

活火山における退避壕等の充実に向けた手引き

〈 参考資料 〉

平成 27 年 12 月

内閣府（防災担当）

目次

1. 火山の噴火に伴う噴石の飛散について	1
(1) 2014 年 9 月に発生した御嶽山の噴火に関する資料	1
(2) 噴石の飛散に関する資料	5
(3) 大きな噴石の火山ハザードマップ作成手法	6
2. 退避壕等の設置状況等について	7
(1) 常時観測 47 火山における避難施設の整備状況に係る緊急調査結果	7
(2) 退避壕等の設置事例	8
(3) 整備に要する費用の例	17
3. 構造物の衝突耐力について	19
(1) コンクリートの衝突耐力	19
(2) 鋼製退避壕の耐力	39
(3) 既存の山小屋等における屋根の衝突強度の向上の検討	41
(4) 噴石衝突模擬実験	42
4. 関係法令・諸手続等	57
(1) 活動火山対策特別措置法（抜粋）	57
(2) 自然公園法（抜粋）	60
(3) 国有林野の管理経営に関する法律（抜粋）	64
(4) 森林法（抜粋）	65
(5) 文化財保護法（抜粋）	68
(6) 特別史跡名勝天然記念物又は史跡名勝天然記念物の現状変更等の許可申請 等に関する規則（抜粋）	69
(7) 消防防災施設整備費補助金交付要綱（抜粋）	71
(8) 地方債同意等基準運用要綱（抜粋）	73
(9) 主な財政措置のイメージ	74
用語解説	75
参考資料	77

1. 火山の噴火に伴う噴石の飛散について

(1) 2014年9月に発生した御嶽山の噴火に関する資料

2014年9月に発生した御嶽山の噴火において、噴出物や噴石の分布とその堆積状況等について、2015年8月19日から20日にかけて、火山噴火予知連絡会御嶽山総合観測班地質チーム(東京大学地震研究所、産業技術総合研究所、山梨県富士山科学研究所、帝京平成大学、常葉大学の合同チーム)により、現地調査が実施された。

以下にその調査結果を示す。

①噴石密度について

現地調査の結果、飛散した噴石の密度が高かった地域の分布を図1-1に示す。

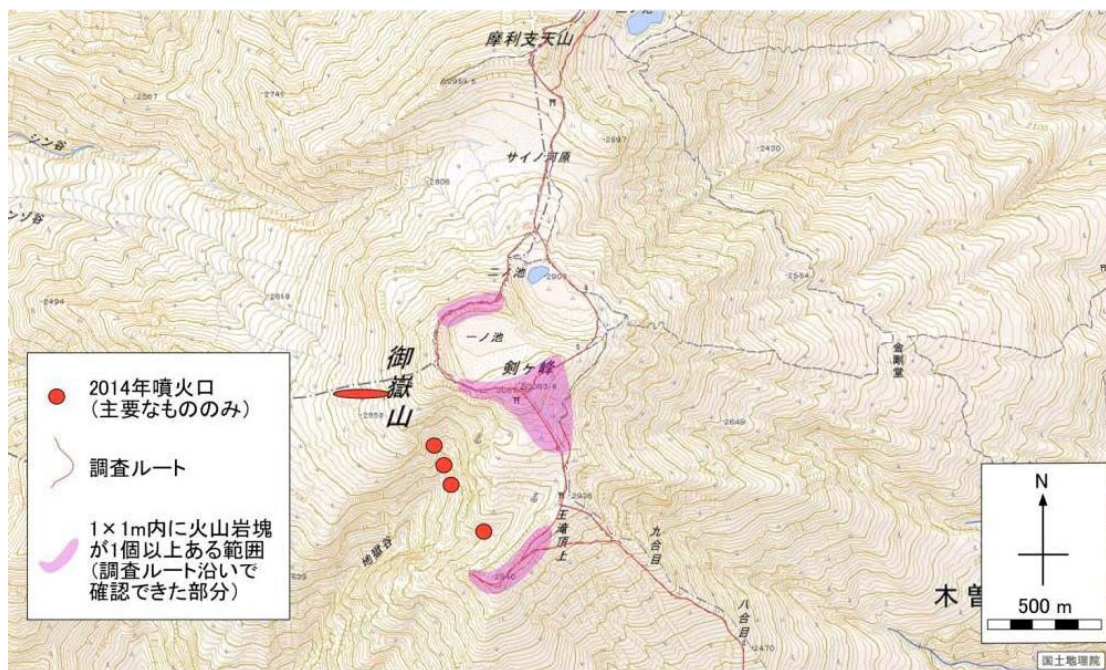


図1-1 噴石密度の高かった地域(調査ルート沿いで確認できた範囲のみ)

