

鋼4主 I 桁橋の設計計算に関する一考察

A study of design analysis for a steel four-I-girder bridge

山口栄輝*, 山本悟**, 村越潤***, 高橋実***, 山下健二****

Eiki Yamaguchi, Satoru Yamamoto, Jun Murakoshi, Minoru Takahashi, Kenji Yamashita

*Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

**修 (工) 西松建設北陸支店 (〒950-0992 新潟県新潟市上所上 1-16-8)

***工修 (独) 土木研究所構造物研究グループ橋梁構造チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

****九州工業大学大学院工学研究科建設社会工学専攻 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1)

Stress acting in a bridge is often smaller than that estimated in design procedure. A reason behind this may be the conventional analysis method employed in design procedure. The conventional method is based on a simple structural theory, so that one can conduct structural analysis even without computers. Due to the advancement of computer technology and finite element software, now it is not difficult to carry out three-dimensional finite element analysis of a bridge, using shell and solid elements, which can yield realistic structural behavior. However, since the 3-D FE analysis requires considerable time for preparing input data, it is not practical to employ it for day-to-day design procedure. In the present study, both the conventional and three-dimensional FE analyses of a steel plate-girder bridge are conducted and the difference is discussed. To reduce the difference, the correction factors for the conventional method are obtained through parametric 3-D FE analysis. The effectiveness is then verified by a numerical example.

Key Words: design analysis, grid theory, three-dimensional finite element analysis, steel four-I-girder bridge

キーワード: 設計解析, 格子桁理論, 立体FEM解析, 鋼4主 I 桁橋

1. はじめに

鋼 I 桁橋に実際に作用する応力は, 設計時の計算で得られる応力より小さいことも多い¹⁾. その原因のひとつに, 設計時に用いられる解析法が考えられる. 現行設計での解析方法は, 橋梁の設計が手計算を中心に行われてきた長い歴史を反映したものであり, 複雑な構造をいかにして解くかに力点がおかれている. 端的には, 格子桁理論の適用を前提に, 橋梁を簡易なモデルに置き換えた設計計算が行われている²⁾.

一方で, コンピュータや構造解析ソフトウェアの進歩には目覚ましいものがあり, シェル要素やソリッド要素を用いた 3 次元有限要素解析 (以下では, 立体 FEM 解析と呼ぶ) も比較的容易に行えるようになってきた. この解析法によって得られる鋼橋の応力は, 実際の橋梁で作用する値に近いことが知られている¹⁾. しかしながら, 従来より鋼 I 桁橋の設計で用いられている格子桁理論に基づいた解析法 (以下

では, 従来解析と呼ぶ) に比べると, 立体 FEM 解析は入力データの作成 (橋梁のモデル化, 要素分割) に多大な時間を要するなど, 通常の鋼橋設計業務で気軽に用いられる状況にはない.

本研究では, 鋼 4 主 I 桁橋を考察対象に取り上げ, まず従来解析と立体 FEM 解析で得られる変形挙動を比較検討し, 違いが生じる要因を明らかにする. 次に, 従来解析の枠組みの中で立体 FEM 解析結果に近い値が得られるよう, 改善策を提案する. 具体的には, 従来解析で使用される荷重分配係数²⁾に対する補正係数の導入を試みる. この改善方法では, 補正係数導入以外の変更は必要としないため, 従来解析の手順等はほぼそのまま踏襲でき, 解析の簡便性も保持される. なお, 立体 FEM 解析には NASTRAN³⁾を用いる.

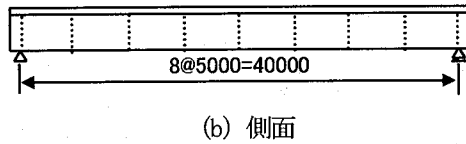
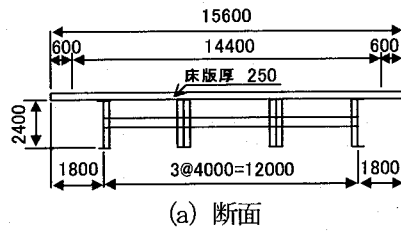
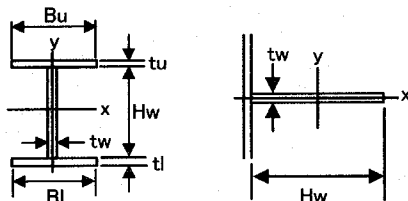


図-1 解析対象橋梁 I (単位: mm)

表-1 断面諸元 (解析対象橋梁 I)

