

繊維強化複合材料中を伝播する軸方向衝撃波の伝播特性

Propagation Characteristics of Longitudinal Shock Wave through Reinforced Composite Member

大島 俊之*, 三上 修一**, 青地 知也***, 新井田 武久****

Toshiyuki OSHIMA, Shuichi MIKAMI, Tomoya AOCHI and Takehisa NIIDA

*工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090 北見市公園町 165 番地)

**博士 (工学) 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090 北見市公園町 165 番地)

***修士 (工学) ㈱開発工営社 (〒060 札幌市北区北 7 条西 5 丁目札幌北スカイビル)

(研究当時 北見工業大学大学院生)

****北見工業大学大学院生 土木開発工学専攻 (〒090 北見市公園町 165 番地)

Longitudinal shock wave propagating through reinforced composite member is taken into account in this paper. The reinforced composite model which we discussed here is a two dimensional rectangular composite which has reinforcement layers. Finite strip method(FSM) is used to formulate the composite and modal analysis and Duhamel integral equation are also used to obtain its dynamic response to the impulsive incident wave. Making use of visualization technique we obtain the visualized simulation of stress wave propagation in a reinforced composite. The effect of interphase layer on the wave energy transmission from matrix to fiber is also analyzed.

Key words : NDE, Longitudinal shock wave, Reinforced composite, Stress wave

1. まえがき

1995 年 1 月 17 日の阪神大震災では 300gal を超える上下方向の加速度記録が得られ、直下型地震の挙動が 1 つの大きな特徴である。したがって地震の被害においては写真 1 に見られるように橋脚や柱状構造物において柱の軸方向衝撃による破壊と思われる被害も多くみられている。橋脚の場合には上部工の上下振動と橋脚中を伝搬する応力波動が連成するとともに、軸方向の応力波動として橋脚中を上下方向に引張と圧縮に反転する衝撃波が地震入力直後に伝播および反射を繰り返す。さらにその過程で衝撃力が材料強度を上回る場合には材料中に破壊を発生させることとなる。したがってこのような衝撃応答時に構造内部でどのような応力分布となっているのかを把握することは、地震対策上重要な課題となっている。このような背景から本論文では鉄筋の異形部分を応力伝達層 (Interphase 層) として考慮した鉄筋コンクリート部材を対象として、これに軸方向の衝撃波が入射する場合、応力の伝達や波動伝播がどのように行われるかを検討する。Interphase 層は補強繊維としての鉄筋と母材の間のある厚さを有する境界領域を意味し、この層では材料定数は二つの材料の中間的値となっている。軸方向の衝撃入力の卓越周期が今回の大地震のように 1 秒 (1000ms) 前後の場合、圧縮または引張の衝

撃力が 500ms 程度の継続時間で入力されることとなる。一方鉄筋コンクリート部材の縦波動速度は 4000m/s 程度であるので 5m 程度の橋脚であれば 2ms 程度で橋脚中を伝播、反射を繰り返すこととなる。したがって橋脚上部が連続げたなどで連結されている全体構造の場合には、橋梁全体の上下方向の振動の過程で、強い応力の衝撃波が橋脚中を波動伝播する。この際、下から突き上げるモードの圧縮衝撃が橋脚天端で引張の衝撃波となって反射するのでこの引張応力がコンクリートの限界引張応力を超える場合コンクリートの衝撃波による破壊となる。さらに地震の位相が突き上げるモードであれば内部の鉄筋の局部座屈が発生することとなる。以上が現段階で著者らがこの問題について考えている内容である。したがって、本研究ではこのような現象の背景となる挙動について具体的にシミュレーションにより検討する。

まず本研究における鉄筋コンクリート部材のモデル化においては、軸方向の衝撃波入力を受ける場合の鉄筋とコンクリートの間の波動エネルギーの分担挙動に着目しており、母材中に異形部分を有する 3 本の補強材がある場合を対象として、これを 2 次元波動応答問題として解析する。解析では長軸方向の衝撃入力を考慮できるように改良した帯板要素法を用いて弾性衝撃応答解析

を実施するとともに、別途有限要素法を用いてコンクリートのひび割れを考慮した2次元の鉄筋コンクリート構造の非線形軸方向衝撃応答解析を実施し比較検討する。



写真1 衝撃破壊が発生した状況¹⁰⁾

2. 帯板要素法による衝撃応答解析

解析には図1のように2次元の等方粘弾性体とした長方形部材に対して帯板要素法を用いる。bを部材幅、dを載荷荷重幅、補強材と母材の間にはInterphase層を設けた。Interphase層の剛性は傾斜機能を有する値とする。帯板要素法においては長方形要素の長軸(x軸)方向変位を連続関数と仮定し、これに有限Fourier変換をおこなう。また長軸に直交する短軸(y軸)方向変位は直線変化と仮定するとガラーキン法により

$$\int_A L_1 \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) dA = 0 \quad (1)$$

$$\int_A L_2 \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) dA = 0 \quad (2)$$

ただし L_1 、 L_2 は重み関数で次式のように仮定する。

$$\begin{aligned} L_1 &= \cos Mx \cdot f_1(y), & \cos Mx \cdot f_2(y) \\ L_2 &= \sin Mx \cdot f_1(y), & \sin Mx \cdot f_2(y) \end{aligned} \quad (3)$$

$$M = \frac{m\pi}{l}, \quad f_1 = 1 - \frac{y}{h}, \quad f_2 = \frac{y}{h}$$

また m はFourier級数のパラメーター、 l は要素の長さ、 h は要素のy軸方向の幅である。そして A は、図2に示す1つの帯板要素の面積とし、変位 u 、 v は、次式のように仮定する。ここで u を $\cos Mx$ 、 v を $\sin Mx$ で展開した理由は長軸方向の部分積分の境界値として要素端部に長軸方向のひずみ成分を考慮することが主たる目的である。

$$u(x, y; t) = \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ U_r^m(t) f_1(y) + U_{r+1}^m(t) f_2(y) \right\} \cos Mx \quad (4)$$

$$v(x, y; t) = \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ V_r^m(t) f_1(y) + V_{r+1}^m(t) f_2(y) \right\} \sin Mx \quad (5)$$

