

平板型ラチス構造物の波動伝播特性に関する研究

An Experimental Research on Wave Propagation Behavior in Planar lattice Structures

劉 鵬*・西田明美*・川口健一*

Peng Liu, Akemi NISHIDA and Kenichi KAWAGUCHI

1. 研究の背景と目的

シェル、スペースフレーム、膜構造で代表される空間構造は、大規模化および軽量化の傾向にある。そのような空間構造において、地震や風等に対する動的構造挙動の調査と評価は重要な設計要因となっている。固有振動数や固有振動モードなどの振動特性についてはこれまでも多くの研究・調査が行われ、その成果が報告されている。一方、構造物の波動伝播現象は振動現象と比較して、過渡的、局所的であり、これまで耐震工学の分野ではあまり問題にされてこなかった。しかしながら、1995年の兵庫県南部地震において、これまで経験したことのないような衝撃的地震力によって構造物が破壊する現象を目の当たりにし、その概念は変わりつつある。大スパン構造においても内部の大型懸垂物の応答が屋根部分に衝撃的な力を与えたことが報告されている。また、大スパン構造の損傷同定などに波動現象を応用することも考えられる。

棒や平板、円筒シェルなどの連続体の構造要素の波動伝播特性については、弾性波動論を利用して古くから多くの研究がなされている。一方、ラチス構造物の波動伝播問題を扱った文献は、宇宙工学の分野に多く見られる。また、実験という観点から既往の文献をみると、部材単位の棒や梁、平板等の衝撃実験は多くみられる。また、多部材で構成されるラチス構造物の振動実験はいくつか報告されているが³⁾、波動伝播に着目した研究は見当たらないようである。

本論文の目的は、平板型ラチス構造物の波動実験を通して多部材からなる構造物の波動伝播特性を調査し、ラチス構造物の動特性を調査すること、ならびに連続体との比較を行うことにある。前半では、平板型ラチス構造物の部材と固定境界部との関係を調べるために行った片持ち梁による予備実験について示す。後半では、部材配置密度の異なる3種類の平板型ラチス構造物と1連続体平板に対して行った波動伝播実験について述べる。

*東京大学生産技術研究所 人間・社会大部門

2. 予備実験

端部の固定度の異なる3種類の片持ち梁に対してインパクトハンマーによる打撃実験を行い、平板型ラチス構造物の試験体境界部の固定方法を検討するための基礎資料とした。

2.1 実験方法

2.1.1 実験計測システム

図1に実験計測システムを示す。入力インパクトハンマー(PCB社: GK 291 C 01)による横衝撃とし、応答の計測には超小型加速計(PCB社: 352 B 22)、および、ひずみゲージ(共和電業: KFP-2-120-C 1-65)を用いた。インパクトハンマーの打撃部分のチップはプラスチックチップを用いた。本実験に用いたインパクトハンマーおよび加速度計の公称有効周波数領域は8 kHz以下である。ひずみゲージ収録の遮断振動数は1 kHzとした。データ収録時間刻みは2 μ s、収録データ振動数は50000、収録時間は0.1 secである。なお、実験時の室温は25°Cであった。また、比較のため、同試験体で静的載荷実験も行った。

2.1.2 試験体

実験に用いた3つの片持ち梁試験体の形状および寸法を図2に示す。試験体材料は全てアクリルを使用し、固定部層間の接着にはアクリライト(アクリル専用接着剤)を用

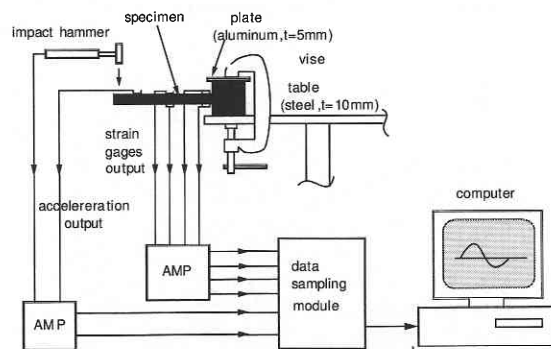


図1 予備実験の実験システム

研 究 速 報

いた。アクリルの材料諸元を表1に示す。質量密度は公称値、ヤング係数は実験値¹⁾である。データ計測位置を図3に示す。

2.2 実験結果

各試験体についてそれぞれ数回打撃を行い、そのうちそれぞれ4回の打撃結果についてデータの収録を行った。Type 3のO点の入力加速度、C点の応答加速度、A、B点のモーメントの時刻歴応答を図5に示す。

(1)入力に関する考察 図5(a)より、入力加速度時刻歴の初期部分に高周波数成分が確認できる。これは、インパクトハンマーが部材と接触中に波動が部材内を伝播し、応答として現れているためと考えられる。ハンマーが部材と接触してい

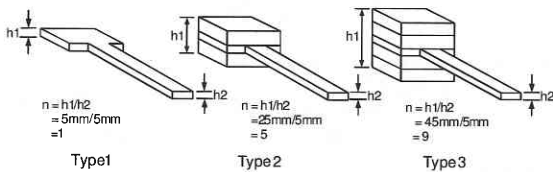


図2 片持ち梁試験体

表1 アクリルの材料諸元

ヤング係数 E (kg/cm ²)	質量密度 ρ (kg/cm ³)
Es ₁ =3.64 × 10 ⁴ /Es ₂ =3.60 × 10 ⁴ /Ed=3.36 × 10 ⁴	1.19 × 10 ⁻³

Es₁ : 引張試験値²⁾, Es₂ : 静的実験値, Ed : 動の実験値

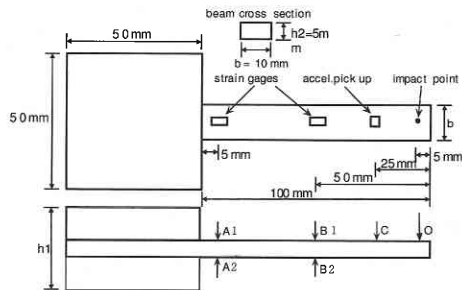


図3 データ計測位置

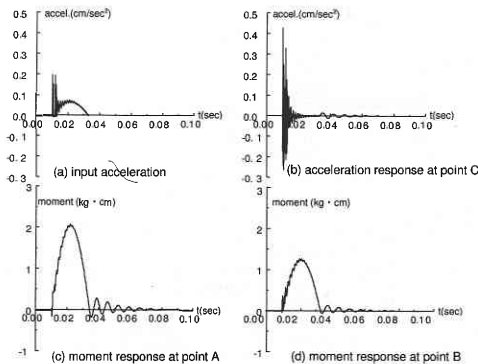


図5 Type 3の実験結果

る部分は、図中において正弦半波の応答波形をしている。(2)入力加速度とC点における応答加速度 図5(a), (b)より、この2つの加速度は、打撃時に加えられたと思われる正弦半波の形状部分をとり除けばよく似ていることがわかる。また、入力加速度がゼロとなった時刻以降、梁は自由振動している様子がわかる。(3)固定度に関する考察 A点のモーメントと入力加速度間の伝達関数を各Typeについて求め、図6に示す。固定境界部の層が厚くなるにつれ卓越振動数が高くなっているが、その値はそれほどかわらないことがわかる。万力による固定度が高いため、3つのTypeの層の厚さの違いが明確に現れなかったと予想される。比較のため、おもりによる静的実験も行い、同様の結果を得ている。

2.3 波動理論による境界の固定度評価

ここで、不連続面における波の反射と透過を考える(図7)。断面一様な棒Iをx軸の正方向に進む波が不連続面Oに到達すると、その一部は反射し、一部は不連続面を通過して棒IIの中に伝わっていく。2つの部材I、IIにおけるz方向変位 \hat{W}_1, \hat{W}_2 を、それぞれ次式のように仮定する。

$$\hat{W}_1 = C_i + C_r = Ae^{-i\beta_1 x} + Ce^{i\beta_1 x} + De^{\beta_1 x} \quad (1)$$

$$\hat{W}_2 = C_t = \bar{A}e^{-i\beta_2 x} + \bar{B}e^{-\beta_2 x} \quad (2)$$

ここに、 $\beta_1 = \sqrt{\omega(\rho A_1 / EI_1)^{1/4}}$, $\beta_2 = \sqrt{\omega(\rho A_2 / EI_2)^{1/4}}$ 。記号 \wedge はフーリエ変換されたことを意味する。不連続面 $x=0$ における力の釣合いと変位の連続条件を用いて、係数 C, D, \bar{A}, \bar{B} を求めることができる。実験に用いた片持ち梁モデルの梁部分と固定境界部分を2つの部材とみなし、係数 C, D, \bar{A}, \bar{B} を板厚比 n の関数として表す。得られた各係数を A に対する比として表し、図8に図示する。 n の増加につれ、 \bar{A}, \bar{B} は0に漸近し、 C は1に、 D は $\sqrt{2}$ に漸近している。 n の値が10倍程度になると、ほぼ固定境界とみなせることがわかる。

2.4 予備実験のまとめ

各実験の結果は、本片持ち梁試験体の場合、固定部分の厚さはその実験結果にさほど影響を与えないことを示している。これは、固定部分を万力により直接固定しているためと思われる。一方、波動理論より導かれた理論解は、試験体厚の10倍程度以上であればほぼ固定境界とみなせることを示している。

3. 平板型ラチス構造物と連続体平板の打撃実験

3.1 実験計測システム

本実験における実験計測システムを図9に示す。予備実験の計測システムとほぼ同じであるが、ひずみゲージによる計

表2 固有振動数 (Hz)

Type 1	Type 2	Type 3	予測値
136.18	137.40	144.37	$f_d = 134.4 / f_{s_2} = 139.12$

f_d : Edによる計算値, f_{s_2} : Es₂による計算値

測系は用いなかった。応答の計測は2つの超小型加速度計を用いた。データ収録時間刻みは2 μ s, 収録データ数は20000, 収録時間は0.04 secである。なお、実験時の室温は22~25°Cで、大きな変動はなかった。

3.2 試験体

実験に用いた円板型試験体は3種類の平板型ラチス構造試験体(部材の少ない順に, Model 1, Model 2, Model 3)と1つの連続体平板試験体(Model 4)である。各試験体は3 mm厚の亚克力板の切り抜き加工により作製した(写真1)。ラチス部材の断面は全て同一であり、幅 b は6 mmである。4種類の試験体の直径 R は1200 mmで共通、ラチス構造試験体のラチス部分の直径は1000 mm, 境界部の幅 B は100 mmである。インパクトハンマーによる打撃点節点1(中心点), 加速度計の計測位置 AC 1, AC 2点を図10に示す。AC 1点は節点1から100 mm, AC 2点は200 mmの位置とした。

3.3 実験の結果と考察

以下簡単のため、平板型ラチス構造試験体のことをラチ

ス平板とよぶことにする。

3.3.1 入力波

(1) 反射波の影響 各試験体の中心点(節点1)の入力波形を図11(a), 12(a), 13(a), 14(a)に示す。初期部分(約4000~4500 μ s間)では主としてハンマーの入力が測定されているが、試験体内を伝播している波が境界部(あるいは不連続部)で反射し、ハンマーと試験体が接触中に打撃点に戻り、時刻4500 μ s以降は主として打撃点の応答が現れている。打撃点では面外上下方向の応答が存在しているが、ハンマーの測定性能により正值のみが収録されている。特に連続体平板 Model 4の場合(図14 a), 反射波による打撃点の応答はハンマーを介して再び試験体に作用し、見掛け上さらに3つのパルスを生じている。図14(b), (c)に示すように、応答加速度波形はその3つのパルスに対応して乱れが生じている。ラチス平板の場合、この現象ははっきりとは見られなかった。

(2) 継続時間 Model 1, Model 2の場合、入力波の継続時間が Model 3, Model 4より長い。これは Model 1, Model 2の部材密度が小さいために剛性が低くなり、ハンマーと試験

