

1. ま え が き

道路橋床版の大部分を占める鉄筋コンクリート床版において、近年破損の事例がみられるようになり、その補修、補強対策が検討される一方、破損原因の追求から、旧示方書にもとづいて設計した鉄筋コンクリート床版に関して、その床版厚の不足、配力鉄筋量の不足、鉄筋の引張許容応力度の過大などが指摘され、昨年度の示方書の改訂の際にこれらの不備な点については改正された。

しかしながら、現示方書においても、鉄筋コンクリート床版の設計曲げモーメント式は床版を支持する桁のためみ差はないという仮定のもとに求められたものであり、支持桁のためみ差により鉄筋コンクリート床版に生じる曲げモーメントは一般には考慮されていない。都市部や自動車専用道路に用いられている多主桁合成桁橋においては、交通状態によっては偏載荷重がきびしくなり、主桁のためみにより鉄筋コンクリート床版に生じる橋軸直角方向の曲げモーメント（以下、床版の付加曲げモーメントと呼ぶ）が大きくなることが予想され、鉄筋コンクリート床版破損の一因とも考えられる。

本論文は、多主桁合成桁橋を曲げ作用を考慮した鉄筋コンクリート床版と並列多主桁から成る構造物として応力解析を行ない、鉄筋コンクリート床版の剛度、主桁の剛度、間隔および本数と付加曲げモーメントの相関性を求め、更に横桁、対傾構、横構を考慮した応力解析および横桁と主桁との連結部における剛度の低下を考慮した応力解析により、これらの部材の構造要素間の力学的な協力作用を明確にし、この解析結果と道路橋示方書の合成桁設計指針との検討を行ったものである。

2. 理 論 解 析

(1) 単純多主桁合成桁橋の応力解析

変位関数を面内変形に対して一次式で、曲げ変形に対して三次式で仮定すると板要素の変位は次のようになる

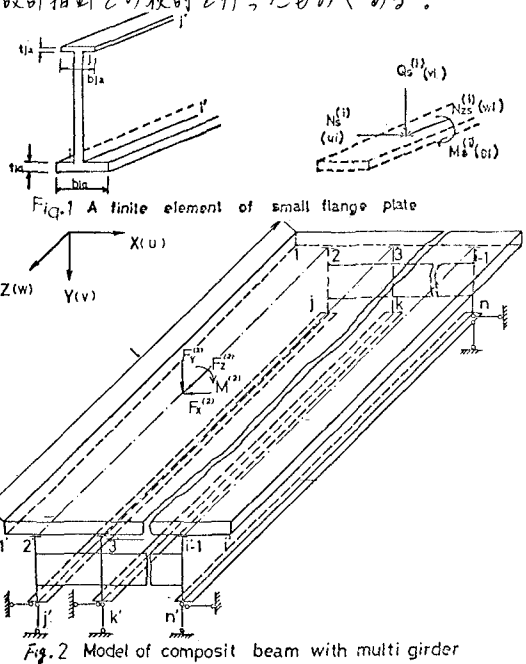
$$w(z, s) = \left(1 - \frac{s}{b_{ij}}\right) w_i(z) + \frac{s}{b_{ij}} w_j(z)$$

$$u(z, s) = \left(1 - \frac{s}{b_{ij}}\right) u_i(z) + \frac{s}{b_{ij}} u_j(z)$$

$$v(z, s) = \left(1 - \frac{3}{b_{ij}^2} s^2 + \frac{2}{b_{ij}^3} s^3\right) v_i(z) + \left(s - \frac{2}{b_{ij}} s^2 + \frac{1}{b_{ij}^2} s^3\right) \theta_i(z) \\ + \left(\frac{3}{b_{ij}^2} s^2 - \frac{2}{b_{ij}^3} s^3\right) v_j(z) + \left(-\frac{1}{b_{ij}} s^2 + \frac{1}{b_{ij}^2} s^3\right) \theta_j(z)$$

ここで、 b_{ij} は要素 i の板幅を示す

変位関数は変数分離されているから、Galerkin法によれば s が消去され節線変位と節線外力の関係式が連立常微分方程式の形で導き出される。



等方性、等板厚の要素に対する剛性マトリックスが文献(2)に示されている。

Fig.1に示すようなフランジを持つ鋼主桁に対してはフランジを棒材として、面積を節点に置き換えて、鋼主桁要素の剛性マトリックスを誘導し、鉄筋コンクリート床版に対しては、主鉄筋量と配力鉄筋量が等しいものとし鉄筋量による剛性の増加を考慮した等方性版、等板厚を仮定して、要素の剛性マトリックスを誘導した。

