

## 非線形構造力学

Non-linear structural mechanics

主任研究員：小川清六

分担研究員：楯列俊夫 中村康範 太田 修 小堀修身 前川佳徳

非線形構造力学の研究グループの3年目の分担研究テーマは、塑性加工、成形に関するものが3件、鋼骨組の弾性安定問題、超音波法による材料評価および溶接構造物の強度と変形の計4テーマからなっている。

塑性加工、成形に関するものの1つの弾塑性増分理論による応力、ひずみ解析では、複合材料の成形加工を多数の空孔を有する材料の変形問題としてとらえ、そのような材料の板材（多孔板）に巨視的な均一面内応力が作用した場合の応力、ひずみ解析を弾塑性有限要素法を用いて行っている。

板材プレス成形諸問題に関する研究では、クロス強化熱可塑性プラスチック板のプレス成形に及ぼす繊維密度の影響について実験的研究を行っている。（論文として発表済み）

成形加工に関するもう1つの研究は、弾塑性／超弾性有限要素法による大変形、接触問題のシュミレーションに関するもので、現在までに行ってきた超弾性有限要素法による熱可塑性樹脂板の真空・圧空成形過程シュミレーションのまとめを行い、弾塑性有限要素法については、金属のかしめ加工の評価への適用を行っている。

鋼骨組の弾塑性安定問題に関する研究では、本年度は頂部柱頭及び1層梁中央に定鉛直荷重が作用する2層1スパン鋼骨組模型の水平定変位振幅両振り繰り返し実験を行い、その結果を一次元複合非線形有限要素法を用い解析している。

超音波法による材料評価に関する研究は、塑性変形による弾性異方性の進展を超音波的に評価する種々の実験を行っている。

溶接構造物の強度と変形に関する研究では、最近船体構造用鋼材に従来型の高張力鋼よりも溶接性に優れているTMCP鋼が採用されつつあるがその鋼材のすみ肉溶接部の疲労強度に問題が発生し、それに関する一連の研究を行っている。

本年度は、試験片形状は昨年度と同様であるが、昨年度の荷重非伝達型のすみ肉継手に対し、本年度は、荷重伝達型のすみ肉溶接継手についてTMCP鋼と従来型高張力鋼の疲労強度、特性の比較検討を行っている。しかし昨年度の結果と同様両鋼材の疲労強度、特性の差は殆ど認められていない。

## 分担研究報告

### 溶接構造物の強度と変形

小川清六（工学部）

溶接構造物の強度と変形に関する研究では、船体構造用鋼材として最近使用されるようになった TMCP 鋼のすみ肉溶接部の疲労特性に関する研究を取り上げている。本研究は、TMCP 鋼を用いた実船で、比較的若い船齢で従来型の高張力鋼には認められなかった疲労き裂がすみ肉溶接止端部に多数発生しているのが認められ、その原因が問題となっていることから、TMCP 鋼母材並びに溶接継手の疲労特性を従来型の高張力鋼のそれと比較検討することを目的としたものである。

昨年度は、荷重伝達型十字すみ肉継手試験片を用い、軸荷重引張り片振り疲労試験を行って両材のすみ肉溶接部の疲労特性を比較検討した。その結果、両者には疲労強度、特性にはいずれも顕著な差は認められなかった。

本年度は、両材について荷重伝達型十字継手試験片を用い、すみ肉溶接部の疲労強度、特性の比較検討を試みた。疲労試験条件等実験方法は、昨年度の荷重非伝達型の場合と全く同様である。

疲労試験は、TMCP 鋼並びに従来型高張力鋼両材の十字継手試験片について、高荷重から低荷重へ数段階の荷重条件で、軸荷重引張り片振り繰り返し試験を破断に至るまで行い、S-N 曲線を求めて両者の疲労特性を比較検討した。その結果、昨年度行った荷重非伝達型の試験片の場合と同様、両者の疲労強度、特性には殆ど有意差は認められなかった。

