

連続床版の曲げ応力について
ON THE BENDING STRESS OF CONTINUOUS SLAB

横山 幸満* 井上 浩樹**

By Yukimitsu YOKOYAMA and Hiroki INOUE

Bending stress induced in the reinforced concrete continuous slab of the road bridge is studied both experimentally and analytically. Dimensionless parameters of $\overline{\nu}$ (Tragwerkeskennzahl by Fischer) and μ (Relative Stiffness Number by the author) are introduced to ensure the mechanical similarity law between prototype behavior and model.

Both experimental and analytical results show that positive bending moment prevails even in the slab over the main girder rather than negative moment stipulated in the Specification for the Road Bridge. A simple design procedure is proposed so as to modify the present Specification, in which it is recommended that the slab should be reinforced to resist larger positive bending moment.

1. まえがき

道路橋の鉄筋コンクリート（以下RCと略記する）床版の亀裂や剥落の原因として、過大な輪荷重や繰返し載荷による疲労、衝撃、コンクリートの乾燥収縮、塩害などが挙げられている。しかし著者らは実際の構造系を設計用にモデル化する際にも問題があるのではないかと考えている。道路橋RC床版の多くは3主桁以上に支持された連続版で、かつ主鉄筋の方向が車両進行方向に直角な場合が多いので、以下の議論ではこの場合に限定する。

現行のRC連続床版の設計曲げモーメントは表1に示されるように、相対する2辺で単純支持された等方性無限単純版として求められた値を基準とし、その±80%を採用している。単純支持の場合の曲げモーメントの±80%を連続支持の場合の曲げモーメントとする設計手法は、支承（この場合主桁）が沈

表1 RC床版の設計曲げモーメント ¹⁾ (kgf・m/m)			
版の区分	曲げモーメントの種類	主鉄筋方向の曲げモーメント	配力鉄筋方向の曲げモーメント
単純版	支間曲げ	$+(0.12L+0.07)P$	$+(0.10L+0.04)P$
連続版	支間曲げ	$+(\text{単純版の}80\%)$	$+(\text{単純版の}80\%)$
	支点曲げ	$-(\text{単純版の}80\%)$	---

L: T荷重に対する床版の支間(m)

P: 自動車1後輪荷重(kgf)

* 工博 宇都宮大学教授 工学部土木工学科 (〒321 宇都宮市石井町2753)

** 日本舗道株式会社

下しないか、沈下してもその影響が非常に小さいことを前提としている。この剛支点限度は主桁と床版の曲げ剛性および支点数に関係する。後出の相対剛性率 η で評価すると、 $\eta < 0.1$ が剛支点限度であり、RC床版にとってこれはかなり厳しい条件である。このため道路橋示方書では『床版を支持する桁の剛性が著しく異なる場合は、桁の剛性の相違を考慮して設計曲げモーメントを算出しなければならない』としているが、このような場合にのみ限定されるものではなく、通常の主桁配置の場合にも主桁の弾性変形を考慮した床版の設計をしなければならない、というのが本論文の趣旨である。

即ち、格子桁橋の荷重分配計算は主桁の弾性変形をばねとして評価し、横桁を弾性支点上の連続梁として求められる。荷重分配計算を行うと行わないとに拘らず、主桁が弾性変形することは明白であるから、連続床版にその影響がどの程度及ぶのかの検討が必要である。RC床版よりも変形し易いと考えられる鋼床版も縦リブが横リブで弾性支持された無限連続版として設計される。このように作用荷重に対して支持物体の弾性変形を考慮することは橋梁構造物全体の基本的考え方であるが、RC連続床版に限って剛支持を前提としていることは設計体系全体から見て合理的とは思われない。

この問題は古くからNewmark²⁾、成岡ら³⁾、米沢^{4) 5)}によって研究され、また最近では高尾⁶⁾がこの問題を研究し、設計図表を提案している。しかし、いずれも現行の設計法とは異なった表現をしており、実用化に至っていない。表1のような簡明な表現が望ましい。

本論文は主桁の弾性変形を考慮した連続床版の合理的な設計法を確立することを目的として、弾性材料による模型実験を行い、FEM、直交異方性版理論、五連モーメント法などの解析と比較検討したものである。なお、横桁による荷重分配効果は考慮していない。

