

地盤の飽和度が爆土圧特性に及ぼす影響とその評価式の提案

An experimental study on influence of degree of saturation in soil on properties of ground shock pressure and proposal of its quantitative evaluation

市野宏嘉*, 大野友則**, 別府万寿博***, 蓮江和夫****

Hiro Yoshi Ichino, Tomonori Ohno, Masuhiro Beppu, 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学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

To build a protective design of buried structures, the ground shock loading should be predicted. However, ground shock propagation in earth media may be a complex function of the dynamic properties of the soil. In this study, small-scale indoor tests of underground explosion were conducted with the different degree of saturation of soil. And, shock pressure due to explosion in soil was measured at the distances of 40cm, 65cm and 80cm, respectively, by a subminiature pressure transducer. The results showed that the pressure became higher with the increase of soil saturation and the attenuation of ground shock depends on the distance from charge. Based on test results, the approximation methods of estimating the ground shock properties (e.g., the peak pressure, the duration time of positive phase and the impulse) were formulated.

Key Words: *ground shock pressure, small-scale explosion test, degree of saturation, scaled distance*

キーワード: 爆土圧, 小規模模型爆発実験, 飽和度, 換算距離

1. はじめに

近年, 世界の各地で爆発を伴うテロ事件や爆発災害が頻発しており, 社会的に重要な施設あるいは危険物を取り扱う施設などを建設する際には, 爆発荷重を考慮した防護設計が求められている。一般に, 耐爆性能を有する地上構造物を建設しようとする, 壁などの部材厚がかなり大きくなる。そこで, このような構造物を地下に建設すれば, 爆破行為や爆発の危険を回避できるとともに, 爆発が生じた場合は衝撃力を地盤材料が吸収あるいは緩和する効果を期待することができるため, より安全で経済的な設計となることが考えられる。ただし, 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。しかしながら, 規模の大きな爆発実験は, 施設・場所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。

国内における研究としては, 坂本ら¹⁾が, 発破による地盤締固めの際に発生する衝撃圧力の伝播特性を解明するため, 海岸砂中で爆土圧を計測して最大爆土圧と爆発位置からの距離との関係について整理し, 最大爆土圧の予測式を提案している。倉持ら²⁾は, 砂質土および粘性土中で爆土圧を計測し, その際に得られた

爆土圧～時間関係の近似式を報告している。また, 森下ら³⁾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上に覆土した状態で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は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⁴⁾, 爆土圧の大きさが土質の相違によって 2 桁以上も異なると指摘するとともに, 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飽和度を挙げている。しかしながらその影響の定式化までは至っておらず, 飽和度が爆土圧に与える影響の定量的把握は急務であるといえる。

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 爆薬による地中爆発実験を行い, 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。次に, これらの実験結果に対して回帰分析を行い, 地盤の飽和度が爆土圧特性に与える影響を定式化するとともに, 既往の屋外実験と比較してその精度を検証した。

