

衝撃引張負荷を与えた中間層を持つ不均質材の応力特性

塚本光夫・中村昇二郎*

Stress Characteristics of Heterogeneous Material with Interlayer Subjected to Impact Tensile Load

Mitsuo TSUKAMOTO and Shojirou NAKAMURA*

(Received September 1, 1999)

The stress characteristics of heterogeneous material with an interlayer, whose Young's modulus differed from the base material and which was subjected to an initial velocity condition, was obtained by FE analysis. The stress propagation behavior and the effect of interlayer width on it for heterogeneous materials was made clear: material with a soft interlayer whose Young's modulus is smaller than the base material, and material with a hard interlayer whose Young's modulus is larger than the base material. The base material of higher Young's modulus, in material with an interlayer of small width, restricts the deformation of a soft interlayer. Consequently, the stress value in a soft interlayer is almost the same as the base material because of the high gross Young's modulus of the interlayer. The stress value in a hard interlayer, in a small interlayer width, is smaller than that in a large interlayer width because the stress wave passes through the interlayer before the stress value increases. The stress value in a hard interlayer of large width, on the other hand, grows because the time required for the stress wave to pass through the interlayer is sufficient.

Key words : interlayer, heterogeneous material, impact load, Young's modulus, FEM

1. 緒 言

一般に静的試験と呼ばれる試験手法は、負荷の増加速度が試験片内の応力速度よりも著しく遅い場合に相当し、試験開始から終了までの時間は負荷投与位置から投入された応力波が試験片のもう一方の負荷投与位置あるいは支持位置に到達する時間よりも著しく遅くなり、一様断面の試験片では時間に関係なく全断面で一様な応力分布になる。これに対し、衝撃試験は負荷投与開始から終了までの時間が極めて短いため、応力波の伝播が問題となり、たとえ一様断面の試験片でも応力分布は一様にはならない¹⁾³⁾。実際の構造部材は一様断面でない場合も多く、このような幾何学的形状が応力の分布形態に及ぼす影響も大きい。このような形状による応力の複雑さもさることながら、試験片の内部に溶接部等の材質的に不均質が存在する場合にも、応力波の伝播挙動は複雑になり⁴⁾、特に、異なる材質の界面近傍での応力波の挙動は材質的な影響と不均質であることの影響が重なり合って、より複雑な挙動をすることが考えられる。

そこで本研究では、中央に母材と異なる機械的性質の中間層を持つ不均質部材の端部に動的負荷を与えたとき、不均質部の機械的性質と幾何学的寸法が応力伝播特性にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的とする。この目的を達成するため、ヤング率が母材とは異なる材料が中央に存

* 熊本市立桜山中学校

在する不均質材をモデルとして有限要素法を用いて数値解析を実施し、応力の伝播挙動を求めた。

2. 解析モデルと解析条件

2.1 解析モデル

本研究では、Fig.1に示すように、ヤング率が母材（材料1）と異なる材（材料2）を中間層に持つ板材の長手方向に引張の初速度条件を与えるモデルを設定した。材料1と材料2の接合界面は剛に接合されており、変位の連続条件を満足するものとする。また、材料1および材料2はそれぞれ等方均質な材料とし、材料1と材料2の界面近傍の熱影響部や界面遷移層を考慮しないものとする。部材の幅を D 、長さを L 、厚さを B 、不均質部の寸法を H とし、端部に与える初速度を V_0 とする。要素分割は全て板厚1mmの四節点四角形要素を用い、2次元弾性平面応力問題として、陽解法を用いて有限要素解析を実施した。

2.2 解析条件

解析条件をTable 1に示す。材料1は鋼の材料定数を参考にして設定し、材料1と材料2のポアソン比 ν と質量密度 ρ は同一として、ヤング率 E を変化させる。材料定数のひずみ速度依存性はなく、一定とする。また、運動エネルギーや変形エネルギーの熱エネルギーへの変換はないものとする。

