

密閉立方構造体内の爆発衝撃波の挙動

正 田 強*

1. 序

本誌所載の「密閉構造体内の爆風圧の測定」に報告せられた内容について検討し、考察したのが本報であつて、これは同じく別項記載の「密閉構造体の耐爆設計に関する研究」の一部をなすものである。

2. 実験結果について

(a) 本実験は回数も少く、測定点も少ないのでこの結果のみから一般的結論を引出すことはむづかしいが、従来の文献値と併せ考察することにより密閉耐爆構造に関する有益な知見をうることができる。

実験結果を検討すると実験方法にいくつか不備な点があつたことに気付く。

イ) ピエゾ素子による測定結果は果して正しい反射圧を測定しえたか否か疑問である。

ロ) 球形爆薬に対する起爆法が雷管一本を中心部に下向きに装着したので底面に対して主方向が偏り、側面に対していくらか斜め衝撃が入射した感じがある。又球形爆薬といつてもいくらか下ぶくれになつていたのでないかという感じもする。

これらの欠点は同一距離でのピーク圧と薬量についての scale law にも現れており“ピーク圧は薬量の3乗根に比例する”という従来からの法則に従わず 0.5~1.0 乗に比例するというデータが多い。

以下の考察では従来の文献値と比較しながら今回の測定値のうち比較的妥当なもののみを採用して議論を進めることにする。

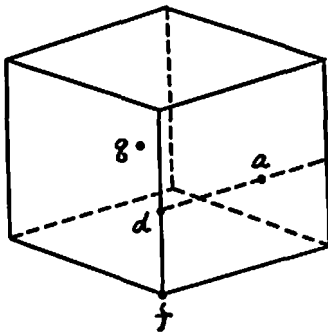


Fig. 1 中心 g , 面中央 a , 稜 d , 隅 f 点

測定の多くは Fig. 1 の a 点について行われ、その他 d 点, f 点について若干の値がとられた。

(b) 側壁中央の a 点の受ける第1波ピーク圧

ストレングージ及びブラストメータによる測定値それにピエゾ法による値のうちいくつかの圧力値を丸めて scaled distance $R/W^{1/3}$ の函数として示すと Fig. 2 となる。

A と B は文献¹⁾²⁾によるもので

A 曲線は TNT による反射圧 (face-on pressure)

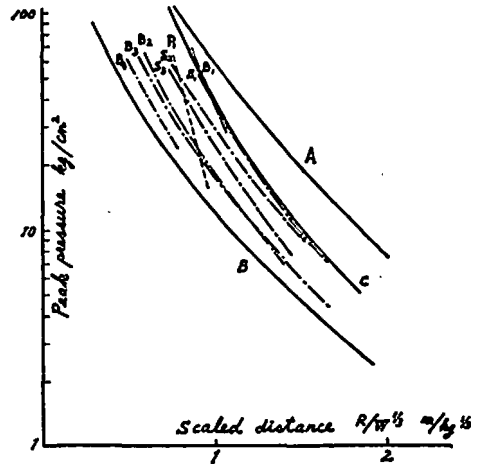
B 曲線は TNT による入射圧 (side-on pressure)

及び (Pentolite による入射圧 (ペントライトは TNT 50+PETN 50)

(註) B 曲線が TNT, Pentolite とともに殆んど同じなのはおかしい。Pentolite は TNT より 2~3 割強力であり、曲線も上になる筈である。どちらがより正しいかは分らない。

本実験の測定は新桐ダイナマイトについて行われた。新桐は TNT と同等と見做してよいから A, B 曲線と直接の比較ができる。

Fig. 2 において今回の実験値の傾斜が文献曲線 A,



S : Strain meter

B : Blast meter

P : Piezo gauge

脚符 : 1, 2, 3, 4 は試験体番号

A : TNT 反射圧¹⁾

B : "TNT" 入射圧¹⁾ Pentolite 入射圧²⁾

C : 実験値最高線

Fig. 2

昭和40年12月24日受理

* 東京大学工学部燃料工学科 東京都文京区本郷7丁目

B の傾斜と異なるのは scale law が異なる為で実験の不備も原因していると思われる。今回の実験値のうち最も高い圧力値を示す線をつらねて本実験値の代表曲線 C とする。

