

EPS と土で構成される爆発緩衝システムに関する実験的研究

An experimental study on explosion mitigation system composed of EPS and soil

市野宏嘉[†], 別府万寿博^{*}, 大野友則^{**}, 東原健一^{***}, 原口望^{****}, 大城戸秀人^{*****}

Hiroyoshi Ichino, Masuhiro Beppu, Tomonori Ohno, Ken-ichi Higashihara, Nozomu Haraguchi, Hideto Okido

[†]博 (工), 防衛大学校准教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 丁目 10 番 20 号)

^{*}博 (工), 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 丁目 10 番 20 号)

^{**}工博, 防衛大学校名誉教授 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 丁目 10 番 20 号)

^{***}カネカケンテック株式会社, 地盤環境事業部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 1-3-3)

^{****}カネカケンテック株式会社, 技術開発部 (〒541-0045 大阪府中央区道修町 4-4-10)

^{*****}岡三リビック株式会社, 営業本部 (〒108-0075 東京都港区港南 1 丁目 8 番 27 号)

Key Words: EPS, explosion mitigation system, subsurface structure

キーワード: EPS, 爆発緩衝システム, 地中構造物

1. 序言

重要な社会基盤施設において爆発事故や爆破テロ事件による爆発災害が発生すると、多くの人的被害が生じるとともに、その経済的損失も計り知れない。そのため、重要な社会基盤施設では、爆発に対する防護策が検討されるべきとの機運が高まっている¹⁾。爆発から重要施設を防護する際、当該施設を地中構造物とすると、構造物と爆発物の間に地盤層が介在することにより、爆発が構造物に近接して生じることがなく、構造物の局部損傷の発生が防止できる。通常、地中構造物は掘削・設置が終了すると地盤材料で埋め戻される。この際、土主体の地盤材料に緩衝材を併用して埋め戻し、これを爆発に対する緩衝システムとする方法が考えられる。この方法により、爆発に対してより安全性が高い施設を建設できることが期待される。

地盤材料に併用して用いられる緩衝材の一つとして、ポリスチレンフォーム (expanded polystyrene foam: 以下、EPS とよぶ。) 等の発泡材がある。発泡材を用いた場合の緩衝効果の検討例として、岸ら²⁾によって落石による衝撃を緩和するための EPS を使用した三層緩衝構造が提案されており、落石防護施設の頂版部の緩衝層には EPS の利用が進められている³⁾。発泡材を爆発に対する緩衝材に応用する研究として、Oleck ら⁴⁾は、実験および数値解析から EPS 製の断熱型枠に打設された鉄筋コンクリート壁が EPS が爆風を緩衝し得る可能性を示している。Wang ら⁵⁾は、地中構造物のコンクリート層の内部に EPS を埋め込んだ場合に爆発によって生じるコンクリート中の応力を低減する効果とその低減率について、数値解析によ

り調べている。De ら⁶⁾は、遠心載荷装置を道いた模型実験によりトンネル等の管状の構造物の耐爆防護における発泡材の有効性を報告している。ただし、地中構造物の耐爆緩衝システムとしての発泡材と土を用いた構造の耐爆緩衝効果についての研究は少なく、その緩衝効果とそれに影響を及ぼす要因は明らかではない。

そこで、本研究では、爆発実験により地中構造物上部の爆発緩衝システムにおける EPS の密度、位置、層数が爆発荷重の緩衝効果 (爆発荷重の低減および分散) に及ぼす影響を調べ、EPS と土による爆発緩衝層を設計する際に考慮すべき要因について検討する。

2. 爆発緩衝システムの爆発実験の方法

2.1 実験ケース

緩衝層の構成と実験ケースを図-1 に示す。耐爆性を考慮した地中構造物を構築する場合、爆発物が構造物の近傍まで侵入して爆発することを防ぐため、地表面付近に剛性が高い材料を使用した層を設けることがある。この層を模擬し、上面から厚さ 75 mm までの砂の層と 2 枚の爆発遮断鋼板を設置した。その下の厚さ 275 mm の層が爆発荷重の緩衝層であり、土 (本実験では砂)、EPS (Case2~Case7) および EPS 防護鋼板 (Case4~Case7) を層状に重ね合わせて構成した。

