

FEM と最適化ソフトの組合せによる鋼橋最小重量化設計の試み

Minimum Weight Design of Steel Girder Bridge by Combination of

FEM and Optimum Design Program

菅沼久忠¹・小西拓洋²・三木千寿³

Hisatada Suganuma, Takuyo Konishi, Chitoshi Miki

¹学生会員 東京工業大学 大学院修士課程学生 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)²正会員 工修 東京工業大学大学院博士課程学生 (同上)³フェロー 工博 教授 東京工業大学工学部土木工学科 (同上)

FEM analysis is commonly used in wide range of industrial design works such as machine design, aeroplane design. There are some experimental studies about the application of FEM combined with optimization methods in order to accommodate complicated mutuary related phenomenon or to accomplish optimization automatically. In this study, optimization methods, FEM and design code inspection program are linked together to automatically seek and generate optimum structural dimension for objective steel bridges. It is discussed that Possibility of conversion of design method from traditional beam theory design to FEM based design where three dimensional structural behavior are easily considered.

Key Words: optimum design, FEM, automatic meshing, minimum weight

1. はじめに

FEMによる応力解析はきわめて日常的に使用されるようになってきた。しかし、鋼橋の設計においては、いまだ骨組み解析を基本とした断面力設計が行われ、FEMの応用は構造ディテールの応力照査に限られている。これは示方書の規定が骨組解析をベースとして記述されていることや、構造の最適化については判定基準が複雑で自動化の難しい部分であり、最終的には技術者の総合的な判断が不可欠とされることなどが理由と考えられる。しかし、経済的な橋梁構造の必要性が高まる中で、床版も含めた全構造の3次元的な荷重への応答挙動までを考慮した設計理論の整備は不十分であり、この領域に3次元FEMと最適ソフトを組合せ、応用を試みた。

本手法で利用する最適化ソフトISIGHTTMは飛行機等の構造最適化を目的として開発されたもので、他分野への応用が検討されてきている。基本的には、従来のパッチ処理を進化させたもので、汎用FEMコード、鋼橋設計計算といった複数のプログラムを最適

化コードを核としてリンクさせて実行するものである。各コードの出力は別のコードの入力として橋渡しされ計算が繰り返される。これらの一連の計算結果をデータベースとして蓄積し、最適化アルゴリズムにより目的とする解を探索するものである。必要に応じて各種汎用コードを組合せることが可能であり、設計条件の追加、変更に対しても柔軟に対応でき、結果を統合して設計に反映することが可能となる。

最適解の探求は、基本的には、各種パラメータを変化させ目的関数を最小化する組合せを探すことにより実施する。従って、これまで専用コードを必要とした非線形計算への応用も考えられる。

有限要素法を橋梁設計に使用するメリット、デメリットはさまざまな場所で議論されている。メリットとしては床版の有効幅、部材の断面諸量の計算、横桁を介した桁の荷重分担、床版の荷重分配等の荷重位置の影響を受ける複雑なパラメータの影響を自動的にモデルに取り込むことが可能となり、現象をより直接的に再現したモデル化が可能になると考えられる。これに対して骨組みモデルによる格子解析を

主とした方法は上記のモデル化の手間は必要となるが、現行の設計法を適用する限り断面力等のインプットが直接得られ、既存の設計プログラムを用いて簡易に設計を行うことができる。また、荷重条件の決定に必要な活荷重の影響載荷を行う場合にも多くの既製ソフトを利用することが出来る。

しかし、2主桁合理化橋梁などに代表される合理化構造は、構造自体が単純化され1部材1断面が標準化されており、部材設計のための荷重条件は限定することができることが多い。又、FEMモデル化の手間についても単純化された2主桁橋では大部分の自動化が可能である。このような状況と解析処理能力の向上を考えるとFEMを用いた設計が橋梁分野においても2主桁橋を中心に近い将来に広まることが予想される。本研究ではこのような新しいFEM設計の可能性を明らかにすることを目的とし、細かい設計条件等は単純化して行った。

2. 二径間連続1桁橋シミュレーション

近年適用が増える少数主桁合理化橋梁を例にあげ、有限要素法を最適化手法の中に組み込んだ最適化シミュレーションを実施した。シミュレーション対象橋梁は、国内で最初の合理化橋梁として施工された支間長53mの2径間連続非合成2主桁橋をとりあげた。この支間のプレストレス床版を有する2主桁合理化橋梁は現在ではごく一般的採用されるようになってきている。このような標準的な橋梁に対して技術者の経験、知識、嗜好に大きく左右されない汎用的なシミュレーション手法によっても、最適な断面決定が可能であることを示すことを、一つの目的とした。

2.1 シミュレーションの流れ

シミュレーションの流れは図-1に示すように、まず最適化手法、変化させるパラメータとその範囲を定めたあと、初期断面を仮定し、これを修正しながらFEM解析、設計照査（これをまとめて設計計算と呼ぶ）を行い、これらの結果をデータベースに蓄積しながら、鋼重などの目的関数を最小化するパラメータを推定し、収束条件を満足するまで計算を繰り返すものである。

断面は入力パラメータにより決定され、この断面についてプロポーシオン、幅厚比をチェックする。設計計算は、FEMモデル作成コードPATRAN²⁾と解析用FEMコードABAQUS³⁾をリンクさせ、設計照査はFORTRAN等のコードを準備する。設計計算の入出力はISIGHTの中で受け渡され、各入力データは自動的に更新される。最適化を行うためのパラメータ、目