Fig.2に示すような単純多主桁合成桁橋の橋端における境界条件を満たすように節線上の点の変位を橋軸方向に対しては $\cos$ のフーリエ級数で、鉛直、横方向、回転に対しては $\sin$ のフーリエ級数で表わす。節線荷重に対しても、同様な取扱いは行なうと、各節線上の点の変位と荷重は全体の剛性マトリックス $[K]$ によって結びつけられる。

(2) 横桁、対傾構、下横構の力学的取扱

横桁の剛性マトリックスは横桁を平面ラーメンの部材要素として求めることができ、対傾構の剛性マトリックスは、対傾構の面内方向の断面二次モーメントが等しくなるような等価板厚を求め、次にこの等価板厚に対する平板の二次元平面応力問題として求めた。 $[K]$ を横桁あるいは対傾構の剛性マトリックス $[K]$ を前節の多主桁合成桁橋の剛性マトリックスとすれば、次の関係式が成立する。

$$\{F\} - \{[K]\{\delta\}\} = [K]\{\delta\} \quad \text{より}$$

$$\{F\} = ([K] + [K])\{\delta\}$$

上式が横桁あるいは対傾構の力学的効果を考慮した多主桁合成桁橋のマトリックス表現式となる。ここでは、単純多主桁合成桁橋の剛性マトリックス $[K]$ は級数表示であり、横桁あるいは対傾構の剛性マトリックスも級数表示にする必要がある。

開断面薄肉構造物が下横構によって閉じられた箱型を形成するとして、下横構に対して等価板厚を求め、準閉断面構造物として、下横構の力学

$$\begin{Bmatrix} \sum F_{z,i}^{(m)} \cos\left(\frac{m\pi z}{l}\right) \\ \sum F_{x,i}^{(m)} \sin\left(\frac{m\pi z}{l}\right) \\ \sum F_{y,i}^{(m)} \sin\left(\frac{m\pi z}{l}\right) \\ \vdots \\ \sum M_n^{(m)} \sin\left(\frac{m\pi z}{l}\right) \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} \sum W_i^{(m)} \cos\left(\frac{m\pi z}{l}\right) \\ \sum U_i^{(m)} \sin\left(\frac{m\pi z}{l}\right) \\ \sum V_i^{(m)} \sin\left(\frac{m\pi z}{l}\right) \\ \vdots \\ \sum \theta_n^{(m)} \sin\left(\frac{m\pi z}{l}\right) \end{Bmatrix}$$

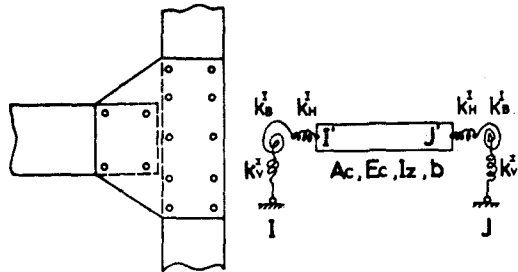
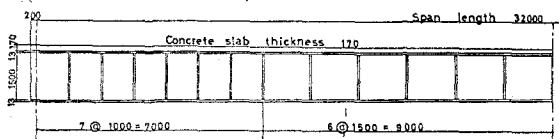
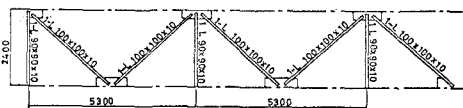
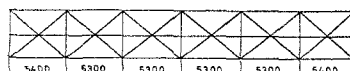


