

(27) 室内地中爆発実験による爆土圧特性の検討

INFLUENCE OF DEGREE OF SATURATION IN SOIL ON PROPERTIES OF GROUND SHOCK PRESSURE

市野宏嘉*, 大野友則*, 別府万寿博**, 蓮江和夫****
Hiroyoshi Ichino, Tomonori Ohno, Masuhiro Beppu and Kazuo Hasue

* 防衛大学校理工学研究科学生 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***博 (工) 防衛大学校講師 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

****工博 防衛大学校教授応用科学群応用化学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: 爆土圧, 小規模模型爆発実験, 飽和度
(ground shock pressure, small-scale explosion test, degree of saturation)

1. はじめに

爆発を伴うテロ事件や爆発事故による被害を防止あるいは軽減するため, 社会的に重要な施設や危険物を取り扱う施設を建設する際には, 爆発荷重を考慮した防護設計とすべきであると考えられる。この際, 耐爆防護施設を地下構造とすれば, 爆発による衝撃力を地盤材料が緩和する効果を期待できるため安全性が高く, かつ経済的な設計が実現すると考えられる。耐爆性能を有する地下構造物を設計するためには, 爆発荷重によって生じる土圧 (以下, 爆土圧という) の特性をあらかじめ実験等により調べる必要がある。しかし, 規模の大きな爆発実験は, 施設や安全性の制限から数多く実施することが困難であるため, 爆土圧に関する研究は, 国内外でも数えるほどしかないのが現状である。

森下ら¹⁾は, 爆発荷重を受ける鉄筋コンクリート版の局部破壊に対する覆土の緩衝効果を調べるため, 鉄筋コンクリート版に覆土を介した爆発荷重を作用させ, 覆土によってコンクリート版の損傷が軽減されることを確認している。また, この実験では, 覆土の含水比を変化させた場合, 含水比の上昇に伴って覆土による緩衝効果が失われることも示されている。国外では, 米国陸軍工兵隊が 10 種類以上の地盤において地中爆発実験を行い²⁾, 最大爆土圧の推定式を提案し, 爆土圧の大きさが土質の相違によって 2 桁以上も異なる指摘している。これらの研究から, 土質を表す指標の中でも爆土圧に大きな影響を与える要因として地盤の

飽和度が考えられている。しかしながらその影響は明確に把握されていない。

本研究は, 模型地盤の内部で爆薬を爆発させて爆土圧を計測し, 地盤の飽和度が爆土圧特性に及ぼす影響について検討したものである。まず, 模型地盤を用いて C4 爆薬による室内地中爆発実験を行い, 地中爆発や爆土圧の特徴を調べるとともに, 地盤の飽和度が爆土圧特性に与える影響について考察した。

2. 模型地盤を使用した室内地中爆発実験の概要

2.1 模型地盤

爆発実験室内に, 幅 180cm, 奥行き 180cm, 高さ 70cm のベニヤ合板製の枠組を設置し, 深さ 60cm まで供試土を充填して模型地盤の土槽を作製した。模型地盤の概要を, 図-1 および写真-1 に示す。供試土には, 神奈川県産の天然の山砂を用いた。供試土の粒径加積曲線および粒度特性値を, 図-2 に示す。

2.2 爆薬

本実験では, 取り扱いが比較的安全で成形が容易であるコンポジション C4 爆薬を使用した。なお, C4 爆薬は, 衝撃感度試験(JIS K4810)によれば, 落つい感度 7 級に相当する。C4 爆薬の外観を, 写真-2 に示す。この C4 爆薬 9.7g を, 直径 ($d = 2.1\text{cm}$) と高さ ($h = 2.1\text{cm}$) が等しい円柱形 ($h/d = 1$) に成形して, 形状保持のために高さ 4cm のアルミスリーブで被覆した。次に, 起爆のための 6 号電気雷管を爆薬の上部から挿

