

## 第 4 章

H P 『海軍砲術學校』公開資料

<http://navgunschl.sakura.ne.jp/>

## 第4章 空中爆発荷重

### 第1節 建造物と爆風波との相互作用

#### 序　論

4.01 核爆発の爆風波によって、空気中に生起する諸現象については、既に前章で述べた。

このような、爆風波にさらされた物体や建造物の応答は、二つの主要な題目に分けて考察できる。

第1は「荷重」とよばれ、これはすなわち動圧の作用によって生ずる力であり、この章の表題である。

第2は「応答」、又は、特殊な荷重によって生ずる建造物のひずみであり、これは次章で取扱う。

4.02 空中爆発においては、投射された爆風の伝播方向は、零地点においては地面に向っているであろう。

正規な反射領域内においては、爆風波の伝播の方向は、建造物の水平軸に平行ではなく、建造物に作用する力は（反射波の通過前においては）水平面における反射波の増大によって、同様に、或る程度下向きの成分を持っている。必然的にマッハ領域においては（§ 3.24参照）水平荷重に加えて、同様に、初期には相当な下向きの力がある。

このことは、並進運動に基づくひずみが重なることにより、例えば、屋根が凹む等地面に向っての押しつぶしが起こり易いことを示す。

4.03 次の節に述べるマッハ領域における地上建造物に対する爆風荷重に関する議論は、理論的考察に従うならば、反射表面はほぼ理想的であり（§ 3.47）、また、爆風波は正常に行動するという立場を取っていることを強調しておく。

先行域（§ 3.79参照）における爆風荷重の大綱説明もまたなされている。

# H P『海軍砲術学校』公開資料

注：(1) これはしばしば偏面超圧とよばれる。なぜならば、実際上反射が起こらない建造物の側面で経験されるものと同じである。

便宜上、その取り扱いはやや任意的に二つの部分に分けられている。一つは、主として爆風波の過圧の頂点によって決定される「回折荷重」であり、もう一つは動圧が重要な役割を持つ「牽引荷重」である。

しかしながら、過圧と動圧は分離することはできないので、例えばある建造物にとっては、一つの型の荷重が他の一方の荷重に比べて重要であるとしても、すべての建造物は同時に二つの型の荷重を受けることを忘れてはならない。

**4.04** 特に、建造物の幾何学的問題がこみ入っていることを除外しても、爆風波の建造物に対する影響の細部は、非常に複雑である。しかしながら、簡略化された幾何学と等しい量を有するものについて考えることは、しばしば可能であり、そして幾つかの爆風荷重に関する幾何学については、この章の後半で論議する。

## 回折荷重

**4.05** 爆風波の前縁が建造物の面に当ると反射が起こる。その結果として過圧は、すみやかに投射波の前縁の圧力の少くとも2倍（一般に数倍）に増大する。実際に到達する圧力は、種々の要素、投射波の最大過圧そして波の方向と建造物の面との角度（§3.78）によって決定される。

圧力の増大は、衝撃面の後にある急速に動く空気が建造物の面で減速されることにより、衝撃面の後にある運動エネルギーが内部エネルギーに転換することによって引き起こされる。

反射された衝撃面は、あらゆる方向の空気中に帰って行く。高圧の範囲は、外部に広がり低い圧力の全周に向う。

**4.06** 波面が進行するにつれて、建造物の面において反射された過圧は、急激に減少し、反射しない爆風波と風圧（動圧）によって生じた牽引圧とが加わったものになる。(1)

同時に、空気の圧力波は建造物の周囲に曲がり、又は、「回折」し、そのため建造物は爆風により結局包み込まれる。そして、ほとんど同じ圧力が側面や屋根に加わる。しかしながら、建造物の背面は風圧から遮断されているけれども、前面は依然として風圧にさらされている。

# H P『海軍砲術学校』公開資料

注：(2) 更に、詳細な取扱いは本章の後半に示す。

4.07 前節で述べた爆発現象の発展過程は、簡易化した形で図-4.07 a・b・c・d・e<sup>(2)</sup>に示されている。この図は、水平方向に進む爆風波によって圧迫された開口部の無い建造物の継続的段階を示す平面図である。

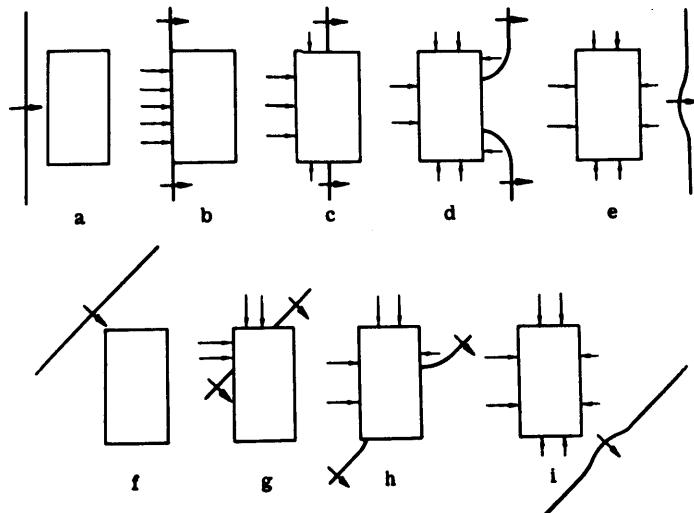


図-4.07 開口部のない建造物による爆風波の回折の諸段階（平画図）

図-4.07 aにおいては、波の前縁が爆風にさらされた建造物の面に垂直に接近していることを示す。

図-4.07 bでは、波は丁度建造物の前面に達し高い反射過程を生じている。

図-4.07 cにおいては、爆風波は建造物に沿い約半分まで進んでおり、図-4.07 dでは、波の前縁は建造物の背面を過ぎ去っている。

爆風が建造物の周囲に回折すると、背面の圧力は増大する。一方前面の圧力は低下する。最終的には図-4.07 eのように、波の前縁が完全に通過するとほぼ等しい空気圧が建造物の側面や屋根に加わる。しかしながら、爆風波の正圧の全期間を通じ、風圧による前面と背面との圧力差は残る。もし、建造物が爆風波に対してある角度をもって建っているならば、圧力は一面ではなく、二面に直接加わるであろう。しかしながら、爆風荷重の一般的な動向は上述したことと同じである（図-4.07 f・g・h・及びi）。

注:(3) 牽引圧は、動圧と牽引係数の積である（§ 4.29）。

**4.08** 前面と背面における圧力差は、爆風波が完全に建造物を廻り切れないうちに、図-4.07 b 及び d、又は、g 及び h のように最大値に達するであろう。このような圧力差は、横方向（又は平行移動）の力を生じ、建造物をずらせ通常爆風と同方向に全体的に動かすことになる。この力は、爆風波が建造物の全周を回折している間作用するので、回折荷重として知られている。

反応の程度と性質は、建造物の大きさ・形・重量及び地面に固定されている堅固さによる。他の建造物の特性も応答性を決定する際に重要であり、以下に示す。

**4.09** 爆風波が建造物を包み込んでしまった時には、(図-4.07 e 及び図-4.07 i) 圧力差は少ない。そして荷重は、主として前面に作用する“牽引圧”に完全に依存する。<sup>(3)</sup> 建造物の全表面の実際の圧力は、周囲の大気圧より高く、爆風の正圧層が終るまでむらなく減少しながらもやはり周囲より高い。ゆえに、開口部のない建造物の回折荷重は、結局、内向きの圧力、すなわち、圧縮又は圧搾運動と動圧との組合せによって置き換える。

開口部のない建造物においては、荷重は過圧が零に低下した時のみ消える。

**4.10** 回折の段階で生ずる損害は、荷重の大きさと、その持続時間で決まる。

荷重は爆風の最大過圧に関連する。そしてこの最大過圧は非常に重要な因子であるといえる。今まで仮定してきたように、建造物に開口部がないという考えの下では回折荷重は、大雑把にいえば、爆風の前縁が建造物の前面から後面に行くに要する時間と同じである。ただし、風の荷重は更に長い期間続く。こうして、建造物の大きさは、回折荷重に影響を与える。

75フィートの長さの建造物に対しては、回折荷重は約1/6秒間働く。しかし、圧縮及び風の荷重は更に長時間続く（§ 4.13）。

細い建造物、例えば、電信及び一般用電柱や煙突では、回折の時間は非常に短く、従って回折荷重は無視し得る。

**4.11** もし、爆風にさらされる建造物が開口部を持つか、又は、ごく短い時間で破壊する窓・パネル・薄い壁又は扉を有する場合は、構造物の内部と外部との間に急速な圧力の平均化が起こるであろう。

このことは、回折が起こっている間に圧力差が減少し易いことを示す。

全体としての建造物に対する回折荷重は、こうして減少する。ただし、内部の壁、隔壁（仕切）に対する荷重は、完全に密閉されたすなわち開口部をほとんど持たない構造物より大きい。更に、建造物が多くの開口部を持っているならば、回折の段階の後において、外圧が内圧より高いことによって起こる圧縮（おしつぶし）の作用は起こらないであろう。

### 牽引（動圧）作用

**4.12** 過圧の正圧部の全期間を通じて（そしてそれより少し後まで）、建造物は爆風波の前縁のすぐ後の一時的な風によって生ずる動圧（又は牽引）荷重を受けるであろう。

理想的でない条件（先行波）においては、種々の強さの動圧荷重が、最大過圧（回折）荷重の前に存在する。特に、マッハ領域においては、牽引荷重は回折荷重と同様に、爆風にさらされた建造物、又は、物件に作用する横方向（平均移動）の力に等しい。

