

2 主桁橋における床版の死荷重曲げモーメント算定式の提案

A simplified method to evaluate bending moment due to dead loads for PC slab decks consisting of two plate girders

坂本 純男*, 中園 明広**, 安川 義行***, 稲葉 尚文****, 長井 正嗣*****

Sumio SAKAMOTO, Akihiro NAKAZONO, Naofumi INABA and Masatsugu NAGAI

*片山ストラテック (株) 橋梁設計部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

**日本道路公団関西支社 大津工事事務所信楽工事区工事長 (〒520-2153 滋賀県大津市一里山 3-40-25)

***日本道路公団関西支社 構造技術課 課長代理 (〒530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20)

****日本道路公団関西支社 構造技術課 (〒530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20)

*****工博 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 教授 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

Steel bridges having two plate girders and PC slab deck have been constructed increasingly with the aim of rationalization and labor-saving by their fabrication and erection works. The calculation of the transverse bending moment of the slab deck due to dead loads is one of the subjects to be investigated in this type of bridges. While a simplified calculation method, e.g., based on a simple or fixed beam may provide a useful design value for this bending moment in the conventional type of bridges having many plate girders, more sophisticated method is required for the PC slab deck set on two plate girders because the amount of the bending moment due to dead loads is larger and hence the effect of elastic rotational restraint at the supports induced by steel girders must be correctly evaluated. In this paper, a simplified calculation method, which has been developed to estimate the transverse bending moment of PC slabs due to dead loads correctly for the practical use, is presented. The results obtained by this method are compared with those by FEM to ensure its usefulness.

Key Words: : slab deck, bending moment due to dead loads, two plate girders, design

キーワード : 床版, 死荷重曲げモーメント, 2主桁, 設計

1. はじめに

近年, PC床版を有する鋼2主桁橋が数多く設計, 施工されている。構造の合理化, 施工の省力化, 維持管理の軽減などが図られ, 経済性, 耐久性の観点から, 今後有力な橋梁構造形式の一つとして定着していくものと考えられる。

鋼2主桁橋を二車線道路に適用する場合, 一般に床版を支持する主桁間隔は5.5~6m程度, 張出し長は2.5~3m程度と, 従来の多主桁橋と比べて長くなる。そのため, 死荷重による床版支間中央の正の曲げモーメントは張出し部の影響を受け, 道路橋示方書¹⁾で示されている主桁位置で単純支持モデルとして求めた曲げモーメントとは, 大きく異なることとなる。また, 死荷重が作用したときの床版の曲げ変形は, 横桁位置でその回転が拘束されるために, 主桁位置を支点とした単純支持ではなく, 固定支持の状態に近くなると考えられている^{2,3)}。

そのため, 日本道路公団設計要領第二集⁴⁾では, 横桁

の有無によって, 「横桁による主桁の拘束を考慮し, 完全固定としたモデル」と, 「主桁の拘束度を無視し, 張出しを考慮した単純梁モデル」との2つのモデルを用いて設計することとなっている。しかしながら, これらを同時に満足させるためには, ほぼ水平に配置(軸力配置)した多くのPC鋼材が必要となり不経済となる。また, PC床版では, 実際に生じている曲げモーメントを正しく評価しないと危険側の評価を与える場合がある。

したがって, ここでは, FEM解析により死荷重が作用した場合のPC床版の挙動を把握するとともに, 床版の死荷重曲げモーメントを簡易に, かつ適切に評価できる手法を提案する。

2. 現状における問題点

2.1 死荷重曲げモーメントの算出に対して

橋軸直角方向の死荷重曲げモーメントの算出において,

床版支間部の設計曲げモーメントは、道路橋示方書Ⅲ5.5.1では張出し部の影響を考慮していないため、正側に安全すぎる値となる。一方、張出し部の影響を考慮できる単純梁モデルでは、張出し部の地覆や壁高欄荷重の影響により、床版支間部の死荷重曲げモーメントが減じられ、正の活荷重モーメントを含めた設計曲げモーメントを減少させることになるので、床版設計時において危険側になる。これは、垂直補剛材、横桁、主桁のねじり剛性などの影響より、実挙動を表すモデルが純粋な単純梁モデルとはならず、固定梁モデルに近くなると考えられるためである。図-1に、道示式、単純梁および固定梁モデルから算出される床版死荷重曲げモーメント図を、表-1にその値を示す。

2.2 PC床版の設計に対して

死荷重状態で正曲げモーメントが発生する固定梁モデルを対象に、経済性を考えてPC鋼材を偏心配置して設計した場合、床版は鋼桁により弾性固定されていると考えられるので、単純梁モデルを用いた死荷重曲げモーメントに対しても応力を確認する必要がある。その結果を表-2に示すが、死荷重時に床版上面に0.94 N/mm²の引張応力が生じ、PRC設計の考え方である「死荷重時に引張りを許さない」という規定を満足していない。また一方、これら単純梁と固定梁の両モデルともに満足させようとすると、