	主桁	横桁	垂直補剛材
Bu (mm)	600	400	
tu (mm)	20	20	
Hw (mm)	2400	600 (1800)	300
tw (mm)	12	9	9
Bl (mm)	600	400	
tl (mm)	50	20	
A (cm ²)	708	214 (322)	27
I _x (cm ⁴)	6.94×10 ⁶	1.70×10 ⁶ (1.76×10 ⁶)	1.82
I _y (cm ⁴)	1.26×10 ⁶	2.13×10 ⁴ (2.13×10 ⁴)	2.03×10 ³

(): 端横桁



主桁, 端・中間横桁

垂直補剛材

2. 鋼4主I桁橋の変形挙動

2.1 解析対象橋梁 I

長井ら⁴⁾が用いた鋼4主I桁橋を取り上げ、解析対象橋梁 I とする。図-1 に示す通り、この橋は幅員 15.6m、張出し長 1.8m、腹板高さ 2.4m、主桁間隔 4m の単純合成桁橋である。スパンは 40m、床版厚は 25cm、断面はスパン方向に一定となっている。主桁、端・中間横桁、垂直補剛材の断面諸元を表-1 にまとめている。なお、鋼材のヤング係数、ポアソン比はそれぞれ $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、0.3、コンクリートのヤング係数は鋼材の $1/7$ 、ポアソン比は 0.167 とする。この橋梁モデルには、横桁、垂直補剛材が 5m 間隔で設置されている。両者の設置位置は同じであり、図-1 (b) に破線で示している。

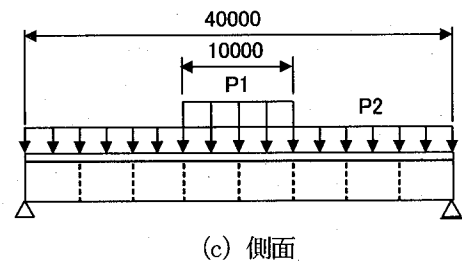
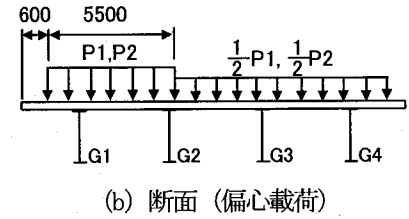
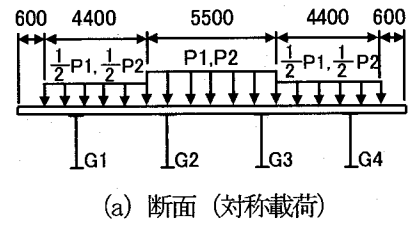


図-2 L荷重載荷状態 (単位: mm)

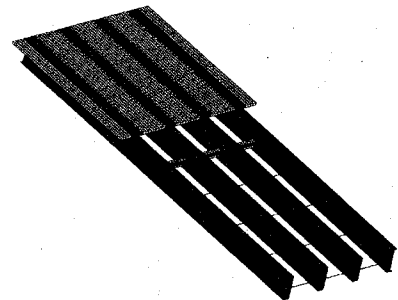


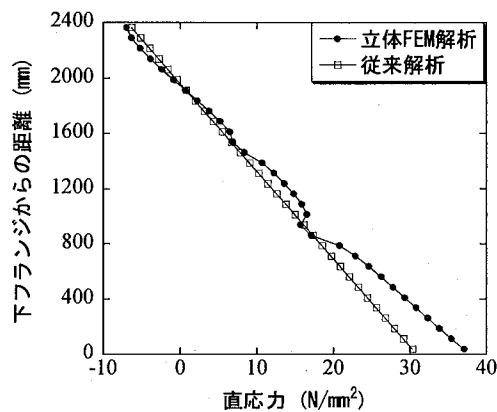
図-3 要素分割 (解析対象橋梁 I)

荷重には道路橋示方書⁵⁾に規定されたB活荷重のL荷重のみを考える。主載荷荷重はスパン中央部に作用させるが、幅員方向の位置を変えることで、幅員中央に関して対称載荷と偏心載荷を考える。図-2に、載荷状態を示す。

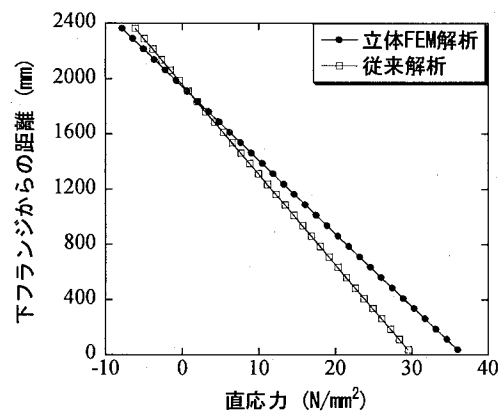
2.2 立体FEM解析モデル

主桁のフランジ、腹板および垂直補剛材は4節点のシェル要素でモデル化する。横桁は、スパン中央位置のみシェル要素、その他は梁要素でモデル化する。床版には8節点のソリッド要素を用いる。主桁上フランジの節点は床版と共有させ、合成桁挙動をさせる。

