

鉄筋コンクリートの発破解体における鉄筋の影響について

馬 貴臣*, 三宅淳巳**, 小川輝繁**
 緒方雄二***, 瀬戸政弘***, 勝山邦久****

汎用有限要素法コードDYNA-3Dを用い、構造物の発破による解体時の主要倒壊要素である鉄筋コンクリート柱を対象して、コンクリートを弾性体及び弾塑性体との2つの物性モデル及び、鉄筋とコンクリートとの間に接触条件を設置する場合と設置しない場合との2種類の境界条件との組み合わせにより応力状態を解析し、それより推定した破壊状態と実験結果とを比較検討することにより、鉄筋コンクリート柱の発破における鉄筋の影響について検討した。

その結果、発破解体時には鉄筋の存在により鉄筋の極近傍に引張応力集中が発生することが分かった。また、鉄筋と自由面の間に生ずる引張応力は、コンクリートを弾性体として解析した場合には無筋の場合とあまり変化がないが、コンクリートを弾塑性体として解析した場合には無筋の場合とは大きな差が生じ、鉄筋と自由面の間での引張応力が極めて大きくなることが明らかになった。

1. 緒言

近年、老朽化したコンクリート構造物を発破により解体する工法が注目されている。この工法は、迅速かつ経済的であるが、地震国である日本では諸外国に比べ構造物の単位鉄筋量が多く、容易に外国の例をそのまま適用することができない。また、発破時の騒音、振動及び飛石に対する周辺環境問題から十分に実用化されていないのが現状である¹⁾。そのため、地震国である日本にとって、発破によるコンクリート構造物を破壊する場合における鉄筋の影響を調べ、その破壊機構を明らかにしておくことは発破解体工法の開発を促進する上で重要である。

1997年9月22日受理

*横浜国立大学工学部物質工学科

現在：応用地質株式会社

〒330-8632 埼玉県大宮市土呂町2-61-5

TEL 048-665-1811

FAX 048-667-9250

**横浜国立大学工学部物質工学科

〒240-0067 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

TEL 045-339-3993

FAX 045-339-4011

***資源環境技術総合研究所安全工学科

〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8564

FAX 0298-58-8558

****資源環境技術総合研究所地殻工学科

〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-3

TEL 0298-58-8500

FAX 0298-58-8508

発破における構造物の破壊機構に関する実験的・理論的研究は多くの研究者によって実施されてきている。特に、弾性理論による応力状態から推定する方法は、純理論的解析とラグランジュ差分法、有限要素法などを用いた数値解析の手法とで行われてきている²⁻⁸⁾。しかし、これら従来の解析では爆源近傍の破壊や塑性領域、また鉄筋コンクリートのような異なる材料を含む場合などの詳細な解析はなされていない。

そこでここでは、既存の汎用有限要素法コードDYNA-3Dを用いて、ビルなどの構造物を発破によって解体する場合の主要倒壊要素である鉄筋コンクリート柱を対象とし、発破後のコンクリートのひび割れ状態から、コンクリートの破壊に及ぼす鉄筋の影響について検討した。計算としては、(1)コンクリートを弾性体、鉄筋を弾塑性体とし、鉄筋とコンクリートを一体とする場合、(2)コンクリート及び鉄筋を共に弾塑性体とし、鉄筋とコンクリートを一体とする場合、及び(3)コンクリート及び鉄筋を共に弾塑性体とし、コンクリートと鉄筋との間に接触条件を考慮する場合の3つのモデルについて、動的応力分布の解析を行った。さらに、1988年都市構造物発破対策委員会が行った「都市構造物発破解体における飛散防護方法の実験」⁹⁾の実験結果を用いて、解析結果の検討を行ったので報告する。

2. 鉄筋コンクリート柱の発破実験

Fig. 1に1988年都市構造物発破対策委員会が行った都市構造物発破解体における飛散防護方法の実験に用

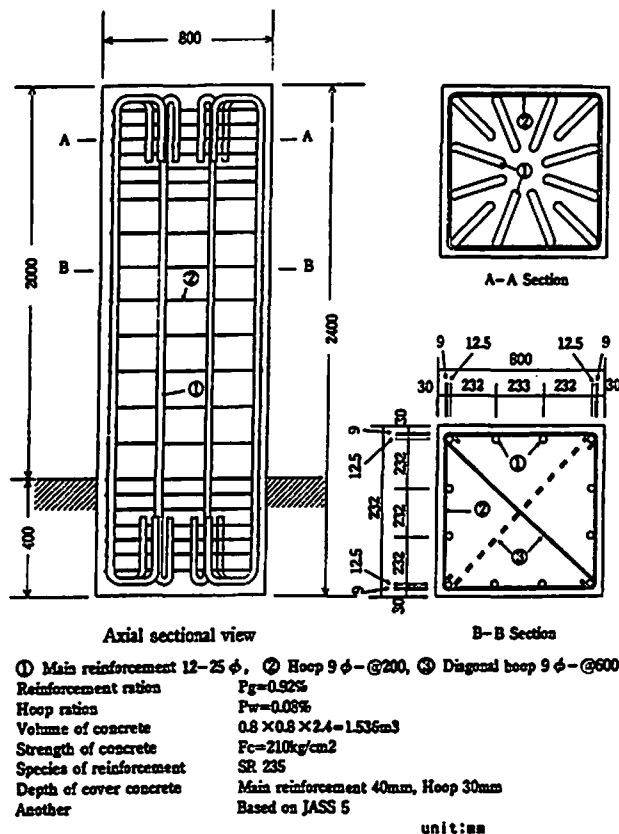


Fig. 1 Structure, size and materials of reinforced concrete sample

いた供試体の概略を示す。鉄筋はSR-24を用い、主筋はφ25mmを12本配筋し、鉄筋比は $P_g=0.92\%$ であった。コンクリート強度は、テストピースの28日強度で

平均35.8MPaであった。爆薬には3号桐ダイナマイトを用い、偏心装薬と中心装薬の2種類の場合について行った。Fig. 2に発破後の写真を示す。写真に示したように、鉄筋とコンクリートとは分離され、鉄筋の位置にあたる表面のコンクリートは縦横に破断され、ひび割れが発生していることがわかる。今回は、このひび割れ状態からコンクリートの破壊に及ぼす鉄筋の影響を検討してみる。