実験値 (C) と文献値 (A, B) をいくつかの scaled distance について比較したのが表 1 である。

表 1 実験値と文献値の比較

| R/W% R/W% | 反射圧 | | 入射圧 | 反射倍数 | |
|--------------|-----|----|-----|------|-----|
| | A | C | B | A/B | C/B |
| 0.8 | 94 | 70 | 18 | 5.2 | 3.9 |
| 1.0 | 58 | 40 | 11 | 5.3 | 3.6 |
| 1.2 | 36 | 20 | 7.7 | 4.7 | 2.6 |
| 1.4 | 23 | 12 | 5.5 | 4.1 | 2.2 |
| 1.6 | 15 | 8 | 4.0 | 3.7 | 2.0 |

文献 (1) では反射圧 P_r と入射圧 P_i の関係は $P_r/P_i = 2 + 6P_i/(7P_0 + P_i)$ P_0 = 大気圧で示されるとしている。表 1 の A/B はこの関係を満足していることは当然である。本実験の結果は表 1 に見るように反射比 C/B は文献値より低い。

この原因は (a) で述べたように本実験の不備にもよるであろうが、文献値の A/B はやや高すぎる感もある。つまり文献 (1) と (2) で入射圧が TNT と Pentolite で同じと出ているように文献にも不一致があり、文献 (2) の Pentolite 入射圧をもし正しいとすれば、Pentolite は新桐より強力であり、入射圧は新桐では B より下方にくるから、反射比 C/B は表 1 の値よりもつと上昇する筈だからである。

このように見れば本実験値 (最高値) がかなり妥当な所に位置しているのではないかと考えられる。

しかし、すでに曲線 A が米国において採用されておるものとすれば、それを下廻る今回の実験値を正しいものとするのも実験不足の現在ではためらわれる。従つて構造設計に当つては曲線 A をとることにすれば一層安全である。

(c) 反射波の形状

ストレングージによる測定によれば第 1 および第 2 反射波の形状は近似的に 2 箇の 3 角形を重ねた形と考えてよい。

このような形になる理由は Fig. 3 に示したようにショック波と爆ごうガスとの界面で反射ショックが衝突して反反射した為に起る現象である。第 2 波以後でショックの形が色々と変化するのも壁面との衝突や衝撃波同志の衝突の結果起るもので容易に推測し難い形をとる。

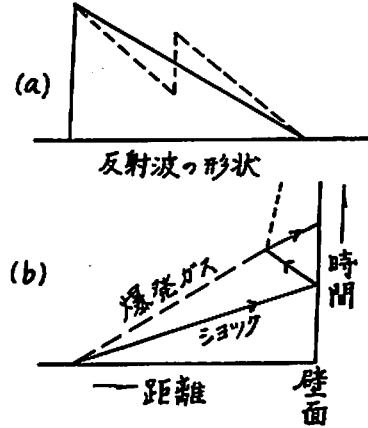


Fig. 3 反射ショックの形

以後の考察では単純な 3 角形を仮定することとする。

密閉下の爆発では上記のような繰返し反射さらに第 2, 第 3 波と重なる為壁面に与える衝撃効果は非常に高くなる。

(d) 壁面の交叉する稜および隅での圧力

プラストメータの結果では試験体 No. 1 の隅部においてはかなり高い値が記録されているが、その他の稜及び隅における圧力値を scaled distance の函数として目盛ると面中央での値と大差がない。ストレングージによる圧力も同様である。

本来、稜と隅では増巾された圧力が出る筈であるが、本実験は空間が狭く爆発ガスの膨脹が壁面近くに及び、理想的な衝撃波干渉の結果を生じなかつたものと見られ、さらに最初に述べた起爆法の欠点がここにも現われているからであると考えられる。

以後の考察では稜においては反射圧の 2 倍、隅においては 4 倍の値を仮定する。

(e) 斜め入射のときの反射圧の倍率

これについては本実験では測定していないが、以後の考察では斜め入射のときの反射圧としては垂直反射圧 $\times \sin \alpha$ (α は入射角) を仮定する。

(f) 平均衝撃波速度

壁面へのショック到達時間とパルス巾についてのデータが実験からえられている。

これらより爆心から壁までの平均衝撃波速度を求め scaled distance の函数として描くと Fig. 4 をうる。

第 2 波についても同様の計算を行うと Fig. 5 となる。第 2 波の方はばらつきが多くて信頼性が少ないが、第 1 波との平均速度の差は少ない。Fig. 5 では横軸は第 1 波のときの 1/3 の値をとつてある。これは Fig. 6 のように二次反射までの距離は一次反射のときの 3