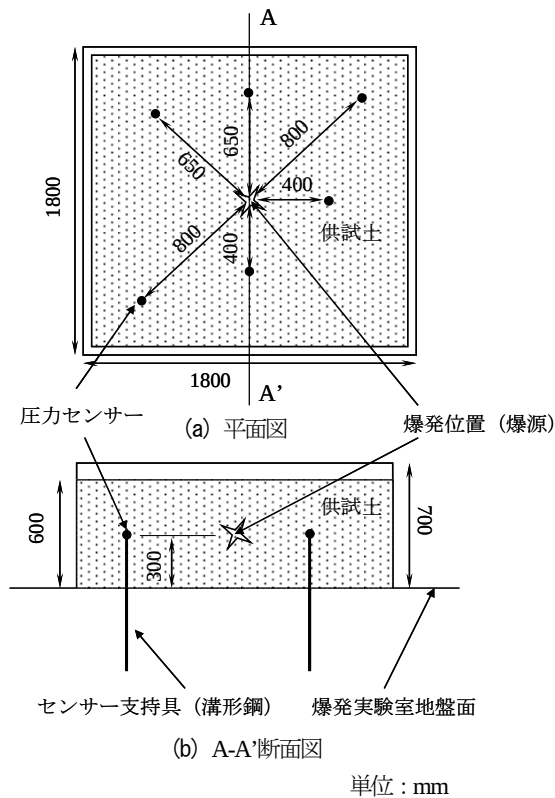


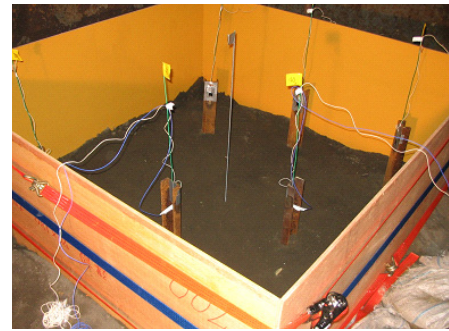
図-1 模型地盤の概要



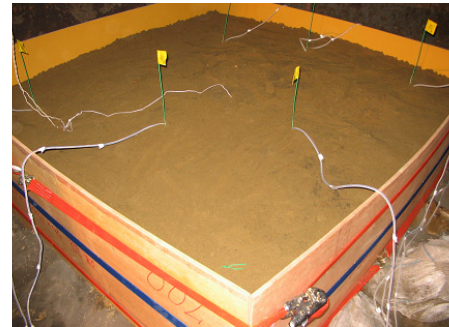
写真-2 C4爆薬の外観



写真-3 成形後のC4爆薬



(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

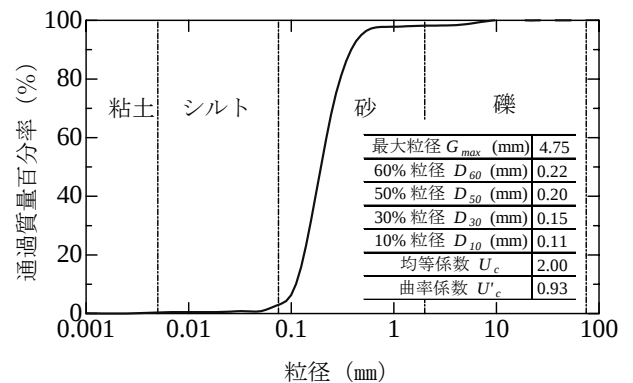


図-2 粒径加積曲線

2. 模型地盤を使用した室内爆発実験の概要

2.1 模型地盤と爆薬の概要

予備実験の結果、C4 爆薬 9.7g を爆発させると、爆源から約 110cm 以上の距離において爆土圧は十分に減衰したので、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た。この枠内に、供試土を 1 回の仕上がり厚さが約 15cm となるように踏み固めながら充填し、これを供試土の厚さが 60cm となるまで繰り返して模型地盤を作製した。土中の水分が多く踏み固めが困難なケースについては、表面をたいて締め固めた。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。

本実験では、取り扱いが安全で成形が容易である C4 爆薬を使用した。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。

2.2 計測項目および実験ケース

発生した爆土圧は、写真-4 および表-1 に示すひずみゲージ式小型圧力センサー（共和電業社製、PS-10KA）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）と同じ高さとなるように調整し、受圧面を爆源に

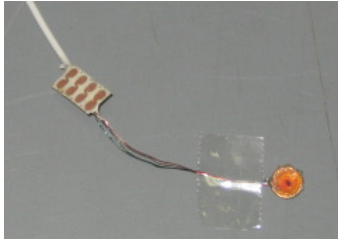


写真-4 小型圧力センサー

表-1 小型圧力センサーの性能

荷重容量	固有周波数	受圧部形状
1MPa	37kHz	直径6mm, 円形

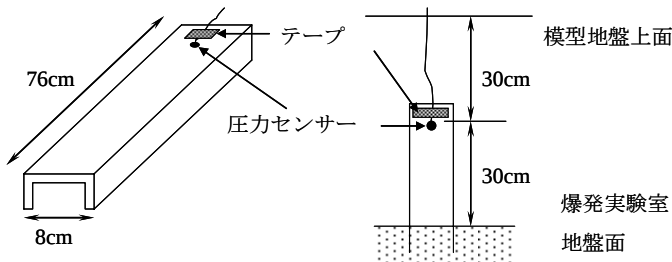


図-3 圧力センサーの設置要領

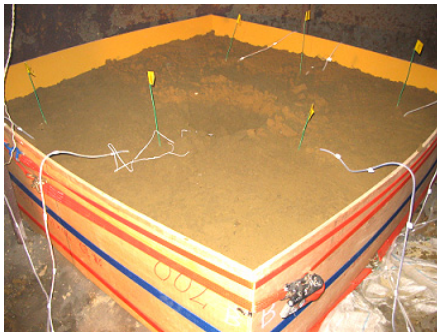


写真-5 爆発痕（実験ケース I）

正対させ、溝形鋼に作用する爆土圧を計測した。爆土圧は、センサーの設置方法（自由、固定または完全固定）によって計測される数値の大きさが異なることを確認しているが、本研究では半固定条件とした。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。

実験は、表-2 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。ここで、表中の飽和度、湿潤密度および含水比については、複数箇所から採取した供試土に対する平均値を示している。爆源と圧力センサー間の供試土については 1 回の爆発ごとに掘り出して再度充填した。

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

表-2 実験ケース

実験ケース	飽和度 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	爆源からセンサーまでの距離 (cm)	実験回数
I	51.6	1.56	20.7	40,65,80	2
II	80.7	1.76	28.7	40,65,80	1
III	85.3	1.80	29.4	40,65,80	2
IV	97.9	1.89	31.6	65,80	1

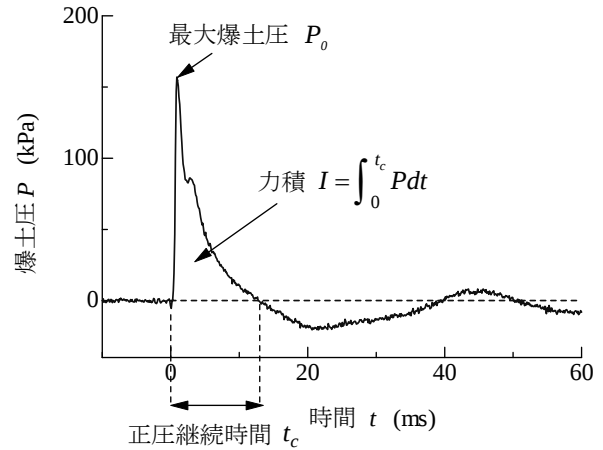


図-4 爆土圧特性値の定義

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、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（ $P=0$ kPa）としている。