本実験で使用する EPS は、密度の差異が爆発荷重の緩衝効果に及ぼす影響の程度が明確に現れるように、設計密度 16 kg/m³ および設計密度 30 kg/m³ の 2 種類を選んだ。これらの EPS に JIS K7220 に準じる圧縮試験を行い、図-2 に示す応力~ひずみ曲線およびエネルギー吸収曲線

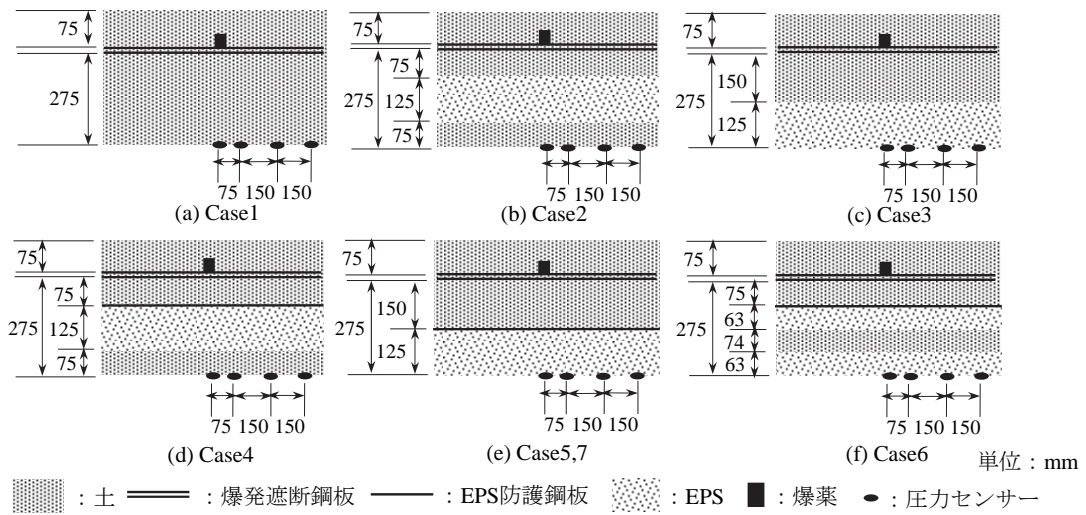


図-1 爆発緩衝システムの構成と実験ケース

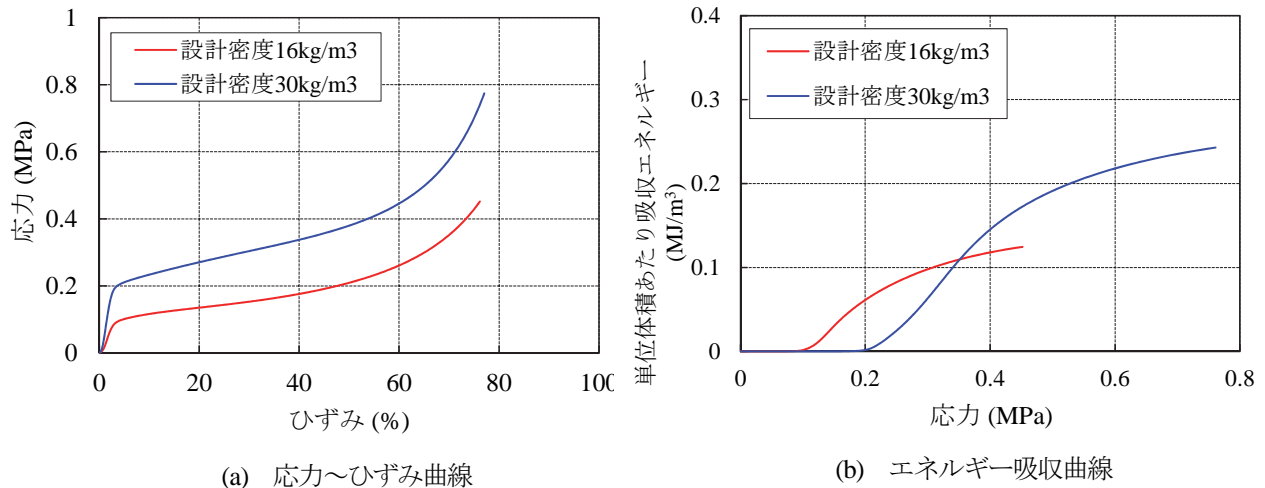


図-2 EPS の力学特性

を得た。図から、いずれの EPS もひずみ 2%未満の領域では弾性的な挙動を示す。ひずみが 2%を超えるとひずみの増大に対する応力の勾配は緩やかとなる。この領域では EPS は過度な応力の増大を伴うことなくエネルギーを効果的に吸収できる。ひずみが 60~70%を超えると、わずかなひずみの増大に対して応力が顕著に増大する。この領域では EPS セルがほぼ圧潰されて緩衝材としての機能が喪失される。なお、設計密度が大きいほど同等のひずみの下で示す応力は大きくなる。また、効果的にエネルギーを吸収できる応力の範囲は密度により異なる。

実際の構造物では、EPS の脆性的な破壊を防止するため、鉄筋コンクリート版などで防護されることも想定されるが、本実験では実験における相似条件や室内への運搬・設置上の制約から、厚さ 1.2mm の鋼板を使用した。