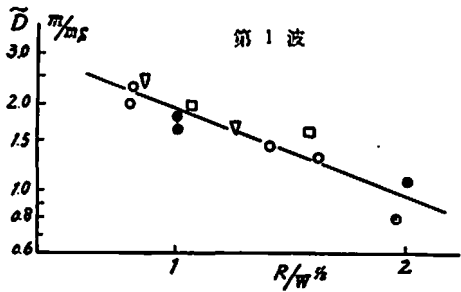


Fig. 4 平均衝撃波速度

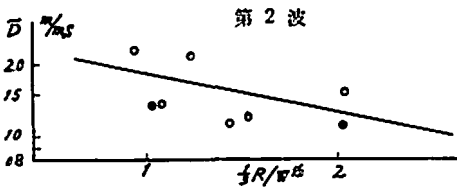


Fig. 5 平均衝撃波速度

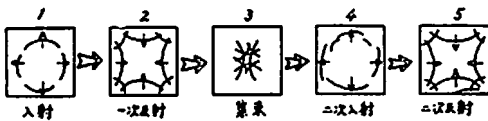


Fig. 6

倍になっているからである。

即ち反射後中心で両面からの反射波が衝突し、再び戻って再入射することになる。

(g) パルス巾

パルス巾即ち衝撃の持続時間は一般的には葉巻にあまり関係していない。代表的な実測値を図示してみると Fig. 7 となる。(壁中央での垂直反射の場合)。イ

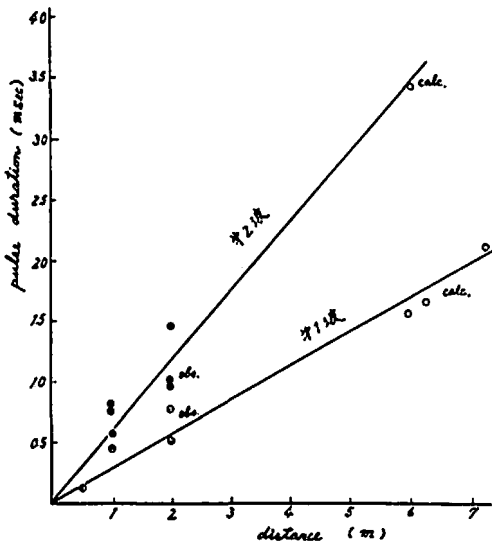


Fig. 7 パルス巾と爆源よりの距離

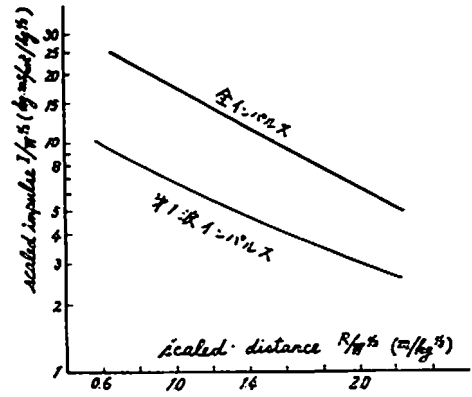


Fig. 8

ンパルスの実験値(後述の Fig. 8)から求めた点を第1波について示すと実験値の外挿直線の上に乗る。

(表2参照)。従つて第2波の持続時間は凡そ第1波の2倍とみてよいことになる。

(h) インパルス

ストレングージによつて第1~第n波インパルスが測定された。Fig. 8には第1波のインパルスの値をプロットしてあるが今回の実験のうち最高値を結ぶ曲線は文献のA曲線に近いことが分る。ピーク圧が文献値より低く出たのであるからインパルスも低位に出ることは当然であろう。

また同図には第2波以後のものをも含めた全インパルスがプロットされている。これは本実験で初めて得られたデータであつて文献にはない。密閉効果のため全インパルスは非常に大きくなつてることが分る。

Fig. 8 実験値の最高値を基準として scaled distance の函数としてインパルス及び全インパルスを描いたものである。

(i) 第2波のピーク圧

第2波のピーク圧力の測定値はかなりばらついていて規則性がない。第2波の方が大きい時すらある。これは一寸疑問で恐らく測定ミスであろう。多くの場合第1波の1/3~2/3位の値を示し、第1波のピーク圧の高いときは概して第2波は1/3位に低くなつてゐる。