2. 模型実験

原型と模型の曲げ変形に関する相似則を満足させるために、鋼床版理論で用いられるFischer⁷⁾の無次元パラメータ *Tragwerkskennzahl*(板係数):

$$\bar{\nu} = 6(L/n\pi \ell)^4 \cdot B_y/B_x \tag{1}$$

を指標として採用する。ここに、*L*: 主桁支間、 ℓ : 主桁間隔、*B_y*: 床版の版剛度、*B_x*=*EI*/ ℓ 、*EI*: 主桁の曲げ剛性および *n*=1,2,3,...である。*n*=1のみをとっても全体に影響を与えないから、以下 *n*=1 とする。3主桁以上の実橋若干例についてこの値を計算した結果では、 $\bar{\nu}$ は7前後であった。

模型材料には主桁としてアクリルパイプ(外形22mm、内径19mm、長さ1m、*EI*=19,100 kgf/cm²)を、床版として同じくアクリル板(厚さ5mm、1.3×1.1m、*EI*=350 kgf/cm²/cm)を用いた。主桁支間 *L*=90cmを一定とし、主桁間隔 ℓ と主桁本数を表2に示すように変えて無次元パラメータ $\bar{\nu}$ の影響を見ることにした。

ひずみを弾性範囲に限ることにして、2430gfのレンガを9cm×9cm×厚さ1cmの発泡スチロールを介して載荷した。荷重強度は *p*=30 gf/cm²

表2 実験ケースと

無次元パラメータ

<i>l</i> (cm)	$\bar{\nu}$	3本主桁	4本主桁
20	9.26	A,B,C	D,E,F
25	4.74	A,B,C	D,E,F
30	2.74	A,B,C	
30	1.73	A,B,C	
40	1.16	A,B,C	

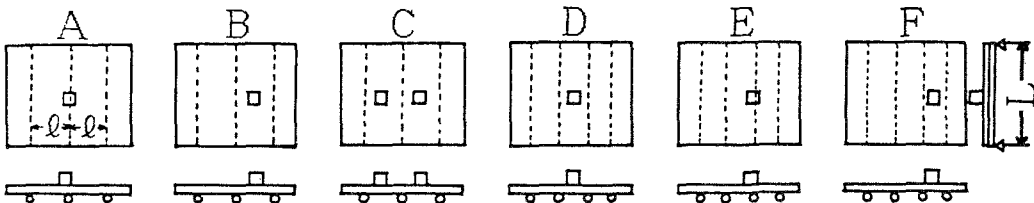


図1 載荷ケース

である。図1に示す7種類の荷重を行い、曲げひずみとたわみを計測した。

ひずみ計は橋軸直角方向の支間中央に11箇所、1/2点および1/4点に10箇所、橋軸方向に8箇所、合計21箇所に貼付した。たわみはダイヤルゲージにより4箇所で測定した。

3. 実験結果と考察

主桁間隔 $\ell = 20\text{cm}$ ($\bar{v} = 9.26$) の場合の橋軸直角方向のひずみの実測値を、3主桁について図2に、4主桁について図3に示す。他の主桁間隔の場合もこれらとほぼ同様であり、表2の $\bar{v}$ の範囲では本質的な差異は認められない。図4は橋軸中心線上1/2点および1/4点での橋軸方向ひずみ (ϵ_x) と橋軸直角方向のひずみ (ϵ_y) を実験の全ケースについて白抜き記号でプロットしたものである。3主桁の場合の主桁中央および中間主桁のたわみを図5に示した。

これらの実測結果からいえる特徴的なことは次の通りである。

- ① 橋軸直角方向（主鉄筋方向）の曲げモーメントはほとんど正（下側引張り）であり、主桁上に荷重した場合でも支点モーメントは負にならない。
- ② 橋軸方向（配力筋方向）の曲げモーメントは橋軸直角方向の曲げモーメントと同程度かそれより大きく、正の値が卓越する。
- ③ 主桁中央のたわみは格子桁の荷重分配係数と同様な分布を示す。これは版がある換算幅 b_e をもった梁と等価な挙動をすることを示唆している。

