

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：太田 修 楯列俊夫 中村康範 森脇良一
福井 毅

残留応力場を伝播する超音波の可視化について、材料中に存在する応力の大きさによって、音波の伝播の速度が変化するので、音波の進行状況を調べることによって応力測定法の1つになると考えられ、伝播の挙動について実験を行った。超音波の観察装置として光弾性と同じものを用いた。超音波によって一時的に応力を受けた部分を、光の複屈折現象により可視化できる。光源に振動子との同調時間を遅延させられる機能を備えたフラッシュライトを使うことにより、超音波を可視化するだけでなく、超音波の位置を変えてその動きをダイナミックにとらえることができる。偏向板、検光板の角度は45°回転した位置とし、硼珪酸ガラス（パイレックス）試験片を用いて、無応力状態、残留応力のある試験片、円孔、切欠きのある長方形板内の伝播を可視化した。

板材プレス成形諸問題に関する研究として、有限要素法と離散最適化手法を組み合わせたプレス加工設計支援システムの開発を行った。近年、板金プレス成形の分野でも、生産様式が少品種大量生産から多品種少量生産へと移行しており、それに伴って加工設計の迅速化や高能率化が要求されている。最適化手法にスイーピング・シンプレックス法を用い、弾塑性有限要素法と組み合わせることにより、ブランク形状の最適化を行うシステムを構築した。ドイツ機械学会推奨のベンチマーク問題に適用し、ブランク形状を3パラメータで表現し板厚現象を目的関数に選び、成形品の局部板厚減少が少ないブランク形状を求めることが可能になった。

弾塑性増分理論による応力一ひずみ解析として、本年度は断面が台形状の角筒の成形の実験を行った。金属板の角形容器は、プレスによってパンチを押し込み成形される。この変形を解析するとき、非線形な応力一ひずみ関係を用いなければならない。実際問題としては、成形性向上が課題であり、加工中板材にしわが生じるのを防ぐため、ダイス（金型）の平らな部分としわ押さえで材料をはさみ、しわができないよう保持して加工する。このとき、しわ押さえ面に溝状のビードを設ける場合と、ビードをつけないで平らな面にする場合がある。実験では、成形途中まではビードのないしわ押さえを用いて、成形後期にビードを作用させることによって、成形性が向上することを示した。

鋼骨組の弾塑性安定問題について、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頂点水平定変位振動両振り繰り返し試験、および数値解析を行った。具体的には、高層骨組の下2層部分を想定した左右対称な2層1スパン鋼骨組模型に対して、頂部左右節点に、高層部から伝わる自重と等しい定鉛直荷重と、局所的に損傷を

与える素因として1層梁中央部に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6つの試験体について行った。

中心圧縮材の連成不安定現象に関する研究として、鋼板を溶接した箱形断面材に圧縮力が作用する場合の弾塑性不安定現象について研究した。この連成不安定現象の崩壊メカニズムは複雑であり、実験的研究で明らかにするのは困難と考えられ、明確な分類法は提案されていない。昨年度小松・工藤が提案した弾塑性有限要素変位解析の結果を基に、崩壊にいたる過程で生じる直ひずみの変化に着目した崩壊モードを8分類する方法について、その判定基準を明らかにするため、本年度は両端固定のスレンダー箱形断面中心圧縮材に対して解析した。

溶接構造物の強度と変形について、船体外板に用いられているT M C P鋼(Thermo Mechanical Control Process)溶接継手部の疲労特性を総括し、船体溶接継手部に発生した疲労き裂の原因に対する研究結果をまとめ見解を述べた。T M C P鋼は強度が高くかつ靱性に富み、従来形高張力鋼板に比べ溶接性が非常に優れていて、船体外板等に多数使用されている。しかし、最近就航年数が3～4年といった若い船令の船体溶接継手部に、従来型の鋼板ではほとんど見られなかった疲労き裂がすみ肉溶接止端部に発生し問題となっている。過去7年にわたり、疲労亀裂発生の原因を明らかにするため、T M C P鋼溶接継手部の疲労特性に関する実験研究をしてきたが、その原因は複雑で、T M C P鋼の切欠き感受性、引張疲労強度、曲げ疲労亀裂発生寿命などからは、結論が得られないことがわかった。

