

III-8 立体 FEM による鋼多主桁橋の設計理論に関する試験調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 13～平 15

担当チーム：橋梁構造チーム

研究担当者：村越 潤、高橋 実

【要旨】

鋼道路橋上部構造の設計は、従来より、初等はり理論に基づいた格子解析により行われている。一方、現在ではコンピュータの急速な発達に伴い、パソコンレベルでも立体 FEM 解析ができるほど設計ツールの高度化が進んでいる。鋼道路橋の設計においても FEM 解析を設計の標準的な手法として導入することで、より合理的な上部構造の開発に繋がるものと考えられる。本研究では、鋼多主桁橋を対象に立体 FEM 解析の適用性を検討するため試設計を実施し、格子解析による従来設計と比較した場合の解析精度や鋼重低減効果の分析を行った。また、それら検討の中で、立体 FEM 解析を設計に適用する場合のモデル化手法、解析結果の評価方法、基本的な考え方、留意事項等を整理し、ガイドライン（案）として取りまとめた。

キーワード：鋼多主桁橋、FEM 解析、格子解析、影響線解析、最適化設計

1. はじめに

鋼道路橋上部構造の設計は、従来より、初等はり理論に基づいた格子解析により行われている。この方法は、計算機が普及していなかった時代において、複雑な構造をいかにして簡単に解くかに力点がおかれた頃から合理的な解析手法として用いられてきている。一方、現在ではコンピュータの急速な発達に伴い、パソコンレベルでも立体 FEM 解析ができるほど設計ツールの高度化が進んでいる。鋼道路橋の設計においても FEM 解析を設計の標準的な手法として導入することで、より合理的な上部構造の開発に繋がる可能性が指摘されている^{1~2)}。

そこで、本研究では、鋼多主桁橋の主桁の最適化設計に立体 FEM 解析を適用した場合にどの程度の効果があるのか、その適用効果について調査するとともに、立体 FEM 解析を上部工設計に適用する場合のモデル化手法、解析結果の評価方法、基本的な考え方、留意事項等について検討し、ガイドライン（案）として取りまとめた。

なお、本研究では、実設計に関する知識に加え、疲労、座屈、FEM に関する学術的かつ理論的知識が不可欠であるため、上記分野を専門とする大学（東

京工業大学三木教授、早稲田大学依田教授、九州工業大学山口助教授）に委託研究を行った。図-1 に研究の概要を示す。

2. FEM 解析による鋼多主桁橋のモデル化の検討

2.1 検討内容

静的載荷試験データが得られている鋼連続多主桁

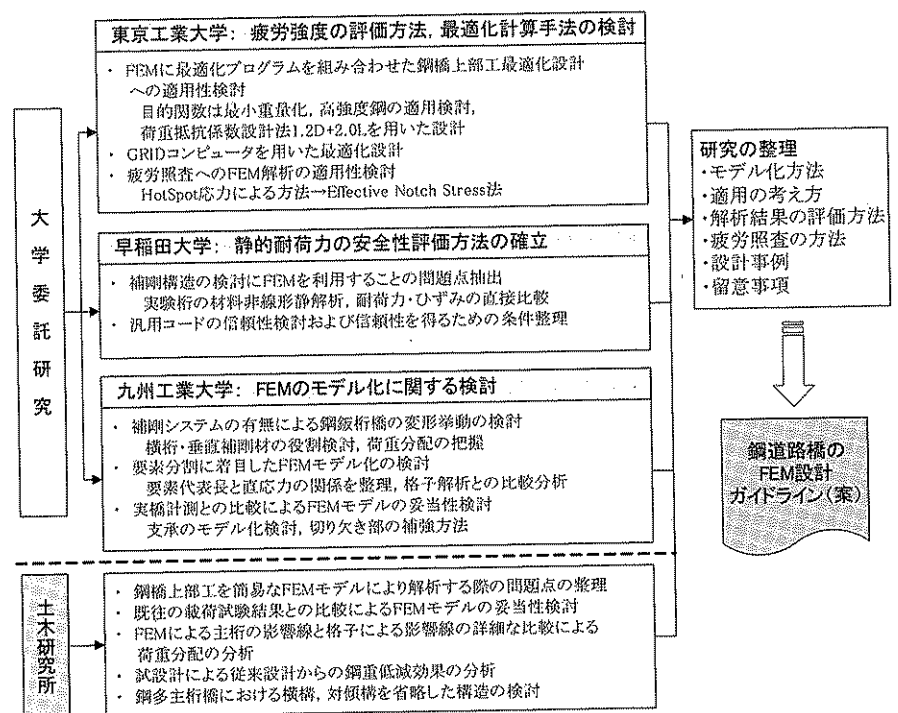


図-1 研究の概要

橋を解析対象として、合成・非合成の格子解析モデルと3種類のFEM解析モデルを作成し、各種荷重ケースの実測値と各モデルの解析値との比較を通して、格子解析とFEM解析の差異を評価するとともに、本研究で使用するFEM解析モデルの選定および妥当性の確認を行った。

2.2 解析対象の橋梁と実橋荷重試験³⁾

図-2に解析対象とした橋梁の上部工一般図を示す。橋長約160m、幅員10.4~10.9m、桁高2.2m、主桁本数4本、主桁間隔2.6mの4径間連続非合成鋼桁橋である。構造の合理化として、横桁間隔を最大10mとし、従来のトラス形式の分配対傾構から充腹形式の分配横桁に替え、下横構は支点部に隣接するパネル部のみに設置して中間パネル部は省略している。また、床版にはプレキャストPC床版(桁とは非合成)を用いている。本橋は竣工前に試験車両を用いた静的荷重試験が行われており³⁾、解析値との比較に際して、その試験結果を利用した。

図-3に荷重試験時の試験車両および荷重ケース、表-1に試験車両の軸重を示す。試験には総重量約20tfの3軸の大型ダンプトラック4台が使用されている。荷重ケースは支間中央部における荷重分配性状の把握を目的とした荷重ケース(幅員方向の中心荷重ケース1および偏心荷重ケース3)と、中間支点上の負曲げモーメント領域の挙動の把握を目的とした荷重ケース(幅員方向の中心荷重ケース2および偏心荷重ケース4)が実施されている。