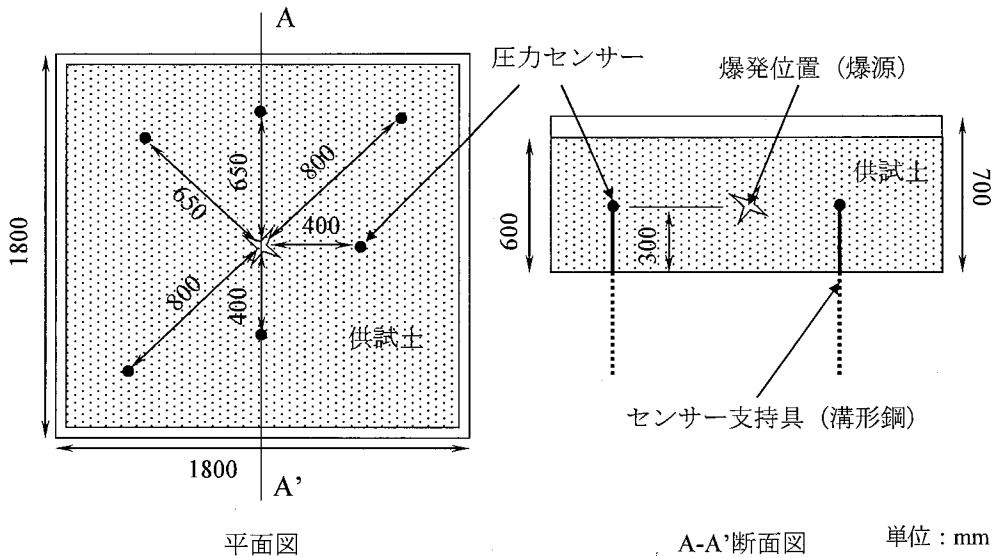
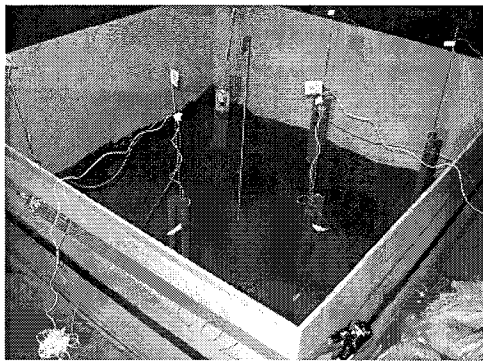
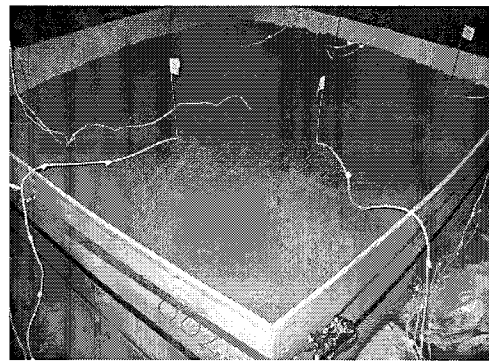


図-1 模型地盤の概要



(a) 供試土充填前の状態



(b) 完成した模型地盤

写真-1 模型地盤

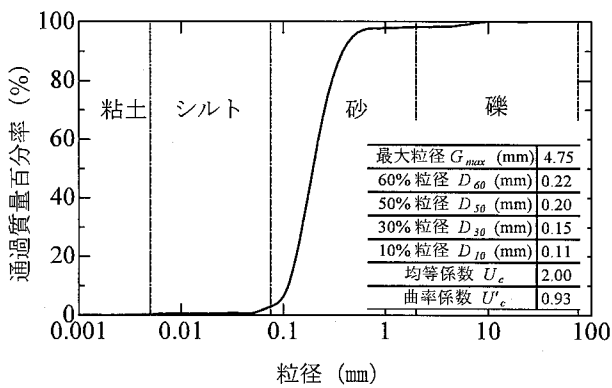


図-2 粒径加積曲線

入し、雷管の引き抜け・転倒防止のために油粘土で固定した。電気雷管の固定が完了した状態のC4爆薬を、写真-3に示す。このC4爆薬を模型地盤の中央、深さ30cmの位置に埋設し、電気点火により起爆した。

