

災害時に破壊された鋼管の緊急修復技術に関する研究(第2報)

鋼管の損傷に対する爆発エネルギーの 寄与と飛翔体の挙動の数値解析

久保田士郎*, 緒方雄二**, 榊井 明***, 和田有司****,
島田英樹*, 松井紀久男*, 瀬戸政宏**, 勝山邦久****

災害時に破壊された鋼管の緊急修復技術として、爆発圧着法の適用を目指し、数値解析的研究を行った。スタンドオフの設定の違いが鋼管の変形量に対する爆発エネルギーの寄与に対してどのような影響を及ぼすのか、一次元衝突問題をもとに検討した。その結果、スタンドオフが短い場合、衝突によるガス圧の再上昇も鋼管の変形増加の一原因であることがわかった。また、二次元流体力学コードを用いて爆薬によって駆動される飛翔体の挙動を調べた。最初の0.5mm程度の飛翔距離では薬量によらずほとんど同じ加速が確認され、200m/s程度まで瞬時に加速される。飛翔距離が2mm程度になると、いずれの薬量の場合も400m/s以上の速度まで加速されることが分かった。飛翔体に作用する生成ガスの圧力は5mm程度の短い距離で急激に減衰する。

1. はじめに

著者らは、地震等の災害時に破壊された鋼管(ガス管、水道管等)の緊急修復方法として爆発圧着を応用する方法を提案した¹⁾。この技術を緊急修復方法として応用する利点は、爆薬そのものが高エネルギー物質であり、電力等の動力源あるいは修復用の機械を必要としないこと、および瞬時に修復が可能であることにある。しかしながら、飛翔挙動を制御しなければ、飛

翔速度の不足による未圧着あるいは、過剰な圧力および応力集中による鋼管の大変形が起こる。著者らは、鋼管の変形を最小限にして圧着可能な条件を解明するために、鋼管に対して基礎的な爆発圧着実験を行ってすでに報告している²⁾。

従来の爆発圧着に関する研究において、飛翔挙動は爆発圧着において重要な因子とされ、爆発圧着関連の研究が盛んに行われた1970年代~1980年代後半まで多くの飛翔挙動に関する研究が行われた^{3)~5)}。これまでに爆薬により駆動される飛翔体の速度算定式が数多く提案されているが、本研究では爆薬として従来の圧着専用の特殊な爆薬ではなく、緊急修復の目的から少量の薬量でも爆発圧着が可能な産業用のエマルジョン爆薬を用いたため、従来の速度算定式は適合できない。そのため新たに飛翔体の挙動を知る必要がある。

前報²⁾では母材の変形に着目して、飛翔体と鋼管との距離(スタンドオフ)に近い実験条件のもとでは、スタンドオフが数mm異なるだけでも鋼管の変形量が変化することを実験的に明らかにした。本報ではスタンドオフの設定の違いが、鋼管の変形量に対する爆発エネルギーの寄与に対してどのような影響を及ぼすのか、飛翔体衝突による鋼管の変形問題を単純な一次元衝突問題に置き換え、そのシミュレーション結果をもとに考察する。また、エマルジョン爆薬によって駆動