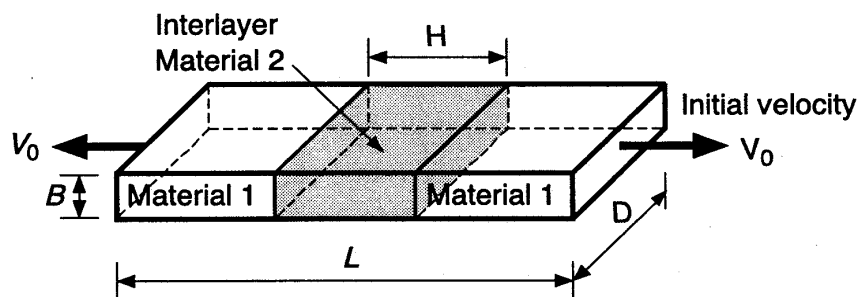


Fig.1 Analysis model

Table 1 Analysis condition

No.	L (mm)	D (mm)	B (mm)	H (mm)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	n_1	n_2	r_1 (kg/mm ³)	r_2 (kg/mm ³)	V_0 (m/s)
1	200	10	1	10	200	2	0.3	0.3	8×10^{-10}	8×10^{-10}	15
2	↑	↑	↑	80	↑	2	↑	↑	↑	↑	↑
3	↑	↑	↑	10	↑	20000	↑	↑	↑	↑	↑
4	↑	↑	↑	80	↑	20000	↑	↑	↑	↑	↑

異材界面部周辺では入力波、透過波、反射波の3つが交錯するため、材料1と材料2のヤング率に100倍の差をつけ、応力分布に大きな差を生じさせて、応力伝播の様子を容易に把握できるようにした。本研究では、ヤング率2GPaの材料を軟質材料、20000GPaの材料を硬質材料と呼ぶ。 v_1 と v_2 はそれぞれ材料1と材料2のポアソン比、 ρ_1 と ρ_2 はそれぞれ材料1と材料2の質量密度、 V_0 は部材の両端に与える初速度を示す。

中間層の幅 H を変化させ、部材の幅 D 、長さ L 、厚さ B は一定とする。本研究では、No.1, 2のように軟質材料を中間層とする板材を軟質中間層を持つ部材と呼び、No.3, 4のように硬質材料を中間層とする板材を硬質中間層を持つ部材と呼ぶことにする。

本研究では、部材の両端から入力された応力波が中間層を透過し終わる段階までに注目した。

3. 軟質中間層を持つ部材の応力伝播

中間層の幅 $H=80\text{mm}$ の軟質中間層を持つ部材の時間経過に伴う応力分布変化をFig.2に示す。ここで、時間 t は部材端部に初速度が入力されてからの時間を表す。

Fig.2(a)は入力された応力波が部材の中央に向かって伝播している様子を示し、 $t=0.800\times 10^{-5}\text{s}$ の応力分布曲線は動的負荷によって部材の両端部に入力された応力波の波形を表す。その後 $t=0.960\times 10^{-5}\text{s}$ では、応力波は部材の中央に向かって伝播する。引張応力波の後方に存在する圧縮応力波は部材の両端部の振動により発生した応力波である。

Fig.2(b)は引張応力波が中間層と母材との接合界面に到達する直前、直後の応力分布の変化を示す。 $t=1.200\times 10^{-5}\text{s}$ では引張応力波が中間層に到達する。この引張応力波の応力値は約150MPaである。その後、 $t=1.440\times 10^{-5}\text{s}$ では、引張の応力波が中間層の異材接合界面で反射、透過する。反射波の最大値は約-150MPaで、部材両端から伝播してきた引張応力波の最大値の符号が反転したものとほぼ同じ値になる。一方、接合界面を透過した引張応力波の大きさは中間層のヤング率の小ささのために急激に減少し、中間層内ではほぼ0になる。

Fig.2(c)は引張応力波が中間層を通過し、もう一方の接合界面を通過する直前、直後の応力分布の変化を示す。 $t=1.680\times 10^{-5}\text{s}$ では、接合界面で反射した圧縮応力波がさらに大きな圧縮応力波となって逆方向に伝播する。その後 $t=1.920\times 10^{-5}\text{s}$ では、中間層内に透過した両端からの応力波が部材中央ですれ違い、もう一方の接合界面を透過する。その大きさは軟質中間層から母材へ透過するため大きくなる。