3. TNT 100kg を1辺12mの立方体構造の中心で爆発させた場合の壁面の受ける圧力荷重の時間経過について

(a) 仮定

以上の準備作業(scale law及び実測よりの推定)により、任意の大きさの密閉室内で、任意量のTNT又は新桐ダイナマイトを爆発させた時の荷重を推定することができる。

但し第2波以後のピーク圧については第1波の1/2を採用することにする。第1波, 第2波等の波形は複雑であるが単純に3角形波形で代表する。

(b) 壁面位置の符号

Fig. 9 に示す各点について考える。

(c) 上記各点についての計算結果は表2のようになる。

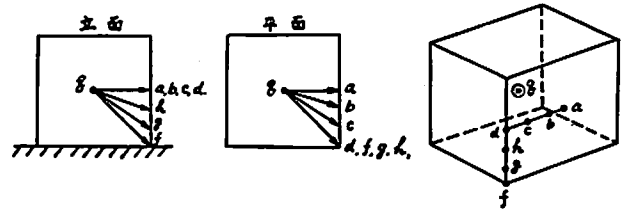


Fig. 9

表2 壁面各点の特性値

| | 面 | | | 稜 | | | 隅 |
|---------------------------------------|------|------|------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | a | b | c | d | h | g | f |
| 爆心 g よりの距離 (m) | 6 | 6.3 | 7.2 | 8.5 | 8.8 | 9.4 | 10.4 |
| R/WK | 1.3 | 1.36 | 1.55 | 1.83 | 1.88 | 2.0 | 2.24 |
| (第1波) 平均衝撃波速度 (m/ms) | 1.6 | 1.5 | 1.36 | 1.1 | 1.06 | 1.0 | 0.85 |
| (同上) 壁面への到達時間 (ms) | 3.7 | 4.2 | 5.3 | 7.8 | 8.2 | 9.4 | 12.2 |
| 入射係数 ($\sin \alpha$)* | 1.0 | 0.95 | 0.83 | 0.7 | 0.68 | 0.64 | 0.57 |
| 垂直反射圧 (kg/cm ²) | 29 | 26 | 17 | 10 | 9 | 7.4 | 5.0 |
| 反射圧** | 29 | 24.8 | 14.1 | 7.0 (14.0) | 6.1 (12.2) | 4.75 (9.5) | 2.9 (11.6) |
| 第2波平均衝撃波速度 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.35 | 1.32 | 1.28 | 1.18 |
| 第2波到達時間 (ms) | 10.6 | 11.8 | 15 | 19 | 20 | 21 | 27 |
| インパルス (第1波) [▽] (I/WK) | 4.9 | 4.6 | 4.0 | 3.2×2 | 3.1×2 | 2.9×2 | 1.4×4 |
| " I | 22.7 | 21.2 | 18.4 | 29.6 | 28.7 | 27 | 26 |
| 全インパルス [▽] ($\Sigma I/WK$) | 12.5 | 12 | 9.9 | 7.2×2 | 6.8×2 | 6×2 | 4×4 |
| " ΣI | 58 | 56 | 46 | 67 | 63 | 55 | 74 |
| 第1波持続時間 [▽] (ms) | 1.56 | 1.64 | 2.16 | 4.2 | 4.7 | 5.7 | 4.5 |

(註)

* h, g, f の入射係数は d の係数に対し, それぞれ $\frac{8.5}{8.8}, \frac{8.5}{9.4}, \frac{8.5}{10.4}$ を乗じたもの。

** 反射圧は垂直反射圧×入射係数, d, h, g 点については計算値の2倍, f 点については4倍をとる (稜と隅の仮定)

▽ インパルスの値は斜め入射の場合も Fig. 4-8 をそのまま使う。

第1波持続時間は第1波インパルス (I) をピーク圧で除し2倍したもの (3角波形と仮定するから)

全インパルスの値の信頼度はさほど高くない。

第2波のピーク圧は第1波の1/2とし持続時間は2倍とする。即ち第2波のインパルスは第1波と同じになる。第3波は, ピーク圧は第2波の半分で, 全インパルスから第1, 2波のインパルスを引いた残りをを使うような持続時間をとる。