Fig 3 The cross beam with spring model

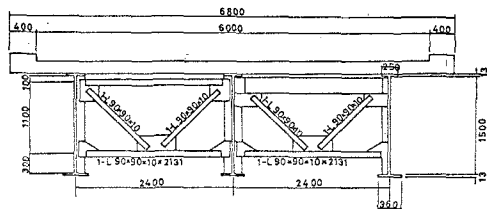
Table 1 R_{11} Matrix	Table 2 K_{22} Matrix
$\begin{bmatrix} K_H^I & & & & \\ & K_V^I & & & \\ & & K_H^J & & \\ & & & K_V^J & \\ & & & & K_H^J \\ & & & & & K_V^J \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_c E_c + K_H^I & 0 & 0 & -A_c E_c & 0 & 0 \\ 12 E_c I_z K_V^I & 6 E_c I_z & 0 & 12 E_c I_z & 6 E_c I_z & 0 \\ 4 E_c I_z K_H^I & 0 & -6 E_c I_z & 2 E_c I_z & 0 & 0 \\ A_c E_c & K_H^I & 0 & 0 & & \\ 12 E_c I_z K_V^I & 6 E_c I_z & 0 & 12 E_c I_z & 6 E_c I_z & 0 \\ 4 E_c I_z K_H^I & 0 & -6 E_c I_z & 2 E_c I_z & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Table 3 $K_{12} = K_{21}$ Matrix	
$\begin{bmatrix} -K_H^I & & & & \\ & -K_V^I & & & \\ & & -K_H^J & & \\ & & & -K_V^J & \\ & & & & -K_H^J \\ & & & & & -K_V^J \end{bmatrix}$	Sym.



(a) Side view of main girder



(b) Plane view of lower lateral bracing



(c) Cross section

Fig 4 Plane view and cross section of composite beam having 3- main girders (Sample number A41-15-17-240-32)

的効果を取扱っている。横桁と主桁の連結が十分に剛ではなく、連結部において、互いに変位および回転を生じる場合には、連結による剛性の低下を考慮する必要がある。ガゼットによる結合をFig.3のようにモデル化すると横桁の剛性マトリックスは次のように表わされる。

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & -K_{12} & K_{22} & K_{21} \end{bmatrix}$$

ここで、 K_{11} 、 K_{12} 、 K_{21} および K_{22} は Table 1~3 に示す。

3. 計算結果の検討

(1) 床版の剛度、主桁の剛度、間隔および本数と床版の付加曲げモーメントの関係

Fig.4 に道路橋標準設計図集(2)の分類番号 1-60-32 を参考にして断面を決めた計算例の3主桁合成桁橋の寸法を示す。Fig.5 には径間32mの3主桁合成桁の床版厚さを12cm, 17cm, 22cm, 27cmとし、これに対応して主桁間隔を1.2m, 2.4m, 3.6mとして、それぞれ10[±]集中載荷したときの付加曲げモーメントを示す。Fig.6(a)にはコンクリート床版厚さ17cm主桁間隔2.40mとして、鋼桁断面二次モーメント I_s を $0.62 \times 10^6 \text{cm}^4$ から $2.42 \times 10^6 \text{cm}^4$ までの範囲を変化させた場合の径間中央断面における床版の付加曲げモーメントを示し、Fig.6(b)には3主桁合成桁橋の外主桁と内主桁との剛度が異なる場合の外主桁と内主桁との剛度比と床版の付加曲げモーメントの関係を示す。Fig.7に、Fig.4の合成桁橋の主桁本数を増加させた多主桁合成桁の径間中央断面の付加曲げモーメントを床版のみの場合は実線で、径間中央に横桁を取り付けた場合を破線で示す。Fig.5,6から、床版厚さが増加するほど、主桁間隔が増加するほど、主桁の剛度が低下するほど、またFig.7から主桁の本数が増加するほど床版の付加曲げモーメントが大きくなる傾向が見られる。内主桁に対する外主桁の剛度比が大きくなると床版の付加曲げモーメントは大きくなるが、その増加率は内主桁に対する外主桁との剛度比の増加の15%程度である。

