

I-673

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 山崎 智之

(株) 島田建設 正 員 斉藤 隆行
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、本研究では補強繊維として、また鉄筋内に埋め込まれるなどして使用される光ファイバーセンサーを内蔵した複合材料において、光ファイバーセンサーを用いた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。これは、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。¹⁾ また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Interphase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

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対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、Fourier変換をおこない各変位成分にたいするマトリクス表示を得る。このマトリクスを全要素について各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。

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

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' 、 δ'' はそれぞれ時間の1階、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。 $[K]$ 、 $[C]$ 、 $[M]$ はそれぞれ剛性マトリクス、減衰マトリクス、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 $\{S_m[F]\}$ と同様に考えることによって、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を考慮することになる。

構造においては有限帯板要素法によりモデル化をし、モデル全体を40要素に分け1/4、1/2、3/4の位置に計3本の繊維を配置した。またInterphase層として母材と補強繊維の要素の中間の剛性を有するモデルも用意し比較検討した。

次に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。

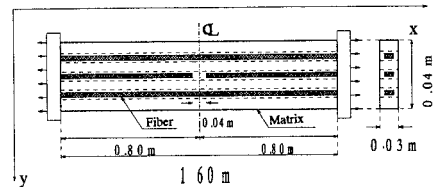


図-1 長方形複合材料モデル

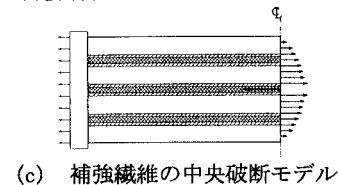
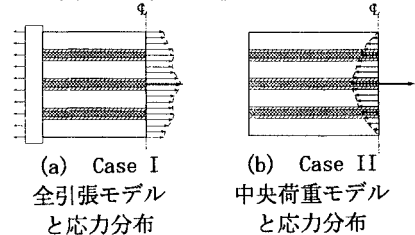


図-2 モデルの合成

表-1 高さ、及び材料定数表

	h (cm)	E (GPa)	ρ (g/cm ²)	ν
Matrix	7	30	2.30	0.17
Interphase	1	120	5.06	0.24
Fiber	2	210	7.85	0.30

3. 数値計算及び、計算結果

本研究の計算では、図-2(a)のような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。次に図-2(b)のように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。最終的には図-2(c)のようにCase IとCase IIの結果を適当な処理をして重ね合わせることになるが、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る。なお入力された荷重は、 $50 \mu s$ までの三角形荷重として用いた。

図-3はCase I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軸方向の時刻歴応答を比較して表したものである。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。この傾向は他の部分の要素でも同じようにみられる。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-4(a)、(b)はCase IIの場合における対称性を考慮した部材半分の各節点の $50 \mu s$ 後のx軸方向の変位をその地点での高さによって表して3次元的に可視化したものである。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。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。

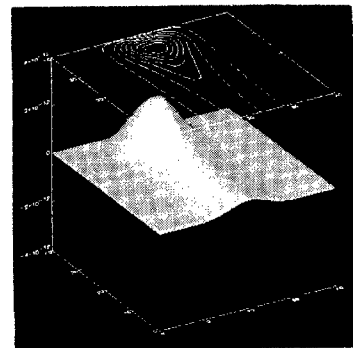
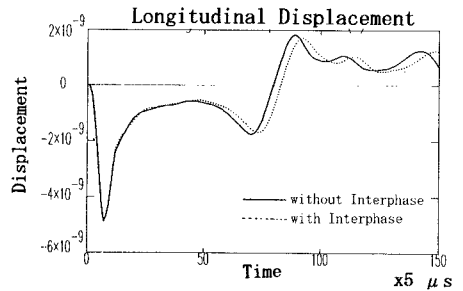
4. まとめ

以上の検討の結果をまとめると以下ようになる。

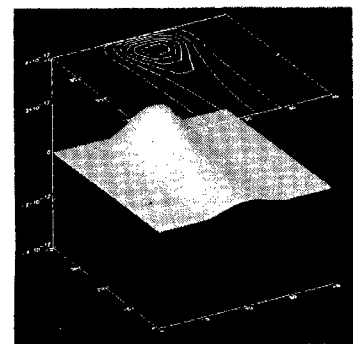
- (1) 動的一様引張荷重を受ける繊維強化複合材料の変形挙動が可視化されて得られた。
- (2) 材料内部の繊維に部分的に载荷した場合の動的挙動が得られた。この結果、部分荷重が伝播していく状況が把握できた。
- (3) Case IIの場合、軸方向変位の分布においてはInterphase層が無い場合の方が繊維に負担が集中する傾向となった。したがってInterphase層の変形を分散させる効果を定量化できた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.



(a) without Interphase



(b) with Interphase

図-4 中央荷重モデルでの応答