3. 動的応力解析モデルと解析条件

3.1 解析モデル

DYNA-3Dは、米国ローレンスリバモア国立研究所で開発された有限要素法による非線形衝撃応答解析プログラムである¹⁰⁻¹²⁾。この解析法は、陽解法により3次元の非弾性、大変形を伴う構造物の動的応答を解析し、コンパクト・インパクトアルゴリズムを採用することにより、摩擦を伴った面接触や、亀裂の取り扱いを可能にしている。また、1976年以来開発・改良され、物体力と9種類の物性が追加され、爆発を伴った構造や土質構造など、より広範囲な問題のモデル化が可能になった。

今回は、DYNA-3Dを用いて鉄筋コンクリート柱の発破実験における中心装薬の場合について、問題の対称性を利用して媒質の1/4の部分を3次元問題として解析を行った。要素の分割には有限要素法プリプロセッサJMESHを用いた。Fig. 3に数値解析に用いた分割要素を、Fig. 4にモデルの $z=1.0\text{m}$ における断面図を示す。想定した解析モデルでは、模型の z 方向の中央部に z 方向の1つの要素のみに、Fig. 3及びFig.

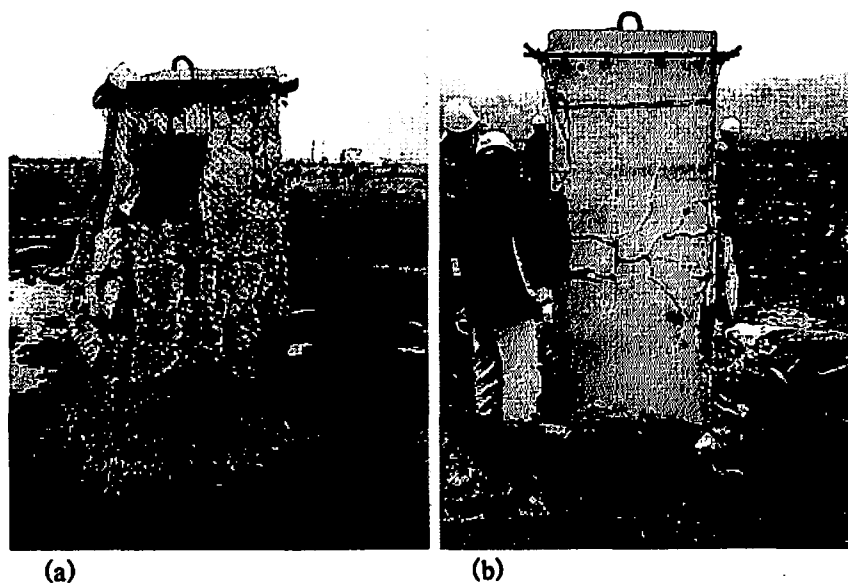


Fig. 2 Fragmentations in reinforced concrete pillar by a blasting
(a) A side view in biased charge
(b) A view from opposite side of the charge in biased charge

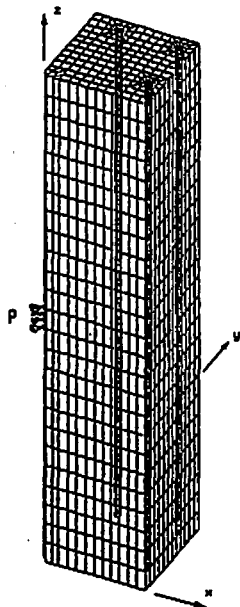
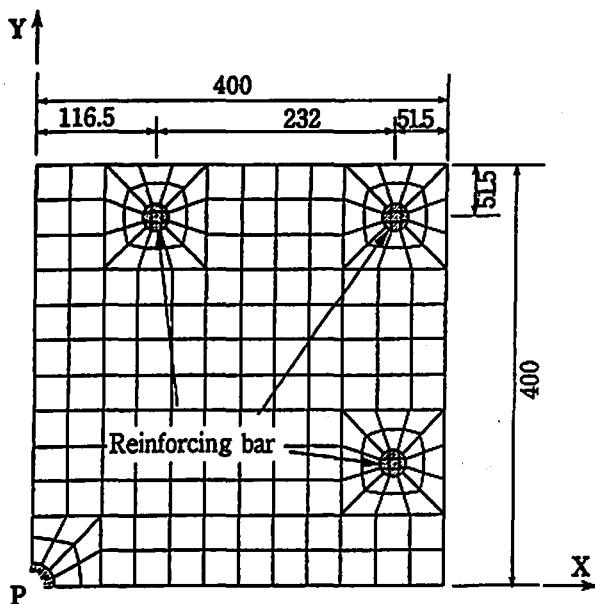


Fig. 3 A simulation model of a reinforced concrete pillar



Unit:mm

Fig. 4 The cross section of a simulation model of reinforced concrete at $z=1.0\text{m}$

4に示した点Pを中心とする装薬孔内壁に圧力を作用させた。Fig. 3に圧力の作用状態がPで示してある。装薬孔の半径を18.5mm、コンクリート部分の正方形要素の一辺の長さを約33mmとし、鉄筋部は半径が12.5mmで、図のように分割した。また、3次元要素のz軸方向の辺の長さを80mmとした。模型の大きさは $x \times y \times z$ が $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 2000\text{mm}$ である。尚、鉄筋とコンクリートを一体としたモデルの場合は要素

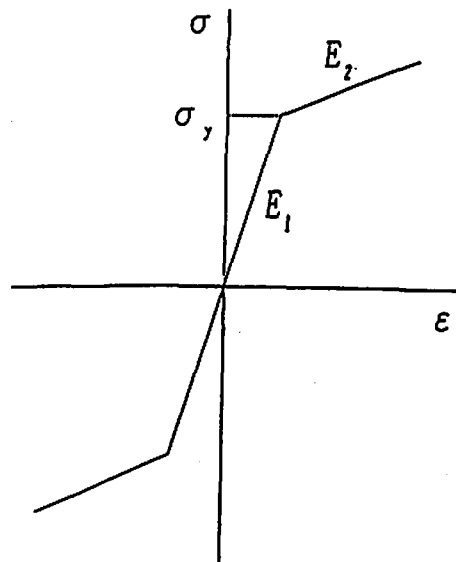


Fig. 5 Isotropic elasto-plastic model of destruction of the concrete and the reinforcing bar in blasting