(2) 横桁、対傾構および下横構の剛度と配置が床版の付加曲げモーメントにおよぼす影響

Fig.8(a)には3主桁合成桁の径間中央に横桁を取り付けた場合の径間中央の中桁上および外桁上に10[±]集中載荷したときの径間中央断面の付加曲げモーメントを実線で、載荷桁の荷重分配率を破線で示す。Fig.8(b)には径間1/4点の中桁上と外桁上に10[±]集中載荷したときの径間1/4点断面の付加曲げモーメントを実線で示す。Fig.8(a)から横桁の格子曲げ剛度が10附近で、付加曲げモーメントは床版のみの場合の各程度に急激に減少し、載荷中桁の荷重分配率もほぼ一定となる傾向が確認され、Fig.8(b)より載荷位置から離れた横桁は曲げ剛度を大きくしても、載荷位置付近に生じる床版の付加曲げモーメントに効果が少ないことが確認できる。Fig.9に横桁の間隔を変えたときの載荷位置の床版の付加曲げモーメントを示す。Fig.10に示す荷重分配率と下横構の等価板厚の関係から対傾構と下横構を設けた場合は非載荷桁の浮き上がりが生じなくなり、載荷桁の荷重分担が少なくなる。Fig.4に示した下横構の等価板厚0.037m以上を用いるとほぼ荷重分配率が一定となる傾向がある。Fig.11(a)および(b)には3主桁合成桁橋の径間を8mから48mまで変えた場合の径間中央断面および径間1/4断面の付加曲げモーメントを示す。Fig.11(c)には3,4,5,6主桁合成桁橋に道路橋示方書の丁荷重を径間中央に一台又は二台載荷した場合の正の最大付加モーメントを床版のみの場合は実線で、横桁を径間中央に取り付けた場合は破線で示す。ここで一点鎖線は径間中央断面で最も大きな主桁のたわみを径間長で割ったものを示す。道路橋示方書による32mの活荷重合成桁橋のたわみ許容量は径間長の1/625である。

(3) 横桁と主桁との連結部の剛性が横桁の分配効果におよぼす影響について

Fig.12およびFig.13には径間中央に横桁を取り付けた主桁鋼桁について、Fig.3の水平、鉛直、曲げスプリング剛度を横桁全強剛度の $1.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^2$ 倍の範囲で変化させた場合の中主桁のたわみ分配率および横桁の曲げモーメントを示す。Fig.14およびFig.15には実験⁶⁾に用いた主桁合成桁の中主桁のたわみ分配率、床版の付加曲げモーメントおよび横桁の曲げモーメントを示す。Fig.16およびFig.17にはFig.4に示す主桁合成桁についての計算結果を示す。ここで、横桁全強剛度1.0とは水平荷重に対しては $4EcI_x/b$ 、鉛直荷重に対しては $12EcI_z/b$ 、曲げモーメントに対しては $4EcI_y/b$ を意味する。Table 4には水平、鉛直、曲げのいずれか要素だけスプリング剛度比を 1.0×10^2 にした場合の各主桁のたわみ、中主桁のたわみの分配率、床版付加曲げモーメントを示す。この表から、横桁の分配効果は結合部の鉛直と曲げのスプリング剛度に大きく影響されることがわかる。著者の実験結果から横桁に対する曲げスプリング剛度も逆算すると $0.52 \times 10^9 \text{ タン/センチ}$ 程度となる。文献7のウェブのみを高力ボルトで連結した場合の曲げスプリング剛度を実験値より求めると $0.89 \times 10^9 \text{ タン/センチ}$ 程度となっている。

Table 4 Spring's stiffness and distribution of def.

Spring's stiffness $K = \alpha K_0$	K_H	1.0×10^2	1.0×10^2	1.0×10^2	1.0×10^2	1.0×10^2
	K_V	1.0×10^2	1.0×10^2	1.0×10^2	1.0×10^2	1.0×10^2
	K_θ	1.0×10^2	1.0×10^2	1.0×10^2	1.0×10^2	1.0×10^2
deflection (cm)	δ_1	0.168	0.138	0.168	0.139	0.139
	δ_2	0.205	0.265	0.206	0.263	0.263
	δ_3	0.168	0.138	0.169	0.139	0.139
distribution	ϕ	0.379	0.490	0.380	0.486	0.486
moment (tm/m)	M_θ	0.062	0.191	0.062	0.186	0.186

4. 解析結果と道路橋示方書の合成桁設計指針との比較検討

(1) 道路橋示方書、同解説では、横桁は桁の支間が10m越える場合には設けなければならない、その間隔を20mを越えてはならないとある。この規定を適用すると径間10mから40mの多主桁合成桁に対して横桁は径間中央に1本のみ取り付けるといいますが、Fig.8(b)、Fig.11(b)より明らかなように径間中央の横桁のみでは、径間4点に集中載荷した場合の載荷位置断面の床版の付加曲げモーメントには効果がないので荷重分配横げたの間隔20mは振さざるように思われる。Fig.9から横桁間隔を6.2mにすると径間中央に横桁がある場合の径間中央断面の床版の付加曲げモーメントと同程度となる。格子曲げ剛度が比較的小さいが荷重分配効果をもつ対傾構と格子曲げ剛度が10以上の荷重分配横桁を6m程度の間隔に交互に配置すると床版の付加曲げモーメントに効果的である。

