

非線形構造力学

Non-linear Structural Mechanics

主任研究員：小堀修身

分担研究員：太田 修、工藤哲男、前川佳徳、福井 毅、楯列俊夫

非線形構造力学では各研究員がそれぞれの分野で非線形現象を取り上げて、その解析を行って来ました。やがてこれらからは非線形現象の例の共通点を見い出して、解析のための統一した手法へ発展させようとしてこれまで研究が進められてきました。所属研究員は一時は8名から9名が所属しておりましたが、定年その他の事情等で14年度の所属研究員は6名になりました。中でも昨年度まで主任研究員を勤められた楯列俊夫工学部教授が研究なかばで病魔に襲われ、14年11月他界されました。これまでこの研究組織を発展させて、また自ら中心となって他の研究員の研究をリードしてこられた功績は大変大きいものであります。14年度のご本人の研究成果まとめの時期の頃であり、長年の材料の成形性特に深絞りに関する分野の研究では多くの業績を残しておりましたので、本研究組織のテーマである材料の非線形挙動に関する知見には注目するものが見られた点を考えるとき大変残念である。楯列前主任研究員の代理で主任を努めることになった私小堀には当初戸惑いばかりで、他の研究員にご迷惑をおかけした点はこの場をお借りしてお詫びしたい。

14年度の研究員の中で、2名は土木工学、機械工学が2(1)名そして残り1名が情報システム分野となっています。科学技術の進歩はこれまでの線形理論では説明のつけられない現象の解明へと向かっていて、研究の先端や研究者の興味の対象も次第にこうした方向へ向かっているといえます。その根底にあるのはコンピューターの発展とソフトの開発により複雑な解析が比較的短時間でできる点にあるといえます。所属研究員は平成14年度も積極的な研究活動を行って来ました。以下に各研究員の研究概要を示します。

太田研究員は長年土木工学の鋼構造物全体の崩壊についてを研究のテーマとしており、これまでに局所梁が大たわみを伴いながら繰り返し水平載荷の負荷を受ける多層のスパンについて取り上げてきた。多層のうちで解析は2層や4層スパンが対象であった点をさらに拡張してこれらの諸力学特性が多層スパンでも同様に生じるか骨組み全体を崩壊に導くかどうかについて基礎的な検討に入った。

工藤研究員は昨年度の榎木研究員のテーマを引き継ぎ、発展させることを狙いとしている。土木構造物、特に道路橋などは鋼材を溶接して組み立てられた中心圧縮材料構造が中心となる。この鋼材は製作段階で残留応力や初期不整量の存在することが多いので、このような部材に圧縮荷重を漸増させると極限圧縮力で急激に機能を失って崩壊する“座屈”と呼ばれる現象が生ずる。土木設計上これは柱と構成板との積で評価される手法が用いられるが、実用上十分な設計法といえない点が見られる。工藤研究員はこのような中心圧縮材料の崩壊過程を弾塑性有限要素の手法を用いて解析し、この崩壊メカニズムに基づく評価法を提案していて、柱と構成板の連成不安定現象について詳細な解明を目指しているところである。14年度

は両端固定梁を用いて、拘束条件に近いモデル化について実験を行い、その結果を検討している。

前川研究員は人体の変形そのものが非線形現象である点に注目して、これまでに乳房の変形、臀部の変形、前腕部の変形などを取り上げてきた。人体を超粘弾性体モデルとして、人体と物との接触に伴う人体側接触大変形を解析しようとしている。コンピュータ内部に仮想された人体モデルを構築（バーチャルヒューマン）して、このモデルが他の物体と接触した時の変形をシミュレーションする。この結果から人間が感じる心地（主として圧覚、痛覚）を評価できるようにする研究である。たとえばいすに着座した状態をモデル化すると、着座姿勢によってその姿勢が評価することができる。前川研究員はこれを接触面からの情報としていすの使用感を評価へと発展させている。この応用例として、車のシートをモデル化してこのシートに着座させた時の臀部の変形シミュレーションを解析すると座り心地を評価でき、付加価値の高いシートの設計に役立つ。また持ち運びするバッグの紐による腕の痛みの評価から快適なバッグと紐の関係が見出すことにも役立っている。この研究は広範囲で応用できるが、将来福祉、介護関係でも役立つ分野への応用を手がけている。

