

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1報)

爆発圧着基礎実験と飛翔挙動の観察

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**

災害時に破壊されたエネルギーライフラインの緊急修復技術として、爆発圧着法の適用を目指した実験的研究を行った。実験では、産業用エマルジョン爆薬を使用し、スタンドオフあるいは薬量を変化させた一連の爆発圧着実験を行い、鋼管の損傷(内部への変形量)と実験条件との関係を明らかにした。圧着実験では、各薬量とも鋼管の変形量はスタンドオフを設定しない場合が最大となり、スタンドオフの増加にともない変形量は減少し、5mm以上のスタンドオフを設定した場合、変形量は一定となった。また、エマルジョン爆薬により加速される飛翔板の飛翔挙動を光学的に観測し、薬量によらず0.5mm以下の飛翔距離で瞬時に200m/s以上の飛翔速度に到達し、5mm以下の短い飛翔距離でほぼ一定の飛翔速度となることが判明した。

1. はじめに

地震等の災害時には破壊されたガス管や石油パイプライン等のエネルギーライフラインを緊急に修復させることが重要である。その修復に要する期間が長くなれば、産業の持続的発展に支障をきたすばかりでなく、被災地住民の生活をも非常に困難なものとする。

このため、迅速にエネルギーライフラインを復旧させなければならない。しかし、地震等の災害時には交通機関が停止、連絡道路等も寸断され、復旧用大型重機の輸送が困難となり、電力等の動力源も供給されない。このため、大型重機あるいは電力等の動力源が不要である機動性に富む修復方法が要求される。

2000年7月24日受理

*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

E-mail yujioga@nire.go.jp

**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

E-mail kubota@mine.kyushu-u.ac.jp

*** (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丁目8番1号

TEL 011-79-1651

FAX 011-791-5241

E-mail masui@nj-soil.co.jp

**** 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

E-mail wada@explosion.t.u-tokyo.ac.jp

***** 愛媛大学農学部地域環境工学水利環境工学研究室

〒790-8566 松山市樟味3-5-7

TEL 089-946-9923

FAX 089-946-9923

E-mail katuyama@agr.ehime-u.ac.jp

著者らは、上述した要求を満足する鋼管の修復方法として、爆発圧着技術¹⁾を応用する新しい修復方法を検討した²⁾。爆発圧着法はクラッド材の作成方法として実用化され、金属箔の圧着、あるいは鋼管の接合技術として現在でも研究開発が進められている^{3)~5)}。この技術を緊急修復方法として応用する利点は、爆薬そのものがエネルギー源であり、電力等の動力源を必要としないこと、ならびに修復用の重機が不要であること、さらに瞬時に鋼管の修復が可能であることにある。

従来の爆発圧着に関する研究の多くは平板の合材を平板の母材に衝突させてクラッド材を作成する目的のものがほとんどであり、母材の損傷を考慮する必要がなかった。管の内壁あるいは外壁に合材を接合する方法も提案され研究されているが、これらの場合、内側からの圧着の場合は管の外側に保護管、外側からの場合は中心部に充てん物を充てんし母材である管を強固に支持して圧着が行われた⁶⁾。本研究は緊急修復への応用を考えているために母材である無支持の鋼管に対して爆発圧着を行うことを目的としている。このた

め、爆薬により加速される飛翔体の挙動を有効に制御しなければ、飛翔速度の不足による飛翔体の鋼管への未圧着が生じるばかりでなく、過剰な圧力による鋼管(母材)の損傷(変形)が問題となる。本研究のように母材の変形に着眼点をおいた研究は、従来の研究において見あたらない。また、反応性物質として従来の爆発圧着では主に圧着専用の特殊な爆薬⁷⁾が用いられているが、緊急修復の目的からは出来るだけ、取り扱いおよび入手が簡単で、かつ少量の薬量でも爆発圧着が可能の方が必要である。爆発圧着専用の特殊な爆薬を使用すると、一般に充てん密度は小さいが、十分な反応を起こすためにはある程度の薬厚が必要である。そのため、装置が大きくなる可能性があるばかりでなく、ガス圧の作用時間が長くなり、鋼管の変形量の防止には不利である。そこで実験には産業用のエマルジョン爆薬を用いた。爆薬量、および飛翔体と鋼管との距離(以下スタンドオフと記述)を変化させた基礎的な爆発圧着実験を行い、鋼管の変形量と実験条件との関係を明らかにするとともに、鋼管の緊急修復技術としてエマルジョン爆薬を用いた爆発圧着技術が応用可能であることを検討した。また、鋼管の変形に飛翔体の挙動がどのような影響を与えるか検討するために、高速度カメラを用いて写真観察した結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 爆発圧着基礎実験

