

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 小堀修身 太田 修 前川佳徳 中村康範

超音波法による材料評価に関する研究では、ガラス強化複合繊維（GFRP）の複合材について異方性とその程度、弾性定数などを超音波の音速測定結果から判定を試みた。これらのデータは、複合材料の応力測定、特に残留応力の非破壊的な評価法に利用できるものである。

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の研究では、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、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、昨年度の継続で、超弾性有限要素法による熱可塑性樹脂板の真空、圧空成形のシミュレーション研究をまとめることと、女性の身体のかたちの好適補整に伴う変形とその心地を弾塑性有限要素法でシミュレーションする方法の確立を試みた。

弾塑性増分理論における応力－ひずみ解析の研究では、「規則的に配列された空孔または介在物を有する板材の弾塑性有限要素法」塑性と加工、Vol. 36-418および「弾塑性理論における増分量チェックのためのT、Nパラメータの提案」塑性と加工、Vol. 36-413、の二つの論文をまとめている。前者の論文では、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を示している。後者の論文では、計算によって得られたひずみ分布と加工品の実測により得られたひずみ分布を比較し構成式から得られる解に修正を加えず、1ステップの大きさを合理的且つ効果的に制御して応力増分が効果的に計算できるようTパラメータ、Nパラメータを提案した。

鋼骨組の弾塑性安定問題に関する研究では、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た。これらの結果は、日本建築学会に発表している。

溶接構造物の強度と変形に関する研究ではTMCP鋼すみ肉溶接継手の疲労に関する一連の研究を行っているがこれら一連の実験結果からは従来型鋼とTMCP鋼の両すみ肉継手の疲労強度には有意差は認められなかった。

板材プレス成形諸問題に関する研究ではガラスマットを強化材に用いた熱可塑性樹脂複合材料で出来た薄板のプレス成形性について調べ、樹脂溶融温度付近で成形することにより実用になることを示した。

溶接構造物の強度と変形

小川清六（工学部）

最近、船体構造用鋼材として強度と靱性が高く且つ溶接性も良いTMCP鋼（Thermo Mechanical Control Process）が使用されるようになってきた。しかし、最近就航年数3～4年と云った比較的新しい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発生し問題となっている。本研究はこの問題を取り上げ、TMCP鋼溶接継手の疲労特性を明らかにし、従来形鋼のそれと比較検討すると共にTMCP鋼溶接継手の疲労き裂発生の原因を明らかにすることを目的としたものである。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基礎的研究としてTMCP鋼母材の疲労に対する切欠感受性を明らかにしておく必要があると考え切欠感受性についての実験を行った。しかし、船体構造用鋼材として用いられている同一強度レベルの従来形50キロ級の疲労き裂感受性とは殆んど差は認められなかった。

次年度からはすみ肉溶接継手について疲労試験を行い、従来形鋼の溶接継手の疲労特性との比較検討を行なった。

先づ平成5年度は、荷重非伝達形十字すみ肉継手の片振引張り疲労試験を行ない、すみ肉溶接止端部の応力集中度を単純化した実験を行なった。

平成6年度の研究4年目は、実際のすみ肉溶接継手を想定し、荷重状態を単純化して荷重伝達形十字すみ肉継手の片振引張疲労試験を行った。

平成7年度は、船体のすみ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の曲げ疲労試験を行い、同強度レベルの従来形鋼とTMCP鋼のすみ肉溶接継手の曲げ疲労特性の比較検討を行った。

これら一連の実験研究の結果からは従来形鋼とTMCP鋼の両すみ肉継手の疲労強度の有意差は認められず、実船において比較的若い船令でTMCP鋼すみ溶接継手の止端部に発生した疲労き裂の発生理由を明らかにすることはできなかった。

その原因としては先づ実船における荷重状態と実験室における曲げ疲労試験のそれとの違いが考えられる。実船においては単純な曲げ荷重のみではなく、引張、ねじりあるいは衝撃等の複雑な合成応力の繰り返し、しかも片振応力状態ではなく両振応力状態として作用する筈である。従って今後の研究の課題としてはより実荷重、実応力状態に近い実験が必要であろう。

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）

本年度次の二つの論文をまとめた。『規則的に配列された空孔または介在物を有する板材の弾塑性有限要素法』：塑性と加工、Vol. 36-418および『弾塑性理論における増分量チ

ェックのためのT、Nパラメータの提案』：塑性と加工、Vol.36-413である。

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、その材料の巨視的な弾性係数、降伏応力、変形能などに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。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、これについて研究されたものはない。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しない場合には、その取扱いは複雑になる。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を示した。

