置と実験の条件

実験には東京大学工学部土木工学科の軌道振動台を使用した。図-13 に軌道振動台の概要を示す。振動台は全長 36 m で、助走区間、測定区間、制動区間にはほぼ3等分されている。振動台は油圧で浮上させると同時に、アクチュエータにはばねを介して振動台に水平方向の振動を与えることができる。振動台の振動数、振幅はこれらばね群を適宜調整することによって設定することができる。最大加速度 0.2 g の範囲で選択し得る振動数と振幅は 0.5~5 Hz, 振幅 0.5~10 cm の範囲である。振動台上には実物の 1/5 模型の車両が走行できるための軌道が

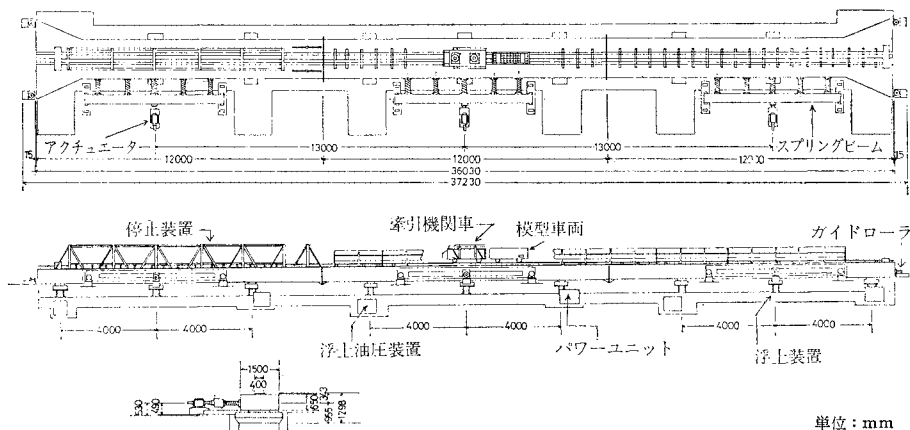


図-13 軌道振動台

表-7 実験模型車両の相似率

長さ	1/5	速度	1/√5
加速度	1/1	周期	1/√5
質量	1/125	振動数	√5/1
慣性モーメント	1/125	ばね定数	1/25
時間	1/√5	減衰定数	1/25√5

表-8 ワラ1型2軸貨車の諸元

諸元	記号	数	値
車体質量 (空車時)	m_1		0.117 kg·s ² /cm
車軸質量	m_2		0.756 × 10 ⁻³ kg·s ² /cm
車体回転慣性			
進行方向軸回り	I_{x1}		50.27 kg·s ² ·cm
鉛直軸回り	I_{z1}		309.8 kg·s ² ·cm
車軸回転慣性			
進行方向軸回り	I_{x2}		1.750 kg·s ² ·cm
鉛直軸回り	I_{z2}		1.750 kg·s ² ·cm
軌間	$2a$		213.4 mm
ばね間	$2b$		386 mm
軸距	$2l$		845 mm
車輪半径	r		86 mm
車体高さ	h		43.0 cm
つり装置ばね定数	k_z		36.49 ± 35 kg/cm
鉛直方向 (積車時)			
左右方向 (積車時)	k_y		18.38 y(1+20 y) ± 1.32 kg/cm

敷設されている。軌間は 213.4 mm である。

実験に使用した模型車両はワラ1型2軸貨車の1/5模型で、実車との相似律を表-7に示すようにとり製作した。模型車両の諸元を表-8に示す。車両の全重量、慣性モーメント、重心位置は5kgの重錘を適当な個数を車体内の任意の位置に積載することによって調整することができる。また、車輪に作用する軌道外力の輪重や横圧は、比較的安定な記録が得られる後車軸車輪のスポーク8本に貼付したそれぞれ32枚の抵抗線ひずみゲージによって検出することができる。すなわち、スポーク1本につき、車両進行方向の面に相対して2枚のひずみゲージを貼付し、1車輪につき合計16枚のひずみゲージをブリッジに組んで横圧を測定した。一方、輪重はスポーク1本につき車両進行方向直角の面に相対して2枚のひずみゲージを貼付し、同じく16枚をブリッジに組んで測定した。これらの記録は車軸に取り付けたスリッピングを介して動ひずみ測定器の入力とした。輪重は車輪が1回転する間に2回検出されるため、連続量としての記録は得られない。そこで輪重の測定値はこれらの値を結び包絡線から求めることにした。車体の運動は車体重心軸を通る左右側壁に鉛直成分、軌道直角水平成分の抵抗線式加速度計を(東京測器製AM型加速度計 ±2g)おのおの1個、車体重心軸を通る後部側壁に鉛直成分、軌道直角水平成分の加速度計をおのおの1個取り付けて測定した。