**4.13** 高い爆風過圧の時以外、建造物の表面における動圧は、爆風波及びその反射による過圧の最高値より、はるかに小さい。

表-3.07 理想的な衝撃波面に関し計算された海面上での  
空気中における尖頭過圧、動圧及び最大風速

尖頭過圧 (P S I)	動圧の最高値 (P S I)	最大風速 (マイル/時)
200	330	2,078
150	222	1,777
100	123	1,415
72	74	1,168
50	41	934
30	17	669
20	8.1	502
10	2.2	294
5	0.6	163
2	0.1	70

しかしながら、建造物に対する抗力過重は、回折過重に比して比較的長時間続く。例えば、1 M Tの核の空中爆発において、地上の動圧の正圧部の持続時間は、1マイルの斜距離では約3秒である。

一方、回折過重は、前述のとおり大きな建造物であっても、1秒よりずっと少ない時間しか働かない。

**4.14** 核と高性能爆薬の爆発との重要な差異を構成するものは、建造物に働く牽引荷重の持続期間の効果である。それは爆風が同じ大きさの最大過圧であっても、核兵器は普通の爆弾より破壊力が大きいことで証明できる。特に、牽引荷重を受ける建物の場合はそうである。これは、高性能爆弾では爆風の持続時間がずっと短いからである。すなわち数百分の1秒に過ぎない。

高エネルギーを発する武器からの爆風の正圧部が長く持続する結果、最大過圧のみからだけ予想されるよりずっと大きな被害を、牽引力に鋭敏な建造物(§ 4.18)に与えることになる。

## 構造特性及び爆風荷重

**4.15** 爆風荷重に対する応答を解析する場合において、第5章で十分に検討するとしても、建造物を二つの種類、すなわち、回折型建造物と牽引型建造物とに分けて考えるのが便利である。これらの名称が暗示するように、核爆発において、前者は主として回折荷重により、後者は牽引荷重に影響される。

しかしながら、実際にこの区分は大変複雑な取り扱いを簡素化するため作られたものであることを、強調しておく。

ある建造物は、主として牽引荷重に応答することは事実である。しかしながら実際は、すべての建物は両方の型の荷重に応答する。

被害を生起するに当たり各々の型の荷重の相対的重要性は、建造物の型と爆風の性格による。これらの事柄は、次節以下の論議との関連において、注目すべきである。

**4.16** 窓や扉の面積が適当に小さく、相当に強い外壁を有する大きな建物は主として回折荷重に応答する。これは、爆風が建物を包みこむには多少の時間を要し、

この時間を通じて建物の前面と後面の間に圧力差が存在することによる。

主として、回折荷重に応答する建造物の例としては、窓面積の少いコンクリートの高層ビルディング、アパートのような大きな壁式構造物、あるいは一般住宅のような木造の建物がある。

**4.17** 何故ならば、大きな建造物の場合でも回折荷重は、わずか数分の1秒しか作用しないので、爆風の正圧部の持続時間は、(これは通常より長いけれども)大した影響はない。言い換えれば、爆風の正圧部の長さは、回折の段階において、かけ値なしの平行移動荷重(又は生起する被害)に対して、重大な影響を与えない。

それゆえ、回折型建造物は、主としてそれがさらされる爆風波の最大過圧に対して敏感である。

実際に、回折荷重を主として決めるのは、建造物に当たる関連反射過圧である。そしてこれは通常入射爆風過圧の数倍に達する(§ 3.78)。

**4.18** 建造物(又はその構成部材)が小さいか、建造物(又は素材)の特性のため、又は、爆風の作用によって各所に開口部ができ、かつ、建造物(又はその構成部材)の各箇所に等しい圧力が急速に加わった場合、回折力は極めて短時間作用するだけである。そして、建造物の応答は、主として爆風の動圧(又は牽引力)による。

代表的な牽引型建造物は、煙突・電柱・ラジオ及びテレビの送信塔及び橋梁である。これ等の場合は、建造物又はその構成部材を取り巻く爆風波の回折は、非常に短い時間を要するだけであり、従って、回折の過程は無視し得る。しかしながら、牽引荷重は相当なものである。

**4.19** 建造物に対する牽引荷重は、単に、動圧にのみよるものではなく、建造物(又はその構成部材)の形状にもよる。

形状因子(又は牽引係数)は円形、又は、流線形の物体の方が不規則な、又は鋭い角を持った建造物(又はその構成部材)より小さい。

例えば、単位投影面積について、電柱又は煙突にかかる荷重は、I型の梁に比して小さい。更に、牽引係数は状況により、正負いずれかの値をとる(§ 4.29)。

**4.20** アスベストセメント・アルミニウム又は波形鋼によって作られた軽い壁を

持つ鋼（又は鉄筋コンクリート）の骨組みの建物は、低い過圧で壁が崩れることにより直ちに、牽引力に敏感となる。

この破壊は、爆風が建造物に突き当たった直後に起こり、それにともなって圧力の平均化が起こるため、骨組みは比較的小さな回折荷重を受ける。続いて骨組みが受けるひずみ、又はその他の損害は、建造物の細かい要素、すなわち、柱・梁及び桁と同様に牽引力によって生ずる。

**4.21** 基本的に牽引型の建造物又は側壁の喪失により、すみやかに牽引型になる建造物の場合は、建造物又はその素材の応答は、牽引荷重とその持続時間の両者によって決まる。

このようにして、被害は爆風の正圧部の長さと最大動圧に依存する。

結局、一定の最大動圧の場合には、高エネルギー放出の爆発は、正圧部の時間が低エネルギー放出の場合より長いため、牽引型の建造物に、より大きな被害を与えるのである（§ 5.48参照）。

## 第2節 対象物と爆風との相互作用

### 爆風荷重の増大

**4.22** 爆風による被害を予想する通常の手順は、利用可能な実験室及び実物について得た実験資料を解析することである。解析は2段階で行われる。第1段階は特定の建造物に対する爆風荷重を決めることであり、第2段階はこの荷重に対する建造物の応答を評価することである。

簡単な形で目標を理想化したものの解析を行う第1段階は、次項以下で論議する。第2段階は、第5章で取り扱う。

**4.23** 対象物に加わる爆風荷重は、入射爆風の性質、すなわち、最大過圧・動圧・減衰及び第3章に示す期間・大きさ・形・方向並びに対象物の応答の両者の関数である。

入射爆風と対象物の相互作用は複雑な過程であり、その過程に対して主として

衝撃波管や風洞実験から得た資料に基づいた理論が開発されている。

爆風荷重の複雑な問題をよく分る表現にするという現在の目的のために、(1)問題の過圧は、50 P S Iより小であること（動圧は約40 P S Iより小）。そして、(2)荷重を受ける対象物は、マッハ反射の領域にあることを仮定する。

**4.24 爆風荷重の過程の概念を得るために簡単な対象物、すなわち、一面を爆発の方向に向けた立方体を例として選ぶ。更に、この立方体は、地面に固く固定されており立方体が荷重を受けた時も動かないと仮定する。**

爆風（又は衝撃）波面は、平面波が立方体に当たると考えられるように立方体と比較して適度の大きさであると解釈する。

以下に述べる圧力とは、特定の面上の平均圧力をいう。

対象物は、マッハ反射領域にあるから爆風波面は、地表面に垂直である。

立方体の前面、すなわち、爆発の方向に面した側面は、爆風の伝播方向に垂直である（図-4.24）。

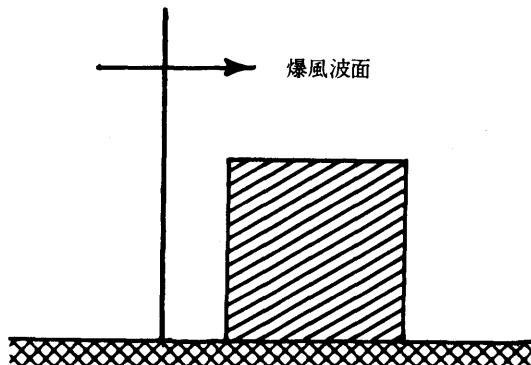


図-4.24 地上に固く固定した立方体に近づく爆風波

**4.25 爆風波が、立方体の前面に衝突する時、入射過圧の2倍ないし8倍にも達する反射圧力を生ずる反射が起こる（§3.56）。**

爆風波は続いて立方体の周りに廻り（回折し）立方体の側面や上面、最後には背面に圧力を及ぼす。対象物はこのようにして爆風波の高い圧力に包まれ、そしてこれは時間とともに減衰し、最後には元の状態に戻る。何故ならば、前面の