2.3 計測項目および実験ケース

発生した爆土圧を、小型圧力センサー（固有周波数37kHz）で計測した。圧力センサーの位置は、爆発位置（以後、爆源という）から水平距離40cm、65cmおよび80cmとした。これらの圧力センサーは、図-3に示すように、溝形鋼に接着剤および粘着テープを用いて固定した。センサー受圧部の位置は爆源の深さ（模型地盤上面から30cmの深さ）と等しくなるように調整した。なお、計測においては、AD変換器のサンプル間隔を約0.1msとした。計測器およびデータ収集装置について写真-4に示す。

実験は、表-1に示すように模型地盤の飽和度を変化させて、実験ケースI（飽和度51.6%）、実験ケースII（飽和度80.7%）、実験ケースIII（飽和度85.3%）および実験ケースIV（飽和度97.9%）の4通りを実施した。

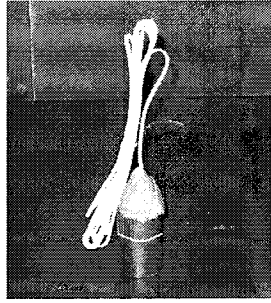
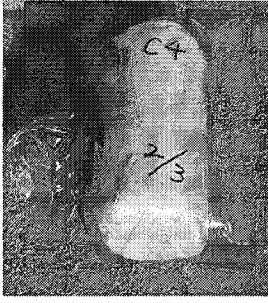


写真-2 C4 爆薬の外観 写真-3 成形後の C4 爆薬

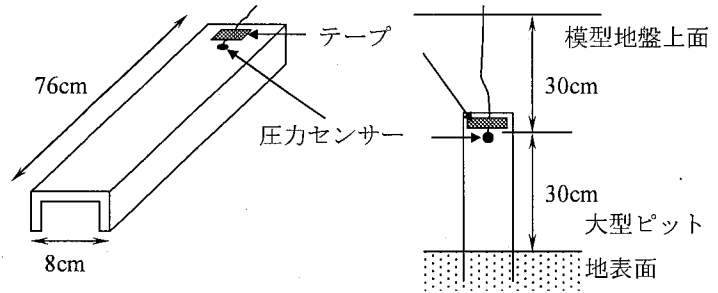


図-3 圧力センサーの設置要領

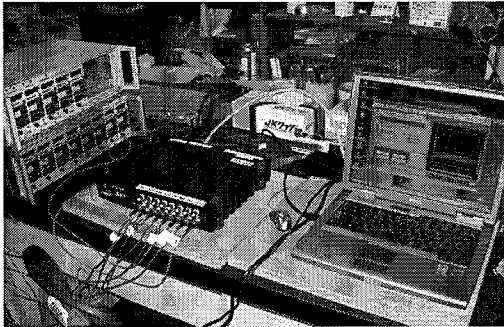


写真-4 計測器およびデータ収集装置

表-1 実験ケース

実験ケース	飽和度 S (%)	爆源からセンサーまでの距離 D (cm)
I	51.6	40,65,80
II	80.7	40,65,80
III	85.3	40,65,80
IV	97.9	65,80

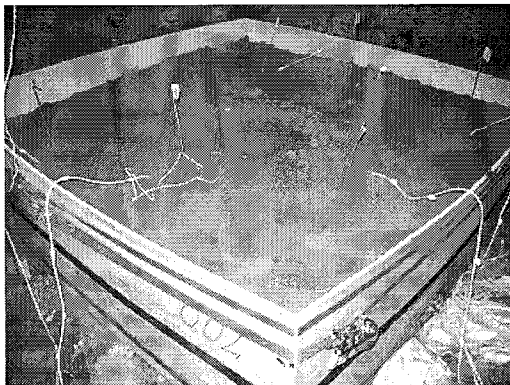


写真-5 爆発痕 (実験ケース I)