数が5500、節点数が6422であり、鉄筋とコンクリートとの間に接触条件を設置した場合は要素数が5500、節点数が7358である。

3.2 解析条件

今回は、まず、コンクリートを弾性体として解析を行い、その動的応力状態を検討することにした。また、爆源近傍の破壊現象は、高温・高圧でコンクリートは粉砕されており、未だその破壊に関する構成則は確立されていないと考えている。しかし、爆源近傍の粉砕部分の破壊を考慮しなければ表面に発生した鉄筋に沿った亀裂は説明できないため、その1つとして弾塑性を選んで解析を行った。したがって、解析は、鉄筋とコンクリートとを一体とする場合、及び鉄筋とコンクリートとの間に接触条件を考慮する場合の2種類の境界条件に対し、コンクリートと鉄筋の物性を弾性体と考えた場合と弾塑性体と考えた場合の2種類の物性を考慮し、これらを組み合わせて、以下に示す3つの条件について行った。

- (1) コンクリートの部分を弾性体、鉄筋の部分を等方弾塑性体とし、鉄筋とコンクリートとを一体とした計算。また、要素分割の影響の有無を検討するため、Fig. 3及びFig. 4に示した鉄筋部の物性定数を周囲のコンクリートと同一と仮定した弾性無筋コンクリート柱の場合についても解析を行った。
- (2) コンクリートと鉄筋を共に等方弾塑性体とし、鉄筋とコンクリートを一体とした計算。また、(1)と同様、鉄筋部の物性定数を周囲のコンクリートと同一のものとした無筋コンクリート柱の等方弾塑性体としても解析を行った。
- (3) コンクリート及び鉄筋を共に等方弾塑性体とし、

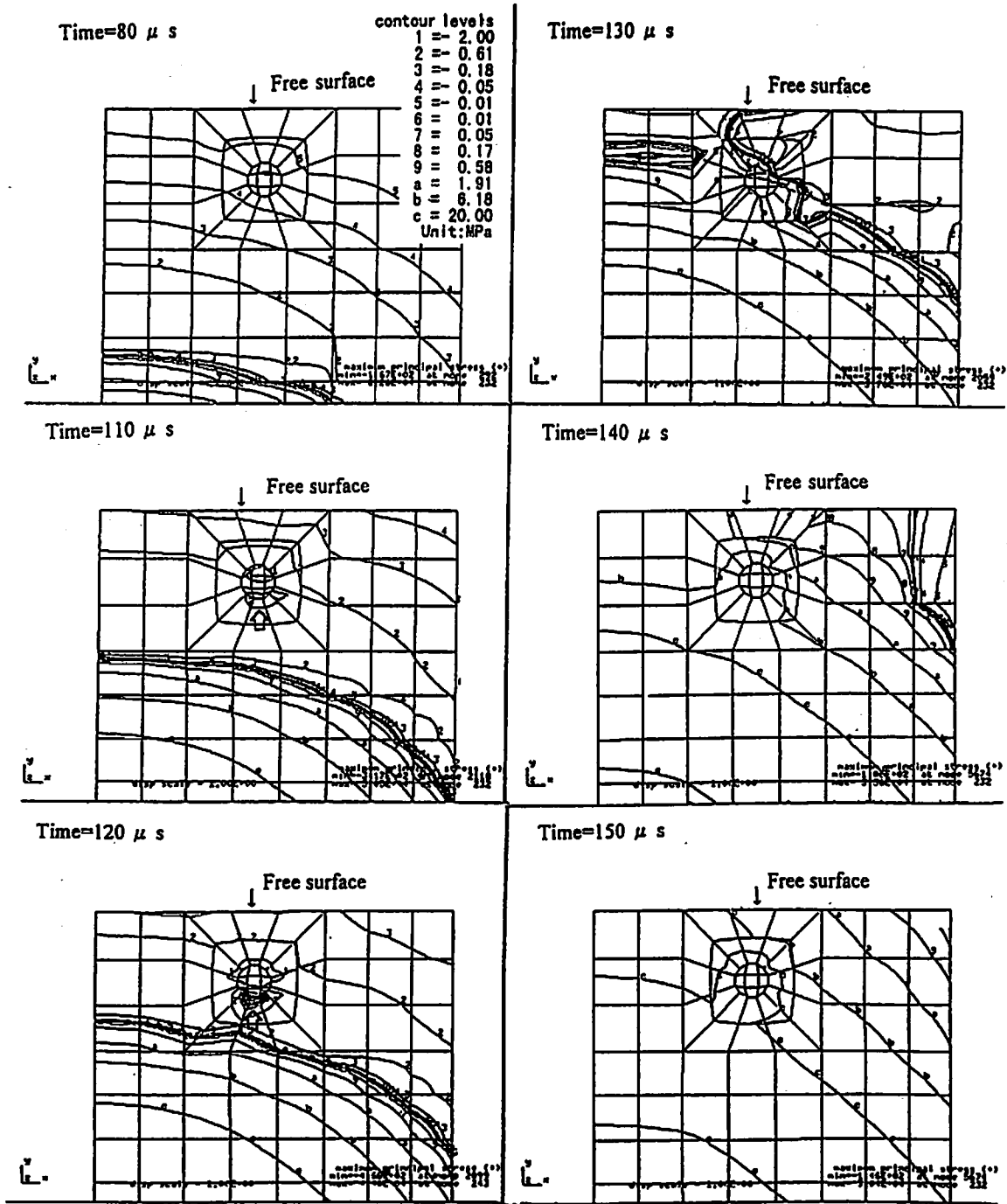


Fig. 6 Maximum principal stress of elastic reinforced concrete pillar with isotropic elasto-plastic reinforcing bar as simulated by DYNA-3D

コンクリートと鉄筋の間に接触条件を考慮した計算。
 模型の定数は、コンクリートの材料実験により、ヤング率が21.0 GPa, ポアソン比が0.144, 密度が2.304 g/cm³, 圧縮強度が38.0 MPa, 引張強度が3.1 MPaであった。また、鉄筋はヤング率が210.0 GPa, ポアソン比が0.29, 密度が7.86 g/cm³, 降伏応力は235 MPaとした。Fig. 5には等方弾塑性体の物性モデルを示す。ここで、 E_1 はヤング率, E_2 は降伏後の接線係数であり、 $E_2 = E_1/10$, σ_y は降伏応力で、今回

