

合成 I 桁橋の立体解析に基づく 変形および部材結合力の特性把握

ANALYSIS OF COMPOSITE I-GIRDER BRIDGES CONSIDERING ECCENTRIC CONNECTION
AND BASIC INVESTIGATION FOR DEFORMATIONS AND CONNECTING FORCES

大塚久哲* 佐賀弘一**

By Hisanori OTSUKA and Koichi SAGA

This paper presents a method of composite I-girder bridges considering eccentric connection. Using this method, composite 3-girder bridges with cross beams or sway bracings are analysed.

Thickness of slabs, location of vehicle loads, configuration and sectional area of lateral bracing and opening angles of curved girder bridge are adopted as parameters for numerical calculations.

Deflections, rotational angles, and connecting forces of sway bracing (or cross beams) and lateral bracings obtained for various parameters are compared to investigate the cause of fatigue cracks which occur in connection plates, stiffeners of main girders and gussets for lateral bracing.

1 緒言

米国においてはかなり以前から道路橋の疲労損傷事例が報告されているが、わが国においても最近になって疲労が原因と思われる道路橋の損傷事例が報告されるようになってきた。

合成 I 桁橋においては、荷重分配横桁あるいは対傾構を主桁に取り付けるための接合部および支点部の下横構取り付け部に疲労損傷が発見されている。横桁と主桁の接合部の損傷は、主桁フランジと横桁フランジとの間に介在するコネクションプレート部に集中しており、対傾構と主桁の接合部の損傷は、対傾構を取り付けた主桁の垂直補剛材の上端部周辺に数多く発見されている。これらの疲労損傷の発生原因として、それぞれ床版のたわみによる角変形に起因する二次応力および横桁あるいは対傾構の荷重分配作用に伴い生じる部材力が考えられよう。また、下横構取り付け部の疲労損傷の原因の 1 つとして、横構部材力が関係していると思われる。したがって、ここに述べた床版の角変形、横桁・対傾構・横構の部材力（あるいは結合力）の大きさを、荷重位置と断面諸元をパラメーターとして解析することは、疲労損傷の原因を究明する上で有用であると判断される。

本研究では、著者らが以前に開発した合成 I 桁橋の主桁、床版、横桁（対傾構）、横構の各構成要素の偏心結合を考慮した立体解析法¹⁾を用いて、荷重位置、床版厚、横構断面積、下横構形状、中心角をパラメーターに、床版部の角変形、部材（結合）力の特性について検討したので、その結果を報告する。

* 工博 九州大学助教授 工学部土木工学科 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

** 九州大学大学院生 土木工学専攻 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

2 多主桁橋の立体解析法

本研究で用いる立体解析法は、床版の剛性方程式を有限帯板法（FSM）により、主桁のそれをフーリエ級数展開により、横桁・対傾構・横構のそれを有限要素法により求めて、三者の偏心結合を考慮した上で、結合法を用いて三者を一体化して解析する手法である。

結合法の概略は次のようである。基本構（床版と主桁からなる構造）の節線たわみ性行列から、横桁などとの結合点における力と変位との関係式（基本構の節点たわみ性行列）を誘導する。しかる後、この節点たわみ性行列と横桁などの剛性行列とから結合力を求める。外荷重と結合力を基本構に作用させて与系を解析する。解法の詳細については、文献1）を参照されたい。なお電算プログラムは曲線桁を対象として開発し、直線橋は曲線半径を無限大に近づけて解析した。床版は1/8分割した。

3 解析モデル

図3-1に示すような単支間（支間長20m）の3主桁合成桁橋を対象とした。横桁（対傾構）は橋軸方向4等分点に配置し、横桁タイプでは横桁のみを、対傾構タイプでは対傾構のみを使用した。曲線橋は横桁タイプとした。下横構の位置は、横桁タイプでは横桁の下フランジと、対傾構タイプでは下弦材と同じ高さ