2.3 解析モデル

以下に、各解析モデルの概要を示す。また、図-4に各解析モデルの要素分割の概要を、表-2に各解析モデルの要素の種類と要素分割数等を示す。

(1) 格子非合成モデル

床版は考慮せずに、主桁および横桁のみをはり要素としてモデル化した。格子非合成モデルは、対象橋梁の設計時に使用されたモデルである。

(2) 格子合成モデル

格子非合成モデルと同様、主桁および横桁のみをはり要素としてモデル化するが、床版の合成作用を考慮するため、床版および壁高欄の断面剛性を主桁

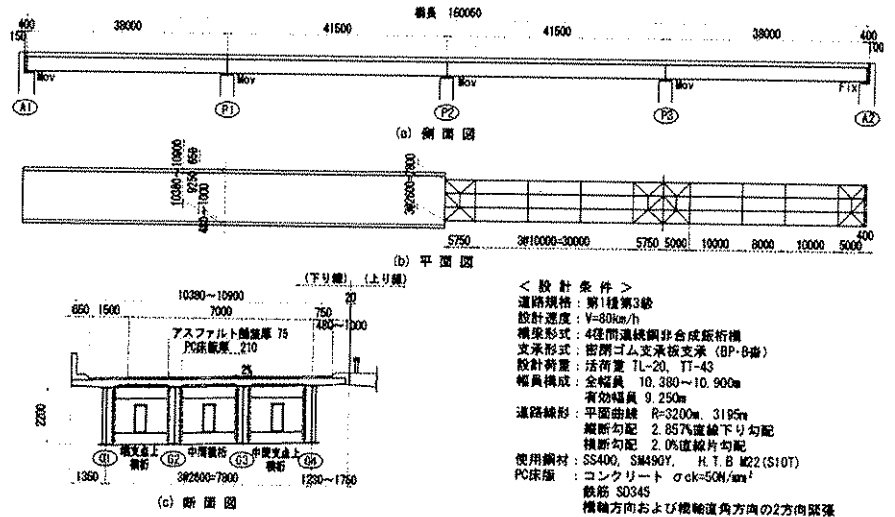


図-2 荷重試験が行われた橋梁の上部工一般図

試験車両の諸元

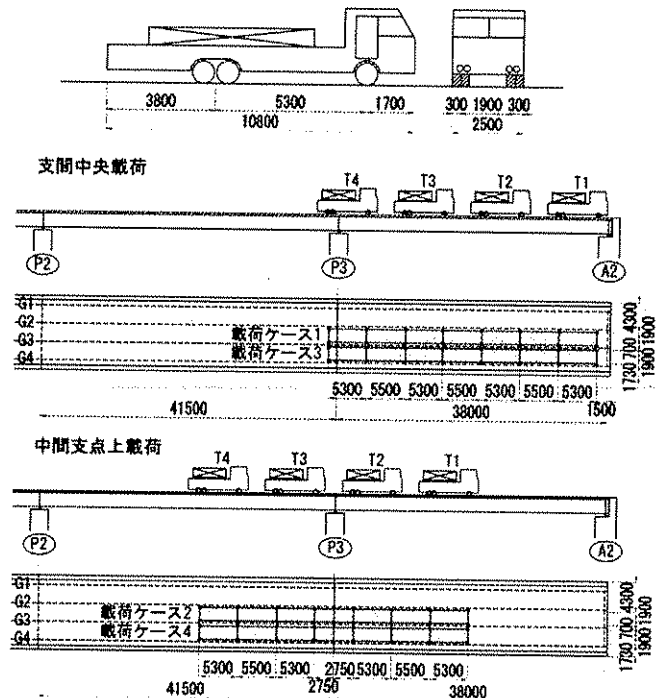


図-3 試験車両および荷重ケース

表-1 試験車両の軸重

試験車両名称	前輪軸重	後輪軸重	合計
T1	5.19	15.57	20.76
T2	5.53	15.10	20.63
T3	6.65	15.01	21.66
T4	6.00	15.00	21.00

※後輪は2軸であるが、1軸として計上

はり要素の断面剛性に算入させたモデルである。壁高欄の断面剛性は近傍であるG1桁のみに加算した。

(3) FEMモデルA

床版の合成作用を考慮するだけでなく、荷重分配作用も見込むため、床版を床版断面の図心軸位置

表-2 各解析モデルの要素種類と分割数

部材名称	簡易モデル		詳細モデル		
	格子-非合成	格子-合成	FEM-合成A	FEM-合成B	FEM-合成C
床版	床版	(-)	□	□	□
	ハンチ		□	□	□
	壁高欄	(-)	□	□	□
主桁	地覆				
	ウェブ	-	-	□	□
	フランジ			□	□
	垂直補剛材				□
横桁	ウェブ	-	-	□	□
	フランジ			□	□
横構	下横構			-	-
高力ボルト継手部					
架設用スライダール					
※ (結合材)					
総節点数	1520	1520	8177	9026	107596
総要素数	1579	1579	9479	9488	118492
(主桁のみ)	(1264)	(1264)	(1264)	(3528)	(40704)
最大要素サイズ	0.50m	0.50m	0.50×0.57m	1.14×2.75m	0.25×0.25m
最大アスペクト比			1:3	1:10	1:3

凡例) □: シェル要素 -: はり要素
 □: オフセットはり要素 -: トラス要素
 (-): 断面性能を主桁の梁要素に加算
 空欄はモデル化していない部材を示す

※ 結合材とは床版と主桁上フランジの合成作用を表すための部材のこと

デルである。また、床版と上フランジの合成挙動を表現するため、シェル要素間の結合材を剛なはり要素でモデル化した。シェル要素の最大サイズは1.14m×2.75m、最大アスペクト比は1:10であり、比較的粗く分割したモデルである。

(5) FEM モデル C

壁高欄をオフセットはり要素として、垂直補剛材をシェル要素としてモデル化している点を除いてモデル B と同様のモデルである。ただし、最大要素サイズを 0.25m×0.25m とし、最大アスペクト比を 1:3 としており、モデル B と比べて細かく分割したモデルである。

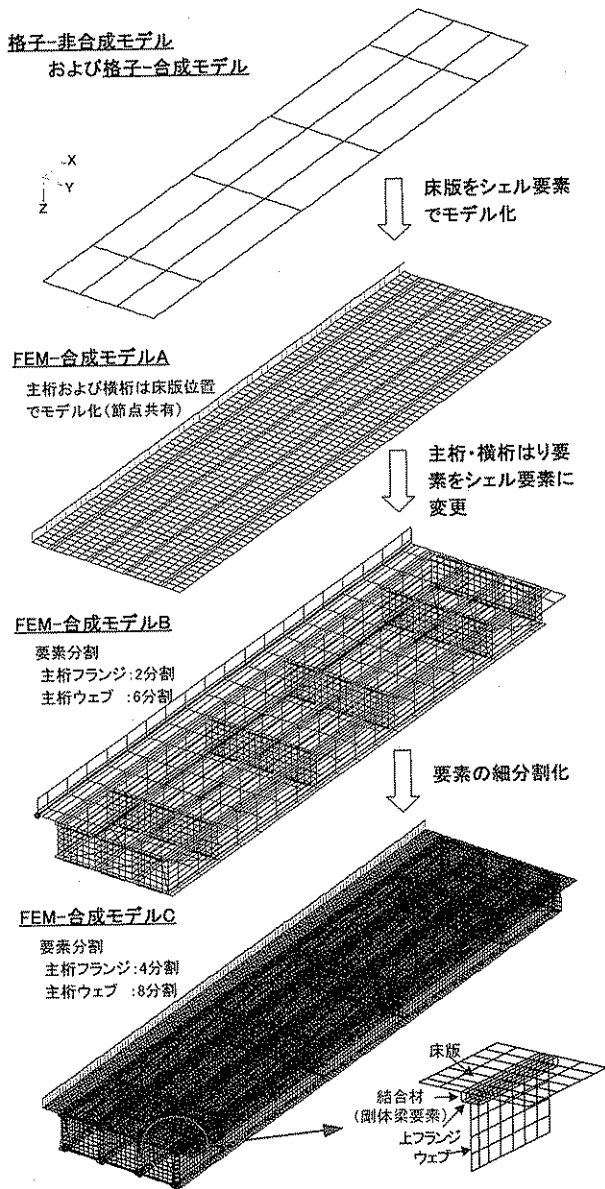
なお、解析に使用したソフトウェアは、汎用有限要素プログラム「NASTRAN ver. 2001.0.9」である。

