

## 爆破荷重を受ける AFRP シート接着されたコンクリート版の 弾塑性衝撃応答解析手法の妥当性検討

An applicability of impact response analysis method for concrete slabs bonded with AFRPs subjected to blast loading

岸 徳光\*, 大野 友則\*\*, 三上 浩\*\*\*, 澤田 純之\*\*\*\*

Norimitsu Kishi, Tomonori Ohno, Hiroshi Mikami and Sumiyuki Sawada

\* 工博 室蘭工業大学理事・教授 工学部 建設システム工学科(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\* 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\* 博(工) 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

\*\*\*\* 博(工) 室蘭工業大学 博士研究員 工学部 建設システム工学科(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In order to establish a rational numerical analysis method for properly estimating impact response characteristics of RC slabs reinforced bonding Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP) sheet under blast loading, a simple three-dimensional elasto-plastic finite element method was proposed and its applicability was investigated comparing with the experimental results. In this study, total ten RC slabs with/without bonding AFRP sheet were tested varying number of sheet piles and volume of detonating powder. From this study, it is confirmed that assuming tensile strength of concrete as  $0.2f'_c$  ( $f'_c$ : compressive strength of concrete) by considering strain rate effects and converting tensile strength for each element size of concrete based on the equivalent tensile fracture energy concept, an impact response behavior of the RC slabs under blast loading may be properly analyzed.

**Key Words** : contact detonation, stand-off detonation, concrete slab, AFRP sheet, elasto-plastic impact response analysis

**キーワード** : 接触爆破, 近接爆破, コンクリート版, 二方向 AFRP シート, 弾塑性衝撃応答解析

### 1. はじめに

発破を用いて高層ビルなどの構造物を瞬時に崩壊させ解体・除去する方法は、重機や人間の手によって解体する従来の解体工法と比べ、高所での危険な作業を必要とせず、工期短縮や安全性、経済性の面で有利な点が多い。現在、この種の工法は、優れた解体工法として特に米国で多く用いられているようである。一方、日本では RC 構造物が全て耐震構造のため鉄筋量も多く強固であることや都市の中心部に多く建設されていることより、爆破による解体工法は殆ど適用されていない。そのため、我が国ではこの種の工法に関する知識・経験が少ないのが現状である。ただし、完全に適用例がないわけではなく、高島の RC 造りアパートの爆破解体や筑波科学万博会場、琵琶湖湖畔の古ホテルの取り壊し、老朽化した橋梁に関する爆破解体事例はある。しかしながら、今後は戦後建設された RC 構造物を中心に使用性能を保証できずに解体しなければならないケースが多々生じるものと考えられること

や、少子高齢化に伴う労働者不足がますます深刻化するだろうこと、また経済性等を考慮すると、この種の解体工法の適用事例は我が国においても年々増加するものと推察される。

また、近年では 2001 年の 9 月 11 日における米国世界貿易センタービル爆破事件以来、世界各地で爆弾や爆薬を用いたテロ事件が多発している。このことは、今や我が国においても人ごとではなく、この種の攻撃に対しても国民の安心・安全を確保するための国としての努力が必要であるものと判断される。

このように、爆破による破壊力は、効率よく利用すれば平和的な産業として成立する一方、軍事的に用いられれば最悪の事態を招く。前者の場合には平和的に応用する手だてに関する研究が必要であるし、後者の場合にはその破壊力を効率的に防御するための防護施設に関する研究が必要となる。

防護構造物等、爆発荷重に対する RC 部材の耐衝撃性に関する問題に限定して考えると、我が国では旧防衛庁第 4 研究所<sup>1)~5)</sup> や防衛大学校<sup>6),7)</sup> を中心に、

表-1 実験ケース一覧

ケース名	実験の種類	シート層数	爆薬量 $w$ (g)	版厚 $t$ (mm)
T46-N	接触爆破 ( $e = 0$ mm)	-	46	80
T46-S1		1	46	
T46-S2		2	46	
U46-N	近接爆破 ( $e = 70$ mm)	-	46	80
U46-S1		1	46	
T100-N	接触爆破 ( $e = 0$ mm)	-	100	100
T125-S1		1	125	
T100-S2		2	100	
U175-N	近接爆破 ( $e = 70$ mm)	-	175	100
U175-S2		2	175	

RC 梁や版部材の損傷評価や遠心力爆破実験装置による地下構造物を想定した爆破応答に関する実験的研究がある。しかしながら、爆破荷重載荷実験は、爆風圧による災害防止やコンクリート片の飛散防止、爆発音の消音対策のために特殊な格納施設内で実施されなければならない。また、作業者の資格等の制限を受けるため、特定の研究機関以外での実施は不可能であり、実験データも必然的に限られたものになる。従って、RC 部材の合理的な耐爆設計手法は、簡易で精度の高い数値解析手法を確立し、実験のみならず数値解析的な手法を援用して構築されなければならない。

一方、爆発荷重を受ける構造物の応答解析に関しては、安藤ら<sup>8),9)</sup>は近接爆発荷重を受ける RC 梁を対象に固体要素を用いた 3 次元弾塑性有限要素解析を行い、実験結果との比較によりその妥当性を検討している。検討結果、RC 梁の動的応答に関しては、コンクリートの降伏条件式 (von Mises 条件と Drucker-Prager 条件) の影響は小さいが、コンクリートの引張破壊圧力の影響は大きく、引張破壊圧力をコンクリートの圧縮破壊強度の 1/5 とする場合は実験結果を良くシミュレートすることを報告している。また、大久保ら<sup>7)</sup>は、接触あるいは近接爆発下の矩形 RC 板の動的挙動を 2 次元軸対称問題として取り扱い、解析を試みている。検討結果、ひずみ速度が  $10^3$  1/s とする場合は実験結果を比較的良くシミュレートできることを示している。そのときのコンクリートの引張強度は、静的な圧縮強度が 25.9 MPa の場合に 34.8 MPa となる。その他、片山ら<sup>10)</sup>は実規模のコンクリートアーチ構造内部で TNT 爆薬が爆発した場合における数値解析を行っている。このように、我が国においても数少ない実験結果に基づいて、RC 部材に関する弾塑性応答解

