

横桁支持された長支間床版の設計曲げモーメント式について

Study on Design Bending Moment Formulae of Floor Slabs Supported by Cross Beams on Highway Bridges.

松井 繁之*, 江頭 慶三**
Shigeyuki MATSUI and Keizo EGASHIRA

*工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

** (株)春本鐵工 技術本部本店設計部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島 6-20-34)

Now some rationalized plate girder bridges, which reduce the number of main girders than ordinary ones, are constructing in highway bridges. These floor slabs are supported by some main girders whose spacing is over the limit span of current specification, and prestressed in transverse direction. But if the slab span exceed about 12m and slab weight is too heavy, this structure may be increase the construction costs. Therefore, the method of supporting the slab with cross beams seems one of the economical solutions. In this paper, we derived the design bending moment formulae due to dead and live loads for concrete floor slab supported by cross beams and investigated the applicability of this method.

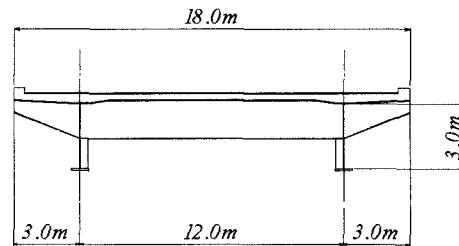
Key Words: Highway Bridge Slab, Rationalized Bridge, Design Bending Formulae

1. はじめに

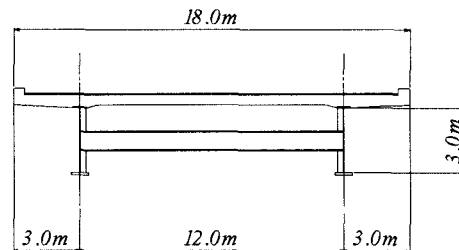
I型の断面で構成される鋼プレートガーダー橋は、様々な構造形式のなかで、建設コスト削減と省力化を目的として、最も合理化が進められている形式である。断面変化を少なくし、構造の簡素化・統一化を図ることによって、工場、現場の省力化とコスト削減が可能となっている。さらに、従来の設計方法では4~5本の主桁を必要とする道路幅員であっても、2~3本の主桁で支持する構造が採用される例も見受けられる。

この形式では床版を支持する主桁間隔が4m以上になることが多いが、場合によってはこれを大きく上回る主桁間隔(例えば12m程度)になるケースも今後予想される。しかしこの場合、プレストレスの導入を行ったとしても、床版厚が非常に厚くなり、床版の施工費用・重量等が増大し、橋梁全体として経済性を発揮できなくなることが予想される。したがって、床版主鉄筋を橋軸方向に配置し、所定の間隔(例えば3m程度)で床版を支持する横桁を配置すれば床版自重の軽減が可能となり、経済性を発揮できる構造の一案となり得ると考えられる。特に、2主桁橋の施工が盛んであるドイツ、フランス等ではこの構造が以前から、多く採用されている¹⁾²⁾。その主桁構造例を図-1に示す。

上段が大横桁と呼ばれる、床版を支持し直接床組として輪荷重を受け持つ横桁である。通常、3m~4m程度の間隔で配置される。下段は現在日本で一般的に用いられている主桁で床版を支持する構造である。上段の構造は、日本における実施例としてあまり見あたら



a) 横桁支持



b) 主桁支持

図-1 床版の支持方法

ないが、合理化対策として、床版に対する検討は既にいくつか報告されている³⁾⁴⁾。

本文では、道路橋示方書の設計規定を参考に、横桁で弾性支持された一方向床版の曲げモーメントに限定して検討を行い、併せて本構造の適用性と経済比較等を行った。

2. 検討の方法

図示に示される規定は横桁位置で単純支持した一方

向無限単純版である。しかし実際は、主桁で支持された横桁はその直上に輪荷重が載荷されることにより、たわみを生じる。主桁間隔が小さい場合は、その影響が小さいと考えられるが、主桁間隔の増加にともなうて、床版に付加応力が加わる。この応力は主桁間隔(=横桁の支間長)と横桁の剛性および、床版の版剛性がパラメータになると考えられる。そこで今回、簡単のために横桁間隔を2~4mに限定し、主桁間隔を6mから16mまで変化させ、さらに横桁の剛性も変化させてFEM解析を行った。解析モデルは、床版はシェル要素、横桁は梁要素とし、主桁位置で単純支持された1方向版を橋軸方向に5パネル並べたモデルを用いた。また、床版は2方向にプレストレスが導入されるものとして、等方性版とした。解析モデルについて詳細を表-1,2に示す。

