

道路橋長支間床版の設計曲げモーメント式の検討

A Study of Design Bending Moment Formulae for Long Span Slab in Highway Bridge

宮崎平和*、中野晴之*、糟谷恭啓**、島田 功***、加藤暢彦****、園田恵一郎*****

Hirakazu MIYAZAKI, Yasuhiro KASUYA, Haruyuki NAKANO, Isao SHIMADA, Nobuhiko KATOU and Keiitirou SONODA

* 東洋技研コンサルタント(株) 本社技術部 (〒532-0025 大阪市淀川区新北野 1-14-11)

** 工修 東洋技研コンサルタント(株) 本社技術部 (〒532-0025 大阪市淀川区新北野 1-14-11)

*** 工博 東洋技研コンサルタント(株) 技術本部 (〒532-0025 大阪市淀川区新北野 1-14-11)

**** ショーボンド建設(株) 本社技術部 (〒536-0022 大阪市城東区永田 3-12-15)

***** 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558-0028 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

Recently, a tendency which adopts the small number of girders has increased as one of a rationalization for steel girder bridges. As for a slab of the small number of girder bridge, the span may be exceed the applicable range of slabs in design bending moment formulae of Specification for highway bridges (in Japan). So, this paper proposes the design bending moment formulae about simple slab, continuous slab and cantilever slab, including the case of the long span which exceeds applicable range of Specification for highway bridge. The bending moments of slabs are derived by the analytical method in a trigonometric series. The span(l) of slab are carried on $0 < l \leq 12\text{m}$ for the simple and continuous slabs, and on $0 < l \leq 5\text{m}$ for cantilever slabs.

key words: highway bridge deck slab, small number of girder bridge, long span slab, design bending moment formula

1. まえがき

道路橋示方書では、単純版および連続版で $0 < l \leq 6\text{m}$ 、片持ち版で $0 < l \leq 3\text{m}$ の適用範囲を定めて、床版の設計に適用する設計曲げモーメント式を規定している[1]。ここに、 l はT荷重に対する床版の支間(m)である。ところで、近年の橋梁上部工における技術動向として、省力化、コスト縮減、耐久性向上などを目指した少数主桁化技術が挙げられる[2]。少数主桁橋の床版は、上述の示方書の設計曲げモーメントの適用範囲をこえる場合もあり、その設計式について検討しておく必要がある[3],[4],[5],[6]。本研究は、示方書の適用範囲を越える支間をもつ場合を含めた床版について、示方書の設計曲げモーメントの算出根拠を踏襲したかたちで床版の曲げモーメントを計算し、示方書の適用範囲での安全性に適合する安全をみた床版の設計曲げモーメント式を提案したものである。示方書の設計曲げモーメント式の算出根拠は、次のとおりである。

1) 対象とした版

- 単純版：相対2辺で単純支持された等方性無限単純版
- 連続版(コンクリート橋)：相対2辺で固定支持された等方性無限固定版
- 片持ち版：相対2辺の内1辺が固定され他の1辺が自由な等方性無限片持ち版

2) 考慮した活荷重

T荷重を橋軸方向には1台、幅員方向には台数に制限な

く載荷する。また、衝撃としては、衝撃係数 $i = 20/(50+l)$ を用いる。

3) 輪荷重の分布

輪荷重はアスファルト舗装表面上に長方形で等分布するものとし、安全側を考慮してそれが5cm厚のアスファルト舗装を通して、床版全厚の1/2の面まで45°の角度で分布するものと仮定する(図-1.1参照)。

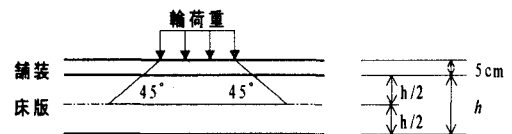


図-1.1 輪荷重の分布

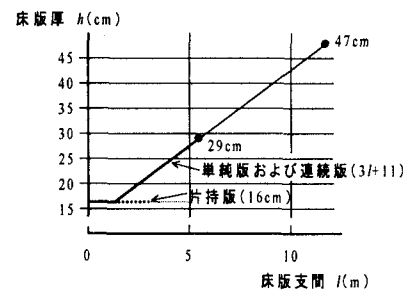


図-1.2 床版支間 l と床版厚 h の関係

4) 床版全厚と床版支間の関係

輪荷重の分布強度は床版全厚の関数となるが、床版全厚を図-1.2のように床版支間の関数で仮定する。

5) 計算法

単純版、固定版、片持版ともに輪荷重をフーリエ級数展開し、それぞれの版の境界条件を考慮して、等方性版のたわみに関する、次の偏微分方程式を三角級数を用いて解き着目する点の曲げモーメントを求める。