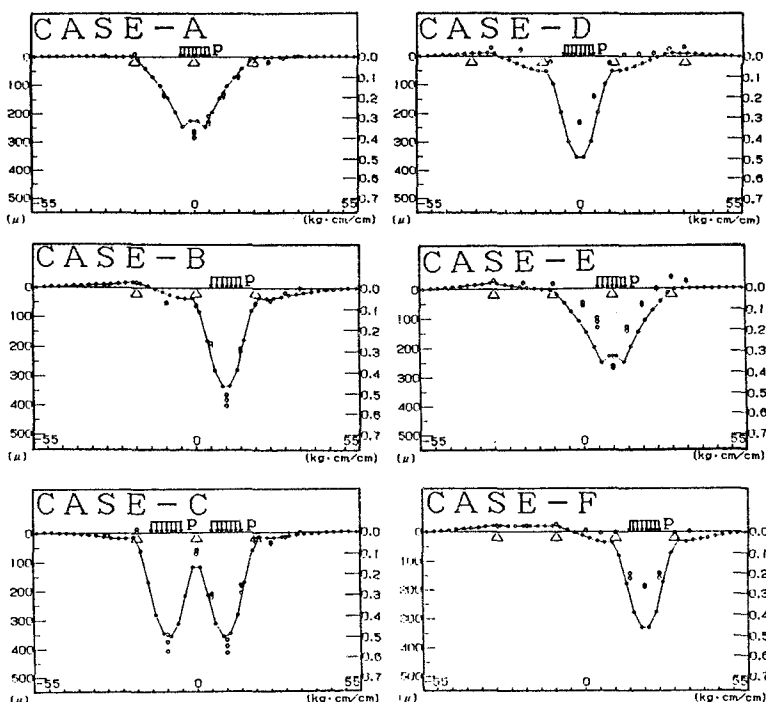


図2 実測値
(3主桁; $\ell = 20\text{cm}$, $\bar{v} = 9.26$)

図3 実測値
(4主桁; $\ell = 20\text{cm}$, $\bar{v} = 9.26$)

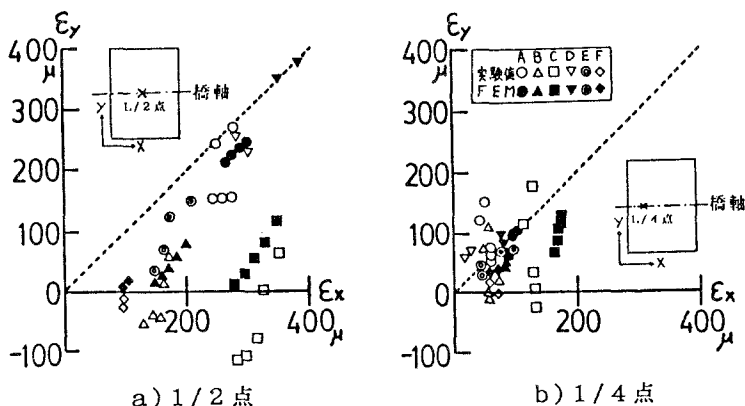


図4 ϵ_x (配力筋方向) と ϵ_y (主鉄筋方向) の関係

4. 解析

(1) FEM解析

床版を長方形板要素に、主桁を梁要素に分割し、両者を軸剛性の大きなトラス要素で結合してFEM解析を行った。その結果は図2および図3に黒丸印で示している。実験モデルと解析モデルに差があるため、曲げモーメントの大きさに若干の相違があるが、実測値と解析値の全般的傾向は良い対応を示している。

図4の黒印はFEM解析による値であり、この場合も橋軸方向曲げモーメントが橋軸方向のそれより大きくなることを示している。

図6は $\ell = 25\text{cm}$ 、荷重ケースCの場合の橋軸直角方向曲げモーメントの解析値を鳥瞰図的に図示したものである。この図からも中間主桁上に負の曲げモーメントは発生せず、版は主桁間隔 ℓ にほぼ等しい幅の梁のような挙動をしていることがわかる。