昨年度及び本年度の実験結果から、船体構造用鋼材として TMCP 鋼を用いた実船のすみ肉溶接止端部に発生する疲労き裂発生原因を明らかにするには、十字型試験片を用いた軸荷重引張り片振り疲労試験のような単純な繰り返し荷重条件では不相当であって、実船における荷重状態に近い疲労試験すなわち十字型あるいは T 型継手試験片による曲げ疲労試験を行う必要があると考えられる。

従って、来年度は、すみ肉継手試験片を用いた曲げ疲労試験を行うことによって TMCP 鋼すみ肉溶接止端部の疲労特性を求め、従来型高張力鋼のそれと比較検討することを予定している。

### 板材プレス成形諸問題に関する研究

専門誌に論文掲載

著 者：大畑富相、中村康範（工学部）

論文名：クロス強化熱可塑性プラスチック板のプレス成形におよぼす繊維密度の影響

誌 名：第24回 FRP シンポジウム講演論文集

## Abstract

Different warp to woof ratio of fiber density of glass cloth in TP composite sheet is used for deep drawing forming. The higher warp to woof ratio tends to make bending-type wrinkles in the part of the sheet having a 0 degree fiber angle, and bucking-type wrinkles in that of 90 degree. It also makes the shear deformation concentrated in the part having 45 degree fiber angle. Alternatively stacked sheet has higher formability than monotonously stacked sheet because of less wrinkle occurrence.

**Key Words** : FRTP, Glass cloth, Press forming, Fiber density

## 鋼骨組の弾塑性安定問題

太田 修 (工学部)

頂部柱頭及び1層梁中央に定鉛直荷重が作用する2層1スパン鋼骨組模型の水平定変位振幅両振り繰り返し試験及び試験に関する数値解析

一般的に、矩形ラーメンの局所梁に作用する横荷重の増大は、載荷梁に大たわみを生じさせるのみに留まらず、骨組全体を崩壊させる場合がある。この種の崩壊挙動の一つ「腰くびれ横揺れ型」では、載荷梁に隣接する左右上下の柱部材が骨組内部に引き込まれる腰くびれ変形の進行中に、横揺れ変形が発生、成長し、骨組が崩壊する。一方、水平方向の繰り返し載荷に対して骨組の安全性を危惧する耐震工学上の指摘がある。この指摘を考慮した、繰り返し載荷を導入した数値解析は、過大な横荷重が作用していなくても梁の大たわみに起因する骨組の劣化現象があることを示している。

本年度は、骨組頂部の左右柱頭に等しい定鉛直荷重と1層梁中央点に一定横荷重が作用する左右対称な2層1スパン鋼骨組模型に対して、2層梁中央点水平変位を制御する定振幅両振り繰り返し試験を、劣化現象及びシェークダウン現象を呈する2個の場合について行った。予め、一次元複合非線形有限要素法を使用して数値解析を行い、定荷重の組み合わせ及び定変位振幅が異なる骨組模型の2個の数値解析モデルはそれぞれ、劣化現象、シェークダウン現象を呈することを予測した。なお、劣化現象を呈した数値解析モデルでは、1層梁中央点の一定鉛直荷重の効果で、繰り返し載荷前に1層梁中央上下縁付近に僅かに降伏域を発生させている。

得られた結論を以下に示す。

(1) 2個の標記の試験から得た骨組の終局的挙動は、数値解析の予測通り、骨組頂部水平反力絶対値の最大値が低下する劣化現象と、ほぼ同一なループに釣合径路が収束するシェークダウン現象を呈した。なお、劣化現象は実験の方が早朝のサイクルで現れる。

(2) 左右対称条件を有する試験であったから、劣化骨組の挙動は第1層横揺れ変位のサイクル毎の逆対称成分の成長に特徴付けられる分岐状現象を呈したといえる。この逆対称成分の発生、増大は、骨組の変形形態が直線的な1次モードの変形から弓形モードの変形へ移行するこ

