

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

線形とは例えば物体の特性で述べると、力（応力）と物体の変形とが1対1に対応することで、力の大きさに応じて変形が決められように、各瞬間に一方が与えられるともう一方が一意的に決まることさす。古典的な解析では現象に対して線形を仮定してその解を得て、現象を説明しているのが多い。しかしながら現実の問題は1対1の対応のみでは解決されない場合が全どである。先述した物体の変形で言えば、変形に与える因子（ファクター）として、温度、時間なども重要となる。さらにはこれら因子の高次（わずかな変化）の項を考慮した理論を使って初めて説明される現象も存在している。このように非線形を考慮した実験や理論的扱いは新しい科学の手法としてますます重要になっている。最近になって、科学技術用語として、カオス、フラクタル、ニューラルネット等の非線形に関連した用語が広く使われるようになってきている。従来は線形近似にもとづいて解析を中心として発達してきた科学技術手法が、計算機能力の向上と共に数値解析を中心とした解析方法へと移行してきたあらわれであり、これによってより現実的な非線形現象への解明へと向かっているとも考えられる。数値解析法を用いると、線形、非線形を問わずに基本方程式を数値的に解けば解を求めることが電算機では可能となり、またグラフ化によって現象の感覚的把握も容易になる。又さらに現象の扱うべき領域も拡大する。このことによって線形近似では現象の把握の出来ない領域まで拡大できるし、また事実このような拡大した領域の検討も必要性も増加していることが上げられる。

非線形構造力学研究グループは、研究分担員がそれぞれの研究分野において個別に非線形現象を取り上げ、現象の倫理的解析や実験的検証、実験に入り込む非線形現象の実態把握とその解釈などについて研究をおこなって来ている。13年度の各研究員の個別テーマにもとづく中間報告は以下のようである。

主任研究員楯列は従来から弾塑性ひずみ増分の理論を用いて応力、ひずみ解析をおこなって来た。この理論を実験的に検証するために、プレス加工によって板材を塑性変形させて、変形挙動の観察や破断、しわの発生について一連のデータをもとに調べてきた。13年度は昨年度に続いて板材のハット曲げの研究をさらに進めていた。ハット曲げの際に問題となる製品をダイスからはずすときの側壁部の曲線からのずれ、そのために設計どりの成形精度でなくなる点の改良について推し進めていた。13年度の研究成果をまとめる時期に病床に伏し治療、投薬の効果もなく、帰らぬ人になった（平成14年11月）。研究成果が十分煮詰まっていただけに大変残念である。

骨組み構造物の弾塑性安定問題の解析に取り組んでいる太田研究員は、一昨年、昨年と引き続いた“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みの全体崩壊”について実験的検討を加えた後、その数値解析をおこなった。この結果については論文として発表した。

超音波による測定をもとに、“切欠きガラス平板の超音波応力測定”をテーマにしているのは福井研究員である。平成13年度も引続いてガラスモデルに超音波を伝播させ、可視化装置を用いてその挙動を調べる実験を行った。モデルに使用したクラウンガラスとパイレックスガラスの伝播波形の違いの有無や、負荷状態で伝播する波形の差について検討した。またガラス試料のくぼみ部分の半径により、負荷の際の応力値が異なることを利用して、その部分を通過する音波の非線形的挙動について検討した。

前川研究員は“人体変形の非線形構造力学的取り扱いとその応用について”をテーマとしている。これまでに人体を超弾性体モデルとして人体と物との接触に伴う人体側の変形を種々のモデルによって検討している。13年度は特に“着座時の変形をシュミレーションできるバーチャル臀部”の開発に関して研究を進めた。骨盤を臀部内にモデル化し、シュミレーションと実験を平行して行い検討結果を示した。

