

道路橋RC床版の設計曲げモーメント式に関する一考察

FORMULATION OF BENDING MOMENTS FOR REINFORCED CONCRETE SLABS AT HIGHWAY BRIDGES

前田幸雄*・松井繁之**
By Yukio MAEDA and Shigeyuki MATSUI

1. まえがき

鋼道路橋設計示方書(昭和39年6月)¹⁾(以下、旧示方書といふ)に従って設計された道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版といふ)は、ここ数年来、破損事故を多発していることは衆知のこととて、交通荷重を直接担う床版の破損事故は土木技術者にとって大きな問題である。

一般に、RC床版の破損現象には鉄筋の疲労破断は見られず、主に引張側コンクリートの剝離や部分的抜け落ちである。そして、この破損の直接原因是コンクリートに生じるひびわれであるといわれている。少々ひびわれが発生しても十分に安全な場合もあり得るであろう。しかし、設計法の不備、予期しない大きな活荷重の載荷、施工誤差などが、これらのひびわれを拡大・拡散させ、コンクリートの抜け落ちなどの破損を誘発したものと思われる。

このRC床版のひびわれ破損の主因子として、設計・

施工面から表-1に示す項目が考えられ²⁾、これらに対応できる解決策が、ひびわれ発生を極力防止する方向で適宜提案された^{3)~5)}。そして、昭和48年2月の道路橋示方書⁶⁾において、RC床版に関する条項に大幅な改訂が加えられた。しかし、道路橋床版のように薄い版厚で、かつ、少ないかぶりのRC床版では引張側コンクリートのひびわれ発生開始時の鉄筋応力は約130~270kg/cm²という報告⁷⁾もあり、鉄筋の許容応力一杯に設計し、かつ、活荷重応力が全作用応力の80~90%も占める道路橋RC床版では当然ひびわれは発生すると予想される。著者らの実験でも設計荷重の1/5位で初期曲げひびわれが発生した⁸⁾。本来、ひびわれの発生していないRC床版は等方性板と考えてもよいが、ひびわれ発生の進展がある場合、板剛性の鉄筋によって占める割合が増加し、直交2方向の鉄筋量・鉄筋配置位置の違いから、それら2方向で板剛性が異なる直交異方性板へと移行する。この異方性化した床版の板挙動は2.で述べるように当然、等方性板挙動と異なる。著者らは、ここ数年来、このRC床版の直交異方性について強調し、道路橋RC床版の安全性確保のために、ひびわれを想定した、すなわち、引張側コンクリートを無視した断面での直交異方性を考慮すべきであると提案してきた^{9)~11)}。倉田・園田ら¹²⁾の実橋から切り出したひびわれを有する床版の載荷試験結果が、著者らの直交異方性板理論値とよい一致を見たことが、この提案の妥当性を証明しているであろう。Rüsch¹³⁾、米沢¹⁴⁾らもすでにRC床版を直交異方性板として取り扱うべきであると述べているが、両者とも、コンクリートは全断面有効とした板剛性比(約0.8)について論じ、ひびわれを考慮した直交異方性は考慮していない。

さて、現行示方書に従って設計した床版においても、やはりひびわれ発生があるといわれており、また、すでに65%程度の配力鉄筋量を入れているアメリカの床版¹⁵⁾でも、その過半数にひびわれが発生していると報告

表-1 床版破損の原因と解決策

| 破損原因 | 解決策 |
|--------------|--|
| ① 配力鉄筋量の不足 | 主鉄筋の70%を与える。 M_y の設計モーメント式を用いる。(6.1.4) |
| ② 剛性の不足 | 床版厚の最小厚規定を守る。(6.1.5) 鉄筋の許容応力を下げる。(6.1.7) |
| ③ 輪荷重の増大 | 設計モーメントの20%増しとする。(6.1.2) |
| ④ 施工誤差・施工不良 | モーメント式に約10~20%の安全を見込んでいる。(6.1.4解説) |
| ⑤ RC床版の直交異方性 | 考慮されていない。 |
| ⑥ 床版支持桁の不等沈下 | 間接的に考慮されている。たとえば、たわみの許容量を小さくする。(1.9) 荷重分配横桁を設ける。(8.8.1) |

ただし、()内は現行示方書の条文番号を示す。

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 大阪大学講師 工学部土木工学科

されている¹⁶⁾。よって、安全側設計として、引張側コンクリートを無視した断面での直交異方性を考慮すべきであろう。現行示方書で設計した床版でも、配力鉄筋量は主鉄筋量の70~80%も入っているが、その板剛性比は高々0.6であり、異方性は依然顕著である。

連続版の曲げモーメントは現行示方書では支間中央および支点上とも単純版の80%と定められており、床版支持桁の影響も明確には考慮されていない。プレートガーダーなど床版剛性に比して剛性のあまり大きくなない鋼桁で支えられた場合、これら支持桁の不等沈下による付加曲げモーメントは非常に大きく^{17)~21)}、これを考慮していないことも床版破損につながる1主原因であるといえる。

ひびわれ破損を受けた床版をよく観察すると、ひびわれは内側床版のみならず片持部床版にも発生していることが多い。この部分のひびわれは主鉄筋に沿ったものであり、配力鉄筋方向の曲げモーメントの大きいことがわかる。この片持部床版でも、床版の直交異方性、境界条件および支持桁の不等沈下等が複雑に影響しているものと思われる。

さて、本研究では以上のRC床版に関する未解決の問題に着目して、RC床版の引張側コンクリートを無視した断面での直交異方性を考慮した設計曲げモーメント式を提示した。さらに、連続版・片持部床版に対しては床版支持桁の不等沈下による影響の大きいことを強調し、この影響を設計曲げモーメント式に考慮した。

ただし、従来、2方向版といわれる辺長比が1:2未満の床版は道路橋床版として使用されることがまれであるので、ここでは辺長比1:2以上の1方向版に限定し、かつ、主鉄筋が車両進行方向に直角なものについて述べる。

また、本解析では、鋼材のヤング係数とコンクリートのヤング係数の比、n値はすべて15とした。

2. RC床版の直交異方性と荷重載荷面積の取り扱い

床版曲げモーメントに影響する主因子は、荷重の大きさのほかに、RC床版の直交異方性と載荷面積の大きさであろう。まず、これら後者2つの影響度と解析上の取り扱い方について説明を加える。

(1) 直交異方性導入の必要性とその異方性度

まえがきで述べたようにRC床版では引張側コンクリートを無視した断面で応力解析するのが妥当かつ安全であると考えられる。さて、この断面をもって図-1に示す慣用の配筋法（すなわち、配力鉄筋は必ず主鉄筋の内

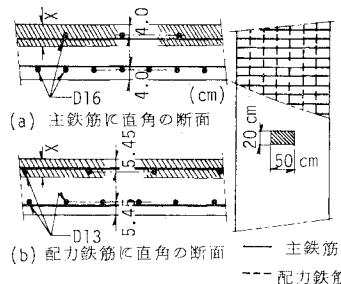


図-1 配筋

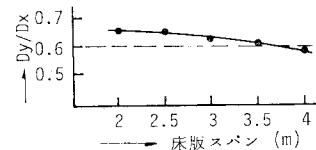


図-2 示方書による床版の D_y/D_x

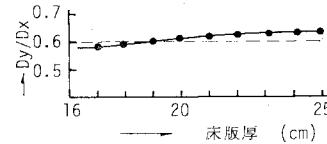


図-3 D_y/D_x と床版厚との関係

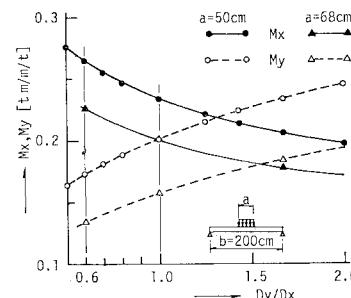


図-4 曲げモーメントと板剛性との関係

側に配筋する方法)に従い、現行示方書の規定通りに設計を行うと、それら床版の板剛性比 D_y/D_x (D_x : 主鉄筋方向の板剛性, D_y : 配力鉄筋方向の板剛性) は図-2に示すように0.6前後になる。また、図-3は配力鉄筋量を主鉄筋量の70%に一定したときの床版厚と板剛性比の関係を示すが、やはり0.6前後となる。これらの結果から、床版支間、床版厚を変化させても板剛性比はほぼ一定値の0.6を示し、ひびわれが発生したRC床版の直交異方性の大きなことが理解できる。