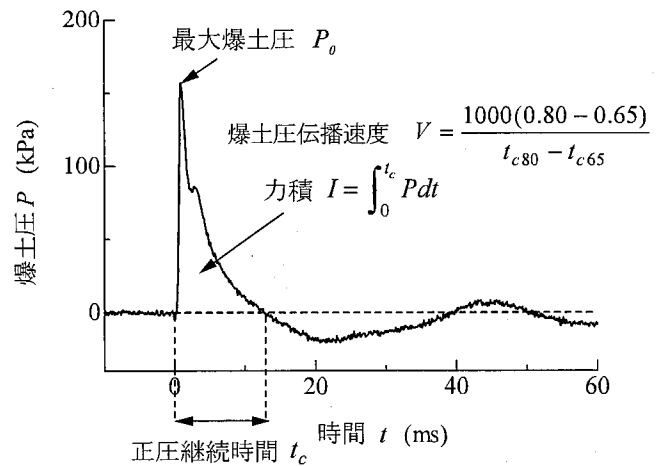


図-4 爆土圧特性値の定義

3. 実験結果および考察

3.1 地中爆発による爆発痕

地中爆発が生じると、その薬量や爆源の深さに応じた爆発痕が地表に発生する。写真-5に飽和度51.6%のケースで生じた爆発痕を示す。爆発痕は、直径約30cm、深さ約20cmの漏斗形であった。

3.2 地盤の飽和度が爆土圧特性に及ぼす影響

一般に、爆薬の空中爆発においては、爆源から離れ

たある位置での爆風圧は爆風が到達した時点で瞬時に上昇して最大圧（正圧）に達し、その後急激に減少して大気圧以下（負圧）になった後、大気圧に戻るという特性がある。一方、地中爆発においても、爆土圧は、図-4に示すように、空中爆発における爆風圧と同様の特性を示すことが知られている。

本研究では、爆土圧特性を表す物理量を以下のように定義する。

① 最大爆土圧 P_0

計測された爆土圧の中で最大の値をいう。圧力セン

サーが地中 30cm の深さに設置されていることから、深さ 30cm に相当する土圧を基準 ($P = 0 \text{ kPa}$) としている。

② 正圧継続時間 t_p

爆土圧が立ち上がる瞬間から負圧を示すまでに要した時間をいう。

③ 力積 I

正圧継続時間内の爆土圧を、時間に関して積分した値をいう。

④ 爆土圧伝播速度 V

爆源からの距離 65cm と、爆源からの距離 80cm との間における、爆土圧の平均伝播速度をいう。爆源からの距離 65cm における最大爆土圧の観測時刻と、爆源からの距離 80cm の間における最大爆土圧の観測時刻から算出している。

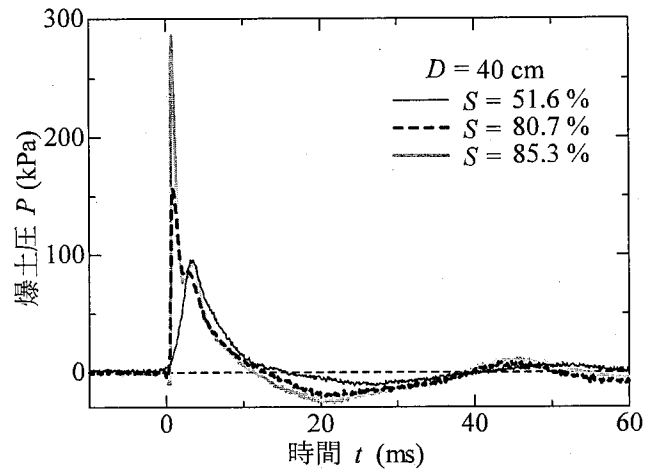
(1) 爆土圧～時間関係

爆源からの距離が 40cm, 65cm, 80cm の位置で得られた爆土圧～時間関係を、図-5 に示す。爆源からの距離が 40cm (図-5(a)) の場合については、飽和度 51.6% の場合を除き爆土圧が瞬間的に立ち上がり、明瞭な最大爆土圧を示した後、爆土圧は急激に低下している。圧力が 0kPa まで戻った以降は負圧を示し、その後再度正圧が生じている。爆源からの距離が 65cm (図-5(b)) とやや離れた場合は、飽和度 97.9% の場合については、爆土圧が急激に立ち上がり明瞭な最大爆土圧を示すなど、爆源からの距離が 40cm の場合と類似している。これに対して飽和度 51.6% および 80.7% の場合は、爆土圧は緩やかに立ち上がっている。最大爆土圧を経過した後についても爆土圧の減少は緩やかである。爆源からの距離が 80cm (図-5(c)) となると、爆土圧の立ち上がりはさらに緩やかになる。また、飽和度 97.9% の場合を除いて最大爆土圧は不明瞭となり、距離減衰が大きいことがわかる。