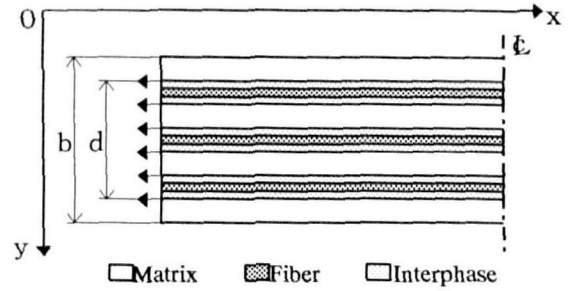


図1 長方形複合材料モデル

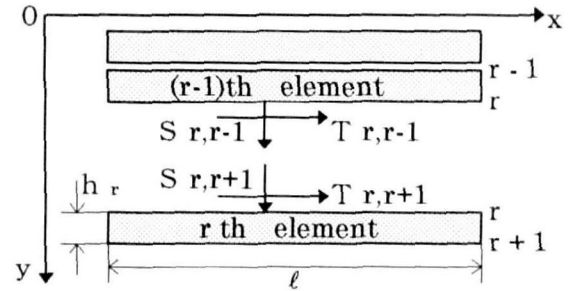


図2 帯板要素分割

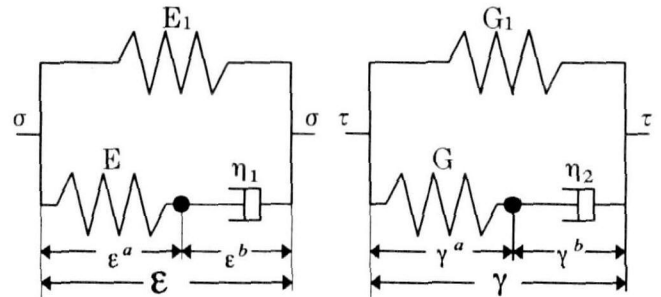


図3 3要素粘弾性モデル

応力とひずみの関係は次式のような3要素の粘弾性の式で表す。

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} \left(1 + \kappa_e \frac{\partial}{\partial t} \right) (\epsilon_x^b + \nu \epsilon_y^b) \quad (6)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} \left(1 + \kappa_e \frac{\partial}{\partial t} \right) (\epsilon_y^b + \nu \epsilon_x^b) \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = G \left(1 + \kappa_e \frac{\partial}{\partial t} \right) \gamma_{xy} \quad (8)$$

ただし E 、 G 、 ν はそれぞれ弾性係数、せん断弾性係数、ポアソン比であり、図3を参照して粘性係数を η_1 η_2 とすると

$$\kappa_e = \frac{\eta_1}{E} \left(\frac{E}{E_1} + 1 \right), \quad \kappa_g = \frac{\eta_2}{G} \left(\frac{G}{G_1} + 1 \right) \quad (9)$$

$$\epsilon_x = \epsilon_x^a + \epsilon_x^b, \quad \epsilon_y = \epsilon_y^a + \epsilon_y^b, \quad \gamma_{xy} = \gamma_{xy}^a + \gamma_{xy}^b \quad (10)$$

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (11)$$

式(6)、式(7)、式(8)を式(1)、式(2)に代入し、要素ごとに積分を実施すると各節点に対する Fourier 変換された変位成分と節点力成分の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} \{Sm[F_m]\} + [N^m] \left\{ \dot{\delta}_{mn} \right\} &= [K^m] \{Sm[\delta_m]\} \\ &+ [C^m] \{Sm[\delta'_m]\} + [M^m] \{Sm[\delta''_m]\} \end{aligned} \quad (12)$$

ただしプライム (') は時間に対する微分 $d(\)/dt$ 、ドット ($\dot{\ }$) は x 軸方向の座標に対する微分 $d(\)/dx$ を表す。 $[K^m]$ 、 $[C^m]$ 、 $[M^m]$ 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。また $\{Sm[\delta]\}$ 、 $\{Sm[F_m]\}$ は軸方向に有限 Fourier 変換した節点変位と節点力を表す。そして δ_{mn} は部材の軸方向端部における境界変位であり、 $[N^m]$ はその係数マトリクスを表わしている。

式(12)に示した関係式を構造の全要素について重ね合わせると、次のような構造全体に対する運動方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \{Sm[F_{st}]\} + [N] \left\{ \dot{\delta}_{stn} \right\} &= [K] \{Sm[\delta_{st}]\} \\ &+ [C] \{Sm[\delta'_{st}]\} + [M] \{Sm[\delta''_{st}]\} \end{aligned} \quad (13)$$

ここで $[K]$ 、 $[C]$ 、 $[M]$ はそれぞれ構造全体の剛性マトリクス、減衰マトリクス、質量マトリクスを表し、 $\{\delta_{st}\}$ は変位ベクトル、 $\{F_{st}\}$ は図1で示した部材の外力ベクトル、 δ_{stn} は境界変位を表す。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および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。この微分方程式を解き、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 逆変換を行うことによって各点における応答が得られる。