反射圧は上面や側面の圧力より大きいので、反射圧は持続できず直ちに減衰して、入射過圧と動圧（牽引）との和である“停滞圧”となるからである。

減衰時間は、おむね稀薄波が前面の縁からこの面の中央を通り、更に、背面の縁に達するに要する時間である。

**4.26 立方体の側面と上面に働く圧力は、爆風波面が問題の点に達する時、入射過圧にまで上昇する。**

回折の過程において、前縁で作られた渦による低圧が短時間続き、爆風波面の前縁の背面にそって、又は、その近くを進む（図-4.26）。

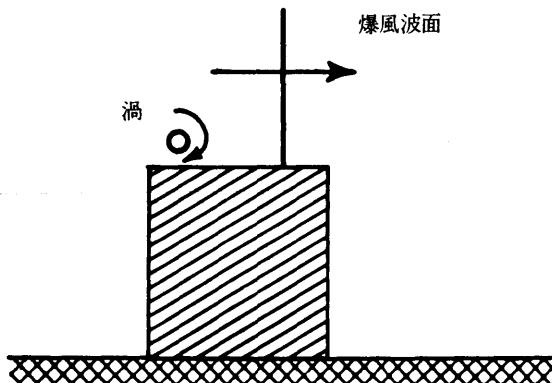


図-4.26 立方体の上面及び側面を移動する爆風波

渦が通り過ぎた後、圧力は時間とともに減衰して、最後には入射波の圧力に戻る。

§ 4.43で見られるように、牽引圧はここでは負の値を取るため空気の流れは側面及び上面の荷重をいくらか減少させる。

**4.27 爆風が立方体の後縁に達すると縁の周りに回折し背面を下降する（図-4.27）。**

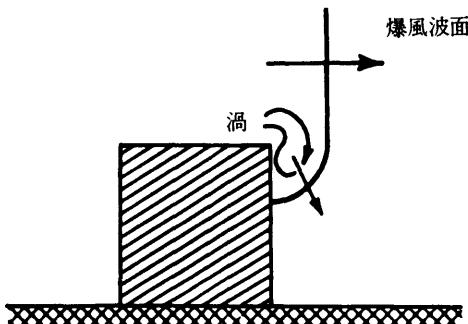


図-4.27 立方体の後面を下方に動く爆風波

圧力が過圧と牽引圧との代数和に等しい多少安定な状態の値を取るまでには、ある時間（立ち上り時間）を要する。この場合も、後者は負の値をとる（§ 4.44）。

有限の立ち上り時間は、爆風波面が一時的な渦作用をともなって、背面の縁を回折することによる弱まり方と背面の縁から中央へ移動する時間により定まる。

**4.28** 立方体の背面の過圧が爆風の過圧の値に達した時、回折過程は終了したものと考えられる。続いて、圧力が爆風の到達する前に示していた周囲の圧力に戻るまで、ほとんど安定した状態が存在するものと考えられる。

**4.29** 立方体の任意な面の全荷重は、それぞれ過圧  $p(t)$  と牽引圧の代数和に等しい。後者は動圧  $q(t)$  に関連し、次式で表れる。

$$\text{牽引圧} = Cd q(t)$$

ここで  $Cd$  は、牽引係数である。 $Cd$  の値は、爆風に対する個々の面の方向で定まり、正又は負の値を取り得る。

このようにして、牽引圧（又は荷重）は、これに応じて正又は負となる。

$p(t)$ 、 $q(t)$  は、それぞれ波面到着からの任意の時間  $t$  における過圧及び動圧を表す（§ 3.57）。

**4.30** 前述の論議は、いろいろな面における荷重について、一般的に述べている。荷重は、ある面の特定な一点に対してはその点と縁との距離にも依存するので、より詳細な取扱いを必要とする。

ここでは、単に、荷重の発達の全体的特性についてのみ記述したことに注意す

る必要がある。実際の場合には、爆風波が減衰し切ってしまうまでに、反射波と稀薄波の繰返しが表面で行われる。しかし、建造物の被害に関する限り、これらの変動は、さほど重要ではない。

## 荷重の発達に対する大きさの影響

**4.31** 各々の面における荷重は、対象物全体としての正味の水平方向の負荷に比べて、さほど重要でない。ゆえに、正味の荷重、すなわち立方体の前面荷重から、後面の荷重を引いたものを検討する必要がある。

回折過程の間においては、前面の圧力は、当初反射圧であり、後面には荷重が到達していないため、正味の水平荷重は大きい。

**4.32** 回折過程が完了した時、前面と後面における過圧荷重は、本来等しい。従って、正味の水平荷重は比較的小さい。

この時期には、正味荷重は動圧によって生ずる前面と後面の荷重の差から成り立っている。

何故ならば、回折過程の完了する時間は、入射爆風の正圧の持続時間よりもむしろ対象物の大きさによるので、単位面積（§ 3.59）に対する回折荷重衝撃は短い対象物より長い対象物に対する方が大きい。

**4.33** 一方、動圧（又は牽引）荷重の大きさは、対象物の形と動圧の持続時間とに影響される。牽引荷重の作用時間（及び単位面積当たりの衝撃）を決めるのは、動圧の持続時間であって、対象物の大きさではない。

**4.34** 従って、短い持続時間の爆風を受けた大きな対象物に対しては、回折過程における水平方向荷重は、動圧荷重より重要であることが結論づけられる。

対象物が小さくなるにつれて、又は、例えば兵器の出力が大きくなるにつれて爆風波の持続時間が長くなるので回折荷重が次第に重要性を増してくる。

分類の目的上、主として被害を及ぼす荷重を示すために、以前に述べたように対象物は、しばしば回折目標あるいは牽引荷重で記される。

実際は、すべての対象物は、爆風荷重のいずれかの一成分によるよりも、過圧荷重と動圧荷重との合成された全荷重によって被害を受ける。

## 荷重の発達にともなう形の影響

**4.35** 爆風波と立方体の相互作用に関する前述の記述は、他の形の建造物に対する荷重に適用するために普遍化できる。

爆風波面における反射係数、すなわち（瞬間的）反射過圧の入射過圧に対する比率は、爆風波が建造物に衝突する角度による。

曲面状の建造物、例えば球体又は円柱（又は球体及び円柱の一部）に対しては反射は前面の各点によって異なる。

反射圧から停滯圧力に減衰する時間は、建造物の大きさと前面における問題の点の位置によって定まる。

**4.36** 牽引係数、すなわち牽引圧の動圧に対する比（§ 4.29）は、建造物の形で変る。

多くの場合、全（又は平均）牽引係数が与えられているので、表面に働く正味の力は決定できる。他の場合では、表面のいろいろな点における圧力を計算するために、局部的な係数が必要である。

背面における平均圧力の形成（又は立ち上り）時間は、建造物の大きさ又は、ある程度までその形に依存する。

**4.37** ある種の建造物は、最初の衝撃によって、吹き飛ばされるもろい部分があり、そのため対象物の形が変わり、荷重もそれにともなって変わる。

普通の建物で窓が吹き飛ぶと、爆風波は中に入り、内部と外部の圧力を等しくしようとする。事実、建造物のある部分をもろくして、建造物大部分の被害を減少させるよう設計することもできる。従って、このような場合には、ある部分の反応は、建造物全体としての爆風荷重に影響を及ぼす。

一般には、構造物要素の運動は、その要素自体に対する爆風荷重に影響することは考えられない。しかしながら、航空機が飛行中に、爆風波の衝撃を受けた場合等には、この法則の例外が起こり得る。

## 爆風荷重—時間曲線

**4.38** 時間の関数として、空中爆風荷重を示す曲線が、それによって引き出され

る手順は、次のとおりである。

与えられた方法は、次の五つの比較的簡単な形状に関してである。つまり、(1)密閉箱型構造、(2)半開箱型構造、(3)オープンフレーム型構造、(4)円筒構造、(5)半円弧構造。これらの方法は、同数の特性を持つ対象に変えることができる。しかし、この方法は、非常に不規則な形状の構造に対しては、爆風荷重の概略の見積もりにしか、適用することはできない。

**4.39** 一般的には、回折型構造の荷重解析は、正の表面過圧が考慮中の表面で零に下がるまで拡張される。動圧はこの時点以後も存在するが、その値は非常に小さいので、牽引力は無視できる。しかし、牽引型構造に関しては、動圧が零になるので解析が続けられる。

負の過圧表面の間は、過圧と動圧の両者とも非常に小さいので、構造には何ら重大な影響を与えない（§3.11以下）。

**4.40** 荷重解析のために知る必要がある爆風波特性と、それらの記号を表-4.40に示す。

一定のエネルギー効率と爆発高の爆発に関して特異な距離において、そのデータは得られているが、第3章にその記載位置も示した。

表-4.40 負荷測定のための爆風波特性

特    性	記  号	出    典
最大過圧	P	図-3.73 a、b 及び c
過圧の時間変動	P(t)	図-3.57
最大動圧	q	〃 3.75
動圧の時間変動	q(t)	〃 3.58
反射された過圧	p <sub>r</sub>	〃 3.78 b
過圧の正の表層存続時間	t <sub>P</sub> <sup>+</sup>	〃 3.76
動圧の正の表層存続時間	t <sub>q</sub> <sup>+</sup>	〃 3.76
爆発前面(ショック)速度	U	〃 3.55