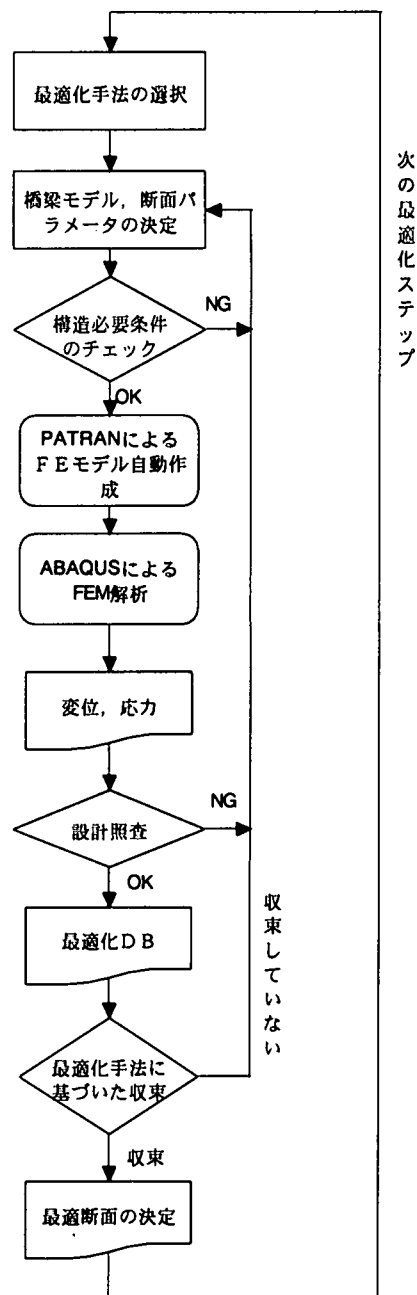


図-1 シミュレーションの流れ

的関数の変化はデータベースに記憶され、最適化ルーチンに基づきデータベースが解析される。収束した場合は次の最適化ステップに移行する。

FEモデルには床版のない架設時照査用モデルと完成系モデルがあり、両者について所定の荷重条件で解析を行う。解析出力から応力、たわみを読み込み、設計照査を行う。

2.2 解析対象のモデル化

図-2にシミュレーション対象橋梁を、図-3にFEMモデルを示す。解析モデル橋は先に説明した2径間連続非合成2主桁橋をベースに決定したものである。しかし、モデルを簡略化したために、ブロック割りは

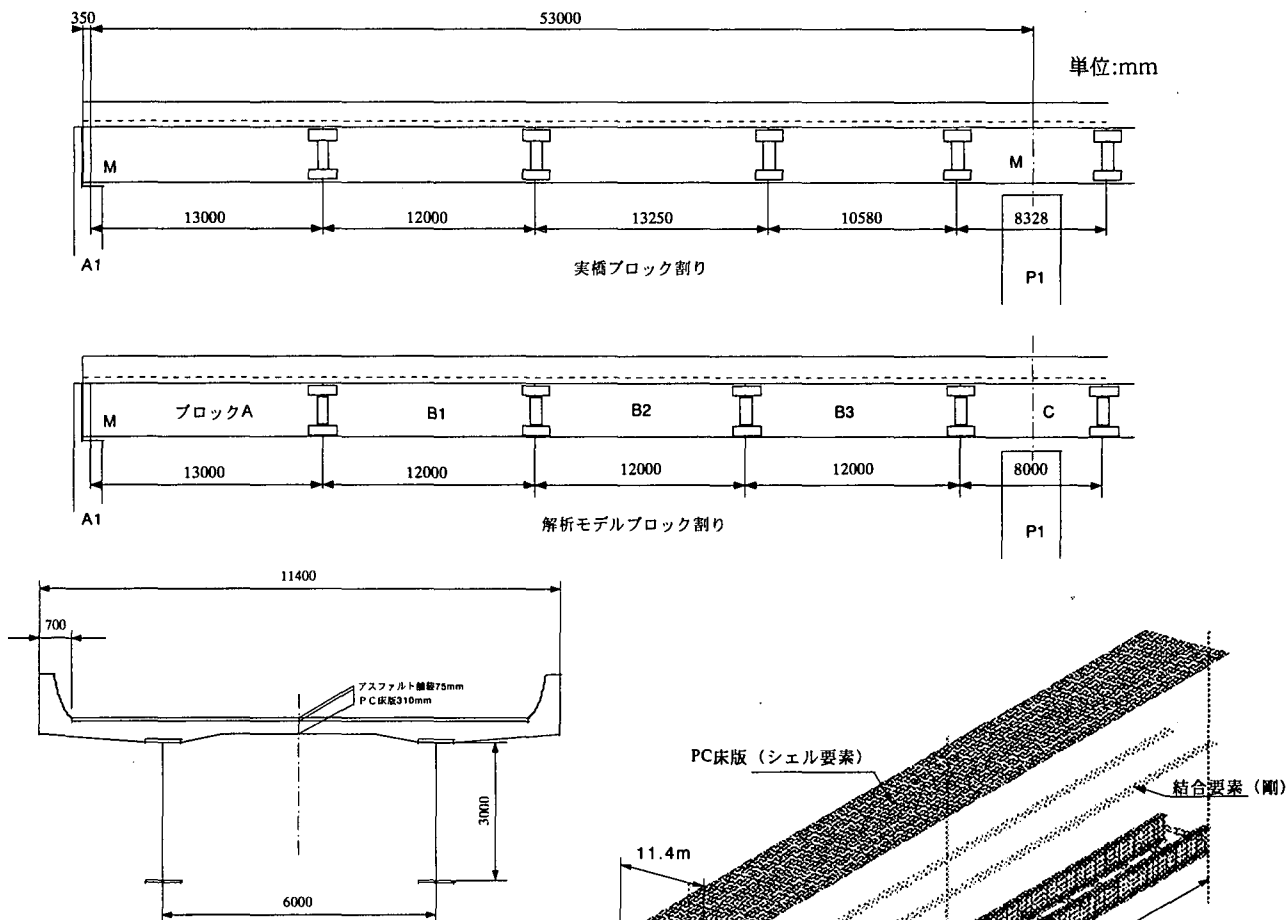


図-2 シミュレーション対象橋梁

表-1 パラメータの可変領域

単位: mm			
ウェブ	高さ	Min	Max
	板厚	8	10
上フランジ	幅	200	1200
	板厚	8	100
下フランジ	幅	200	1200
	板厚	8	100