表-2 コンクリートの力学的特性値

密度 $\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	弾性係数 $E_c$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_c$
2.309	30.9	20.6	0.186

表-3 二方向 AFRP シートの力学的特性値

繊維目付量 (g/cm <sup>3</sup> )	厚さ $t_f$ (mm)	弾性係数 $E_f$ (GPa)	引張強度 $f_f$ (GPa)	破断ひずみ $\epsilon_f$ (%)
445/445	0.286/0.286	118	2.06	1.8

析手法の確立に向けた検討が行われるようになってきた。

本研究では、上述のように爆発荷重を受けるコンクリート構造物に関する数値解析手法の確立に向けた検討の一つとして、アラミド繊維 (AFRP) シートを接着補強した矩形コンクリート版に関する近接爆発実験結果を対象に 3 次元弾塑性応答解析を試み、実験結果と比較することによりその妥当性について検討を行った。なお、本数値解析では、衝撃応答解析用汎用プログラム AUTODYN<sup>11)</sup>を用いている。

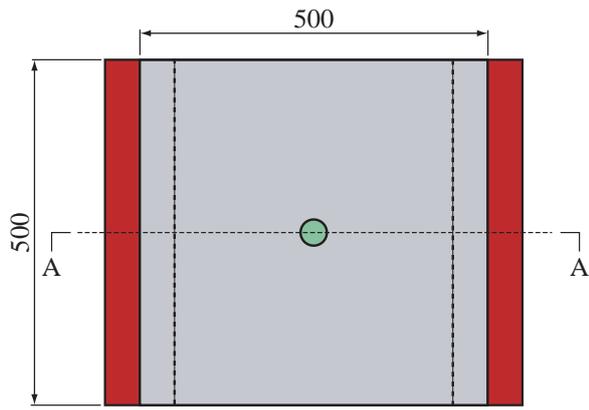
## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要および実験方法

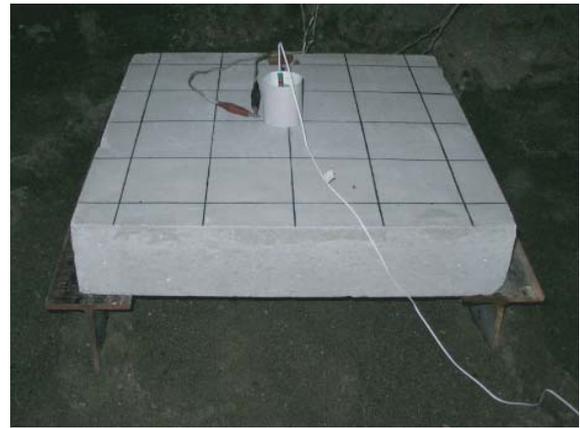
表-1 には、本研究で実施した爆破実験の実験ケースの一覧を示している。表中、ケース名の第一項目には爆破位置 (T: 接触爆破, U: 近接爆破) に爆薬量 (g) を付して示している。また、第二項目にはコンクリート版の補強状況 (N: 無補強, S: シート補強) を示しており、付随する数字はシート層数を示している。また、表-2、表-3 には、本実験で使用したコンクリートおよび二方向 AFRP シートの力学的特性値 (公称値) を示している。

図-1 には、実験の概要を示している。試験体は  $500 \times 500$  mm、版厚  $t$  を 80 mm または 100 mm とした無筋コンクリート版である。裏面接着シートには二方向 AFRP シートを用い、1 層もしくは 2 層を裏面全体に接着している。爆薬にはプラスチック爆薬の一種である C4 爆薬を用い、高さ / 径 = 1 の円柱状となるように成形している。

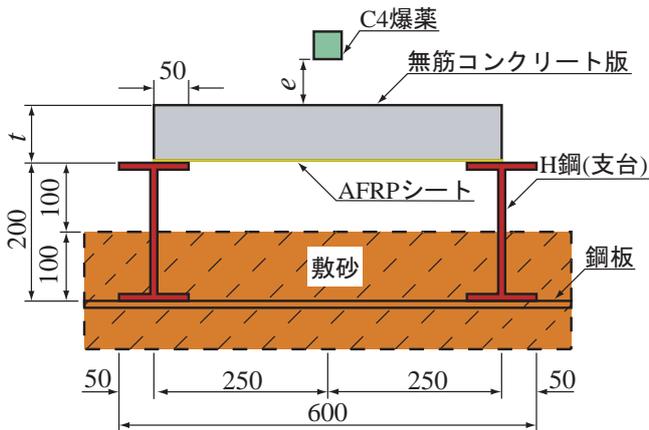
図-1 (b) に示されているように、各試験体は、深さ 100 mm の敷砂中に設置された鋼板上に中心間隔が 500 mm となるように H 形鋼を設置し、その上に試験体の支持幅が 50 mm となるように設置した。境界条件としては、1 対辺単純支持 1 対辺自由支持に近い状態になっているものと判断される。爆薬はコンクリー



(a) 平面図



(a) 接触爆破の実験状況



(b) A-A断面の状況 (Unit:mm)



(b) 近接爆破の爆薬設置状況

図-1 実験概要

写真-1 実験状況および爆薬設置状況

ト版中央鉛直上に設置し、爆薬の上面に6号電気雷管を装着して起爆した。爆破距離 $e$ は爆薬底面からコンクリート版上面までの距離であり、0、70 mmの2ケースを設定した。爆薬量は46、100、125、175 gの4ケースである。実験は、最初に版厚 $t=80$  mmの試験体に対して爆薬量を46 gとした5ケースについて実施し、その破壊状況を参考にして、版厚 $t=100$  mmの場合の爆薬量を決定することとした。なお、写真-1には、実験状況および爆薬設置状況を示している。近接爆破( $e=70$  mm)の場合は、写真-1(b)に示されるような治具を用いて爆薬を一定の高さ( $e=70$  mm)に固定している。

