

2 方向支持された長支間道路橋 RC 床版の 設計曲げモーメント式について

DESIGN BENDING MOMENT FORMULAE OF RC TWO-WAY SLABS AT HIGHWAY BRIDGES

松井 繁之* 石崎 茂**

By Shigeyuki MATSUI and Shigeru ISHIZAKI

* 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

** ㈱酒井鉄工所 橋梁設計部長 (〒590 堺市出島西町 3-1)

The structural systems in short- and medium-span highway bridges are investigated, recently, from various aspect for the purpose of decreasing cost of fabrication works and erection in site due to structural simplification. For one of these, the replacement of the type of girder systems from multi-girder to 2- or 3-girder ones has been investigated and put into practical use. In this type of girder systems, the span length of concrete deck slabs become longer than the one of usual type of bridge systems, so that the design bending moment formulae prescribed in JSHB have not been applicable. On the other hand, the strengths and durabilities of slabs are improved by arranging the main bars parallel to main girders from the prediction of distributed configuration of wheel load, and the thickness of concrete deck slabs can be thin by supporting with cross beam placed perpendicular to main girders. Under these circumstances, the bending moments due to dead and live load for 2-way concrete deck slabs are analyzed in order to propose the design bending moment formulae. In this calculation, the influence of deflection of cross beams and orthotropy of slabs due to cracking of tension side of concrete are also taking into consideration.

Key Words : highway bridges, RC slabs, 2-way slabs, design bending moment fomulae

1. まえがき

わが国の道路橋における RC 床版の設計規定は、損傷事例の増加と共に見直され、昭和 42 年には、建設省通達により配力鉄筋量の増加規定が盛り込まれ、昭和 46 年には、同通達により最小版厚が増厚されると共に鉄筋の許容応力度が低減された。さらに、昭和 53 年には、大型車両の計画交通量による床版厚の増厚規定が導入され、鉄筋応力度も低めに設定するよう規定されると共に支持桁の不等沈下の影響を考慮した設計法が導入された。そして、平成 5 年 11 月には道路構造令の改訂に伴い設計自動車荷重が改訂され、現在に至っている。しかしながら、これらの設計規定の基本となる設計曲げモーメント式は、相対する 2 辺で単純支持された等方性無限板の解析結果を基準としたものであり、昭和 46 年の改定以来、基本的な見直しは行われていない。

床版を 2 辺単純支持の無限板とした場合、輪荷重の載荷面の形状から、床版支持桁を車両進行方向と平行に配置し、床版スパンをこれと直角に配置する構造が、支持桁を車両進行方向と直角に配置する構造より有利となる。このため、わが国の中小スパン橋梁に多用される桁橋に

において、床版を主桁で 1 方向に単純支持した多主桁橋とし、主鉄筋を車両進行方向と直角に配置する例が圧倒的に多い。しかしながら、松井ら¹⁾の研究によれば、車両進行方向と直角に主鉄筋を配置した道路橋 RC 床版の疲労耐久性は、主鉄筋と平行な貫通ひび割れの発生による版のはり状化に伴う主鉄筋断面のせん断強度の低下に支配されることが報告されている。このような貫通ひび割れの発生に対しては、輪荷重の載荷面の形状が橋軸直角方向に偏平な矩形であることから判断して、主鉄筋を車両進行方向と平行に配置した方が有利と考えられる。また、車両進行方向と平行にトラス形鉄筋を配置した床版の疲労実験²⁾では、これを直角方向に配置した場合より疲労耐久性が著しく向上することが確認されている。

一方、近年、中小スパン鋼道路橋の製作コストや維持管理コストの低減、および現場作業の省力化を目的として、様々な方向から従来の多主桁橋の構造を簡素化するための検討が加えられている。そのひとつとして、従来の多主桁形式を 2、または 3 主構の I 桁形式とする試みが注目されつつある³⁾。主構造を少主桁化し、かつ、構造簡素化のため主桁間の縦桁を省略した場合、床版支間

が著しく増大し、現行の道路橋示方書⁴⁾(以下道示と記す)の適用支間を超えるため、RC床版の設計曲げモーメント式が適用できなくなるだけでなく、現行示方書の最小版厚規定を適用した場合、床版厚が増大し、死荷重の増加に伴う鋼重の増加により、省力化によるコスト削減効果が消失する。これを解決するには、従来のRC床版にプレストレスを導入し強度を増大させる方法⁵⁾、あるいは床版の支持構造を見直し、床版を2方向版とし、発生曲げモーメントを低減する方法⁶⁾、のいずれかを採用せざるを得ないものと考えられる。

以上のことから、少主桁で長支間のRC床版を有する道路橋において、充腹構造の横桁で床版を支持し2方向版とすることは、床版の発生曲げモーメントを低減し、床版厚を薄くすることを可能とするだけでなく、これによって、主鉄筋を車両進行方向に配置することが可能となり、RC床版の疲労耐久性の向上にも有効であると考えられる。したがって、本文では、主桁と充腹構造の横桁で2方向支持された道路橋RC床版の設計曲げモーメント式を誘導するため、横桁剛性、および引張側コンクリートのひび割れによる版の直交異方性を考慮した解析によって、死荷重、および輪荷重により版に作用する最大曲げモーメントを主桁、および横桁間隔を変えて算出し、これを基にして、2方向RC床版の設計曲げモーメント式を提案することを試みる。

なお、張り出し部の曲げモーメントについては、この部分の構造が従来の多主桁橋の床版と同様であり、曲げモーメント式も、現行の道示の式がそのまま使用できるものと考えられるため、本文の対象外とした。

2. 解析方法

解析方法としては、横桁の変形が床版の設計曲げモーメントに与える影響を考慮するため、主桁および横桁には棒要素を用い、床版には平面応力の影響をも考慮した5自由度の直交異方性の板曲げ要素を用いて、桁の中立軸と床版中立面との偏心を変位の適合条件により考慮した、準立体FEM解析⁷⁾に拠った。