PC鋼材を軸力配置に近づけ、より多くの鋼線を配置する必要がある。

2.3 今後の設計に対して

これらの問題に対し、より正確に設計を行おうとすれば、FEM解析にて設計する方法が考えられるが、道路規格の異なる橋梁や拡幅などのある橋梁に対して、個々にFEM解析することとなり、多大な労力と費用を要する。したがって、床版の死荷重曲げモーメントを簡易に、かつ適切に評価できる手法が望まれている。

3. 検討方法

3.1 解析モデル

総幅員 11.2mの鋼2主桁橋を対象に、立体FEM解析を実施し、PC床版の挙動を把握する。ここでは、横桁の有無に起因する床版死荷重曲げモーメントの橋軸方向の変化、また、床版・主桁・横桁・補剛材の各部材における変形状態などに着目する。

解析モデルを図-2に示す。床版はソリッド要素、鋼桁はシェル要素、またPC鋼材は棒要素でモデル化している。解析は、床版支間中央部で対称条件を用いた半橋モデルと

表-1 床版支間部死荷重曲げモーメント(kN・m/m)

項目	道示式	単純梁	固定梁
床版	39.4	14.5	10.9
舗装	7.8	3.8	2.1
壁高欄	0.0	-3.6	0.0
遮音壁	0.0	-21.7	0.0
全死荷重	47.2	-7.0	13.0

注) 表中、マイナスは負曲げモーメントを示す

表-2 床版支間部の応力計算(kN・m, N/mm²)

項目		単純梁	固定梁
死荷重曲げモーメント	Md	-7.0	13.0
活荷重曲げモーメント	Ml	95.0	95.0
設計モーメント	Md+l	87.9	108.0
設計下面応力度	σ_{d+l}	-1.09	-2.19
死荷重上面応力度	σ_d	-0.94	0.19