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p(x,y)}{D} \dots\dots (1)$$

ここに、 w はたわみ、 $p(x,y)$ は輪荷重強度、

D は版剛度 ($= E h^3 / 12(1 - \nu^2)$)

E はヤング率、 h は版厚、 ν はポアソン比である。

6) 曲げモーメントの計算

単純版においては支間中央で算出し、コンクリート橋連続版の支点における主鉄筋方向の曲げモーメントは固定版の固定辺上で算出する。片持版においては、主鉄筋方向の曲げモーメントは固定辺上で、配力鉄筋方向の曲げモーメントは自由辺上で算出する。片持版の場合、輪荷重の載荷位置は自由辺より 50cm 離れた位置とする(図-1.3 参照)。

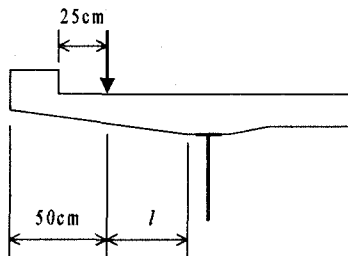


図-1.3 片持版の輪荷重載荷位置

本研究で考慮した床版支間は、

単純版および連続版： $0 \leq l \leq 12m$

片持版： $0 \leq l \leq 5m$

である。さらに、本研究では、鋼橋について、単純支持辺と固定辺を有する床版モデルを用いて連続版の支点曲げモーメントの検討を行った。また、3径間連続の床版モデルを用いて、連続版の支間曲げモーメントの検討も行った。

2. 計算モデル

等方性版の基礎方程式(1)の解(たわみ w)は、図-2.1に示す矩形版に対して三角関数を用いて、次のように級数で表される。

$$w = \sum_m w_{0m}(x) \sin \alpha_m y \dots\dots (2)$$

ここに、 $m = 1, 2, 3, \dots$ 、 $\alpha_m = \frac{m\pi}{a}$

$w_{0m}(x)$ は $x=0$ と $x=l$ の境界条件および荷重条件によ

って決まる項である。

曲げモーメントは次式で与えられる。

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \dots\dots (3)$$

ここに、 M_x 、 M_y はそれぞれ床版の主鉄筋方向および配力鉄筋方向の曲げモーメントを表す。

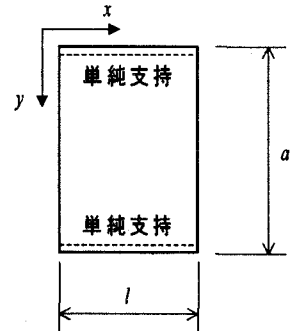


図-2.1 矩形版 (l : 床版支間)

ところで、床版の設計曲げモーメントは1方向無限版 ($a \rightarrow \infty$) に対して求められる。ここに示した解は、 $y=0$ と $y=a$ で単純支持としている。しかし、 $y=a/2$ の位置にT荷重を載荷した場合、その断面における曲げモーメントは、矩形版の辺長比 (a/l) を5以上にとれば、1方向無限版の結果とほとんど一致するといわれている。表-2.1は、辺長比5の単純版 ($a = 50m$, $l = 10m$) の中央に輪荷重 (20cm × 50cm, 10tf) を載荷した場合の中央点の曲げモーメントについて、式(3)の結果と1方向無限版の結果を対比して示したものである。3桁まで一致している。そこで、本計算の床版モデルは、辺長比 (a/l) が5以上になるように設定した。

表-2.1 単純版の中央点の曲げモーメント ($\nu = 1/6$)

単純版	$M_x(\text{tf}\cdot\text{m/m})$	$M_y(\text{tf}\cdot\text{m/m})$
辺長比5の矩形版	3.11	2.58
1方向無限版	3.11	2.58

