第10章 衝擊作用

10.1 一般

- (1) [REQ] 本指針は,衝撃的な作用を主作用として,もしくは従作用として受ける土木構造物の設計法を作成する場合に,設計用の作用(荷重)を指定する方法,およびこれに伴う必要な安全係数を求める方法について述べる.
- (2) [REQ] 本指針は,性能設計体系に基づいて制定される日本国内の土木構造物の設計法,および性能設計体系における照査アプローチAに基づく設計を行う設計について適用される.
- (3) [REQ] 本指針を適用するにあたっては,策定される基準を,包括設計コード(性能設計概念に基づいた構造設計コード作成のための原則・指針と用語:code PLATFORM ver 1.0, 2003.3,土木学会包括設計コード策定基礎調査委員会)等,関連する性能設計法に基づくガイドラインの意図することに適切に整合させねばならない.

【解説】

(1)について

本章の目的を定めた.

(2)について

本章の適用範囲を示した.性能設計体系に基づいた設計法では,性能の照査方法がマニュアル的に示され,その示すところに従って照査をすると自動的に,その上位にある包括設計コードの要求性能を満足する自由度の少ない照査アプローチBと,設計者が自由に照査方法を選択する照査アプローチAがある.本指針は,照査アプローチBの基準を作成する者と,自由設計を行う者に適用される.

(3)について

本指針は,性能設計のコード体系に従うものであり,性能設計の概念および体系については, 土木学会包括設計コード策定基礎調査委員会の提案した包括設計コードに従うものとしている. ちなみに,この体系(用語の定義)に従って,適用範囲も記述されている.

10.2 作用因子

- (1) [REQ] 衝撃作用は,物体衝突による作用,爆発による作用,および流体の衝突による作用 等がある.
- (2) [REQ] 物体衝突による作用因子は,物体質量および速度である.
- (3) [POS] 物体衝突による作用因子として,運動エネルギーを与えることもある.
- (4) [REQ] 爆発による作用因子は,爆薬量,爆薬の種類および離隔距離である.
- (5) [REQ] 流体の衝突による作用因子は,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.

【解説】

(1)について

衝撃作用の種類を述べた.狭義の意味では,衝撃作用は,構造物に衝撃波もしくは,衝突物体 自体に衝撃波を生ずる現象をもって定義される.しかし,一般の土木構造物設計では,衝撃波が 支配的でない現象においても,単なる動的現象を超えるという解釈で,衝撃作用として設計され ることがあるので,ここに示す3つの定義以外の作用もありうることを示している.

(2),(3)について

衝突作用において,(2)の作用因子が分離して統計分布を得られない場合には,(3)の定義による作用因子をもとに,設計作用モデルを構成することがある.

(4)について

従来の爆破荷重の式における因子を示す.

(5)について

例えばダムの排出管路内のサージング現象による作用などを求める作用因子である.

10.3 作用

- (1) [REQ] 衝撃作用は,作用因子の関数として,適切なモデルパラメータを用いて,空間分布 および時間分布に変換し与える.
- (2) [POS] 衝撃作用は,時空間分布に代えて,力積として与えられることもある.

【解説】

(1)について

作用は,設計される構造物に与える設計上のモデルである.

(2)について

例えば,衝突による作用は,極めて小さな点における集中作用から開始されて,時間とともに接触点が急速に拡がり,構造内部に衝撃波として応力伝播し,徐々に構造全体の応答に遷移していく

ことが知られている.これを忠実に,再現することは一般に困難であり,仮に限界状態が局所破壊ではなく,構造応答であったり,緩衝材を介して衝突荷重が設計構造物に伝播したりする場合などは,図 10.1 に示すような空間的な分布に関するモデル化を行う.また,実験的観察に基づき,図 10.2 のような時間的モデル化を行う.

- 1) 爆発による作用は 図 10.3 に示す時間モデル化が作用因子の関数として行われ 実験的にも,解析的にも良く整合することが確かめられている.
- 2) 設計において着目している限界状態を支配する動的現象の固有周期に対して,十分に小さな作用時間内においては,作用の波形にかかわらず,その力積が同じであるなら,作用終了後の構造応答(最大値など)は,同じになることが知られている.この場合には,時間的モデル化は必要でなく,力積を与えることにより,応答推定が可能である.

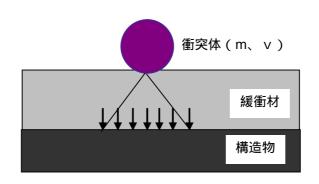


図 10.1 作用の空間分布モデルの例

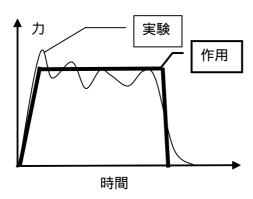


図 10.2 衝突による作用の時間モデル

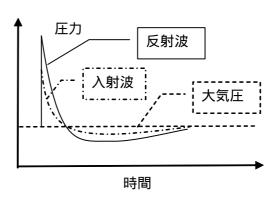


図 10.3 爆発による作用の時間モデル

10.4 衝撃作用の変動性

- (1) [REQ] 設計者は,当該構造物の目的および要求性能を分析し,衝撃作用を「変動作用」もしくは,「偶発作用」のいずれとして取り扱うかを明示する.
- (2) [REC] 変動作用として取り扱う場合には,不確定性を含めて,前提とする確率特性を記述することが望ましい.
- (3) [REC] 事前に確率特性を指定できない場合には,必要な特性値を求めるための調査方法等 を指定することもできる.

【解説】

(1)について

設計者とは, 照査アプローチ B による設計法の策定者および照査アプローチ A による設計者をいう.

一般の土木構造物では、衝撃作用は他の作用に比して作用頻度が極めて小さく、そのばらつき特性が不明確であるため、偶発荷重として取り扱われるが、特定の防災構造物や防護構造物のように衝撃荷重を受けることを主目的とする構造物がある。この場合には、衝撃荷重を偶発荷重とすることは、構造物の設置目的と矛盾することになるので、その場合には作用頻度と作用荷重との関係に、主観的であっても何らかの確率評価が行えるものとする。

偶発作用と変動作用の取り扱いの選択結果は,作用組み合わせの考え方や要求性能の多段階性に影響を与える.すなわち,偶発作用として取り扱う場合には,自重などの永続作用とのみ組み合わして衝撃作用を与えることになり,変動作用として取り扱う場合には,他の変動作用を従作用として組み合わせ状態を考慮することになる.また,変動性を考慮できるので,大頻度低レベルの作用に対する限界状態と低頻度高レベルの作用に対する限界状態などを多段階に組み合わせた性能規定をあたることができる.

(2),(3)について

一般に,衝撃作用の発生頻度特性を定量化するための基礎データを集めることは難しい.しかし, 推定の不確定性を主観的な確率量として与えることは可能である.

落石作用や土石流中の巨礫など,地域依存性の強い作用因子については,広域な範囲での標準化を行うことは困難である.このため,例えば95%非超過確率値に対応する値の調査方法などを指定することが望ましい.