また、床版の直交異方性の影響は、板要素の弾性マトリックスを算定する際、引張側コンクリートを無視した断面で、直交2方向の板剛性をHuberの提案式⁸⁾に基づいて次式で評価した。すなわち、

$$[D] = \begin{bmatrix} D_x & D_1 & 0 \\ D_1 & D_y & 0 \\ 0 & 0 & D_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$D_x = \frac{E_c}{1 - \nu^2} [I_{cx} + n I_{sx}] \quad (2)$$

$$D_y = \frac{E_c}{1 - \nu^2} [I_{cy} + n I_{sy}] \quad (3)$$

$$D_1 = \nu \sqrt{D_x D_y} \quad (4)$$

$$D_{xy} = \frac{1 - \nu}{2} \sqrt{D_x D_y} \quad (5)$$

ここに、

[D] : 板要素の弾性マトリックス、

D_x, D_y : それぞれ、主鉄筋方向、および配力鉄筋方向の版の板剛性、

D_{xy} : 直交異方性版のねじり剛性、

E_c : コンクリートの弾性係数、

ν : コンクリートのポアソン比、

I_{cx}, I_{sx} : 主鉄筋断面の中立軸に関するコンクリート、および鉄筋の断面2次モーメント、

I_{cy}, I_{sy} : 配力鉄筋断面の中立軸に関するコンクリート、および鉄筋の断面2次モーメント、

n : 鋼とコンクリートのヤング係数比である。

3. 計算手順と解析モデル

2方向版に作用する死荷重曲げモーメント、および活荷重曲げモーメントに対する解析手順のフローチャートを図-1に示す。

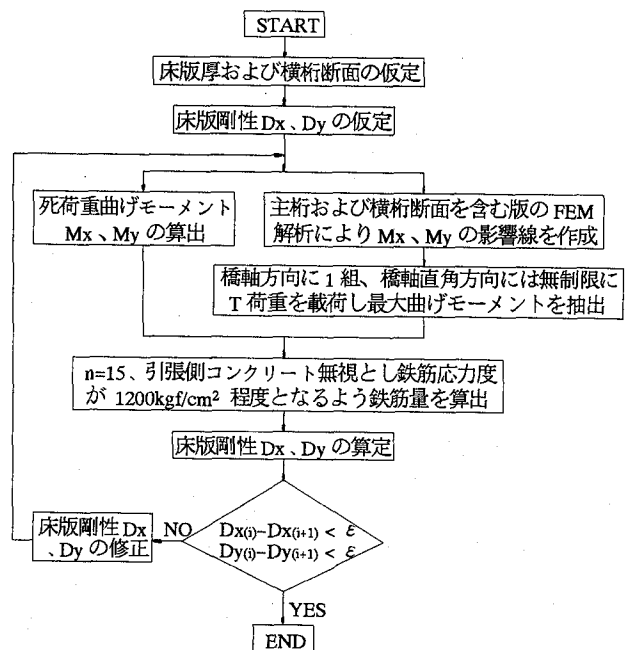


図-1 曲げモーメント算出のフローチャート

死荷重、および自動車輪荷重による最大曲げモーメントの算定に際しての解析条件の詳細については、以下の節に示すとおりとした。なお、収束の判定基準とした仮定板剛性と鉄筋応力度算定後の板剛性の差 ε は、主鉄筋方向、配力鉄筋方向とも、仮定板剛性の5%以内とした。

3.1 床版厚の仮定

現行道示の最小厚規定は、コンクリートが、ある程度までは曲げ引張力に抵抗し得ることに着目し、床版コン

クリートに生じる曲げ引張応力がある限度内に押さえて有害なひび割れの発生を抑制することを目的として定められたものである。したがって、ここでも同様の考えから、対象とする構造条件、荷重条件に対して、鉄筋コンクリート断面を等方性版として求められる曲げによるコンクリートの最大引張応力度がコンクリートの曲げ引張強度以下となるよう決定した2方向版の最小版厚⁹⁾を仮定床版厚として以下の計算を行った。

3.2 横桁断面の仮定

床版を2方向版とする場合、主桁と横桁、および床版の剛性の差異の影響を考慮する必要がある。少主桁橋梁の場合、一般に、主桁の曲げ剛性が横桁の曲げ剛性に比して著しく大きくなるため、版の曲げモーメントは、横桁の剛性と床版の剛性の比によって決定され、主桁の剛性は、版の曲げモーメントにほとんど影響を与えなくなる。このため、主桁に対応する棒要素の剛度を横桁剛度に比して十分大きな値とし、横桁剛度のみに以下に示す断面剛度の算定値を用いることとした。すなわち、横桁剛度は、解析対象とする、それぞれの主桁および横桁間隔に対して、舗装、および仮定床版厚に対する死荷重による曲げモーメント、および道示のT荷重による曲げモーメントを算定し、この曲げモーメントにより横桁の断面決定を行うことによって評価した。表-1に解析に使用した横桁断面と断面性能およびその決定根拠となった鋼桁の縁応力度を示す。

なお、横桁断面の決定にあたって以下の事項を考慮した。すなわち、横桁の変形を少なくし、床版の2方向版としての特性を生かすため、横桁の材質としてSS400を用い、最小桁高を800mmとした。また、最小フランジ断面は、製作上の制約から200mm×10mmとした。

3.3 死荷重曲げモーメント

現行の道示では、対象としている解析モデルが、単純支持無限板のため、主鉄筋方向の設計曲げモーメントとして、梁としての曲げモーメント式をそのまま使用し、配力鉄筋方向の曲げモーメントは無視している。しかし、2方向版の場合、主桁間隔と横桁間隔の比の変化に伴い、主鉄筋方向、および配力鉄筋方向の死荷重により発生する曲げモーメントは、共に変化する。さらに、主鉄筋方向と配力鉄筋方向の板剛性比の影響をも受けることとなる。したがって、2方向版に対しては、死荷重による曲げモーメント式についても、主桁間隔と横桁間隔の比、および板剛性比の変化を考慮したパラメトリック解析により評価する必要がある。以下に、上記パラメトリック解析を行う際の条件について説明する。

