

(解説)

構造解析の最前線

中川知和(工博)

技術開発本部・機械研究所

The Leading Edge of Structural Analysis

Dr. Tomokazu Nakagawa

Rapid advances in computer technology have made it possible to simulate extremely complicated, large-scale structural problems. As a direct result of this, structural analysis is now widely used in nearly every possible type of structural design. Kobe Steel has been working on high-level structural analysis and related simulation programs for more than 20 years. By focusing on how designs have been improved, this report outlines the application of such structural analysis to various kinds of products including steel bridges, construction machinery, crushers, automobiles and steel materials.

まえがき = 建造物や機械などの構造体を設計する際には、その機能と安全性を確保するために、使用時に発生する応力や変形、あるいは安定性などを入念に調べておく必要がある。構造解析はこのための手段として不可欠なものであり、古くは構造体を単純な形状にモデル化して手計算で実施されていたが、計算機の出現とともにいわゆる数値解析手法が飛躍的に発展して、いまでは後述のように極めて複雑な形状・現象を取扱えるようになった。構造解析の発展の流れは、巨視的に、「線形解析から非線形解析へ」及び「小規模解析から大規模解析へ」ととらえることができよう。このような解析技術の発展とともに、構造解析は、応用面では土木建造物や航空機にはじまって、自動車、家電製品など多岐にわたる製品の強度設計に利用されているほか、塑性加工などの生産プロセス最適化にも広く使われるようになった。

当社においても、現在はほとんどの製品や設備に対して構造解析は日常的に実施されており、安全性照査のみならず、高品質、高機能、経済性を追求するための基盤技術のひとつになっている。本文においては、橋梁、機械及び材料の各分野から構造解析の特徴的な事例を抽出して解説を加え、当社の高度製品設計技術の一端を紹介したい。さらに、新しい技術動向にも触れてみたい。

1. 構造解析の方法

構造解析の古典的手法は、数学式により記述された単純構造体の力の釣合いを解析的に解くことであったが、現在は計算機による数値解析が主流となっている。数値解析の代表的手法は有限要素法(Finite Element Method, 以下FEM)であり、現在ほとんどの構造解析はこの手法に依っているが、その特徴は、任意の形状、境界条件、荷重、材料を取扱うことで、古典的手法に比べて適用範囲は格段に広い。

FEMの計算プロセスは、構造体を「要素」と「節点」で構成されるメッシュに分割してモデル化し、節点の変位を未知数とした釣合い方程式を解き、節点変位から各要素の応力を算出するというものである。このプロセスはシステム化されており、当社においては解析対象に

じて独自開発ないしは市販のソフトウェアを適宜利用している。

周知のごとく計算機の発達が目覚しく、10年前と比べても計算速度、記憶容量ともに1000倍程度向上した。これによって、従来部分的にしか計算できなかった構造体を、100万要素規模の大規模な全体モデルで計算することも可能になっている。また数値解析手法(ソフトウェア)については、弾塑性・クリープなどの非弾性材料や極めて大きな変形挙動を扱ういわゆる非線形解析の手法、合理的形状決定のための構造最適化手法、あるいは大規模演算の効率的解法など、各種のものが発達を続けている。

なお、構造解析においてはメッシュが細かければ精度が高くなると思われがちであるが、モデリング(要素の定式化、拘束や荷重の境界条件設定、要素形状など)が不適切な場合、詳細モデルでも解析結果が著しく実際と相違することがあるので注意を要する。従って、当社においては、新製品の開発や複雑現象の解明など、ルーチンワーク的でない構造解析には、構造力学の専門家が関与して信頼性の高い結果が得られるようにしている。

2. 橋梁構造物への応用

橋梁分野においては、従来の仕様規定型設計から性能照査型設計への移行が進みつつある。後者においては、従来の規定に縛られず自由度の高い設計を行うことができる半面、詳細な構造解析が必須となり、設計者には高度な解析技術が要求される。以下では、この背景に沿って実施した、特徴ある橋梁の構造解析事例を紹介する。

