

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

鋼骨組の弾塑性安定問題として、平成10年度まで、多層多スパン鋼骨組を構成する部分としての2層1スパン鋼骨組模型に対して、水平変位を制御して定振幅で繰り返し載荷させ、実験および数値解析を行ってきた。本年度は4層1スパン、および3層2スパン模型を対象とした。4層1スパン模型に対して、1層目の損傷梁の中央断面付近が全断面曲げ降伏に近い応力状態になるよう一定横荷重を載荷し、軸力比が0.330および0.405となるよう左右対称となるよう定鉛直荷重を与える2タイプの荷重モデルについて定振幅水平変位制御の繰り返し試験を行った。

中心圧縮材料の連成不安定現象に関する研究では、圧縮材の柱としての部材曲げと構成材の局部曲げとの連成作用と両者の因果関係により複雑な崩壊メカニズムを呈する連成不安定現象の弾塑性有限変位解析を行ってきた。本年度は中心圧縮材を構成する銅板の有効幅厚比（ R ）の大きな領域について調べ、 R が大きくなると極限耐荷力の解が収束するためには離散化モデルの最適なメッシュ割が必要であること、断面内の残留応力分布は、自己平衡状態と仮定して導入するが、解析モデルの影響を適切にすることで対処できること、 R の大きな領域では板の局部曲げの座屈のモードが卓越することなどを明らかにした。

塑性加工の代表的加工法はプレス加工であり、最近は特に産業界のコスト低減の要求が強くなり、その一手段としてこれまで鋳造、熱間鍛造で生産されていた部品を、常温でプレス加工することによって生産性を上げ、コストダウンしようとする動きがある。その解析方法は、鍛造に対しては剛塑性理論が、板成形に対しては弾塑性理論が適用されている。その混合型には、弾塑性理論を適用するのが効果的と思われるが、いまの時点では、その変形挙動が解明されておらず、本年度の研究では、厚肉の板材を絞り加工して、後工程で鍛造加工することによって効率よく成形することを目的とした。その基礎研究として、トラクトリクスダイスによって厚肉板材の成形限界を調べた。

人体変形の非線形解析では、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接触大変形を取り扱っている。これまで、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してきた。ここでは、臀部を超弾性体とし、椅子を剛体（あるいは弾性体）として、椅子と臀部の接触・大変形解析を行い、接触面（座面）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。今年度は、人体変形解析手法と材料特性値の妥当性を検証するため、椅子による臀部の変形を例に取って、実験との比較検討を行った。

実験では、圧力シートを用いて、椅子と被験者の臀部との接触面（座面）での荷重分布を求め、解析では同じ状況をシミュレーションした。

平板の非破壊応力測定、材料評価に関する研究では100mm×100mm×20mmの正方形板の周囲の1辺に、深さ30mm、幅1mmの切り欠きをもつ試験片に応力を与えて超音波測定を行った。その結果切り欠き部の応力が大きくなれば、超音波の切り欠き部での速度も大きくなり、切り欠き部での超音波の反射角も変化することがわかった。

異方性材料・非線型材料の応力、ひずみ測定と材料評価については、本年度は異方性材料の代表例としてグラスファイバー強化繊維（GFRP）を取り上げた。供試材に単軸負荷を与えて、負荷による音速変化（音弾性効果）を調べ、その結果少しばらつきがみられるが、音弾性則が仮定できること、縦波、および2つの直交する方向に偏る横波の音弾性定数はいずれも負であることなどが判明した。

弾塑性ひずみ増分理論における応力、ひずみ解析

楯列俊夫（工学部）

塑性加工の代表的加工法はプレス加工であり、その成形は板状の材料を対象とした板金成形と、金属塊をプレス加工する鍛造加工に大別される。最近は特に産業界のコスト低減の要求が強く、その一手段としてこれまで鋳造、熱間鍛造で生産されていた部品を、常温でプレス加工することによって生産性を上げ、コストダウンしようとする動きがある。板材料の成形では、絞り加工によって材料の径を小さくしてコップ状の成形を行うため、プレス機械の圧力は小さくても大きな変形を与えることができる。一方、鍛造加工では材料に大きな変形を与えるためには大きな圧力が必要である。そのため、金型の強度不足が加工の限界となっていて、金型の割れ、磨耗が問題となっている。この変形中の応力、ひずみを解析することは、金型の寿命、プレスの精度を検討する上に欠かすことはできない。その解析方法は、鍛造に対しては剛塑性理論が、板成形に対しては弾塑性理論が適用されている。その混合型には、弾塑性理論を適用するのが効果的と思われるが、いまの時点では、その変形挙動が解明されておらず、第一ステップとして実験により破断、しわなどの変形挙動を調べる必要がある。