実験にあたっては、EPS を使用しない場合と、EPS を使用した場合の爆発荷重に対する緩衝効果を比較する。また、EPS の配置位置の相違による影響についても調べる (Case1~Case3)。この際、防護鋼板の有無による影響に

についても検討する (Case4, Case5)。さらに、EPS1 枚の厚さを薄くして 2 層に分けて使用することにより、各 EPS により大きな変形を促した場合の緩衝効果の変化を調べる (Case6)。最後に、EPS の力学特性は密度により変化することから、密度の異なる EPS を使用した場合の緩衝効果について検討する (Case7)。実験回数は Case1,5,6,7 が 2 回、Case2,3,4 が 1 回である。

2.2 実験用緩衝システムの構築と圧力の計測

爆発実験室内の地盤を掘削して、内寸が 920 mm×920 mm の正方形となるように木製型枠を設置した。底部には、圧力センサー (共和電業製 PC-50KC, 定格容量 5 MPa, 固有振動数約 71 kHz) を厚さ 25 mm の鋼板に貼付して設置した。爆薬設置位置 (爆源) の直下に配置した圧力センサーを P0、爆源直下から水平距離 75 mm, 225 mm, 375 mm の位置に配置した圧力センサーをそれぞれ P75, P225, P375 と表す。EPS の縦横の寸法はいずれも縦 900 mm×横 900 mm で、厚さは 125 mm または 63mm (Case6

