

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 森脇良一 太田 修
福井 毅 前川佳徳

人体の変形の非線形構造力学的取り扱いとその応用に関する研究では、女性の乳房をブラジャーで好適に補整する際の変形を、乳房を超弾性体として非線形構造力学解析でシミュレーションすることを試みた。またウエスト部についても同様な解析を行い変形に伴う圧迫感の評価手法を検討した。これらの変形シミュレーションには、個々の対象者の材料定数に相当するものを求める必要があり、さらに圧迫感の評価には変形シミュレーション結果で得られるある値と圧迫感の関係を求めなくてはならない。本年は、主にそのことに重点を置いた研究を行った。

弾塑性増分理論における応力、ひずみ解析の研究では、つぎのような研究を行った。即ち、剛塑性材料については一般に付帯条件に対しラグランジェの未定乗数法が適用され、汎関数に極値を与える変位関数を求める方法が採られている。しかし、材料ビレットがプレス加工されてダイス穴に押し込まれるとき、材料表面の部材は工具表面と接触し、材料表面上の節点変位間には工具上をすべると云う関係式が生じ、この付帯条件の取扱いが厄介となる。そこで付帯条件の関係式から変数を独立変数と従属変数に分ける概念を提案し、その分離を自動的に行うための理論を提案した。

中心圧縮材の連成不安定現象に関する研究では、本年度は、弾性不安定現象の崩壊モードを8個に類型化する指標となる崩壊モード判別のための判定基準について、数値パラメトリック解析により検討した。これらの結果は、「薄肉断面圧縮材の連成不安定現象に関する研究」と題して日本計算工学講演会論文集第1巻、第2号に、また「箱型断面中心圧縮材の連成不安定現象判定方法に関する一考察」と題して土木学会第51回年次学術講演会概要集に発表している。

鋼骨組の弾塑性安定問題に冠する研究では、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を行っている。本研究の目的は、左右対称な定鉛直荷重作用下の左右対称な骨組が水平定変位繰り返し載荷をうけた場合、骨組が呈する変形生成過程、劣化挙動過程を解明することにある。本年度は、実験では頂部柱頭定鉛直荷重載荷装置を改良し、載荷時における対称性の実現に努めた。また数値解析では増分法に基づく一次元複合非線形有限要素法における有限要素の局所座標系定義を変更し、仮想変位増分がより正確に導入されるように解析プログラムを改善中である。

溶接構造物の強度と変形では溶接継手の疲労強度を取り上げ、本共同研究の始めから継続的に研究を行っている。研究目的は、船体構造用鋼材として従来鋼に取って代わり使用

されるようになったT M C P鋼の溶接継手部に、船舶就航後比較的早い時期に従来鋼溶接継手部にはみられなかった疲労き裂が発生したためその原因を明らかにすることである。実験はT M C P鋼と従来型鋼両材の十字すみ肉継験片を用いて疲労試験を行い、両継手の疲労強度ないしは特性を比較検討してきたが、顕著な有意差は認められなかった。本年度は、主として両継手試験片のき裂発生寿命について実験したがT M C P鋼溶接継手の方がむしろ長寿命側にある結果となった。

超音波による異方性物体の測定の研究では、超音波を用いて圧延材の弾性異方性の測定と、超音波を目で見る実験を行っている。これらの研究結果は、1996年10月日本設計工学会関西支部で発表している。

分担研究報告

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鋼に比べ溶接性も優れているT M C P鋼(Thermo Mechanical Control Process)が比較的最近使用されるようになった。しかし、最近就航数年が3～4年と云った若い船齢の船体の溶接継手部に従来形鋼では殆んどみられなかった疲労き裂が発生して問題となっている。本研究はこの問題を取り上げ、T M C P鋼溶接継手部の疲労特性を明らかにして従来形鋼のそれと比較検討すると共に、T M C P鋼溶接継手部に上述のような3～4年と云ったかなり短期間に疲労き裂が発生する原因を明らかにするために数年来一連の実験、研究を行なって来た。