図-3に要素分割を示す。主桁等が見えるように、この図では床版を一部取り除いている。この要素分

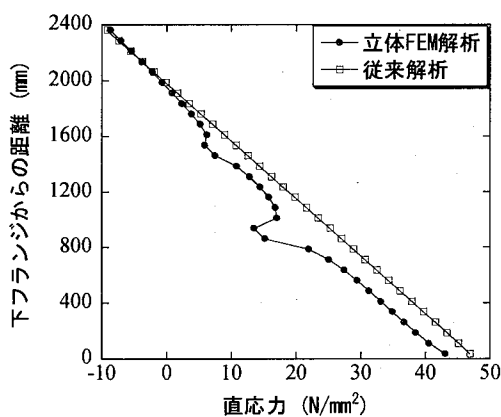


(a) 0.1 m

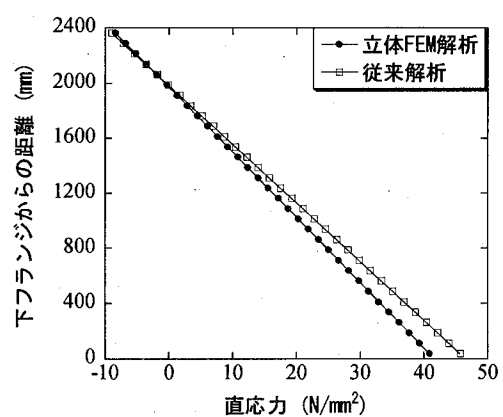


(b) 2.5 m

図-4 G1桁腹板内の橋軸方向直応力分布 (対称載荷)



(a) 0.1 m



(b) 2.5 m

図-5 G2桁腹板内の橋軸方向直応力分布 (対称載荷)

割には、ソリッド要素 20400 個、シェル要素 46248 個、梁要素 624 個を使用している。

2.3 解析結果および考察

(1) 直応力分布

対称載荷時のG1, G2桁腹板内橋軸方向直応力分布を図-4, 図-5, 偏心載荷時のG1, G4桁腹板内橋軸方向直応力分布を図-6, 図-7に示す。着目位置は、スパン中央から0.1m, 2.5m離れた断面である。2.5mの位置は、2つの垂直補剛材の中間点に当たる。図-4~7では、縦軸が腹板内の位置、横軸が橋軸方向直応力を示している。いずれの載荷状態においても、着目位置0.1mで立体FEM解析結果の応力分布に乱れが見られる。これは横桁位置での現象であり、2次部材の取り付けにより、局所的に応力分布が乱れることが理解される。

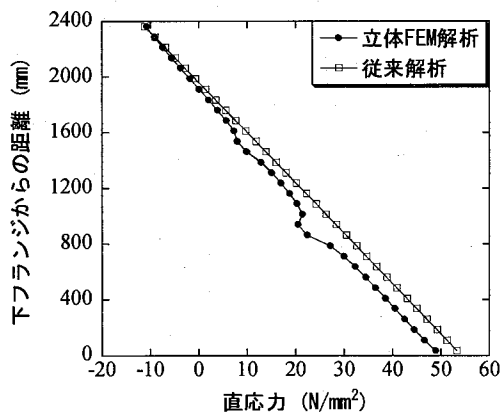
図-4, 図-5には、従来解析で得られた直応力分布も示している。立体FEM解析結果とは顕著な差が認められ、腹板下端において9%~18%の違いが生じている。立体FEM解析に比べると、従来解析で

はG1桁で小さな応力、G2桁では大きな応力が得られている。これは、従来解析は立体FEM解析に比して、G1桁に小さな荷重、G2桁に大きな荷重を受け持たせる結果になっている。対称載荷では主載荷荷重がG2, G3桁上に位置していることから、換言すれば、従来解析は各主桁への荷重分配を過小評価していると考えられる。

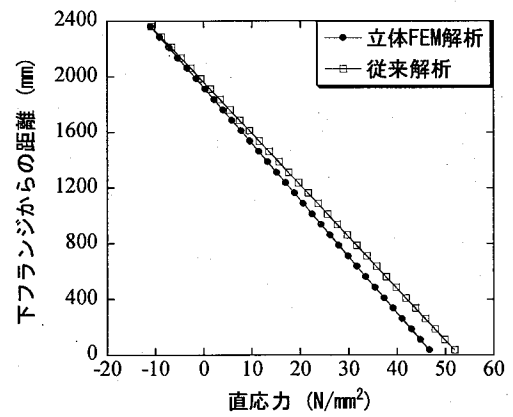
図-6, 図-7でも従来解析と立体FEM解析の結果は異なり、腹板下端において9%~17%の差が生じている。G1桁では従来解析の応力が立体FEM解析結果を上回り、G4桁では逆に従来解析の応力が立体FEM解析結果よりも小さくなっている。すなわち、従来解析は立体FEM解析に比して、G1桁に大きな荷重、G4桁に小さな荷重を受け持たせる結果となっている。主載荷荷重がG1桁側に位置していることから、ここでも、従来解析は各主桁への荷重分配を過小評価している。