Fig.2(d)は引張応力波がもう一方の接合界面を通過した直後の応力分布の変化を表している。接合界面で反射した圧縮応力波は逆方向に向かって伝播し、その後、中間層内に透過した両端からの引張応力波が部材中央ですれ違い、もう一方の接合界面を通過する。中間層内ではほぼ0であったが、軟質中間層から母材に伝播したため、値は大きくなる。その値は約100MPaで、通過する前の約150MPaよりも小さい。

軟質中間層を持つ部材の応力伝播の概略図をFig.3に示す。部材内を伝播してきた引張応力波が中間層へ伝播するとき、ヤング率の大きな材料から小さな材料への伝播であるため、中間層の接合界面が自由端に近いふるまいをし、圧縮の応力波が逆方向に反射する。中間層内に透過した応力波は急激に減少し、部材中央ですれ違った後、もう一方の接合界面を透過する。

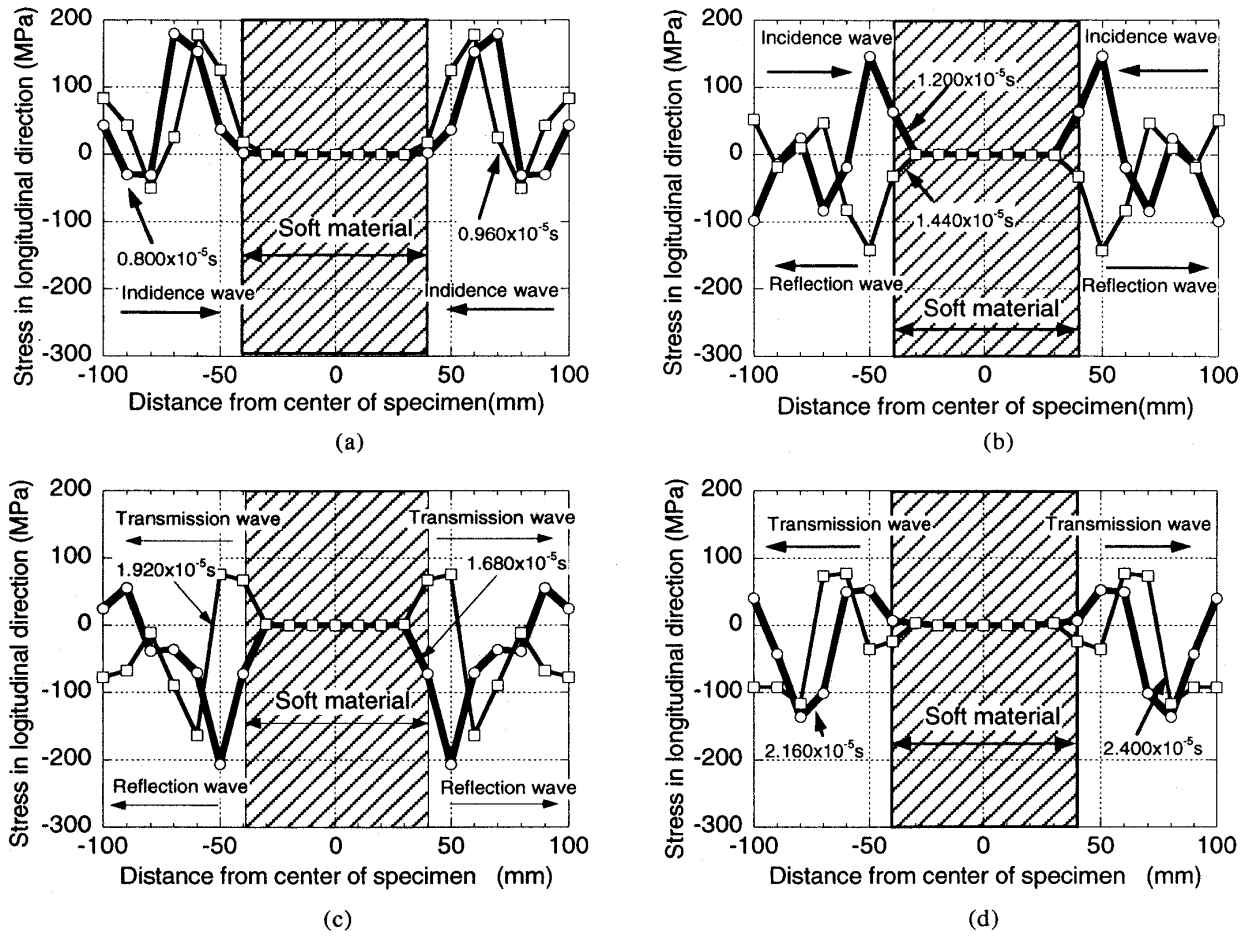


Fig. 2 Stress distribution for heterogeneous plate with soft interlayer

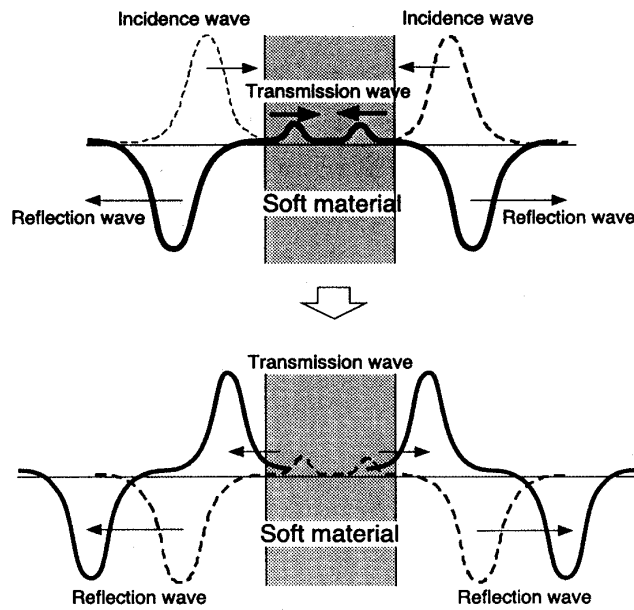


Fig. 3 Stress distributions of heterogeneous palte with soft interlayer

4. 硬質中間層を持つ部材の応力伝播

中間層の幅 $H=80\text{mm}$ の硬質中間層を持つ部材の時間経過に伴う応力分布変化を Fig.4 に示す。

