

鋼構造の補強法の数値シミュレーションシステムに関する研究

NUMERICAL SIMULATION SYSTEM OF THE REPAIR METHOD OF STEEL STRUCTURES

谷口 健男* 本郷英樹**

Takeo TANIGUCHI and Hideki HONGOH

This investigation treats the numerical simulation of the repair method of steel structures like steel bridges. General and most popular method to investigate the repair method of steel bridge is by the structural experiment, but at the setting of experimental model we encounter many difficulties, especially on the boundary conditions. On the other hand, the computational method can set any boundary condition, and we can easily reappear the state of the actual structures. But, there still exist many problems for the establishment of the numerical simulation method, most of which are from the ability (the memory size and the computation speed) of the computer which we can use at present. In this investigation we aim to propose a numerical simulation method of the repair method of steel bridges, and through the numerical examples we consider on better tools for the method.

1. まえがき

大規模かつ複雑な鋼構造のディテールでの応力緩和策を検討する場合、通常構造実験等が行われるが、全体系の再現が困難なことより、部分系に限定してモデルを作りその補強策を検討している。しかしながら、実際の境界条件等の再現性には疑問が多いと言える。

一方、今日電算機の能力の発達及び数値解析法の進歩より、様々な数値シミュレーションが可能になってきている。数値的手法の利点は、複雑な系の構築、様々な境界条件の設定が容易である点、また構造実験では詳細に検討できないプロセスの検討、内部の例えば応力の照査が可能である点であろう。

以上の点を鋼構造の補強法の検討という問題に照らし合わせてみると、いかに大規模・複雑な系でも取り扱えることや、その細部の応力の検討、荷重等の境界条件の設定の容易さ、複数列の対策の検討を容易に行える点、また、コスト及び時間を節約できること等、多くのメリットが挙げられる。

* 工博 岡山大学助教授 工学部共通講座 (〒700 岡山市津島中 3-1-1)

** 欄 西日本旅客鉄道 (〒530 大阪市北区大深町 1-1)

数値シミュレーション法を考察しようとする場合、まず、解析手法を決定しなければならない。この解析手法としては、今日、その汎用性と信頼性が高く、幅広い分野に利用されている有限要素法を採用する。更に、応力集中や、き裂伝播解析等、特異な応力分布を持つ問題を対象とするため、その解の精度を確保するために、直接応力を算定する応力法でなく、まず変位を算定して、それを基に応力を求める変位型の有限要素法を用いる。¹⁾ また、大規模系の中の一部の応力状態を精度良く把握することは、今日の大型計算機の能力を持ってしても、計算時間・容量また数値・離散化誤差などにより困難である。そのためここでは、ズームング技法(多段階構造解析法)を用いることにする。²⁾

数値解析をベースとしたときの問題点を探ってみよう。数値解析結果の判断には技術者のセンスにたよる面が多く、かなりの経験を必要とする。さらに重要なことに、数値シミュレーションで扱える系の大きさ(自由度総数)が用いる計算機の能力に依存する。また、数値シミュレーション法自体が有する問題点として、大規模系解析に良く利用されるズームング技法上の問題点、即ち、全体系から部分系への移行の際に断面力を等価な節点力にするなどの補間の問題や、これらのシステムの確立などが挙げられる。

本研究においては、鋼構造の補強法の数値シミュレーションシステム構築を試み、いくつかの例題を通してその妥当性と適用性について検証を行うとともに、今後のツールへの展望を考察する。

2. 解析システムのハードウェア構成について

大規模系解析の手法は、いわゆる汎用大型計算機にたよっているのが現状である。しかしながら、対象とする系が大規模かつ複雑となればなるほど、入力データ量が大量となり、その作成、作成データの検討・修正等、データの取扱が複雑かつ多様となる。言い替えると、解析者とデータとの接触回数が増加することになる。また、このような問題点を考慮して、ほとんどの汎用大型計算機には、グラフィクスソフトウェアや周辺機としてグラフィクス端末機、XYプロッターなどが用意されているが、非常に高価なものであったり、対話形式の処理が不可能なものも多く、手軽に利用することができないのが現状である。