そこで、本年度の研究では、厚肉の板材を絞り加工して、後工程で鍛造加工することによって効率よく成形することを目的とした。その基礎研究として、厚肉板材の成形限界について調べた。従来厚肉の板材の絞り加工は、円錐ダイスが用いられてきた。本実験でも、まず、45°、60°の円錐ダイス（しわ押さえ面の頂角が45°または60°）によって、4、6mmの熱間圧延銅板、冷間圧延アルミ板の4、6、8mm材料の絞り加工を行った。ブランクについては、旋盤によって直径122mmの円板状に外周を切削した。

実験は直径122mmのブランクをダイスの上に置き、しわ押さえを用いないで、直径48mmのポンチをダイス穴に押し込むことによって絞り成形を行った。その結果、円錐ダイスではすべての材料で、成形途中材料のポンチ底部で破断が生じた。

次に新しい方法として、トラクトリクスダイスを用いた。トラクトリクスとは、板材料が絞り込まれるとき、常に材料の外周部のみがダイスと接しているという条件から得られ

る数学的な形状であり、ベル形の形状のダイスである。円錐ダイスでは破断が生じたすべての板材に対して、トラクトリクスによる実験では破断が生じないで絞り加工を続行できた。しかし、摩擦力が大きくなり、ダイスと材料の間でスキップスリップが生じ、絞り加工中大きな摩擦音が発生した。そのため、潤滑剤の影響の大きいことが判明し、パラフィン系オイル、ワセリン、二硫化モリブデンなどの潤滑剤を用いた。最終的に二硫化モリブデンによる潤滑が厚板の絞り加工に適していて、トラクトリクスダイスを用いると、ここでのすべての板材で絞り加工できることがわかった。

鋼骨組の弾塑性安定問題

太田 修 (工学部)

「局所梁に大たわみを伴いながら繰り返し水平载荷を受ける多層多スパン鋼骨組の全体崩壊」

平成10年度まで、多層多スパン鋼骨組を構成する部分としての2層1スパン鋼骨組模型に対して、頂部の水平変位を制御して定振幅で繰り返し载荷させ、且つ定振幅を漸増させる実験と数値解析を行ってきた。载荷の進行に従って、局所梁の損傷度合の成長や、定鉛直荷重による重力の2次効果が、骨組の崩壊進行過程に及ぼす影響について検討し、その成果は既に報告してきた通りである。

本年度からは、多層多スパン骨組を研究対象にする。第一に、既応の部分骨組が呈した崩壊の諸特性は多層多スパン骨組内の部分骨組でも生じ得るか、また生じる場合、それは骨組全体を崩壊せしめる原因に成り得るかについて検討する。第二に、全体崩壊に至るとすれば、それはどのような変形生成の過程を経由していくのか、逆に言えば、シェークダウンするならば、部分の骨組が崩れてからの局部崩壊の拡がり、どの程度に留まるのかについて検討する。

多層多スパン骨組供試体の形状は、4層1スパンと3層2スパンの骨組模型とする。骨組模型全体の寸法が前年度までより大きくなるため、試験装置を以下のように新設・改良した。反カフレームを口の字形にして大型化し、新しく製作した。試験ベースプレートの大型化に伴い、供試体頂部の各々の柱頭に作用する定鉛直荷重、局所梁に作用する一定横荷重また頂部に作用する制御水平変位の3つの载荷装置について、それぞれトーナメントの取り合いを改良した。また変位量、ひずみ量の計測における多点化について工夫した。

先ず、4層1スパン鋼骨組模型について、T4シリーズとして実験を計画した。T4-1、T4-2試験ともに、損傷梁は1層梁とし、その中央断面付近が全断面曲げ降状に近い応力状態になるように、所定の一定横荷重を载荷した。4層頂部の各柱頭には、軸力比がT4-1、T4-2に対してそれぞれ0.330、0.405となる左右が等しい定鉛直荷重を与え、この試験条件で、12回の繰り返し毎に漸増する定振幅水平変位を制御して、試験を行った。T4-1では小さい定振幅から、T4-2ではそれより大きな定振幅から試験を開始した。なお、旧反カフレームを使用した。

試験結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 水平変位の繰り返し毎に生成される逆対称変形成分の増分と腰くびれ変形成分の増分が、ほぼ等しく生成される挙動を呈するときは、骨組は安定化の方向に向かい、収束的なシェークダウン状の挙動となる。
- (2) 逆対称変形成分の増分が腰くびれ変形成分の増分より大きくなる挙動を呈するようになると、逆対称変形成分が生成されている方向の水平載荷では損傷梁下の層間変位が、逆方向載荷では損傷梁上の層間変位が、ともにそれぞれの他の層のそれらより大きくなる。

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）

薄肉中心圧縮材に圧縮力が作用する場合の弾塑性連成不安定現象は、圧縮材の柱としての部材曲げと構成板の局部曲げとの達成作用と両者の因果関係により複雑な崩壊メカニズムを呈する。この達成不安定現象の解明には実験的研究では困難であり、計算機の性能向上や構造解析の進歩に伴う数値解析適手法が有効な手段と考えられる。