初年度の文献調査等の結果、疲労き裂はすみ肉継手のすみ肉止端部に発生していることから、T M C P鋼と同一強度レベルの従来形鋼の疲労に対する切欠感受性に関する実験を行い、両者の切欠き感受性を比較したが有意差は認められなかった。即ち、疲労に対する材料そのものの感受性には差は認められず、T M C P鋼そのものの疲労強度が従来形鋼よりも劣るものではないことが解かった。

3年目からは溶接継手の疲労特性に関する研究を行っている。すなわち、すみ肉溶接止端部の応力集中状態を単純化するために荷重非伝達形十字すみ肉継手を用いた片振引張り疲労試験、実際のすみ肉溶接継手を想定し荷重状態を単純化した荷重伝達形十字すみ肉継手の片振引張り疲労試験、および船体のすみ肉溶接継手部が実際に受ける荷重状態を考えて、T形および十字形すみ肉継手について行った曲げ疲労試験等一連の疲労試験を行ってきた。しかしこれら一連の疲労試験の結果からは従来形鋼とT M C P鋼の両すみ肉継手の疲労強度には有意差は認められず、T M C P鋼を用いた船体溶接継手部に比較的早期に疲労き裂が発生した理由を明らかにすることはできなかった。

本年度は従来の実験すなわち疲労破断強度とは観点を變えて、疲労き裂の発生に着目し、十字すみ肉継手を用いて曲げ疲労試験を行い、すみ肉止端部におけるき裂発生寿命をT M

CP鋼、従来形鋼の両者について比較を行なった。これらの実験の結果、き裂発生寿命はむしろTMCP鋼の方が長く、疲労き裂発生に関してはTMCP鋼の方が優れていると云う結果となった。

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 前川佳徳（工学部）

鋼材の冷間鍛造や熱可塑性樹脂板の真空・圧空成形のシミュレーションに非線形構造力学を適用することから発展して、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進めている。今年度は、昨年度ほぼその方法を確立した、女性の身体のかたちの好適補整に伴う変形シミュレーションと、その心地シミュレーションを、非線形構造力学で行う研究を継続して行った。

本研究では、まず女性の乳房を例にとり、それをブラジャーで好適に補整する際の変形を、乳房を超弾性体として非線形構造力学解析でシミュレーションすることを試みた。ついで、女性の身体を理想的なトルソバランスに近づけるためのウエスト部の変形シミュレーションを、同じくウエスト部を超弾性体として非線形構造力学解析で行い、変形に伴う圧迫感の評価手法を検討した。これらの変形シミュレーションには、個々の対象者の材料定数に相当するものを求める必要があり、さらに圧迫感の評価には変形シミュレーション結果で得られるある値と圧迫感の関係を求めなくてはならない。本年は主にそのことに重点を置いた研究を行い、人体の変形の非線形構造力学的取り扱いの確立を進めた。

人体の材料定数を求めるには、たとえばウエスト部の場合、材料定数とその寸法が既知のゴム輪でウエスト部を締め、ゴム輪およびウエスト部の変形量を測定して、その状態をモデル化した非線形構造力学解析シミュレーションを繰り返し試みながら、未知のウエスト部の材料定数を同定していく。

当然考えられることとして、人体の材料定数や圧迫感などは個人によって異なる。そこで、多くの被験者に対し実験を行い、非線形構造力学解析シミュレーションでその材料定数を求めた。また、人体の圧迫に伴い人体に生じる応力値やひずみ値を、得られた人体の材料定数を用いて求め、それらと圧迫感との関係を調べた。その中で規則性を検討したところ、人体に生じる応力値に相当するものではなく、ひずみ値に相当するものと、圧迫感との関係が、同一人の場合、各部位（たとえば、上腕、ウエスト、太股）で類似した関係になることが確認された。

これらの研究成果の中間報告は、情報処理学会第53回全国大会（平成8年9月）で、2報を報告し、第1回感性工学日韓国際シンポジウム（平成9年2月）で1報を報告した。

感性工学日韓国際シンポジウムでの発表内容は、以下の論文集に、論文として掲載された。

Maekawa, Y., "Presentation system of forming into desirable shape and feeling of women's breast". KANSEI ENGINEERING I, pp.37-43, 1997.