溶接構造物の強度と変形

小川清六(工学部)

船体構造用鋼材として、強度が高く、且つ靱性に富み、従来型高張力鋼に比べ溶接性にも非常に優れているT M C P鋼(Thermo Mechanical Control Process)が船体外板等に多数使用されるようになっている。しかし、最近、就航年数が3～4年と云った若い船齢の船体溶接継手部に、従来型鋼では殆んど見られなかった疲労き裂が、すみ肉溶接止端部に発生し、問題となっている。本研究は、船舶工学上の見地からこの問題を取り上げ、過去7年にわたり疲労き裂発生の原因を明らかにするために、T M C P鋼溶接継手部の疲労特性に関する研究を行ってきた。本年度は過去6年にわたる実験の成果をまとめ、T M C P鋼溶接継手部の疲労特性を総括し、船体溶接継手部に発生した疲労き裂の原因に対する見解をのべた。

過去6年にわたる実験、研究は、以下の通りである。即ち、疲労き裂は、すみ肉溶接止端部の応力集中部に発生していることから母材の疲労に対する切欠き感受性が問題になると考え、T M C P鋼の疲労に対する切欠き感受性を求め従来型高張鋼のそれと比較検討した。

次いで溶接継手について以下にのべるような一連の疲労試験を行ってT M C P鋼溶接部

の疲労特性を求め、従来型高張鋼のそれと比較検討した。

1. 溶接継手の引張り疲労特性試験
 - a) 荷重伝達型十字すみ肉継手の片振り疲労試験
 - b) 非荷重伝達型十字すみ肉継手の片振り疲労試験
2. 溶接継手の曲げ疲労特性試験
 - a) 丁継手の3点曲げ疲労試験
 - b) 十字継手の3点曲げ疲労試験
 - c) 十字継手の曲げ疲労のき裂発生寿命を求める試験

これら一連の実験研究を総括して以下に述べるような結果が得られた。

- i) T M C P 鋼の疲労に対する切欠き感受性は従来型高張力鋼のそれと殆ど等しい。
- ii) すみ肉溶接継手の引張疲労強度は両鋼材とも殆んど等しい。
- iii) 曲げ疲労特性も両者は殆んど等しく、むしろ T M C P 鋼の方が僅かに大きい傾向がみられた。
- iv) 曲げ疲労き裂発生寿命にも両継手に有意差は認められない。

以上、一連の実験研究から実船の T M C P 鋼のすみ肉止端部に発生した疲労き裂は、材料の疲労強度が従来型高張力鋼により低いことが原因であるとは結論づけられないものと考えられる。

鋼骨組の弾塑性安定問題

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頂部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

太田 修（工学部）

本年度は過去3年に渡って行ってきた6個の試験について、試験結果を整理し、全体的に検討した。その概要を以下に示す。高層骨組の下2層部分を想定した左右対称な2層1スパン鋼骨組模型に対して、模型頂部左右節点に（高層部から伝わる自重を表す）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もなる）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6体の試験体について行った。模型の頂部節点定鉛直荷重量、1層梁中央点一定横荷重量そして頂部定振幅水平変位量の組み合わせを6種用意し、試験条件としてこれらを同じ幾何形状の各骨組模型にそれぞれ載荷した。繰り返しの進行に伴う応答状態量の推移を主として検討し、次の結論を得た。第1に、1層梁中央部に損傷部分がある場合、その損傷がわずかであっても骨組は「水平変位繰り返し載荷時に生じる腰くびれ横揺れ崩壊」に至る可能性が大きい。第2に、周期的に同一な弾性挙動を呈するという厳密な意味でのシェークダウン現象とは異なるけれども、繰り返し回数が20回程度であれば、実際には材料が降伏する事柄が含まれていても骨組の呈する挙動はシェークダウン状の現象