2. 4 検討結果

図-4 に支間中央の鉛直変位、支間中央および中間支点上の主桁下フランジ応力について、解析値と実測値の比較結果を示す。以下に、図-4 に示すモデル化順序に従って、検討結果を述べる。

(1) 床版の合成作用の影響

床版の合成作用を無視した格子非合成モデルの結果を見ると、実測値に対して鉛直変位で4~5倍、下フランジ直応力度で2~3倍大きくなっている。一方、床版の合成作用を考慮したその他のモデルでは、全体的に実測値に近い解析結果を得ている。このことから、対象橋梁は非合成桁として設計されているに



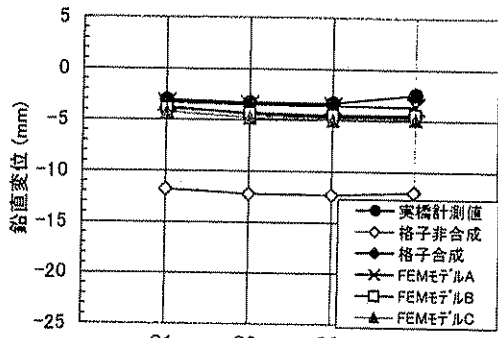
※ 1径間のみ図示しているが、解析は全径間モデル化して実行している。

図-4 各解析モデルの要素分割の概要 (1 径間分)

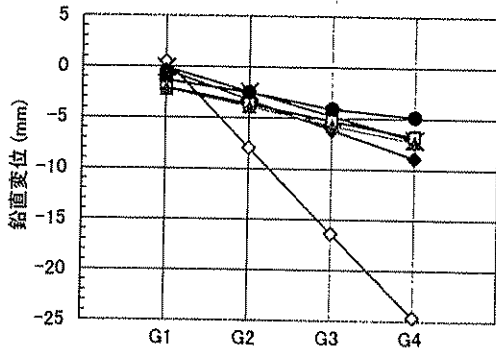
にシェル要素として配置し、主桁および横桁をはり要素としたモデルである。主桁および横桁は、床版位置で節点共有してモデル化するため、床版シェル要素位置を原点として断面定数を算出した。床版はコンクリート全断面を有効とし、床版内の鉄筋は無視した。また、ハンチは床版シェル要素の板厚をハンチ高分厚くすることで考慮した。なお、シェル要素の最大サイズは 0.50m×0.57m、最大アスペクト比は 1:3 であり、比較的細かく分割したモデルである。

(4) FEM モデル B

下横構をトラス要素、それ以外の部材 (床版、壁高欄、主桁、横桁) を全てシェル要素で配置したモ

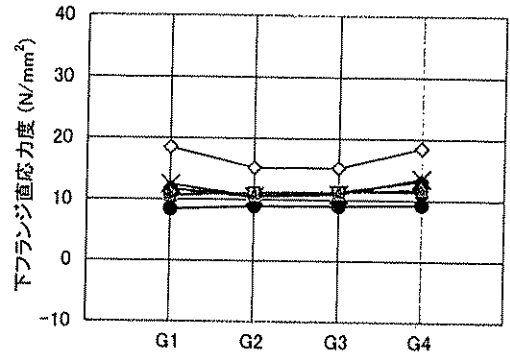


i) 支間中央載荷ケース1(鉛直変位)

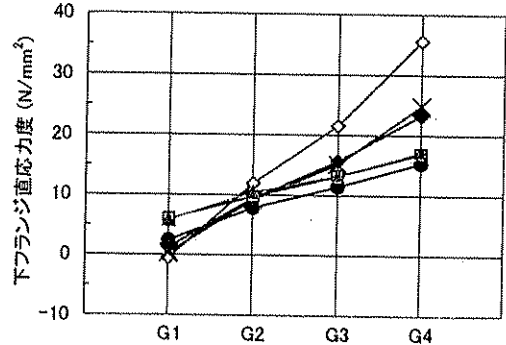


ii) 支間中央載荷ケース3(鉛直変位)

(a) P3-A2支間中央の鉛直変位

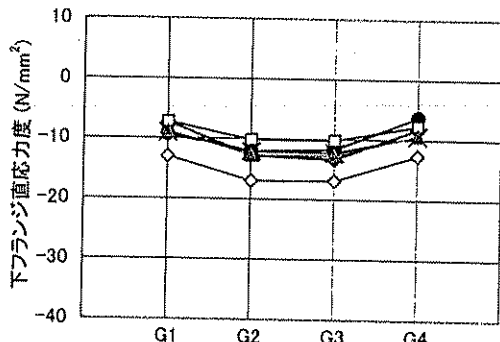


i) 支間中央載荷ケース1(直応力)

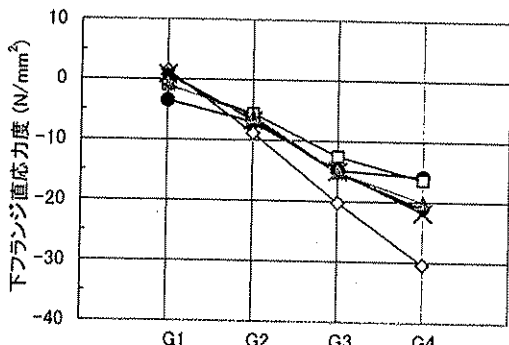


ii) 支間中央載荷ケース3(直応力)