このような観点からすれば、汎用大型計算機では、機能的に不十分であり、もっと柔軟なハードウェア構成を考えねばならない。近年のワークステーション或はパーソナルコンピュータの導入・利用は、そのような要求に答えようとするものと考えられる。

そこで、ここではパーソナルコンピュータに注目することにする。最近のパーソナルコンピュータの性能向上は著しく、豊富なソフトウェアに支えられた機能は非常に使いやすいものとなっている。また、その処理能力は大型計算機に比べると劣るが、ユーザー側の要求する柔軟な動きが可能である。例えば、入力データ作成中にグラフィクスを活用して、対話処理により生きたデータを加工することが可能となれば、ユーザーの労力が削減されるだけでなく、確実性も高まる。さらに、入力データの作成や出力結果の確認といった解析前後の作業をパーソナルコンピュータで行うことは、計算機の演算精度や容量をそれほど必要としない点、演算時間が比較的短い点、また大型機に比べコストが安い点、などの利点からみても実用的であるといえよう。以上のことによりここでは、図1に示すようなハードウェアの構成を行っている。システム開発に使用した汎用大型計算機は岡山大学総合情報処理センターのNEC ACOS model 2010と、スーパーコンピュータSX-1Eである。また、その端末となりうるパーソナルコンピュータとしてNEC PC-9801 vmを採用する。さらに、パーソナルコンピュータには、カラーディスプレイ、シリアルプリンター、XYプロッター、40 MBのハードディスク、拡張用メモリボード2 MBを実装する。

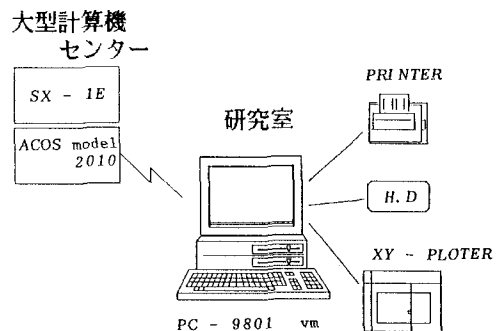


図1 ハードウェア構成

さらに、パーソナルコンピュータには、カラーディスプレイ、シリアルプリンター、XYプロッター、40 MBのハードディスク、拡張用メモリボード2 MBを実装する。

3. ソフトウェア開発上の問題点及びその対策

ソフトウェアの構成を図2に示す。システム全体は有限要素法をベースとしていることより、大きく分けて、プレプロセッシング部、アナリシス部、ポストプロセッシング部の3つの部分となる。

プレプロセッシング部では、必要な要素分割をブロッキング法を用い、その後、節点番号付けを Gibbs - Poole - Stockmeyer 法を用いて行う。CORE-PC は、市販のグラフィックスソフトである。

アナリシス部では、作成したデータを大型機に転送して解析を行う。解析する際に作られる線形代数方程式の元数は数千円程度と考えられるため、スカイライン法を用いて計算機の容量・演算時間の節約を行う。

ポストプロセッシング部では、再び、解析結果のデータをパーソナルコンピュータに転送して整理・表示等を行う。その際、変位と応力に関する解析結果については、3次元的にグラフィックス処理を行い表示することにする。

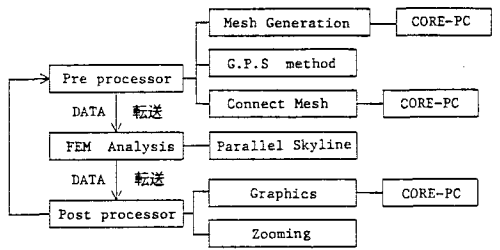


図2 ソフトウェア構成

ここでは、本システムで使用する各ソフトウェアについて、プレプロセッシング部、アナリシス部、ポストプロセッシング部の順に説明し、ソフトウェア開発の際に発生する問題点を抽出しその対策を検討する。