2.1 ケーブルトラス橋の全体構造解析¹⁾

写真1に示す橋梁は、ケーブルトラス橋と呼ばれる形式の鋼橋であり、現在、日本道路公団徳島自動車道で供用されている。本橋は橋長74mの単純支持鋼桁を、支間中央に設置した支柱を介してケーブルで下から支えるユニークな構造である。その特長は、鋼桁の断面を通常の桁橋に比べて小さくでき経済的であること、中間橋脚が不要で環境への影響を少なくできることなどである。

本橋は日本では道路橋として初めての形式であり、特



写真1 ケーブルトラス橋(竹花橋)
Photo 1 Cable trussed bridge (The Takehana Bridge)

殊な構造のために、従来の設計基準(道路橋示方書)のみでは設計が不可能であった。とくに、桁に軸方向圧縮力が作用するので 架設時の座屈が懸念された。そこで、梁モデルによる全体の弾塑性大変形解析を実施し、さらに鋼桁の一部である腹板パネルの局部座屈現象を詳細に解析(図1)して、補剛構造(水平補剛材の本数・位置など)を決定し、安全に架設することができた。

さらに、図2に示すような詳細 FEM モデルを使って自動車荷重と風荷重載荷時の弾性構造解析を実施し、局部(とくに支柱と鋼桁の結合部、及びケーブル定着部)の応力集中を求めて疲労強度を照査した。

本橋のように、新しい構造形式の橋梁に対しては構造解析による事前検討が安全性確保のためには不可欠なものとなる。

2.2 鋼製橋脚の地震時の耐荷力解析²⁾

1995年の阪神・淡路大震災により橋梁構造物にも甚大な被害が発生したが、損傷のほとんどは橋脚に集中した。

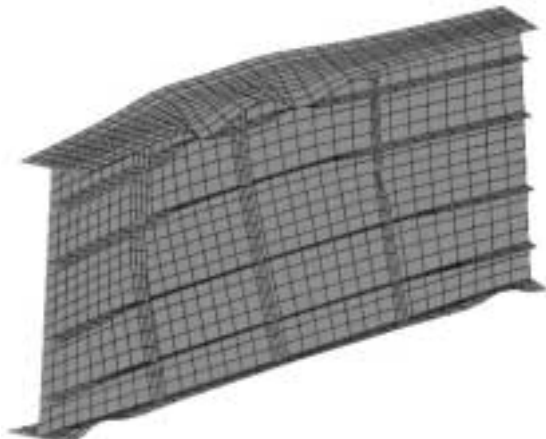


図1 ケーブルトラス橋の桁の座屈変形
Fig. 1 Deformation of buckled girder of cable trussed bridge

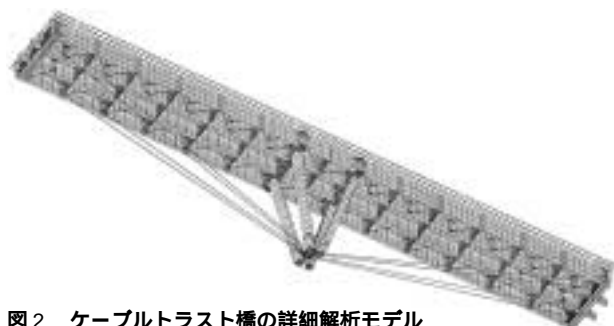


図2 ケーブルトラス橋の詳細解析モデル
Fig. 2 Detailed analysis model for cable trussed bridge

鋼製橋脚も、従来のコンクリート橋脚に比べて靱性が高いとされてきたにもかかわらず、数多くの損傷を受け数基は崩壊にまで至っている。このため、鋼製橋脚の耐震設計基準改訂に向けて官民の共同研究が実施された。この研究における着眼点は、地震に対して「粘り強い」構造を提案することであるが、そのために鋼製橋脚上部に水平方向の地震荷重が繰返し作用した場合の耐荷力性能(塑性変形や座屈に対する抵抗力)を精度良く推定する解析技術が不可欠であった。