構造物の大型化に伴って、材料に圧縮応力が作用する場合の弾塑性連成不安定現象の解明をテーマにしている森脇研究員は、箱型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て弾塑性有限要素法による解析、崩壊過程の直ひずみ、変形、応力状態などの詳細な検討をおこなってきた。13年度はこれまでの成果をさらに発展させて、これらの数値解析結果の収束性を考慮したモデルに対して、関連細長比と構成板の有効幅厚比の領域における崩壊時の極限耐荷力と崩壊モードの類型化の相関図を提案した。森脇研究員は今年度で最後であるが、未解明の部分が多いこの研究は次年度から工藤哲男氏（工学部土木工学科）が新しく分担研究員として加わり、引き継ぐ予定である。

超音波による材料評価の研究を担当する小堀研究員は各種の材料を超音波の伝播速度から評価することを継続している。固体中を伝播する音波は一見きれいな正弦的波形のように扱われているが、実際にはこれが崩れている。これが非線形現象によるものであり、固体中を伝播する音速を測定する時にはこの波形のひずみが問題になる。特に固体が金属ではなく、減衰や、散乱の大きい材料中を伝播するときには、その周波数も低周波側にシフトされる。今年度はアスファルトをモデルにしてその波形の観察と伝播速度について実験を行った結果を示した。

本研究組織はこのように非線形挙動をしめす大型構造物や人体を超弾性体とした材料、散乱や減衰の大きな材料に対して、幅広い検討を通してその有効な解析法や実験法・測定法を模索して実用的な成果を上げつつある。

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荷重を受ける多層多スパン鋼骨組の全体崩壊」

平成11、12年度に行った標記の実験を基に、数値解析研究を行った。Introduction, Conclusions and Publicationを以下に示す。

Introduction:

This paper presents the numerical study on waist induced sway deformation of two

pieces of experiment performed on four storied single bay symmetrical steel frame model subjected at the top of the frame to reversed cyclic lateral forced displacement, under symmetrical concentrated loads at both the heads of the 4th story columns and with vertical constant load at mid span of the 1st or 2nd story beam. One dimensional geometric and material non-linearity finite element program is developed for the analysis purpose.

The results of numerical study show that the waist induced sway frame is ultimately collapsed by the increased anti-symmetric sway component of deflections generated successively with the increased cycles of lateral displacement. The characteristic behaviors detected from the numerical analysis of 4-story frame models are like to the one detected experimentally in previous paper included as "Waist-induced Sway Collapse steel frame subjected to reversed cyclic lateral displacement".

Conclusions:

i) The frame undergoing waist induced sway deformation is ultimately collapsed by the increased anti-symmetric sway component. During the first few cycles of reversed cyclic lateral displacement, the symmetrical component of deformation is greater than the anti-symmetric component and then on the following cycles, the rate of increase of symmetrical component becomes nearly constant where as the rate of increase of anti-symmetric deformation component keeps in increasing until the frame gets collapsed.

ii) Parametric analysis carried out varying the column member section asymmetrically in the case of waist induced sway frame show that waist component, U_s and sway component, U_a relationship is asymmetrical to that of waist axis with cycles of lateral displacement for the loaded beam at intermediate story as well as for the case of loaded beam at the first story. This is due to the presence of large anti-symmetric component, U_a in the later frame where as it is very small in former case at its initial cycles of displacement.

Publication:

Shrestha Bimal, Ohta Osamu; Waist-induced sway deformation of steel frame subjected to reversed cyclic lateral displacement, Summaries of tech. Papers annual meeting of A. I. J. 2001, B-1, p351-352, 2001.

超音波による材料評価に関する研究 (アスファルト中の超音波伝播速度)

研究員：小堀修身（工学部）

協力者：大前達彦（工学部）

1. はじめに

コンクリートに対する非破壊試験法として従来から超音波パルスを利用した動的弾性係数の測定手法がよく知られている。また、近年コンクリートの非破壊検査の目的でも超音波は利用されるようになってきている。一方、アスファルトに対する超音波適用例の報告は少なく、コンクリートと類似した方法で弾性率やポアソン比を測定した例がある⁽¹⁾⁽²⁾。アスファルトはコンクリートに比べると剛性も低く粘性が大きい。また、温度によって性質が変わる⁽³⁾などの問題点が存在するため、超音波による測定も積極的に行われていないようである。

