

2 主桁橋梁の床版死荷重曲げモーメントに関する計算モデルの提案

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

坂本 純男*, 中藪 明広**, 稲葉 尚文**, 長井 正嗣***, 星埜 正明****
Sumio SAKAMOTO, Akihiro NAKAZONO, Naofumi INABA, Masatsugu NAGAI and Masaaki HOSHINO

*片山ストラテック (株) 橋梁設計部 課長 (〒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 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)

*****工博 日本大学 理工学部交通土木工学科 教授 (〒274-0063 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

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

1. はじめに

近年、PC床版を有する鋼2主桁橋梁が数多く設計、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、今後も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主桁橋梁を二車線道路に適用する場合、一般的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、従来の多主桁橋梁と比べて長くなる。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、JH設計要領第2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鋼線が必要となり、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. 検討課題

(1) 設計死荷重曲げモーメント

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、危険側

の設計になる。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単純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（表-1、図-1参照）。

(2) PRC床版の設計方針

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鋼線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、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、PC鋼線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ため不経済となる。

これらに対して、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る。

3. 検討方法

総幅員11.2mの鋼2主桁橋梁を対象に、立体FEM解析を実施し、PC床版の挙動を把握する。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ケーブル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入れた半橋モデルとした。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。

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

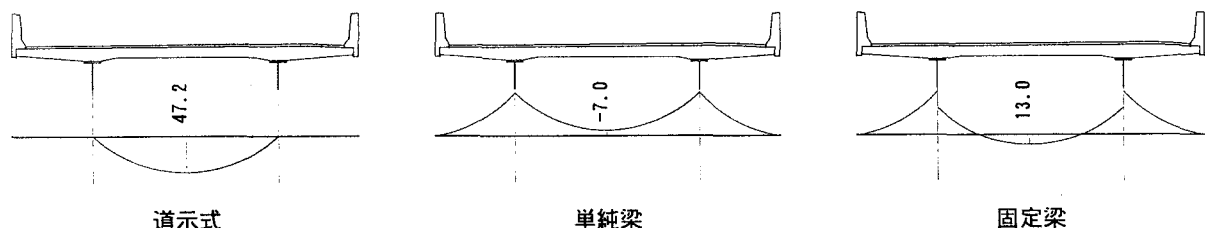


図-1 橋軸直角方向の床版死荷重曲げモーメント図

解析パラメータとしては、表-3に示すとおり、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、および補剛材高さとし、これ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。

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集中荷重の2種類とした。

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形状、などに着目するが、本論文ではこれらのうち、床版支間中央部の下面応力について記述する。

4. 検討結果

立体FEM解析結果のうち、壁高欄、遮音壁載荷時の応力コンター図を図-3に示す。このケースでは、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る。床版、舗装載荷時については、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力がバランスして、横桁の有無による差はあまり生じない。

また、図-4に横桁のある断面と横桁のない断面との変形を、表-4に各モデルの床版支間中央部下面応力を示す。

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。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部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

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 MI	95.0	95.0
設計モーメント Md+I	87.9	108.0
設計下面応力度 σ_{d+I}	-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

表-3 解析パラメータ

項目	パラメータ
横桁取付高さ h	1.5m
補剛材高さ b	390mm 310mm 250mm
横桁間隔 Ld	7.5m 15.0m
主桁間隔 Ls	6.0m 5.5m