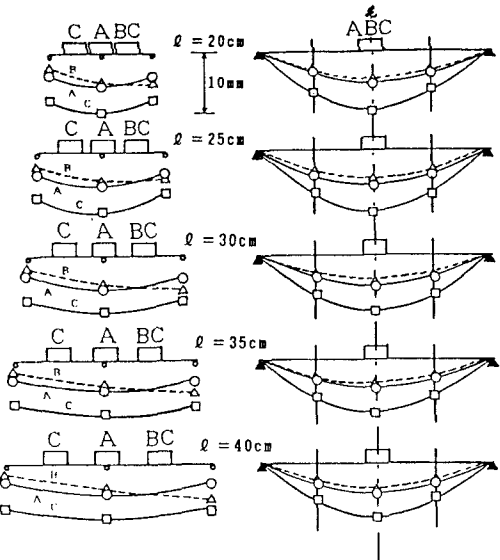


図5 主桁のたわみ

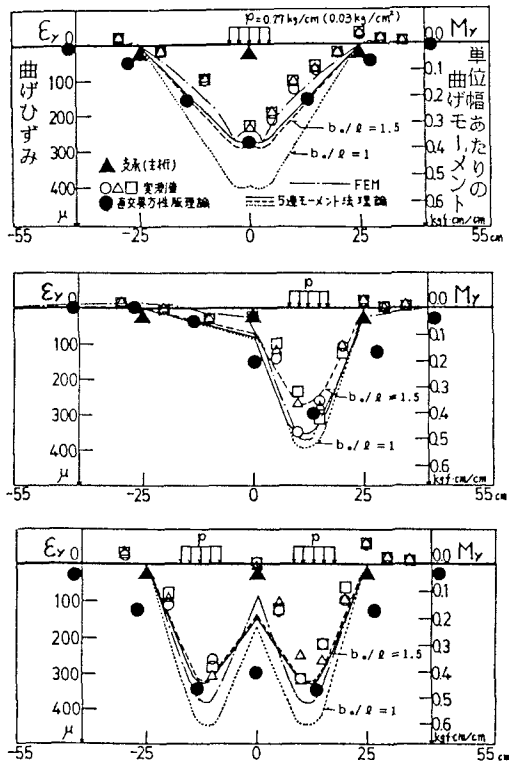


図7 各種解析結果の比較

($\ell = 25\text{cm}$, $\bar{v} = 4.74$)

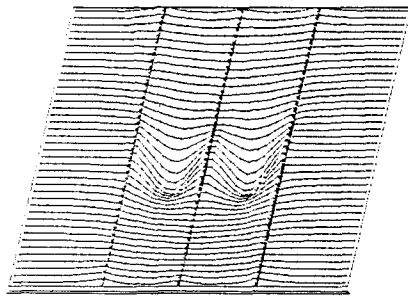


図6 有限要素解による橋軸直角方向曲げモーメント図($\ell = 25\text{cm}$)

(2) 直交異方性版としての解析

Guyon-Massonetの方法により直交異方性版として解析した結果を図7に黒丸で示した。最大曲げモーメントの大きさは実測値とよく一致している。

(3) 五連モーメント法による解析

図6で床版はある有効幅をもつ梁のような挙動をすることを述べた。この見掛けの幅を等価換算幅 b_e と称することにして、主桁の弾性変形をばねとする弾性支点上の連続梁を考え、五連モーメント法⁸⁾により実測ひずみに適合する等価換算幅を求めた。図8a)はその結果であり、図8b)はこれを無次元化して v に対して示したものである。また図7には $b_e/\ell = 1$ および1.5の場合の計算値を細い点線と破線で示した。これらの結果から等価換算幅 b_e として主桁間隔 ℓ または 1.5ℓ をとればよいことがわかる。

一方、表1の単純版の支間曲げ $b_e(\text{cm})$

モーメント $M = (0.12\ell + 0.07)P$ を与える梁としての等価換算幅 b_e を次のようにして求める。即ち、幅 b_e 、支間 ℓ の単純梁に集中荷重 P が作用したとき、支間中央の単位幅当りの最大曲げモーメントは衝撃も含めて $M = P\ell(1+i)/4b_e$ 。

