

## 非線形構造力学

### Non-linear structural mechanics

主任研究員名:小堀 修身

分担研究員名:太田 修、小川 清六、工藤 哲男、小松 定夫、楯列 俊夫  
中村 康範、福井 毅、前川 佳徳、森脇 良一

#### 1 はじめに

長期的共同研究組織として「非線形構造力学」が研究組織に参加したのは平成3年で、当時の研究員は工学部交通機械工学科の小川清六教授を主任研究員とし、以下研究員には土木工学科（現都市創造工学科）小松定夫教授、太田修助教授、機械工学科 楯列俊夫教授、情報システム工学科前川佳徳教授、と私小堀（機械工学科）の6名でグループを構成して研究を開始した。産業研究所が長期的共同研究組織を立ち上げた最初の年でもあったと記憶しています。以来ご定年のためメンバーを外れたり海外留学などで中断した方もありますが、新しいメンバーが加わったりして今日まで研究を続けて来ました（表1参照）。太田研究員は初年度から変わらない唯一のメンバーであること、土木工学科の小松教授が退任された後その研究を森脇良一教授が平成8年から研究員に加わって担当された。さらに森脇研究員の退任（平成13年）以後には工藤哲男講師（都市創造工学科）が研究員としてその研究を引き継ぎ今日に至っていること、機械工学科福井毅教授は平成8年から研究員として活動され平成16年退職までその活動を続けられたことなどである。また小川主任研究員がご退職の後は楯列研究員が主任研究員としてまとめ役をされ研究をリードしていましたが、平成13年病気になり、代理として私がまとめをさせていただいた。

#### 非線形構造力学 所属研究員

	H 3	H 4	H 5	H 6	H 7	H 8	H 9	H 10	H 11	H 12	H 13	H 14	H 15
太田 修	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
小川 清六	○	○	○	○	○	○	○						
工藤 哲男												○	○
小堀 修身	○	○	○	○	○			○	○	○	○	○	○
小松 定夫	○	○											
楯列 俊夫	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○		
中村 康範		○		○	○	○	○						
福井 毅						○	○	○	○	○	○	○	○
前川 佳徳	○			○	○	○		○	○	○	○	○	○
森脇 良一						○	○	○	○	○	○		

これまで「非線形構造力学」は研究活動について毎年中間報告を行ってきたが、成果報告としてまとめたものを発表することはありませんでした。規則が制定され、5カ年の経過後に報告書を提出することになったのを機にこれまでの状況についてもあわせて報告します。

## 2 「非線形構造力学」について

研究組織の名称がこのように名づけられた背景と趣旨について当時説明はあったように思うのですが、今となつては確かめること出来ません。小川教授と小松教授の話し合いで決まったように記憶していますが、名称の由来については以下のように理解しているのです。

よく知られているように入力  $x$  に対する出力  $y$  がグラフで表したとき直線になる場合つまり 2 つの量の变化が互いに比例関係にある場合を線形の関係という。この世界では入力  $x_1$ 、 $x_2$  に対して出力がそれぞれ  $y_1$ 、 $y_2$  であれば  $(x_1 + x_2)$  に対して  $(y_1 + y_2)$  の出力が成り立つ (重ね合わせの原理) ことも知られている。ここではすべての入力に対して出力が計算できるので、種々の解析や設計が容易になる。たとえば重さと体積の関係、力と加速度の関係や音の重ね合わせなど自然現象では線形の関係がかなり多いように思われるが、現実にはこうして整理すると理解しやすいと見ている場合や、変化のあまり大きくない領域で線形とみなしている場合もあるからである。線形代数や線形計画法などの学問は解析の背景として入出力関係に一次(線形)関係をベースにして発展してきた体系である。線形でない場合を非線形という。自然現象は厳密には非線形現象であるが線形からのはずれが十分小さければ、または近似的な解として十分な量を見出しうるときには線形理論が通用されている。これまでの科学の発達初期段階ではこうした理想化もあって本質的な現象の理解が進められてきた。しかしながら科学の進歩は理論の精度を上げるために線形化せずにその解を求めようとしたり、本質的に非線形現象を扱う分野にまで広げられてきた。空気の抵抗を受ける物体の落下や粘性を伴う物体の振動、船の速度の増加とともに増大する水の抵抗などその対象毎に個性的な非線形現象が存在し、これを非線形理論としての理論的解析や体系化の研究がコンピュータの発達とあいまって幅広く行われるようになってきた。

こうした非線形現象の力学との結びつきについては、先述の自然現象の例でもわかるように、物体(粒子)の移動、変形の状態を調べるのが力学であり、時間とともに推移する非線形現象の存在下で、物体の動きを時間の関数として表そうとすることから、これに非線形力学の名称を与えている。非線形力学の代表例としてしばしば取り上げられるのが単振り子の振動である。糸に重りをつけて多端を固定し、重力下で振らせる時、糸が鉛直に静止した状態からの角度に対する運動方程式を解く問題である。角度が小さければ容易にその解は得られるが大きくなると調和振動から離れて非線形性を示す。他には惑星運動やクーロン力によって束縛された電子の運動(ケプラーの運動)、3次元空間で自由度3を持つ物体の運動などがある<sup>(1)</sup>。また運動方程式の中に非線形性を取り入れると、物体の運動の軌道は初期の変動によって大きく変動することが知られた。こうした力学系の不規則で複雑な運動の挙動を示す現象をカオスと呼び、カオス運動、カオス暗号方式などの研究も行なわれている<sup>(2)、(3)</sup>。

「非線形構造力学」は対象を構造物にするということであるが、部品の組み合わせからなる構築物ばかりでなく、構成する材料までもその対象としている。

## 3 研究員の非線形対象分野

初年度から活躍された小川主任研究員は溶接構造物の継ぎ手部分に発生する疲労き裂がもたらす強度の低下と材料の変形について系統的な研究を行ってきた。き裂の発生と進展には通常の線形弾性力学では解決できない問題を数多く含んでいる。この研究は船体の強度評価に重要な資料を提供することになっている。小松研究員から森脇研究員そして工藤研究員へと受け継がれてきた研究は大型構造物を構成する材料として使われる鋼板の有する問題を取り上げてきた。構造物の長大化や軽量化のために大型の薄肉断面を有する部材が使われるが、こうした鋼材は初期段階ですでに曲がりや初期たわみ、初期残留応力が発生していることが多い。ここに荷重が加わると本来の負荷に対する抵抗力のほ

かに初期不整による応力が相乗効果となって塑性変形の進展やたわみを増大させたりする。こうした連成作用に伴う不安定な現象の存在とその実態について系統的な研究を行ってきた。この理論的背景として弾塑性の有限変形解析が適用される。弾性論が微小な線形理論に基づいて体系化されているので大変形に対して近似解は当てはまらないためである。太田研究員は初年度から一貫して骨組み構造物の弾塑性安定問題を取り上げてきた。大たわみの生ずるような繰り返し負荷を受ける多層からなる多くのスパン骨組み構造物の崩壊につながる過程を追求している。はじめは2層からなる1スパンの骨組み構造模型から実験と解析を行い、順に複雑な骨組みへと発展させてきた。楯列研究員はプレスによる機械加工で生産性を向上させる目的の研究を進めてきた。板状の材料を対象とする板金成形と金属塊をプレスする鍛造加工それぞれの成形法の特徴を考慮しながら混合型の成形法についても検討するために深絞り加工によってコップ状の成形加工品に対して実験的な変形挙動観察とその理論的解析を進めてきた。この解析は剛体の塑性理論や弾塑性増分理論に基づいている。楯列および太田研究員の対象は異なっているが、いずれも現象が応力一ひずみの線形理論では説明しがたい。前川研究員の研究は臀部、腕部、乳房など人体の変形を取り上げている。人体の変形そのものが線形弾性理論では説明できない非線形現象を示すので超粘弾性体モデルとしての扱い、人体と物との接触に伴う人体側接触大変形の解析を目指している。これによって人間が感じる心地（圧力覚、痛覚など）を評価しようとしている。こうした研究は人間工学的な観点から多くの応用分野で期待される。

福井研究員は構造物の外力による応力解析を行ってきた。これまでの複素応力関数を拡張して、応力一ひずみの非線形性と材料の異方性を取り入れた手法を理論的に検討中に退職された。この実験的検討のために異方性の程度の異なる材料を基にした実験が途中になっていて残念に思っている。研究員小堀は固体中を伝播する超音波に注目してその伝播特性から材料の異方性の程度や残留応力の評価を行ってきた。固体中に微小振幅の音波（超音波）を入射すると音速の大部分は材料の定数（弾性定数）と密度によって決まることは線形理論から理解されるが、ここからわずかに変化する部分がある。それが材料内部に存在する応力や材料の異方性の程度に帰因している。この変化は非線形理論に基づいて説明される（音弾性理論）。この結果を利用すると残留応力の非破壊測定が可能になる点で注目される。また正弦的な音波が固体中に入射されても材料内部に微小なわれや欠陥があるとき、そこを伝播した波の波形の崩れや位相の変化が観察される。これを非線形超音波とよび、非破壊的な材料の診断や評価に利用できる。

#### 4 まとめ

以上のように「非線形構造力学」研究員は何らかの形で非線形現象に伴う力学的効果について研究を重ねてきた。個々の詳細はこれまでの各研究員の報告（含む中間報告）を参照していただくとして、それぞれの非線形現象がもたらす効果を検証し、解析も進めたが現段階では全体としての体系化には至っていない。そのための更なる機会が得られれば幸いであると願っている。また非線形現象はこのほかにも多くの工学の分野に見られ、さらには新しいこうした現象の発見もあると思われるので、研究として続ける意味は大きいと考えている。

終わりにこれまで研究を支えていただいた産業研究所の機関と関係者に感謝申し上げます。

#### 参考文献

- (1) 世界大百科事典 平凡社（2005）
- (2) 科学大辞典 国際科学振興財団編 丸善（2005）
- (3) 新しい自然科学 非線形科学の可能性 倉本 由紀 岩波書店（2003）

# 過載荷梁をもつ2スパン3層骨組の層崩壊に関する実験的研究\*

太田 修<sup>1)</sup>・太田充紀<sup>1)</sup>

Experimental study on collapse of story in two span three-story frame model with overloaded beams

Osamu OHTA・Mitsunori OHTA

## Abstract

This paper presents the experimental study on collapse of story or stories in steel frame model of two span and three-story frame modeled as a prototype to tall building. The model was subjected to constant gravity load at the head of third story columns and to the overloaded beam in the middle of left span in the first story and right span in the second story. This was then, quasi-statically subjected to lateral force displacement and to reversed cyclic displacement with initial constant amplitude at the top and then with gradually increased value. Two sets of experiments were performed with the same loading conditions but with the opposite direction of the forced displacement and with almost double the increment of the force displacement amplitude.

The deformation behaviors occurred in the steel models are concluded as follows:

Firstly incremental beam mechanisms do occur in the overloaded beams and their large deflections are inevitable. Consequently, the deflection of waist-sway type on sub-assembly in the neighborhood members also develop and the sway deflections grow up more and more large which then, will undergo several collapses, that is to say, the story collapse stages in occurrence of first story alone, the combination of the first and second stories, the second and third stories and the third story alone.

## 1. はじめに

阪神・淡路地震では層崩壊によって鉄筋コンクリート建屋が全壊する事例が数多く見られた[1]。阪神・淡路地震の地動は長周期パルスタイプに特徴付けられる。東海、東南海、南海地震のような海洋型の大地震では、長周期地動が長時間に渡って、大阪付近に伝播して来るであろうと言われている[2]。この様な長周期・長時間に特徴付けられる地動を受けた場合には、粘りを身上とする構造特性をもつ鋼造建屋でも層崩壊に至って建屋が全壊するという危険に曝されることも限らない。繰り返される長周期地動によって、漸増塑性変形の累積や交番塑性らの問題も加わり、材料の

非線形性および幾何学的非線形性の複合効果はより複雑なものになる。また、一般に構造設計では梁降伏型骨組が推奨されて骨組は設計されてきている。阪神・淡路地震や2004年10月に起こった新潟県中越地震などに代表させられる直下型の地震では地動初期の上下動によって梁が損傷する場合がある。用途変更などによって梁に過大な荷重が作用している場合なども梁の塑性化は避けられない。

本研究は、鋼骨組が地震に遭遇したとき起こる最も危険な崩壊型の一つである層崩壊について、模型供試体を用いて実験的に層の横揺れ崩壊として抽出すること、横揺れ崩壊挙動の発生・成長・終局の変形過程を骨組全体

※ 平成16年11月 原稿受理

1) 大阪産業大学 工学部

の変形進行の過程から解明することを目的とした基礎的実験研究である。実験は次のように行われた。2スパン高層骨組の下3層をモデル化した2スパン3層対称鋼骨組模型の供試体について、高層部の自重（柱荷重）を、供試体の左、内、右の柱材軸線頂部に作用させる。更に1層左梁と2層右梁の中央部が降伏するように、それぞれの中央点に一定鉛直荷重（梁荷重）を作用させる。これらの荷重載荷の後、左柱頂部の水平変位を制御して漸増型定振幅変位を準静的に与え、制御に反応する水平力が内柱頂部に作用する両振り繰り返し試験を行った。同一鋼材から同一形状を有するように製作した2体の供試体に対して、上述の柱荷重をそれぞれ等しくなるように与え、また梁荷重もそれぞれ等しくなるように与えた。ここで1個の供試体に対する柱荷重、梁荷重はそれぞれ等しい。2体の供試体に対する制御水平変位の載荷条件としては、一方の条件を基準にすると、他方では、定振幅変位での繰り返し回数を等しくし定振幅の漸増量を倍にした。また繰り返し制御水平変位の開始の向きを逆にしている。

## 2. 試験の概要

### 2.1 供試体

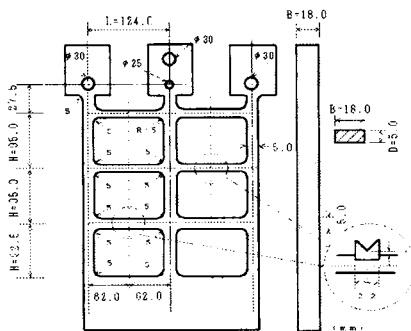


図1 供試体形状および公称寸法

供試体の形状および公称寸法を図1に示す。従来の供試体様式[3],[4],[5]に比べ、最上層梁を下層梁と同じになるように設計した。梁および柱の断面は構面外への変形を避けるため背と幅の比が1:3.6の矩形とする。柱と梁の接合部には半径5mmの円弧部分を残し応力集中を避ける。3層梁の材軸線から上方に27.5mm離れた平行線と左、内、右の各柱の軸線の交点にはそれぞれ直径30mm、25mm、30mmの穴、更に内柱では同じように75mm離れた交点に30mmの穴を開ける。2.2節で述べるように、30mm、25mmの穴にはそれぞれ定鉛直荷重載荷装置を構成する天秤棒、水平力導入装置を構成する棒が挿入される。供試体は、厚さ19mmSS400の同一鋼板からワイヤー切削によって製作した。幾何形状の計測には総合精度7.0 $\mu$ m、最小読み取り0.0005mmの性能の三次元測定機を使用した。2体の供試体について、スパン長さと階高、断面の実測寸法を表1に示す。供試体は精度よく製作されていることを確認した。供試体を切り出した鋼板から10本の14B号引張試験片を採取し、材料試験を行った。結果を処理して得た7個の特性値について、それらの標本平均および標準偏差を表2に示す。

表2 引張試験結果 10本

項目	$E \times 10^5$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	est $\epsilon$ (%)	$\sigma_2$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_4$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_5$ (N/mm <sup>2</sup> )
平均	197	267	189	283	321	348	367
標準偏差	0.04	18	0.05	61	30	27	21
変動係数(%)	21	07	24	22	09	08	06

$\sigma_{2-5}$ ; 数字はひずみ量 (%) を示す。

表 1.1 実測スパン長さと階高

試験体	スパン長さ:L		階高:H		
	左	右	3層	2層	1層
T3-3	123.98	123.98	95.00	95.01	92.49
T3-4	123.94	123.96	94.98	94.97	92.50

[mm]

表 1.2 実測断面寸法

試験体	層	梁		柱		
		左	右	左	中	右
T3-3	3	19.03	18.01	18.01	18.02	18.05
		4.94	5.00	4.99	5.00	4.98
		18.02	18.03	18.04	18.02	18.04
	2	5.01	5.00	4.97	5.02	4.98
		18.02	18.02	18.01	18.05	18.01
		4.99	5.02	4.99	5.02	4.97
T3-4	3	18.01	18.05	18.06	18.08	18.05
		4.98	4.98	4.95	4.96	4.95
		18.02	18.06	18.05	18.02	18.00
	2	4.99	4.95	4.99	4.99	4.99
		18.03	18.03	18.05	18.03	18.03
		5.00	4.96	4.96	4.96	4.97

上段:断面幅B、下段:断面高さD [mm]

## 2.2 実験装置および載荷手順

実験装置は、供試体固定装置、2種類の定鉛直荷重載荷装置そして制御水平変位導入装置の4部分から構成されている。図2に各実験装置の概念図を示す。各装置の詳細は文献[3]に示される。以下のようにマウンティングする。

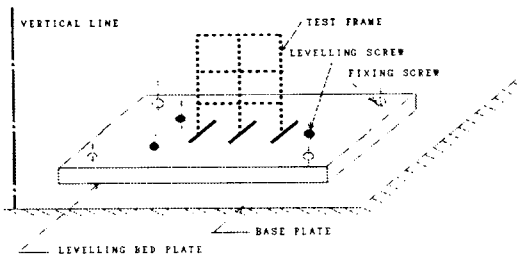


図 2.1 供試体固定装置

i) 供試体を水平基準盤に対して固定して、水平基準盤を反力フレーム梁の上フランジ基盤に固定する (図 2.1)。

ii) 重錘を各柱の材軸線上の突起部  $\phi 30\text{mm}$  穴へトーナメントを介して精度よく分配できる一定鉛直荷重載荷装置を用いて、重錘を吊り下げて供試体に載荷する。装置には天秤棒の原理が2箇所で作られており、本実験では重錘の重さを3等分するように設計している (図 2.2)。

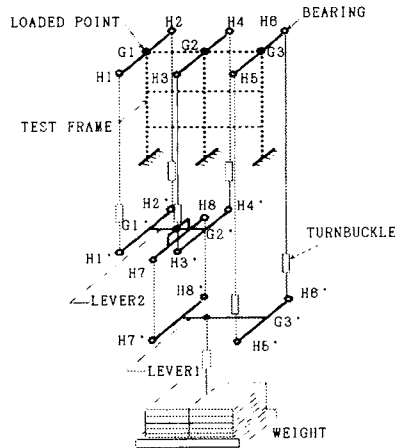


図 2.2 定鉛直荷重載荷装置

iii) 水平基準盤を水平に調整した後、重錘を吊り下げる作業を繰り返す毎に供試体構面内、外の供試体頂部変位を変位計を用いて計測し、それぞれ  $\pm 0.020\text{mm}$ 、 $\pm 0.500\text{mm}$  の範囲内に納める (図 2.1、2.2)。

iv) 1層左梁、2層右梁に対してそれぞれ別個に、梁の中央点と同一鉛直線を共有するように、反力フレーム梁の下フランジにロードセルを固定する。電気油圧サーボ機構は、トーナメントを介して圧縮力を一定に制御し、キャップV字溝を通して梁の中央点に一定鉛直荷重を与える (図 2.3)。