とを意味しており、その成分の符号は弓形モードが脹む方向を決定している。なお、この符号は試験結果と数値解析結果では異なっていた。

(3) 劣化現象を呈した骨組は、1層梁の大たわみに伴う腰くびれ変位の増大に誘発され、第1層横揺れ変位のサイクル毎の逆対称成分を成長させながら、崩壊に至る。載荷様式は前年度までの扱いと異なるけれども、この崩壊は基本的には「腰くびれ横揺れ型」に属するといえる。

## 弾塑性／超弾性有限要素法による大変形・接触問題のシミュレーション

前川佳徳（工学部）

高精度・高品質製品への要求に応えるために、その成形検討に非線形構造力学を応用した成形シミュレーションが広く用いられるようになってきている。本研究は、実際の成形に適用して、シミュレーション上の問題点を明確にするとともに、解の信頼性を保障しながら簡易的に取り扱えるモデルを見いだすことを目的としている。

今年度は、これまで行ってきた超弾性有限要素法による熱可塑性樹脂板の真空・圧空成形過程シミュレーションのまとめを行い、弾塑性有限要素法については金属のかしめ加工の評価への適用を行った。また、超弾性有限要素法を、女性の胸部のブラジャーによる好適補整のためのシミュレーションに適用することも始めた。

これらに必要な手法は、材料非線形、幾何学的非線形、境界非線形を取り扱う、非線形性の強い構造解析手法である。

### (1) 熱可塑性樹脂板の真空・圧空成形過程シミュレーション

長方形の熱可塑性樹脂板から正方形の底面を有する箱形を、ブロー、型突き上げ、真空引きで成形する真空成形過程と、ブロー、ドローダウン、圧空により成形する圧空成形過程を対象に取り上げた。

各成形過程のシミュレーション手続きと、素板温度分布が成形状態に大きな影響を与えるので、それを温度連成問題とせずに簡易的に取り扱い、かつ精度のよい解を得られる方法を提案した。さらに、成形品を好適板厚分布とするためのシミュレーション・システムも提案した。

成果は以下の2論文で公表され、さらに2論文を投稿中である。

前川・柳：真空成形過程のコンピューターシミュレーションのための材料挙動検討、成形加工（プラスチック成形加工学会誌）、6-11、781（1994）。

前川・柳：真空成形過程のコンピューターシミュレーションのためのモデル化検討、成形加工（プラスチック成形加工学会誌）、6-11、788（1994）。

### (2) 金属のかしめ加工の評価シミュレーション

各種軸形状の、かしめ加工に伴う頭部の変形状態と、かしめ対象の板の穴断面への荷重状態を、弾塑性有限要素法によるシミュレーションで求め、好適なかしめ軸形状の評価を行った。実験結果と評価は一致し、それをもとにシミュレーションでより好適な軸形状が提案された。

成果は論文で公表する予定である。

(3) 女性の胸部のブラジャーによる好適補整のためのシミュレーション

本テーマは、人体形状の変形や、それに伴って人間が受ける応力状態を評価する試みの最初の取り組みである。本研究での成形シミュレーションと分野は異なるが、超弾性有限要素法による大変形・接触問題で、材料定数を替えるのみで、同じ取り扱いができる。

超音波法による材料評価に関する研究  
(塑性変形による異方性変化について)  
小堀修身 (工学部)

多結晶材料の各種の巨視的性質には、主として集合組織によってタイプと程度の異なる異方性が生じ、機械的性質に関しても、弾性や塑性などの異方性について多くの研究がされている。これらのうち弾性異方性(弾性定数の異方性成分)は、超音波音速の伝播速度や偏り方向に影響を与える。最近では、塑性変形による超音波の音速変化は、弾性異方性の変化によるものと考えられて、超音波による弾性異方性の測定に基づき、集合組織や塑性異方性を非破壊的に評価する研究も行われている。