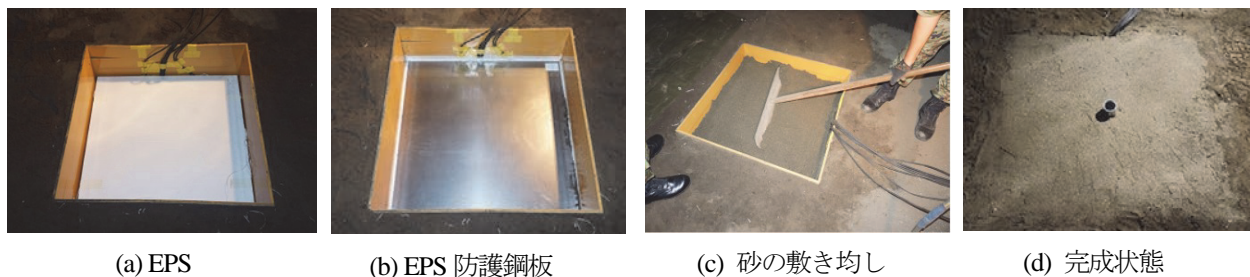


図-3 実験用緩衝システムの構築

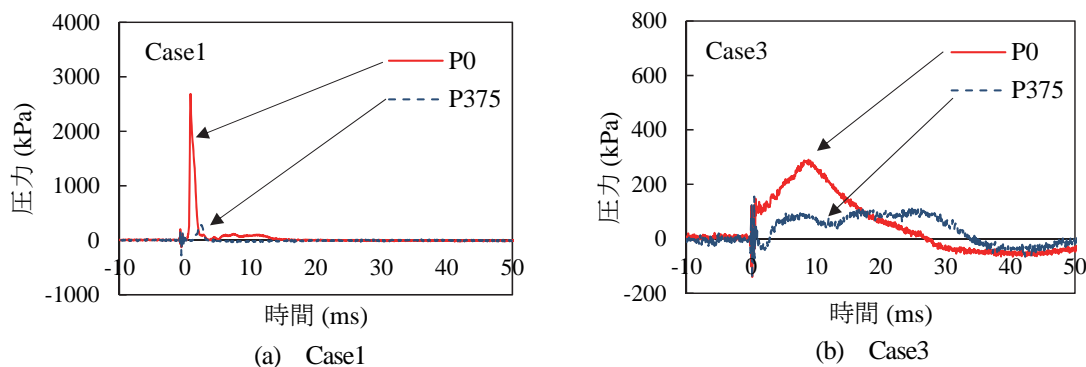


図-4 圧力～時間関係の一例

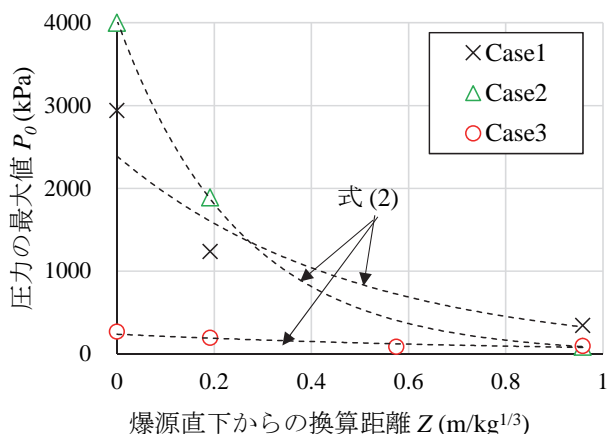


図-5 圧力の最大値と換算距離との関係

(厚さ 1.2 mm) を敷設した。本実験では地盤材料として砂を使用した。使用した砂の平均粒径は約 0.4 mm である。この EPS と砂および鋼板を図-1 のように実験ケースに応じて層状に重ねた。砂層の仕上り時の密度は $1.39 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \sim 1.46 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、含水比は 10.6% ~ 11.1% であった。緩衝システムの構築の状況を図-3 に示す。

実験に使用した爆薬は、Composition C-4 爆薬 53g である。爆薬は、アルミ粘着テープで作製した円筒形のスリーブに充填し、直径と高さがともに 3.7 cm の円柱形に成形した。充填密度は 1.4 g/cm^3 である。この円柱形状爆薬に 6 号電気雷管を挿入し、爆薬に固定した。爆薬の設置位置は、図-1 に示すとおりである。計測項目は緩衝システムの最下面に作用する圧力であり、計測のサンプリング間隔は、約 0.04 ms とした。

3. EPS を使用した緩衝システムの耐爆緩衝効果

3.1 EPS の有無および配置位置による緩衝効果の相違

まず、EPS を使用しない場合と、EPS を使用した場合の爆発荷重の緩衝効果を比較した。図-4 に圧力～時間関係の代表例を示す。また、図-5 に、圧力の最大値と、爆源直下からの換算距離との関係を示す。爆源直下からの換算距離 Z は、次式で定義される。

$$Z = \frac{d}{M_E^{1/3}} \quad (1)$$

ここに、 d は爆源直下からの水平距離(m)、 M_E は爆薬の TNT 換算質量 (本研究では C4 爆薬の質量の 1.13 倍) (kg)、である。また、図-5 では、圧力の最大値と爆源直下からの換算距離との関係を次式で近似する。

$$P_0 = A e^{-BZ} \quad (2)$$

ここに、 P_0 は圧力の最大値(kPa)、である。式(2)には、 A 、 B の 2 つの係数が含まれている。係数 A は、爆源直下($d = 0$)における圧力の大きさを表す係数である。したがって、係数 A が小さいほど爆発緩衝システムによる爆発荷重の低減効果が大きいことを示す。係数 B は、爆源からの距離が離れることに伴う圧力の減少の割合を表す係数である。したがって、係数 B が小さいほど、爆源直下での圧力と爆源からより離れた位置での圧力の差が小さく、爆発緩衝システムによる爆発荷重の分散効果が大きいことを示す。表-1 に係数 A および係数 B の値を