2000年7月27日受理

*九州大学大学院 工学研究院 地球資源システム工学部門

〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1

TEL 092-642-3626

FAX 092-642-3614

**工業技術院資源環境技術総合研究所安全工学部

〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-3

TEL 0298-61-8764

FAX 0298-61-8758

*** (株)北日本ソイル総合研究所 地質調査部

〒007-0895 札幌市東区中沼西5条1-1

TEL 011-79-1651

FAX 011-791-5241

**** 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

TEL 03-5841-7293

FAX 03-5841-7225

***** 愛媛大学農学部地域環境工学水利環境工学研究室

〒790-8566 松山市榺味3-5-7

TEL 089-946-9923

FAX 089-946-9923

される飛翔体の挙動を二次元流体計算コードにより数値解析し、その結果をもとに飛翔挙動が鋼管に与える影響について考察する。

2. 実験概要

数値解析の背景となる実験について説明する。実験条件と圧着性ならびに鋼管の変形量との基礎的なデータを得るために爆発圧着実験を行った。内径205mm肉厚5mmの鋼管上に、スタンドオフを設けるためのスペーサを置き、その上にエマルジョン爆薬を充てんした長方形の箱を長手方向に配置した。箱の底面は飛翔体(材質SPCC, 幅25mm, 長さ100mm, 厚み1.5mm)からなる。起爆は6号電気雷管で行った。Fig. 1は第一報²⁾で示した実験結果であり、薬量20, 25, 30, 40g(それぞれ薬厚6.0, 7.5, 9.0, 12.0mm)についてそれぞれ鋼管内側の変形量とスタンドオフとの関係を示したものである。スタンドオフをとらないすべての場合とスタンドオフ2mmでかつ薬量20gの場合は、圧着しなかった。変形量は、各薬量について、スタンドオフを設定しない場合が最大で、スタンドオフが大きくなるに従い変形量は小さくなり、5mm以上で変形量はほぼ一定となる結果が得られた。

爆発圧着に用いた飛翔体の挙動を把握するために、飛翔体と鋼管が衝突しない場合について、高速度カメラ(Cordin社製フレーミングカメラ124)を用いた写真撮影実験を行った。実験の際に、爆轟生成ガスは飛翔体の側面から先行してしまうため、飛翔体が生成ガスに隠れてしまい撮影できない。そこで、飛翔体と爆薬との間に厚さ0.4mm, 長さ180mm, 幅180mmの飛翔体に対して十分広い銅板を介在させ、生成ガスの先行を防止した。

3. 数値解析方法

数値解析は弾塑性流れに対する質量, 運動量, エネルギーの保存式を離散化して行った。一次元衝突問題の数値解析に用いたコードはMaderのSINコード⁶⁾をもとに著者らが作成したものである。二次元流体計算コードによる飛翔挙動の数値解析にはLagrangeの方法とEulerの方法を組み合わせたALE法(Arbitrary Lagrangian-Eulerian Technique)に基づいたコードを用いた⁷⁾。ALE法は本数値解析のように、計算場に爆轟生成ガス, ならびに金属といった異種媒体が存在し、かつ大変形を伴う問題に有効な数値解析手法である。爆轟生成ガスの状態式としては、組成をもとにパラメータを求めるBKW(Becker-Kistiakowsky-Wilson)⁸⁾, KHT(Kihara-Hikita-Tanaka)⁹⁾状態式あるいは、実験をもとにパラメータを求めるJWL

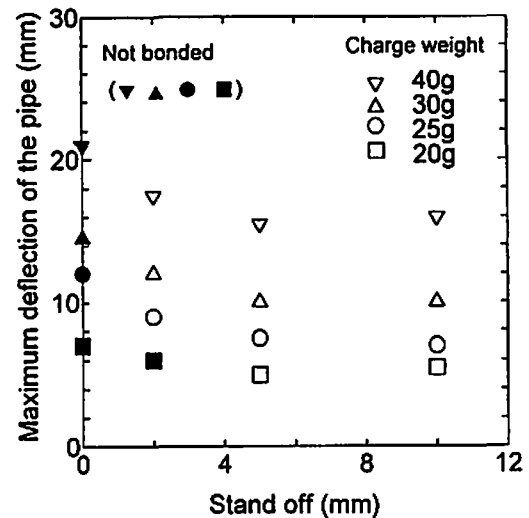


Fig. 1 Effect of stand off and charge weight on the damage to the pipe

(Jones-Wilkins-Lee)¹⁰⁾状態式等が提案され、種々の爆薬についてそのパラメータが公表されている。しかしながら、エマルジョン爆薬のように非理想爆轟を呈する爆薬では、その爆轟速度が薬径あるいは密閉状態の違いに大きく影響を受けるため、上述した方法で求められる状態式による特性と実際の使用条件下における特性が大きく異なる場合がある。実験で使用したエマルジョン爆薬の特性ならびに状態式のパラメータは、無限大薬径の場合について公表されており、その爆轟速度は5500m/sとされている¹¹⁾。しかしながら、我々の使用条件のもとでは50g(薬厚15mm)の場合で約3400m/sの値が得られており、上述した爆薬の特性ならびにパラメータでは爆薬の威力を過大評価する可能性がある。そこで本数値解析に用いる爆薬はその爆轟速度が実験に使用したエマルジョン爆薬と同程度のもので、その爆轟特性ならびに状態式のパラメータが公表されているAqualan爆薬¹²⁾とし、生成ガスの状態式としては次式で表せるJWL状態式を採用した。