従来、鋼製橋脚の耐荷力解析は断面形状が不変という仮定を置く梁理論によって行われていたが、実際には橋脚基部に局部座屈が発生して断面が大きく変形するため精度が悪かった。そこで当社では、図3に示すようなシェル要素を用いた詳細な弾塑性有限変形解析を実施して、水平荷重と変形の間係を求めた。その結果は、図4に示す通り、実験結果と非常に良く一致しており、時間・コストのかかる大型実験を大幅に省略することが可能となった。また、阪神・淡路大震災において被災した円形断面橋脚の破損原因を探るために、図5のような動的応答解析も実施し、破損原因が板厚の変化する溶接部の局部座屈にあることを明らかにした。これらの解析は上記共同研究に反映されている。

2.3 2主桁橋梁の構造解析³⁾

近年の公共事業費削減に対する強い要求に対して、鋼橋業界においてもコスト縮減のために合理的な構造形式の開発が盛んに行われている。この中で、とくに効果の

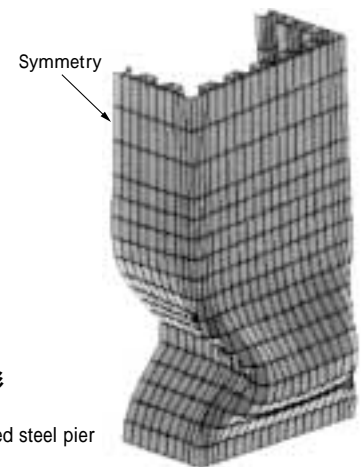


図3 鋼製橋脚の座屈変形
(1/2モデル)
Fig. 3 Deformation of buckled steel pier
(a half model)

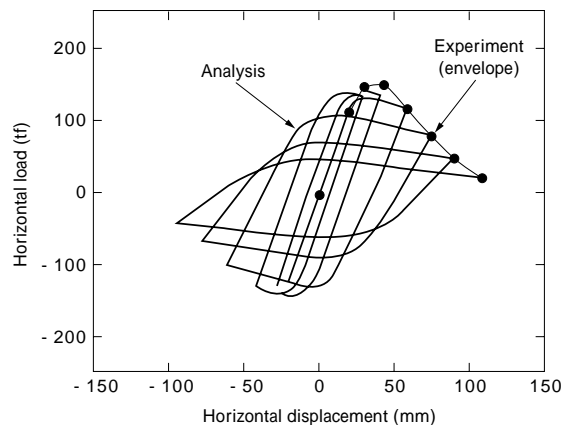


図4 鋼製橋脚の載荷実験と解析結果の比較
Fig. 4 Comparison between analysis and loading experiment of steel pier

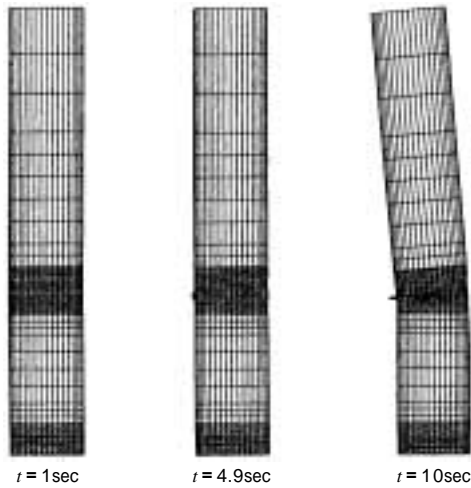


図5 地震時の鋼製円筒橋脚の局部座屈発生予測
Fig. 5 Prediction of local buckling of cylindrical steel pier under seismic loading

高い形式は2主桁橋梁であり、最近は多数の高架道路橋にこの形式が採用されている。2主桁橋梁は、従来の多主桁橋梁に比べて構造が大幅に簡素になるので、製造コストを10～20%程度低減できることが長所である。一方、構造的には、主桁間隔が広くかつ補剛材が少ないことにより架設時の不安定性が増すので、解析による安全性照査が不可欠となる。

写真2は、日本道路公団の上位越自動車道で供用されている2主桁橋梁である。本橋では、鋼桁の上にプレキャストのコンクリート床版を設置するとき、座屈に対する危険性が最も高いので、このときの安定性を検討するために図6に示すような座屈解析を実施した。同図は中間横桁間隔が8mの場合の座屈変形図であり、座屈荷重は自重の3.55倍(安全率3.55)となった。一方、中間横桁間隔を24mに上げると、安全率は1.62にまで減少したので、最終的に安全上余裕のある8m間隔を採用し