一方、塑性加工のシミュレーションについては、鍛造、板成形の分野でも有限要素法が盛んに用いられてきており、プレス成形における型設計の製作期間の短縮化、コストの低減化をはかるため、市販のソフトの利用、さらには自作のソフトの開発が行われている。その理論は剛塑性理論、弾塑性理論に大別できるが、板材成形の解析には弾塑性増分理論が効果的であるようである。計算結果から、成形中の材料の破断、しわの発生を予測して型設計の段階で、加工中のトラブルを減じようとの試みがなされている。計算によって得られたひずみ分布と加工品の実測によって得られたひずみ分布を比較して計算の妥当性を検討し、応力分布状態の応力値の高い領域の変形に注目して、しわ、破断の発生などのトラブルに対する指針としている。しかし、応力分布が傾向的に妥当なものであっても、これをしわ、破断など次のステップへの資料とするのは、適当でなく、計算された応力の値そのものについての妥当性が示されなければならない。本報告では、構成式から得られる解に修正を加えず、1ステップの大きさを合理的かつ効果的に制御して応力増分が効果的に計算できるよう、Tパラメータ、Nパラメータを提案した。

超音波法による材料評価に関する研究 (複合材料の異方性測定) 小堀修身(工学部)

繊維強化プラスチック(FRP)は強度と軽量化の点で開発当初から注目されてきた。ガ

ラス繊維の有する引張強さ2500~3500MPa、密度 2.5g/cm³という数値は鋼の6~7倍の強度を有し、アルミよりも軽い等の利点がありガラス強化複合繊維（GFRP）は以前から工業材料として重要視されている。複合材料への超音波の利用は主としてボイドの評価や剝離の検出などに広く応用されてきたが、ここでは実験室で製作したガラス繊維複合材について異方性とその程度、弾性定数などを超音波の音速測定結果から判定しようとした。これらのデータは、複合材料の応力測定、特に残留応力の非破壊的な評価法に利用できる。

実験に用いた試験片はガラス繊維を一方向に配向しポリエステル樹脂を用いて厚さ1~2mmの板状に成形したものである。この板から長さ200mm、幅10mmでガラス繊維の配向角が引張方向と角度 $\alpha = 0^\circ$ 、 45° 、 90° となるように試料を切り出した（単一板）、またガラス繊維の直交織りしたものをならべて樹脂で成形した板（直交織板）については切り出し角を $0/90^\circ$ 、 $45/135^\circ$ とした。はじめに試料の単軸引張試験を行った。単一板の応力-ひずみ関係はいずれも線形であるが、通常用いられる弾性定数としてのヤング率やポアソン比は切り出し角によって大きく異なっている（異方性が大）。

次に、超音波の横波用探触子を用いて、試料表面から厚さ方向に音波を入射しシングアウンド（S.A）法による音速測定を行った。探触子の回転による横波音速の最大および最小値は、それぞれ1365m/s、1326m/sで、これらは繊維方向およびそれと直交する方向で異方性の主軸方向がこれらと一致していることを示している。これから得られる異方性の程度（初期異方性）を示す値 $B_0 = 2.9\%$ は通常鋼に見られる0.1~0.3%と比較するとかなり大きい。直交織板の場合も繊維の直交する2方向が主軸方向となっている。続いて試料に単軸負荷を加えながら応力による横波音速の変化を測定した。Maseらの報告はこのような複合材の音弾性効果を測定した数少ない例であり、その報告では100~150MPaの応力に対して音速変化（率）が非線形的になっている。本実験に用いたGFRPはMeseらの実験よりも応力範囲は小さいが切り出し角 $\alpha = 0^\circ$ 、 90° いずれの場合も応力（ σ ）に対して初速 V_0 からの音速変化 ΔV は、ほぼ直線的に変化し、 $\Delta V/V_0 = K\sigma$ の関係式が成り立っている。これから比例係数（音弾性定数）を算出した。ここでも繊維配向と応力方向によって顕著な異方性の特徴がみられて、 $\alpha = 90^\circ$ の比例定数は $\alpha = 0^\circ$ のそれらの4~6倍大きくなっている。複合材料は金属ほど大きな負荷は与えられないため、単純な比較はできないが K の値自身は金属よりもかなり大きいといえる。また K の値は繊維の含有率によっても変化するようである。

これらの結果を異方性の弾性論に基づいて検討を行っている。

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

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を、昨年度に継続して行った。昨年度に行った二つの試験の一方は、地震鉛直動の効果が大きい場合を想定して1層梁に作用する定鉛直荷重を大きくとり予め載荷梁中央部に降伏域を発生させた状態下での試験であり、繰り返しの初期から腰くびれ変形が増大し、その後弓形変形が発生、増大し、終局には頂部水平反力が低下する漸増崩壊現象を呈した(T-1試験)。他方は、載荷梁中央部をほぼ弾性域に留ませる定鉛直荷重を用い、頂部の定鉛直荷重や水平定変位振幅も比較的小さな値を用いた状態下の試験であり、腰くびれ変形は繰り返しの初期に小さな量に収束し、弓形変形は最後まで発生せず、繰り返し毎に同一の釣合径路を巡回する変形硬化現象を呈した(T-2試験)。これらの現象は数値解析においても予測されていた。