実橋とは多少異っており、1径間を橋軸方向に5ブロックに分割した。この分割数は経済性、輸送など条件から決る連続桁の標準的なブロック分割数で対象橋梁のブロック分割数とも同一である。ウェブ高さは全径間一定としたことから、1ブロック内1断面と仮定すれば、断面解析パラメータとしては上下フランジの板厚、幅、ウェブ板厚が5×5断面+ウェブ高さ1で計26パラメータとなる。

FEMモデルの要素数は9,524で、床版、主桁、横桁をシェル要素でモデル化している。

主桁の断面変化位置は、一部で実橋と1.25mずれており、又、横桁間隔は実橋の5.7mに対し6mとした。要素分割は一般部では横桁要素の取付けを考慮してウェブ高さ方向に5分割、中間支点では20分割している。中間支点部は他の領域に比べ応力変化が急で

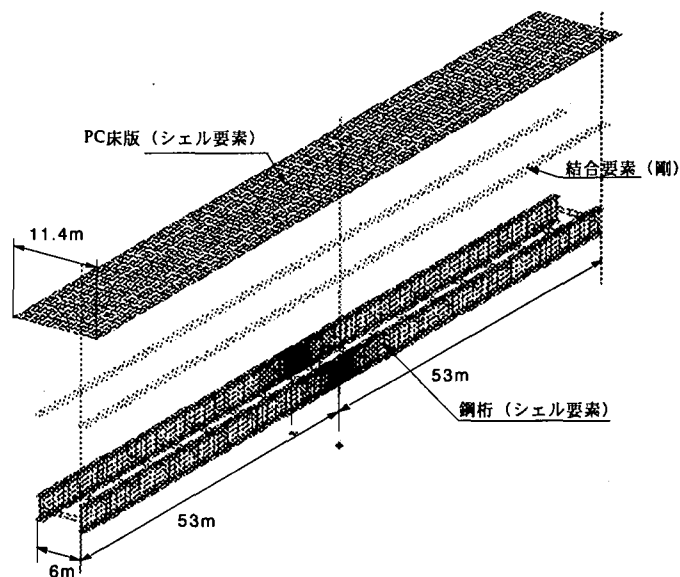


図-3 FEMモデル

あることを考慮して分割を細かくした。横桁取付位置は主桁下フランジより1200mmを下端とし、桁高の最適過程においても固定している。支点上横桁は中間横桁と同一断面とした。最適化の過程において板幅が変化した場合でも、内部の要素分割数は一定であり、従って要素の縦横比は変化する。従って部材寸法が極端に変化する場合にはシミュレーションの基準モデルを作り直すことが望ましい。

床版のコンクリートは設計基準強度35MPa、鉄筋を考慮して弾性係数を32500MPaとした。ポアソン比1/6、単位体積重量2500 kg/m³、コンクリート床版厚31cmとし、アスファルト舗装、ハンチ部コンクリート、高欄はモデルから省略した。床版シェル要素は床版厚中心に配置し、床版要素と主桁上フランジ要素間は剛性、断面積が非常に大きい梁要素で連結している。

表-2 構造必要条件

照査項目	照査内容
板厚	$t \geq 8\text{mm}$
自由突出幅b	$t \geq b/16$
ウェブ板幅厚比	$b/123$ ($b/209$) bは上下フランジの純間隔、SM520の場合
プロポーションチェック	$0.1 < l_{yc}/l_y < 0.9$ l_y は主桁の鉛直軸周りの断面2次モーメント、 l_{yc} は圧縮領域の断面2次モーメント

但し、腹板厚は補剛材なしと補剛材1段 () の場合

表-3 限界応力度照査式

限界曲げ引張り応力度	1.71×2100	
限界軸方向圧縮応力度	$\sigma_{ca} = \sigma_{cag} \sigma_{cal} / \sigma_{cao}$	
局部座屈を考慮しない限界軸方向応力度 (σ_{cag})	$1.71 \times (2100 - 15(l/r - 14))$	$14 < l/r < 76$
	$1.71 \times (1.2 \times 10^7 / (4500 + (l/r)^2))$	$76 < l/r$
但し: 部材の有効座屈長 r : 断面2次半径		
自由突出板の局部座屈に対する限界応力度 (σ_{cal})	1.71×2100	$b/10.7 < t$
	$1.71 \times 240000 \times (t/b)^2$	$b/16 < t < b/10.7$
但し b: 自由突出幅		
圧縮限界応曲力	$A_w/A_c < 2$	1.71×2100
	$A_w/A_c > 2$	$1.71 \times (2100 - 44 \times (l/b - 3.5))$
力	$A_w/A_c < 2$	1.71×2100
	$A_w/A_c > 2$	$1.71 \times (2100 - 22 \times (K \times l/b - 7))$
但し A_w : 腹板総断面積 A_c : 圧縮フランジ総断面積 l: 圧縮フランジの固定間距離 b: 圧縮フランジ幅 $K = \sqrt{(3 + A_w/2/A_c)}$		