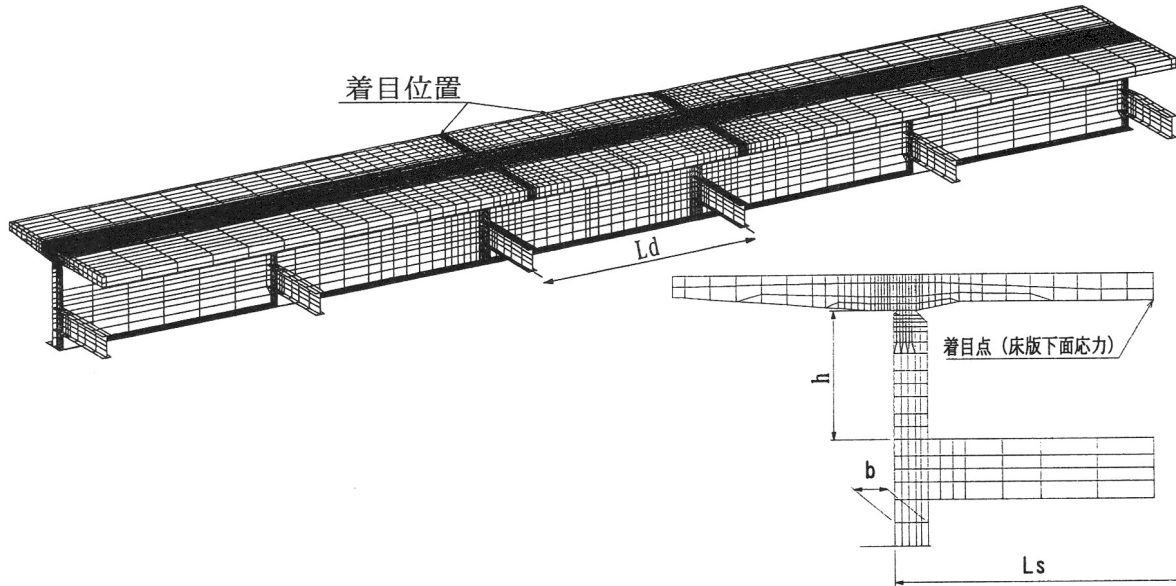
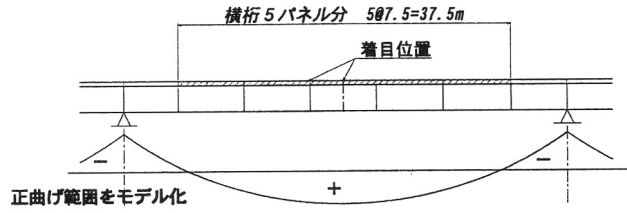


図-2 立体FEM解析モデル

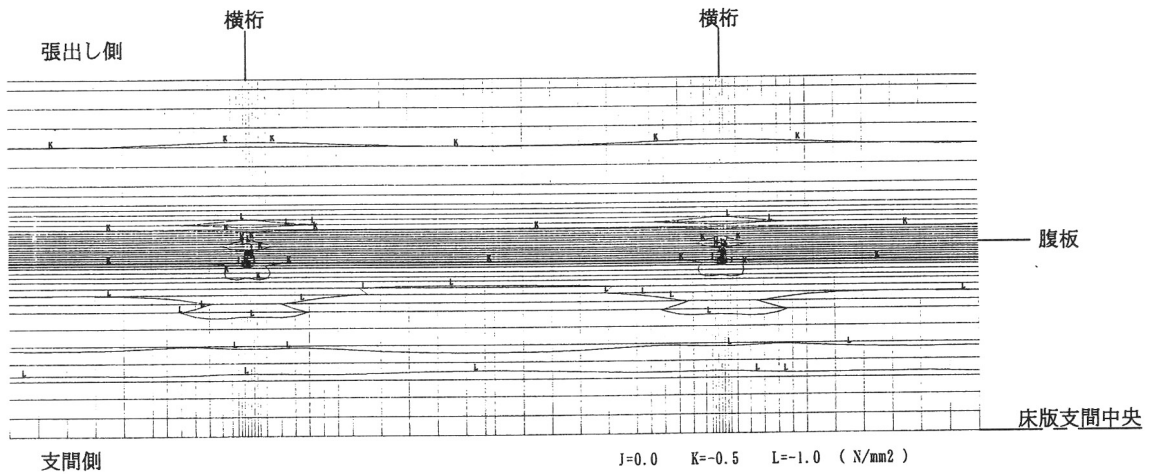
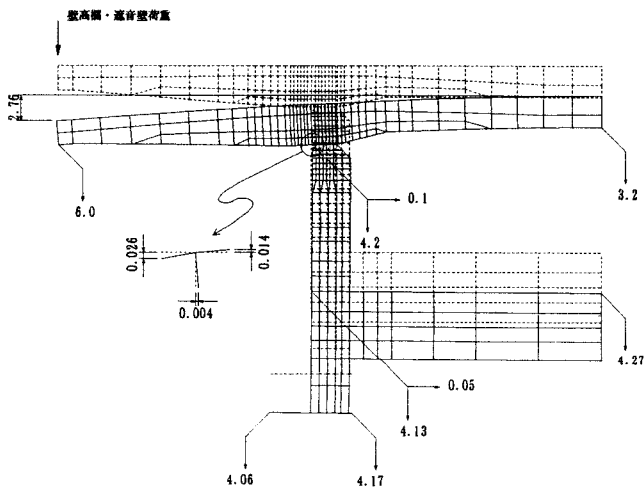