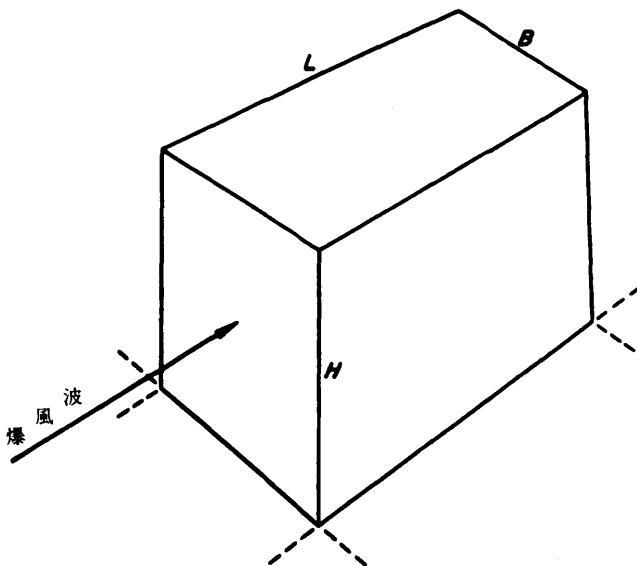


図-4.41 密閉容器型構造の描写

4.41 密閉容器型構造は、図-4.41に示すように、平行六面体によって簡単に表わされ、長さL、高さH及び幅Bである。フレームとほぼ同一の爆風抵抗の平らな屋根及び壁を持つ構造は、この範ちゅうになる。壁は、全く開口部（扉及び窓）を持たないが、全面積の約5%以下の少数の開口部を持つ構造の内部の圧力は、爆風波の到着以前に存在する周囲の値近くに保たれるが、外部は、爆風荷重の作用を受ける。処置を簡素化するために、構造の一方が爆発に面し、爆発波の進行方向に垂直であると仮定する。この側を前面とよぶ。荷重図は、以下(a)前面、(b)側面及び頂点、並びに(c)背面に関して計算する。(a)と(c)のデータを合わせると、正味の水平荷重が(d)に得られる。

#### 4.42 (a)前面における平均荷重

第1段階は、反射圧 $P_r$ を測定することである。これは時刻 $t = 0$ における圧力である。 $t = 0$ の時、爆風波前面が前面に到達する（図-4.42）。次に、時間 $t$ sが計算され、この時間において停滞圧 $P_s$ が到達する。

考えられる最大過圧（50 psi 以下）に関しては、

$$t_s = \frac{3S}{U}$$

によって、より近似されることが実験室的研究から知られている。ここで S は H か  $\frac{H}{2}$  の何れか小さい方に等しく、U は爆風前面（ショック）速度である。

前面に関する牽引係数は、1 であるので、ここでは牽引圧は動圧に等しい。停滯圧は、従って、

$$P_s = p(t_s) + q(t_s)$$

である。ここで  $p(t_s)$  及び  $q(t_s)$  は時間  $t_s$  における過圧及び動圧である。従って平均圧に、時間とともに、減少するので、

$$\text{時間 } t \text{ における圧力} = p(t) + q(t)$$

である。ここに  $t$  は  $t_s$  と  $t_p$  の間の任意の時間である。前面における圧力—時間曲線は、図-4.42のように、測定されている。

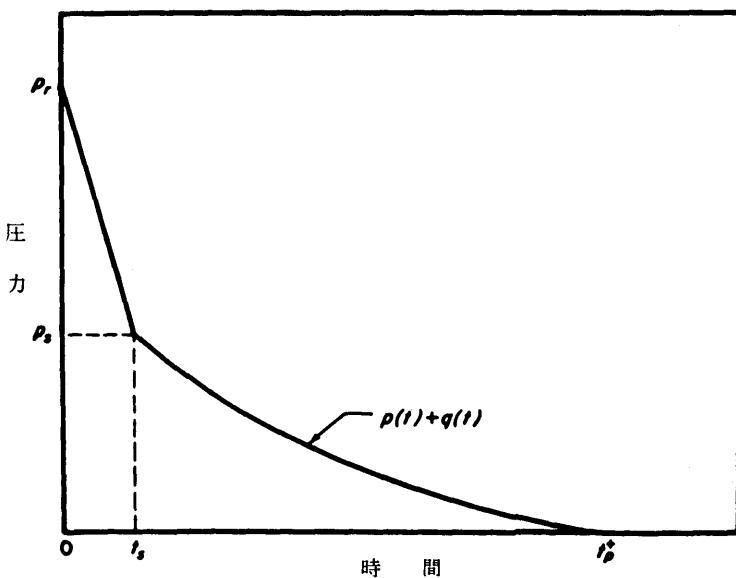


図-4.42 密閉容器型構造の平均前面荷重

**4.43 (b)** 側面及び頂点の平均荷重——荷重は、爆風波が前面に到達する時、すなわち、 $t = 0$  から直ちに始まるが、波が距離 L を移動する時、時間  $t = \frac{L}{U}$  の時ま

では、側面及び頂点は、十分に荷重されない。この時間における平均圧  $P_a$  は、構造の前面から距離  $\frac{L}{2}$  における過圧と牽引荷重の和と考えられる。従って、

$$P_a = p \left( \frac{L}{2U} \right) + C_d q \left( \frac{L}{2U} \right)$$

構造の側面及び頂点における牽引係数は、考察中の爆風圧領域では、約 -0.4 である (§ 4.23)。

荷重は、図-4.43に示すように、 $t = 0$  の零から時間  $\frac{L}{U}$  の  $P_a$  まで増加する。従って、任意時間  $t$  の平均圧は、

$$\text{時間 } t \text{ の圧} = p \left( t - \frac{L}{2U} \right) + C_d q \left( t - \frac{L}{2U} \right)$$

で示される。ここで  $t$  は  $\frac{L}{U}$  と  $t_p + \frac{L}{2U}$  の間にある。過圧及び動圧はそれぞれ時間  $t + \frac{L}{2U}$  における値である。ゆえに、側面及び頂点における過圧は  $t_p + \frac{L}{2U}$  で零になる。

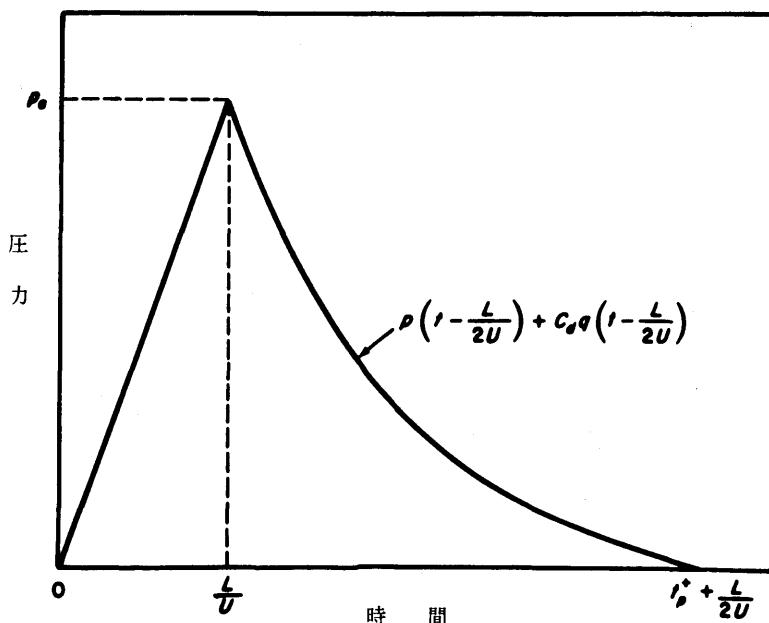


図-4.43 密閉容器型構造の側面及び頂点の平均荷重

4.44 (c) 背面の平均荷重——衝撃前面は、時間  $\frac{L}{U}$  で背面に到達するが平均圧が  $P_b$  の値にまで立ち上がるためには  $4\frac{1}{2}\%$  の時間が更に必要である (図-4.44)。

ここで  $P_b$  は、次式で近似される。

$$P_b = p \left( \frac{t+4S}{U} \right) + C_d q \left( \frac{L+4S}{U} \right)$$

前記のように、 $S$  は  $H$  又は  $\frac{L}{2}$  のどちらか小さい方に等しい。

背面の牽引係数は、仮定の爆風圧領域では約  $-0.3$  である。 $P_d$  到達以後の任意の時間  $t$  の平均圧は、

$$\text{時間 } t \text{ における圧} = p \left( t - \frac{L}{U} \right) + C_d q \left( t - \frac{L}{U} \right)$$

によって表わされ、 $t$  は図-4.44に示すように  $(L+4S)/U$  と  $t_p + L/U$  との間にある。

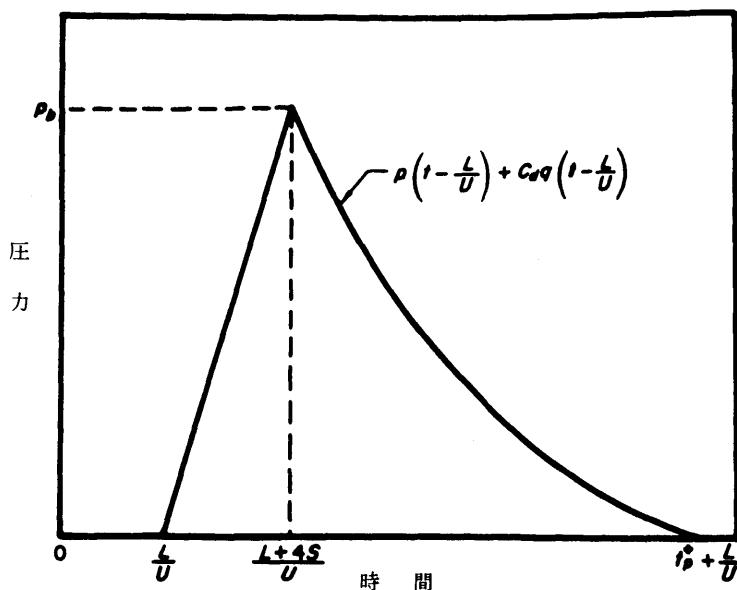


図-4.44 密閉容器型構造の背面平均荷重

4.45 (d) 正味の水平荷重——正味の荷重は、前面荷重と背面荷重の差に等しい。

この引き算は、図-4.45に示すように、グラフ的に行う。

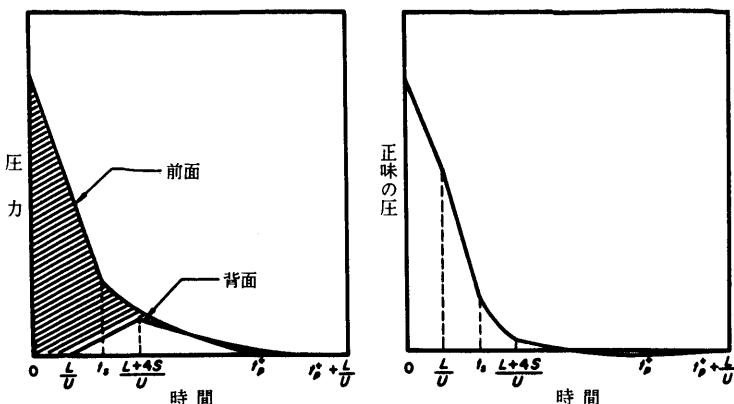


図-4.45 密閉容器型構造の正味の水平荷重

左側の図は、それぞれ、図-4.42及び図-4.44から導かれるように、前面荷重と背面荷重を個々に示す。影をつけた領域で示す差は、右側の図に移され、正味の圧を与える。正味の荷重は、フレームの応答性を決定するために必要であり、他方、壁の動向は、主として個々の面の荷重に依存する。