注) 表中、マイナスの応力は引張りを示す

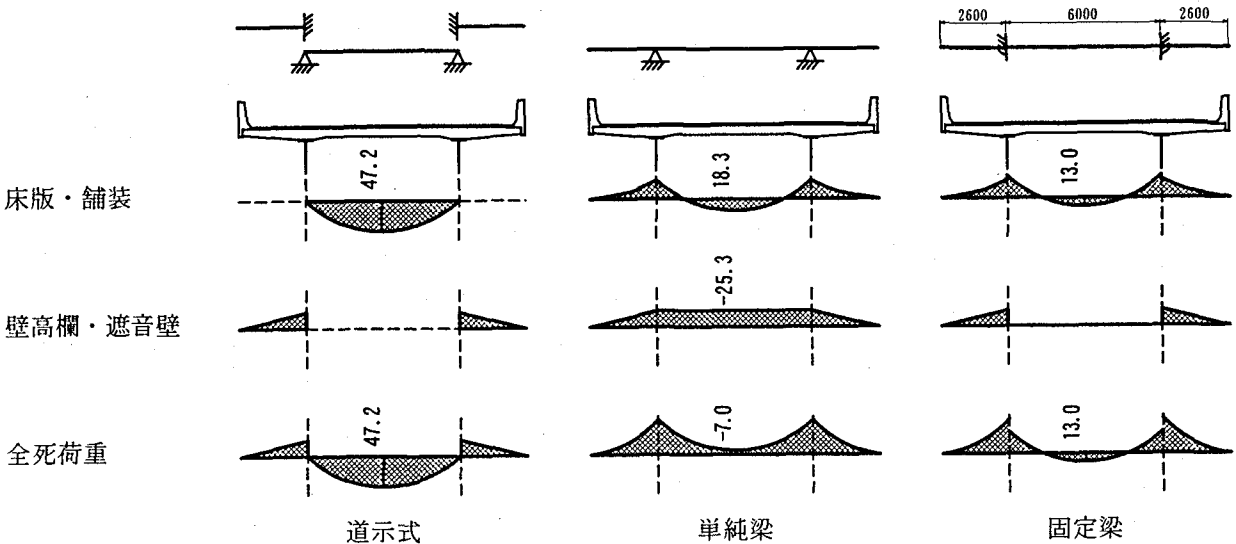


図-1 橋軸直角方向の床版死荷重曲げモーメント図

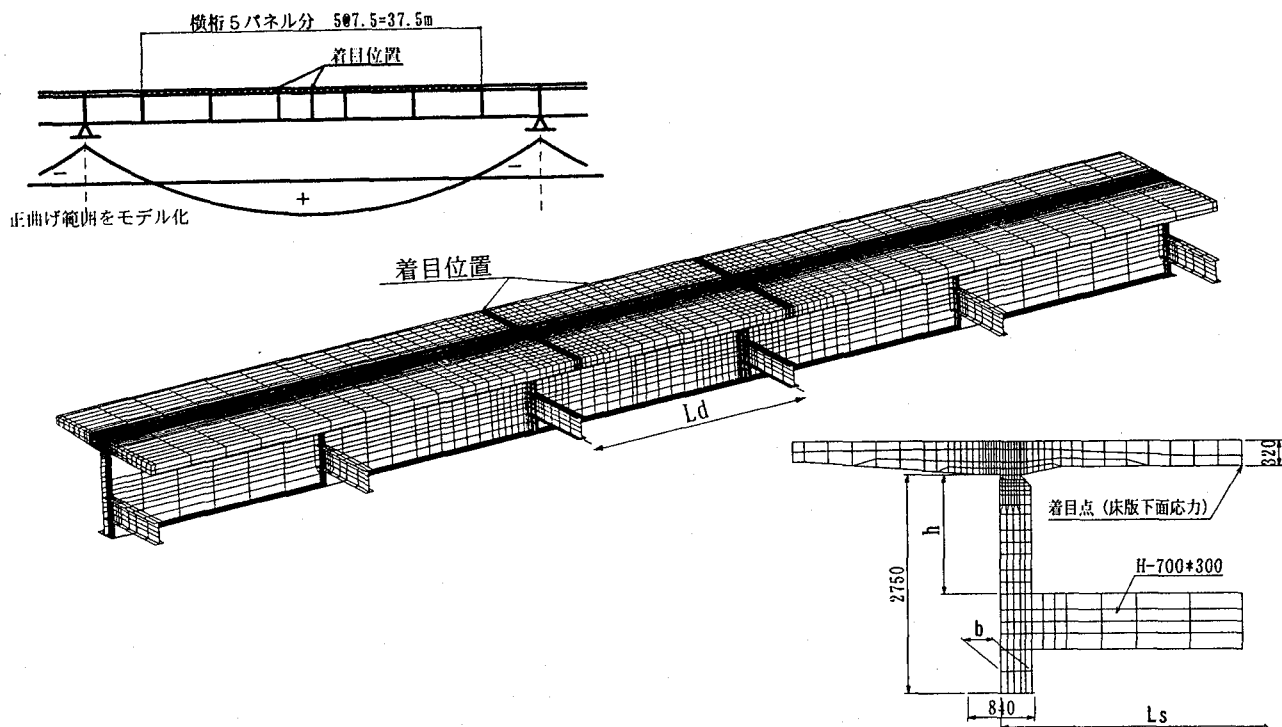


図-2 立体FEM解析モデル

表-3 解析ケース

床版解析ケース		主桁間隔 L_s	横桁間隔 L_d	横桁取付高 h	補剛材高さ b	補剛材厚 t
case 1	基本形	6.0 m	7.5 m	1.5 m	390 mm	38 mm
case 2	細部寸法変更	6.0 m	7.5 m	1.0 m	390 mm	38 mm
case 3		6.0 m	7.5 m	0.5 m	390 mm	38 mm
case 4		6.0 m	7.5 m	1.5 m	310 mm	38 mm
case 5		6.0 m	7.5 m	1.5 m	310 mm	20 mm
case 6		6.0 m	7.5 m	1.5 m	250 mm	38 mm
case 7	横桁間隔変更	6.0 m	15.0 m	1.5 m	390 mm	38 mm
case 8	主桁間隔変更	5.5 m	7.5 m	1.5 m	390 mm	38 mm
case 9	横桁なし	6.0 m	—	—	—	—