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）

本年度は剛塑性材料について研究を行った。材料の変形中の塑性領域の伝播などの研究には弾塑性理論を適用するのがよいが、塑性加工によって製品が加工される大変形問題では、加工中の材料非線形、幾何学的非線形の影響は著しく、要素分割数を多くし、また加工までを莫大なステップ数に分割して、1ステップの大きさを小さくする必要がある。従って、より効率的な手法、理論が要求されている。

材料の弾性変形を無視して塑性変形だけに注目した剛塑性有限要素法では、付帯条件（体積一定の条件）に対しラグランジェの未定乗数法が適用され、汎関数に極値をあたえる変位関数を求める方法が採られ、そのときの未定乗数の値が応力の静水圧成分であることが示されている。しかし、材料ビレットがプレス加工されてダイス穴に押し込まれるとき、材料表面の部材は工具表面と接触し、工具表面上をすべる。このとき、材料表面上の節点変位間には工具上をすべるという関係式が生じ、この付帯条件の取扱いが厄介となる。系統的に解を得るためには、やはり未定乗数法を用いるのが有効であるが、未知数は未知節点変位と、さらに未定乗数の数だけ増加し、最終的に解かなければならない一次方程式の行列の次数は莫大になる。

そのため、付帯条件の関係式から変数を独立変数と従属変数に分ける概念を提案し、その分離を自動的に行うための理論を提案した。すなわち、ある変数列からいくつかの変数を従属変数として選び出す際、その選択方法は一通りでなく、どの選択方法が最善かを考慮しなければならない。この選択方法を自動的にかつ理論的に行う方法を提案した。この独立変数だけを用いることによって、最終的に解かれる剛性方程式の次数を半減できた。次に、節点が工具表面を滑るという条件式を未定乗数法を用いて汎関数に組み込んだとき、その未定乗数は材料と工具との接触圧力および摩擦力であることを、Eulerの変分原理を用いて証明した。前報では、二次元または軸対称変形に対してこの理論を適用したが、本年度はこの手法を三次元問題に拡張し、丸棒の単軸圧縮に適用して解析解と数値計算値とを比較し、三次元問題に対しても理論の正しいことを示した。なお、変形は軸対称であるが、有限要素理論は、要素分割が軸対でなく、計算は三次元問題として扱われている。さらに、工具面との摩擦を考慮して数値計算を行った。この理論は1996.10.9, OHIOでの5th International Conference on Technology of Plasticityで「F.E.M. Simulation for Rigid Plastic Materials by Dependent Displacement Method」のタイトルで発表された。

板材プレス成形諸問題に関する研究 中村康範（工学部）

ガラスマットを強化材に用いた熱可塑性樹脂複合材料薄板のプレス成形性に関する研究を

行った。本年度は成形条件が成形性に与える影響を調べた。

成形条件の影響を調べるために、成形後の製品のひずみ分布を求める手法を開発した。成形材料の不均一さのため板厚変化を直接測定することは難しく、そのため本研究では材料の面積密度比を測定し板厚変化に変換して利用した。子午線方向の長さ変化と体積一定の条件から他の2方向のひずみを算出し成形品全体のひずみ分布を求めた。

結果としてガラスマットを強化材に用いた熱可塑樹脂複合材料で出来た薄板のプレス深絞り成形では金属薄板の深絞り成形に比べ張り出し成分が大きく、絞り成分が小さいことがわかった。これらの結果は1997年7月に開催される国際学会ICCM-11(Australia)にて発表予定である。