### 半開箱型構造

**4.46** 半開箱型構造は、前壁及び背壁が約30%の開口部又は窓の面積があり、爆風波の通過を妨害する内部の隔壁を持たないものである。

前の例におけるように、荷重は、(a)前面、(b)側面及び屋根、(c)背面、並びに(d)正味の水平荷重について求める。爆風波が、今度は構造の内部に入ることができるので、荷重——時間曲線は、構造の外部及び内部の両者について考える。

**4.47** (a)前面の平均荷重——外部荷重は、 $S$ を $S'$ で置き換えることを除いては、密閉構造に用いるものと同一の方法で計算される。この $S'$ は(前面全体について)、壁部分の中心から壁の開口辺までの平均距離である。それは、稀薄波が停滞圧まで反射圧を減少させるため、前面上で動かなければならない平均距離を表わす。

**4.48** 爆風波が直接開口部から入るので、前面の内側の圧は、零時間で立ち上がり始めるが、爆風波が過圧の値になるまでに $2\%$ の時間がかかる。従って、任意の時間 $t$ における内部圧は、 $p(t)$ で与えられる。動圧は、構造の内部において無

視できると仮定する。時間による内側と外側の圧の変化を、図-4.48に表わす。

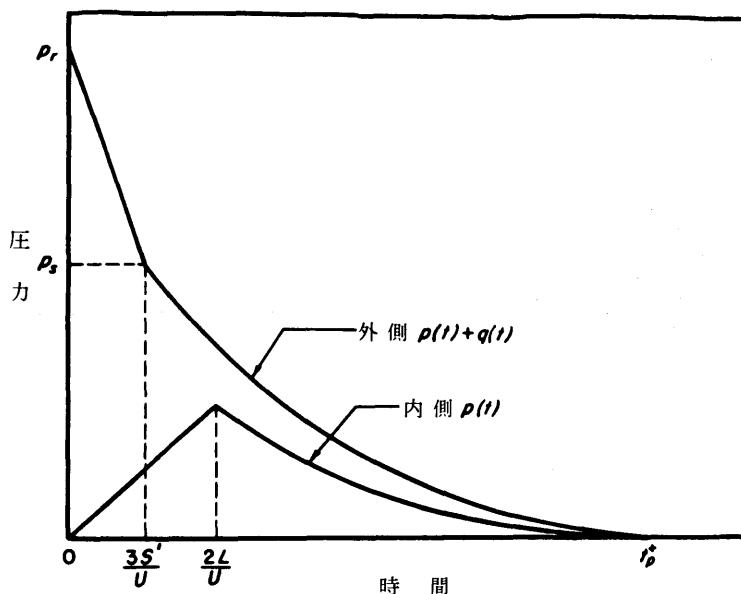


図-4.48 半開箱型構造の前面の平均荷重

**4.49 (b)**側面及び頂点の平均荷重——外側圧は、密閉構造（§ 4.43）の場合と同様に得られるが、内側圧は、前面の場合のように、爆風波中で過圧に到達するまでに $2\frac{1}{2}v$ の時間を必要とする。ここでもまた、内部における動圧は無視され、側壁の開口部は、荷重に対するそれらの効果が確実ではないので、無視される。荷重曲線は、図-4.49に示す。

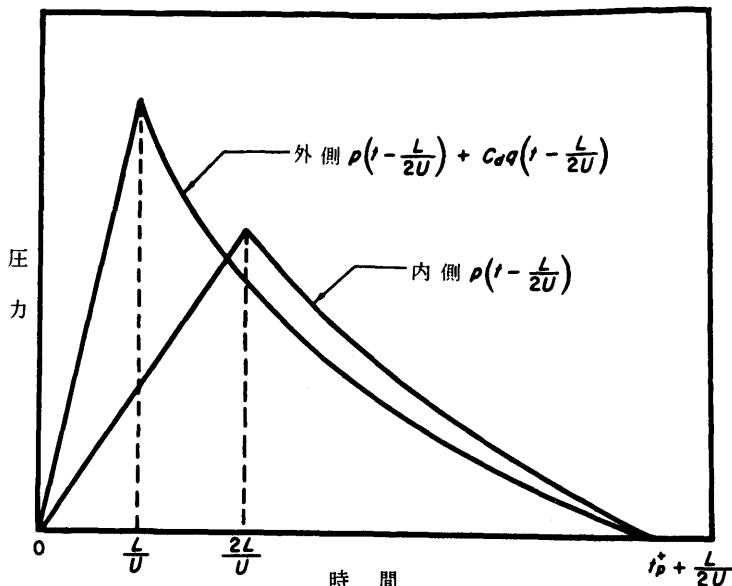


図-4.49 半開箱型構造の側面及び頂点の平均荷重

4.50 (c) 背面の平均荷重——外側の圧は、 $S$ を $S'$ で置き換えることを除いて、密閉構造の場合と同一である。背面の内側から反射された内側圧は、時間 $t_0$ で爆風過圧と同一の値となり、次に、 $p(t - t_0)$ で減少する。前のように、動圧は無視できるものとみなせる。(図-4.50)。

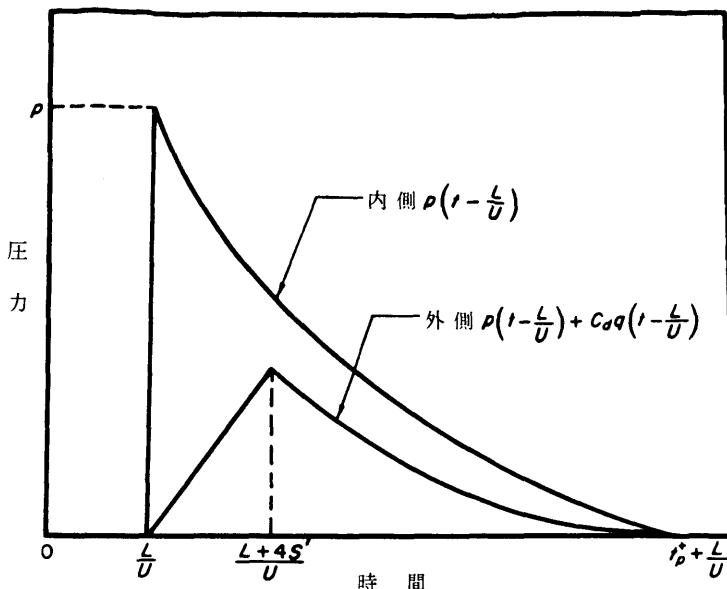


図-4.50 半開箱型構造の背面の平均荷重

4.51 (d) 正味の水平荷重——正味の水平荷重は、正味の前面荷重（すなわち外側と内側の差）と正味の背面荷重との差に等しい。

### 開放フレーム構造

4.52 小さな別々の要素が爆風波にさらされる構造、例えば、トラス橋は開放フレーム構造と見なし得る。

壁面積の大部分がガラスである鉄フレーム事務所やアスベスト・軽鉄鋼又はアルミニウムのパネルでできた工場・建築物は、爆風波の最初の衝突の後に、すばやく開放フレーム構造となる。

4.53 脆弱な壁材料が、破壊の前に、フレームに伝達する荷重の大きさを決定することは、困難である。ガラスに関しては、伝達される荷重は、荷重がガラスを破碎するに十分ならば、無視できると仮定できる。アスベスト、transite、波形鉄板、あるいはアルミニウムのパネルに関しては、フレームへ伝達される荷重の近似値は、0.04 psi の衝撃である。スパンの長さと板の強度によって最大過圧

が約2 psi以下であると板はかならずしも破壊しない。この場合には十分な爆風荷重がフレームに伝達される。

**4.54** 開放フレーム構造の処理についての別の困難な点が、回折過程の間、各々の素材について作用する過圧の算出について生ずる。この過程が、種々の素材について異なる時間で発生し、隣接素材によって、ある素材が遮蔽されることにより影響を及ぼされるので、問題点は簡素化しなければならない。

推奨できる簡素化は、荷重を衝撃として処置することであり、その値は、次のようにして得られる。衝撃として負荷する過圧は、密閉型構造として取り扱われる平均的素材については、決定され、これは素材の数を乗ずる。