考慮した荷重は等分布死荷重とB活荷重である。活荷重の載荷方法は橋軸直角方向に後輪荷重10tfを車両間隔にしたがって無制限に載荷する方法をとった。6mの主桁間隔では3台、16mでは6台になる。このような載荷確率は非常に低いものの載荷台数が設計断面力に鋭敏に影響しないことから、道示の規定をそのまま採用することとした。

表-1 FEM解析モデル

横桁支間	横桁剛性	主桁間隔: 2主桁 (m)				
		6	8	10	12	16
2m 床版厚 (23cm)	0.5lcb	○	○	○	○	○
	lcb	○	○	○	○	○
	2lcb	○	○	○	○	○
	∞	○	○	○	○	○
3m 床版厚 (28cm)	0.5lcb	○	○	○	○	○
	lcb	○	○	○	○	○
	2lcb	○	○	○	○	○
	∞	○	○	○	○	○
4m 床版厚 (33cm)	0.5lcb	x	○	○	○	○
	lcb	x	○	○	○	○
	2lcb	x	○	○	○	○
	∞	x	○	○	○	○

注)lcbとは活荷重たわみを満足する断面2次モーメント

表-2.解析に用いた横桁の剛性

主桁間隔 L(m)	横桁の許容 活荷重たわみ δa (mm)	δa を満足する 剛性 Elcb(tfm ⁴)
6	3	40390
8	4	97860
10	5	189882
12	7.2	273204
14	9.8	372279
16	12.8	483902

3. 解析結果

横桁で支持された床版の主鉄筋断面に作用する曲げモーメントおよび、配力鉄筋断面の曲げモーメントを図-2,3に示す。横桁間隔が3mでの解析結果である。ここで、Mx(I)は、活荷重たわみを満足する横桁剛性、Mx(0.5I)はMx(I)の半分、Mx(2I)はMx(I)の倍の剛性、Mxoは無限大の剛性として解析したものである(My

も同様)。この図から、横桁が無限大の剛性のとき、主桁間隔に依存しないことが判る。横桁が活荷重たわみを満足する程度の剛性では、主桁間隔が16mになると横桁剛性無限大の時の倍近い主鉄筋曲げモーメントが生じるので、横桁断面を決定する際は自らの応力を満足するだけでなく、床版の断面力を考慮して決定することが必要になる。

また、配力鉄筋断面に作用する曲げモーメントは主桁間隔の影響は少なく、横桁の剛性の違いによって、曲げモーメントがシフトしている。これは横桁のたわみによる付加曲げモーメントであり、当然横桁の剛性が大きくなる程小さくなる。6m程度の主桁間隔では1方向版としての比(主桁間隔/横桁間隔=2以上)を満足しているが、横桁がたわむことにより、2方向版として、配力鉄筋断面の負担する割合が多くなっていると考えられる。しかし、横桁剛性が∞のときは配力鉄筋断面に作用する曲げモーメントは2tfm/m程度で一定となり、1方向版として挙動することになる。

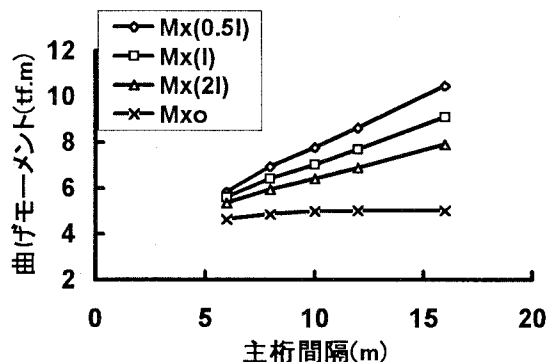


図-2.主鉄筋断面曲げモーメント

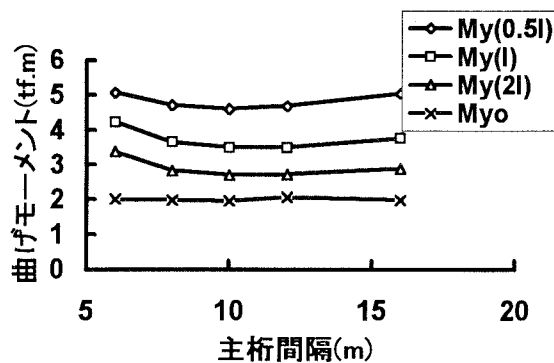


図-3.配力鉄筋断面曲げモーメント

これらの図より、橋軸直角方向すなわち配力鉄筋断面は横桁のたわみの影響が非常に大きく影響していることが示されており、横桁の剛性を考慮した設計が必要があると考えられる。

