

## 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 福井 毅 前川佳徳 森脇良一

塑性変形における非線形問題では、金属板材のハット曲げについて実験を行った。これまでの加工法では、板材は終始引張り曲げを受け、側壁部を形成する材料要素はダイス形丸みR部を通過するとき、曲げ曲げ戻しを受け、製品をダイスから取りはずすと側壁部は曲線に逸れ、設計通りの製品または成形精度のよい成形ができない。その対策として、板押さえを用いない新しい加工法を提案して実験を行った。実験結果では、すべての条件でハット曲げ成形品は、外そりの傾向が少し見られが、スプリングバック量は減少し、工業的に有力な成形加工法となる可能性のあることが見出された。

人体変形の非線形構造力学的取り扱いでは、人体を超弾性体モデルとし、人体と物の非線形構造力学的取り扱いを試み、これまでに、乳房、臀部の変形への適用を行い、今年度は、前腕部の変形への適用を行った。具体的には、前腕部にバッグの紐を掛け、バッグの重さの違いによる前腕部の変形の違いを解析した。また、本研究の成果を応用して、人体各部の変形シミュレーションを行い、痛覚や圧覚を評価できるバーチャルヒューマンの構築を行っているが、今年度その成果をSIGGRAPH 2000（米国・ニューオーリンズ）で発表し、好評を得た。

切欠きをもつ平板に応力が作用したときの超音波測定については、無応力に近い切欠きをもつ正方形の試験片を作成し、その試験片に曲げモーメントを加えて、切欠き部に生じた応力と超音波の関係を測定した。試験片としてガラス材料（パイレックスガラス）、 $100 \times 100 \times 20$ （厚さ）mmの正方形板を使用し、切り欠き深さ30mm、幅3mm、切欠き底R 1、1.5、2 mmと変化させた試験片を作った。その試験片の切欠きが水平になるように置き、切欠き側の上面（50mm上の面）の端に、荷重を0、50、100、150Nと変化させて加え、切欠き底の上面（5 cm上の面）に超音波端子を当て、切欠き底の少し下の超音波を撮影した。

鋼骨組の弾塑性安定問題では、局所梁が大たわみを伴いながら繰り返し水平載荷を受ける多層多スパン鋼骨組の全体崩壊について研究した。左右対称な4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層あるいは2層の梁中央に局所的損傷を与えて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漸増型定振幅を与える両振り繰り返し試験を4体の供試体について調べた。これらの試験はT4シリーズとして計画され、T4-1、T4-2試験は既に昨年度実施している。T4-3、T4-4試験では、損傷梁をそれぞれ第1層、第2層として、そ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に所定の一定横荷重を載荷した。

異方性材料・非線形材料の応力・ひずみ測定に関しては、超音波による材料評価を行なった。物体の表面に短時間強い熱衝撃を与えると表面のごく近傍の薄い層（熱境界層）内に物体温度の鋭い変化が起こる。エンジンや原子炉容器、金型などではこのような熱衝撃（熱疲労）による材料の強度が重要な問題となる。ここではS15C板材に繰り返し熱衝撃を与え、残留応力発生を超音波的に評価することを試みた。材料を温度500℃の炉中に30分間保持した後急冷する工程を繰り返し、20回毎に試料を取り出して各面に縦波、横波を入射して音速測定した。音速は繰り返し回数の増加と共に始めは僅かな変化であるが、120回付近から大きく変化する。またこの時の金属の組織観察によると、初期状態に比べパーライトはかなり微細化していることがわかった。

中心圧縮材の連成不安定現象に関しては、柱および構成板の両者の因果関係により複雑な崩壊挙動を示し、実験的研究で解明するのは困難であり、数値解析的手法により研究を進めてきている。本研究では、箱形断面の中心圧縮材について3次元離散化モデルを対象とし、変位法で軸力を与えて弾塑性有限変位解析を行い、崩壊過程の垂直ひずみ、変形、応力状態の詳細な分析を行っている。平成12年度は、数値解析結果の収束性を考慮した最適化された離散化モデルを用いて、柱としての関連細長比と構成板の有効幅厚比を用いて、崩壊時の極限耐荷力の曲線と、崩壊モードの類型化の相関図を提示した。