Fig.4(a) は入力された引張応力波が部材の中央に向かって伝播している様子を示したものである。 $t=0.800\times 10^{-5}\text{s}$ の応力波形は入力波形を表す。その後 $t=0.960\times 10^{-5}\text{s}$ では、応力波は部材の中央に向かって伝播する。その最大値は約 200MPa である。

Fig.4(b) は引張応力波が接合界面に到達する直前、直後の応力分布の変化を示す。部材内を伝播してきた引張応力波は中間層内で衝突し、一つの波形を形成する。母材からヤング率の大きい硬質中間層へ伝播したため、応力値は急激に大きくなり、中間層内では約 300MPa になる。

Fig.4(c) は両端からの引張応力波が部材中央で衝突した直後の応力分布の変化を表している。 $t=1.320\times 10^{-5}\text{s}$ では応力値は約 400MPa まで大きくなり、その後 $t=1.440\times 10^{-5}\text{s}$ では、約 350MPa まで減少する。

Fig.4(d) は応力波がもう一方の接合界面を通過した直後の応力分布を表している。 $t=1.560\times 10^{-5}\text{s}$ では、引張応力波がもう一方の接合界面を透過して、ヤング率の小さな母材に伝播するため、応力値は減少して約 120MPa になる。その後 $t=1.680\times 10^{-5}\text{s}$ では、接合界面を透過した引張応力波の応力値が大きくなり、約 200MPa になる。中間層から母材へ引張応力波が伝播するとき、接合界面で反射が生じるが、ヤング率の大きな材料から小さな材料への伝播であるため、中間層の異材接合界面が自由端に近いふるまいをし、中間層内に約 -100MPa の圧縮波として反射する。