②山小屋の屋根を貫通した噴石の分布密度

山小屋の屋根を貫通した噴石の個数とその粒径の調査結果を示す。

表1－1 噴石による山小屋等の損傷状況

地点	屋根面積 (m ²)	屋根貫通個数 (個)	噴石の 平均粒径 (cm)	貫通密度 (個／100m ²)	火口からの距離 (km)
御嶽神社頂上奥社	65	12	26	18.5	0.5
御嶽頂上山荘	160	16	26	10.0	0.5
御嶽剣ヶ峰山荘	420	20	計測できず	4.8	0.5
王滝頂上山荘	440	5	19	1.1	0.6
二ノ池本館	390	1	18	0.3	1.0
二ノ池新館	610	2	17	0.3	1.0

- ・屋根の面積は、空中写真をもとに計測した。垂直方向に投影した概算値。
- ・貫通個数は、噴石の貫通により穴が開いている箇所をカウントした。現地で確認できない箇所については、報道写真等から判読した。
- ・火口からの距離は、地獄谷右岸の火口中心と山小屋の中心との距離を示す。

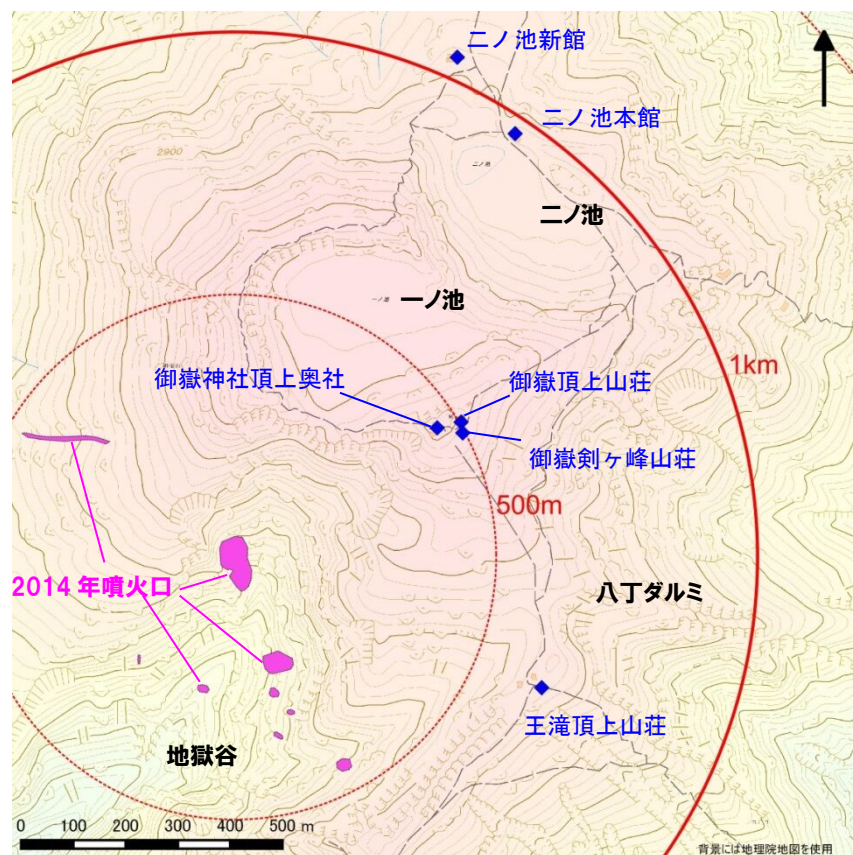


図1－2 山小屋の位置と火口からの距離(火口は国土地理院公表データを使用)

※火口からの距離は、地獄谷右岸の火口中心と山小屋の中心との距離を示す

③山小屋等の損傷状況

現地で確認された、噴石による山小屋等の被害状況を示す。



図1－3 御嶽神社頂上奥社外壁の被害状況



図1－4 御嶽剣ヶ峰山荘屋根の被害状況



図1-5 御嶽頂上山荘の被害状況



図1-6 二ノ池本館の噴石落下箇所(斜めに突き抜けている)



図1-7 二ノ池本館の噴石落下部位の小屋内部(2枚目の屋根で噴石停止)

（２）噴石の飛散に関する資料

噴火活動が頻繁に観測される桜島では、気象庁鹿児島地方気象台が遠望カメラによる観測により、大きな噴石（50cm 以上）の到達距離と個数を観測・記録している。

記録からヒストグラムを作成すると、飛散した大きな噴石のほとんどは、山頂から約 2 km 以内に落下していることが見て取れる。また、山頂から約 1 km 周辺に到達する噴石が特に多いことも確認できる。