(2) 鉛直変位

図-8には、スパン中央における主桁の鉛直変位

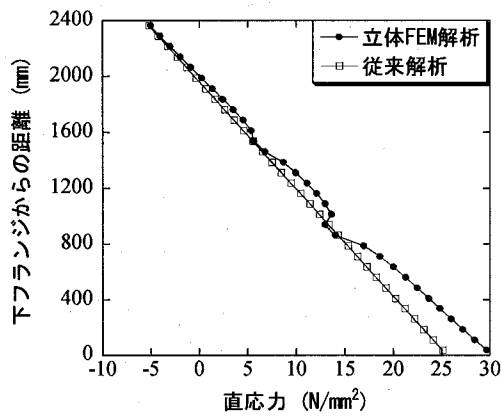


(a) 0.1 m

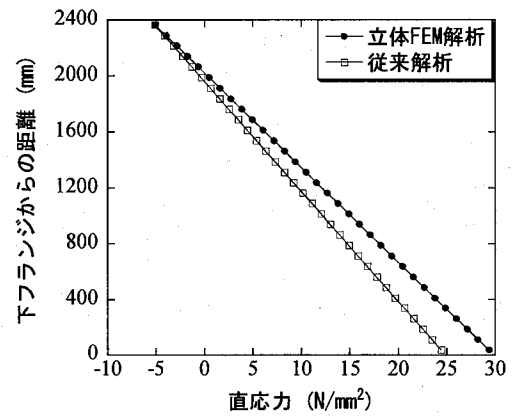


(b) 2.5 m

図-6 G1桁腹板内の橋軸方向直応力分布（偏心載荷）

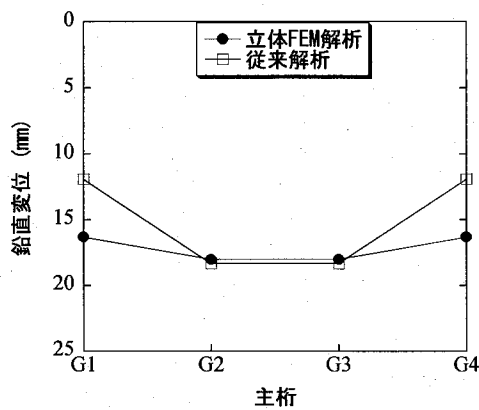


(a) 0.1 m

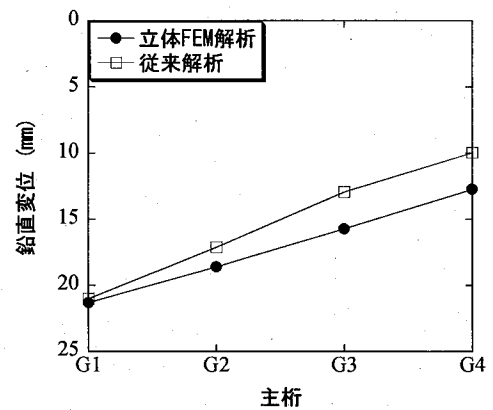


(b) 2.5 m

図-7 G4桁腹板内の橋軸方向直応力分布（偏心載荷）



(a) 対称載荷



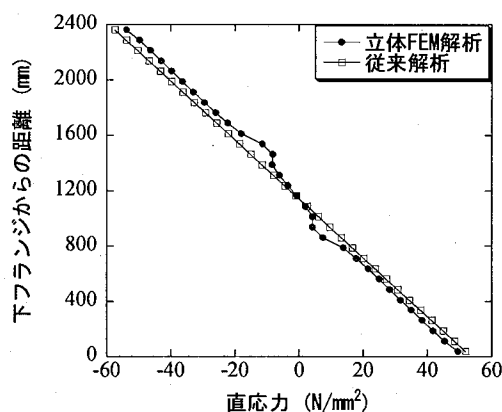
(b) 偏心載荷

図-8 主桁中央での鉛直変位

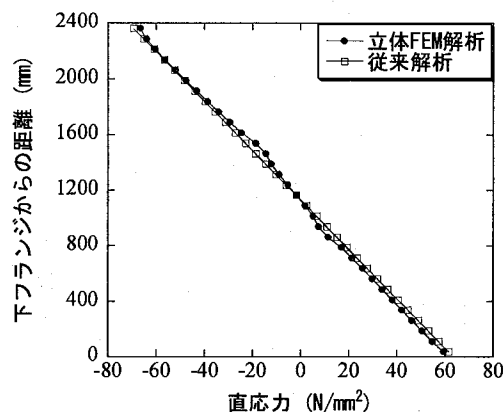
(たわみ)を示している。従来解析と立体FEM解析による鉛直変位は異なっており、桁間の鉛直変位差は従来解析の方が大きくなっている。これは、従来解析では上載荷重の各主桁への荷重分配が過小評価されていることを意味しており、直応力分布の解析結果と符合している。