## 2.2 実験結果の概要

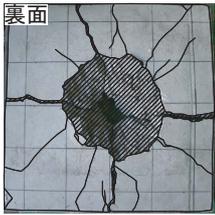
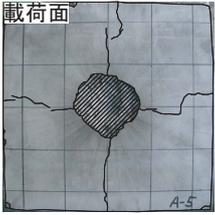
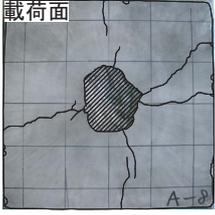
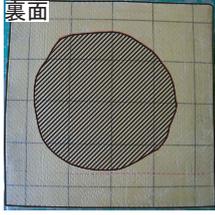
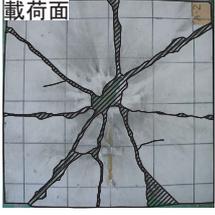
表-4には、版厚80 mmの場合の実験結果をまとめて示している。無補強RC版を用いた接触爆破であるT46-Nの場合と近接爆破であるU46-Nの場合を比較すると、載荷面では損傷(クレーター)の大きさに違いが見られるものの、裏面剥離の大きさや貫通径は両者で類似している。特に貫通径は爆薬の径と同程度である。また、コンクリート版の破壊状況を見ると、

近接爆破であるU46-Nの場合には、接触爆破であるT46-Nの場合に比較してコンクリート版がより多くブロック化していることが分かる。これは、接触爆破であるT46-Nの場合には爆破によるエネルギーがコンクリート版の爆薬設置点に集中してエネルギーが入力されることによりコンクリート版がほぼ4等分に分割破壊されるのに対して、近接爆破であるU46-Nの場合には爆破によるエネルギーが時間差を伴いながら版全体に分散して作用し小割り状に破壊するためと推察される。

次に、コンクリート版裏面にAFRPシートを接着補強する場合であるT46-S1、T46-S2、U46-S1の場合について比較すると、接触爆破であるT46-S1とT46-S2の場合に関しては、シート層数による差異は見られない。また、爆薬の設置位置が異なるU46-S1とT46-S1の場合を比較すると、U46-S1の場合には爆破位置がコンクリート版から離れていることにより、コンクリート版表面の損傷は小さくなっているものの、裏面におけるシート剥離の大きさはT46-S1の場合とほぼ同じである。

表-5には、版厚100 mmの場合における実験結果

表-4 版厚 80 mm における実験結果一覧

ケース名	実験終了後のコンクリート版の状況			実験終了後のコンクリート版の損傷状況
T46-N				<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 載荷面中央に損傷</li> <li>・ 中央部は貫通</li> <li>・ 裏面中央に裏面剥離</li> <li>・ 四つに分割される形で破壊</li> </ul>
T46-S1				<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 載荷面中央に損傷</li> <li>・ 十字にひび割れ</li> <li>・ 裏面中央にシート剥離</li> </ul>
T46-S2				<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 載荷面中央に損傷</li> <li>・ 十字にひび割れ</li> <li>・ 裏面中央にシート剥離</li> </ul>
U46-N				<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 中央部のひび割れは貫通</li> <li>・ 裏面中央に裏面剥離</li> <li>・ 八つに分割される形で破壊</li> </ul>
U46-S1				<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 載荷面中央に小さい損傷</li> <li>・ ⊥字にひび割れ</li> <li>・ 裏面中央にシート剥離</li> </ul>

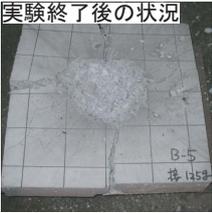
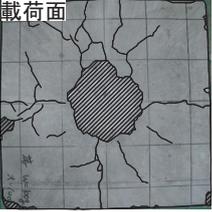
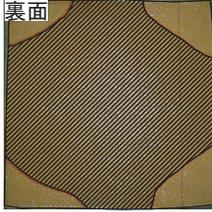
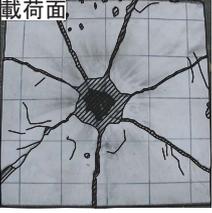
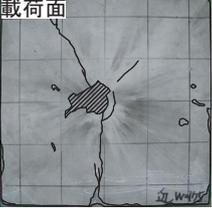
をまとめて示している。AFRP シートで補強していない T100-N, U175-N の場合における結果を見ると、T100-N の場合にはコンクリート版が無数の小さい塊に粉砕されている。一方、U175-N の場合には爆薬量が多いものの、コンクリート版は数個のブロックに分割される程度の破壊となっている。これは、U175-N の場合は T100-N の場合に比して爆薬量が多いもののコンクリート版から離れて設置されていることにより、破壊力も小さくなったものと推察される。

次に、コンクリート版裏面に AFRP シートを接着補強する場合について見ると、T125-S1 の場合には T46-S1 の場合（表-4 参照）に比して爆薬量が多いため載荷面の損傷が大きく、裏面に接着したシートはコンクリート版から完全に剥離し、かつコンクリー

ト版は四分割されて破壊している。接触爆破である T100-S2 の場合には、裏面のシートが4隅部を除き大部分で剥離しているもののコンクリート版はブロック化せず、T125-S1 の場合に比較して損傷が抑制されていることが分かる。近接爆破である U175-S2 の場合には載荷面の損傷も小さく、裏面にも中央部に円形状の剥離が見られる程度であった。

以上より、(1) 接触爆破では載荷面側の損傷が近接爆破に比して激しくなる一方で、版全体の破壊は近接爆破の方が顕著となる傾向にあること、(2) シート補強により載荷面側の損傷や版全体の破壊が顕著に抑制されるものの、シート層数の影響は顕著ではないこと等が明らかとなった。

表-5 版厚 100 mm における実験結果一覧

ケース名	実験終了後のコンクリート版の状況			実験終了後のコンクリート版の損傷状況
T100-N				<ul style="list-style-type: none"> <li>・無数の小さい塊に粉砕</li> </ul>
T125-S1				<ul style="list-style-type: none"> <li>・載荷面中央に大きい損傷</li> <li>・中央部のひび割れは貫通</li> <li>・裏面のシートは全面剥離</li> <li>・四つに分割される形で破壊</li> </ul>
T100-S2				<ul style="list-style-type: none"> <li>・載荷面中央に損傷</li> <li>・裏面中央の大部分でシート剥離</li> </ul>
U175-N				<ul style="list-style-type: none"> <li>・載荷面中央に損傷</li> <li>・中央部は貫通</li> <li>・裏面中央に裏面剥離</li> <li>・七つに分割される形で破壊</li> </ul>
U175-S2				<ul style="list-style-type: none"> <li>・載荷面中央に小さい損傷</li> <li>・裏面中央にシート剥離</li> </ul>

