

東京大学 正員 奥村敏恵
 東京都 正員 佐々木貴一
 東大院 〇 学生員 佐藤政勝

1. 序

最近道路橋床版で破損を占めるものが見られるようになりその設計、施工法の再検討が望まれている。特に合成桁においてはコンクリート床版は自動車の輪荷重を支える床組としてのみならず主桁の一部として外かに抵抗する主要な部材要素であり、コンクリート床版の破損は合成桁の耐力にも影響を及ぼす可能性がある。コンクリート床版の破損の原因としては荷重条件に関係して 1) 輪荷重の大きさの増大とその輪荷重載荷頻度の増加 構造上の問題に関して 2) 床版の版厚不足 3) 鉄筋の許容応力度の設定、配筋鉄筋量の決定等の床版自体関係するものと 合成桁全体に関係する 4) 主桁のたわみ差によりコンクリート床版に付加される応力 5) スタッド・ジベルを用いた不完全合成桁と完全合成桁との相異 6) 床版の版作用と桁作用との組み合わせ応力等が指摘される。

1) 2) 3) の問題については建設省、日本道路協会を中心に検討がなされ本年度改訂された「道路橋示方書(日本道路協会)」では旧示方書の不備な点を補っている。しかしながら 4) 5) 6) の問題については十分な検討がなされておらず未解決の点もある。これらの問題に対しては、主桁の本数とその剛度、横桁の剛度とその間隔、コンクリート床版の剛度と構造要素として多くの要因があるため、体系的にながめその理論的な解析を行い、実験により解析の妥当性を検討する必要がある。上述の主旨により 1) 主桁の鋼桁、合成桁, 3) 主桁の鋼桁、合成桁, 2) 主桁の合成桁の実験と東大大型構造物試験室で実施した。本報告ではこの実験結果と理論値の比較検討を行い、コンクリート床版破損の原因について力学的立場より考察したものである。

2. 供試体と材料試験

供試体は1等橋活荷重合成ゲタ標準設計を原案として断面寸法を決定した。特にコンクリート床版と鋼桁の断面特性が実際の合成桁と類似するように、コンクリート床版には最大骨材寸法25mmの普通生コンクリートを用いた。1主桁合成桁の一般図はFig. 1, Fig. 2, 3には3主桁合成桁の鋼桁と床版の一般図を示す。鋼桁と床版との結合材には16mmのスタッド・ジベルを2本並列して使用している。Fig. 4に各床版に使用したコンクリートの応力-歪曲線の実験値を実線で示す。この図からコンクリート初期弾性係数を $E_{ci} = 3.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とし、最大圧縮力に至るまで放物線と仮定した応力-歪曲線を破線で表している。鋼桁にはSM41Aを使用し、鉄筋にはSD30を使用した。

Table 1 Comparison of test with incomplete and complete Composite Beam Theory

Composite Beam		N	Stress kg/cm^2				Deflection cm
			σ_{Cu}	σ_{Cl}	σ_{Su}	σ_{Sl}	
1-Main Girder	A Test Data	7	78	42	336	1455	1.75
	B Incomplete	7	82	42	401	1436	1.76
	C Complete	7	83	45	319	1418	1.71
	D Complete	8	80	46	370	1430	1.78
		A/B (%) B/C (%)		95/100 99/93	100/126 101/103	84/101 101/103	99/103 101/103
2-Main Girder	A Test Data	8	70	34	357	1200	1.70
	B Incomplete	8	70	33	353	1133	1.62
	C Complete	8	71	35	286	1118	1.58
	D Complete	9	69	36	324	1129	1.63
		A/B (%) B/C (%)		100/101 101/95	102/101 95/124	101/106 101/103	105/105 101/103
3-Main Girder	A Test Data	8	75	42	420	1130	0.58
	B Incomplete	8	75	42	421	1140	0.58
	C Complete	8	76	45	359	1125	0.55
	D Complete	9	73	45	402	1138	0.58
		A/B (%) B/C (%)		100/101 99/93	100/117 95/101	100/101 101/103	99/105 101/103

σ_{Cu} = Upper Fiber Compressive Stress of Concrete Slab
 σ_{Cl} = Lower Fiber Compressive Stress of Concrete Slab
 σ_{Su} = Upper Fiber Compressive Stress of Steel Girder
 σ_{Sl} = Lower Fiber Tensile Stress of Steel Girder