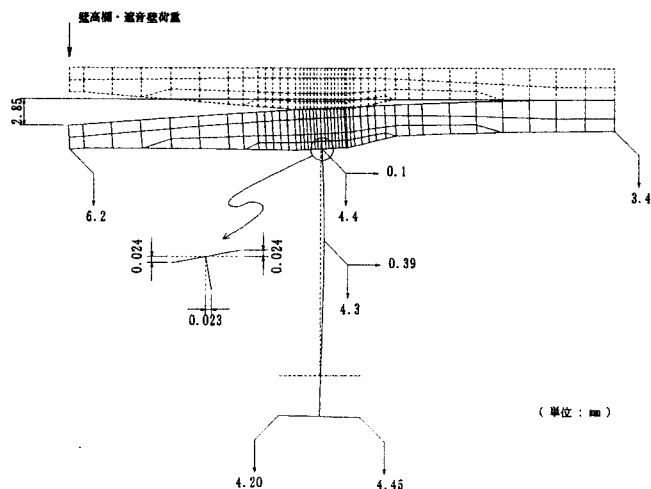
図-3 橋軸直角方向床版下面応力コンター図 (壁高欄・遮音壁載荷時)

表-4 橋軸直角方向床版下面応力表

	解析パラメータ			床版下面応力度 (N/mm ²)			
	構造寸法 (m)			床版・舗装		遮音壁・壁高欄	
	主桁間隔	横桁間隔	補剛材高さ	横桁部	一般部	横桁部	一般部
case 1	6.000	7.500	0.390	0.96	0.95	-1.08	-1.08
case 2	6.000	7.500	0.310	0.97	0.97	-1.12	-1.12
case 3	6.000	7.500	0.250	1.00	0.99	-1.20	-1.20
case 4	6.000	15.000	0.390	1.01	1.02	-1.22	-1.29
case 5	5.500	7.500	0.390	0.63	0.63	-1.11	-1.11



(a) 横桁のある断面



(b) 横桁のない断面

図-4 変形図

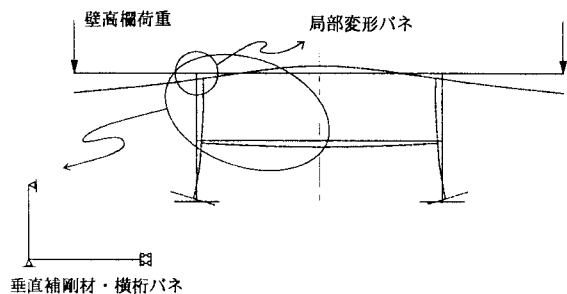


図-5 横桁部模式図

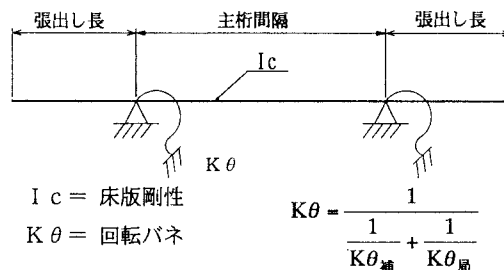


図-6 計算モデル

あるが変形しているのが分かる。図-5はその模式図である。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。