(3) 床版厚の影響

従来解析では、横桁によってのみ上載荷重が各主桁に分配されると仮定している。一方、立体FEM解析では、床版も板としてモデル化するため、その荷重分配機能も考慮される。この点で、2つの解析法は大きく異なっている。

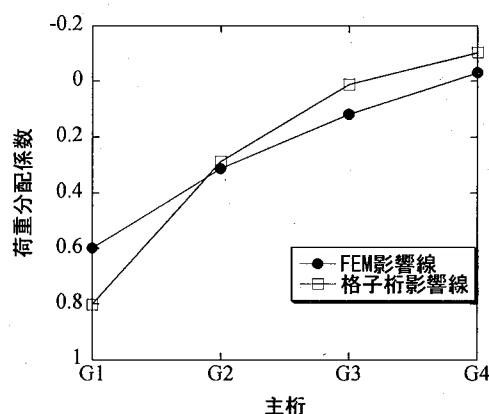


(a) G 2 桁 (対称载荷)

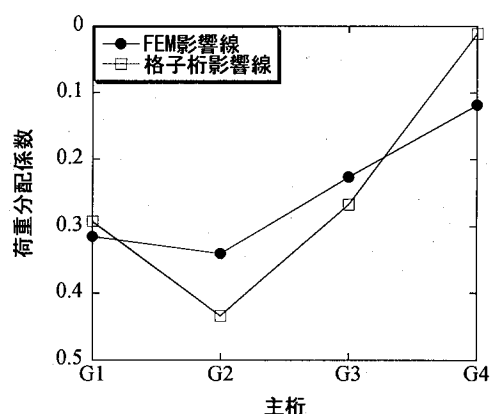


(b) G 1 桁 (偏心载荷)

図-9 腹板内の橋軸方向直応力分布 (床版厚 2.5cm)



(a) G 1 桁影響線



(b) G 2 桁影響線

図-10 荷重分配影響線

その影響を検討するため、床版の厚さを 1/10 に低減し、剛性を低下させて解析を行った。解析結果として、対称载荷時の G 2 桁腹板内、偏心载荷時の G 1 桁腹板内の橋軸方向直応力分布（いずれもスパン中央から 0.1m 離れた断面のもの）を図-9 に示している。先の解析結果に比べると、従来解析結果と立体 FEM 解析結果の差は大きく減少している。床版が薄くなって剛性が低下すると、床版の荷重分配機能は低下する。したがって、図-9 は、従来解析と立体 FEM 解析で異なった結果が得られるのは、床版の荷重分配機能考慮の有無が主原因であることを示唆している。

3. 荷重分配係数の補正

2 章では、従来解析と立体 FEM 解析で異なった変形挙動が得られることを示した。ここでは、従来解析の枠組みの中、すなわち現行の設計計算の流れを大きく変えることなく立体 FEM 解析結果との差異を縮めることを目的に、従来解析で用いられる荷重分

配係数²⁾に対する補正係数を検討する。

3.1 主桁への荷重分配

従来解析では、格子桁理論によって各主桁への荷重分配係数（以下では、格子桁分配係数と呼ぶ）を求め、それに応じて各桁が負担する荷重が算出される²⁾。格子桁分配係数と比較検討するために、立体 FEM 解析でも荷重分配係数 (FEM 分配係数) を求める。具体的には、主桁と、横桁または対傾構の交点上の床版上面に単位荷重を載荷させ、立体 FEM 解析で各主桁のスパン中央たわみを求め、それより各主桁に分配された荷重を算出し、FEM 分配係数を得る。

図-10 は、解析対象橋梁 I の荷重分配係数を算出し、描いた荷重分配影響線である。図中、格子桁理論による荷重分配影響線を格子桁影響線、立体 FEM 解析による荷重分配影響線を FEM 影響線と呼んでいる。この図より、格子桁影響線に比べ、FEM 影響線では主桁間の荷重分配係数の差が小さいことがわかる。従来解析では荷重分配作用を過小評価していることが、ここでも確認される。