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

ここで $\zeta = V/V_0$ であり、 V は生成ガスの比体積、 V_0 は未反応爆薬の比体積、 E は内部エネルギーを示す。また、 A, B, R_1, R_2, ω のパラメータは実験的に得られる定数である。Aqualan爆薬の特性をTable 1に、そのJWL状態式のパラメータをTable 2に示す¹²⁾。飛翔体は347steelおよび銅とし、状態方程式はHugoniotの実験式($U_s = C_0 + sU_p$)をもとにしたMie Grüneisen型の状態式を採用した。弾塑性判定にはVon-Misesの降

Table 1 Detonation properties for Aquanal explosive

Composition	Density	Detonation velocity	Detonation pressure
Slurry + Al	1430 (kg/m ³)	3700 (m/s)	5.5 (GPa)

Table 2 JWL parameters for Aquanal explosive

A (GPa)	B (GPa)	C (GPa)	R ₁	R ₂	ω
91.29	0.407	0.7456	4.4	1.0	0.16

Table 3 Physical properties of the flyer plate (ρ_0 : Density, C_0 : Sound velocity, s : Coefficient in Hugoniot relation, γ : Grunisen parameter)

Material	ρ_0 (kg/m ³)	C_0 (m/s)	s	γ
347 Steel	7917	4580	1.51	2.02
Cu	8903	3958	1.497	2.00

伏条件を用いた。Table 3に計算に用いた飛翔体の物性値を示す。

一次元衝突問題として次のような問題を考える。1.5mm厚の飛翔体と5mm厚の母材を考え、スタンドオフを0mm~10mmの間で設定した場合について、衝突後の飛翔体と母材との全体の運動エネルギーを求める。爆薬の爆発エネルギーによる飛翔体の加速について考えると、爆発エネルギーのほとんどは飛翔体の加速のためではなく周辺に解放され、残りのほとんどのエネルギーが飛翔体の運動エネルギーに変換される。さらに衝突まで考えると、飛翔体の加速段階が終了して衝突する場合は、飛翔体と生成ガスとの界面で生成ガスの十分な圧力減衰が見込め、衝突による速度減速のための生成ガスの再上昇はそれ程飛翔体と母材の挙動に影響を与えないものと推察される。この場合は衝突前に得られた飛翔体の運動エネルギーが母材に作用すると考えられる。一方、加速段階で衝突する場合、衝突前の運動エネルギーは前者に比べて小さいが、衝突直後の飛翔速度の減速により運動エネルギーが大幅に減少するとともにガスの作用圧力も再び上昇する。したがって、飛翔体と母材との両方に与える爆発エネルギーの寄与を評価するためには、衝突後十分時間が経過した後の飛翔体と母材が得た運動エネルギーを評価する必要がある。爆発モデルは等容爆発モデルとし、飛翔距離が5mm程度で1.5mm厚の飛翔体の顕著な加速が終了するように爆薬量を調整し、ここで考えるすべての問題で共通の爆薬の初期条件を決定

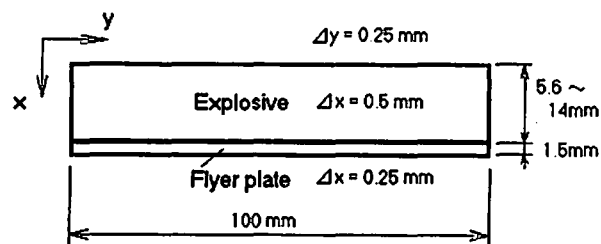


Fig. 2 Calculation model for the flyer motion by explosion

した。

Fig. 2に二次元流体計算コードによる飛翔挙動の数値解析に用いた計算場を示す。実験と同一面積あたりの薬量で考えると、本数値解析では薬厚5.6, 8.4, 11.2, 14mmがそれぞれ薬量20, 30, 40, 50gに相当する。実験結果と数値解析結果を比較するために、まずガス先行防止のための銅板が含まれる場合を計算し、次に銅板が介在しない場合の数値解析結果により実際の飛翔挙動を数値解析した。爆轟計算は爆轟波が一次的に計算場を左から右方向に伝播すると仮定して以下のように行った。爆轟波は爆轟速度で伝播するため、時間刻みは格子間隔を爆轟速度で除した値で定義した。爆轟波先頭の状態量は生成ガスが反応後直ちにそのセルの体積まで膨張したものと考え、等エントロピーの関係をもとに算出した¹³⁾。