10.5 構造物の要求性能区分法

- (1) [REC] 設計者は,衝撃作用を受ける場合の当該構造物の要求性能について,限界状態に対応 させて作用の大きさを組み合わせて,要求性能を記述する.
- (2) [REC] 変動作用として取り扱う場合には,一般に複数の限界状態に対して,それぞれに対応する作用の大きさを示す.
- (3) [REC] 偶発作用として取り扱う場合には,一つの限界状態に対して,対応する作用の大きさを示す。
- (4) [REQ] 作用の大きさの指定については,構造物の重要度を考慮する必要がある.

【解説】

(1)について

包括設計コードでいうところの「要求性能」は, 荷重の大きさ,限界状態および時間(期間) を組み合わせ,言語表現で記述することになっている.

同一種類の作用に対して,複数の要求性能を指定する場合には,作用を指定して限界状態を選択する方法と,限界状態を指定して対応する作用を選択する方法があるが,ここでは後者を推薦した.

(2)について

変動作用として取り扱う場合には,作用が大きくなるにつれて超過頻度が低くなる性質を前提と することが可能である.よって,複数の段階について要求性能を指定することが可能である.

(3)について

偶発作用では,その作用頻度や大きさについての定量的表現が非常に困難である.このような荷重特性において,複数の作用段階を設定することは非合理的であるので,単一の要求性能を前提とした.

(4)について

衝撃作用を対象とする防災構造物は,設置場所の工事難易度や防災対象物の価値や近接度など設計条件の多様性が大きい.このため,土木構造物が公共構造物であることに鑑みて,重要度に応じた設計作用の選定が可能とすることが重要である.

10.6 限界状態

- (1) [REQ] 設計者は,衝撃作用を受ける構造物には使用限界状態,修復限界状態および終局限界 状態のいずれか,もしくはそのいくつかについて定義する.
- (2) [REC] 変動作用として取り扱う場合には,一般に複数の限界状態を指定する.
- (3) [REC] 偶発作用として取り扱う場合には,単一(多くの場合終局限界状態)を指定する.
- (4) [POS] 限界状態の物理的事象には,衝撃作用特有のもののみならず,一般の作用によって生ずるものもある.

【解説】

(1)について

限界状態の設定法は,基本的に一般の作用に対応した限界状態の区分原理と同様である.

(2),(3)について

衝撃作用を主作用とする構造物は稀であるため,多くの場合,偶発作用として取り扱われ,その場合には,単一の限界状態に対応させることが多いと考えられる.その際の,限界状態は,使用限界状態や修復限界状態である場合がないとは限らないが,衝撃作用の特性上,終局限界状態に対応させる場合が多いものと思われる.

(4)について

構造物が衝撃作用を受けると,裏面剥離や貫通などの局部応答が卓越して起こる場合が多い.よって,衝撃作用に対しては,そのような衝撃作用特有な限界状態を意識しがちであるが,構造物の特性や作用との相互効果によって,一般の動的な作用を受ける構造物と同様な応答が生ずることも多く,その応答の中に,構造物の目的に照らして,限界状態として定義すべきものがある.

衝撃荷重を受ける場合の限界状態は、一般に次のものから選択・指定する、

- 1) 使用性
 - a) 振動
 - b) 水密性
 - c) 気密性等
- 2) 局所的破壊限界
 - a) 表面破壊
 - b) **貫入**
 - c) 裏面剥離
 - d) 貫通等
- 3) 構造要素破壊限界
 - a) 変形
 - b) 破断等
- 4) 構造システム破壊限界

- a) 変形
- b) 保護空間への進入等
- 5) その他

飛散物による傷害等

本項による限界状態の選択と荷重指定を組み合わせることは ,図 10.4 に示すような性能マトリクスを具体的に指定することに相当する .

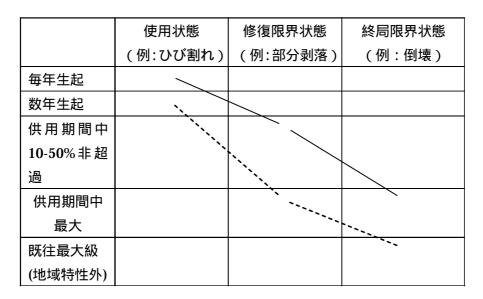


図 10.4 要求性能に重要度を考慮した荷重指定

10.7 要求性能の性能規定化

- (1) [REQ] 設計者は,要求性能を数量化し,性能規定として示す.
- (2) [REQ] 照査アプローチ A のためには ,数値化された荷重と数値化された限界値およびその達成信頼度について示す .
- (3) [POS] 数値化に伴って,載荷状態をモデル化して指定することもある.
- (4) [POS] 照査アプローチ B については,部分係数法による処理をして示すこともある.

【解説】

(1)について

要求性能は,技術情報化される以前の合意を示すものであるのに対し,性能規定は技術者間の解釈のばらつきを制御する目的の情報である.よって,技術情報としての定量化が行われていなければならない.

(2)について

性能規定は ,見なし規定を用いない照査アプローチ A による設計について評価を行う場合の基準値でもある.よって , 適切な自由度を有しつつ , 曖昧な解釈を避けるような定義が必要である.

(3),(4)について

照査アプローチ A で行われる作用効果の推定は,実績のある手法であるが古典的なものや,新しく精緻な計算が可能であるが実績のないもの,大量な実験結果であるが構造要素のみであったり縮小モデルであったりするもの,もしくは実物実験であるが数少ない荷重ケースでありものなど,長所欠点の混在するものであることが多い.これらを公平にかつ科学的に評価するためには,性能規定が達成される信頼性を審査する尺度が必要である.

ただし,この信頼性をどのように判定するかについては,いまのところ確立した方法が有るわけではない.このため,照査アプローチBで行われる部分係数法の安全率がどのように決定されているかについて理解と判断尺度を参考とする必要がある.

付 録

- (1) 落石シミュレーション
- (2) 爆発作用

付録1 落石シミュレーション

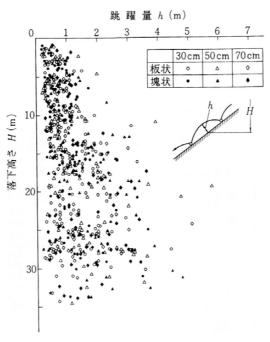
落石は、ほとんどの場合偶発的に発生する.落石に関わる問題は付表 1.1 に示すように大きく 4 つに分類され、この中で、落石発生の具体的な予知に関しては有用な資料が十分得られていないため、現状では困難な場合がほとんどである.ただ、落石がどのような箇所にどのような頻度で発生するかについてはデータの蓄積がある現場ではかなり明らかである.落石衝撃に関する対策を検討する場合、落石荷重設定のため、一般に落石の質量、衝突速度が必要とされる.

番号	問題の分類	内 容 説 明	
1	落石発生	落石の発生の時期,箇所そしてその規模を予知・推定する.	
2	斜面上の落石運動	発生した落石の斜面上の動的挙動を推定し,危険度を決定	
		する.	
3	落石衝突による発生衝撃力	衝突落石による運動エネルギー,発生衝撃力を算定する.	
4	落石防護構造物の挙動	落石衝突による防護構造物の動的挙動を算定する.	