## 弾塑性ひずみ増分理論における応力－ひずみ関係 楯列俊夫（工学部）

金属板材のハット曲げについて実験を行った。ハット曲げとは、板材プレス加工の1行程で金属板に溝形状を与える加工であり、簡単な形状のポンチ、ダイスによって加工できるためしばしば実際の生産加工に用いられる。成形された製品の断面の形が、曲げ部が4カ所ある鉤のある帽子の形に似ているので、ハット曲げの名前がでよばれている。ダイスは溝形のくぼみを有し、そのコーナーの肩部には丸みRがあり、このダイスRが成形に大きな影響を持つ。ダイスの平らな部分と材料押さえによって金属板をはさみ、ポンチによってダイス溝形くぼみに板材を押し込んで成形する。この変形過程では、板押さえによって材料を拘束し、ポンチによって材料がダイス穴に引き込まれる。したがって、終始板材は引張り曲げを受け、側壁部を形成する材料要素はダイス形丸みR部を通過するとき、曲げ曲げ戻しを受ける。このため、材料がダイス内にある状態では設計通りのハット形状であるが、製品をダイスから取りはずすと側壁部は曲線に逸れ、4カ所の曲げ部のRはスプリングバックにより大きなRの形状になり、設計通りの製品または成形精度のよい成形ができない。その対策として、大きな板押さえ力を作用させて材料を強力に引張りながら曲げる方法がとられるが、素材の板厚が薄くなり製品の強度上好ましくなくなる。

本来は、塑性変形での応力、ひずみ関係を調査して、その変形挙動を明らかにするのが研究の目的であったが、加工法そのものを開発するのがより大きな効果をもたらすという

観点から、その欠点を改良するための方法として板押さえを用いない新しい加工法を提案して実験を行った。これはポンチを所定の成形深さまで押し込んだ後、ポンチの側面に設けた突起によって板材をダイスのフランジ部側に曲げ返す方法であり、板押さえを用いない成形方法である。

20×60mm、板厚0.5mmのSUS304(冷間圧延ステンレス鋼板)の供試材を板の圧延方向に対し $0.90^\circ$ に採取し、ダイス肩半径 $R_d = 1, 2, 3$ mm、ポンチ肩半径 $R_p = 2$ mm、ポンチ底のクッション力を617,735Nとして、深さ50mmのハット曲げを、ポンチ速度1mm/secで行い、スプリングバック量、側壁の曲率半径、フランジ部の形状を工具顕微鏡で測定した。

実験結果では、すべての条件でハット曲げ成形品は、外そりの傾向が見られ、クッション圧を増加すると、スプリングバック量は減少する。また、板押さえのある従来の方法では、 $t = 0.5$ mmの素板が変形後0.45mmと薄くなるが、本改良型ではほとんど板厚減少は見られなかった。したがって、工業的に有力な成形加工法となる可能性のあることが見出された。

## 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荷重を受ける多層多スパン鋼骨組の全体崩壊」

左右対称な4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層あるいは2層の梁中央に局所的損傷を与え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漸増型定振幅を与える両振り繰り返し試験を、4体の供試体について行った。研究の目的は、供試体が呈する逆対称変形成分の生成、生長、生長の消滅、また発散について分析すると同時に、4層骨組が呈する崩壊挙動の特徴は2層骨組で既に見出されている「水平変位繰り返し時に生じる腰くびれ横揺れ崩壊」[文献]にその原型があることを示すことにある。

これらの試験は、T4シリーズとして計画され、T4-1, T4-2 試験は既に昨年度実施している。T4-3, T4-4 試験では、損傷梁をそれぞれ第1層、第2層として、そ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に、所定の一定横荷重を載荷した。4層頂部の各柱頭には、両試験ともに軸力比がT4-2と同じ0.405となる左右が等しい定鉛直荷重を与えた。両試験ともに8回の繰り返し毎に漸増する同じ定振幅水平変位を与えながら試験を制御した。初期定振幅は0.012radとした。