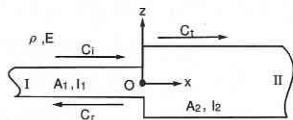


図7 不連続面における波の反射と透過

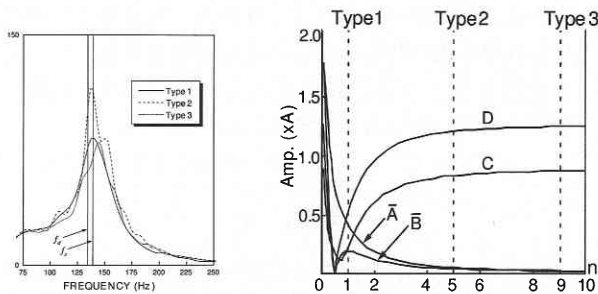


図6 A点における伝達関数

図8 反射率(C, D)と透過率(A, B)

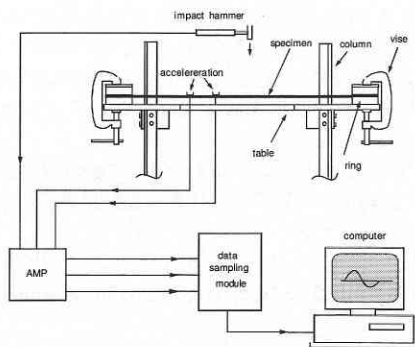


図9 実験計測システム

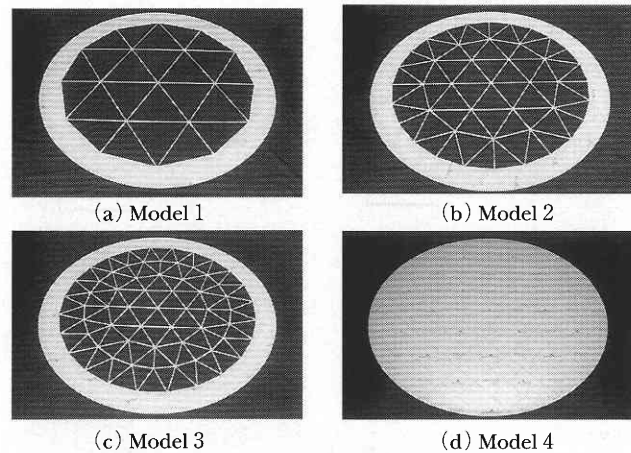


写真1 平板型ラチス構造試験体

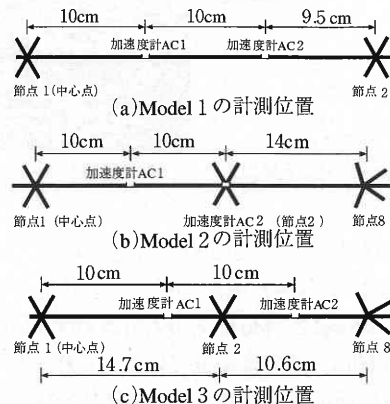


図10 平板型ラチス構造試験体の計測位置

研 究 速 報

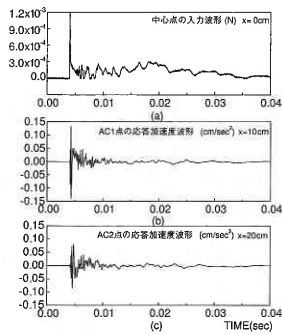


図 11 Model 1 の実験結果

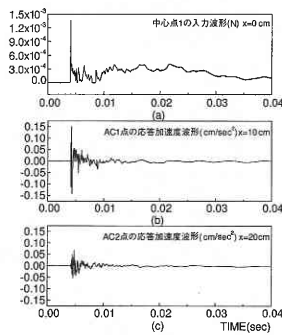


図 12 Model 2 の実験結果

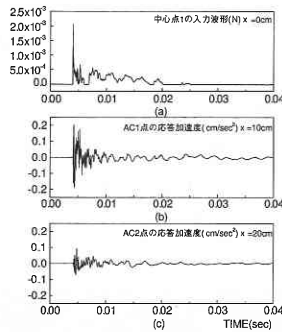


図 13 Model 3 の実験結果

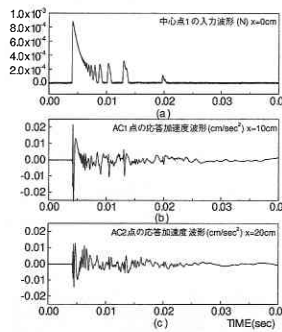


図 14 Model 4 の実験結果

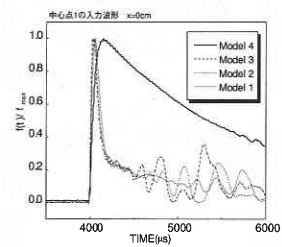


図 15 中心点 1 の入力波形

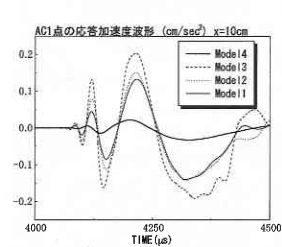


図 16 AC 1 点の応答加速度

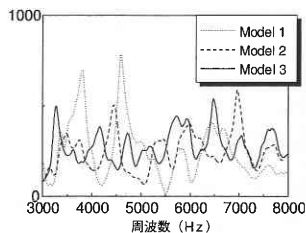


図 17 AC 1 点の伝達関数

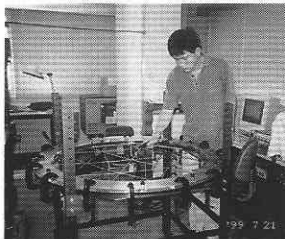


写真 2 実験風景

体の接触時間が長くなったためと考えられる。
 (3) 波形 図 15 は各入力波形をピーク値で割ったものである。Model 1, Model 2, Model 3 の入力波形は反射波が到達する時刻 (約 4400 μ s) までよく似ている。これら 3 つのラチス平板の中心点の局部剛性は等しく、連続体平板の中心点の局部剛性と異なるため、応答にその違いが現れている。

3.3.2 応答加速度