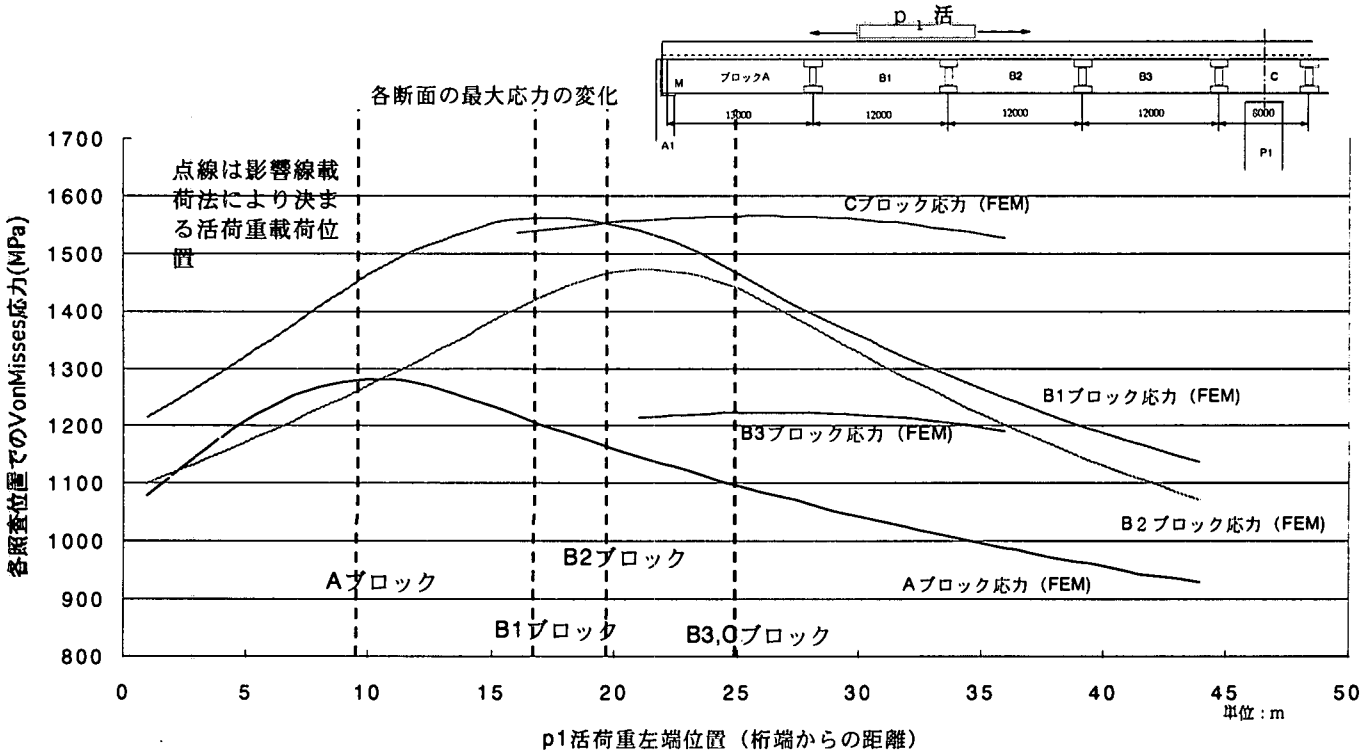


図-4 影響線解析とFEM結果

支承はソールプレートを含め、剛部材として動くようシェル要素と梁要素でモデル化した。水平補剛材、垂直補剛材もシェル要素でモデル化している。

FEM解析において、以下の簡略化を行ったが、それでも、いわゆる合理化橋の基本的なコンセプトは保たれているはずである。

- 鋼材はSM490Y材に統一した。材質を変えるシミュレーション方法は実施出来ておらず実際の橋梁で使用比率の最も多い材料に統一した。
- 水平補剛材1段と無しの2ケースについて解析を行う。水平補剛材を減らせば製作工数が減らせるがウェブが厚くなり重量が増す。実橋では0~2段に変化させているが、現在では1段までが主流となっている。実際には製作コストと

重量増によるコスト増を比較して決定する。

- 床版と鋼桁は合成していると仮定、床版厚は本橋と同程度の1等橋の標準値に近い31cmに統一した。この値は主桁断面によってほとんど影響されない。
- 荷重としては死荷重と活荷重のみを考慮する。風、地震等により断面が決まるのは、主として横桁、横構等、今回の最適化シミュレーション対象とした主桁は以外の部材である。
- 中間支点部等、床版に引張りが生じる領域についてもコンクリートは全断面有効とした。このため今後規格化される合成桁設計に比べ、中間支点部の鋼桁断面が小さく決定される可能性がある。又、コンクリート床版の設計は行わず、コンクリートの温度、クリープ、乾燥収縮

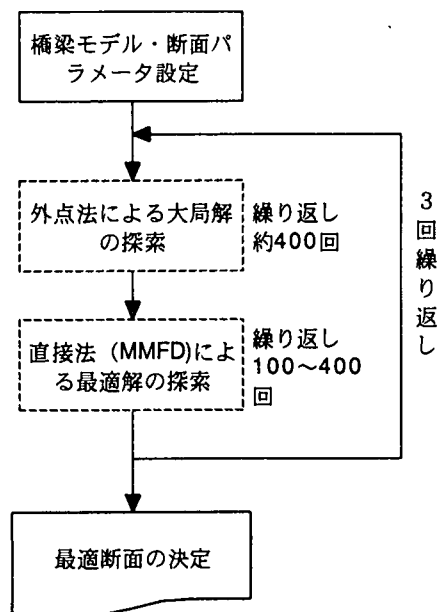


図-5 2主桁橋最適化のフロー

等による鋼桁への影響は無視している。この点については今後改良の余地がある。

シミュレーションでは最適化の過程で主桁の断面形状を表-1に示す範囲で変化させる。このパラメータの値に応じてFEMモデルの自動生成を行うために、PATRANのセッションファイルを利用した。セッションファイルはいわゆる作業記録で再度実行が可能なスクリプトにより記述される。26のパラメータ値に応じてスクリプトの必要部分を自動的に書き換えることによりFEMモデルを修正する。