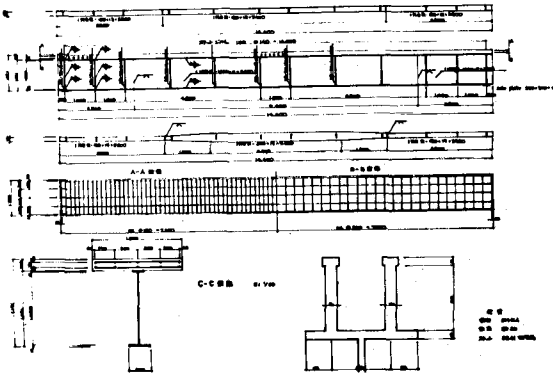


Fig 1 1-Main Girder Composite Beam

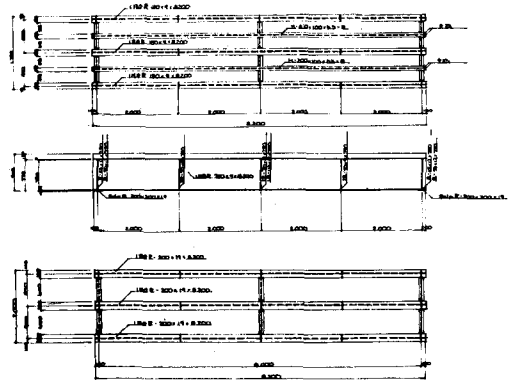


Fig 2 3-Main Girder Composite Beam (Girder)

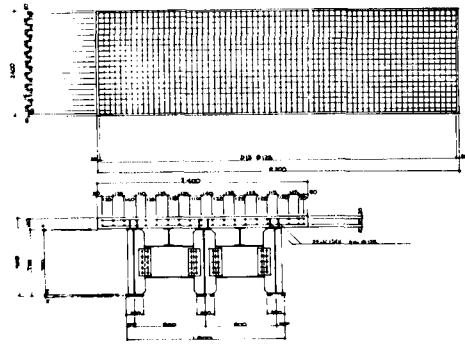


Fig 3 3-Main Girder Composite Beam (Slab)

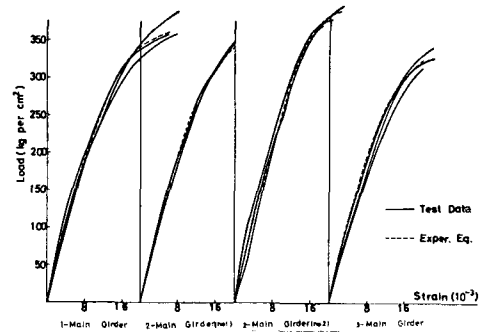


Fig 4 Stress-Strain Curve of Concrete

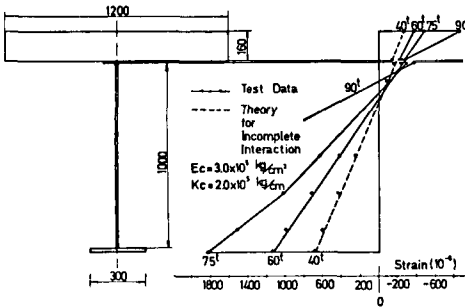


Fig 5 Strain Distribution (Mid Span)

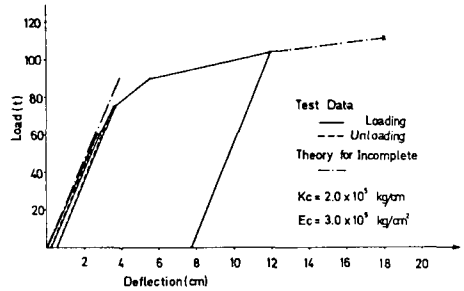


Fig 6 Load-Deflection Curve (Mid Span)