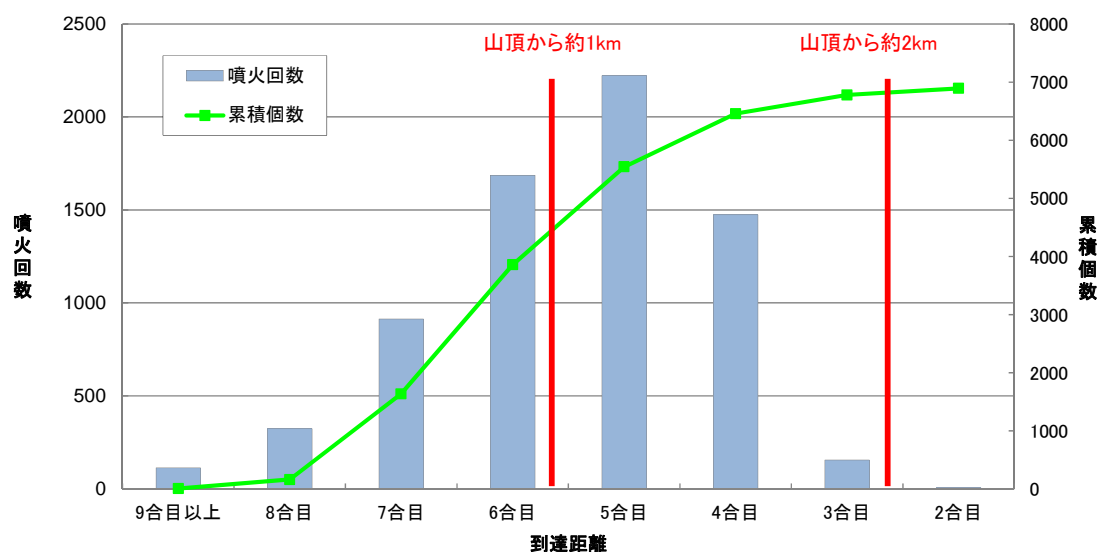


図1－8 桜島における大きな噴石の到達距離別ヒストグラム(桜島爆発原簿 1955～2015.7)

注記：鹿児島地方気象台が観測・記録した 1955 年から 2015 年 7 月までのデータより作成。なお、本データは鹿児島地方気象台の遠望カメラによる観測結果のうち、到達距離が明らかなもののみを抽出した。

(3) 大きな噴石の火山ハザードマップ作成手法

大きな噴石（直径 50cm 以上）が飛散する際の軌跡は、比較的単純な弾道計算で再現される。噴火時は、影響が及ぶ範囲も火口を中心に全方向に飛散し、等距離に広がるものと予想される。このことから、大きな噴石を対象とした火山ハザードマップは、災害要因実績図に記録された大きな噴石の落下地点に関する情報を基に、最大到達距離を決定し、火口を中心とする円を描画することで作成することができる。ただし、噴火様式によって、大きな噴石の到達距離は異なることに留意する必要がある。

なお、火山ハザードマップの作成にあたり、「火山防災マップ作成指針」（H25.3 内閣府他）を参考とすることができ、作成手法について同指針よりの抜粋を示す。

(A) 災害要因実績図を利用した大きな噴石の火山ハザードマップの作成手法

- ① 災害実績を踏まえると、水蒸気噴火やプリニー式、ブルカノ式噴火が想定される火山では、火口から 2 km 以内の範囲を最も危険度が高い区域と考えることができる。また、頻度は比較的低いが、爆発力の大きなマグマ噴火に対しては、大きな噴石は火口から 4 km まで届くことが報告されており、火口から 4 km 以内の範囲を危険度が高い区域と考えることができる。