機械工学科に所属する福井研究員は主として非線形現象を伴う構造物の応力解析を理論的に行っている。解析には複素応力関数を拡張した手法を取り入れていて、これにさらに一昨年以来材料の異方性を考慮した問題へと発展させている。コンピュータを利用した近似計算は可能であるが、厳密解の導出には、手計算による手法がやはり優れているようである。この実験的検証にはモデル化する材料にも苦勞する点から、小堀主任研究員が手法とする超音波の伝播挙動の観察から異方性材料中ではどのように進行して反射するか異方性の程度との関係などについて共同研究テーマとして取り上げた。14年度は音響インピーダンスの異なる2種類の材料を準備して、境界面や端面での反射、小穴や溝の部分を通過する音波についての基礎実験を行った。

小堀主任研究員は前述のように、超音波を利用して材料中を伝播する音波の音速や減衰を測定して、材料内部の応力分布や材料の異方性の程度、内部欠陥などを非破壊的に評価する研究を行っている。この対象が非線形挙動を示す材料であり、これまで金属はもちろん複合材料やセラミックス、最近ではレンガ、アスファルトそして生体材料へと発展させている。H14年度は主として耐火物の超音波伝播速度の測定と金属丸棒の内部のねじり負荷による弾塑性境界とせん断応力分布測定をテーマにして研究を行った。供試材料に超音波の縦波や横波を入射させて伝播経路の音速測定結果から材料の特性や応力状態、弾性変形と塑性変形の境界判定などを実験的に明らかにしようとした。前者は大型の燃焼炉に利用されているレンガの寿命を燃焼炉を止めずに内部のレンガの破損調査や交換取替え時期を検査することに役立つもので、業界からの要請もあったテーマのひとつである。後者は動力伝達のシャフトの設計強度計算と実用上破損する際の強度の比較のために、弾性変形と塑性変形を考慮した設計基準を決めるための資料として活用されるものである。研究成果は各種研究会で発表している。中間報告としてその概要を後述する。

耐火物の超音波伝播速度測定

小堀修身

1. はじめに

燃焼炉に使用されるような炉には、高温となるためにレンガが古くから使用され、その種類も今では目的に合わせた各種のレンガが考案されている。しかし、燃焼炉の長時間使用はレンガの寿命を短くし、やがて焼け落ちてしまうので、炉の内部を周期的に検査し、場合によっては、レンガを取り替えることも必要になる。現在、炉の燃焼をストップして炉に入り、人的な目視と検査が行われるが、そのための費用と、その間のストップによる処理物の蓄積を考えると、とても大きな損失となっているのが現状である。したがって、これら内部の肉厚減少などを、炉をストップせずに測定する技術に、現場では大いに期待されるようになってきている。

一方、固体中を伝播する超音波は、伝播経路の内部情報を知る手がかりとして有効である。これらは材料や構造物の非破壊的検査の手法として多くの場面で利用されている。もし耐火物の非破壊検査法で炉をストップせずに外部から内部の肉厚減少を知ることができればローコストで楽に検査を行うことができる。本研究は耐火物の非破壊検査法を利用するための基礎的データを得ようとしたものである。

2. レンガ試料

実験に使用したのは市販の耐火物（商品名 ML-B）および断熱用（丸越 C-1）の二種類である。耐火レンガは気孔率が小さく、緻密に作り上げた材質で、孔径が小さく、孔量が少ないため液相がレンガに浸透しにくいという特徴がある。それに対して断熱レンガはかさ比重が 1/3 から 1/4 と非常に軽く、炉軽量化に非常に役立つと同時に炉壁の蓄積量が少なく、また熱伝導率が 1/2 から 1/3 と小さいため壁厚さを薄くできかつ放散熱量を少なくすることにその特徴を有する。それらの寸法形状と性質はメーカーのカタログから Table.1 のようになっている。