生じた衝撃は、衝撃前面が最初に構造に到達する時間において発生するものと考えられる。すなわち、これは、大部分の素材が存在する前面及び背面に関して二つの衝撃に分けられ、図-4.56において、次のように示す。

**4.55** 開放フレーム構造の荷重の大部分は、引張荷重からなる。開口部における個々の素材に開口部における個々の素材に関しては、Iビーム、溝(channels)及びアングル並びに長方形の断面を持つ素材の引張係数は、約1.5である。しかし、フレーム中には、種々の素材が十分な爆風荷重からある程度までお互いに遮蔽するので、全フレームが考えられるとき平均引張係数は、1.0まで減少する。

個々の素材についての力F、すなわち、面積をかけた圧力は、次によって与えられる。

$$F(\text{素材}) = C_d q(t) A_i$$

ここで、 $C_d$ は1.5であり、 $A_i$ は爆風の進行方向に垂直に投影した素材の面積である。しかし、フレームの荷重に関して、力は、

$$F(\text{フレーム}) = C_d q(t) \sum A_i$$

である。ここで、 $C_d$ は1であり、 $\sum A_i$ は、素材すべての投影面積の和である。結果は、次の形で記述される。

$$F(\text{フレーム}) = q(t) A$$

ここで、 $A = \sum A_i$ である。

**4.56** 前面及び背面の壁が、主要な面積を占めるような、長さ L のフレームの荷重（力）と時間の関係は、図-4.56に示すとおりである。記号  $A_{fw}$  及び  $A_{bw}$  は、それぞれ破壊される前の、荷重を伝達する前面と背面の面積を、記号  $I_{fm}$  と  $I_{bm}$  は、それぞれ前面と後面の過圧荷重力積 (overpressure loading impulses) を示す。

抗荷重は、爆風波が前面にぶつかった直後、すなわち、時間  $t = 0$  から始まるが、爆風波が距離 L を走ったとき、すなわち、時間  $t = t_u$  までは、背面は完全には荷重を受けない。このとき、構造物全体にかかる平均抗荷重  $q_a$  は、構造物の前面から  $t_u$  の距離で発生する荷重と考えられるから、

$$q_a = C_d q \left( \frac{L}{2U} \right)$$

で表わされ、フレームにかかる平均の力  $F_a$  (フレーム) は、

$$F_a \text{ (フレーム)} = q \left( \frac{L}{2U} \right) A$$

となる。ただし、このときの  $C_d$  の値は 1.0 である。この時点以降の任意の時間におけるフレームにかかる平均抗力は、

$$F_a \text{ (フレーム)} \text{ (時間 } t \text{)} = q \left( -\frac{L}{2U} \right) A$$

によって与えられる。ただし、 $t$  は図-4.56に示すように、 $t_u$  と  $t_p + t_u$  の間にある場合である。

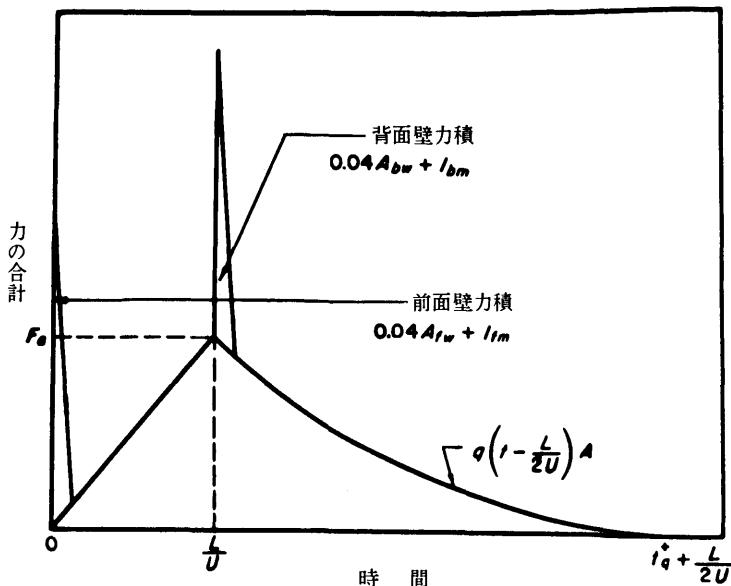


図-4.56 開放フレーム構造の正味の水平可重

### 円柱型構造物

4.57 電柱及び煙突など、長さに比し直徑の小さい円形断面の構造物に対しては、以下の取り扱いを適用することができる。ここに述べられた内容は、爆風の進行方向が、円柱の軸に対し垂直に働く、円柱形構造物の力を受ける区域の平均圧力の決定方法である。円柱上の点に関する圧力と時間の関係を示す曲線の決定法の細部については、4.62及びそれ以降のアーチ型構造物の荷重の項に示すとおりである。円柱型構造物に近づく爆風波の一般的な型は、図-4.57に示すとおりである。

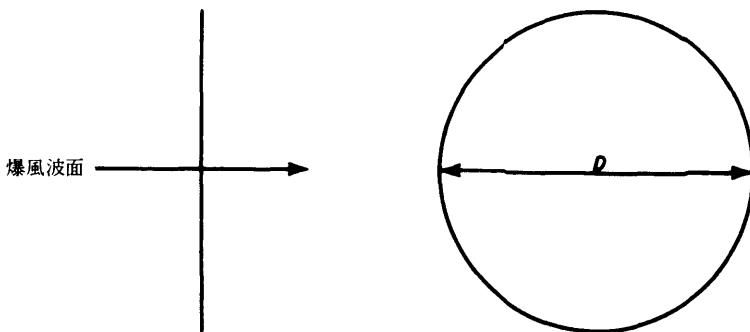


図-4.57 円柱型構造物の示し方

4.58 (a) 前面に対する平均荷重——理想的な爆風波が、構造物の平滑な面にぶつかると、圧力は直ちに反射圧の値まで上昇し、それからすぐに停滞圧まで下降する(4.25)。円柱の曲面の場合には、爆風波と円柱前面との相互作用は、もっと複雑である。しかし、爆風が円柱の半径に等しい距離を進行したときに爆風面が最大になる時点を零とするとき、平均圧力で示される荷重の大きさは、時間の経過とともに増大する一つの力として表われる。円柱の直径を  $D$  とすれば、これは時間  $t_{av}$  において起きる。考察の対象になる爆風圧力の範囲についていいうならば、平均圧力の最大値は、図-4.58に示すように  $2p$  となる。前面に対する荷重は、時間  $t = t_{av}$  の近くまでは、ほぼ直線上に減衰する。その後の平均圧の減少は、図に示すとおりである。この円柱の前面の抗力係数は、0.8である。

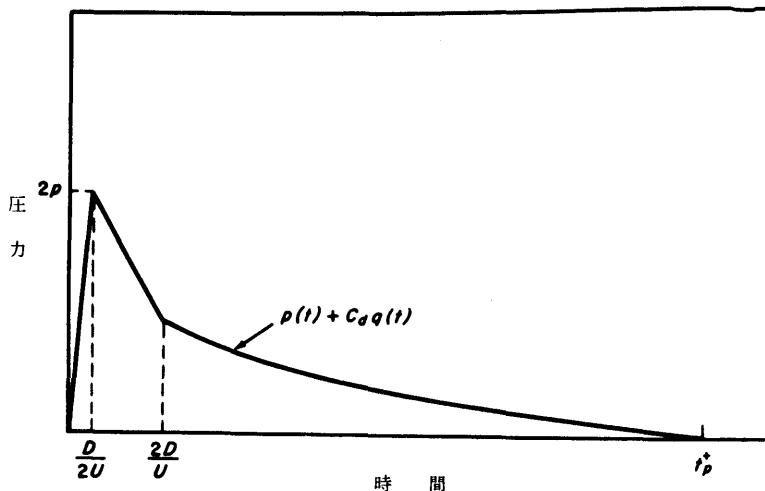


図 4.58 円柱前面における平均圧力の変化

4.59 (b) 側面における平均荷重——側面における荷重は、爆風が前面に当たった後、すぐに始まるが、4.41以下に述べた閉じた箱のように、爆風波が距離Dを進むか、又は、時間  $t = \frac{D}{U}$  以内においては、側面は、完全に荷重がかかった状態にはならない。

