

# 小孔の衝撃押し広げによる地下空間構築技術 に関する実験的研究

建山和由<sup>1</sup>・片見俊宏<sup>2</sup>・平井伸吾<sup>3</sup>・伊東 繁<sup>4</sup>・長野司郎<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 立命館大学教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)

E-mail: tateyama@se.ritsumei.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>3</sup>正会員 工修 東海旅客鉄道株式会社 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1-6-5)

<sup>4</sup>工博 熊本大学教授 衝撃・極限環境研究センター (〒860-8555 熊本市黒髪 2 丁目 39-1)

<sup>5</sup>熊本大学技術専門官 工学部 (〒860-8555 熊本市黒髪 2 丁目 39-1)

土中に掘削した直径 10cm 程度の小孔の内部に発破等により衝撃荷重を載荷する場合を想定する。このとき小孔の孔壁周辺の土は急激に圧縮され、地盤内には、圧縮土の孔壁で囲まれた空洞が出現する。この考えを実際のトンネル施工や基礎工事に応用すると、最小限の排土で、かつ最小の覆工で地下空間を構築することができる。本論文では、衝撃的な載荷による地下空間構築技術の実現可能性について爆薬を用いた室内実験と現場実験により考察を行った。

**Key Words:** shock wave, explosive loading, soil compaction, underground space, experiment

## 1. はじめに

トンネルに代表される地下空間の構築や杭をはじめとする構造物の基礎工事では、地盤を掘削して地中に空間を構築しなければならない。工事に伴い発生する掘削土は、その処理が年々困難となり、これが制約となり掘削工事に支障を来す場合も多くなってきた。

本研究では、図-1 に示すように地盤中に直径 10cm 程度の小孔を掘削し、これを発破等により衝撃的に押し広げることを想定する。この手法では小孔を押し広げて空間を作り出すため、排土を最小限に押さえることができ、かつ、衝撃的に押し広げると孔壁周辺の土を集中的に圧縮することになるため、孔壁の安定を保つことができ、トンネル等の地下空間では覆工の軽減をはかり得る可能性がある。著者らは、数値計算と重錘の落下による擬似的な衝撃荷重を利用した室内実験により、地盤内に設けた小孔を急速に押し広げると、孔壁周辺に圧縮の影響を吸収させて小孔を拡張し得ること、ならびに簡易的な数値計算でこの現象を表現し得ることを明らかにした<sup>1)</sup>。本研究では、この工法の実現可能性を調べるため、爆薬を用いた室内実験と現場実験を行った。

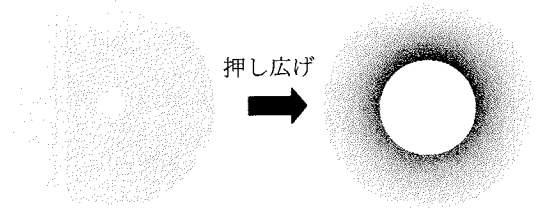


図-1 小孔の衝撃押し広げによる地下空間の構築

## 2. 爆薬を用いた室内実験

### (1) 実験の方法と設備の概要

実験は、熊本大学衝撃・極限環境実験センターにある衝撃エネルギー施設において実施した。同センターは、衝撃波現象の解明や衝撃圧縮を利用した材料創成などの研究を行っており、ここには、爆薬を用いた実験を安全に行うことのできる施設が整っている。

今回の実験は、内寸で縦横それぞれ 500mm、深さ 250mm の木製土槽を用いて実施した。実験では、予め土槽の中央に直径 50mm のステンレス製の円筒シリンダーを入れたメンブレンをセットし、その周辺に試料土を締

固めて供試体とした。供試体の作成では、試料土を4層に分けて土槽に撒き出し、鉄板を介して荷重をかけて締固めた。なお、実験後の供試体を切断してその内部の変形状況を観察するため、土槽は分解することができる構造になっている。

供試体の作成後、メンブレン内のシリンダーを抜いて爆薬をセットした後、メンブレン内に水を満たした。図-2に実験の概要を示す。

供試体作成の際、2層目の締固めが終了した試料土の表面に圧力計測センサをセットした。圧力計測センサは、長さ約30cmのステンレス製鋼棒の先端に半導体センサを取り付けたもので、衝撃波を感知するとこれを電圧に変換する。計測された電圧は、圧力計測センサ固有の係数を乗じることによって圧力に変換することができ、伝達した衝撃圧力を知ることができる。圧力計測センサは、前述の土槽側面に水平に設けられた4つの穴から土槽内に挿入し、メンブレン側面から、4段階の距離を離して設置した。写真-1に圧力計測センサの設置状況を示す。