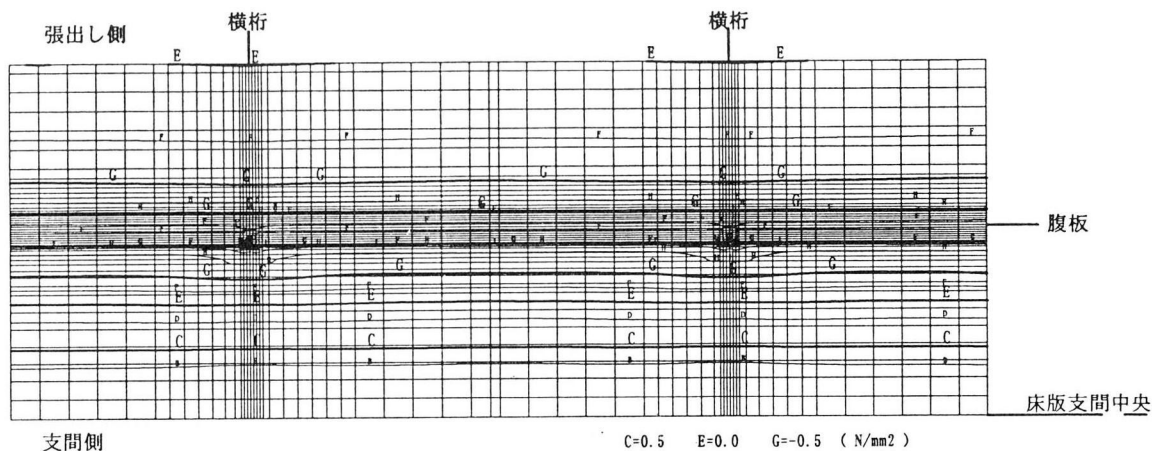
表-4 橋軸直角方向床版下面応力

	解析パラメータ		床版下面応力度 (N/mm^2)			
			床版・舗装		遮音壁・壁高欄	
	パラメータ	構造寸法 (m)	横桁部	一般部	横桁部	一般部
case 1	基本形		0.96	0.95	-1.08	-1.08
case 2	横桁取付高 h	1.000	0.96	0.95	-1.04	-1.04
case 3		0.500	0.94	0.94	-0.97	-0.98
case 4	補剛材高さ b	0.310	0.97	0.97	-1.12	-1.12
case 6		0.250	1.00	0.99	-1.20	-1.20
case 7	横桁間隔 L_d	15.000	1.01	1.02	-1.22	-1.29
case 8	主桁間隔 L_s	5.500	0.63	0.63	-1.11	-1.11
case 9	横桁なし	—	—	1.06	—	-1.46

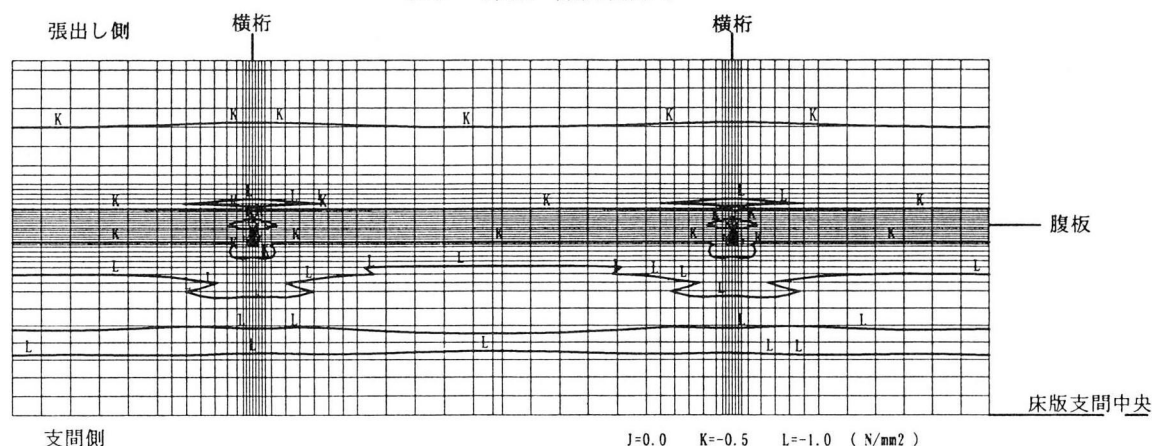
した。また、橋軸方向は正曲げの作用する範囲をモデル化することとし、両端部を単純支持している。

3.2 解析パラメータ

解析ケースを表-3に示す。比較検討するパラメータとしては、死荷重曲げモーメントに影響を及ぼすと考えられる主桁間隔、横桁間隔、横桁取付高さ、補剛材高さ、および補剛材厚とし、これら以外のサイズについては標準的な値を用いることとした。