鋼管の変形量を最小限に押さえて、爆発圧着可能な実験条件を見いだすために、Fig. 1に示すような実験状況で鋼管に対して爆発圧着の基礎実験を行った。実験では、内径205mm肉厚5mmの鋼管(中圧ガス配管)上に、スタンドオフを設けるためのスペーサを置き、その上に箱の底面が飛翔体(材質SPCC、幅25mm、長さ100mm、厚み1.5mm)からなる厚紙製の箱にエマルジョン爆薬を充てんし、6号電気雷管で起爆した。爆薬の高さは30gの場合で9mm程度であった。爆薬量ならびにスタンドオフを変化させて実験を行い、鋼管内壁の変形量を測定した。一般に爆轟圧力は爆薬の充てん密度と、爆轟速度の二乗に比例する⁸⁾とされており、今回の使用条件のもとでエマルジョン爆薬は薬厚によって爆轟速度が異なる。そのため、それぞれの実験条件について、イオン探針法を用い4点間で爆轟速度を計測し平均爆轟速度を求めた。実験で使ったエマルジョン爆薬は、市販のエマルジョン爆薬でJIS法による計測で定常爆速は約5,200m/s程度である。また、圧着性を確認するため、圧着実験後の飛翔体と鋼管との境界面近傍の断面をSEM(Scanning Electron Microscope: 走査電子顕微鏡)写真により観察し、圧

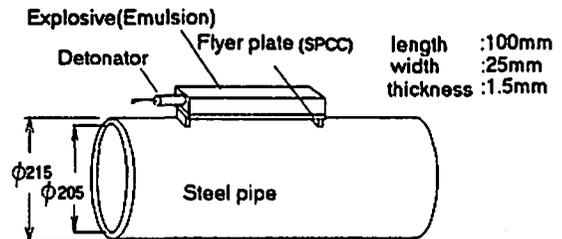


Fig. 1 Experimental set up for explosive welding of a steel pipe

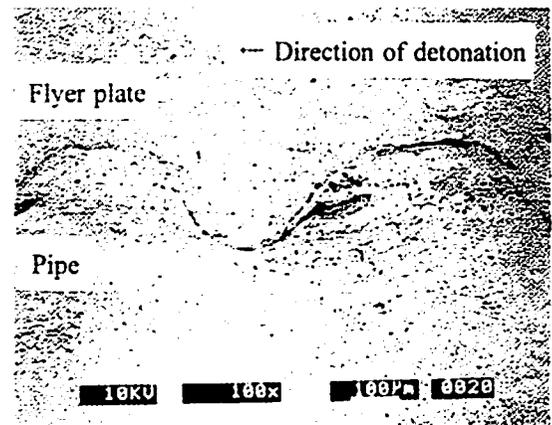


Fig. 2 An optical micrograph of the welding section

着状況を調べた。なお、圧着実験の前にあらかじめ鋼管の塗料を部分的にサンドペーパー等で除去した。

2.2 高速度カメラによる飛翔状況の写真撮影実験

爆発圧着において重要となる因子は、飛翔体の飛翔速度とその形状である。それらの因子が爆発圧着におよぼす影響を明らかにし、爆発圧着のメカニズムを解明するために、高速度カメラ(Cordin社製フレーミングカメラ124、最高撮影速度 2.5×10^6 FPS: Frame Per Second)を用いて、爆薬の爆轟によって駆動された飛翔体の飛翔過程の写真撮影実験を行った。光源にはクセノンフラッシュライトを用い、駒間隔 $2.0 \mu\text{sec}$ (5.0×10^5 FPS)で撮影を行った。撮影の際に、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。このため実験では、飛翔体と爆薬との間に厚さ0.4mm、長さ180mm、幅180mmで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. 実験結果と考察

