

DVD 付録 2

土木構造物に対する作用の指針
(衝撃作用部分の抜粋)

1. まえがき

土木学会では、平成 20 年に「性能設計における土木構造物に対する作用の指針」を発行し、設計における荷重モデルについて、そのランダム性や不確定性のモデル化についての包括的な指針を示した。また、平成 22 年には、土木構造物共通示方書 I、II 編を発行し、第 II 編では各種設計荷重のやや具体的な指針を示した。

本参考資料は、上記指針および示方書に示された衝撃作用に関する情報を、土木構造物共通示方書の体裁を引用しながら再編集、総合化したものである。

2. 照査用衝撃作用設定のための基礎知識

2.1. 衝撃作用の分類

衝撃作用には、物体（飛翔物体、流体）の衝突による作用（衝突作用と呼ぶ）と、爆発による衝撃作用（爆発作用と呼ぶ）がある^{1),2)}。飛翔物体（飛散物、ミサイルなど）もしくは流体の衝突による作用は、衝突物体と被衝突物体との相互作用によって生ずるものであり、被衝突物体である土木構造物にとっての荷重は、この衝突点に生ずる相互作用力のことである。よって、飛翔物体と構造物の特性によって複雑な相互作用力が生ずることになる。一方、爆発による衝撃作用は、空気中を伝播する衝撃波の圧力であり、構造物に反射する際に生ずる圧力上昇があるものの、概して爆発現象にのみ依存する荷重である。

2.2. 衝撃作用の作用因子

衝撃作用をモデル化するにあたって、その負荷の大きさ（程度）を支配する不確定因子、すなわち、次に示す発生頻度依存性の作用因子について、その大きさを決定する必要がある。

- 物体の衝突作用における主な作用因子は、飛翔物体の質量と衝突速度である。
- 流体の衝突作用における主な作用因子は、流体の密度、流速、流体の断面積および流速方向の長さである。
- 爆発作用の主な作用因子は、爆薬量、爆薬の種類および離隔距離である。

2.3. 衝撃作用の頻度認識による分類

衝撃作用は、一般に高頻度に発生することはなく、多くの土木構造物の建設目的では、主たる要求性能に衝撃作用を掲げるものは、それほど多くはない。よって、一般に衝撃作用は設計状況から除外されるか、偶発作用として取り扱われる^{3),4)}。表-I-A-4.1には、設計状況として、衝撃作用が偶発作用として考慮されることのあるものを挙している。一方、表-I-A-4.2に示す要求性能の主な

表-I-A-4.1 偶発作用としての衝撃作用例

構造物	作用（荷重）
海上構造物	船舶の衝突 漂流物の衝突
沿岸構造物	津波衝突 津波漂流物の衝突
跨線構造物 沿線構造物	電車の衝突
立体交差橋梁 河川橋梁	交差車両の付帯設備衝突 土石流衝突、流木衝突 船舶の衝突
一般構造	近隣爆発（ガス、火薬等） 台風時や竜巻による飛来物の衝突 火山の噴火 航空機やミサイルの部品の衝突
重要構造物	人為的行為（爆薬の爆発、航空機衝突など）

表-I-A-4.2 変動作用としての衝撃作用例

構造物	作用（荷重）
ロックシェッド、スノーシェッド、防護柵、防護棚、防護網、防護擁壁、防護土堤	落石の衝突、雪崩の衝突、崩土の衝突
ガードレール	車両衝突
火薬等貯蔵施設	火薬の爆発
土石流用砂防えん堤	土石流流体圧 土石流中巨礫衝突

対象作用に衝撃作用を考慮する構造物においては、作用の大きさと発生頻度に相関関係があると考えることが妥当であり、その場合には変動作用として取り扱う。

3. 照査用衝撃作用の因子設定のための基本方針

3.1. 偶発作用の作用因子設定

前述のように、多くの土木構造物において衝撃作用は、偶発作用として取り扱うことが多い。その場合の、作用因子の設定は、シナリオ分析に従うことが望ましい。ここでいうシナリオ分析とは、たとえば、航路近くに存在する海上構造物に対する船舶の衝突作用について、航行船舶のうち最大級の船舶が航路中の最大航行速度で衝突するシナリオを立てたり、高速鉄道を跨ぐ橋梁に対して、その高速鉄道の最大速度で衝突するシナリオを立てたりすることである。

3.2. 変動作用の作用因子設定

衝撃作用を変動作用として取り扱う場合には、蓋然性ある不確定確率モデルを用いて、設計に用いる作用因子を設定することが望ましい。衝撃作用による災害は、発生頻度が低く、その確率分布を設定することは容易ではないが、変動作用としての処理をするものとするれば、不確定モデリングなどを適用できる。

たとえば、砂防えん堤設計における土石流の衝突巨礫の大きさを決定する場合には、上流部の巨礫調査に基づき 95%非超過確率値を用いている例もある。また、ロックシェッドの設計でも、斜面やのり面における落石の可能性の調査や過去の履歴などに基づき、確率値を使用する設計技術が存在する。また、調査による統計分析を補う方法として、数値シミュレーションによる確率分布の推定に基づく利用も増えてきた^{1,2,5,6)}。また、土石流の設計流速は 100 年再現確率値を用いており、衝撃流体圧における確率値を用いる事例として参考になる。

爆発作用には、今のところ変動作用としての取り扱い例は見あたらないが、爆発が発生した場合の影響の大きさを考えれば、貯蔵量の頻度分析を行うなどの方法を用いることにより、シナリオ分析により変動作用としての取り扱いが可能になるものと思われる。

3.3. 衝撃作用の設計値

変動作用モデルとして因子を取り扱う場合には、対応する限界状態に対する許容破壊確率もしくは目標信頼性指標に応じて、上記の作用特性値に荷重係数を乗じて、設計値とする⁷⁾。

シナリオ分析による場合でも、照査方法の信頼性に応じて、荷重係数を乗じて補正した設計値を用いることもある。

4. 照査用解析モデルと衝撃作用

衝撃作用を受ける構造物の要求性能は、構造物の特性に応じて各限界状態について設定されるのが一般的であると考えられる。これに対する性能照査は設計作用（荷重モデル）に対する構造解析を行い、限界状態に対して非破壊状態となることを確認することである。この際、照査のための構造解析は、次のように大分類でき、その特性に応じて衝撃作用を適切かつ具体的にモデル化する必要がある。

4.1. 衝撃作用を含む動的構造解析による照査

近年、数値解析手法の発達により、爆発作用、流体の衝突作用、もしくは物体の衝突作用と構造物（緩衝材を含む）との動的応答解析が可能になってきた。このような数値解析手法によって、要求性能に対する照査を行う場合には、特定の荷重モデルを設けずに、直接衝撃作用を入力条件とすることによって、照査が可能である。

4.2. 衝撃作用の時刻歴荷重モデルを用いた動的構造解析による照査

この荷重モデルは、一般に衝撃荷重モデルと呼ばれるものである。爆発作用では、構造物に作用する空間的な圧力分布とその時刻歴変化をモデル化したものであり、流体の衝突作用も同様である。物体の衝突作用では、飛翔体と構造物の衝突点局部接触面に発生する接触力、もしくは接触応力をモデル化したものである。ちなみに、物体の衝突作用を受ける構造物では、緩衝材を用いる場合が少なくないが、その場合には緩衝材を介して構造物に伝達される力、もしくは応力分布をモデル化する。この荷重モデルは、空間的な荷重分布のモデルと、その大きさに関する時刻歴の荷重モデルの複合モデルとして与えられる。

4.3. 準静的な荷重モデルを用いた静的構造解析による照査

本来は動的現象である構造の挙動を静的な解析によって簡略化した照査を行うものである。衝突作用、特に物体の衝突においては、本来は飛翔体と構造物との衝突局部における接触によって生じる構造物に対する衝撃作用を、単純な静的解析によって求めることはできない。よって、荷重の空間分布モデルには、前項で述べた構造物のみの動的解析による照査に用いる時刻歴型荷重モデルのある瞬間を切り取ったものを用いることが多い。その際には、荷重の大きさに適切な補正を施す必要がある。なお、「適切な」とは、照査すべき限界状態に対する解析値が、着目する重要な動的応答値と等価な値が得られるように調整することに相当する。

一般に、静的構造解析では、動的構造解析における低次振動モードに相当する変形応答が得られるため、物体の衝突作用のように、局所に集中して瞬時に動的な荷重が作用すると生起する局部破壊や局部変形をもたらす支障（限界状態）を表現することはできない。よって、静的構造解析による照査を行う場合にはこの点に十分留意する必要がある。

4.4. その他の解析法による照査

衝撃現象は、非常に複雑であるため高度な動的解析方法によっても、実現象を必ずしもよくシミュレーションできない場合もある。そのため上述の方法によらない照査方法も存在する。たとえば、物体の衝突作用について、飛翔体の有する運動エネルギーと構造物に入力されるエネルギーの問題としてとらえて、構造物の限界状態までに吸収可能なエネルギー容量と比較することによって照査する方法もある。

このエネルギー照査法における荷重モデルは、飛翔体の運動エネルギーというスカラー量になるため、一般に照査手順は単純である。そのため、この荷重モデルを利用する場合には、構造物の限界状態の設定と実現象との整合性、また、精緻な動的解析結果との整合性を持たせるための検討などを十分に行う必要がある⁸⁾。

5. 衝撃作用の各種荷重モデル

ここでは、一般に知られている代表的な衝撃作用の荷重モデルとその考え方について紹介する。

5.1. 爆発荷重

爆発荷重は、基本的に分布荷重であり、単位面積あたりの荷重は、爆源から荷重作用点までの距離と爆薬量によって決定される。その詳細は、付紙 I-A-4.1 に示す。

5.2. 細長い弾性体の衝突荷重モデル

物体の衝突作用を、単純モデル化する際に、相互作用の複雑さを回避するために、被衝突体（構造物）の応答を固定された剛体と仮定する場合の相互力を、荷重モデルとする考え方の基本形である。衝突間の飛翔体の応答を弾性応答と仮定して求められる衝突面の荷重をそのまま荷重モデルとする。その詳細は、付紙 I-A-4.2 に示す。

構造物の質量が飛翔体に比して大きく、かつ剛性が高く、また、飛翔体が衝突前後においてその形状を留めるような現象に応用できる。

5.3. 柔らかい飛翔体の衝突荷重モデル

航空機が建造物に衝突する場合などでは、衝突物は被衝突物に比べ非常に柔らかいため、衝突面で粉々に飛散破壊しながら、あたかも建造物に吸い込まれるように破壊する。このように、構造物の剛性もしくは強度が飛翔体に比して、圧倒的に大きく、かつ飛翔体が衝突によって原形をとどめないほど柔らかく変形する場合には、飛翔体の変形による荷重と衝突面での破壊飛散によって生ずる見かけ上の消散運動量を考慮した荷重モデル化を行う。その詳細は、付紙 I-A-4.3 に示す。

5.4. 事前実験による衝突荷重モデル

前述の柔らかい飛翔体の衝突のように、構造物の応答が飛翔体の挙動に比して、破壊や変形が少なく、構造物の動的応答速度が飛翔体に比して小さい場合には、構造物を十分に剛性の大きな壁面などに置き換えて、その衝突面の反対面に荷重計を設置し、そこに飛翔体を衝突させる実験（Meppen test と呼ばれる）を前もって行う。この事前実験により得られた荷重－時間関係をモデル化して設計荷重モデルとして用いる。

5.5. 接触理論を基礎とする衝突荷重モデル

堅いものが柔らかいものに衝突する際には、衝突点でへこみ変形が生じる。この接触点では2物体の動的な接触問題となり、その接触力が構造物にとっての衝突荷重であると考えられる。このような観点から、まず接触力の式を導き、実荷重との整合性を定数調整して荷重モデルとする考え方がある。付紙 I-A-4.4 に、広く知られている落石便覧式を示す。これは、落石を剛体の球、緩衝材を表面が平坦な半無限の弾性体（半径無限大の弾性球）との動的接触時の最大値である。ただし、実際には、緩衝材も落石も弾性体ではないことや、この荷重モデルは、時刻歴モデルではないことなどの点から、動的解析には適さない。