(2) 道路橋示方書の解説では、荷重横分配横桁を20m間隔以内に配置し、現行のたわみ許容量を越えない設計荷重に対して、床版の付加曲げモーメントは設計曲げモーメント(道示6.1.4)の15%までを許容するものとしているが、Fig.11に示されるように、横桁の取り付け位置から離れた断面では床版の設計曲げモーメントの50%程度の付加曲げモーメントが予想される。前項(1)の対傾構と横桁の配置を行った場合でも主桁本数および巾員が振くとなると、T-荷重の載荷位置により付加曲げモーメントは大きくなり、巾員12mの6主桁合成桁では約20%となるので、道示6.1.4(3)の規定を主桁本数が6主桁以上になるような振巾員の合成桁橋についても適用する必要がある。構造的には振巾員の多主桁合成桁橋については上下車線の境界部を連続しないようにするとよい。

(3) 多主桁合成桁橋を格子構造として、荷重分配を計算する場合、横分配効果をもつ対傾構あるいは横桁の全断面の曲げ剛度を考慮しているので、対傾構あるいは横桁と主桁との連結部は部材断面の全強で設計するのが好ましい。この場合は、連結による横桁の剛度の低下はないものと思われる。

5. 文 献

- 1) 奥村敏恵、佐々木貴一、佐藤政勝：鉄筋コンクリート床版の剛度および横桁、横構の多主桁橋

および影響について、第28回年次学術講演会講演集(土木学会) I-109

- 2) 奥村敏恵, 坂井藤一: 薄肉平板より成る立体的構造物の静力学的解析に関する一方法とその応用 土木学会論文報告集 176号(1970)
- 3) 三本木茂夫, 吉村信敏: 有限要素法による構造解析プログラム、日本鋼構造協会編、培風館
- 4) 田原保二, 香掛哲男: 米白橋(合成桁)に関する実験的研究、土木研究所報告、昭和29年11月
- 5) C.F. Kollbrunner, K. Basler: *Torsion in Structures*, Springer-Verlag, 1969
- 6) 佐藤政勝: 合成桁の力学的挙動に関する研究、東京大学工学部学位論文、昭和48年3月
- 7) 国広哲男, 他2名: 床組連結部の応力伝達に関する実験的研究、土木技術資料13-12