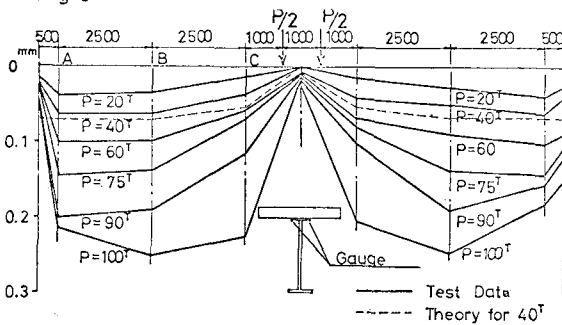


Fig 7 Load-Slip Curve of Stud Nibel

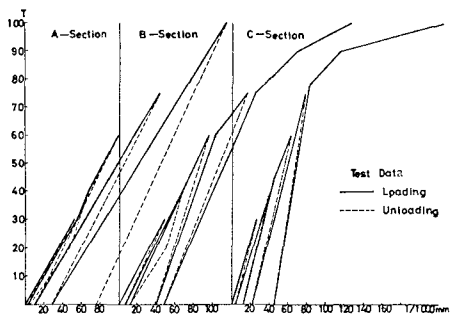


Fig 8 Load-Slip Curve of Stud Nibel

3. 実験結果と理論値の比較検討

3-1 スタッド・シベルを用いた合成桁の応力性状

1 主桁合成桁のD断面の実験値と

中央2点荷重 $40t$ の時の床版のコンクリート弾性係数 $E_c=3.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、スタッド・シベルの剛性 $K_c=2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}$ と仮定した不完全合成桁としての計算値をFig.5に示す。Fig.6には中央点のたわみをFig.7にはコンクリート床版と鋼桁のズレをFig.8には各断面に於ける荷重-ズレ曲線を示す。Table 1には3つの合成桁に対してコンクリート床版の上縁、下縁、鋼桁上フランジ下縁と下フランジ下縁に於ける応力値と桁中央点のたわみについて不完全合成としての計算値と不完全合成桁と同一条件の完全合成としての計算値とコンクリートの弾性係数比を1だけ大きくした完全合成としての計算値を対比してある。Fig.5曲げ歪分布Fig.6たわみ Fig.8荷重-ズレ曲線から鋼桁の下フランジの応力値が降伏応力値に達するまでは合成桁としては弾性的な挙動を示すことが認められる。合成桁の終局耐力をBS, AASHOに従って計算すると(Fig.9b)1主桁合成桁に対しては $100t$ 、2主桁合成桁に対しては(その2)に対しては $188t$ となる。実験からは1主桁合成桁に対しては $90t$ 強、2主桁合成桁に対しては $180t$ 前後となる。若干計算値の方が大きめになるので、鋼桁の完全降伏状態の時のコンクリート床版の応力分布をFig.9cの様仮定すると終局耐力は1主桁合成桁に対して $91t$ 、2主桁合成桁(その2)に対して $174t$ となる。

Fig.9 Stress Diagram for a Composite Beam

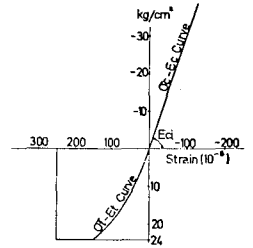


Fig. 10 Stress and Strain Curve of Concrete

Table 2 Design and Crack Moment

	Slab Thickness cm	Reinforce cm ² /m	Design Moment t·m/m	Crack Moment t·m/m	Design Load t	Crack Load t	Test Data t
2-Main Girder	16.0	13.20	2.140	2.084	8.6	8.4	7.5~10
2-Main Girder	21.0	19.00	3.667	3.829	15.5	16.2	15~20
3-Main Girder	13.0	10.14	1.247	1.320	7.6	8.0	6~8

Table 3 Calculation and Test Moment per 1t

Dimension	Slab Thickness cm	Reinforce cm ² /m	by Spec -calon (A) t·m/m	by Simple Supported (B) t·m/m	by End Moment (C) t·m/m	Calculation Moment (B-C) t·m/m	Test Data t·m/m
2-Main Girder	16.0	13.2	0.214	0.270	-0.037	0.233	0.230
2-Main Girder	21.0	19.0	0.214	0.270	-0.021	0.249	0.225
3-Main Girder	13.0	10.14	0.165	0.218	-0.050	0.168	0.165

Fig. 11 Load and Strain Curve (slab thickness 13cm)

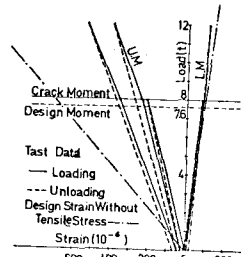


Fig. 11 Load and Strain Curve (slab thickness 13cm)

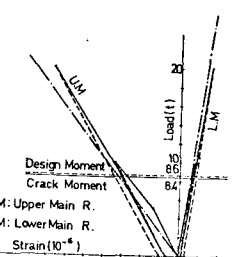


Fig. 12 Load and Strain Curve (slab thickness 16cm)

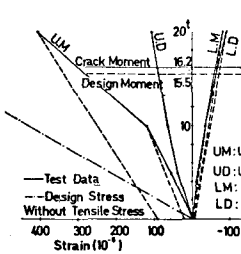


Fig. 13 Load and Strain Curve-slab thickness 21cm

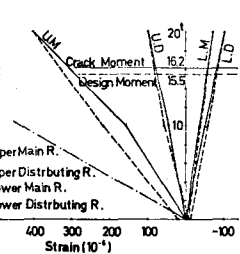


Fig. 14 Load and Strain Curve-slab thickness 21cm

3-2 床版の応力

Fig.11には3主桁合成桁(床版厚13cm)の主桁間の中央に荷重した時の荷重直下の鉄筋の荷重-歪分布を示す。Fig.12, 13には同様に2主桁合成桁床版厚16cm, 21cmの荷重-歪分布を示す。Table 2には各床版に対して、引張応力を無視した複鉄筋矩形梁として鉄筋の計算応力が 7400 kg/cm^2 になるモーメントを設計モーメントとし、Fig.10のごとく仮定した応力-歪曲線を用いてコンクリートの最大引張歪 250×10^{-6} になるモーメントを亀裂モーメントと対比してある。Table3には荷重 $1t$ に対して、道路橋橋示方書による計算モーメントと版理論による計算モーメント