4. 設計モーメント式の提案

以上のことから、活荷重曲げモーメント式は主桁間

隔、横桁の剛性および横桁間隔がパラメータとなる。各支間毎に設計曲げモーメント式を作成すれば、式は単純化できるが⁹⁾、今回は、全解析結果を一つの式にまとめた。すなわち、主桁間隔と横桁間隔の比(=B/L)をパラメータとして定式化を行った。また、床版および、横桁の剛性の変化を考慮できるように、剛性の比(相関剛比)もパラメータとしている。

下記に活荷重(衝撃を含む)による設計曲げモーメント式を提案する。

主鉄筋断面曲げモーメント

$$Mlx=(0.173+0.034B/L/H^{1/2})PL \text{ (tfm/m)} \quad (1)$$

配力鉄筋断面曲げモーメント

$$Mly=(0.060+0.310/L/H)PL \text{ (tfm/m)} \quad (2)$$

ここに

H は横桁と床版の剛性の比= $I_g E_s / (L D)$

$I_g E_s$: 横桁の剛性, L : 主桁間隔,

D : 床版の剛性= $t s^3 E_c / 12 / (1 - \mu^2)$

$t s$: 床版厚,

E_c, μ : コンクリートの弾性係数, ポアソン比

P : 輪荷重(=10tf)

L : 横桁間隔(m)

B : 主桁間隔(m)

H は相関剛比と呼ばれ、横桁のたわみによる断面力を算定する場合、必要となるパラメータである。

主鉄筋断面曲げモーメント式は Mlx/PL を用いると、相関剛比の関係する項と関係しない項が存在することが分かる。これは、横桁の剛性が無限大である時、すなわち横桁のたわみを生じない場合の曲げモーメントとたわみによって生じる付加曲げモーメントの2項に分割出来ることを意味するものである。また、解析値も横桁剛性無限大の値を基準として、付加曲げモーメントの値を算出することができる。それぞれの項に対する解析値と提案式の比較を図-4,5に示す。

同様に配力鉄筋断面の曲げモーメント式も2つの項に分割される。比較の結果を図-6,7に示す。この図よ

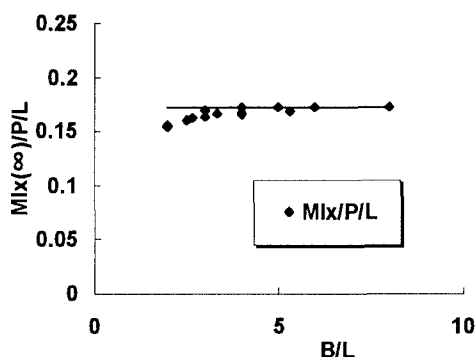


図-4相関剛比を含まない項

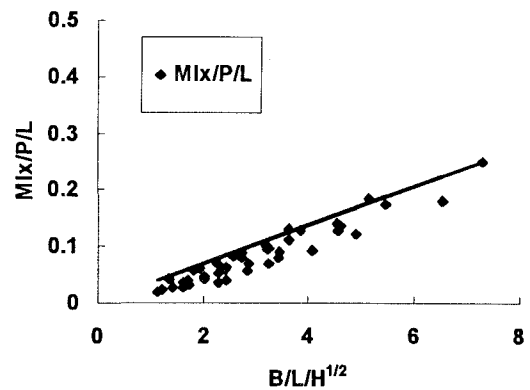


図-5 相関剛比を含む項

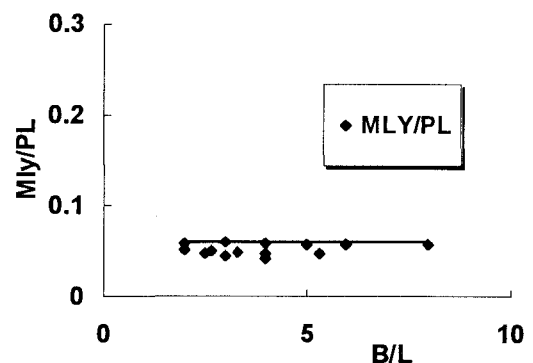


図-6 相関剛比を含まない項

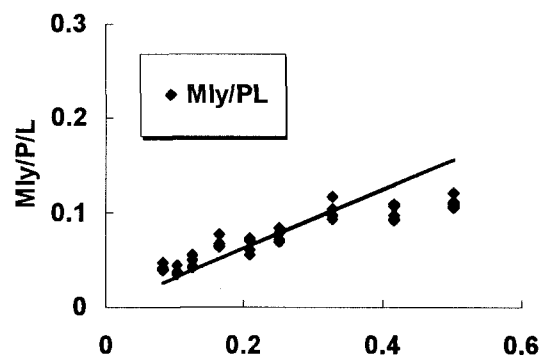


図-7 相関剛比を含む項

り、配力鉄筋曲げモーメントは相関剛比の関係する項において、主桁間隔の影響を受けていないことが分かる。

次に、道示では、鋼桁の活荷重たわみは床版の付加曲げモーメントによる応力増分を押さえるため、曲率で規定されており、許容値内であれば付加応力は20%以内に抑えられると説明されている。横桁支持の構造でも、同様な詳細検討を行って、規定すべきだと考えられる。

また、通常、設計曲げモーメント式には、20%程度

の余裕量を付加しているが、上式には考慮されていない。今回の解析では先述したように、活荷重を無制限に載荷しているため、確率的には極めて希な状態を想定している。したがって、活荷重台数が4台以上となる12m以上の主桁間隔では余裕を見込む必要はないと考えられる。

次に、死荷重による設計曲げモーメント式についても解析結果をまとめ、以下のように提案する。

主鉄筋断面曲げモーメント

$$Mdx = 0.046wdL^2(1 + 4.32/H/L^2) \quad (tfm/m) \quad (3)$$

配力鉄筋断面曲げモーメント

$$Mdy = Mdx/6 + 0.838wd(L/H) \quad (tfm/m) \quad (4)$$

ここに

wd : 分布死荷重(tf/m)

L : 横桁間隔(m)

H : 相関剛比

通常、配力鉄筋断面の死荷重曲げモーメントは主鉄筋断面の1/6（ポアソン比）しか作用しないので、無視しているが、横桁のたわみの影響が大きく、無視できない大きさであることから、設計上見込むものとした。特に、直交異方性を考慮した設計では配力鉄筋断面には大きな曲げモーメントが作用しないことから問題ないが、今回仮定した等方性の床版であれば、無視できなくなるので、注意が必要である。表-3にMdxの解析値と提案式の比較を、図-8にMdyの比較を示す。

5. 横桁上の主鉄筋断面に作用する負曲げモーメントについて

床版を横桁で支持した場合、横桁をまたいで、タンデム軸重が作用する場合は主鉄筋断面に負曲げモーメントが生じ、橋軸直角方向のひびわれが危惧される。しかしながら、これまでにも述べたように、横桁がたわむことにより、発生する負曲げモーメントは非常に小さく、床版に若干のプレストレスあるいは補強鉄筋が考慮されておれば、問題ないと考えられる。

6. 床版厚について

プレストレスを橋軸方向および橋軸直角方向に導入することは、橋軸直角方向に配置される横桁の応力改

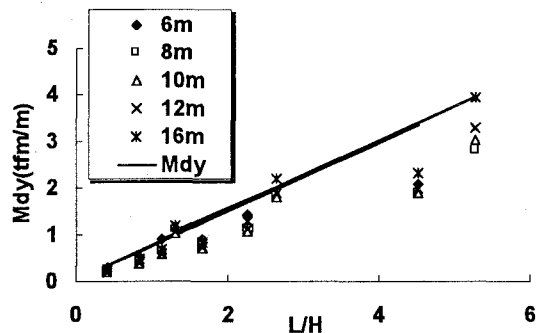


図-8 Mdy:配力鉄筋断面に作用する死荷重曲げモーメント

善効果も期待でき、またそのような設計を実際に行った例もあるようである。また、橋軸直角方向のプレストレスはこの方向の乾燥収縮に対しても有効と考えられる。このような観点から、実際には今回の解析で仮定した床版厚は十分すぎる厚さと考えられる。床版厚が薄くなれば相関剛比が大きくなるので、結果として付加曲げモーメントが減少し、良い傾向を示す。