各 Model の AC 1 点の応答加速度を図 16 に、伝達関数を図 17 に示す。(1) 位相 図 16 より、Model 1, Model 2, Model 3 の振幅の大きさは入力によって異なるが、位相はほぼ同じである。これは、部材内の波の伝播速度が同じであるためと考えられる。本試験体の場合、平板の曲げ波の伝播速度はラチス部材の曲げ波の伝播速度より速い。そのため、Model 4 の位相は他の 3 つの Model と比較して速くなっていると考えられる。(2) 距離減衰 Model 1 と Model 4 の入力のピーク値はほぼ同じであるが、AC 1 点の加速度応答をみると、Model 4 の振幅の大きさは Model 1 の振幅よりかなり小さい。曲げ波の分散関係において、波の振幅と距離 x との関係は平板の場合には近似的に $1/x$ 、梁の場合には近似的に $1/\sqrt{x}$ であり、対応する差違が実験結果より確認できる。(3) 周波数特性 図 17 より、図中のピークの数 Model 3 が最も多くなっている。これは、ラチス平板を構成する部材数が多くなるためと考えられる。

4. 結 論

3 種類の平板型ラチス構造試験体と 1 つの連続体平板に対してインパクトハンマーによる波動伝播実験を行った。実験結果より、以下の知見を得た。

- (1) 波動伝播特性は局部剛性に大きく依存していることが確認された。
- (2) 位相と距離減衰の特性より、ラチス平板は梁の、連続体平板は平板の特性を示すことが確認された。
- (3) 周波数特性として、部材数の多い Model ほど卓越振動数の個数が多いことを確認した。

(2000 年 3 月 29 日受理)

参 考 文 献

- 1) 西田明美, 劉鵬, 川口健一 (1999): 単層ラチス構造物の波動伝播に関する基礎的研究 その 1: インパクトハンマーによる片持ち梁の打撃実験, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 46 B, pp. 175-179.
- 2) 小田憲史 (1994): 大スパン軽量構造の幾何学的非線形問題の基礎的研究と構造設計への応用, 博士論文, 東京大学.
- 3) 山田聖志 (1995): 屋根型ラチスシェル模型の振動実験, 機械力学・計測制御講演論文集, 日本機械学会, Vol. A, pp. 459-462.
- 4) 西田明美 (1993): 大空間構造物の波動伝播特性に関する研究—連続系と離散系における波動伝播特性の調査—, 博士論文, 東京大学.
- 5) 長松昭男 (1993): モード解析入門, コロナ社.
- 6) J.F. Doyle (1989): Wave Propagation in Structures, Springer-Verlag.