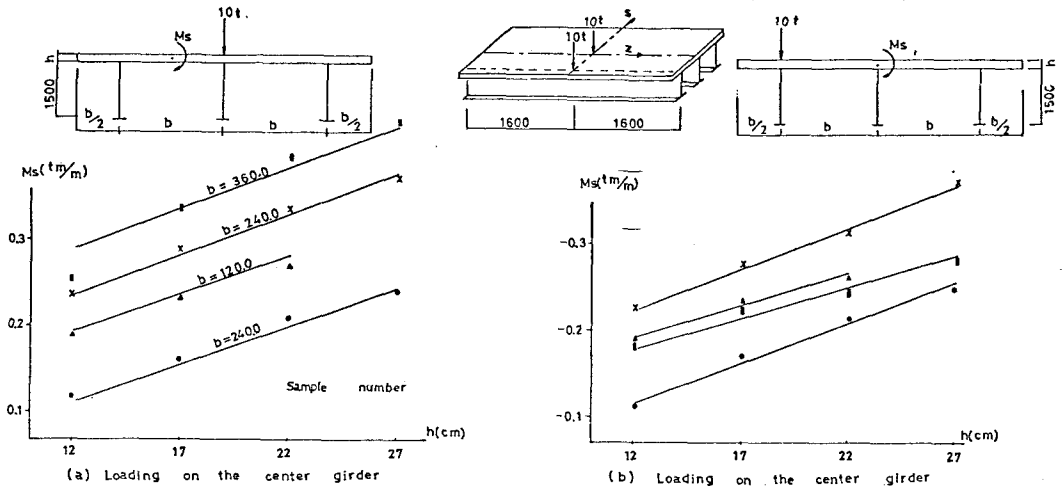


Fig. 5 The additional bending moment M_s of the s direction on the center line

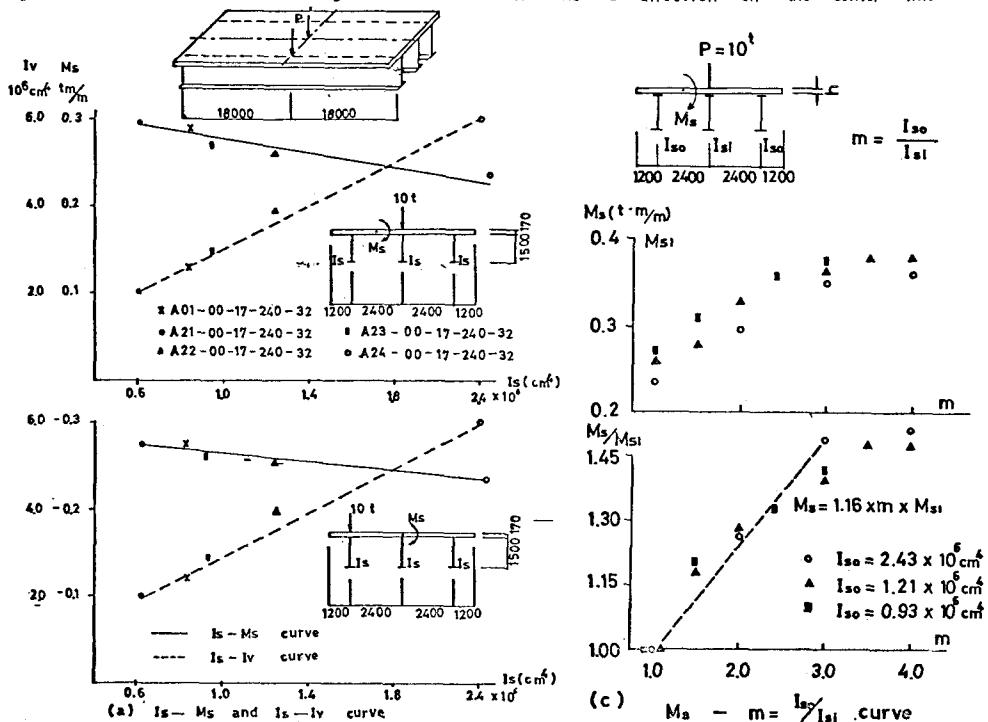


Fig. 6 The additional bending moment M_s of the s direction on the center line

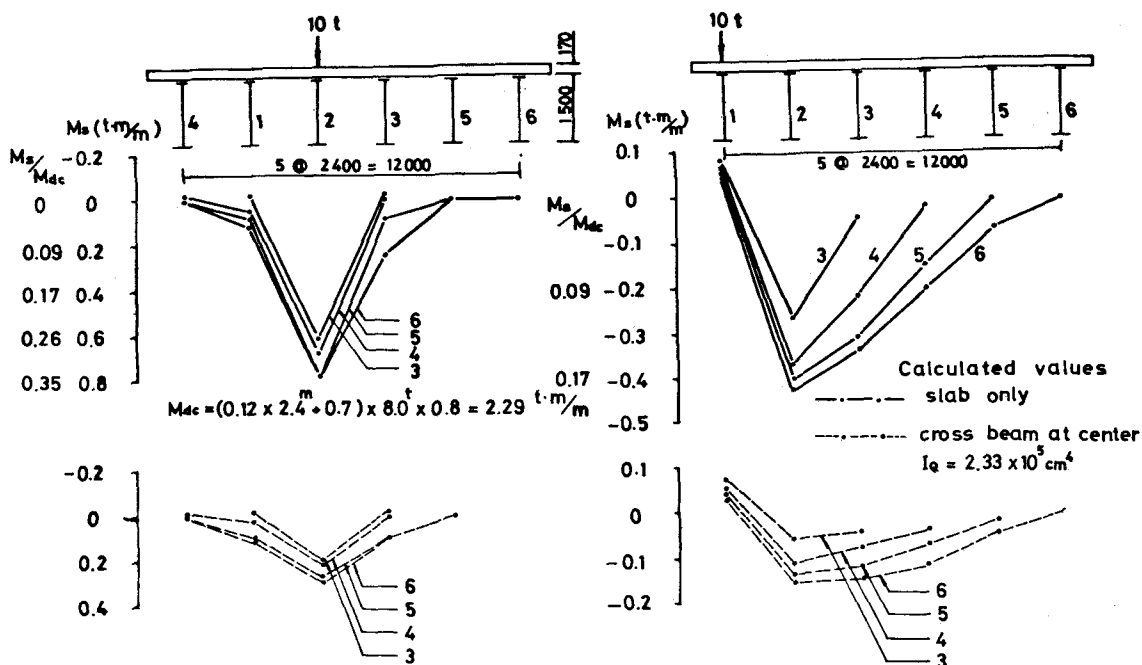