また、小規模な水蒸気噴火やストロンボリ式噴火が想定される火山では、火口から 1 km 以内の範囲を最も危険度が高い区域と考えることができる。

- ② 当該火山の災害実績がある場合は、その実績も参考にして、大きな噴石の影響が及ぶ範囲を検証する。

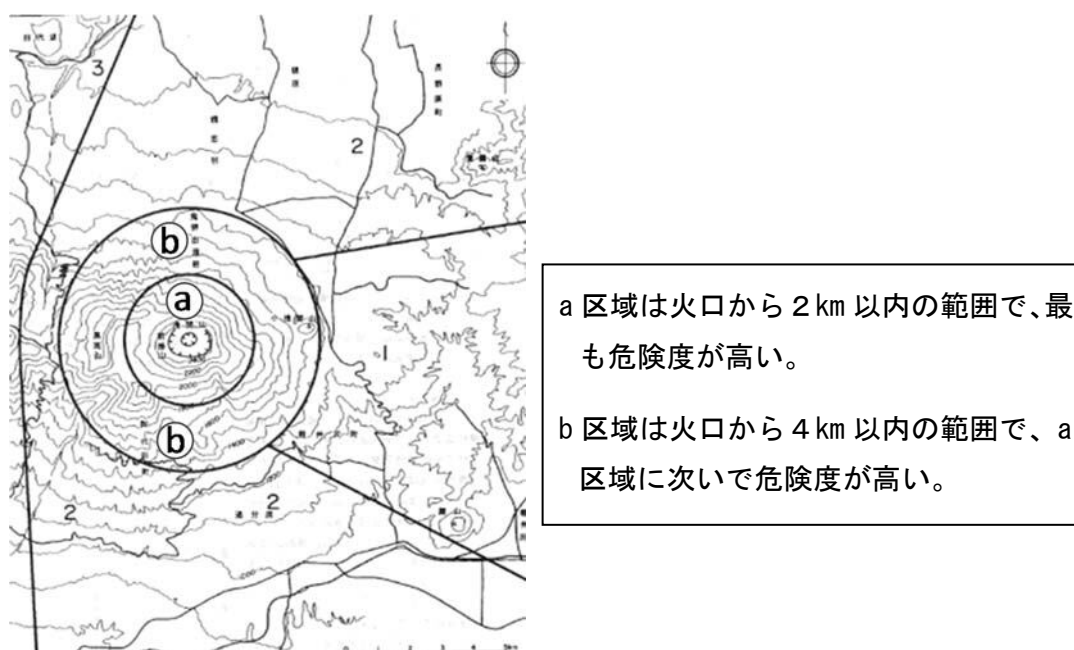


図1-10 大きな噴石の影響が及ぶ範囲を示す火山ハザードマップ(浅間山の事例)

2. 退避壕等の設置状況等について

(1) 常時観測 47 火山における避難施設の整備状況に係る緊急調査結果

御嶽山の噴火を受け、総務省消防庁が実施した常時観測 47 火山における避難施設の整備状況の調査結果を示す。

表2-1 常時観測 47 火山における避難施設の整備状況に係る緊急調査結果
(平成 26 年 10 月現在 (消防庁調査を元に一部加筆))

	火山名	関係都道府県	避難施設整備状況							
			退避壕				退避舎			
			有無	施設数	設置主体	施設規模 (面積※1)	有無	施設数	設置主体	施設規模 (面積※1)
1	アトサヌプリ	北海道	×				×			
2	雌阿寒岳	北海道	×				×			
3	大雪山	北海道	×				×			
4	★十勝岳	北海道	×				×			
5	樽前山	北海道	×				×			
6	倶多楽	北海道	×				×			
7	★有珠山	北海道	○	1	民間(ロープウェイ運営会社)	23㎡	×			
8	北海道駒ヶ岳	北海道	×				×			
9	恵山	北海道	×				×			
10	岩木山	青森県	×				×			
11	秋田焼山	秋田県	×				×			
12	岩手山	岩手県	×				×			
13	秋田駒ヶ岳	秋田県・岩手県	×				×			
14	鳥海山	秋田県・山形県	×				×			
15	栗駒山	秋田県・岩手県 宮城県	×				×			
16	蔵王山	山形県・宮城県	×				×			
17	吾妻山	山形県・福島県	×				×			
18	安達太良山	福島県	×				×			
19	磐梯山	福島県	×				×			
20	那須岳	福島県・栃木県	×				×			
21	日光白根山	栃木県・群馬県	×				×			
22	草津白根山	群馬県・長野県	○	13	4=群馬県 9=市町村	19~128㎡	×			
23	浅間山	群馬県・長野県	○	4	市町村	10~20㎡	×			
24	新湯焼山	新潟県・長野県	○	1	市町村	20㎡	×			
25	焼岳	長野県・岐阜県	×				×			
26	乗鞍岳	長野県・岐阜県	×				×			
27	御嶽山	長野県・岐阜県	×				×			
28	白山	岐阜県・石川県 福井県	×				×			
29	富士山	山梨県・静岡県 神奈川県	×				×			
30	箱根山	神奈川県・静岡県	×				×			
31	伊豆東部火山群	静岡県	×				×			
32	★伊豆大島	東京都	○	11	市町村	10~60㎡	○	1	東京都	120㎡
33	新島	東京都	×				×			
34	神津島	東京都	×				×			
35	★三宅島	東京都	×				○	1	市町村	2710㎡
36	八丈島	東京都	×				×			
37	青ヶ島	東京都	×				×			
38	硫黄島	東京都	×				×			
39	鶴見岳・伽藍岳	大分県	×				×			
40	九重山	大分県	×				×			
41	★阿蘇山	熊本県	○	16	阿蘇市、 南阿蘇村	13~53㎡	×			
42	★雲仙岳	長崎県	○	1	長崎県	124㎡	○	1	長崎県	170㎡
43	★霧島山	宮崎県・鹿児島県	○	7	市町村	8~29㎡	×			
44	★桜島	鹿児島県	○	37	市町村	10~21㎡	○	20	市町村	117㎡
45	薩摩硫黄島	鹿児島県	×				×			
46	口永良部島	鹿児島県	○	17	市町村	11㎡	×			
47	諏訪之瀬島	鹿児島県	○	3	市町村	10㎡	×			
合計			○:11火山 ×:36火山	111	都道府県:5 市町村:105 民間:1		○:4火山 ×:43火山	23	都道府県:2 市町村:21	
★:活動火山対策特別措置法第2条第1項の規定により、避難施設緊急整備地域が指定されている8火山(霧島山は新燃岳のみ)			○:6火山 ×:2火山	73	都道府県:1 市町村:71 民間:1		○:4火山 ×:4火山	23	都道府県:2 市町村:21	