3. 軸方向衝撃力を受ける繊維強化複合構造の帯板要素法による数値解析

(1) 解析モデル

本論文の数値解析ではまず長軸方向の補強繊維を有する複合棒状構造が軸方向に端部で衝撃力を受ける場合を対象として、図4に示すような3本の補強繊維を有する2次元の複合部材について解析する。用いた構造諸元は表1に示すように一般の鉄筋コンクリート柱と一致するものではないが軸方向に衝撃力を受ける複合構

表1 構造諸元

	h(cm)	E(GPa)	ρ (g/cm ³)	ν
Matrix	7	0.357	1.2	0.35
Interphase	1	4.063	3.6	0.29
Fiber	2	7.750	6.0	0.22

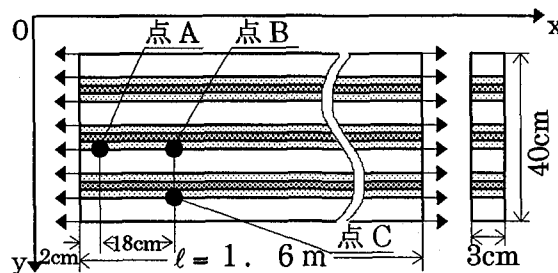
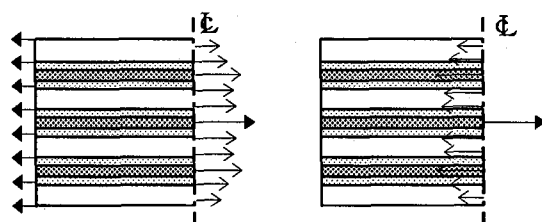
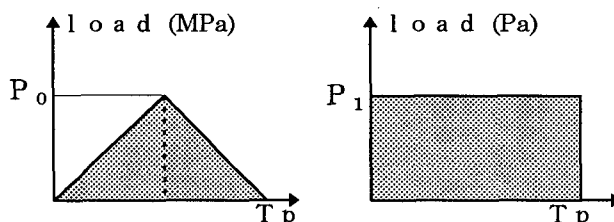


図4 解析モデル



(a) Case I 全引張モデル (b) Case II 中央引張モデル

図5 2つの荷重モデル



(a) 三角形荷重 (Case I) (b) ステップ荷重 (Case II)

図6 入力荷重の時間分布

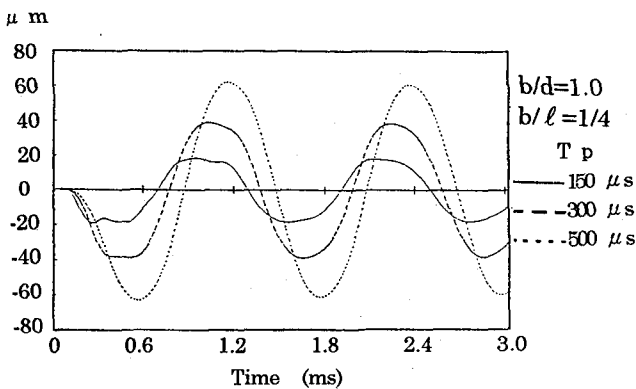
造体中の波動エネルギーの分担傾向など、一般的な動的挙動を把握できるものと思われる。また、次章では実際の鉄筋コンクリート柱を想定した FEM による解析を示す。また本章の解析結果は次章の FEM による動的弾性応答の場合の解析と一致している。帯板要素法による解析の利点は長軸方向に Fourier 変換しているので数値計算上は短軸方向の分割数と Fourier 級数の収束にのみ注意を払えば、過渡応答などの衝撃的現象も簡単に計算できる点にある。なお本章の数値計算では Fourier 級数の項数については 80 項としているが充分収束していることを確かめている。また短軸方向の分割数については 40 分割を用いているが 100 分割による結果と比較した結果、本論文の結果には差があらわれなかった。

図4の解析モデルでは等間隔に3本の補強繊維があり、さらに補強繊維は Interphase 層を有している。全構造はy軸方向に幅hの等しい40個の帯板要素に分割されている。母材と補強繊維および Interphase 層の構造諸元は表1に示しているが、Interphase 層を設けることによって、母材と補強材の剥離防止の効果がある。鉄筋コンクリート構造においては鉄筋の異形部分がこの効果に相当する。

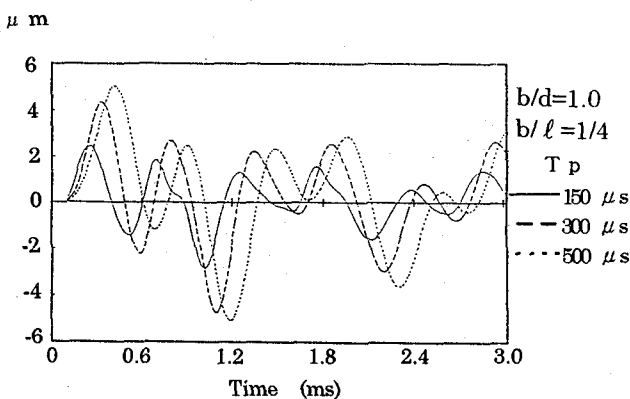
本章の数値解析は最終的には軸方向の衝撃力を受ける複合部材中の補強材の動的破断現象をモデル化する事を目的としている。しかし本論文ではその中間的な解析結果として、図5に示すような全引張モデル (Case I) と中央引張モデル (Case II) の2つの場合についての結果を示す。したがって最終的には軸方向の衝撃力の作用下で中央の補強材の破断直後に、破断した補強材が負担していた力が隣接する補強材にどのように再分配されていくのかを検討する。すなわち、図5の Case I と Case II の結果に適切な処理をして重ね合わせる計算をして、中央の補強材の応力を動的に解放することになる。数値計算では Case I, Case II とともに図4のように幅40cm、厚さ3cm、長さ160cmとしている。入力荷重の時間変化は Case I に対して図6(a)のタイプ、Case II に対しては (b) のタイプを用いている。解析時間ステップは $20\mu s$ であるが、次項で述べるように固有周期と比較すると $1/100$ 程度に小さく、解析上充分の精度がある。また減衰定数 $h_r = b\omega_r / (a + b\omega_r)$ とし、 $a = 13935$, $b = 15.5$ は実験から求めたものである。⁶⁾ ここで ω_r は固有円振動数 (KHz) である。