$$= (P\ell/4b_e) \cdot (70+\ell)/(50+\ell)$$

であるから、これが前記の値と等しいと置くと、

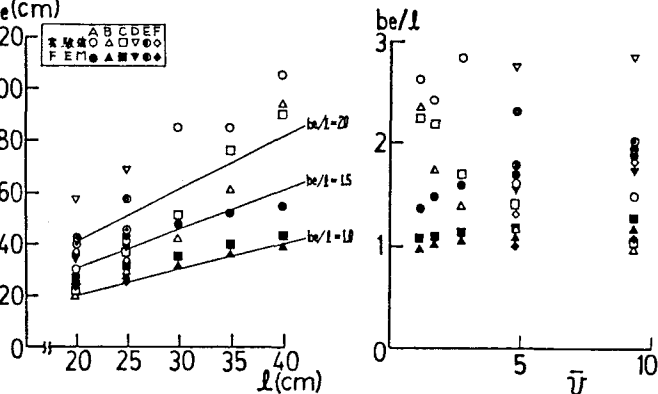
$$b_e = \frac{\ell}{4(0.12\ell + 0.07)} \cdot \frac{70 + \ell}{50 + \ell} \quad (2)$$

が得られる。この結果は図9に示すようになり、通常の主桁間隔では $b_e \approx \ell$ となって、図7および図8の結果とも整合する。連続版の等価換算幅は主桁上と主桁間で異なるが、第一近似として式(2)の値を用いることにする。弾性支点上の連続梁の特性は無次元パラメータである相対剛性率 $\mu = 6EI/K_0\ell^3$ で規定できる。こゝに EI : 梁の曲げ剛性、 K_0 : 支点ばね係数、 ℓ : 支間である。

連続床版の場合、幅 b_e のRC梁の曲げ剛性を $E_c I_c$ 、主桁の曲げ剛性を $E I$ 、主桁の支間を L とすると、 $K_0 = 48EI/L^3$ であるから

$$\mu = (E_c I_c / EI) \cdot (L / 2\ell)^3 \quad (3)$$

が得られる。これは格子桁橋の曲げ格子剛度 z に他ならない。3主桁以上の標準的なプレート・ガーダーについて、式(2)および(3)により相対剛性率 μ を求めた結果は図11のようになり、多くの場合 $\mu = 1 \sim 2$ の値となる。 $\mu = 0$ が表1の連続版の相対剛性率に相当する。従来、曲げ格子剛度 z が $1 \sim 2$ の場合は荷重分配効果が無いとされているが、梁(版)の曲げ応力にとってこれは無視できない大きさである。前述した連続梁の剛支点限度はおおよそ $\mu < 10^{-3}$ (4.0/5であり⁹⁾、通常の支点数 $n \geq 3$ に対して $\mu < 0.1$ である。図12は3主桁および4主桁の場合を例にとり、 $\mu = 0, 1$ および 2 に対する曲げモーメントの影響線を示したものである。中間支点には負の曲げモーメントだけでなく、その絶対値を上廻る正の曲げモーメントが生じ、また支間中央では単純支持の場合1.2倍程度の正の曲げモーメントが生じ得ることがわかる。なお、式(1)で定義された $n=1$ の場合のTragwerkskennzahl v と相対剛性率 μ との関係は