※1 面積については、建面積、延面積、避難面積等を記載

(2) 退避壕等の設置事例

各活火山における退避壕等の整備事例について示す。

○浅間山の事例



浅間山火山館
(建物左下が噴火対策用シェルター)

○桜島の事例



有村溶岩展望所駐車場の退避壕



有村溶岩展望所の退避壕



バス停を兼ねる退避壕



道路沿いの仮設退避壕

○霧島山の事例



大浪池登山道入り口の退避壕



大浪池登山道入り口の退避壕内掲示



高千穂河原の退避壕



湯之野の退避壕

○阿蘇山の事例



退避壕（箱形）（１）



退避壕（箱形）（２）



退避壕（ドーム型）（１）



退避壕（ドーム型）（２）

○草津白根山の事例



登山道脇の埋め込み型退避壕



埋め込み型退避壕内部



レストハウス駐車場の退避壕



カルバートを利用した退避壕

なお、紹介した退避壕の整備事例のうち、下記事例の図面は次項以降の通りである。

設置事例①	桜島（鹿児島市）	11 頁
設置事例②	口永良部島（屋久島町）	12 頁
設置事例③	浅間山（小諸市）	13 頁
設置事例④	霧島山（霧島市）	14 頁
設置事例⑤	霧島山（霧島市）	15 頁
設置事例⑥	霧島山（霧島市）	16 頁

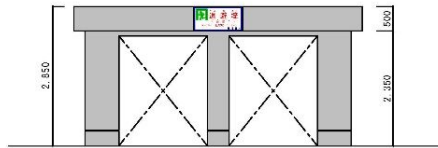
〈設置事例①：桜島（鹿児島市）〉

外部仕上表

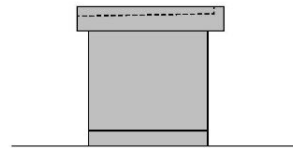
屋根	防水コンクリート金2打押え
構	コンクリート打ち放しの上、外装薄塗材E
壁	コンクリート打ち放しの上、複層塗材E
巾木	コンクリート打ち放し補修
備考	銘板 500×1,000 1箇所

内部仕上表

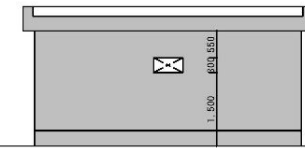
天井	コンクリート打ち放しの上、外装薄塗材E
壁	コンクリート打ち放しの上、複層塗材E
巾木	コンクリート打ち放し補修