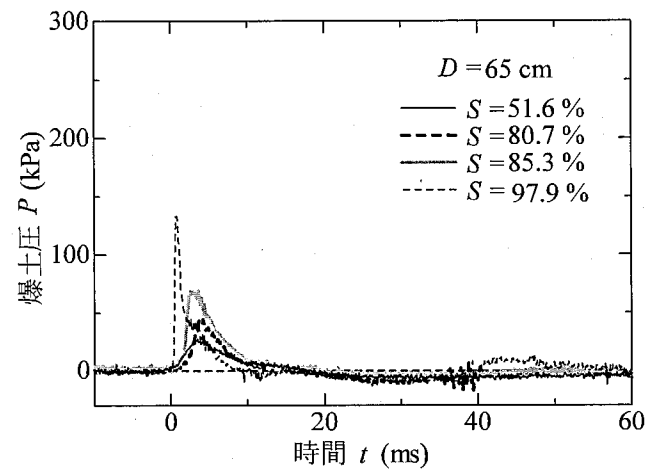
以上より、爆土圧～時間関係の特徴としては、立ち上がり後 0.2ms～数ms 程度の時間で最大爆土圧を示し、その後は滑らかな曲線を描き土圧は低下していくことがわかる。ちなみに、飽和度が高いほど爆土圧の立ち上がりに要する時間が短くなり、最大爆土圧が明瞭に示されるようになる。また、一般的に爆源からの距離が 65cm, 80cm と離れるにしたがって爆土圧の立ち上がりは緩やかになる。

(2) 最大爆土圧と飽和度との関係

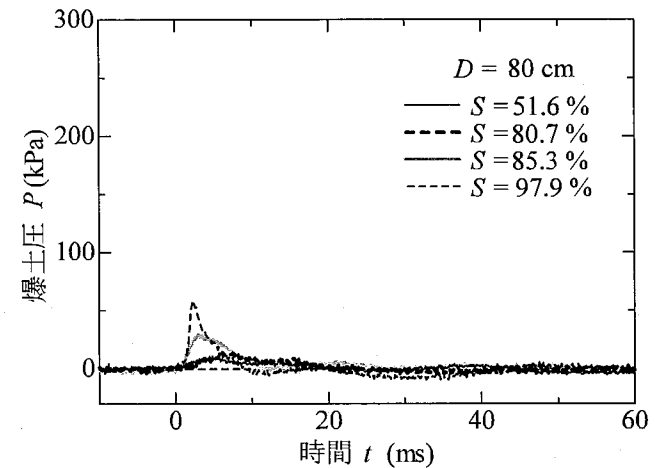
最大爆土圧 P_0 と飽和度 S との関係を、図-6 および表-2 に示す。図-6 より、爆源からの距離にかかわらず、



(a) 爆源からの距離 $D = 40 \text{ cm}$



(b) 爆源からの距離 $D = 65 \text{ cm}$



(c) 爆源からの距離 $D = 80 \text{ cm}$

図-5 爆土圧～時間関係

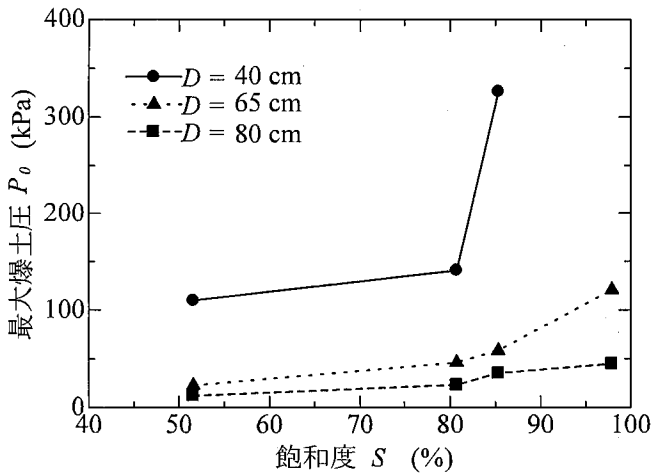


図-6 最大爆土圧と飽和度との関係

表-2 最大爆土圧の平均値

最大爆土圧 P_0 (kPa)	爆源からの距離 D (cm)			
	40	65	80	
飽和度 S (%)	51.6	110.0	23.0	12.5
	80.7	141.0	46.5	23.5
	85.3	326.5	58.8	35.5
	97.9	-	121.0	45.0

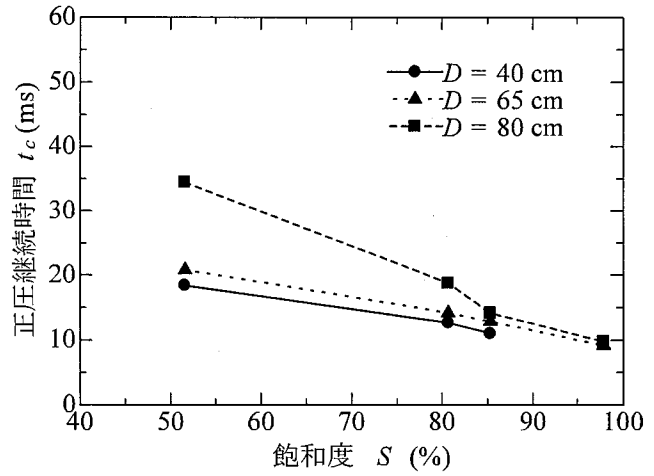


図-7 正圧継続時間と飽和度との関係

表-3 正圧継続時間の平均値

正圧継続時間 t_c (ms)	爆源からの距離 D (cm)			
	40	65	80	
飽和度 S (%)	51.6	18.4	20.8	34.5
	80.7	12.7	14.2	18.8
	85.3	11.0	12.9	14.2
	97.9	-	9.2	9.8

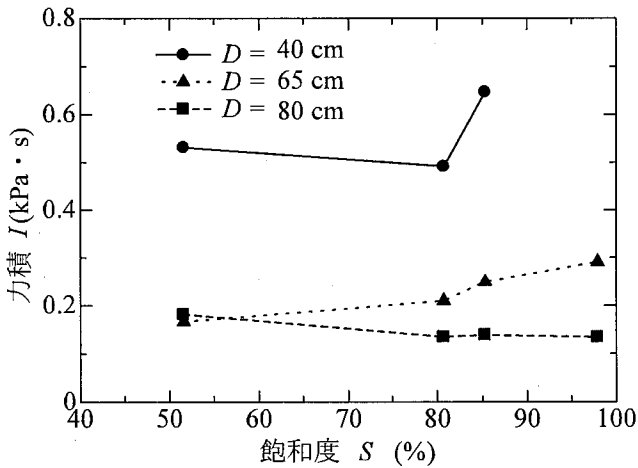


図-8 力積と飽和度との関係

表-4 力積の平均値

力積 I (kPa·s)	爆源からの距離 D (cm)			
	40	65	80	
飽和度 S (%)	51.6	0.53	0.17	0.18
	80.7	0.49	0.21	0.13
	85.3	0.65	0.25	0.14
	97.9	-	0.29	0.13

飽和度が上昇すると、最大爆土圧は増加することがわかる。とくに、飽和度 80%以上の領域における増加が著しい。ちなみに、飽和度が 97.9%の場合における最大爆土圧の値は、飽和度 51.6%の場合と比べて距離 65cm, 80cm の位置でそれぞれ 3.6 倍および 5.3 倍に増加した。

(3) 正圧継続時間と飽和度との関係

正圧継続時間 t_c と飽和度 S の関係を、図-7 および表-3 に示す。爆源からの距離にかかわらず、飽和度が上昇すると、正圧継続時間はほぼ線形に減少することがわかる。正圧継続時間の値は飽和度が 51.6% から 97.9% に上昇した場合、距離 65cm, 80cm の位置でそれぞれ 0.44 倍および 0.28 倍に減少した。