写真2 2主桁橋梁(儀明川橋)
Photo 2 Two I-girder steel bridge (The Gimyogawa Bridge)

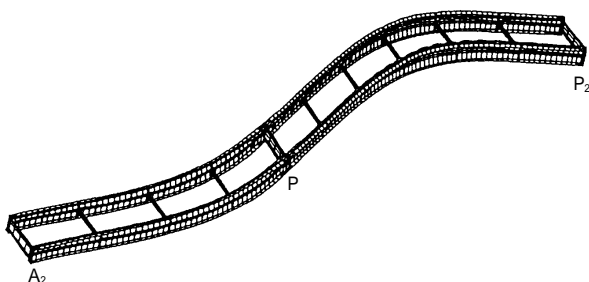


図6 2主桁橋梁の架設時の座屈解析結果
Fig. 6 Buckling mode of two I-girder bridge during erection

た。本例以外にも、応力集中を緩和するための構造ディテールの決定などに、構造解析が利用された。

3. 機械構造物への応用

3.1 建設機械の衝撃解析及び構造最適化

建設機械の設計において、構造解析は主として耐久性評価に用いられている。すなわち、実働荷重により構造物に発生する応力を解析により求め、疲労強度評価を行なう。この場合、応力集中を生じる溶接止端部は形状が不均一で応力の乱れが激しいので、解析モデルにおいては止端部から一定距離の部位の応力を算出し、独自に作成した疲労強度評価指針で照査を行なっている。また、メッシュ作成については、CADデータを使用して短時間で処理できるシステムを構築している。

さらに、極めて非線形性が強く従来精度上問題のあった衝撃解析についても実用化している。その例として、図7に油圧ショベルキャブの落下物衝撃解析結果を示す。本解析は、オペレータ保護のためのISO規格に対する性能評価試験を、非線形動的解析によりシミュレートしたものである。シミュレーション結果は実験との比較で、変形が10%以内の誤差に収まった。いまでは、このような事前解析により落下衝撃試験のほとんどは1回で終了するまでに至っている。

また、クレーンの旋回フレーム構造の最適形状を決定するために、図8のような構造最適化解析も実施している。この解析は、構造物の重量を一定としたとき、与えられた荷重に対して剛性が最大となる形状を自動的に見出すものである。数値解析手法としては、要素の密度を



図7 油圧ショベルキャブの落下衝撃解析
Fig. 7 Impact analysis of backhoe cabin subject to falling object

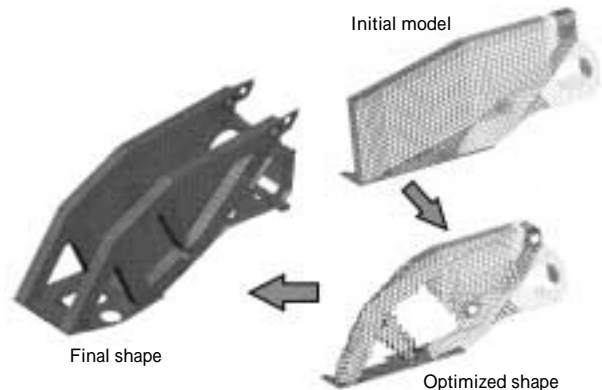


図8 クレーン旋回フレームの形状最適化
Fig. 8 Shape optimization analysis of crane upper frame

最適化計算により変更して、密度がゼロになったものは空隙とみなすことにより、最適形状を浮かび上がらせている。

建設機械の設計においては、構造のみならず振動・流熱・防音に関しても計算機支援の事前評価 (Digital Testing と称している) が根付きつつあり、設計期間の大幅短縮と性能向上に寄与している。