2.3 荷重条件

荷重については死荷重に加えて、着目部材応力を最大とする活荷重パターンを有限要素モデルに載荷する必要がある。活荷重は道示のB活荷重を用い、L荷重を片側に偏載した。 p_2 は全径間又は半径間に載荷し、 p_1 荷重は橋軸方向で着目部材にもっとも不利となる位置に載荷する。通常の設計では影響線解析によりこの位置を決定されるが、FEM解析で p_1 荷重載荷位置を変えながら着目位置の応力を調べるにより照査応力を決定することができる。着目位置はブロック内で最も応力の高い要素位置であり、通常はブロック継ぎ手位置となる。しかし、ここではブロック内応力最大値を探しだしている。この結果、B3ブロックとCブロックについてはフランジとウェブで最大応力を与える活荷重載荷位置が異なった。図-4は水平軸に活荷重ブロック（強軸方向長さ10m）の左端位置を示し、鉛直軸に応力をとり、曲線は荷重が移動したときの着目ブロック下フランジの最大発生応力(von Misesの相当応力)を示している。曲線のピークが最大応力を

発生させる荷重位置である。鉛直の点線は一般的な骨組みの影響線解析により決定した p_1 荷重載荷位置位置であり、両者はほぼ一致する。但し、影響線載荷では直応力、剪断応力それぞれの最大値を求めるのに対し、FEMでは両者を組み合わせたvon Misesの相当応力により評価するため、多少、載荷位置が変わる場合がある。特にウェブパネルの照査位置については、剪断の大きい桁端部、支点部で相違が見られる。

連続桁の場合、着目点の応力を最大とする荷重載荷位置は桁の剛性分布が変われば変化する可能性があるが、シミュレーションでは剛性分布が変る毎に活荷重を移動載荷することは困難であり、剛性変化前の状態での p_1 荷重位置により解析を行い、断面決定後、再度活荷重載荷位置を決め、再度断面最適化を行った従って、載荷位置については収束を確認していない。しかし仮定断面の剛性分布が決定断面のそれと大きく違わない場合は活荷重載荷位置の変化は小さい。又、この部分については完全な自動設計となっていない。

2.4 断面照査

照査においては、FEMで得られた結果を断面力に換算することなしに、算出応力を用いて直接行うことを試みた。従来の橋梁設計においては断面力計算と部材設計の間に応力への換算という作業が介在した。この段階の計算法については過去提案されてきた数多くの手法が存在し、設計者は適切なものを選択し、あるいは自ら作り出し設計を行ってきた。これに対し、FEMをベースとした設計法は、これら計算手法の一部をFEMにとって変らせようとするものであり、設計法の未確立な新構造の設計等に応用が広がる可能性が考えられる。しかし、そのためにはFEMで算出された応力により直接実行できる照査式が必要となる。

シミュレーションで実施される照査には荷重抵抗係数設計法のコンセプトを適用することとした。現行の道路橋示方書²¹⁾は許容応力度設計法を用いており荷重係数、抵抗係数は定められていない。荷重係数等は従来の研究と道路橋示方書に準拠して優先的に使用した。荷重係数についてはいくつかの指針が示されている^{16,17)}が、ここでは余裕を見て死荷重係数に1.2、活荷重係数に2.0を用いて、 $1.2 \cdot D + 2.0 \cdot L$ を見込んだ。

断面照査は架設時と供用時について行う。架設時照査においては活荷重合成を仮定し、床版荷重を鋼桁に載荷した。但し、床版は一括打設とし打設順序は考慮していない。供用時については各部材に最大応力を生じる7つの活荷重パターンを考慮した。