3.1 プレプロセッシング関連

3.1.1 ブロッキング法を用いた3次元要素自動分割法³⁾

有限要素法を用いて構造解析を行う場合、その前処理として対象系の要素分割を行う必要がある。分割法の考え方は数多く発表されているが、ここでは、ブロッキング法を採用する。ブロッキング法は、対象系を任意の単純な形の部分系に分割することにより、複雑な形状の要素分割を容易に行うことができ、また、メッシュサイズやメッシュパターン、物理定数など部分系ごとの性質の変化にも対応できるため複雑な構造解析に適している。

ここでは、扱うモデルを鋼橋のような3次元構造物としている。対象とする構造物の形状が単純である場合には、モデルは2次元で十分であるが、プレートガーダーのスティフナ接合部やボックスガーダー、シェル構造物などは、2次元体のモデルとして解析するには、そのモデル化に困難が生じる。²⁾

鋼橋等を見た場合、その構造要素である主桁、横桁、スティフナ等は2次元体としてモデル化することができ、それらが全体としては3次元的に連結していると考えることができる。

このような特性は、ブロッキング法のメリットを有効に生かせることは明かである。すなわち、各構造要素単位に要素分割を行い、その後それらを位相幾何学的情報をもとに3次元的に接合する(図3参照)。

この場合、全体系への接合は位相幾何学量をもとにしているため、確実性は高く、ミスは少ない。また、グラフィックス処理を利用して実際の要素分割図が得られるため、ユーザー側の意図した要素分割でない場合は、再び、入力データ作成に戻ることが可能である。また、3角形及び4角形の部分系を3角形の要素に分割す

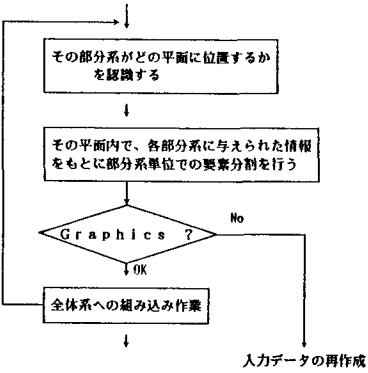
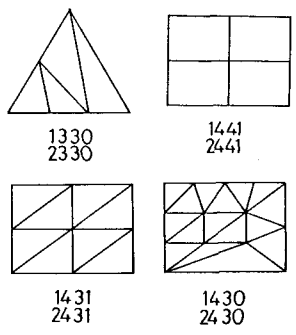


図3 Mesh Generation



1 : 定歪み要素
2 : アイソパラメトリック要素

図4 メッシュパターン

る手法として、メッシュ関数法とデラウニーの三角分割法を採用している。後者の採用により、各辺に対して任意の分割数が与えられるため、入力データの作成をより簡単に行うことが可能となった。

さらに、前者を採用することにより、図4に示すメッシュパターンによって簡単に各々の領域について要素分割を行うこともできる。しかしながら、デラウニーの三角分割法では、凹の領域に対する要素分割が困難なため、今後の開発が望まれる。

なお、解析に必要な有限要素の種類としては、面内要素、板曲げ要素、平面シェル要素、はり・棒要素など、幾何学的に2次元・1次元的な形状を有する要素である。

3.1.2 補強用要素分割データ作成について (CONNECT MESH)

本システムでは、鋼構造の補強に数値シミュレーション法を利用することを目的としており、そのプロセスは、① 入力データの作成 ② 解析 ③ 出力結果のチェック ④ 入力データの変更 の4つの流れとなる。そのため、システム設計の方針としては、入力データの作成・変更等の作業を迅速かつ正確に行うことが要求される。しかしながら、対象とする系が大規模・複雑なものになると、それらの作業に対する労力も多大となる。

また、補強用要素分割データの作成は図5に示すように、補強を施す前のオリジナルデータを、部材寸法の変更、新部材の追加、旧部材の削除等の補強策をもとに加工して新しい補強用要素分割データとして作成していくことになる。