図-4は支間中央に一後輪荷重を載荷した支間2mの単純版の最大モーメント M_x , M_y と D_y/D_x の関係を示す。現行示方書では等方性板、すなわち、 $D_y/D_x=1.0$ として取り扱っており、この場合のモーメント比 M_y/M_x は0.86(載荷幅 $a=50\text{cm}$)~0.78($a=68\text{cm}$)にも達

し、配力鉄筋方向にも大きな曲げモーメントが発生する。この大きな曲げモーメントにより、実橋調査²²⁾・実験²³⁾などの報告にあるように、まず初期には主鉄筋方向のひびわれが発生するのが理解できる。ただし、この方向のひびわれには乾燥収縮によるものも多い。この方向のひびわれによって床版は急激に異方性化が進み、主鉄筋方向での荷重分担率が増加し、配力鉄筋方向にもひびわれが発生することになる。ある程度縦横にひびわれが発生すると2方向の断面はコンクリートの引張側を無視した断面へと徐々に進行する。コンクリート有効断面の減少につれて板剛性の鉄筋によって占める割合が増加し、主鉄筋、配力鉄筋の鉄筋量の差が顕著になり板剛性比も低下する。その結果、図-4で明らかなように M_x が大きく増加する。榎本・原らの実験は図-4に示す板剛性比とモーメント比の関係をよく説明している²⁴⁾。旧示方書で設計されたRC床版は最低配力鉄筋比がわずか0.25の極端な異方性板($D_y/D_x=0.4$ 以下)であるため、ひびわれ発生後では、過大な M_x モーメントを受け、破損が早まったものと推定できる。昭和42年の配力鉄筋に関する道路局長通達⁵⁾、および、現行示方書の M_y についての設計モーメント式により、配力鉄筋量は主鉄筋の70~80%まで増加し、その板剛性比は0.6前後に上昇した。しかし、この異方性度をもつ床版でも M_x は等方性板のものに比して、依然約13%も大きいことは解決されていない。

RC床版の安全な合理的設計として、さらに配力鉄筋量を増加し、等方性板へと近づける方法が考えられる。しかし、一方向版では本来 M_y は M_x より小さいことから、配力鉄筋量を主鉄筋量より少なくするのが妥当と考えられ、その最大鉄筋比は、等方性板でのモーメント比約0.7を目安にすればよいであろう。この配力鉄筋比のものでは、板剛性比は高々0.6であり、当然RC床版の直交異方性板としての取り扱いが必要となる。

よって、以下の解析では、配力鉄筋量を主鉄筋量の70%以内にとどめると仮定し、 D_y/D_x は一律0.6とした。ただし、床版のスパン方向で、厳密にはひびわれ発生区間と非発生区間では板剛性比を変化させる必要があるが、非発生区間は全スパンに比して小さいため、安全側として床版全域で一様にこの板剛性比0.6を与えるものとした。

(2) 輪荷重載荷面積の取り扱い

現行示方書では自動車後輪荷重は、後輪接地面積500×200mmを図-5に示すごとくアスファルト舗装厚も含めて床版中央まで45°方向で拡大させた面に分布すると定義している。いま、載荷面の長辺をパラメーターとした M_y 、 M_x の変化を見ると図-6の示すように、載

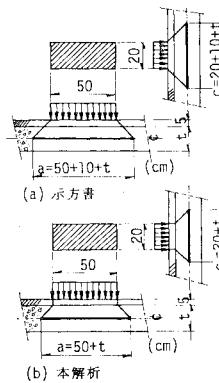


図-5 輪荷重分布面

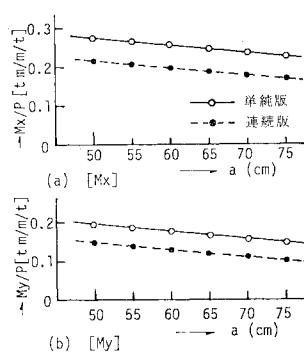


図-6 モーメントと載荷面積との関係

荷面の増大につれモーメントは顕著に減少する。約10cmの辺長増大で、モーメント減少量は7~10%にもなる。

一般にアスファルト舗装の剛性はRC床版の剛性に比して著しく小さいことから、この舗装に示方書で規定する荷重分配作用を期待することに疑問がある。さらに、材料のばらつき、施工誤差などを考慮するとこのアスファルトによる荷重分配作用を期待しない方が、床版の安全性確保につながると考えられる。倉田・園田も、輪荷重面の拡散はないと厚板解析で証明している²⁵⁾。よって、本報告の解析ではすべて舗装は荷重分配に関与しないものとして、図-5(b)に示す輪荷重分布面を採用した。

3. 単純版のモーメント

1等橋・2等橋の道路橋では、現行示方書の規定する床版スパンの範囲(最大4m)で、単純版が使われることは非常に少ないが、単純版は床版の基本形であるため、単純版モーメントについて解析する。

(1) 解析手順

現行示方書ではモーメント式算定に級数解法が用いられたため、無限板が解析対象となった。有限要素法による本解析では辺長比 $L/b=5$ (b :短スパン、 L :長スパン)の4辺単純支持版のモーメントを単純版モーメントとした。一般に、4辺単純支持版の最大モーメントは、すでに辺長比2で無限板のものに収束し、上記の5では境界条件の影響は入らないと考えられる。

床版スパン b は2, 2.5, 3, 3.5および4mの5種で、これらに対応する床版厚 t は示方書の解析に用いられた $t(cm)=3b+11$ によった。

さて、各床版の最大モーメントを求める必要がある。本解析では後輪1個の荷重による $L/2$ 断面のモーメン

ト影響線を計算し、各床版スパンの範囲で載せ得るだけの輪荷重をのせ、最大モーメントを求めた。このとき、多数個の輪荷重によって決まる場合には、各輪荷重間隔は示方書に従い、1mあるいは1.75mとした。ただし、床版スパン4m以下の単純版では前輪の影響は非常に小さいため、この影響を無視した。

(2) 解析結果と考察

図-7は M_x および M_y の影響線の一例である。各床版スパンにおける最大影響値を表-2に整理した。この表から次のことが理解できる。

① 異方性板・等方性板ともそのモーメント比 M_y/M_x は床版スパンに関係なくほぼ一定値となり、等方性板($D_y/D_x=1.0$)では約0.8、板剛性比0.6の異方性板では約0.6で、後者の場合、板剛性比により合ったモーメント分配となっている。