3.2 破碎機の大規模構造解析

FEM による構造解析において、最も手間のかかる作業はメッシュを作成することであり、優秀な専用のソフトウェアを使用してもなお多大なオペレーション時間が必要である。そこで、ひとつの解決策として、多数の直方体要素で構造形状を近似することが考えられる。この場合、一定の精度を保持しようとするれば、通常の任意形状要素を用いたモデリングに比べてはるかに多くの直方体要素が必要となり計算機負荷が増すものの、オペレーション時間は短縮されるはずである。

図9は、破碎機のケーシングを直方体要素約200万個でモデル化して構造解析を実施した結果であるが、CADデータを与えてからメッシュ作成に要した時間はわずか10分であった (通常のFEMによるメッシュ作成では1週間以上必要)。一方、本計算で着目した応力集中部における算出応力は、通常のFEM解析と比べて3%の差であった。このように、着目部位の形状の近似度に注意を払

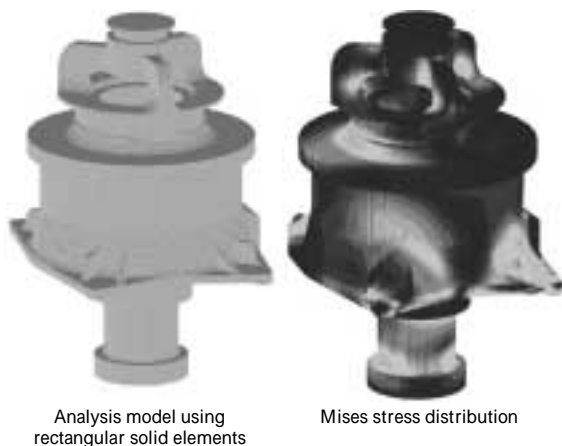


図9 破碎機の大規模構造解析
Fig. 9 Large scale structural analysis of a crusher

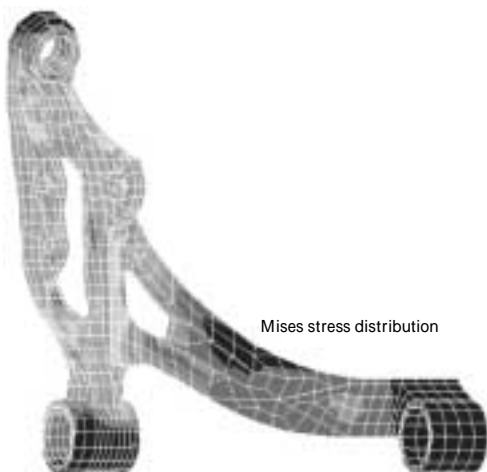


図10 アルミ合金製自動車ロアアームの構造解析
Fig.10 Structural analysis of aluminum alloy lower arm for automobile

えば、十分実用に耐え得る精度で応力を予測することが可能である。

3.3 自動車への応用

本節では、アルミ材の自動車部品への適用技術を示す。基本的にアルミ材は、自動車軽量化のために用いられるが、既存の鋼材に比較して、強度、成形性が劣る点を、解析技術、成形・材料特性データを駆使しカバーする。その結果、アルミ部品は、軽量かつ鋼製部品と同等以上の性能を持つことが可能となる。解析事例として、図10に弾性解析により得られたアルミニウム合金製自動車用鍛造ロアアーム表面の応力分布を示す。過去に実施したアルミ製同種部品の実験データベースを活用し、解析上の境界条件及び降伏・破壊の精度の高い判定条件を用いることにより、通常手段による初期設計形状から更に8%軽量化を達成したものである。解析はすでにCADとリンクしており、設計時間の短縮も可能なものとしている。

つぎに、図11にスペースフレームの剛性解析モデルを示す。スペースフレームにアルミニウム製押出型材を利用することを想定して、このときの車体全体のねじり剛性や曲げ剛性を評価するためのソフトウェアを独自開発した。スペースフレームの全体剛性にはフレーム同士の結合部 (ジョイント) の局部変形が大きく寄与するので、この部分をシェル要素により詳細にモデル化しておく必要がある。そこで本ソフトウェアにおいては、初期設計において簡単に剛性評価ができるようにするために、結合部の基本寸法さえ入力すれば詳細モデルを自動的に作成できるようにした。これにより、解析時間は通常処理に比べて1/10以下になり、型材の最適配置を短時間で決定することが可能になった。

