

## 非線形構造力学

Non - linear structural mechanics

主任研究員：楯列俊夫

分担研究員：太田 修 小堀修身 森脇良一 福井 毅 前川佳徳

左右対称な2層1スパン鋼骨組模型に対して、頂部左右節点に等しい定鉛直荷重と、1層梁中央点に（局所的に損傷を与える素因となる）一定横荷重を作用させた、両振り繰り返し試験を行った。本年度は、試験を同定するため、5ケースの数値解析を一次元複合非線形有限要素法を用いて解析した。そして、頂部節点水平力と対応水平変位で表される釣合経路曲線、繰り返し毎に特徴付けられる応答状態量（水平反力、腰ぐびれ変位、横揺れ変位の対称成分、横揺れ変位の逆対称成分）と繰り返し数の関係として数値解析結果を整理し、実験結果と比較検討した。

鋼板を溶接した中心圧縮材に圧縮力が作用する場合の連成不安定現象について、弾塑性有限変位解析の数値結果を基に、連成不安定現象が進展して崩壊に至る過程で生ずる直ひずみの変化に着目した崩壊モードを8分類する方法を提案し、これらを類型化する意義や崩壊判定基準を明らかにするために、初期圧縮力判定係数（ $\alpha_1$ ）、最終圧縮力判定係数（ $\alpha_2$ ）および直ひずみ判定係数（ $\beta$ ）を定義し、数値パラメトリック解析を行い崩壊モードの発生順序を論理的に示し判定法の妥当性を調べた。製作時の初期たわみの波形形状（sin波、cos波）による極限耐荷力や判定結果に及ぼす影響は小さく、溶接による残留応力を最適化した離散化モデル（有限要素法）に導入するには、メッシュ分割と断面内不平衡力についてさらに検討を加える必要があることなどがわかった。

プレス加工によって複雑な形状の製品を成形するとき、最適なブランク（板素材）の形状を求めることが加工の第1段階での重要な課題となる。最適なブランク形状を求めるため、弾塑性有限要素法（非線形有限要素法）による最適化手法の可能性を調べた。製品の板厚の最少の部分の板厚寸法を目的関数にとり、パラメータを種々変えて得られるブランクを用いて成形したとき、目的関数が最大の値をとる条件を求めた。また、実験ではパラメータの値を等分割して規則的に変化させる「格子法」（または「格子探索法」）を適用した。

人体の変形の非線形構造力学的取り扱いとその応用について、バストの変形、ウエスト部の変形等の研究を行った。解析には対象とする人体各部の材料特性値が必要で、その同定手法を確立するとともに、変形に伴う圧迫感の評価についての検討も行った。今年度の目標は、人体各部の材料特性値と、変形に伴う圧迫感のデータベースを確立することであり、そのために超弾性体の大変形シミュレーションを活用した。また、新たに臀部の変形解析にも取り組み、それを椅子の座り心地評価に応用する研究も始めた。ここでは、臀部を超弾性体とし、椅子を剛体として、椅子と臀部の接触・大変形解析を行って、接触面で

の荷重分布を求め、それを用いて座り心地を評価している。

円板、円筒型板、V型切り欠き試験片などに、超音波を斜めに入射ときの音波の動きを可視化して観察した。平板に横波を $\alpha = 12^\circ$ 、 $21^\circ$ の2種の入射角を与えて実験し、 $\alpha = 21^\circ$ では良好な写真が撮影できることがわかった。その理由はいまのところ不明である。入射と屈折についてはSnellの法則にほぼ従っていることもわかった。

パルスエコーオーバーラップ方法と呼ばれる2つのパルスを重ね合わせて周波数の違いから音速を測定する方法について、2つのパースト波を用いる方法について研究した。一方は、試料中を伝播し背面で反射する波と、他方は試料表面で反射する波の2つを取り出してオーバーラップさせる方式である。2つの波の位相差をなくすように周波数を調整するとき、周波数変化が音速と伝播距離の変化の和として得られる。実験では、アルミ丸棒から垂直に切り出した試料について切断面の音速分布を求め、棒の内部に発生している初期残留応力を調べた。測定対象の厚さが一定の時は音速変化が応力和と容易に関係づけられ、スキャン範囲を広くして測定間隔を細かくとることが可能であることなどがわかった。

## 弾塑性増分理論における応力、ひずみ解析 楯列俊夫（工学部）

プレス加工によって複雑な形状の製品を成形するとき、最適なブランク（板素材）の形状を求めることが第1段階での重要な課題となる。現場では、ブランクの形状を種々変えて実加工し、試行錯誤で成形できるブランク形状を探している。このようにして得られたブランク形状は、単に製品にしわ、破断が生じないだけのものであり、決して最適な条件のものではない。