② M_x , M_y について等方性板と異方性板を比較すると、 M_x は平均13%も異方性の方が大きくなり、逆に、 M_y については15%程度小さくなる。

さて、図-7の影響線図から各スパンの最大モーメントが算出できる。床版スパン2mでは版中央に輪荷重1

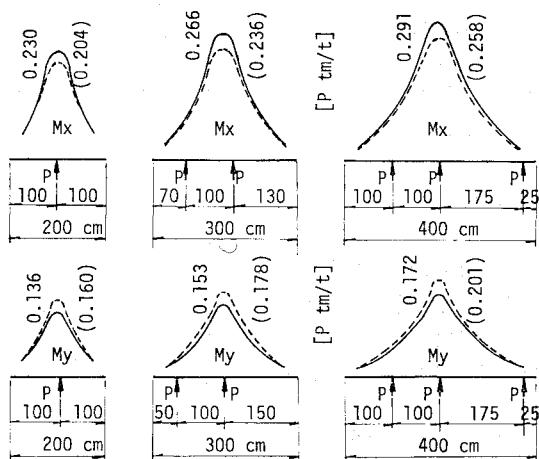


図-7 単純版の影響線と載荷可能輪荷重

表-2 輪荷重1個載荷時の最大モーメント(t·m)

| | | 床版スパン | | |
|------|-----------------|--------|--------|--------|
| | | 2m | 3m | 4m |
| 異方性板 | M_{x0} | 0.230P | 0.266P | 0.290P |
| | M_{y0} | 0.136P | 0.153P | 0.172P |
| | M_{y0}/M_{x0} | 0.590 | 0.577 | 0.592 |
| 等方性板 | M_{xi} | 0.204P | 0.236P | 0.258P |
| | M_{yi} | 0.160P | 0.178P | 0.201P |
| | M_{xi}/M_{zi} | 0.783 | 0.753 | 0.779 |
| 比 | M_{x0}/M_{xi} | 1.126 | 1.127 | 1.126 |
| | M_{y0}/M_{xi} | 0.848 | 0.863 | 0.855 |

個が載るとき最大となり、3m, 4mでは図-7に示すように2個および3個の輪荷重が載荷可能で、最大モーメントは各床版中央付近に発生する。この最大モーメントと床版スパンとの関係を図-8(a), (b)に示す。この図には現行示方書の設計値および理論値も併記した。これらの図から次のようなことが考察できる。

① まず、等方性板に関する本解析結果は示方書の理論値とよく一致し、本解析結果は精度のあるものといえる。

② 最大モーメントに関しても最大影響値と同様に、異方性板の M_x は等方性板のものより約13%増加する。現行示方書設計モーメントに従って設計されたRC床版は、引張側コンクリートを無視すると $D_y/D_x=0.6$ の異方性板であり、主鉄筋断面には上記13%も過大なモーメントが作用することになる。

③ M_y は、逆に、等方性板のものより減少し、現行示方書設計計算を大きく下回る。

④ 図-8において(△)印で示した結果は、床版厚を厚くした $t(cm)=4b+11$ を用いた異方性板の解析値である。これによると M_x は $t=3b+11$ の場合より約10%減少し、ほぼ示方書の理論値前後に低下する。この結果から、示方書の単純版最小厚規定($t=4b+11$)によって、異方性による M_x の増加を偶然に抑えていること

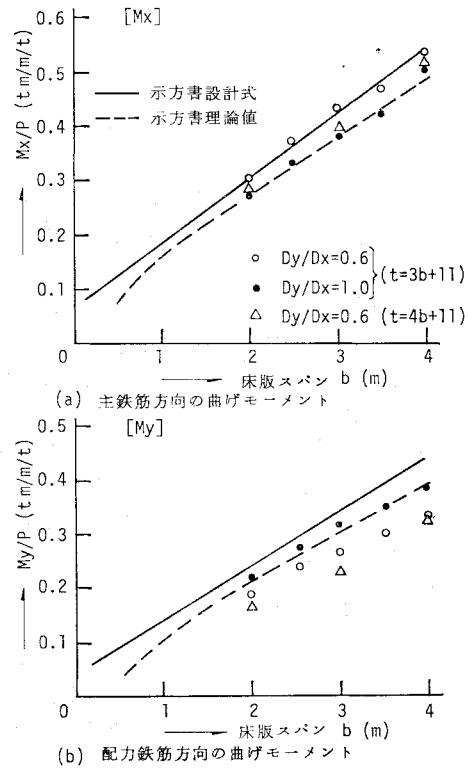


図-8 単純版の曲げモーメント

いえる。しかし、同時に M_y も減少し、配力鉄筋に直角な断面は不経済なものとなっている。

(3) 活荷重モーメント式の提案

図-8 の (○) 印の結果から最小自乗法を用いて M_x , M_y の床版スパンを変数とする直線関数を求める式(1)~(4)のごとくなる。すなわち、この4式が直交異方性を考慮した単純版の活荷重モーメント理論式である。現行示方書設計式は施工誤差などを考慮して理論値に対して 10~20% の安全を見込んだものであり、ここに提案した4式に対しても同様の安全を見込むならば設計式に発展させることができる。ただし、単純版の床版厚を示方書通りの $t(cm)=4b+11$ とするならば、すでに約 10% 程度の安全が見込まれることになる。

① M_x のモーメント式

衝撃を含む式

$$M_x = (0.118b + 0.075)P \text{ (t·m)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 b : 床版スパン長 (m), P : 1 後輪荷重 (t)
衝撃分離式

$$M_x = (0.08b + 0.07)(1+i)P \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$= M_{x0} \cdot (1+i) \text{ (t·m)}$$

ここで、

$$i: \text{衝撃係数} = 20/(50+b),$$

$$M_{x0}: (0.08b + 0.07)P \text{ (t·m)} \quad \dots\dots\dots (2')$$

② M_y のモーメント式

衝撃を含む式

$$M_y = (0.075b + 0.040)P \text{ (t·m)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

衝撃分離式

$$M_y = (0.055b + 0.030)(1+i)P \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$= M_{y0}(1+i) \text{ (t·m)}$$

ここで、

$$M_{y0}: (0.055b + 0.030)P \text{ (t·m)} \quad \dots\dots\dots (4')$$

(4) 単純版の設計法

3.(3) で提示したモーメント式を用いて単純版の断面を試算設計すると表-3 のようになる。ただし、床版厚は単純版規定に従い、死荷重モーメントも示方書通りの主鉄筋断面のみで受けもたせた。表-3 の (*) 印を付けた値は現行示方書の設計モーメントである。

さて、上記の理論式から算定した配力鉄筋方向の断面は各スパンとも左側欄の通りとなった。この場合、配力鉄筋量と主鉄筋量との比、すなわち、配力鉄筋比は約 0.5~0.6 となり、等方性板モーメントで設計する場合より約 20~30% も小さくなる。しかし、この断面で最終的に D_y/D_x を検算すると約 0.5~0.54 となり、モーメント解析時の仮定 0.6 より小さくなってしまう。この試算通りに断面決定すると再び M_x は増加することになる。よって、合理的に設計を行うには仮定板剛性比に収束するよう反復計算をする必要がある。しかし、この手順は非常に複雑であり、一義的に設計する必要がある。最も簡単な方法は直交異方性度すなわち板剛性比を 0.6 に保つよう配力鉄筋断面を決定することである。すなわち、主鉄筋断面の決定後 D_x を計算し、その 60% を D_y とし、この D_y による配力鉄筋量を決定すればよい。この手順に従うと配力鉄筋の応力は若干小さくなるが、不経済といえるほど小さくはない。