### 3. 数値解析概要

#### 3.1 数値解析モデル

本数値解析に用いている衝撃応答解析用汎用プログラム AUTODYN は、Euler 法と Lagrange 法の二種類の定式化方法を併用している。Euler 法は、要素を空間に固定させ要素間を物質が移動することにより、物質の動的挙動を示す方法であり、爆発や流体問題に対して有効である。Lagrange 法は、要素が物質の変化に従って変形するため基本的には固体に用いられる。本数値解析では、これら二種類の定式化法を併用しているため、以下にそれらモデルの詳細を示す。

図-2(a)には、空気を除いた各構成要素の要素分割状況を示している。図中、C4 爆薬以外の構成要素に

は Lagrange 法を用いてモデル化し、8 節点固体要素を適用している。図-2(b)には、空気の要素分割状況を示している。なお、本解析で考慮した空気要素の領域は、実験用格納施設壁部からの反射爆風圧のコンクリート版への影響は小さいものと判断し、かつ解析時間の効率化を考慮して、図に示しているように爆薬要素の位置よりも下方の領域でかつコンクリート版周辺に限定することとした。空気および爆薬には Euler 法を適用している。本解析では爆薬による爆風圧の効果を考慮するため、その影響領域に空気要素を配置している。

なお、AUTODYN では、Lagrange 要素の要素長は Euler 要素の場合よりも大きく定義する必要があるため、シートのモデル化には実際のシート厚さ  $t_f$  をそ

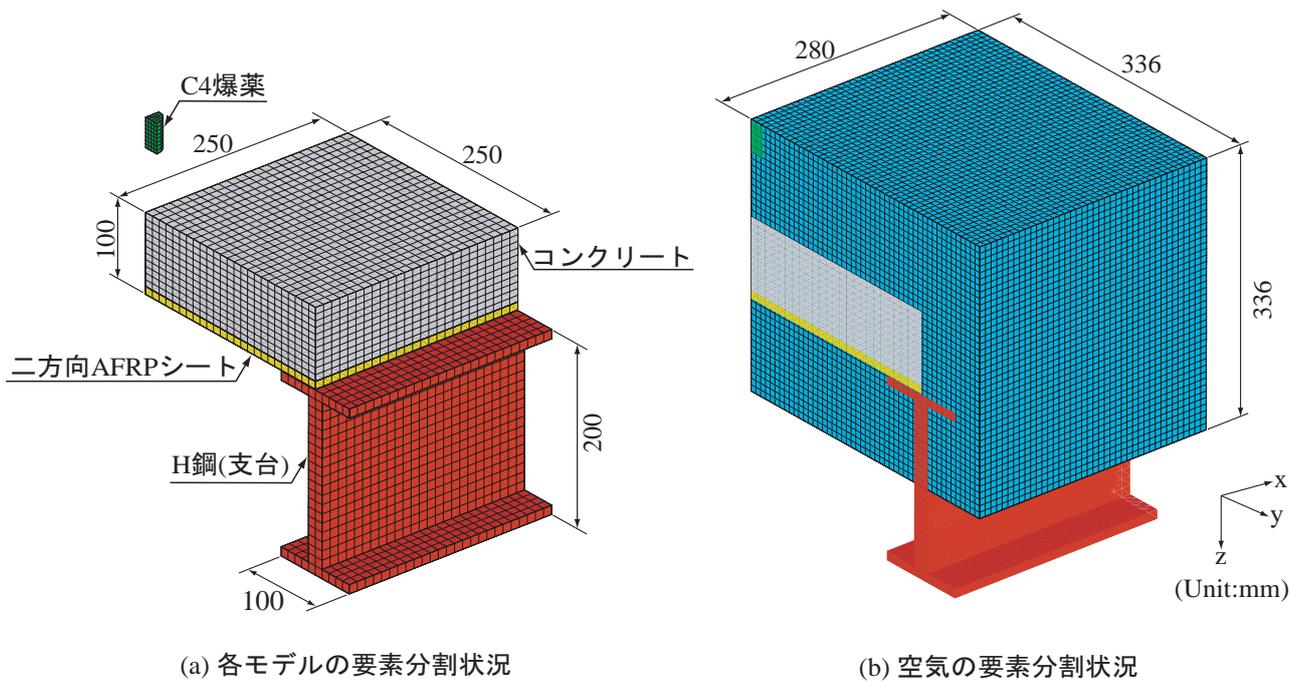


図-2 要素分割状況

のまま使用できない。本研究では、仮想的にシートの厚さを実厚さの10倍に設定し、軸剛性が等価になるように弾性係数  $E_f$  を1/10に換算し低減している。また、解析対象をコンクリート版の対称性を考慮した1/4モデルとすることで、計算時間の短縮を図っている。境界条件に関しては、H形鋼の場合には敷砂に埋設された部分の各節点を完全拘束とした。また、空気領域に対しては、下面（敷砂表面）に完全反射条件、上面および側面に流出境界条件を適用することで、解析に必要な計算領域を最小限に抑えている。

### 3.2 材料構成則および接着界面の取り扱い

図-3には、各材料の応力-ひずみ関係を示している。

コンクリート要素に関しては、図-3(a)に示すように、圧縮側に対しては折れ線近似による相当応力-相当ひずみ関係、引張側に対しては破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとする弾塑性体モデルを適用した。特に、圧縮領域に関しては、0.15%ひずみに達した状態で降伏するものと仮定する完全弾塑性のバイリニア型にモデル化している。その降伏応力には圧縮強度  $f'_c$  を仮定した。また、引張側の破壊圧力は、後述のように最終的に安藤ら<sup>9)</sup>の研究と同様に  $f_t = 0.2f'_c$  と仮定した。引張側の圧力は、要素内に生じる3方向の直応力の平均値 ( $\{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z\}/3$ ) として評価している。

なお、各要素に1個の曲げひび割れを想定し、支持方向の要素長を変化させた場合にも等価なひずみエネルギーでひび割れが発生するように<sup>12)</sup>、要素長に対

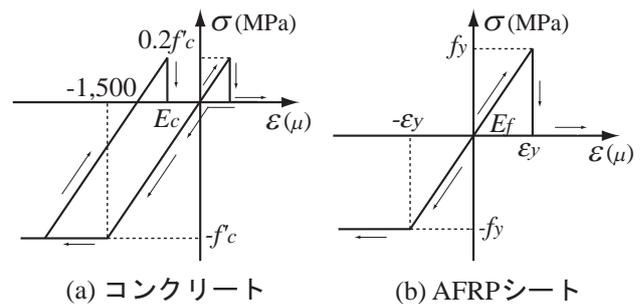


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

応させてコンクリートの引張強度を仮想的に変化させている。すなわち、要素長30mmを基本要素とし、本解析での要素長15mmに対して引張強度を実引張強度の $\sqrt{2}$ 倍に設定して解析を行った。

図-3(b)には、AFRPシートの応力-ひずみ関係を示している。本数値解析では、引張ひずみが破断ひずみ ( $\epsilon_f = 1.8\%$ ) に達した時点で破壊となる構成則を適用している。降伏の判定には、コンクリート、AFRPシートともに von Mises の降伏条件式を採用している。

また、AFRPシートとコンクリート間の接着界面の取り扱いに関しては、以下の理由により特別な処理はせず、コンクリートとAFRPシートは完全付着であるものとして処理することとした。すなわち、JIS規格に基づいたFRPシートの含浸接着樹脂の引張強度試験の規格値が30MPa以上<sup>13)</sup>であるのに対して、コンクリートの引張強度は前述の通り  $f_t = 0.2f'_c$  とする

と  $f_t = 6.18 \text{ MPa}$  となる。これより、シート剥離が生じる場合には、実際は接着界面からの剥離ではなく、接着界面近傍のコンクリートの引張破壊によって生じているものと推察される。本研究では、上述のとおり、コンクリートの引張破壊が評価可能になっていることより、対応してAFRPシートの剥離現象も評価可能であるものと判断される。

なお、FRPシートの剥離問題を取り扱う場合には、通常せん断型の剥離現象も考慮しなければならない。しかしながら、本研究で対象としている荷重は爆発荷重であることより、この種の荷重対して必ず想定しなければならない裏面剥離破壊、すなわちスプール破壊でも明らかのように、直応力成分の波動伝播挙動がシート剥離に大きく影響を与えるものと考えられる。このことより、本研究ではせん断型のシート剥離現象は考慮せずに、接着界面近傍におけるコンクリートの引張破壊のみを用いてシート剥離を評価することとした。

### 3.3 爆風圧に関する状態方程式

本研究では、C4爆薬を用いる場合の爆風圧に関する状態方程式は、AUTODYNの材料ライブラリー<sup>11)</sup>に準じて式(1)に示すJWL(Jones-Wilkins-Lee)式を用いている。

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) \exp \left( -\frac{R_1}{\eta} \right) + B \left( 1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) \exp \left( -\frac{R_2}{\eta} \right) + \omega \eta Q \quad (1)$$

ここで、 $P$ は圧力、 $Q$ は内部エネルギー、 $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$ は材料定数、 $\rho$ は密度、 $\eta = \rho / \rho_0$ 、 $\rho_0$ は参照密度である。なお、C4爆薬に関するJWL式の各パラメータの値は表-6に示すとおりである。また、数値解析に必要となるC-J爆轟速度およびC-J圧力等を表-7に一覧にして示している。

なお、本状態方程式を用いる場合には、接触爆発の場合であるT46-Nにおいて、爆轟圧力は約8GPaであることを確認している。また、近接爆破の場合であるU46-Nにおいて、コンクリート版上にはごく短時間に最大値に達し、その後過減衰的に減少する爆風圧が作用することを確認している。本解析ケースの場合における爆風圧は、作用継続時間、最大圧力がそれぞれ約50  $\mu\text{s}$ 、約0.2GPaであった。

### 3.4 予備解析

爆破実験のような高速荷重問題の場合には、コンクリートのひずみ速度効果が無視できないため、本研究では安藤ら<sup>9)</sup>と同様の手法により基本となる要素の引張強度を圧縮強度の0.1~0.3倍まで変化させた予備解析を行った。

図-4には、T46-Nの場合に関する数値解析結果が

表-6 C4爆薬に関するJWL式のパラメータ一覧

$\rho_0$ ( $\text{g}/\text{mm}^3$ )	$A$ (MPa)	$B$ (MPa)	$R_1$	$R_2$	$\omega$
$1.601 \times 10^{-3}$	$6.098 \times 10^5$	$1.295 \times 10^4$	4.5	1.4	0.25

表-7 C4爆薬に関する材料特性値一覧

C-J爆轟速度 $V_{CJ}$ (m/s)	C-J圧力 $P_{CJ}$ (GPa)	C-Jエネルギー $E_{CJ}$ ( $\text{J}/\text{mm}^3$ )
$8.193 \times 10^3$	28.0	9.0

ら得られる載荷面、裏面および断面の第一主応力分布図と、実験終了後のコンクリート版の損傷状況を重ねて示している。なお、解析結果は零応力を強調し、ひび割れの発生領域が明瞭に示されるように等色レベルを設定している。白色分布は第1主応力が零応力状態であることを表しているが、大きな応力が発生する領域が白色の応力分布を示す場合には、その領域にひび割れが発生していること、特にコンクリート版裏面の場合にはAFRPシートが剥離状態であることを意味している。また、黒色の実線は実験結果のひび割れ分布を示しており、斜線部はコンクリートの剥離剥落部を、また後述の図-5および図-6に示される網掛け部はシート剥離部を意味している。

図-4より、基本要素のコンクリートの引張強度を  $f_t = f'_c / 10$  とする場合には、実験結果に比べてひび割れが多く発生し、引張強度が過小評価となっていることが分かる。一方、 $f_t = 3f'_c / 10$  とする場合には、ひび割れの発生が少なく引張強度が過大評価となっている。 $f_t = f'_c / 5$  とする場合には、解析結果と実験結果が概ね対応していることが分かる。

以上より、本数値解析では、ひずみ速度効果を考慮した基本要素のコンクリートの解析上の引張強度として、実験結果と最も良く対応する場合である  $f_t = f'_c / 5$  を適用することとした。

### 3.5 数値解析ケース

本数値解析は、爆破実験を対象とした再現解析であるため、実験と同一のケースを実施した。なお、ケース名は実験ケースと同様の表記としている。

## 4. 実験結果と数値解析結果の比較

図-5および図-6には、数値解析結果から得られる各コンクリート版に関する載荷面、裏面および断面の第一主応力分布図と、実験終了後の損傷状況を重ねて示している。なお、シート補強を行ったコンクリート版の解析ケースの場合には、シート要素を除去した

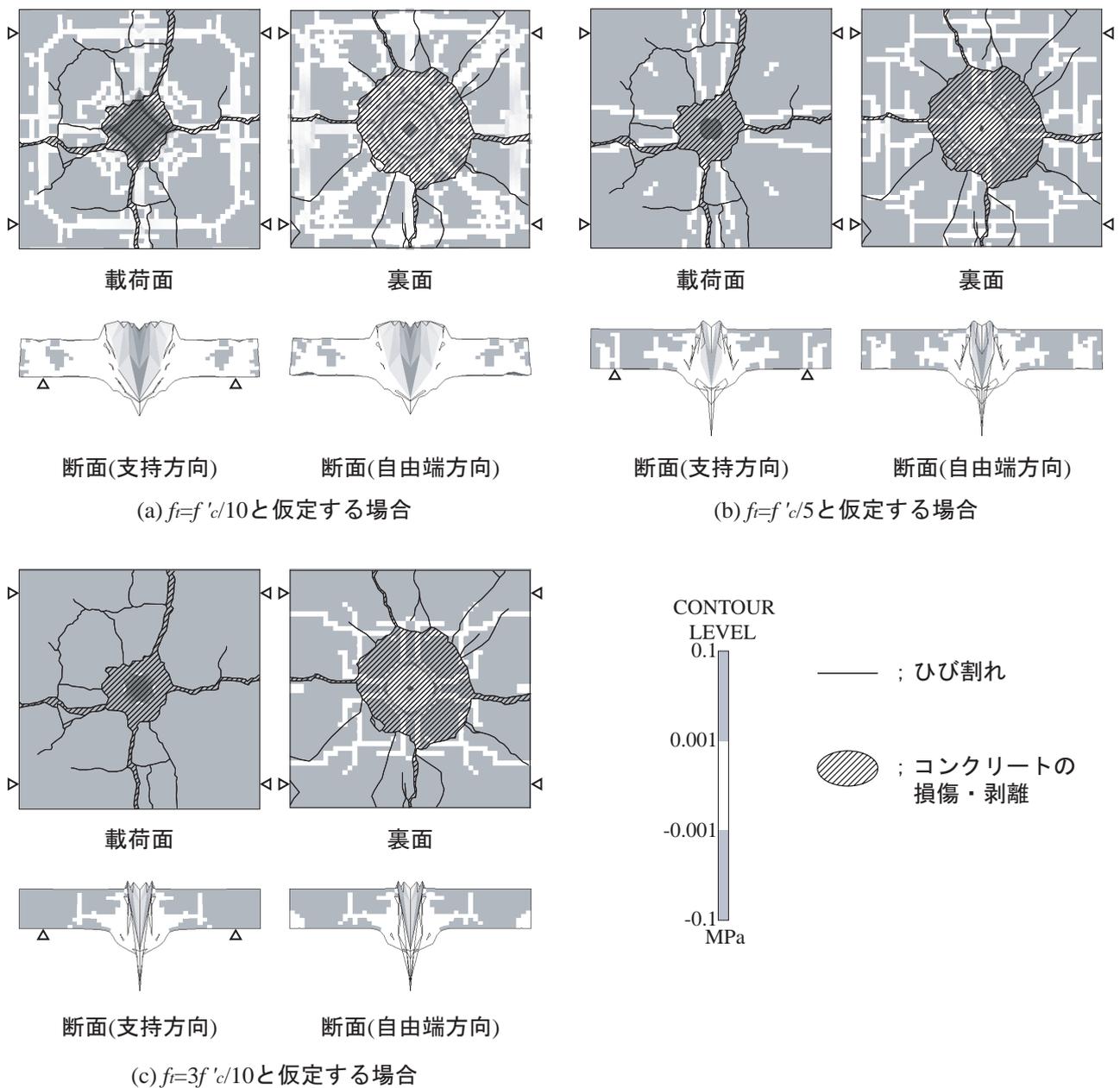


図-4 コンクリートの引張強度を変化させた場合に関する予備解析結果

コンクリート面の第一主応力分布を示している。

図-5には、版厚 80 mm の場合における 5 ケースに関する結果を示している。接触爆破で無補強版である T46-N の場合には、載荷面の損傷や裏面のコンクリートの剥離、ひび割れ、断面図に見られる貫通の様子等、実験結果を良く再現していることが分かる。近接爆破で無補強版である U46-N の場合には、載荷面に損傷が見られないものの、裏面の剥離や貫通の様子は実験結果を大略再現している。シート補強を行った T46-S1, T46-S2, U46-S1 の各ケースの場合には、裏面のシート剥離は実験結果をほぼ再現しており、また T46-S1, T46-S2 の場合には載荷面の損傷やひび割れも再現できていることが分かる。なお、U46-S1 の場

合における載荷面のひび割れ分布は若干の過小評価となっている。

図-6には、版厚 100 mm の場合における 5 ケースの結果をまとめて示している。薬量が 100 g, 無補強で接触爆破である T100-N の場合における解析結果は、ひび割れが載荷面や裏面および断面の全体に広がっているものの、実験結果はコンクリート版が完全に粉砕されているため、比較が困難である。薬量が 175 g である U175-N の場合には、実験結果に比較してひび割れが多く見られるものの、実験結果を概ね再現している。シート補強を行った状態で接触爆破した T125-S1 と T100-S2 の場合には、載荷面の損傷や裏面のシート剥離状況等、実験結果を比較的良く再現

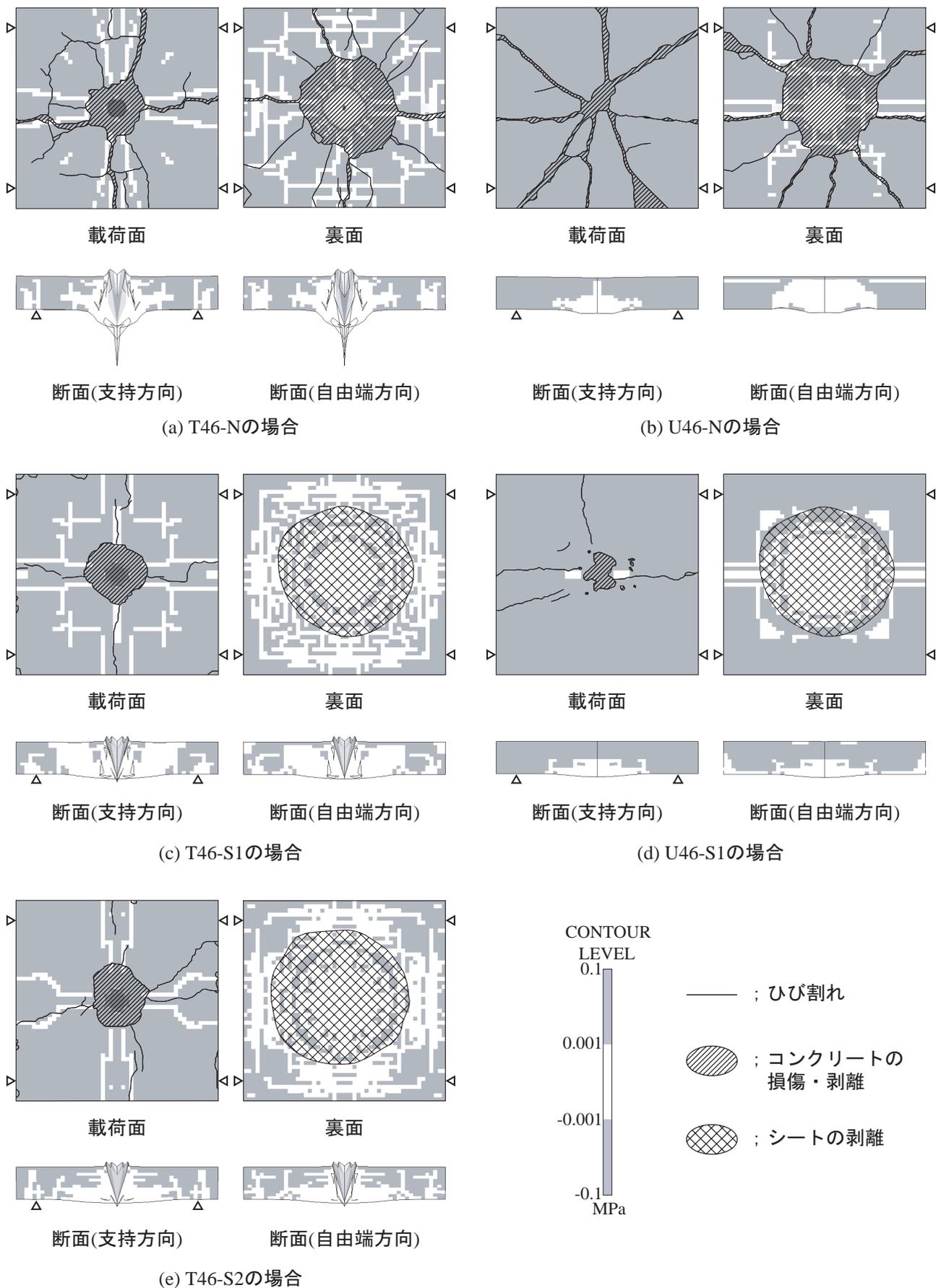


図-5 版厚 80 mm における実験結果および第一主応力分布図

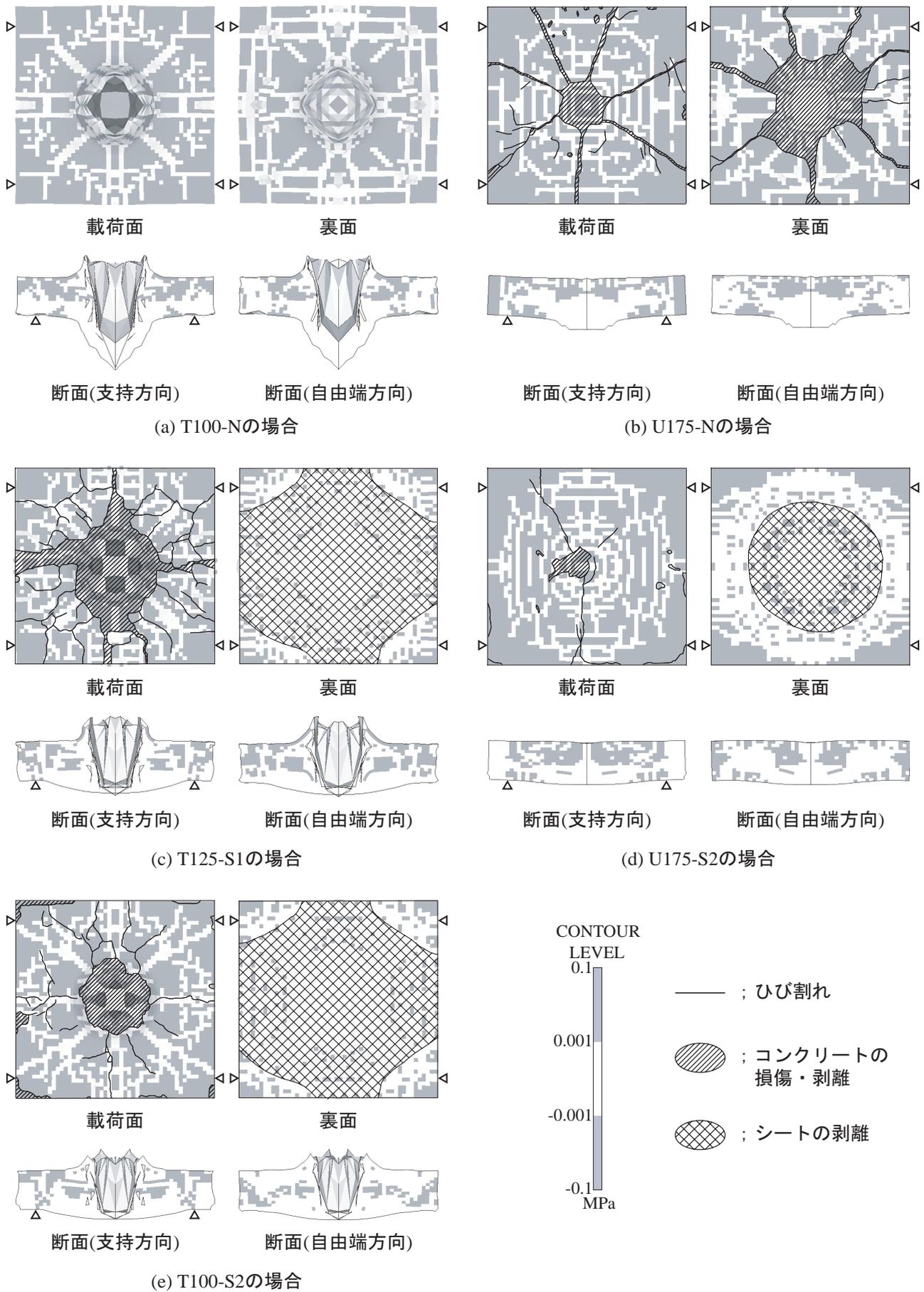


図-6 版厚 100 mm における実験結果および第一主応力分布図

できているものと判断される。また、近接爆破である U175-S2 の場合における解析結果は、実験結果と比較して若干過大評価となっているものの、実験結果を概ね再現している。

以上より、本研究で実施した爆破荷重を受けるコンクリート版に関する実験結果に対して、提案の数値解析手法を用いることにより、AFRP シート補強の有無、爆薬量、版厚にかかわらず大略再現可能であることが明らかになった。

## 5. まとめ

本研究では、爆破荷重を受けるコンクリート構造物の簡易で合理的な衝撃応答解析手法を確立することを目的に、C4 爆薬を用いたコンクリート版の爆破実験に関する弾塑性衝撃応答解析を行った。検討は、補強を目的として二方向 AFRP シートを接着した無筋コンクリート版に関する実験結果の損傷状況と数値解析結果の第一主応力分布を比較する形で行った。

本研究の結果、1) コンクリートの引張側ひずみ速度効果を考慮するために、基本のコンクリート要素に対して引張強度を圧縮強度  $f_c$  の 0.2 倍とすることや、2) 支持方向にコンクリートの要素長を変化させる場合においても、等価なひずみエネルギーでひび割れが発生するように、要素長と対応してコンクリートの引張強度を仮想的に変化させることにより、爆破荷重を受けるコンクリート版の損傷を大略再現可能であることが明らかとなった。また、本解析手法は、シート補強の有無、爆薬量、爆破位置、版厚に関わらず適用可能であることが明らかとなった。

**謝辞：**最後に、本研究を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工学専攻構造力学研究室の鈴木健之君に多大なるご支援を頂いたことを付記し、ここに感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 森下 政浩, 田中 秀明, 伊藤 孝, 山口 弘, 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 46A, pp. 1785-1796, 2000.3
- 2) 田中 秀明, 森下 政浩, 伊藤 孝, 山口 弘, 爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼす爆破位置の影響, 土木学会論文集, No. 675/I-55, pp. 297-312, 2001.4
- 3) 森下 政浩, 田中 秀明: 繰り返し爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷, 土木学会論文集, No. 752/I-66, pp. 317-322, 2004.1

- 4) 森下 政浩, 阿曾沼 剛: 衝撃 3 軸負荷及び衝撃静水圧負荷を受けるコンクリートの変形・破壊挙動, コンクリート工学論文集, 第 16 巻第 2 号, pp. 165-170, 2005.5
- 5) 安藤 智啓, 阿曾沼 剛, 森下 政浩, 松尾 啓: 爆発荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの損傷および応答に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, コンクリート工学協会, Vol. 28, No.2, pp. 829-834, 2006.7
- 6) 市野 宏嘉, 大野 友則, 別府 満寿博, 蓮江 和夫: 地盤の飽和度が爆土圧特性に及ぼす影響とその評価式の提案, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 53A, pp. 1284-1292, 2007.3
- 7) 大久保 一徳, 大山 浩代, 別府 満寿博, 大野 友則, 片山 雅英: C4 爆薬の接触・近接爆薬に対するコンクリート板の損傷評価, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 53A, pp. 1273-1283, 2007.3
- 8) 安藤 智啓, 森下 政浩, 阿曾沼 剛: 近接爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート梁の応答に関する三次元数値解析, コンクリート工学論文集, 第 18 巻第 1 号, 2007.3
- 9) 安藤 智啓, 斎藤 和伸: 爆発荷重を受ける RC はりの応答に与えるコンクリート材料モデルの影響に関する解析的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 53A, pp. 1261-1272, 2007.3
- 10) M. Katayama, M. Itoh, S. Tamura, M. Beppu, and T. Ohno: Numerical analysis method for the RC and geological structures subjected to extreme loading by energetic materials, Proceedings of Design and Analysis of Prospective Structures against Impact/Impulsive/Shock Loads, Tokyo, Japan, pp. 287-297, 2003.12
- 11) Century Dynamics, Inc. : User Manual AUTODYN Version 5
- 12) 岸 徳光, Abdul Qadir Bhatti, 三上 浩, 岡田 慎哉: 破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁に関する衝撃応答解析手法の妥当性検討, 構造工学論文集, Vol.53A, pp. 1227-1238, 2007.3
- 13) アラミド補強研究会: アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領, 1998.1
- 14) 藤本 一男: 防護設計・解析 防護構造物設計の現状と展望, 防衛施設学会誌, 第 4 号
- 15) 市野 宏嘉, 別府 万寿博, 大野 友則, 中辻 博康: 爆弾の地中爆発による周辺爆土圧の距離減衰特性, 防衛施設学会誌, 第 4 号

(2007 年 9 月 18 日受付)