硬質中間層を持つ部材の応力伝播の概略図を Fig.5 に示す。部材の両端から伝播してきた引張応力波が中間層の界面を透過し、その値は増加する。その後、中間層内で一つの波形を成し、二つの引張応力波に分かれ、もう一方の異材接合界面を透過する。その際、中間層の異材接合界面が自由端に近いふるまいを示し、圧縮波が部材の中央に向かって反射する。

5. 中間層幅の影響

Fig.6 は応力分布に及ぼす中間層幅 H の影響を表したものである。

Fig.6(a) は中間層で最も応力値が大きくなる時間での軟質中間層をもつ部材の中間層幅 $H=10\text{mm}$ と $H=80\text{mm}$ の応力分布を比較したもので、 $H=80\text{mm}$ ではほぼ 0 であるにもかかわらず、 $H=10\text{mm}$ では約 50MPa もの高い値を示す。軟質中間層をもつ部材の場合、Fig.7 に示すように中間層幅が大きいときには、応力波が透過すると中間層が十分な変形をするため応力値は小さくなる。しかし、中間層幅が小さいときには、板幅方向の変形がヤング率の高い母材に拘束されるためほとんど変形ができなくなる。したがって、中間層の見かけ上のヤング率が大きくなり応力値は大きくなる。

Fig.6(b) は中間層で最も応力値が大きくなる時間での硬質中間層をもつ部材の中間層幅 $H=10\text{mm}$ と $H=80\text{mm}$ の時の応力分布を比較したもので、 $H=80\text{mm}$ は 400MPa 以上の値であるのに対して、 $H=10\text{mm}$ の応力値は約 350MPa であり、 $H=80\text{mm}$ に比べ小さくなっている。中間層幅が大きいほど、引張応力波が中間層内を通過する時間が長くなるため、応力値は増加する。一方、中間層幅が小さいと、応力が増加する時間が少ないため、応力値は増加しきれず、小さくなる。