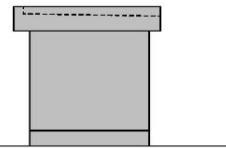
A面



B面

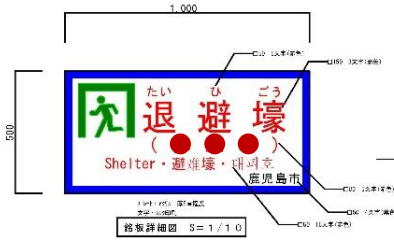


C面

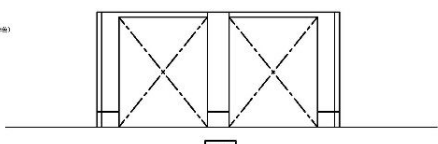


D面

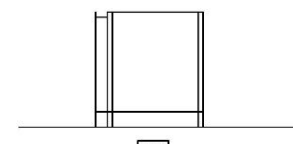
立面図 S=1/50



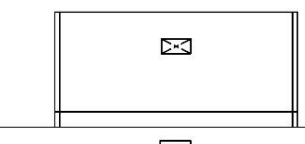
銘板詳細図 S=1/10



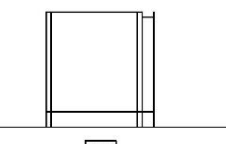
A面



B面

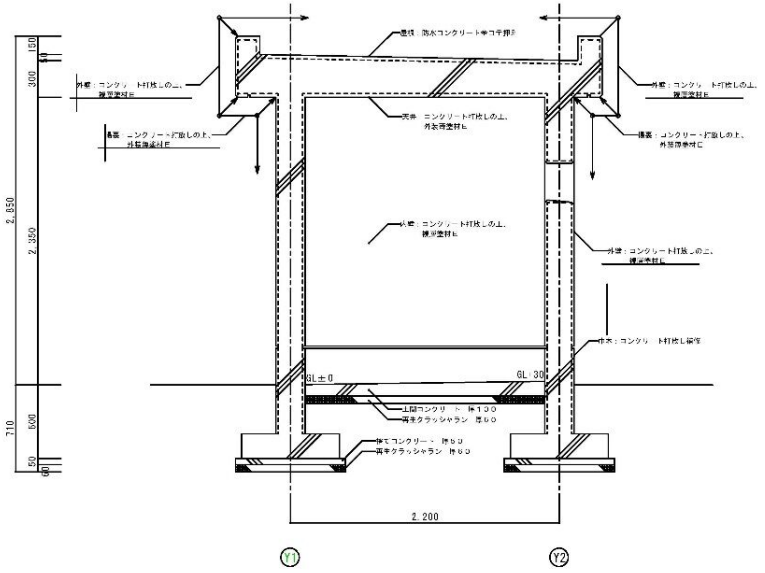