Table.1 レンガの種類、寸法、性質

	耐火レンガ	耐火断熱レンガ
商品名	ML-B	C-1 Y1
材質	ムライト質	粘土質
寸法(mm)	64×114×229	65×114×230
かさ比重	2.35	1.06
圧縮強さ (MPa)	62.8	5.9
熱間線膨張率 (%) 1000°C	0.51	0.49
残存線膨張収縮率 (%) 1500°C	-0.05	0.57
	1500°C	1300°C

後述する実験では Fig.1 に示すように、レンガの A、B、C 面から垂直に音波を入射して音速を測定した。

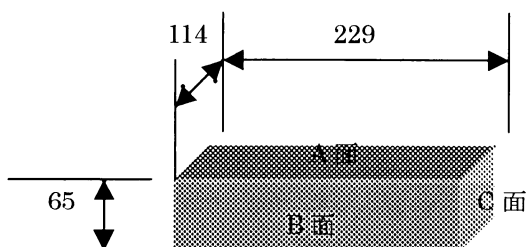


Fig.1 耐火レンガの寸法と波の入射面の例

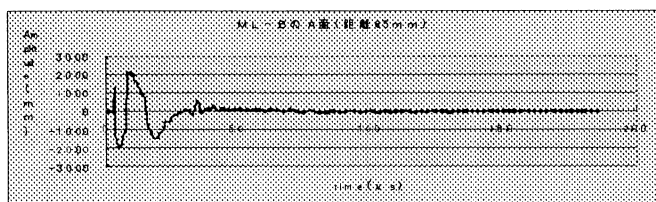
3. 実験装置

実験装置には超広帯域の装置 UCT12b (アイ・エス・エル社製) を使用し実験を行った。UCT12b は、専用の送受信アクティブ探触子を利用する。この探触子内部には圧電素子、コンデンサー、抵抗の他に増幅用 IC が組み込まれている。送信用アクティブ探触子はステップ状の波形による励振によって送信振動子の厚さが瞬時にステップ状の一定厚さに変化し、結果として半波の波の超音波が送信されるようになっている。音速の測定には反射法を主に利用した。透過法は最初に表れる波が透過波で現象も理解しやすいが実際の炉の非破壊検査のためには反射法が実用的である。実験では参考までに透過法のデータもとった。送受信に利用した探触子は周波数 0.5MHz、 $\phi 40$ のもの (縦波用) を使用した。