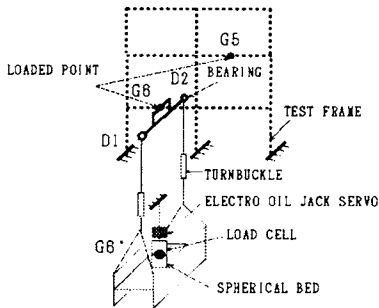


図 2.3 定鉛直荷重載荷装置

v) 制御水平変位導入装置については、水平反力が供試体形状の左右対称な位置から作用するように、載荷点は 2.1 節に示す内柱突起部の  $\phi 25\text{mm}$  穴の中心点とする。電気油圧サーボ機構装置はその軸線が載荷点と同じレベルを保つように反力フレームの上部でピン支持され、穴とは両端にニードルベアリングをもつ棒を介して連結される。試験を制御する頂部水平変位の載荷点は穴の中心点と同じ水準にある左柱軸線上の突起部左縁とする。ここにサーボ機構装置を構成する変位計を接触させ固定する。プログラムされた頂部水平変位はこの変位計を介して供試体に載荷され、同時に応答水平反力がサーボ機構装置を構成するロードセルを介して内柱の載荷点に作用する (図 2.4)。

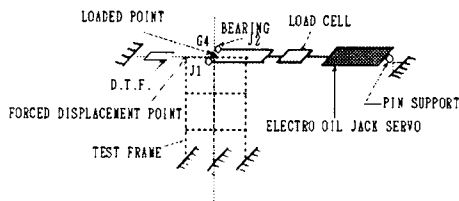


図 2.4 制御水平変位導入装置

載荷の手順を以下に示す。

- i) 左、内、右の頂部に等しい一定鉛直荷重 (柱荷重  $P_c$ ) を載荷。
- ii) 1 層左梁、2 層右梁の中央点に等しい一定鉛直荷重 (梁荷重  $Q_L$ 、 $Q_R$ ) を載荷、 $Q_L$ 、 $Q_R$  をほぼ同時に載荷するように制御。
- iii) 頂部水平変位  $U_T$  を階段漸増型定振幅両振りプログラム STIDAN (図 3) [6] によって準静的載荷。

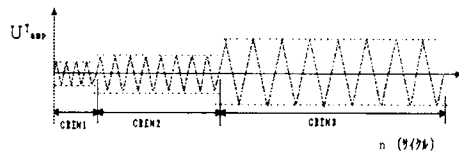


図 3 STIDAN プログラム

### 2.3 計測量

荷重、変位そしてひずみの各量を計測した。これらのアナログ量を、データログを使用して A/D 変換し、1 秒毎に 1 集団のサンプルとして採取した。

- i) 荷重計測について；計測位置、方向および正の向きを図 4 に示す。供試体頂部の各柱

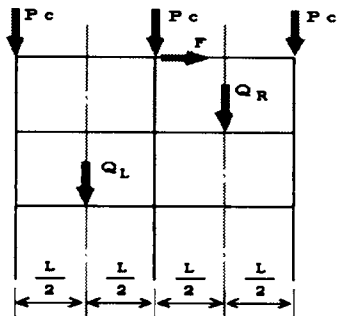


図 4 荷重

突起部の  $\phi 30\text{mm}$  穴の中心に作用する定鉛直荷重  $P_c$  については、トーナメント機構の静力学的釣合式に基づいて算出し、重錘荷完了時における3層柱中央のひずみを弾性ゲージで検出し、得られた軸力値からこれらの算出値が精度よく再現されていることを確認した。載荷梁中央点横荷重  $Q_L$ 、 $Q_R$  および水平反力  $F$  を各々容量  $5\text{KN}$  の引張圧縮両用ひずみゲージ式ロードセルにより計測した。

ii) 変位計測について；計測位置、方向および正の向きを図5に示す。頂部の制御水平変位  $U^T$  を、水平反力  $F$  が生じるレベルで、試験前の左柱軸線上の突起部外縁に測定範囲  $\pm 12.5\text{mm}$  ひずみゲージ式変位計を接触させ固定して測定した。また外柱節点の水平変位  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 、 $U_4$  を、各々同一の測定範囲  $\pm 5\text{mm}$  のひずみゲージ式変位計を試験前の各梁の軸線上の供試体外縁に各々接触させ固定して計測した。柱頂部鉛直変位  $V_L$ 、 $V_M$ 、 $V_R$  を、測定範囲  $\pm 5\text{mm}$  のひずみゲージ式変

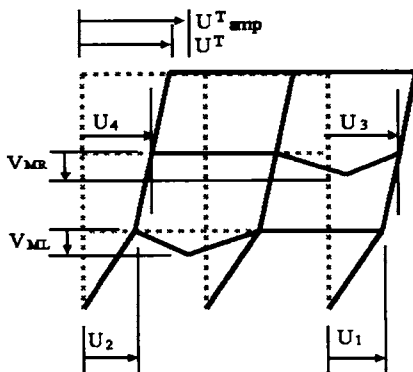


図 5 変位

位計を試験前の突起部上縁に各々接触させ固定して計測した。載荷梁中央点鉛直変位  $V_{ML}$ 、 $V_{MR}$  を、測定範囲  $25\text{mm}$  のひずみゲージ式変位計を試験前の載荷梁中央点真上の載荷装置縁に各々接触させ固定して計測した。

iii) ひずみについて；図6に示す位置における68個の縁ひずみを、標点間  $2\text{mm}$  の塑性ひずみゲージを用いて検出した。

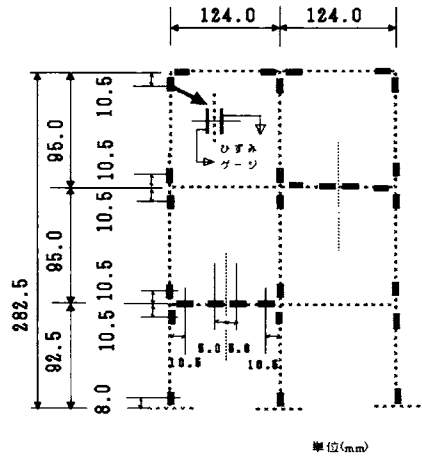


図 6.1 縁ひずみの計測位置

	(83)	(81)	(79)	(77)	
[46]	[84] [45]	[82] [34]	[80] [33]	[78] [22]	[21]
[48]	[47]	[38]	[35] [75] [73]	[24] [71] [69]	[23]
[50]	[49]	[38]	[37]	[76] [74] [72] [70]	[26] [25]
[52]	[51] [67] [85]	[40] [63] [81]	[39]	[28]	[27]
[54]	[68] [86] [53]	[64] [82] [42]	[41]	[30]	[29]
[56]	[55]	[44]	[43]	[32]	[31]

図 6.2 縁ひずみの名称



## 2.4 試験条件

高層鋼骨組の下3層を想定した供試体の各柱頂部に上層部の自重として、表3.1に示すように、柱荷重の軸力比が0.3になるように一定鉛直荷重 $P_c$ に7.20KNを与える。

表 3.1 実験条件(定鉛直荷重および制御水平変位)

条件 供試体	定鉛直荷重		制御水平変位( $U^T$ )	
	$P_c$ $N_p$	$Q$ $Q_p$	$U^T$ 開始の 向き	$U^T_{amp}/\Sigma H$ の増分
T3-3	0.30	1.70	正	0.001rad
T3-4			負	0.002rad

$N_p = \sigma_y \times B \times D$ ,  $M_p = (\sigma_y \times B \times D^2) / 4$ ,  
 $Q_f = 4M_p / L'$ ,  $L' = L - D - 2R$ ,  $\Sigma H = 310mm$

表 3.2 実験条件(変位振幅)

T3-3 サイクル数と変位振幅		
n	$U^T a_{amp}$	$U^T_{amp}$ (cm)
	$\Sigma H$ (rad)	
8	0.010	0.310
8	0.011	0.341
8	0.012	0.372
8	0.013	0.403
8	0.014	0.434
8	0.015	0.465
8	0.016	0.496
8	0.017	0.527
8	0.018	0.558
8	0.019	0.589
8	0.020	0.620
8	0.021	0.651

表 3.3 実験条件(変位振幅)

T3-4 サイクル数と変位振幅		
n	$U^T a_{amp}$	$U^T_{amp}$ (cm)
	$\Sigma H$ (rad)	
8	0.010	0.310
8	0.012	0.372
8	0.014	0.434
8	0.016	0.496
8	0.018	0.558
8	0.019	0.589
8	0.020	0.620

また梁荷重の作用点を1層左梁と2層右梁の各中央点に選り、単純梁の塑性崩壊荷重 $Q_p$ との比が1.7になるように一定鉛直荷重

$Q$ に1.87KNを与える。梁の崩壊が早期から発生するように、 $Q$ に関してはこのような過荷重を選んだ。試験を制御する左外柱頂部の水平変位 $U^T$ については、2.2節で示したように図3のSTIDANプログラムを用いる。制御変位速度を3min/cycleとして $U^T_{amp}/\Sigma H = 0.010rad$ から試験を開始し、同じ $U^T_{amp}$ における繰り返し数を8回とした。塑性変形の蓄積効果や低サイクル疲労を観察するため、表3.2、3.3に示すように、 $U^T_{amp}$ 増分をT3-3試験で0.001rad、T3-4試験では主に0.002radとして倍の違いを与えた。またSTIDANプログラムによる水平変位 $U^T$ を最初に与える向きをT3-3試験で正、T3-4試験で負とした。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 載荷梁における漸増型梁崩壊の進行

頂部水平変位が繰り返し載荷する過程で、載荷梁が呈した弾塑性挙動を主として載荷梁の断面縁ひずみ(図6;  $\epsilon_{61} \sim \epsilon_{76}$ )と水平反力 $F$ の関係から推察する。供試体を問わず共通に梁端、中央の各部に、初期の段階から繰り返し毎に定性的な弾塑性挙動が見られる。梁の各部で呈する弾塑性状態の変化を、制御水平変位の載荷方向毎に、時系列順に観察すると、表4のようにまとめられる。ここで、弾性(除)はひずみ増分の反転により塑性域から除荷している弾性挙動を示し、梁の姿図における●印は載荷最終時における塑性域を表す。1例として、T3-4試験における1層左梁断面上縁ひずみ $\epsilon_{61}$ 、 $\epsilon_{63}$ 、 $\epsilon_{65}$ 、 $\epsilon_{67}$ (図6.2)のそれぞれと $F$ の関係を図7に示す。載荷梁の左端、中央左、中央右、右端の各部において、上下の断面縁ひずみの履歴から塑性状態にあると判断できる各部では、ひずみ増分の増加に従って塑性曲げ変形の増

表 4 載荷梁の弾塑性状態の変化

載荷梁	載荷方向	左端	中央左	中央右	右端	姿図
2層右	正	弾性(除)	塑性	弾、塑性(除)	弾、塑性	
	負	弾、塑性	塑性	弾、塑性	弾性(除)	
1層左	正	弾性(除)	弾、塑性	塑性	弾、塑性	
	負	弾、塑性	弾、塑性(除)	塑性	弾性(除)	

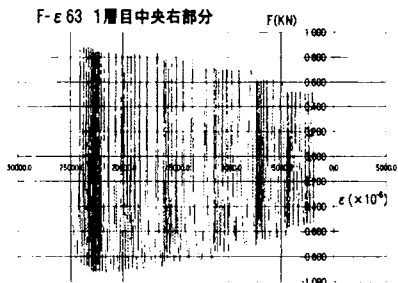
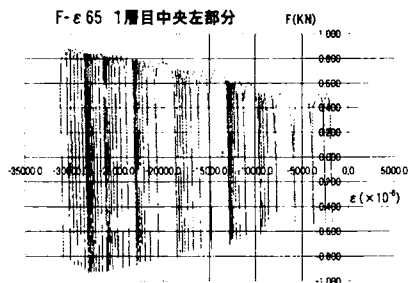
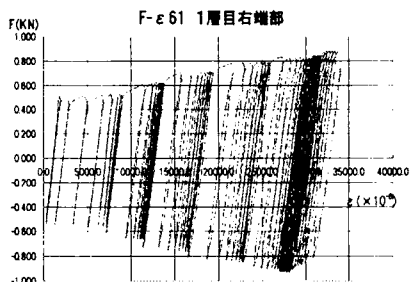
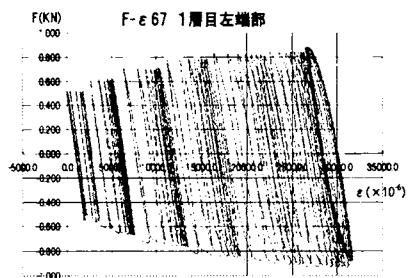


図 7 F-ε 関係

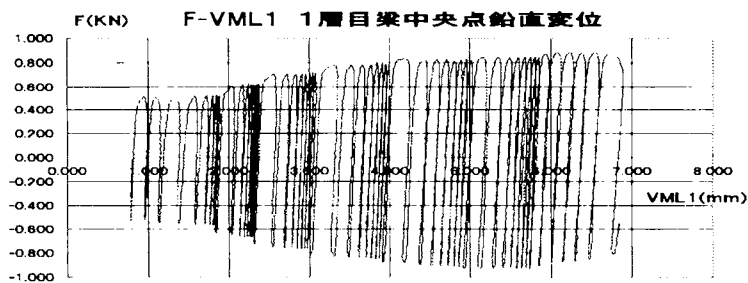


図 8 F-V<sub>ML</sub> 関係

分が進行するから、塑性回転角増分も進行すると見なせる。表4の姿図に示すように、中央部の左右が共に塑性状態にある荷重方向の最終の場では、塑性状態にある梁端部と中央部の塑性回転角がともに進行すると同時に梁中央点鉛直変位が増大し、その前の逆方向の荷重で生じたもう一方の梁端部の塑性回転角と変形適合する。例に対応するT3-4試験の1層左梁に関する梁中央点鉛直変位の進行状態を、 $F-V_{ML}$ 関係で表し、図8に示す。1サイクル毎に漸増型梁崩壊の機構が形成される。

実験初期のサイクルからこの現象が連続的に見られるから、サイクル数の進行に伴い両方の梁とも梁機構による部分崩壊が進行する。初期段階から梁節点間の距離が縮小するような梁の大変形が成長していることになる。

### 3.2 履歴の定常挙動と荷重梁周辺サブアセンブリの変形の進行

定振幅漸増型の制御水平変位 $U^T$ が準静的に作用する供試体について、変形進行の推移を以下では主として2種の図を用いて表す。一つは水平反力 $F$ と各柱の相対水平変位 $U_{ij}$  ( $i=1,2,3$ 層、 $j=L,I,R$ 柱)の関係から得られる9個の履歴ループ図を供試体毎にまとめた図である。ここに荷重梁以外の梁については梁端間の距離は変形前と同じであると仮定して、 $U_{ij}$ を計測水平変位 $U_i$  ( $i=1,2,3,4$ )と $U^T$ を用いて算出する。 $F-U_{ij}$ 図に描かれる履歴ループの軌跡(後出、図11)では、定振幅毎にはほぼ収束的に挙動する軌跡部分、T3-3試験では0.020rad、T3-4試験では0.019radまでを省略して除いている。省略部分の軌跡からは次の事柄が観察される。骨組が崩壊するときの定振幅 $U^T_{amp}$ の場合

を除けば、同じ $U^T_{amp}$ 荷重の8回の繰り返しの荷重に対してどの柱もそれぞれ最後にはほぼ同じループになるように、 $U^T_{amp}$ 毎に水平反力とそれぞれの水平振幅を漸増させながら収束的に挙動する。注目すべき挙動特性は、各柱の相対水平変位 $U_{ij}$ の振幅中心が定振幅の増大に伴って一方向に移動する柱とほぼ元の位置に留まる柱に分けられることである。

二つ目の図については、省略した軌跡に基づいて、同じ8回の $U^T_{amp}$ 荷重に対する8回目の最終サイクルの履歴ループから、上述した相対水平変位 $U_{ij}$ の振幅中心座標 $U^c_{ij}$  ( $i=1,2,3$ 層、 $j=L,I,R$ 柱)を抽出する。 $U^c_{ij}$ は定常履歴ループに関して変位方向への偏りを表す変位である。下柱の偏り変位の位置を原点にして、横方向に $U^c_{ij}$ 、縦方向に階高で定まる点をプロットし、柱線毎に各点を直線で結ぶ。 $U^T_{amp}$ 毎に描けば、各柱の偏り変位と供試体全体の偏り変位の進行状態が見えてくる。供試体毎に $U^T_{amp}/\Sigma H$ が0.010radから0.002rad毎に0.018radまでの偏り変位と、T3-3試験では骨組が崩壊する前の0.019、0.020radまで、T3-4試験では0.019radまでの偏り変位を図9に描いた。 $U^c_{ij}$ は僅かな量であり増幅して描かれる。図9から、両供試体に共通な挙動特性が見出される。第1層では左柱、第2層では内柱がそれぞれ連結する荷重梁のある右の向きに引き込まれ、第3層では左、内柱がそれと逆の左の向きに移動し、これらの柱の偏り変位は供試体毎に大略等しい。また崩壊前 $U^T_{amp}$ での挙動では、0.001radの増分に対するこれらの応答偏り変位増分はそれまでの偏り変位増分よりも大きくなる。相異点として、微量な偏り変位ではあるがT3-3では第1層内

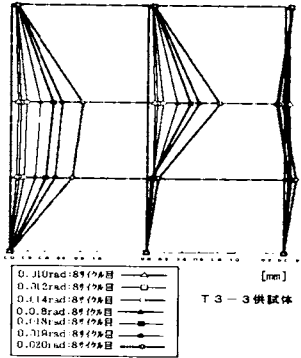


図 9.1 偏り変位 $U_{ij}$ の進行状態

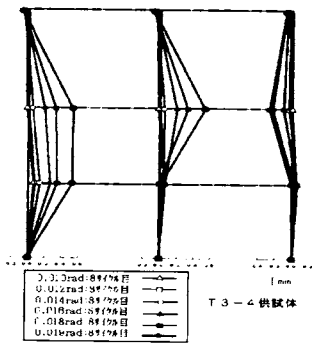


図 9.2 偏り変位 $U_{ij}$ の進行状態

柱は右へ、T3-4では第2層右柱は左へ偏る傾向がある。同スパン同層の骨組に対して同じ梁位置に鉛直荷重を漸増载荷した従来の研究[7]は、1層载荷梁に生じる引張力の作用は外柱を载荷梁側に引き込み、その上梁に生じる圧縮力の作用と2層载荷梁に生じる引張力の作用の内柱節点を载荷梁側に変位させることを示している。载荷系が非対称であるとき呈する上述の構造挙動特性は、左右対称な両振り水平変位载荷に対してもその特性を保持していると考えられる。また図9からよくわかるように、载荷梁周辺サブアセ

ンブリッジを左スパン1、2層部分と右スパン2、3層部分の2つの部分架構に分けて見れば、それらの架構はそれぞれ単スパン骨組に関する実験で呈したと同じ“腰くびれ横揺れ型の変形”を呈している[3]、[4]。前節の载荷梁の大変形に伴う梁端間距離の減少は隣接柱の変形と適合して“腰くびれ変形”となり、微量ではあるが部分架構の下部分に生じる“横揺れ変形”はともに右向きに生じ、上部分の“横揺れ変形”は左側部分架構では下部分と同じ向きに、右側部分架構では逆向きに生じる。

### 3.3 履歴の劣化挙動と層崩壊

崩壊時 $U^{Tamp}$ における制御水平変位 $U^T$ の繰り返し载荷過程では、水平反力 $F$ と柱の相対水平変位 $U_{ij}$ に基づいて描かれる履歴ループ(後出、図11)について言えば、 $U^{Tamp}$ の漸増毎に定常的な履歴ループに収束してきた今までの挙動からは一変する。ループの軌跡は1回1回の繰り返し载荷毎に、1、3層部における変形は増大し水平反力は減少する両供試体に共通な劣化挙動が現れる。実験結果を $F-U^T$ 図、 $F-U_{ij}$ 図、また前出の偏り変位 $U_{Cij}$ の進行状態図で示し、それぞれ図10、11、12に示す。ここでは、崩壊時 $U^{Tamp}$ に漸増する直前の $U^{Tamp}$ 载荷の8回目のサイクルにおける挙動を点線で、供試体が崩壊する $U^{Tamp}$ 载荷における実験終了サイクルまでの全サイクルが呈した挙動を実線で供試体毎に描く。実験を制御した最後の定振幅変位とそのサイクル累積数はそれぞれT3-3試験では0.021rad、89回~94回であり、T3-4試験では0.020rad、49回~55回であった。