5.6. 緩衝材・緩衝構造を介する荷重モデル

剛な飛翔体による衝突作用を和らげるために、緩衝材を用いることがある。緩衝材は、衝突荷重の作用

領域を拡げて、局所的な破壊を防いだり、作用時間を伸ばして最大荷重を緩和したりするなどの効果を発揮する。緩衝材を介した構造物への衝撃荷重は、緩衝材の材料特性および形状特性に支配される。一般に、4.4で述べた事前実験を行い、そのモデル化を行う。付紙 I-A-4.5には、ロックシェッドの設計に用いられる敷き砂緩衝材の荷重モデルの一例を示す。また、防護すべき構造物が大規模で衝突物が水平方向に衝突する場合などには、砂などの安価な緩衝材が使用できないため、鋼材などの延性材料の部材や構造を前面に設置して、緩衝構造とする場合がある。一例として、鋼管を緩衝部材として用いる場合の荷重モデルを付紙 I-A-4.6に示す。

5.7. エネルギー入力モデル

構造物の最大変位などによって、限界状態を照査する場合にエネルギーの保存則から簡易に最大変位を推定する方法を用いることがある。付紙 I-A-4.7にそのモデルの考え方と入力エネルギーの算定法を示す。大規模な衝撃に対する損傷や被害予測は重要な課題であるため、合理的なエネルギー入力モデルについて、今後さらに研究が必要であろう。

4.8 流体圧モデル

流体による衝撃荷重は、純粋に衝撃波理論に相当する水撃圧モデルと波などが衝突した場合の波力に相当する荷重モデルがある。付紙 I-A-4.8に流体圧の衝撃荷重モデルを示す。

6. 実験と衝撃荷重モデル

上述した個々の衝撃作用に対して、合理的で信頼性のある衝撃荷重モデルを設定するには、実規模の実験を行うことが望ましい。しかし、実規模実験はコスト上の制約から、そもそも不確定やばらつきのある荷重因子を再現して、何度も実験を行うことは難しく、典型的な荷重条件の数例に絞られることが多い。よって、この「典型的」もしくは「代表的」とする条件の導出においては慎重な検討が必要である。

一方、コスト上の制約から、縮小モデル実験を行うことが多い。その場合の相似則には、レプリカ則もしくはフルード則が適用されるが、いずれの相似則もゆがみがあるため、計測された荷重をそのまま相似則に基づき、実物の荷重もしくは荷重モデルとすることには難がある。

遠心載荷装置内での実験は、相似則がほぼ完全に成立するという利点があるが、一般に模型が小さくなる。このため、たとえば砂の緩衝材粒子に相当する縮小材料を作製出来ないなどの問題も生ずる。

このように、衝撃実験では荷重のモデル化に多くの留意点がある⁹⁾。

【参考文献】

- 1) 構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会：性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法，構造工学技術シリーズ No.52，土木学会，2007.10.
- 2) 土木構造物荷重指針連合小委員会：性能設計における土木構造物に対する作用の指針 構造工学シリーズ 18，土木学会，2008.3.
- 3) International organization for standardization: *ISO2394*, General principles on reliability for structures, 1997.10.
- 4) T. Vrouwenvelder : *Eurocode 1, Part 1.7, Accidental Actions*, ICOSAR, pp.3311-3317, 2005.
- 5) 梶谷浩，梶川康男，黒川敏広：荷重係数設計法の落石覆工への適用について，構造工学論文集，土木学会，Vol.41A，

pp. 1299-1308, 1995. 3.

- 6) Masuya, H., Amanuma, K., Nishikawa, Y., and Tsuji, T.: Basic rockfall simulation with consideration of vegetation and application to protection measure, *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1835- 1843, 2009.
- 7) 星谷勝, 石井清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
- 8) 原木大輔, 香月智, 田代元司: 円柱形要素を用いた個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 2, pp. 536-553, 2009. 6.
- 9) 江守一郎, 齋藤孝三, 岡本孝三: 模型実験の理論と応用, 技報堂, 2000. 3.

付紙 I-A-4.1 爆発荷重

構造物に作用する爆発荷重の主たる作用因子は、一般に爆薬の質量、爆薬の種類および対策を講じる構造物と爆発位置との距離である。以下に、設計に用いられている爆発荷重の設定法について記述する。

1.1 火薬の種類¹⁾

火薬類取締法では分類として火薬、爆薬、および火工品の3つに分類されている。

火薬 (low explosive, powder) は推進的爆発の用途に使用され、爆燃を生じ、音速以下の速度で伝播する急速燃焼をする。火薬には、黒色火薬、無煙火薬、コンポジット推進薬、コンクリート破砕薬などがあり、銃砲の推進薬やロケット推進薬として使用される。

爆薬は (high explosive) 発破など、破壊的用途に使用するもので爆轟 (detonation) を生じ、超音速で爆薬内を衝撃波が伝播し、破壊力は極めて大きい。

爆薬には起爆の難易によって一次爆薬 (起爆薬) と二次爆薬に分類される。一次爆薬は少量のエネルギーで点火されて爆轟する非常に敏感な爆薬である。二次爆薬は雷管によって爆轟するなど、かなりのエネルギーを集中的に与えると爆轟状態になる。一次爆薬には DDNP、あじ化鉛などがあり、二次爆薬にはニトログリセリン、TNT、RDX などがある。なお、硝酸アンモニウムや過塩素酸アンモニウムなどは鈍感な爆薬であり、雷管では爆轟せず、二次爆薬によって起爆するので三次爆薬ともいう。

火工品は火薬または爆薬を利用して、爆発反応の生起、伝達等の目的に適合するものをいい、工業雷管、電気雷管、砲爆弾、導火線、伝爆線、コンクリート破砕器、煙火等がある。

ここでは、爆発荷重について述べるため主として二次爆薬や三次爆薬の爆轟について記すことにする。

1.2 爆発現象

爆薬が点火されると、爆薬は起爆され爆轟を起こす。この爆轟は非常に早く安定した化学反応であり、爆薬の未反応部分へと超音速の爆轟速度で伝播して行く。爆轟速度は高性能爆薬の場合 8000m/s オーダーになる。爆轟波は爆薬を急速に非常に高压で高密度で高温のガスに変化させる。ガスの圧力は 100kbar から 300kbar で温度は非常に高温で 3000°C~4000°Cにも達する。爆轟の前面が爆薬の表面に達するとガスの急速な膨張が生じ、周囲の空気に強力な衝撃波を伝達し、この衝撃波は超音波速度で外側に伝わる。衝撃波面のすぐ後ろの圧力、温度、および密度は非常に高く、爆轟によって生じたガスと空気の強い外側への流れが発生する。このガスは空中での強い爆発波の元になる。爆発的に形成されたガスは拡大して行き、爆発波は爆源から移動して行く。

ガスの拡大が続くと爆風の前面は強く圧縮された空気の壁とともに伝播する。爆風波面の速度、最大圧力、温度は距離が増加するに従い急速に減少する。最終的にはガスの膨張続き、これらは冷やされ、圧力は大気圧より僅かに小さい値となり、その後、元の大気圧に戻る。爆発波は爆薬から外側に向かって移動するとき、爆発前面の後方の空気の質量の流れが風を発生させる。これによる圧力は動圧といい、衝撃波後方で風速と空気の密度の関数となる。衝撃波頭面の圧力は静圧(過圧)という。

図-1 は爆発後の爆風の形が時間毎の変化する様相を模式的に示したものである。負圧が生じるのは爆源から少しはなれたところからである。

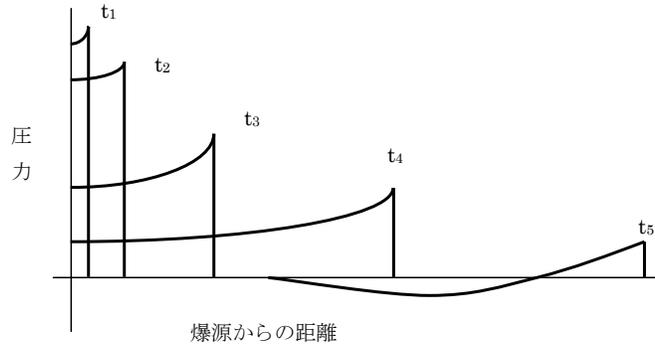


図-1 衝撃波の形成

表-1 空中爆発の静圧と動圧

p_s (kPa)	q_s (kPa)
200	10
350	290
500	518
650	778

1.3 爆発波のパラメータ^{2),3)}

爆発波前面のパラメータは、1840年にランキンとユゴニオによって、理想気体の標準的の衝撃波について述べられたのが最初である。これは多くの参考文献に取り上げられている。理想気体の場合、爆発波前面の速度 U_s 、爆発波前面の後ろの密度 ρ_s および最大動圧 q_s の関係は次式となる。

$$U_s = \sqrt{\frac{6p_s + 7p_0}{7p_0}} \cdot a_0 \quad (1)$$

$$\rho_s = \frac{6p_s + 7p_0}{p_s + 7p_0} \cdot \rho_0 \quad (2)$$

$$q_s = \frac{5p_s^2}{2(p_s + 7p_0)} \quad (3)$$

ここで、 p_s は静圧(過圧)の最大値、 p_0 は爆発波前面の周囲の空気圧(大気圧)、 ρ_0 はそこでの密度、 a_0 はそこでの音速である。式(1.3)から、 p_0 を 101kPa とすると空中爆発での静圧と動圧との関係が表 1 のように得られる。

表から静圧 500kPa までは動圧は静圧(過圧) p_s より小さくなっている。約 500kPa 以上の静圧(過圧)は動圧

より大きくなる.

1.4. スケール法則^{2),3)}

爆発波の換算法則はホプキンソンとクランツによって独自に公式化された法則である. これは一般に 1/3 乗法則として述べられている. すなわち, 同じ形状で同じ爆薬が異なる大きさの 2 つの爆薬が同一の大気中で爆発したとき, 同じ換算距離位置において同一の爆発波が生じる.

そこで, もし, 2 つの爆薬の質量が W_1, W_2 直径が d_1, d_2 とすると同じ爆薬ならば, 以下のことは明らかである.

$$\begin{aligned} W_1 &\propto d_1^3 \\ W_2 &\propto d_2^3 \\ \therefore \frac{W_1}{W_2} &= \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3 \\ \therefore \frac{d_1}{d_2} &= \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{1/3} \end{aligned} \quad (4)$$

したがって, 2 つの爆薬の直径の比を $d_1/d_2 = \lambda$ とすると図 3 に示すように, もし同じ過圧 p_s が 2 つの爆薬から生じるならば, その過圧が生じる距離の比は λ であり, 正圧の持続時間および力積の比も同様に λ である.

与えられた過圧が生じる距離は式(4)によって計算できる. 例えば

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{1/3} \quad (5)$$

ここで, R_1 は与えられた過圧が爆薬 W_1 によって生じる距離であり, R_2 は爆薬 W_2 によって同じ過圧が生じる距離である. 換算距離とは $Z (= R/W^{1/3})$ で表すことができる.

これらの原理は図-2 に示したとおりである.

この換算距離を用いることによって爆発波の広範な範囲でのデータを求めることができる.