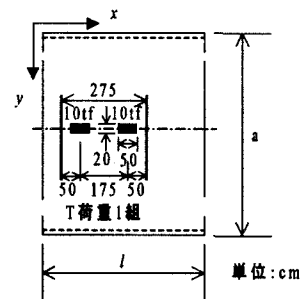


図-2.2 床版とT荷重の載荷

図-2. 2 は、床版の設計曲げモーメントを計算するT荷重の載荷状況を示したものである。着目点の曲げモーメントの計算は、床版上にT荷重(前輪は無視)を載荷し、着目点の曲げモーメントが最大となるように、幅員方向には台数に制限なく載荷した状態を試行により設定して行った。

輪荷重の分布(図-1. 1 参照)、床版(図-1. 2 参照)、片持版の輪荷重載荷位置(図-1. 3 参照)等は、示方書の算出根拠に準じた。なお、床版のポアソン比は $\nu = 1/6$ とした。

3. 設計曲げモーメントの計算値と提案式

曲げモーメントの計算値を示方書のものとは対比して示す。なお、示方書の適用範囲外のものについては、式を延長して求めた値を示している。長支間床版において、示方書の式では、安全率が小さくなるものとして、単純版支間曲げモーメントの配力鉄筋方向曲げモーメントと片持版先端付近の配力鉄筋方向曲げモーメントがあげられる。逆に、安全すぎるものとして、片持版支点主鉄筋方向曲げモーメントがあげられる。ここでは、それらのものについて、示方書の適用範囲内での安全率に適合するよう、適用範囲を超える床版支間を持つものの設計曲げモーメント式を提案し、その安全率を示した。また、これらの結果を対比して図示した。

3. 1 単純版の支間曲げモーメント

床版支間(l)が2m~12mのものについて、支間中央の曲げモーメントを算出した。図-3. 1は、T荷重の載荷状態を示したものである。計算結果を図-3. 2に示す。

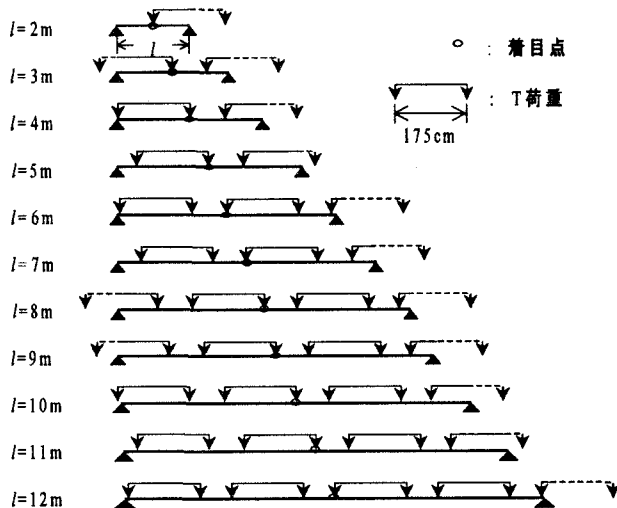


図-3. 1 T荷重載荷

適用範囲を超える床版支間を持つものの設計曲げモーメント式を次のように提案する。

1) 主鉄筋方向曲げモーメント

$$(0.12l + 0.07) P \quad (\text{tf}\cdot\text{m}/\text{m})$$

$$0 \leq l \leq 12\text{m} \quad \text{示方書と同じ}$$

2) 配力鉄筋方向曲げモーメント

$$(0.10l + 0.04) P \quad (\text{tf}\cdot\text{m}/\text{m})$$

$$0 \leq l \leq 6\text{m} \quad \text{示方書}$$

$$(0.11l - 0.02) P \quad (\text{tf}\cdot\text{m}/\text{m})$$

$$6\text{m} < l \leq 12\text{m} \quad \text{提案式}$$

曲げモーメント

M (tf·m/m)

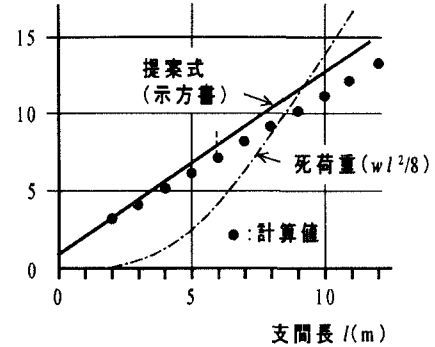


図-3. 2(a) 主鉄筋方向曲げモーメント($P=10\text{tf}$)

曲げモーメント

M (tf·m/m)