にみえる場合がある。第3に、載荷梁の大たわみを伴わない骨組に関する劣化現象の可能性を、サイクル毎の横揺れ変位の逆対称成分という応答状態量の生成、成長過程から論じた。

これらの内容は、太田修、太田充紀の共著で「水平定変位振幅両振り繰り返しをうける定鉛直荷重下鋼骨組模型の劣化挙動」と題し日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、B-1・構造I、1997. 9に発表し、さらに「繰り返し水平載荷を受ける局所過載荷梁を持つ骨組模型の劣化挙動」と題し構造工学論文集、vol. 44B、1998. 3、日本学術会議メカニクス・構造研究連絡委員会ほかに掲載された。

また数値解析研究では、試験を同定する数値解析を行う。この種の挙動特性を検出できる、増分法に基づく次元複合非線形有限要素法による数値解析プログラムを使用する。解析精度を向上させるため、従来から有限要素に関する局所座標系に剛体運動座標を採用してきたが、さらに精度を向上させるため昨年度から、有限要素を今まで用いていた片持梁要素から単純梁要素に変更する手続きを行ってきた。ひずみ量がより正確に計算されることになる。この解析過程を表す理論式に基づくプログラミングの作業が本年度でほぼ終了したことを報告する。

弾塑性増分理論における応力一ひずみ解析 楯列俊夫（工学部）

金属板の角形容器は、プレスによってパンチを押し込み成形される。この変形を解析するとき、非線形な応力一ひずみ関係を用いなければならない。この解析的研究を行うに際して、本年度は断面が台形状の角筒の成形の実験を行った。

加工中板材にしわが生じるのを防ぐため、ダイス（金型）の平らな部分としわ押さえで材料をはさみ、しわができないよう保持して加工する。このとき、しわ押さえ面に溝状のビードを設ける場合と、ビードをつけないで平らな面にする場合がある。一般的に、比較的深い、単純な断面の容器には、材料のダイス穴への流れ込みを容易にする目的で、ビードを付けずに平らなしわ押さえ面としている。一方、成形高さはそれほど高くないが、形状が複雑な場合にはビードを設けて、張り出し成形が主となる成形を行っている。

しわ押さえ面にビードを有する成形では、パンチストロークの初期からビード効果によってフランジ部は大きな拘束を受けている。さらに成形性を向上させるためには、変形初期はフランジ部の拘束を小さくして、成形後期にしわを制御できるような大きなフランジ拘束を与えることができるような、フランジ拘束の幅広い制御機構を開発することが重要であると考えられる。

実験では、ダイス、パンチのしわ押さえ面のビード部が取り外しができる構造とした。変形初期には、材料の絞り込みをよくするため、しわ押さえ面のビード取り付け凹部にスペーサを挿入し、ビードのない状態で加工し、変形途中でビード取り付け凹部のスペーサを除去し、ビード型を挿入してビードが働いた状態で加工することができる。

次の3つの実験を行った。

- (1) しわ押え面にビードを使用せず、最大の絞り深さを求める。
- (2) しわ押え目にビードを設け、最大絞り深さを求める。
- (3) 成形途中まではビードのないしわ押えを用いて、成形後期にビードを作用させて最大絞り深さを求める。

実験はしわ押え力を一定にしてポンチ1mmずつ送り込み、その都度ボディーしわまたは破断が生じていないか調べ、しわまたは破断が生じたときのポンチストローク（成形深さ）を求めた。なお、しわの有無の判定は、目視と触指によった。