C面



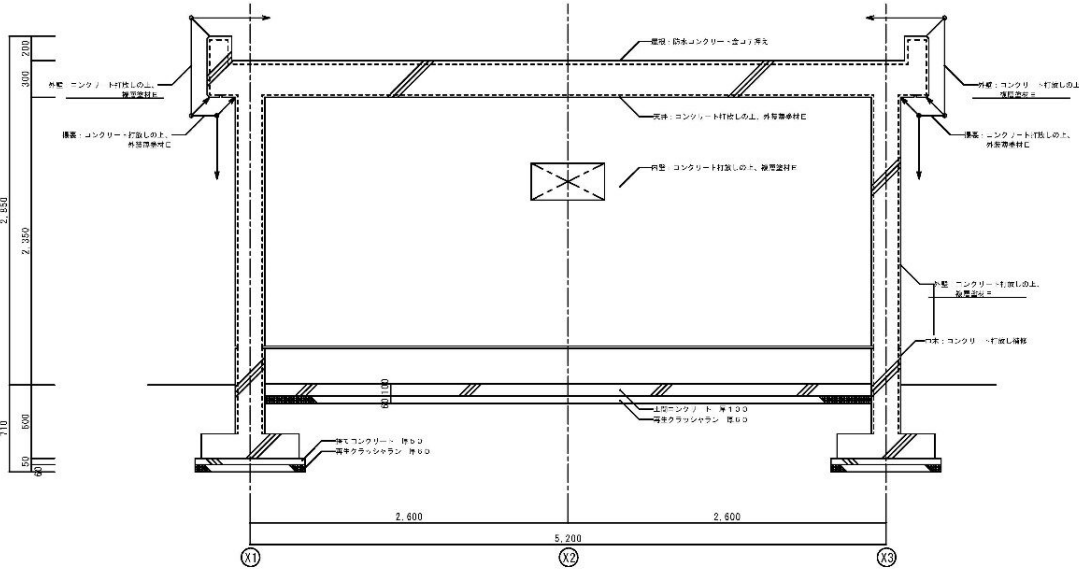
D面

展開図 S=1/50



Y1

Y2



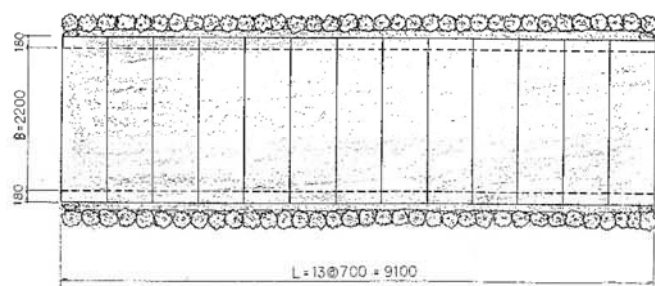
X1

X2

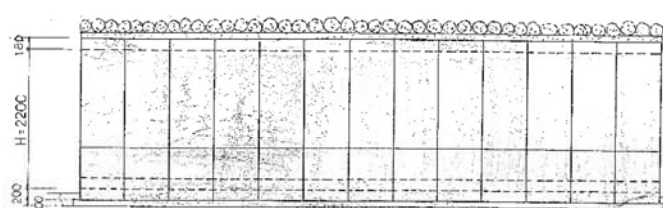
X3

断面図 S=1/20

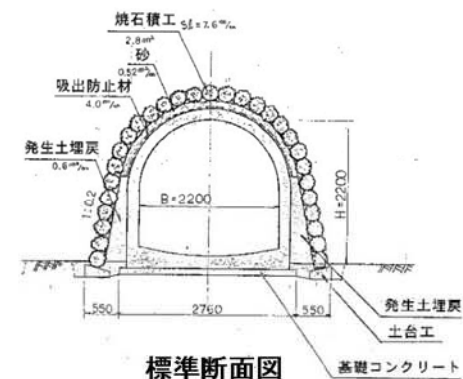
〈設置事例③：浅間山（小諸市）〉



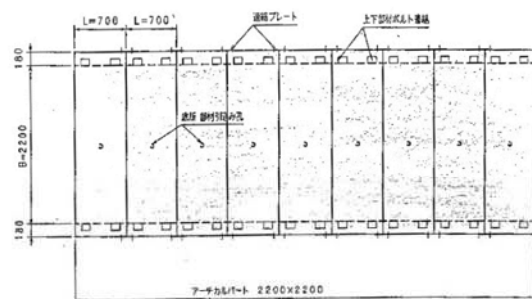
平面図



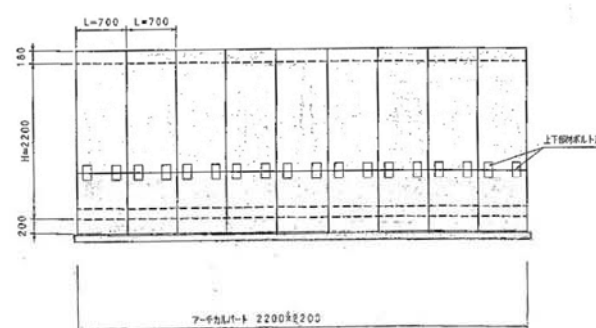
側面図