本年度は塑性変形による弾性異方性の進展を超音波的に評価するために次のような試料を用意し、実験を行った。市販のアルミ圧延板(JIS A16063)を、母材の圧延方向と平行な方向から、 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ の角度をなすように切り出して、それに塑性圧縮を加え、0%から2%毎に10%までの塑性歪みを与えた。そして、試料の厚さ方向および横方向に横波超音波を入射して、2横波の音速と偏り方向の変化を測定した。横波の偏り方向の測定は、モーターを介してトランスデューサを $5^\circ$ ずつ回転させ、音速の最大、最小を示す角度を読みとった。その結果、次のようなことが結論づけられた。

(1) 横波の偏り方向が圧縮方向と、これに直交する方向となっている $0^\circ$ 、 $90^\circ$ の試料では、塑性歪みを加えても偏り方向は変化しない。このときの2横波の音速は、 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ いずれに対しても、塑性歪みと共に直線的に変化する。

(2)  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ の試料に対しては、塑性歪みが増加するにつれて偏り方向が回転し音速は曲線的变化を示す。

(3) 進展する異方性の程度を弾性定数の変化としてとらえ理論的に伝播特性の解析を行った。アルミの初期異方性を直交異方性とし、進展する異方性を平面等方性と仮定した音速、偏り角の理論的な変化は実験結果をよく説明している。

このことから、歪みの小さな範囲では、塑性圧縮ひずみに比例して平面等方性が成長していると言える。

## 弾塑性増分理論による応力、ひずみ解析 楯列俊夫（工学部）

最近、種々の複合材料が開発され、その力学的性質を解析する必要がしばしば生じてきている。その材料では、添加物質が繊維状または固形介在物として複合材料内に存在している。一方、粉末成形においては、成形中、または成形加工後の材料内に空孔が存在する。

このように、数多くの空孔または介在物が存在する材料の力学的性質を解析しようとするとき、空孔、介在物、が材料内に規則的に分布していて、その材料に巨視的均一応力が外力として作用しているモデルを考え、その解析が行われる。そして、微視的には不均一な材料を、巨視的に均一材料として取扱い、その材料の巨視的な弾性係数、降伏応力、変形能などと関連づけることによって、材料の機械的性質の改良などのアプローチが可能となる。このとき、有限要素法によるのが適切であるが、効率的な手法がまだ提案されていないようである。すなわち、空孔、介在物など材料内の分布の繰り返しの最小形状に有限要素法を適用しようとするとき、その境界条件の取扱い方は複雑であり、著者の知る限りでは、これについて研究されたものはない。

このような三次元問題を取扱う前の段階として、板材の変形などの二次元問題について考えるのが妥当である。著者は、規則的に配列された多数の穴をもつ板材（ここでは単に多孔板と呼ぶ）の成形性の実験を行っている。その深絞り実験結果より、ポンチ肩付近の多孔板の単軸引張りによる材料抵抗力、およびフランジ部の円周方向圧縮応力による変形挙動は成形性を大きく左右することがわかった。したがって、理論的アプローチの一つとして、その変形挙動を解析するのが重要な課題となり、面内2軸応力下での多孔板の変形の解析を試みた。これまで、板材の引張り試験片の平行部中央に円孔がひとつだけある場合の単軸引張りの有限要素法は、境界条件が簡単であり、すでに研究されている。穴を格子状に配列した多孔板で、かつ外力の主応力軸と穴配列の対称軸とが一致する場合には、穴配列の繰り返しに関する材料形状の最小部分のみについて解析することは、前述の試験片の単軸引張試験の場合と同じになる。一方、格子状配列でない場合または主応力軸と穴配列の対称軸が一致しない場合には、その取扱いは複雑になる。例えば多孔板の対称軸と $\theta$ の角をなす方向に引張る場合の有限要素法の境界条件は簡単ではない。

本年度は穴、介在物などが規則的に配列された板材に巨視的な均一面内応力が作用した場合の弾塑性有限要素法の増分的取扱いを、穴、介在物などの繰り返しの最小形状の材料部分に適用する手法について研究を行った。その基本となる考え方は、境界条件の取扱いであり、ここでは三角形要素を用いたが、三角形要素以外の四角形要素、その他の要素形状、剛塑性有限要素法にも適用できる。