このように、当社では単なるアルミ部材製造だけではなく、部品設計も一部支援できる体制を取ってアルミ製品の適用拡大努力を行っている。

4. 材料の挙動解析

4.1 鋼材の疲労強度予測シミュレーション⁴⁾

古くから疲労強度に優れた鋼材の組織はいかにあるべきかに関して多くの研究がなされてきたが、いずれも経験的知識によるところが大きく、まだ普遍的な組織設計指針を得るには至っていない。そのため、新しい材料の開発は、長時間を要する疲労試験の試行錯誤的な繰返しに頼らざるを得ないのが実状である。このような問題を解決するひとつの手段として、当社ではシミュレーシ

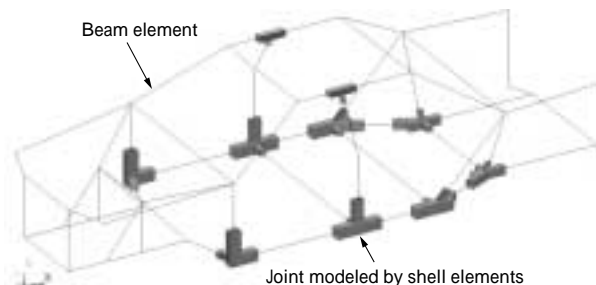


図11 スペースフレーム構造の簡易剛性解析モデル
Fig.11 Simplified analysis model for space frame structure

ンによって疲労強度予測を実施している。

本シミュレーションは連続分布転位論に基づいており、そのプロセスを示すと以下のとおりである。

図 12 に示すように、計算機内で乱数を用いて結晶粒を発生させる。

ある負荷応力範囲 に対して転位の総量が最大となる結晶粒を探し出し、ここに微小な初期き裂を発生させる。

このき裂先端の開口変位 $CTOD$ からき裂伝ば速度を求めて、き裂を伝ばさせる。

同時に、き裂前方に存在するすべり帯の先端の微視的応力拡大係数 K^m を求める。

すべり帯が粒界に達したとき、き裂が停留するか否かを判定する。この判定においては、 $CTOD$ 及び K^m がおのおの材料固有の限界値よりも小さい場合に、き裂は停留する（すなわち疲労限度になる）とした。この条件が満たされない場合には、すべり帯を次の結晶粒に進展させ、き裂も伝ばさせる（すなわちステップに戻る）。