模型車両は試験軌道外側に設けた専用軌道上を走行するけん引車によってけん引される。模型車両からの輪

重、横圧、加速度の出力は、けん引車に積載された動的ひずみ測定器によって増幅され、FM送信機によって地上側に送信される。地上に設けられた受信機によって受信された信号は、ミキサによっていったん2成分から1成分に変換され、データ・レコーダに記録される。データ・レコーダに記録されたデータは復調分離器を介して再び2成分に変換され、適宜解析に用いた。模型車両の走行速度は、比較的安定な走行が期待できる桁中央部の測定区間の両端に、CDS光電素子を設け、車両側方に取り付けた光源遮蔽板による光量の変化を電圧変動に変換する方法により測定した。実験にあたって模型車両の走行速度は、0 m/s、1.5 m/s (実車換算 12.1 km/h)、3.0 m/s (24.2 km/h)、4.5 m/s (36.2 km/h) の4段階に設定した。

実験を大別すると、静的実験、動的实验に分類することができる。静的実験は、静的空気力のみが車両に作用する場合を想定したもので、軌道は静止した状態にある。これに対し動的实验は、変動する横風が作用したり、あるいは風によって橋梁に横振動が生じたり、風洞

実験の結果から得られたトラス格点間を周期とする変動風荷重が作用する場合を想定したものである。この周期外力の周期や振動数は、風の変動成分、橋梁の振動性状、あるいは橋梁形式等によって決まるものであるが、この実験では車両運動の極限状態を調べるため、周期はワラ1型貨車の低心ローリング共振周波数(約1.6Hz)を含む0.6~5Hzの範囲とし、振幅はこの振動数範囲で一定加速度0.05gを与えるように定めた。加速度0.05gの値は、静的空気力に対して動的空気力や橋梁の振動などによる軌道外力の比率が最大50%以内にあるものと想定して定めたものである。動的実験、静的実験ともに、積荷が実車換算7tの状態(以後空車という)、満載の状態(以後満車という)について実験を行っている。これら2つの状態の模型車両の諸量を表-9に示す。空車および満車状態での実車換算風速はそれぞれ29.2m/s, 38.0m/sで、空車状態では運転規制風速30m/sにほぼ等しいが、満車時には運転規制速度を超えている。また横風が作用しない場合と比較するためにカントがない通常の軌道についても同様の実験を行った。

表-9 模型車両の諸量

1/5 模型車両	車体重量 (水平) W(kg)	車体重量 (傾斜) P(kg)	重心変位 e_0 (cm)	軌道傾斜 α	実車積 載重量 (t)	実車換 算風速 (m/s)
ワラ型 2軸車	空	114.7	109.8	2.95	0.1	7.0
	満	194.1	185.8	2.95	0.1	16.9

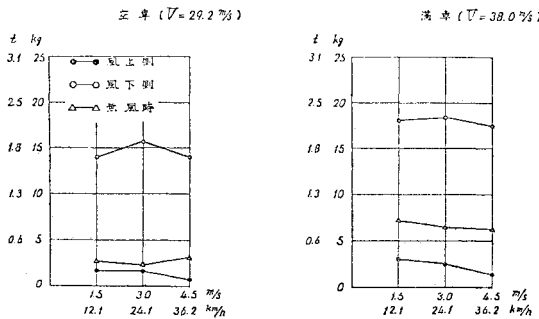


図-14 ワラ1型 横圧最大値(軌道振動なし)