はコンクリートの降伏応力値として圧縮強度の値を用いた。また、波動による破壊の場合には通常材料試験による破壊の場合よりはるかに荷重速度が大きいため、コンクリートは上記の強度よりも強くなるものと考えられる⁴⁾。一方、筆者らが実施した棒状試験片のホプキンソン効果に関する実験から、荷重速度が非常に大きい場合のモルタルの引張強度を算出した結果は圧裂実験により求めた強度の約2倍であることが分かっているため^{13, 14)}、本解析では波動の伝播によるコンクリートの引張破壊強度 S_t を圧裂実験により得られ

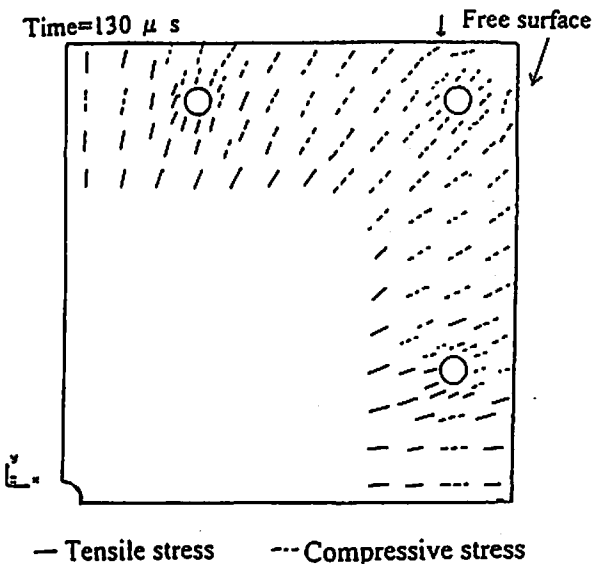


Fig. 7 Maximum principal stress direction of elastic reinforced concrete pillar with isotropic elasto-plastic reinforcing bar as simulated by DYNA-3D

た引張強度の2倍として、発破におけるコンクリートの引張破壊を評価することにした。鉄筋とコンクリートの間の接触条件は、鉄筋とコンクリートとは起爆の瞬間に分離すると仮定する。

模型のz方向の中央部の装薬孔Pの内壁には、(1)式で示されるパルス的な変化をする圧力を作用させた。

$$P(t) = P_0 N (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

ここで、 P_0 は最大作用圧力、 N は α 、 β の値によらず常に $P(t)$ の最大値を P_0 にする定数である。今回は最大作用圧力 P を4.0GPaとし、立ち上がり時間を実験結果から40 μ sになるように設定した。

4. 動的応力の解析結果

4.1 コンクリートを弾性体、鉄筋を弾塑性体とし、鉄筋とコンクリートを一体とした場合

Fig. 6に各時間毎の断面 $z=1.0$ mにおける最大主応力の等主応力線を、Fig. 7に最大主応力の作用面方向の一例を示す。Fig. 8は鉄筋の部分が周囲のコンクリートと同一定数であると仮定した分割要素の影響を調べるためのFig. 6の補助的な解析結果の一例である。Fig. 6及びFig. 8中の1~9及びa~cはそれぞれの等主応力線を示し、凡例に示した応力値を示している。尚、ここでマイナスが圧縮、プラスが引張である。この図では、番号1~5が圧縮応力で、応力の大きさが順次0に近づき、番号6~9及びa~cで引張応力を示している。応力値の範囲は-2.0MPa~20.0MPaである。また、Fig. 7では実線が引張応力、破線が圧縮応力である。

Fig. 6に示したように、応力波の伝播により発生し

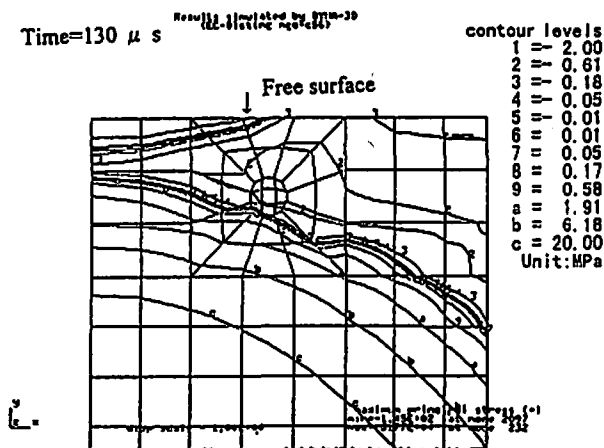


Fig. 8 Maximum principal stress of elastic concrete pillar as simulated by DYNA-3D

た最大主応力は、まず、値が約-0.01MPa~-0.61MPaという圧縮応力で、3主応力とも圧縮応力となる。起爆後時間 $t=80\mu$ sの図は、応力波の先端が鉄筋の位置を通過した瞬間を示す。時間 $t=110\mu$ s及び $t=120\mu$ sでは、印で示した部分で引張応力が生じた。これは、鉄筋の存在により鉄筋の極近傍に応力集中が発生し、引張応力が生じたものと考えられる。時間 $t=130\mu$ sでは、Fig. 8の $t=130\mu$ sの値と比較すると引張応力を示す範囲は幾分広がってはいるが、自由面近傍の引張応力はFig. 8と比較して大きくはならなかった。すなわち、この場合には、鉄筋の剛性が自由面近傍のコンクリートを破壊させないように作用しているものと思われる。

Fig. 7に $t=130\mu$ sの時の最大主応力の作用する面を

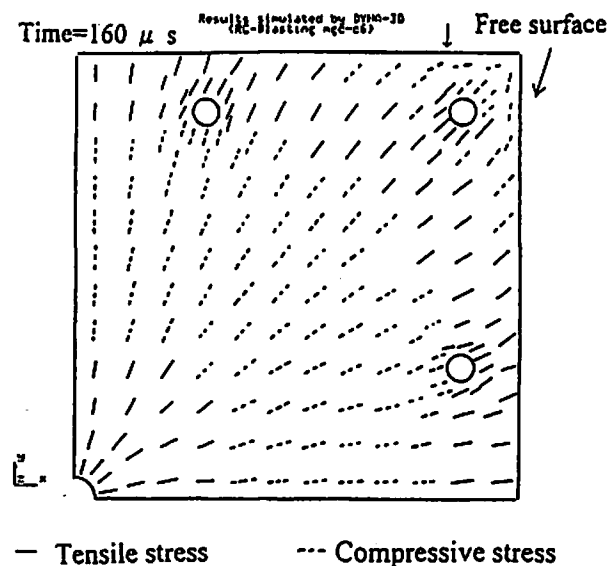


Fig. 10 Maximum principal stress direction of isotropic elasto-plastic reinforced concrete pillar as simulated by DYNA-3D