また、2層目を締固めた試料土の表面にメンブレンを中心として放射状に20mm間隔でマーカを設置した。マーカは直径2mmのプラスチック製のボールを用いた。実験前後でマーカ間の間隔の変化を計測し、供試体内の変形を計測するのに用いる。なお、本来、実験前後の供

試土の密度分布の変化を計測すべきところではあるが、土槽の大きさが小さいため、部分的に試料土を採取して密度分布を求めるといった測定を行うことができず、密度は計測していない。

使用した爆薬は、導爆線とエマルジョンの2種類である。このうち、導爆線は、ペンスリットを芯薬とし、本来は、他の爆薬の爆ごうを起こさせるために用いられる火工品である。今回用いた導爆線は、芯薬量7.0g/m、外形5.4mm、爆速6310m/sの25グレイン導爆線である。実験では、この導爆線を30cm程度の長さに切り、内径7mmのアクリルパイプに入れて、メンブレンの中央に鉛直に立て、その上端に電気雷管を取り付けて爆薬とした(図-2(a)参照)。また、エマルジョンは、含水爆薬の一種で今回用いたものは、密度1.13g/cm<sup>3</sup>、爆速4440m/sのものである。実験では、12gの重さのエマルジョンをフィルムケースに詰め、その中央に電気雷管を差し込んだ。このフィルムケースをキャップをせずにメンブレンの底部中央において爆薬のセットを完了した(図-2(b)参照)。実験は、供試体と爆薬をセットした木製土槽をエアサスペンションで支えられた水槽内に密閉状態に入れて、水槽内に水を満たすことなく電気雷管に通電して爆薬を爆破させた。実験後、供試地盤内にできた小孔の広がり具合の目視観察、ならびに供試体内の変形状況の計測を行うと共に、圧力センサの出力値から、供試体内の衝撃波の伝播挙動を調べた。

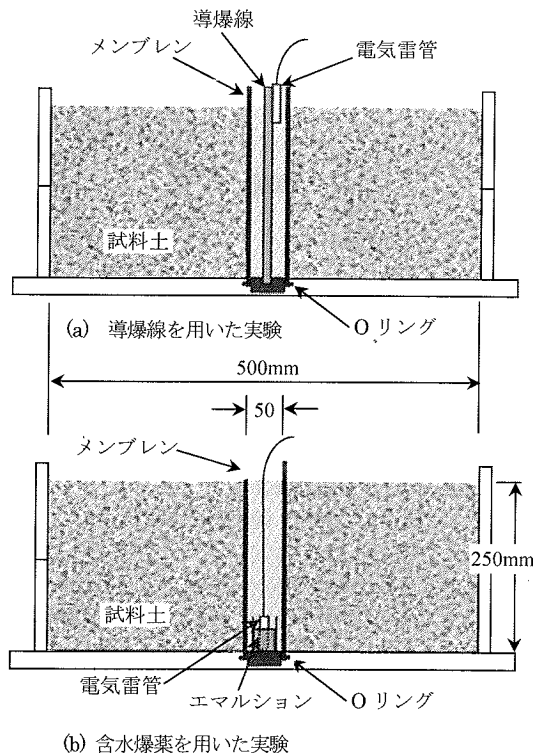


図-2 実験用土槽と爆薬のセット

## (2) 実験で用いた試料土と実験パターン

実験で用いた試料土は、表-1に示す3種類で、これらの試料土に対し表-2に示す実験を行った。実験では、各実験の再現性を調べるため、表-2に示すように各パターンで複数回の実験を行ったが、エマルジョンを使用した実験だけは、1回目の実験で土槽底部が破壊したため、繰り返し実験を行うことはできなかった。なお、他の実験では同じ条件のもとでは、ほぼ同様の結果が得られることが確認された。

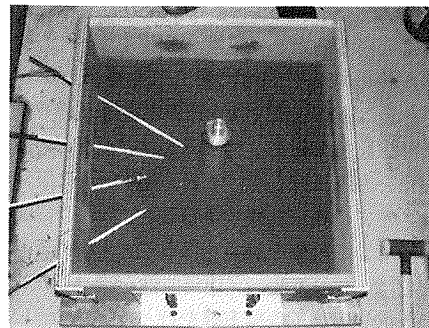


写真-1 圧力計測センサの設置状況

(3) 実験結果と考察

a) 導爆線を用いた実験（実験パターンD1, D2, D3）

写真-2, 3, 4は、導爆線を用いた実験結果の一例で、それぞれ、礫混じり砂、火山成粘性土、細粒分質砂に対する実験後の拡張孔周辺地盤の平面図と側面図である。側面図は、実験後、木製土槽を分解し、供試体をナイフエッジで切断して観察したものである。ただし、縮尺が写真により若干異なるため、これらの写真から、見た目による大きさの比較を単純に行うことはできない。これらの結果を観察することにより、以下のことが明らかになった。