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、主桁間隔、および横桁間隔の影響を受ける。

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る。

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

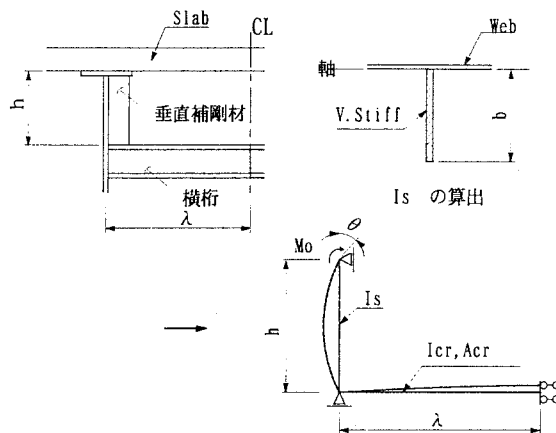


図-7 詳細モデル

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。なお、橋軸方向の支持範囲は横桁間隔とする。

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、単位モーメントを載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できる。

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

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

なお、主桁間隔6m程度で、かつ中段配置 ($h \approx 1.5\text{m}$) 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、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。

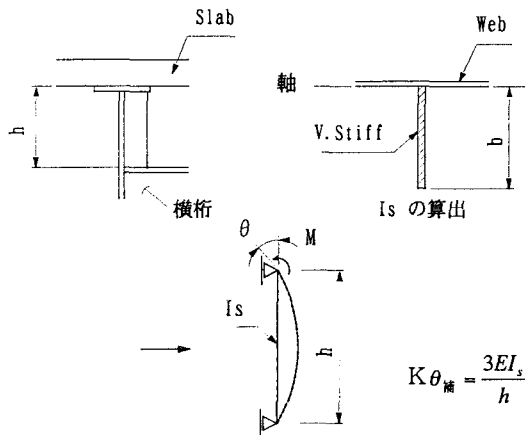


図-8 両端ピン支持モデル

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、垂直補剛材断面をパラメータとしたFEM解析を実施して決定した。その結果、回転バネ定数は、断面積に依存すると思われるが、一般的に用いられる鋼2主桁橋梁の補剛材は概ね $90 \sim 140\text{cm}^2$ の断面積を有することから、一律 $15,000\text{tfm/rad}$ とした。ここで用いたFEM解析モデルを図-9に示す。

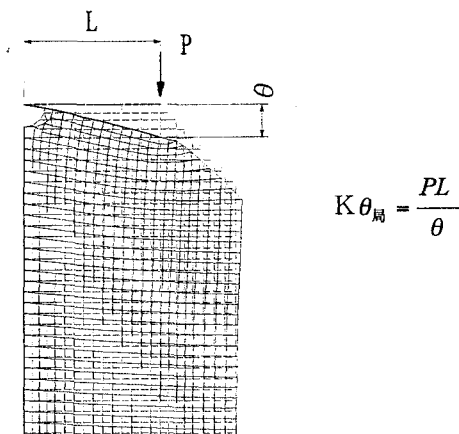


図-9 FEM解析モデル

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、中間横桁間隔分とする。すなわち、図-10に示すように、床版剛性は中間横桁間隔分を考慮する。

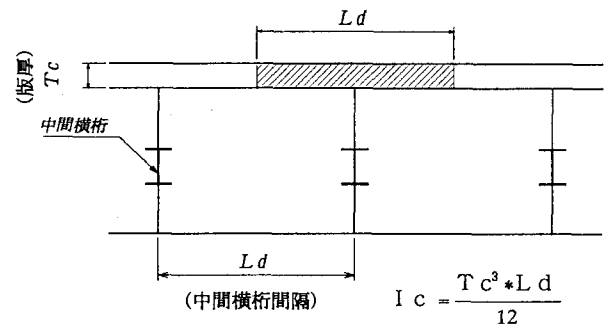


図-10 床版剛性

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-11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FEM解析値とほぼ一致しており、計算モデルの妥当性が確認できた。

7. まとめ

PC床版2主桁橋梁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。その結果、固定・単純支持の両方をPRC構造として満足するよう設計した場合と比べて、8割程度のPCケーブル量となる。また、固定支持でケーブル間隔および配置を決めて、単純支持で照査した場合、死荷重時に引張応力が作用することになり、PRC設計の考え方と矛盾することとなるが、計算モデルではその様なことはない。

床版死荷重曲げモーメントが単一モデルで設計できることから、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ケーブルの偏心量も小さくすることができ、二次力も抑えられる。