道示では主鉄筋断面（橋軸方向）にプレストレスを導入する場合はRCとしての必要床版厚の65%まで低減できると規定されている。主桁支持した場合の橋軸直角方向のプレストレス導入による床版厚低減比率90%と比較すると格段に低減できることになる。この理由は輪荷重の向き（車両進行方向に短く、橋軸直角に長い）と載荷方法が橋軸直角にできるだけ多く載荷することが原因で、横桁支持した構造では主鉄筋断面の負担率が非常に大きいことに他ならない。したがって、このような特性を逆に利用するならば、橋軸直角方向にのみプレストレスを導入する構造を考えれば、主鉄筋断面が梁状化することは起こり得ず疲労耐久性に大きく寄与すると予想される。

以上のことから、プレストレスを導入する場合は床版厚は導入方向に注意し、応力照査により、低減を行うものとする。ただし、2mの横桁支間になると、16cm程度の非常に薄い厚さになるので、20cm以下の床版に関しては、別途せん断耐荷力等を十分検討し、さらに疲労耐久性に対する十分な検討が要求される。

7. 経済性の検討

経済比較を行うには、鋼桁の鋼重、床版の面積（体積）、製作工数、部材数、塗装面積、現場工費等の数量算出により実施できるが、簡単のため、床版を主桁で支持した場合と横桁で支持した場合の経済性の比較

表-3 Mdx(主鉄筋断面に作用する死荷重曲げモーメント)

tfm/m

Mdx	H	横桁間隔2m		H	横桁間隔3m		H	横桁間隔4m	
		解析値	提案式		解析値	提案式		解析値	提案式
0.5 cb	1.200	0.305	0.305	0.665	0.525	0.622	0.760	0.849	0.870
cb	2.400	0.227	0.233	1.330	0.459	0.492	1.520	0.739	0.756
2 cb	4.800	0.179	0.197	2.660	0.402	0.426	3.040	0.665	0.699
∞	∞	0.160	0.161	∞	0.348	0.361	∞	0.620	0.642

検討を以下の仮定により行った。

- ①主桁の桁高さは輸送を考慮して3mまでとする。また、フランジ断面の最大は1000mm×100mmとする。
- ②横桁間隔は3mとし、断面は死・活荷重断面力で決定する。
- ③横桁支持の床版厚は28cm一定とし、主桁支持では主桁間隔をLとして、 $0.9(3L+11)$ で与えられる厚さとする。
- ④①の仮定を満足できる支間長45mの合成桁で検討する。
- ⑤主桁間隔を6mから16mまで2mピッチで変化させて、概略計算を行い、数量の算出を行う。
- ⑥主桁支持の構造は2主桁と3主桁で比較を行う。

以上の仮定により得られた主桁間隔毎の鋼重比較を図-9に示す。このグラフから、16m程度までの支間長では、鋼重は主桁で支持したほうが、経済的であり、横桁支持の構造は部材数も増加することから、コスト高となる。しかし、鋼桁だけに着目した経済比較だけでは十分でなく、床版施工費や下部工も含めた総

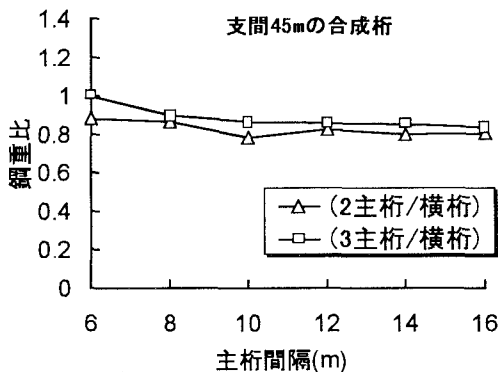


図-9 鋼重比較 (主桁支持/横桁支持)

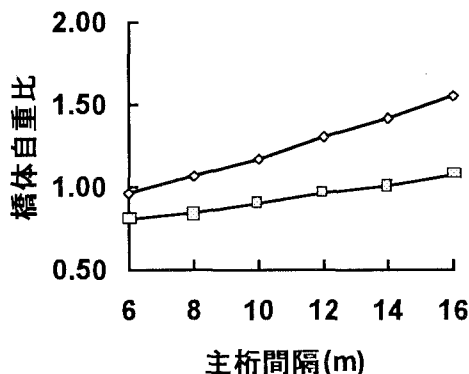


図-10 橋体自重比比較

合比較を行うべきである。とくに、12mを超えるような2主桁では床版施工費が増大すると考えられる。

ここで参考のため、下部工に与える影響を検討すると、地震時の計算で支配的となる橋体自重を算出し比較した結果をおよび、図-10に示す。この結果より、主桁間隔が16mにもなると、2主桁支持の橋体自重