Table 2には各床版に対して、引張応力を無視した複鉄筋矩形梁として鉄筋の計算応力が 7400 kg/cm^2 になるモーメントを設計モーメントとし、Fig.10のごとく仮定した応力-歪曲線を用いてコンクリートの最大引張歪 250×10^{-6} になるモーメントを亀裂モーメントと対比してある。Table3には荷重 $1t$ に対して、道路橋橋示方書による計算モーメントと版理論による計算モーメント

トと実験値を示す。版理論による計算値は床版が橋軸方向に無限に長い版が主桁上で単純支持されていると仮定したモーメントと主桁上のコンクリート床版の鉄筋の歪実験値より主桁上の端モーメントを求めその端モーメントによる床版中央のモーメントとの和として求めた。又実験値は亀裂モーメント以下の小さい荷重の範囲でFig.10の歪-応力曲線を用いて抵抗モーメントを求めそれを荷重で割って1/m当りのモーメントとした。 Fig.14には2主桁合成桁の橋軸方向1/4点附近の主桁上に4点対称載荷してコンクリート床版に圧縮応力を作用させた後床版中央に載荷した時Fig.13と同じ断面の荷重-歪を示したものでありこのFig.13とFig.14の鉄筋の歪-荷重曲線はほぼ等しく桁応力と床版の応力は重ね合せが成立つことが確認できる。

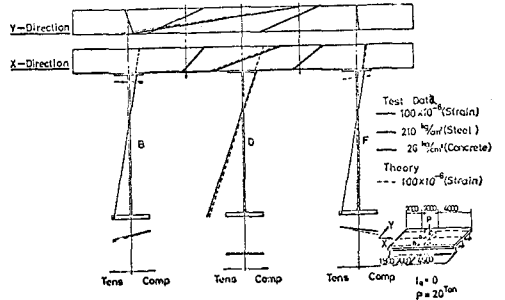


Fig. 15 Strain Distribution of Beam and slab

3-3 主桁のためみ差による床版の附加応力
橋梁の橋軸直角方向の剛性が無限大でないかぎり集中荷重が作用すると主桁にためみ差が生じコンクリート床版には附加応力が生じる。 Fig. 15は横桁が存在しない場合で中央に20^t集中載荷した時の中央から50cm離れた断面の歪分布であり、 Fig.16は横桁が橋軸中央に存在している場合で中央に20^t集中載荷した時同じ断面の歪分布である。 Fig. 15, 16に点線で示してある計算値は鋼桁部分については床版を無限数横桁として主桁の捻りを考慮して応力解析を行ったものであり、床版内の歪分布は主桁のためみ差による附加応力を外桁と橋軸端で単純支持と仮定して計算したものを弾性係数で割って歪として求めたものである。

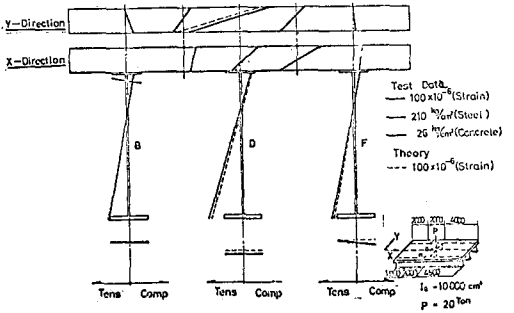


Fig. 16 Strain Distribution of Beam and Slab

4. まとめ
1) スタッド・ジベルを用いた合成桁は鋼桁の下フランジの応力度が降伏応力度に達するまでは弾性的挙動を示し、RC床版のコンクリート弾性係数比を1程度低下させて完全合成桁に類似している。
2) 終局耐力に対してBS, AASHOの規定による計算値は若干大きめであるが一応の目安となる。
3) コンクリート床版に於いて桁作用と床版作用による応力の重ね合せが成立することが確認された。
4) 主桁のためみ差によるコンクリート床版に生じる附加応力に対しては大きな剛度を持つ横桁を長間隔に配置するより横桁間隔を密に配置するのが好ましい。その意味では床版は連続した横分配作用を持つものでありコンクリート床版の剛度は桁全体の構造要素として考える必要がある。
5) 偏心荷重が作用すると各主桁のためみ差によりコンクリート床版に附加応力が生じ、その上に輪荷重による応力が加わって局部的な大きな応力がコンクリート床版の破壊の一因と思われる。

5. 文献

T.P.Taylor, H.Matlock
B.S., c p 117 Part 2
S.P.Timoshenko, S.Woinowsky-Krieger

A finite Element Method of Analysis for Composite Beams
Beam for Bridge 1967 British Standards Institution
Theory of Plates and Shells 1940

January 1968