表-1 実験結果

Case	圧力の最大値 (kPa)				A	B
	P0	P75	P225	P375		
1	2941	1238	*	343	2390	2.08
2	4000	1892	*	87	4033	4.00
3	269	193	85	95	237	1.17
4	497	328	*	91	479	1.74
5	191	135	129	104	172	0.54
6	138	125	103	80	139	0.57
7	603	490	494	543	545	0.06

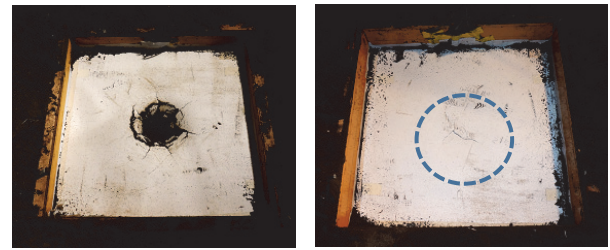
含めた実験結果を示す。表中の*印は、センサーの不具合によりデータが得られなかったことを示している。同一条件で2回の実験を行った Case1, Case5~Case7は、平均値を記載した。

図-4(a)より、EPS を使用しなかった Case1 で計測された圧力~時間関係は、P0 では立ち上がりで急な圧力上昇を示して最大値に達した後、約2msで静土圧に戻る。P375 では立ち上がり時の圧力の勾配が P0 と比較して多少緩やかであるが、継続時間は約2msで P0 と大差はない。このように、Case1 では、爆源直下に比較的大きな圧力が極めて短い時間で作用するという特徴がある。次に、爆源からの距離に応じた圧力の分布に着目する。図-5より、P0 では圧力の最大値は2,941 kPa、P75 で1,238 kPa、P375 で343 kPaであり、P375 ではP0の最大値の12%に低下した。すなわち、緩衝システムにEPSを使用しない場合、爆発荷重は爆源直下周辺に集中的に作用していることがわかる。

EPS を緩衝システムの中層に配置した場合 (Case2) には、図-5より、P0の最大値はCase1と比較して大きく、4,000 kPaの値を示している。一方、P375の最大値は、反対にCase1の値を下回る87 kPaであり、P0の最大値の2%に低下した。P0の継続時間はCase1よりも短い約1.5msであった。図-10より、係数Aの値は、Case1で2,390、Case2で4,033であり、係数Bの値は、Case1で2.08、Case2で4.00である。すなわち、Case2においては、Case1と比較して、爆源直下のより狭い範囲に、より大きな爆発荷重が集中的に作用していることがわかる。

図-6(a)に、Case2における爆発後のEPSの状況を示す。EPSの中央部に貫通孔が生じており、大きな爆発荷重が緩衝システムの爆源直下付近に作用したことがわかる。この場合、EPSにはセル壁に発生した亀裂が瞬時に進展する等の脆性的な破壊を生じ、エネルギーの効果的な吸収が生じなかったと考えられる。したがって、EPSに脆性的な破壊が生じると、爆発荷重は緩衝システムでほとんど分散されることなく底面まで達する。