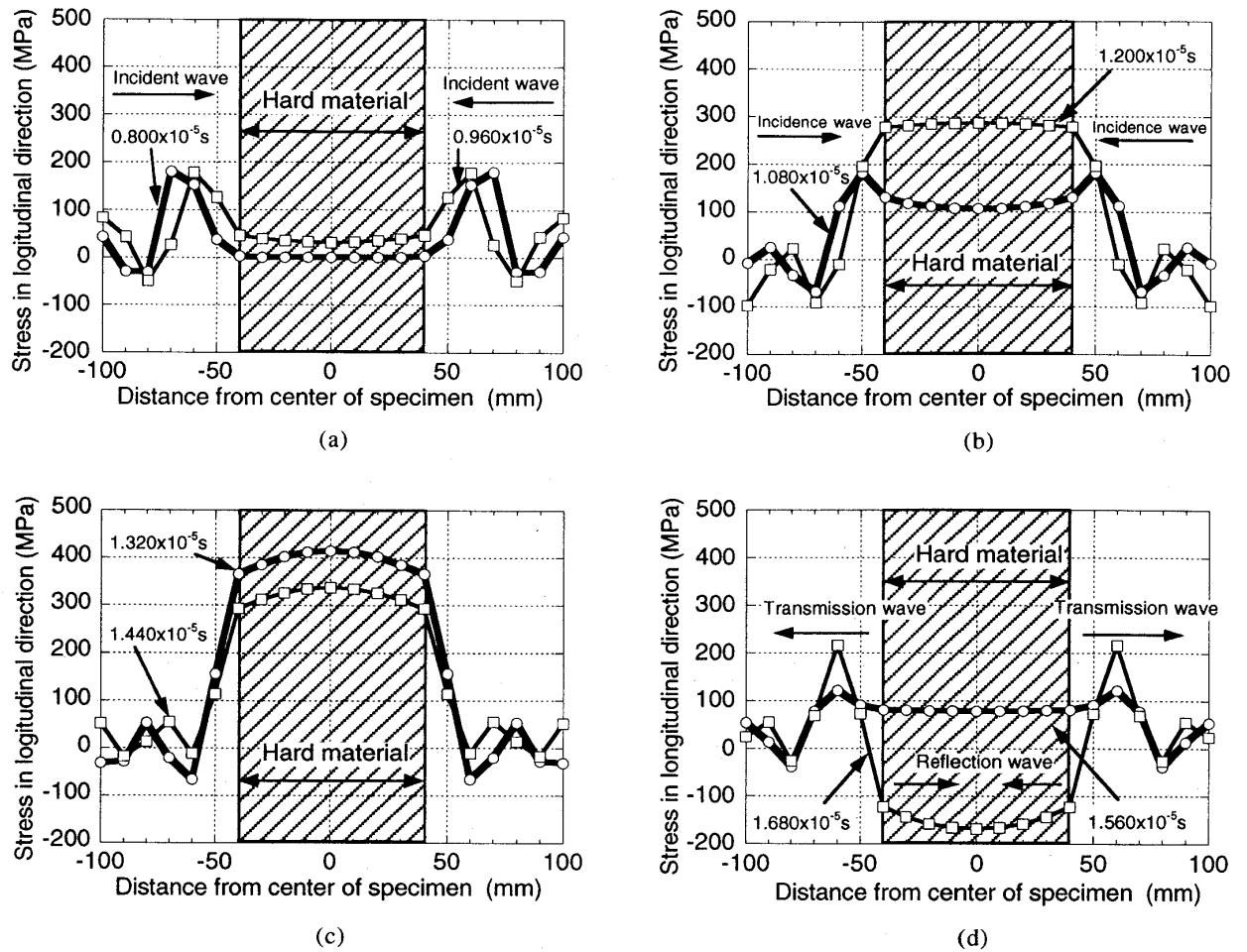


Fig. 4 Stress distribution for heterogeneous plate with hard interlayer

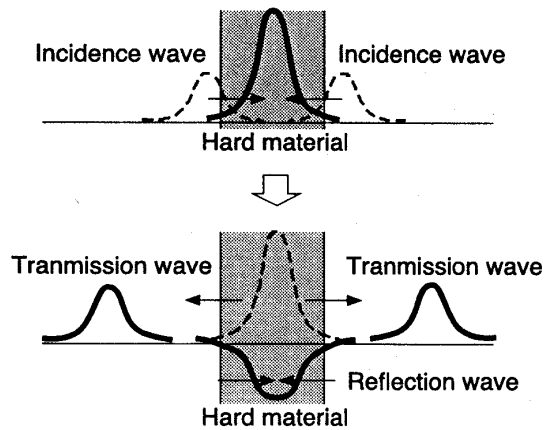


Fig. 5 Stress distributions of heterogeneous plate with hard interlayer

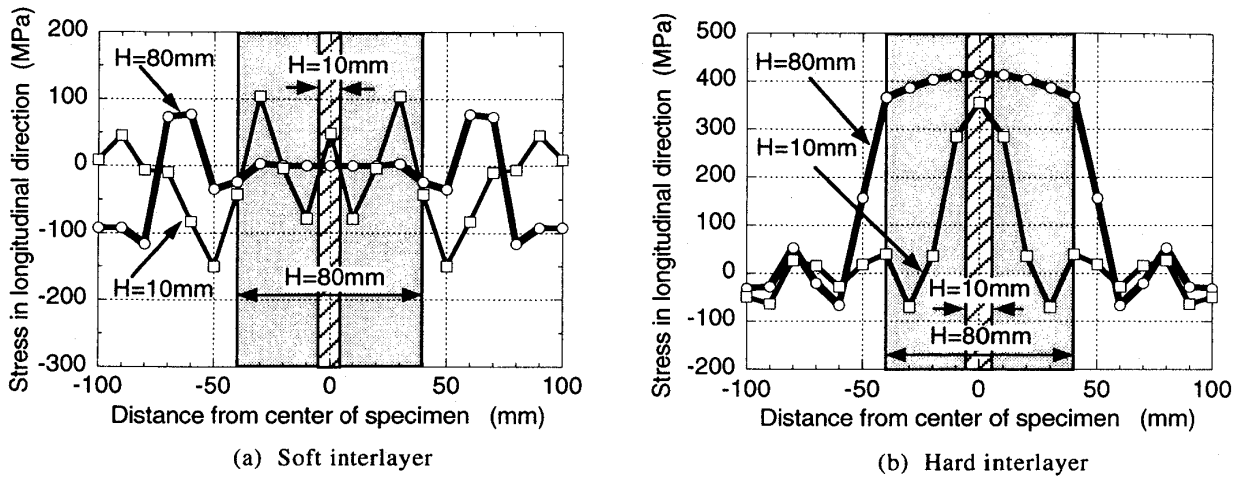


Fig. 6 Effect of interlayer width on stress distribution for heterogeneous plate

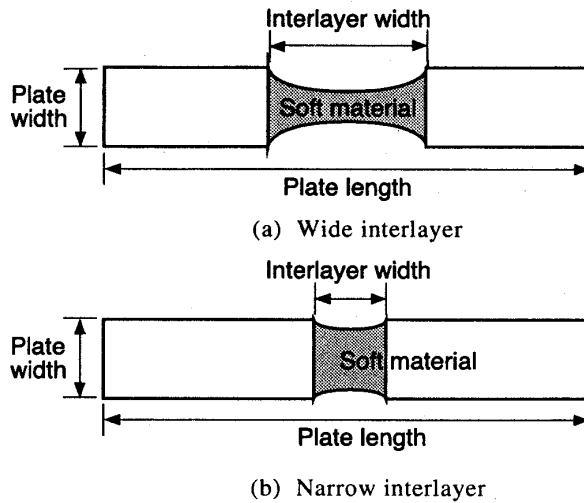


Fig. 7 Deformation of plate with wide and narrow soft interlayer

6. 結 論

本研究は、ヤング率が母材と異なる材が中間層として含まれる板材の両端部に初速度を与えたモデルを対象とし、中間層のヤング率が母材よりも小さい軟質中間層をもつ部材と中間層のヤング率が母材よりも大きい硬質中間層をもつ部材のそれぞれの応力伝播挙動とそれらに及ぼす中間層の幅の影響を明らかにした。以下に本研究で得られた結果を述べる。

- 1) 軟質中間層を持つ部材の端部から伝播した引張応力波は、中間層の異材接合界面に透過すると、硬質の母材から軟質中間層に応力波が伝播するため応力値が減少する。その直後に中間層の異材接合界面が自由端に近いふるまいを示し、圧縮の応力波となって反射する。その後、中間層内を伝播した引張の応力波は中間層のもう一方の異材接合界面を透過する。その際に、軟質中間層から硬質の母材に応力波が伝播するため応力値が上昇する。