現状では、最適なブランク形状を求めて加工することはほとんどない。それはしわ、破断がなければ製品として支障はなく、最適なブランクによって加工しようとするのは、試行錯誤の加工のための時間、材料が無駄であると考えられている。一方、コンピュータの本体の安価、計算の高速度化は著しく、シミュレーションを用いた最適化手法が有効と考えられるようになってきている。ここではその可能性を検証するために研究を行った。またこの結果を実験と比較した。材料は0.5mmのアルミニウム板であり、ブランク形状は正方形ブランクの3隅をコーナカットし、そのコーナカット量をパラメータにとった。製品形状はドイツ機械学会のベンチマークテストに提案されている自動車タイヤハウスとした。シミュレーションソフトは弾塑性有限要素法（非線形有限要素法）である。板厚の最少の部分の板厚寸法を目的関数にとり、パラメータを種々変えて得られるブランクを用いて成形したとき、この目的関数が最大の値をとる条件を求めるのがここでの課題となる。具体的には、タイヤハウス製品には3カ所の突起部があり、この突起部で破断が生じたり、肉厚が極端に薄くなったりする。この部分の肉厚減少が最も少ないもの、すなわちこの部分の肉厚が最も大きい製品を作成できるブランク形状が最適条件となる。

コンピュータシミュレーションによる最適化手法にはスリーピング-シンプレックス法

を用いた。これは、3隅のコーナカット量のパラメータの値を変化させて最適なパラメータの組み合わせを探すのに、試行錯誤の回数をできるだけ減少させるための手法である。

一方、実験ではパラメータの値を等分割して規則的に変化させ、あらゆる組み合わせについて実験した。3つのパラメータを3次元空間であらわすとき、パラメータの組み合わせは3次元空間での点で表示できる。この点は3次元空間で格子状を形成するので「格子法」または「格子探索法」と呼ばれている。実験では各パラメータについて4種類で、計  $4 \times 4 \times 4 = 64$ 種類のブランクについて実験した。

## 鋼骨組の弾塑性安定問題

太田 修 (工学部)

### 繰り返し水平荷荷を受ける骨組模型試験に関する数値解析

平成9年度まで、左右対称な2層1スパン鋼骨組模型に対して、頂部左右節点に等しい定鉛直荷重と1層梁中央点に(局所的損傷を与える素因となる)一定横荷重を作用させた後、頂部水平変位を準静的に制御して定振幅、あるいは漸増型定振幅を与える両振り繰り返し試験を行ってきた。繰り返し毎に塑性変形が増大し1層梁の大変形を伴う骨組全体の劣化現象やその他の特徴ある諸現象が観察され、また諸現象の生成過程が分析されている。

本年度は、試験を同定する数値解析を5ケースについて行った。この種の現象の特性を検出でき得るとされる一次元複合非線形有限要素法に基づくプログラムを使用する。数値解析が示す骨組の挙動特性を検討すること、数値解析と実験の結果を比較してプログラムの骨組挙動予測性能を調べることが研究の目的である。有限要素は単純梁型の梁柱とし、剛体運動座標を用いる。骨組模型の数値化は、形状には実測寸法を用いて行い、要素断面では、実際断面と等価になる4個の条件を導入し4質点断面として行った。応力ひずみ関係には、材料試験結果に基づいてbi-linear型の近似を行い、これを導入した。解析における荷荷手順また荷荷の制御は実験と同じである。

数値解析結果を、頂部節点水平力と対応水平変位で表される釣合経路曲線また繰り返し毎に特徴付けられる応答状態量(水平反力、腰くびれ変位、横揺れ変位の対称成分、横揺れ変位の逆対称成分)と繰り返し数の関係として整理し、実験結果と比較検討して以下の知見を得た。

- (1) 解析で観察される“水平変位繰り返し荷荷時に生じる腰くびれ横揺れ崩壊”  
“シェークダウン状の現象”そして“荷荷梁の大たわみを伴わない骨組の劣化現象”は、対応する実験での結果と同じような挙動特性を有している。
- (2) (1)のことから、試験結果はこの種の問題を扱う数値解析プログラムを検証するためのbench mark testとして使用できる。
- (3) 接合部、応力ひずみ関係、有限要素断面の質点化らに関してそれらのモデル化を更に工夫する必要がある。

これらの内容は、大村厚二(大学院生)・太田修の共著で「繰り返し水平荷荷を受ける

骨組模型試験に関する数値解析」と題し日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、B-1・構造Ⅰ、1998.9に発表した。

## 超音波による材料評価に関する研究 小堀修身（工学部）

本紙p. 1に論文掲載。

## 中心圧縮材の連成不安定現象に関する研究 森脇良一（工学部）

これまで鋼板を溶接した中心圧縮材に圧縮力が作用する場合の連成不安定現象については、極限耐荷力のみに着目しており、座屈問題の詳細な解明がなされていないのが現状である。その中でDast Rio12では、箱形断面部材を板および柱として個々の極限耐荷力を求め、連成座屈を評価している。この連成不安定現象の解明には実験的研究では困難であり、数値解析に基づく手法が最適と考えられる。