EPSを最下層に配置した緩衝システム (Case3) の圧力~時間関係では、P0では立ち上がり後約9msの比較的



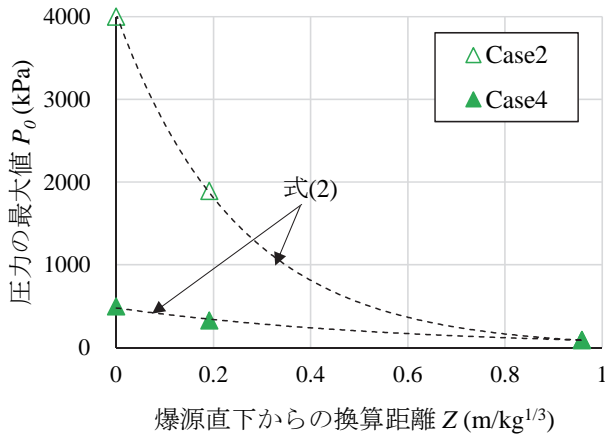
(a) Case2 (b) Case3

図-6 爆発後のEPS

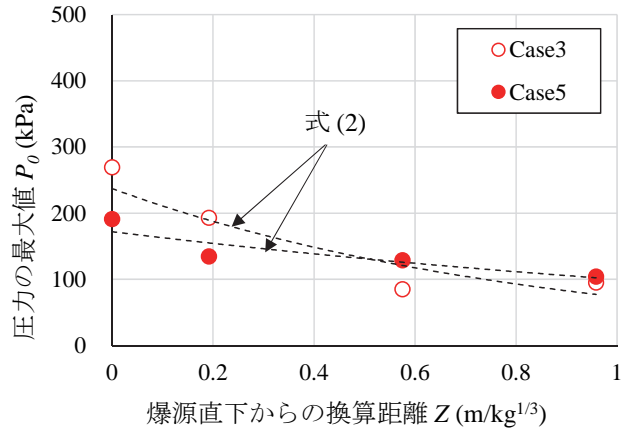
長い時間をかけて圧力が最大値に達するとともに、圧力の継続時間は約25msである。一方、P375では明瞭なピークがなく、圧力の継続時間は30ms以上である。このように、Case3では、Case1と比較して爆発荷重の立ち上がりの勾配が緩やかとなり、継続時間が長くなる傾向がある。図-5より、圧力の最大値は、P0では270 kPaで、Case1, 2の10%以下に低減した。P75, P225, P375の最大値はそれぞれ190 kPa, 90 kPa, 100 kPaであり、Case1, 2と比較して圧力が大きく低下する。表-1を見ると、Case3における係数Aの値は237、係数Bの値は1.17である。両係数ともCase1およびCase2と比較して小さく、Case3では、爆発荷重はより低減、分散されていることがわかる。図-6(b)に、爆発後のCase3のEPSの状況を示す。EPSの表面には、爆源直下を中心とした直径約40cmの範囲内にひび割れが生じた(図中の破線内)が、このひび割れは裏面には到達しなかった。Case2と比較すると、EPSの損傷は軽微である。また、EPSの表面には凹状の残留変形が生じており、EPSセルの圧潰による塑性変形が生じ、エネルギーが吸収されたと考えられる。すなわち、EPSを緩衝システムの最下層に配置したことにより、EPSの上面に作用する荷重はCase2と比較して低減できる。その結果、EPSの脆性的な破壊が抑制され、緩衝システム底面に伝達される爆発荷重の低減、分散の効果が生じたと考えられる。

3.2 EPSを防護する鋼板の有無が爆発荷重の緩衝効果に及ぼす影響

図-7に、Case2~Case5における圧力の最大値と爆源直下からの換算距離との関係をそれぞれ示す。EPSを緩衝システムの中層に配置してEPSの上面に防護鋼板を敷いた場合 (Case4) と防護鋼板を設置していないCase2との比較 (図-7(a)) から、防護鋼板を設置することにより爆源直下から75mmまでの範囲における圧力値が顕著に小さくなっている。また表-1から、係数Aの値は、Case2で4033、Case4で479であり、係数Bの値はCase2で4.00、Case4で1.74である。EPSの防護鋼板を使用することにより、とくに爆源直下近傍において圧力が顕著



(a) Case2, Case4



(b) Case3, Case5

図-7 圧力の最大値と換算距離との関係

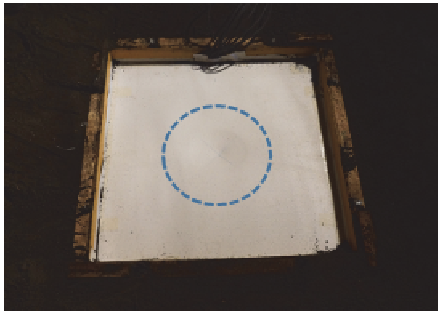


図-8 爆発後のEPS (Case4)

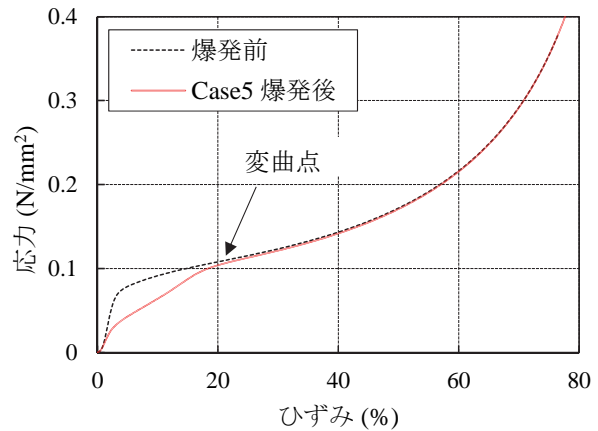


図-9 爆発後のEPSの応力～ひずみ曲線 (Case5)