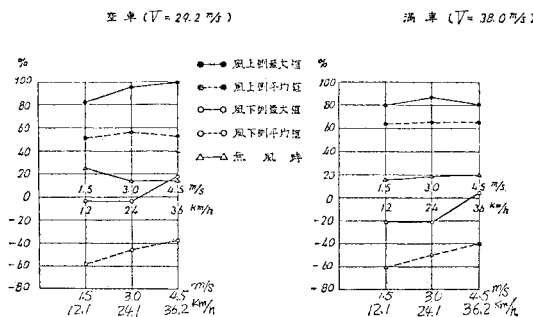


図-15 ワラ1型 輪重減少率(軌道振動なし)

(2) 傾斜軌道による静的実験(軌道が静止している場合)

軌道が静止している場合、傾斜軌道による実験は、軌道に直角な水平方向から、一様な横風が作用する状態をシミュレートしたものである。この条件における横圧、輪重減少率、脱線係数、車体加速度をおのおの図-14から図-17に示した。

横圧は風下側において、空車時最大2.0t、満車時最大2.3t(実車換算)を示す。これを無風時の横圧と比較すれば空車で約6倍、満車で約3倍の値に相当する。図-14からも明らかなように走行速度が増加するにつれて、空車、満車とも風上側横圧は減少の傾向がみられ、風下側においても必ずしも増加していない。風上側の横圧は、いずれも無風時の状態よりは低い値を示すがこの傾向は空車の状態に比べ、満車の状態の方が著しい。

輪重減少率は試験区間走行中の風上側、風下側のおのおの最大値と平均値を示した。風上側平均値は空車(V=29.2m/s, 実車換算風速)では約55%, 満車(V=38.0m/s, 実車換算風速)では約65%であり、走行速度による変化は小さい。しかし、これを風上側最大値で見ると、空車では100%に近い輪重減少率が出現し、満車でも86%となっている。また一般に満車に比べて、

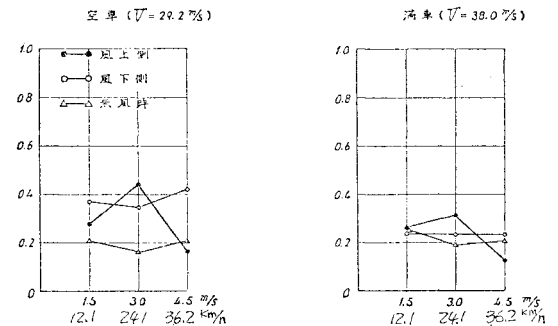


図-16 ワラ1型 脱線係数最大値(軌道振動なし)

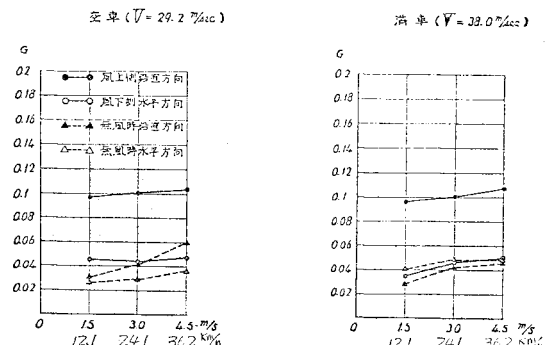


図-17 ワラ1型 車体加速度最大値(軌道振動なし)

空車の方がやや大きな値を示している。国枝⁹⁾は転倒に対する輪重減少率の許容範囲として、静的の場合 60%、動の場合 80% をとることを提案している。実験の結果得られた平均値を静的な場合と置き換えると、空車、満車ともほぼこの範囲内にあるものと見なすことができる。しかし最大値を動の場合と見なすと、本実験の結果はやや高めの値を示している。

脱線係数については、空車の最大値は風上側で 0.44、風下側で 0.42 であり、満車の最大値は風上側で 0.31、風下側で 0.24 である。無風時と比較して、空車の場合には、風上側で 1.5 倍、風下側で 1.8 倍程度であるが、満車の場合には無風時の状態と比べほとんど差がみられない。車両走行安定性を示す脱線係数は、従来より 0.8 が限界値とされており、本実験の結果はいずれもこの限界内にある。