さて、上記のように修正した配力鉄筋方向の抵抗モー

表-3 単純版の設計

| 種類 | 床版厚 | 床版スパン | | | | |
|-----------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | 2.0m | 2.5m | 3.0m | 3.5m | 4.0m |
| 主鉄筋 断面 | 活荷重モーメント比 | 0.611 | 0.615 | 0.618 | 0.620 | 0.622 |
| | 活荷重モーメント (t·m) | 2.488 (2.480*) | 2.960 (2.960*) | 3.432 (3.440*) | 3.904 (3.920*) | 4.376 (4.400*) |
| | 死荷重モーメント (t·m) | 0.238 | 0.410 | 0.647 | 0.957 | 1.350 |
| | 全モーメント M_x (t·m) | 2.726 | 3.376 | 4.079 | 4.861 | 5.726 |
| | 断面係数 W_s (cm ³) | 194.7 | 241.1 | 291.4 | 347.2 | 409.0 |
| | 配筋量 A_{sx} (cm ²) | D 16-@13 cm | D 16-@11.5 | D 16-@11.0 | D 16-@10.0 | D 19-@13.5 |
| 配力鉄筋断面 | 筋板剛性 D_x (10 ⁶ kg·cm ²) | 15.28 | 16.55 | 18.05 | 19.86 | 21.22 |
| | 活荷重モーメント M_y (t·m) | 1.520 (1.920*) | 1.767 (2.320*) | 1.820 (2.202) | 2.120 (2.608) | 2.420 (3.140) |
| | 断面係数 W_s (cm ³) | 108.6 | 130.0 | 151.4 | 172.9 | 194.3 |
| | 配筋量 A_{sy} (cm ²) | D 13- (@14.0) | D 13- (@12.0) | D 13- (@13.5) | D 13- (@11.0) | D 13- (@10.5) |
| 比 | 筋板剛性 D_y (10 ⁶ kg·cm ²) | 9.11 (10.63) | 9.45 (11.60) | 9.82 (12.15) | 10.21 (13.24) | 10.56 (14.19) |
| | D_y/D_x | 0.540 (0.6) | 0.533 (0.6) | 0.521 (0.6) | 0.505 (0.6) | 0.490 (0.6) |
| | A_{sy}/A_{sx} | 0.596 (0.696) | 0.571 (0.701) | 0.544 (0.673) | 0.514 (0.666) | 0.498 (0.669) |
| | M_y/M_x | 0.558 (0.648) | 0.539 (0.652) | 0.519 (0.639) | 0.498 (0.646) | 0.475 (0.644) |

メントは表-3の右側欄の()内に示すものとなり、現行示方書の配力鉄筋方向設計モーメントにはほぼ一致し、また表-3の最下段に示したように主鉄筋方向の全モーメントの約65%になることが認められる。

以上の結果から、直交異方性を考慮したRC床版の設計法として次のような方法を提案できる。

1) 主鉄筋方向の曲げモーメントは式(1)あるいは(2)によって計算する。ただし、設計時には適当な安全を見込む必要がある。

2) 配力鉄筋方向の曲げモーメントは主鉄筋方向の死・活荷重による全モーメントの65%とする。

(5) 外国示方書との比較

比較の対象としてDIN^{26)~27)}とAASHO¹⁵⁾の示方書を選んだ。各国の示方書では自動車輪荷重の大きさ、その間隔、および、材料強度などが個別であるため、正確な比較にはならないと思われるが、これら2示方書

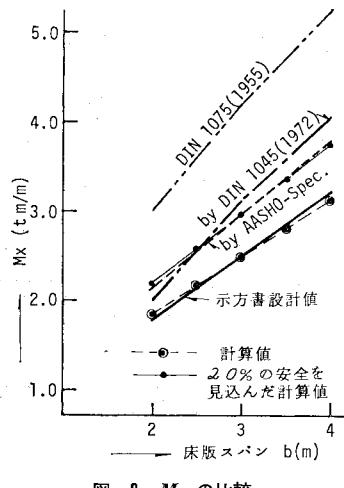


図-9 M_x の比較

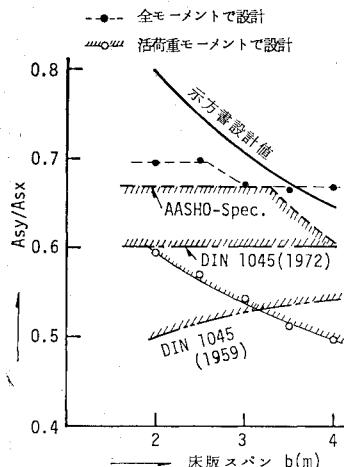


図-10 配力鉄筋比の比較

の規定に対しては、わが国の輪荷重をあてはめて計算できる。比較の対象は曲げモーメント M_x と配力鉄筋比である。

図-9は M_x に関する比較図である。この図には①本解析の提案式による M_x 、②現行示方書設計式による M_x 、③わが国の輪荷重で計算したAASHO示方書設計式の M_x 、④DIN 1045 (1972) により計算した M_x 、および、⑤DIN 1072 の SLW ⑥によるRütscheの影響面から求めた $M_x^{28)}$ を併記した。この図より、わが国の現行示方書設計式は、DIN、AASHOの M_x に比して約20~25%も小さい M_x を与えていることがわかる。直交異方性を考慮した本解析の理論値は安全を見込まないものであるにもかかわらず、現行示方書のものと同じであり、これに示方書と同じように20%程度の安全を見込むならばAASHOの M_x にはば一致し、DINの M_x とも大きな差違はなくなる。蛇足であるが、DINの⑥による M_x は図でも明らかのように非常に大きく、荷重体系が異なるといえどもドイツでは大きな荷重により床版を設計している。

図-10は M_y の代わりに配力鉄筋比について比較したものである。本研究で提案した設計法に従うと、ほぼAASHO示方書に近い値を与えることが理解できる。DIN 1045では60%以上の配力鉄筋量を配することになっており、本解析からの理論活荷重モーメントによる鉄筋比と提案設計法によるものとの中間値を与えている。わが国の現行示方書では床版スパン3m以下の場合、配力鉄筋量は非常に大きくなり、不経済であろう。

以上、2種の比較結果から、本研究で提案した設計法はAASHO、DINの規定に近いものといえる。

4. 連続版のモーメント

連続版においては床版支持桁の不等沈下による付加曲げモーメントの大きいことは、すでに成岡、国広らも強調している^{15)~20)}。しかし、これら既往の研究ではRC床版は等方性板として取り扱われている。また、コンクリートは全断面有効とした大きな床版剛性を与え、付加曲げモーメントに顕著に影響する支持桁剛性と床版剛性との比、すなわち相関剛比を小さく見積り過ぎている。さらに、不等沈下による曲げモーメントを独立に計算し、これを不等沈下のない連続版の設計値に単に加算し全モーメントとしているため、荷重体系が一致せず、精度は上らないと思われる。着目点を支間部において場合、不等沈下による付加曲げモーメントに比して、輪荷重による純曲げモーメントの方が大きく、床版剛性としては、コンクリートが全断面有効のものを用いない方が妥当と考えられる。よって、本研究では、やはり、RC

床版は中立軸以下の引張側コンクリートを無視した断面からなる直交異方性板であるとした。また、解析手法として有限要素法を用いるため、全体構造が一度に解析でき、同一荷重で不等沈下の影響を含むモーメントを算出した。

(1) 床版の種類と解析上の仮定

① 4本主桁と5本主桁をもつ連続版を対象とした。主桁間隔は等しく、1径間長 b が2, 3, 4 mの3種について解析した。これらの連続版には図-11に示すように、すべて1 mの張り出し部をつけた。ただし、張り出し部の M_y および端主桁上の M_x は片持部床版モーメントとして5.で述べる。

② 桁スパン長 L は $5b$ とした。桁スパン長と最大モーメントとの関係は図-12に示すように、 M_x は桁長の増加に従って漸増する傾向にあるが、イ) $b=2\text{m}$ の場合には $L=6b$ でピークになり、ロ) $L=4b$ より長くなるとモーメント増加は非常に小さくなる。ハ) 一般的のプレートガーダー橋(非合成)では桁スパン長は25 m程度であり、 M_x が線形的に増加するとしても $L=5b$ のものより5%程度の増加を考えればよい。以上の考察から一律 $L=5b$ とした。 M_y についてはすでに $L=2b$ で最大値に収束し、 $L=5b$ とすれば全く桁スパン長の影響を受けないであろう。