照査は表-2に示した構造必要条件に加え、引張り部材の照査、圧縮部材の照査、たわみ照査を行う。部

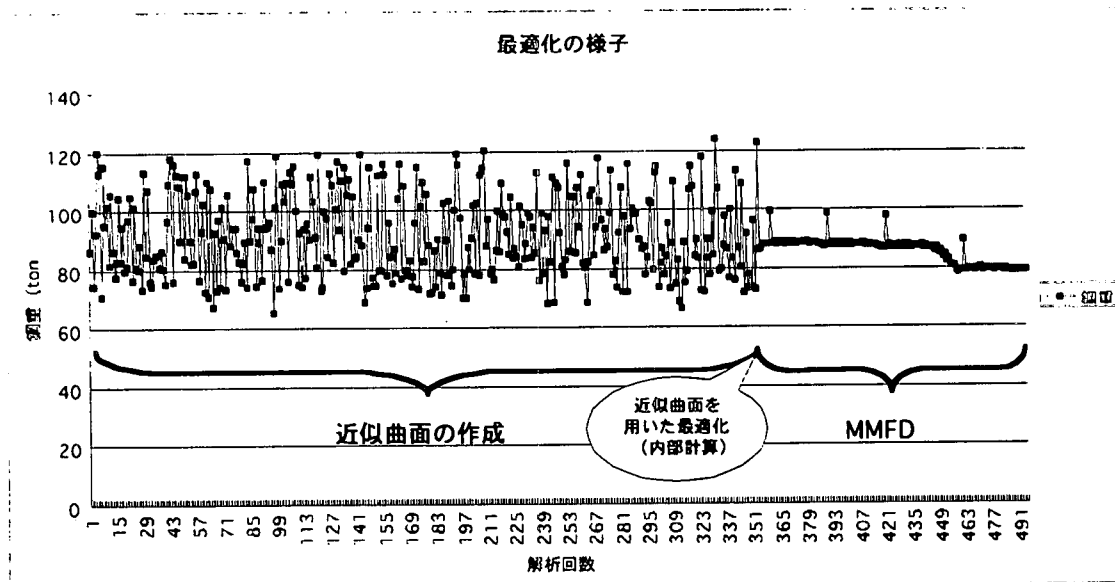


図-6 鋼重の収束状況

材の照査式は道示許容応力度を1.71倍したものであり、SM520材で40mm以下の場合の照査式を表-3に示す。

FEMで計算されるような局部応力に対する降伏照査の方法は現在の示方書には規定されていないが、ここではvon Misesの相当応力により評価した。応力照査評価方法については、今後、更に適切な方法が提案されるものと考えている。

通常の設計では2次的な発生応力および形状に起因する応力集中は無視しており、これらの影響は部材設計時に考慮している。FEM解析では部材の偏心、算出応力はvon Misesの相当応力を用いる。

2.5 最適化手法

パラメータの少ない場合は、別途研究で行ったように全ての組合せに対して断面設計を行い最適値を探す□、いわゆる力ずくでの繰り返し計算も可能である。この場合でも設計者の経験的知識を加味することにより収束を速めることは可能である。しかし、扱うパラメータが多くなった場合には数理計画法に基づいた最適化手法の適用が有効となる。しかし、どのような最適化手法が橋梁に適するかについてはまだ模索段階であり、ここでは図-5に示す2段階の探索を実施した。破線の四角1つが図-1の流れ1回に対応する。

シミュレーションでは最適化ステップ毎に有限要素解析を実行することから、収束を速め、計算時間を短縮するため大局的な解の探索をまず実施し、その後、直接法により最適解を探る2段階の探索を行った。大局解の探索には外点法を用いる。(参考文献名)外点法は制約条件のある最適化問題を制約条件のない問題

として制約条件を変換し直し、ペナルティー汎関数(変換後の関数)を伴った修正目的関数を最適化していく手法である。つまり実行可能領域外からの最適化が可能である。近似手法は再解析手法の一種で各パラメータを重みで与えた近似関数(近似曲面)を作りそれに対して最適化を行う手法である。効率的ではあるが±15%程度の誤差が存在する。

直接法としてはMMFD(修正実行可能方向法)を適用している。本手法は実行可能方向と改良ステップ幅を常に実行可能領域に存在するように最適化の反復を行う方法で、このことから高速性に優れ、かつ精度のよい最適解が得られる手法である。今回の解析では最終的には第1ステップとして近似解法を用いた外点法を使用することにより実行可能領域内の大局解を求め、MMFD法により最適解を求めた。さらに、この解を初期値として同一ルーチンを3回繰り返すことにより解の精度を上げることとした。

具体的な最適化の計算規模は目的関数である鋼重を最小とする解の探求に、図-5に示す2段階の最適化を行う。まずは近似手法により1万要素の要素数のFEM解析を351回繰り返し26パラメータに対する近似曲面を作成する。この近似曲面に対し外点法を適用して大局解を得る。その後MMFD法により同FEMを約100～400回行い局所解を得る。この過程を計3回繰り返すことで最終的な解を得ている。最適化は全て自動で行われるが、一回のFEM解析が約5分、データの解析、要素の再分割を含め1ルーチン6分かかるとして標準的な性能のワークステーションを2週間稼働させることが必要であった。シミュレーション中の鋼重の収束状況を図-6に示す。最初に近似手法による近似曲面の作成が行われ、同曲面を用いて最適化を

表-- 4 部材別鋼重比較

	実橋	補剛材無し	補剛材 1 段
U.Flг	56.365	8.912	12.616
Web	68.772	96.036	70.608
L.Flг	55.628	39.732	37.888
計	180.765	144.68	121.112

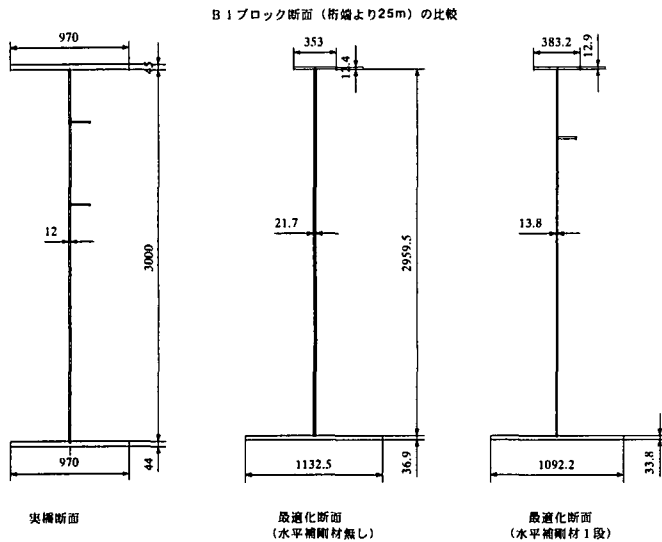


図--8 実橋断面と最適化後断面の比較

行った後、直接法により最適解の精度を上げている。MMFD 法では26の変数に対して32通りの組合せを試し、その都度に解の精度を上昇させているが、1回目と3回目でそれほど大きな鋼重減少はないことから、通常的设计レベルであれば、最適化手法の選択、反復回数を減らすこと等により、設計時間はかなり短縮出来ると考えられる。