(d) 面および稜での圧力波形

以上の計算より各点での圧力荷重の経過を辿ることができる。

壁中央 a 点での波形は Fig. 10 となる。

第3波までで丁度全インパルスと同じになる。

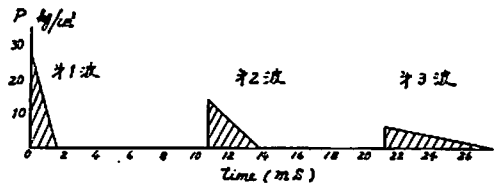


Fig. 10 a 点 (壁中央) の圧力経過

壁中央の水平線 a, b, c, d に沿って荷重変化の状況を図示したのが Fig. 11 である。

最初中央に高いピークの荷重がかかり, 以後両側に拡がりながら中央が凹に縁が高い形の波となつて稜へ

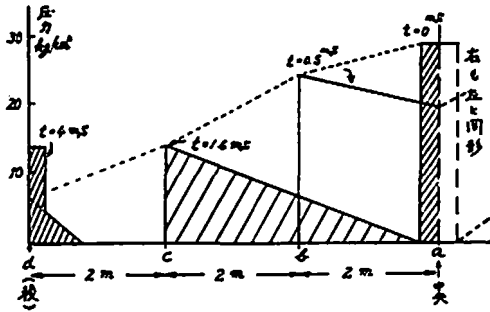


Fig. 11 a, b, c, d 線上の圧力の時間的变化

向う。稜で反射して隣の面からきた波と合体し、2倍となつて再び中央へ向う。稜線上の d, h, g, f 点で同様の圧力荷重の変化を描くと Fig. 12 となる。稜線の場合、圧力荷重の減衰が面の場合に比して非常に遅いのが目立っている。隅では又3稜の合併効果が現れて高い圧力となる。

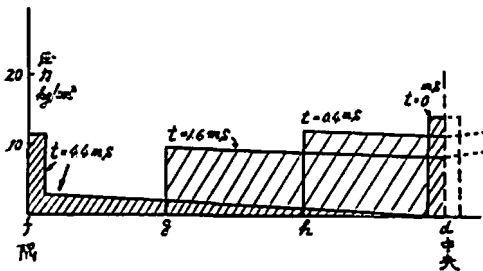


Fig. 12 d, h, g, f 稜線上の圧力の時間的变化

稜点 d で a 点と同じような圧力波形の経過を描いてみると、Fig. 13 となる。

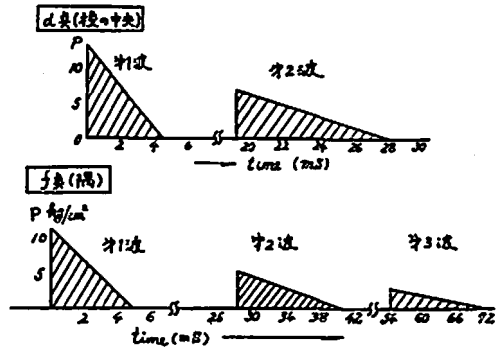


Fig. 13 d, f 及びび点での圧力波形の経過

(e) 結論

以上により壁面の各点に加わる圧力の時間的变化を一応推定し得た。勿論多くの仮定に基いた計算であつてなお検討を要する点も多いけれども、従来のデータと今回の実験による裏付けを基礎としているので耐爆構造の設計に有用な指針を与えるものと信ずる。

文 献

- 1) A. J. Hoffman & S. N. Mills "Air Blast Measurements about Explosive Charges at Side-on and Normal Incidence" U. S. Army Ballistic Res. Lab. Rep. No. 986, 1956
- 2) J. G. Kirkwood & S. R. Brinkley Jr. "Theory of Propagation of Shock Waves from Explosive Source in Air and Water" OSRD rep. 4814, PB 32198, 1945.

Behavior of Shock Waves produced by Detonation of Explosives in Closed Cubic Structures

by Tsutomu Hikita

Behaviors of Shock Waves produced by detonation of Shinkiri Dynamite of 0.5 ~ 12kg at the center of closed cubic structures (4m, 2m, 1m span cube and 2m dia cylinder) have been studied by the G-project group.

Results obtained from the pressure measurements by strain-meter, piezo-gauge and blast-meter were summarized in Fig. 2. The values of first-wave-impulse and total impulse were shown in Fig. 8.

The results of sample calculation with the detonation of 100kg TNT in 12m cube were shown in Table 2.

(University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo)