

I-13

Interphase層を有する繊維強化複合材料の動的界面特性

北見工業大学 学生員 青地 知也

北見工業大学 正員 大島 俊之

北見工業大学 正員 三上 修一

1. まえがき

最近、開発されつつある先端複合材料 (Advanced Composite Material) のうち、本研究では光ファイバーセンサーを内蔵した複合材料においてはその動的応答を研究対象とする。一様引張を受ける繊維強化複合材料において1本の補強繊維が切断するとき、その補強繊維が負担していた分担力が、どのようにして隣り合う繊維および母材に再分配されるかを動的応答問題として解析することを目的としている。またその際、補強繊維に設けたInterphas層がどのような動的効果を発揮するかも検討する。

2. 解析理論

(1) 帯板要素法

解析には、図-1のように面外変形を考慮しない等方弾性体とした長方形部材にたいし帯板要素法を用いる。長軸 (x 軸) 方向を連続関数として仮定し、さらにFourier変換をおこなうことによって各変位成分にたいするマトリクス表示が得られる。このマトリクスを全要素について剛性マトリクスと質量マトリクスおよび境界条件を重ね合わせると、次のような構造全体に対する運動方程式が得られる。

$$\{S_m[F]\} = [K]\{S_m[\delta]\} + [M]\{S_m[\delta']\} + [U]\{\delta\} + [V]\{\delta\} \quad (1)$$

ただし $\{S_m[\delta]\}$ は、変位の像関数ベクトル、 $\{S_m[F]\}$ は外力の像関数ベクトルを表し、 δ'' は時間の2階微分を表し、 δ' は x 軸方向の長さに対する1階微分を表す。 $[K]$ 、 $[M]$ はそれぞれ剛性マトリクス、質量マトリクスを表す。ここで x 軸方向の歪をパラメーターとする境界条件 $[U]$ $\{\delta\}$ を外力の像関数ベクトル $\{S_m[F]\}$ と置き換えることによって、計算モデルの端部に結合した剛体に等分布荷重を対称にかけたような荷重条件として考慮することになる。また鉛直方向の外力は無いものとし、 $[V]$ $\{\delta\}$ は無視して考える。よって式 (1) は、次のようになる。

$$\{U\} = [K]\{S_m[\delta]\} + [M]\{S_m[\delta']\} \quad (2)$$

(2) 構造のモデル化

有限帯板要素法によるモデル化においてモデル全体を13層に分け、1/4、1/2、3/4の位置に計3本の鉄筋を配置した。また帯板要素数は高さの等しい40要素からなる。ここで、積層モデルに改良を加えた改良RCモデルを用いることにする³⁾。これは鉄筋層によって表層と下層のコンクリートの連続性が損なわれることを防ぐために、鉄筋層にコンクリート要素のマトリクスを重ね合わせることで、表層と

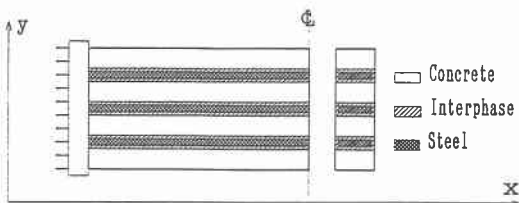


図-1 長方形複合材料モデル

Dynamic Interface Characterization of Fiber Reinforced Composite with Interphase Layer.

by Tomoya AOCHI, Toshiyuki OSHIMA and Shuichi MIKAMI

下層のコンクリートを直接つなぐようにしたモデルである。また、Interphase層として母材と補強繊維の要素の中間的剛性を有するモデルも用意した。

(3) 動的解析

自由振動問題として外力ベクトルを零として固有値、固有ベクトルを求め、固有ベクトルの直交性と減衰項(減衰定数)を考慮すると、各モードにおける動的2階常微分方程式となる。この微分方程式を単位衝撃力に対する変位の衝撃応答関数を用いてDuhamel積分すると各モードにおける応答が求められる。さらにこれをx軸方向に有限Fourier逆変換をおこなうと各点における応答が得られる。

3. 数値計算

本研究の計算では、動的一様引張荷重を受ける繊維強化複合材料の動的応答解析をおこない、材料中の変形や応力分布を最初に把握する。ここではこの解析をCase Iとする。次に1本の繊維が切断することを想定して、Case Iでの中央の繊維が負担していた応力を材料内部に作用する荷重として再分布载荷する。この場合をCase IIとする。したがって最終的にはCase IとCase IIの結果を適当な処理をして重ね合わせことになるが、ここではCase IとCase IIの場合の結果を中心として述べる。さらにInterphase層の有無についても検討する。

(1) 入力数値

数値計算モデルはCase I、Case IIともに、支間長1.6m、高さ0.4m、幅3cm、y方向分割数40、Fourier級数の項数80、入射継続時間50 μ sで25 μ sを頂点とする三角形荷重、解析時間間隔2 μ s、最大解析時間300 μ s、材料定数および要素高さは表-1に示す。減衰定数 $h_r = b \omega_r / (a + b \omega_r^2)$ 、ここでa、bは実験より求められる定数、 ω_r は固有円振動数(KHz)である。

(2) 計算結果

図-4はCase IIにおける中央に配置された繊維部の境界端部におけるInterphase層のあるモデルと無いモデルとのx軸方向の応答を比較して表したものである。実線がInterphase層を持たないもの、破線がInterphase層を持つものを表している。Interphase層を持つものの方が持たないものに比べ変形が若干ではあるが小さな値を示している。また変形のピーク位置からみても、その変形が緩やかに生じていることが確認できる。このことは他の部分の母材要素、繊維要素、Interphase要素でも同じような傾向がみられる。これはInterphase層を設けたことによる母材の剛性が高まったためであると考えられる。

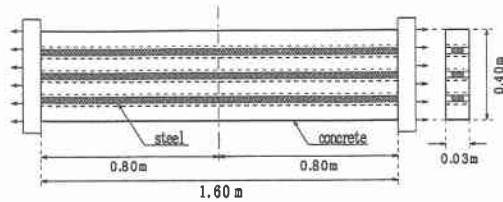


図-2 Case I 全引張モデル

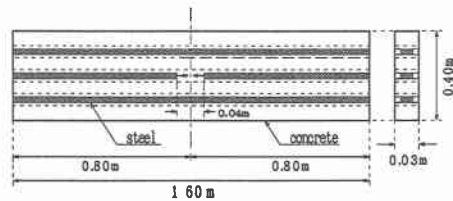


図-3 Case II 中央荷重モデル

表-1 高さ、および材料定数

	h(cm)	E(GPa)	ρ (g/cm ³)	ν
Concrete	7	3.0	2.3	0.17
Interphase	1	1.20	5.06	0.24
Steel	2	210	7.85	0.3

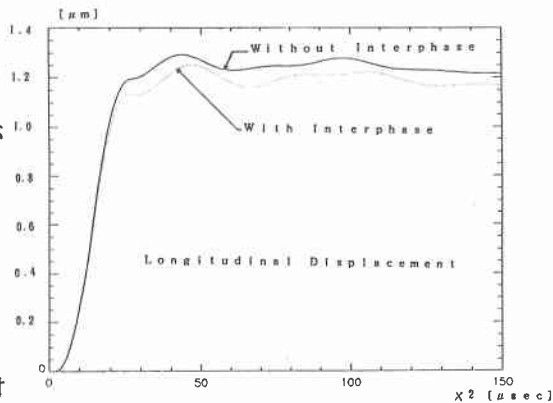
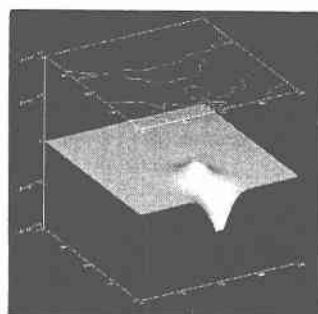
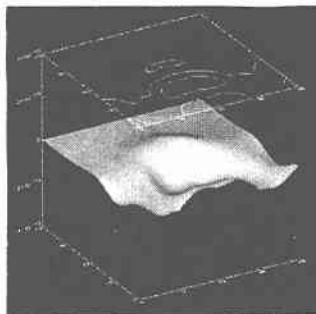