ブロードは静圧(過圧)が 10bar 以上の爆源に近い所とそれ以遠の静圧が 0.1 から 10bar の中距離における場合とに分けて以下に示す関係を導いた.

$$\begin{aligned} p_s &= \frac{6.7}{Z^3} + 1 \text{ bar} \quad (p_s > 10\text{bar}) \\ p_s &= \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \text{ bar} \quad (0.1 < p_s < 10 \text{ bar}) \end{aligned} \quad (6)$$

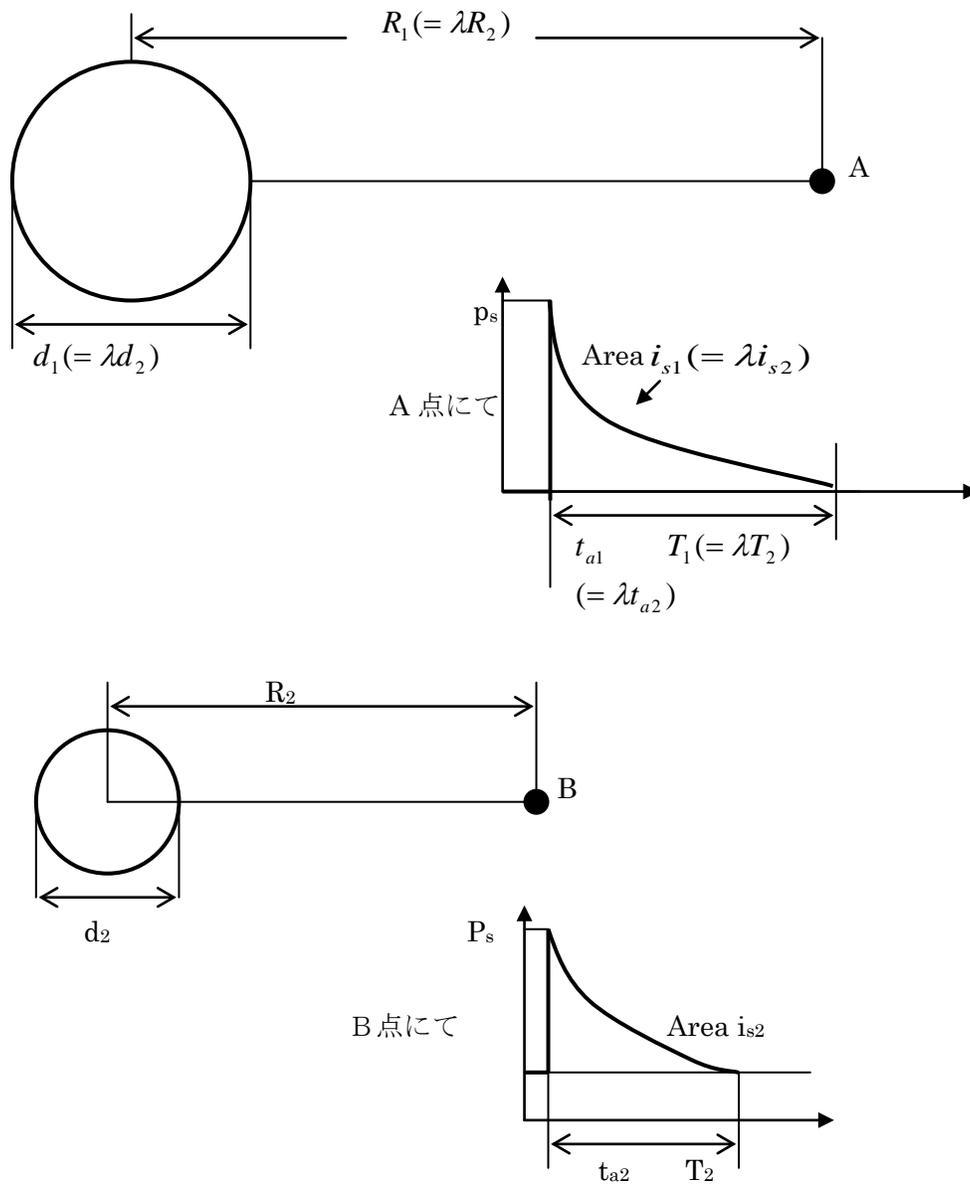


図-2 ホプキンソン・克蘭ツの換算距離の原理

ここで、 Z は換算距離であり、次式で与えられる。

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (7)$$

ここで、 R は爆薬の中心からの距離 (m)、 W (kg) は爆薬の質量で TNT によって換算する。単位は kg である。 Z を構成するためには通常基準爆薬として TNT 爆薬を用いる。TNT と異なる爆源からの爆発波の定量化は TNT と等価な質量に変換させて行う。最も単純な方法は、TNT の比エネルギー (specific energy) の基づいた

表-2 TNT 等価換算係数 (その1) 2)

爆薬	単位質量当りのエネルギー Q_x (kJ/kg)	TNT 等価(Q_x/Q_{TNT})
Amatol80/20(80%ammonium nitrate 20%TNT)	2650	0.586
Compound B(60%RDX, 40%TNT)	5190	1.148
RDX(Cyclonite)	5360	1.185
HMX	5680	1.256
Lead azide	1540	0.340
Mercury fulminate	1790	0.395
Nitroglycerin(liquid)	6700	1.481
PETN	5800	1.282
Pentorite50/50(50%PETN 50%TNT)	5110	1.129
Tetryl	4520	1.000
TNT	4520	1.000
Torpex(42%RDX , 40%TNT , 18%Amuminium)	7540	1.667
Blasting gelatin(91%nitroglycerin , 7.9%nitrocellulose, 0.9%antacid, 0.25water 60%Nitroglycerin dynamite	4520	1.000
	2710	0.666

表-3 TNT 等価換算係数 (TM5-855) 2)

爆薬	等価圧力係数	等価力積係数
Composition B(60%RDX, 40%TNT)	1.11	0.98
PETN	1.27	Not available
Pentolite	1.40	1.07
Tetryl	1.07	Not available
TNT	1.00	1.00

変換係数を爆薬の質量を乗じて行う。各種爆薬の変換係数はベイカー等によって提唱され、表-2 に示されている。RDX100kg は TNT118.5kg に変換する。比エネルギー(Specific energy)比は $5360/4520(=1.185)$ である。この換算距離を用いることによって爆発波の広範な範囲でのデータを求めることができる。

他の方法として、2つの変換係数を用いる。発生した最大過圧あるいは力積が実際の爆薬と TNT が一致するかどうかによって選択する。表-3 は TM5-855-1 から採用したものでこれらの変換係数の例である。

代表的な空中爆発の圧力時間関係を示すと-4 のようになる。

爆発波は、当初瞬間的に圧力が大気圧から上昇し、入射圧(静圧) p_s に達する。入射波は爆発波の進行方向と平行な表面上の圧力である。この波は、爆発点から放射状に伝播していき、その伝播速度は U_s で空気の音速より大きく、距離とともに圧力、速度ともに急激に減少する。ガス分子が構成している波面は、粒子速度 u_s で移動する。爆源からどの点でも圧力の時間関係は図-3 で示したようになる。衝撃波面は波面到達時間 t_a で到達し、最大値に達して正圧持続時間 T_a で大気圧になるまで減少する。

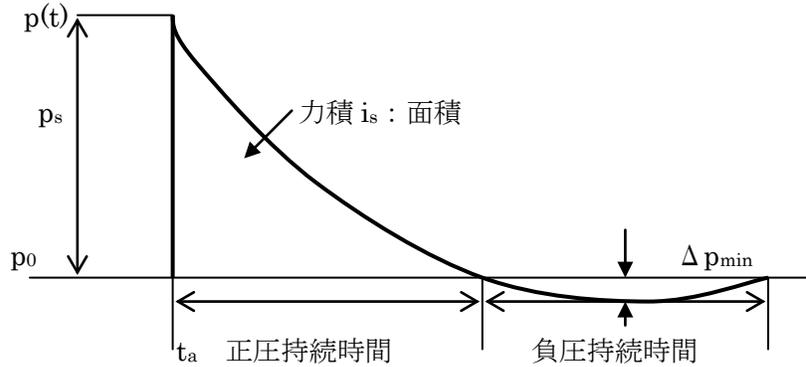


図-3 標準的な爆発波の圧力時間関係

この正圧持続時間と圧力に囲まれた面積を力積という。これは次式で示される。

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a+T_s} p(t) dt \quad (8)$$

図に示す Δp_{\min} は負圧の最大値であり、爆発波の希薄波成分でブロードは以下のように示されると提唱している。

$$\Delta p_{\min} = -\frac{0.35}{z} (z > 1.6) \quad (9)$$

負圧の持続時間は以下のように与えられる。

$$T^- = 1.25W^{1/3} \quad (10)$$

それに負圧における力積は以下のように与えられる。

$$i^- \approx i_s \left[1 - \frac{1}{2Z} \right] \quad (11)$$

球状 TNT の空中爆発に対する最大圧力、力積、速度、その他のパラメータと換算距離 Z との関係は多くの文献で与えられており、図-4 および図-5 に示す。図中 p_s : 入射波過圧、 t_a : 到達時間、 T_s : 制圧持続時間、 i_s : 入射波の力積である。その他のパラメータとして、動圧 q_s 、爆発波面速度 U_s 、これは $\bar{u} (= U_s / a_0)$ で表され、ここで a_0 は音速である。また、粒子速度 u_s も同様に $\bar{u} (= u_s / a_0)$ として与える。さらに、次式に示す爆発波の形状を示す値 b も図によって与えられる。これらの値を用いることによって、爆発波の形状が求められる。

$$p(t) = p_s \left(1 - \frac{t}{T_s} \right) \exp \left(-\frac{bt}{T_s} \right) \quad (12)$$

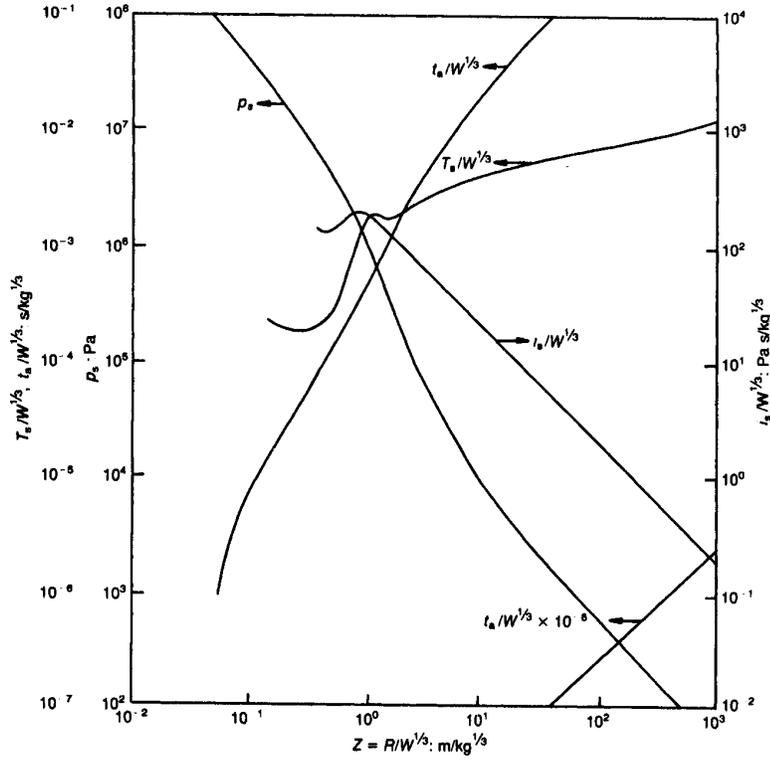


図-4 球状 TNT の空中爆発による入射波パラメータ 2)

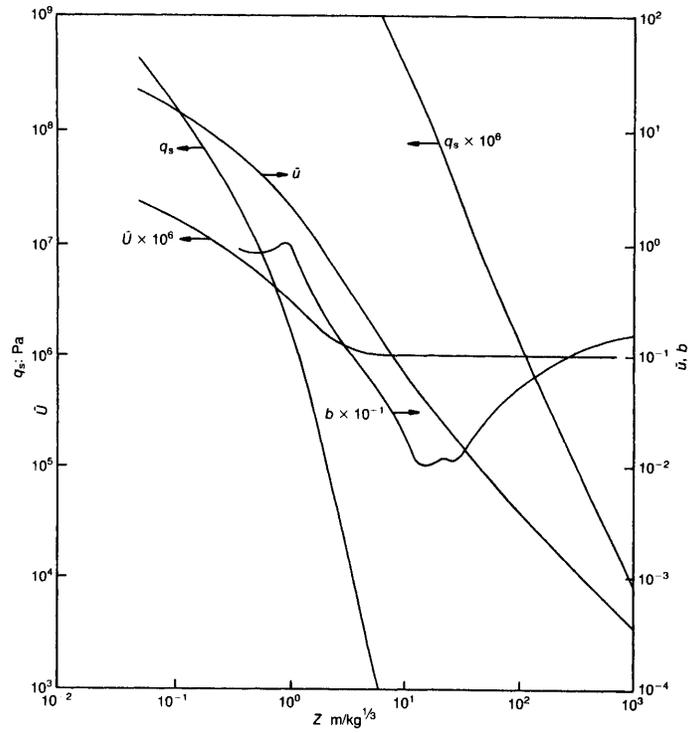


図-5 球状 TNT の空中爆発による他のパラメータ 2)