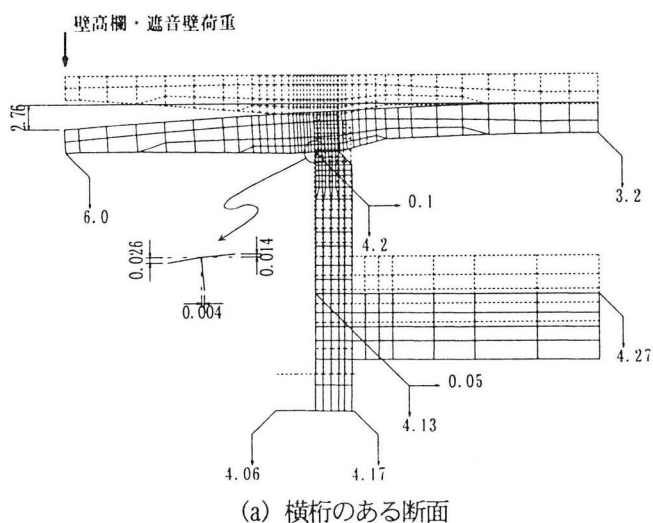


(a) 床版・舗装載荷時

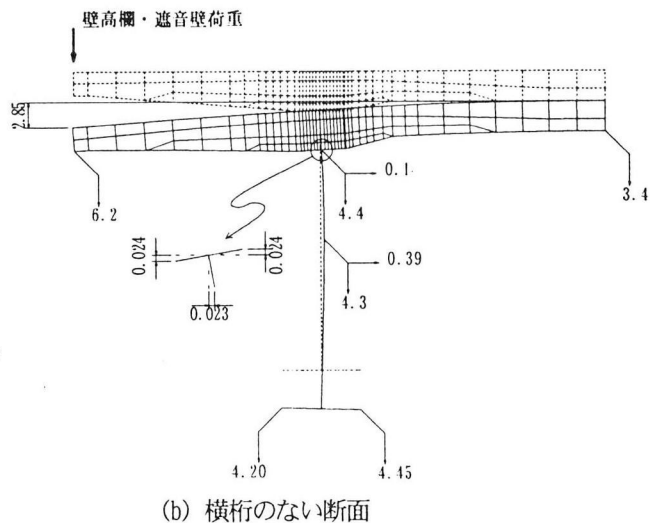


(b) 壁高欄・遮音壁載荷時

図-3 橋軸直角方向床版下面応力コンター図



(a) 横桁のある断面



(b) 横桁のない断面

図-4 変形図 (単位: mm)

3.3 載荷荷重

載荷荷重は、床版および舗装を対象とした等分布荷重と、壁高欄および遮音壁を対象とした橋軸方向線荷重の2種類とした。また、PCケーブル軸力についても、PC床版への影響を把握するため、解析を行った。

4. 検討結果

立体FEM解析結果のうち、床版設計時において引張応力が作用する床版下面について着目する。基本形における橋軸直角方向の床版下面応力コンター図を図-3に、壁高欄・遮音壁載荷時における横桁のある断面と横桁のない断

面との変形形状を図-4示す。また、表-4には、各解析ケースにおける横桁位置と横桁のない位置（一般部）での床版支間中央部下面応力を示す。

図-3（a）の床版・舗装載荷時においては、幅員方向に等分布荷重で載荷しているため、張出し部と支間中央部の荷重がバランスして、横桁の有無による差はあまり生じない。一方、図-3（b）および図-4から、壁高欄・遮音壁載荷時では、各部材の応力分布や変形形状が横桁の有無の影響を受けているのが分かる。

これらの解析結果から、次のことがいえる。

- ① 主桁と横桁との交差部では全ての荷重時において床版下面応力は乱れているが、床版支間中央部までは影響を及ぼしておらず、橋軸方向に見てみると横桁の有無にかかわらず、ほぼ一定の応力値を示している（図-3）。すなわち、横桁がある位置と横桁がない位置とでの床版支間中央部の下面応力はほとんど変わらない。
- ② 横桁がある場合、その横桁と垂直補剛材とが主桁の変形を拘束しており、補剛材および横桁が僅かであるが変形しているのが分かる（図-4）。図-5は、壁高欄・遮音壁載荷時のその模式図である。また、床版

と上フランジとの接合部である垂直補剛材上端部に局部変形が生じているのが分かる（図-4）。すなわち、床版の支持状態は、単純支持でも固定支持でもなく、主桁および主桁の変形を拘束する横桁と横桁上の垂直補剛材によって支持されている。

- ③ 床版支間中央部の死荷重曲げモーメントは、垂直補剛材断面（高さ・厚さ）、横桁取付高さ、主桁間隔、および横桁間隔の影響を受ける。また、横桁のない解析ケースでは、単純梁から算出した応力とほぼ等しくなっている。

以上より、主桁位置で床版を支持している状態は、単純支持でも固定支持でもなく、垂直補剛材や横桁などによって回転拘束されていることがわかった。

5. 計算モデルの提案

解析結果より、床版死荷重曲げモーメント算出時の計算モデルは、これら垂直補剛材や横桁によって支持された回転バネ支持モデルとした。計算モデルを図-6に示す。

垂直補剛材、横桁などの影響を回転バネに置換し、床版の橋軸直角方向死荷重曲げモーメントを算出する。その際

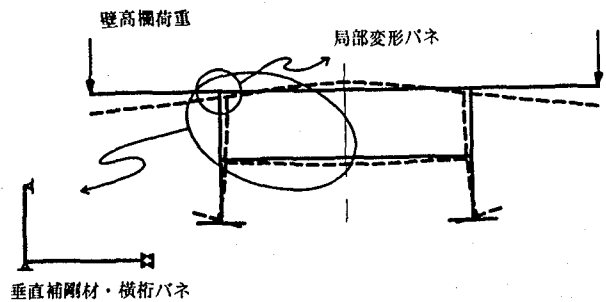
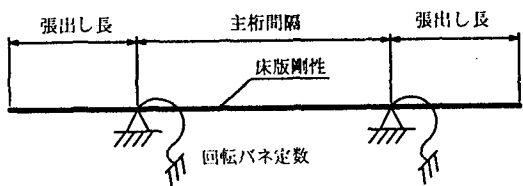