③ 床版厚は $t(\text{cm})=3b+11$ とした。この値は現行

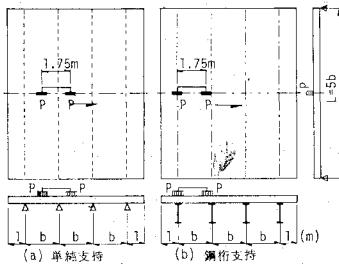


図-11 計算の対象とした連続版の一例

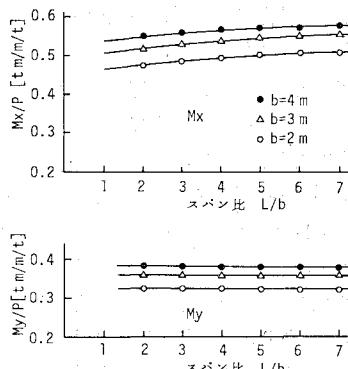


図-12 最大モーメントと桁スパン長との関係

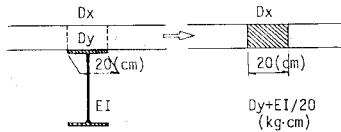


図-13 桁剛性の取り扱い

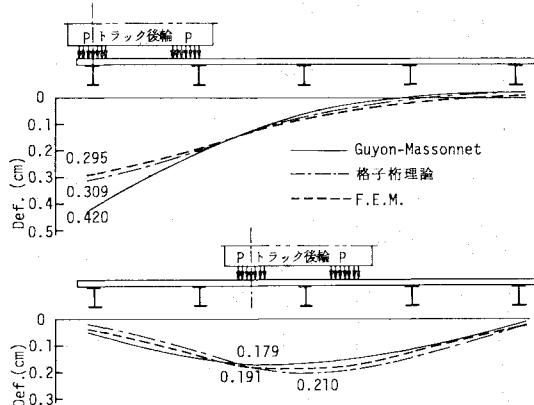


図-14 板理論・格子理論との比較

示方書の解析時と同じものである。

④ 支持桁の剛性は5種に変化させた。すなわち、相関剛比 $H (=EI/L/D_x)$, EI :支持桁の曲げ剛性, D_x :床版の主鉄筋方向の板剛性)は2, 5, 10, 20および ∞ の5種である。一般的のプレートガーダー橋では $H=10\sim 15$ 、トラス橋では $H=2\sim 5$ 程度であることから前者の4種を選んだ。 $H=\infty$ は支持桁の沈下がない場合である。

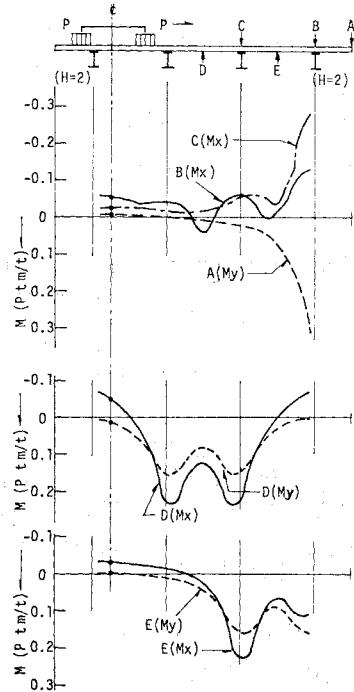
⑤ 支持桁と床版の間は非合成とした。よって、支持桁の影響は橋軸方向の曲げ剛性だけである。有限要素法のプログラム上では桁の上フランジ幅を20 cmと仮定し、図-13に示すように桁剛性をこの幅の床版要素の D_y に重ね合わせる手法をとった。この手法の妥当性、解析精度を調べるために、Guyon-Massonetの板理論と、全体構造を格子桁に変換した格子理論(横剛性は床版の D_x のみで与える)の2方法と比較検討した。この結果、図-14にその一例を示すようにたわみおよび M_y はこれら2方法のほぼ中間にあり、上記取り扱いは信頼できるものと思われる。

⑥ 荷重は後輪荷重とし、桁スパン中央に載荷した。前輪は最大モーメントに影響を及ぼさないと考え、これを無視した。連続版のモーメント解析では、桁スパン中央線上でのトラック1台の後輪一組による影響線を作り、トラックを整数台載せて最大モーメントを求めた。

⑦ 要素分割は電子計算機の限界容量、演算時間の制約から最大 53×11 (約650節点、600要素)とした。

(2) 解析結果と考察

まず、4本主桁と5本主桁の解析結果に、共通の着目

図-15 連続版の影響線図(4本主桁・ $H=2$)

点ではほとんど差違は見られなかった。

図-15 は2後輪荷重による連続版のモーメント影響線図である。各影響値は2後輪の中心点で表示した。これら影響線は大別して2つのグループに分けられる。その1つは支間モーメントの影響線であり、着目点の径間に少なくとも片方の後輪が乗る範囲で同一符号のモーメントが卓越するものである。他の1つは支点上モーメントである。この点のものは同一符号の影響域が散らばり、また、幅員の相違、相関剛比の変化によって影響線のパターンそのものが変化してしまう。

表-4 連続版における支間モーメントの M_y/M_x 値表-4 連続版における M_y/M_x 値

| 床版 の種類 | 着目点 | 中間支間 | | | 端支間 | | |
|-----------|------------|-------|------|------|-------|------|------|
| | | 床版スパン | | | 床版スパン | | |
| | | 2m | 3m | 4m | 2m | 3m | 4m |
| 4本 主桁 | $H=\infty$ | 0.67 | 0.66 | 0.69 | 0.65 | 0.66 | 0.63 |
| | 2 | 0.68 | 0.63 | 0.64 | 0.73 | 0.67 | 0.67 |
| | 5 | 0.63 | 0.61 | 0.62 | 0.63 | 0.63 | 0.57 |
| | 10 | 0.62 | 0.61 | 0.63 | 0.62 | 0.61 | 0.60 |
| | 20 | 0.63 | 0.62 | 0.63 | 0.61 | 0.62 | 0.60 |
| 5本 主桁 | $H=\infty$ | 0.66 | 0.66 | 0.67 | 0.65 | 0.64 | 0.65 |
| | 2 | 0.65 | 0.63 | 0.63 | 0.72 | 0.69 | 0.71 |
| | 5 | 0.62 | 0.61 | 0.62 | 0.64 | 0.62 | 0.64 |
| | 10 | 0.62 | 0.62 | 0.62 | 0.62 | 0.60 | 0.61 |
| | 20 | 0.62 | 0.62 | 0.62 | 0.61 | 0.60 | 0.61 |

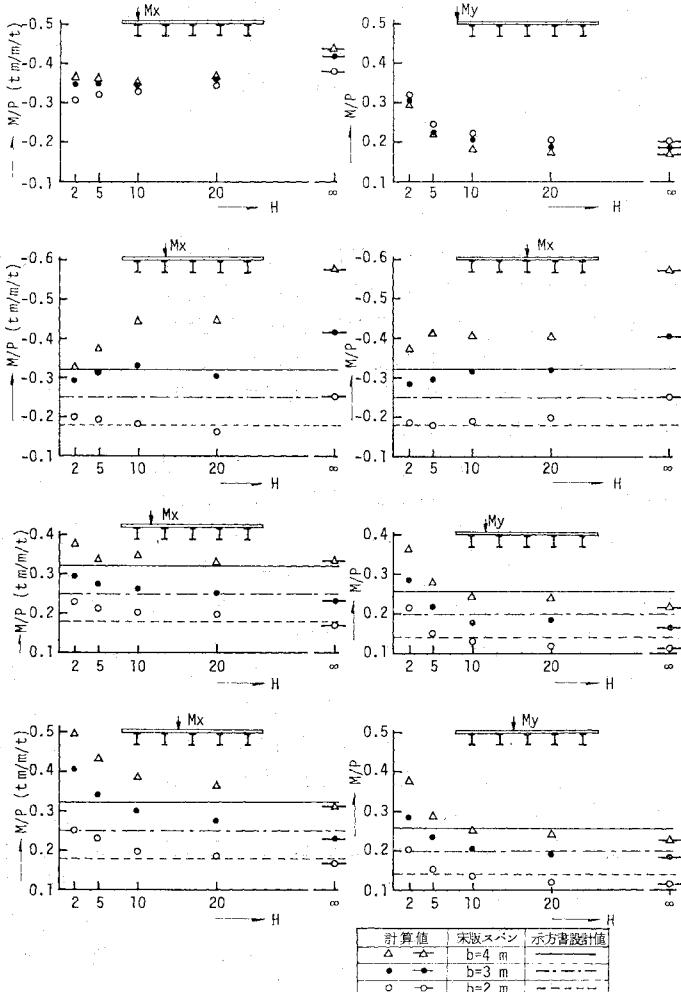


図-16 最大モーメントの相関剛比との関係

ある。これらの値は大略して単純版のものより若干大きいが、 $H=5\sim20$ の範囲では約 0.62 であり、連続版においても板剛性比 $D_y/D_x=0.6$ とつり合ったモーメント比になることが認められる。この表の値はトラック 1 台のみ載荷した場合であるが、多数台載荷した場合でも大きな差違は見られなかった。

図-16 は、影響線図の同一符号の領域に載せ得るだけのトラック（整数台）を載せて得られた最大モーメントと相関剛比の関係を示す。これらの図より、支間部モーメントは支持桁の不等沈下を考慮すると大きく増加することが明らかである。たとえば、 $H=2$ では $H=\infty$ のものと比較して、 M_x は 1.5~1.8 倍、 M_y も 1.6~1.75 倍にもなる。現行示方書の提示式は不等沈下を考慮しないものであり、この値を直線で併記した。これらの値が $H=\infty$ の結果と比較して若干上回っていることから、示方書の連続版モーメントは単純版の 80% とす

るという考えには誤りがないと考えられる。しかし、 $H = 2 \sim 20$ という実用的支持桁剛性の範囲内では、すべての着目点で、設計値は解析値を下回り、危険側になってしまふ。

支点上の曲げモーメントは図-16 で明らかなように、 $H = \infty$ の本解析値は現行示方書設計値の約 2 倍となる。一方、支持桁の不等沈下を考慮すると、支間部とは逆に、 $H = \infty$ のものから約 25~30% も減少する。しかし、床版スパンが 3 m 以上の範囲では、依然として設計値を上回っており、注意を払う必要がある。実橋では、一般にハンチを設けるためこの過大なモーメントを受けても実応力は許容値を越えない場合もあると考えられるが、床版破損調査を行った場合、支持桁上の床版上側にひびわれ発生が発見されることが多いことは、このような過大なモーメントの発生があったものと考えてよいだろう。よって、支点モーメントについても、示方書の単純版の 80% とする規定は危険側と考えられ、適切なモーメント式の提案が必要である。

さて、図-16 から、支間部モーメントは相関剛比との関係を双曲線関数で表わせられる。支点モーメントは相関剛比との間に明瞭な関係ではなく、 $H = 2 \sim 20$ の範囲

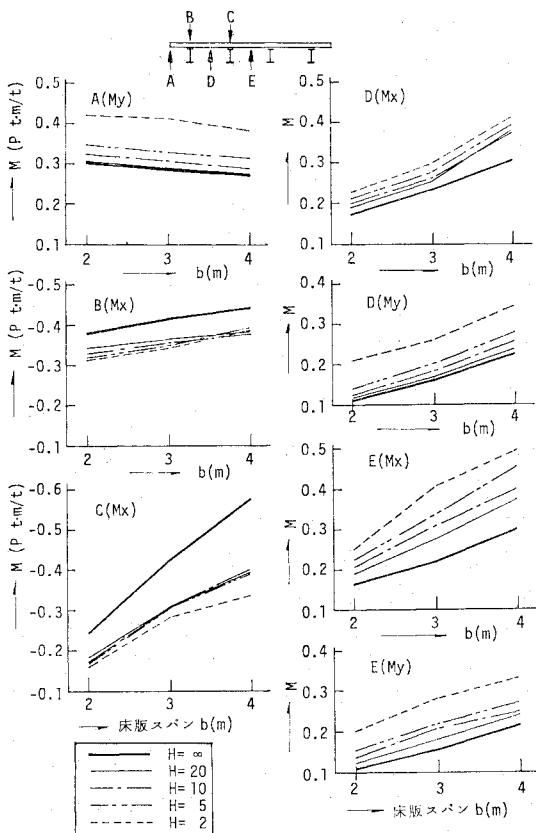


図-17 最大モーメントと床版スパンとの関係

では、ほぼ一定と評価してもよいと考えられる。

次に、各着目点の最大モーメントと床版スパンの関係を見るために図-17 に再整理した。この結果によると、全着目点とも床版スパン長 b と直線関係が見い出せる。少々、ばらつきがあるのは、スパンおよび H の相違によりトラック台数が整数単位で変化するためである。

(3) 連続版の活荷重モーメント式の提案

4.(2) での計算結果と考察をもとに、各着目点の活荷重による理論曲げモーメント式として式(5)~(8)を提案する。これらのモーメント式は、極力簡素な形で表現されているが、その誘導過程で次のような考え方を導入した。

- ① 支間部モーメントは相関剛比 H の双曲線関数とする。
- ② 支点モーメントでは相関剛比の影響が明瞭に現われないため、 H による項は設けない。
- ③ 単純版のモーメント式を基礎として表現する。
- ④ 全着目点とも、モーメントと床版支間 b は線形関係にあるとする。
- ⑤ 4 本主桁・5 本主桁の区別はしない。
- ⑥ 端支間・中間支間の M_x は若干異なるため分離する。
- ⑦ 両支間での M_y はほぼ等しいので分離しない。

端支間の M_x 式

$$M_x = (0.03b + 0.71)M_{x0} + (0.080/H + 0.020)P \quad \dots \dots \dots (5)$$

中間支間の M_x 式

$$M_x = (0.035b + 0.66)M_{x0} + (0.260/H + 0.020b + 0.020)P \quad \dots \dots \dots (6)$$

両支間の M_y 式

$$M_y = (0.035b + 0.54)M_{y0} + (0.240/H)P \quad \dots \dots \dots (7)$$

中間支点の M_x 式

$$M_x = -(0.20b + 0.70)M_{x0} + (0.02b^2 - 0.075b + 0.135)P \quad \dots \dots \dots (8)$$

ただし、 b ：床版スパン長 (m)、 P ：1 後輪荷重 (t)、
 M_{x0} 、 M_{y0} ：衝撃を含まない単純版 モーメント式でおのおの式(2')、式(4')に同じ。

以上の式(5)~(8)において、第1項は不等沈下のない連続版のモーメントで、第2項が支持桁の不等沈下を考慮することによって発生する付加モーメントである。なお、上記のモーメント式は、3 径間および 4 径間の連続版から算出したものであるが、各着目点のモーメント影響線の傾向から判断して、2 径間連続版および 5 径間以上の連続版に対しても適用可能と考えられる。

さて、これら 4 式には衝撃による影響はまったく入っ

ていない。したがって、衝撃係数による割り増しを考える必要があるが、 $H=\infty$ の項と不等沈下による項とに分離したことにより、第1項に対する衝撃係数は式(9)を、第2項には式(10)を用いるのが妥当と考えられる。

衝撃係数

$$i = \frac{20}{50+b} \quad (b: \text{床版スパン (m)}) \dots\dots\dots (9)$$

$$i = \frac{20}{50+L} \quad (L: \text{桁スパン (m)}) \dots\dots\dots (10)$$

さて、これら提案式によるモーメント値と解析値を比較すると危険側の誤差は最大5%程度にとどまり、一応妥当な提案式であると思われる。上記提案式に施工誤差、材料強度のばらつきを考慮して10~20%程度の安全を見込むならば、すべて安全側となるであろう。

連続版の活荷重による M_y も総じて M_x の約60%程度であり、死荷重モーメントを主鉄筋方向のみで受けもたせるならば設計断面の D_y/D_x は、単純版同様、0.6より低下することが予想される。この場合には3.(4)で述べたように配力鉄筋方向のモーメント値に M_x の全モーメントの65%を与える、仮定剛性を保持しなければならない。もし、 $M_y > 0.65 M_x$ の場合には、このモーメントのままで計算した断面に決定すればよい。 D_y/D_x が0.6以上になる場合、全体として安全側になるであろう。

5. 片持部床版のモーメント

実橋の片持部床版においても主鉄筋方向のひびわれが多く発生し、片持部においても配力鉄筋量は不足しているようである。このため、現行示方書で初めて片持版先端の M_y のモーメント式が提示された。しかし、これに対しても異方性は考慮されていない、また、解析モデルは1辺自由・1辺固定の片持版であり、端桁上で連続する張出し版として忠実に取り扱われていない。張り出し版とすると、 M_x は減少するが、 M_y はかなり増加し、危険側の実モーメントを発生する¹⁸⁾。また、支持桁の剛性を考慮すると、この傾向はさらに大きくなると思われる。よって、ここに、片持版・単純版の張り出し版、および、支持桁の不等沈下を考慮した連続版の張り出し版をすべて解析し、現行示方書との比較のもとに適切なモーメント式を提案する。

(1) 解析した床版

① 片持版 版のスパン長 $l=1.0\text{ m}$ は一律とし、 $(L=10\text{ m}, t=19\text{ cm})$, $(L=15\text{ m}, t=23\text{ cm})$, $(L=20\text{ m}, t=27\text{ cm})$ の3種である(図-18(a))。

② 単純版の張り出し版 張り出し長 $l=1.0\text{ m}$ は一律とし、 $(b=2\text{ m}, L=10\text{ m}, t=19\text{ cm})$, $(b=3\text{ m}, L=15\text{ m}, t=23\text{ cm})$, $(b=4\text{ m}, L=20\text{ m}, t=27\text{ cm})$ の3種である(図-18(b))。

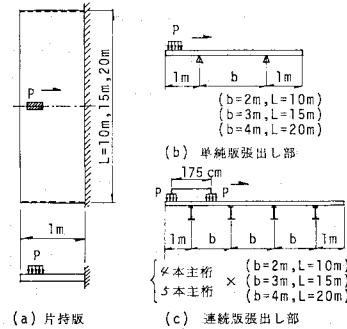


図-18 片持部床版

$=15\text{ m}, t=23\text{ cm}$, $(b=4\text{ m}, L=20\text{ m}, t=27\text{ cm})$ の3種である(図-18(b))。

③ 連続版の張り出し版 張り出し長 $l=1.0\text{ m}$ は一律とし、4本主桁と5本主桁をもつ2種の連続版で、おのおの、 $(b=2\text{ m}, L=10\text{ m}, t=17\text{ cm})$, $(b=3\text{ m}, L=15\text{ m}, t=20\text{ cm})$, $(b=4\text{ m}, L=20\text{ m}, t=23\text{ cm})$ の3種である(図-18(c))。

(2) 解析結果と考察

全床版ともその一例を図-15にすでに示したような影響線図から、 M_x, M_y の最大値を計算した。これらの結果を図-19~22にまとめた。

図-19は本解析における片持版の結果であるが、その値およびスパンとの関係は示方書の理論値とほぼ同じであった。床版厚を厚くすると M_x, M_y とも減少することが認められる。しかし、床版厚19cmの結果と、16cmで計算された示方書の値はスパン50cm~75cmの間でほぼ一致している。これは、床版厚増によるモーメントの減少を直交異方性による M_x の増加によって相殺されたためである。床版の安全性を考えるならば、やはり片持部も直交異方性を考慮すべきものと考えられる。

図-20は張り出し版の結果であるが、支点沈下のない張り出し版のモーメント M_x は片持版のものより20%以上も減少する。さらに、支持桁の不等沈下を考慮すると約12~17%減少する。しかし、図-20で明らかのように、 M_x では不等沈下による影響は $H=2\sim20$ の範囲ではほぼ一定であった。

M_y は M_x とは逆に、張り出し版として計算すると、荷重載荷スパン $l=50\text{ cm}$ 以上では片持版(示方書)のものより大きくなり、また、床版支持桁の相関剛比の減少によって大きく増加し、設計式には相関剛比 H を考慮しなければならないであろう。 M_y の相関剛比 H との関係はやはり双曲線関数で示されることが図-22により認められる。

図-21は最大モーメントと内側スパンとの関係を示

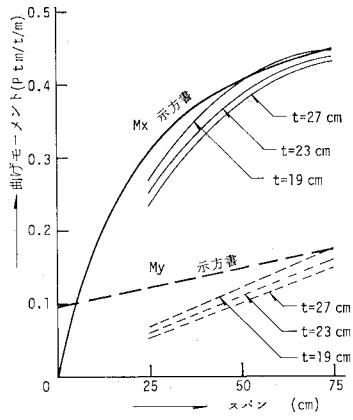


図-19 片持版のモーメント

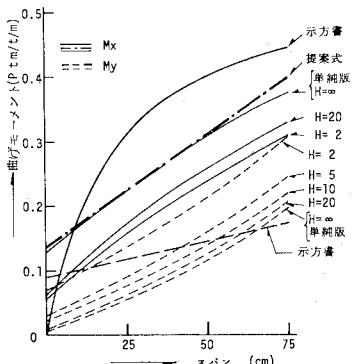


図-20 張り出し版のモーメント

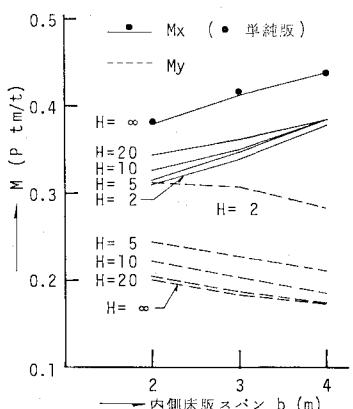
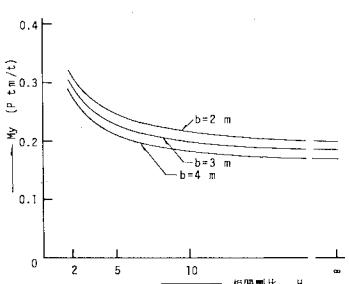