中でも、新部材を追加する補強に関してはプログラム開発を行い、データの加工を自動化することにより労力の軽減とデータ作成上発生しやすいミスの防止に努める。これは、図6に示すように互いにまったく情報を持たない2つの要素分割データを座標値による判定で結合することができる。ただし、座標値という幾何学的量をもとに結合する場合、結合ミスの危険性が高く、作成されたデータの信頼性が低い。そこで、グラフィクス処理による確認の作業を、プログラム実行中に行っている。

現段階では、新部材を追加する場合にだけ、プログラムによる自動化が可能であるが、他の補強策に関してもプログラム開発が望まれる。

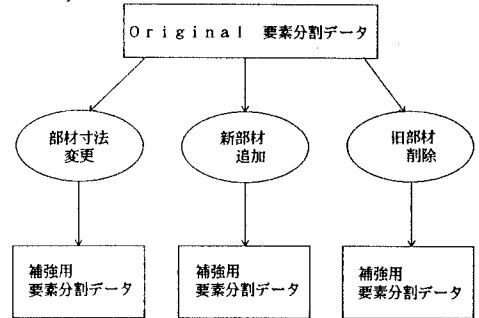


図5 補強用データ作成

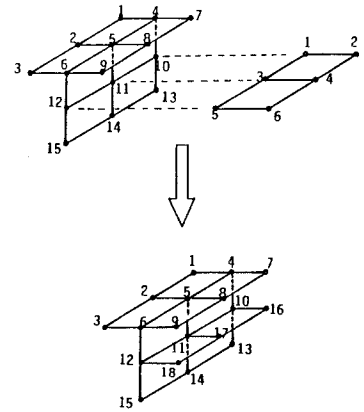


図6 Connect Mesh

3.1.3 プロファイルを最小化する節点番号付けについて

要素分割にはブロッキング法を用いているため、節点番号は作成されたブロック順につけられる。従って、そのままの形で作られる大次元疎行列の帯幅あるいはプロファイル値は、非常に大きなものとなり、結果としてその計算に要する演算時間は大きくなる。そこで、一度作成されたデータに対して節点の番号の付け直しを行い、演算時間の節約をはかる必要がある。この目的のため、ここでは、Gibbs - Poole - Stockmeyer のアルゴリズムを用いることにする。このアルゴリズムは、帯行列法のための帯幅およびスカイライン法のためのプロファイル値の減少を目的とした節点番号付手法であって、あまり複雑でないような系に対して有効な手法であることが知られている。なお、詳細については参考文献4を参照されたい。

3.2 アナリシス関連

3.2.1 スカイライン法の利用について⁵⁾

変位型有限要素法を用いて静的解析を行うことは、最終的に次の連立一次方程式を解くことになる。

$$\begin{aligned} [K] &: \text{剛性マトリックス} \\ [K] \cdot \{u\} &= \{f\} & \{u\} &: \text{変位ベクトル} \\ & & \{f\} &: \text{荷重ベクトル} \end{aligned}$$

その場合、剛性マトリックス $[K]$ には、① 元数が多い（数千元） ② 係数の中に 0 を多く含む ③ 0 でない係数は対角の近くに集中して帯型をしている ④ 正定値・対称である のような性質がある。

連立一次方程式の解法は直接法と間接法に大別できるが、板あるいはシェル要素を含む剛性マトリックスに、反復法を適用すると厳密解への収束が安定しないという問題があるため、直接法を利用する。⁶⁾

スカイライン法は直接法の一つで前述した剛性マトリックスの性質を利用して、剛性マトリックスの各列の内、プロファイル内に入る部分、すなわち、アクティブコラムを下から順に並べて1次元的に配列し、この順序で消去演算を行い、その後、後退代入により解を求める方法である。この方法により、前進消去過程で発生するフィル・インは、すべてこの1次元配列内に限定することができることになり、計算中にそれ以上の記憶容量を必要としないので、計算機の記憶容量の節約が行えるばかりでなく、演算時間の短縮にもなる。

なお、ベクトル計算機の利用を前提とした時の解法として上記手法を改良した2次元配列を用いたパラレルスカイライン法も作成・利用する。⁷⁾ パラレルスカイライン法とは、有限要素法による解析の際に作られる全体剛性マトリックスが、節点（自由度 m ）に関する $m \times m$ の要素剛性マトリックスから成り立っていることを利用して、内積計算を並列処理し高速化する手法である。