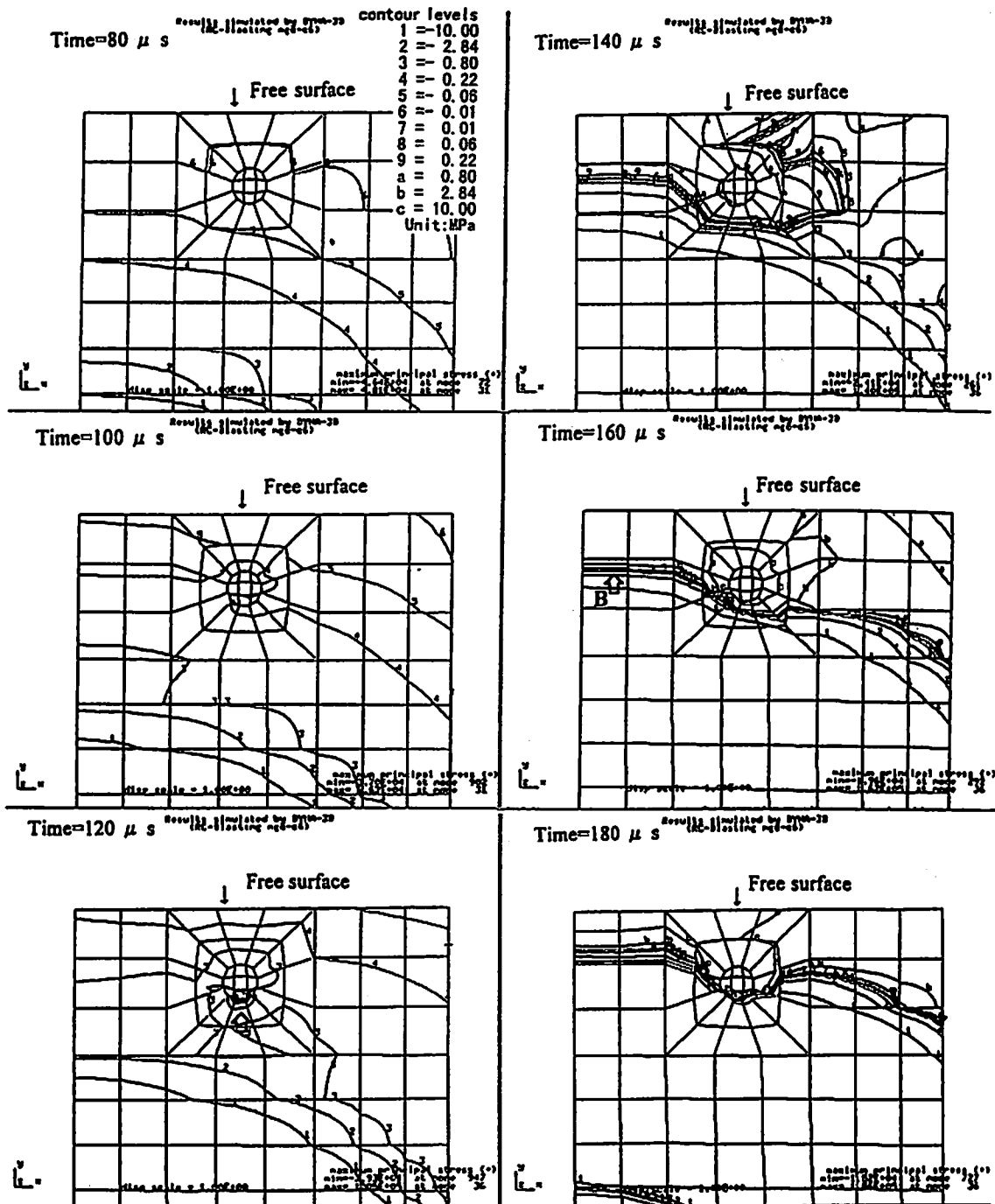


Fig. 9 Maximum principal stress of isotropic elasto-plastic reinforced concrete pillar as simulated by DYNA-3D

示す。鉄筋と自由面の間には最大応力の作用する面が自由面と垂直となっているのが分かる。

4.2 コンクリート、鉄筋の両物性とも弾塑性体で、鉄筋とコンクリートを一体とした場合

Fig. 9に断面 $z=1.0$ mにおける各時間の最大主応力の等主応力線を、Fig.10に最大主応力の作用面方向の一例を示す。Fig.11は鉄筋の部分がコンクリートと同一の物性である場合の要素分割の影響を見るための補助的な解析結果である。Fig. 9及びFig.11の見方はFig. 6と同様である。起爆後時間 $t=80\sim 120\mu$ sの場合に

は、Fig. 9及びFig.11に示したように、応力波の伝播により発生した最大主応力は表示した部分では圧縮となる。これをコンクリートを弾性体として解析したFig.6と比較してみると、Fig.6では最大主応力は先端の圧縮波の後方で引張応力となったが、Fig. 9及びFig.11の場合には先端の圧縮波の後方でも圧縮応力になった。また、Fig. 9をFig.11と比較すると、鉄筋の存在により鉄筋周辺のコンクリートの圧縮応力値が小さくなっていることを示している。Fig. 9の時間 $t=120\mu$ sにおける印 ∇ で示した太い線が引張応力領域と

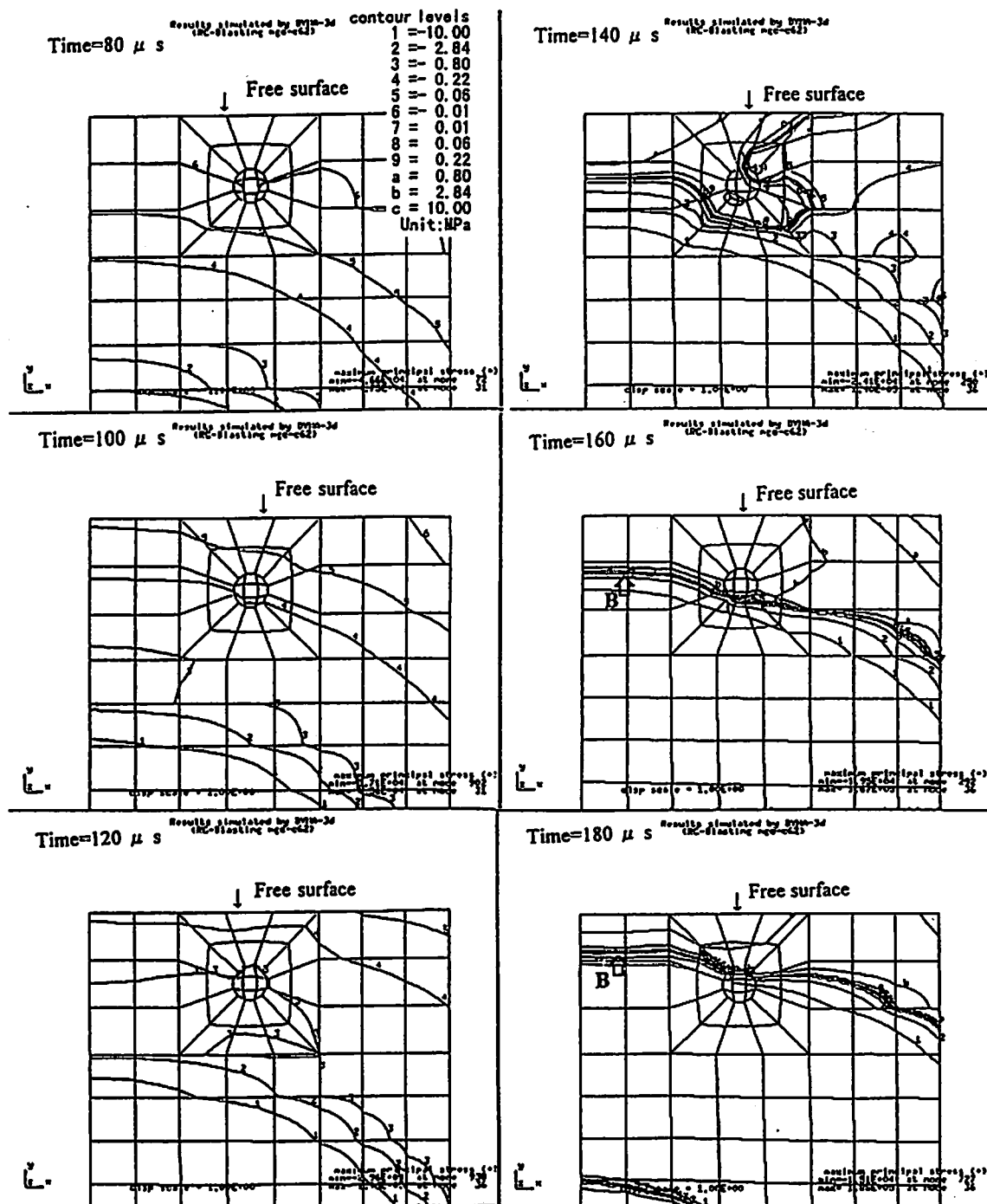


Fig. 11 Maximum principal stress of isotropic elasto-plastic concrete pillar as simulated by DYNA-3D

圧縮応力領域との境界線である。図に示したように、鉄筋周辺のコンクリートにおいては応力集中が発生し、引張応力を示した。これをFig.6と比較すると、Fig.9における引張応力になる範囲は、Fig.6より大きくなるのが分かった。また、Fig.9とFig.11共に、時間 $t=140\mu s$ では圧縮応力波が自由面で反射し、自由面付近の応力は圧縮から引張に変わった。鉄筋周辺の応力はFig.9とFig.11両方とも引張であるが、Fig.9に示した鉄筋周辺の引張応力が極めて大きいことが分かる。

時間 $t=160\sim 180\mu s$ では、爆源からの圧縮応力波が時間とともに自由面に近づいてくる。Fig.9をFig.11と比較すると、鉄筋が存在するFig.9の場合では、鉄筋及び鉄筋付近のコンクリートにおいて引張応力と圧縮応力との境界線B(印)は鉄筋を越えなかったが、Fig.11の無筋コンクリートの場合には、その境界線が鉄筋の位置を越えて自由面近くまで移動した。これは、鉄筋の存在により、鉄筋と自由面との間のコンクリートにおいて引張応力となる部分が無筋コンクリートの場合に比較して広がったことを示している。こ

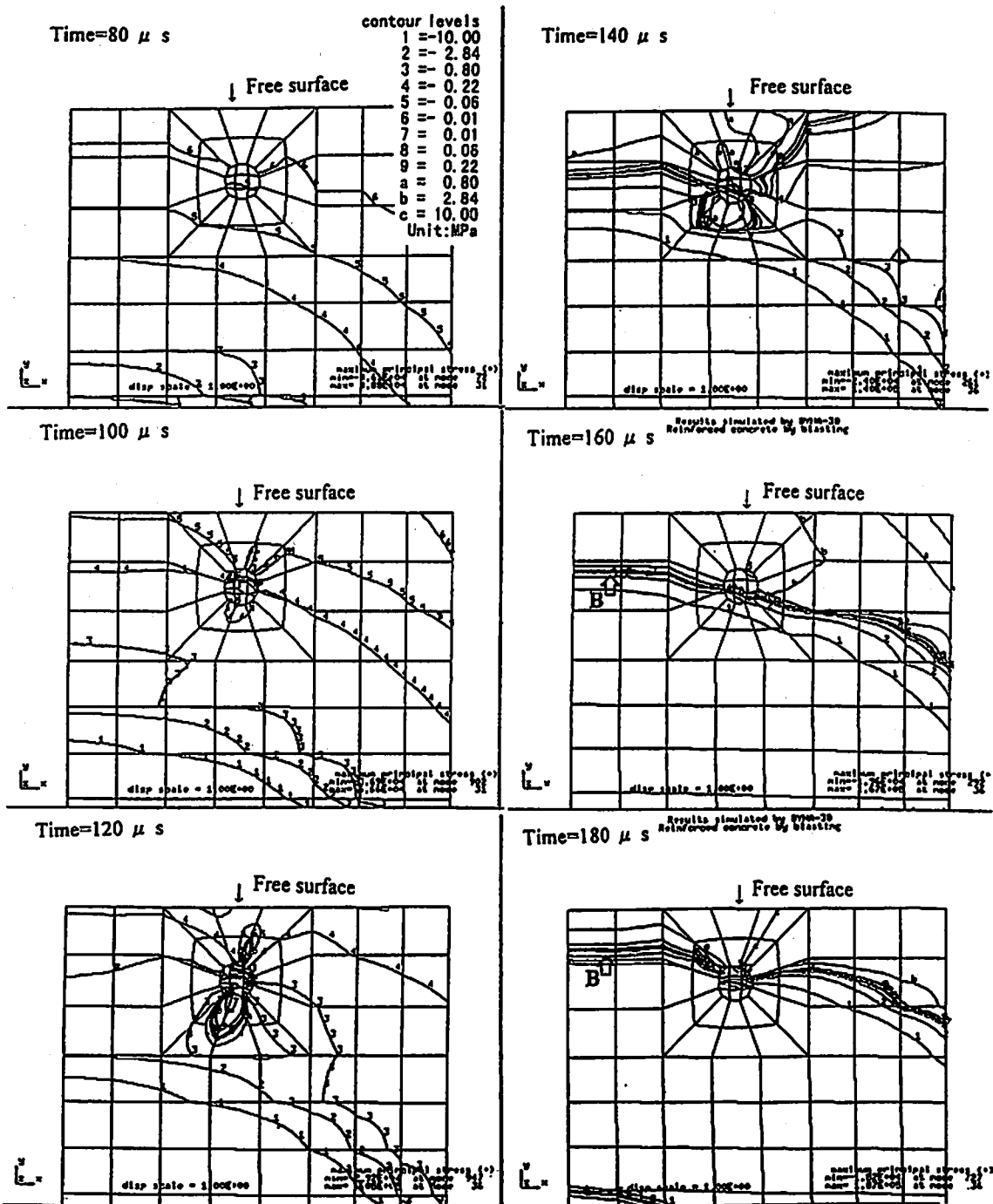


Fig. 12 Maximum principal stress of isotropic elasto-plastic reinforced concrete pillar as simulated by DYNA-3D in the case of supposing sliding interfaces between concrete and reinforcing bar

の現象はFig. 6, Fig. 8には見られず、装薬孔近傍に塑性を考慮したこの解析において鉄筋の影響が自由面近傍にまで大きく現れることが分かった。

また、Fig.10に $t=160\mu\text{s}$ の時の最大主応力の作用する面を示した。鉄筋と自由面の間には最大主応力が引張となっており、しかも、その方向は放射状に近いものであった。

4.3 鉄筋とコンクリートいずれも弾塑性体で、かつ鉄筋とコンクリートの間に接触条件を考慮した場合 Fig.12に断面 $z=1.0\text{m}$ における各時間の最大主応力

の等主応力線を示す。図の見方はFig. 9と同じである。Fig.13に最大主応力の作用面方向の一例を示す。Fig.12に示したように、起爆後時間 $t=80\sim 100\mu\text{s}$ では、応力波の伝播により発生した最大主応力は表示した部分では圧縮の値であるが、鉄筋が圧縮応力波の伝播に影響を与え、鉄筋と自由面の間の応力は圧縮にはならなかった。また、鉄筋周辺のコンクリートでは、装薬孔側における応力集中の発生時間が接触問題を考慮しない場合のFig. 9より早かったことが大きく異なる点である。さらに、時間 $t=120\mu\text{s}$ では、鉄筋と

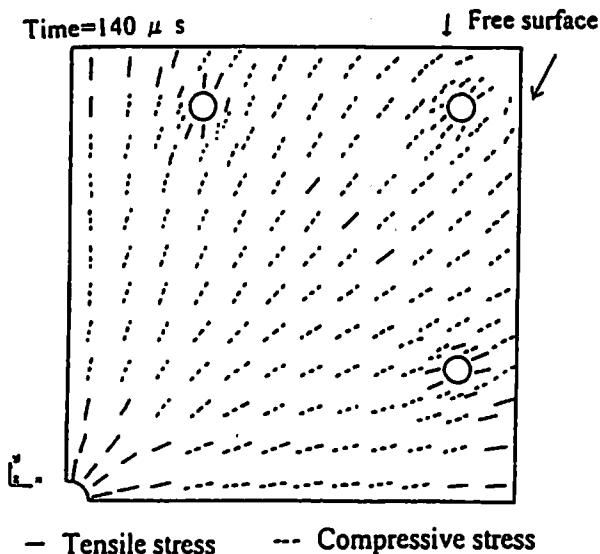


Fig. 13 Maximum principal stress direction of isotropic elasto-plastic reinforced concrete pillar as simulated by DYNA-3D in the case of supposing sliding interfaces between concrete and reinforcing bar

自由面の間のコンクリートにおいても応力集中が発生した。

時間 $t=140\sim 180\mu s$ で鉄筋とコンクリートとの間に接触条件を考慮しない場合のFig. 9及び無筋のFig. 11と比較すると、時間 $t=140\mu s$ では、鉄筋と自由面の間及び鉄筋周辺の引張応力は無筋のFig. 11より大きくなったが、Fig. 9より小さくなった。時間 $t=160\mu s$ では、鉄筋と自由面の間及び鉄筋周辺の引張応力は無筋のFig. 11とほとんど同じになり、Fig. 9よりもっと小さくなった。時間 $t=180\mu s$ になると、鉄筋周辺の引張応力は無筋のFig. 11より少々大きくなったが、Fig. 9より小さくなった。また、引張応力と圧縮応力との境界線が鉄筋を越えて、鉄筋周辺の引張となる範囲は、Fig. 9より小さくなった。これにより、鉄筋と自由面の間に接触条件を考慮した場合の鉄筋の影響は、より無筋の場合に近くなっており、接触条件を考慮しない場合のFig. 9より軽減していると考えられる。

Fig. 13に $t=140\mu s$ の時の最大主応力の作用する面を示した。鉄筋の装薬孔側と自由面側には最大主応力が引張となり、しかも、その作用面は鉄筋の中心からの放射状方向であった。

5. 結 論

本報では、汎用有限要素法コードDYNA-3Dを用いて、ビルなどの構造物の発破による解体時の主要倒壊要素である鉄筋コンクリート柱を対象とし、コンクリートを弾性体及び弾塑性体の2つの物性モデルを仮定した場合について、鉄筋とコンクリートとの間に接触条件を設置する場合及び設置しない場合の2つの境