Fig 7 The additional bending moment of composite beams with multigirder

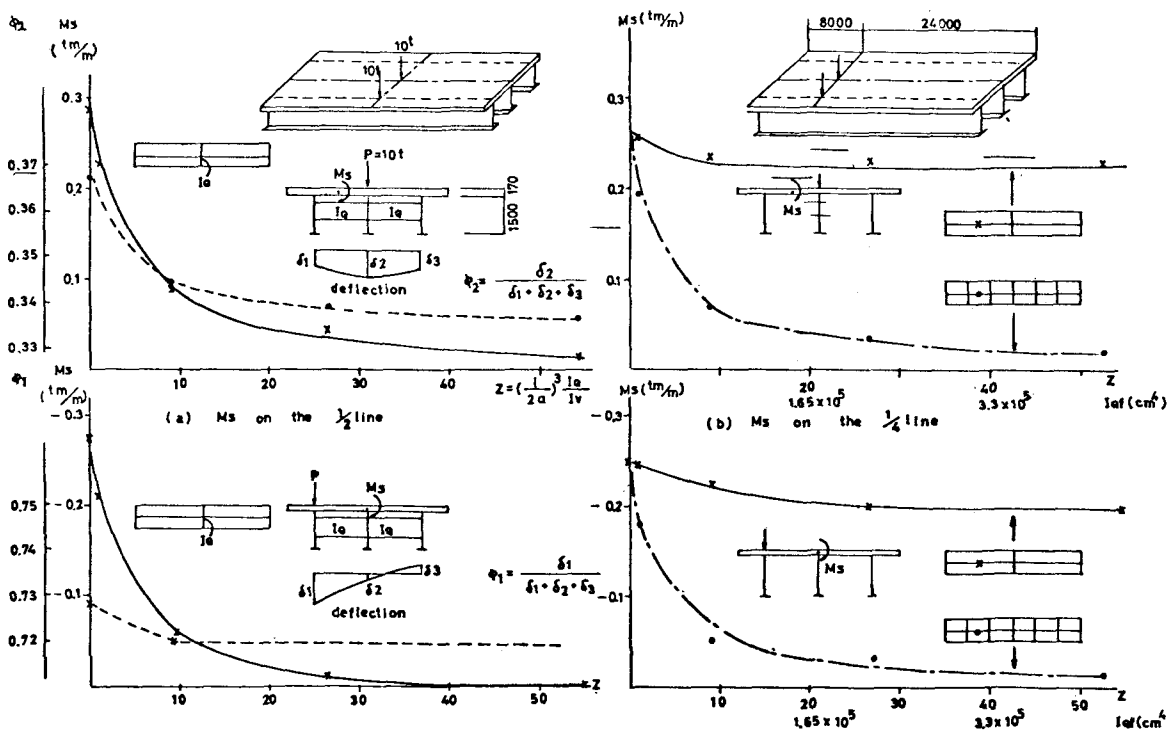


Fig 8 M_s - Z curve and distribution of total deflection- Z curve

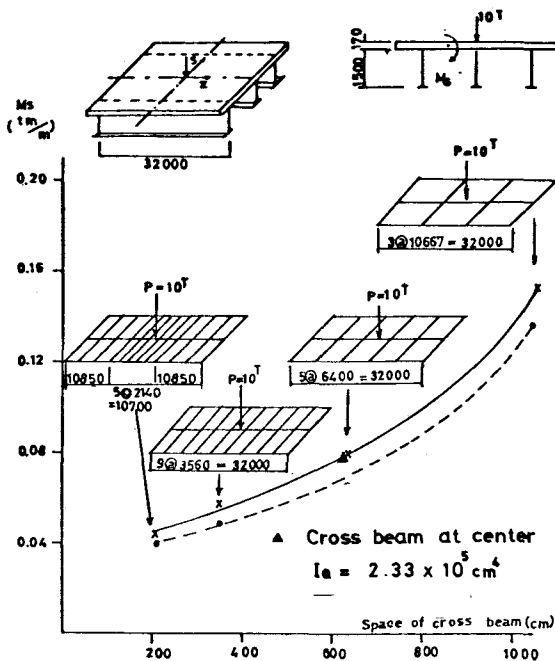


Fig 9 Ms—the space of cross beam curve