このパイロット試験(T-1、T-2試験)の結果は、腰くびれモードの増大と収束、弓形モードの発生、発散、収束、また各モードの連成効果等を検討する理論上の必要性があることを示唆すると同時に、次のような実用上の問題を提起している。鉛直動によってある程度部分的に構造損傷が生じるような例えば載荷梁に降伏域が生じる場合、その後に来る水平動に対して、漸増崩壊現象を生じさせる頂部の定鉛直荷重や水平定変位振幅の下限値は如何ほどか、また通常扱われてきたような載荷梁が弾性域に留まる場合では、変形硬化現象を生じさせる頂部の各々の上限値は如何ほどか、これらの下限値と上限値には如何ほどの差異があるか、また後者の場合に、水平動に誘発され載荷梁中央部に降伏域が発生する状況は有り得るか等を明らかにする必要がある。本年度は、後者の場合を研究対象に置き、1層梁の中央部断面縁部分が弾性限界に近い状態を再現する定鉛直荷重を与えて、前年度漸増崩壊現象を呈した試験と同じ頂部の定鉛直荷重と水平定変位振幅を採用した場合(T-3試験)と、特に頂部定鉛直荷重だけを約1割増加させた場合(T-4試験)について、水平変位繰り返し制御試験を行った。これらの試験結果は共に、前年度の変形硬化現象を呈した挙動と同質の結果であるとみなし得る。数値解析に関して、T-3試験の予測は変形硬化現象を呈し、T-4試験の予測は漸増崩壊現象を呈した。なお、T-1、T-2試験結果については、太田充紀と共著で「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」と題して、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)1995年8月に発表した。

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)

本研究は、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、昨年度の継続で、超弾性有限要素法による熱可塑

性樹脂板の真空・圧空成形のシミュレーション研究をまとめることと、女性の身体のかたちの好適補整に伴う変形とその心地を超弾性有限要素法でシミュレーションする方法の確立を行った。また、基礎的研究として、簡単な対象に対して、弾性解析、弾塑性解析、超弾性解析を試み、各解析手法の特徴の検討も行った。

(1) 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

昨年につき、第3報目の論文が公表された。前川・柳：コンピューターシミュレーションによる真空成形での板厚分布好適化制御手法，プラスチック成形加工学会誌「成形加工」，8-3(1996)，pp. 198-204.

また、シート成形のシミュレーション技術の解説記事でも研究成果が公表された。

前川：シート成形のシミュレーション技術，工業材料，43-5(1995)，pp. 66-70.

(2) 女性の身体のかたちの好適補整に伴う変形とその心地シミュレーション

本研究は、女性の乳房を例にとり、それをブラジャーで好適に補正する際の変形を、超弾性体として有限要素法でシミュレーションすることを試みたものである。また、理想的なトルソ・バランスとするためのウエストの変形についてもシミュレーションを試みた。これらの変形シミュレーションには、まず個々の対象者の材料定数に相当するものを簡易に求める必要があり、その手法も検討した。また、心地の評価として、ウエストを締めていった時の痛みについて、応力値に相当するもので評価することも提案した。これらは、基本的には非線形構造力学の応用である。

研究成果の中間報告は、情報処理学会の全国大会講演会で3報、機械学会の設計工学・システム部門講演会で1報が報告され、また日本図学会関西支部学術講演会の特別講演でも本研究成果の解説と報告がなされた。

(3) 基礎的研究

基礎的研究として、簡単な対象に対して、弾性解析、弾塑性解析、超弾性解析を試み、各解析手法の特徴を検討することを試みた。

検討結果は、当研究室の大学院生の牧本展政君の修士論文「非線形シミュレーションの応用に関する研究」の「第3章 非線形シミュレーションの基礎的検討」にまとめられた。

分担研究課題：板材プレス成形諸問題に関する研究 中村康範（工学部）

前年度はガラスクロスを強化材として用いた熱可塑性樹脂複合材料の深絞り成形について調べたが、クロスの性質上変形の自由度が小さく成形がある特定の部分に集中するための制約が大きいことが分った。そこで、本年度は変形の自由度が高いガラスマットを強化材に用いた熱可塑性樹脂複合材料で出来た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。

実験は真空ホットプレスを用いて素板の製造から始め、マット状の繊維の積層組み合わせ

せを変化させることにより、数種の厚さを持つ素板を作成した。樹脂溶融温度を中心に成形温度を変化させ、外観のしわ観察により成形温度の影響を調べた。また、成型品のひずみ・板厚・繊維含有率・面接密度分布の測定より成形性に与える影響を調べた。

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プレス成形は樹脂溶融温度より少し低い温度領域で成形することによりしわ・破断が生じることのない成形が可能である事が分った。しわ押さえ力に関しては金属薄板の深絞り成型時に見られるように、低すぎるとしわの発生が見られ、高すぎると破断が生じる事が分かり、しわ押さえおよび板厚に関して最適値が存在することが分った。しかしこの破断現象は金属薄板ではポンチ肩の破断であるが、樹脂複合材料の場合側壁部の材料の伸びが大きくなりすぎ、板厚減少が激しくなる減少が見られた。