T4-1, T4-2, T4-3試験の結果は以下のようにまとめられる。

(1) 繰り返し毎に生成される逆対称変形の増分と腰くびれ変形の増分がほぼ等しいときには、骨組は収束的な挙動を呈する。

(2) 逆対称変形の増分が腰くびれ変形の増分より大きくなると、逆対称変形が生成さ

れている方向の水平載荷で損傷梁下の層間変位が、逆方向載荷では上の層間変位がともにそれぞれの他の層より大きくなる。この性質の原型を文献にみることができる。

(3) 本実験では、増幅された制御変位を入力した直後に逆対称変形増分が急増し骨組は崩壊した。

これらの内容は、太田充紀・太田修の共著で「両振り繰り返し水平載荷を受ける鋼骨組模型の逆対称変形の生成過程」と題し、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、B-1・構造I、2000.9. に発表した。

文献：太田修、太田充紀、「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」、構造工学論文集、vol. 44B, PP523 ~530, 1998. 3.

## 超音波による材料評価に関する研究 (繰り返し熱衝撃による超音波の伝播速度変化) 小堀修身(工学部)

### 1 はじめに

物体の表面を短時間に強い熱衝撃を与えると表面のごく近傍の薄い層(熱境界層)内に物体温度のすどい変化が起こる。この層内には圧縮塑性ひずみが生じ、熱衝撃が終わると符号を変えて引張りひずみとなる。熱衝撃を多数回うけると交互に繰り返される塑性ひずみによって境界層は疲労破壊し、亀裂の発生にもつながる。エンジンや原子炉容器、金型などではこの様な熱衝撃(疲労)による材料の強度が重要な問題となる。ここではS15C板材に繰り返し熱衝撃を与え、残留応力発生を超音波的に評価しようとした実験を行った結果を報告する。材料を温度500℃の炉中に30分間保持した後急冷させることを繰り返し、20回毎に試料を取り出して各面に縦波、横波を入射して音速測定を行った。音速は繰り返し回数の増加と共に始めは僅かな変化であるが120回付近から大きく変化する。またこの時の金属の組織観察によると初期状態からのパーライトはかなり微細化しているのが判った。これらの結果を総合的に判断して、熱衝撃による材料の強度につながる非破壊的な現象を超音波的に判断しようとした。

### 2 実験

母材はS15C板材(幅100mm、厚さ32mm)でこの圧延方向に平行に試料を切り出して、一辺が30mmの立方体のブロックに機械加工した(図1)。初めに縦波、横波を試料の各面に垂直に入射して初期状態の音速と密度を測定し表1にまとめた。

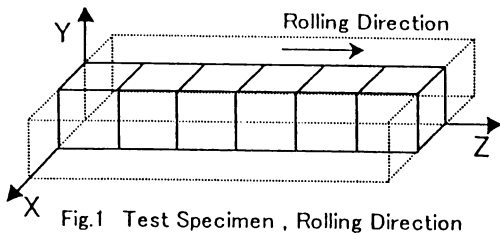


Table1 Initial velocity and Density of the specimen

Incidence	yz plane	xz plane	xy plane
L.wave(m/s)	5926.7	5917.3	5921.4
T.wave (m/s)	Max Pol.Z	Pol.Z	Pol.Y
	3246.3	3248.8	3247.7
Min	Pol.Y	Pol.X	Pol.X
	3241.4	3243.0	3245.2
Difference	4.9	5.8	2.6
Density(g/cm <sup>3</sup> )	7.87		

L.wave : longitudinal wave  
 T.wave : transverse wave  
 Max;Min : maximum and minimum velocity  
 Difference : velocity difference=Max-Min  
 Pol. : polarization

測定結果から判断すると圧延方向を異方性の主軸方向とする直交異方性とみなすことができる。密度と音速から計算される直交異方性材の弾性定数  $C_{ij}$  は表 2 のようにまとめられる。また各面に入射した音速の 2 乗和  $\rho \sum V^2$  は伝播方向に対して集合組織に依存しないことが知られている。この場合も実験的にこの関係が

$$\rho \sum V^2 = C_{11} + C_{55} + C_{66} = C_{22} + C_{44} + C_{66} = C_{33} + C_{44} + C_{55}$$