これらとは別に超音波の送受信に利用される探触子とレシーバー機能を持つ探傷器の組み合わせでは共振周波数付近で使用してこの近傍の受信情報を最大にしようという考え方で設計がなされている。したがって減衰や散乱の激しい材料に音波を入射させると、途中の散乱で周波数成分が低い音波になってしまうとき探触子がこのような波を受信しても受信感度がこの領域に対応していないと観察されない結果となってしまう。

このような問題を解決するために作られた超広帯域の装置（UCT12b。アイ・エス・エル製）を利用して実験を行った。実験室で作成したアスファルトに対して透過法、反射法により平均伝播速度を求め測定位置の違いによる音速のばらつきについて、また、アスファルト中のある深さに埋め込まれたパイプの非破壊検査への適用について検討した。

2. アスファルト供試体と音速測定装置

供試用の密粒度アスファルトコンクリートを実験室で製作した。マーシャル（Marshall）試験の後WT（Wheel Test）試験のローラーを使って圧縮したものである。使用した骨材の粒度は2.5～13mmの碎石と0.6～2.5mmの砂であり、比重はそれぞれ2.734及び2.581である。試料の総重量は6,682gでストレートアスファルト量は5.0%となっている。表1には供試材の諸元をまとめた。また後述実験の一例として、非破壊的な内部の介在物検査の目的で、試料中央に直径22mmの鉄パイプをはめ込んでおいた。Fig.1にはパイプ位置や試料サイズを示した。図中の記号1～15、31～45はパイプのない部分、16～30はパイプが埋め込まれている真上の測定位置を示す。実験装置UCT12b（Fig.2参照）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きている。実験には透過測定用として2MHz、20φの2探触子及び反射測定用として0.5MHz、40φの探触子を準備したが、今後の現場での実用的な使用（測定）法としては一探触子による反射法が中心となるのでここではその測定

結果を示す(透過法で測定したアスファルトのみの受信波形を Fig.3 に示しておいた)。実験に際してはアスファルトの温度による変化に留意したが特定の温度にコントロールせずに測定を行った。

表1 アスファルトの緒元

碎石;粒度 2.5~13mm	比重;2.73(実測)
砂;粒度 0.6~2.5mm	比重;2.58(実測)
アスファルト量;0.5%	
総重量;22.273Kg	

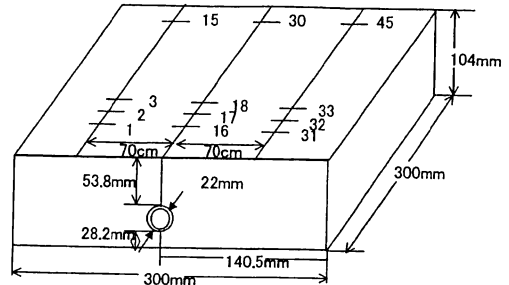


Fig.1 鉄パイプの埋め込んだ
アスファルト供試体の寸法

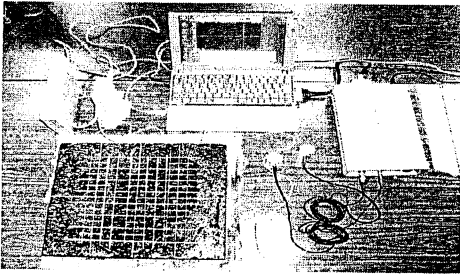


Fig.2 実験装置UCT12bと供試体

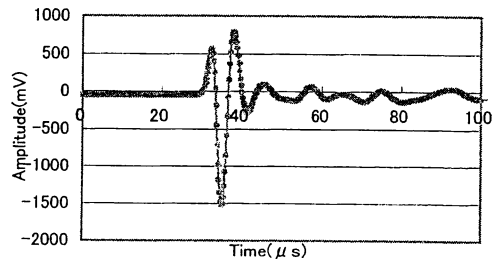


Fig.3 アスファルトのみの受信
波形(透過法)