本シミュレーションを用いて、10 種類の 400 ~ 800MPa 級の熱延鋼板（2 相及び 3 相組織）に対する疲労強度を

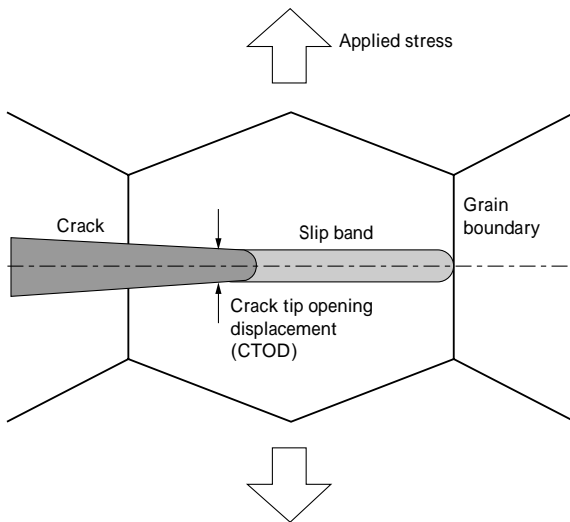


図12 疲労強度予測シミュレーションモデル
Fig.12 Simulation model for fatigue strength prediction

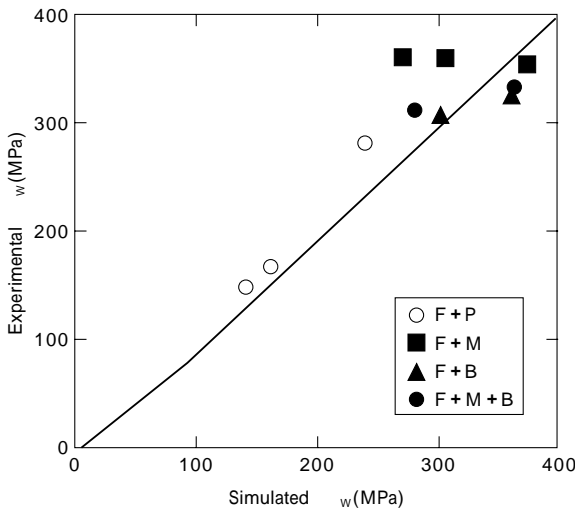


図13 疲労限度の予測値と実験値の比較
Fig.13 Comparison between analytical and experimental fatigue limits

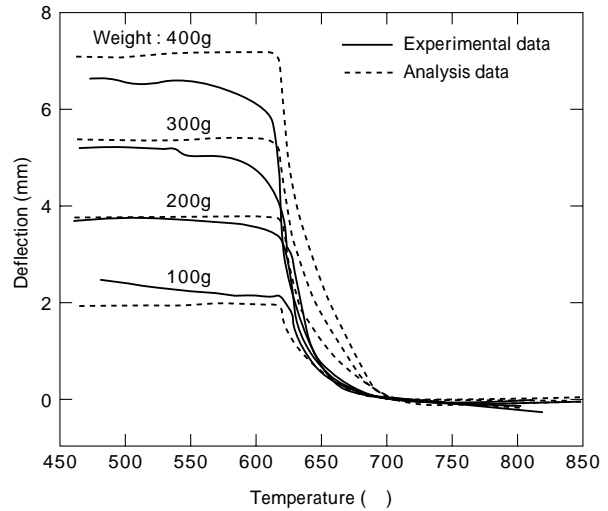


図14 変態超塑性による鋼片のたわみ挙動
Fig.14 Deflection behavior of steel piece during phase transformation

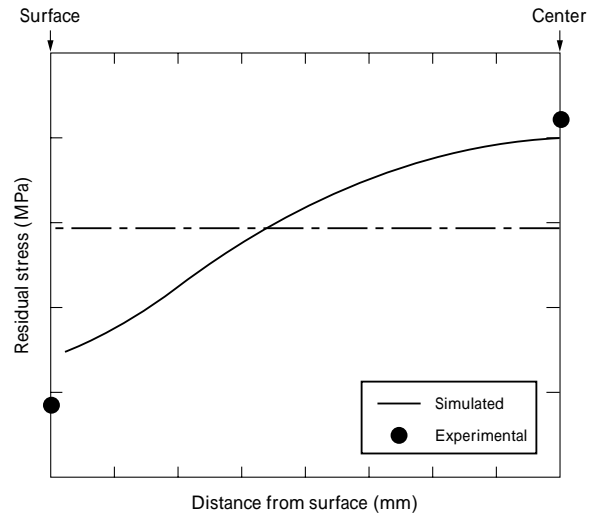


図15 残留応力の解析値と実験値の比較
Fig.15 Comparison between simulated and experimental residual stresses

予測した。シミュレーションにおいては実際の組織観察から得られたデータをもとに、結晶粒の統計的性質を与えている。図 13 には、この予測結果と実験結果との比較を示す。高強度側でやや差の大きいものもあるが、おおむね良好な一致をみている。

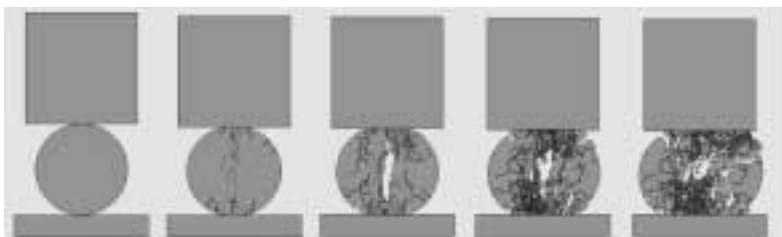
このように、シミュレーションによって疲労限度に及ぼす組織因子の影響を、良い精度で予測することが可能であり、新材料開発の一助となっている。

4.2 鋼板の相変態に伴う残留応力の予測⁵⁾

鋼板の製造時、水冷などによる熱処理プロセスにおいて相変態と熱応力が生じるが、これによって残留応力と変形が発生する。これらを小さくするように冷却方法を最適化することは永年の課題となっている。そこで、当社では鋼材の相変態を考慮した熱応力解析により、残留応力を精度良く予測できる手法を開発した。

まず、相変態時の力学的挙動を忠実に表現するための数学モデルを作成することを目的として、高温雰囲気中の鋼片の3点曲げ実験（荷重一定）を実施した。本実験においては、図 14 に示すように、温度を高温から徐々に降下すると、相変態開始温度になったときに試験片は変態超塑性現象（一種の軟化現象）を生じて一挙にたわ

図16 ぜい性材料円柱の崩壊シミュレーション
Fig.16 Breakage simulation of brittle cylinder



みが増加する。このたわみの経時変化から、変態超塑性ひずみと応力との関係を求め定式化した。そして、この関係式を弾塑性クリープ熱応力解析プログラムに新しく付加して計算することにより、相変態に伴う軟化現象も考慮した残留応力予測が可能となった。本法によれば、図15のように実測にかなり近い残留応力が得られる。以上のような解析を実際の冷却プロセスに適用するには、精度の高い温度予測も不可欠であり、このために熱伝達率など熱的な境界条件も現場で実測している。このようなデータを用いて上記の残留応力解析を実施することにより、冷却プロセスの最適化が図られている。

5. 今後の動向

これまで紹介したように、当社において構造解析は製品の強度設計に不可欠な技術として定着しており、ある意味では成熟技術とみなされている。しかし、設計のコストダウンと高度化に対する要求はますます厳しくなっており、これに応えるために研究開発を間断なく実施しているのが実状である。

当社において現在実施中の研究事例として、まず崩壊シミュレーションが挙げられる。これの狙いは、破碎機による岩石の破壊現象を忠実にシミュレートして装置設計に反映したり、鋼-コンクリート合成橋梁の耐荷力・耐久力をコンクリートのひび割れを考慮して精度良く求めることなどである。図16は、ぜい性材料の円柱供試体が圧壊する状況を、崩壊シミュレーションにより求めた結果である。本シミュレーションは非線形動的解析の一種であり、まず供試体を三角形要素で非常に細かく分割しておき、各要素間には非線形のパネを配し、パネに作用する力が限界値を越えた時に要素間の結合を開放するという計算を時々刻々行っている。この程度の単純な形状に対しては実測と崩壊荷重が良く一致することを確

認しており、実用化に向けてソフトウェアを整備中である。

また、CAD から FEM へのデータの受渡しを簡単にする（スムーズリンク）ための特殊な 3 次元ソリッド要素も開発した。この要素は、特殊な定式化を施しており、極めて偏平な板形状になっても、従来のように精度が劣化（剛性が実際よりも著しく大きくなる）しない。これにより、板構造の CAD データをほとんど加工せずに、迅速に構造解析することが可能であり、実設計に適用を開始している。

さらに、使い易さの追求も行なっている。例えば、油圧ショベルのアタッチメントの疲労強度や座屈の評価、あるいはケーブル系橋梁の非線形構造解析などをパソコンでごく簡単に実施できる設計ツールを保有しており、現在も機能の向上を図っている。

むすび = 橋梁、機械構造物及び材料分野における特徴的な構造解析事例を紹介するとともに、新しい技術の動向について触れた。本解説が、当社の構造解析技術の現状と将来を知るうえで参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 中川知和ほか：橋梁と基礎，Vol.35 (2001)，No.1，p.29.
- 2) 中川知和ほか：阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，(1996)，p.599.
- 3) 埴洋二ほか：橋梁と基礎，Vol.33 (1999)，No.1，p.15.
- 4) 横幕俊典ほか：日本機械学会論文集 (A 編)，Vol.63 (1997-10)，No.614，p.38.
- 5) 堤一之ほか：材料とプロセス，Vol.13 (2000)，No.5，p.1051.