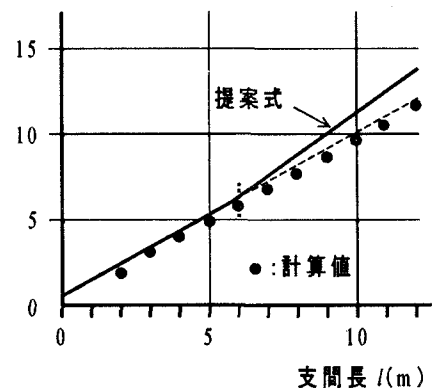


図-3. 2(b) 配力鉄筋方向曲げモーメント($P=10\text{tf}$)

3. 2 連続版の支点曲げモーメント

1) コンクリート橋

固定版の固定モーメントの計算結果を図-3. 3に示す。

曲げモーメント

M (tf·m/m)

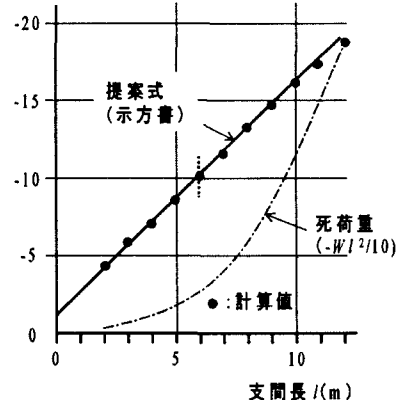


図-3. 3 主鉄筋方向曲げモーメント ($P = 10 \text{ tf}$)

この結果より、設計曲げモーメント式を次のように提案する。

$$-(0.15l + 0.125)P \quad (\text{tf}\cdot\text{m}/\text{m})$$

$$0 \leq l \leq 12\text{m} \quad \text{示方書に同じ}$$

2) 鋼橋

示方書では、鋼橋の支点曲げモーメントとして、-(単純版の80%)を与えている。しかし、図-3.4に示すような支持機構とT荷重の載荷状況での床版の曲げを考えると、中間支点上で固定の挙動を示し、大きな曲げモーメントを生ずる。

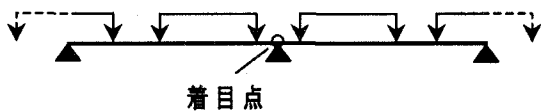


図-3.4 3支点支持の連続版

ここでは、図-3.4の支持機構とT荷重載荷を考え、図-3.5に示すように、相対2辺の内一辺単純支持、他の一辺が固定された等方性無限版において、固定辺の曲げモーメントを鋼橋の支点曲げモーメントとして求める。

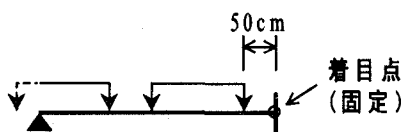


図-3.5 連続版(鋼橋)の支点曲げモーメント

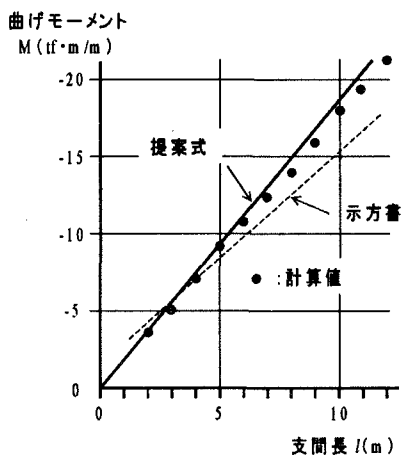


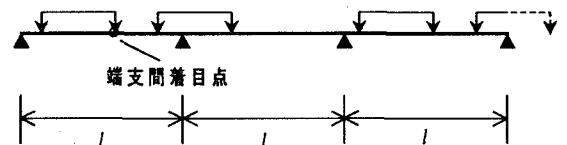
図-3.6 連続版支点曲げモーメント($P=10\text{tf}$)

図-3.6に示したように、鋼橋における連続版の支点曲げモーメントの計算値は、示方書の適用範囲 $0 \leq l \leq 6\text{m}$ においても安全率が1以下(示方書による値<計算値)となる。安全率が1以上となる設計曲げモーメント式として、次式を提案する。

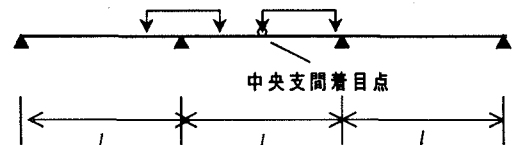
$$-0.19l \cdot P \quad (\text{tf}\cdot\text{m}/\text{m}) \quad 0 \leq l \leq 12\text{m} \quad \text{提案式}$$