3.3 ポストプロセッシング関連

3.3.1 グラフィックス処理による大規模系解析の結果整理について

大規模系あるいは複雑な構造物の解析を行った場合、その出力データの量も膨大となり、必要な解析結果の確認等の作業にも著しく時間が費やされがちである。ここでは、解析結果について変位と応力をコンピュータグラフィックスを利用して出力し、システムの最終作業の軽減化に努める。

まず、変位についてはその解析結果が妥当なものであるかを検討するために図7、8のような変形図と変位図をグラフィックス表示する。

図7の変形図は、4本主桁のトラフガーダー橋に非対称荷重を載荷して解析したときの変位について3次元的な処理を行っている。さらに同図は、設定した境界条件や、変形状態が解析結果として妥当なものであるかどうか判断するために用いる。

図8の変位図では、4本主桁のうちの1本をとりだしその下フランジの橋軸方向をXとし、Z方向変位についてプロットしている。また、同図ではその最大変位量を数値で、変形をたわみ曲線でグラフィックス表示しているので、あらかじめ算定した理論値（梁理論等による）との照合が可能である。

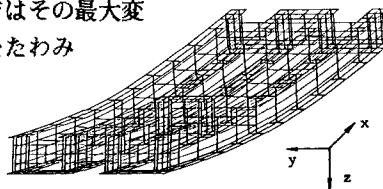


図7 変形図

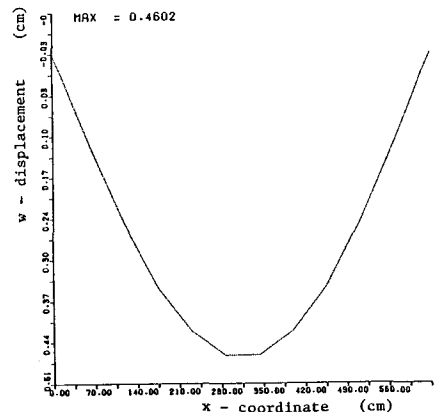


図8 変位図

変位に関するデータの検討が終了すれば、次に応力に関する結果のグラフィックス処理を行う。応力図は、任意の同一平面上複数列の部分系について各要素ごとに応力を表示する。応力値は、主応力の方向を矢印の方向で、大きさをその長さで表示する。具体的には、後述する図12等を参照されたい。

これらを利用することにより膨大な出力データの処理・表示を合理的かつ迅速に行うことが可能となる。

3.3.2 ズーミング技法（多段階構造解析法）²⁾

大規模な構造物の局所的な応力分布状態を精度良く把握するためには、非常に細かい要素分割が必要となる。これを、一括解析で行おうとすると、膨大な自由度の増加につながり、計算機の容量・演算時間、誤差の諸点からその実行は困難となる。そこで、それらの問題を解決するためにズーミング技法（多段階構造解析法）を用いることにする。具体的には、図9のような全体系解析モデルとその断面Iで切断した部分系解析モデルを使って説明する。いま、全体解析を行うことにより、節点 P1 ～ P6 での自由度である u , v , w , θ_x , θ_y , θ_z が得られたとする。このとき、部分系解析モデルでの節点 p1,p3,p5,p7,p9,p11 は前段階の節点と一致するため、そのまま全ての自由度を強制変位として与える。また、部分系解析時に新に発生した点 p2,p4,p6,p8,p10 に対しては、2次のスプライン関数を用いて補間する事により強制変位を算定したものを与える。以上の操作をした後、部分系解析を行う。