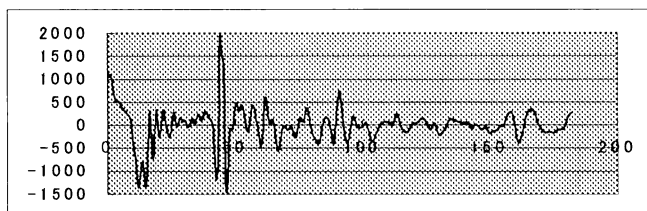
4. 実験結果

① それぞれのレンガ

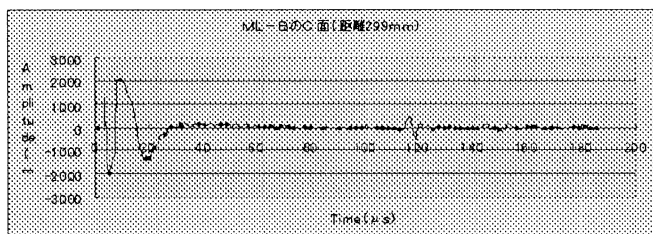
耐火レンガおよび断熱レンガの各面に超音波を入射させて反射波形の立ち上がり時間と伝播距離とから音速を求めた。Fig.2 (a)、(b)、(c) は耐火レンガ (ML-B) の各面に入射したときの波形の例を示す。このレンガはその特徴を充分発揮させるために、製作過程では配分の調整のあと B 面に所定の圧力を加えて十分に固めたあと焼入れ炉に入れられる。(したがってコストパフォーマンスも高価である。) 音速測定の結果は B 面が 4854m/s と大きく他の A、C 面は 3916m/s、4005m/s とほぼ同程度であるから、この A、C 面は性質が類似していて、音速の大きい B 面は硬いという事実とも対応している。Table.2 には断熱レンガの測定結果とともに音速の測定数値をまとめて示した。断熱レンガは各面の音速は、幾分違っているが耐火レンガの用に特定の方向性を持っていないことがわかる。製作過程においても先述の耐火のような配慮はないとのことである。



【a】A面の反射波形



【b】B面の反射波形



【c】C面の反射波形

Fig.2 耐火レンガの入射面による超音波伝播波形

Table.2 レンガの縦波音速 (反射法m/s)

面 \ 縦波	耐火レンガ ML-B	耐火断熱レンガ C-1 Y1
A面	3916	2241
B面	4854	1935
C面	4005	1896

② 組み合わせ

Fig.3は、実際の燃烧炉の内壁を想定したようにレンガを組み合わせせた図を示す。上が断熱レンガ、下が耐火レンガになっており、耐火レンガは実際に使われている物で台形の形になっている。これを組み合わせせていろいろな形に構成していくのでその基本形を取り出して配置した。測定は Fig.3に示すように断熱レンガの上に探触子を置いて、縦波を上から入射させ

る。反射の受信波形は上部の断熱レンガからの反射波と耐火レンガの底面での反射波の二つが適当な感度調整で得られる (Fig.4)。Fig.4 における最初のピークの立ち上がりから計算される速度 2220m/s は先述した断熱レンガ A 面の音速に近く、先のピークと後のピークの時間差から得られる音速 4089m/s は耐火レンガ C 面と一致していることがわかる。

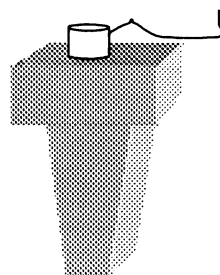


Fig.3
組み合わせレンガの測定

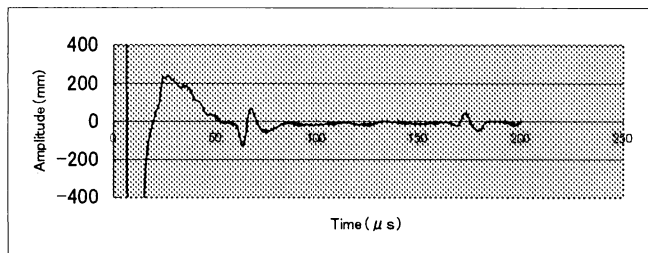


Fig.4 組み合わせレンガの波形

5. まとめ

性質の異なるレンガの組み合わせでも個々の音速がわかれば、実際の炉のレンガ厚さの非破壊測定に役立つものと思われる。

この研究は日本機械学会関西支部にてH14年3月 発表

ねじり応力分布の超音波による測定

小堀修身

1. 緒言

金属内部の探傷などの非破壊的な手法として利用されてきた超音波は、科学技術の進歩と共に登場した複合材やセラミックスなど新しい材料への適用と広がり、単に傷や欠陥の検査にとどまらず、材料評価の手法となってきた。また近年、高度経済成長期に建造された橋梁などの建造物の亀裂やコンクリートの落下などに代表される材料の劣化・損傷などの検出や評価法としても重要な位置を占めてきている。技術的、性能的な進歩も目覚しく、従来の接触式超音波の計測から非接触超音波の計測やレーザー超音波、空中超音波の実用化が成されている。またデジタル超音波波形処理の機能進展による解析方法も進歩している。本年10月に開催された第6回 FENDT(Far East NDT)の国際会議でも会期中の7セッションが超音波テスト関係でおよそ35件近くの講演がなされた。コンクリートなど他のセッションの超音波利用の講演を含めるとかなり多くの研究が超音波関係で占められている。