は横桁支持のそれよりも50%増になり、下部構造の規模が大きくなることが予想される。3主桁構造では橋体自重も横桁支持より軽く、経済性を発揮できると予想される。しかしながら、3主桁では、主桁相互の不等沈下による応力が、床版に作用し、プレキャスト床版の場合は据え付けの困難も伴う。

8. 橋軸直角方向プレストレスと横桁との合成について

先述の橋軸直角方向プレストレスは場所打ち床版においても実施可能であり、プレストレスの一部は横桁にも作用する。横桁に積極的にプレストレスを導入することと、横桁と床版を合成構造にすることにより、活荷重たわみの改善と、ブラケット断面の効率化が可能となり、よりいっそうの床版の有効利用が図られることになる。特に部材数が主桁支持より増える分、製作の共通化、単純化、そして鋼重の低減が課題となる。

9. せん断力および、疲労耐久性に関する検討

主桁支持のRC床版の場合、疲労現象は乾燥収縮と移動輪荷重の繰り返しによる曲げモーメントおよび、ねじりモーメントによって貫通ひびわれが生じた後に、交番せん断力によるひびわれ面の摩耗と水による石灰の流出によって押抜き破壊が生じる現象で一般に説明されている⁹⁾¹⁰⁾。横桁でRC床版を支持した場合、同様な疲労損傷は、実験で今のところ確かめられていない。しかし、横桁で支持する構造であっても、せん断力の交番は生じる。主鉄筋の方向が移動輪荷重の走行する方向と平行なことから、この方向でせん断力が交番する。特に横桁上で大きく交番する。ただし、ここではひびわれが存在していてもひびわれ面の摩耗は無いと考えられ、この位置での疲労損傷は起こり難いと考えられる。逆に横桁間の中央部では損傷の可能性は否定できない。ただし、輪荷重の載荷総数が主桁支持と比較して少なくなることから、せん断力は小さい。十分な検討と実験は必要であるが、特に、疲労損傷に対して、問題のある構造とは考えにくい。

10. まとめと今後の課題

横桁で床版を支持する構造は、先述したように、横桁部材数が増加し、床版自重を軽減するメリットを相殺してしまう可能性があるため、実際の適用には詳細の検討が必要である。しかし、このような背景のなかで、この種の構造を持つプレートガーダー橋が採用されていることは、死荷重低減効果、長スパンの橋梁や、桁高の抑制に効果を発揮し、また横桁が密に配置されるので、架設時の座屈等に対する安定性、供用時の活荷重の偏載や風・地震等の水平力に対する安全性が増すと考えられているからと推測される。

また、万一床版が損傷した場合も、横桁で支持されたパネルで補修ができること等、主桁支持の構造に

対して、優位性も挙げられるので、今後の積極的な研究・開発が望まれる。さらに、プレキャスト床版を採用するならば、横桁上で橋軸方向の接合を行えば、型枠不要でかつ接合部の弱点を克服することができ、より簡易的な構造が採用される可能性がある。このことで、より経済的で耐久性のある構造が実現できよう。

今回は限定したモデルでの活荷重曲げモーメントに着目したが、今後は適用範囲を拡げ、床版の疲労耐久性の検討と、直交異方性を考慮した床版についての検討も行い、より一般化した設計曲げモーメント式を提案し、この構造の適用性について明らかにしていきたいと考えている。

参考文献

- 1)成瀬：西ドイツの新しいケタ橋（I,II），土木技術 25 卷 11,12 号，1970.
- 2)Michel VIRLOGEUX: Les ponts mixtes associant l'acier et le beton precontraint,Bulletin Ponts Metalliques n° 15.
- 3)松井，石崎: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，構造工学論文集 VOL.42A, pp1031-1038,1996.3.
- 4)太田，高木，森，松井:鋼少数主桁橋に適用する I 形格子床版の設計法に関する考察，橋梁と基礎 1997.2.
- 5)江頭，松井：横桁で支持された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 53 回年次学術講演会概要集 CS, pp78-79, 1998