図-5 横桁部模式図



$$K\theta = \frac{1}{(1/K\theta_{nb}) + (1/K\theta_{w})} \quad (1)$$

図-6 計算モデル

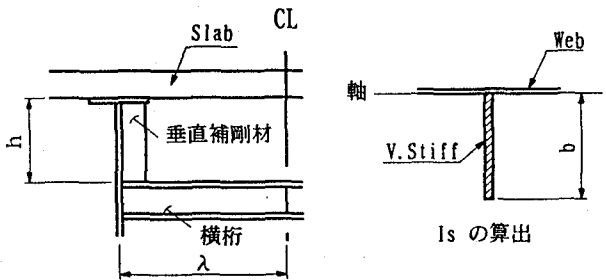


図-7 詳細モデル

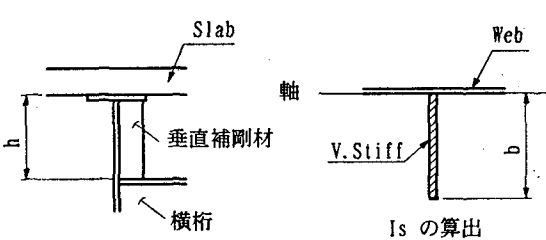


図-8 両端ピン支持モデル

の回転バネは、垂直補剛材および横桁の曲げ変形によるバネと垂直補剛材の局部変形によるバネとの連成バネとする。ただし、主桁の剛性による影響は小さいことから、ここでは無視することとした。

5.1 垂直補剛材・横桁による回転バネ定数

回転バネ定数は、図－7に示すようなフレームモデルの柱先端に、単位モーメントを载荷したときの回転変位として算出する。その際、柱および梁の剛性は、それぞれ垂直補剛材断面、横桁断面を用いる。

この詳細モデルでの回転バネ定数は、最小仕事の原理から次式より求めることが出来る。

$$K\theta_{補} = \frac{E}{\frac{h}{I_s} \left(\frac{\omega^2}{3} h^2 - \omega h + 1 \right) + \frac{\lambda}{I_{\sigma}} (\omega h - 1)^2 + \frac{\omega^2 h}{A_{\sigma}}} \quad (2)$$

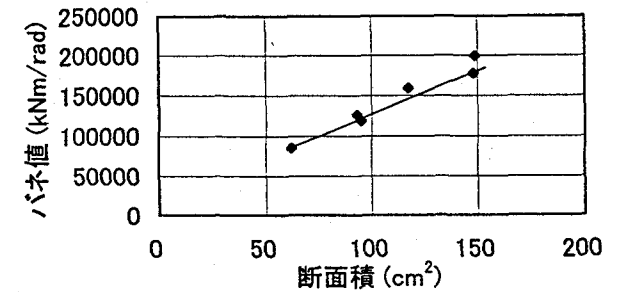
$$\omega = \frac{\frac{h}{2I_s} + \frac{\lambda}{I_{\sigma}}}{\frac{h}{3I_s} + \frac{\lambda}{I_{\sigma}} + \frac{1}{A_{\sigma}} \frac{1}{h^2}}$$

なお、主桁間隔6m程度で、かつ一般的な中段配置(h≒1.5m)の横桁に支持された床版については、横桁の及ぼす影響が小さいことから⁵⁾、図－8に示す両端ピン支持モデルを用いて、簡易にバネ値を算出する方法もある。

$$K\theta_{補} = \frac{3EI_s}{h} \quad (3)$$

表－5 解析パラメータ

	補剛材高 b mm	補剛材厚 t mm	断面積 cm ²	バネ値 tfm/rad
case 1	390	38	148.2	17767
case 2	310	38	117.8	15900
case 3	250	38	95.0	11881
case 4	310	48	148.8	19958
case 5	310	30	93.0	12632
case 6	310	20	62.0	8515



図－10 補剛材断面積と回転バネ定数との関係

5.2 垂直補剛材上端部の局部変形による回転バネ定数

局部変形による回転バネ定数は、立体FEM解析とは別に、垂直補剛材断面をパラメータとした平面FEM解析を実施して決定した。ここで用いたFEM解析モデルを図－9に、解析パラメータを表－5に示す。

垂直補剛材上端部の局部変形によって生ずる回転バネ定数は、図－10に示すように、その断面積とほぼ比例関係にあると考えられる。ここで、一般的に用いられる鋼2主桁橋の補剛材は概ね 90～140cm²の断面積を有することから、一律 147,000kNm/rad とした。