3.1 鋼管の損傷の評価ならびに爆轟速度測定

Fig. 2は圧着実験後の鋼管を切断して得られた軸方向断面(爆轟方向は向かって右から左の方向)のSEM写真である。界面は爆発圧着特有の波状形状をしてお

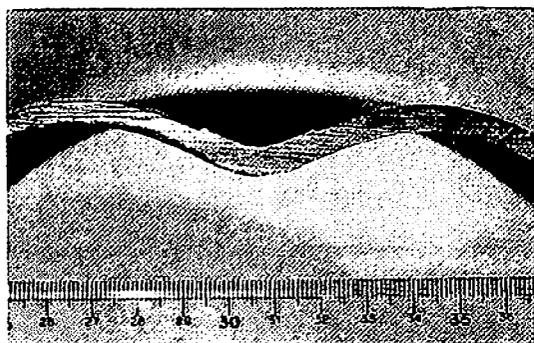


Fig. 3 A photograph of a cross section of the steel pipe after welding test

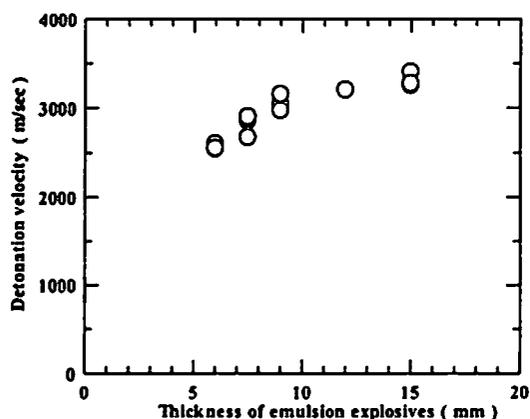


Fig. 4 Relation of the thickness and detonation velocity for emulsion explosive

り、上面の飛翔体と下面の鋼管とが強固に圧接している様子が確認できた。Fig. 3は圧着後の鋼管の半径方向切断面の写真であり、今回行った実験の中で最も薬厚がある場合(薬厚15mm、薬量50g)である。同図より鋼管が大きく変形している様子が確認できる。この鋼管内面の最大の変形量を、爆発圧着実験前後の鋼管形状より求め、鋼管の損傷を評価した。Fig. 4にエマルジョン爆薬の薬厚を6~15mm(薬量20~50g)に変化させた場合にイオン探針法により得られた爆轟速度を示す。薬厚が6mm(薬量20g)の条件では、爆薬が完全に爆轟しない場合があり、十分な爆轟状態を得られない。このことから、今回使用した爆薬では、薬厚6mmで爆薬が完爆するか否かの限界状態が存在すると判断し、実験での最小薬量とした。また、薬厚の増加とともに9mm(薬量30g)までは顕著に爆轟速度が増加し、それ以上は緩やかな増加になっており、薬厚が15mm(薬量50g)の場合で爆轟速度は3400m/s程度であった。このことから薬厚が6mmあるいは7.5mm(薬量25g)と少ない場合、エマルジョン爆薬の反応率が低下し飛翔体に作用する爆轟圧力の顕著な低下が予想される。