他方、固体中を伝播する超音波の速度が応力に依存してわずかに変化する現象(音弾性効果)を利用した応力測定は非破壊的な測定法として注目されているが、音速測定に含まれる材料の初期異方性と応力の効果を分離するための簡易で効果的な方法の確立はいまだに模索されている。こうした状況にあっても応力測定の対象として興味ある分野は数多い。特に弾性領域のほかに弾塑性境界の判定や塑性域における応力状態の把握は亀裂の発生や進展の研究と結びつくので、応力測定の意義はおおきいと思われる。ここではアルミを供試材としてねじり負荷を与えて、表面近傍を塑性変形させる。このときの残留応力分布と弾塑性境界の判定を超音波的に評価しようとした。

2. 実験方法

2.1 試験片とねじり負荷

供試材は市販のアルミニウム52S引き抜き丸棒である。成分表はTable.1に示すようにMgとCrの他にFeも含まれている。これを直径30mmからFig.1に示すようにつかみ部を採って、ゲージ部直径25mmまで機械加工した後、ねじり試験機(RET-50 島津)を用いて負荷を加えた。あらかじめ試験片表面にひずみゲージを軸線と45度をなす方向にあわせて貼り付け、トルクTとひずみゲージの読みの関係を示したのがFig.2である。この直線部分から計算される横弾性係数Gは $G = 25\text{GPa}$ となっている。なおこの図は試片に50.0 kg・mのトルクを加えた後除荷した場合を示す。これによって残留応力状態を作り出している。超音波測定のため、この試料は中央部分を切断し直径25mm、厚さ30mmに機械加工した。

Table.1 アルミ材料の成分表

化学成分	SI	FE	CU	MN	MG	CR	ZN	AL
規格値					2.2 以上	0.15 以上		RE
	0.25 以下	0.40 以下	0.10 以下	0.10 以下	2.8 以下	0.35 以下	0.10 以下	
含有量(%)	0.07	0.14	0.02	0.02	2.51	0.17	0.01	RE

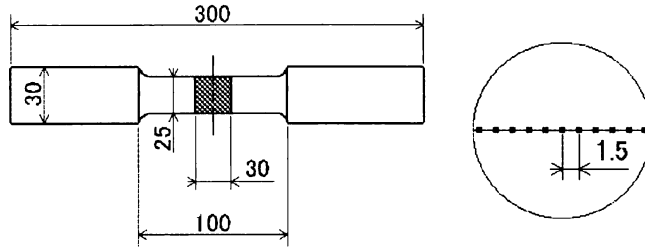


Fig.1 アルミ試験片と切り出し加工測定点

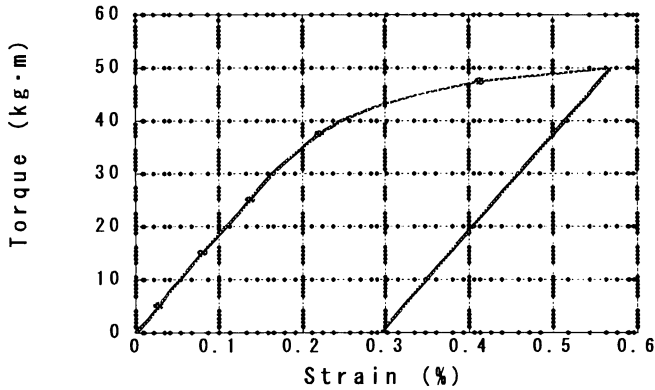


Fig.2 トルクひずみ線図

2.2 音速測定

音速測定にはシングアラウンド音速測定装置（超音波工業）を用いた。探触子は縦波用として5Z10N（KGK）、横波用として5C55N（KGK）である。試片の中央部から厚さ30mmの円板を切り出してその中心軸上を1.5mmごとにセンサーを移動させて測定した（Fig.1 測定点参照）。特に横波は偏り方向を半径方向、および円周方向に回転させて直交する2方向の音速を測定した。