- 1) 写真-2は、D1の実験に対する結果である。礫混じり砂に対する実験結果では、50mmの小孔は爆破により周方向に圧縮されて、約120mmの円筒孔にまで押し広げられた。ただし、爆破による圧縮波が土槽の端部で反射して小孔に向かって帰ってくるため、粘着力の小さな砂の孔壁がゆるんでいることが観察された。このことは、平面図において孔周辺に反射波の伝播に伴う引張り亀裂が同心円状に生じていることから推察することができる。
- 2) 写真-3は、D2の実験に対する結果である。火山成粘性土に対する実験では、直径50mmの小孔は、約

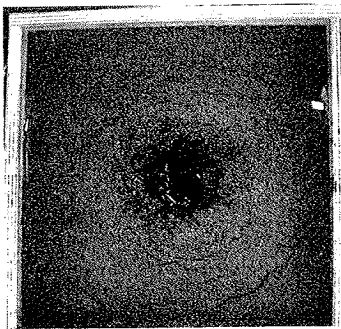
170mmの円筒孔に拡張されていた。この試料土は、粘着力を有する土であるため、一端押し広げられた箇所を反射波が伝播しても、砂質土でみられたような引張り亀裂は発生せず、孔壁は安定して自立していた。また、写真-3の平面図では、孔壁周辺の同心円状の範囲の土が特に圧縮されている様子が観察される。

表-1 試料土の物理特性

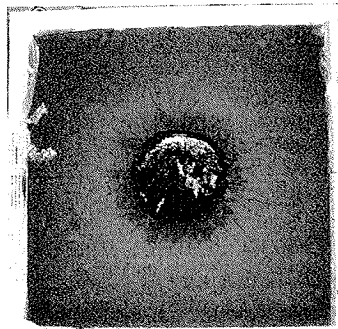
種類	土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	平均粒径 $D_{50}$ (mm)	含水比 $w$ (%)	間隙比 $e$	飽和度 $S_r$ (%)
礫混じり砂	2.72	0.62	9.0	0.850	28.8
火山成粘性土	2.80	0.065	138.3	5.829	66.4
細粒分質砂	2.71	0.33	16.9	0.726	53.1

表-2 実験パターン

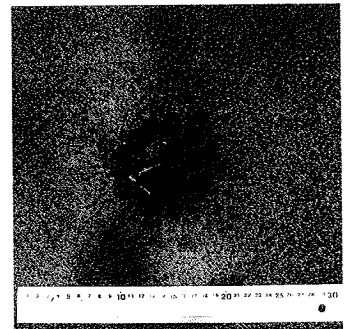
実験番号	試料土	使用爆薬	実験回数
D1	礫混じり砂	導爆線	3
D2	火山成粘性土	導爆線	3
D3	細粒分質砂	導爆線	2
E3	細粒分質砂	エマルジョン	1



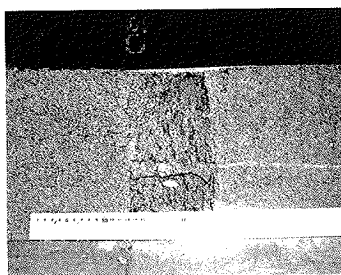
(a) 平面図



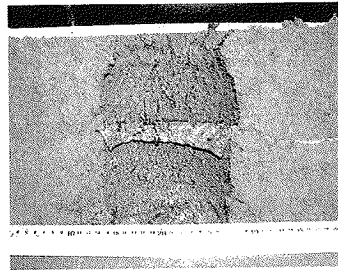
(a) 平面図



(a) 平面図



(b) 側面図



(b) 側平面図



(b) 側面図

写真-2 D1に対する実験結果  
(礫混じり砂・導爆線)

写真-3 D2に対する実験結果  
(火山成粘性土・導爆線)

写真-4 D3に対する実験結果  
(細粒分質砂・導爆線)

3) 写真-4は、D3に対する実験の結果である。ただし、写真の縮尺の関係で平面図は他の写真に比べて、すこし大きく表示されている。細粒分質砂に対する実験結果では、D1の結果と同様に、約120mmの円筒孔が形成されていること、ならびに反射波による孔壁周辺のゆるみ具合は、実験D1とD2の中間程度であることが観察された。また、砂質系の土で初期含水比が高かったところに爆破で飛び出たメンブレン内の水を吸収したため、孔壁の土は泥濁化していることも観察された。

上述のように、D1とD3の砂質系の試料土では、50mmの小孔が約120mmにまで拡張され、D2の火山成粘性土では、約170mmにまで拡張されるという結果が得られた。拡張後の孔の大きさの違いは、試料土の圧縮性の違いによると考えられる。これは、表-1に示すようにD2の試料土の初期間隙比が他の試料土の間隙比に比べ、非常に大きいことから理解することができる。