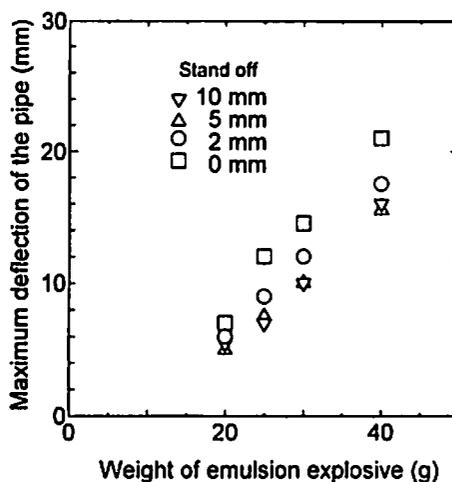


Fig. 5 Effect of amount of explosive on the pipe damage

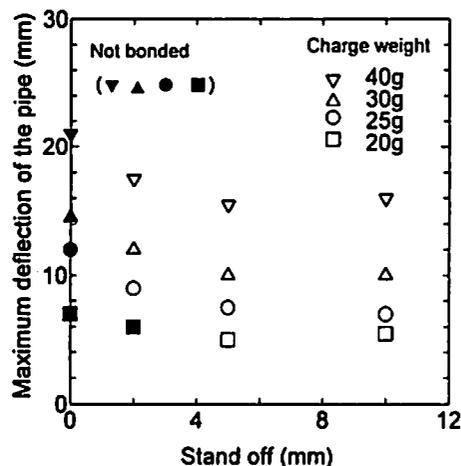


Fig. 6 Effect of stand-off distance on the pipe damage

3. 2 爆発圧着基礎実験結果

Fig. 5に薬量と鋼管の変形量との関係を示したもので、各スタンドオフについて示したもので、各実験条件とも3回以上実験を実施しその平均を表している。本実験条件の範囲では同じスタンドオフにおいて、変形量はほぼ爆薬量に比例して増加する傾向が確認できた。Fig. 6は薬量を変化させた場合について、鋼管内壁の変形量とスタンドオフとの関係をそれぞれ各薬量について示したものである。図中黒く塗りつぶした印が圧着しなかった条件を示す。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でかつ薬厚6mmの場合について、圧着しなかった。爆発圧着には圧着のためにある程度の飛翔速度が必要であるため、スタンドオフを取らない場合は当然圧着しない。本実験条件のもとでは薬厚6mmでかつスタンドオフ2mm~5mmの間に圧着に必要な飛翔速度の限界値が存在するものと考え

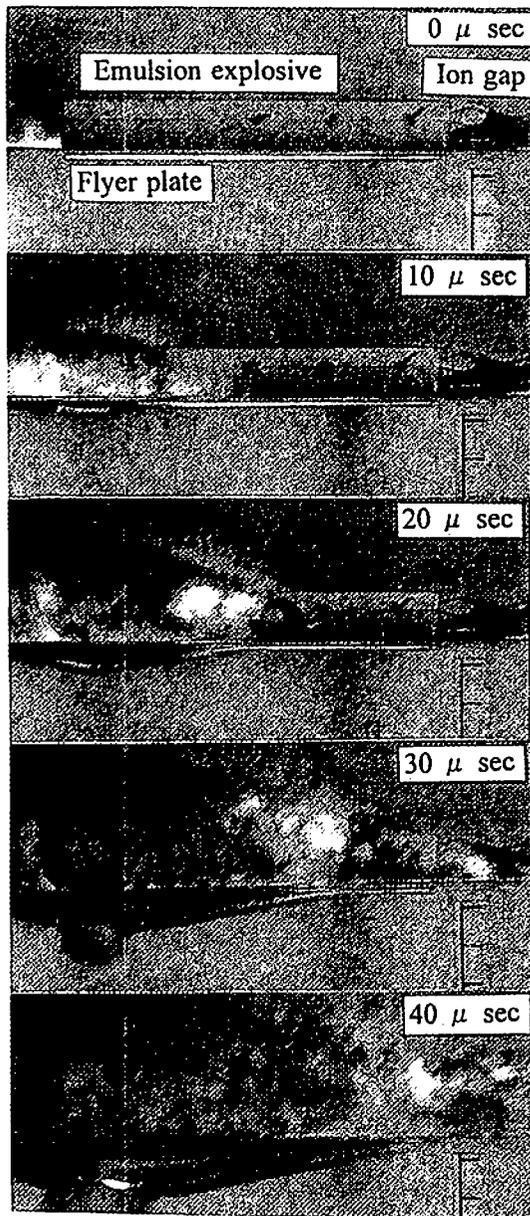


Fig. 7 High-speed photograph of a flyer plate in motion

られる。変形量については、すべての場合において、同じ薬厚であればスタンドオフが5mm以上で変形量は一定となり、スタンドオフが減少すれば変形量は増加し、スタンドオフを設定しない場合が最大の変形量となった。本実験では薬厚6mmでスタンドオフ5mmの時、変形量が5mm程度と最小となった。スタンドオフ5mm以上で一定となった変形量と0mmで最大の変形量の差は薬厚が6mm、9mm、12mmの場合について、それぞれ2mm、4.8mm、5.3mmと薬厚が多いほど増加する傾向を示した。

3. 3 高速度写真撮影実験結果

Fig. 7は高速度カメラにより側面から飛翔過程を撮

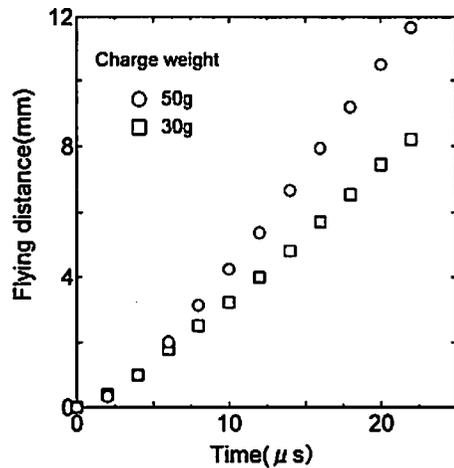


Fig. 8 Flying distance vs. time

影して得られた写真である。各写真の右上に示してある時間は雷管起爆を起点とする時間であり、各時間右下に見えるスケールは、あらかじめ配置した鉛直方向位置校正のためのゲージである。白いラインが飛翔体その上に厚さ0.4mmの銅板を介してエマルジョン爆薬が配置されてる。0μsの写真で左端に現れている白い発光は爆薬を起爆するための精密雷管の爆発を示す。爆轟が進むにつれて飛翔体は加速され下方に変位し、上方に生成ガスが膨張している。また雷管側である左端を見ると、飛翔体が大きく湾曲しているのが確認される(同図10, 20μs)。この飛翔体の湾曲は雷管の影響のみならず、爆薬の起爆側の自由端からの膨張波の影響をすぐに飛翔体が受けてしまうためであると考えられる。さらに時間が経過すると銅板が破れて、爆轟生成ガスが飛翔体よりも先行している様子が見える。これらの写真をもとにまず、両端面からの膨張波の影響を避けるため、40mm~60mmの間で飛翔形状を水平方向2mm間隔で求めた。得られた各時間における飛翔形状をもとに、2mm間隔の各位置において鉛直方向飛翔距離と時間との関係が求められる。それらを平均して得られた飛翔体の鉛直方向飛翔距離と時間との関係をFig. 8に示す。この結果をもとに飛翔距離と鉛直方向飛翔速度の関係を求めてプロットしたものがFig. 9である。いずれの薬量の場合も0.5mm程度の極めて短い飛翔距離においてすでに200m/s以上まで急激に加速されている。さらにこの急激な加速は続き2mm程度の飛翔距離で400m/s程度の非常に速い速度が得られている。このことはエマルジョン爆薬を用いて爆発圧着を行った場合、少ない薬量でも短いスタンドオフで圧着が可能な運動エネルギーが得られる可能性を示しており、実際、圧着実験ではスタンドオフ2mmの場合、薬厚9mm(薬量30g)と極めて小さい薬厚

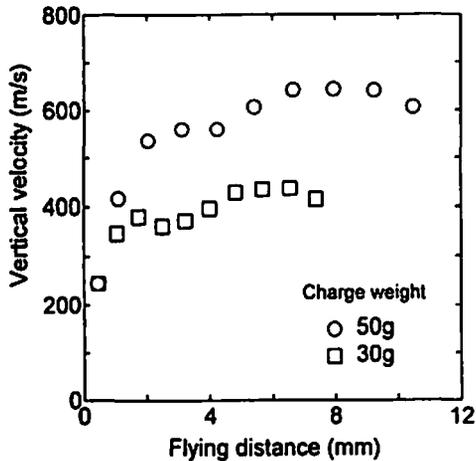


Fig. 9 Vertical velocity vs. flying distance

でも圧着が可能であった。その後、薬厚9mmの場合は2mm以上で、薬厚15mm(薬量50g)の場合4mm程度でほとんど加速段階が終了し、ほぼ一定速度となっている。

上述した飛翔挙動をもとに爆発圧着実験結果について考察する。スタンドオフを5mm以上に設定した場合、生成ガス圧の作用による飛翔体の加速段階が飛翔距離5mmまでに終わり、同じ薬量であれば飛翔体はスタンドオフによらず同程度の運動エネルギーを持って鋼管に衝突する。このため、スタンドオフ5mm以上では、鋼管の変形量は一定となると推察できる。これに対して5mmよりも短いスタンドオフを設定した場合、スタンドオフが短いほど変形量が大きくなった結果より次のように考えられる。飛翔体は生成ガス圧による加速段階であり、この段階で鋼管と衝突すると、生成ガスと飛翔体との界面で再び圧力が上昇し、加速段階が終わって衝突する場合と比較して、生成ガスが鋼管に与えるエネルギーが大きくなり、変形量が大きくなると推定できる。また、薬量が多いほど加速力(加圧)が大きくなり、スタンドオフ5mm以上で既に飛翔板への加速が終了するが、飛翔速度が大きくなり鋼管の変形量も大きくなる。スタンドオフが5mm以下の場合と同様に、薬量が大きいと鋼管に加わる加速が大きくなり変形量が多くなる。さらに、スタンドオフ0mmでは、爆薬の持つエネルギーを直接鋼管へ加えられるため、最大の変形量を示す。

6. まとめ

災害時に破壊されたガス管や石油パイプライン等のエネルギーライフラインの緊急修復技術として、反応性物質を利用する爆発圧着技術の応用を目指し、飛翔体の鋼管への爆発圧着実験ならびに飛翔挙動の観察実

験を実施し以下の結論を得た。

- (1) 反応性物質として従来の爆発圧着で用いられている爆薬ではなく、入手、取り扱いが簡単である産業用のエマルジョン爆薬を用いたが、圧着断面をSEM写真で観察した結果、強固に接合していることが明らかとなり、エマルジョン爆薬を用いた爆発圧着が緊急修復方法として利用可能であることを示した。
- (2) 薬量および、スタンドオフを変化させた一連の実験を行い、鋼管の変形量と実験条件との関係を明らかにした。鋼管への圧着性について、本実験からはスタンドオフを設定しない場合と薬量20gかつスタンドオフ2mmで飛翔体は鋼管に圧着しなかった。鋼管の変形量について、同一薬量のもとで、5mm以上のスタンドオフを設定すれば鋼管の変形量は一定で最小となる。5mm以下のスタンドオフ設定ではスタンドオフが小さいほど変形量が増加し、スタンドオフを設定しない場合が変形量は最大となった。薬量のみならず、スタンドオフの設定も鋼管の変形量抑制効果があり、本実験では薬量20gでスタンドオフ5mm以上の時、変形量が5mm程度と最小であることが明らかになった。
- (3) 高速度カメラによる飛翔挙動の観察実験より、飛翔体の加速領域は5mm以下の短い飛翔距離で終了し、その後ほぼ一定速度で飛翔することが明らかになった。飛翔挙動と爆発圧着実験結果から考えると、加速領域で衝突する場合は、加速終了段階で衝突する場合より生成ガス圧の変形量への寄与が大きくなると推察でき、5mm以上のスタンドオフを設定した場合、飛翔体はスタンドオフによらず同程度の運動エネルギーを持って鋼管に衝突するため、スタンドオフによらず鋼管の変形は一定になると考えられる。

文 献

- 1) 福山郁生, 工業火薬協会誌, 30, 203(1969)
- 2) 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, 榊井明, 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行集, 342(1997)
- 3) 阿部晃久, 機械学会論文集, 62-599, B, 86(1996)
- 4) 外本和幸, 伊妻猛志, 藤田昌太, 工業火薬協会誌, 54, 219(1993)
- 5) D. G. Batham, A. Loyer and D. V. Dorling, *Welding Journal*, 31(1987)
- 6) 馬場信吉, 工業火薬協会誌, 31, 390(1970)

7) 外本和幸, 藤田昌太, 千葉昂, 阮立群, 浦上進,
工業火薬協会誌, 50-3, 156(1989)

8) 社団法人火薬学会編, 「エネルギー物質ハンド
ブック」, 共立出版(1999)

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

Explosive welding test and optical measurement of flyer motion

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

The experimental study on the application of explosive welding technique to urgent repairs of gas and water pipe networks was conducted. The relationship between the damage to the pipe and experimental parameters such as stand off distance and amount of explosive has been determined by a series of the explosive welding tests. The deflection of the pipe is maximum without stand-off under the same amount of emulsion explosive. As stand-off increases, the deflection of the pipe is decreased. To the definite amount of explosive, when stand-off is more than 5mm, the deflection of the pipe becomes approximately constant. Moreover, the motion of the flyer was investigated by optical experiments. Regardless of the amount of explosive, the velocity of the flyer plate is accelerated instantly over 200 m/s within 0.5mm flying distance and reached approximately constant velocity at short flying distance smaller than 5mm.

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

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

^{***}Institute of north Japan soil co-operation, 1-8-1, Nakanumanishigojyo, Higashi-ku, Sapporo, Hokkaido, 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)