図-21 張り出し版モーメントと内側スパンとの関係

図-22 片持部先端の M_y と相関剛比との関係

すが、両者の間は線形関数で表現されると考えられる。しかし、 M_x と M_y では内側スパンの影響は逆になる。

(3) 片持部床版のモーメント式の提案

5.(2) の片持部床版の解析結果から、片持部床版における端桁上の M_x 、および、片持部先端における M_y について、式(11)、(12)のようなモーメント式が提案できる。 M_x 式、 M_y 式とも、床版スパンとは線形関係をもたせ、内側スパンの影響を係数表示した。また、 M_y は相関剛比の項を付加したが、 M_x では相関剛比による影響が明瞭でないため、単純版の張出し版モーメントを安全側として採用した。ただし、本提案式は荷重載荷スパン（後輪中心から支点までの距離）が 75 cm、すなわち、張り出し長が 1 m までのものに適用可能である。

端桁上の M_x 式

$$M_x = (0.08b + 0.84)(0.36l + 0.13)P(1+i) \quad \dots \dots \dots (11)$$

ただし、 b ：内側スパン長 (m)

l ：片持部支点と後輪中心との距離 (m)

先端の M_y 式

$$M_y = (1.13 - 0.065b)(0.25l + 0.01)P(1+i) + 0.230/H \cdot P(1+i') \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$\text{ただし}, i = \frac{20}{50+l} \quad i' = \frac{20}{50+L}$$

上記片持部床版のモーメント式において、床版スパン l の係数は支間モーメントの係数の約 4.5 倍になっており、片持部床版はスパン長の増加の影響を顕著に受けることがわかる。床版全体でバランスのとれた断面の設計を行うことは安全かつ経済的であると考えられる。このため、片持部床版の最大張り出し長は 1 m 程度にすべきであると思われる。片持部床版も、単純版・連続版と同様に、板剛性比が 0.6 になるよう設計されるべきであろう。

6. あとがき

道路橋 R C 床版の 1 方向版で、主鉄筋が車両進行方向に直角な場合に關し、直交異方性を考慮した R C 床版の単純版・連続版および片持部床版の曲げモーメント式および設計法の提案を行った。従来からも道路橋 R C 床版の異方性は概念的には認められているが、現場での確認実験の大半ではたわみによる判定によるところが多く、床版の最大たわみが 0.5 mm 前後という小さな値であることから、精度的にその異方性度の評価は困難であったと思われる。しかし、既存のひびわれが入った床版から切り出した供試体においては異方性板理論適用の妥当性が理解できる。最近では、床版にはひびわれ発生を許容

するか、否かの議論もあるが、現段階では、ひびわれ断面での直交異方性を考慮して設計を行っておくのが安全であろうと考える次第である。

連続版・片持部床版では支持桁の不等沈下の影響が大きいことを示した。連続版では統一的に単純版モーメント式を基礎にし、不等沈下の影響を分離し、衝撃係数による割り増しが合理的に行えるようにした。

設計式に見込む安全率については、施工誤差・材料のばらつきなどが考慮されねばならず、今回は資料不足のため、ここでは論議しなかった。

最後に、本解析の電算プログラム作製、膨大なデータ整理にあたり、当時の大阪大学大学院生 田中敏幸君(現日本道路公団勤務)、および、小島一雄君(現新日本製鉄勤務)の多大のご助力を得たことをここに記し、深甚の謝意を表する次第である。

なお、本研究の解析では、阪大型計算機センターの NEAC 2200-700、および、京大型計算機センターの FACOM 230-60/75 を使用したことと付記する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋設計製作示方書解説、昭和 39 年 6 月。
- 2) 国広哲男：橋りょうスラブのこわれ方・なおし方、土木施工、12 卷 12 号、13 号、1971。
- 3) 建設省道路局：橋梁の床版設計について—鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版の配力鉄筋に関する道路局長通達一、道路 No. 323、昭和 43 年 1 月。
- 4) 日本道路協会橋梁委員会：鋼道路橋床版の設計に関する暫定基準(案)および施工に関する注意事項、道路 No. 332、昭和 43 年 10 月。
- 5) 建設省道路局長通達：鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版の設計について、建設省道企発第 9 号、昭和 46 年 3 月。
- 6) 道路橋示方書・同解説：日本道路協会、昭和 48 年 2 月。
- 7) J.P. Leyod, H.M. Rejali and C.E. Kesler : Crack Control in One-Way Slabs Reinforced with Deformed Welded Wire Fabric, ACI Journal, May 1969.
- 8) 前田幸雄・松井繁之・小島一雄・西本祐司：道路橋 RC 床版の疲労破壊特性について、昭和 51 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集、昭和 51 年 5 月。
- 9) 前田幸雄・松井繁之・田中敏幸：鉄筋コンクリート床版に関する 2,3 の考察、昭和 46 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集、昭和 46 年 5 月。
- 10) 前田幸雄・松井繁之・田中敏幸：同上(その 2)，昭和 48 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集、昭和 48 年 6 月。
- 11) 前田幸雄・松井繁之：RC 床版の耐荷力とその補強方法、第 11 回日本道路会議論文集、昭和 48 年。
- 12) 倉田宗章・園田恵一郎・実松秀夫・竹村泰弘：既設道路 RC 床版の疲労破壊実験と疲労破壊機構に関する一考察、第 22 回構造工学シンポジウム、1976.1.
- 13) Rüsch : Fahrbahnplatten von Straßenbrücken, 5 Anflage, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1960.
- 14) 米沢 博：道路橋床版の設計曲げモーメントについて、土木学会論文集 第 33 号、昭和 31 年 4 月。
- 15) Standard Specifications for Highway Bridges—Sec. 1.3.2, 1965 and 1973, The American Association of State Highway Officials.
- 16) Proposed ACI Standard-Recommended Practice for Concrete Highway Bridge Deck Construction, Report by ACI Committee 345, ACI Journal, June 1973.
- 17) 成岡昌夫：鋼上路道路橋の縦桁によって支持される床版の曲げモーメントについて、土木学会誌 38-12, 昭和 28 年 12 月。
- 18) 佐藤 進・成岡昌夫：支持桁のたわみを考慮した鋼道路橋の鉄筋コンクリートの床版の曲げモーメントについて、土木学会論文報告集 第 175 号、昭和 45 年 3 月。
- 19) 国広哲男・井刈治久：床版支持桁の不等沈下によって生ずる床版の曲げモーメント、土木技術資料 Vol. 13-1, 昭和 46 年 1 月。
- 20) 国広哲男・井刈治久・伊藤 満：床版支持桁の不等沈下によって生ずる床版の曲げモーメント計算図表、建設省土木研究所資料 第 771 号(昭和 47 年 9 月), 第 875 号、(昭和 48 年 9 月)。
- 21) 前田幸雄・松井繁之・小島一雄：道路橋 RC 床版のモーメント式に関する 2, 3 の考察、第 29 回土木学会年次学術講演会概要集、昭和 49 年 10 月。
- 22) 岩橋 賢・山下義之：道路橋床版の破損とその補強工法の一例、第 23 回建設省技術研究報告集 B-2.20, 昭和 44 年 11 月。
- 23) 加藤 寛・渡部 章・小畑陽康：鋼道路橋における鉄筋コンクリート床版の疲労試験について、日本道路公団第 15 回業務研究発表会論文集 11-21, 昭和 48 年。
- 24) 横本公司・原 千里：鉄筋コンクリートスラブにおける配力鉄筋の影響について、第 27 回土木学会年次学術講演会概要集、昭和 47 年 10 月。
- 25) 倉田宗章・園田恵一郎・堀川都志雄：道路橋床版の輪荷重点下の応力の評価、第 30 回土木学会年次学術講演会概要集、昭和 50 年 10 月。
- 26) DIN 1045-Beton und Stahlbetonbau-Bemessung und Ausführung, 1972.
- 27) DIN 1045-Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Stahlbeton, 1959.
- 28) 太田 実：鉄筋コンクリート道路橋床版における配力鉄筋量の検討、土木研究所資料、第 307 号、昭和 42 年 7 月。
(1975.4.7・受付)