(2) 数値解析結果

図5の Case I において端部の入力荷重 (図6) の載荷時間 T_p を $150\mu s$ 、 $300\mu s$ 、 $500\mu s$ と変化させた場合の動的応答変位の比較を図7に示している。入力荷重は帯板要素端部の節点に集中して作用させているが、荷重は載荷幅d、厚さ3cmに分布しており、その強度は図6の P_0 が580MPaとなっている。この場合は部材全体の縦横比 $b/l = 1/4$ 、入力荷重の載荷幅比 $d/b = 1.0$ (全幅載荷)、母材と補強材の間の Interphase 層を考慮しない場合の結果である。表1の構造諸元による固有値解析結果から軸方向固有振動モードに対応する固有周期のうち、最低次は1.2s程度、また全固有振動モードを通じて周期がもっとも短いもので5ms程度である。固有値の総数は80個あるが、そのうち軸方向振動モードに対応するものは40個である。したがって入力荷重の載荷時間 T_p が短い場合には動的応答は長軸方向の全体振動応答として固有周期による自由振動に移行する以前に、長軸方向の両端間で反射する波動応答が短周期で先行することとなる。その周期はこの計算の場合は1.2ms程度である。また図7の結果の場合には端部の荷重が全面に作用し

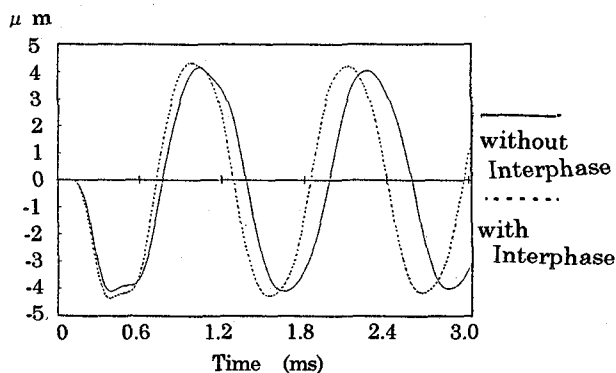


(a) 点 B における長軸方向変位

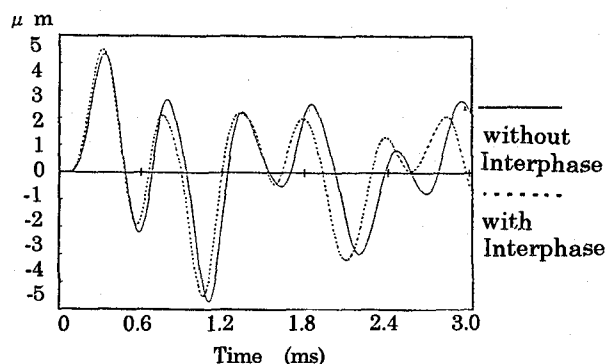


(b) 点 C における短軸方向変位

図7 入力時間の変化した場合の時刻歴応答変位



(a) 点 C における長軸方向変位



(a) 点 C における短軸方向変位

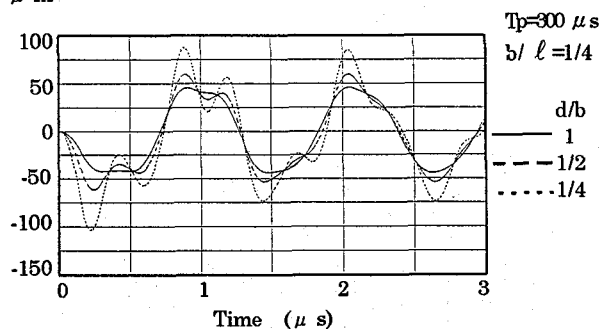
図8 Interphase層の有無による時刻歴応答変位

ているが、一般に載荷幅が全幅より小さく $d/b < 1$ の場合には、載荷点近傍での応力分布が複雑となる。またこの分布の影響は全幅と同程度長軸方向に内側に入った範囲から幅全体に平均化することが知られている。¹¹⁾

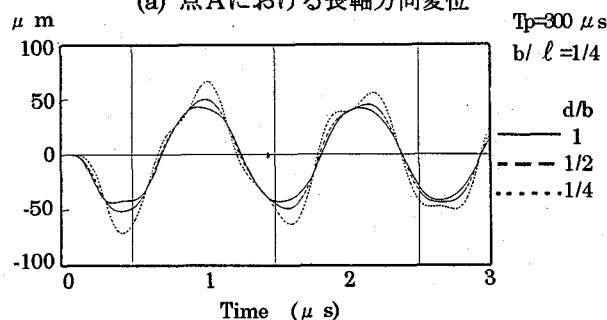
本章の帯板要素法による計算条件では図4の載荷点の構造境界では短軸（y軸）方向変位を拘束している。図7（a）には母材と補強材の境界上で部材端部から全長 l の $1/16$ 内側に入った点Bの長軸方向変位応答を示している。また図7（b）には同様に長軸方向に点Bと同じ距離で短軸方向に全幅 b の $1/4$ 中央より離れた母材と補強材の境界上の点Cの短軸方向変位応答を示している。（a）図と同じ点Bでの応答を比較しなかった理由は、この場合短軸方向変位は幅中央に対して逆対称のため、中央より離れた位置の方が応答が卓越するためである。これらの図から入力時間 T_p が大きくなるにつれて力積が大きく応答振幅が大きくなるとともに、全体振動に移行する以前の長軸方向の波動応答の状況が明らかとなっている。