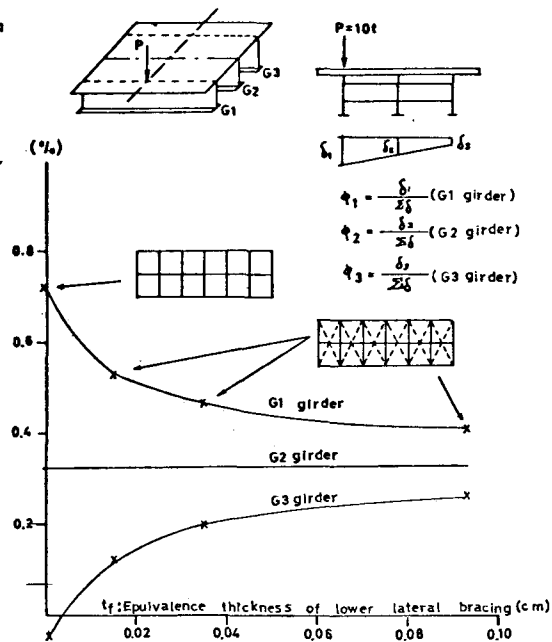


Fig 10 t_f —the distribution of deflection curve

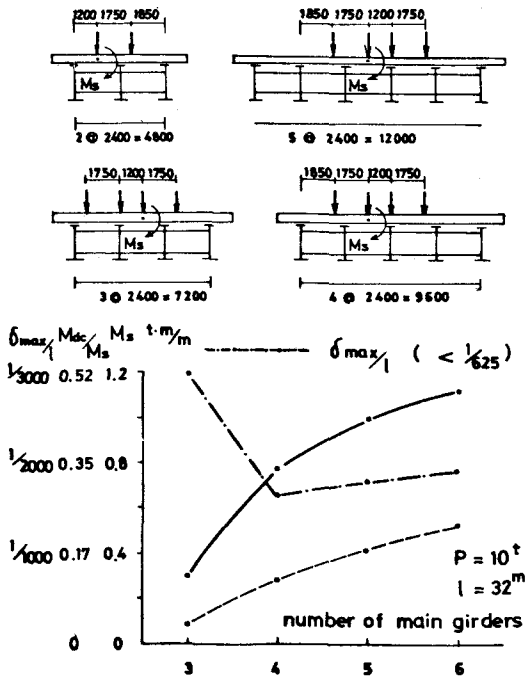
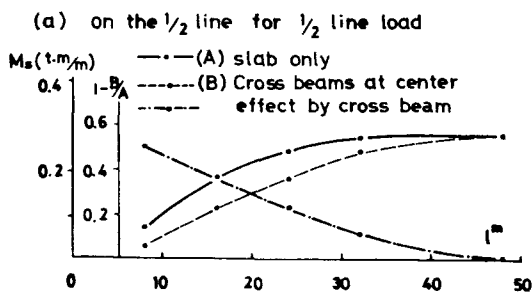
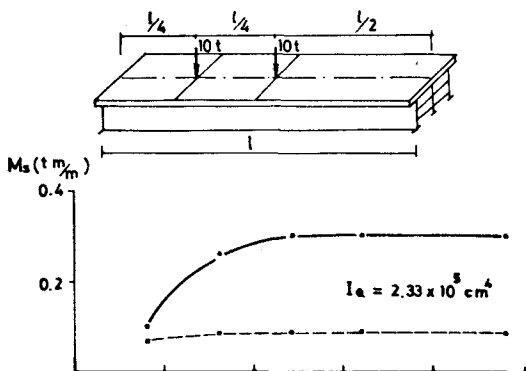


Fig 11 The additional bending moment M_s on the S - direction