(4) 力積と飽和度との関係

力積 I と飽和度 S の関係を、図-8 および表-4 に示す。全般的に、飽和度が上昇すると力積は増加する傾向がある。ただし、その増加率は爆土圧の増加ほどは大きくない。これは、飽和度の上昇に伴い最大爆土圧は大きくなるが、正圧継続時間は減少するためであると考えられる。たとえば、距離 65cm の場合、飽和度が 51.6% から 97.9% に上昇すると、最大爆土圧は 5.3 倍に増加するが、正圧継続時間は 0.44 倍に減少するので、力積の値は、飽和度 51.6% と比較して 1.7 倍程度の増加を示している。

(5) 爆土圧伝播速度と飽和度との関係

爆土圧伝播速度 V と飽和度 S の関係を図-9 および表-5 に示す。飽和度が上昇すると、爆土圧伝播速度は増加する傾向にある。米国陸軍テクニカル・マニュアル²⁾によると、飽和度 90%以上の領域で、地盤内を伝播する地震波の速度は急激に上昇するとされている。しかしながら、本実験の結果では、爆土圧伝播速度にはこのような波速の急増は反映されておらず、今後検討が必要である。

4. まとめ

本研究は、模型地盤の中で爆薬を爆発させて爆土圧を計測し、地盤の飽和度が爆土圧特性に及ぼす影響について検討したものである。本研究における主要な結論は、以下に要約される。

- (1) 爆土圧～時間関係の特徴として、急激な立ち上がりで最大爆土圧を示し、その後は滑らかな曲線を描き土圧が低下していくことがわかった。また、飽和度が高いほど爆土圧の立ち上がり要する時間が短くなり、最大爆土圧が明瞭に示された。ただし、飽和度が低い場合には、距離減衰が大きいことがわかった。
- (2) 地盤の飽和度が上昇すると最大爆土圧が著しく増大した。爆源からの距離が 65cm において、飽和度が 97.9%の場合における最大爆土圧の値は、飽和度 51.6%の場合と比較して 5.3 倍に増加した。一方、正圧継続時間は飽和度の上昇に伴い減少するため、このときの力積の増加は 1.7 倍にとどまった。
- (3) 地盤の飽和度が上昇すると爆土圧伝播速度は増加した。

本研究により、飽和土と爆土圧との関係が概ね明らかになった。今後は、この現象を距離減衰や薬量を加味して定式化し、設計時に利用しやすい形に整備していく必要がある。また、粘土や礫などの代表的な地盤材料を対象とした実験を行い、地盤材料の種類が爆土圧特性に与える影響について調べる予定である。

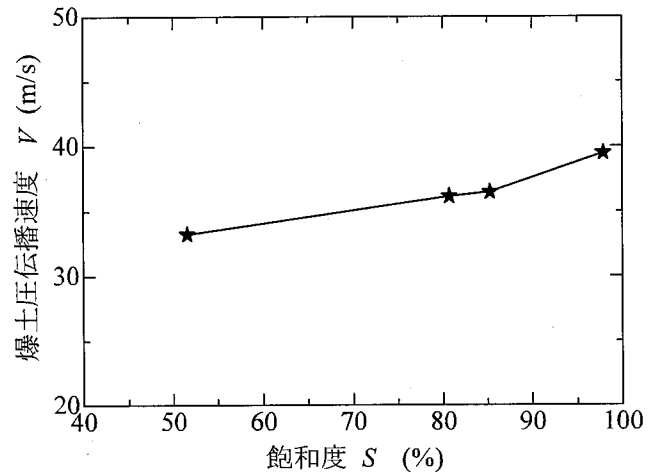


図-9 爆土圧伝播速度と飽和度との関係

表-5 爆土圧伝播速度の平均値

爆土圧伝播速度 V (m/s)	飽和度 S (%)			
	51.6	80.7	85.3	97.9
	33.2	36.1	36.5	39.5

参考文献

- 1) 森下政浩, 阿曾沼剛, 齋藤和伸, 松尾啓: 近接爆発による RC 版の局所損傷, 防衛施設学会平成 17 年度年次研究発表会, 2006.1
- 2) Headquarters, Department of the Army, Washington DC: Fundamentals of protective design for conventional weapons, TM5-855-1, Cha.5, 1986.