3. 伝播速度

はじめに探触子を試料の測定位置31から45上において得られる受信エコーを測定した。結果の例を Fig.4 に示す。測定位置周囲でほんの僅か位置をずらしながらデータを多数取り込み、平均化したものである。0 付近に見られる複雑な波形はノイズであるが、64 μ s あたりで立ち上がる1つのピークが観察される。この測定を各位置で2回以上繰り返して得られる立ち上がり時間とその平均値を表2にまとめた。いずれも伝播経路がそれぞれ違って現れるこのピークは底面からの反射エコーと判断でき、碎石がランダムに配置されているにもかかわらず迂回しながら伝播する波の平均音速は厚さ 104mm から 3229.81m/s と判断される。次にパイプ埋め込み位置の真上にあたる16から30上の位置で測定を行った。受信波形の一例を Fig.5 に示す。これを先の Fig.4 と比較すると64 μ s 付近の他に33 μ s にもピークが観察される。後のピークは底面から、先のピークは埋め込んだパイプからの反射である(別の実験でこの位置がパイプからのエコーであることも確認してあるが・・・)。

表3には各測定位置での二つの立ち上がり時間と平均値を示した。底面からの立ち上がり時間はパイプのない場合とよく一致している。アスファルトの平均音速とパイプまでの

平均時間からパイプの位置を推定すると 52.9mm となる。実際の位置 53.8mm との違いはおよそ 0.9mm である。

アスファルトは外気の温度変化を受けやすいため、音速測定には、温度による音速の変化のデータも必要になる。実験室レベルでの温度による受信波形の違いを Fig. 6 に示す。今後の課題として重要な点と位置付けている。

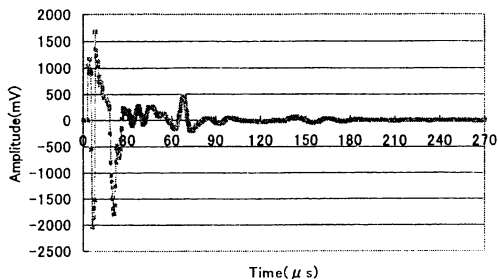


Fig. 4 底面からの反射エコー (パイプなし)

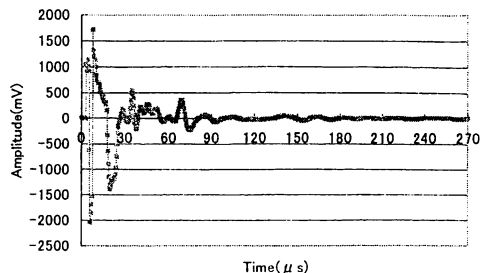


Fig. 5 パイプと底面からの反射エコー

表 2 伝播時間のまとめ (パイプなし)

位置	伝播時間 (μs)
31	64.4
33	64.0
35	64.4
37	64.8
39	64.4
平均	64.4

表 3 パイプ位置と底面までの時間のまとめ

位置	伝播時間 (μs)	伝播時間 (μs)
16	32.4	64.4
19	32.8	64.0
22	33.6	64.4
27	32.8	64.0
29	32.8	64.8
平均	32.8	64.3

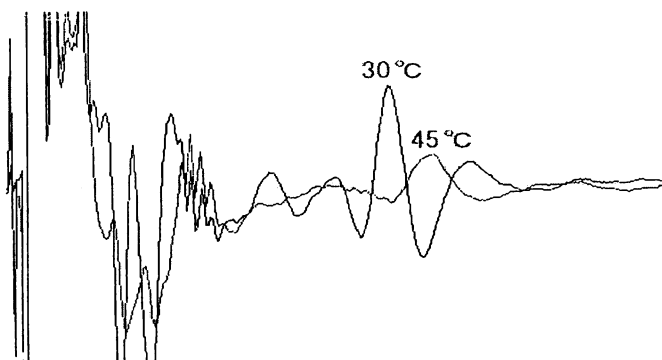


Fig. 6 アスファルトの温度による受信波形の違い

参考文献

- 1) 荻野、大前：繰り返し圧縮裁荷を受けたアスファルト混合物の圧縮強度とポアソン比、土木学会第 47 回年次学術講演会概要集、1992。
- 2) 荻野、大前：超音波法パルスによるアスファルト混合物の諸係数、土木学会第 51 回年次学術講演会概要集、1996。

3) 土木学会編：舗装工学、丸善、pp55～60、1995.