最後に、本研究はJH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（伊藤学委員長）」の活動の一環として行ったものである。

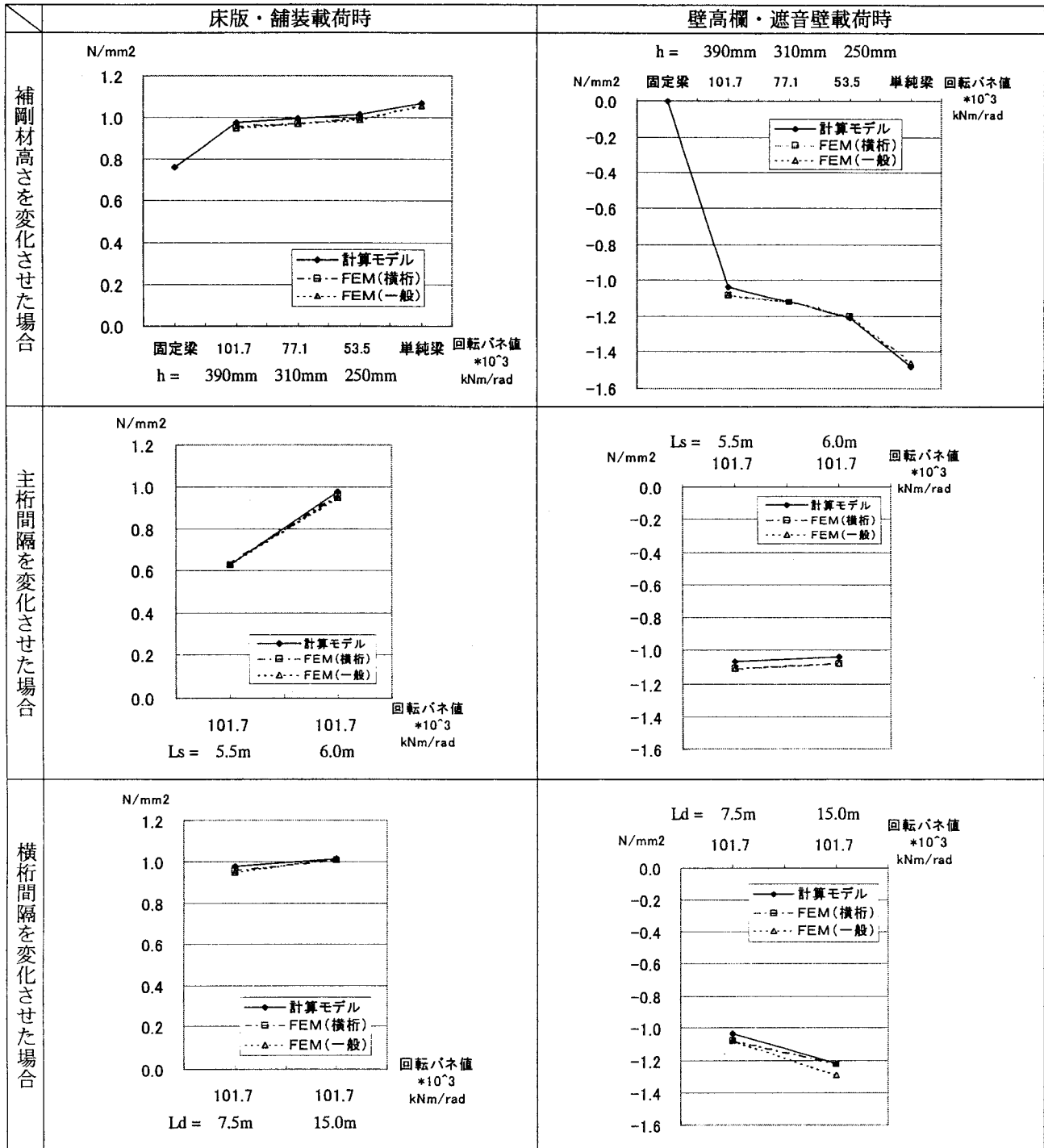


図-11 計算モデルとFEM解析との比較（床版下面応力度）

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。
- 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。