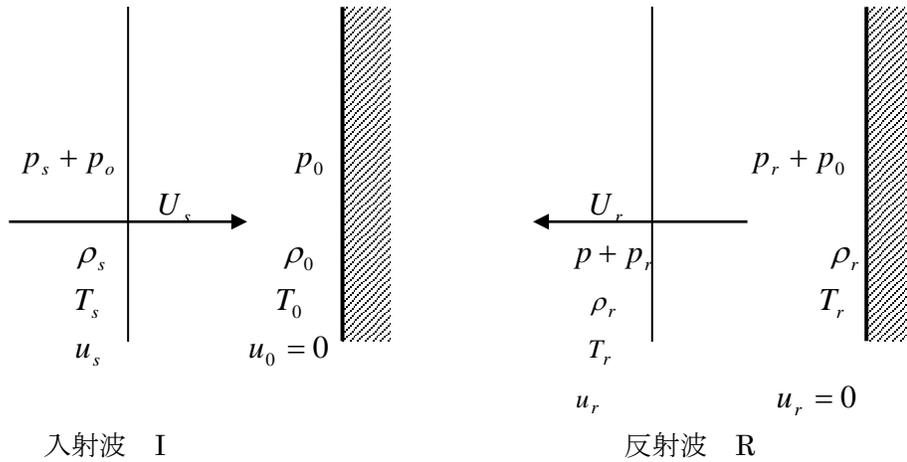


図-7 表面反射

5. 爆発波の相互作用²⁾

入射波が構造物の周りを取り囲むと波の進行方向と平行でなくなることになる。このとき入射波はより強化されいわゆる反射波となる。反射波とは構造物等に入射波が衝突することによって進行方向とは逆に方向転換する波であり、反射波は常に爆源から同一距離での入射波より大きくなる。

図7は壁面に作用する反射波の様相を示した。

ランキン-ウゴニオはこの反射波に関する式を誘導した。これは空気を理想気体として比熱比 ($C_p / C_v = \gamma$) から

反射圧 p_r を最大入射圧と動圧とを用いて表した。

入射角ゼロのとき、反射波の最大値 p_r は字式で与えられる。

$$p_r = 2p_s + (\gamma + 1)q_s \quad (13)$$

ここで、動圧 q_s は

$$q_s = \frac{1}{2} \rho_s u_s^2 \quad (14)$$

ここで、 ρ_s は空気の密度、 u_s は波頭面後部の粒子速度であり、これは以下のようになる。

$$u_s = \frac{a_0 p_s}{\rho_0} \left[1 + \left[\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right] \frac{p_s}{p_0} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (15)$$

ここで、 a_0 は大気圧での音速である。式(13)を式(14)、(12)に代入して整理すると次式をうる。

$$p_r = 2p_s \left[\frac{7p_0 + 4p_s}{7p_0 + p_s} \right] \quad (16)$$

ここでは空気の比熱比 $\gamma = 1.4$ としている。

この式を見ると反射波に最大値と最小値が求められる。入射波の過圧 p_s が大気圧よりかなり小さい場合(例えば小さい爆薬で距離が遠い場合)には反射波は、次式となる。

$$p_r = 2p_s \quad (17)$$

p_s が大気圧より非常に大きい場合(例えば非常に大きい爆薬で距離が近い場合)には式(16)は次式となる。

$$p_r = 8p_s \quad (18)$$

もし、反射波と入射波の比を反射係数として C_r と定義するならば、ランキン-ユゴニオの関係は C_r が 2 から 8 の間にある。しかしながら、非常に近いところのガスの分離の影響によって、 C_r が 20 まで観測されている。図-7 は反射波の過圧と力積について、通常の反射波のパラメータと換算距離 Z の関係をプロットしたものである。ここで p_r は反射波の最大値、 i_r は反射波の力積である。考えられる Z の最小値は球体の TNT の表面に一致した場合であり、もし TNT が 1600kg/m^3 の密度であるなら、 Z の最小値は 0.053 である。

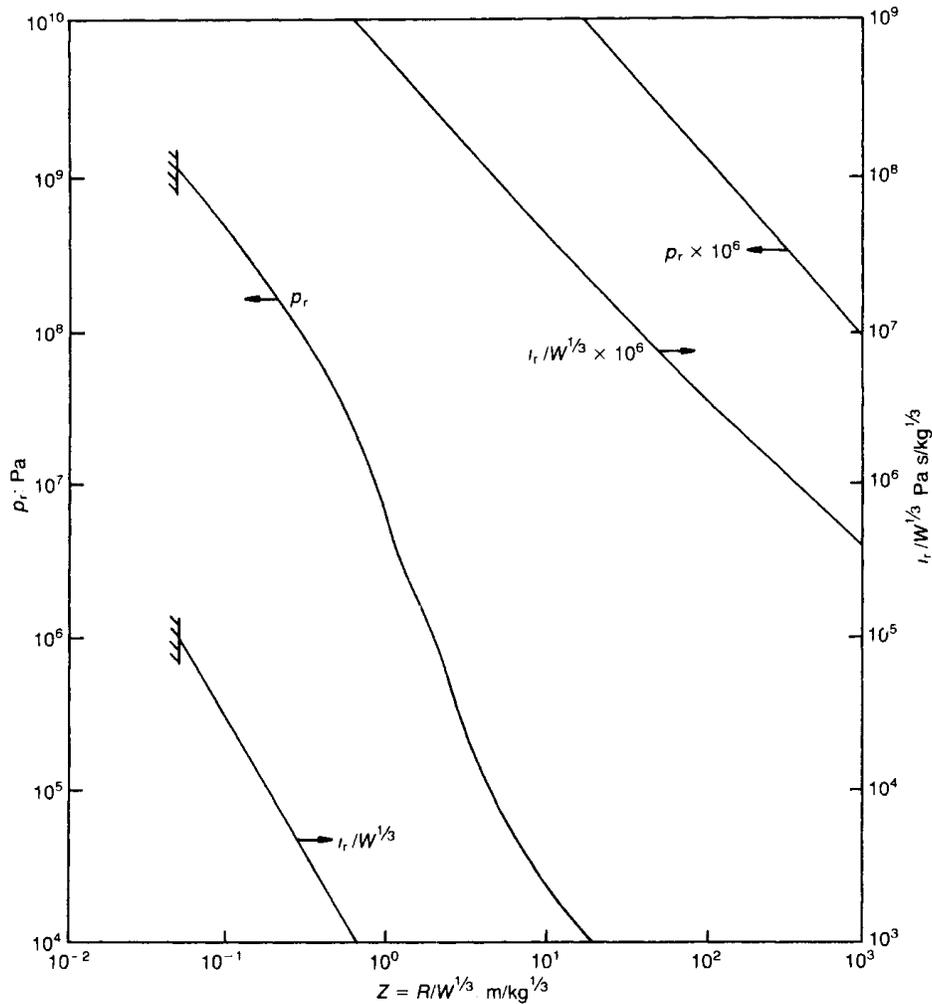


図-7 球状 TNT の反射波と換算距離の関係²⁾

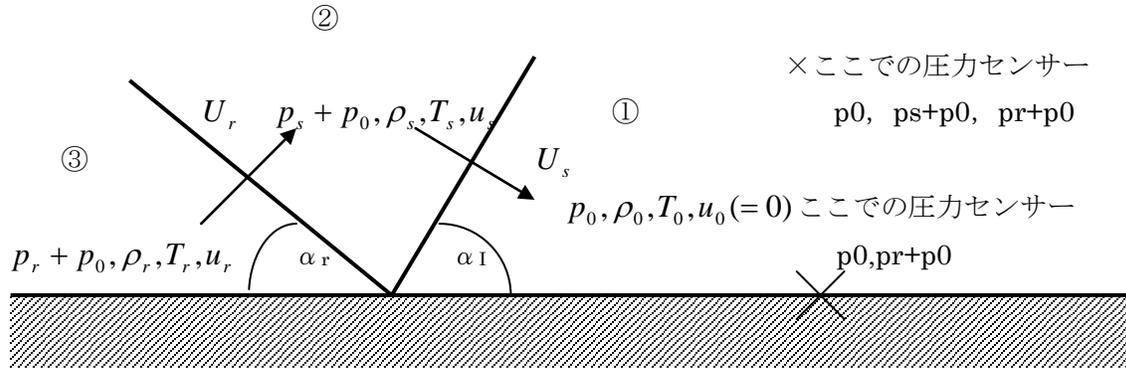


図-8 正規反射

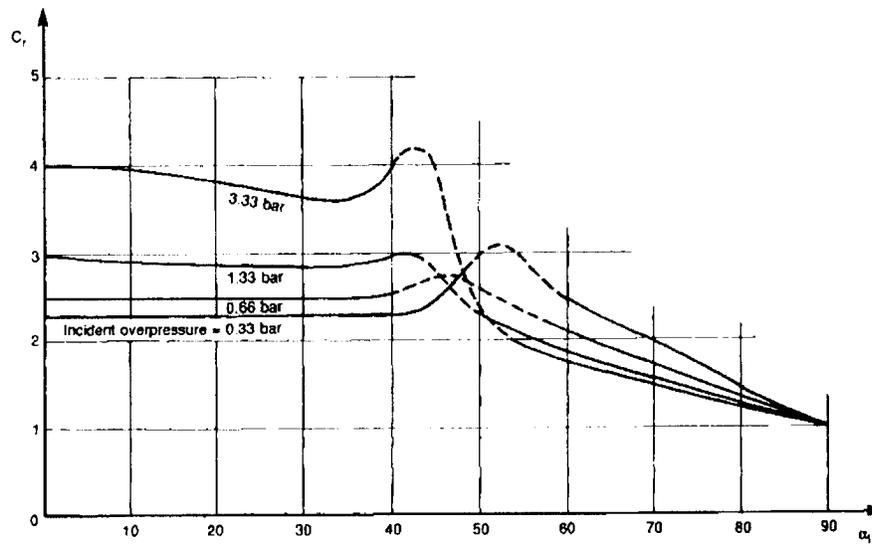


図-9 入射波の値に対する反射係数と入射角(低過圧範囲)

6. 正規およびマッハ反射

構造物の表面に爆発波が直角に当たったときは入射角 α_I がゼロである。 α_I が 90 度の場合反射は生じず、目標表面には最大過圧 p_s が作用し、これはしばしば入射圧(サイドオン圧力)と呼ばれるものである。 α_I が 0 から 90 度の間にある場合は、斜め反射であり、正規反射とマッハ反射が起きる。正規反射とマッハ反射は入射角と入射波の大きさによって発生する。

まず、図-8 に示すような正規反射について述べる。正規反射の場合、①領域に示した入射波は α_I の角度を維持したまま伝播していく。入射波の後方の②領域は入射波のパラメータを有している。③領域は入射波が反射している反射波領域であり、反射角 α_R で反射し、パラメータは反射波の性質で伝播する。反射波は入射波の大きさによっては正規反射が生じない角度がある。この値以上であると正規反射は起きず後述のマッハ反射が生じる。すなわち、垂直反射 ($\alpha_I=0$) で生じた反射波より大きい反射波 p_r になる α_I がある。空気の場合この角度は約 40 度である。さらに、反射波の角度 α_R は α_I とともに増加する。図-9 は入射波に対する反射係数と入射角の関係を示しており、40 度付近で反射係数が大きくなっていることがわかる。

図-10 は反射係数と入射角の関係を示している。ランキン-ユゴニオの最大反射係数 8 は非常に高い圧力

ではこれを超えている。図で40度付近で垂直になっている部分は後述のマッハ反射を示す。

図-11に示すように、マッハ反射は α_1 が入射波の大きさに依存する閾値を超えたときに生じる。マッハ反射波過程が複雑であり、しばしば'spurt-type'噴出型効果とも言われており、ここでは入射波が小さい入射角の場合のようにリバウンドするのではなく、反射表面を掬い取るようになる。この結果、反射された波は入射波に追いつき融合し、マッハ軸と呼ばれる第3の波頭面を反射表面上部に形成する。3つの波が合体する点をトリプルポイント(3重点)という。これらの過程は図-11に示している。