実験では、小孔の押し広げ状況を観察した後、衝撃波による地盤内の変形をマーカの移動量から計測した。マーカは、試料準備の際に中央の層の上面に20mm間隔で小孔の境界から放射状に並べておいたもので、実験後そ

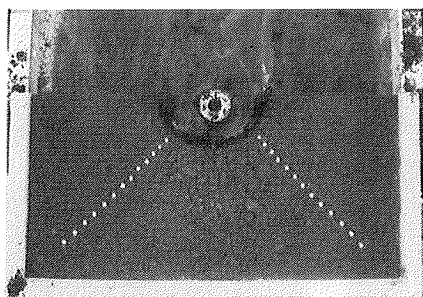


写真-5 押し広げ後のマーカの移動の計測

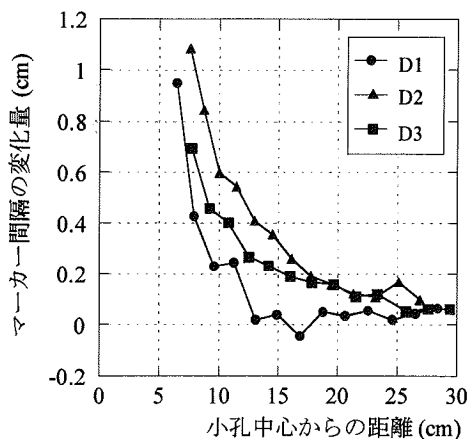


図-3 衝撃押し広げによるマーカ間隔の変化

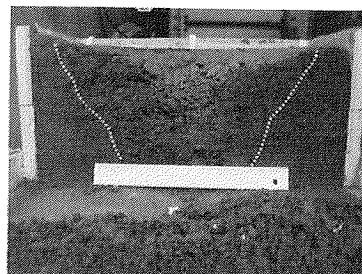
の間隔の変化を計測した。計測は、写真-5に示すようにデジタルカメラでマーカの位置を撮影し、その画像をパソコンに取り込んで、間隔の変化を算出した。図-3は、その計測結果である。孔壁周辺では当初20mmあった間隔が半分以下にまで圧縮されているが、間隔量の変化は、孔壁からの距離に応じて急激に小さくなり、小孔中心からの距離が20cm~25cm離れると、マーカの間隔の変化量は初期間隔の10%以下に低下していることがわかる。このことは、爆破による押し広げの影響が、孔周辺の限られた領域で吸収されたことを意味している。なお、この図から供試土により若干の差はあるが、いずれの土においても概ね同様の圧縮が生じていることがわかる。

### b) エマルジョンを用いた実験（実験パターンE3）

写真-6はエマルジョンを用いた実験後の供試体の状態を表す。エマルジョンを使用した実験E3については、写真-6に示すように導爆線を用いた他の実験の結果とは拡張孔の大きさや形状が大きく異なった。導爆線を用いた前述の実験では、爆破で押し広げられた拡張孔は、ほぼ円筒形であったが、この実験で得られた孔は、大きな漏斗状であった。供試地盤は沈下しているため、衝撃により密度は増加していると考えられるが、孔壁の押し広げは確認できず、土が拡張孔を埋めてしまっている。



(a) 平面図



(b) 側面図（白波線は緩んだ領域の境界のスケッチ）

写真-6 エマルジョンによる実験結果

これらの違いは、爆薬の種類と爆破の方法の違いによるものと考えられる。D1～3の実験で用いた導爆線は、前述のように他の爆薬を起爆するための火工品であり、一般的な爆薬が有する膨張ガスによる仕事効果は小さいと言える。これに対し、E3の実験で用いたエマルションは、硝酸塩からなる含水爆薬の一種で、爆薬本来の機能であるガス膨張現象が顕著に現れる。このため、E3の実験では、最初の衝撃波で小孔が押し広げられても、その後の急激なガス膨張により孔周辺の土が吹き飛ばされて、このゆるんだ土が拡張孔にたまってしまったものと思われる。

また、導爆線を用いた実験では、少量の爆薬を小孔の中心軸に沿って線状に爆発させていくため地盤内で小孔の周方向に衝撃波が進行するが、E3の実験では、小孔の底面に爆薬を置いたため、1点に爆薬のエネルギーを集中して発生させることになり、衝撃波が放射状に進行し地盤は漏斗状に破壊を起こしたものと考えられる。なお、E3の実験でも、供試体の準備の際にその内部にマーカを埋め込んでおいたが、爆破後は元の位置との関係が特定できないほど乱れていて、供試体内の変位状況は計測できなかった。

#### c) 衝撃波の伝播の計測結果

図-4は、表-2に示したD1の実験において供試体の作成時に内部に埋め込んで置いた半導体センサにより、衝撃波の伝播状況を計測した結果の一例である。1ch, 2ch, 3ch, 4chのセンサの位置は、小孔の中心からそれぞれ、45, 65, 85, 105 mmであり、縦軸の電圧に校正係数を乗じると圧力に変換することができる。この図より、衝撃波の大きさは、小孔から遠ざかるに従い小さくなり、また、その波形もなだらかになっていることが読みとれる。これは、供試土が爆破で圧縮される際、衝撃波のエネルギーが吸収されることと、衝撃波が平面的に広がることによる幾何減衰との両者の効果が重ね合わされて生じた波形と考えられる。

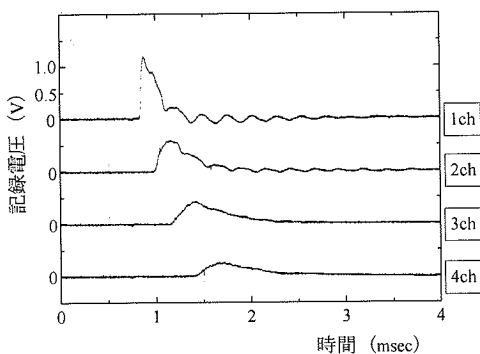


図-4 衝撃波の計測結果

図-5は、図-4に示したセンサの出力電圧を圧力値に変換してそのピーク値を読み、この値を個々のセンサの小孔中心からの距離に対してプロットした結果である。この図より、導爆線を用いたD系の実験では、土質によらず、ほぼ同様の最大衝撃圧力が伝わっていることがわかる。これに対し、エマルションを用いたE3の実験では、出力値の不備から2点でしか結果が得られていないが、D系の実験結果に比べ、非常に大きな衝撃圧力が発生していることがわかる。これは、導爆線は、線に沿ってごく少量の爆薬が順次爆発していくため、感知される衝撃圧力が比較的小さいのに対し、エマルションを用いた実験では、小孔底部でまとまった爆薬を一度に爆発させたため、非常に大きな衝撃圧力が感知されたものと考えられる。また、この図より、衝撃圧力は小孔から遠ざかるに従い小さくなっており、爆破の影響が小孔中心からの距離とともに減衰していることがわかる。

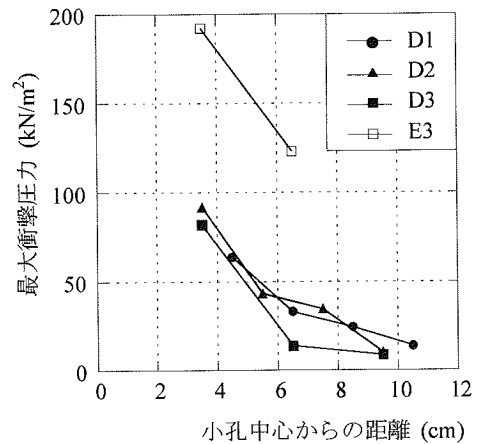


図-5 最大衝撃圧力の計測結果

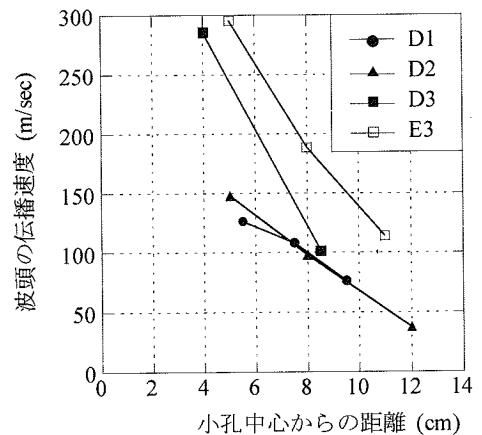


図-6 波頭の伝播速度の計測結果

図-6 は、図-4 の衝撃圧力の計測データから、各センサ間の波頭の伝播時間を読みとり、各地点の伝播速度に換算して、小孔中心からの距離に対してプロットした結果である。この図より、小孔の中心から遠ざかるにしたがって波頭の伝達速度が小さくなっていることが分かる。実験前の地盤は一樣に締固めた地盤であるため、通常の弾性波等の伝播では、波頭の伝播速度も一樣となるはずである。しかしながら、今回の衝撃押し広げでは、爆破の衝撃により移動する粒子の速度が波頭の伝播速度より遙かに大きいため、圧力計測センサは弾性波頭が届くよりも早く衝撃の影響を感知することになる。このため、孔壁付近では、波頭の伝播速度は大きく表れるが、衝撃波は距離とともにそのエネルギーが減衰するため、小孔中心からの距離とともに伝播速度は小さくなったと考えている。

なお、D3 の結果が D1, D2 と異なる結果を示したが、この原因は不明確ながら供試体作成の際に、センサの設置位置がずれたことによるものと考えている。

### 3. 現場実験による検討

本章では、屋外の地盤における本工法の適用可能性を検討するため、現場のヤードにおいて、発破実験を行った。

#### (1) 実験方法

現場は、ある土地造成現場の一面で実施した。実験では、試験ヤード内に削孔機を用いて直径 90mm、または 60mm、深さ約 1100mm の鉛直孔を掘削し、その中に爆薬をセットした。この際、爆薬の周辺を水で満たすため、鉛直孔の中にビニル製の袋を入れ、その中央に内径 35mm の塩ビパイプを挿入した。塩ビパイプにはパイプ

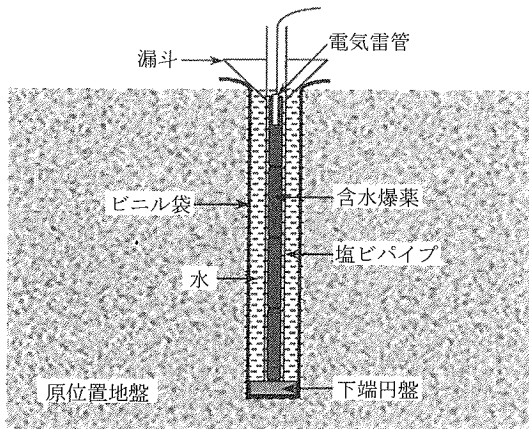


図-7 現場実験の概要（正起爆）

が鉛直孔の中央に来るようにその下端に円盤、上端に漏斗を利用した支持具を取り付けた（図-7 参照）。

使用した爆薬は、室内実験の E3 実験で使用した含水爆薬（アルテックス紙巻き包装品、爆速 5800~6000m/sec）で直径 30mm、長さ 253mm、重量 200g の薬包を 1 孔に 3 個ないし 4 個装填し、最上部の薬包に瞬発電気雷管を取り付けた正起爆、もしくは最下部の薬包に雷管を取り付けた逆起爆により爆ごうさせた。爆破の際には、安全のため、鉛直孔の上に鉄板を置き、その上に防爆シートとワイヤーもっこを置いた。写真-7 に、装薬前の鉛直孔と爆薬を示す。

#### (2) 実験で用いた試料土と実験パターン

実験で用いた試料土は、室内実験の D3, E3 で用いた物と同じ細粒分質砂で、良く締固められた硬い A 地盤とまだ十分に締固められていない柔らかい B 地盤の 2 種類の地盤に対して実験を行った。それぞれの地盤の特性は表-3 に示す通りである。このうち、A 地盤は 1 カ所のみであったが、B 地盤では 4 カ所で行い、実験条件が爆破効果に与える影響を調べるため、条件を表-4 に示すように少しずつ変えて、実験を行った。

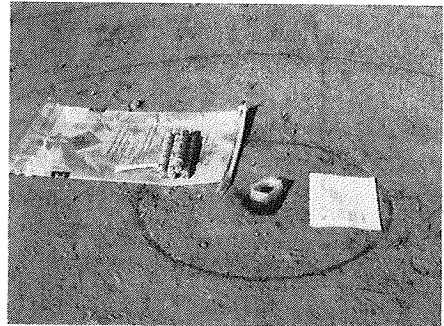


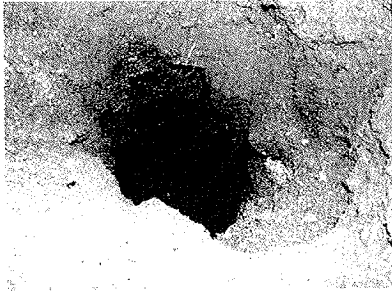
写真-7 削孔された鉛直孔と爆薬

表-3 現場実験で使用した試料土の物理特性

	乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 Sr (%)
A 地盤	1.65	9.8	0.646	41.4
B 地盤	1.38	12.5	0.991	34.6

表-4 現場実験における実験条件

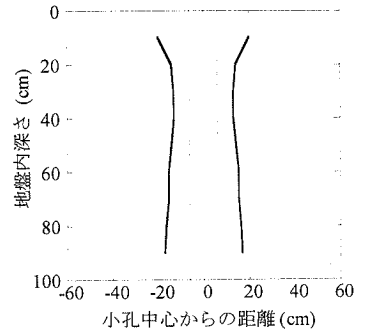
No.	地盤種別	起爆方法	削孔径	薬包本数
A1	A 地盤	正起爆	90mm	4
B1	B 地盤	正起爆	90mm	4
B2	B 地盤	正起爆	90mm	3
B3	B 地盤	正起爆	60mm	4
B4	B 地盤	逆起爆	90mm	4



(a) 爆破後の孔の状況



(b) モルタル注入による孔の型取り  
(左は、爆破を行わなかった削孔跡の型取り)