このときの側面の平均圧力を  $ps_i$  とすれば、 $ps_i$  は、おおむね次式のとおりである。

$$ps_i = p \left( \frac{D}{U} \right)$$

このあとに発生する複雑な渦により、平均圧力は、時間  $t = \frac{3D}{2U}$  で、最小値の  $ps_2$  に降下する。 $ps_2$  の値は、このときの最大過圧の約  $\frac{1}{2}$  である。

$$ps_2 \approx \frac{1}{2} p \left( \frac{3D}{2U} \right)$$

側面における平均圧力は、時間  $\frac{9D}{2U}$  までは上昇し、その後図-4.59のように減衰する。側面の抵抗係数は、0.9である。

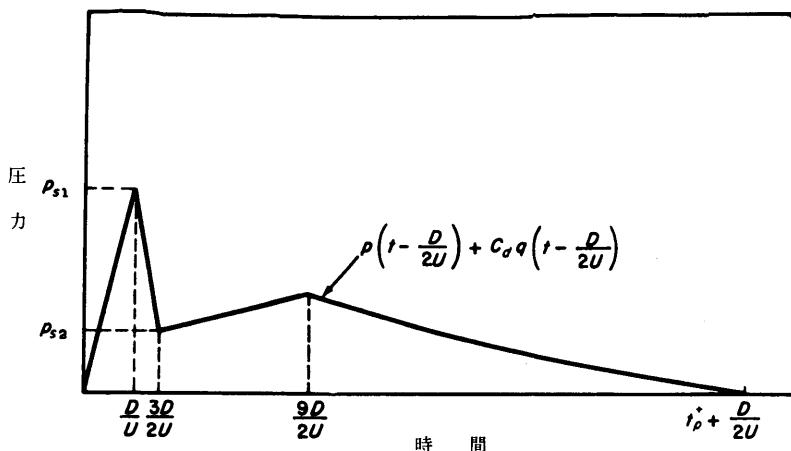


図-4.59 円柱側面における平均圧力の変化

4.60 (c) 背面における平均荷重——爆風波の円柱背面への影響は、時間  $\frac{D}{2U}$  に起り始め、平均圧力は、時間約  $\frac{10D}{U}$  で  $P_{b1}$  (図-4.60) まで、除々に上昇する。  
 $P_{b1}$  の値は、次により与えられる。

$$P_{b1} = \frac{1}{2} p \left( \frac{4D}{U} \right)$$

平均圧力は、引続き増加し、おおむね、 $\frac{20D}{U}$  の時点で、最大値の  $P_{b2}$  に達する。  
 $P_{b2}$  は、次式により与えられる。

$$P_{b2} = p \left( \frac{20D}{U} \right) + C_d q \left( \frac{20D}{U} \right)$$

最大値に達した後の、任意の時間  $t$  における平均圧力は、次式により表わされる。

$$\text{時間 } t \text{ における圧力} = p \left( t - \frac{D}{2U} \right) + C_d q \left( t - \frac{D}{2U} \right)$$

ただし、 $t$  は、 $\frac{20D}{U}$  と  $t_p + \frac{D}{2U}$  の間をとるものとする。背面の抗力係数は、-0.2とする。

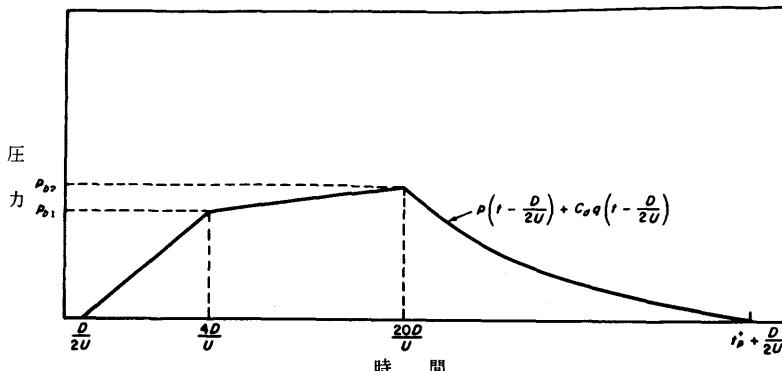


図-4.60 円柱背面における平均圧力の変化

4.61 前項においては、円柱の各面における荷重の平均的な値について検討した。実際の圧力は、点から点へと連続的に変化する。従って、正味の水平荷重を前面荷重から背面荷重を減ずる単純な計算により求めることは、正確にはできない。正味の荷重の大まかな近似値は、閉じた箱状の構造物の項（4.45）に述べたものと、類似の方法によって求めることができる。これよりもよい近似値が必要なら、4.65以降に示す方法によって求めることができる。

### アーチ型構造物

4.62 ハットメント等のアーチ型構造物については、次の取り扱いを適用することができます。この方法は、ドーム型と球型の構造物の大まかな近似を得ることにも用いることができる。以下に述べるのは、爆風の進行方向が、円柱の軸に垂直な半円柱型構造物に対する取り扱いの方法である。円柱型構造物は、両側に同じ荷重を持つ二つの半円柱部からなるから、この成果を円柱型構造物に適用することも可能である。§ 4.57以降は、円柱の面における平均の荷重について述べてあるが、以下は各点における荷重について論じたものである。一般的な示し方は、図-4.62のとおりである。Hは、アーチの高さ（又は円柱半径）、Zは、面上の任意の点を表わしている。水平線（又はその延長線）とZを半円の中心に結ぶ線とのなす角を $\alpha$ で表わす。H（ $1 - \cos\alpha$ ）に等しいXは、アーチの底と任意の点Z間の爆風進行方向の水平距離である。

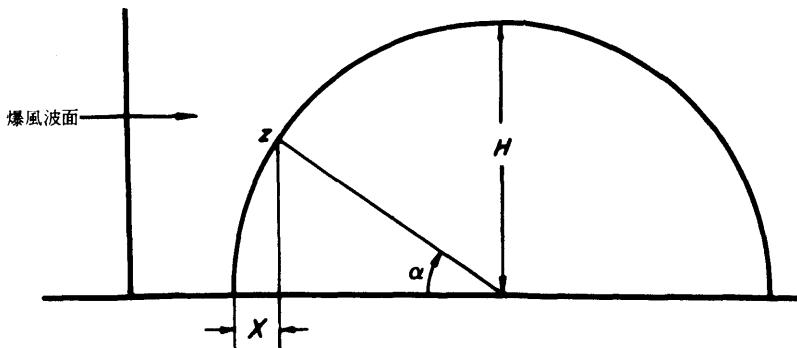


図-4.62 典型的な半円アーチ型構造物の示し方

4.63 理想的な爆風波が曲面に当ると、反射直後に渦の発生が起こり、そのため、停滯圧に到達する前に、一時的なものであるが、鋭い圧力降下が起こる。任意の点Zにおける時間に応ずる一般的な圧力変化の状況は、図-4.63に示すとおりである。爆風波面が時間  $t = 0$  にアーチの基底に当たり、点Zが前面又は背面のいずれの半面上にあっても、Zに到着する時間は、 $\frac{1}{2}v$  である。過圧は、それから鋭く上昇し、時間  $t_1$  後に反射圧力  $p_1$  になる。すなわち、 $t_1$  は立ち上がり時間である。渦の形成によって圧力が  $p_2$  まで降下させられ、次いで停滯圧が  $p_3$  まで上昇する。その後圧力は、 $p(t) + Cdq(t)$  で表わされ、通常のように、 $t$ とともに減衰する。ただし、 $Cd$  はその時の抗力係数である。

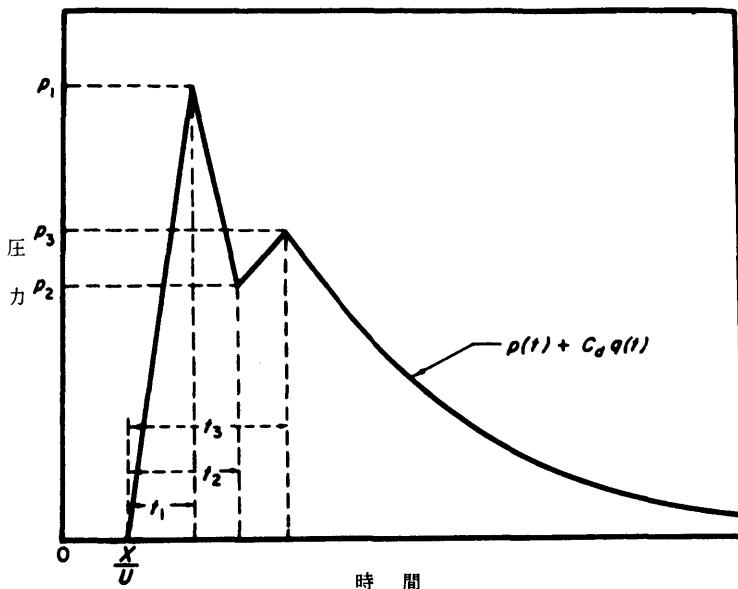


図-4.63 爆風を受けるアーチ型構造物上の任意の点における典型的な圧力変化

4.64 圧力  $p_1$ 、 $p_2$  及び抗力係数  $C_d$  の  $\alpha$  による変化は、図-4.64に示すとおりである。この図で圧力は、平滑面に対する理想反射圧力  $p_r$  に対する比により表わされている。 $\alpha = 0$  の場合、すなわち、アーチ型の底では、 $p_1$  は  $p_r$  に等しいが、 $\alpha$  が大きくなるにつれて、 $p_1$  は  $p_r$  よりも小となる。爆風波が、アーチの底に達した後の立ち上がり時間  $t_1$ 、渦形成時間  $t_2$  及び停滯圧になるまでの時間  $t_3$  を % を時間の単位にとった場合の状態は、図-4.64に示すとおりである。アーチの前半面、すなわち、 $\alpha$  が  $0$  から  $90^\circ$  の間では、立ち上がり時間が零になることがわかる。後半面、すなわち、 $\alpha$  が  $90^\circ$  から  $180^\circ$  の間では、有限値をとり、 $\alpha$  とともに増大する。時間  $t_2$  と  $t_3$  は、角  $\alpha$  に無関係である。