次に図8にはInterphase層がある場合と無い場合の比較について示している。これは図7と同様、Case Iの場合で $b/l = 1/4$ 、 $d/b = 1.0$ 、 $T_p = 300 \mu s$ の場合の点Cの長軸方向変位応答（（a）図）と同じく点Cの短軸方向変位応答（（b）図）を示したもので、Interphase層の無い場合が実線、ある場合が破線で示されている。点CにおいてはInterphase層のある場合の方が若干応答も大きくなり、位相も早くなる傾向にある。

次に図9にはCase Iにおける載荷幅比 d/b を1、 $1/2$ 、 $1/4$ と変化させた場合の長軸方向応答変位に与える影響を補強材とInterphase層の境界上の点Aと点Cについて



(a) 点Aにおける長軸方向変位



(b) 点Cにおける長軸方向変位

図9 載荷幅比の変化した場合の時刻歴応答変位の比較

て比較している。すなわち、 $b/l = 1/4$ 、 $T_p = 300 \mu s$ とし、荷重の総計を等しくするように載荷幅比 d/b を変化させた場合の結果を比較したものである。前述したように載荷点近傍の点Aでは変位分布の変動が大きいものに対して、点Cではその影響は小さくなっている。この場合Interphase層を考慮したモデルについて比較している。

次に応答の全体的分布を見るため、応力分布を画像処理ソフトウェアで可視化した結果について示す。図10（a）、（b）、（c）の結果はCase Iで $d/b = 1$ 、 $b/l = 1/4$ 、 $T_p = 300 \mu s$ 、Interphase層のある場合のモデルについて図6（a）の入力荷重を受けた場合に、最初に応答のピークを生じる入力後 $600 \mu s$ の時刻の長軸方向応力 σ_x 、短軸方向応力 σ_y およびせん断応力 τ_{xy} をそれぞれ示している。図では右上側が構造の長さ方向の中央になっている。図10（a）、（b）ではともに補強材の応力分担割合が大きいことが見られるとともに図10（c）のせん断応力分布では正負の応力分布が短軸方向に生じている状況が見られる。

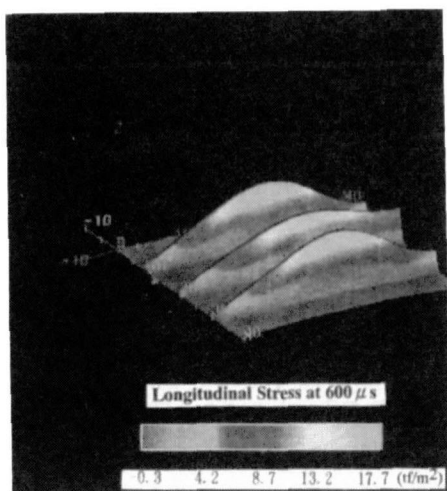
また図5のCase IIの中央引張モデルによる計算結果として、3本の補強材の2番目の補強材の長さ中央に内力による入力荷重として、互いに向かい合う長軸方向の荷重を図6（b）のような時間分布で載荷した場合の結果を図11（a）、（b）、（c）に示している。1本の補強材に分布する荷重として、荷重強度は図6の P_1 を 0.022 Pa としている。この場合は入力荷重が構造内部に載荷されるため、応答波動は構造周辺の自由境界に向かって伝播することとなる。図中の座標の向きは前述と同様であるが、図11（a）のみ図の右下側が載荷点の構造中心付近となっている。これらの図から強い衝撃力が集中して構造中、特に補強材中を長軸方向に伝播する場合には補強材が母材中で座屈したり、塑性化する可能性があることを推測できる。

4. 有限要素法による鉄筋コンクリート部材の軸方向衝撃応答解析

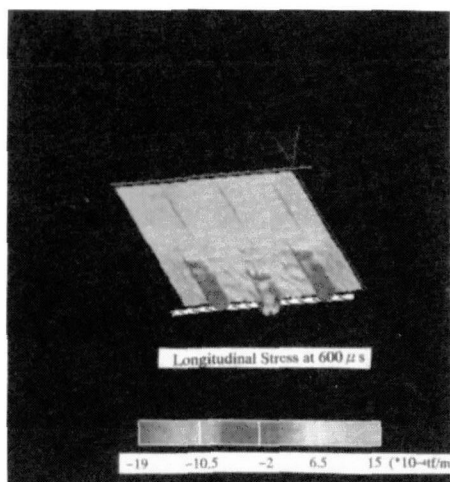
前章では帯板要素法により繊維強化複合材構造を2次元にモデル化した解析結果を示したが、本章では比較のために非線形総合構造解析プログラム（MARC）を用いて同様の計算をするとともに、コンクリートのひび割れや帯鉄筋の影響などを考慮した解析を行った結果について示す。