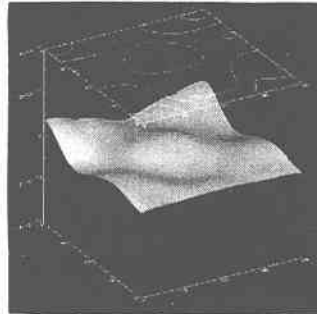
図-4 全引張モデルによる変位応答



(a) 30 μ s 後

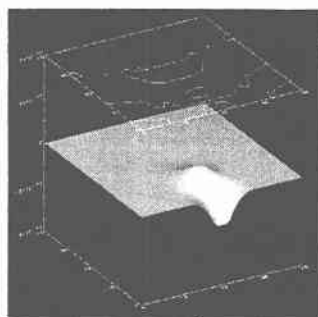


(b) 100 μ s 後

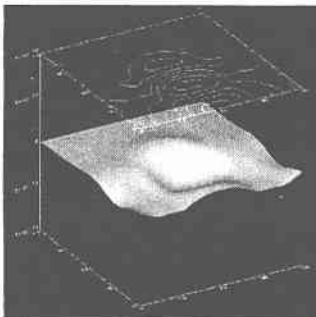


(c) 200 μ s 後

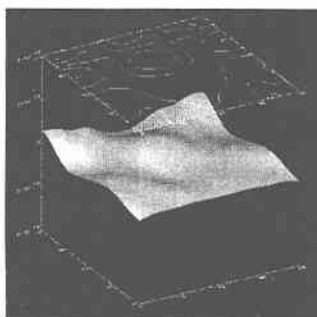
図-5 Interphase層を有さない中央繊維部への载荷の応答



(a) 30 μ s 後



(b) 100 μ s 後



(c) 200 μ s 後

図-6 Interphase層を有する中央繊維部への载荷モデルの応答

図-5、図-6はCase IIの場合における対称性を考慮した部材半分の、x軸方向変位を3次的に可視化したものである。右下の辺を対称軸とし、そこから左上へ延びていく方向をx軸方向、右上へ延びていく方をy軸方向として、それぞれ上へ向かう方向を正とする。そして各節点での変位を、その地点での高さによって表している。これにより全体の変位を立体的に把握することができる。また、一番上には、同様の条件によって描かれたコンター図を重ねてあるが、等高線は最大値と最小値を8分割したものであり、他の図と比較する際、考慮に入れておく必要がある。図-5はInterphase層を有さない場合のモデルであり、図-6はInterphase層を設けたモデルの場合で、それぞれ30 μ s後、100 μ s後、200 μ s後の3つの時刻の変位を表している。30 μ s後の図をみると、Interphaseを有さないモデルの方がよりシャープな変形をし、繊維部分の変位が大きくなる。これは中央の繊維部分にかけられた荷重が周りの要素および両端にある繊維部分に分担されにくく、中央の繊維に集中するものと考えられる。つまりInterphase層を設けることによって変形を他の要素へ伝え分散させていく効果があると考えられる。またこの効果は、100 μ s後、200 μ s後についても同様にみられるが、時間がたつにつれて、薄れていく傾向にあると思われる。図には示していないが、y軸方向においても同様な傾向がみられる。これは、Interphase層がy軸方向の変位においても多少ではあるが分散させていく効果があると考えられる。

4. まとめ

以上の検討の結果次のような結果が得られた。

- (1) 動的一様引張荷重を受ける繊維強化複合材料の変形挙動が可視化されて得られた。
- (2) (1) の時Interphase層がある場合と無い場合の比較をした結果、多少の差異が見られる程度で大きな分布の差は見られなかった。
- (3) 材料内部の繊維に部分的に載荷した場合の動的挙動が得られた。この結果、部分荷重が伝播していく状況が把握できた。
- (4) Case IIの場合、軸方向変位の分布においてはInterphase層が無い場合の方が繊維に負担が集中する傾向となった。したがってInterphase層の変形を分散させる効果がみられた。

本研究では、光ファイバーセンサーによる変形の計測を土木分野に応用するための基礎的な研究を行った。光ファイバーセンサーを用いれば、歪ゲージによる計測に比べてかなり精度よく測定できるとともに、長年月の使用に耐え、土木構造物のモニタリングに応用できる。またセンサー位置でひび割れが発生しても継続的に測定が可能である⁶⁾。

参考文献

- 1) 大島俊之、武田展雄,R.D.Kriz: 傾斜機能を有する先進複合材料の動的界面特性、第39回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集Vol39、pp21-24,1994.
- 2) Toshiyuki Oshima,Ronald D.Kriz,Sumio G.noguchi:Simulation and Visualization of Stress Wave Propagation Composite Laminate with Interphase Layer,Nondestructive Characterization of Materials™,1991.
- 3) 三上修一、大島俊之、角田史雄:劣化したコンクリートばりを伝播する応力波動のシュミレーション解析、土木学会北海道支部論文報告集、第50号、No.I-40,pp192-195,1994.
- 4) 三上修一、大島俊之、能町純雄、木田哲量:積層長方形ばりを伝播する応力波動シュミレーションと非破壊評価への利用、構造工学論文集Vol39A、pp371-378,1990.
- 5) 三上修一、大島俊之、ロナルド クリッツ、菅原登:積層複合ばりを伝播する応力波動とEnergy Flux分布の研究、構造工学論文集Vol39A、pp435-444,1993.
- 6) S.F.Masri, R.O.Claus: Developments in Actuators and Sensors for Structural Response Under Seismic and Dynamic Loads, U.S.-Japan Seminar on Experimental Methods in Earthquake Engineering, 1993.
- 7) R.O.Claus, M.F.Gunther, A.Wang, K.A.Murphy: Extrinsic fabry-Perot sensor for strain and crack opening displacement measurements from -200 to 900 °C, Smart Mater. Struct.1, pp237-242,1992.