中心圧縮材の連成不安定現象に関する研究 森協良一（工学部）

これまで溶接箱形断面を有する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連成座屈と言われているのは、「まず構成板の局部座屈が先行し、それによって断面の一部の抵抗性能が消失して、全体座屈による崩壊が生じる」という崩壊モードのみを指しており、連成不安定挙動について詳しい検討がなされていないのが現状である。また、この長期的共同研究組織「非線形構造力学」において、小松・工藤が連成不安定挙動について、箱型断面中心圧縮材の崩壊の過程で、構成板の局部たわみによる板曲げひずみと部材曲げによる板面内ひずみの増加状態により、8つの崩壊モードに分類されると提案しているが、この論文は、崩壊モードを8分類するための意義や判定基準の指標が明確でなく、また、この分類による定量的な評価もなされておらず、さらなる検討が必要であることは明らかである。

そこで平成8年度は、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崩壊モード判別のための判定基準について、数値パラメトリック解析により検討した。

この判定係数については、前述の連成座屈の現象を基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) を考え次式で定義した。

$$\text{圧縮力判定係数 } \alpha_{(1,2)} = N / N_{\max} \quad \text{直ひずみ判定係数 } \beta = \varepsilon_n(\varepsilon_B) / \varepsilon_y$$

ここに、 N_{\max} : 極限耐荷力

N : 中心圧縮材の軸力

ε_n : 部材曲げによる板面内ひずみ ε_B : 構成板局部曲げによる板曲げひずみ

ε_y : 材料の弾性ひずみ

数値解析には両端固定の箱型断面中心圧縮材を用い、崩壊モード判定係数を $\alpha_1 = 0.3, 0.4, 0.5, \alpha_2 = 0.95, \beta = 0.03, 0.05, 0.07, 0.10$ としてパラメトリック解析を行った結果

- (1) 崩壊モードを8分類するためには、判定係数 $\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.95, \beta = 0.05$ となった。
- (2) 崩壊モードの8個の内、発生が想定される6個の崩壊モードを全て示すことができ

た。

- (3) 関連細長比(λ) = 2.0, 有効幅厚比(R) = 0.3~1.2 で、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。

これらの内容は、森脇良一・工藤哲男の共著で「薄肉断面圧縮材の連成不安定現象に関する研究」と題し日本計算工学講演会論文集第1巻、第2号(1996.5)に、さらに「箱型断面中心圧縮材の連成不安定現象判定方法に関する一考察」と題して土木学会第51回年次学術講演会概要集(第I部)(1996.9)に発表した。

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)

研究の目的は、左右対称な定鉛直荷重作用下の左右対称な骨組が水平定変位繰り返し載荷を受けた場合、骨組が呈する変形生成過程、劣化挙動過程を解明することにある。繰り返し載荷を受けた場合には、単調載荷時にはみられない漸増塑性変形の累積や交播塑性らの問題が加わり、幾何学的非線形と材料非線形の複合効果は一層複雑なものになる。また変形生成過程や劣化挙動過程は、梁に作用する一定横荷重の大きさによって全く異質なものになることが想像される。

目的に従って、骨組頂部の左右柱頭に等しい定鉛直荷重と1層梁中央点に定鉛直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骨組頂部水平変位を制御する定振幅両振り繰り返し試験、及び試験に関する数値解析を一昨年度から継続して行ってきた。1994年度には2体の試験体についてパイロット試験を行い、1層梁に作用する一定横荷重が大きい場合、梁は過大に変形し骨組は腰くびれ横揺れ崩壊現象に代表される劣化挙動を呈し(T-1)、それが小さい場合には、梁の変形は増大せず骨組は周期的に左右対称な変形を保ち続け同一弾性挙動に収束する変形硬化現象を呈した(T-2)。後者の挙動特性に左右非対称な変形生成過程が加わる場合を想定して1995年度には、頂部柱頭定鉛直荷重と頂部水平定変位振幅を増加させた2体の試験体に対して、横揺れ変位の逆対称成分を有する変形硬化現象の存在について実験的に、数値解析的に検討した(T-3, T-4)。一般に分岐状現象を伴う構造系釣合径路の軌跡を得るためには実験精度、数値解析精度の向上が要求される。本年度は、実験では頂部柱頭鉛直荷重載荷装置を改良して、その載荷時における対称性の実現に努めた。数値解析では増分法に基づく次元複合非線形有限要素法における有限要素の局所座標系定義を変更し、仮想変位増分がより正確に導入されるように解析プログラムを改善中である。一方実験及び数値解析の制御に関して、頂部水平変位振幅群を数個入力できるように各々の制御プログラムを変更し、制御の自由度を増した。1層梁荷重載荷時に梁が弾性域のほぼ限界に留まる条件下の試験では、釣合径路は水