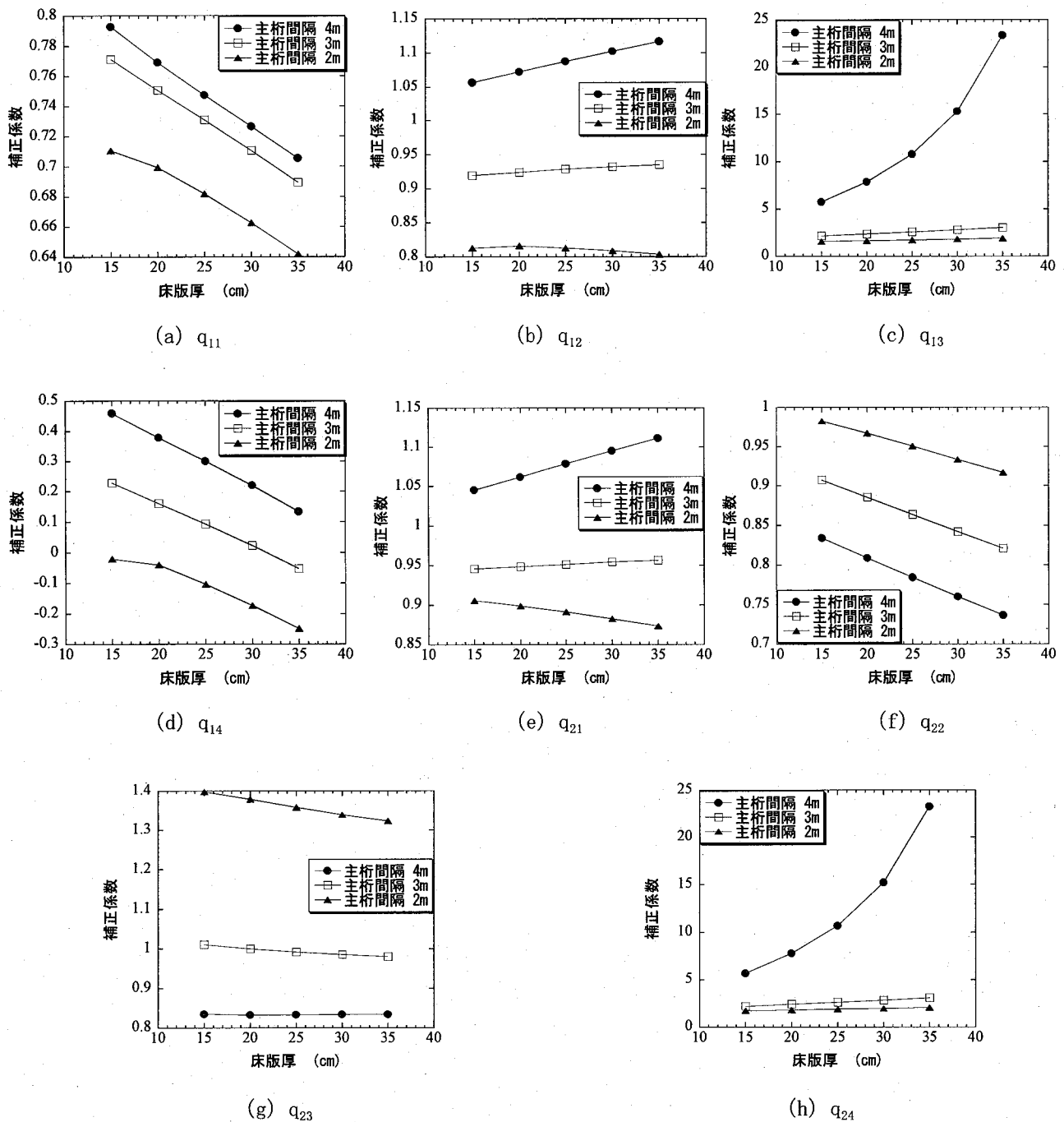


図-11 荷重分配係数の補正係数

3.2 補正係数

図-10 で見られるような、格子桁影響線と FEM 影響線の差をなくすために、ここでは、格子桁分配係数への補正係数の導入を検討する。そのために、主桁間隔と床版厚をパラメータとした解析を行う。主桁間隔は 2m, 3m, 4m, 床版厚は 15cm, 20cm, 25cm, 30cm, 35cm と変化させ、従来解析と立体 FEM 解析で荷重分配係数を求める。