(b) P3-A2支間中央の下フランジ直応力

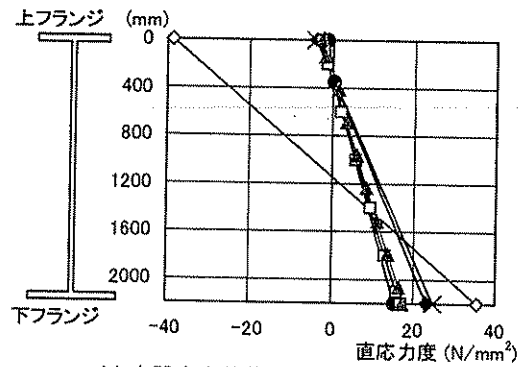


i) 中間支点上載荷ケース2(直応力)

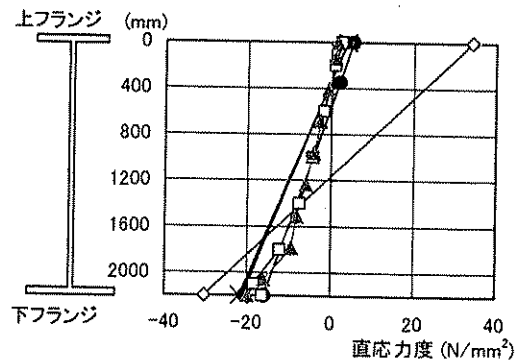


ii) 中間支点上載荷ケース4(直応力)

(c) P3支点上の下フランジ直応力



i) 支間中央載荷ケース3(応力分布)



ii) 中間支点上載荷ケース4(応力分布)

(d) G4桁高さ方向の直応力分布

図-5 解析値と実測値との比較

も関わらず、実際は合成挙動しているといえる。

(2) 床版のモデル化の影響

床版をモデル化せず剛性だけを考慮した格子合成モデルと、床版をシェル要素でモデル化したFEMモデルAとの結果を比較すると、両モデルの解析値は全ての荷重ケースで変位、応力およびその分布形状がほぼ一致している。また、これらの解析値を実測値と比較すると、中心荷重ケース1,2では、変位、応力ともに実測値に比較的近いが、偏心荷重ケース3,4では、荷重直下の桁の変位と応力が実測値より大きくなり、荷重から離れた桁は実測値より小さくなる傾向がある。とくに支間中央の偏心荷重ケース3における外桁G4の下フランジ応力度は、実測値に比べて約50%も大きくなっている。以上より、格子モデルではFEMモデルと比べて実橋の幅員方向における荷重分配を正しく表現できず、格子モデルに床版シェル要素を追加しても、その結果はほとんど変わらないことがわかった。

(3) 主桁の要素種類の影響

ここでは、主桁をはり要素としたFEMモデルAとシェル要素としたFEMモデルBの結果の比較を行う。モデルAは、(2)で述べたように偏心荷重したときの荷重分配が適切に再現できていない。一方、モデルBでは、偏心荷重ケース3での応力分布が実測値にほぼ一致し、外桁G4での解析値は実測値に比べ約10%大きい程度である。このことより、床版をモデル化するだけでなく、主桁をシェル要素でモデル化し、解析モデルに鉛直方向の情報を持たせることで、実橋の荷重分配をより正確に表現できることがわかった。

(4) 要素分割の影響

粗い要素分割であるFEMモデルBと細かい要素分割であるFEMモデルCとの結果を比較すると、支間中央荷重での鉛直変位と下フランジ直応力度はほぼ一致しているが、中間支点上荷重での下フランジ直応力度の差が大きく、モデルBの解析値は実測値よりも20%程度小さい結果となった。FEM解析は近似解法であり、要素分割が粗いと解析精度が低下することが一般的に知られている。また、アスペクト比が大きい4節点シェル要素を使うと、モデルの剛性が増加し変形、応力ともに小さくなる傾向がある⁴⁾。両モデルの

比較でも、応力の伝達が一様である支間中央部には差が見られないものの、支承反力により複雑な応力状態となる中間支点上では解析精度が低下したと類推される。

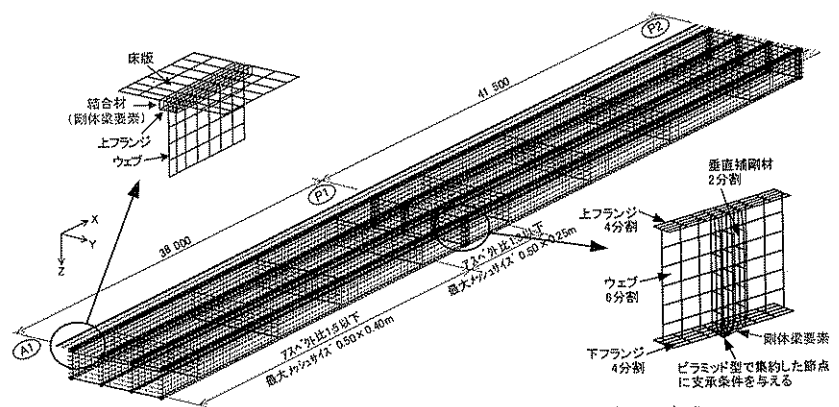
2.5 モデル化のまとめ

2.4の比較結果より、実測値に近い計算値を得るためには、床版をシェル要素でモデル化するだけでなく、主桁や横桁もシェル要素でモデル化したFEMモデルCのようなモデル化が必要と考えられる。しかしながら、要素分割の粗いモデルBでも支間中央では同程度の結果が得られている。これらを踏まえ、鋼多主桁橋の設計に用いるための立体FEM解析モデルのモデル化方針を表-3にまとめる。要素分割については、主としてモデルCに準じることとし、支間中央部ではモデルBを参考とした。このモデル化方針に従って作成した、3章以降の設計で使用するFEM解析モデルを図-6に示す。

表-3 FEM解析モデルのモデル化方針

部材名称	使用要素	要素分割	アスペクト比	重量
床版	床版	□	床版支間4分割	考慮
	ハンチ		支間中央付近は 1:5以下	〃
	壁高欄			〃
	地覆			〃
主桁	ウェブ	□	中間支点上付近は 1:3以下	〃
	フランジ	□		〃
	垂直補剛材	□	全幅1分割	〃
	水平補剛材			〃
横桁	ウェブ	□	1:5以下	〃
	フランジ	□		全幅2分割
橋構	下橋構	—		〃
高力ボルト継手部				無視
架設用スライド				〃
(結合材)	—			〃

※ 凡例および注釈は表-2と同じ



※3章では2節間をモデル化、4章では4節間をモデル化。

図-6 設計で使用するFEM解析モデル

3. 格子解析とFEM解析による影響線の比較

3.1 検討内容と対象橋梁

活荷重の荷重においては、FEM解析を設計に用いる場合でも従来設計同様、影響線により着目部位が最も不利となる荷重状態を求めることを考える。本章では、同一の対象橋梁に対して、FEM解析と格子解析による影響線を算出し、その相違を比較するとともに、影響線を用いて着目部位が最も不利になる荷重状態およびその状態で発生する主桁の活荷重応力を比較した。これらの詳細な比較は、FEM解析および格子解析から得られる設計断面の比較に繋がるものとして実施した。