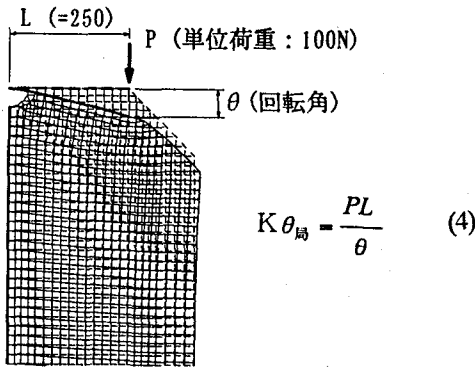
5.3 床版剛性の算出

連成バネの橋軸方向における支持範囲は、一本の中間横桁が、その間隔分の荷重を受け持つものとする。すなわち、図－11に示すように、床版剛性は中間横桁間隔分を考慮する。

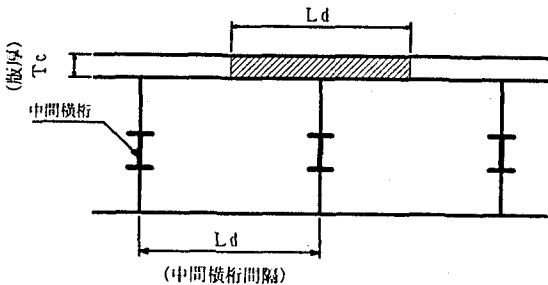
6. 計算モデルとFEM解析との比較

提案した計算モデルを用いて、床版の橋軸直角方向死荷重曲げモーメントおよび床版応力を算出し、FEM解析結果と比較した。

図－12に示すように、垂直補剛材の曲げ剛性、主桁間隔、および横桁間隔を変化させても計算モデルから求めた応力度とFEM解析値とはほぼ一致しており、計算モデルの妥当性が確認できた。



図－9 FEM解析モデル



図－11 床版剛性

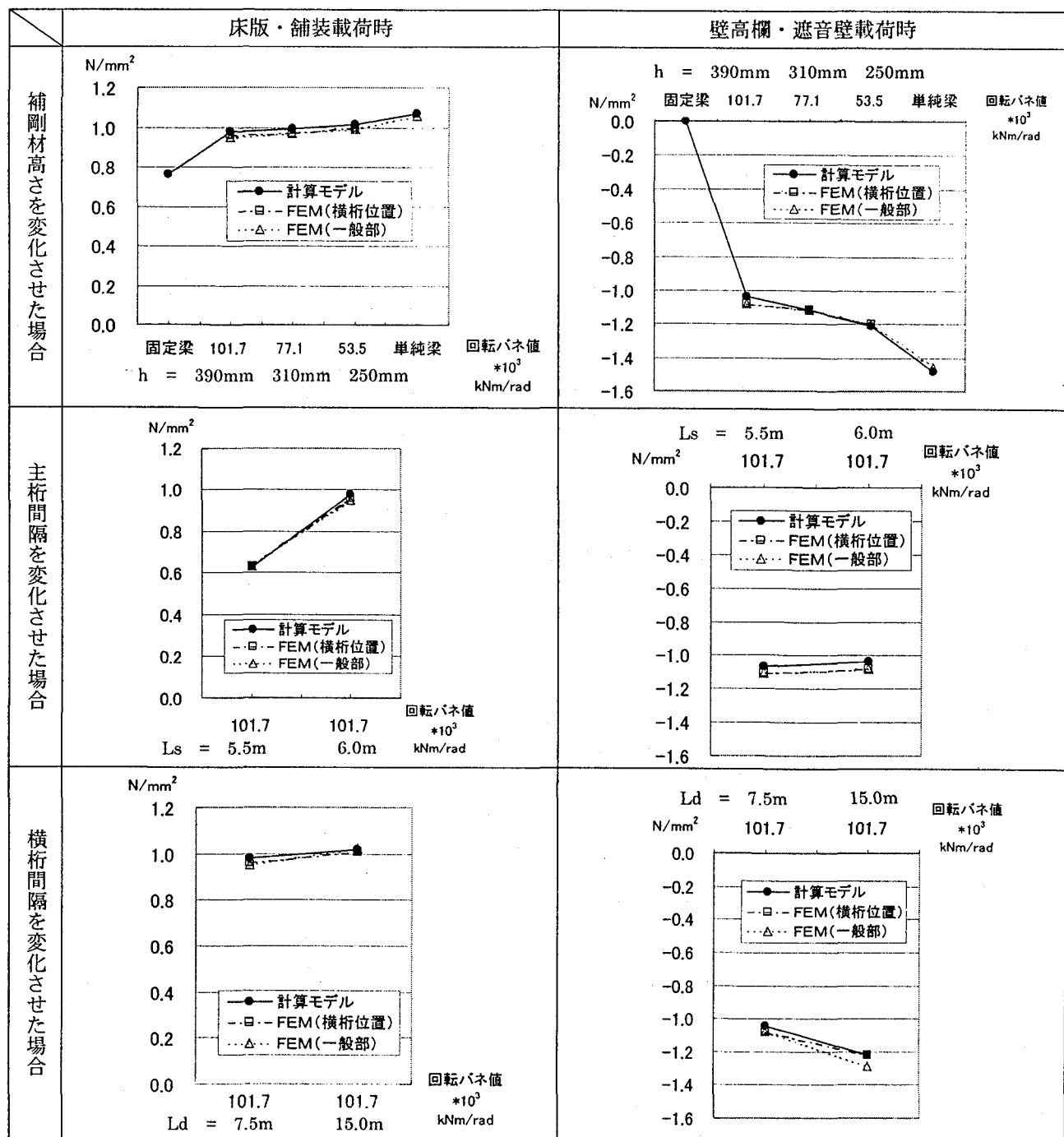


図-12 計算モデルとFEM解析との比較(床版下面応力度)