（1）解析モデル

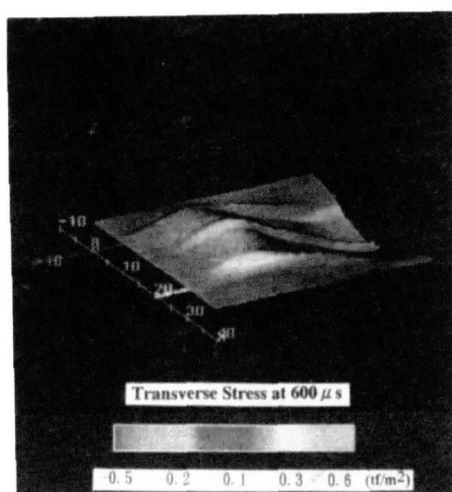
解析モデルとしては図12に示すように2次元の鉄筋コンクリート構造を対象として、軸方向鉄筋をモデル化した3本の主鉄筋と帯鉄筋を有するモデルを用いた。構造諸元は長さ 192 cm 、幅 48 cm 、奥行き 11.7 cm の片持ばりであり、主鉄筋の断面積は 6.2 cm^2 、間隔 15 cm で3本配置されており、帯鉄筋の断面積は 3.14 cm^2 、間隔 20 cm で9本配置されている。荷重は、はり右端部に図



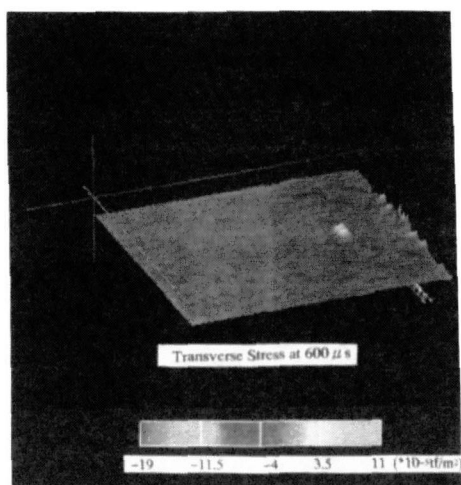
(a) 長軸方向応力 (σ_x)



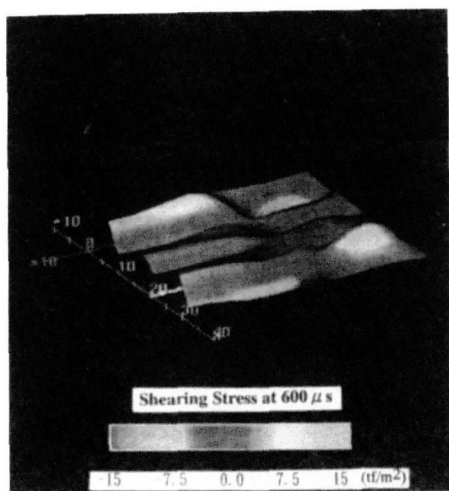
(a) 長軸方向応力 (σ_x)



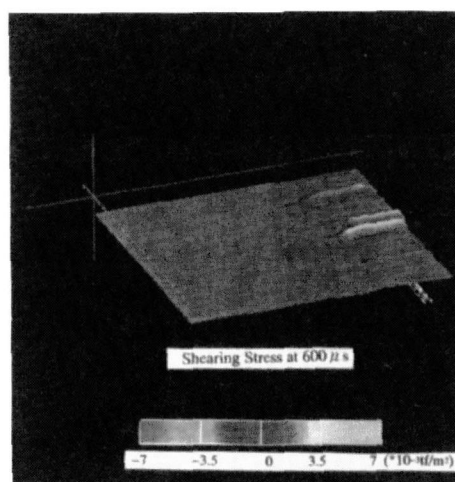
(b) 短軸方向応力 (σ_y)



(b) 短軸方向応力 (σ_y)



(c) せん断応力 (τ_{xy})



(c) せん断応力 (τ_{xy})

図10 Case IのInterphase層を有する場合の
応力分布

図11 Case IIのInterphase層を有する場合の
応力分布

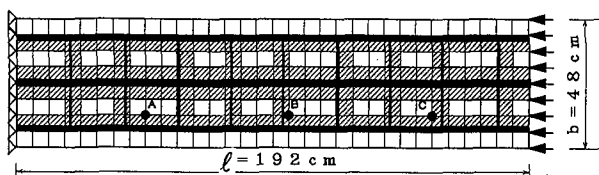


図12 有限要素法による解析モデル

13に示すような時間分布を有し、幅方向に一様に分布する長軸方向の入力荷重が作用する。要素は8節点4辺形平面ひずみ要素で要素数はコンクリート256、鉄筋164で全節点数は849である。計算プログラムでは2次元平面ひずみ問題として計算するので、コンクリートと鉄筋の断面積を自動的に2次元問題に変換している。用いた材料定数及び解析条件は表2に示しているが、この中でコンクリートには引張応力によるクラック発生が考慮されている。また表2のコンクリートの限界引張応力に達したとき、ソフトニング係数に比例して要素の応力伝達機能が低下してゆき、剛性が小さくなっていく様に設定している(図14参照)。またクラック発生後、応力が圧縮に反転するとクラックは閉鎖する。クラックが閉鎖すると剛性は部分的に回復し、クラック発生後のせん断力保持率に従ってクラック面を介してせん断力が伝達され、圧縮応力下の伝達機能が一部再生するように設定している。時間についてはNewmarkの β 法を用い、解析時間ステップ幅を1msとしている。これらについては計算の安定性に配慮している。

(2) 数値計算結果

図12に示した点A($l/4$ 点)、点B($l/2$ 点)、点C($3l/4$ 点)の長軸方向の変位応答結果を図15に示している。これにより本論文の最初に述べたように長軸方向の応答は構造全体の伸縮振動に、波動伝播による引張・圧縮の影響が重ね合わさった挙動となっていることがわかる。

次に、図16には点Bにおける長軸方向応力 σ_x の応答結果を示している。図中(a)図の30ms付近で、表2で設定したコンクリートの限界引張強度2.5kPaに達している。(b)図はその拡大図である。したがってこのような限界強度を超える引張応力が生ずる部分でコンクリートのひび割れが発生することとなる。