- 2) 硬質中間層を持つ部材の端部から伝播してきた引張応力波は、中間層の異材接合界面を透過すると、軟質部材から硬質部材へ伝播するため大きくなる。その後、中間層内で一つの波形を形成していた引張応力波は二つの引張応力波に分かれ、もう一方の中間層の異材接合界面を透過する。このとき、硬質中間層から軟質の母材に引張応力波が透過するため、中間層の異材接合界面が自由端に近いふるまいを示し、圧縮波が中間層内部に向かって反射する。
- 3) 軟質中間層を持つ場合、中間層の幅が小さいときには、長手方向応力が透過したときにそれに対して直角方向、すなわち板幅方向の変形がヤング率の高い母材に拘束されるためほとんど変形が生じなくなる。したがって、中間層の見かけ上のヤング率が高くなるため、母材部の応力値と大差ない応力が生じる。一方、中間層の幅が大きいときには、応力が透過しても中間層中で十分な変形が生じ、応力値は小さくなる。
- 4) 硬質中間層を持つ場合、中間層の幅が小さくなると、中間層に入射した応力波が十分に大きくなる前に中間層を通過するため中間層内の応力は小さくなる。一方、中間層の幅が大きい場合には時間的に余裕があるため中間層内での応力は大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 林卓夫, 田中吉之助: 衝撃工学, 日刊工業新聞社, 1988.
- 2) 黒崎永治: 衝撃塑性学, コロナ社, 1970.
- 3) 社団法人 日本機械学会: 衝撃破壊工学, 技報堂, 1990
- 4) 沼野正慎, 河合康博, 大政光史, 豊田政男, 塚本光夫: 動的負荷条件下での力学的不均質の応力・歪特性, 溶接学会全国大会講演概要, 第57集, 192-193, 1995.