界条件の組み合わせにより、3つの解析条件について応力状態を解析し、応力状態より推定した破壊状態を実験結果と比較検討することにより、鉄筋コンクリート柱発破における鉄筋の破壊への影響について考察した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 爆源近傍の破砕帯の塑性破壊領域を考慮せず、コンクリートを弾性体として応力解析した場合、鉄筋近傍で引張応力集中は見られるものの自由面付近の引張応力は、無筋コンクリートと仮定した場合と比較して、それほど大きくはならなかった。
- (2) 爆源近傍の破砕帯を塑性領域として考慮し、コンクリートおよび鉄筋を共に等方弾塑性体として解析した結果には、鉄筋近傍での引張応力集中の発生状況は爆源近傍の破砕帯の塑性破壊領域を考慮せず、コンクリートを弾性体とした場合とあまり変わらなかったが、引張応力の値と範囲は極めて大きいことが分かった。また、鉄筋の存在により、鉄筋と自由面の間における自由面付近の最大主応力は柱を縦方向にひび割れるように作用することが明らかになった。
- (3) 鉄筋、コンクリートいずれも弾塑性体でかつ鉄筋とコンクリートの間に接触条件を考慮した場合には、接触条件を考慮しない場合と比較すると、鉄筋の影響は軽減していることが分かった。

以上より、検討した3条件とも鉄筋の存在により、鉄筋の極近傍に引張応力集中が発生するが、鉄筋と自由面の間に生ずる引張応力は、コンクリートを弾性体として解析した場合には無筋の場合とあまり変化がなく、また、コンクリートを弾塑性体として解析した場合には無筋の場合に比較し、鉄筋と自由面の間で引張応力が大きくなることが分かった。

今回の解析では、鉄筋とコンクリートの間に接触条件を考慮しない場合の弾塑性解析は、鉄筋の影響が強調され、接触条件を考慮した場合の弾塑性解析は鉄筋の影響が軽減された。実際の発破では、鉄筋がどの時点でコンクリートから分離するかは明らかにならなかったが、破壊の途中で鉄筋とコンクリートが分離されれば、鉄筋とコンクリートが分離するまでの鉄筋の影響は鉄筋とコンクリートの間に接触条件を考慮しない場合のように大きくなり、その後、最後の接触問題のようになるものと思われる。

謝 辞

本研究の一部は、財団法人火薬工業技術奨励会研究助成金により実施いたしました。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) 世一英俊, 坂田英一, 西村 毅, 三原陽治, ハザ

- マ研究年報, 317-324(1992).
- 2) 伊藤一郎, 佐々宏一, 水曜会誌, 16, 75-78(1966).
 - 3) 佐々宏一, 伊藤一郎, 材料, 21, 123-129(1972).
 - 4) 佐々宏一, 伊藤勝久, 伊藤一郎, 工業火薬協会誌, 34, 30-40(1973).
 - 5) T. G. Barbour, C. Young, Proc. 21st U S Symp. Rock Mechanics, 420-434, University of Missouri-Rolla, MO(1980)
 - 6) N. Utagawa, I. Kondo, N. Yoshida, M. Itoh, N. Yoshida, Microcomputers in Civil Engineering, 7, 151-159(1992)
 - 7) M. R. Akky, D. Rosidi, M. N. Madianos, J. Y. Kaneshiro : Dynamic analyses of large underground caverns using discrete-element codes verification and reliability, in Tunnelling and Ground Conditions, Balkema, Rotterdam, 477-484(1994)
 - 8) 金子勝比古, 松永幸徳, 山本雅昭, 火薬学会誌, 56, 207-215(1995)
 - 9) 末吉康一, 笠井芳夫, 斉藤照光, 富田幸助, 小林茂雄, 工業火薬協会誌, 54, 282-291(1993)
 - 10) G. L. Goudreau and J. O. Hallquist, J. Comp. Meths. Appl. Mechs. Eng., 33, 725-757(1982).
 - 11) J. O. Hallquist, D. J. Benson, DYNA-3D user's manual (Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions), Methods Development Group Mechanical Engineering Department, Lawrence Livermore National Laboratory(1986)
 - 12) 林 卓夫, 田中吉之助, 「衝撃工学」, 269(1988), 日刊工業新聞社
 - 13) 馬 貴臣, 三宅淳巳, 小川輝繁, 和田有司, 瀬戸政弘, 勝山邦久, 久保田士郎, 榊井 明, 火薬学会秋季研究発表会講演要旨, 北九州, 77-78(1996)
 - 14) 馬 貴臣, 三宅淳巳, 小川輝繁, 和田有司, 瀬戸政弘, 勝山邦久, 第29回安全工学研究発表会講演要旨, 横浜, 61-62(1996)
-

Numerical investigation on breakage behavior of reinforced concrete by blasting demolition

by Guichen MA*, Atsumi MIYAKE**, Terusige OGAWA**, Yuji OGATA***
Masahiro SETO*** and Kunihisa KATSUYAMA****

The numerical simulation of the blasting demolition of reinforced concrete has been carried out by using DYNA-3D code. Following three models were used in this study;

- (1) an elastic concrete pillar with isotropic elasto-plastic reinforcing bars
- (2) an isotropic elasto-plastic reinforced concrete pillar
- (3) an isotropic elasto-plastic reinforced concrete pillar considering sliding interfaces between concrete and reinforcing bars

The breakage behavior was estimated by the stress distribution, and the effect of reinforcement in concrete were examined with numerical analysis. Although the tensile stress concentration in the concrete around reinforcing bar was analyzed for three models, stress distribution in each model showed large differences. The main results obtained in this study were as follows;

The tensile stress between reinforcing bar and free surface in elastic concrete pillar with isotropic-elastic-plastic reinforcing bars did not show a significant difference with tensile stress in elastic concrete pillar without reinforcement. However, the tensile stress between reinforcing bar and free surface in isotropic-elastic-plastic reinforced concrete pillar was extremely higher than that in isotropic-elastic-plastic concrete pillar without reinforcement.

(* Department of Safety Engineering, Yokohama National University.

Present address: OYO corporation, 61 - 5 Toro-Cho 2-Chome, Omiya-Shi, Saitama 330-8632, Japan

** Department of Safety Engineering, Yokohama National University, 79 - 5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-0067, Japan

*** Department of Safety Engineering, National Institute for Resources and Environment (NIRE), 16 - 3 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-0053, Japan

**** Department of Geotechnology, NIRE, 16 - 3 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-0053, Japan)