謝辞 この研究は実験協力者（工学部土木工学科）大前晴彦氏のほかに大学院研究生金英泰氏およびアイ・エス・エル宇田川義夫氏の協力の下に行われた。この結果は非破壊検査協会関西支部“平成 13 年度構造物の非破壊検査シンポジウム”において発表した（2001 年 11 月 28 日）。協力者に謝意を表します。

切欠き平板の非破壊応力測定

福井 毅（工学部）

この実験は厚板の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。ただし、超音波はガラス中を 1 秒間に 6km ほど進むので、その一瞬をとらえることになる。

今回の試験片は、前回のパイレックスガラスより少しねばさがあると言われている、少し青みがかったクラウンガラスを使用し、凸型の二個の試験片を製作した。二個の試験片はほとんど同じ寸であるが、くぼみ部の角の丸みが小さいもの（極率半径 $R=0.5\text{mm}$ ）と少し大きいもの（ $R=1\text{mm}$ ）を使用した。また、凸型の下の部分の高さは安定の好い様に、また音波が通り易い様に大きくしておき、下面で固定した。凸型の下部の左横から、超音波を通過させて、凸型の下部の右のくぼみ部付近の縞模様を、パソコンに取込み観察した。観察するときに、凸型の最上部の左横に荷重（0～2.2kN）の加えた。

その結果、次のようなことがわかった。

1. パイレックスガラスとクラウンガラスとでは荷重による超音波の波形の差はほとんどないようである。
2. 荷重が増加するにしたがい、凸型の下部の右のくぼみ部付近の縞模様は急激に明るくなった。絞りは 22 まで絞ったがそれでも、絞りきれなかった。
3. 明るさと同時にほぼ直線の超音波の波も見え、また境界に近い部分を見ているので、反射波も確認できた。ただ、荷重が変わっても波の位置は変わらなかった（金属なら変わると思われるが）。
4. 角の丸み R が少し大きくなると、荷重が同じでも急激に応力が小さく成る様で、試験片の明るさは相当暗くなった。

ただ、ガラスでは荷重を少しくらい変化させても、波の位置が変わらなかったのも、発表には至らなかった。

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た。

今年度は、「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た。「椅子による臀部の変形」の研究開発は平成 11 年度に取り組んだが、今年度は骨盤を臀部内にモデル化し、より精度の高いモデル（バーチャル臀部）として、実験を平行して行い、そのことの検証を行った。

骨盤のモデル化にあたっては、被験者のレントゲン撮影結果を用い、そのサイズと位置を確認して、その被験者の臀部形状モデル内に入れ込んでいる。また、被験者としては、男性の肥満体、瘦身体、普通体と、女性の普通体の 4 人を採用し、4 種類のモデルを作成した。

本研究でのモデルは、アトミーベースドモデルではなく、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としたものであるが、実験より得られた変形状態とよく一致するシミュレーション結果を得ており、採用したモデルの妥当性が検証された。とくに、実際の乗用車のシートに着座した時のシミュレーションを、シートも非線形弾性体として解析し、有用な結果を得ることができた。

本研究の成果は、当研究室の大学院生、中野剛君の修士論文（2001 年度）「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」にまとめられている。

なお、今年度は、背中の変形や足部の変形なども試み、次の展開への予備的考察も行っている。

中心圧縮材の連成不安定現象に関する研究

森脇良一（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（ λ ）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について研究を主として進め、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ている。

平成13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 (λ) と構成板の有効幅厚比 (R) の領域における、崩壊時の極限耐荷力の曲線と、これまで提案してきた判定手法を用いた判定基準による崩壊モードの類型化の相関図を提示出来た。また、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)を考慮した場合の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。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試みた。これらの内容については、まだ未解明の部分が多く含まれており、土木工学科の工藤哲男講師に研究を継続して頂き論文としてまとめる予定である。

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、関係各位には心から感謝の意を表します。