a) 実験値および有限要素解による 主桁間隔-等価換算幅関係
b) 実験値および有限要素解による $\bar{l} - b_e/\ell$ 関係

図8 等価換算幅 b_e

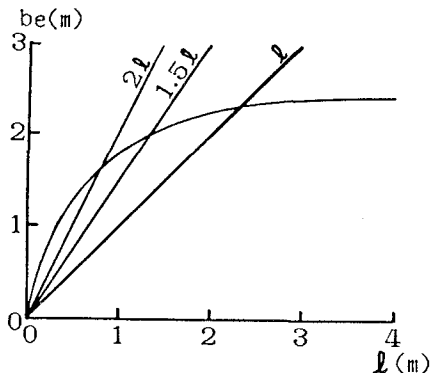


図9 等価換算幅 b_e

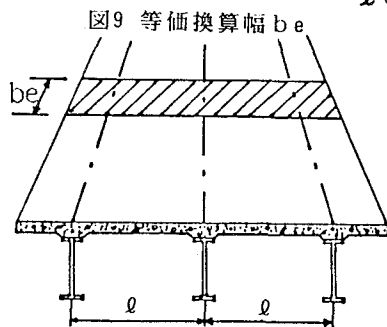


図10 連続床版

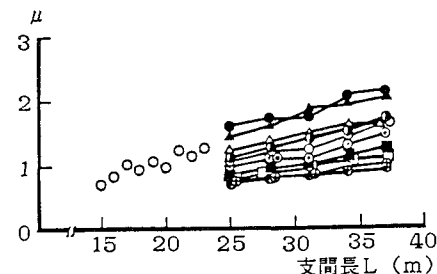


図11 標準的プレートガーダー床版の μ

$$v = \mu (48/\pi^4) L/b_0 \approx \mu L/2b_0. \quad (4)$$

であり、実橋の $v \approx 7$ は $\mu = 1 \sim 2$ に対応する。

5. 結 び

連続床版の模型実験と各種解析を総合して次のような結論が得られた。

- ① RC連続床版の曲げにとって、単に主桁間に著しい剛性の差がある場合だけでなく、通常の主桁の弾性変形も考慮する必要がある、その影響は主鉄筋の配筋方法を変えなければならないくらい大きい。表1に規定する連続版の設計曲げモーメントは主桁の支承近傍の床版に対して適用すべきである。
- ② 主桁中央付近の連続版に対しては、負の曲げモーメントのみでなく、表1の単純版の設計曲げモーメントMと同程度の正の曲げモーメントを考慮する必要がある。

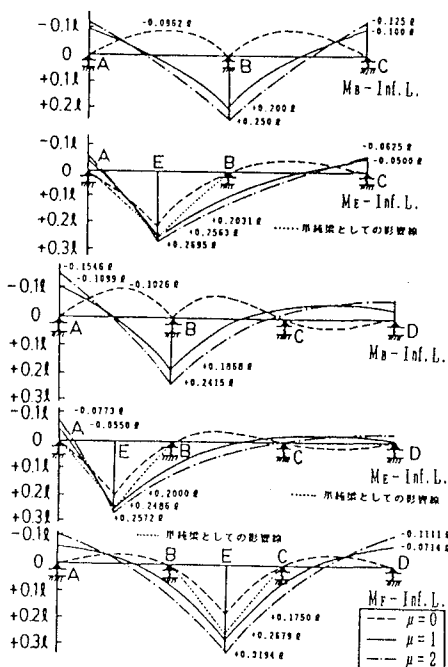


図12 曲げモーメントの影響線

実験の指導に協力された宇都宮大学の日下部 治 助教授に感謝する。FEM解析には日本鋼管(株)の滝尾順一氏が開発したプログラム TAK-3 を利用した。同氏と棚辺 隆 氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II 鋼橋編，pp.179-183，1970。
- 2) Newmark, N.M.: A Distribution Procedure for the Analysis of Slabs continuous over flexible Beams, Univ. Illinois, Bulletin No.304, 1938。
- 3) 成岡昌夫・米沢 博：鋼道路橋の鉄筋コンクリート連続版の設計曲げモーメントについて(1) — 主鉄筋が車両進行方向に直角な場合 —，土木学会誌，Vol.36, NO.12, pp.8-13, 1951。
- 4) 米沢 博：直交異方性版理論による鋼道路橋床版および桁の曲げモーメントについて，土木学会誌，Vol. 39, No.1, pp.38-43, 1954。
- 5) 米沢 博：道路橋床版の設計用曲げモーメントについて，土木学会論文集，No.33, pp.39-43, 1956。
- 6) 高尾孝二：鋼道路橋鉄筋コンクリート床版の設計曲げモーメントに関する研究，東京大学学位請求論文，1985。
- 7) STAHLBAU - Ein Handbuch für Studium und Praxis -, Köln, pp.309-310, 1961。
- 8) 横山幸満：荷重関数法による梁の力学，山海堂，pp.93-111, 1987。
- 9) 横山幸満：くい構造物の計算法と計算例，山海堂，pp.197-200, 1977。で許容誤差を±10%以下とすると $V_{11}(\mu) \geq 0.9 + 0.1V_{11}(\infty)$ または $V_{11}(\eta) \leq 0.1V_{11}(\infty)$ を満足する η として求められる。

(1987年10月16日)