対象橋梁は2章の橋梁に以下の変更を加えたものとした。主桁は、非合成桁として設計されているが、ここでは、鋼材・床版重量を鋼断面のみで抵抗し、橋面荷重（舗装、壁高欄など）・活荷重を合成断面で抵抗する、いわゆる活荷重合成桁に変更した。床版をプレキャストPC床版から設計基準強度 30N/mm^2 のRC床版に変更し、ひび割れを許容するプレストレスしない連続合成桁橋とした。これらの条件変更のもと、3章では計算を簡略化するため4径間のうち2径間のみを対象に、格子解析により再設計した桁断面と同一な断面でFEMモデルを作成し、条件を揃えた上で格子とFEMの影響線比較を行った。

また、連続合成桁の設計では中間支点上における床版の合成作用の取扱いが重要である。格子解析では中間支点から両側支間長の15%領域を「鉄筋+鋼断面」として曲げ剛性を算出し、残りの領域を合成断面とする方法⁹⁾が実務レベルでは一般的に用いられており、それを踏襲した。FEM解析では、RC床版のひび割れの状態を評価し（ひび割れ強度 σ_a 以上をひび割れとして判定）、「鉄筋+鋼断面」の範囲に反映させる方法を用いた。

対象橋梁のFEM解析モデルは図-6に示すとおりである。荷重に用いる活荷重は道路橋示方書のB活荷重（L荷重）を用いた。なお、FEM解析による影響線の作成にあたっては、今回の研究で開発したFEM影響線解析プログラム「FLIVE」を用いた。

3.2 影響線の比較結果

(1) 影響線のピークおよび等分布荷重 p_l 荷重位置の比較

図-7に格子解析とFEM解析により算出されるG4主桁に着目した場合の3次元の影響面を示す。図-7(a)には支間中央のG4桁下フランジ直応力 σ_x の

影響面を、図-7(b)には中間支点上のG4桁下フランジ直応力 σ_x の影響面を、図-7(c)には中間支点上のG4桁ウェブせん断応力 τ の影響面をそれぞれ示す。図中の縦軸は単位荷重（1kN）を荷重したときの着目位置の発生応力（影響線縦距）である。図-8には、図-7の影響面をG4桁の位置で縦断したときの分布と、最も不利な応力を発生させるときのL荷重の等分布荷重 p_l （以下、 p_l 荷重という。）の荷重位置を示す。また、図-9には、図-7に示すFEM解析からの影響面のピークの位置で両者の影響面を横断したときの分布と p_l 荷重荷重位置を示す。

これらの図を見ると、支間中央G4桁下フランジの直応力 σ_x 着目では、ピークの値が格子に比べFEMの方が21%小さい（図-7(a)）。これはFEMと格子で荷重分配効果が異なることを示している。最大応力を与える p_l 荷重の位置はほぼ一致している（図-8(a)、図-9(a)）。中間支点上G4桁下フランジの直応力 σ_x 着目では、第1支間と第2支間で完全対称分布となる格子に対し、FEMではわずかに非対