2.3 音弾性則

音速変化から応力を求めるには以下のような数式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{K_L} \left(\frac{\Delta V_L}{V_{L0}} \right) + \frac{\Delta(V_{\theta} - V_r)}{V_{T0}} \frac{1}{C_A} \right] \\ \sigma_r &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{K_L} \left(\frac{\Delta V_L}{V_{L0}} \right) - \frac{\Delta(V_{\theta} - V_r)}{V_{T0}} \frac{1}{C_A} \right] \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} (\sigma_r - \sigma_{\theta}) \sin 2\varphi \dots (2)$$

ただし、仮定として材料の等方性、2次元応力状態、初期異方性 ≈ 0 、主応力 σ_r 、 σ_θ とする。

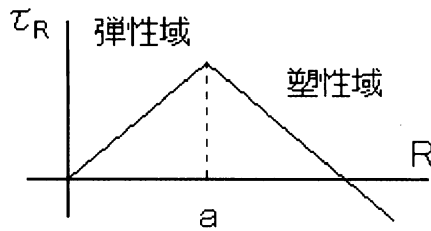


Fig. 3 残留応力分布

また、Fig. 3 はねじり負荷を加え除荷した時の残留応力を理論的に導いたものであり、これより弾性域では残留応力は増加し、塑性域では減少していることが判る。したがって、弾塑性境界は a 点である。

3. 結果

Fig. 4 は初期状態の縦波の音速 V_{L0} および横波の音速（円周方向 $V_{\theta 0}$ 、半径方向 V_{r0} ）の分布を示す。このグラフから提供アルミ材は音響異方性の程度も小さく中心から一様な分布になっていることが判る。Fig. 5 は負荷後の音速測定結果をもとに初期状態からの音速変化 $\Delta V = V - V_0$ を示す。