2.6 解析上の留意点

FEM 解析を用いた場合、骨組み設計と比較するといくつか留意すべき点がある。今回の解析では応力成分の組合せ計算を省略するため von Mises の相当応力を用いて評価を行っている。

2次的な応力の発生、応力集中部に対しては通常的设计解析では無視されており、これについては部材設計段階で個々に対応している。FEM で断面の応力を算出した場合、偏心載荷、横力等による横桁発生応力等直接算出することが出来る反面、これら局所的な応力が算出されるため、主部材の設計時にこれらの効果による応力を区別する必要がある。今回の解析では、例えば中間支点部の支承取り付け部でソールプレート縁端で応力集中が発生した。ここでは応力集中範囲外の応力を2次曲線で内挿し、スムーズな応力分布を仮定し、この最大値をもって主桁の設計を行った。このような内挿の是非については厳密には検討を要する。

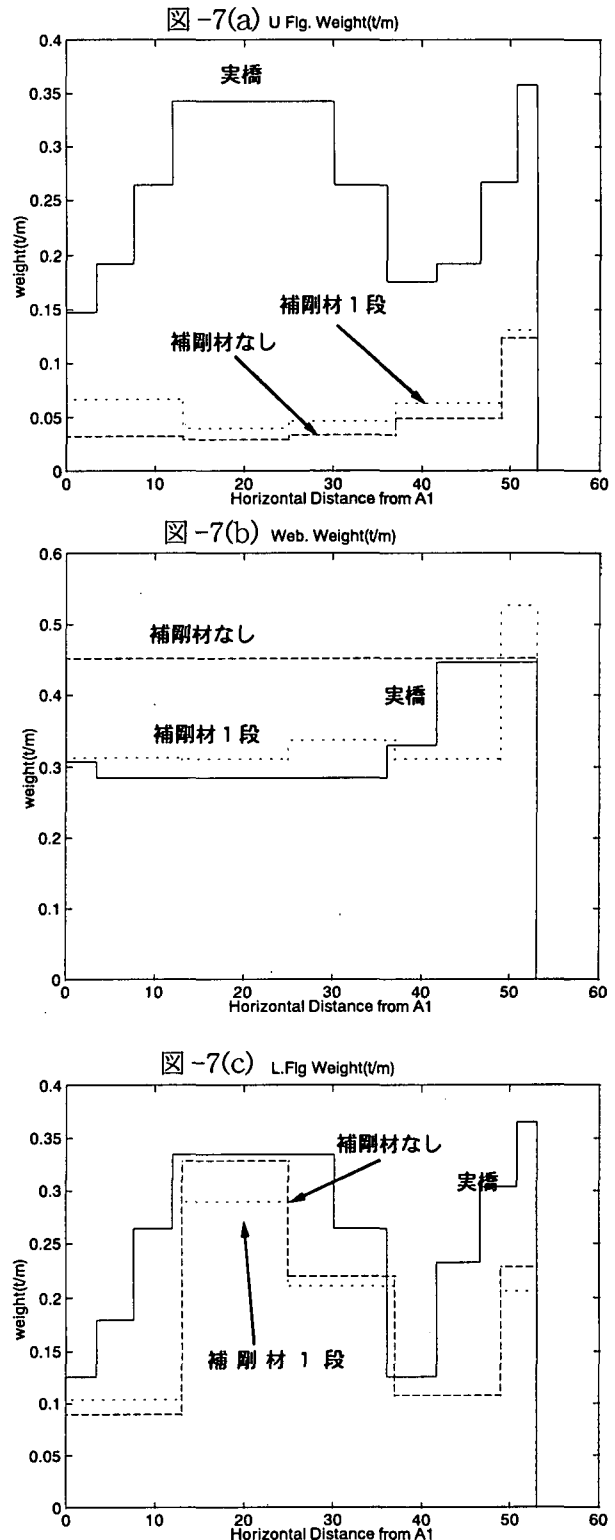


図--7 鋼重分布比較

3. シミュレーション結果

シミュレーションは水平補剛材を省略した場合と1段設置した場合について行った。主桁鋼重について実橋とシミュレーション結果の比較を表-4、図-7に示す。実橋主桁鋼重 181t (補剛材含まず、1 橋全鋼重

213t) に対して、シミュレーション結果は補剛材無しの場合 145t で主桁鋼重は 30%、補剛材 1 段では 121t (補剛材重量含まず) で 42% 減少した。但し、実橋は非合成桁として設計されており、水平補剛材は最大 2 段取り付けている。又、シミュレーションでは鋼種を SM490Y に統一したが、実橋では SS400 から SM570 まで使い分けている。正曲げ領域でのシミュレーション断面を実橋断面と共に図-8 に示す。

部材別鋼重を見た場合の重量比較を表-3 に示す。

上フランジ重量は床版との合成効果により中間支点部を除き実橋に比べ $1/7 \sim 1/8$ と大幅に減少している。一方、ウェブについては水平補剛材なしとした場合、実橋に比べ鋼重が一般部で 20% 程度増加する。補剛材 1 段とした場合は実橋とほぼ同じとなっている。但し、実橋の断面は 1 ブロック 1 断面ではなく、添接部の孔引きにより板厚が増厚する場合にブロック内での増厚等を行う従来設計のため、1 支間で 9 つの断面が存在する。これに対し、シミュレーションでは溶接による添接を想定し、ボルト添接の孔引きによる増厚はなくしたため多少重量が実橋よりも小さめに評価されている。逆にブロック内での板厚変化を無くし 5 断面で構成されていること、中間支点部のブロック長が多少長いことにより、重量が過大に評価されている。下フランジについては支間中央部は実橋とそれほど変わらず、端部、及び、中間支点付近で鋼重の減少が目立つ。