なお詳しい式等は、参考文献2を参照されたい。この解析を必要に応じて繰り返すことによって、大規模系の中の小さな領域を解析することができる。

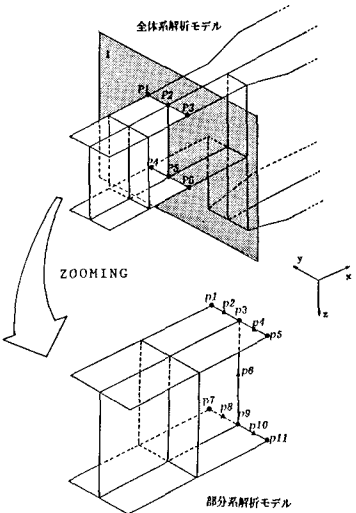


図9 ズーミング技法

4. システムの適用例^{8) 9)}

ここでは、最近問題となっているプレートガーダー橋のスカーラップ部におけるひび割れ発生について数値解析モデルを作成し応力解析を行い、さらに数種類の補強策を施し解析を行った。

全体解析モデルは、40m級の2本主桁のプレートガーダー橋をその構造形式及び荷重等を考慮して図10のように1/4モデルとした。なお、境界条件は表1に示す。荷重は、床版上に分布荷重（死荷重）を0.106 Kg/cm²、図10のE-E断面に線荷重（活荷重）を25.0 Kg/cm²

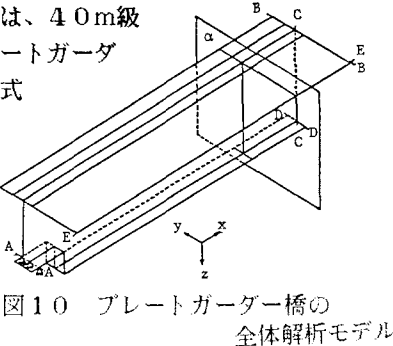


図10 プレートガーダー橋の全体解析モデル

表1 境界条件

図10に示した断面	与える境界条件
A - A	$v=0, w=0, \theta_x=0, (\theta_z=0)$
B - B	$u=0, \theta_y=0$
C - C	$u=0$
D - D	$u=0, \theta_y=0$
E - E	$v=0, \theta_x=0$

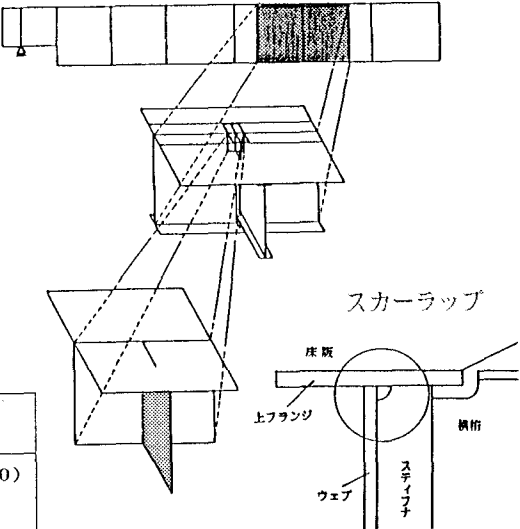


図11 多段階解析法

載荷した。

さらに、本システムを使ってズームング技法を2回行って最終的にスカーラップ部を解析した(図11参照)。この解析により得られたスカーラップ部の応力状況を図12に示す。これにより、上フランジ、ウェブ、スティフナの隅角部であるスカーラップ部において、引張り側の最大応力のピーク値が 1450 Kg/cm^2 となり、周辺部の応力と比べて著しく高く、応力集中が発生しているのがわかる。

そこで、図13に示す3つの補強法を用いてより良い応力の緩和法を探る。なお、補強用要素分割データの作成は、3.1.2 で開発したプログラム CONNECT MESH で行う。

ケース1： 主桁上フランジと横桁上フランジとを連結する(図13(b))

ケース2： 主桁ウェブ背面に鉛直スティフナを追加する(図13(c))

ケース3： 主桁間の中央に縦桁を増設する(図13(d))