(1) 荷重の載荷方法

2方向版の死荷重による曲げモーメントを算定する際の荷重条件としては、等分布死荷重として舗装(75mm厚)、および、解析対象とする、それぞれの主桁、および横桁間隔に対し3.1で決定される床版厚に対応する床版自重を載荷した。

表-1 横桁断面の総括表

L	B	T	bf	tf	hw	t	A	I	e	σ_f
3.0	3.0	25	200	10	800	9	112.0	1.040	60.5	641
	4.0	26	200	10	800	9	112.0	1.040	61.0	1064
	5.0	28	200	10	900	9	121.0	1.375	67.0	1353
	6.0	29	230	10	1100	9	145.0	2.415	77.5	1347
	7.0	30	260	12	1200	9	170.4	3.588	83.0	1362
	8.0	31	290	12	1400	9	195.6	5.527	93.5	1346
	9.0	31	340	14	1400	9	221.2	6.817	93.5	1370
4.0	10.0	32	360	14	1600	9	244.8	9.637	104.0	1372
	4.0	27	200	10	800	9	112.0	1.040	61.5	1131
	5.0	30	220	10	900	9	125.0	1.458	68.0	1376
	6.0	32	260	12	1000	9	152.4	2.348	74.0	1374
	7.0	33	290	12	1200	9	177.6	3.852	84.5	1382
	8.0	34	320	14	1300	9	206.6	5.515	90.0	1369
	9.0	35	340	14	1500	9	230.2	7.987	100.5	1376
5.0	10.0	36	360	16	1600	9	259.2	10.593	106.0	1376
	5.0	30	250	10	900	9	131.0	1.582	68.0	1346
	6.0	33	250	10	1200	9	158.0	3.126	84.5	1325
	7.0	35	280	12	1300	9	184.2	4.540	90.5	1375
	8.0	37	320	14	1400	9	215.6	6.537	96.5	1360
	9.0	38	340	14	1600	9	239.2	9.272	107.0	1385
	10.0	39	370	16	1700	9	271.4	12.401	112.5	1369
6.0	6.0	34	270	12	1100	9	163.8	3.001	80.0	1360
	7.0	37	280	12	1400	9	193.2	5.407	96.5	1346
	8.0	40	360	14	1400	9	226.8	7.096	98.0	1372
	9.0	41	350	16	1600	9	256.0	10.384	108.5	1358
	10.0	42	360	19	1700	9	289.8	13.791	114.0	1354

記号; L: 横桁支間(m) bf: フランジ幅(mm) hw: 腹板高(mm)
 B: 主桁支間(m) tf: フランジ厚(mm) tw: 腹板厚(mm)
 T: 床版厚 (cm) A: 総断面積 (cm²) e: 偏心量(cm)
 I: 断面2次モーメント(10⁶cm⁴) σ_f : 最大曲げ応力度(kgf/cm²)

(2) 主桁間隔および横桁間隔の設定

文献 6) より主桁間隔が10m、横桁間隔が6mを超えると床版厚が厚くなりすぎ、2方向版とすることの妥当性が損なわれるため、主桁間隔は、3m～10m、横桁間隔は3m～6mとし、それぞれ1m刻みに変化させ計算を実行した。なお、最小主桁間隔、および最小横桁間隔を3mとしたのは、主桁間隔がこれ以下の場合が多主桁構造とした方が有利となるためであり、また、横桁間隔が3m以下の場合横桁数が多くなりすぎ構造を簡素化するという初期の目的が損なわれるためである。

3.4 T荷重による曲げモーメント

T荷重により床版に発生する最大曲げモーメントは、死荷重の場合と同様に、2方向版の縦横比、および床版の直交異方性の影響を受けるものと考えられるが、それに加えて、主鉄筋方向と配力鉄筋方向の荷重分配率が、輪荷重載荷面の形状、および輪荷重載荷面から床版中立面への荷重配分の関係から床版厚の影響をも受けることになる。このため、上記の縦横比、および版の直交異方性の影響を死荷重による曲げモーメントの場合以上に大きく受けるものと考えられる。

これらのことから、図-1に示したように、仮定した板剛性により求められた死荷重、および活荷重による曲げモーメントの解析値を用いて主鉄筋方向、および配力鉄筋方向の鉄筋応力度を算定し、鉄筋断面を決定し、これによる板剛性が、解析の際に仮定した主鉄筋方向、および配力鉄筋方向の板剛性とほぼ等しくなるように収束計算を実施することとした。この収束計算により、主鉄筋方向、および配力鉄筋方向の最終の曲げモーメントを算定した。なお、鉄筋応力度の算定に際しては、鉄筋ピッチを5mm単位で変化させ鉄筋応力度が1200 kgf/cm²に最も近くなる断面を用いて板剛性の評価を行った。これは、現行の道示では、床版の鉄筋比をある程度以上に保持し、有害なひび割れの発生を防止するため、床版支持桁の不等沈下の影響を無視できる場合でも、鉄筋の許容応力度1400 kgf/cm²に対して200kgf/cm²程度の余裕をみるよう規定されているためであり、ここでも同様の考えから目標とする鉄筋応力度を1200kgf/cm²とした。計算に際しての、荷重の載荷方法、および最大曲げモーメントの算定手順は、以下に示すとおりである。

(1) 荷重の載荷方法

2方向版で、横桁間隔が6 m以下の場合、道示で規定される自動車の後輪荷重が、版の曲げモーメントが最大となるパネル中央に載荷されるとき、前輪荷重は、隣接パネルに載荷されることになる。このため、前輪荷重は、最大曲げモーメントを減少させる方向に作用する。したがって、ここでは、安全側を考慮し、前輪荷重の影響は無視することとした。

また、T荷重の載荷方法は、道示の規定に基づき、後輪荷重を橋軸方向に1台、橋軸直角方向には可能な限り載荷することとした。また、輪荷重は、部分分布荷重とし、図-2に示すように、床版の中央面まで45°の角度で拡大分布するものとし、舗装による荷重分配は、コンクリートの剛性に対して舗装の剛性が著しく小さいことから、これを無視するものとした。