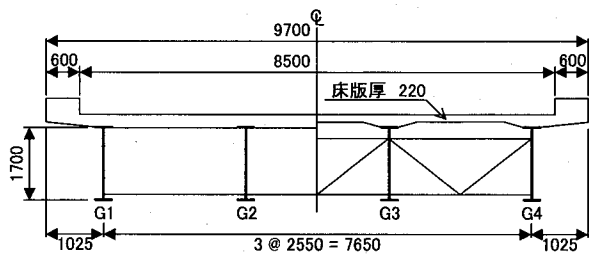
このパラメトリック解析の結果として、荷重分配係数 q_{ij} の補正係数を図-11 に示す。なお、荷重分配係数 q_{ij} は、物理的には、主桁 i に単位荷重が作用

した際に、主桁 j が受け持つことになる力を表す。また、補正係数は FEM 分配係数を格子桁分配係数で除した値である。

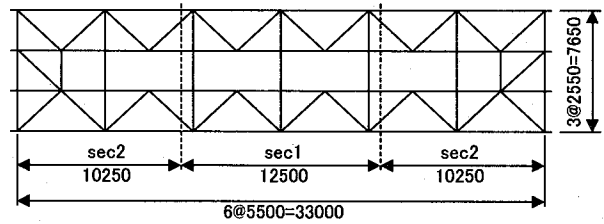
4. 数値計算例

4.1 解析対象橋梁 II

3 章で得られた補正係数の有効性を検討するために、文献 2) の鋼 4 主合成 I 桁橋を解析する。概略は図-12 に示しているが、スパン 33m, コンクリート床版厚 22cm の単純桁橋である。表-2 に示すよう



(a) 断面

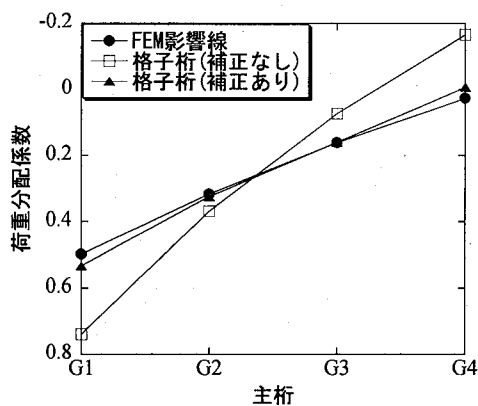


(b) 平面

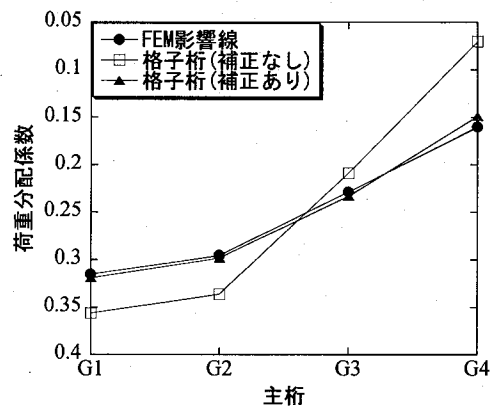
図-12 解析対象橋梁Ⅱ (単位: mm)

表-2 主桁断面諸元 (解析対象橋梁Ⅱ)

	G 1, G 4		G 2, G 3		横桁		垂直補剛材	
	sec1	sec2	sec1	sec2	端横桁	荷重分配横桁	端部	中間部
Bu (mm)	310	310	310	310	220	240		
tu (mm)	22	17	21	17	10	10		
Hw (mm)	1700	1700	1700	1700	1450	1280	170	110
tw (mm)	9	9	9	9	9	9	16	9
B1 (mm)	550	550	550	550	220	240		
t1 (mm)	32	32	29	29	10	10		
A (cm ²)	397	382	378	365	174.5	163.2	27.2	9.9
I _x (cm ⁴)	1.97×10^6	1.77×10^6	1.86×10^6	1.71×10^6	4.63×10^5	3.57×10^5	5.80	0.668
I _y (cm ⁴)	4.98×10^4	4.86×10^4	4.54×10^4	4.44×10^4	1.78×10^3	2.31×10^3	65.5	99.8



(a) G 1 桁影響線



(b) G 2 桁影響線

図-13 FEM 影響線と格子桁影響線の比較

に、主桁断面は橋梁Ⅰより小さい。主桁間隔、床版厚ともに3.2節の検討範囲内であるが、橋梁Ⅰと異なり、断面がスパン方向に変化し、外桁と内桁で寸法が異なっている。また、横桁、垂直補剛材に加えて、水平補剛材、対傾構、横構が設置されている。

4.2 立体 FEM 解析モデル

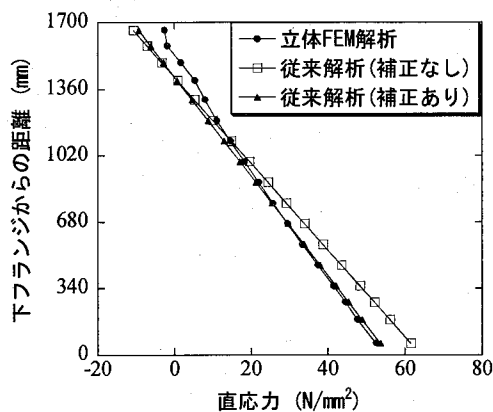
主桁、垂直補剛材、水平補剛材、荷重分配横桁、端横桁は4節点シェル要素、対傾構、横構は梁要素、床版は8節点ソリッド要素を用いてモデル化する。使用要素数は、ソリッド要素 27348 個、シェル要素