車体加速度についてみると、無風時と比較して車体のローリング動を示すと考えられる風上側車体鉛直方向加速度は、空車・満車とも約 2.5 倍の値を示している。しかし車体左右方向加速度は無風時の場合の加速度に対し大きな変化はみられない。車体加速度は走行速度が増加すると、無風時、横風作用時とも一様に増加する傾向を示す。

以上より一様な横風が作用するとき、軌道が静止している状態で問題になると思われるのは、空車時の輪重減少率の最大値である。実験の記録によれば、この最大値は継続時間はきわめて短く、瞬間的ではあるが、転倒に対する危険性を含むため、今後より詳細に検討されなければならないものと思われる。

(3) 傾斜軌道による 動的実験 (軌道が振動する場合)

先に述べたように、この実験は、一様な横風が作用している状態に加えて風の変動成分や橋梁の振動などによって、変動外力が車両に作用する場合である。実験では、軌道をカント 0.1 に傾斜させた状態で、振動台を正弦的に 0.05 g の加速度振幅で定常的に振動させた。一方、無風時の状態をシミュレートする目的で、カントをもたない水平直線軌道について、同様の条件で実験を行い、横風が作用する場合の結果と比較した。実験によって得られた結果は図一18~22* に示す。いずれも折線で示した曲線は車両走行速度 1.5 m/s (12.1 km/h, 実車換算)、3.0 m/s (24.2 km/h)、4.5 m/s (36.2 km/h) の場合の無風状態の実験結果を表わし、点で示した値が、それぞれの走行速度での横風作用時の状態を表わしている。

図一18 (a), (b) に空車時、満車時のそれぞれの横圧の値を示す。横軸は軌道外力の振動数、縦軸は横圧の値を模型、実物の両方についてとっている。空車では風速 29.2 m/s で横圧は風上側では無風時とほとんど変わらないが、風下側では無風時の 3~7 倍を示し、最大値は 2.6 t (実車換算) に達する。これは軌道が静止し、かつ横風が作用している状態での約 1.3 倍に相当する。満車では風速 38.2 m/s で風下側の横圧の最大値は 3.3 t になる。これは軌道が振動しない場合の 1.5 倍程度に相当する。これに対し風上側の横圧は無風時の横圧に比べてやや低い値を示している。走行速度と横圧の関係は、一般に走行速度が高い方が安全側にある。実験の観察によると、その原因は低速の状態ほどレールと車輪の左右相対速度はかえって不規則で、そのうえ大きな値を示すことによるものと思われる。空車と満車の比較では横圧は満車の状態がより大きな値を示しているが、満車の実験での風速が、空車の実験での風速よりも高いことを合わせて考えなければならない。

図一19 (a), (b) に空車・満車それぞれの輪重減少率を示す。風上側では空車・満車、ともに輪重減少率は 80~100% の範囲内にある。空車では無風時、横風作用時ともに走行速度が高いほど大きな値を示し、特に横風作用時には風上側ではほぼ 100% に近い値を示している。無風時に現われる 3 Hz での顕著な共振点は横風作用時には明確に現われていない。しかし、これを図一15 に示す軌道が静止した状態での輪重減少率と比較すれば、軌道が振動している状態での輪重減少率は、軌道が静止している状態での輪重減少率の最大値とあまり大きな差異は認められない。したがって軌道加速度が 0.05 g の範囲内では、静的実験の最大値が 1 つの目安になるものと思われる。

図一20 (a), (b) に空車状態、満車状態での脱線係数を示した。脱線係数については、空車の風上側に大きな共振点がみられるほかは、無風時と横風作用時にはほとんど大差がないものと見なすことができる。空車状態の共振点は、2~3 Hz の値であって、輪重の瞬間的な減少によって生じたものと考えられる。この結果を軌道が静止した横風作用時の状態、すなわち図一16 の値と比較すると、空車時の共振点での脱線係数の値を除けば、動的、静的ともに大きな差異はない。したがって、脱線係数については通常の場合、風速 30 m/s の範囲内では空車状態の共振点を除けばほとんど問題はないものと思われる。