ケース1～3までの補強を行い、解析を行った結果を図14に示す。

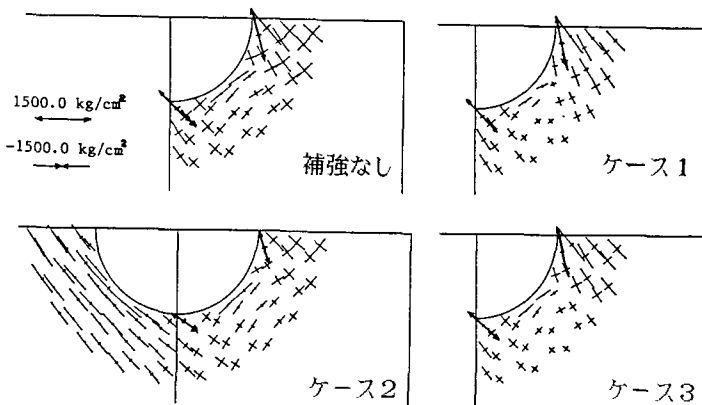


図14 補強後の応力状況

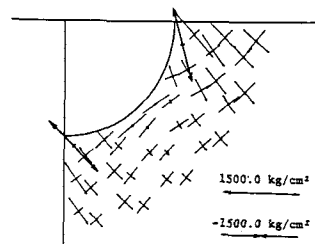


図12 スカーラップ近傍の応力状況

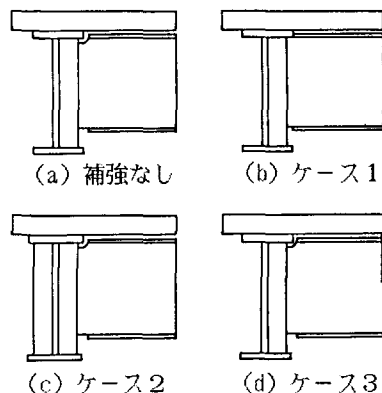


図13 各種補強法

ケース1： 応力集中部以外の所で応力が低下しており、その部分に限定すれば平均的な応力低下は一応達成されているが、さらに広い領域の応力を平均化するという点では無意味である。

ケース2： 応力が低い部分において変化がなく、集中部だけを低下させている。ピーク値も25%程度の低下がみられ、応力を平均化させている面からより良い補強法と考えられる。

ケース3： ケース1と同様に、平均的な応力の低下で、ピーク値もさほど低下していない。

参考のため、主桁断面の変位図を図15に示す。これは、図10中の主桁断面αにおける変形状態を実線で示している。同図によると、床版の変形を抑えるという点では、ケース3、ケース1、ケース2の順となる。しかし、最大応力の低下及び応力の平均化という点では、ケース2、ケース3、ケース1の順で有効となり、床版の変位を抑えることが必ずしも良い補強法とは成り得ないようである。明らかに各部材の剛比バランスにより、その部分の力の伝達関係が支配される。

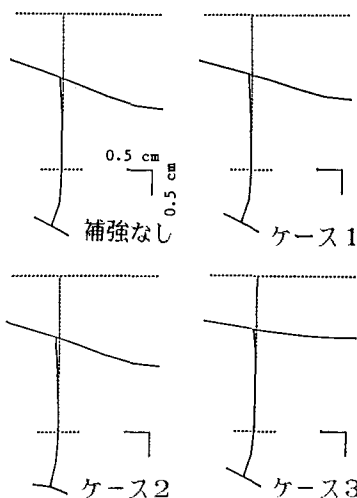


図15 α断面での変位図

次に、スティフナ厚やスカーラップ部の曲率半径が応力状況に与える影響を調べるため、次の3つのケースについて解析を行った。ここでの、補強用要素分割データ作成にも 3.1.2 で開発したプログラム CONNECT MESH を使用する。

ケース4： 対象とするスカーラップ部のスティフナ厚を 1.0 cm から 1.5 cm にする

ケース5： 対象とするスカーラップ部のスティフナ厚を 1.0 cm から 2.0 cm にする

ケース6： 対象とするスカーラップ部の曲率半径を 3.5 cm から 4.5 cm にする

これらの解析を行った結果を

図 16 に示す。

これによると、スティフナ厚が応力状況に与える影響はみられなかった。スティフナが厚くなれば全体的に応力が低下するだけであり、応力の平均化は成されていない。

また、曲率半径についてもピーク値がやや下がっただけで、応力状況にはほとんど変化がみられなかった。

以上の解析結果から次のよう

な結論が得られた。

1. プレートガーダー橋のスカーラップ部は、境界条件、荷重等にもよるが応力集中が発生する
2. この場合の補強法としては、問題のスカーラップ部のスティフナの背面に鉛直スティフナを追加添削する方法が最も良く、床板の変形を抑えることは必ずしも良い補強法とはいえない。