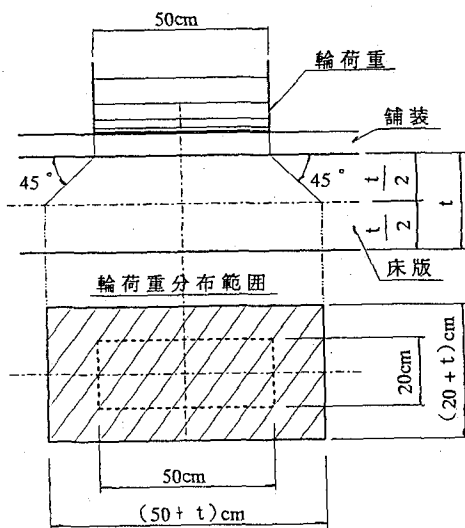


図-2 輪荷重の分布形状

(2) 最大曲げモーメントの計算手順

最大曲げモーメントの算定法としては、図-3に示すように、中央パネルの中央点におけるパネル中心線上の主鉄筋方向、および、配力鉄筋方向の曲げモーメントの影響線を、1個の輪荷重を主桁上よりパネル中央点まで250mmピッチで移動させ載荷することにより作成した。この影響線上に、道示のT荷重を図-3に示すように橋軸方向に1台、橋軸直角方向には可能な限り載荷し、輪荷重の間隔を保持したまま、載荷位置を橋軸直角方向に移動させることにより、最大曲げモーメントを算定した。また、計算に用いた主桁間隔、および横桁間隔は、死荷重による曲げモーメントを算定した際と同様、主桁間隔を、3 m～10 m、横桁間隔を3 m～6 mとし、それぞれ1 m刻みに変化させて計算を実行した。なお、衝撃の影響は、道示に示された次式を用いて評価した。

$$i = \frac{20}{50+L}$$

ここに、 i ：衝撃係数、

L ：横桁間隔である。

なお、横桁位置の支点部負曲げモーメントについては、後輪2軸のトレーラーの軸重を10tfとし、輪荷重が横桁を跨いで載荷される場合と、道示のT荷重が橋軸直角方向に並列し、橋軸方向には、横桁をはさんで載荷される場合について曲げモーメントを算定したが、いずれの場合も、その絶対値が支間部最大曲げモーメントの1/2以下であった。このため、支点部の断面は、現行道示の多主桁橋における支点部と同様、支間部の断面をそのまま延長し、支点上にベンド筋を追加する構造でよいと思われるため、ここでは詳細な検討を省略した。ただし、この部分の詳細については今後の検討課題としたい。

3.5 解析モデル

本文で解析対象とする床版は、主桁と横桁で弾性支持された連続版であり、横桁間を1パネルとして、その3パネル分を取り出したモデルでは、床版端部における境界条件の影響を受けるが、5パネルでは連続版の値に収束することが確認された。したがって、図-3に示すように、5パネル分を取り出したモデルを解析モデルとして使用した。なお、本解析モデルでは、実際の道路橋に

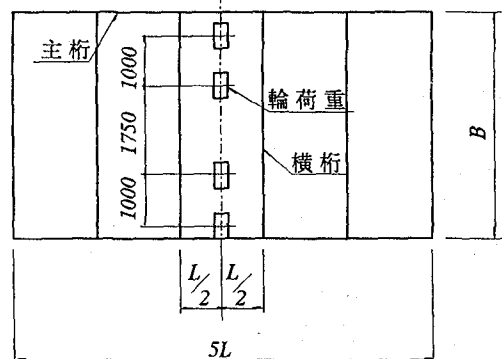


図-3 解析モデル

見られる主桁外側の床版の張り出し部分が無視している。計算に先立って、この張り出し部分を考慮したモデルと、無視したモデルについて計算を実施したが、主鉄筋方向、および配力鉄筋方向の曲げモーメントとも、無視したモデルの方が若干大きめの値となった。この曲げモーメントの差異は、張り出し長によって異なるものと考えられるため、ここでは、安全側を考慮して、張り出し部は無視することとした。

4. 解析結果と考察

上記の方法で求めた死荷重、および活荷重による最大曲げモーメントの解析結果を、最終の鉄筋応力度 σ_s 、および、これに対するコンクリート、および鉄筋の剛度 I_{cx} , I_{sx} 、 I_{cy} , I_{sy} と共に表－2に示す。

この表より、横桁間隔が等しい場合、主鉄筋方向の曲げモーメントは主桁間隔の増大に伴って増加するが、配力鉄筋方向の曲げモーメントは逆に減少することがわかる。これは、主桁間隔の増大に伴って配力鉄筋方向への曲げモーメントの分配率が低下するためと考えられる。

表の中で、配力鉄筋断面の鉄筋応力度が小さい値となっている部分は、道示で規定される圧縮側鉄筋の最大中心間隔を300mmとすれば、引張側鉄筋の最大中心間隔が、150mmとなるため、引張側鉄筋の最少鉄筋量をD16、150mmピッチとして算定したためである。

4.1 死荷重曲げモーメント

(1) 主鉄筋方向曲げモーメント

死荷重による主鉄筋方向の曲げモーメントの解析結果を死荷重強度、および横桁支間長で無次元化し、主桁間隔と横桁間隔の比に対して整理したものを図－4に示す。

この図より、死荷重による主鉄筋方向の無次元化曲げモーメント係数 (M/wL^2) は、主桁間隔と横桁間隔の比B/Lが1に近づくにつれて急激に減少することがわかる。これは、配力鉄筋方向に曲げモーメントが分配されるためであり、逆にB/Lが2を超えると、2方向版としての特性が失われ、1方向版の曲げモーメントと考えられる一定値に収束することがわかる。

また、死荷重による主鉄筋方向の曲げモーメント係数をB/Lにより整理すると、そのばらつきは最大でも7.5%程度であり、同曲げモーメントは、B/Lをパラメータとして比較的精度良く評価できることがわかる。

(2) 配力鉄筋方向曲げモーメント

主鉄筋方向の場合と同様に、死荷重による配力鉄筋方向の無次元化曲げモーメント係数をB/Lによって整理したものが図－5である。

この場合も主鉄筋方向と同様にB/Lが2を超えると一定値に近づくが、ばらつきは、主鉄筋方向の曲げモーメントと比較して若干大きめとなる。また、B/Lが1に

表－2 解析結果と最終の鉄筋断面および応力度

横桁 間隔	主桁 間隔	床版 厚	主鉄筋		主鉄筋方向曲げモーメント			σ_s kg/cm ²	I_{cx}		I_{sx}		配力鉄筋		配力鉄筋方向曲げモーメント			σ_s kg/cm ²	I_{cy}		I_{sy} kg/cm ⁴
			径	ピッチ	M(d)	M(l)	M(l+i)		kg/cm ²	cm ⁴	cm ⁴	径	ピッチ	M _d	M _l	M(l+i)	kg/cm ²		cm ⁴	kg/cm ⁴	
																					mm
m	m	cm	mm	mm	t・m/m	t・m/m	t・m/m	cm ²	cm ⁴	cm ⁴	cm ⁴	cm ⁴	mm	mm	t・m/m	t・m/m	cm ²	cm ⁴	kg/cm ⁴		
3.0	3.0	25	D19	150	0.252	2.835	3.905	1200	16815	3397	D16	150	0.148	1.523	2.098	1009	10749	2421			
	4.0	26	D19	140	0.314	3.183	4.384	1207	19602	3993	D16	150	0.147	1.397	1.924	882	11716	2795			
	5.0	28	D19	140	0.359	3.433	4.728	1190	23047	4942	D16	150	0.171	1.348	1.857	782	13758	3624			
	6.0	29	D19	140	0.380	3.638	5.011	1207	24863	5457	D16	150	0.165	1.258	1.733	699	14832	4078			
	7.0	30	D19	140	0.394	3.806	5.242	1210	26739	6000	D16	150	0.177	1.218	1.678	653	15939	4560			
	8.0	31	D19	140	0.406	3.913	5.390	1195	28677	6570	D16	150	0.179	1.210	1.667	623	17081	5068			
	9.0	31	D19	135	0.406	4.049	5.577	1191	29746	6741	D16	150	0.191	1.209	1.665	626	17081	5068			
	10.0	32	D19	140	0.417	4.097	5.643	1202	30673	7169	D16	150	0.196	1.210	1.667	603	18255	5603			
4.0	4.0	27	D19	130	0.466	3.421	4.712	1182	22878	4687	D16	140	0.326	2.012	2.771	1176	13681	3428			
	5.0	30	D19	130	0.610	3.942	5.430	1208	28785	6320	D16	150	0.339	1.820	2.507	1002	15939	4560			
	6.0	32	D19	125	0.701	4.345	5.985	1189	34376	7768	D16	150	0.354	1.701	2.343	873	18255	5603			
	7.0	33	D19	120	0.752	4.666	6.427	1183	38233	8699	D16	150	0.333	1.554	2.140	770	19463	6165			
	8.0	34	D19	120	0.788	4.885	6.728	1194	40746	9435	D16	150	0.343	1.487	2.048	717	20703	6754			
	9.0	35	D19	120	0.817	5.003	6.891	1183	43330	10203	D16	150	0.343	1.437	1.979	671	21975	7370			
	10.0	36	D19	120	0.844	5.117	7.048	1171	45985	11004	D16	150	0.363	1.424	1.961	648	23278	8012			
5.0	5.0	30	D19	130	0.791	4.040	5.565	1221	30888	6923	D16	125	0.650	2.554	3.517	1184	20781	6103			
	6.0	33	D19	115	1.019	4.843	6.671	1216	39873	8966	D16	150	0.508	2.075	2.858	1048	19463	6165			
	7.0	35	D19	110	1.163	5.329	7.340	1200	47251	10858	D16	150	0.519	1.929	2.657	918	21975	7370			
	8.0	37	D19	110	1.279	5.668	7.807	1199	53176	12603	D16	150	0.545	1.829	2.519	825	24613	8681			
	9.0	38	D19	110	1.347	5.867	8.081	1206	56255	13528	D16	150	0.534	1.739	2.395	763	25978	9377			
	10.0	39	D19	110	1.404	6.030	8.305	1204	59410	14489	D16	150	0.547	1.689	2.326	725	27374	10099			
6.0	6.0	34	D19	115	1.240	4.817	6.635	1201	42507	9725	D16	115	1.003	2.975	4.098	1188	27634	8857			
	7.0	37	D22	140	1.615	5.769	7.946	1191	56426	13156	D16	150	0.804	2.396	3.300	1112	24512	8473			
	8.0	40	D22	140	1.883	6.038	8.316	1159	66542	16172	D16	150	0.860	2.230	3.072	966	28692	10615			
	9.0	41	D22	135	2.019	6.613	9.108	1185	72688	17714	D16	150	0.819	2.101	2.894	885	30145	11383			
	10.0	42	D22	135	2.139	6.881	9.478	1203	76455	18863	D16	150	0.811	1.989	2.740	822	31628	12177			

近づくと、ばらつきは、さらに大きくなるが、配力鉄筋方向の死荷重による曲げモーメントは、後に述べる輪荷重による曲げモーメントに比べ絶対量が小さいため、この程度のばらつきでは死荷重による配力鉄筋方向の曲げモーメントを最大値でもって評価しても床版の設計に際し、あまり大きな影響を及ぼさないものと考えられる。