付表 1.1 落石問題の分類

1. 落石運動の予測

落石運動,すなわち,落石が斜面上をどのように落下するのかを予測することは,落石対策上重要な課題である.この予測については経験的な方法および数値シミュレーションによる方法がある.前者は既往の現場観察から導かれたもので,比較的単純で限られた斜面・落石条件に対して適用されるものである.そのような条件から大きくはずれる場合や,防護工の設計等のためにより詳細に運動の予測が必要とされる場合に,後者の方法が適用される.ここでは,経験則による方法と数値解析による落石運動シミュレーションを紹介する^{1),2)}.



付図 1.1 落石の落下高さと跳躍量の関係

1.1 経験則による方法

斜面上を落下する落石の跳躍量,速度等は,既往の現場落石実験の結果等にもとづき,ある程度 経験的に予測することができる.ここでは,斜面上の落石運動を経験則により求める方法について 述べる.

1.1.1 跳躍高さ

付図 1.1 は , 現場落石実験³⁾による落石の落下高さと落石の跳躍量の関係を落石の形状と最大径で分類し示したものである . この実験結果では , 80%程度以上は 2m以下の跳躍量となっている^{4),5)} . しかしながら , 斜面に凹凸が存在する場合で落下高さの大きい場合には , 跳躍量は 2mを超えることもあることも予想される .

1.1.2 速度

斜面上の落石の速度は,残存係数 と自由落下速度を用いて,経験的に次式のように表す場合が 多い.

$$V = \alpha \cdot \sqrt{2gH} \tag{1.1}$$

ここに,V:落石速度,g:重力加速度,H:落下高さである.残存係数の値は斜面の土質,岩質,凹凸,勾配,ならびに落石の形状によって異なる.

斜面の等価摩擦係数をμとすると残存係数 は次式で表される.

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\mu}{\tan \theta}} \tag{1.2}$$

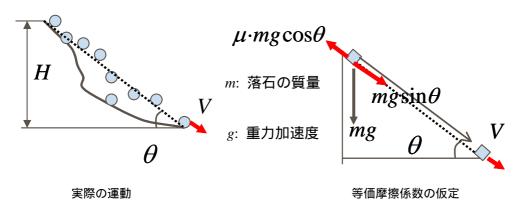
ここに, :斜面勾配であり,落石速度は等価摩擦係数 μ を用いると次式で表される.

$$V = \sqrt{2g(1 - \frac{\mu}{\tan \theta})H} \tag{1.3}$$

付図 1.2 は等価摩擦係数を求める仮定を示したものである.実際にはある斜面を複雑に落下してくる落石の最終速度を摩擦のある勾配 の直線斜面を滑りおりると仮定し摩擦係数を定める方法である.等価摩擦係数の値について既往の実験から得られた値を整理したものが,付表 1.2 である⁴⁾.これより斜面を落下する落石の速度を経験的に求めることができる.

1.1.3 落石のエネルギー

落石の全運動エネルギー Eは ,線速度エネルギー E_{\vee} と回転エネルギー E_{Γ} との和で表される .すなわち ,



付図 1.2 落石運動と斜面の等価摩擦係数 µ

付表 1.2 等価摩擦係数の値

区分	落石特性	斜面特性	摩擦係数μの値(設計用)
A	硬岩,丸状	凹凸小,立木無し	0~0.1 (0.05)
В	軟岩,丸状~角状	凹凸中~大,立木無し	0.11 ~ 0.2 (0.15)
С	土砂・崖錐,丸状~角状	凹凸小~中,立木無し	0.21 ~ 0.3 (0.25)
D	崖錐・巨礫まじり崖錐,角状	凹凸中~大,立木無し~有り	0.21 ~ 0.3 (0.25)

$$E = E_V + E_r \tag{1.4}$$

等価摩擦係数を用いて表すと,落石の全運動エネルギーEは次式によって求めることができる.

$$E = (1 + \beta)(1 - \frac{\mu}{\tan \theta})m \cdot g \cdot H \tag{1.5}$$

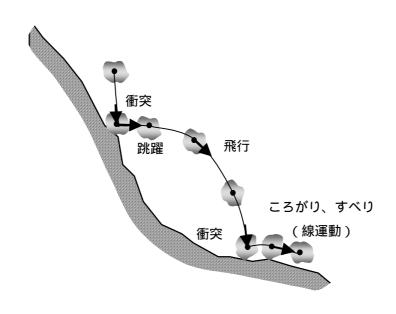
ここに , βは回転エネルギー係数である .

回転エネルギー E_r は,既往の実験結果によれば,線速度エネルギー E_V の 10%程度であるされて $N6^{4)}$.

ここでは経験則による落石の跳躍量,速度,運動エネルギーの予測法の概略を述べたが,これらは全て限られた現場落石実験の結果等をもとに設定されているものである.したがって,これらの関係は斜面状況により大きく変わることが考えられる.

1.2 シミュレーションによる方法

経験的な方法では落石の跳躍量,速度,運動エネルギーの設定が困難な場合に数値シミュレーションを用いて設定に役立てる場合が増えてきている.このシミュレーションによる方法は,落石の



付図 1.3 落石の運動形態

モデル化の違いにより質点系シミュレーション手法と非質点系シミュレーション手法の 2 つの手法に大別される.

1.2.1 質点系シミュレーション手法の概要

質点系シミュレーション手法は,基本的には落石を大きさのない質量を持った質点,または, 形状の簡単な円柱や球形の剛体と仮定し,斜面を線状あるいは面状の剛壁と仮定した斜面などから の作用力を考慮して落石の飛行,衝突,すべり・回転等の運動を初等力学により定式化し,数値的 に解く手法である²⁾.

a)シミュレーション手法の歴史的経緯

Ritchie 6)他の現場斜面での落石運動の観察から,落石の運動形態は付図 1.3 に示すように飛行,線運動 (斜面に沿うころがりあるいはすべり),衝突の 3 つに分類されることが多い.

わが国では 1968 年の飛騨川バス転落事故⁷⁾を契機に,道路に沿う土砂災害に対する防護施設の整備が進められるようになり,その一分野として落石の痕跡から軌跡の逆解析を行うなど⁷⁾の落石運動機構に関する研究等が開始された .1974 年には落石に関する既往の成果が高速道路調査会によりとりまとめられた⁵⁾ .その報告書の中で上述したような落石の基本的な運動形態の分類や定式化,落石の最大跳躍高,落下速度,運動エネルギーの参考値等が示されている . その後,1980 年代に入り計算機の発達に伴い落石運動のシミュレーションに関する研究が行われるようになってきた⁸⁾⁹⁾ . これらの研究に先立つ初期の研究では落石を質点とモデル化しており回転運動は無視されていたが,次第に落石を剛体にモデル化することにより回転を考慮することの重要性も認識されるようになってきた.