に低減されるとともに、爆発荷重が周囲に分散して作用したことがわかる。図-8に、爆発後のCase4のEPSの状況を示す。EPSには、ひび割れ等の損傷は認められず、下に凸の残留変形が生じていた。また、EPSを緩衝システムの最下層に配置し、EPSの上面に防護鋼板を敷いた場合 (Case5)、図-7(b)より、防護鋼板を設置していないCase3と比較して圧力値は低下するが、その低下の度合いは大きくない。すなわち、EPSが最下層に配置されて、その上部に十分な厚さの土砂があれば、防護鋼板による爆発荷重の低減効果はあるがその影響は小さいと考えられる。表-1より、Case5における係数 B の値は0.54であり、Case3の1.17と比較して小さく、鋼板の敷設により爆発荷重がより分散されたことを示している。

図-9に、Case5で使用したEPSを回収し、爆源直下の部分を切り出して一軸圧縮試験を行った結果を示す。図-9より、爆発後のEPSの応力～ひずみ曲線は、ひずみ20%程度の位置で荷重を受けたことがないEPSの応力～ひずみ曲線と重なる。したがって、Case5の爆発後のEPSは、なおエネルギーを吸収できる余裕を残している。

3.3 EPSの層数が緩衝効果に及ぼす影響

前節で検討したCase5におけるEPSは、なおエネルギー吸収ができる余裕を残している。そこで、EPS1枚の厚さを半分にしてこれを2層に分けて使用することにより、各EPSにより大きな変形を促して爆発荷重の低減を期待する。図-10に、Case6の圧力の最大値と、爆源直下からの換算距離との関係をそれぞれ示す。図-10には、比較のためCase5の結果も併記した。図-10および表-1から、EPSを2層に分けて使用することにより、EPSが1層の場合と比較して爆発荷重の低減効果が多少向上することが認められる。表-1より、 B の値はCase5で0.54、Case6で0.57であり、分散の効果はほぼ同等であった。また、図-11に爆発後のEPSの爆源直下の部分の応力～ひずみ関係を示す。Case6の爆発後のEPSでは、Case5のそれよりもより小さな応力で変形が進展しており、Case6のEPSは、爆発時にCase5と比較してより大きな変形を生じていたものと推察される。