7. 試設計およびまとめ

PC床版2主桁橋の床版設計時における橋軸直角方向死荷重曲げモーメントの算出に、回転バネを用いた計算モデルを提案した。ここで提案した計算モデルによる手法と従来の手法とを用いて、PC床版の設計を行ってみた。設計条件はFEM解析で用いた基本形とした。その際、活荷重による設計曲げモーメントにおいては道路橋示方書Ⅲ 5.5.1より求めることとした。計算結果を図-13に示す。この結果より次のことが分かる。

① 固定支持および単純支持とも満足するように床版を

設計したタイプⅡの場合、PC鋼材の偏心量は小さくなるものの、ピッチは400mmと他のケースと比べて、約1.3倍のケーブル量が必要となる。

② 固定支持でケーブル配置を決めて、単純支持で照査したタイプⅠの場合、死荷重時に上縁で0.94 N/mm²の引張応力が作用し、PRC設計の考え方である「死荷重時に引張りを許さない」という規定を満足させることができない。また、PC鋼材の偏心量も大きくなる。

③ 計算モデルで設計したタイプⅢの場合、PC鋼材の偏心量は小さくなり、二次力も小さくなる。また、ピッチも510mmとなり、経済性、施工性が良くなる。

設計（支持）条件		ケーブル配置図
タイプⅠ	・設計要領第2集による ・固定支持でケーブル配置を決定 ・単純支持では照査 (死荷重時には引張応力が生じる) ・ケーブルピッチ @ 520mm	
タイプⅡ	・固定支持および単純支持でフルプレストレスとして決定 ・ケーブルピッチ @ 400mm	
タイプⅢ	・回転バネ支持の1つのモデルで決定 ・ケーブルピッチ @ 510mm	

図-13 試設計

表-6 床版支間部の応力計算

項 目	計算モデル	FEM解析	単純梁	固定梁
死荷重曲げモーメント Md	-3.7		-7.0	13.0
活荷重曲げモーメント Ml	95.0		95.0	95.0
設計モーメント Md+l	91.3		87.9	108.0
設計下面応力度 σ_{d+l}	-2.10	-2.18	-1.92	-3.03
死荷重上面応力度 σ_d	0.17	0.29	0.00	1.12

注) 表中、マイナスの応力は引張りを示す。FEMの応力については活荷重およびPC軸力は計算値。

また、計算モデルにより決定したケーブル配置で、単純梁モデルおよび固定梁モデルでの曲げモーメントを用いて照査してみる。その結果を表-6に示す。FEM解析結果とは、計算モデルが比較的良く合っているのがわかる。

したがって、道示式、あるいは単純梁と固定梁との組合せから床版を設計するより、単一モデルで実状にあった設計ができる。また、それによって、最適な主桁間隔の設定が容易になるとともに、従来の設計と比べ床版PC鋼材の偏心量も小さくすることができ、二次力も抑えられる。

8. おわりに

本研究は、日本道路公団にて検討を進めている「PC床版鋼2主桁橋の連続合成桁化に関する技術検討（東京大学名誉教授 伊藤學委員長）」の活動の一環として行ったものである。種々ある検討課題のうちの一つとして挙げられ、討議の上に取り纏められたものである。

ここで提案した回転バネモデルが、今後、建設が増増すると考えられるPC床版2主桁橋の設計の一助になれば

幸いである。

最後に本研究に際し、終始ご指導頂きました技術検討委員会の方々には多大なるご指導を頂き、紙上を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編、Ⅲコンクリート橋編、1996.12.
- 2) 坂井藤一、八部順一、大垣賀津雄、橋本靖智、友田富雄:合成2主桁橋の立体挙動特性に関する研究、構造工学論文集、土木学会、Vol.41a,pp.945~954,1995.
- 3) 作川孝一、八部順一、大垣賀津雄、高橋昭一、高畑和弘、川尻克利:横桁の影響を考慮した2主桁橋床版の死荷重曲げモーメントに関する一提案、第52回年次学術講演会、I-A260,1997.9.
- 4) 設計要領第二集、日本道路公団、1998.7.
- 5) (財)高速道路技術センター:PC床版鋼2主桁橋の連続合成桁化に関する技術検討(その3)、2001.3.
(2001年9月14日受付)