諸外国においても 1970 年代中頃より 1980 年代後半にかけて,回転速度も考慮し跳躍ところがりで運動を表現する手法¹⁰⁾,落石の形状を楕円体として表現する手法¹¹⁾,落石を多角形モデルとし反発係数などを確率的に取り扱う手法¹²⁾,斜面の凹凸度(一般にラフネスと呼ばれる)を確率変数とする手法^{13,14)}などが提案されている.

b)シミュレーション手法の現状

付図 1.4 は落石運動の取り扱いの概念図を示したものである.左は質点の力学の基本であり落石の回転は考慮しない.右に行くに従い多様な運動形態を取り扱うものとなり,回転を考慮し作用力の位置の影響も取り入れたものとなる.質点系手法では,落石運動の形態を判別して運動を定式化しており,このような様々な落石のモデル化のもとで各種の運動形態の遷移を必要に応じ考慮するシミュレーション手法が現在数多く存在する¹³⁾⁻¹⁹⁾.

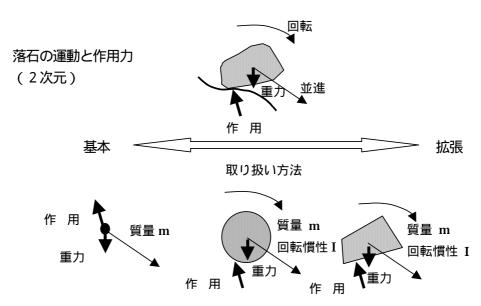
質点系シミュレーションにおける重要な影響因子として,考慮する運動形態,衝突運動のモデル化,回転運動の考慮,落石運動の不規則性のモデル化等が上げられる.このため,検証データの集積によるパラメータの設定法やシミュレーションにより得られた結果の評価も重要である4.

1.2.2 非質点系シミュレーション手法の概要

非質点系のシミュレーション手法とは,落石を質点ではなく形状を持ったブロックとして取り扱い,斜面を一つあるいは複数のブロックの集合体として取り扱う方法である.この手法としては,個別要素法 DEM(Distinct Element Method)と不連続変形法 DDA(Discontinuous Deformation Analysis)があり,共に不連続面を有する岩盤などの挙動解析に用いられている数値解析手法である.最近,動的現象である斜面上の落石運動解析にもこれらが適用されるようになってきた.このような開発経緯の違いを考慮し,質点系と区別して非質点系呼ばれる場合が多い.

落石シミュレーションを行う場合,個別要素法(DEM)では基本的に解析対象を剛体²⁰⁾,不連続変形法(DDA)では変形可能な多角形要素によって離散化される²¹⁾.運動形態を区別することなく飛行・衝突・すべり・ころがりを包括した運動方程式は小さい時間刻みの逐次計算により解かれる.表 1.3 に両手法の主な特徴を示すが,時間ステップ毎に接触・非接触を判定し,接触時には接触位置での接触力,すべり,回転モーメント,エネルギー損失などが計算され,非接触時は直前の速度と重力より運動を算定する手法である.なお,DEM及びDDAにおいては,複数の落石が落下するような場合の解析も行なうことができる.

質点系シミュレーション手法と異なり、運動形態(飛行・衝突・すべり・ころがり等)を区別した処理は行われない、また、石の特徴をできるだけ実際の形状に近いモデルとして扱うので、落石の斜面に対する衝突姿勢に依存した反力が算定できる。このため、接触時に接触力が重心を通らない場合に発生する回転モーメントなどが自然に取り込まれるといった特徴がある。しかし、実際の斜面における斜面形状及び落石の凹凸、物性値の変化を詳細にモデル化するのは困難である。このことから、簡易的な方法として、落下開始時の落石の姿勢を変化させるなどの解析を複数回行い、確定的、決定的な計算結果に、実現象におけるばらつきを反映させる検討も行われている²⁾。



落石の取り扱い	大きさのない 質点	大きさのある剛体(円)	大きさ・形状を持つ剛体
質点の運動	並進運動	並進運動・回転運動	並進運動・回転運動
作用力	力は全て重心に作用	重力は重心、作用力は円	重力は重心、作用力は表面
		周上に作用	に作用

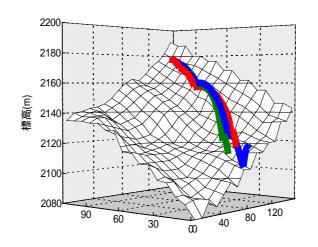
付図 1.4 落石の取り扱い概念図

1.2.3 シミュレーション手法の適用事例

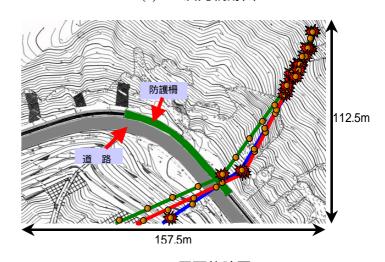
桝谷ら¹⁸⁾と小村ら¹⁹⁾は雪崩対策としてスノーシェッドを計画中の山岳道路において,斜面上方の多数の不安定岩塊に対する落石到達に対するで変性の検討および落石到重なである。外面の生産のために3次元解析を用いる。斜面のモデル化向に157.5m,斜面で上が最近でいる。対象落石とが最も大きの範囲を約まる。対象落石とが最も大きの動産が最も大きの動産が最も大きの動産が最も大きない。次の大力を変化させシミュレーションを変化させいる。

付図 1.5 に解析結果による落石の3次元軌跡を示す.付図 1.5(b)に示す落石経路は付図 1.5(a)の軌跡を平面上に投影したものであり,落石の到達範囲が把握できる.3次元解析を用いることで,より現実的に落石現象を表現できることがわかる.

倉岡らは非質点系シミュレーション手法である個別要素法(DEM)



(a) 3次元軌跡図



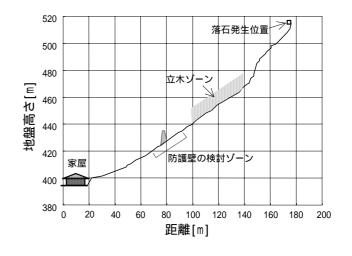
(b) 平面軌跡図

付図 1.5 小村・桝谷らによる 3 次元解析事例

を用い,立木のある斜面での防護壁の設置位置の検討を行っている22).対象とした斜面は傾斜が30

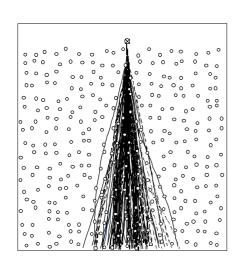
~45°であり,防護対象とする家屋から 発生源までの比高は約120mである(付図 1.6).斜面の標高470m~430mには直径 0.2~0.4mの杉が10m²に一本程度の割合 で林立していた.立木には落石との衝突 による擦痕が地表から0.5~1.5mのとこ ろに認められ,落石に対する抵抗効果が 推定された.

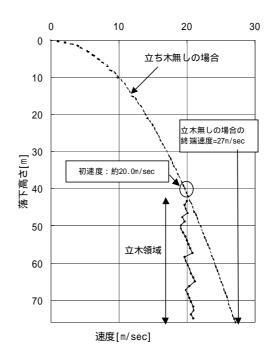
そこで,立木の抵抗効果を考慮するために個別要素法(DEM)により立木及び落



付図 1.6 個別要素法 (DEM) 適用事例の概要

石を円形要素で表した平面解析が予め行われた.その結果から立木による速度の低減効果を求め, その低減効果を速度に比例する粘性抵抗力として考慮し縦断面方向の解析に取り入れている.付図





(a) 立木を考慮するための平面解析

(b) 立木の速度低減効果の一例

付図 1.7 DEM の解析事例

1.7 に解析結果の一例を示す.この結果によれば立木がある場合の終端速度は,立木が無い場合に 比べて平均で2~3割程度減少している.

1.3 あとがき

ここでは,経験的手法に加え,近年有効と考えられようになってきた落石シミュレーション手法の特徴に基づき,シミュレーション手法を質点系と非質点系に大別し,その特徴の概要を示すとともに適用事例を紹介した.今後,落石シミュレーションの斜面防災に果たす役割はますます重要になるものと予想される 現在 解析パラメータの設定に関する基礎的研究が鋭意行われている^{23,24)}. 今後,より信頼性の高い衝撃荷重の設定を行うために,斜面途中の植生,転石や防護施設の影響などを考慮できるより合理的な3次元シミュレーション手法の開発が望まれている.

参考文献

- 1) 桝谷 浩,佐々木哲也,倉岡千郎,古賀泰之,三木 茂:落石対策4.落石運動のメカニズムと 予測(その2),土と基礎, Vol.50, No.4(531), pp.48-53, 2002.4.
- 2)落石シミュレーション手法検討ワーキンググループ(松尾修,桝谷浩,他16名):落石対策便覧に関する資料-落石シミュレーション手法の調査研究資料-,日本道路協会,2002.4.
- 3)佐々木康,谷口栄一,舟見清巳,谷本亘,堀口正己:落石の跳躍量に関する実験,第 14 回日本 道路会議特定課題論文集,pp.113~115,1981.
- 4)日本道路協会:落石対策便覧,2000.
- 5) 高速道路調査会:落石防護施設の設置に関する調査研究報告書,1974.
- 6) Ritchie, M.: Evaluation of rockfall and its control, Highway Research Record No.17, pp.13-28,1963.
- 7)諏訪浩:講座 土石流,4.土石流の観測事例,土と基礎,地盤工学会,Vol.48,No.7,Ser.No.510,pp.41-46,2000.7.

- 8) 吉田博, 荒田久和: マイコンによる落石の飛跡シミュレーション, 第一回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集, pp.55-6, 1983.
- 9) 右城猛,村上哲彦:落石の飛跳躍高の推定,第一回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集,土木学会,pp.48-54,1983.
- 10) Piteau, D. R.: Communication computer rockfall model, Written report of the Meeting -Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness-, ISMES-Bergamo, pp.127-128,1976.
- 11) Bozzolo, D.: Simulation of rock falls down a valley side, Acta Mechanica, Vol.63, pp.113-130,1986.
- 12) Paronuzzi, P.: Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barriers, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.22, pp.175-183,1989.
- 13) Pfeiffer, T. J., J. D. Higgins and A. K. Turner: Computer aided rockfall hazard analysis, Proc.6th IAEG Congress, pp.93-103,1990.
- 14) Stevens, W.D.: RocFall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls, A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science, University of Toronto, Department of Civil Engineering, 1998.
- 15) 吉田博,右城猛,桝谷浩,藤井智弘:斜面性状を考慮した落石覆工の衝撃荷重評価,構造工学論文集, Vol.37A, pp.1603-1615.1991.
- 16) 鷲田修三, 古賀泰之, 伊藤良弘: 落石運動の予測手法について, 第24回土質工学研究発表会, pp.1611-1614.1989.
- 17)右城猛, 篠原晶二, 谷田幸治, 八木則男: 落石の斜面衝突運動に関する研究, 第5回構造物の 衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.91-96.2000.
- 18) 桝谷浩,福田尚晃,堤下克彦:斜面上の落石の運動解析手法の開発,構造工学論文集, Vol.43A, pp.1589-1596.1997.
- 19) 小村辰彦,村西隆之,西澤謙二,桝谷 浩:落石シミュレーション解析のパラメータ設定と実 斜面の凹凸評価,第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演会論文集,pp.63-68.2000.
- 20) Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. Proc. of Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Vol.1, Nancy France, II-8,1971.
- 21) Shi, G. and R. E. Goodman: Discontinuous deformation analysis, Proc. Of 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp.269-277,1984.
- 22) 倉岡千郎,太田敬一,杉山実:立木の影響をモデル化した落石の個別要素法による解析,第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集,土木学会,pp.97-100,2000.
- 23) Heidenreich, B.: Small- and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes, Ph.D. thesis n°3059, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH, 2004.
- 24) 上條明洋,音田 奨,桝谷 浩:落石現象における反発係数と摩擦係数に関する基礎実験,構造工学論文集,Vol.47A,1605-1612,2001.3.

付録-II-10-2 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。

2.1 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,硝酸アンモニュウムや過塩素酸アンモニュ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.

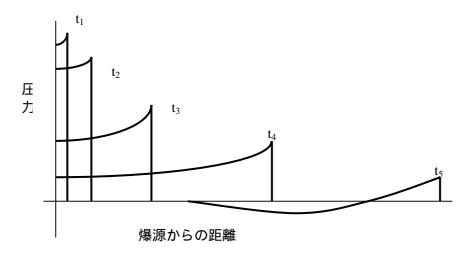
火工品は火薬または爆薬を利用して,爆発反応の生起,伝達等の目的に適合するものをいい,工業雷管,電気雷管,砲爆弾,導火線,伝爆線,コンクリート破砕器,煙火等がある.

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 .

2.2 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圧で高密度で高温度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3000~4000 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, 衝撃波後方での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



付図 2.1 衝撃波の作成

圧)という . 付図 2.1 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 .

2.3 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 .

$$U_{s} = \sqrt{\frac{6p_{s} + 7p_{0}}{7p_{0}}} \cdot a_{0} \tag{2.1}$$

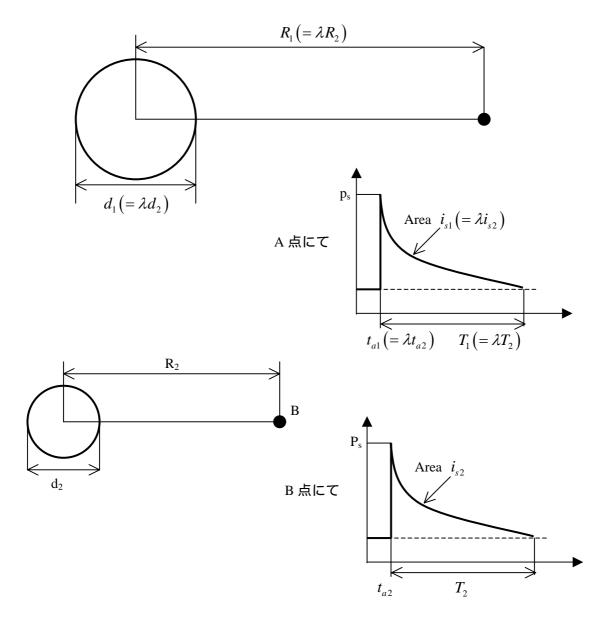
$$\rho_s = \frac{6p_s + 7p_0}{p_s + 7p_0} \cdot \rho_0 \tag{2.2}$$

$$q_s = \frac{5p_s^2}{2(p_s + 7p_0)} \tag{2.3}$$

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.付式(2.3)から, p_0 を101 (kPa)とすると空中爆発での静圧と動圧との関係が付表 2.1 のように得られる.

付表 2.1 空中爆発での静圧と動圧の関係

p_s (kPa)	q_s (kPa)
200	110
350	290
500	518
650	778



付図 2.2 ホプキンソン - クランツの換算距離の原理

表から静圧 500kPa までは動圧は静圧(過圧) p_s より大きくなっている.約 500kPa 以上の静圧(過圧)は動圧よりより大きくなる.

2.4 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.

$$W_{1} \propto d_{1}^{3}$$

$$W_{2} \propto d_{2}^{3}$$

$$\therefore \frac{W_{1}}{W_{2}} = \left(\frac{d_{1}}{d_{2}}\right)^{3}$$

$$\therefore \frac{d_{1}}{d_{2}} = \left(\frac{W_{1}}{W_{2}}\right)^{1/3}$$

$$(2.4)$$

したがって 2 つの爆薬の直径の比を $d_1/d_2=\lambda$ とすると付図 2.2 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 であり , 正圧の持続時間および力積 の比も同様に である .

与えられた過圧が生じる距離は付式(2.5)によって計算できる、例えば

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{1/3} \tag{2.5}$$

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.このことから換算距離 $Z(=R/W^{1/3})$ という概念が導かれる.

これらの原理は付図 2.2 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.

$$p_{s} = \frac{6.7}{Z^{3}} + 1 \quad bar \quad (p_{s} > 10bar)$$

$$p_{s} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^{2}} + \frac{5.85}{Z^{3}} - 0.019 \quad bar \quad (0.1 < p_{s} < 10 \quad bar)$$
(2.6)

ここで,Zは換算距離であり,次式で与えられる.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \tag{2.7}$$

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)に基づいた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、付表 1.2 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.付表 2.3 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.

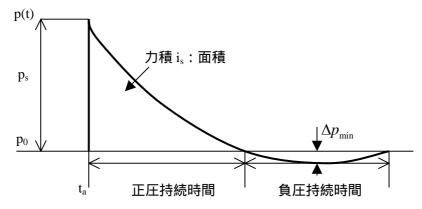
付表 2.2 TNT 等価換算係数 2)

爆薬	単位質量当りのエ	TNT 等価(Q _x /Q _{TNT})
Amatol80/20(80% ammonium nitrate 20% TNT)	ネルギーQ _x (kJ/kg) 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 ,	4520	1.000
7.9%nitrocellulose,		
0.9% antacid, 0.25 water		
60%Nitroglycerin dynamite	2710	0.666

付表 2.3 TNT 等価換算係数 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

代表的な空中爆発の圧力時間関係を示すと付図 2.3 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 b0 ,入射圧(静圧)b1 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 b1 で空気の音速より大きく ,



付図 2.3 標準的な爆発波の圧力時間関係

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付図 2.3 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_s 大気圧になるまで減少する.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.

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a + T_s} p(t)dt \tag{2.8}$$

図に示す p_{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.

$$\Delta p \min = -\frac{0.35}{Z}(Z > 1.6)$$
 (2.9)

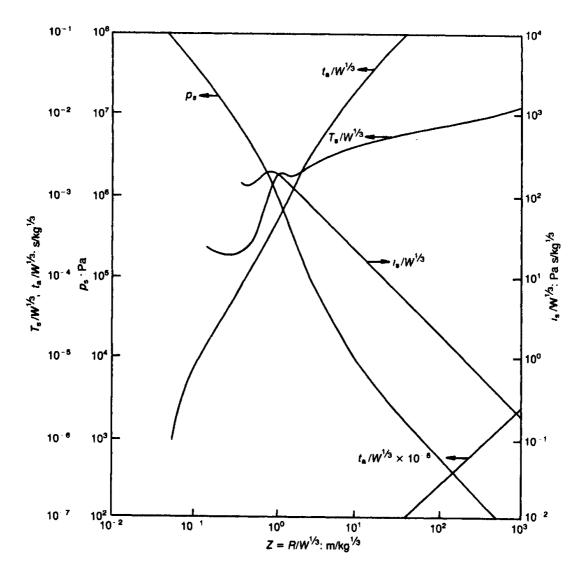
負圧の持続時間は以下のように与えられる.

$$T^{-} = 1.25W^{1/3} \tag{2.10}$$

さらに負圧における力積は以下のように与えられる.

$$i^- \approx i_s \left[1 - \frac{1}{2Z} \right] \tag{2.11}$$

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,付図 2.4 および付図 2.5 に示す.図中 p_s :入射波過圧, t_a :到達時間, T_s : 正圧持続時間, 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 $\overline{U}(=U_s/a_0)$ 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 $\overline{u}(=u_s/a_0)$ 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,爆発波の形状が付式(2.12)によって求められる.



付図 2.4 球状 TNT の空中爆発による入射波パラメータ 2)

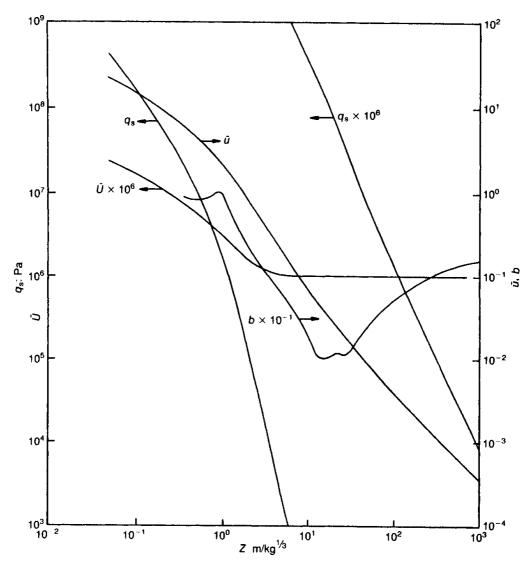
$$p(t) = p_s \left(1 - \frac{t}{T_s} \right) \exp\left(-\frac{bt}{T_s} \right)$$
 (2.12)

2.5 爆発波の相互作用 2)

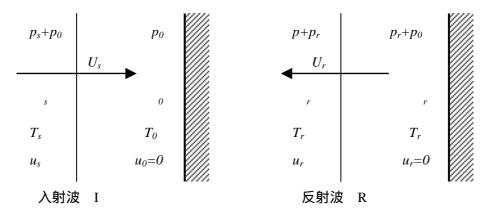
入射波が構造物の周りを取り囲むと波の進行方向と平行でなくなることになる.このとき入射波はより強化されいわゆる反射波となる.反射波とは構造物等に入射波が衝突することによって進行方向とは逆に方向転換する波であり,反射波は常に爆源から同一距離での入射波より大きくなる.付図 2.6 は壁面に作用する反射波の様相を示した.

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.

$$p_r = 2p_s + (\gamma + 1)q_s \tag{2.13}$$



付図 2.5 球状 TNT の空中爆発による他のパラメータ 2)



付図 2.6 表面反射

ここで,動圧 q_s は

$$q_{s} = \frac{1}{2} \rho_{s} u_{s}^{2} \tag{2.14}$$

ここで, sは空気の密度, us 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.

$$u_{s} = \frac{a_{0} p_{s}}{\gamma p_{0}} \left[1 + \left[\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right] \frac{p_{s}}{p_{0}} \right]^{-\frac{1}{2}}$$
 (2.15)

ここで , a_0 は大気圧での音速である . 付式(2.13)を付式(2.14) , (2.15)に代入して整理すると次式をうる .

$$p_r = 2p_s \left[\frac{7p_0 + 4p_s}{7p_0 + p_s} \right] \tag{2.16}$$

ここでは空気の比熱比 =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.

$$p_r = 2p_s \tag{2.17}$$

 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)には付式(2.16)は次式となる.

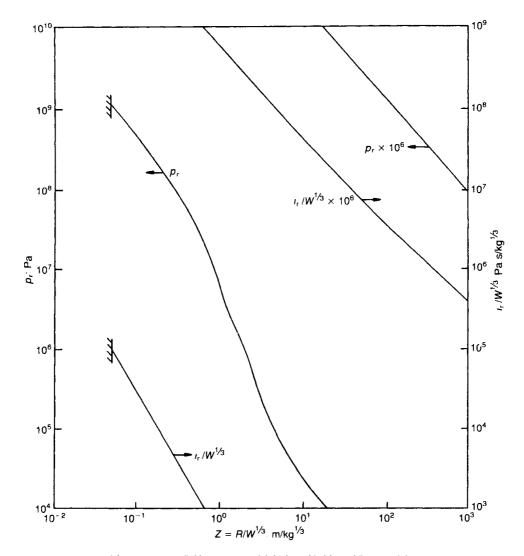
$$p_r = 8p_s \tag{2.18}$$

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.付図 2.7 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 p_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 $1600 kg/m^3$ の密度であるなら,Z の最小値は 0.053 である.

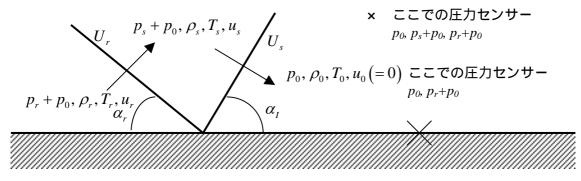
2.6 正規およびマッハ反射

構造物の表面に爆発波が直角に当たったときは入射角 $_{\rm I}$ がゼロである $_{\rm I}$ が $_{\rm 90}$ 度の場合反射は生じず,目標表面には最大過圧 $_{\rm Ps}$ 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 $_{\rm I}$ が $_{\rm 0}$ から $_{\rm 90}$ 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,付図 2.8 に示すような正規反射について述べる.正規反射の場合 , 領域に示した入射波は $_{\rm I}$ の角度を維持したまま伝播していく.入射波の後方の 領域は入射波のパラメータを有している. 領域は入射波が反射している反射波領域であり,反射角 $_{\rm R}$ 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 ($_{\rm I}$ =0)で生じ



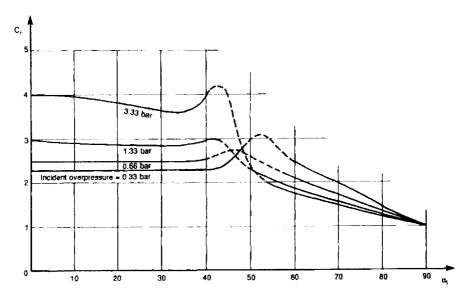
付図 2.7 球状 TNT の反射波と換算距離の関係



付図 2.8 正規反射

た反射波より大きい反射波 p_r になる $_1$ 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 $_r$ は $_1$ とともに増加する.付図 2.9 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.付図 2.10 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.

付図 2.11 に示すように,マッハ反射は 」が入射波の大きさに依存する閾値を超えたときに生じ



付図 2.9 入射波の値に対する反射係数と入射角(低過圧範囲)

る.マッハ反射波は過程が複雑であり,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というようになる.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.これらの過程は付図2.11に示している.付図2.11(a)に示す状況は3つの波頭面を示しており,付図2.11(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,付図2.11(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に増加する.

2.7 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

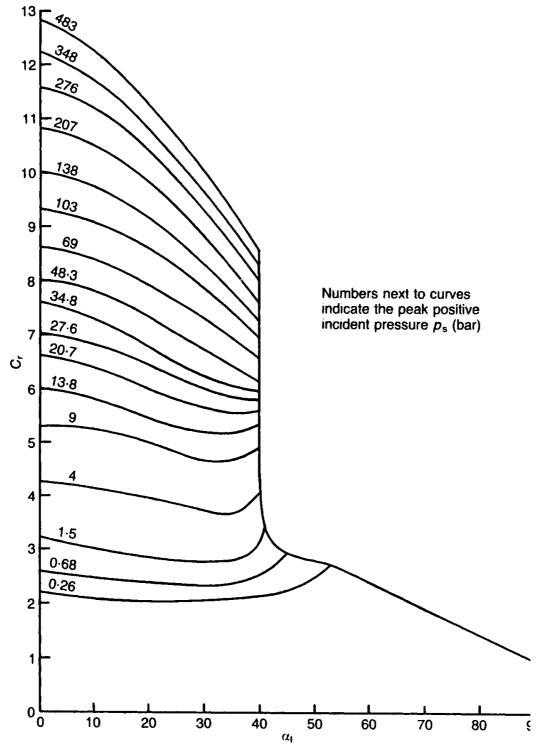
これらの力は爆発波に対する構造物の位置,構造物の大きさ,形状に依存するので非常に複雑になる.そこで,単純化するため,構造物の形状は長方形とし,構造物に作用する爆発波はマッハ反射の領域にあるものと仮定する.

爆風は付図 2.12 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付図 2.12 に示すように極めて複雑な作用をするが,付図 2.13 に示すように単純化して算定する.

2.7.1 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付図2.14のように理想化する.

反射波の過圧の大きさ p, は爆薬量と距離から換算距離を求めて付図 2.7 を用いれば得られる.反射



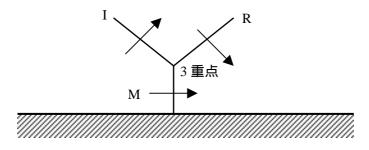
付図 2.10 各入射波における入射角と反射係数の関係

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 .

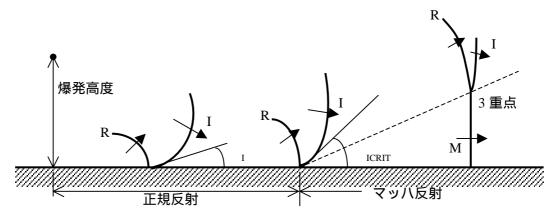
$$p_{st} = p_s + C_d q_s \tag{2.19}$$

$$t_c = 3S/U_s \tag{2.20}$$

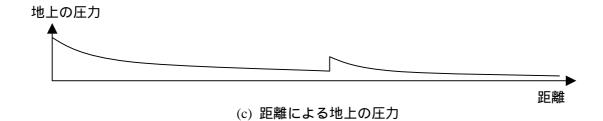
反射波がよどみ圧まで減衰する時間 t_c は入射波の正圧持続時間以下になる .また ,付図 2.14 において ,バイリニアで与えられる圧力時間関係を三角形状に示すため , 点線で示した等価圧力荷重は最



(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



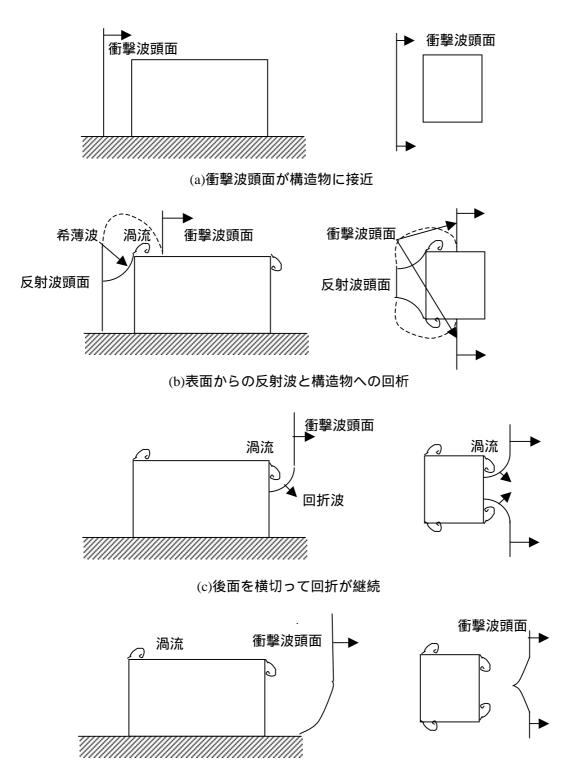
付図 2.11 マッハ反射

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.

$$I_w = 0.5(p_r - p_{st})t_c + 0.5p_{st}T_s$$
 (2.21)

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.

$$t_e = 2I_w / p_r = (T_s - t_c) p_{st} / p_r + t_c$$
 (2.22)



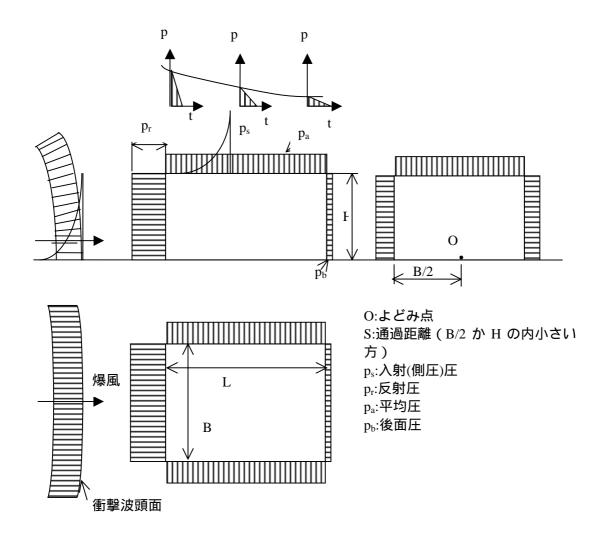
(d)回折終了,衝撃波頭面構造物を越えて通過

付図 2.12 爆風と長方形建物との相互作用 4)(出典:TNO Green Book)

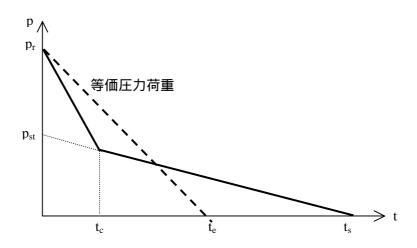
2.7.2 側壁および屋根

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等しい場合は,入射波が建物の後端に達した場合には,



付図 2.13 長方形建物の爆風圧に一般的な配置



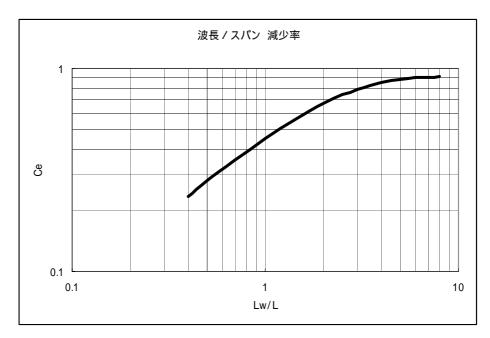
付図 2.14 理想化した前面の爆発荷重

前端の圧力は大気圧に戻ってしまうことになる.

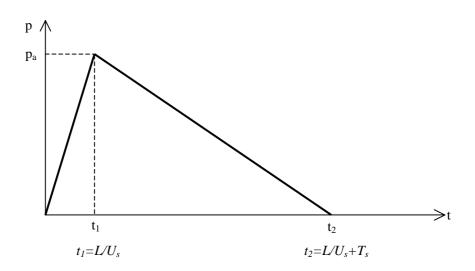
そこで,等価な等分布荷重に置き変えて圧力荷重とする.

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,



付図 2.15 波長 / スパンと減少率の関係



付図 2.16 屋根および側壁の圧力時間関係

次式によって求める.

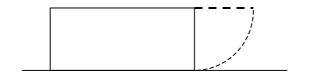
$$p_a = C_e p_s + C_d q_s \tag{2.23}$$

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.

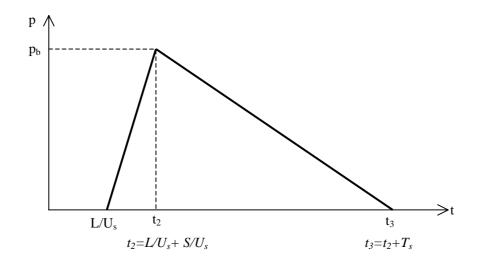
付図 2.15 は波長とスパン長の比と減少率の関係を示したものである.5)

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 40.

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付図 2.16 のようになる.



付図 2.17 後面の壁を屋根に延ばして置き換えたモデル



付図 2.18 単純化された後面の圧力時間関係

2.7.3 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 ,付図 2.17 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 , 付図 2.18 に示したとおりであり , p_b は付式 (2.23) 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) PD Smith, JG 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