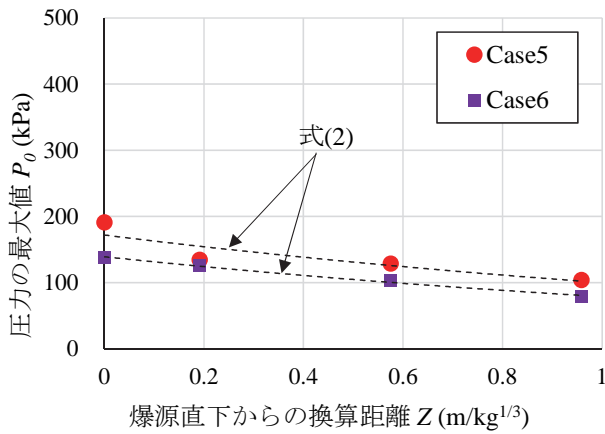


図-10 圧力の最大値と換算距離との関係

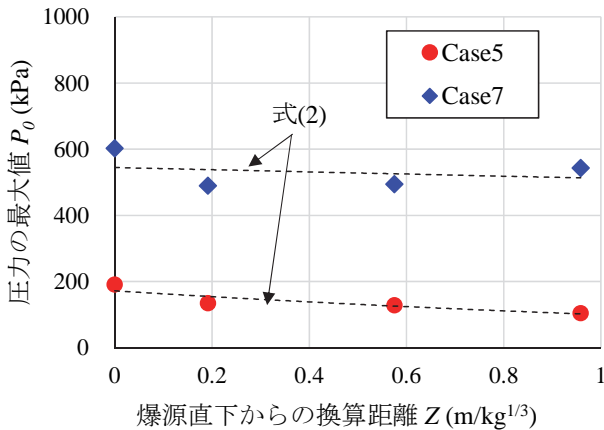


図-12 圧力の最大値と換算距離との関係

3.4 EPSの密度が爆発荷重の緩衝効果に及ぼす影響

図-12に、設計密度 30kg/m^3 のEPSを用いたCase7の圧力の最大値と爆源直下からの換算距離との関係を示す。図-12には、比較のためCase5の結果も併記した。図-12に示すように、P0, P75, P225およびP375の最大値はそれぞれ603 kPa, 490 kPa, 494 kPaおよび543 kPaであり、設計密度 16kg/m^3 のEPSを使用したCase5と比較して、Case7では爆発荷重が十分に低減されていないことを示している。このため、爆発緩衝システムの設計に際しては、設定する入力爆発荷重の大きさに応じて、EPSの密度を選択する必要がある。

4. 結言

本研究では、地中構造物上部の爆発緩衝システムにおけるEPSの密度、位置、層数が爆発荷重の緩衝効果に及ぼす影響を実験により調べた。主要な結論を以下に示す。
 (1) 緩衝システム中にEPSを使用した場合は、使用しない場合より爆発荷重を低減・分散して爆発荷重に対する緩衝効果が向上できる。ただし、EPSに脆性的な破壊が生じ、貫通孔が生じるほど著しく損傷されるとその効果

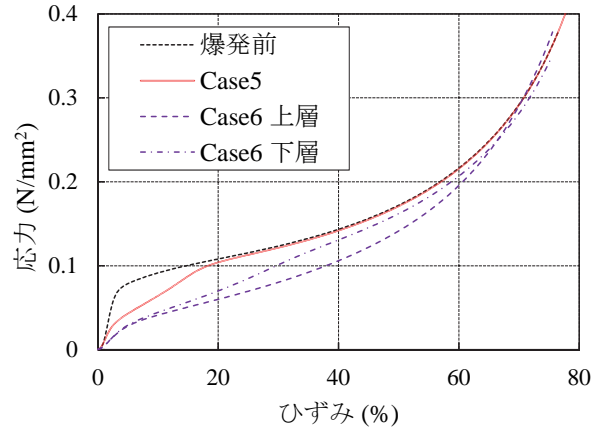


図-11 爆発後のEPSの応力～ひずみ曲線 (Case6)

が得られない。

(2) EPSを使用した層構造による緩衝効果の違いについて、EPSを2層に分けて配置した場合に、緩衝システム底面で計測される圧力が最も小さくなった。次いで、1層のEPSを緩衝システムの最下層に配置した場合の圧力が小さくなった。

(3) 本実験の条件では、設計密度 30kg/m^3 のEPSを使用した場合、設計密度 16kg/m^3 の場合と比較して爆発荷重は低減されなかった。爆発緩衝システムの設計に際しては、設定する入力爆発荷重の大きさに応じて、EPSの密度を選択する必要がある。

謝辞

爆発実験施設の使用に際して、防衛大学校応用化学科の甲賀 誠教授、伊達新吾准教授のご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ27 爆発・衝撃作用を受ける土木構造物の安全性評価—希少事象に備える—, 丸善, 2017.
- 2) 岸徳光, 佐藤昌志, 中野修：三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型屋外実験, 構造工学論文集 Vol.41A, pp.1257-1264, 1995.
- 3) 発泡スチロール土木工法開発機構編：EPS 工法, 理工図書, 1993.
- 4) R. F. Oleck, A. C. Habel, and D. W. Henit: Insulated Concrete Forms (ICF) As Blast-Resistant Barriers, Structures Congress 2012, pp.35-45, 2012.
- 5) Zhi-Liang Wang, Yong-Chi Lia, and J.G. Wang: Numerical analysis of attenuation effect of EPS geofoam on stress-waves in civil defense engineering, Geotextiles and Geomembranes 24, pp. 265-273, 2006.
- 6) Anirban De, Alberto N. Morgante, Thomas F. Zimmie: Numerical and physical modeling of geofoam barriers as protection against effects of surface blast on underground tunnels, Geotextiles and Geomembranes 44, pp.1-12, 2016.