4. 数値解析結果および考察

4.1 一次元衝突問題による検討

飛翔体の飛翔挙動について、飛翔速度 V をその最大飛翔速度 V_{max} で除した値と飛翔距離との関係をFig. 3に示す。一次元衝突問題の数値解析の結果、最も運動エネルギーが大きくなったのはスタンドオフを設定しない場合となった。そこでスタンドオフを設定しない場合に得られる最大の運動エネルギーを E_{max} として、飛翔体と母材との運動エネルギーの合計について時間履歴をFig. 4に示した。 E_k は各条件で得られた飛翔体と母材との運動エネルギーの合計である。スタンドオフを設定しない場合ははじめから母材と飛翔体とが接触しているため、当然初期の段階で運動エネルギーが他の場合と比較して小さい。スタンドオフを設定した場合は母材と衝突するまでは運動エネルギーが急激に

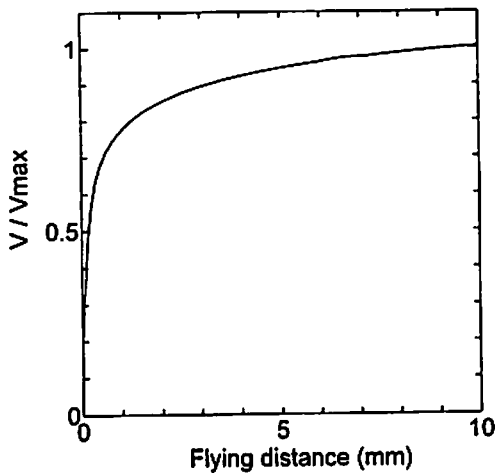


Fig. 3 Ratio of flyer velocity vs. flying distance as the result of numerical simulation of 1-dimensional impact problem (V_{max} : maximum velocity of flyer plate, V : velocity of flyer plate)

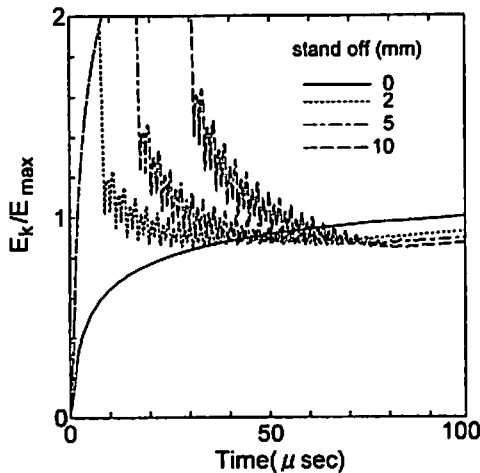


Fig. 4 Profiles of kinetic energy of flyer and base plates (E_{max} : The sum of kinetic energy of flyer and base plates without stand off distance, E_k : The sum of kinetic energy of flyer and base plates)

増加し、衝突により衝突面で急激な速度減衰が生じるため運動エネルギーは顕著な減衰を示す。1 μ s程度の短い時間で、母材と飛翔体との界面からの反射波が生成ガスと飛翔体との界面に到達し、再び作用ガス圧が上昇する。その結果、運動エネルギーの減衰率は緩やかになる。その後、飛翔体、ならびに母材中を往復する圧力波が干渉しながら飛翔するため、運動エネルギーに複雑な振動が見られる。各条件について100 μ s経過後の爆発により与えられた運動エネルギーを比較すると、スタンドオフを設定していない場合を基準にして、スタンドオフ2, 5, 10mmに対して、そ