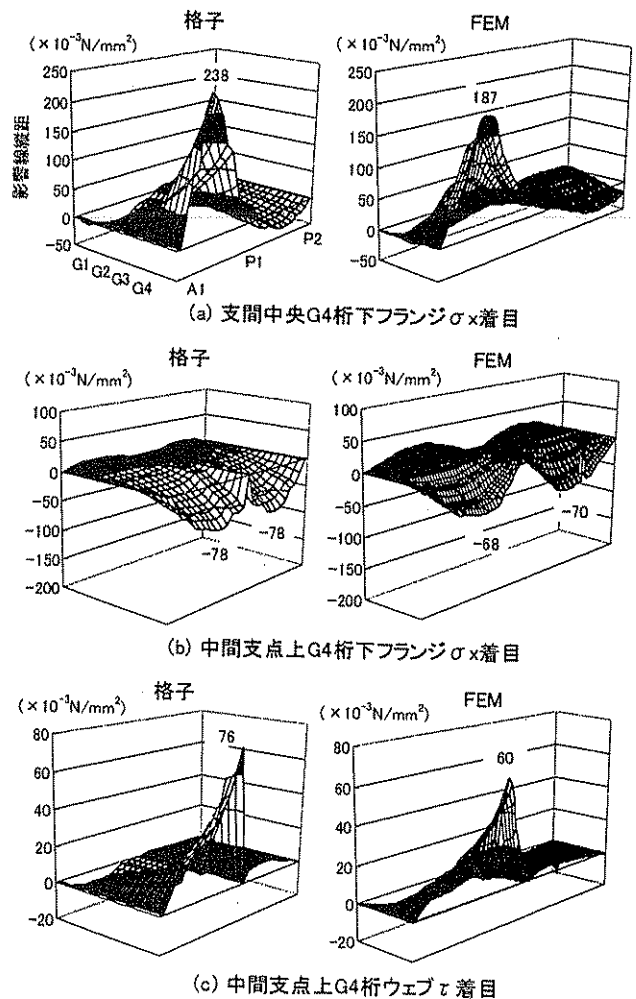


図-7 格子とFEMの3次元影響面グラフ

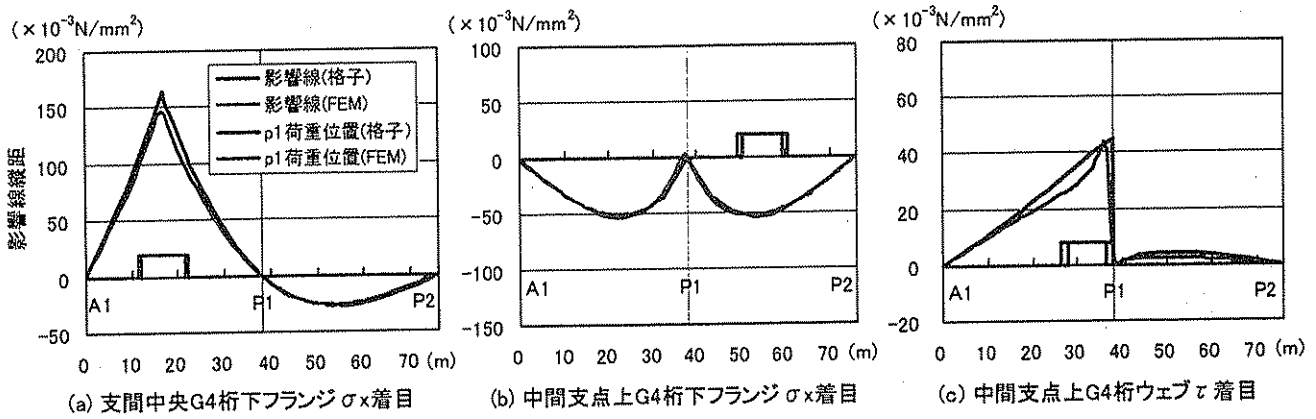


図-8 格子とFEM解析より算出される外桁G4上の影響線と p_1 荷重載荷位置の比較

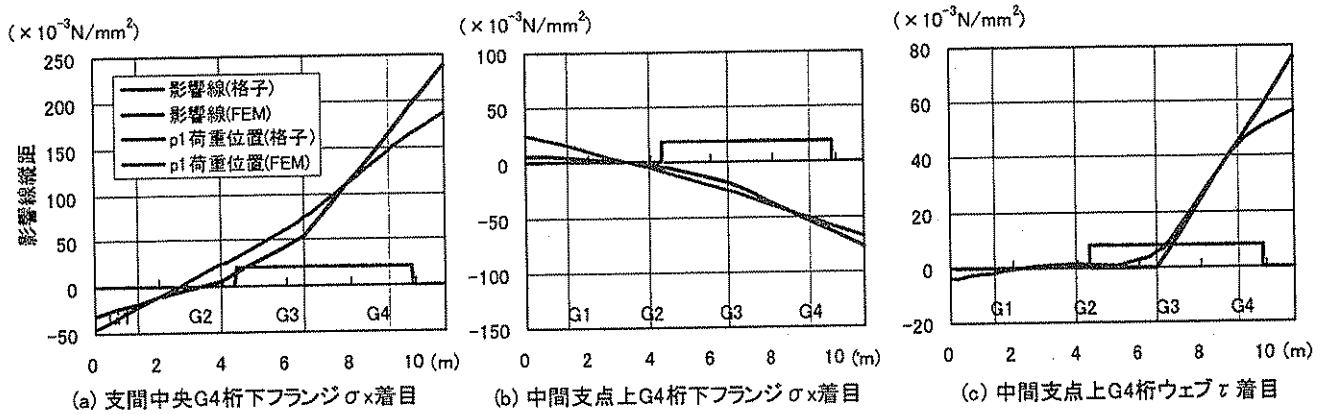


図-9 格子とFEMより算出される幅員方向の影響線と p_1 荷重載荷位置の比較

称の分布となり、ピークの値は格子より10%小さい(図-7(b))。また、最大応力を与える p_1 荷重の橋軸方向位置が約1mずれている(図-8(b)、図-9(b))。中間支点上G4桁ウェブのせん断応力 τ 着目では、ピークの値は格子に比べFEMの方が21%小さい(図-7(c))。また、 p_1 荷重の橋軸方向位置が約1.5mずれており、影響線形状にも顕著な違いが見られる(図-8(c)、図-9(c))。

以上のことから、解析ツールによって主桁における応力性状の再現性が異なり、影響線のピークはFEMの方が総じて小さくなることがわかった。

(2) 活荷重時発生応力の比較

表-4に直目部位における影響面体積の比較と、着目部位が最も不利になる荷重状態における活荷重時発生応力の比較を示す。同表を見ると、活荷重時発生応力の格子とFEMの比率は影響面体積の比率にほぼ一致していることがわかる。

支間中央G4桁下フランジの最大直応力 $\sigma_{x_{max}}$ では、FEMの方が8%大きくなり、影響線のピークにあった差から逆転している。中間支点上G4桁下フランジの最小直応力 $\sigma_{x_{min}}$ でも同様に、FEMの方が

表-4 影響面体積および活荷重応力の比較

着目点と着目量		解析モデル	格子	FEM	比率 (FEM/格子)
支間中央	G4下フランジ $\sigma_{x_{max}}$	影響面体積	9568	10423	1.09
		活荷重応力	93.3	100.4	1.08
中間支点上	G4下フランジ $\sigma_{x_{min}}$	影響面体積	-7883	-9163	1.16
		活荷重応力	-52.7	-61.4	1.17
	G4ウェブ τ_{max}	影響面体積	2728	2648	0.97
		活荷重応力	25.8	23.9	0.93

※単位は、影響面体積($\times 10^6 \text{N/mm}^2 \cdot \text{mm}^2$)、発生応力(N/mm²)
 影響面体積は、着目量がmaxのとき+側の体積を、minのとき-側の体積をそれぞれ示す

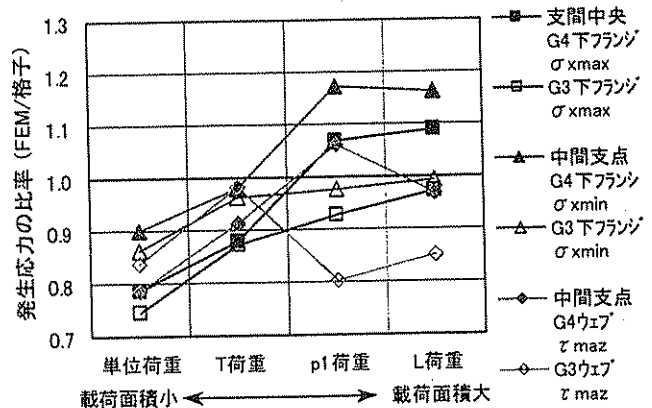


図-10 載荷面積の大きさによる発生応力の比較

17%大きくなり、影響線ピークの差から逆転している。また、中間支点上 G4 桁下フランジの最大せん断応力 τ_{max} では、ピークの差から逆転まではいかないが、FEM が 7% 小さくなる程度にとどまっている。

(3) 載荷面積の大きさによる発生応力の比較

(1)、(2)の比較検討で見られた逆転現象をより詳細に調べるために、格子と FEM から算出したそれぞれの影響線に対し、載荷する荷重の面積を徐々に大きくして発生する応力の比較を行った。図-10 に示す外桁 G4 の結果から、載荷面積が比較的狭い状態であれば FEM の発生応力は格子に比べ小さくなるが、載荷面積が大きくなると格子と同等か、それ以上になることがわかった。このことから、FEM 解析を主桁設計に用いても活荷重の載荷面積が大きいいため、設計断面の大幅な縮小化には繋がらない可能性が示唆される。

4. FEM 解析による断面最適化の検討

4.1 設計を行うための前提条件

FEM 解析により得られた応力を用いて、許容応力度法に基づき主桁の最適化設計を行い、格子解析による場合との比較を行った。設計対象は 2 章で載荷実験を行っている 4 径間連続鋼桁橋とするが、3.1 に示した橋梁諸元の変更と同様の変更を行い、4 径間分の主桁設計を実施した。設計に使用する FEM 解析モデルは先に示した図-6 のとおりである。