40672 個、梁要素 512 個である。従来解析では考慮されていない対傾構、横構、床版ハンチ部、地覆部などもここでは忠実にモデル化している。

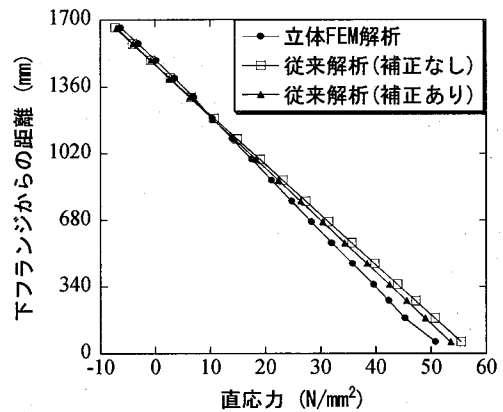
B活荷重のL荷重⁵⁾をここでも考慮する。ただし、文献2)に合わせ、格子桁理論による影響線をもとに、影響線載荷で解析する。

4.3 解析結果

解析結果として、G 1 桁、G 2 桁の FEM 影響線と格子桁影響線を図-13 に示す。補正の有無により、格子桁影響線は2本描かれている。補正には、橋梁



(a) G 1 桁



(b) G 2 桁

図-14 腹板内の橋軸方向直応力分布

表-3 鉛直変位, 橋軸方向直応力

	G 1		G 2	
	鉛直変位 (mm)	直応力 (N/mm ²)	鉛直変位 (mm)	直応力 (N/mm ²)
従来解析(補正なし)	23.4 (17.6%)	61.6 (17.2%)	20.3 (4.1%)	55.4 (9.0%)
従来解析(補正あり)	20.4 (2.5%)	53.6 (2.1%)	19.6 (0.5%)	53.5 (5.3%)
立体FEM解析	19.9	52.5	19.5	50.8

(): 誤差

I を用いて 3.2 節で求めた補正係数を適用しているが, 補正を行うことにより, 格子桁影響線は FEM 影響線とよく一致するようになっている。

図-14 には, スパン中央から 0.03m 離れた断面での腹板の橋軸方向直応力分布を示している。この図からも, 補正係数を用いることで, 従来解析と立体 FEM 解析の差が減少することが理解される。表-3 には, この断面での従来解析と立体 FEM 解析による G 1, G 2 桁の鉛直変位, 腹板下端での橋軸方向直応力をまとめている。表中の括弧内は立体 FEM 解析を正としたときの誤差である。補正前の従来解析では, 立体 FEM 解析との差が最大で 17.6% であるのに対し, 補正後の格子桁影響線を用いた従来解析では最大誤差でも 5.3% に減少しており, 補正係数の有効性を確認できる。

5. まとめ

本研究では, 鋼 4 主 I 桁橋を対象に, 設計業務で用いられる解析法 (従来解析) と立体 FEM 解析による変形挙動の比較をまず行った。立体 FEM 解析の結果に比べると, 従来解析では各主桁への荷重分配が過小評価される傾向が認められ, 差異の生じる要因が床版の荷重分配機能考慮の有無であることを示した。疲労損傷などへの対応から, 近年の床版は厚くなっている。このことを思えば, 本研究の結果は,

設計業務で得られる鋼 I 桁橋の変形挙動は, 実挙動とかなり異なっている可能性が大きいことを示唆している。

現行の設計解析の枠組みの中でこの点を解決すべく, 立体 FEM 解析を用いたパラメトリックスタディを行い, 格子桁分配係数に対する補正係数を求めた。異なる諸元を有する鋼 4 主 I 桁橋を数値計算例として取り上げ, その有効性を検証した。これにより, 鋼橋の設計を合理化するためのひとつの方向を提示できたと考えている。ただし, ここでの検討内容は限られ, 実用に供するにはさらなる検討が必要と考えており, 漸次取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.
- 2) 日本橋梁建設協会: 合成桁の設計例と解説, 1997.
- 3) MSC.visualNastran, professional, 2003.
- 4) 長井正嗣, 吉田康治, 藤野陽三: シンプルな横補剛システムをもつ鋼多主 I 桁橋の立体力学挙動, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 1141-1151, 1997.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2002.

(2005 年 9 月 10 日受付)