死活荷重載荷時において、発生応力度は von Mises の相当応力で 200 ~ 260MPa となり、実橋の値とほぼ同じであった。しかし、架設時の応力は実橋に比べ小さめとなった。これは実橋で考慮されている移動型枠等の荷重を考慮していなかったことが原因と考えられる。

各パラメータの目的関数に対する影響度合の評価、いわゆる因子解析は試みたが、各パラメータが独立でないこと、1 断面の全体重量への影響評価はあまり意味がなく、パラメータをグループ化して評価する必要があるように思われるがまだ着手できていない。

今回のシミュレーションでは、たわみ制限が厳しい制約となり、この条件により断面が決定されている。実際の設計においては、たわみと応力等の制約条件がわかっている場合、設計者は経験から、桁高をある範囲に限定して設計を開始する。最適化シミュレーションではこのような桁高さの制約を行わない限り、コンピュータは全組合せについて照査を行い、膨大な FEM 計算が無駄に行なわれることとなる。最適化手法として、実験計画法、エキスパートシステム等により設計者の経験的な知識を組み込むことによりシミュレーションの高速化が実現できると考える。

4. 結論

有限要素法を最適化プログラムとを組み合わせることにより橋梁断面の最適化が可能である。

実橋の設計とシミュレーションでは設計のレベルも異なり、鋼重を比較する場合には注意が必要であるが、合成桁化+最適化により上フランジの重量が 2 割程度に削減できる。ウェブについては同程度、下フランジについては端部、中間支点部で断面を減少できた。

FEM をベースとした設計によりフランジ、ウェブを独立した部材として決定することができる。ウェブ、フランジを組合せ、ひとつの部材として設計する既存の橋梁設計とは異なったアプローチとなる。

FEM による構造の評価については、例えば鉄筋コンクリートの剛性の評価、ひび割れ挙動などのモデル化等も含め解決すべき問題も多い。しかし、次々と提案されるハイブリッド桁、複合構造等新しい構造について 3 次元的な構造特性、材料特性等を総合的に評価できる FEM ベースの設計法はますます重要性を増し、標準的な設計法として用いられる可能性がある。数万要素の FEM を数千回繰り返すという方法も現在の計算機能力を考えれば可能ではあるが、最適化の方法については改善の余地があり、更に収束を速めることが可能である。又、今回のシミュレーションのような手法を新しい構造物設計に適用することとは別に、シミュレーションの容易で標準化しやすいタイプの橋梁について、いくつかのスパンに対し与えられた条件のもとで、コスト算定の基準となる最適断面を提案していくような利用方法が考えられる。

本手法は、理論的には複数のプログラムコードをリンクさせて設計シミュレーションを行うことが可能であり、構造物開発において大きな可能性を秘めた手法と考えられる。

参考文献

- 1) The MacNeal-Schwendler Corporation: MSC/PATRAN User's Manual, Volume 1-4, 1998.
- 2) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS/Standard Example Problems Manual, Volume 1-3, 1998.
- 3) Engineous Software inc. : iSIGHT Developer's Guide, Volume 1-4, 1998
- 4) 神原康樹, 長井正, 鷲尾修一: 金城第三高架橋の合理化設計, 年次学術講演会, 第 51 回/I-A291, pp. 581-582.

- 5) 黒田充紀, 長井正嗣, 藤野陽三, 柄川伸一, 川井豊: 並列I桁橋の有限要素モデル化に関する検討, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1073-1080, 1996.
- 6) 日本鋼構造協会編: 最適化手法の構造設計・解析への応用, 培風館, 1980.
- 7) 山本宏: 最適化デザイン, 培風館, 1993.
- 8) 茨城俊秀, 福島雅夫: 情報数学講座14, 最適化の手法, 共栄出版, 1993.
- 9) 佐々木康彦, 三上隆, 菲澤憲吉: 構造材料の配分最適化手法による最適な補剛構造の形態に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.577-584, 1997.
- 10) 三上市蔵, 木村泰三, 大淵智弘: プレートガーダーの終局強度の算定法について, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.531-544, 1993.
- 11) 杉本博之: 構造最適設計の数値計画法からの脱皮, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.339-345, 1989.
- 12) 長谷川彰夫, 古川浩平, 坂下克之: 最大荷重設計と最小重量設計の等価性と効率性, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.361-371, 1989.
- 13) 松井繁之, 神原康樹: 道路橋の限界状態設計法に向けての活荷重に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.419-431, 1989.
- 14) 佐藤尚次: プレートガーダーの限界状態を考慮した道路橋活荷重シミュレーションによる応答評価と設計法, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.433-443, 1989.
- 15) 三上市蔵, 木村泰三, 山里靖: 設計のためのプレートガーダーの終局強度の算定法, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.511-522, 1989.
- 16) 鋼橋技術研究会, 限界状態設計法研究部会: 限界状態設計法の書式による鋼道路橋設計指針, 1998.
- 17) 土木学会: 鋼構造シリーズA 鋼構造物設計指針 PartA: 一般構造物, 1997.
- 18) 本四連絡橋公団: 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.
- 19) 守矢健生, 入部孝夫, 塚原弘光, 中西芳郎, 長崎富彦, 依田照彦: 鋼桁橋における現行設計法と限界状態設計法のキャリブレーション, 橋梁と基礎, pp.37-42, 1997.
- 20) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, II 鋼橋編, 平成8年.
- 21) 長谷川浩志, 酒井新吉, 渡辺隆之: iSIGHTによる曲面近似手法ベースの最適化設計における実験計画法利用について, 日本機械学会, No.99-7, Dynamics and Design Conference199, pp. 1999.

(2000年4月21日受付)