が成り立っていることを示した (表 2)。

Table 2 Anisotropic Elastic Constants Orthotropy

$C_{11}$	$C_{22}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{55}$	$C_{66}$	$\rho \sum V^2_{yz}$	$\rho \sum V^2_{xz}$	$\rho \sum V^2_{xy}$
276.4	275.6	276.0	83.0	82.9	82.7	442.0	441.3	441.9

単位: GPa

### 3 繰り返しによる音速の変化

電気炉中の温度を 500℃ に設定し、試片ブロックを炉中に入れて 30 分間保持してから取り出して氷水中へ投入する。これを 1 サイクルとして 20 回毎に 1 個を取り出して音速と密度を測定した。熱衝撃を与えると試料表面は黒ずみ、酸化によって表面が少しポロポロになる。この表面を 0.2~0.25mm 研削した後密度と縦波、横波音速を測定した結果をそれぞれ図 2, 3, 4 に示す。密度は繰り返し数と共に減少する (図 2)。図中には最小 2 乗法による直線を示す。 ( $\rho = 7.87 - 6.4 \times 10^{-5}n$ ; n は繰り返し数)。圧延 (yz) 面、圧延に垂直な (xy) 面および側面 (xz 面) での縦波音速の変化は図 3 に示すように 20 回から 120 回附近までわずかに上昇し、120 回以上になると大きく減少する。横波音速は 20~40 回附近まで一時音速が減少し、その後 120 回附近までわずかに増加する。そして 120 回以上になると大きく減少しているのは縦波と同様である (図 4 にはセンサーを回転させて主軸方向に偏る最大音速をプロットしている) が、偏り方向が直交する 2 つの横波の音速差を調べると xy 面では殆ど変化していない。熱衝撃後の圧延面上の顕微鏡写真を観察すると、パーライトが初期状態よりも微細になっていて圧延方向に平行に並んでいるのが判断されている。

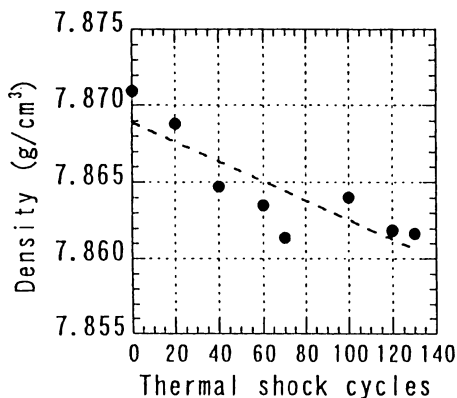


Fig.2 Density change due to the thermal shock

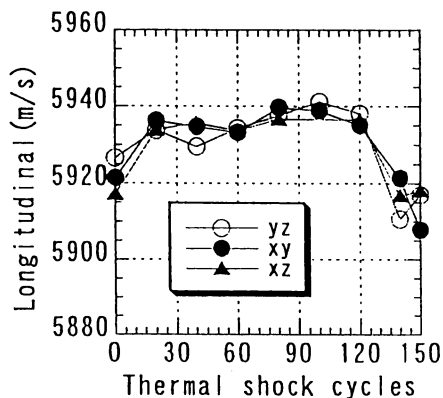


Fig.3 Longitudinal velocity change due to the thermal shock

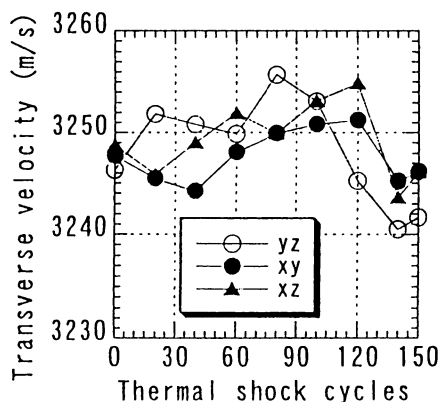


Fig.4 Transverse velocity change

### 切欠きをもつ平板に応力が作用したときの超音波測定 福井 毅 (工学部)

病院では超音波を用いて、体の中の心臓や肺の内部をブラウンカンや大きいフィルムに写し出したりする事が、よく行なわれている。しかし、このような画像処理装置は金額的に相当高くなるため、工学系ではあまり普及していない。工学系では試験片に超音波を与え、試験片の微量な振動をオシログラフに取り込んで、その振動より試験片の内部の状態を判断している。しかし試験片の内部が複雑になると、判断しきれない場合が多い。そこで本実験のような超音波による可視化装置が必要に成ってくる。

今回の可視化装置（非破壊応力測定）では無応力に近い切欠きをもつ正方形の験片を作成し、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10×10×2（厚さ）cmの正

方形板を使用し、外周の一辺の中央に深さ30mm、幅3mmの切欠きをもつ板を作成し、切欠き底を1、1.5、2mmと変化させた試験片を作った。その試験片の切欠きが水平になるように置き、切欠き側の上面(5cm上の面)の端に、荷重を0、50、100、150Nと変化させて加え、欠き底の上面(5cm上の面)に超音波端子を当て、欠き底の少し下の超音波を撮影した。その結果次のような事が判った。

1. 切欠き底での応力は荷重の増加と共に増加し、しかも光度も増していく。
2. 荷重が増加しても、ほとんど超音波の線は予想に反して変化しなかった。
3. 切欠き底の半径が増すと応力が減少した。

これらの結果は次の学会で発表された。

日本設計工学会、関西支部、平成12年11月、研究発表講演会。

## 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検討している。これまでに、乳房の変形、臀部の変形への適用と、その結果を用いて、例えば椅子の座り心地評価を行う研究等を行ってきた。

今年度は、前腕部の変形への適用を行った。具体的には、前腕部にバッグの紐を掛け、バッグの重さの違いによる前腕部の変形の違いを解析し、その結果からの痛みレベル評価を試みた。これまでの乳房や臀部への適用と異なるところは、変形シミュレーションにおいて骨部の影響を考慮する必要があることで、そのモデル化と、骨と筋肉の接触面での境界条件指定の検討を行い、妥当なモデル化のノウハウを獲得した。前腕部の変形解析結果は実験結果と検証されており、提案するモデルによる解析結果は実験結果と一致することが確認されている。

また、本研究の成果を応用して、人体各部の変形シミュレーションを行え、痛覚や圧覚を評価できるバーチャルヒューマンの構築を行っているが、今年度その成果をSIGGRAPH 2000(米国・ニューオーリンズ)で発表し、好評を得た。

さらに、本研究の成果を応用した「自動車用椅子の座り心地評価」の受託研究も、本年から実施している。

Y. Maekawa, E. Kato and F. S. Lai: Virtual Human That Can Predict Comfort and Pain Level, Conference Abstracts and Applications SIGGRAPH 2000, p. 272, 2000.

## 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）

鋼構造物の大型化省力化に伴い、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を解明することは不可欠の問題となってきた。しかしながら、連成不安定現象問題は柱および構成板の両者の複雑な因果関係により複雑な崩壊挙動を示す。したがって、これらの解明には実験的研究では困難であり、これまで数値解析的手法により研究を進めてきている。

本研究では、箱形断面の中心圧縮材について3次元離散化モデルを対象とし、変位法で軸力を与えて弾塑性有限変位解析を実施し、崩壊過程の直ひずみ、変形、応力状態について詳細な分析を行っている。これまで、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（ $\bar{\lambda}$ ）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について主に検討してきたが、これらは、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の部材について研究を進め、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た。

平成12年度はこれまでの解析結果に基づいて、解の収束性を考慮した最適化した離散化モデルを用いて解析を行い以下の結果が得られた。

- (1) 弾塑性領域における中心圧縮材（いわゆる短い柱）について直歪み判定係数を求め、崩壊モードに全断面が降伏する降伏崩壊が存在することを明らかとした。また、連成座屈が存在しない領域も明らかになった。
- (2) 柱としての関連細長比（ $\bar{\lambda}$ ）と構成板の有効幅厚比（ $R$ ）の相関図において、崩壊時の極限耐荷力の曲線と、これまで提案してきた直歪みの判定手法を用いた判定基準の変化による崩壊モードの類型化の相関図を提示出来た。
- (3) 初期不整（柱のたわみ、構成板のたわみおよび残留応力分布）の影響による崩壊モードの判定基準と崩壊モードについても検討を加えた。
- (4) さらに崩壊過程の構成板の応力分布に着目した分類法についても検討を行った。