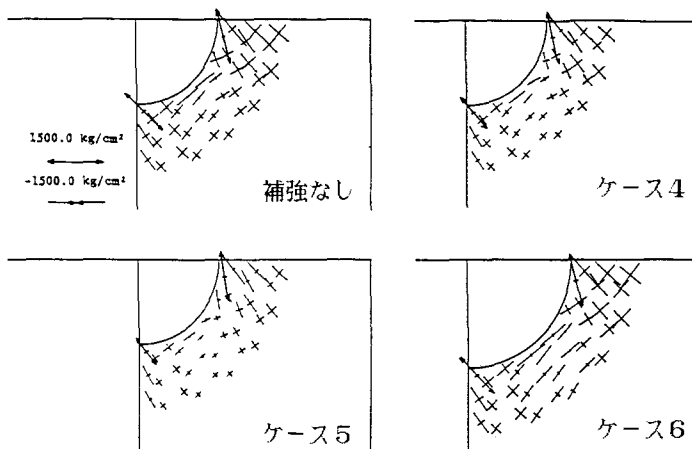


図 16 補強後の応力状況

5. あとがき

本研究では、有限要素法を用いて大規模構造物の補強法の数値シミュレーションシステムの提案を行い、さらにパーソナルコンピュータと大型汎用計算機とを併用して、相互の利点を生かしたシステムの構築を行った。

今後の課題としては、同システムを利用する際の各プロセスにおける作業の軽減化が重要である。特に要素分割時における入力データの取扱い、メッシュの確認等の作業は、解析するモデルが複雑になればなるほど労力と時間がかかりがちである。そのため、グラフィックスを活用した新たなツールの開発と、ユーザーとデータとの接触を最小限にするためにプログラムによる作業の自動化が必要となる。具体的には、入力データの作成・編集をグラフィックスを活用した対話形式により実行可能なプログラム開発と、それを応用して補強用要素分割データの部材寸法の変更作業についても同様にグラフィックスを活用したプログラム開発を行う。

しかしながら、パーソナルコンピュータでは、ユーザーズメモリや演算速度に自ずと限界があるため、大型機の端末となりうるワークステーションでの開発が望まれる。

《参考文献》

- 1) 鷲津 久一郎他 共編： 有限要素法ハンドブック I（基礎編）、培風館、1981.
- 2) 森脇 清明、谷口 健男： 多段階構造解析における有限要素モデルの設定に関する数値実験的研究、土木学会構造工学論文集、Vol.35A, 1989.3.
- 3) Takeo TANIGUCHI and Yasuo TSURUMI : Automatic Mesh Generator For 3-Dimensional Finite Element Analysis , OKAYAMA UNIV. Vol.21-2, 1987.
- 4) N.E.Gibbs ,W.G.Poole Jr.and P.K.Stockmeyer : An Algorithm for Reducing The Bandwidth And Profile of a Sparse Matrix , SIAM J.Numer.Anal, Vol.13, No.2, pp.236-250, 1976.
- 5) 菊池 文雄 訳： 有限要素法の数値計算、科学技術出版社、pp 227-263, 1979.
- 6) 谷口 健男： 土木工学における大型行列計算 , bit, No.13, pp.1699-1709, 1987.
- 7) T.Taniguchi & K.Fujiwara : Parallel Skyline Method using 2-dimensional Array , OKAYAMA UNIV. Vol.24-2, 1989(in Printing)
- 8) 鶴海 康雄： 3次元鋼構造物の応力解析に関する基礎的研究、岡山大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文、1988年
- 9) 岡田 清 監訳： 橋梁その他構造物の損傷事例集、月刊土木施工6月臨時増刊号、山海堂、VOL 27, No 9, 1986.

(1989年10月2日受付)