図一21, 22 に車体に生ずる鉛直方向加速度、水平方向加速度を示す。図一21 (a), (b) の鉛直方向加速度は風上側の値を、図一22 (a), (b) の水平方向加速度は風下側の値を示した。鉛直方向加速度については、無風時

* 図一18~22 の凡例は次のとおり。

—●— 4.5 m/s, ---- △ 3.0 m/s, —— × 1.5 m/s

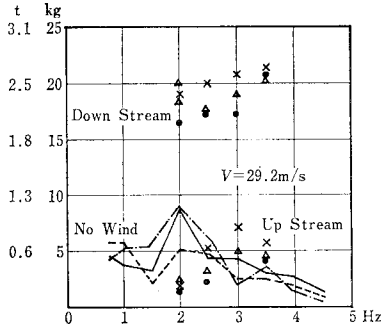


図-18(a) ワラ1型, 横圧, 空車, 軌道加速度 0.05 g

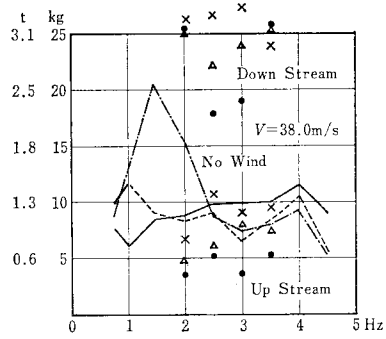


図-18(b) ワラ1型, 横圧, 満車, 軌道加速度 0.05 g

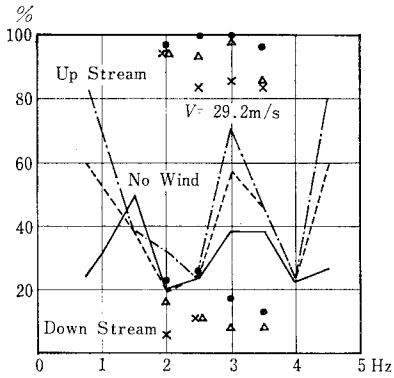


図-19(a) ワラ1型, 輪重減少率, 空車, 軌道加速度 0.05 g

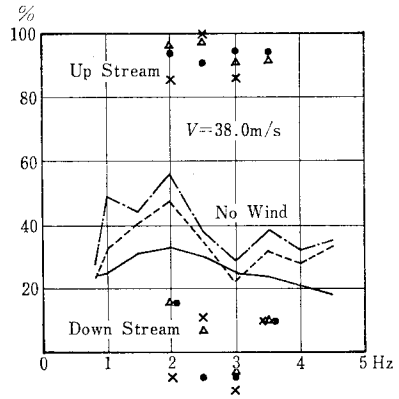


図-19(b) ワラ1型, 輪重減少率, 満車, 軌道加速度 0.05 g

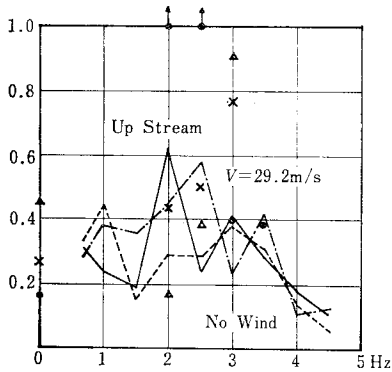


図-20(a) ワラ1型, 脱線係数, 空車, 軌道加速度 0.05 g

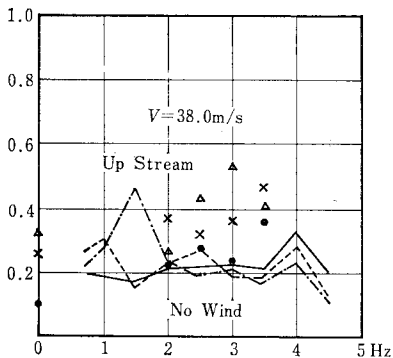
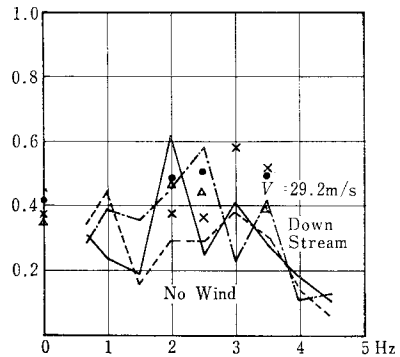
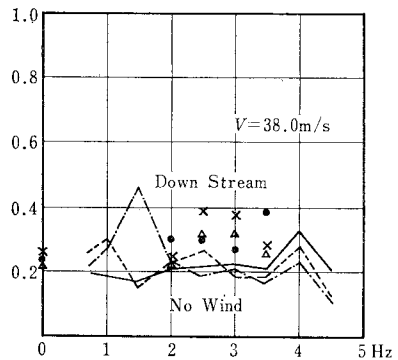


図-20(b) ワラ1型, 脱線係数, 満車, 軌道加速度 0.05 g



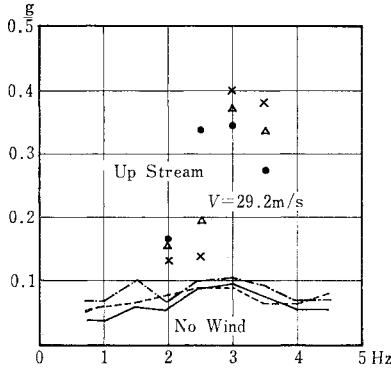


図-21 (a) フラ 1 型, 空車, 風上側車体鉛直方向
加速度, 軌道加速度 0.05 g

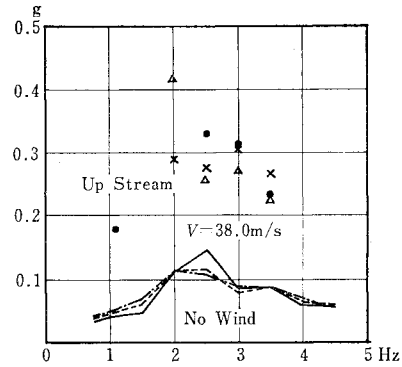


図-21 (b) フラ 1 型, 満車, 風上側車体鉛直方向
加速度, 軌道加速度 0.05 g

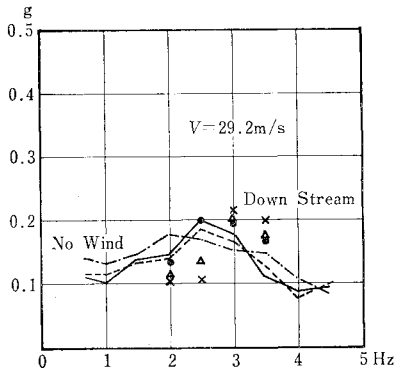


図-22 (a) フラ 1 型, 空車, 風下側車体水平方向
加速度, 軌道加速度 0.05 g

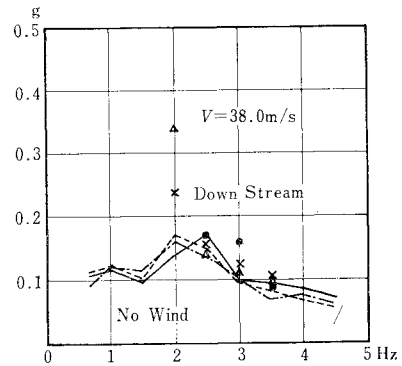


図-22 (b) フラ 1 型, 満車, 風下側車体水平方向
加速度, 軌道加速度 0.05 g

の状態の 2~3 倍の値を示し, 特にこの傾向は空車で大きくなる. 実験の観測によると, この原因は振動時に車体に生じるローリングによるもので, 風上側の輪重減少率と同じ傾向をもっている. 図-22 (a), (b) の水平加速度についてみれば, 満車状態で 2 Hz の近傍の共振点でやや水平加速度が無風時と比べて増加しているが, そのほかは無風時とほとんど差異はないものと思われる. これらの比較から, 横風が作用している状態で, 軌道が振動する場合には車体にローリングが発生しやすいことが考えられよう.

風荷重をシミュレートした傾斜軌道の実験結果をまとめると, 以下のようになる.