そこで本研究では、弾塑性有限変位解析の数値結果を基に、連成不安定現象が進展して崩壊に至る過程で生ずる直ひずみの変化に着目した崩壊モードを8分類する方法を提案し、この類型化するための意義や判定基準を明らかにするために、初期圧縮力判定係数（ $\alpha_1$ ）、最終圧縮力判定係数（ $\alpha_2$ ）および直ひずみ判定係数（ $\beta$ ）を定義し、両端固定のスレンダー箱形断面中心圧縮材について弾塑性有限変位解析を実施し、その解析結果を基に崩壊モード判定係数 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta$ について数値パラメトリック解析を行い、崩壊モードの発生順序を論理的に示し、判定方法の妥当性を明らかにしてきている<sup>1),2)</sup>。

平成10年度は、両端固定の箱形断面中心圧縮材について、製作時における初期不整量の弾塑性有限変位解析への導入方法について検討した。また汎用構造解析プログラムを用いて本解析法の検証も行った。

- (1) 製作時の初期たわみの波形（sin波、cos波）による極限耐荷力や判定結果に及ぼす影響については小さい。
- (2) 溶接による残留応力を最適化した離散化モデル（有限要素法）を導入するには、メッシュ割と断面内不平衡力についてさらに検討を加える必要がある。
- (3) 汎用構造解析プログラムを用い、極限耐荷力については初期不整量を考慮しない場合は良く一致し、本解析法の検証ができた。

これらの両端固定柱の初期不整量の影響については、まだ十分解明できておらず今後さらに研究を進める予定である。

- 1) 工藤哲夫・森脇良一「薄肉断面圧縮材の連成不安定現象に関する研究」日本計算工学講演会論文集第1巻、第2号（1996.5）

- 2) 工藤哲夫・森脇良一「スレンダーな箱形中心圧縮材の連成不安定現象の判定手法」鋼構造年次論文報告集第5巻(1997.11)

## 切欠き平板の非破壊応力測定

福井 毅 (工学部)

「超音波伝播挙動の観察」というテーマで10年12月に電子科学研究所における「構造物の非破壊検査に関するシンポジウム」なる講演会にて報告されている。

その内容は平板、円筒型板、V型切欠き試験片などに超音波を斜入射したときの音波の動きを可視可して観察したものである。平板に横波を $\alpha=12^\circ$  または $21^\circ$  斜むけた波を入射した場合には $\alpha=21^\circ$  斜むけたときの方がはっきりした写真がとれたがその理由はまだわからない。また入射と屈折に対してはsnellの法則にほぼしたがっていることもわかりました。

## 人体変形の非線形構造力学的取り扱いとその応用

前川佳徳 (工学部)

本研究の最初の取り組みは、平成3年度の「弾塑性／剛塑性有限要素法による鋼材の大変形シミュレーションおよび粘弾性／粘塑性有限要素法による熱可塑性樹脂板の大変形シミュレーション」であった。熱可塑性樹脂板の成形シミュレーションでは、厳密には熱可塑性樹脂板を粘塑性体として解析しなければならないが、計算手間と解の信頼性から、現実課題に適用することは困難で、超弾性体としてモデル化することを試み、実務的にはこの方が有用であることを示した。

平成4、5年度は、本研究組織での研究は休止し、平成6、7年度には「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」という課題に取り組んだ。ここでは、超弾性体モデル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を実務に適用する手法を確立し、さらに同様の手法を人体の変形シミュレーションに応用することを始めた。人体変形シミュレーションは、人体を超弾性体モデルとし、人体と物との接触に伴う人体側変形を解析するもので、材料定数を変えるだけで熱可塑性樹脂板での手法と同じ取り扱いができる。最初の取り組みは、ブラジャーによる女性のバストの変形解析で、その好適補整に適用することを狙いとした。また、人体側が受ける応力状態等と心地を関係づけ、着け心地を評価することも試みた。

平成8年度は、研究課題を「人体の変形の非線形構造力学的取り扱いとその応用について」として、バストの変形、ウエスト部の変形等の研究を行った。ここで、解析には対象とする人体各部の材料特性値が必要で、その同定手法を確立するとともに、変形に伴う圧迫感の評価についての検討も行った。平成9年度は、本研究組織での研究は休止し、平成

10年度（今年度）は平成8年度の課題を継続して行った。

今年度の目標は、人体各部の材料特性値と、変形に伴う圧迫感のデータベースを確立することで、そのために超弾性体の大変形シミュレーションを活用し、計画どおりの結果を得ることができた。この成果は、当研究室の大学院生、西島千春君の修士論文（1998年度）「圧覚による心地評価のための人体特性値の同定について」にまとめられている。

また今年度は、新たに臀部の変形解析にも取り組み、それを椅子の座り心地評価に応用することも始めた。ここでは、臀部を超弾性体とし、椅子を剛体として、椅子と臀部の接触・大変形解析を行って、接触面での荷重分布を求め、それをを用いて座り心地を評価している。この研究成果の中間報告は、以下に報告した。

前川、河崎、西島、加藤：仮想空間での椅子の使い心地を評価するバーチャル・ヒューマンの構築，情報処理学会第57回全国大会後援論文集，4，pp.180-181,1998.