(c) 孔の変形状況

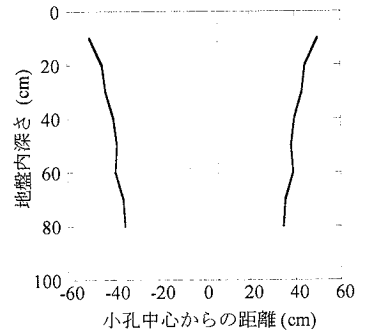
写真-8 A 地盤の実験結果 (実験 No.A1)



(a) 爆破後の孔の状況



(b) モルタル注入による孔の型取り



(c) 孔の変形状況

写真-9 B 地盤の実験結果 (実験 No.B1)

爆破後、押し広げられた孔の概略の採寸と目視観察を行った上で、押し広げにより形成された孔にモルタルを流し込み、1週間後、重機を使ってそれらを掘り出して、詳細な採寸を行った。またこの際、拡張孔周辺の地盤の観察と試料採取を行った。

### (3) 実験結果と考察

写真-8 に A 地盤における実験後の様子を示す。このうち、(a)は爆破で拡張された孔の状況を表す。現場試験では、室内試験で使用したものと同じ含水爆薬を使用したため、爆破に伴い大量の膨脹ガスが発生する。このガスは外部に吹き出るときに地表面付近の土砂を吹き飛ばし、これが、拡張孔の中に落下してくるため、爆破直後の孔には土砂がたまっている。(b)は、爆破で拡張された孔にモルタルを流し込み、1週間後に掘り出したものである。参考のために、爆破を行わなかった小孔にもモルタルを流し込みその型をとった。この写真より A 地盤では比較的一様に小孔の押し広げが起こっていることがわかる。

(c)は、(b)から小孔の押し広げ状況を図に落としたものである。この図より、直径 90mm の小孔が、直径約 300mm 程度にまで拡張されていることがわかる。

写真-9 は、同じく B 地盤における実験後の様子を示したものである。(a)は爆破で拡張された孔の状況を表すが、もとの地盤が十分に締固められていないため、発生したガスで地表面付近の土砂が多く吹き飛ばされ、地表面や孔の中に落ちてたまっている。これらの土の体積は、締固められた A 地盤より明らかに大きかった。

(b)は、爆破で拡張された孔のモルタル型である。地表面付近の土が爆風で吹き飛ばされたこともあり、上部の径が下部に比べて大きくなっている。このことは、(c)の小孔の押し広げ状況からもよく見て取ることができ、直径 90mm の小孔が、下部で約 700mm、上部で約 1000mm 程度にまで拡張されている。

なお、実験では、孔周辺の地盤の変形を計測するために地表面にマーカを置いて、実験前後の位置の違いを調べたが、有意な差は計測されなかった。

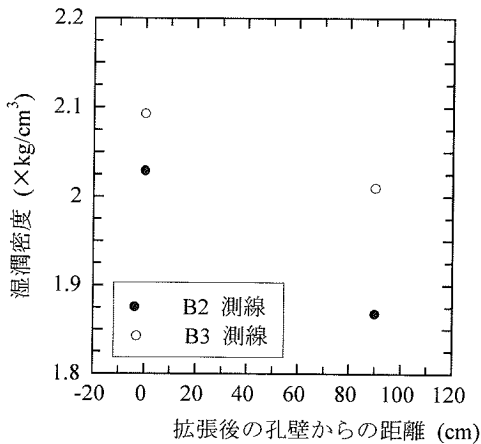


図-8 爆破実験後の地盤内の密度分布

また、実験後、B2とB3の実験エリアにおいて、重機を用いて孔周辺の地盤を削り取り、周辺地盤の変状を観察すると共に、異なる2測線において土の試料を収集し密度計測等を行った。図-8は、この計測の結果を表している。計測点が少なく断定はできないが、土の密度は孔周辺がその外側に比べると若干高いという傾向は認められる。なお、掘削の際、孔周辺の地盤内の変状を目視観測したが、孔壁より1m程度離れると、見た目では変状は認められなかった。

実験は、表-4に示すように条件を変えて実験を行った。準備したモルタルの量に限りがあり、すべてのケースについて拡張孔の正確な大きさと形を計測することはできなかったが、目視観測による限り起爆方法、削孔径、爆薬の薬量による結果の差異は観察されなかった。唯一初期地盤の締固め具合が拡張効果に与える影響の差異は、写真-8, 9に示したように明確で、同じ土を同じ方法で押し広げても初期密度の違いにより結果が大きく異なることが明らかになった。