図-11 に FEM による設計で最適断面を決定するためのフローを示す。設計にあたっては、鋼道路橋設計ガイドライン（案）の適用により各主桁でフランジ幅およびウェブ厚を一定にすることとした。ただし、ウェブ厚については、水平補剛材が 1 段で収まらない場合は板厚差 1mm 以内で変化させた。照査に用いる応力は橋軸方向の直応力とし、合成応力度の照査では直応力とせん断応力とを組み合わせた。設計で考慮する荷重は、前死荷重、後死荷重、活荷重および地震荷重とし、温度変化、支点沈下、床版コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響は考慮していない。また、本設計では、コンピュータによる最適化設計を行っていないため、格子解析で決められた断面を初期値とし、断面の最適化の仕方については設計技術者の判断により行い、各荷重状態での FEM 解析を繰返し行うことで断面を決定した。設計変数は上下フランジ幅厚およびウェブ高厚の計 6 個とし、材質に関しては初期値である格子計算のものを踏襲した。

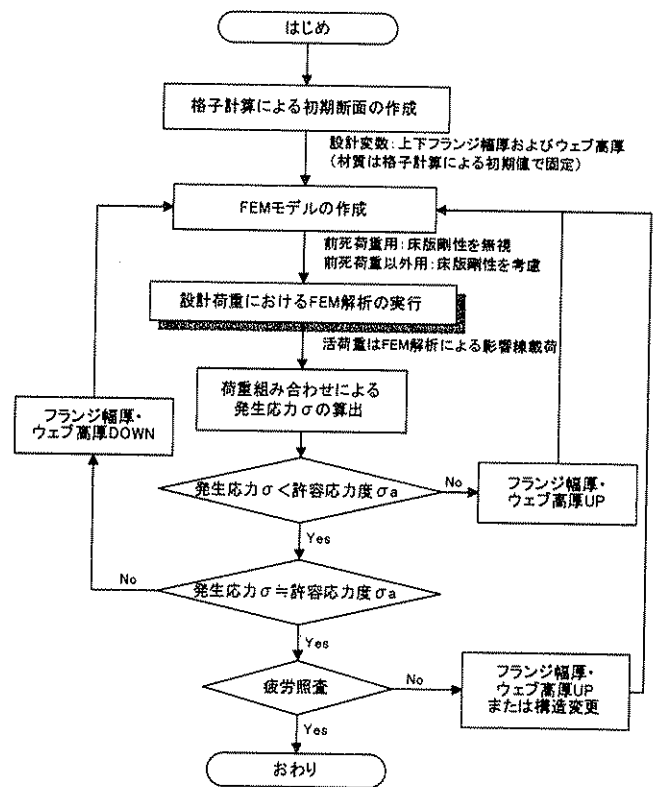


図-11 FEM 解析による設計の最適化フロー

4.2 設計結果の比較と鋼重低減率

表-5 に格子解析と FEM 解析で設計された代表断面における断面構成の比較を、表-6 に外桁 G4 の代表断面における応力照査の比較をそれぞれ示す。表-5 より、支間中央の外桁、中桁ともに格子設計と FEM 設計ではほぼ同じ断面となった。これは、前述のとおり、活荷重の載荷面積が大きいいため、断面の縮小化には至らなかったものと考えられる。一方、中間支点上の外桁上下フランジは、設計に FEM 解析を用いたことにより、板厚を 4~8mm 薄くすることができた。これは表-6 に示すように、活荷重時では FEM の方が発生応力は大きくなるが、前死荷重時および後死荷重時の発生応力は FEM 解析の適用により低減されたためである。

図-12 に各設計での鋼重とその比率を示す。同図には非合成桁として設計した結果と、PC 床版を有する合成桁（床版のコンクリート剛性を全橋にわたって有効）として設計した結果も併せて示す。主桁鋼重には補剛材の鋼重は含まず、その他部材の鋼重は垂直補剛材、水平補剛材、横桁および下横構の鋼重の合計である。図-12 より、FEM 解析を用いて設計した場合、格子解析と比較して、RC 床版を有する合成桁では約 1%、PC 床版を有する合成桁では約 1% の鋼重低減となった。

表-5 設計した代表断面の断面構成比較

外桁G4		A1-P1支間中央	P1支点上	P1-P2支間中央
上フランジ	格子	400 x 18	400 x 31	400 x 13
	FEM	400 x 19	400 x 23	400 x 13
ウェブ	格子	1800 x 10	1800 x 12	1800 x 10
	FEM	1800 x 10	1800 x 12	1800 x 10
下フランジ	格子	550 x 30	550 x 37	550 x 20
	FEM	550 x 30	550 x 31	550 x 16

中桁G3		A1-P1支間中央	P1支点上	P1-P2支間中央
上フランジ	格子	400 x 13	400 x 14	400 x 13
	FEM	400 x 13	400 x 15	400 x 13
ウェブ	格子	1800 x 10	1800 x 10	1800 x 10
	FEM	1800 x 10	1800 x 10	1800 x 10
下フランジ	格子	400 x 22	400 x 35	400 x 17
	FEM	400 x 21	400 x 36	400 x 18

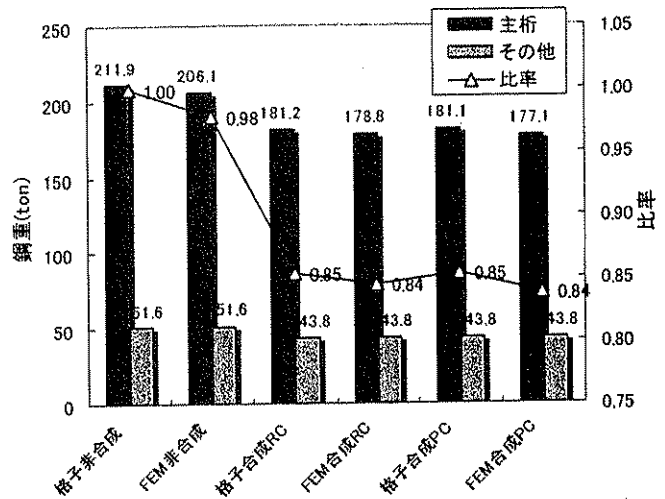
表-6 外桁 G4 における応力照査の比較

照査断面位置	A1~P1支間中央		P1橋脚支点上		
	格子	FEM	格子	FEM	
鋼材断面	上フランジ mm	400 x 18	400 x 19	400 x 31	400 x 23
	ウェブ mm	1800 x 10	1800 x 10	1800 x 12	1800 x 12
	下フランジ mm	550 x 30	550 x 30	550 x 37	550 x 31
	材質	SM490Y	SM490Y	SM570	SM570
σ _{ou}	前死荷重 N/mm ²	-135	-133	157	170
	後死荷重 //	-3	-3	29	18
	活荷重 //	-14	-11	56	50
	死+活 //	-152 < 210	-147 < 210	242 < 255	238 < 255
σ _{al}	前死荷重 //	87	87	-118	-117
	後死荷重 //	24	17	-32	-22
	活荷重 //	93	95	-62	-72
	死+活 //	204 < 210	199 < 210	-212 < 219	-211 < 219
τ		12 < 120	12 < 120	64 < 145	67 < 145
架設時		-135 < 135	-133 < 135	-118 < 274	-117 < 274
合成応力度		0.95 ≤ 1.2	0.91 ≤ 1.2	1.13 ≤ 1.2	1.14 ≤ 1.2