(1)の条件では成形高さ29mmが、(2)の条件では、最大成形高さ31mmが得られた。(3)の条件に関しては、ビードなしで、ポンチストローク27mmまで押し込み、ここで一旦加工を中断し、次にビードのあるしわ押えでフランジ部を保持して、適当なしわ押え力を作用させて加工すると、成形高さ33mmの製品が得られた。このとき、適当なしわ押え力については、試行錯誤で最大成形高さが見られるしわ押え力を探した。結局、ここで提案した(3)の方法は、実際の加工に有効であることが示された。

板材プレス成形諸問題に関する研究

中村康範（工学部）

近年、板金プレス成形の分野でも、生産様式が少品種大量生産から多品種少量生産へと移行しており、それに伴って加工設計の迅速化や高能率化が要求されている。本研究では、有限要素法と離散最適化手法を組み合わせたプレス加工設計支援システムの開発を行った。

本年度は最適化手法にスイーピング・シンプレックス方を用い、弾塑性有限要素法と組み合わせることによりブランク形状の最適化を行うシステムを構築した。ドイツ機械学会推奨のベンチマーク問題に適用し、ブランク形状を3パラメータで表現し、各部の最小板厚の逆数を目的関数に選ぶことにより、成形時に局部板厚減少の少ないブランク形状を求めることが可能となった。

同時に成形金型を製作し実際の成形を行い、シミュレーション精度の検証を行った結果妥当な結果が得られたことが確認された。

また、ブランク形状を表現するパラメータを目的関数との相関係数を用いてクリティカルなものを2個選び、2変数の最適化問題として行った結果、最適化に要する計算時間を大幅に短縮することが出来ることも確認された。

結論として本研究で開発した有限要素法と離散最適化手法を組み合わせたプレス加工設計支援システムは十分な精度で設計変数を決定する支援が可能であると考えられる。計算時間に関しても設計変数を選択することにより短縮が可能であることを示した。

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）

土木や建築の分野では、鋼板を溶接した箱形断面部材に圧縮力が作用する場合の弾塑性不安定現象については極限耐荷力を用いた分類法が試案されている。この連成不安定現象の崩壊メカニズムは複雑であり実験的研究で明らかにすることは困難と考えられ、明確な分類法は提案されていない。

そこで昨年度は、小松・工藤が提案した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分類する方法について、この分類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（ α_1 ）、最終圧縮力判定係数（ α_2 ）および直ひずみ判定係数（ β ）を定義し、ケーススタディーとして関連細長比（ $\bar{\lambda}$ ）=2.0を一定として数値パラメトリック解析を行い、弾塑性不安現象の崩壊モードを8個に類型化する指標となる判別のための判定基準について明らかにした。

平成9年度は、長大化する鋼構造物を対象に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昨年度提案した崩壊モード判定係数 α_1 、 α_2 、 β について数値パラメトリック解析を行い以下のことが明らかになった。

- (1) 関連細長比 $1.0 \leq \bar{\lambda} \leq 3.0$ 有効幅厚比（ R ）=0.2~3.0においても、崩壊モードの発生順序や発生モード数を定量的に示すことができた。
- (2) 崩壊モードの発生順序を論理的に示し、その妥当性を明らかとした。
- (3) 崩壊モードを8分類するための判定係数として $\alpha_1=0.4$ 、 $\alpha_2=0.95$ 、 $\beta=0.05$ がより明確となった。
- (4) 崩壊モードの分類は実験的研究では困難であるが、数値実験を用ることで可能となる判定手法を提案した。

これらの内容は、森脇良一・工藤哲男の共著で「スレンダーな箱形断面中心圧縮材の連成不安定現象判定方法について」と題して土木学会第52回年次学術講演会概要集（第1部）（1997.9）に、さらに「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」と題し鋼構造年次論文報告集第5巻（1997.1）に発表した。

切欠き平板の非破壊応力測定、材料評価に関する研究

福井 毅（工・機械部）

本誌P. 1に論文掲載