② 正圧継続時間 t_c

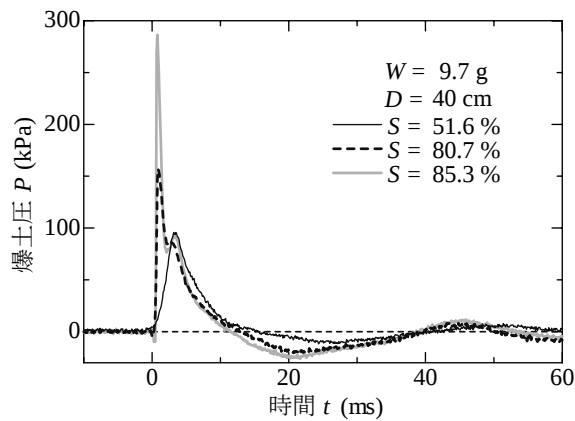
爆土圧が立ち上がる瞬間から負圧を示すまでに要した時間をいう。

③ 力積 /

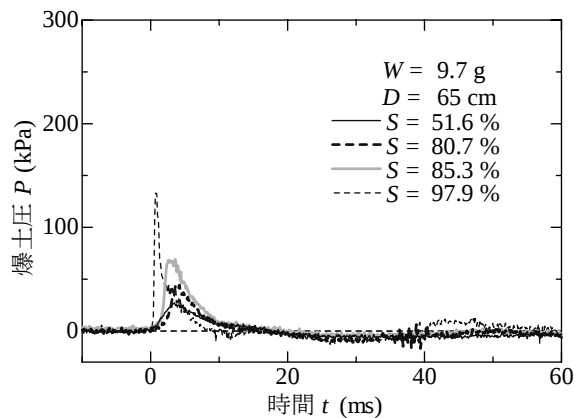
正圧継続時間内の爆土圧を、時間に関して積分した値をいう。

(1) 爆土圧～時間関係

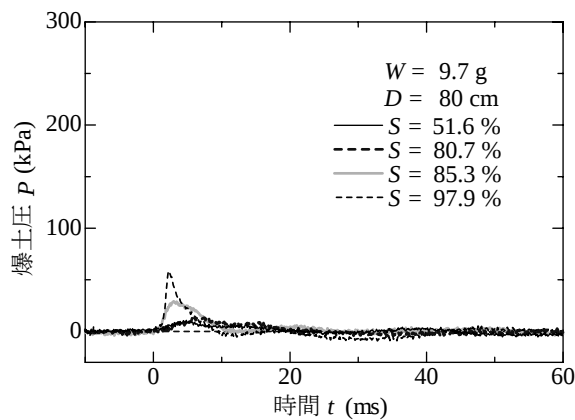
爆源からの距離が 40cm、65cm、80cm の位置で得られた爆土圧～時間関係を、図-5 に示す。爆源からの距離が 40cm（図-5 (a)）の場合については、飽和度 51.6% のケースを除き爆土圧が瞬間的に立ち上がり、明瞭な最大爆土圧を示した後、爆土圧は急激に低下している。このとき、飽和度 85.3% のケースについては、爆土圧が最大値から低下する過程で一度増加し、再度爆土圧が低下してゆくが、これは何らかの原因で爆土圧が乱れたものと考えら



(a) 爆源からの距離 $D = 40$ cm



(b) 爆源からの距離 $D = 65$ cm



(c) 爆源からの距離 $D = 80$ cm

図-5 爆土圧～時間関係

表-3 爆土圧の伝播速度

飽和度(%)	51.6	80.7	85.3	97.9
伝播速度(m/s)	210	230	250	270

れ、再現性は特に確認できなかった。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)) の場合は、飽和度 97.9% のケースについては、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。一方、飽和度 51.6% および 80.7% のケースにおいて爆土圧は緩やかに立ち上がっている。また、最大爆土圧以降についても爆土圧の減少

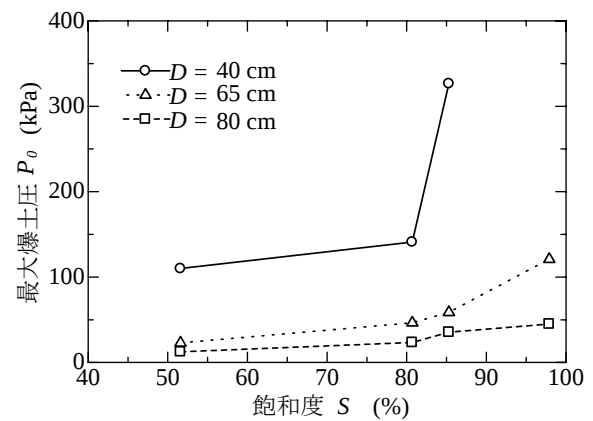


図-6 最大爆土圧と飽和度との関係

表-4 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
	80.7	141.0	46.5
	85.3	326.5	58.8
	97.9	-	121.0

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% のケース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。模型地盤の木材によって反射された爆土圧は、爆源からの距離 80cm にあるセンサーに再度到達するまでに減衰されたと考えられ、図-5(c) に反射とみられる影響は現れていない。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かかる時間が短くなり、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。

爆源からの距離 65cm および 80cm 間の距離 (15cm) を、これらの位置における爆土圧の到達時間の差で除して求めた爆土圧の伝播速度を表-3 に示す。表-3 より、飽和度の上昇にしたがって爆土圧の伝播速度はやや増加する傾向がある。これは、飽和度が上昇すると、土の間隙は水分で満たされるため、爆土圧伝播速度が増加したものと考えられる。

(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 に示し、最大爆土圧の平均値を表-4 に示す。なお、本研究では、1 ケースにつき 2 個または 4 個の爆土圧データが得られており、以後の検討においては、それらの平均値を用いることにする。図-6 より、爆源からの距離にかかわらず、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。これは、飽和度の上昇によって、爆土圧の伝播を妨げる土中の空気間隙が減少したためであると考えている。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 5.3 倍および 3.6 倍に増加した。