両試験が呈した挙動の特徴を、共通事項i)、

ii)、iii)、iv)、相違事項 v)、vi)、総合事項 vii)、viii) に分けて以下に示す。

i) 図 1 0 に示す  $F-U^T$  関係からは、骨組が呈した全体的な力と変形の関係が観察できる。最終制御振幅変位  $U^{Tamp}$  の 2 回目の繰り返しから、水平反力は負側で減少し始める。正側でも数サイクル後には減少し始める。その後、水平変位  $U^T$  を一方向に制御荷している途中の過程で、水平反力  $F$  は極限值  $F_{max}$  (極小値・極大値) に達した後微減する。次の繰り返しの過程では、前過程の  $F_{max}$  より減少した  $F_{max}$  が現れる。骨組に関するこれらの 2 つの耐力低下現象は  $U^T$  の負方向荷過程で先に現れる。

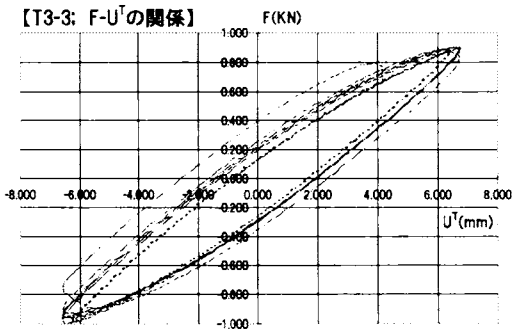


図 10.1  $F-U^T$  関係 T3-3

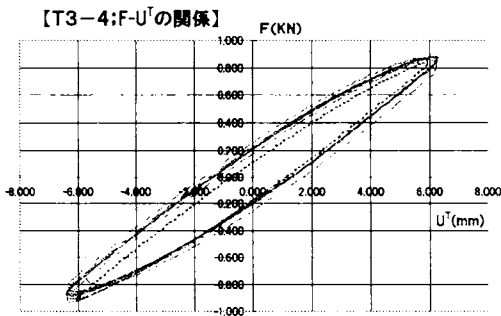


図 10.2  $F-U^T$  関係 T3-4

ii) 水平反力  $F$  と各柱の相対水平変位  $U_{ij}$  の関係を、図 1 1 で  $i=1,2,3$  層を下から上へ、 $j=L,I,R$  柱を左から右へレイアウトして、供試体毎に示す。繰り返し荷過程の始めから各々の履歴ループは、繰り返し荷毎に、1 層では  $U_{iL}$  のみならず  $U_{iI}$ 、 $U_{iR}$  も制御水平変位  $U^T$  の正方向に、3 層では  $U_{3L}$ 、 $U_{3I}$  のみならず  $U_{3R}$  も  $U^T$  の負方向に移動し続ける。この履歴ループの移動はつぎのように説明できる。i) の前半部で説明した劣化荷過程で、図 1 1 の履歴ループが移動する方向への  $U^T$

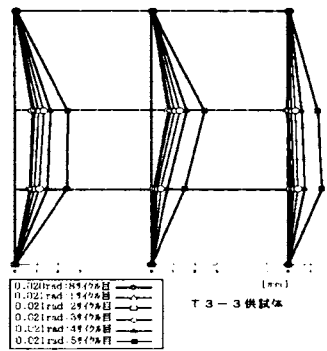


図 12.1 偏り変位  $U_{ij}$  の進行状態

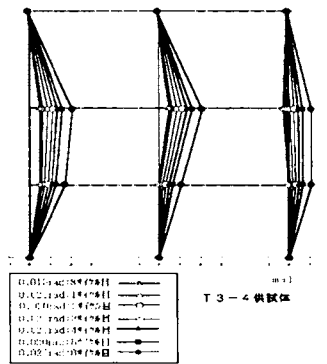


図 12.2 偏り変位  $U_{ij}$  の進行状態

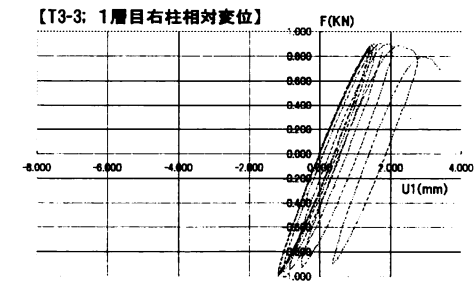
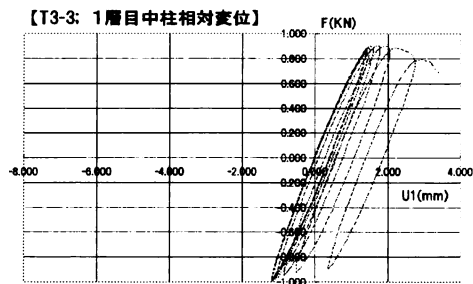
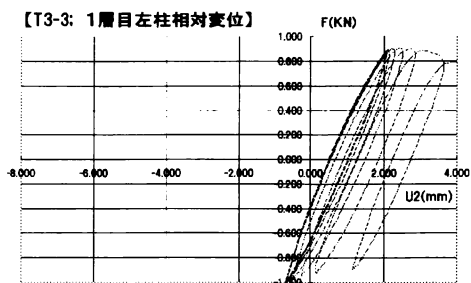
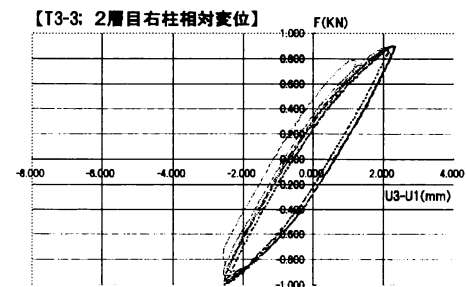
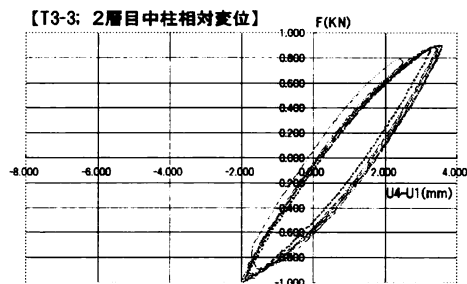
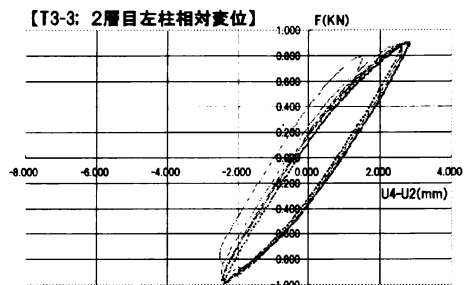
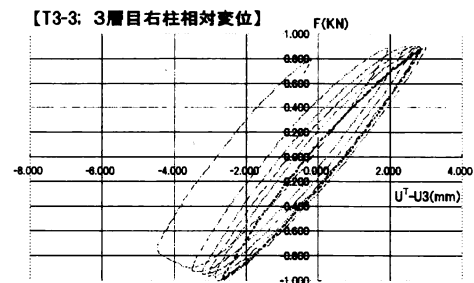
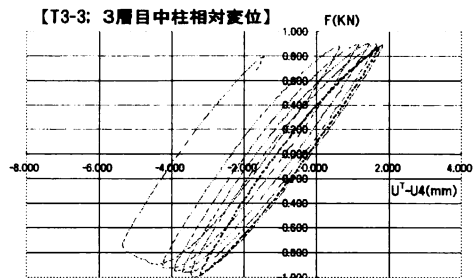
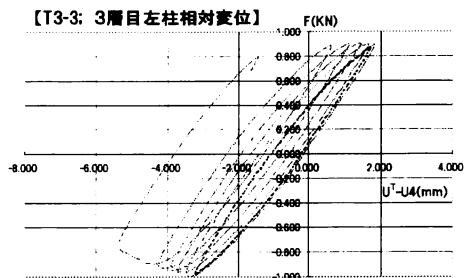


圖 11.1 F-U<sub>i</sub>關係 T3-3供試體

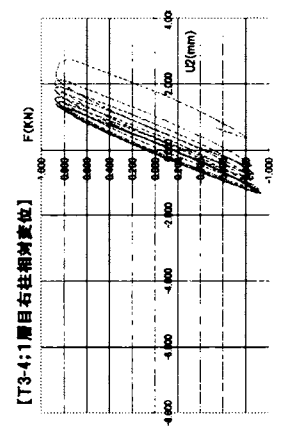
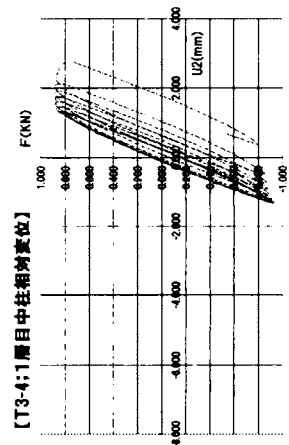
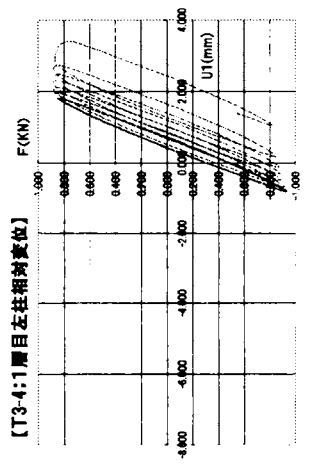
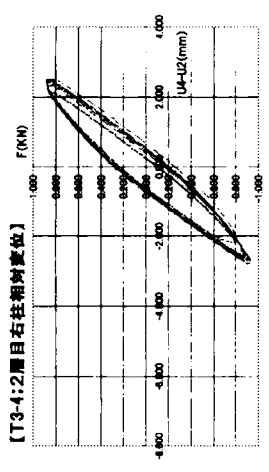
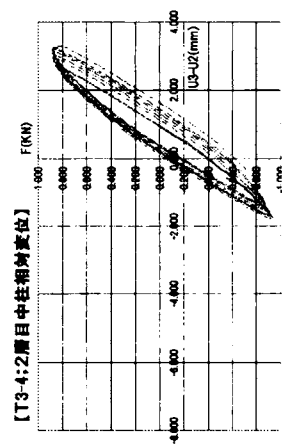
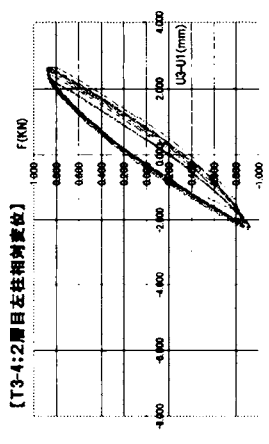
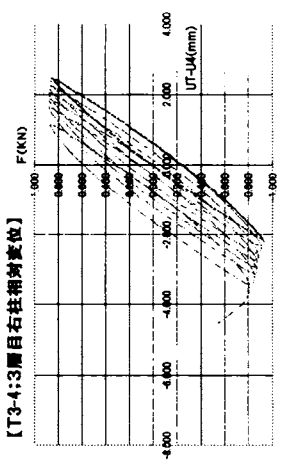
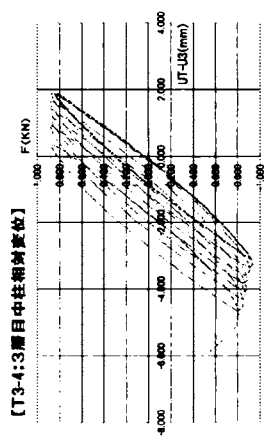
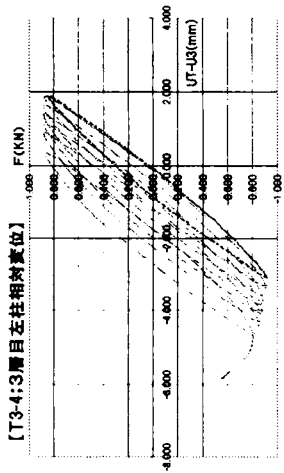


图 11.2 F-U 關係 T3-4 拱試体

載荷ではそのループを構成する相対柱変位は最大荷重近傍でその方向に急増し、逆方向の UT 載荷ではその方向に急増することはない。i) の後半部で説明した劣化載荷過程では、この傾向がより強くなる。履歴ループに関する繰り返し毎に生じるこれらの移動は図 1 2 に示す繰り返し載荷毎の偏り変位  $U_{ij}^c$  で表すと量的に視覚化される。1 層と 3 層では、同層の各柱の偏り変位が繰り返し毎に一方方向に増えていくことが明瞭に見える。これらの層間変位が成長する方向は、今までに蓄積されてきた履歴ループの偏り変位  $U_{1L}^c$ 、 $U_{3L}^c$  の方向とそれぞれ同じであるから、1、3 層の層間変位の生じる方向はすでに定まっていたことになる。 $U_{1L}^c$  の増大は  $U_{1I}^c$ 、 $U_{1R}^c$  の増大を誘発させ、 $U_{3L}^c$  の増大は  $U_{3R}^c$  の増大を誘発させていると考えられる。

iii) i) に述べた耐力の低下現象と ii) に示した 1 層また 3 層の単層部における横揺れ変位の増大挙動を合わせ考えると、T 3-3、T 3-4 供試体とも繰り返し載荷毎に、制御水平変位の正方向載荷で 1 層横揺れ崩壊、負方向で 3 層横揺れ崩壊が始動していると言える。

iv) 図 1 1 に示す第 2 層柱の相対水平変位  $U_{2j}$  に関する 3 つの履歴ループは繰り返し毎に、T 3-3 では 3 層の相対変位と同じ負方向に微量に移動する。ただし、内柱のみは繰り返しの最後でこの傾向を示す。T 3-4 では 1 層の相対変位と同じ正方向に微量に移動する。しかしながら、 $F-U^T$  図 (図 1 0) にみられる  $F_{max}$  (極小点・極大点) 後挙動と  $F-U_{2j}$  図 (図 1 1) にみられるそれらの対応を詳細に観察すると、繰り返しの当初では、正負の繰り返しに対してともに  $U_{2j}$  が進行し

続ける負荷挙動を呈している。このことは 2 層柱頭、柱脚のひずみ ( $\epsilon_{25-28}$ 、 $\epsilon_{37-40}$ 、 $\epsilon_{49-52}$ ) から確認できる。2 層柱の頭部、脚部では塑性曲げ変形が進行していることを意味する。従って T 3-3、T 3-4 供試体とも繰り返し載荷毎に制御水平変位の正方向載荷で 1、2 層の横揺れ崩壊、負方向載荷で 2、3 層の横揺れ崩壊を呈していることになる。両供試体ともに、一对の正負の載荷に対して 2 つの層で耐え抵抗している。v) に後述する崩壊に至る中間的なものと考えられる。

v) 骨組の崩落は突然に発生する。実験最終サイクル直前のサイクルで極限点  $F_{max}$  以降、水平反力が急激に減少し、iv) で述べたように T 3-3 では負方向載荷で 2、3 層の、T 3-4 では正方向載荷で 1、2 層の複数層に渡る横揺れ崩壊の状態になる。制御水平変位  $U^T$  が反転することによって骨組は全体的に除荷弾性挙動に移行する。これらの釣合曲線上の早期に現れる極限点  $F_{max}$  で 2 層部柱の水平相対変位  $U_{2j}$  は全て制御方向と逆の方向に反転する。ii) で述べたように T 3-3 では 1 層柱の相対変位  $U_{1j}$  が、T 3-4 では 3 層柱の相対変位  $U_{3j}$  が増大し続けているから、T 3-3 供試体は制御水平変位の正方向載荷で 1 層の、負方向載荷で 2、3 層の横揺れ崩壊となる。また T 3-4 供試体は正方向載荷で 1、2 層の、負方向載荷で 3 層の横揺れ崩壊となる。

vi) 水平反力の最大値は、図 1 0 に示す  $F-U^T$  関係を供試体毎に比較すると、正、負のいずれの側でも T 3-3 供試体の方が僅かに大きいこと、正の側、負の側の値は両供試体ともに負側で僅かに大きいことがわかる。前者の違いは崩壊時の制御水平変位振幅の大



小に起因しており、後者の違いは上述の崩壊モードの違いに関係していると考えられる。

vii) 実験条件の違いが試験に与えた影響として、水平変位の繰り返し回数については、総繰り返し回数が大きい T3-3 試験の方が崩壊時の水平変位、水平荷重ともに大きい。従って材料に関する低サイクル疲労の影響はなかったように見える。また変位載荷開始の向きについて、実験供試体に作用する梁過荷重の非対称性は供試体を正方向に弓形に逸れさせる性質をもっている。正方向から変位載荷した T3-3 試験ではその変形を緩和させる効果があり、負方向から変位載荷した T3-4 試験ではそれを更に大きくさせる効果がある。従って T3-3 試験の最終制御水平変位が T3-4 よりも大きくなったとも考えられる。

viii) 単純塑性理論に基づいて一方向載荷の 2 自由度崩壊機構による崩壊点予測を、正負のそれぞれの載荷方向に対して v) に示したそれぞれの層崩壊機構を仮定し、P- $\Delta$ 効果、一定作用軸力による塑性モーメントの減少、接合部の剛域を考慮して、解析をした。実験で得た 4 つの崩壊点近傍を予測できたこと、予測から得られる崩壊荷重の大小関係は実験結果に対応していることを付記する。

#### 4. まとめ

高層 2 スパン骨組の下 3 層をモデル化した 2 スパン 3 層対称鋼骨組模型供試体について、高層部の自重をモデル化した等しい定鉛直荷重を各柱線毎に、左、内、右の柱頂部に作用させる。更に 1 層左梁と 2 層右梁の中央部が降伏するようにそれぞれの中央点に等しい一定鉛直荷重を作用させる。この試験条件下で、左柱頂部の水平変位を制御して漸

増型定振幅を与え、制御に反応する水平力が内柱頂部に作用する両振り繰り返し試験を行った。同一形状、同一材質の 2 体の供試体に対して、上述の柱荷重、梁荷重をそれぞれ等しく与えた。制御水平変位の載荷条件としては、一方の条件を基準にすると、他方では定振幅での繰り返し回数は等しく、定振幅の漸増量は倍にし、また繰り返し制御水平変位の開始の向きを逆にした。特に層崩壊に焦点を当て、両振り繰り返し水平変位載荷に伴って供試体全体、載荷梁、各柱が呈する変形進展挙動の過程から考察を行った。要約を以下に示す。

(1) 繰り返しの初期から、両方の載荷梁には漸増型の梁崩壊が発生する。制御変位載荷方向にある梁端部では塑性曲げ変形増分が生じ、同時に梁中央部にも塑性曲げ変形増分が生じる。正負の繰り返しに対して、梁中央部に関する塑性領域長さは大きい場合と小さい場合に分けられ、1 層梁では正方向載荷で、2 層梁では負方向載荷で大きくなる。大きい場合にはその塑性曲げ変形増分も大きくなり梁中央の鉛直変位増分が進行する。繰り返しの載荷毎に梁崩壊型の変形が漸増するから、梁は大変形に成長する。

(2) 載荷梁の大変形による梁端間距離の縮小に適合するように、1 層載荷梁の隣接外柱は 1 層載荷梁に生じる引張力の作用によって、2 層載荷梁の隣接内柱は 1 層載荷梁の直上梁に生じる圧縮力の作用と 2 層載荷梁に生じる引張力の作用によって、それぞれ載荷梁の側に変形する。梁の大変形に伴ってこのように増大していく 1 層左柱と 3 層内柱の相対水平変位の向きは後挙動で生じる 1 層と 3 層の層崩壊の向きを定めている。定振幅の繰り返し

載荷に対して呈する上述の変形は、崩壊が生じる直前の定振幅までは、収束的に挙動し、定振幅が漸増してもほぼ同じように収束的に挙動する。

(3) 定振幅水平変位の繰り返し載荷の途中で水平反力が極限值を呈する最後の繰り返し載荷では、繰り返し載荷の始めから、1、3層では、(2) で方向付けされた2つの柱の相対水平変位の向きに、それぞれ同層の他の柱と共に変位し、正載荷で1層横揺れ崩壊、負載荷で3層横揺れ崩壊が始動する。2層ではその部分を構成する各柱の相対変位増分は繰り返し制御水平変位の開始の向きと逆の向きに微増するが、繰り返しの当初では正負の向きに対して2層柱はすべて負荷の状態を呈する。従って2層柱の頭部、脚部では塑性曲げ変形が進行するから、両供試体ともに繰り返し載荷毎に制御水平変位の正方向載荷で1、2層の横揺れ崩壊、負方向載荷で2、3層の横揺れ崩壊となる。いずれにしても一対の正負の載荷に対して異なる隣接2層で耐え抵抗している。

(4) 単層横揺れ崩壊が始動・進行し、2層部の各柱もその方向に変形挙動している変形場の終局で、骨組の崩落は突然に生じる。釣合曲線上の水平反力の極限点で今まで負荷の状態にあった2層部分を構成する各柱は弾性除荷挙動に移行する。T3-3試験では1層崩壊によって崩落し、T3-4試験では3層崩壊によって崩落する。従って、T3-3供試体では制御水平変位の正方向載荷で1層の、負方向載荷で2、3層の横揺れ崩壊となる。またT3-4供試体では正方向載荷で1、2層の、負方向載荷で3層の横揺れ崩壊となる。

(5) 水平変位載荷の繰り返し回数が骨組崩

壊の主因になっているとは言えない。

### 参考文献

- 【1】 日本建築学会、阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：「阪神・淡路大震災調査報告、建築編-1、建築編-2」、1997.
- 【2】 日本建築学会：「強震動予測と設計用入力地震動」、構造部門（振動）パネルディスカッション資料、2004年度日本建築学会大会、2004.
- 【3】 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、pp.523～530、日本学術会議メカニクス・構造研連構造専委、土木学会、日本建築学会、1998.
- 【4】 太田充紀、太田修：「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」、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1、構造I、pp.293～294、2000.
- 【5】 SHRESTHA Bimal, OHTA Osamu : 「Waist - Induced Sway Deformation of steel frame subjected to reversed cyclic lateral displacement」、Abstract Presented at 2001 Annual Meeting of A.I.J., B-1, Structures - I、pp.351-352、2001.
- 【6】 日本建築学会：「建築耐震設計における保有耐力と変形性能」、pp.89-93、1990.
- 【7】 中村恒善、石田修三、太田修：「サブアセンブリの過大な変形によって誘発される骨組の全体的崩壊挙動」第24回構造工学シンポジウム論文集、pp.101～108、日本学術会議構造研連、土木学会、日本建築学会、1978.

## 中心圧縮材の連成不安定現象について

森脇 良一（工学部）

工藤 哲男（工学部）

### 1. はじめに

私（森脇）は日本橋梁、神戸製鋼を経て岐阜大学教授として定年退官を向かえ帝国コンサルタントに顧問として余生を過ごそうとした折り、前任の小松先生から大阪産業大学工学部土木工学科教授への要請があり平成7年4月に着任した。赴任する約3ヶ月前にある阪神淡路大震災があり私の家（西宮市）も全壊し、東大阪市内に急遽住まいを構えるなど慌ただしく着任したことがいまでも記憶残っている。

阪神淡路大震災は、直下型地震であり鉄筋コンクリート構造物のみならず鋼構造物が上下動（圧縮力）による座屈現象で多くの被害を受け、緊急な研究課題として着目されていたが、いずれも緊急復旧に関するテーマに重点が置かれていた気がする。その矢先、前任の小松先生が私の研究室を訪れ、いわゆる鋼構造のベーシックな事項である『中心圧縮材の連成不安定現象』の解明が重要であり本テーマの研究を継続の申し出があり、私大阪産業大学に着任してから新たに手掛けたテーマとなった。そして、大阪産業大学産業研究所の長期共同研究組織「非線形構造力学」には研究組織代表者（当時）の小川清六教授より強く勧められ分担研究員として参加したと記憶している。

### (1) 研究の背景

本研究で取り扱う中心圧縮材の鋼構造物は、合理化・大型化・省力化に伴い、圧縮力が作用する場合の部材（柱）と構成板の連成問題を対象としており、こ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いる。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ことが知られているが、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がなされているが、その定量的な評価法は見いだされていないが現状であった。

そこで、この研究を始めるに当たり、まず小松が提案した箱形断面中心圧縮材の連成不安定現象の『崩壊モードの類型化』<sup>1)</sup>、いわゆる8つのモードが実際の座屈問題として発生しうるか？と言う初歩的なことから吟味することにした。そして『崩壊モードの類型化』するための『崩壊モードの判定基準』<sup>2)</sup>は、物理的な意味について検討を加えていくと、その妥当性見いだせなかった。そこで当時、客員教授として週1日来学しておられた小松先生にお会いして見解をお聞きしようと思った矢先に入院され帰らぬ人となった。そこで私は工藤助手から小松先生が生前に見解を述べていないかを問いただしたが具体的な内容は曖昧であることが判明した。

そこで、『崩壊モードの判定基準』を明確にするには、箱形断面中心圧縮材の柱としての細長比パラメーター $\lambda$ と板としての幅厚比パラメーター $R$ の面内についてパラメトリック解析を行いその結果を基にその検証する事が妥当と考え研究に取り組んだ。しかしながら、後述するがパラメトリック解析をするには満足のいく計算機が整っていなかったのが現状であった。

## (2) 研究室の研究環境

私の着任当時の研究環境は、9号館2階にある土木端末室(9228室)の中に3研究室(約30名)が共同利用し計算作業するスペースが有るだけで、さらに大型計算機利用出来る環境になく、土木工学科共有のUNIXマシン2台、キャラクター端末(10数台)、パソコン端末(数台)あるだけと必ずしも潤沢でなかったと記憶している。そこで、着任時の学科特別配分費で研究室のUNIXマシンとパソコン(Win)を買いそろえた。しかしながら解析に用いた弾塑性有限変位プログラムは、大型計算機用に開発されており、このような計算能力ではとても満足するものとはいえなかった。例えば、有限要素法の節点数、要素数の制限、一回の解析に速くて約1~2時間、数人が同時に計算すると10数時間から数日間かかっていた。さらにその計算結果が収束しない場合には再計算するというのを繰り返し、最適解に到達するまで繰り返すと言う気が遠くなるような時間と労力がかかり、1年かけて3~10個の最適解析結果が出来るかどうかであった。そこで卒業研究生には与えられた研究環境の中で研究の成果を出すには『計算機と対話しなさい』とよく話した。すると卒研生はいよいよ泊まり込みをするようになり、そうすると1つ2つと最適解が得られ、目の色が変わり自ら考えるようになったことが思い出される。一方、平成8年度からは卒研生に毎年女子学生がおり、泊まり込みの申し出ることも多々あり断るのに苦慮したと聞いている。一方、計算機も24時間フル稼働状態が6ヶ月続くことから、UNIXマシンは保守点検をパソコンはハードディスク交換を毎年繰り返していたが、定年退職の平成12年度頃からパソコン性能が飛躍的にアップしパソコン更新することで解析回数も大幅に増加し、ようやく最適解が数多く得られるようになった。また、平成11~13年度は大学院生3名および研究生1名が精力的に基礎的なパラメトリック解析により当初研究目的の1つであった『崩壊モードの判定基準』の明確化する手法を確立できたが、まだ未解明の部分が多く含まれており、志半ばで私森脇が定年を向かえた。本研究は、連成不安定現象が進展して崩壊に至るまでの過程で生ずる直ひずみの変化に着目した小松の提案した8個の崩壊モードとその評価法について、さらなる検討が必要であり工藤講師に引き継いだ。ここでは、これまでの長期研究組織『非線形構造力学』分担研究員、森脇良一、工藤哲男の研究成果を報告する。

## 2. 解析方法

解析は鋼板を溶接した箱形断面を有する箱形断面を有する中心圧縮材の3次元離散化モデルを対象とし、小松らが開発した文献2)、3)の解析手法を拡張した弾塑性有限変位解析により行った。本会積に用いた仮定は以下の通りである。

- ①降伏局面を有し、von Misesの降伏基準に従う。
- ②降伏局面に含まれる応力空間内においては、等方等質弾性材料である。
- ③等方性ひずみ硬化則に従う。
- ④関連塑性流れ則に従う。

### (1) 離散化モデル

離散化モデルは、線形三角形要素で構成され、局部たわみが生じやすい中央断面付近を細かく固定端部を荒いメッシュとし節点数、要素数を少なくして数値計算の精度向上

と計算時間の効率化を計った。節点の自由度は、一般節点は5自由度(面内変位 $u$ 、 $v$ 、面外変位 $w$ 、回転変位を $\theta_x$ 、または $\theta_y$ あるいは $\theta_z$ )、偶各部の節点については6自由度( $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$ )とした。また、部材端の境界支持条件は固定とし、両端に強制変位( $W$ )を与えた。

## (2) 離散化モデルの緒元

解析モデルは、幅 $b$ 、高さ $h$ 、長さ $L$ の箱形断面中心圧縮材である。部材としてのパラメーターとして関連細長比( $\lambda$ )、構成板のパラメーターとして有効幅厚比を次式で求めた。

$$\lambda = 1 / \pi \cdot (\sigma_y / E)^{1/2} \cdot (L / r) \quad (1)$$

$$R = 1 / \pi \cdot [12(1 - \nu^2) \cdot \sigma_y / kE]^{1/2} \cdot (b / t) \quad (2)$$

ここに、 $r$ : 断面回転半径、 $k$ : 有効座屈係数、 $\sigma_y$ : 降伏応力度、 $E$ : ヤング係数、 $\nu$ : ポアソン比である。

解析に用いたひずみ硬化領域における応力ひずみ関係式は次式を用いた。

$$(\sigma / \sigma_y) = B (\varepsilon / \varepsilon_y)^n \quad (3)$$

ここに、 $B$ : ひずみ硬化係数、 $n$ : ひずみ硬化指数である。

## (3) 初期不整

本解析では、初期不整として中心圧縮材の柱としての初期たわみ $\delta$ 、構成板の初期たわみとして $\Delta$ を次式で求めた。

$$\delta = \delta_0 \sin(\pi z / L) \quad (4)$$

$$\Delta_f = \Delta_0 \sin(n \pi z / L) \cdot \sin(\pi x / b) \quad (5)$$

$$\Delta_w = \Delta_1 \sin(n \pi z / L) \cdot \sin(\pi y / h) \quad (6)$$

さらに、構成板の溶接による残量応力の断面内分布は2軸対称として導入した。

## 3. 崩壊モードの類型化

中心圧縮材の弾塑性連成不安定現象により崩壊するまでに、どのような過程をたどって応力や変位が増分していくかということを詳しく追跡することは、局部曲げと部材曲げの連成作用の有無あるいは相互の影響の大小や因果関係を明確にする上できわめて重要である。それによって初めて崩壊機構の実態を明らかにすることが出来る。ところが既往の研究ではこの点についてほとんど触れられていない。

本研究においては、弾塑性連成不安定現象が進展して崩壊に至る過程で起こる力学的挙動を詳細に分析し小松の提案した8個の崩壊モードを想定し、そして構成板に生ずる軸方向ひずみの変化状態に応じて何れの崩壊モードが発生したかを判別する手法を確立する。この手法により、構成板の有効幅厚比( $R$ )と圧縮部材の関連細長比( $\lambda$ )の組み合わせに応じてどのような崩壊モードが生ずるかを明らかにするものである。

## 4. 研究成果

本研究では箱形断面中心圧縮材の数百体について、弾塑性有限変位解析を行い崩壊までの挙動を分析し、数値パラメトリック解析を基に弾塑性連成不安定現象について以下のことが明らかになった。

(1) 崩壊モードの分類

中心圧縮材の崩壊過程で、構成板の局部たわみによる板面内ひずみ( $\epsilon_b$ )と部材曲げによる板面内ひずみ( $\epsilon_n$ )の増加状態により次の8つのモードが存在すると考えられる。

- (I) 全体座屈モード
- (II) 局部座屈モード
- (III) 部材曲げ先行型連成座屈
- (IV) 局部曲げ先行型連成座屈
- (V) 部材曲げ優勢連成座屈
- (VI) 局部曲げ優勢型連成座屈
- (VII) 均等並行型連成座屈
- (VIII) 降伏崩壊

これらの崩壊モード別に無次元圧縮力  $N/N_{max}$  に対する中央断面の構成板の無次元板曲げひずみ  $\epsilon_n/\epsilon_y$ 、無次元板曲げひずみ  $\epsilon_b/\epsilon_y$  の図1に示した。これらの崩壊モードは以下に述べる検証によって、崩壊モードの類型化を明かにすることが可能となった。

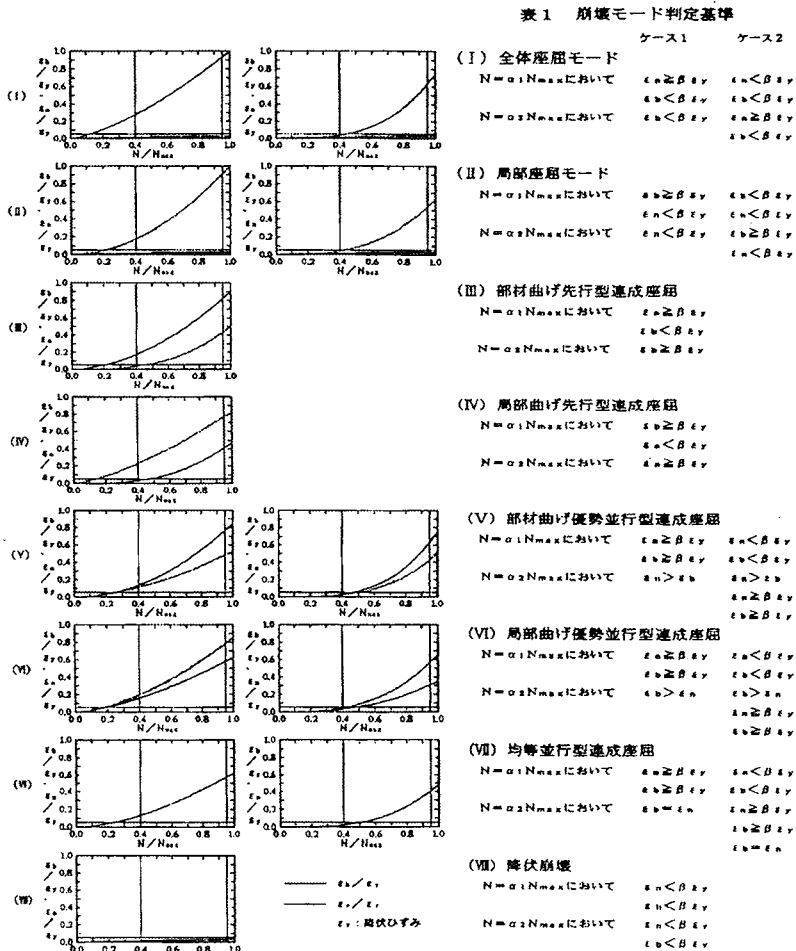


図1 崩壊モード別直ひずみの変化

## (2) 崩壊モードの判別方法と判定基準

崩壊モードの判別には、数値解析の結果から直接的に崩壊モードを判別する手法として、 $N/N_{max}$  に対する  $\varepsilon_n/\varepsilon_y$  と  $\varepsilon_b/\varepsilon_y$  のとの変化に着目して、圧縮力判定係数  $\alpha_{1,2} = N_{1,2}/N_{max}$  および直ひずみ判定係数  $\varepsilon_{n(b)} = \varepsilon_n(\varepsilon_b)/\varepsilon_y$  を用いた。その判定方法を表1に示した。既往の研究では、荷重段階初期の変形状態をもとに荷重最終段階での変形状態や耐荷力の低減より連成座靴と定義していること、初期圧縮力判定係数  $\alpha_1$  は構成部材要素が弾性から降伏が始まる点ということから  $\alpha_1 = 0.4$  とし最終圧縮力判定係数は  $\alpha_2$  は、降伏状態になる点  $N_{max}$  ではその構成部材の挙動が不安定になると考えられることから  $\alpha_2 = 0.95$  とした。さらに数値計算結果より崩壊までの断面内応力状態、変形状態および数値パラメトリック解析からも圧縮力判定基準  $\alpha_{1,2}$  の妥当性も検証できた。

## (3) 崩壊モードの発生順序

箱形断面中心圧縮材の崩壊モードの発生順序は関連細長比 ( $\lambda$ ) を一定として有効幅厚比 (R) に大小により論理的に表2に示すような崩壊モードを呈するものと考えられる。さらに直ひずみ判定係数  $\beta$  については数値パラメトリック解析結果より検討した結果  $\varepsilon_n = 0.05$ 、 $\varepsilon_b = 0.30$  が妥当となった。

表2 スレンジャーな部材の崩壊モード発生順序

R	モード発生順序	発生可能性
↑ 小 ↓ 大	Ⅷ 高伏崩壊	×
	↓ ↓	
	Ⅰ 全体座屈	○
	↓ ↓	
	Ⅲ 鋼材先行	○
	↓ ↓	
	Ⅴ 部材座屈	△
	↓ ↓	
Ⅶ 均等並行	△	
↓ ↓		
Ⅵ 局部座屈	○	
↓ ↓		
Ⅳ 局部先行	○	
↓ ↓		
Ⅱ 局部座屈	○	

註1：表中の番号は崩壊モード番号を示す  
 註2：表中記号の○印は発生の可能性が高い  
 △印は発生の可能性が低い  
 ×印は発生が考えられない

## (4) 耐荷力と崩壊モード相関図

中心圧縮材は極限耐荷力で評価されており、関連細長比と有効幅厚比による極限耐荷力の関係を図2に示した。また崩壊モードの発生順序をもとにした圧縮力判定係数  $\alpha_1 = 0.4$ 、 $\alpha_2 = 0.95$  および直ひずみ判定係数  $\varepsilon_n = 0.05$ 、 $\varepsilon_b = 0.20, 0.30$  を基準として関連細長比 ( $\lambda$ ) と有効幅厚比 (R) 面内に極限耐荷力と崩壊モードの相関図を図3に示した。これらの図から判るように、これまでの極限耐荷力のみで連成座屈を評価していた各種提案式に対して、今回の手法が連成不安定現象のより明確な指標となることを示している。

## (5) 崩壊モードと初期不整、鋼材特性

崩壊モードは残留応力や初期たわみによる影響が小さいことが明らかになった。また、一般構造用鋼材、高調質鋼、ステンレス、アルミ、変形能に優れた鋼材 (森脇が提案) などヤング係数、降伏応力、降伏比が異なる鋼材について検討を試み、鋼材の機械的性質が連成不安定現象に与える影響は大きいことも明らかになってきているが、さらに検討を要する。

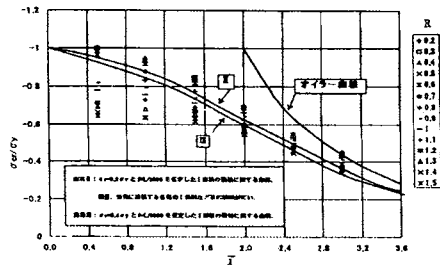


図2 関連細長比と有効幅厚比の極限耐荷力

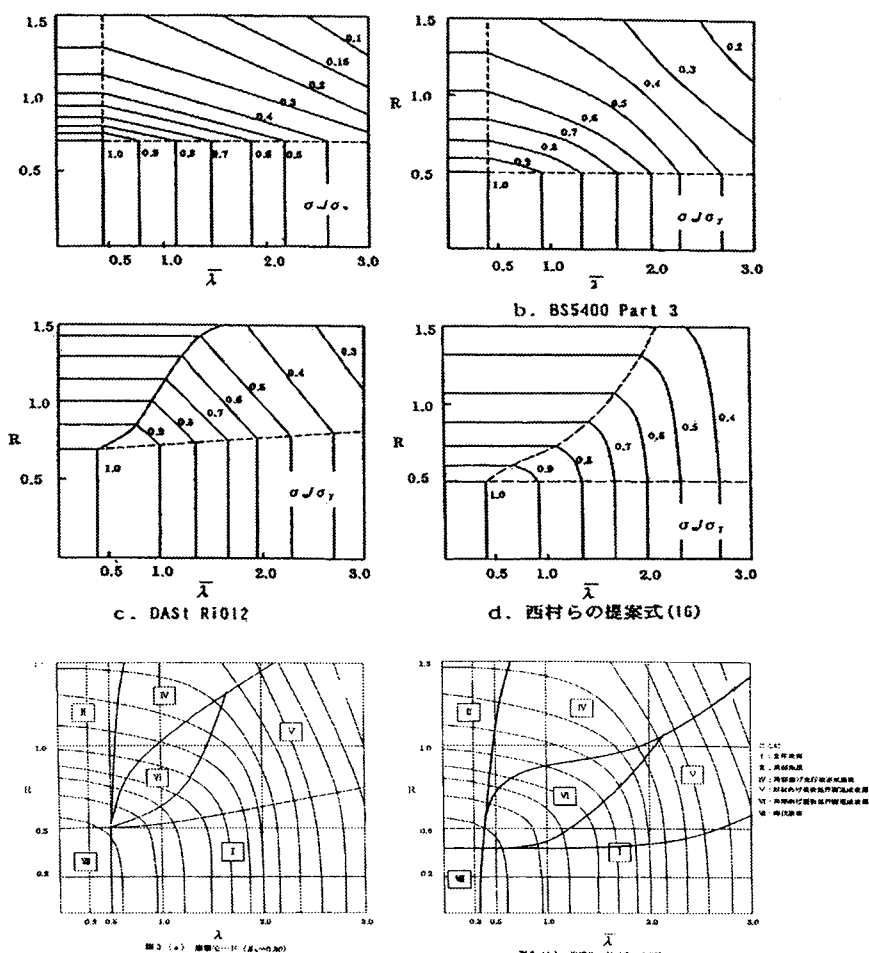


図3(c) 崩壊モード相関図

5. おわりに

本研究は、箱形中心圧縮材について弾塑性有限変位解析結果を基に、数値パラメトリック解析により、連成不安定現象の解明に貴重な資料を提供できた。今後、連成不安定現象の有用性を明らかにするために研究を推し進める予定である。

最後に、長期的共同研究組織『非線形構造力学』の分担研究員を終わるに当たり、主担研究員、産研研究所所長および関係各位には多大なご支援を賜り心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小松定夫、工藤哲男：薄肉弾面圧縮材の連成不安定現象に関する研究、大阪産業大学研究所報平成5年
- 2) 小松定夫、北田俊行：補剛された圧縮板の弾塑性有限変位挙動の一解析手法、土木学会論文報告集、No. 296、pp1(1980)
- 3) 小松定夫、北田俊行、宮崎清司：残留応力および初期たわみを有する圧縮板の弾塑性解析、土木学会論文報告集、No. 244、pp1(1975)
- 4) 道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編)・同解説：日本道路協会(2000)



## 切欠きをもつ板の超音波による可視化

分担研究員 福井 毅

### Ultrasonic Measurement on Stress Model

#### Having Defects in Photo-elasticity

Tuyosi FUKUI

#### Abstract

Materials are used to support many bodies, or to transmit forces or heat. But, materials are not isotropy generally and usually have defects. In my report, a plate is come in contact with ultrasonic probe and a picture of stress condition inside of material based on defects taken and is considered in the stroboscopic photo-elastic system for the visualization. For that reason a plate is used glass and photo-elasticity. These experiments are compared with Two or more photographs and are examined the thickness of wave, the lightness of Photograph, and are experiments of comparison in this reason.

#### 1. はじめに

いろいろな材料は力や熱に耐えるように使用される。材料は回転している軸(シャフト)を支えるために用いられることも多く、シャフトは大体数本以上あるのが普通である。それらのシャフトには、それぞれ異なった方向の力がかかっている。回転している軸の力を支える板はどこでも同じ強さがあると思われざみであるが、板の内部を拵ると、縦方向には強いが、横方向にはあまり強くない材料もある。木材などはその典型である。また金属であれば伸び、縮みやしやすい方向とそうでない方向がある。それに金属は溶かしてから、固め

て、使用するが、非常に小さい気泡やヒビが入っていたり、固まるときに一様に固まりずらく、早く固まった所や後から固まった所ができて、なかなか一様な金属も作りづらい。非破壊試験には放射線透過試験や超音波探傷試験があり、医療診断でも両方が使われている。ただ、放射線の方は外部に放射能が出ないように、また、人体の一部だけに放射線がくるような工夫が必要である。医療系で使用されている放射線はおもにX線が使われているが、放射能の問題から、超音波の方が良く使われている。一応、人間が被曝してもよい放射能(線量限度という)は年間1ミリ

シーベルトと定められている。しかし、雨に濡れるだけでも放射能は体に入ってくる。超音波であれば、医療でも普通3メガヘルツ（デシベル/cm）以下が用いられる。ただ、X線と超音波とは単位も異なるし、超音波も10メガヘルツ以上浴びないほうが良い。超音波送受信機は最初潜水艦探知のため、フランスがドイツの潜水艦を見つけるために、1919年に開発された。それ以後、魚群探知機、水晶時計、テレビやラジオの周波数フィルター等にも利用されている。もちろん、工学系でもX線と超音波とが使われているが、材料力学系では超音波が良く利用されているようである。工学系での超音波の一般の測定方法にはパルスエコーオーバーラップ（PEO）法、パルススーパーポジション法、シングアランド法などがあり、光を通す方法にはシュリーレン法、等色線法、超音波パルスの映像法、フレネル解析映像法などがある。超音波の可視化は超音波探傷試験の内の一つであり、また映像法の一つでもある。超音波で可視化した写真はあまり多く発表されていない。それは目に見えるだけで論文になりにくいといった理由もあるようである。そこで、いろいろな場合の可視化実験を行ってみた。

## 2. 超音波について

工学系における超音波は医学系からみれば相当遅れている。それは医学的には身体内部を観察する場合、病院ならば1億円程度のお金はたいした金額でもないし、超音波の検査をうける人も非常に多いので、採算も取れる。工学系では撮影する回数は少ないし、一人や二人のために、1億円を出す大学や研究施設

は少ないようである。超音波は目に見えるものではない。ただ、超音波を発生している端子（センサー）を例えば、板に当てれば板に超音波が伝わっていくはずである。しかし、ほとんど目や音は発生しないので、何か装置を用いない限りわからない。それほど超音波は小さい振動である。

そこで一般にはオシログラフを使って超音波の振動を電氣的にとらえ、周波数、波長、時間などを計る。しかし、オシログラフも一方向の電波をとらえることができるだけなのであるが、3方向ぐらいの電波をとらえて、主振動方向を確認してから、測定する必要があるようである。ただその波も地震のように上下に振動している波と左右に振動している波が重なって表示されることが多く、解析しづらい場合も多いようである。そのような場合、超音波で可視化（目に見えるように写すこと）して、どのような状態かを観察してから、測定することも一つの方法となる。ただし、透明に近い材料で作り直さねばならないので、それほど簡単ではないし、加工もしにくく、問題も多い。しかし、本研究では可視化のいろいろな実験を行ってみた。

## 3. 超音波の利点

超音波には次のような利点がある。しかし、超音波は音であるので、X線のような光より相当おそい。それゆえ、天文学的な測定では光線を用いるべきである。

(a) 波長が短いこと

音速が電磁波の速度より $10^5$ 程度遅いことから必然的に波長が短いことがわかる。波長が短いことによって、パルス反射法では送信パルスの幅を狭くすること

ができる。

- (b) 液体 固体中を電波より良く通ること  
水中での電磁波の透過性を考えてみると、極めて低い周波数 (VLF) の電波が水中からの通信に使われている (帯域幅は狭く伝送容量は少ない)。電磁波は水中では減衰が大きすぎ計測用の媒質としての実用性は少ないようである。特に金属は、電磁波に対して不透明なので計測用の媒質としては使い難い。それに対し、液体 固体中での超音波は周波数にもよるが、比較的減衰が少なく、計測の分野で電磁波よりも広く使われている。

- (c) 放射線障害が無い

医学上の診断の手段として超音波は非常に良く使われており、X線、T線などの放射線による方法と相補いつつも競合している。歴史的に先に発達したX線検査に対して、超音波診断が急速に普及した原因の一つは放射線被曝の点にある。例えば胃のX線透視検査一回に受ける放射線量は約0.5レムである。一般公衆の個人が一年間に受けて良いとされる線量限度0.5レムと同等である。できれば検査のための被曝は避けたい。特に妊婦や胎児が影響を受けやすいので、妊婦と診断されてから後の胎児の受けて良い総線量は1レム以下と勧告されている。このような理由から超音波による診断法が急速に発達した。

- (d) 超音波照射による障害は無い

人体の治療や、組織に損傷を与えることを目的とした超音波治療方がある以上、診断のために超音波を人体に照射することは何等かの変化を与える可能性があるのではないかという疑問が残る。しかし

実際に診断で使われているのは  $0.1\text{mW}/\text{cm}^2$  以下である。超音波エネルギーが生体に変化を与えるのは  $0.1\text{W}/\text{cm}^2$  以上が必要とされており、診断に使うエネルギーとは  $10^3$  倍以上の差があり、診断のための超音波照射による障害は無いと考えて良い。

- (e) 電波法による規制が無い

電波、特に HF、VHF 以下の周波数の電波は概して大気中での減衰が少ない。必要以外のところまで届いてしまうこともある。その結果混信を起こしてお互いに通信を妨害することを防ぐために電波法によって目的別の使用周波数区分、周波数許容偏差、出力などについて規制されている。そのために測距、速度測定、テレメータ、リモコンなどの空気中での測定と制御に、できるならば電波を使いたい場合でも規制を逃れて超音波を使いたくなる。あるいは使わざるを得ない場合も多い。ただい超音波でも同時使用による相互妨害の例も無いわけでもない。例えば魚群探知機は、漁法・深度などに使用されているが、全々支障が無いわけでもない。

#### 4. 超音波可視化装置

超音波可視化装置は光弾性装置 (Fig.1 の下部) と超音波発生センサーからの波と光弾性装置の光が試験片で一致するようにする電気系統部 (Fig.1 の上部) とからなる。ただし、この装置は同大学の小堀教授が外国の文献などを参考にして、作成されたもので、私には詳しくはわからない。ただ、試験片の射

影部には相当の光が必要な上に、超音波の波形も目にはいつも写っているように見えるが、昔の映画のように 0.1~0.3 秒ぐらいの間隔で放射されている。また、光弾性の光はストロボのライトに変えているし、1/4 波長板は使用されていない。それゆえに光弾性の光と超音波の波は両方とも断続的であるため、それらを調整する上部が必要となってくるようである。決められた号を作っているパルス発信器とフラッシュ閃光装置の間にシンクロ

(同調) 装置を配置し、ストロボを光らせるようにし、さらにシンクロ装置の中に発信信号の延滞装置(遅れ時間発生装置)を加えることによって超音波の位置を自由なところに音波位置でフラッシュを光らせるには Fig.1 の上、詳しくは Fig.2 のような装置が必要である。超音波を発生させる信密波である。つまり物質中を音波が進むとき、移動させ、波の動きを観察できるようにした。しかしこれだけではなく、超音波のある位置がどこで

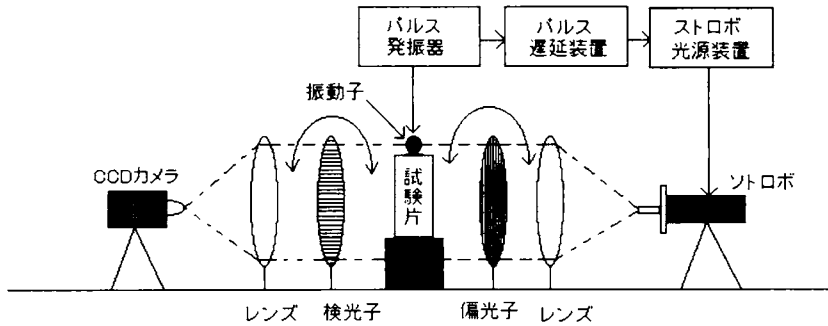


Fig.1 The ultrasonic equipment using the stroboscopic photo-elasticity

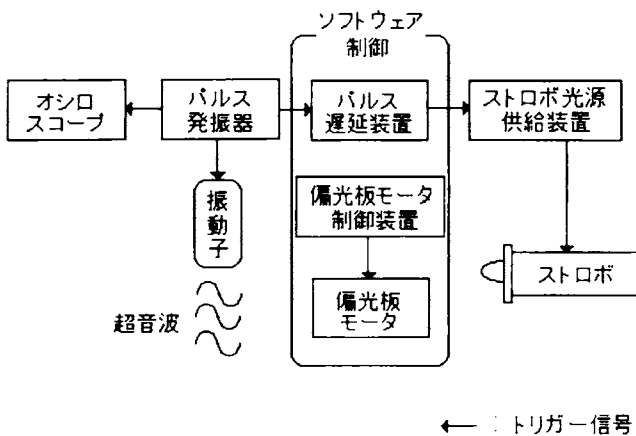


Fig.2 The same period equipment between the stroboscope and the oscillator

あるのがわかるようにしている。また、超音波は弾性波であり、特に縦波は疎その物質内には超音波により局部的に「密」な部分ができることになる。この「密」な部分を見えるように光弾性応力解析装置を用いられている。このように、超音波の音圧により一時的ではあるが試験片内部に応力を受けた部分は光弾性の実験装置のより確認が可能となる。

## 5. 探触子について

探触子は超音波を発生させるセンサーであり、電気を振動に与え、超音波振動を発生させる電気音響変換器であり、超音波探傷器の感覚器管に該当する重要な部分である。超音波発生センサーは普通のものであれば、センサーで押さえた方（Z方向）とZ方向に直角な方向（X、Y方向）に波形は伝わる。しかし、今回使用したセンサーはFig.3のような装置でZ方向にのみ振動が伝わるセンサーである。そしてセンサーの接触部は直径26mmの円形である。センサーの波の伝わり方は、伝達材から離れるにしたがって、波形はZ方向にたいして30度程の角度で、拡大して伝わっていくようである。

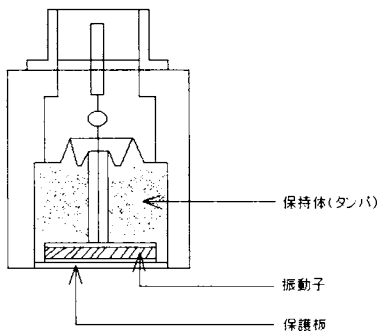


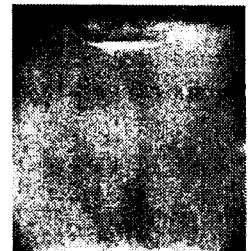
Fig.3 Pulse oscillator with perpendicular wave

探触子内部の振動子は、超音波を発生させたり受信するために圧電材料が用いられ、その材料として用いられるが、水晶、硫酸リチウムなどの高いインピーダンス型と、チタン酸バリウム、ジルコン酸鉛磁器のような低インピーダンス型があり、これらは薄く切り出して両面に電極を貼り付け、その間に電圧を加えると、厚さ方向に伸びたり縮んだりする性質を持っている。接触媒体を介して試験材の表面も振動子伸縮につれて振動し、超音波となって試験材の内部に伝わっていく。振動子は感度よく使うために普通半波長の厚さである。

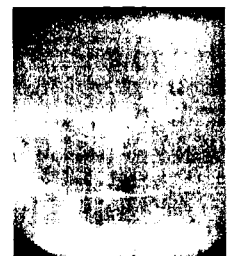
## 6. 試験片および実験結果

### 6.1 無応力状態での超音波の可視化

試験片として、120mm×120mm×(厚さ)20mmのパイレックスガラス（ガラス）を用い、超音波を上から下と伝達させた。その図がFig.4であり、図(a)、(b)では振動が上から下へ進んでいることを示し、白の横線の両端が少し上を向いていることを示す。横線に成るのは試験片の上に置かれたセンサーの横



(a)The incident wave on upper side



(b)The incident wave passing 180  $\mu$ s

幅が26mmあるせいで、両端が細くなるのは波が弱くなっているせいである。波の伝達速度も少し遅いままである。

図(c)では下面からはね返った波を示す。そのまま下へ通過していく波もある。このガラ

ス中での速度はシングアランド法にれば縦波で約6680m/s、横波では約3830m/sと観測された。1 $\mu$ sでは縦波は0.565mm進むことになる。ゆえに120mmであれば上から下まで通過するのに212 $\mu$ sかかることになる。

正方形板の端上部に超音波センサーがくると、はみ出た波は側面で反射され、Fig.5のように45°の方向に反射する。この図では、正方形板の端部(屈折している所の縦の部分)が見えるように撮影されている。この反射という現象は試験片を通過するとき、異質物を見る

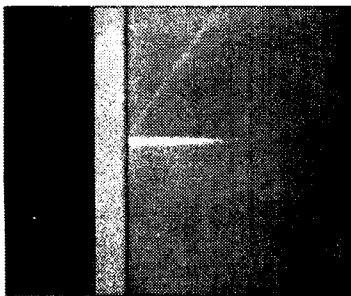
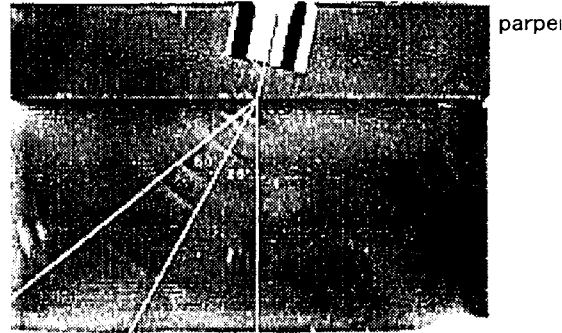


Fig.5 The wave reflected with perpendicular wave in the side boundary

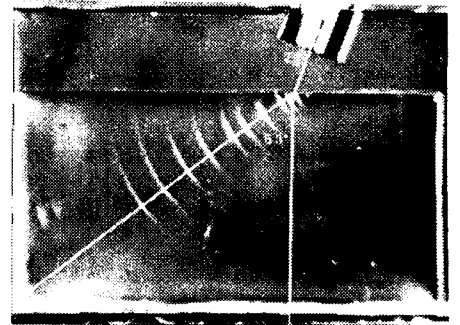


(c) The reflected wave the bottom side  
Fig.4 The condition communicated perpendicularity

のに、邪魔になる場合が多い。もちろん、正方形外部に放出する波もある。Fig.10は正方形板を水中に入れ、図(a)は上下方向より超音波センサーを12°、図(b)は26.8°傾けて、波を入射させたときの図である。音波が正方形板にあると、まっすぐに進まずに、板の表面に近いほうに屈折



(a) The inclination 12°



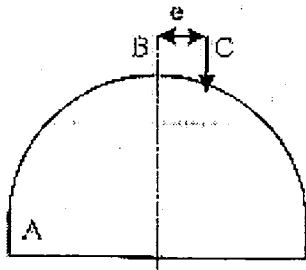
(b) The inclination 27.8°

Fig.6 The incident wave slantin to the vertical direction

して進んでいく。超音波を斜めに入射したときにはそれも時間とともに波が左右にひろがっているのがわかる。もちろん、水とガラスの間で反射する波もある。

## 6.2 音波が曲線をもつガラス内を通過する場合

曲線をもつガラス内を音波が通過する場合、そのガラス内は完全に無応力で一様であるとは言い難い。切削による残留応力が少しはあるように思える。半円形板の中心から距離  $e$  だけ移して超音波を入射させたときの図が Fig.7 である。厚さ 20mm で直径 70mm

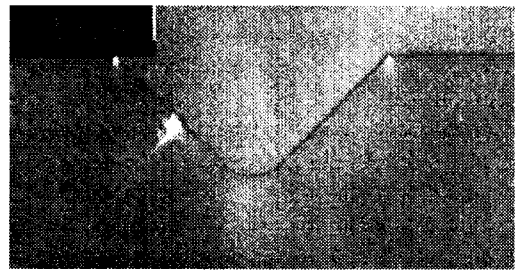


(a) The case shifting  $e$  from the circular center

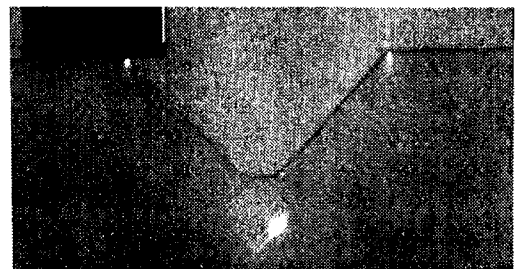


(b) The surface wave in this case Fig.7 The case of incidence shifting  $e$  from the center of circular plate

円筒状の頂点 B から水平に距離  $e$  だけずらして垂直に縦波を入射させると、図のような表面波も観察され、曲面にそって移動するようである。Fig.8 は深さ 30mm で底部が半径 6mm の曲面となっている V 字型境界を持つ厚さ 20mm のモデルに上部から縦波を入射させると、表面波が境界面に沿い底部に向かって伝播する。ただ、センサーは表面波を生ずる所まで V 字型境界に寄せている。



(a) The surface wave of the first time



(b) The surface wave of the back time Fig.8 The surface wave passing V block

の半円板を長方形板 (70×15mm) の上に乗せたガラスモデル (Fig.11) を水中においた。

### 6.3 境界に小さい切り欠きをもつ正方形板に縦波が通過する場合

Fig.9はエポキシ樹脂の正方形板において右端中央に幅3mm、深さ3mmの切欠きを造り、光弾性写真を写した図である。結構残留応力が残るのが判る。



Fig.9 The isochromatic photograph having the notch of square shape

Fig.10は、幅2mm、深さ2mmの切欠きを側面に造り、切り欠きのある面の上部にセンサーを置き、縦波を照射した図である。切欠き上部に第一波とその反射波が見られる。第一波は切欠きの上で相当太くなっていくの

(a) The case of upper position



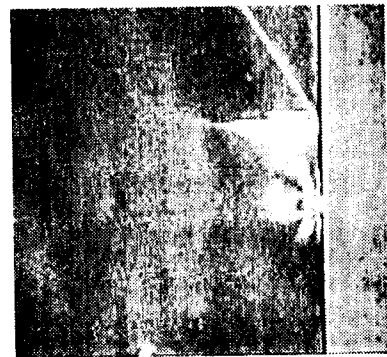
from the notch



(b) The case of down position from the notch

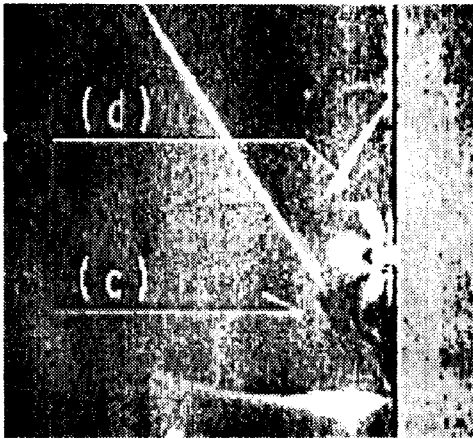
Fig.10 The incident wave having the Notch of depth 2mm

が判る。図(b)では第一波が下にきたときの図で、切欠きの真下で波が消えかかっているのが判る。第一波の反射波(第二波)が切欠きの上部に見られる。図(b)では切欠き周辺に円形方の反射波も見られる。Fig.11は板に4mm角の切欠きを作ったときに、縦波を照射した図である。図11(a)では切欠き上に縦波を当てたときの画像であり、図(b)は切欠き下にきたときの画像である。



(a) The case of upper position from the notch





(b) The case of down position from the notch

Fig.11 The incident wave having the Notch of depth 4mm

図(a)では縦波は切欠き上で太くなっており、切欠き下に来たとき、切欠き真下で波が薄くなっていることが確かめられる。ただ、反射波は切欠き上部で、ほとんど写っておらず、反射波の反射波(d)は逆にはっきり写っている。実験では切欠き深さが1mmのときも撮影したが、2mmのときとほとんど変わらなかった。また、波形の濃い、薄いはライトの照度で変わるので、一枚の写真だけで溝の深さは何mmありますかと聞かれてもわかりづらい。切欠きがあるであろうとしか、答えられない。

#### 6.4 円孔をもつ長方形板の上部から縦波を入射させたとき

Fig.12 は円孔をもつ長方形板の上から下へ超音波が通過する場合である。円孔の周囲には少し残留応力が見られる。波が通過していくと、横線(縦波)は円孔の所で切れているよ

うに写っている。その波は円孔下でも切れて写っている。ただ、下へいくと切れ目は少なくなっている。その理由はセンサー下が

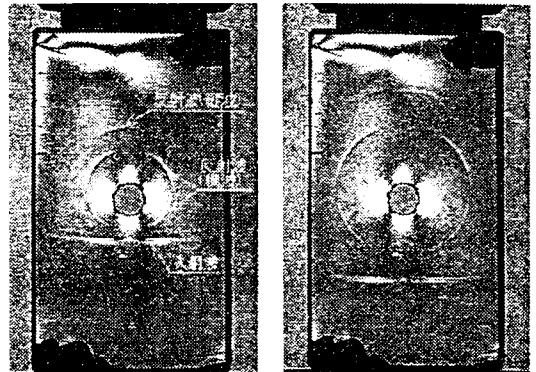
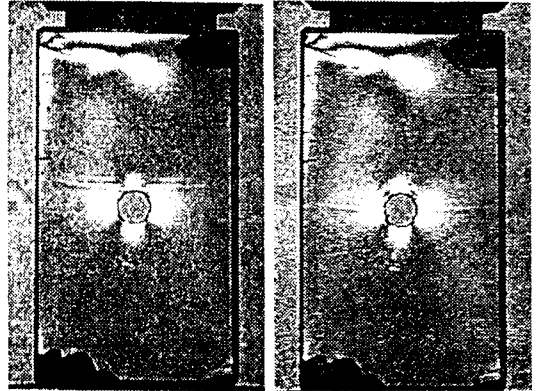
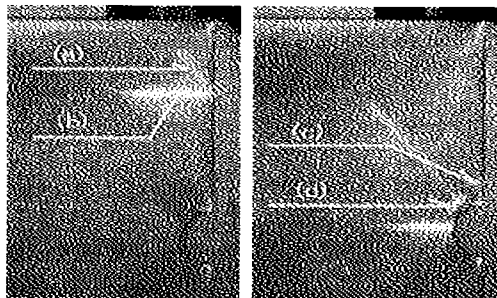


Fig.12 The perpendicular wave passing On the circular hole

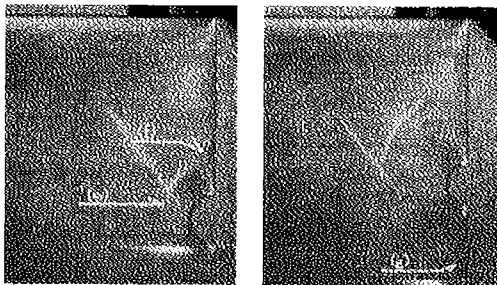
26mmあり、斜めに光が差し込むせいで。また、円の周囲には二重の円形の反射波が観測され、その円孔は波がと下に行くほど円は大きく成っている、

### 6.5 円孔切欠きをもつ長方形板の上部から縦波を入射させたとき

10cmの正方形板の右中央にFig.13では深さ6mmで、曲率半径6mmの切欠きをもっている。図(a)は縦波が切欠きの上にあるときで、図(b)、(c)、(d)は切欠きのほぼ中央にある

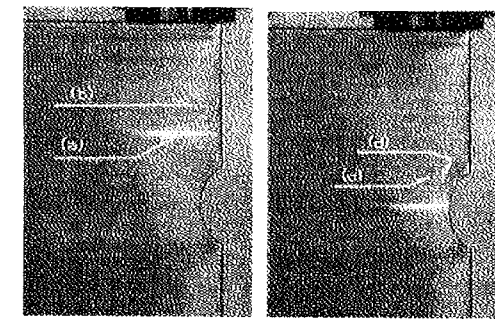


(a) (b)

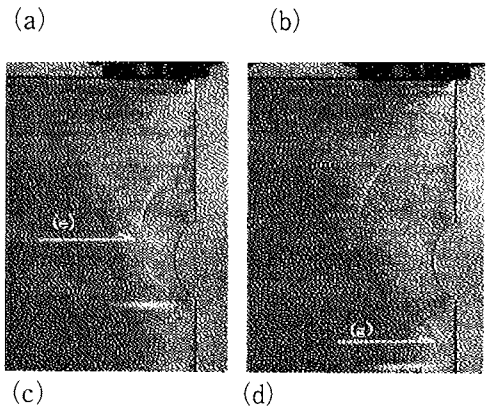


(c) (d)

Fig.13 The perpendicular wave passing on the circular notch  $R=6\text{mm}$  of depth 6mm



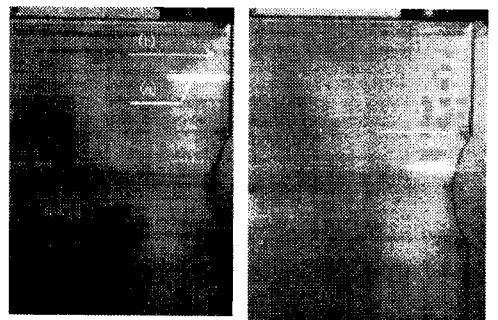
(a) (b)



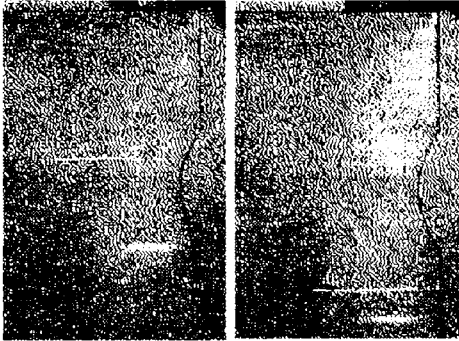
(c) (d)

Fig.14 The wave passing on the circular notch  $R=12\text{mm}$  of depth 6mm

とき、切欠き下にあるとき、切欠きより下にきた場合である。そして、Fig.14、15は深さは同じ5mmであるが、曲率半径が12mm、24mmとおおきくなった切欠きをもつ場合の縦波を照写した写真である。それぞれの図(a)は(a)どうし、図(b)、(c)、(d)は(b)、(c)、(d)どうし比べると、曲率半径が小さいほうが縦波は太く、図(c)、(d)での反射波はより大きく切れていることが判る。それは円孔が大きくなって、円孔中心より離れたことも関係している。すなわち、曲率半径が小さいほうが深さが同じであれば、応力が高いと思われる。



(a) (b)

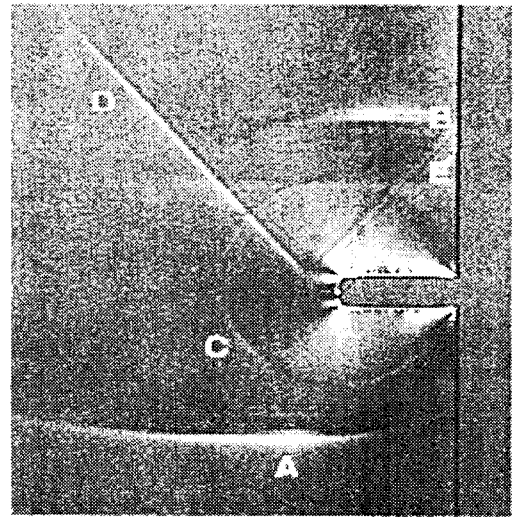


(c) (d)

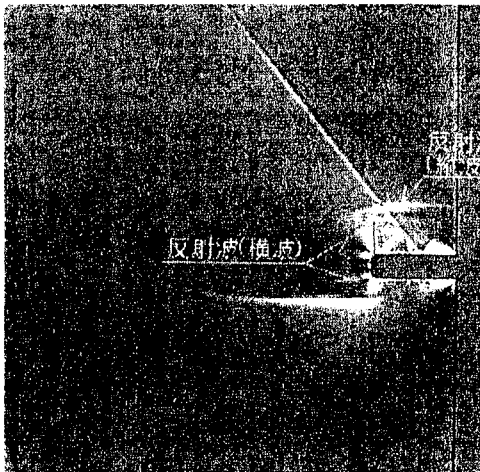
Fig.15 The wave passing on the circular notch  $R=24\text{mm}$  of depth  $6\text{mm}$

6.6 深い切欠きをもつ正方形板(無応力状態)を縦波が通過したとき

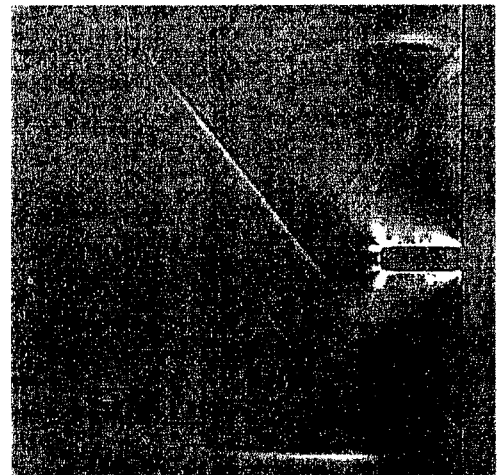
10cmX10cm のガラス試料に幅 3mm、深さ 10mm の切欠きを中央に設けて、切欠きの試料上部端部に近い位置から縦波を入射させた。Fig.16(a)のように縦波は切欠き面の下



(b) The case of point position of the notch



(a) The case of down position readily of the angle notch



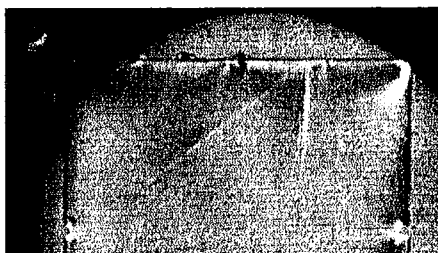
(c) The case of down position from the notch

Fig.16 The incident wave having the angle notch of depth 10mm

に現れ、反射波は切欠き上面で反射して円弧状に周囲へ広がる。さらに図(b)では縦波が切欠き部先端近くにあたり、反射波は切欠き部で斜め上に反射すると共に、大きく反射して円形ができています。図(c)ではそれらはより大きく広がっているのが判る。また、角張っている部分で大きい応力を生じていることも判る。

### 6.7 正方形板の上から荷重をかけ、横上にセンサーを当てたとき

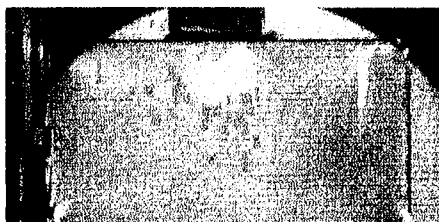
Fig. 17 は正方形板の上から荷重をかけ、上にセンサーを当てたときの図である。図(a)は荷重をかけずに、左横より縦波を当てたときの図であり、図(b)は上から荷重をかけセンサーを当てた最初の図であり、図(c)



(a) The case of no load



(b) The beginning case acting the load



(b) The back case acting the load

Fig.17 The incident wave having the Load and acting the osillator by the side

は波が荷重より右にあるときの図である。いろいろと実験してみたが、荷重をかけた場合と、かけてない場合との差は良くわからなかった。

### 6.8 深い切欠き(丸型)をもつ正方形板(応力あり)を縦波が通過したとき

Fig. 18は切欠きのある試験片を台上に置き、マルチリングと超音波振動子を配置したときの寸法図である。また、Fig.19は試験片寸法である。マルチリングの目盛り

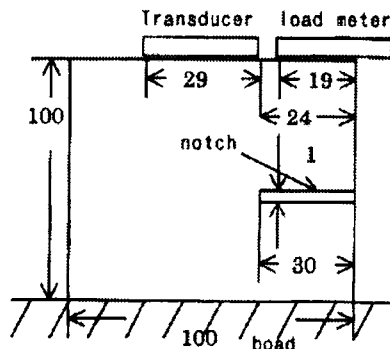


Fig.18 The transducer and load meter on the square plate having the deep notch on the stand(unit mm)

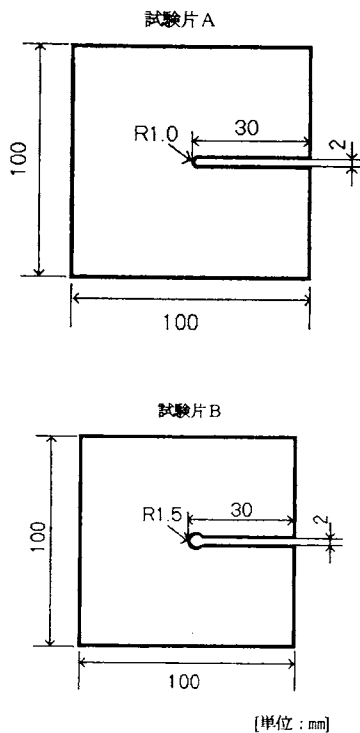
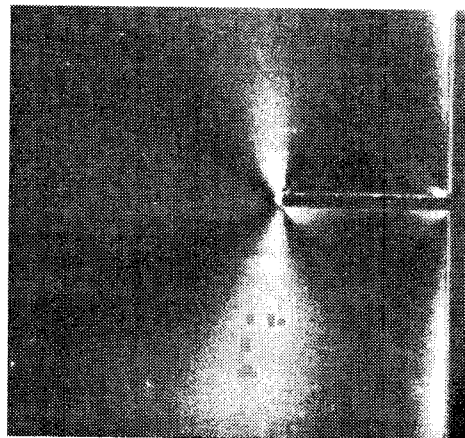
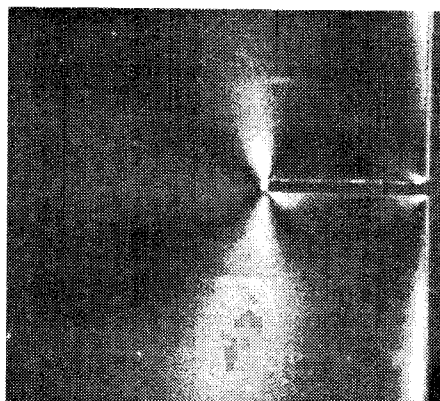


Fig.19 The models of deep notch

0(無荷重)のときで、ディレイ 74 にし、絞り 1.4 で写した図が Fig.20(a)である。切欠きの下の長い横白線が縦波(第一波)であり、上のかすかに見える曲線が反射波である。切欠きは白い部分から右にある。また、切欠き底が白い部分は残留応力と思われる。荷重がなしで縦波が少し下にきた場合が Fig.20(b)である。図 21 は同じ位置で荷重 44.8 kgf、絞り 4 で写した図であり、荷重が大きくなる程切欠き底の白い部分が大きくなり、応力も大きくなっているのが判る。この上下および左方向の明るさからも切欠き周辺の応力が求められると思われる。ただ縦波の位置で波形が少しずつ変化していく



(a) The case fo diray 74



(b) The case fo diray 90

Fig.20 The wave on no load (radius : 1mm)

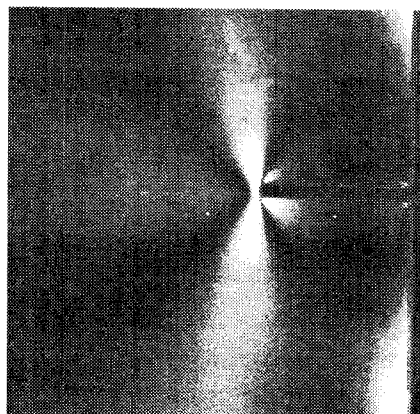
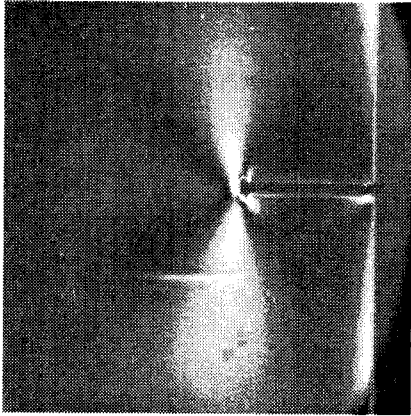


Fig.21 The wave on the load (radius : 1mm)

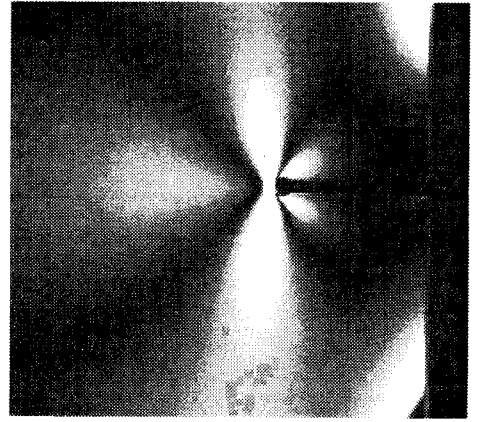
ので、縦波の位置を決めて議論すべきである。下図は切欠き底のかどをわずかに (1.5mm) 丸めて、最大切欠き長さを 30mm にして同様の実験を行った図である。角ばった試験片より、丸まった場合の方が全体的に切欠き底での応力が少ないことがわかる。Fig. 22(a)はフェイル 78 一定であり、Fig. 22(b)、(c)は荷重 40、60Kgf のときの図である。絞りは図(b)増すと縦波が切欠き底で白い応力部分を増



(a) The case of no load (R=2mm)



(b) The case of the load 40kgf (R=2mm)



(c) The case of the load 60kgf (R=2mm)  
Fig. 22 The wave on the load (radius 2mm)

し、縦波と重なり、縦波は見えづらくなっている。切欠き底の半径が大きくなると、応力が相当減少するようである。Fig. 21 と 22(b) を比べると、22(b)のほうが切欠き底の白い部分が少なくなっており、また縦波もはっきり見えている。Fig. 24 は Fig. 23 の荷重装置

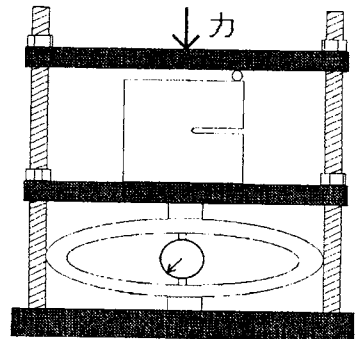
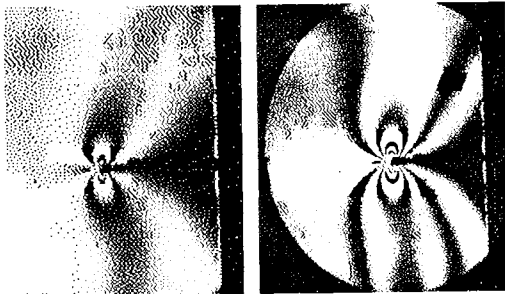


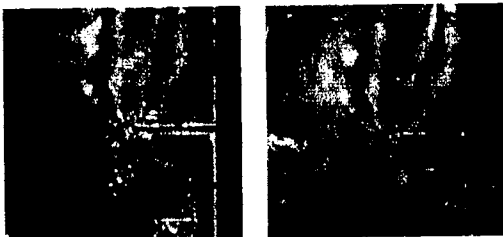
Fig. 23 The contrivance acting force on the square plate having the deep notch

を用いて撮影した光弾性写真である。Fig. 24において、図(a)は切欠き底半径 $R = 1\text{mm}$ で、左図は先端荷重 $1\text{kgf}$  ( $9.8\text{N}$ )で、右図は $5\text{kgf}$  ( $49\text{N}$ )の場合である。図(b)は $R = 2\text{mm}$ のときで、左図は荷重 $3\text{kgf}$ で、右図は $6\text{kgf}$ の場合である。

荷重が違うので、あまり比較できないが、図(a)のほうが図(b)より縞が多く現れるようである



(a) The case of the radius  $R=1\text{mm}$



(b) The case of the radius  $R=2\text{mm}$

Fig. 24 The isochromatic photograph having the notch of circular shape

### 6.9 ガラスの突き出し梁に縦波を通したとき

使用した試験片は以下の3種類であり、いれも材質はクラウンガラスである。Fig. 25 は厚さ $2\text{cm}$ で、一番長い縦、横の寸法は $10\text{cm}$ であり、切り欠き付け根の半径 $R$ は $0, 1\text{mm}$ である。

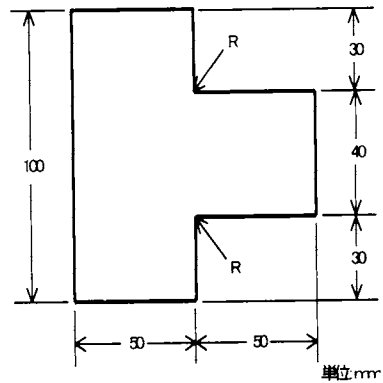


Fig. 25 The plate model on the support on the one side

を押さえる装置である。図にはかかれていないが、試験片最上部は上からコイルばねで支えた。荷重は試験片の凸部分先端に荷重が

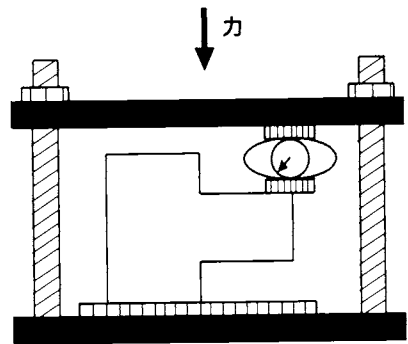


Fig. 26 The load contrivance



Fig. 27 The case of the suppress of the glasses of pairekusu(left) and curaun (right)

かかるようにセットした。超音波のディレイ

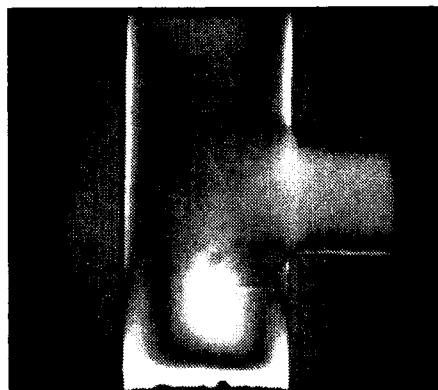
95とし、設定した荷重は、0.007KN（荷重測定器の重さ）、50kgf（約4.9KN）、100kgf（約9.8KN）である。Fig.27には  $R=0.5\text{ mm}$  でパイレックスガラスとクラウンガラスの切り欠き部の写真を示す。両者にはほとんど変わらないようである。Fig.28は  $R=0.5\text{ mm}$  の切り欠き部の写真であり、図（a）はダイレイ95、荷重0.007KNで先端を押さえたときの付け根の写真である。Fig.28の（b）、

（c）は他の条件は同じで、荷重を1.3kN、2.2kNと変化させたときの写真である。

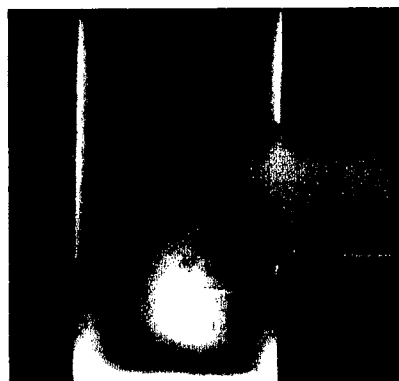


（c）ダイレイ95、荷重2.207KN

Fig.28  $R=0.5\text{ mm}$  の切り欠き部の写真



（a）The direy 9 5、the load 0.007KN



（a）ダイレイ95、荷重0.007KN



（b）ダイレイ95、荷重1.307KN



（b）ダイレイ95、荷重1.307KN

Fig.29  $R=1\text{ mm}$  の切り欠き部の写真



Fig.29 は  $R=1\text{mm}$  の切り欠き部ときの写真で、図(a)はディレイ95、荷重0.007KNのとき、図(b)はディレイ95、荷重1.3KNのときの写真である。

### 6.10 アルミ板をもつガラス中を通過する超音波縦波

アルミ板を二つのガラスの間にいれたときの超音波写真を撮影した。ガラスの中央に厚さ6mmのガラスを挿むと超音波は相当複雑な波形を描くことになる。まず、超音波がガラスの中へ入っていく。次にアルミの中に入っていく。そうするとアルミの中を通過する波（ただし、アルミ材の中の超音波は見えない）とアルミ表面で反射した波となる。このときディレイ55である。次にFig.29のように下のガラスを通過して波とアルミ下面で反射した波に分かれる。下の波が第1波で上の波が反射波である。反射が起こると波は半分ずつに別れるので、少しずつ写るようになる。それでも結構濃く写る。本研究ではアルミの下にできた波を観察することになる。このときディレイ68である。次にアルミ板に穴を開けたときの超音波写真を示す。アルミ板に穴が開いているときには、その穴の部分には波は通らない

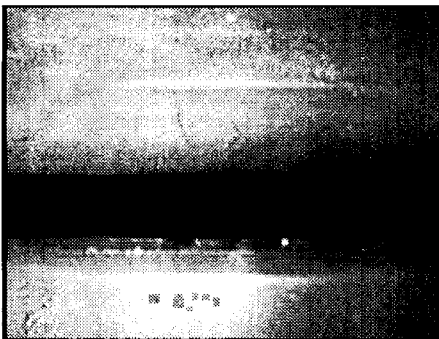
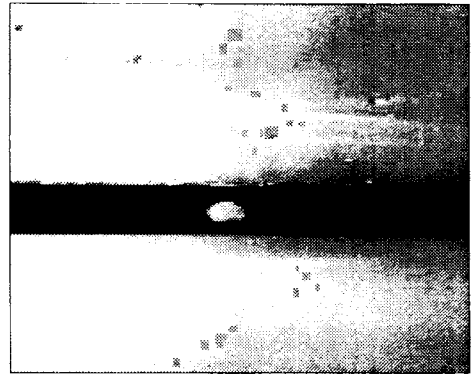
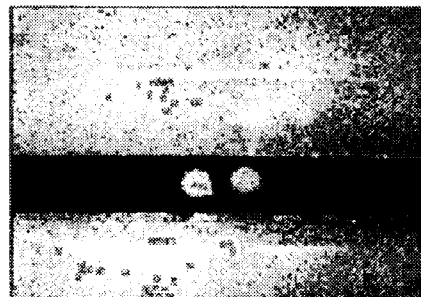


Fig.29 The wave passing the aluminum



(a) The case of one hole



(b) The case of two holes (diley 68)

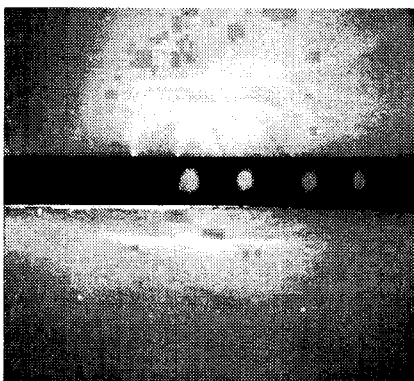


(c) The case of two holes (diley 120)

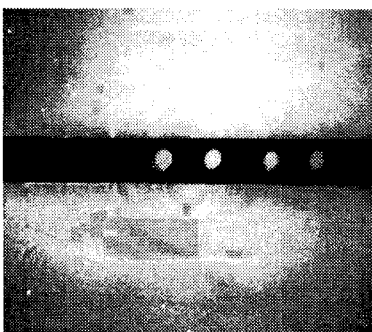
Fig.30 The wave passing the aluminum

し、また穴の周辺1mm ぐらいの所では残留応力のため、波は通りづらい。特に穴0.5

mm ぐらいの所はほとんど通らない。  
 Fig. 30(a)は1個の円孔があるアルミ板を波が通過した場合であり、この時のディレイは66である。図(b)はアルミ板に2個の円孔があり、その間の円孔間での間の距離が2.7mmであった。円孔周辺に残留応力が残るため波が伝わりにくくなる。波が二つに切れているように見える。図(b)はディレイは66であり、図(c)は120である。Fig. 31はアルミ板に4個の円孔があり、ディレイ66のときと、120のときである。円孔周辺部分には波が通らず途切れかかっているのがわかる。



(a) The case of delay 66



(a) The case of delay 120

Fig. 29 The wave passing the aluminum having four holes

ディレイ 120 では波は薄くなり一直線につながっているように見える。

### 6.11 ジュラルミン板をもつガラス中を通過する超音波縦波

次に Fig. 30 は、ガラスとガラスの間にはジュラルミンが用いられているときの寸法図である。アルミニウムであると軟らかいので、穴を開けた時に周囲に残留応力残りやすい。Fig. 31 のようにジュラルミンには3個の円孔を開け、円孔と円孔の距離を少しずつ変化させた。Fig. 32 は電気装置(パルス遅延装置)が故障したため、想像設計した図である。である。からわかるように図(c)ではジュラルミン下の縦波はほとんど続いて

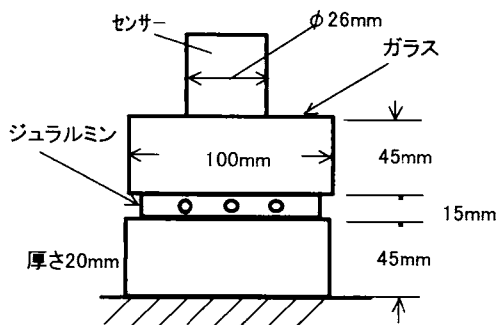


Fig. 30 The load contrivance

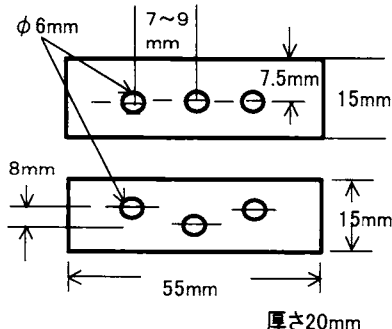
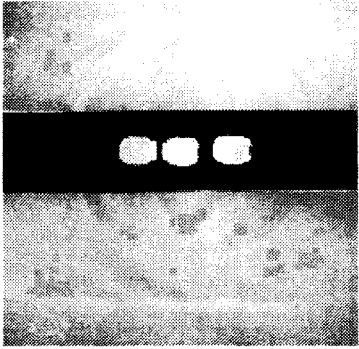
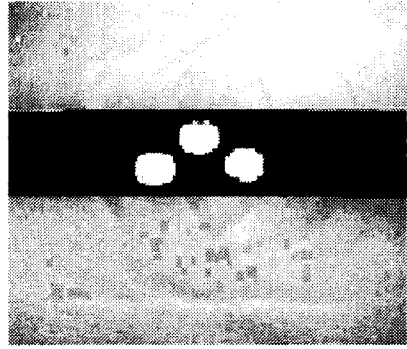


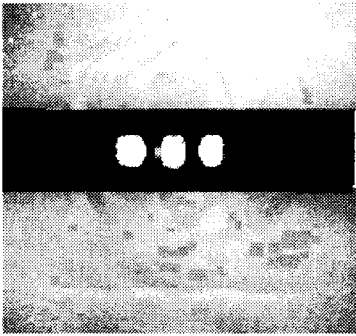
Fig. 31 The measure on the duralumin Having the holes



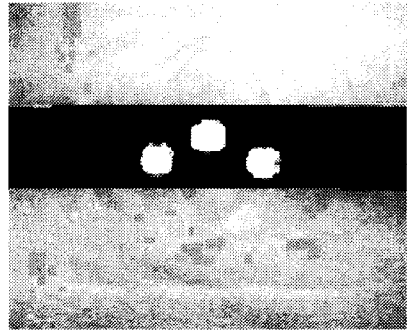
(a) The case of the circular distance  
7mm



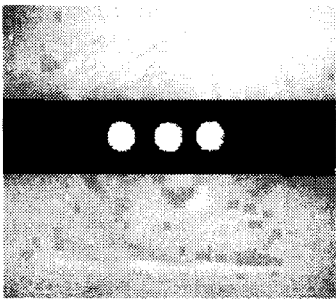
(a) The case of the circular distance  
7mm



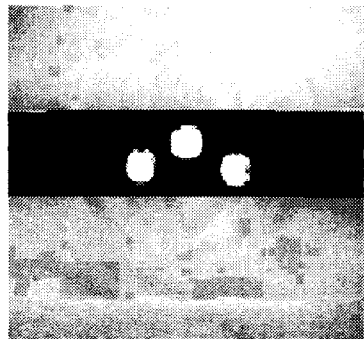
(b) The case of the circular distance  
8mm



(b) The case of the circular distance  
8mm



(c) The case of the circular distance  
9mm



(c) The case of the circular distance  
9mm

Fig.32 The wave passing the duralumin  
having three holes

Fig.33 The wave shifting 3mm heightly  
in the duralumin

いるように写っている。しかし、図(a)では相当切れて写っている。Fig.33では3個の円孔があるが、穴と穴の横の間隔は上図と同じであるが、上下に3mm変化させている。ジュラルミン下の縦波はやはり、図(a)が一番切れているように写っており、(c)が一番続いているようにみえる。Fig.18とFig.19とを比較すると、わかりづらいが上下に少しずらした方が縦波は続いているように見える。反射波は正方形板の右横にある場合にはある程度役に立っている。また、板に切欠きがあり、荷重が作用した場合も実験した。ただし、ガラスが壊れないように、しかも相当荷重がかけられる場合のみ有効であった。

## 7. おわりに

試験片にいろいろな切欠きを造り、応力が大きくなると思われる所に超音波の縦波を照射し、波の状態を観察した。切欠き部が白く輝く程、応力が大きくなったことを示している。ゆえに、どれぐらい明いか、なた白い部分の大きさはどれぐらいあるかで決まることになる。6.8の深い切り込みをもつ正方形板の実験にはなかなか有効のようであった。

## 文献

- (1) 福岡, 音弾性による応力解析, 機論, 49-440, A (1983), 403.
- (2) 福岡・戸田, 音弾性残留応力解析, 材料, 35-396 (1986), 961.
- (3) 小堀・岩清水, はめこみ円板の音弾性残留応力測定, 音弾性研究会, No. 7 (1991), 21.
- (4) 戸田・福岡, 斜角SH波および表面SH波による板の応力性研究会, No. 3 (1989), 24.
- (5) Burger, C. P., Testa, A. and Singh, A., Experimental Mechanics, April, 1982, 147-153.
- (6) Ying, C. F., Zhang, S. Y. and Shen, J. Z. J., Nondest. Eval. Vol. 4, No. 2, 1984, 65-73.
- (7) J. Z. Shen and C. F. Ying, Scattering Of a longitudinal pulse at Grazing Incidence by a crack of finite width in solid. Presented at the IEEE 1983 Ultrasonics Symposium, Atlanta, Ga.
- (8) G. Hall, ULTRASONICS. Ultrasonic wave visualization as a teaching aid in non-destructive testing, MARCH 1977.

# 非線形構造力学

前川佳徳(工学部)

人体変形の非線形構造力学的取り扱いと心地を評価できるバーチャルヒューマンへの応用

## 1. 「非線形構造力学」に関する研究経過

長期共同研究組織として、「非線形構造力学」に関する研究に取り組んできた経過をまず紹介したい。

平成3年度は「弾塑性／剛塑性有限要素法による鋼材の大変形シミュレーション」に主として取り組んだ。具体的には、クロスジョイントやベベルギアといった部品の冷間鍛造での、素材の接触大変形解析の試みである。材料非線形、幾何学的非線形、境界非線形を同時に扱う困難な解析であるが、陰解法により、リメッシュを繰り返しながら解を得ることができた。陽解法を採用しなかったのは、金型強度解析につなげるために、素材変形に伴う型との接触面での荷重分布を精度よく評価したいためであった。本研究では、陽解法と陰解法での特徴等、それらを選択する際の指針を得ることができた。

平成6、7年度は「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」という課題に取り組んだ。ここでは、超弾性体モデルによる熱可塑性樹脂版の真空・圧空成形過程シミュレーションを実務的に取り扱う手法を確立した。さらに、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始めた。人体の変形シミュレーションでは、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変形を解析するもので、材料定数を変えるだけで熱可塑性樹脂版での解析と同じ取り扱いができる。最初の取り組みは、ブラジャーによる女性のバストの変形解析で、その好適補整に適用することを狙いとしたりした。また、人体側が受ける応力状態等と心地を関係づけ、着け心地を評価することも試みた。

平成8年度は、研究課題を「人体変形の非線形構造力学的取り扱いとその応用」として、バストの変形、ウエスト部の変形等の研究を行った。ここで、解析には対象とする人体各部の材料特性値が必要で、その同定手法を確立するとともに、変形に伴う圧迫感の評価についての検討も行った。

平成10年度は、平成8年度の課題を継続して行い、臀部の椅子による変形をシミュレーションし、接触面(座面)での荷重分布を求め、それをを用いて座り心地を評価した。平成11年度は、座面での荷重分布のシミュレーション結果の妥当性を検証するため、圧力シートを用いた実験を実施し、シミュレーション結果の信頼性を検証した。

平成12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かけ、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、その結果から痛み評価を試みた。

平成13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」に集中して研究を進め、骨盤をモデル化したバーチャル臀部を開発した。

骨盤部は剛体とし、それ以外の臀部は均質な非線形弾性体(ムーニーモデル)としている。平成14年度は、さらに大腿部(剛体)のモデル化を行った。平成15年度には、「心地を評価できるバーチャルヒューマンの開発」というテーマで、これまでの人体変形の非線形構造力学的取り扱いをまとめることを行った。以下には、その「バーチャルヒューマン」の紹介と、とくに製品使用感の評価への応用を紹介する。

## 2. バーチャルヒューマンについて

バーチャルヒューマンとは、コンピュータ内に構築された仮想的な人間モデルのことであり、コンピュータ内のサイバースペース上で種々の動作や作業をさせ、その動作や作業の対象をバーチャルに事前検討することが行われている。検討内容は、対象製品の操作性であったり、作業場の配置であったりする。

これに対し、筆者が開発しているバーチャルヒューマンは、人体とある物体が接触した時の接触面での変形をシミュレーションでき、そのシミュレーション結果から、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したものである。このようなバーチャルヒューマンを用いれば、サイバース

ベース上に対象製品をモデル化し、それをバーチャルヒューマンに使用させることによって、その製品の使い心地を評価できる。

このような方法で製品の使用感を評価するようなことは、これまでに見られなかった。本バーチャルヒューマンは、製品の使用感を評価することにより、高付加価値製品の開発に寄与でき、かつ人体変形シミュレーション機能のみによって、医療・福祉分野に役立てることも可能である。

### 3 心地を評価できるバーチャルヒューマン

ある物の使用感というのは、それを使用する時の人間の姿勢、および使用する対象との接触面からの情報によって決定されることが多い。

図1は Jack と呼ばれる動作シミュレーション用のバーチャルヒューマンを椅子に着座させ、その姿勢を評価しており、着座姿勢によって椅子の使用感を評価しているとも言える。姿勢による評価はこのように、Jack のような市販されているバーチャルヒューマンによって行えるので、筆者は、対象物との接触面からの情報によって、使用感を評価できるバーチャルヒューマンの構築を試みることにした。

その仕掛けは、使用対象と人体との使用条件での接触変形シミュレーションを行い、得られた接触面での荷重分布やひずみ分布によって、心地や痛みを評価する。具体的に、シートの座り心地評価と、バッグの紐による腕の痛み評価を例にとって、その仕掛けを解説したい。



図1 Jack による姿勢評価の例

#### 3.1 座り心地を評価するバーチャル臀部

図2に、シートの座り心地を評価するバーチャルヒューマンの臀部モデルを示す。このモデルは、臀部形状内部に骨盤および大腿骨が定義され、骨部は剛体、臀部は均質な超弾性体（ゴムのようなもの）としてある。

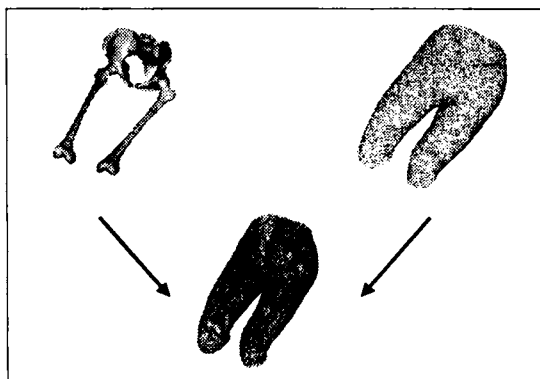


図2 臀部モデル

図3は、その臀部モデルを、たとえば自動車用シートに着座させたときの（対称性により、右側半分のみ）の変形シミュレーションを示している。この場合、もちろん自動車用シートのモデル化も必要で、その形状と、材料特性としてはウレタンシートの特性値を指定している。接触変形シミュレーションには、有限要素法を用い、臀部、シート共に変形する。

椅子等の座り心地評価においては、着座時の接触変形シミュレーション結果の、接触座面での荷重分布を用いて評価を行う。荷重分布と座り心地との相関関係は、あらかじめ被験者による実験によってデータベース化してある。したがって、バーチャルヒューマンの臀部によって着座シミュレーションを行えば、図4のように、バーチャルヒューマンがその座り心地を評価できるようになっている。

椅子等の設計においては、着座シミュレーション結果としての座面の荷重分布において、荷重が集中する部分の座面形状を変更したり、シート材の変更を行ったりして、バーチャル臀部による着座シミュレーションを繰り返すことにより、好適な使用感の椅子形状や材料を、実際に製造する前に決定できることになる。

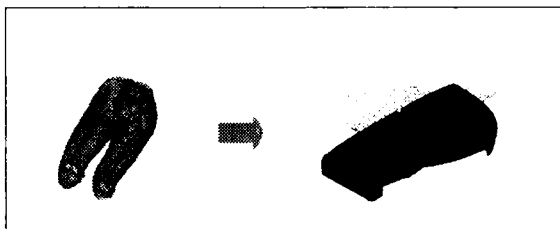


図3 臀部モデルによる自動車用シートの着座シミュレーション

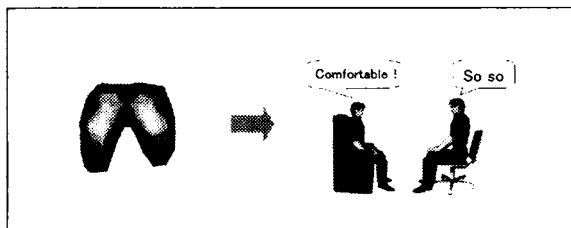


図4 座面の荷重分布結果による座り心地評価

### 3.2 痛みを評価するバーチャル腕部

図5に、バッグの紐による腕の痛み評価例を示す。バーチャルヒューマンの腕部モデルは、上記臀部モデルと同様に作成されている。図の右側は、より重いバッグを提げており、変形シミュレーションにおいて、接触面での変形量が大きくなっている。腕部の痛み評価においては、変形シミュレーション結果のひずみ値が、痛みと相関関係にある。

このようにバッグの紐による腕の痛みを評価できると、紐の形状を変更してシミュレーションを繰り返し、腕に与える痛みを軽減できるバッグの紐形状を、製造する前に決定できる。

なお、腕部モデルをアトミー・ベースド・モデル（解剖学的構造を基礎にしたモデル）としてモデル化を試みた例を、図6に示す。このモデルの方が、筆者のモデルよりも忠実にモデル化しているので、変形シミュレーション結果がよくなるように思われるかもしれない。しかし、各筋肉の形状を忠実にモデル化することは困難ではないが、その材料特性を求めることが困難で、それをいいかげんな値でシミュレーションしたのでは、結果的に信頼性の悪いシミュレーション結果しか得られないことになる。

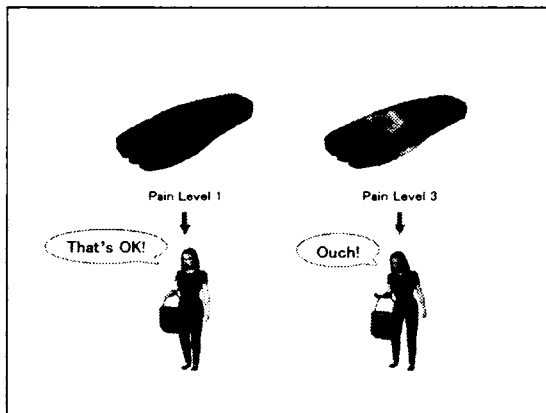


図5 バッグの紐による腕の痛み評価

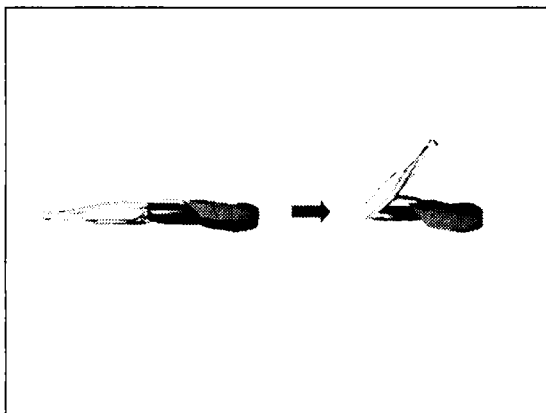


図6 腕部のアトミー・ベースド・モデルの例

### 3.3 どのような心地が評価可能か

心地というようなものには個人差があつて、普遍的に評価することは不可能ではないかということが、よく言われる。例として、図7に、腕部変形シミュレーション結果のひずみ値と、それにより生じる腕部の痛みレベルとの関係を、複数の被験者によって求めた結果を示す。

各痛みレベルは、以下のようにした。

痛みレベル1：痛みらしきものを感じ始める時。

痛みレベル2：耐えられるが明確に痛みを感じ始める時。

痛みレベル3：耐えられない痛みを感じ始める時。

図7は、上記痛みレベルに達した時の各被験者の腕部におけるひずみ値をプロットしたものであるが、複数の被験者間にはそのひずみ値にばらつきのあることがわかる。しかし、痛みレベル1、2、3の重なりは無く、荒い分け方ではあるが、被験者間のばらつきを考慮しても、上記のような痛みレベルの違いの評価は可能であることがわかる。

実際には、上記レベルを5段階評価としてデータを作成したのであるが、5段階では各段階の評価が重なりあうことになり、結果として3段階評価で行うことになった。このように、個人差を考慮すると、荒い分け方の評価しかできないということには留意しておかねばならない。

また、心地でも、椅子の座り心地のような臀部の「圧覚」によるものや、バッグの紐による痛みのような腕部の「痛覚」によるものは、接触面での物理的な量（荷重やひずみ等）と相関を持ち、個人差も少なく、取り扱いやすい。しかし、他人によって撫でられた時の心地などは、接触面での物理量との相関というよりも、誰が撫でたかというような心理的な事柄との相関が強く、そのような心地評価は困難となる。

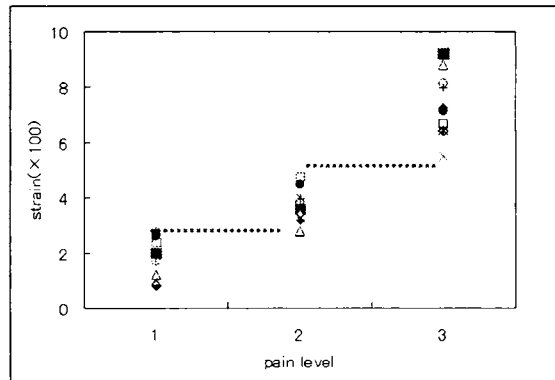


図7 腕部のひずみ値と痛みレベルの関係

## 4 心地を評価するバーチャルヒューマンの構築法

筆者が構築しているバーチャルヒューマンの仕掛けのイメージは理解いただけたと思うが、ここでは具体的に、どのように構築しているかを紹介する。

### 4.1 動作に伴う人体各部形状変化のデータベース

バーチャル腕部のモデルでも述べたように、解剖学・ベースド・モデルを採用するよりも、人体を均質な超弾性体で構成されているとし、その中に骨部を定義した簡易的モデルの方が実用的で、筆者が構築しているバーチャルヒューマンでは、そのようなモデルを採用している。ここで重要なのは、バーチャルヒューマンが動作すると、当然その人体外部形状は変化する。したがって、バーチャルヒューマンの接触変形シミュレーションには、動作中の任意の姿勢での精度のよい人体外部形状データが必要となる。



そこで筆者らは、動作に伴う人体外部形状の変化を提示できるデータベースを構築した。図8に、着座時の動作に伴う臀部形状を提示している例を示す。このデータベースは、被験者の着座動作での刻々の臀部外部形状を非接触3次元形状入力機で取り込み、間をモーフィング手法で補間して、連続動作の任意の姿勢での臀部形状を提示できるようにしたものである。

さらに、接触変形シミュレーション用モデルとしては、上記データに、動作に伴って変化した骨部の位置もモデル化されていなければならない。このようなモデルについては、人体各部ごとに、また代表的な動作（座る、歩く、横になるなど）ごとに作成し、データベース化している。

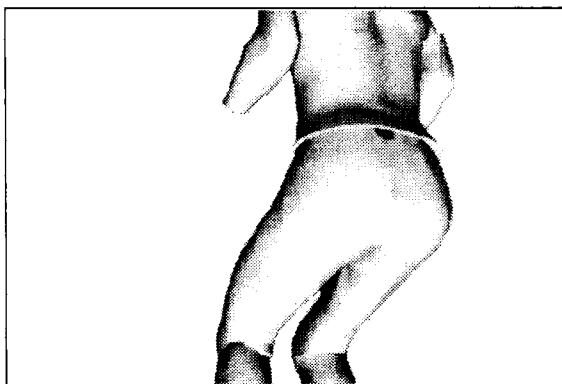


図8 動作に伴う人体外部形状の提示

#### 4.2 変形シミュレーションのための形状処理

人体形状取り込みなどは、非接触3次元形状入力機（ミノルタ製 VIVID700）を用いて行っているが、変形シミュレーション用の形状データにするためには、さらにいくつかの形状処理を行う必要がある。図9は、乳房形状の VIVID700 による取り込みを示したもので、いくつかの方向から取り込んだ形状データをマージして、全体形状が作成される。

この形状データは、点情報が多すぎるので、削除したり、形状の欠陥部分を修正したりして、さらにそれを閉空間化したものが、図10の左上に示すものである。これらの処理は、ダイキン工業が扱っている3次元CGソフトウェアである Soft Image を用いて行っている。

それを有限要素に分割したものが、左下に示すもので、要素分割は日本 MSC が扱っているプリ・プロセッサの MENTAT を用いて行っている。ここまでの形状処理の行われたものが、変形シミュレーション用として利用できるモデルである。

このようなモデル作成には、各ソフトウェアを扱え、かつデータの受け渡しに関するノウハウなどが必要となる。

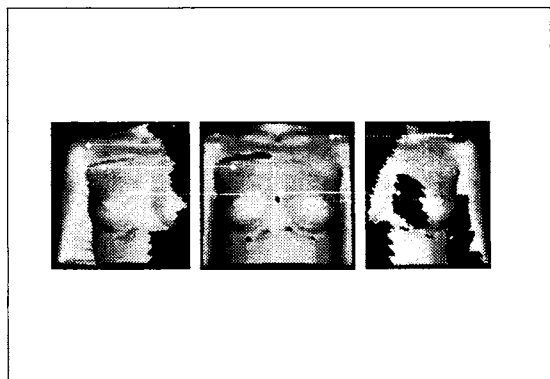


図9 人体形状の取り込み

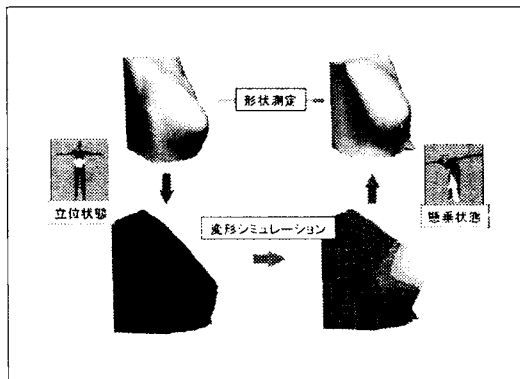


図10 変形シミュレーションと材料特性値の同定

## 4.2 変形シミュレーションのための材料特性の同定

人体の変形シミュレーションには、さらに対象の材料の特性値が必要となる。図 10 は、乳房の平均的材料特性値の同定方法を示したものである。

図に示すように、立位状態と懸垂状態での被験者の乳房形状を取り込む。立位状態の形状は、図の乳房の下方向に重力がかかっている結果であり、懸垂状態の形状は、図の乳房の前方向に重力がかかっている結果である。したがって、立位状態の要素分割したモデルから、下方向の重力を抜き、前方向に重力をかけるシミュレーションを行うと、その結果が懸垂状態の測定形状に一致しなければならない。そこで、乳房の材料特性値を変化させながら変形シミュレーションを繰り返し、懸垂状態でのシミュレーション結果が、測定形状結果に一致するようになれば、その時の材料特性値が乳房のものであると同定できることになる。図の右下の変形シミュレーション結果は、そのようにして測定形状結果とほぼ一致する結果として得られたもので、この時の材料特性値が被験者の乳房の平均的な材料特性値とする。

他の人体各部も同様に、ある変形を与えた前後の形状を実測し、その間の変形シミュレーション結果が実測結果と一致するように材料特性値を同定している。

## 5 今後の応用の考え方

これまでには、臀部モデルによる自動車用シートの座り心地評価、腕部モデルによるバッグの紐の痛み評価を例に示したが、同様の手法で、図 11 のような足部モデルによる靴底の評価、図 12 のような背部モデルによるベッドの評価なども可能である。ベッドについては、床ずれ防止などへの対策にも応用可能と考えている。図 13 は、介護ロボットが被介護者をどのように扱えばよいかを学習するのに、本バーチャルヒューマンを適用できることを示したものである。このように、本バーチャルヒューマンの応用範囲は広いと考えている。

さらに、本バーチャルヒューマンの人体変形シミュレーション機能のみを用いて、医療における手術シミュレーションや、義足・義手等の設計といった分野にも応用が可能である。

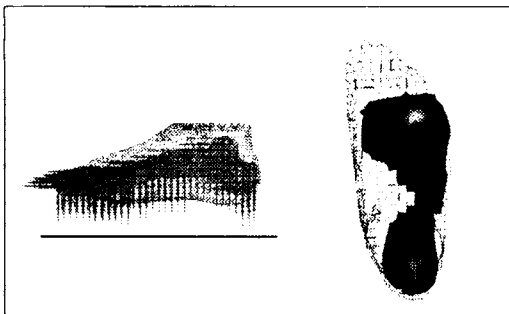


図 11 足部モデルによる靴底の評価

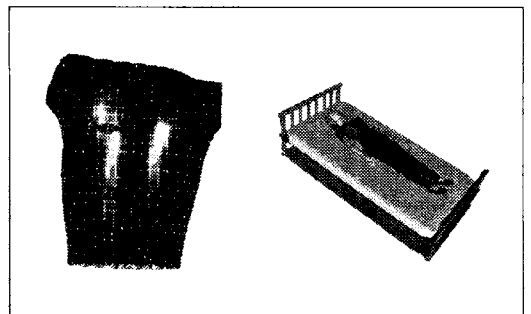


図 12 背部モデルによるベッドの評価

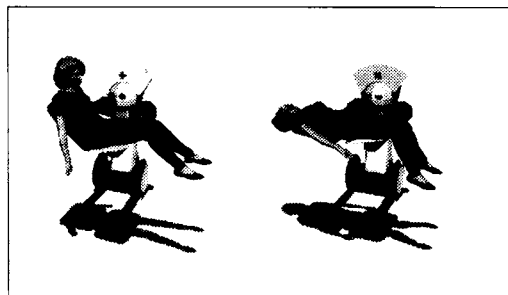


図 13 介護ロボットのティータンク