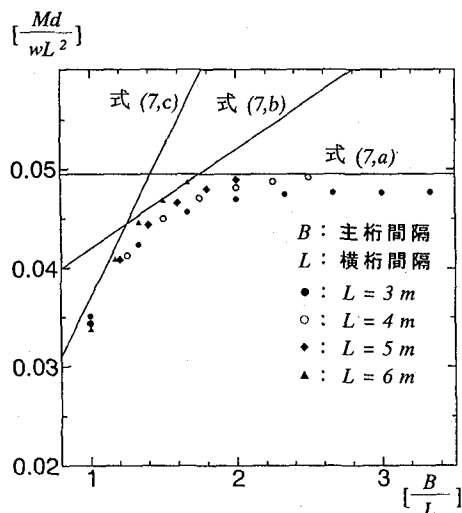


図-4 死荷重による主鉄筋方向の曲げモーメント

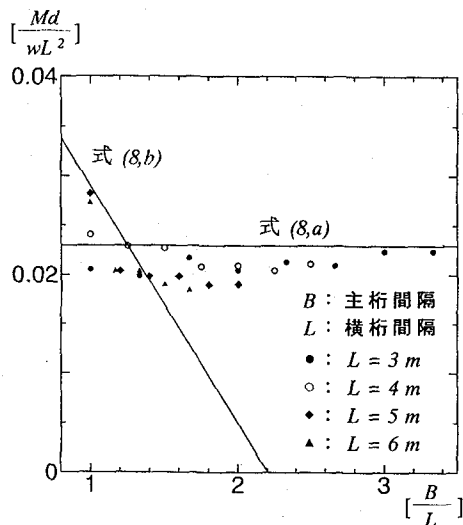


図-5 死荷重による配力鉄筋方向の曲げモーメント

4.2 活荷重曲げモーメント

(1) 主鉄筋方向曲げモーメント

活荷重による主鉄筋方向曲げモーメントの解析結果を後輪荷重、および横桁支間長で無次元化し、主桁間隔と横桁間隔の比に対して整理したものを図-6に示す。

この図より、主鉄筋方向の活荷重による曲げモーメント係数は、 B/L の増加にしたがって増大することがわかる。しかし、その勾配は、 B/L が2を超えると一定値に近づくが、 B/L が1付近では、横桁間隔が大きくなると、その値が1に近づくとつれて急速に増加する。これは、死荷重の場合と同様、 B/L が1に近づくとつれて配力鉄筋方向への曲げモーメントの分配率が増大するためであり、輪荷重の載荷面の幅と横桁支間の比の影

響によるものと考えられる。また、ばらつきは、 B/L が1のとき最大となり、このときの最大値と最小値の差異は13%程度となる。しかしながら、 B/L が1.2以上となると急速にばらつきが小さくなり、その差異は5%程度以内に収束する。したがって、 B/L が1.2以上の2方向版の活荷重による主鉄筋方向の曲げモーメント係数は、 B/L をパラメータとして極めて精度良く評価できることがわかる。

(2) 配力鉄筋方向曲げモーメント

主鉄筋方向の場合と同様の方法で配力鉄筋方向曲げモーメントを整理した場合、横桁間隔 L の大きさによって曲げモーメント係数に大きなずれが発生する。このため、 PL で無次元化した曲げモーメント係数の値をさらに横桁間隔 L の1次関数を用いて補正することによって、このずれを補正することとした。図-7に補正後の曲げモーメント係数の分布を示す。

この図より、配力鉄筋方向の活荷重による補正後の曲げモーメント係数は、 B/L の増加にしたがって減少するが、 B/L が2を超えると一定値に近づく。 B/L が2

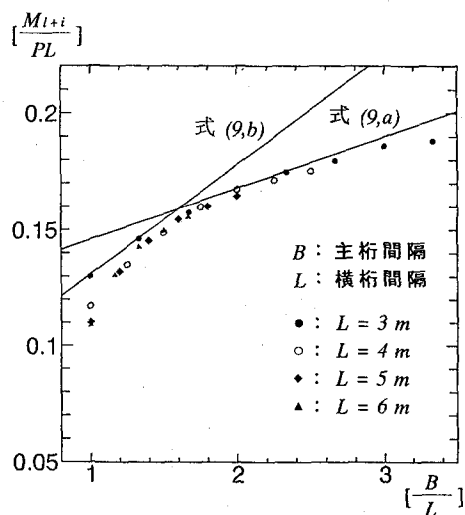


図-6 活荷重による主鉄筋方向の曲げモーメント

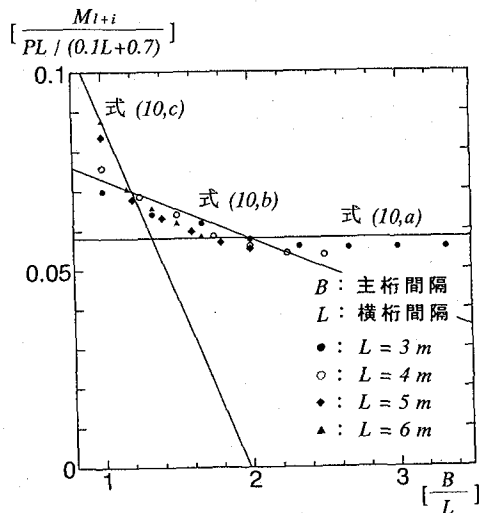


図-7 活荷重による配力鉄筋方向の曲げモーメント

以下の時は、勾配が1に近づくにつれて増加するが、ばらつきは、主鉄筋方向の場合と同様、B/Lが1のとき最大となる。そして、その差異は、20%程度と大きくなるが、B/Lが1.2を超えると急速にばらつきは小さくなり、その差異は5%程度以内に収束する。したがって、B/Lが1.2以上の2方向版の活荷重による配力鉄筋方向の曲げモーメント係数も、B/Lが1に近い場合を除いて、B/Lを用いて極めて精度良く評価できることがわかる。また、B/Lが1に近い場合の配力鉄筋方向の曲げモーメント係数は、横桁間隔が増加するにつれ大きくなっている。一方、横桁間隔が小さい場合、表-1に示したように配力鉄筋断面が最小断面により決定されるため、鉄筋応力度に大きな余裕がある。このため、設計曲げモーメントが多少増加しても鉄筋断面は変化しない。したがって、上記曲げモーメント係数の最大値を用いて設計曲げモーメント式を設定しても、板剛性比は変化せず、主鉄筋方向の曲げモーメントに与える影響も少ないと考えられる。