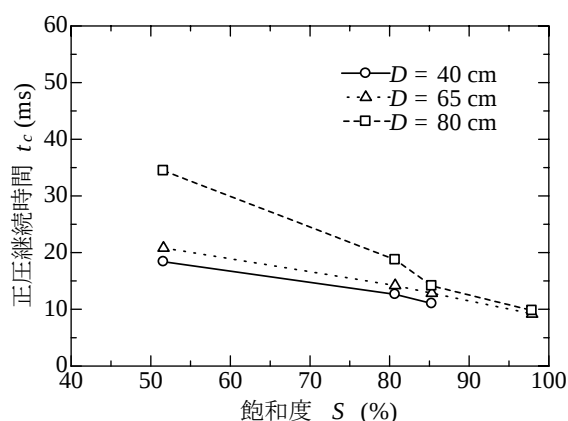


図-7 正圧継続時間と飽和度との関係

表-5 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	51.6	18.4	20.8
S (%)	80.7	12.7	14.2
	85.3	11.0	12.9
	97.9	-	9.2

(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 に示し、正圧継続時間の平均値を表-5 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 に示し、力積の平均値を表-6 に示す。爆源からの距離が 40cm および 65cm の場合は、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らないようである。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 倍の増加を示している。

4. 飽和度が爆土圧特性に及ぼす影響の定式化

飽和度の影響を考慮した、最大爆土圧、正圧継続時間および力積の評価式を提案する。評価式の定式化にあたり、爆薬の質量や爆源からの距離の影響を無次元化して評価するため、Hopkinson-Cranz⁵⁾の換算距離の概念を導入する。Hopkinson と Cranz は、同一条件の媒質内において、大きさが異なる相似形状で同じ種類の爆薬が爆発したとき、等しい換算距離において相似な爆轟波が生成するものとして次式を提案している。

$$R = D / M^{1/3} \quad (1)$$

ここに、 R : 換算距離 (m/kg^{1/3})、 M : 爆薬の質量 (kg)、 D : 爆発位置からの距離 (m) を示す。

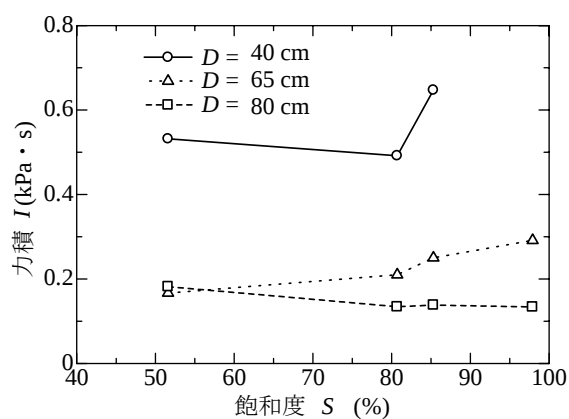


図-8 力積と飽和度との関係

表-6 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	51.6	0.53	0.17
S (%)	80.7	0.49	0.21
	85.3	0.65	0.25
	97.9	-	0.29

例えば、同じ種類、同じ形状をした質量 $M_A = 1$ (kg) と $M_B = 1000$ (kg) の爆薬 A, B が同一条件の媒質内で爆発したとき、爆薬 A については爆発位置からの距離が $D_A = 1$ (m)、爆薬 B については爆発位置からの距離が $D_B = 10$ (m) において両者の換算距離は等しく ($R_A = R_B = 1$ (m/kg^{1/3})) となり、これらの位置で等しい最大爆土圧が計測されることになる。この換算距離を導入することにより、爆源からの距離および爆薬の質量が異なる爆発実験のデータを比較することができる。

4.1 最大爆土圧

図-9 は、実験ケース I, II, III の全計測データについて、最大爆土圧と換算距離の関係を両対数軸上にプロットしたものである。飽和度が異なる各実験ケースについては、次に示す一次式でそれぞれ近似できる。

$$S = 51.6\%; \ln P_0 = 6.56 - 3.13 \ln R \quad (2a)$$

$$S = 80.7\%; \ln P_0 = 6.62 - 2.67 \ln R \quad (2b)$$

$$S = 85.3\%; \ln P_0 = 7.61 - 3.21 \ln R \quad (2c)$$

式(2)の各式はいずれも同様の形をしており、ここで $\ln P_0 = A_p + B_p \ln R$ とおく。係数 A_p は爆土圧の大きさそのものを表しており、係数 B_p は換算距離の増大に応じた爆土圧の距離減衰の程度を示している。次に、係数 A_p と B_p に関して、飽和度 S との相関を調べる。図-10 に、 A_p と飽和度との関係を示す。飽和度 80% 以上の領域において最大爆土圧は急増するため、この領域では、 A_p も急激に増加する傾向がある。そこで、指数関数を仮定して回帰式を求めると、次式を得る。

$$A_p = e^{\{(S-22)/66\}^{7.5}} + 5.4 \quad (3)$$

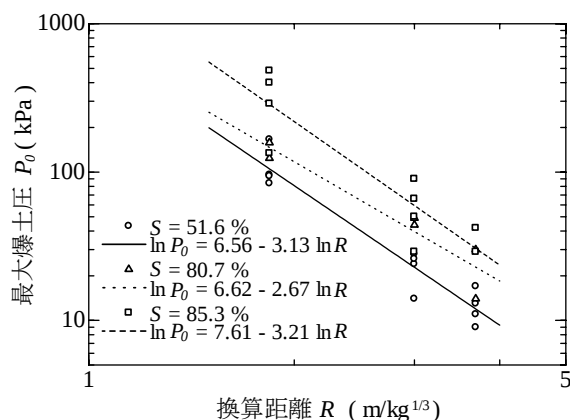


図-9 最大爆土圧と換算距離との関係

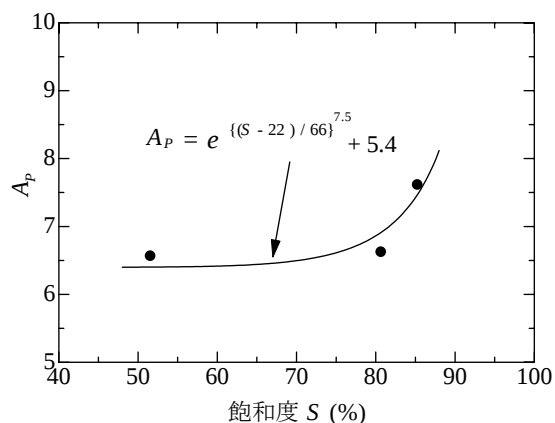


図-10 係数 A_P と飽和度との関係

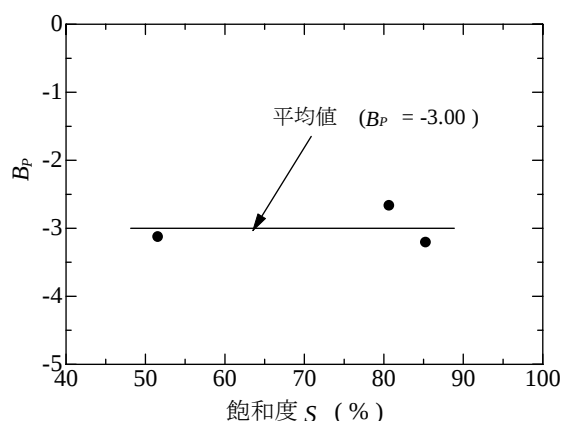


図-11 係数 B_P と飽和度との関係

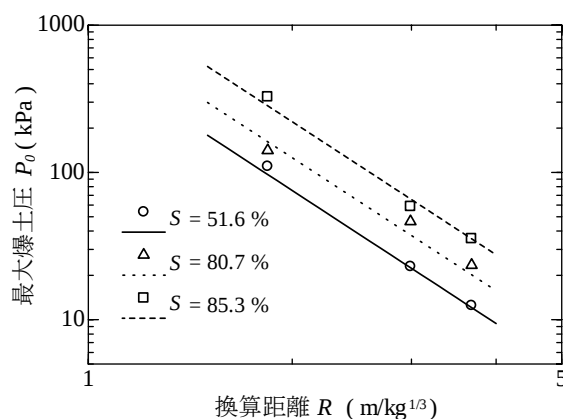


図-12 最大爆土圧の評価式

一方、図-11 に示す B_P の値は、飽和度 S が変化してもほぼ一定値を示している。 B_P の値は、爆土圧の距離減衰の程度を表しており、地盤の圧縮性や土粒子間の摩擦の有無などに起因して変動する可能性もあるが、本実験ではあまり変化しなかった。そこで、実験データの平均値 $B_P = -3.00$ を採用して定式化を試みる。

以上より、飽和度 S を考慮した最大爆土圧 P_0 と換算距離 R との関係は、次式で表される。

$$\ln P_0 = A_P + B_P \ln R \quad (4a)$$

$$A_P = e^{\{(S-22)/66\}^{7.5}} + 5.4 \quad (4b)$$

$$B_P = -3.00 \quad (4c)$$

図-12 は、各飽和度において実測された最大爆土圧の平均値と式 (4) による推定値を重ねて示したものである。図から、提案式は、実験で計測された最大爆土圧の平均値を良好に近似していることが認められる。

4.2 正圧継続時間

図-13 は、実験ケース I, II, III の全データについて、正圧継続時間と換算距離の関係を両対数軸上にプロットしたものである。図中の回帰式は次式で表される。

$$S = 51.6\%; \ln t_c = 2.43 + 0.70 \ln R \quad (5a)$$

$$S = 80.7\%; \ln t_c = 2.22 + 0.47 \ln R \quad (5b)$$

$$S = 85.3\%; \ln t_c = 2.19 + 0.33 \ln R \quad (5c)$$

ここで、飽和度 S を考慮した評価式を定式化するために、式(5)を $\ln t_c = A_t + B_t \ln R$ とおく。式(5)中の係数 A_t , B_t の値と飽和度 S との関係について図-14 および図-15 にそれぞれ示す。図から、 A_t , B_t の値は、いずれも飽和度の増加とともにほぼ線形的に減少する傾向があり、それぞれ以下の回帰式で表される。

$$A_t = (-6.96 \times 10^{-3})S + 2.79 \quad (6)$$

$$B_t = (-9.88 \times 10^{-3})S + 1.22 \quad (7)$$

結局、飽和度 S を考慮した正圧継続時間 t_c と換算距離 R との関係は、次式で表される。

$$\ln t_c = A_t + B_t \ln R \quad (8a)$$

$$A_t = (-6.96 \times 10^{-3})S + 2.79 \quad (8b)$$

$$B_t = (-9.88 \times 10^{-3})S + 1.22 \quad (8c)$$

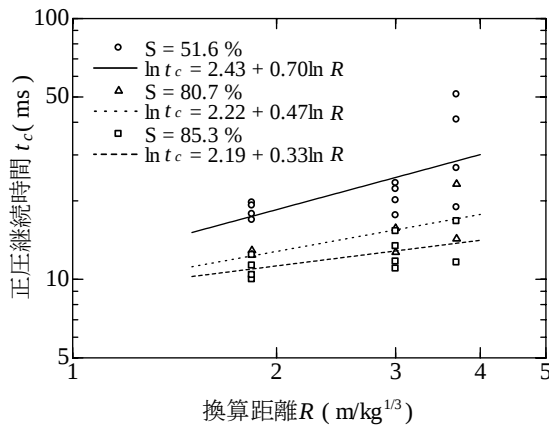


図-13 正圧継続時間と換算距離との関係

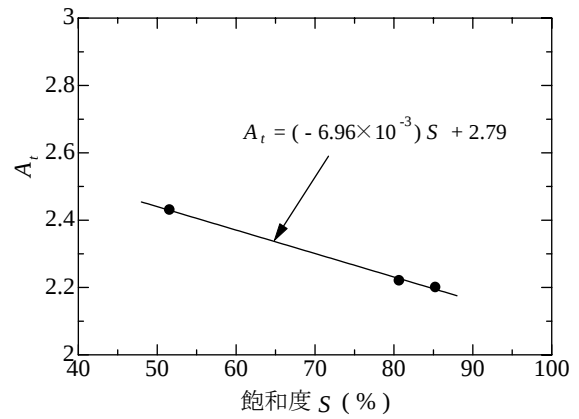


図-14 係数 A_t と飽和度との関係

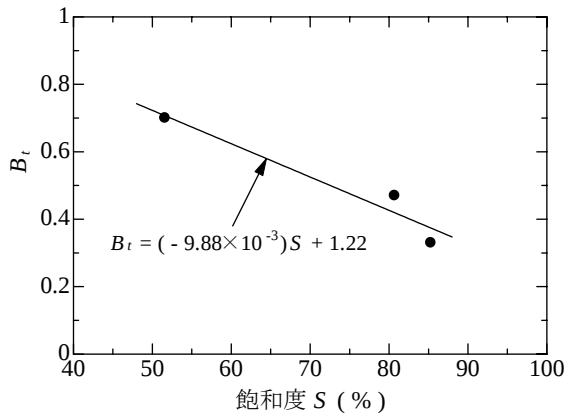


図-15 係数 B_t と飽和度との関係

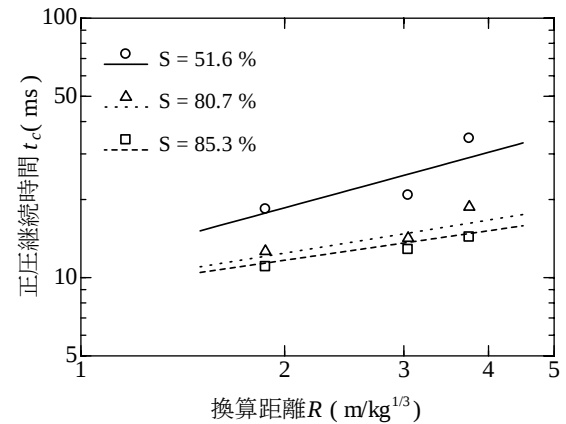


図-16 正圧継続時間の評価式

図-16 は、各飽和度において実測された正圧継続時間の平均値と換算距離との関係に、式(8)による推定値を重ねて示したものである。これより、提案式は実験値を概ね推定しているといえる。

4.3 力積

図-17 は、実験ケース I、II、III の全データに対して求めた力積と換算距離との関係を両対数軸上にプロットしたものである。図中の回帰式は次式で表される。

$$S = 51.6\%; \ln I = 0.46 - 1.90 \ln R \quad (9a)$$

$$S = 80.7\%; \ln I = 0.42 - 1.84 \ln R \quad (9b)$$

$$S = 85.3\%; \ln I = 0.70 - 1.92 \ln R \quad (9c)$$

飽和度 S を考慮した評価式を定式化するために、式(9)を $\ln I = A_I(S) + B_I(S) \ln R$ と表す。図-18、式(9)中の係数 A_I の値と、飽和度 S との関係についてそれぞれ示す。 A_I の値は、飽和度 80.7% で一旦減少しているが、飽和度 85.3% では急激に増加し、全体として飽和度 S が大きくなると A_I の値も大きくなっている。そこで、 A_I の値と、飽和度 S との関係を次式で近似する。

$$A_I = e^{\{(S-23)/78\}^{7.5}} - 0.58 \quad (10)$$

また、図-19 は B_I と飽和度 S との関係を示している。 B_I の値は、飽和度 S が変化してもほぼ一定値を示し、平均値は、 $B_I = -1.88$ である。以上より、力積 I と飽和度 S との関係は、次式で表すこ

とができる。

$$\ln I = A_I + B_I \ln R \quad (11a)$$

$$A_I = e^{\{(S-23)/78\}^{7.5}} - 0.58 \quad (11b)$$

$$B_I = -1.88 \quad (11c)$$

図-20 は、各飽和度における力積の平均値と換算距離との関係に、式(11)による計算値を重ねて示したものである。飽和度 51.6% および 85.3% では、提案式は実験値よりもやや小さく評価している傾向があるが、全体的にはよく近似しているといえる。

5. 提案した評価式と既往の実験データとの比較

ここでは、提案した爆土圧の評価式の妥当性を検討するため、Eng-Choon Leong らが行った屋外実験⁶⁾および米国陸軍工兵隊が提案した最大爆土圧推定式⁴⁾(以下、TM 式とよぶ)と比較、検討を行う。

Eng-Choon Leong らの実験条件(実験ケース: Partially Saturated Soil)と、本研究における室内爆発実験の条件を、表-7 に比較して示す。Eng-Choon Leong らの実験の土質条件は、本実験とほぼ等しいことがわかる。ただし、実験規模は、本実験よりはるかに大きく、薬量は約 100 倍～1000 倍である。なお、使用した爆薬の種類がそれぞれ異なるため、TNT 当量⁷⁾(エネルギーが TNT 爆

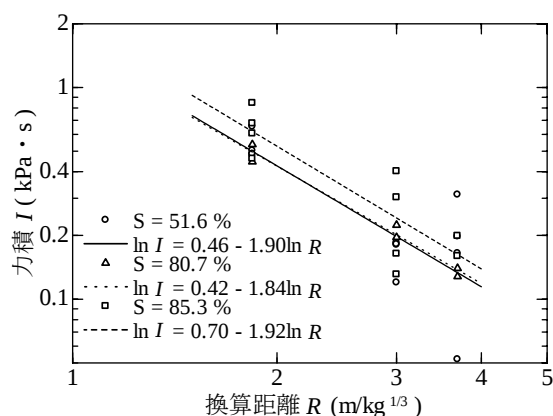


図-17 力積と換算距離との関係

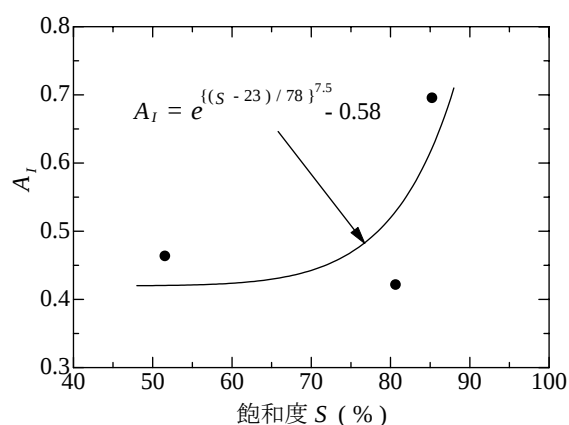


図-18 係数 A_I と飽和度との関係

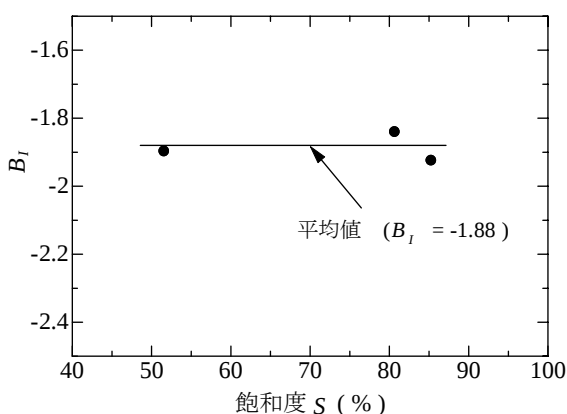


図-19 係数 B_I と飽和度との関係

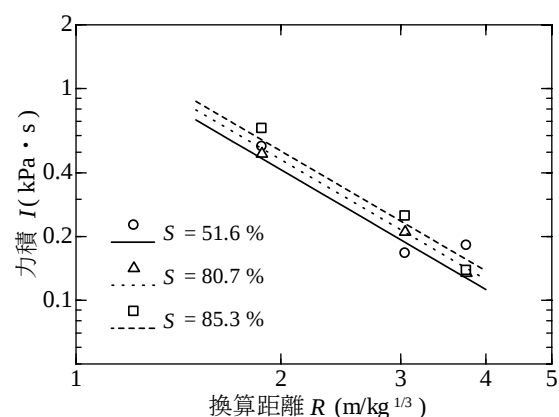


図-20 力積の評価式

表-7 室内爆発実験と Eng-Choon Leong らの実験における条件の比較

	室内爆発実験	Eng-Choon Leong らの実験 ⁶⁾ 実験ケース : Partially saturated soil
飽和度 S	51.6%, 80.7%, 85.3%, 97.9%	85%
粒度組成	砂95%, シルト3%, 礫2%	砂95%, シルト5%
爆源からの距離 D	40cm~80cm	100cm~646cm
使用爆薬	C4	ペントライト
使用爆薬のTNT当量	1.05	1.08
薬量 M	9.7g	1000g~10000g
TNT換算薬量 M_{TNT}	10.2g	1080g~10800g
換算距離 R	1.84~3.68 m/kg ^{1/3}	0.97~2.92 m/kg ^{1/3}

薬と等価になるように調整する係数)を導入して、使用した薬量を TNT 爆薬に換算した薬量 M_{TNT} で比較している。このとき、換算距離 R は、ほぼ同等であるとみなすことができる。

また、TM 式は、次式で表される。

$$P_0 = 48.8 \times (\rho c) \times \left(2.52 \times \frac{D}{M_{TNT}^{1/3}} \right)^{-n} \quad (12)$$

ここに、 P_0 : 最大爆土圧 (kPa) , D : 爆源からの距離 (m) , ρc : 音響抵抗 (kPa/(m/s)) , M_{TNT} : TNT 換算薬量 (kg) , n : 減衰係数, を示す。