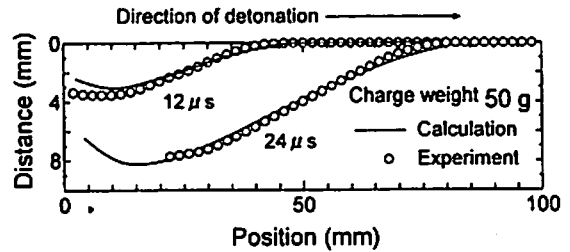


Fig. 5 The flying shape of the plate in the case of 50g of explosive

れぞれ7, 10, 12%運動エネルギーが減少しており、スタンドオフの増加とともに爆発により飛翔体と母材に与えられるエネルギーは減少し、その減少率も小さくなる傾向を示した。以上のことから、スタンドオフが小さい場合、衝突によるガス圧の再上昇も鋼管の変形増加の一原因として考えられることが数値解析的に示された。

4. 2 飛翔体の飛翔挙動

実験結果と比較するために、まず爆薬と飛翔体の間に0.4mmの銅板が介在する場合の数値解析を行った。Fig. 5は爆薬量50gの場合に得られた飛翔体の飛翔形状を示しており、起爆後の時間12 μ sおよび24 μ sの形状を示している。白丸は時間隔2 μ sでフレーミング撮影された写真から得られた形状の一例である。時間12 μ sにおいて起爆端で実験結果と計算結果に違いが見られる。これは実験において起爆点近傍で雷管の影響も考えた数値解析が必要になることを示している。また、飛翔開始点近傍には両者に違いが確認される。これは本数値解析で用いた爆薬の爆轟速度が実験での使用爆薬の爆轟速度より8%程度速いため若干の違いが確認されるものである。以上の点を除けば実験結果と数値解析結果には良い一致が見られる。Fig. 6は起爆点から50mmの位置において縦軸上を通過する飛翔体の速度と飛翔距離との関係を示したものである。ただし図中に示してある実験結果は次のように求めた。まず2 μ s間隔で得られたフレーミング写真を基に飛翔形状を求め、次にそれをもとに起爆点から40mm~60mmの範囲で2mm間隔でそれぞれ鉛直方向通過速度を求めそれを平均することにより得た。爆薬量が50gの場合、飛翔距離4mm程度までは実験のほうが高めであるが、それ以降は良く一致している。薬量30gの場合、2mm以内では良い一致を示し、それ以降では両者に若干の違いが見られる。この違いは、飛翔体幅方向からの膨張波の影響を数値計算では考慮していないことに原因すると考えられる。しかし

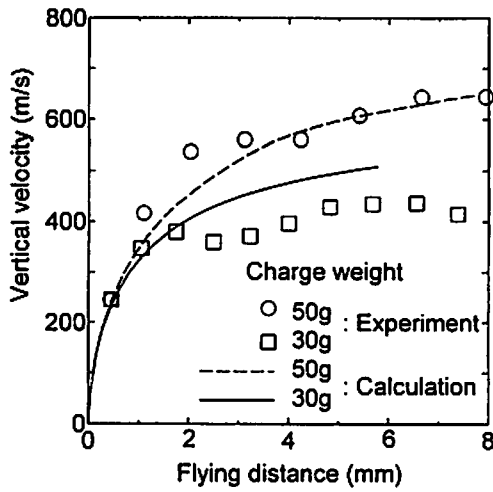


Fig. 6 Vertical velocity of flying plate vs. flying distance (with copper plate)

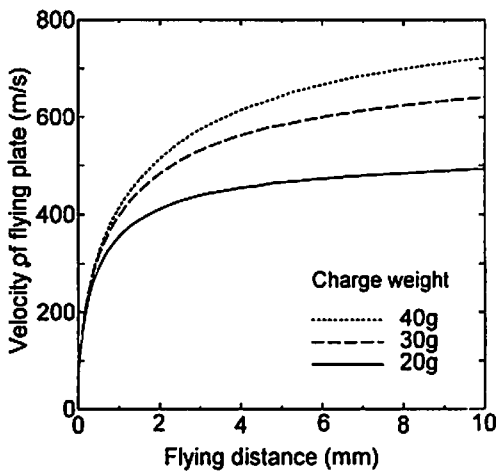


Fig. 7 Velocity of flying plate vs. flying distance (without copper plate)