5. 設計曲げモーメント式の提案

以上の結果と考察から、主桁、および横桁で弾性支持された2方向RC床版に対する設計曲げモーメント式は、以下に示す式で表すことができる。

5.1 死荷重による曲げモーメント式

(1) 主鉄筋方向曲げモーメント

$0.0495 wL^2 \quad (B/L \geq 1.75) \quad (7,a)$

$[0.032 + 0.01 (B/L)] wL^2 \quad (1.25 \leq B/L < 1.75) \quad (7,b)$

$[0.007 + 0.03 (B/L)] wL^2 \quad (1 \leq B/L < 1.25) \quad (7,c)$

(2) 配力鉄筋方向曲げモーメント

$0.023 wL^2 \quad (B/L \geq 1.25) \quad (8,a)$

$[0.053 - 0.024 (B/L)] wL^2 \quad (1 \leq B/L < 1.25) \quad (8,b)$

ここに、w：床版に作用する死荷重強度 (ton/m²)

B：主桁間隔 (m)

L：横桁間隔 (m)

5.2 活荷重による曲げモーメント式

(1) 主鉄筋方向曲げモーメント

$[0.124 + 0.022 (B/L)] PL \quad (B/L \geq 1.6) \quad (9,a)$

$[0.084 + 0.047 (B/L)] PL \quad (1 \leq B/L < 1.6) \quad (9,b)$

(2) 配力鉄筋方向曲げモーメント

$\frac{0.058}{0.1L + 0.7} PL \quad (B/L \geq 2) \quad (10,a)$

$\frac{0.088 - 0.015 (B/L)}{0.1L + 0.7} PL \quad (2 \leq B/L < 1.2) \quad (10,b)$

$\frac{0.178 - 0.09 (B/L)}{0.1L + 0.7} PL \quad (1 \leq B/L < 1.2) \quad (10,c)$

ここに、P：後輪荷重 (= 10 tonf)

B, L：5.1と同じ。

5.3 提案式の考察

上記に示した提案式によって算定される2方向RC床版の死荷重、および活荷重に対する主鉄筋方向と配力鉄筋方向の設計曲げモーメントと、今回の解析によって得られた曲げモーメントを比較したものを表-3に示す。

表-3 解析結果と提案式の比較

L	B	B/L	T	Mx(d)	式(7)	Mx(d) 式(7)	My(d)	式(8)	My(d) 式(8)	Mx(1)	式(9)	Mx(1) 式(9)	My(1)	式(10)	My(1) 式(10)
3.0	3.0	1.000	0.25	0.252	0.266	0.949	0.148	0.208	0.709	3.905	3.930	0.994	2.098	2.640	0.795
	4.0	1.333	0.26	0.314	0.336	0.936	0.147	0.170	0.865	4.384	4.400	0.996	1.924	2.040	0.943
	5.0	1.667	0.28	0.359	0.382	0.938	0.171	0.181	0.945	4.728	4.820	0.981	1.857	1.890	0.982
	6.0	2.000	0.29	0.380	0.400	0.949	0.165	0.186	0.889	5.011	5.040	0.994	1.733	1.740	0.996
	7.0	2.333	0.30	0.394	0.411	0.959	0.177	0.191	0.928	5.242	5.260	0.997	1.678	1.740	0.964
	8.0	2.667	0.31	0.406	0.422	0.962	0.179	0.196	0.913	5.390	5.480	0.984	1.667	1.740	0.958
	9.0	3.000	0.31	0.406	0.422	0.963	0.191	0.196	0.975	5.580	5.700	0.978	1.665	1.740	0.957
4.0	10.0	3.333	0.32	0.417	0.433	0.963	0.196	0.201	0.976	5.643	5.920	0.953	1.667	1.740	0.958
	4.0	1.000	0.27	0.466	0.502	0.929	0.326	0.393	0.830	4.688	5.240	0.895	2.757	3.200	0.862
	5.0	1.250	0.30	0.610	0.657	0.928	0.339	0.340	0.998	5.402	5.710	0.946	2.494	2.518	0.990
	6.0	1.500	0.32	0.701	0.731	0.958	0.354	0.358	0.988	5.954	6.180	0.964	2.331	2.382	0.979
	7.0	1.750	0.33	0.752	0.790	0.951	0.333	0.367	0.907	6.394	6.500	0.984	2.130	2.245	0.948
	8.0	2.000	0.34	0.788	0.810	0.973	0.343	0.376	0.912	6.694	6.720	0.996	2.038	2.109	0.966
5.0	9.0	2.250	0.35	0.817	0.830	0.985	0.343	0.386	0.890	6.856	6.940	0.988	1.969	2.109	0.934
	10.0	2.500	0.36	0.844	0.850	0.994	0.363	0.395	0.920	7.012	7.160	0.979	1.951	2.109	0.925
	5.0	1.000	0.30	0.791	0.853	0.927	0.650	0.669	0.972	5.509	6.550	0.841	3.482	3.667	0.950
	6.0	1.200	0.33	1.019	1.072	0.951	0.508	0.604	0.842	6.604	7.020	0.941	2.830	2.917	0.970
	7.0	1.400	0.35	1.163	1.205	0.965	0.519	0.602	0.862	7.267	7.490	0.970	2.630	2.792	0.942
	8.0	1.600	0.37	1.279	1.317	0.971	0.545	0.631	0.863	7.729	7.960	0.971	2.494	2.667	0.935
6.0	9.0	1.800	0.38	1.347	1.389	0.969	0.534	0.645	0.827	8.001	8.180	0.978	2.371	2.542	0.933
	10.0	2.000	0.39	1.404	1.420	0.989	0.547	0.660	0.828	8.223	8.400	0.979	2.303	2.417	0.953
	6.0	1.000	0.34	1.240	1.362	0.911	1.003	1.068	0.940	6.538	7.860	0.832	4.038	4.062	0.994
	7.0	1.167	0.37	1.615	1.659	0.973	0.804	0.988	0.814	7.829	8.330	0.940	3.252	3.369	0.965
	8.0	1.333	0.40	1.833	1.914	0.984	0.860	0.971	0.886	8.561	8.800	0.973	3.026	3.138	0.964
	9.0	1.500	0.41	2.019	2.026	0.996	0.819	0.992	0.826	8.975	9.270	0.968	2.851	3.023	0.943
6.0	10.0	1.667	0.42	2.139	2.142	0.999	0.811	1.012	0.802	9.338	9.640	0.969	2.699	2.908	0.928