本研究においては、中心圧縮材の3次元離散化モデルを対象とし、軸力として強制変位を与えて弾塑性有限変位解析を行い、崩壊過程における直ひずみに着目し崩壊モードを8つに分類する方法を提案し、両端固定のスレンダーな箱形断面中心圧縮材について、柱としての関連細長比（ λ ）を一定としたときの崩壊モードの発生順序を論理的に示し、本手法の妥当性について検証した。このスレンダーな中心圧縮材は柱の崩壊挙動を呈し、いわゆる連成不安定現象の内、全体座屈から部材曲げ優勢座屈の発生しやすい領域について研究を主として進め、また、製作時における初期不整量としてのたわみ波形および残留応力の導入方法についても検討してきている。

平成11年度は、鋼構造物の大型化に伴う箱型断面中心圧縮材が多く用いられている現状を踏まえて、中心圧縮材を構成する鋼板の有効幅厚比（ R ）の大きな領域、いわゆる構成板の局部曲げ主要因とする崩壊挙動を示す領域について検討を加えた。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 有効幅厚比（ R ）が大きくなると、極限耐荷力の解が収束する離散化モデルの最適なメッシュ割りが必要であることが明らかになった。
- (2) 断面内の残留応力分布は、自己平衡状態と仮定して導入するが、解析モデルの断面分割を適切にすることでその影響が小さいことが明らかになった。
- (3) 有効幅厚比（ R ）の大きな領域では板の局部曲げの座屈のモードが卓越することが明らかになった。

今後、箱型断面を有する中心圧縮材の連成不安定現象の崩壊過程における断面内の応力や歪みおよび変形状態の詳細な分析を行い、崩壊モードの類型化について研究を進める予定である。

平板の非破壊応力測定、材料評価に関する研究

福井 毅（工学部）

この超音波の可視化装置（非破壊応力測定）では今までガラス系材料の内部に生じた残留応力をいろいろな学会でも測定されてきているし、私も測定してきている。しかし今回は無応力に近い切欠きをもつガラス試験片を作成し、その試験片に曲げの力を加えて、切欠き部に生じた応力と超音波の関係を測定しようとした。試験片としてガラス材料（パイレックスガラス）で10cm × 10cm厚さ2 cmの正方形板の一方の周辺の中央に深さ10mm、幅1 mmの切欠きをもつ板を作成して、曲げ応力を加えて応力を測定しようとした。ところが、ガラス材料では大きい力を加えるとガラス材が壊れてしまい、思うように切欠き部の近くに応力を生じさせることができなかった。そこで次に10cm × 10cm × 2 cmの板に切欠き部として深さ30mm、幅2 mmをもつ正方形板を作成し、切欠き部に応力を生じさせて、その応力に超音波を与えて、応力の大きさを測定した。測定は一応できたが学会の発表には間に合わなかった。

測定した結果、引張り応力が大きくなるほど

- a. 超音波の速度がわずかであるが減少する
- b. また切り欠き部で反射した波も反射して切欠きに近づく

ことが観察できた。

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）

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接触大変形を、非線形構造力学的取り扱いで行う試みをこれまで検討してきた。解析には対象とする人体各部の材料特性値が必要で、昨年度は、そのデータベースの確立を行った。また昨年度は、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を始めた。ここでは、臀部を超弾性体とし、椅子を剛体（あるいは弾性体）として、椅子と臀部の接触・大変形解析を行い、接触面（座面）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。

今年度は、本研究での人体変形解析手法と材料特性値の妥当性を検証するため、椅子による臀部の変形を例に取って、実験との比較検討を行った。実験では、圧力シートを用いて、椅子と被験者の臀部との接触面（座面）での荷重分布を求め、解析では同じ状況をシミュレーションした。その結果、実験結果と解析結果は、接触面形状、荷重最大値等の点において、よい一致を示し、本研究での解析モデル、解析手法および材料特性値同定手法の妥当性が確認できた。また、座面での荷重分布から定量的に座り心地を評価する方法についても提案を行った。この成果は、当研究室の大学院生、加藤恵麻君の修士論文（1999年度）「人体変形シミュレーションとそれによる心地評価手法の検証」にまとめられている。なお、本研究成果に対して、自動車用の椅子のメーカーから利用したいとの申し出があ

り、情報交換を行っているが、次年度には共同研究にもっていく予定である。また、これまでの研究成果を第9回International Conference Artificial Reality and Telexistenceで発表した。

Y. Maekawa, R. Kawasaki, E. Kato and F. S. Lai:Virtual Human Who Can Evaluate Oppressed Sensation, Proceedngs of ICAT '99,pp.194-201,1999.