ながら、今回の計算範囲では両者の違いは平均して15%程度であり、本計算はエマルジョン爆薬により駆動される飛翔体の挙動を良く近似している。

Fig. 7は銅板が介在しない場合の飛翔速度と飛翔距離の関係を示している。爆発圧着実験と同じ条件である薬量30g、飛翔距離5mmで600m/s程度の速度が得られており、この場合、Fig. 6の銅板が介在する場合より約100m/s速い。最初の0.5mm程度の飛翔距離では薬量によらずほとんど同じ加速が確認され、200m/s程度まで瞬時に加速されている。さらに、飛翔距離が2mm程度になると、いずれの薬量の場合も400m/s以上の速度まで加速されている。このことは、実際の圧着実験において、スタンドオフを2mm程度と小さく設定した場合でも、十分な加速が得られ、圧着に必要な衝突速度に到達する可能性を示している。さらに飛翔距離が長くなると次第に加速が小さくなる。

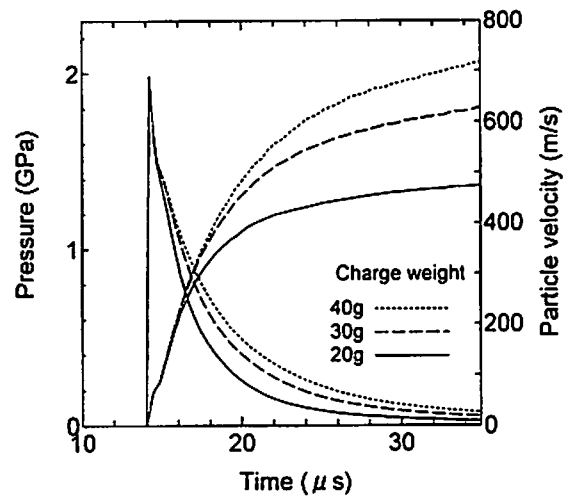


Fig. 8 Histories of gas pressure and particle velocity at the surface between explosive and flying plate with various weights of explosive

実際の爆発圧着実験では板厚1.5mm、薬量20gかつスタンドオフ2mmの条件の場合に圧着しない結果が得られている。本数値解析では、その条件下での飛翔速度は410m/sであった。

Fig. 8は爆轟生成ガスと飛翔体との界面における生成ガスの作用圧力履歴と界面の粒子速度の履歴を示している。ただし、観測位置は起爆点から50mmの位置である。横軸の時間は起爆後の時間を示す。爆轟波が観測点に到達すると、圧力は瞬時に約2GPaまで上昇する。爆轟波が到達した直後の1μsは爆薬量によらず圧力は急激に減衰し、その減衰率は一致する。この間、飛翔体も瞬時に加速され、各薬量ともに加速率も一致する。その後、薬量が多いほど、上方からの膨張波の影響が生成ガスと飛翔体の界面に到達するのが遅くなるため、圧力減衰の割合が小さくなる。薬量が多いほど加速時間が長くなり、得られる速度が大きくなる。本計算の中で薬量の多い40gについて見てみると、Fig. 7より、飛翔距離5mmの位置で約650m/sの飛翔速度に到達することが理解でき、Fig. 8からそのとき飛翔体に作用している圧力が得られる。5mm飛翔後に飛翔体に作用している圧力は、爆轟波が到達して約16μs経過後の作用圧力に対応し、初期圧力の5%程度の圧力まで急激に減衰している。このことから実験で推定されたのと同程度の距離で生成ガスが減衰してしまい鋼管の変形にほとんど寄与しなくなることが数値解析からも理解される。

5. まとめ

爆発圧着を応用した破損鋼管の修復技術に関する基礎的研究として、スタンドオフの設定の違いが、鋼管

の変形量に対する爆発エネルギーの寄与に対してどのような影響を及ぼすのか、一次元衝突問題により数値解析的に検討した。また、二次元流体力学コードを用いてエマルション爆薬によって駆動される飛翔体の挙動を調べた。一次元衝突問題に関する数値解析の結果、スタンドオフの増加にともない母材に与えられる爆発エネルギーは減少し、その減少率も小さくなることが明らかになり、スタンドオフが小さい場合、衝突によるガス圧の再上昇も鋼管の変形増加の一原因として考えられることが実証できた。飛翔挙動の数値解析の結果、数値解析結果と実験結果には良い一致が確認され、本数値解析はエマルション爆薬により加速される飛翔体の挙動を近似できることが示された。薬量20, 30, 40gのそれぞれの場合の飛翔挙動は、最初の0.5mm程度の飛翔距離では薬量によらずほとんど同じ加速が確認され、200m/s程度まで瞬時に加速される。飛翔距離が2mm程度になると、いずれの薬量の場合も400m/s以上の速度まで加速されることが分かった。飛翔中の界面での圧力履歴より、5mm程度の短い距離で十分な圧力減衰があることが示された。