この表より、配力鉄筋方向の死荷重曲げモーメントを除いて、全ての主桁間隔、および横桁間隔の組合せに対して、提案式の曲げモーメントと解析結果による曲げモーメントが良く一致しており、その差異はほとんどの箇所5%以内に収まっている。

この差異が最大となるのは、主桁間隔 3m 横桁間隔 3m の活荷重による配力鉄筋方向曲げモーメントで、解析値に対して約 20% の差異となっている。また、主桁間隔 4m 横桁間隔 4m の場合も、配力鉄筋方向曲げモーメントで約 14% 程度の差異を発生するが、これらの場合は、前にも述べたように配力鉄筋断面が、いずれも最小断面で決定されており鉄筋応力度に大きな余裕があるため、設計曲げモーメントを多少大きく評価しても鉄筋断面に与える影響は少ないものと考えられる。

主鉄筋方向の活荷重による曲げモーメントでは、B/L が 1 となる主桁間隔が 4～6m、横桁間隔が 4～6m の場合のみで 10%～17% 程度の差異となっている。この部分については、この差異が鉄筋断面に与える影響が大きいので、B/L が 1 に近い場合のみ、横桁間隔 L によって設計曲げモーメント式を補正する方法も考えられるが、計算式が煩雑となるため提案式には考慮しなかった。

また、提案式と解析値の差の割合が比較的大きい配力鉄筋方向の死荷重曲げモーメントの場合も、その差異は、主桁間隔 3m 横桁間隔 3m の 29% となる場合を除いて最大でも 20% 以内であり、概ね 15% 以内となっている。また、前にも述べたように配力鉄筋方向の死荷重による曲げモーメントは、輪荷重による曲げモーメントに比較して絶対量が著しく小さいため、差異の割合が大きいいずれの箇所においても、この差異が鉄筋断面に与える影響は無視できる程度に小さいと言える。さらに、これらの差異が比較的大きい箇所の配力鉄筋断面は、いずれも鉄筋の配筋規定による最小断面で決定されており鉄筋応力度に大きな余裕があるため、設計曲げモーメントを多少大きく評価しても鉄筋断面に与える影響はほとんどないと言える。

図-8は、文献5)による1方向版の活荷重による主

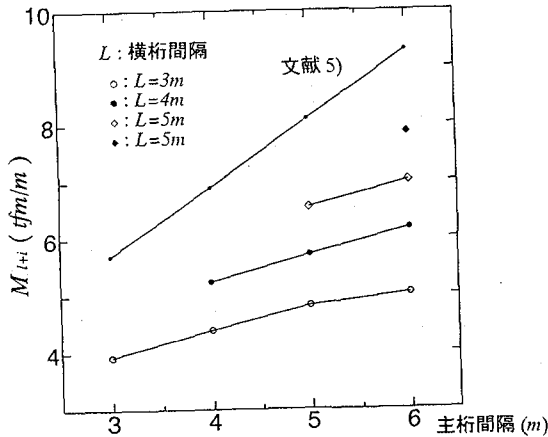


図-8 1方向版と2方向版の活荷重モーメントの比較

鉄筋方向の曲げモーメントと提案式のそれを、文献5)で適用可能としている主桁間隔 6m 以下のものについて、比較したものである。この表より、床版を横桁で2方向支持することにより輪荷重による発生曲げモーメントを大幅に低減でき、床版厚を薄くすることが可能と言える。

6. まとめ

少主桁 I 桁形式道路橋において、RC 床版を主桁、および横桁で弾性支持された直交異方性 2 方向版として、主桁間隔および横桁間隔を変化させ、死荷重および活荷重のそれぞれに対して、主鉄筋方向、および配力鉄筋方向の最大曲げモーメントに対するパラメトリック解析を行った。その結果、以下に示す事項が明らかとなった。

(1) 上記構造形式の道路橋において、死荷重による主鉄筋方向、および配力鉄筋方向の設計曲げモーメント式は、近似的に式 (7)、および式 (8) で与えられる。また、活荷重による設計曲げモーメント式は、式 (9)、および式 (10) で与えられる。これらの式によって、主桁と横桁で 2 方向支持された RC 床版の死荷重、および活荷重による発生曲げモーメントを精度良く評価できる。

(2) 床版を横桁で弾性支持し主鉄筋を車両進行方向と平行に配置することにより、主桁間隔の広い上記構造形式の道路橋において、床版厚を薄くすることが可能であり、上記構造形式の道路橋に対しても従来の RC 床版を採用することが可能といえる。また、2 主桁橋で RC 床版を採用する場合の主桁間隔は、最大 8m～10m 程度であり横桁間隔も 6m 程度以内に配置するのが望ましい。

今後は、上記構造形式の RC 床版の輪荷重による主鉄筋方向、および配力鉄筋方向の最大せん断力を算定し、2 方向支持された RC 床版の疲労耐久性についても検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性、平成 3 年 12 月。
- 2) 松井繁之、川本安彦、梨和 甫：トラス形鉄筋によりセン断補強した RC 床版の疲労耐久性、第 49 回土木学会年次学術講演会講演概要集、I -342。
- 3) 高橋昭一、志村 勉、橘 吉宏、水野 浩：PC 床版 2 主 I 桁橋による合理化検討、第 49 回土木学会年次学術講演会講演概要集、I -135。
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、II 鋼橋編、平成 6 年 2 月。
- 5) 松井繁之、江頭慶三、石崎 茂：長支間床版の設計曲げモーメント式に関する 2、3 の考察、鋼構造年次論文報告集、pp. 215-220, 1995 年 11 月。
- 6) 石崎 茂、松井繁之：2 主構 I 桁形式道路橋の RC 床版の最小厚規定について、第 50 回土木学会年次学術講演会講演概要集、I -172。
- 7) Maeda, Y. and Ishizaki, S. : Structural behavior of slabs at skewed composite girders, Tecnology Reports of Osaka Univ. Vol. 29, No. 1489, pp. 275-283, 1979.
- 8) Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger S. : Theory of plate and shells, Macgraw-Hill, pp. 364-371, 1959.

(1995 年 9 月 18 日受付)