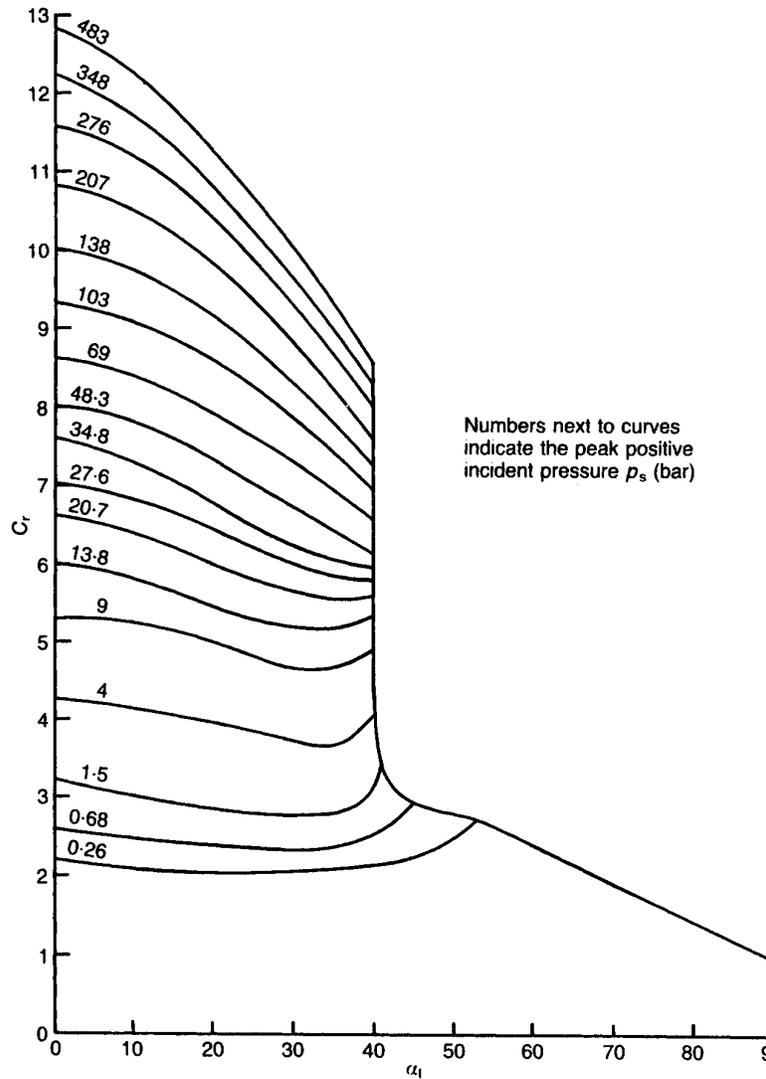


図-10 各入射波における入射角と反射係数の関係

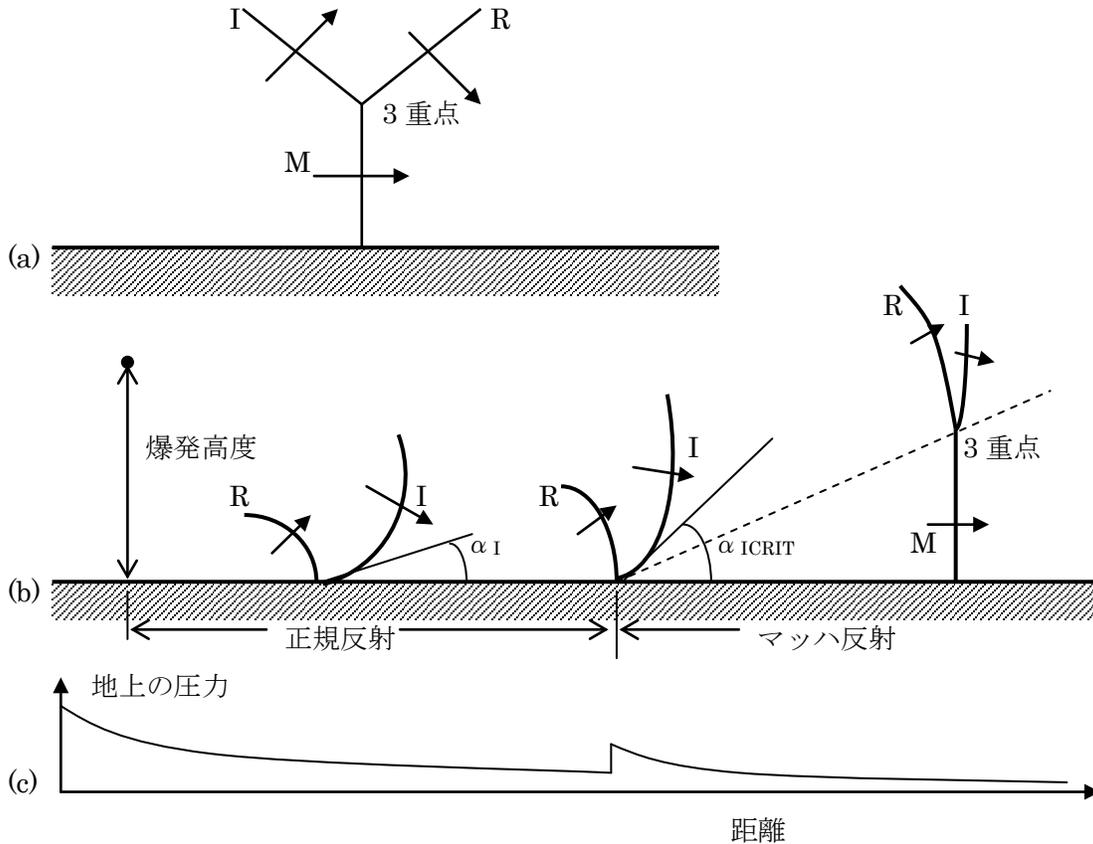


図-11 (a)マッハ軸 3 重点の形成, (b)爆発高度に対するマッハ軸と 3 重点の形成,(c)距離による地上の圧力

図-11(a)に示す状況は 3 つの波頭面を示しており, 図-11(b)はマッハ軸が距離に応じてどのように生じるかを示している. また, 図-11(c) は爆発高さにおける爆轟によって生じる圧力の変化についても示している. マッハ軸の発端では圧力がステップ上の増加する.

7. 構造物に作用する爆風圧⁴⁾

構造物に作用する爆風圧は次の 3 つの力にわけることができる.

- 入射圧に起因する力
- 動圧に伴う力
- 境界面に入射したために生じる反射波

これらの力は爆発波に対する構造物の位置, 構造物の大きさ, 形状に依存するので非常に複雑になる. そこで, 単純化するため, 構造物の形状は長方形とし, 構造物に作用する爆発波はマッハ反射の領域にあるものと仮定する.

爆風は図-12 に示すように左から右へ移動する.

建物のそれぞれの位置における爆風は図-12 に示すように極めて複雑な作用をするが, 図-13 に示すように単純化して算定する.

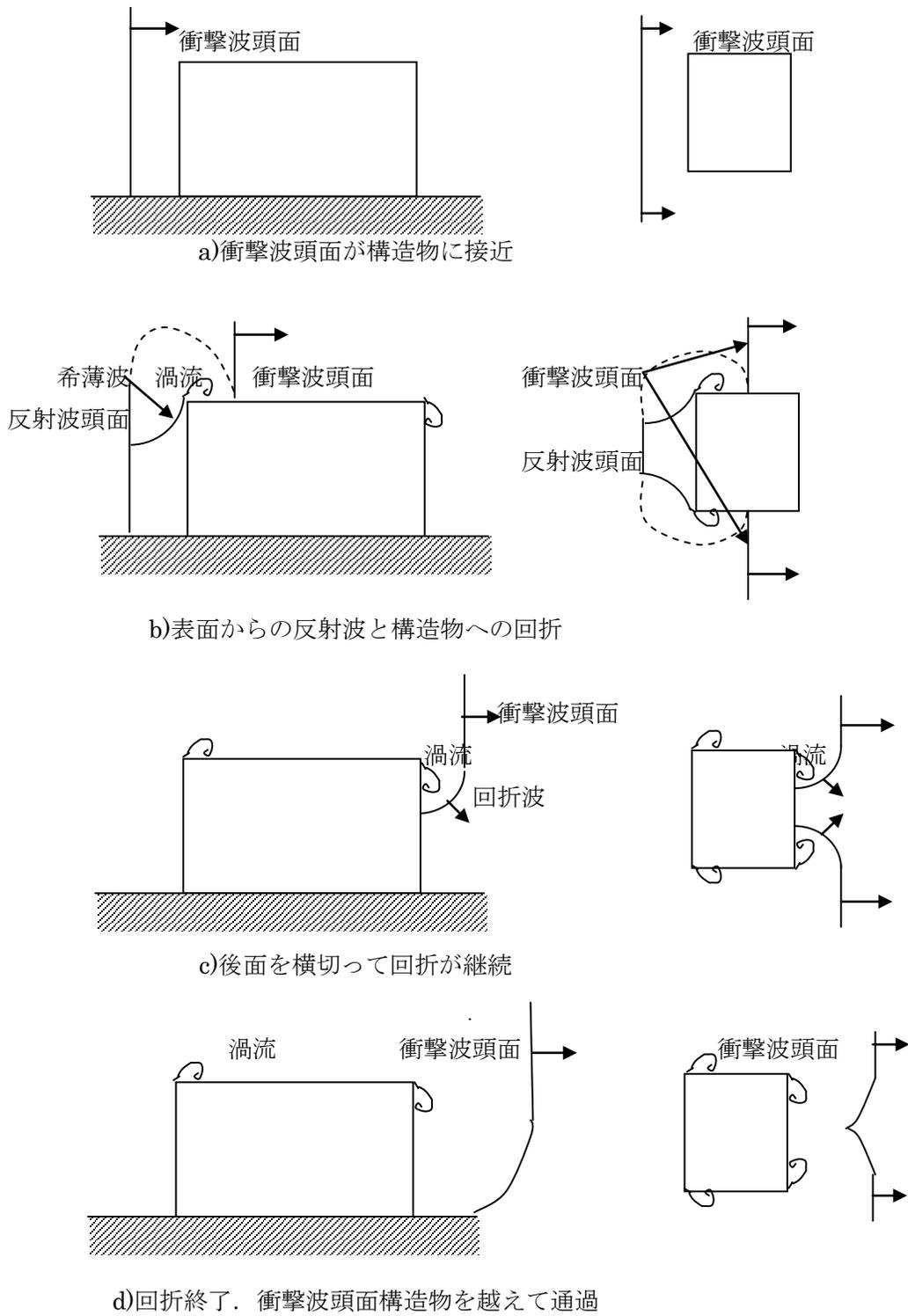


図-12 爆風と長方形建物との相互作用⁴⁾ (出典: TNO Green Book)

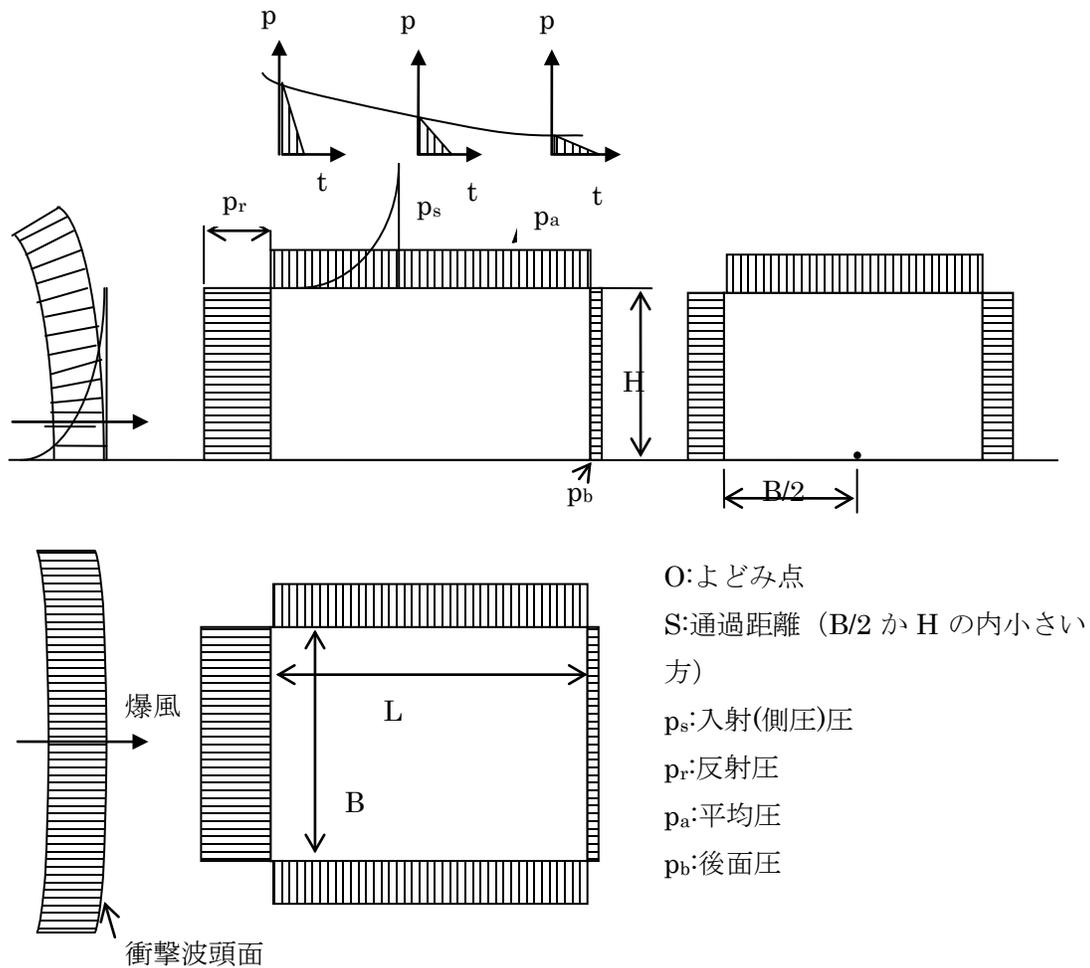


図-13 長方形建物の爆風圧に一般的な配置

○ 前面の壁

前面の壁は、反射波を受けることになる。反射波の過圧は入射角と圧力上昇時間に依存するが、設計目的では入射角 0、上昇時間を 0 として考える。

前面の壁に作用する圧力は図 15 のように理想化する。

反射波の過圧の大きさ p_r は爆薬量と距離から換算距離を求めて図 8 を用いれば得られる。

反射波はよどみ圧 p_{st} になるまで通過時間 t_c かかって減衰する。

p_{st}, t_c は次式によって求める。

$$p_{st} = p_s + C_d q_s \text{-----(19)}$$

$$t_c = 3S / U_s \text{-----(20)}$$

反射波がよどみ圧まで減衰する時間 t_c は入射波の正圧持続時間以下になる。

また、図 15 において、バイリニアで与えられる圧力時間関係を三角形状に示すため、点線で示した等価圧力荷重は最大圧力は反射波の最大値として、力積が同じとすると、次式になる。

$$I_w = 0.5(p_r - p_{st})t_c + 0.5p_{st}T_s \text{-----(21)}$$

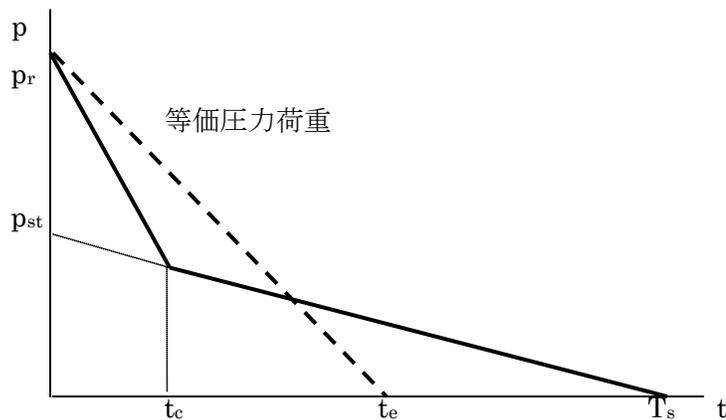


図-14 理想化した前面の爆発荷重

したがって、等価三角圧力荷重の持続時間 t_e は次式になる。

$$t_e = 2I_w / p_r = (T_s - t_c) p_{st} / p_r + t_c \text{-----(22)}$$

○側壁および屋根

側壁および天井は前面に比較して反射波はなく、爆風が側壁を通過しながら爆源からの距離が大きくなり、圧力が減少するため圧力荷重は小さくなる。

爆風が建物に沿って通過すると入射波は等分布荷重とはならない。すなわち、距離と時間によって変化する。たとえば、波長が建物の長さと同じ場合は、入射波が建物の後端に達した場合には、前端的圧力は大気圧に戻ってしまうことになる。

そこで、等価な等分布荷重に置き換えて圧力荷重とする。

まず、入射波の波長を求める。これは、 $L_w = U_s T_s$ として求めることができる。

波長とスパンの比によって、平均圧力を定義して設計に用いる。 p_s を側壁あるいは天井の先端部の入射圧とするとあるスパン L 間の平均入射圧は、減少率 C_e を乗じて求めさらに動圧を加えて、次式によって求める。

$$p_a = C_e p_s + C_d q_s \text{----- (23)}$$

ここで、減少率 C_e は波長とスパン L の比によって決まる値で、スパンが非常に短ければ 1 に近い値であり、大きくなるに従って小さくなる。

図-16 は波長とスパン長の比と減少率の関係を示したものである。⁵⁾

動圧による圧力は抗力係数 C_d を換算距離によって得られた値を乗じて求める。効力係数は長方形断面のときは、前面では 1.0、側壁および後面では -0.4 としてよい⁴⁾。

より精密に求めたい場合は、スパンを適宜短くしてそれぞれのスパンにおいて求めればよい。単純化した圧力時間関係は図-17 のようになる。

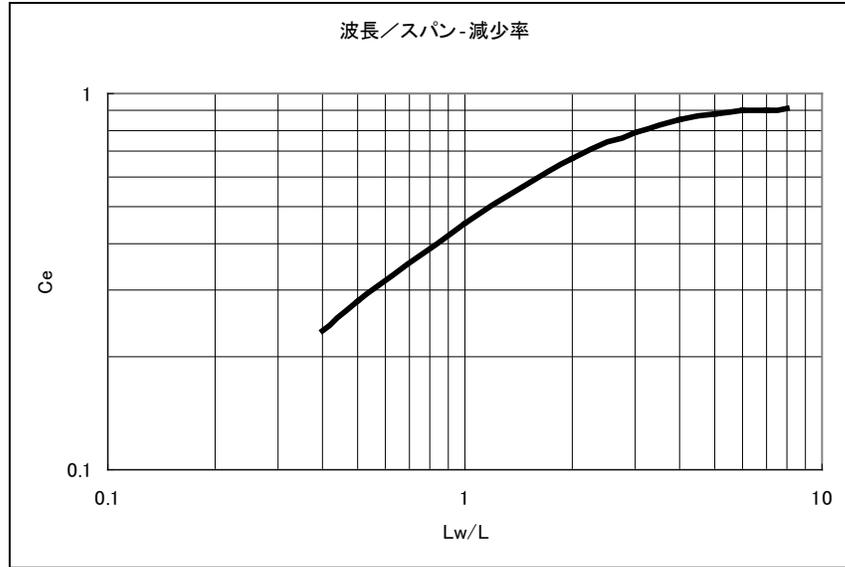


図-16 波長/スパンと減少率の関係

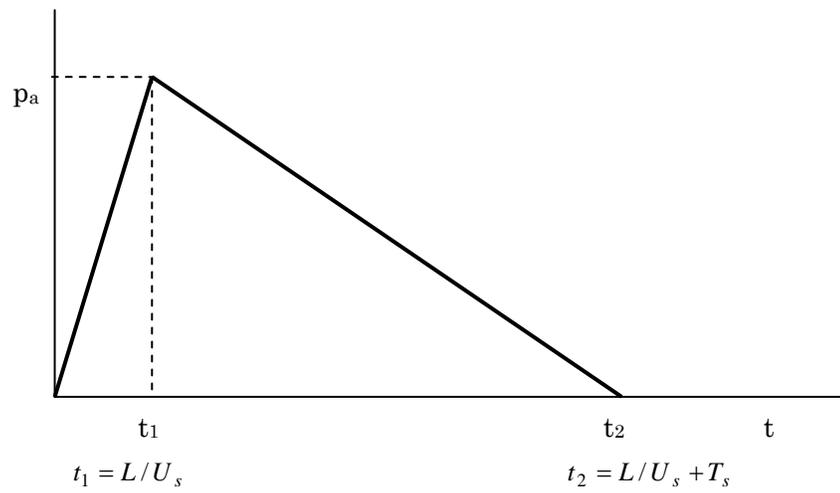


図-17 屋根および側壁の圧力時間関係

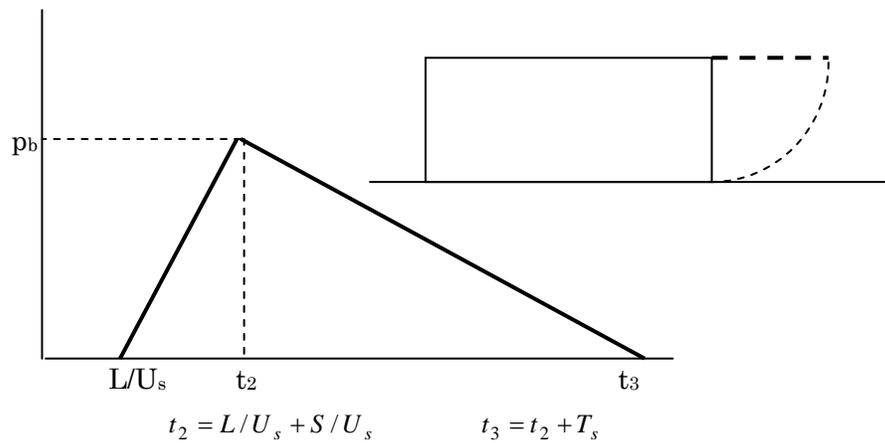


図-18 単純化された後面の圧力時間関係

○ 後面の壁

後面の壁の荷重は前面の壁と反対の方向の荷重として作用するので全体のフレームに作用する外力を計算するときに用いられる。多くの場合、安全側として無視することが多い。

ひとつの圧力時間関係を求める方法として、図-18 に示すように後面の壁を屋根に延ばして置き換えて計算する方法が、TM 5-1300 に示されている。この場合は、圧力の立ち上がり時間が L/U であり、単純化された圧力時間関係は、図-18 に示したとおりであり、 p_b は式 (23) を用いて計算する。

以上述べたように、建物に作用する爆発荷重はきわめて複雑ではあるが、単純な近似によって設計用の荷重は求めることができる。

参考文献

- 1) 中原正二, 火薬学概論, 産業図書, 1992 年
- 2) P D Smith, J G Hetherington, Blast and Ballistic Loading of Structures, Butterworth Heinemann, 1994
- 3) G C Mays, P D Smith, BLAST EFFECTS on BUILDINGS, Thomas Telford, 1995
- 4) ASCE, Task Committee on Blast Resistant Design , Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities,
- 5) US Army, TM 5-1300, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, 1990

付紙 I-A-4.2 剛体に対する弾性棒の衝突荷重モデル

図1のように 剛な固定された壁面に速度 v の弾性棒が衝突すると、衝突直後から弾性棒の衝突端から、次式で表される応力波が弾性棒の後端に向かって伝播する。

$$\sigma = \rho cv \quad (1)$$

ここで、 σ : 応力, ρ : 弾性棒の密度, c : 棒材を伝わる応力波の速度, v : 棒材の衝突速度であり、

$$\sigma = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

である。ここで、 E : 棒材の弾性係数。

よって、壁面には棒材の断面積を A とするとき

$$P = \sigma A \quad (3)$$

の荷重が図2に示すように作用する。

この応力波は、自由端に達すると、自由端での境界条件（応力=0）を満足する引張波が作用することになり、図3のように、後端から応力波がゼロである領域が広がる。

この状態が、剛体壁面に達すると、棒全体の速度はゼロとなり衝突現象は終了することになる。

応力波の伝播速度は c であるので、この荷重の持続時間は、次式によって与えられる。

$$T = \frac{2L}{c} \quad (4)$$

ここで、 T : 荷重継続時間, L : 棒材の長さ。

以上の結果、荷重の時刻歴モデルは、図4のようになる。

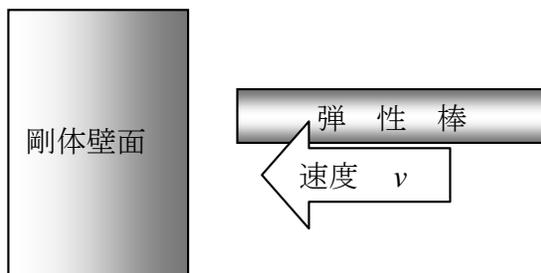


図1 弾性棒の衝突

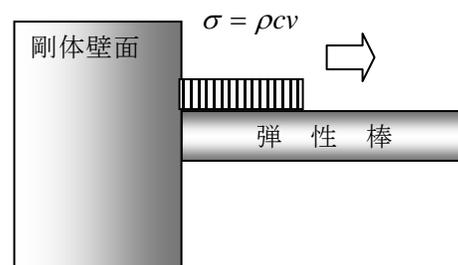


図2 応力波の伝播（往路）

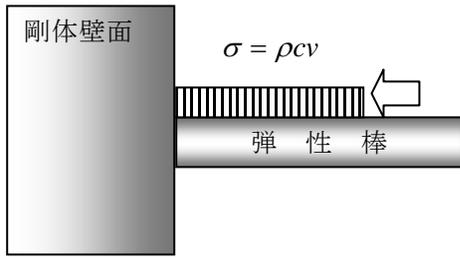


図3 応力波の伝播（復路）

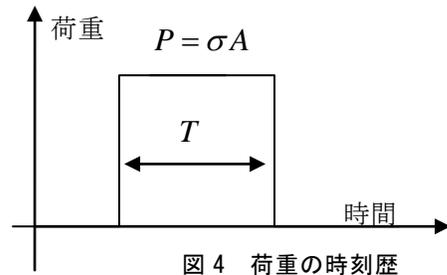


図4 荷重の時刻歴

付紙 I-A-4.3 剛体に対する柔らかい飛翔体の衝突荷重モデル

図 1 のように、強度が大きく質量も大きな壁面に初速度 v_0 の柔らかい飛翔体が衝突するものとする。

衝突後の挙動は、図 2 に示すように、衝突面近傍で、飛翔体のクラッシュもしくは破壊飛散が生じており、衝突面より少し離れた位置より後ろの飛翔体の形状は初期の形状を保っているものとする。なお、この現象において、被衝突物の変形は、飛翔体に比して非常に小さく、被衝突物は剛体と仮定できるものとする。

このとき、壁面に働く荷重 P は、次式によって与えられる。

$$P = R - v \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{P}{m} \quad (2)$$

$$v = v_0 - \int \alpha dt \quad (3)$$

$$m = m_0 - \int dm \quad (4)$$

ここで、 P ：衝突荷重、 R ：衝突局部でクラッシュ変形することによる抵抗力、 v ：その時点での残飛翔体の速度、 v_0 ：衝突初速度、 α ：加速度、 dm ： dt 間にクラッシュ部に繰り入れられる領域の質量、 dt ：微小時間、 m ：その時刻において後方に原形をとどめて残された飛翔体の質量、 m_0 ：飛翔体の総質量。

飛翔体の衝突速度方向における質量分布と、各部分のクラッシュ抵抗（局部座屈のようなもの）分布が与えられると、式 (1) ～ (4) を連立して解くことにより、初速度 v_0 で衝突する場合の、衝突荷重の時刻歴モデルを求めることができる。

- 1) Barr, P. : *Guidelines for the Design and Assessment of Concrete Structures subjected to Impact*, Wigshaw Lane, Culcheth Cheshire, WA3 4NE, 1990.
- 2) Sugano, T., Tsubota, H., Kasai, Y., Koshika, N., Ohnuma, H., Riesmann, W. A., Bickel, D. C., and Parks, M. B. : Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force, *Nuclear Engineering and Design* 140, pp. 373-385, 1993. 6.
- 3) 桂正治, 河西良幸, 坪田張二 : RC への柔飛来物の衝突による貫通、裏面剥離に関する 3 つの既往実験への UKAEA ガイドの評価法の適用性検討, 第 9 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp. 187-192, 2008. 12.

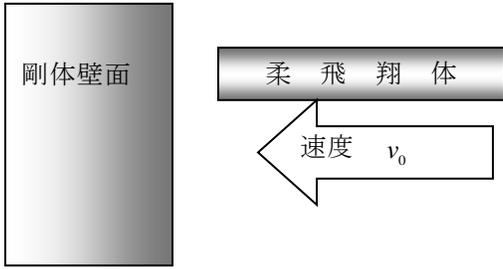


図1 柔飛翔体の衝突

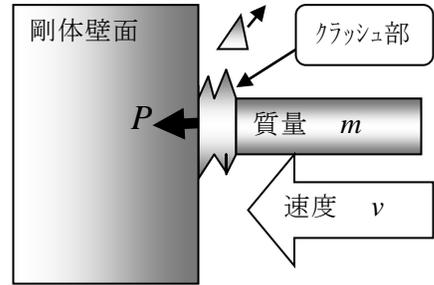


図2 衝突後のクラッシュ挙動

付紙 I-A-4.4 落石対策便覧式

図1のように2つの弾性物体1と2が速度 v_1 と v_2 で衝突する場合、物体間に作用する力は P と2つの物体重心間の距離の変化 δ の関係は次式で表される^{1,2,3)}。

$$\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 - v_0^2 \right\} + \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right) \int_0^\delta P d\delta = 0 \quad (1)$$

ここに、 $v_0 = v_1 + v_2$ は2物体の衝突速度、 m_1 と m_2 は物体1と2の質量である。 P と δ との関係は、接触面の形状により異なり、球体同士の接触の場合には、次式で表される。

$$P = \sqrt{\frac{19r_1 r_2}{9\pi^2 (k_1 + k_2)^2 (r_1 + r_2)}} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

ここで、 r_1 、 r_2 は物体1、2の半径、 E_1 、 E_2 および ν_1 、 ν_2 を物体1、2のヤング係数およびポアソン比とすると、 $k_1 = (1 - \nu_1^2) / \pi E_1$ 、 $k_2 = (1 - \nu_2^2) / \pi E_2$ である。

この式に基づき、図2に示すように、比重2.6の弾性係数が無限大である剛な球体が高さ H より自由落下し、速度 $v_0 = \sqrt{2gH}$ で、半無限の弾性体（半径 $r = \infty$ 、質量無限大、ポアソン比0.25）であるクッション材に衝突した場合の最大変形に達したときの接触力は次式で与えられる。

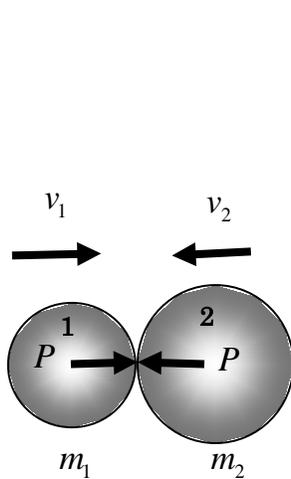


図1 2物体の衝突

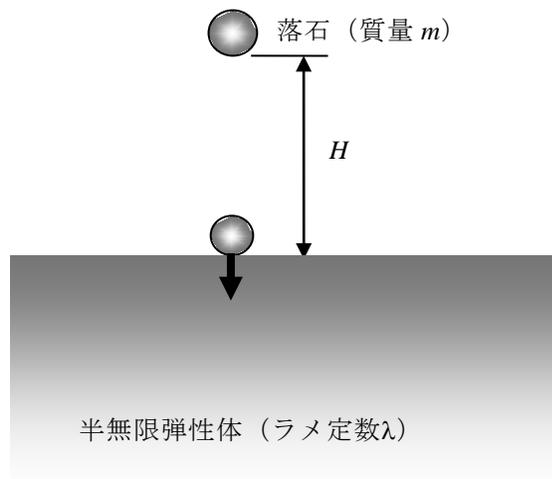


図2 落石と半無限弾性体の衝突

$$P_{\max} = 2.108(mg)^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5} \alpha \quad (3)$$

ここで、 P_{\max} は最大衝撃力(kN)、 m は落石質量(t)、 g は重力加速度(m/s²)、 λ はクッション材のラーメの定数(kN/m²)、 H は落石の落下高さ(m)、 $\alpha = \sqrt{T/D}$ は敷砂厚の割増係数、 T は敷砂層厚(m)、 D は落石直径(m)である。この式は、サンドクッションを緩衝材として用いるロックシェッドの設計に用いられているものであり、落石対策便覧式と呼ばれている。図3は、式(3)による落下高さと衝撃力の関係を示したものである⁴⁾。理論上、接触面の半径が落石半径に達する限界落下高さ H_{lim} (m) は以下の式で表される。

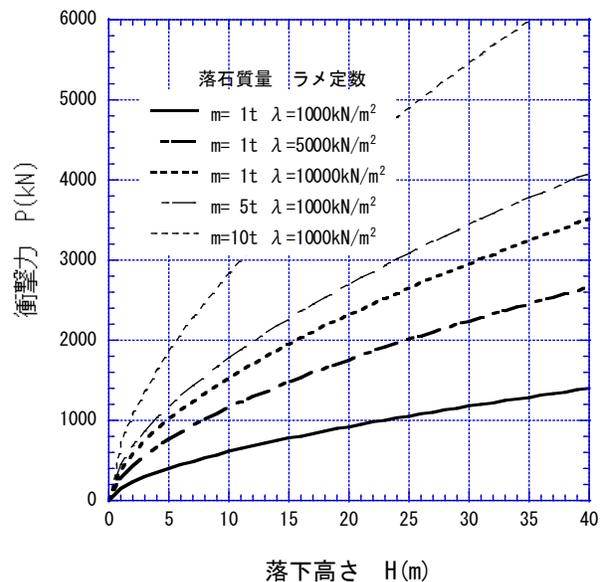
$$H_{lim} = 0.0133\lambda \quad (4)$$

なお、落石の直径と砂厚が等しい場合、 $\lambda=1000, 5000$ そして 10000kN/m^2 の各々に対す限界落下高は 13.3m, 66.6m そして 133m である。

落石対策便覧式は以上のように理想状態を仮定して導かれたものである。現実の落石衝突挙動は弾性挙動ではなく、落石の質量、形状、落下高さ、クッション材の種類などの影響を受ける。この点に関して明らかにするため、今なお研究が行われている。

【参考文献】

- 1) 土木学会：ロックシェッドの耐衝撃設計，構造工学シリーズ8，1998.11.
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- 3) 石川信隆，大野友則，藤掛一典，別府万寿博：基礎からの衝撃工学，森北出版，2008.3.
- 4) 今野久志，佐々木哲也，榊谷浩，池田憲二：落石対策：5．落石対策の実際（その2），土と基礎，Vol. 50, No. 7(534)，pp. 55－60，2002.7.



資料図 3.3 落下高さと衝撃力

付紙 I-A-4.5 敷砂緩衝材の荷重モデル

ロックシェッドには落石衝突による衝撃力の緩衝，分散を目的として何らかの緩衝材が用いられる．緩衝材としては，砂，砕砂，山砂などのいわゆる敷砂が多く用いられているが，古タイヤ，発泡スチロール（Expanded Poly-Styrol）などが用いられる場合もある．また，敷砂，鉄筋コンクリート版と EPS を組み合わせた多層緩衝構造も使用されている¹⁾．ここでは何らかの緩衝材が存在する場合の落石による荷重とそのモデルについて説明する．

緩衝材が構造物上にある場合，**図 1** に示すように衝突物である落石は最初緩衝材に衝突し，緩衝材中に貫入していく．その際緩衝材は弾性および塑性変形を生じ，緩衝材が砂などの粒状体の場合は緩衝材の流動も生ずる．このような経過で衝撃力は応力として緩衝材中を伝播し最終的に構造物表面に到達し外力として作用することになる．また，緩衝材中の以上のような応力の伝播過程で，衝撃力は一般に空間的，時間的に分散し，緩衝材内部の減衰作用や緩衝材自体の破壊，移動によりエネルギーが散逸され，構造物との直接衝突の場合に比べ，衝撃力の最大値は非常に小さく，作用時間も非常に長くなる．

図 2 のように，ロックシェッドの設計では敷砂上面に作用する集中荷重 P が，砂層厚 T に対して 1:0.5 の角度に分布するとし，敷砂底面ではその範囲に等分布荷重が静的に作用すると考える²⁾．よって，構造物には，敷砂厚さ T の直径を有する円形状の等分布荷重が作用することになる．すなわち，衝撃力として次式の分布圧を設定する．

$$q = \frac{4P}{\pi T^2} \quad (1)$$

あるいは，簡易的には一辺 $\sqrt{\pi T}/2$ の正方形の領域に置き換えられる．

このように設計においては落石による作用は静的な荷重に置き換えてとり扱う場合が一般的であったが，荷重の時刻歴を，**図 3** に示すように，台形状の波形にモデル化した動的弾性解析結果を用いて設計することも提案されている^{3),4)}．

【参考文献】

- 1) 今野久志，佐々木哲也，榊谷浩，池田憲二：落石対策 5．落石対策の実際（その 2），土と基礎，Vol. 50，No. 7(534)，pp. 55-60，2002. 7.
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧，2000. 6.
- 3) 吉田博，榊谷浩，岡衛：落石覆工屋根上への落石による衝撃特性について，土木学会論文集，第 362 号 /4，pp. 461-470，1985. 10.
- 4) 中野修，岸徳光，松岡健一，菅田紀之：剛性マトリックス法を用いた落石覆工の衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol. 38A，pp. 1597-1606，1992. 3.

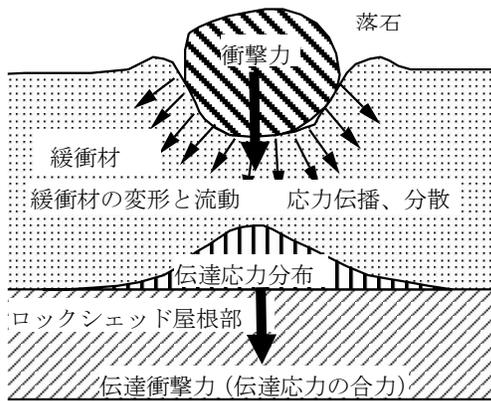


図1 落石による衝撃力

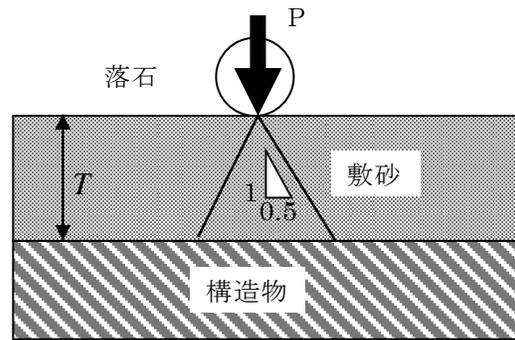


図2 敷砂内の荷重作用範囲

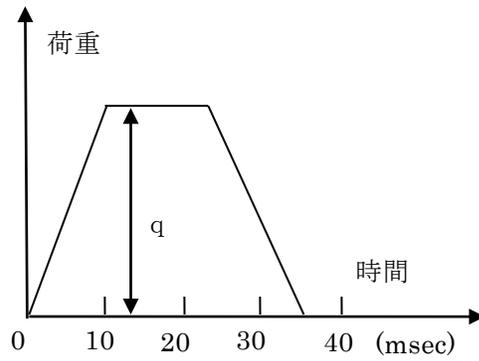


図3 時刻歴モデル

付紙 I-A-4.6 Ellinas 式による鋼管緩衝材モデル

図 1 のように，鋼管にへこみ変形が生じている場合のへこみ量と荷重の関係を，Ellinas は，次式のように与えた．

$$P = \frac{1}{4} K \sigma_y t^2 \left(\frac{\delta}{D} \right)^{0.5} \quad (1)$$

ここで， P ：荷重， σ_y ：鋼管材料の降伏応力， t ：鋼管の肉厚， D ：鋼管直径， δ ：へこみ量，実験によって与えられる定数．

星川は，衝突荷重を受けた場合には，式(1)の降伏応力にひずみ速度効果を考慮した割り増しを行うとともに，実験定数 K のみならず， δ/D の指数部を 0.8 程度に修正することを提案している．

よって，衝突物による荷重は，鋼管の支持条件に応じてその背面に，荷重 P が分配されて伝達されるものとする荷重モデルを作成するが，その最大荷重については，図 2 に示すように，Ellinas 式もしくは修正 Ellinas 式による荷重～変位関係による吸収エネルギーが，質量 m で速度 v の衝突物の運動エネルギー $mv^2/2$ と等しくなる時点での荷重 P_{max} として与えられる．

【参考文献】

- 1) Ellinas, C. P., and Walker, A. C. : Damage on Tubular Bracing Member, *Proc. of International Association for Bridge and Structural Engineering (ISBSE Colloquium)*, Copenhagen, pp. 253-261, 1983. 10.
- 2) 星川辰雄ほか：局部変形とひずみ速度効果を考慮した鋼管固定はりの衝撃応答変位，土木学会論文集, No. 512/31, pp. 101-115, 1995. 4.

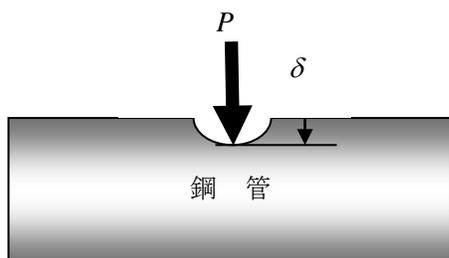


図 1 鋼管のへこみ変形

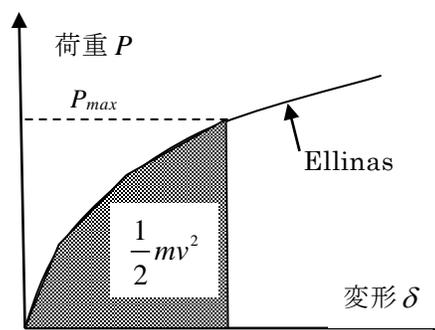


図 2 吸収エネルギー

付紙 I-A-4.7 エネルギー入力

図1のように構造物に剛な衝突物が衝突する場合に、衝突点における構造物の荷重-変位関係と等価な応答を示すばねと構造物の動的な応答形状により求まる慣性力に対応した等価な質量 m_2 やバネ k_2 を用いると、2質点ばねモデルによって、その応答をモデル化できる。

なお、図1の m_1 は衝突物の質量であり、 m_1 と m_2 の間にあるバネ k_1 は、衝突物と構造物との接触点に生ずる荷重～変形関係をモデル化した局部バネである。

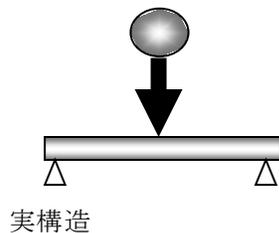
このモデルには、ダッシュポットのようにエネルギーを逸散させる機能がないので、動的応答の時刻に関わらず、エネルギー保存則が成立する。すなわち、運動エネルギーとばねに蓄積されたひずみエネルギーの総和は常に等しい。

よって、局部バネの吸収エネルギーを無視できるとした上で、図2に示すように構造ばね(k_2)の吸収エネルギーを定義すると、次式が成立している。

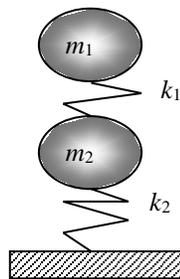
$$E = U + \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 \quad (1)$$

ここで、 E : 初期運動エネルギー、 v_1 , v_2 : それぞれ質量 m_1 , m_2 の速度。

最大変位は、明らかに v_1 および v_2 が零となったときに生ずることになり、破壊の照査には、最大変位状態が支配要因となることが多いため、速度が無視できる($v_1=v_2=0$)ので、動的応答解析は不要となり、式(1)の右辺第一項までの釣り合いを解けばよい。このような簡略モデルの趣旨からして、局部応答については、 m_1 と m_2 との間で完全非弾性衝突が初期に生じたものとして仮定され、 E は次式によって与えられる。



実構造



ばねモデル

図1 ばねモデル化

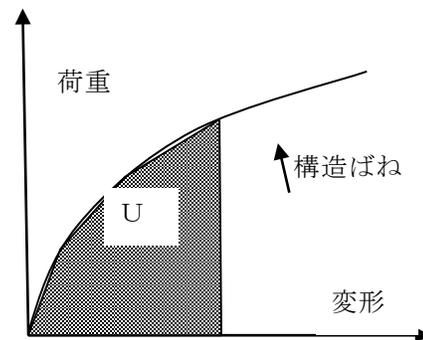


図2 構造ばねの吸収エネルギー

$$E = \frac{1}{2} \frac{m_1^2}{m_1 + m_2} v_{01}^2 \quad (2)$$

ここで、 v_{01} ：衝突物の衝突速度。

ただし、式(資料 6.2)では、局部応答の非弾性衝突仮定による逸散エネルギーが考慮されているため、 m_2 が大きい場合には、その仮定の妥当性について留意する必要がある¹⁾。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，p. 150, 2000. 6.

付紙 I-A-4.8 流体圧モデル

図1のように、管路のような閉鎖された空間を流体が流れている場合に、瞬間的に出口を塞ぐなどして、流体を停止させると、その停止点から水撃圧が発生する。

この水撃圧は、流体内の衝撃波であり、弾性鋼棒の衝突問題と同じ考え方および式が成立する。すなわち、水撃圧は次式で与えられる。

$$p = \rho cv \quad (1)$$

ここに、 p は水撃圧力、 ρ は流体の密度、 c は流体の衝撃波伝播速度（水では約 1500m/s）、 v は流速である。

その継続時間 T は、衝撃波が自由水面に達して零となった応力波が戻ってくるまでとなり、次式で与えられる。

$$T = \frac{2L}{c} \quad (2)$$

ここに、 L は止水点から自由水面までの距離である。

実際には、このように純粋な衝撃波の荷重を生ずる現象は少なく、多くの場合、津波、土石流、崩土や雪崩などのように、流体表面形状が段波と呼ばれる図2に示すような切り立った形状となり、その波が構造物に当たった場合に衝撃的な荷重を与える。その荷重モデルは、いわゆる、通常の流体中に置かれた構造物が受ける次式のような抵抗力に類似した荷重を表現する次式を使用する機会が多い^{1),2),3),4)}。

$$q = \frac{1}{2} c_d \rho v^2 \quad (3)$$

ここに、 q は流体圧力、 c_d は抵抗力係数(被衝突体の形状に依存)、 ρ は流体の密度、 v は流速である。

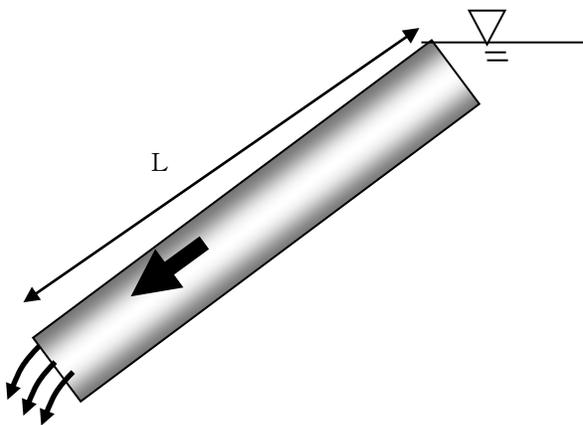


図1 水撃圧モデル

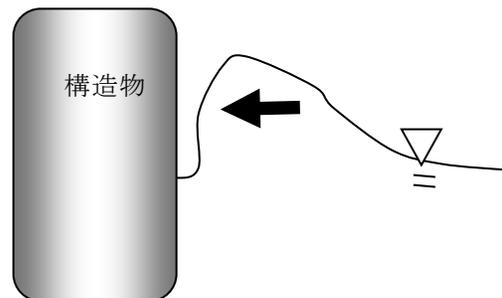


図2 段波の衝突

【参考文献】

- 1) 椿東一郎：水理学，森北出版，1977.
- 2) 日本建設機械化協会：新編 防雪工学ハンドブック，1988. 3.
- 3) 飯塚秀則，松富英夫：津波氾濫流の被害想定：海岸工学論文集 第 47 卷，pp. 376-380，2000. 10.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，国土技術政策総合研究所資料, No. 364，2007. 3.