次に、以上で述べた各点の応答結果を可視化した結果について示す。図17には荷重入力から30ms~49msの範囲の応答図を示しており、中央部分でコンクリートにひび割れが発生していることが明瞭に見られる。図中の黄色の部分がひび割れが発生している領域である。このように長軸方向に衝撃的荷重が作用する場合に、応力波動の引張応力が引張強度を超過する場合に、母材としてのコンクリートが長軸に直角な方向にひび割れが発生することをシミュレーション結果から示すことができる。

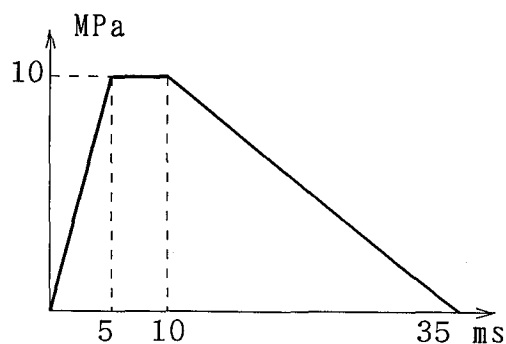


図13 入力荷重

表2 材料定数及び解析条件

	Concrete	Steel
ヤング率 (GPa)	30	210
ポアソン比	0.17	0.3
質量密度(g/cm ³)	2.35	7.85
降伏応力(kPa)	15	499.8
限界引張応力(kPa)	2.5	
ソフトニング係数(MPa)	2.1	
圧壊発生ひずみ	0.0035	
せん断力保持率	0.5	

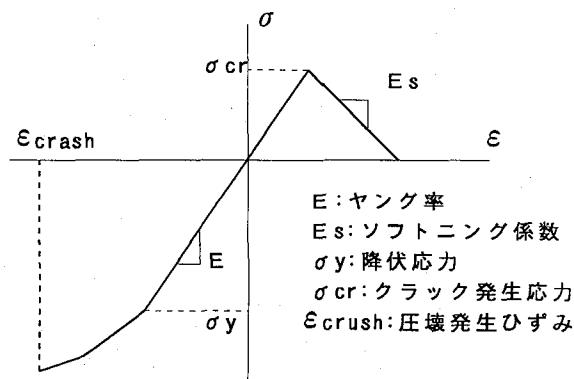


図14 コンクリートの単軸応力ひずみ関係

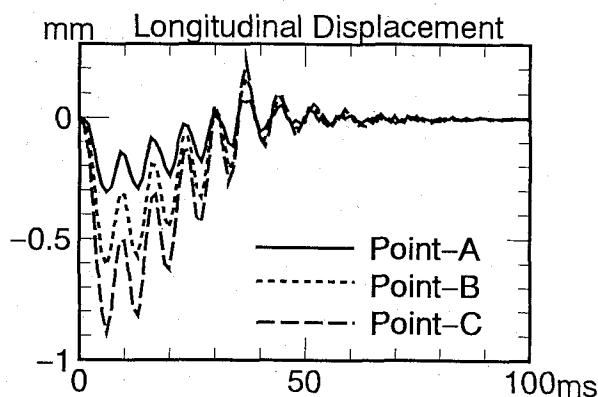


図15 長軸方向変位応答

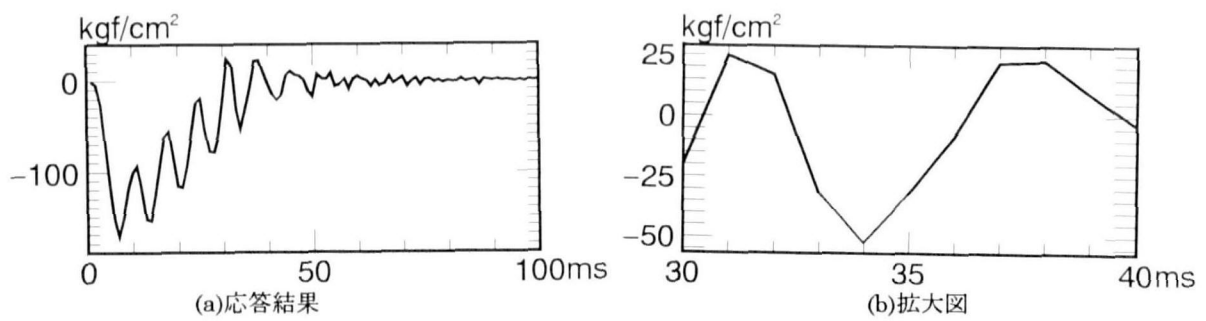
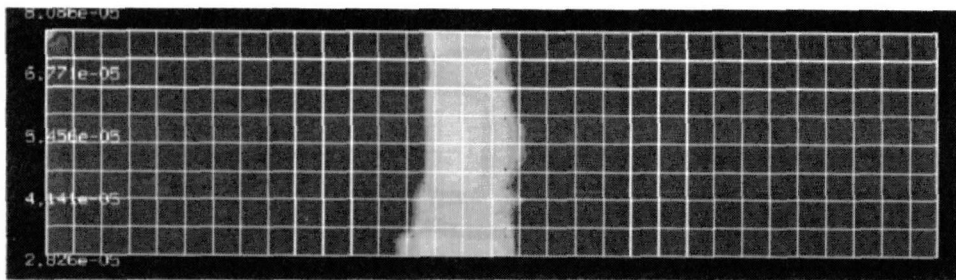
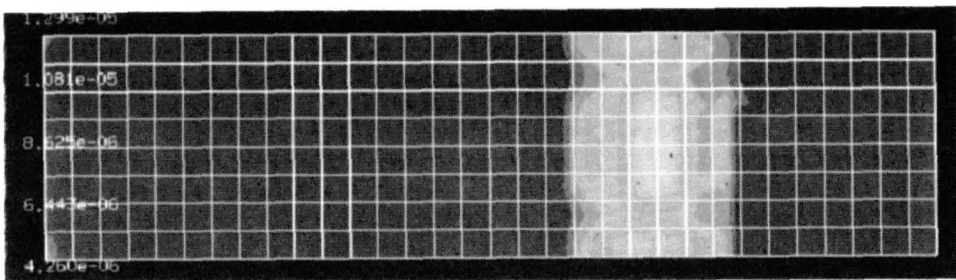


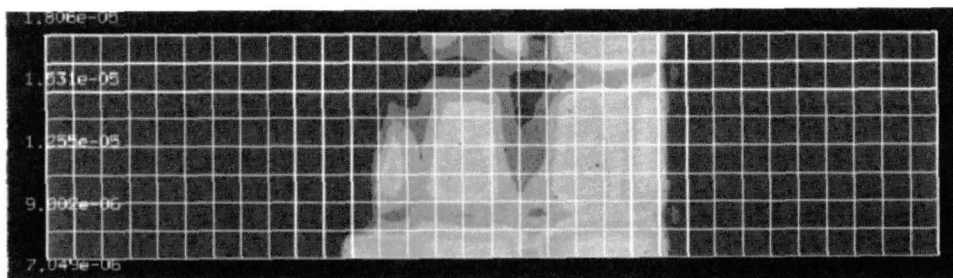
図 16 長軸方向応力の応答



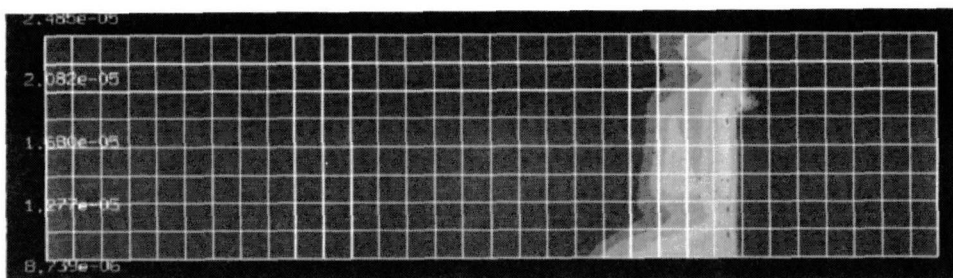
(a) 30ms



(b) 40ms



(c) 47ms



(d) 49ms

図 17 軸方向衝撃力によるクラック発生シミュレーション

5. 結論

以上の結果を要約すれば次のようになる。

(1) 端部に動的一様入力荷重を受ける繊維強化複合構造の入力直後の変位応答および応力応答結果が得られた。これにより軸方向に衝撃の入力を受ける場合、固有値による自由振動に移行する以前に高速で軸方向に伝播・反射する波動伝播の影響が大きいことを示した。

(2) Interphase層を設けた場合に母材と補強材の境界における波動エネルギーの反射が小さくなり、波動エネルギーはより多く補強材に伝達される。⁹⁾図8ではこれらの影響が若干見られた。

(3) 端部の荷重の載荷幅比 d/b を変化させると載荷点近傍での応答は短軸方向の波動伝播の影響も加わりより複雑なものとなる。

(4) 応力の応答を可視化して検討した結果、長軸方向の補強材に大きな波動エネルギーが集中している状況が確認された。また波動エネルギーが1本の補強材に集中するCase IIのような場合には、母材中で補強材が屈服するか塑性化する可能性があることが推測された。

(5) 軸方向主鉄筋と帯鉄筋を有する鉄筋コンクリートばりが軸方向に衝撃力を受ける場合に載荷直後に軸方向の波動エネルギーの集中によってコンクリートのひび割れが発生することをシミュレーションにより確認できた。

本研究は阪神大震災における橋脚の軸方向の衝撃破壊に着目して、その数値解析シミュレーションを目指して実施された。研究の必要性を強調された大阪市立大学の小林治俊助教授に感謝いたします。また貴重なご指摘をいただいた査読者の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 大島俊之、能町純雄：有限プリズム法による繊維強化複合材料の縦波動伝播速度の研究、土木学会論文報告集、第297号、1980年5月
- 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 Vol 39、pp21-24,1994.

3) T. Oshima, R. D. Kriz, S. G. Nomachi : Simulation and Visualization of Stress Wave Propagation in Composite Laminate with Interphase Layer, Nondestructive Characterization of Materials, 1991.

4) T. Oshima and S. G. Nomachi : Torsional Wave in the Fiber Reinforced Rectangular Bar, Trans. of Japan Society of Composite Materials, Vol.9, No.1, 1983.

5) 三上修一、大島俊之、角田與史雄：劣化したコンクリートばりを伝播する応力波動のシミュレーション解析、土木学会北海道支部論文報告集、第50号、No.I-40,pp192-195,1994.

6) 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ミュレーションと非破壊評価への利用、構造工学論文集 Vol 39 A、pp371-378,1990.

7) 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 Vol 39 A、pp435-444,1993.

8) 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.

9) 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.

10) 園田恵一郎、小林治俊：兵庫県南部地震時における土木構造物の地震構造物の地震衝撃破壊について、土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会資料、平成7年4月4日

11) S.P.Timoshenko and J.N.Goodier : Theory of Elasticity, Third Ed., McGraw - Hill, 1951

(1995年9月18日受付)