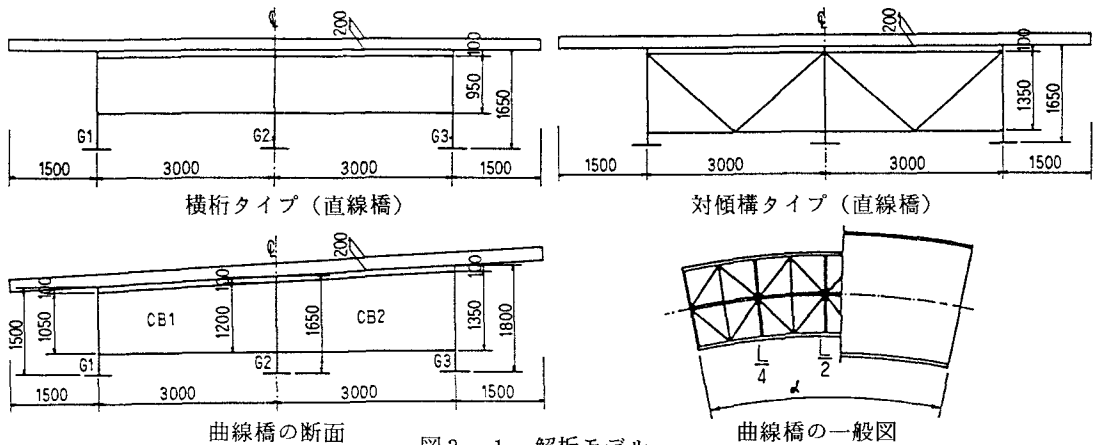


図3-1 解析モデル

表3-1 断面諸元

直線橋

主桁		h (cm)	165	
		b1 (cm)	36	
		b2 (cm)	48	
		t1 (cm)	2.0	
		t2 (cm)	2.5	
		tw (cm)	0.9	
横桁		h (cm)	95	
		b (cm)	31	
		tf (cm)	1.4	
		tw (cm)	0.9	
下横構断面積		A (cm ²)	34.77	

対傾構	A (cm ²)	上・下弦材	34.77
		斜材	29.76
横構	A (cm ²)	下横構	34.77

表 6 1 断面諸元

曲線橋

主桁		G 1	G 2	G 3
	h (cm)	150	165	180
	b1 (cm)	35	36	38
	b2 (cm)	46	48	50
	t1 (cm)	2.0	2.0	2.0
	t2 (cm)	2.5	2.5	2.5
	tw (cm)	0.9	0.9	0.9
横桁		C B 1		C B 2
	h (cm)	105~120		120~135
	b (cm)	31		31
	tf (cm)	1.4		1.4
横構	A (cm ²)	上横構		29.76
		下横構		34.77
		ストラット		16.56

とした。主桁等の断面諸元は表 3-1 に示す通りである。

図 3-2 に角変形の定義を示す。すなわち、角変形 $\theta_{1R}, \dots, \theta_{3L}$ は床版のたわみ角 θ_s と主桁の回転角 θ_g との差 ($\theta_s - \theta_g$) であり、 θ_s は、床版と主桁の結合点のたわみと隣接節点のたわみとの差を、帯板要素幅で除した値である。符号は、床版と主桁とがなす角が $\pi/2$ より小さくなる場合を正とする。2つの添字のうち数値は主桁番号を、L, R はそれぞれ主桁の左、右側を示す。

図 3-3 に対傾構・横桁・横構の結合力の表し方を示す。結合力は絶対値とその方向 ϕ で表す。

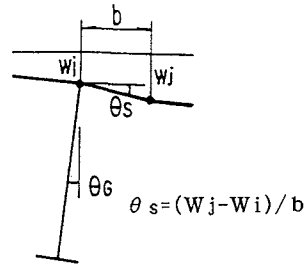
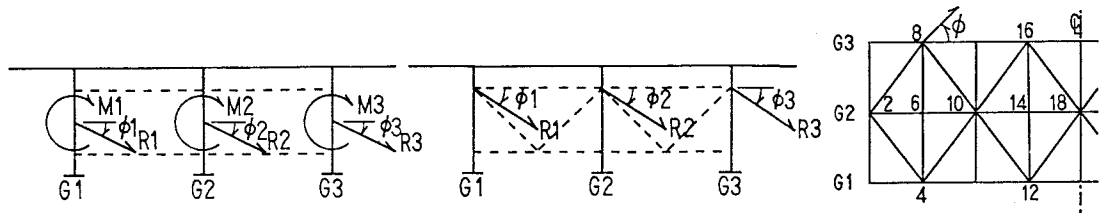


図 3-2 角変形の定義



(数値はその点の結合点番号を示す)