3.3. 連続版の支間曲げモーメント

道路橋示方書では、連続版の支間曲げモーメントとして、(単純版の80%)を与えている。ここでは、図-3.7に示すような支持機構を有する3径間の連続版を対象に、端支間中央点および中間支間中央点に着目し、試行によって最大の床版曲げモーメントを与えるT荷重の載荷状況と、床版支間曲げモーメントの理論計算値を求めた。また、示方書の式による結果と計算値との比較により、設計曲げモーメント式の安全性を検討した。



(a) 端支間



(b) 中央支間

図-3.7 4点支持の連続版

(T荷重載荷は一例である)

図-3.8, 3.9は、これらの結果を図示したものである。

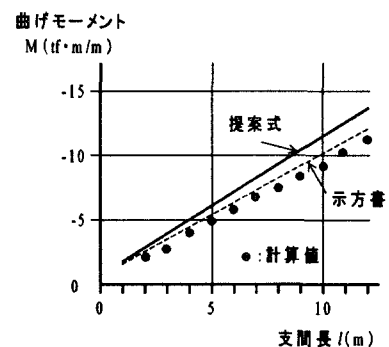


図-3.8(a) 端支間の支間(主鉄筋)方向曲げモーメント ($P=10\text{tf}$)

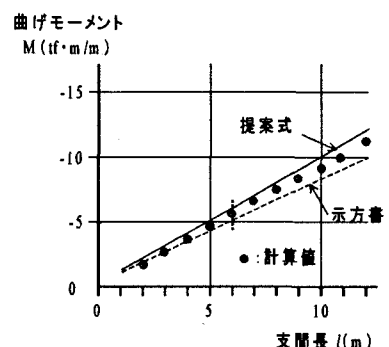


図-3.8(b) 端支間の支間に直角(配力鉄筋)

方向曲げモーメント ($P = 10 \text{ tf}$)

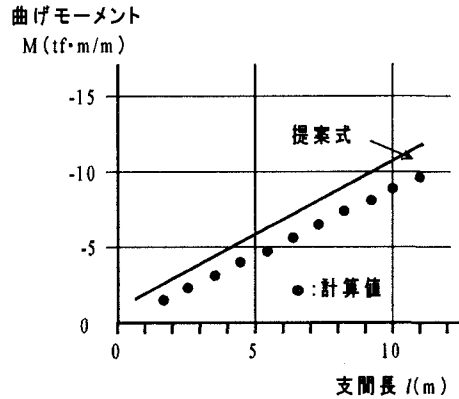


図-3. 9(a) 連続版中間支間の支間(主鉄筋)方向曲げモーメント ($P = 10 \text{ tf}$)

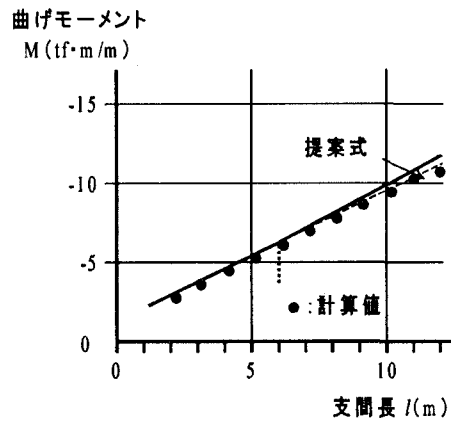


図-3. 9(b) 連続版中間支間の支間に直角(配力鉄筋)方向曲げモーメント ($P = 10 \text{ tf}$)

連続版の支間曲げモーメントは、端支間では、支間(主鉄筋)方向曲げは示方書より求めた結果の方が計算値より若干大きい、支間に直角(配力鉄筋)方向の曲げは安全率が1以下(示方書による値<計算値)となっている。一方、中間支間においては、支間(主鉄筋)方向の曲げ、および支間に直角(配力鉄筋)方向の曲げ、ともに、安全率が1以上(示方書による値>計算値)である。そこで、端支間の設計支間曲げモーメントに対して、中間支間の設計支間曲げモーメントの安全率にみあうように、次式を提案する。

端支間の設計支間曲げモーメント
 = 単純版の設計支間曲げモーメント $\times 90\%$
 $0 \leq l \leq 12\text{m}$ 提案式

中間支間の設計支間曲げモーメント
 = 単純版の設計支間曲げモーメント $\times 80\%$
 $0 \leq l \leq 12\text{m}$ 示方書と同じ

3. 4 片持版の曲げモーメント

床版支間(l)が0.5m~5mの片持ち版について、固定および自由端の曲げモーメントを算出した。図-3. 10は、T荷重の載荷状態を示したものである。計算結果を図-3. 11に示す。

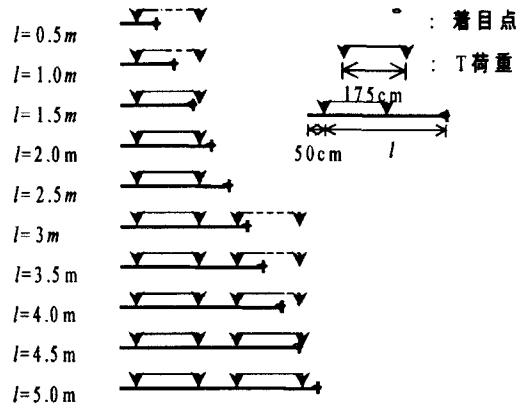


図-3. 10 T荷重載荷

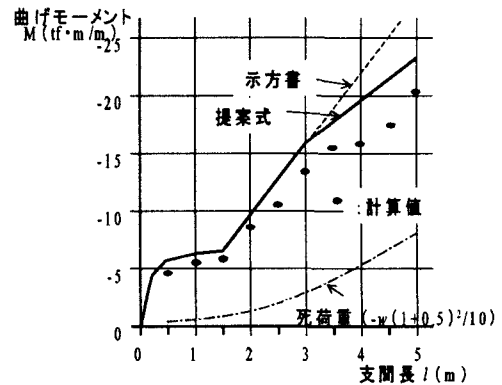


図-3. 11(a) 主鉄筋方向(支点)曲げモーメント ($P = 10 \text{ tf}$)

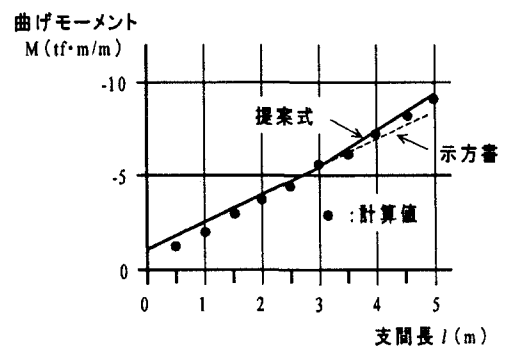


図-3. 11(b) 配力鉄筋方向(先端付近)曲げモーメント ($P = 10 \text{ tf}$)

これらの結果より、設計曲げモーメント式として次式を提案する。

1) 片持ち版支点曲げモーメント式

$$\frac{-P \cdot l}{1.30l + 0.25} \quad (\text{tf} \cdot \text{m}/\text{m})$$

$0 \leq l \leq 1.5\text{m}$ 示方書と同じ

$$-(0.6l - 0.22)P \quad (\text{tf} \cdot \text{m}/\text{m})$$

1.5m < l ≤ 3.0m 示方書に同じ

$$-(0.4l + 0.38)P \quad (\text{tf} \cdot \text{m/m})$$

3.0m < l ≤ 5.0m 提案式

2) 片持版先端付近曲げモーメント式

$$(0.15l + 0.13)P \quad (\text{tf} \cdot \text{m/m})$$

0 ≤ l ≤ 3m 示方書に同じ

$$(0.18l + 0.04)P \quad (\text{tf} \cdot \text{m/m})$$

3m < l ≤ 5m 提案式

4. あとがき

道路橋床版を対象に、示方書の設計曲げモーメントの算出根拠を踏襲したかたちで、曲げモーメントを計算し検討した。床版支間が示方書の適用範囲を超えると、適用範囲における安全率と若干異なるものも散見された。それらに対し、設計曲げモーメントの提案式を提案した。本研究では、示方書に従って床版を等方性版として解析している。しかし、RC床版では、床版下面にひびわれが発生し、主鉄筋方向と配力鉄筋方向の断面剛性の差から、直行異方性版としての挙動を示す。また、長支間床版の場合はプレストレスを導入し、PC床版とするが、施工上、橋軸方向はRCとする場合が多い。このような場合も直行異方性版としての挙動を示す。図-4. 1は、床版支間(l)が6mの単純版について、支間中央の曲げモーメントに及ぼす異方性の影響を直行異方性版の解析によって検討したものである。

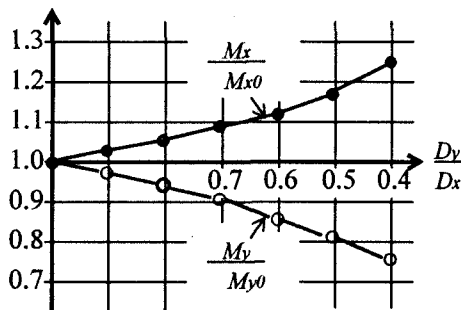


図-4. 1 床版の異方性度と曲げモーメント
(床版支間(l)が6mの単純版)

ここに、添え字 x は主鉄筋方向を、添え字 y は配力鉄筋方向を、 M_{x0} 、 M_{y0} は等方性版の場合の曲げモーメントを表す。ひびわれ床版の直行異方性度(D_y/D_x)は、0.6~0.5とされているが[4]、その範囲では、等方性版の曲げモーメントに対し、主鉄筋方向で15%程度増加し、配力鉄筋方向で、15~20%低減していることがわかる。

示方書では、上述のような配慮とともに、床版が輪荷重を直接支え、さらに輪荷重を支持桁に伝達するものであるため、支間方向の曲げモーメントに対し図-4. 2に示すような割増し係数を設定し、より安全となるように考慮している。なお、示方書では、単純版および連続版については $0 \leq l \leq 6\text{m}$ について、片持版については $0 \leq l \leq 3\text{m}$ について規定している。図-4. 2には、さらに、単純版

および連続版については $l \leq 12\text{m}$ まで、片持版については $l \leq 5\text{m}$ まで延長した線も図示した。ところで、単純版および連続版について、前述の設計曲げモーメントの計算値は、床版支間が6mを超えると、T荷重を床版の幅員方向に3台以上並列して載荷した場合の計算になる。このような載荷ケースは希であると考えられ、割増し係数をさらに大きくとることは不経済であると思われる。したがって、割増し係数には、上限(例えば1.20)を設定すべきであろう。一方、床版支間が長くなると、床版厚が厚くなり、主鉄筋方向の曲げに対しては死荷重の影響が設計上重要なファクターとなる。したがって、長支間床版では疲労の問題は軽減されることになる。

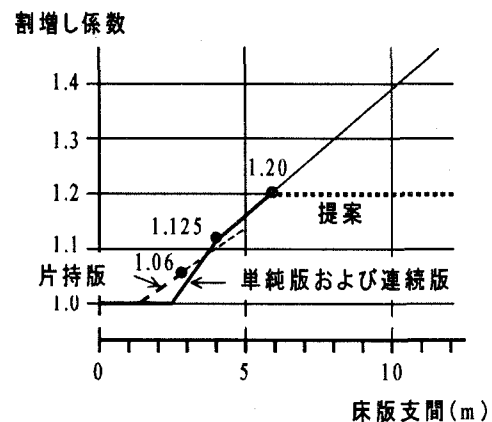


図-4. 2 支間方向の曲げモーメントの割増し係数

参考文献

- [1] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、丸善、1996. I. 共通編、II. 鋼橋編、III. コンクリート橋編
- [2] 高橋昭一、橋吉宏、志村勉、小西哲司：PC床版2主桁橋「ホロナイ川橋」の設計および解析・試験検討、橋梁と基礎、96-2、PP.23~30、1996.
- [3] 園田恵一郎、島田功、穴瀬勝之：床版支間の大きい2主桁橋の床版モーメントとせん断力について、土木学会関西支部講演概要、PP. I-93-1~2、1995.
- [4] 江頭慶三、松井繁之、坂晃昭：長支間床版の設計曲げモーメント式について、土木学会第51回年次学術講演会概要I、1016~10172、1996.
- [5] 桐川潔、松井繁之、江頭慶三：長支間床版の設計について、土木学会第52回年次学術講演会概要I、352~353、1997.
- [6] 岡米男、能登谷秀樹、中川洋三、春日昭夫：衡原橋(エクストラーズ橋)の床版の設計—長支間床版の設計法—、橋梁と基礎 97-9、PP.18~22、1997.