平定変位振幅の増大に伴い変形硬化現象から他の変形硬化状の状態へと変化した。初期からの1層梁端に漸増する塑性変形の累積、終局での柱端部に生じる交播塑性また横揺れ変位の逆対称成分の増大が観察された。なお1層梁の過大な変形はみられない。挙動の推移方向が収束であるか劣化であるかは検討中である(T-5)。一定横荷重にT-1とT-5の中間値を採用した試験では、水平定変位振幅の増大に伴い、T-1と同様な変形生成過程を経て、骨組は劣化した(T-6)。

超音波による異方性物体の測定 福井 毅 (工学部)

超音波は小堀先生(現在パークレイへ留学中)が研究され、私も少し研究を始めております。1996年10月日本設計工学会関西支部で、圧延材の弾性異方性とその程度と題して発表した結果と超音波を目に見えるようにしたときの途中経過について報告させていただきます。

超音波は一種の振動ですが、図1のように X_3 方向の縦波(速度 V_L)と X_2 と直角方向の縦波(速度 V_1, V_2)をもって X_3 方向に進みます。ところで、圧延材は適当に圧延して造るため、縦方向と横方向では組織が少し異なるのが普通です。今回の発表では、板厚方向が圧延方向と平行になるように正方形板を切り出して、正方形の中央の横縦を x, y 軸とし、中央を零として音波側面からあてて観察し、図2を得た。この実験から主軸方向は x, y と 45° の方向であること、また、この位置での組織異方性は $=0.57$ であること、異方性の程度は中央で強く、表面付近で弱いことなどがわかった。これと異なる超音波の研究として超音波を目で見る研究も行なっている。図3は孔のあいた平板の上から超音波を当てた図である。残留応力のある孔があると円の周囲に4個の白い部分ができる。横長の白い線が超音波です。左から右へだんだん白線が下に行っています。右端の図では白の直線以外に丸線の白線が1本見えています。図を拡大すると円形の線が2本見えますが、これが反射波と思います。

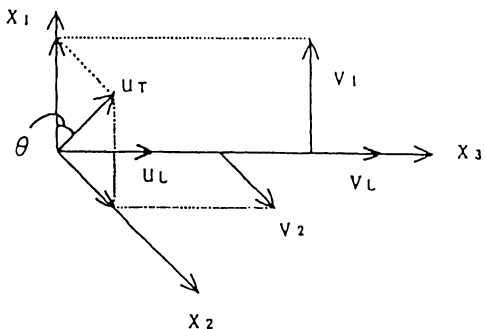


図1. 異方性材料と波の伝播

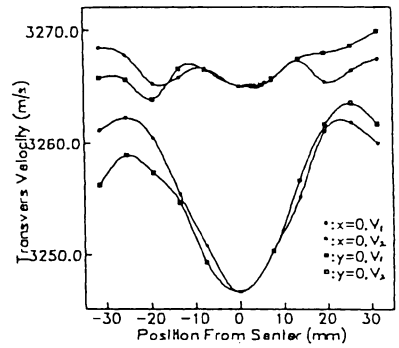


図2. 平板の横波音速の分布
(x 軸および y 軸上)



図 3 . 円孔を持つ平板に超音波をあてた場合