図 3-3 横桁・対傾構・横構の結合力

4 結果と考察

車両は図 4-1 に示すように 2 台並列させて載せ、後輪をスパン中点上に置いた。橋軸方向には 1 台のみである。載荷位置は L 1 から L 5 までの 5 通りを考えた。L 3 は中桁を対称軸とする対称載荷であり、他の 4 ケースは非対称荷重である。L 1, L 2 は片側に歩道を有する非対称な車線構成を考えており、輪荷重の位置の詳細は、図 4-1 に示す。L 4, L 5 は、それぞれ L 2, L 1 の G 2 桁を対称軸とする鏡像位置にあり、曲線橋の解析に用いる。

以下に解析結果を示すが、4-1 から 4-3 までは対傾構タイプ、4-4 と 4-5 では横桁タイプの結果を示す。また 4-5 のみ曲線橋を、その他は直線橋を対象としている。4-3 を除き、横構の配置形状は図 4-4 の (a) であり、横構寸法は、表 4-1 の D タイプとした。床版の厚さは 4-2 を除きすべて 20 cm である。角変形、対傾構・横桁の結合力は、支間中央断面の値を示した。

4-1 荷重位置と角変形、結合力の関係 (図 4-2)

L 1 荷重の場合、 θ_{2L} の角変形が最も大きい。対称載荷の場合、耳桁上の角変形 (θ_{1R}, θ_{3L}) が中桁上の角変形 (θ_{2L}, θ_{2R}) より大きい。したがって、垂直補剛材上端部の疲労損傷は、対称荷重では耳桁で、L 1 荷重では中桁で生じやすいと思われる。

中桁上の対傾構結合力は、載荷位置による変化は小さい。対称荷重では、3 本の主桁上の結合力の差はわずかである。

横構結合力は、荷重が非対称になるほど支点付近で著しく増加し、横構取り付け部の疲労損傷に、この横構結合力が何らかの影響を及ぼしているのではないかと考えられる。

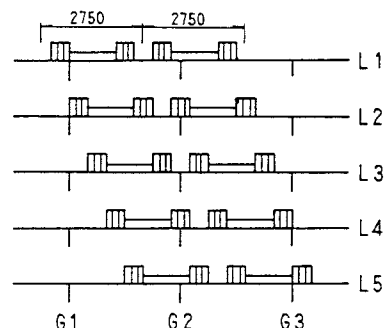
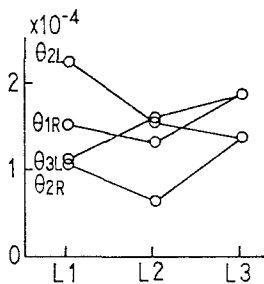
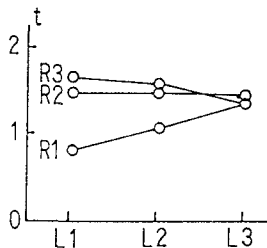


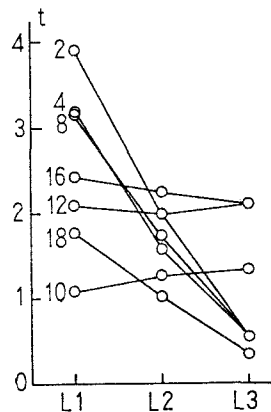
図 4-1 荷重位置と荷重ケース名



(a) 角変形



(b) 対傾構の結合力

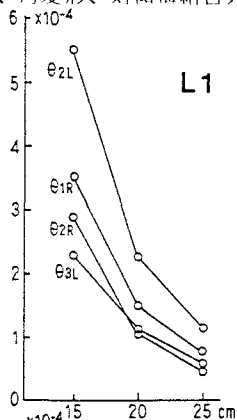


(c) 横構の結合力

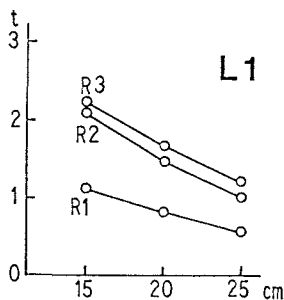
図 4-2 荷重位置による角変形・結合力の推移

4-2 床版厚と結合力、角変形の関係 (図 4-3)