Fig. 6 は残留応力の分布を示すものであり、上記より本実験の結果では中心から 6mm 付近が弾塑性境界であると思われる。

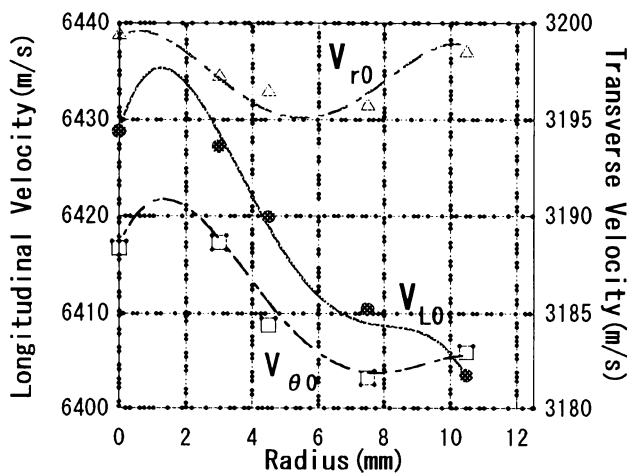


Fig. 4 初期状態の音速

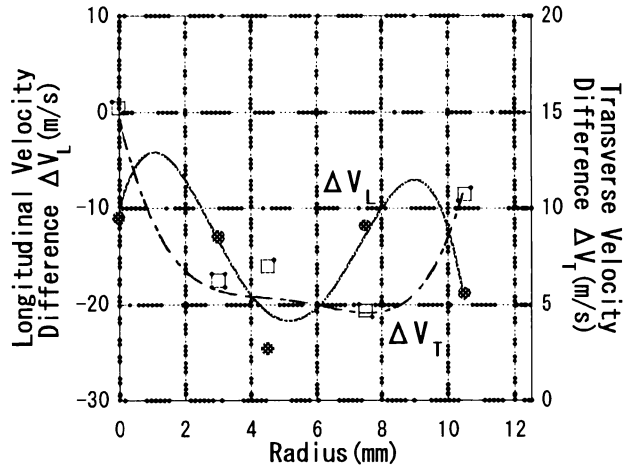


Fig.5 縦波及び横波の音速の差

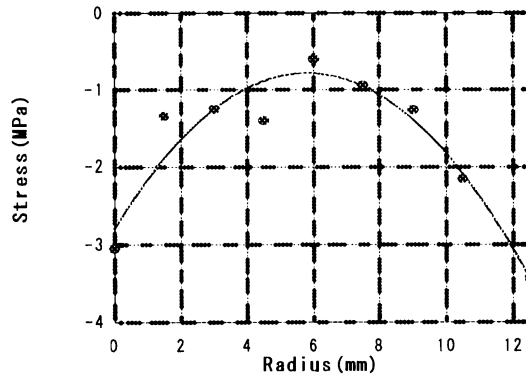


Fig.6 残留応力分布

4. 結言

本実験ではアルミ材の径に対して探触子の径が大きく、今後の実験にはより小さな探触子を用いてより多くの測定点で計測し、測定精度を向上させることも必要だと考えられる。

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載荷を受ける多層多スパン鋼骨組の全体崩壊」

3層2スパンの多層多スパン骨組を研究対象とする。既応の研究(2層1スパン骨組と4層1スパン骨組が対象)で得られた崩壊過程における諸々の力学特性は多層多スパン骨組の部分でも生じ得るか、それらは骨組全体を崩壊せしめる原因となり得るか、またその崩壊過程やシュークダウン現象の過程を検討する。多層多スパン骨組試験を行う目標に向けて、予備的な基礎試験を行ってきたが、本年をその最終年度とする。

試験装置については、口の字型反力フレームの新設に伴う試験ベースプレートの大型化に適合するように、3つの載荷装置(供試体頂部の各々の柱頭に作用する一定柱荷重・局所梁に作用する一定梁荷重・頂部に作用する制御水平変位)を平成12年度から改良してきている。供試体については、その厚さを15mmから18mmに増加させ、供試体と各載荷装置の取り付けを工夫しながら供試体を設計し、平成13年度はT3-0供試体(15mm厚)、本年度はT3-1、T3-2供試体(18mm厚)について予備試験を行ってきた。供試体に与える各装置の影響を含めて実験結果を検討した結果、来年度の本試験に向けて次のことがわかったので報告する。

- i) 供試体頂部に載荷する水平変位の制御点は、形状に関して左右対称な軸線と最上梁の材軸線の交点とするのが望ましい。それに近い状態として、最上梁軸線から27.5mm上の平行線と対称軸線の交点を制御点とする。
- ii) 最上層の梁を一般層の梁と同じ形状にとる。各々の柱荷重は、分配側による拘束を除けば完全に独立した作用状態になる。
- iii) 供試体の構面外の変形を無視してよい状態にするため、供試体厚さは18mmとする。
- iv) 試験条件(柱荷重・梁荷重・水平変位振幅)に関して、適切な組み合わせ値を得た。

工藤 哲男 (工学部)

鋼材を用いた中心圧縮材は、鋼板を溶接し組み立てられ製作段階で残留応力や初期変形などの初期不整量が存在する。この部材に圧縮力を漸増して作用させると極限圧縮力に達すると急激にその機能を喪失し崩壊する現象が発生する。この現象は座屈とよばれ圧縮部材では設計する上で重要な問題であり、道路橋示方書においては柱と構成版を個々に検討を加え、部材としてはこれらの積で評価されている。この設計法は、現在推し進められている性能照査設計や限界状態設計には程遠い感がある。

そこで本研究では、薄肉箱形断面中心圧縮材の崩壊過程について弾塑性有限変位解析を用いて、それらの崩壊メカニズムに基づく評価方法について提案してきたが、柱と構成版の連成不安定現象の解明には、まだまだ不明な点が多く種々検討を加える必要がある。そこで、平成14年度は、両端固定の初期不整としてのたわみは形形状を拘束条件に近いモデル化につ

いて検討を加えた。まず初期たわみ波形の形状をコサインカーブとし、その時の最適なメッシュ割りについて検討した結果、従来の手法に若干の修正を加えることで簡単に最適解を導くことができた。次に、初期不整としてコサインカーブを導入することによって座屈現象におよぼす影響について検討し、さらに圧延鋼材、調質鋼材および森脇ら提案した変形性能に優れた鋼材についても検討を加えた。この結果、初期不整としてのたわみ形状が極限耐力に与える影響は大きく、また鋼材の種類に与える影響は顕著であり、これらはこれまで提案している崩壊モードの分類においても同様の結果が得られた。

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検討している。これまでに、乳房の変形、臀部の変形、前腕部の変形への適用などを行ってきて、一昨年度からは、「着座時の変形をシミュレーションできるバーチャル臀部」の開発に集中して研究を進めてきた。この研究での臀部モデルは、骨盤部を剛体とし、それ以外の臀部は均質な非線形弾性体（ムーニーモデル）としたものであるが、今年度は大腿部（剛体）もモデル化し、非線形弾性体にオグデンモデルを採用して、実験より得られた変形状態とより一致したシミュレーション結果を得た。

また今年度は、足部の変形を靴のインソールの評価に応用することも行った。手法は、臀部変形シミュレーションと同様で、3次元非接触形状測定機により、被験者から足の外部形状を、日本人標準骨格モデルから骨部形状を取り込み、足部モデルを構築した。それをを用い、直接床に立った時と、各種インソールを挿入した時の、足部接触面（足裏部）での荷重分布をシミュレーションし、実験結果と一致することを確認した。この荷重分布結果と心地との相関を求めれば、インソールの評価を行うことができる。

なお、これまでの成果について、「バーチャルヒューマン構築による製品使用感の評価」として解説論文にまとめ、発表した。

前川佳徳： バーチャルヒューマン構築による製品使用感の評価、科学と工業、77-6、p.p.282-287（2003）。

切欠きガラス平板の超音波測定

福井 毅（機械工学科）

この実験はガラス試験片に厚さ方向から超音波を通過させ、その通過状況を偏光板を用いた可視化装置（ガラス上の模様を目に見えるようにした装置）で、そのガラス上の模様を観察する実験である。

今回は、2枚の長方形（パイレックス）ガラスの間に6mmのアルミを挟んだ試験片を使用し、超音波を通過させて、アルミ下のガラス部の縞の状況を、パソコンに取り込み観察した。なお、アルミには直径3mmの穴が一直線上に3個空いており、穴と穴の間隔を3mmから6mmまで変化させて、測定されている。その結果、次のようなところがわかった。

1. ガラスとアルミの間、およびアルミとガラスの間で反射波を生じ、下のガラスには上のガラスより超音波の通過度は半分程度に減ったと思われる。
2. アルミに直径3mm、深さ20mmの穴をあけると、切りくずを取りながら空けても、穴の周囲に1mm程度の塑性域部分が出来るようである。
3. 穴と穴の間隙が3mmの時には、下のガラスにほとんど超音波は通過しなかった。たぶん塑性域の部分が影響していると思われる。
4. 穴と穴の間隙が3mmを越えると、下のガラスに超音波が見え始めた。しかも、アルミ板から離れに従って超音波は太く見えた。その原因は超音波センサーがガラスに当たっている長さが26mmあり、右端から届いた波と左端からの波とが合成されるためと思われる。

ただ今回は、アルミが薄かったこと、またアルミに穴を空けると塑性域を多く生じたため、あまり良い結果は得られなかった。