5. 鋼多主桁橋の構造簡略化の検討

合理的な鋼多主桁橋の上部工形式として、下横構・対傾構を省略するとともに横桁間隔を大きくした構造形式を考える。ここでは、このように構造簡略化がなされた支間長 40m+50m+40m で RC 床版を有する 3 径間連続合成鋼桁橋を想定し、立体 FEM 解析を用いた試設計を行う。図-13 に構造諸元の概要を示す。4 章で設計した橋梁の諸元 (図-2 参照) と大きく違う点は、径間数、支間割、床版張出し長、下横構の有無、横桁の形状である。FEM 解析による設計手法は 4 章と同様の方法を用いた。また、比較のため、格子解析による同橋梁の設計と、橋梁諸元は同じで下横構・対傾構が取り付けられた従来橋梁の格子解析による設計を行った。

図-14 に構造簡略化による鋼重比較を示す。簡略化橋梁を FEM 解析で設計した場合、FEM 解析で設計した場合と比較して約 3% の鋼重低減となり、4 章



※合成RCはRC床版を有する合成桁、合成PCIはPC床版を有する合成桁としての設計鋼重を示す。

図-12 各設計での鋼重とその比率

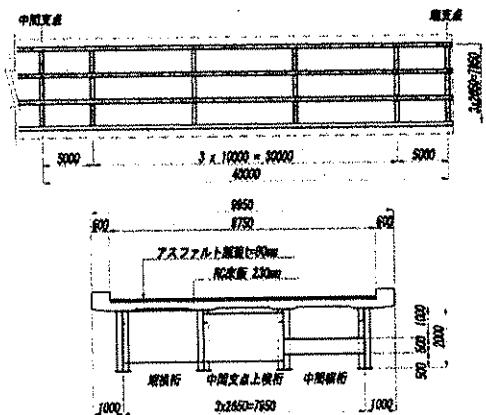


図-13 簡略化橋梁の構造諸元の概要

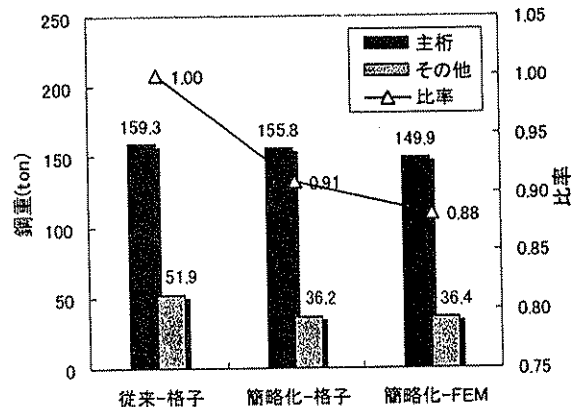


図-14 構造簡略化による鋼重比較

の設計結果 (図-12 参照) よりも FEM を設計に用いた場合の効果が増している。その原因について言及するには試設計の数が少ないが、床版の張出し長が今回の橋梁では 4 章より短くしたことにより、格子と FEM での幅員方向の影響線の形状にさらに違いが生じたためではないかと考えている。

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 静的載荷試験データが得られている鋼連続多主桁橋を対象として、格子解析とFEM解析を行い、実測値と計算値との比較を行った。その結果、FEM解析の方が、主桁応力・変位実測値に近い結果が得られることが確認された。
- (2) FEM解析および格子解析から算出した影響線および発生応力の比較を行った。その結果、外桁での下フランジ直応力およびウェブせん断応力に着目した影響線のピークは、FEM解析の方が20%程度小さくなるものの、活荷重の載荷面積の大きさが原因で発生応力は格子解析と同等か、それ以上になることがわかった。
- (3) FEM解析による主桁の最適化設計を行い、格子解析による場合との比較を行った結果、対象とした有効幅員9.25m、支間長約40mの鋼多主桁連続橋では、格子解析による従来設計とほぼ鋼重が変わらないことがわかった。
- (4) 合理的な鋼多主桁橋上部工形式として、下横構・対傾構を省略するとともに横桁間隔を広げた構造形式の橋梁を想定し、FEM解析により試設計を実施した。その結果、格子解析による場合と比べて約3%の鋼重低減となり、橋梁諸元の違いで鋼重低減効果に変化することがわかった。
- (5) 上記検討および大学への委託研究を踏まえ、立体FEM解析を設計に適用する場合のモデル化手法、解析結果の評価法等適用に当たっての考え方、留意事項等を整理し、ガイドライン(案)として取りまとめた。主な内容は次のとおりである。

- ・FEMの適用の考え方
- ・FEM解析の基本事項
- ・モデル化の方法
- ・照査方法
- ・設計事例

7. 今後の課題

本研究で行った試設計の結果は一例であり、鋼重低減効果に関して定量的に評価するためには、橋梁諸元(橋長、支間割り、幅員、主桁本数、主桁間隔、平面曲線等)をパラメータとした試設計を行う必要がある。

また、本研究では道路橋示方書に従い、許容応力度法により設計照査を行ったが、その安全率に格子解析とFEM解析の解析精度の相違は考慮していない。実測値との比較より、FEM解析の方が精度良く実挙動を表現していることから、これら解析ツールの信頼性の違いを見込めるような照査法(例えば、疲労設計のような構造解析係数の導入)が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 西川和廣・中谷昌一・小野潔・中洲啓太：超高性能ゲーム機時代の橋梁設計，(財)土木研究センター，土木技術資料，第43巻，第1号，pp.50-55，2001.1.
- 2) 小西拓洋，富澤雅幸，三木千寿：FEMと数値最適化に基づいた鋼橋コスト最小化設計の試み，土木学会論文集，No.717/I-61，pp.23-36，2002.10.
- 3) 池田博之，緒方辰男，白水晃生：鉸桁構造の合理化，土木学会，第49回年次学術講演会概要集，1994.9.
- 4) 特集 応用力学の深淵，(社)土木学会，土木學會誌，Vol.85，pp.5-63，2000.8.
- 5) (社)日本橋梁建設協会：PC床版を有するプレストレスしない連続合成桁設計要領(案)，1996.3.
- 6) 本州四国道路橋公団：鋼上部構造の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン(案)，1993.9.