謝 辞

本研究の一部は平成11年度(財)火薬工業技術奨励会研究助成金により実施した。ここに記して謝意を表す。

文 献

- 1) 井清武弘, 勝山邦久, 北原良哉, 国松直, 瀬戸政宏, 緒方雄二, 和田有司, 今泉博之, 榎井明, 久

- 保田士郎, 平成7年度提案公募型・最先端分野研究開発成果報告会予稿集, 342(1997)
- 2) 緒方雄二, 久保田士郎, 榎井明, 和田有司, 瀬戸政宏, 勝山邦久, 島田英樹, 松井紀久男, 火薬学会誌, 投稿中
- 3) 恩沢忠男, 石井勇五郎, 滝沢雄, 伊妻猛志, 工業火薬協会誌, 33, 17(1972)
- 4) 滝沢雄, 藤田昌大, 工業火薬協会誌, 36, 190(1975)
- 5) 藤田昌大, 千葉昂, 福田泉, 苧阪浩男, 馬場文章, 真鍋繁之, 工業火薬協会誌, 48, 176(1987)
- 6) C. L. Mader, "Numerical modeling of detonations", University of California Press, California (1979)
- 7) C. W. Hirt, A. A. Amsden and J. L. Cook, Journal of Computational Physics 14, 227(1974)
- 8) C. L. Mader, LA-2900, UC-4, TID-4500(1963)
- 9) 田中克己, 疋田強, 工業火薬協会誌, 36, 210(1975)
- 10) E. L. Lee, M. Finger, W. Collins, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept-UCID-16189(1973)
- 11) 高山和喜編, "衝撃波ハンドブック", シュプリンガー・フェアラーク東京(1995)
- 12) H. Hornberg, Propellants, Explosives, Pyrotechnics 11, 23(1986)
- 13) 久保田士郎, 島田英樹, 松井紀久男, 吉田正典, 中山良男, 松村知治, 大槻真人, 平成10年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 147(1999)

On development of urgent repair techniques for steel pipe destroyed by natural disaster (II)

—The numerical simulations on contribution of explosion energy to pipe damage and on flyer motion—

Shiro KUBOTA^{*}, Yuji OGATA^{**}, Akira MASUI^{***}, Yuji WADA^{****}, Hideki SHIMADA^{*},
Kikuo MATSUI^{*}, Masahiro SETO^{**}, and Kunihisa KATSUYAMA^{*****}

This paper presents the numerical analysis on the application of the explosive welding technique to the field of the urgent repair of gas and water pipe networks. By carrying out numerical calculation of 1-dimensional impact problem, we examined how the difference in the stand off distance affect the contributions of the explosion energy of explosive to the pipe damage. As a result, in the case of short stand off distance it is demonstrated that the rise of gas pressure at the contact surface between gas and flyer plate caused by impact is one of the factors which increase the pipe damages. The behaviors of the flyer motion were also examined by use of 2-dimensional hydrodynamic code. Regardless of the weight of explosive, the flyer plate is accelerated instantly over 200m/s within 0.5 mm flying distance and more than 400m/s at about 2mm flying distance. The gas pressure at the contact surface is abruptly attenuates approximately 5mm flying distance.

(^{*}Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, JAPAN

(^{**}National Institute for Resources and Environment, 16-3, Onogawa, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8569, JAPAN

(^{***}Kitanihon Soil Research Laboratory Co.,Ltd. 5-1-8-1, Nakanuma-Nishi, Higashi-ku, Sapporo, 007-0895, JAPAN

(^{****}Department of Chemical System Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN

(^{*****}College of Agriculture, Ehime University, 3-5-7, Tarumi, Matsuyama, Ehime 790-8566, JAPAN)