## 5. まとめ

本研究では、地盤中に設けた小孔の内部に衝撃荷重を載荷して、これを急速に押し広げることによりトンネルや基礎工事のための空洞を構築する技術の実現可能性を爆薬を使用した室内実験と現場実験で検討した。爆薬を使用するため、実験の規模や方法が制限され、限られた実験しか行うことができなかったが、これらの実験を通じて以下の知見を得た。

小型の土槽を用いた室内実験では、3種類の供試土に

設けた50mmの円筒形の孔内で導爆線とエマルジョンの2種類の爆薬を爆発させて小孔の衝撃押し広げを行った。この結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 導爆線を用いた実験では、いずれの土についても衝撃波による拡張孔が作られたが、特に初期間隙比の大きな粘土地盤においては、直径170mm程度の円筒形の孔を形成することができた。
- 2) 爆破の衝撃圧力によって周辺地盤は圧縮されて変位するが、変位量は孔壁近傍で大きく、孔壁から離れるにしたがって急激に小さくなる。
- 3) 砂質系の土の場合、土槽実験では端部で反射した波が引張波となって帰ってくるため、圧縮で作られた孔壁の土が崩れて、拡張孔の形が保持されにくい。これに対し、粘性土の場合には、孔壁が崩れることなく拡張孔の形が保持される。
- 4) 導爆線を用いた実験では、小孔の中心軸に沿って線状に小規模な爆破が起こっていくため、ほぼ円筒形の拡張孔が作られるが、エマルジョンを用いた実験では、小孔の底で比較的まとまった爆薬を爆発させたことと、爆破に伴い高圧のガスが発生したことにより、孔周辺の土が吹き飛ばされ、円筒形の拡張孔は得られなかった。
- 5) 爆破の衝撃波による圧力は、地盤内を伝播していく間に土の圧縮と幾何減衰により、急激に小さくなる。
- 6) 爆破時の波頭の伝達速度は、小孔の中心に近いほど大きく、小孔の中心から遠ざかるにしたがって小さくなる。

また、実際の土工現場において含水爆薬を用いた実験を行った。実験では深さ1100mm程度、直径90mm、もしくは60mmの鉛直孔を造成地の地盤に掘削し、この中に爆薬を装填して発破を行った。このとき、地盤の締固め具合、爆薬の量、削孔径、起爆方法を変えて実験を行い、これらの条件が結果に与える影響を調べた。この実験の結果、以下の知見が明らかになった。

- 1) 締固めが進んだA地盤では、約300mm、締固めが不十分なB地盤では、約700mmにまで小孔が押し広げられた。
- 2) 実験で用いた爆薬は含水爆薬で、衝撃波とともに大量のガスが発生し、これが放出される際に孔周辺の土を吹き飛ばすため、表層近くの土が崩れ、圧縮で作られた孔の中に落ち込むことが多い。
- 3) 爆薬の量、削孔径、起爆方法が結果に与える影響は観察できなかった。

以上の実験結果から判断して、地盤内に小孔を掘削し、これを爆薬を用いて衝撃的に拡張することによる地下空間構築技術は、地盤条件によっては実現の可能性を有すると判断されるが、工法として確立させるには、検討



を要する課題も多い。特に、地盤特性、爆薬の種類と薬量、装薬と起爆方法が爆破による地盤変形に与える効果、ならびに、騒音や振動等、周辺環境への影響については、必要不可欠の検討事項といえる。また、粒子の移動速度が波頭の伝播速度より早い衝撃波の伝播に伴う土の圧縮現象をシミュレートすることのできる計算手法の開発も必要となってくる。これらの課題に対して、引き続き、研究を続けていく予定である。

り、熊本大学工学部・大谷順教授、松本英敏技官から多大な協力を得た。記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 建山和由, 平井伸吾, 矢野隆夫, 片見俊宏: 小孔の衝撃押し広げによる地下空間構築技術の実現可能性, 土木学会論文集, No. 763/VI-63, 151-162, 2004. 6.
- 2) 日本化薬工業会資料編集部編: 一般火薬学, 2001.

謝辞: 最後に、土槽を用いた室内爆破実験を行うにあた

(2003. 9. 9 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON UNDERGROUND SPACE CONSTRUCTION BY EXPLOSIVE LOADING OF BLASTING IN A BOREHOLE

Kazuyoshi TATEYAMA, Toshihiro HENMI, Shingo HIRAI, Shigeru ITOH  
and Shiro NAGANO

In the case that an explosive load is subjected in a borehole which has been excavated in the ground, the soil around the borehole wall will be abruptly compressed and then a cavity will be created in the ground, being surrounded by the compressed soil wall. When we apply this idea to the construction of tunnels or foundations, the underground space can be created with the minimum mucking and the reduced lining. We carried out some laboratory experiments and field ones, where small boreholes were expanded by blasting. The results of the experiments gave us some knowledge on the possibility of the underground space construction by this idea.