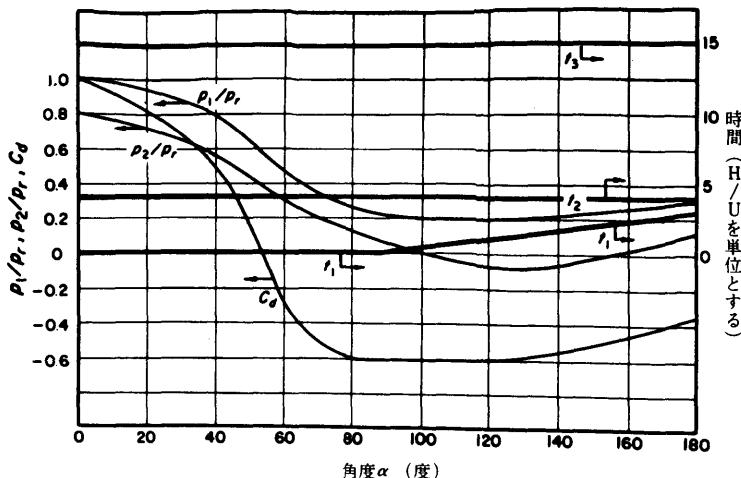


図-4.64 アーチ構造物の圧力比、抗力係数、時間幅の変化

**4.65** 上述の方法は、面上の任意の点Zに垂直な荷重を与えるものであるから、正味の水平方向荷重は、前面の荷重から背面を差し引くという簡単な方法で求めることはできない。正味の水平方向荷重を求めるためには、両面の荷重の水平方向の成分を各々合計してから差し引くことが必要である。水平方向の荷重が重要と見られる場合には、実際には、必要な結果を得るために、近似法が使われる。特定の場合、例えば、特に大きい構造物の場合には、損害を表わす重要な基準は、正味の荷重ではなくて、局部の荷重であることを、指摘することができよう。

**4.66** 正味の荷重を決める近似法においては、回折段階間の過圧荷重は、 $p_r A ({}^2 H/U)$  に等しい、初期力積 (initial impulse) と等価であると見られる。ただし、Aは爆風進行方向に垂直な投影面積である。 ${}^2 H/U$  は、爆風波面が構造物を通過する時間であることに注意しなければならない。単円柱の正味の抗力は、関連する爆風圧力範囲内では、約0.4である (§ 4.23)。従って、初期力積のほか、正味の水平荷重の残りは、図-4.66に示すとおり、单一構造物に適用される  $0.4q(t)A$  という力で表現することができる。

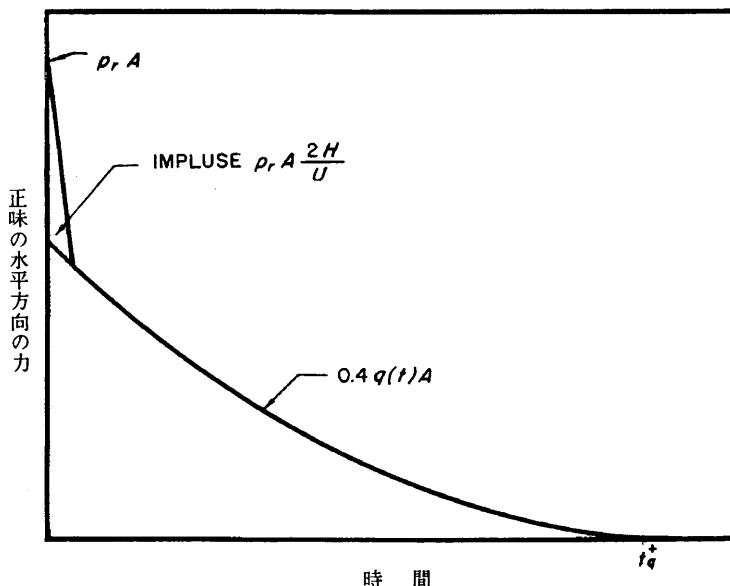


図-4.66 半円柱型構造物の近似的な正味の水平方向の力の荷重

フレームが多くの円形要素からなっているときに使用する方法は、開いたフレーム型 ( $C_d = 0.2$ ) 構造物 (§ 4.55) の方法に類似している。

### 理想的でない爆風荷重

**4.67** 上述までは、ほぼ理想的な地表面 (§ 3.47) から反射される爆風波によって作られる荷重を取り扱った。波の形は、実際には、必ずしも理想的な形をとらない (§ 3.79以降)。特に、先行波が形成されるなら、荷重は、根本的に変わってくる。

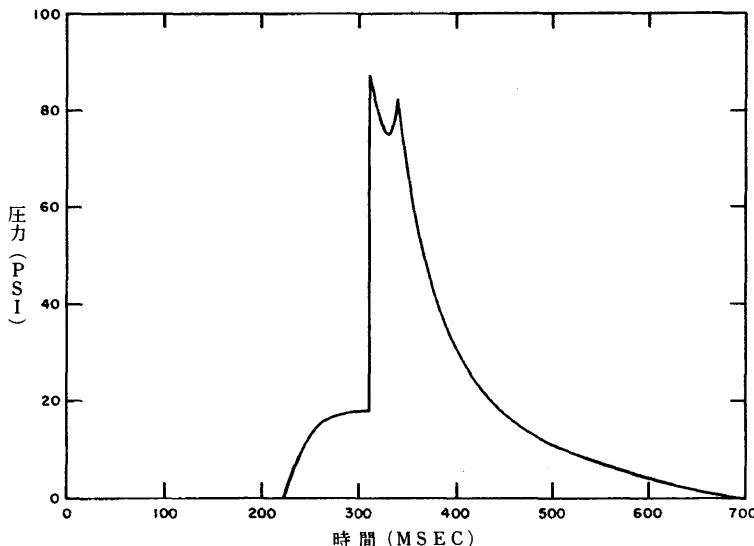
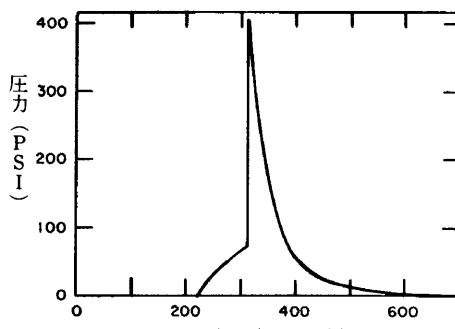


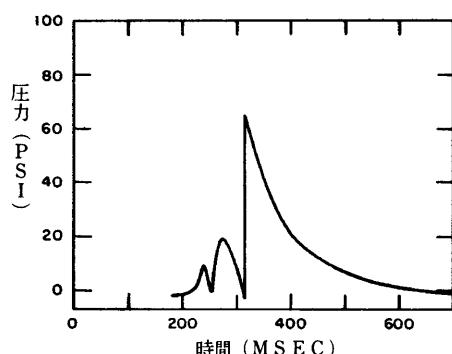
図-4.67 a 理想的でない入射爆風（衝撃）波

理想的でない荷重について細部検討するのは、本書の範囲を超えるものであるが、定性的なある事例を以下に述べよう。

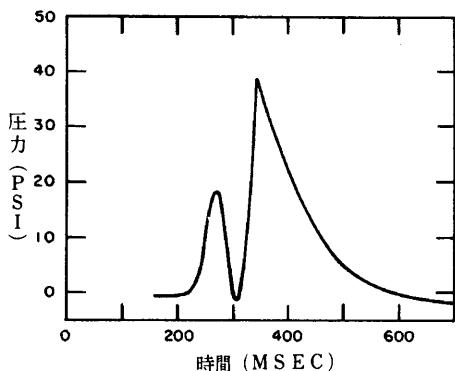
図-4.67 a は、理想的でない入射爆風（衝撃）波であり、図-4.67 b・c・d は、核兵器実験中に観察された長方形のブロックの前面・上面及び背面に対する荷重のパターンである。図-4.67 b・c・d と図-4.42・4.43・4.44 の相互比較は、ある状況下に起こる理想的な荷重からのズレの発生を示している。この構造物に対する正味の荷重は、理想的な条件下にある場合よりも明らかに小さくなっている。ただし、いつも必ずこのとおりになるものとは限らない。



b.



c.



d.

図-4.67 b , c , d 理想的でない爆風波による長方形ブロックの前壁、上壁、背壁における荷重のパターン

## 参 照 文 献

- \*AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, "Design of Structures to Resist Nuclear Weapons Effects," ASCE Manual of Engineering Practice No. 42, 1961.
- \*ARMOUR RESEARCH FOUNDATION, "A Simple Method of Evaluating Blast Effects on Buildings," Armour Research Foundation, Chicago, Illinois, 1954.
- \*BANISTER, J. R., and L. J. VORTMAN, "Effect of a Precursor Shock Wave on Blast Loading of a Structure," Sandia Corporation, Albuquerque, New Mexico, October 1960, WT-1472.
- JACOBSEN, L. S. and R. S. AYRE, "Engineering Vibrations," McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1958.
- KAPLAN, K. and C. WIEHLE, "Air Blast Loading in the High Shock Strength Region," URS Corporation, Burlingame, California, 1965, URS 633-3 (DASA 1460-1), Part II.
- \*MITCHELL, J. H., "Nuclear Explosion Effects on Structures and Protective Construction—A Selected Bibliography," U.S. Atomic Energy Commission, April 1961, TID-3092.
- PICKERING, E. E., and J. L. BOCKHOLT, "Probabilistic Air Blast Failure Criteria for Urban Structures," Stanford Research Institute, Menlo Park, California, November 1971.
- WILLOUGHBY, A. B., et al., "A Study of Loading, Structural Response, and Debris Characteristics of Wall Panels," URS Research Co., Burlingame, California, July 1969.
- WILTON, C., et al., "Final Report Summary, Structural Response and Loading of Wall Panels," URS Research Co., Burlingame, California, July 1971.