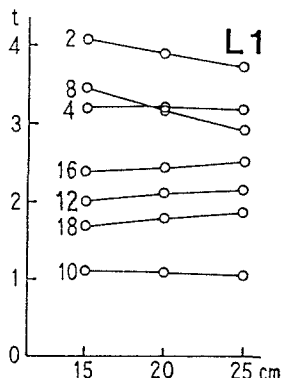
図 4-3 に、鋼部材断面は一定とし、床版厚を 15、20、25 cm と変化させたときの結果を示す。床版厚を増加させると、載荷位置によらずすべての角変形、対傾構結合力が単調に減少する。したがって、床版厚を増すことは対傾構取り付け部やコネクションプレートの疲労防止に大いに寄与するものと思われる。横構結合力は、床版厚を増加させると、支付付近では減少、支間中央付近では増加傾向にあるが、その変化の度合は、角変形、対傾構結合力に比して小さいことがわかる。



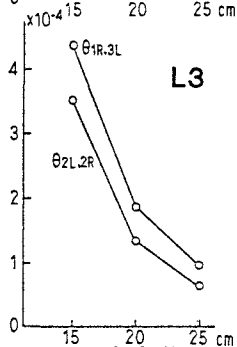
(a) 角変形



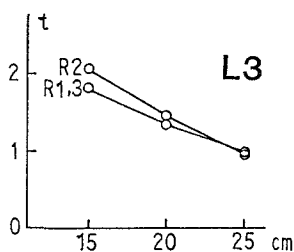
(b) 対傾構の結合力



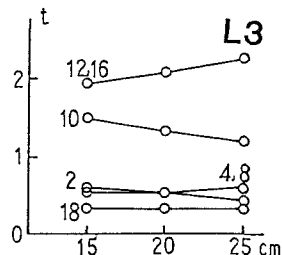
(c) 横構の結合力



(a) 角変形



(b) 対傾構の結合力



(c) 横構の結合力

図 4-3 床版厚の変化による角変形・結合力の推移

4-3 下横構形状と角変形、結合力の関係 (図4-5)

下横構の配置形状として、図4-4に示すa～dの4通りを考えた。さらに横構がない場合も解析し、これをeとした。

偏載荷重 (L1) の場合、a, bの支点およびその近傍の横構結合力 (2, 4, 8) が大きく、偏載荷重を受ける主桁配置の場合には、c, d形式が望ましいといえよう。しかし、対称荷重の場合には、逆に、c, dの支間中央における結合力 (22, 24) は大きくなり、対称荷重の場合にはa, b形式が望ましいといえよう。

aとb、cとdでは対傾構・横構結合力、角変形とも同じ程度であり、ストラットの存在により力学性状が改善されることはほとんどないようである。

横構がない場合 (e)、対傾構結合力はa, bに比較して大きい、角変形は他とあまり変わらない。

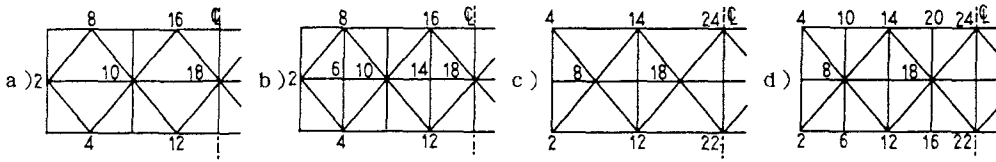


図4-4 下横構形状

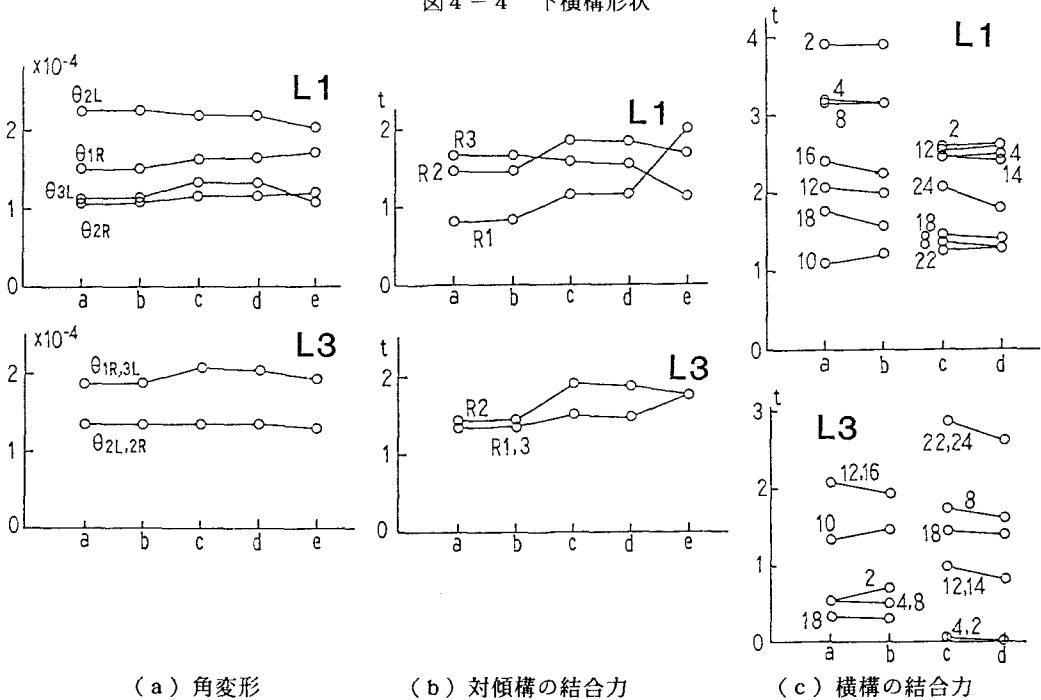


図4-5 下横構配置形状による角変形・結合力の推移

4-4 横構断面積と角変形、結合力の関係 (図4-6)

本節では横桁タイプを対象に、横構の断面積を4通り変化させて、横構の剛性の影響を考察した。表4-1に横構の断面積と寸法を示す。

横構がない場合、横桁結合力は大きいですが、横構断面積を増していくと横構結合力が増加し、横桁結合力は特に耳桁側で大幅に減少する。横構結合力の増加の割合と横桁結合力の減少の割合は、偏載荷重の場合に顕著であることがわかる。角変形は横構断面積にはほとんど依存しないようである。

また、荷重位置に着目して結果をみれば、L1のとき θ_{2L} が最も大きく、L3のときは θ_{1L} 、 θ_{3R} が大きい。このことから、横桁上のコネクションプレートの疲労損傷に角変形が関与するものと考えれば、対称荷重では耳桁上で、偏載荷重では中桁上でその発生の可能性が高いといえよう。

表 4-1 横構断面積と寸法

	A	B	C	D
断面積 (cm ²)	横構なし	13.62	22.74	34.77
寸法 (mm)		100×100×7	130×130×9	150×150×12

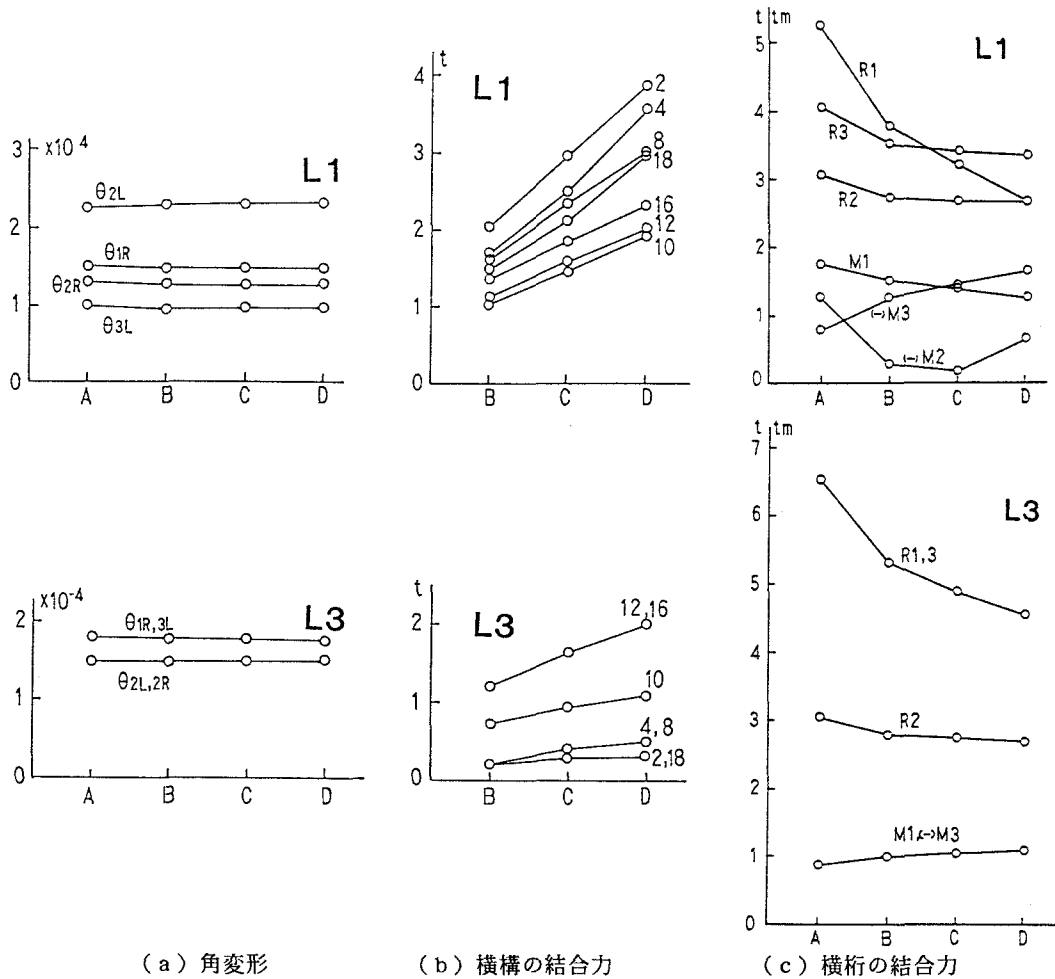


図 4-6 横構断面積の変化による角変形・結合力

4-5 中心角と角変形、結合力の関係 (図4-7、図4-8)

図3-1に示す曲線橋を対象に、中心角を 10° 、 20° 、 30° と変化させて、曲線橋としての挙動を調べた。図4-7に示す角変形は曲線内側偏載荷重の場合 θ_{2L} 、外側偏載荷重の場合 θ_{2R} が大きく、偏載荷重の場合は中桁載荷側のコネクションプレート部に疲労損傷が生じやすいと思われる。ただし、いずれの荷重位置であっても中心角の相違による角変形の変化はほとんどないので、中心角の違いによって損傷の生じやすさが変わることはないと思われる。

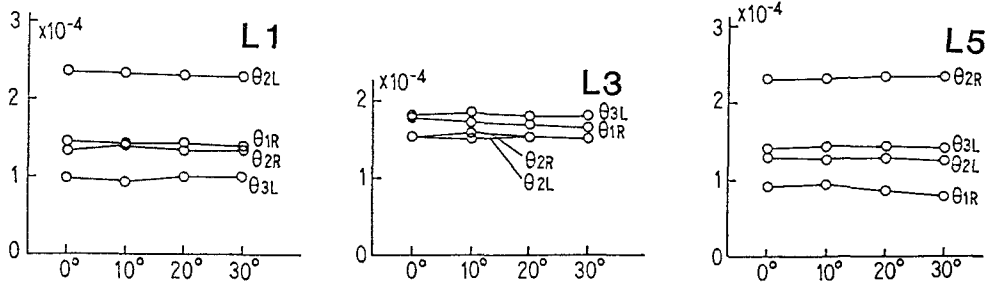


図4-7 中心角の変化による角変形の推移

図4-8に示す横構結合力は内側偏載荷重の場合は減少、外側偏載荷重の場合は増加しており、対称荷重か外側偏載荷重の場合は曲率の大きい橋ほど横構取り付け部で疲労損傷が生じやすいと思われる。

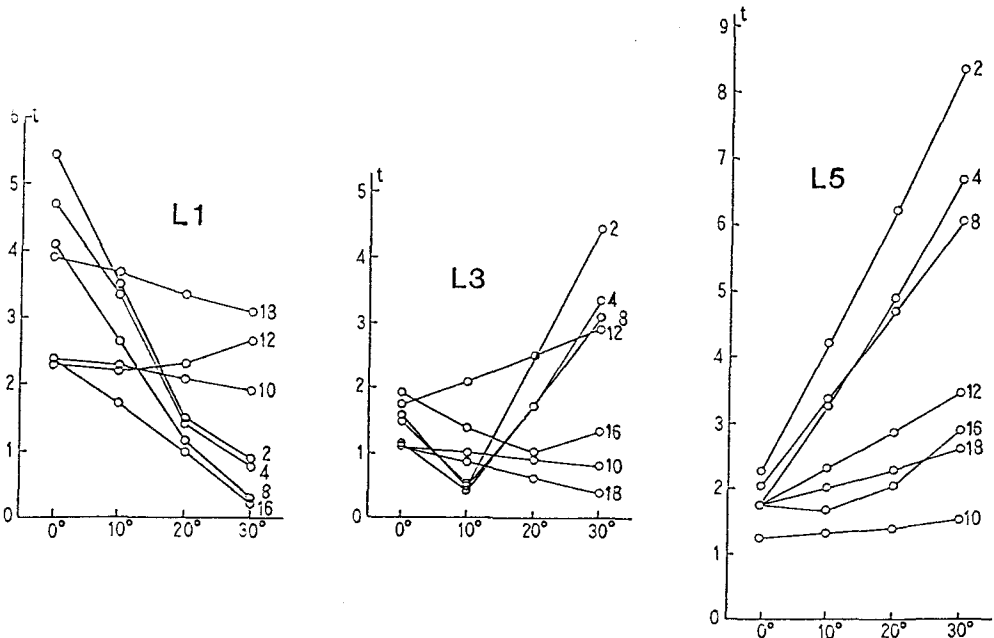


図4-8 中心角の変化による横構結合力の推移

次に、曲線橋における横構ストラットの影響を調べるため、中心角 20° の曲線橋にL1、L3、L5の3通りの荷重を載荷させて、ストラットを有する場合と、無い場合の角変形、結合力を算出した。その結果、荷重ケースにかかわらず、角変形の差は3%以下であり、非常に小さいことがわかった。また、横桁と横構の結合力の差は図4-9に示す程度であり、横構結合力の差は図4-5(c)に示す直線橋の場合と同程度の影響しか与えないことが知られた。

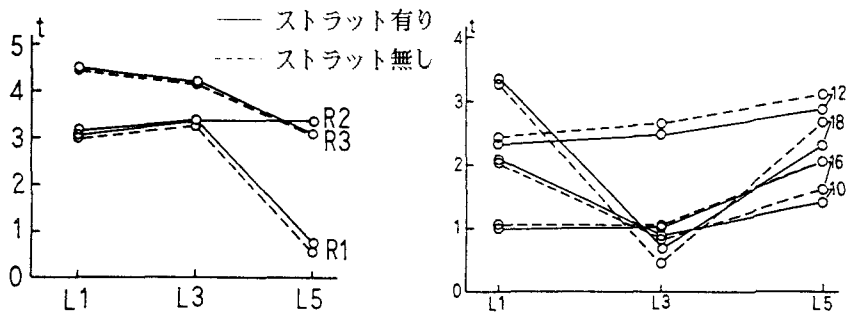


図4-9 横構ストラットの有無による結合力の推移

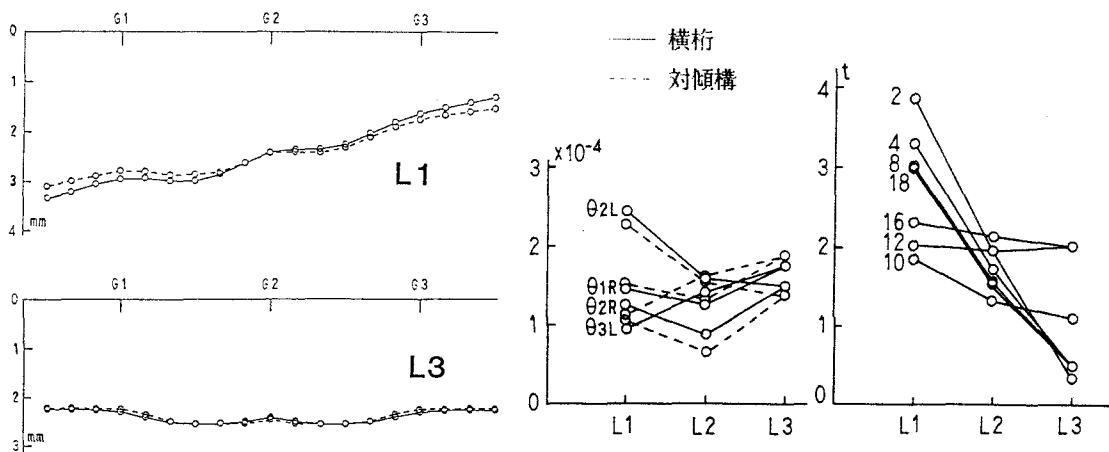
4-6 対傾構タイプと横桁タイプの比較

図3-1に示した直線橋の対傾構タイプと横桁タイプの比較を行った。

図4-9に見られるように、主桁相対変位と角変形の最大値は、L1の場合は対傾構タイプの方が小さいが、対称荷重の場合は逆に横桁タイプの方がわずかながら小さい。

横桁タイプでは、L1の場合支間中央の横構結合力(18番)が支点部の結合力と同程度に大きくなっているのが特徴としてあげられよう。(対傾構タイプは図4-2(c)を参照のこと。)ただし、横桁結合力の影響があるため、横構取付部のガセットに働く応力が対傾構タイプと比較して大きいとは一概に言えない。

ちなみに、本計算例では、対傾構の重量は約260kg、横桁のそれは約410kgであり、横桁の重量は対傾構の重量の58%増ではあるが、両者の結果がこの程度であれば、対傾構結合部における大きな結合力を避ける横桁の方が合理的であるといえよう。



(a) 床版変位の比較

(b) 角変形の比較

(c) 横桁タイプの横構結合力

図4-9 変位・角変形・横構結合力

5 結論

本研究で行った数値計算結果から得られた知見をまとめると次のようである。

- (1) 横桁タイプの場合、コネクションプレートの疲労損傷と床版部の角変形とに相関があるとすれば、対称荷重時には耳桁で、非対称荷重時には中桁で疲労損傷が生じやすいと考えられる。
- (2) 横構は元来、横荷重に対する構造部材として設計されているが、鉛直荷重に対しても、結合力が生じ、特に非対称荷重の場合、大きな結合力となっている。したがって、下横構取り付け部の疲労損傷の原因として非対称荷重の影響を考慮する必要があるだろう。
- (3) 床版厚の増加は角変形と対傾構や横桁の結合力を大幅に減少させるため、全体的に局部応力の発生が抑えられ、各部材の疲労防止に対しては効果が大きいと思われる。
- (4) 下横構の形状に着目して考察すれば、非対称荷重の場合は図4-4のc, dの形状のとき横構結合力が小さく、対称荷重の場合はa, bの形状のとき角変形、結合力が共に小さくなる。車線構成と連動させて横構形状を決めることができれば合理的な設計ができよう。
- (5) 曲線橋においても、直線橋と同じく非対称載荷時の角変形が大きく、コネクションプレート部の損傷が生じやすいと思われる。さらに曲線外側に偏載の場合、横構結合力は飛躍的に増大するため横構取り付け部における疲労発生に注意が必要となろう。
- (6) 対傾構タイプと横桁タイプを比較すると、非対称荷重の場合は対傾構タイプ、対称荷重の場合は横桁タイプの方が角変形の最大値は小さい。しかし、両者の差は大きいものではなく、むしろ局部応力発生箇所の低減の見地からは、横桁の方が有利であるといえよう。

本研究は横桁、対傾構、横構取付部の疲労亀裂発生の原因となる局部的な応力性状を把握するための前段階として、部材の結合力に着目して、その特性を把握するためにパラメトリック解析を行ったものである。本研究で明らかになった変形量や結合力を入力データとして用いることにより、局部的な応力解析が可能となる。

本研究は文部省科研費総合研究(A)：都市高速道路橋の疲労損傷事例調査とその防止対策に関する研究(代表者 中井 博)の一部として行った。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 大塚・吉村・彦坂・平田：床版と桁の偏心結合を考慮した曲線桁橋の解析、土木学会論文報告集、第259号、1977-3、PP11-23
- 2) 大塚・吉村：並列I桁曲線および直線橋における主桁付加応力度と横構部材力について、土木学会論文報告集、第290号、1979-10、PP17-29
- 3) 鋼構造委員会疲労変状調査小委員会：鋼橋の疲労変状調査、土木学会論文集、第368号/I-5、1986-4
- 4) 西脇・増田 他：I型並列合成桁橋の主桁対傾構取合部局部応力に関する一考察、土木学会第42回年次講演会概要集、1987-9
- 5) 大塚・佐賀：横構を考慮した合成I桁橋の立体解析に基づく部材結合力の特性把握、土木学会第43回年次講演会概要集、1988-10、PP328-329

(1988年10月12日受付)