米国陸軍テクニカル・マニュアル⁴⁾には、実験で得られた $\rho c, n$ の値が土質ごとに示されているが、供試土の飽和度については

示されていない。そこで、本実験および Eng-Choon Leong らの実験における実験条件に最も近い土質として、「緩く、湿った、粒度の悪い砂」を採用した ($\rho c = 339$ (kPa/(m/s))および $n = 3$)。このとき、式(12)は、以下のように表される。

$$\ln P_0 = 6.97 - 3.00 \ln R \quad (13)$$

図-21 および表-8 は、提案式による計算値と、Eng-Choon Leong らの実験で得られた最大爆土圧 P_0 および TM 式による算定値を比較したものである。本実験と Eng-Choon Leong らの実験データが重複する換算距離 $R = 2 \sim 3$ の範囲においては、本実験で得られた推定式は Eng-Choon Leong らの実験で得られた最大爆土圧の最大値とほぼ同等の値を示しており、換算距離の増加に伴う最大爆土圧の減少傾向はよく一致する。また、本実験の範囲外である

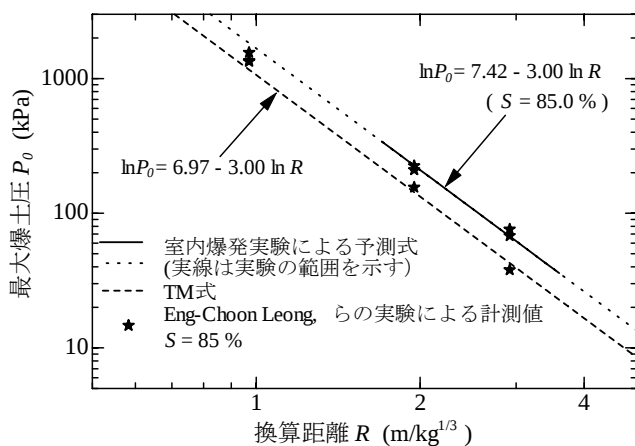


図-21 本実験による予測式、TM式および
Eng-Choon Leong らの実験における最大爆土圧の比較

表-8 最大爆土圧の比較

換算距離 (m/kg ^{1/3})		0.97	1.95	2.92	
最大爆土圧 (kPa)	本実験の提案式による計算値	1829	225	67	
	TM式による計算値	1166	144	43	
	Eng-Choon Leong らの 実験による計測値	1回目	1340	156	38
		2回目	1565	210	68
		3回目	1359	225	76
平均値		1421	197	61	

$R < 2$ の領域においても、予測式を外挿することにより、予測式と Eng-Choon Leong らの実験で得られた最大爆土圧の傾向は概略一致することがわかる。

一方、本実験による推定式と TM 式による値とを比較すると、本実験による推定式の方が最大爆土圧を大きく評価しているが、換算距離の増加に対する最大爆土圧の傾向は類似している。したがって、薬量 10g 程度の小規模室内爆発実験であっても、換算距離を導入することにより大規模な地中爆発による爆土圧を予測することができるといえる。

6. まとめ

本研究は、模型地盤の内部で C4 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。本研究の成果をまとめると、以下のようになる。

(1) 爆土圧は、爆発の直後に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た。また、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た。ただし、飽和度が低い場合には、距離減衰が大きい。

(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。しかし、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) 換算距離を導入して飽和度の影響を考慮した、最大爆土圧、正圧継続時間および力積の評価式を提案した。

(4) 提案した評価式は、Eng-Choon Leong らが行った屋外実験とほぼ同等の値を示しており、換算距離の増加に伴う最大爆土圧の減少傾向はよく一致し、米国陸軍工兵隊が提案した最大爆土圧推定式とも類似した傾向を示した。したがって、薬量 10g 程度の小規模室内実験であっても、換算距離を導入することで、大規模な地中爆発による爆土圧を予測することができると考えられる。

本研究においては、1 種類の地盤材料に対して検討したが、今後、粘土や礫などの代表的な土質について実験を行い、土質が爆土圧特性に与える影響についてさらに検討する必要がある。

参考文献

- 1) 坂本 佐, 西村満登: 土中に於ける衝撃圧力の測定, 工業火薬協会誌 Vol27, No.6, pp. 28-29, 1966
- 2) 倉持二郎, 高根沢吉夫, 藤井透, 高嶋実, 岡村功三: 耐爆構造の研究 (第 2 報), 防衛庁技術研究本部, 1978
- 3) 森下政浩, 阿曾沼剛, 栗木茂幸, 竹本憲介, 齋藤和伸, 松尾啓: 近接爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷と覆土の緩衝効果, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp. 865-876, 2006
- 4) Headquarters, Department of the Army, Washington DC: Fundamentals of protective design for conventional weapons, TM5-855-1, Cha.5, pp. 1-9, 1986
- 5) P.D.Smith and J.G.Hetherington, *Blast and Ballistic Loading of Structures*, Elsevier Science Ltd, pp. 37-41, 1994
- 6) Eng-Choon Leong, S Anand, Hee-Kiat Cheong, Chee-Hiong Lim: A revisit to TM-5-855-1: Scaled distances and peak stresses, Design and Analysis of Protective Structures against Impact/Impulsive/Shock Loads, pp. 29-40, 2003
- 7) Headquarters Department of the Army, the Navy and the Air Force Washington DC, ARMY MANUAL No.5-1300/NAVY NAVFAC P-397/AIR FORCE AFR 88-22 "Structures to resist the effects of accidental explosions", Cha.2, pp. 7, 1990

(2006 年 9 月 11 日 受付)