横圧は風下側が大きい, 軌道の状態がよければ軌道振動の有無にかかわらず, 走行上支障を起こすほど大きな値を示さない. 輪重減少率については空車は満車に比べ変動が大きく, 風上側では瞬間的に大きな値を示す. 軌道振動がある場合には車体にローリングが発生し, 輪重減少率は空車・満車ともに瞬間的に 100% を示すことがある. 車両に発生する運動は無風時に比べて風荷重が作用するときの方が大きく, より大きな車体のローリングが認められる.

傾斜軌道で用いた実験条件は風速が約 30 m/s (空車状態)あるいはそれ以上の風速 (満車状態)が作用する場合であり, そのうえ 3 分力をそれぞれ実際に測定された値の最大値にとっている. このような極限状態は現実にはまれであるが, 実験全体を通じて脱線や転覆の現象は発生していない. 実験に用いた諸条件のもとでは, 定常風荷重下の走行車両は, 脱線よりも輪重ぬげによる転倒現象の方が発生しやすいものと思われる. また同一の風速条件では満車の方が空車に比較して安全性が高い.

4. 結 論

本研究はトラス内の 2 軸貨車に作用する空気力の性状を風洞実験によって明らかにするとともに, このような空気力が橋梁内を走行する 2 軸貨車に作用する場合どのような影響を与えるかを, 1/5 模型 2 軸貨車, 傾斜軌道を用いて検討したものである.

風洞実験の結果によれば, トラス内を通過する 2 軸貨車には, トラスの形状や寸法によって大きさの異なる空気力が作用すること, それらのうちでトラスの充実率, 車種, トラス幅の影響が大きいこと, 静的空気力と動的

空気力が反比例の関係にあること、トラス部材の配置によって車両に周期外力が作用すること、などが明らかにされた。

傾斜軌道によるシミュレート模型実験では、風荷重の作用によって輪重減少率が增大すること、横圧、脱線係数は問題が少ないこと、車体にはローリングが生じやすいこと、さらに横風作用下では脱線に対するよりも転倒に対する安全性が低下することなどが明らかにされた。しかし、転倒の限界条件や走行の危険性を明確にするためには、今後より詳細な研究が必要になるものと思われる。

5. あとがき

本研究は本州四国連絡橋公団から委託された鉄道吊橋の実用性に関する研究の一環として、東京大学工学部八十島義之助教授、松本嘉司教授のご指導のもとに行われたものである。本研究の遂行にあたって、さまざまな角度からご助言をいただいた鉄道技術研究所 福地合一博士、日本大学 松井 哲教授、風洞を快く使わせて下さった東京大学工学部航空工学科の諸先生、また実験に

際してなみなみならぬご助力をいただいた東京大学工学部土木工学科交通研究室の大嶋孝二助手、田代充宏技官、林 賢治の諸氏に心より謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋の列車走行に関する研究報告，昭和 48 年 3 月～昭和 54 年 3 月。
- 2) 国枝正春：曲線通過時の車両の転ぶく限界風速と走行速度の関係，東海道新幹線に関する研究，日本国有鉄道鉄道技術研究報告，昭和 35 年 4 月。
- 3) 国枝正春：鉄道車両の転ぶくに関する力学的理論的解析，日本国有鉄道鉄道技術研究報告，No. 793，昭和 47 年 2 月。
- 4) 鉄道建設公団：本州四国連絡鉄道吊橋技術調査委員会中間報告，昭和 41 年 4 月。
- 5) 鉄道建設公団：本州四国連絡鉄道吊橋技術調査委員会橋梁専門部会報告書，昭和 45 年 6 月。
- 6) 福地合一・林田千秋・西沢生一・土屋 恂：横風による列車転覆の静力学的検討，日本国有鉄道鉄道技術研究報告，No. 854，昭和 48 年 6 月。
- 7) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋の列車走行に関する研究委員会中間報告書，昭和 48 年 3 月。
- 8) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋の列車走行に関する研究，走行分科会中間報告，昭和 51 年 8 月。
- 9) 松本嘉司・大嶋孝二・橋本渉一：風荷重を受ける振動軌道上の車両運動に関する研究，土木学会年次学術講演会概要集，昭和 50 年 10 月。
- 10) 松本嘉司：土木解析法 I，技報堂出版，昭和 46 年 11 月。
(1979.11.13・受付)