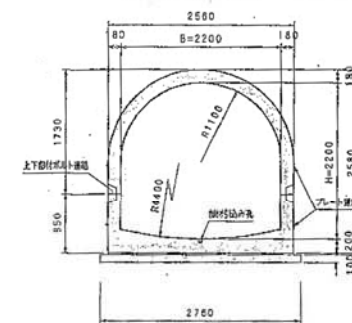
標準断面図



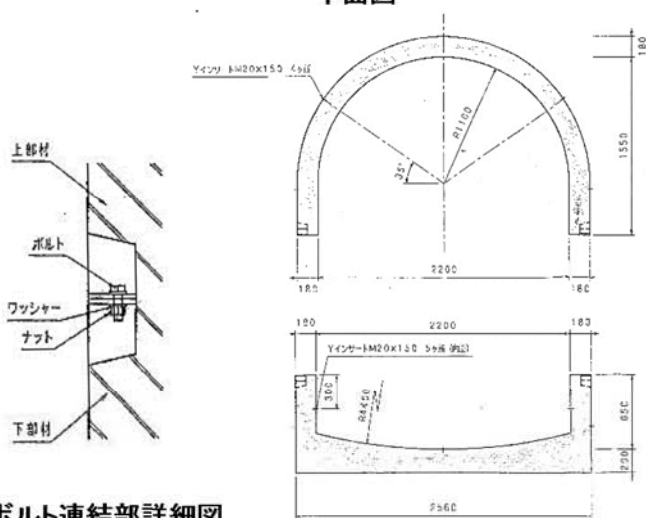
平面図



側面図

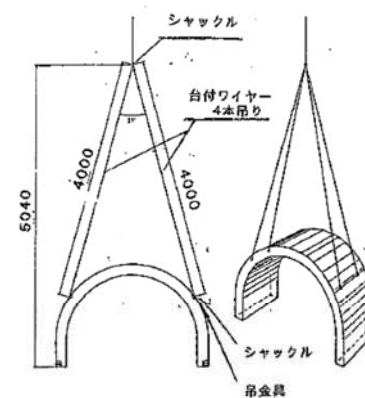


標準断面図

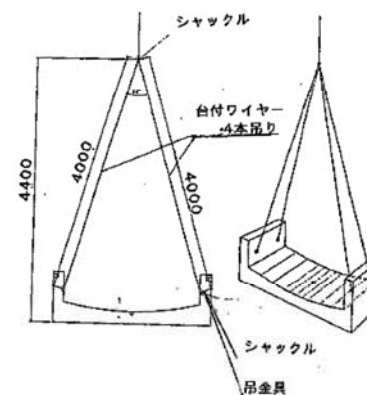


ボルト連結部詳細図

正面図



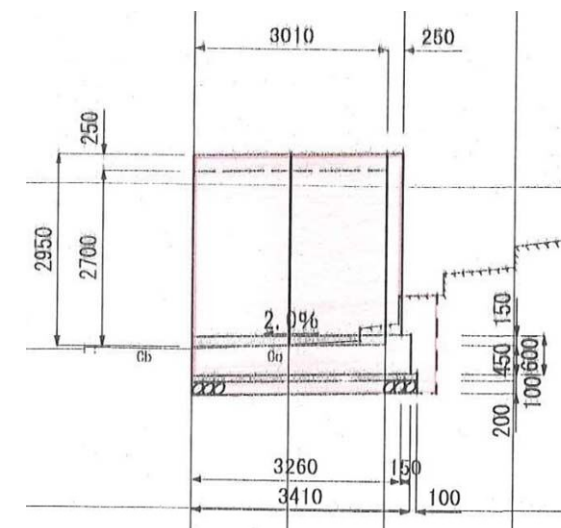
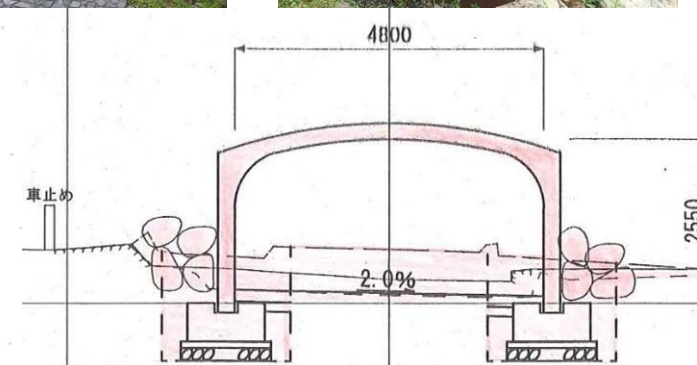
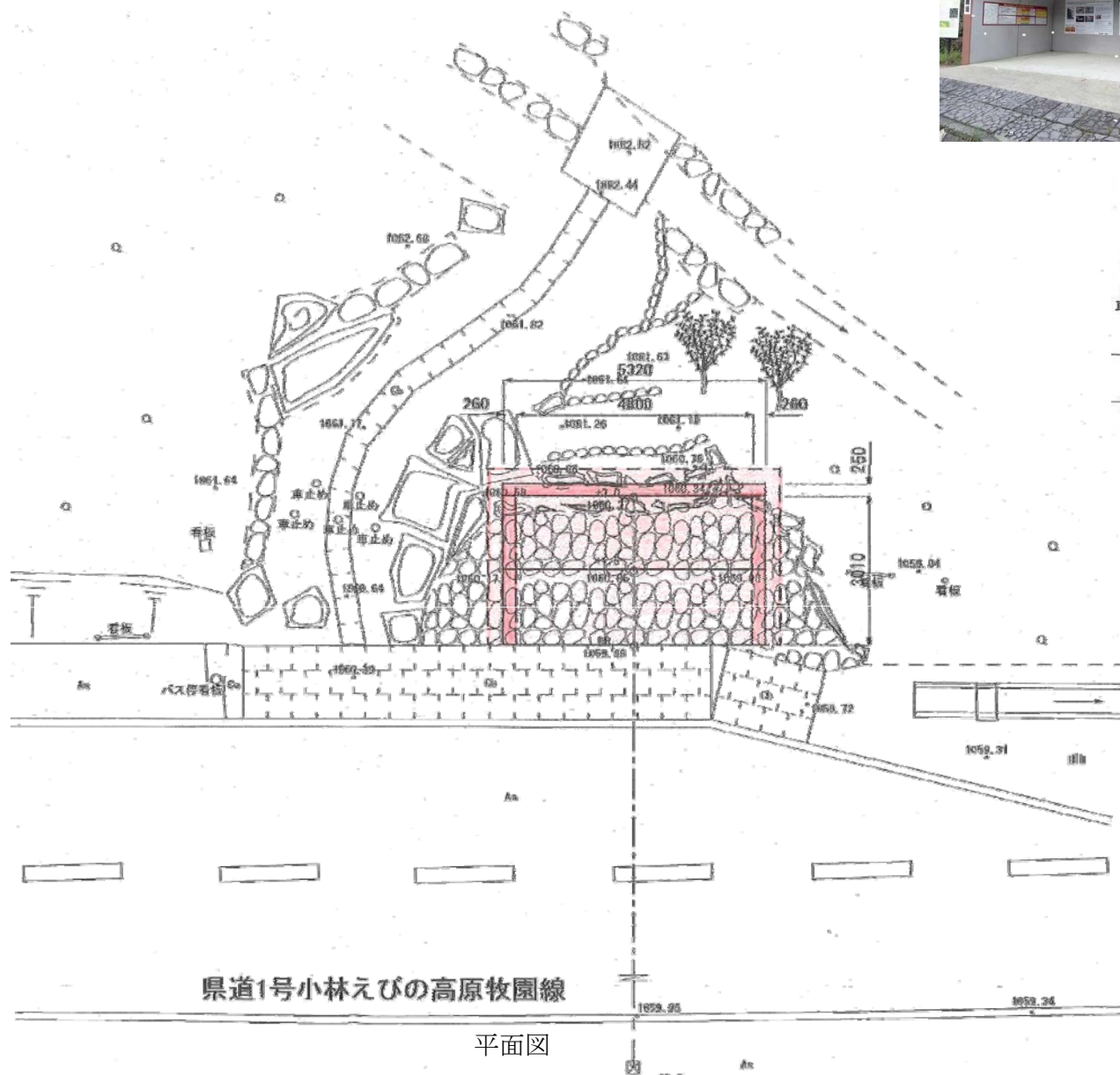
上部材



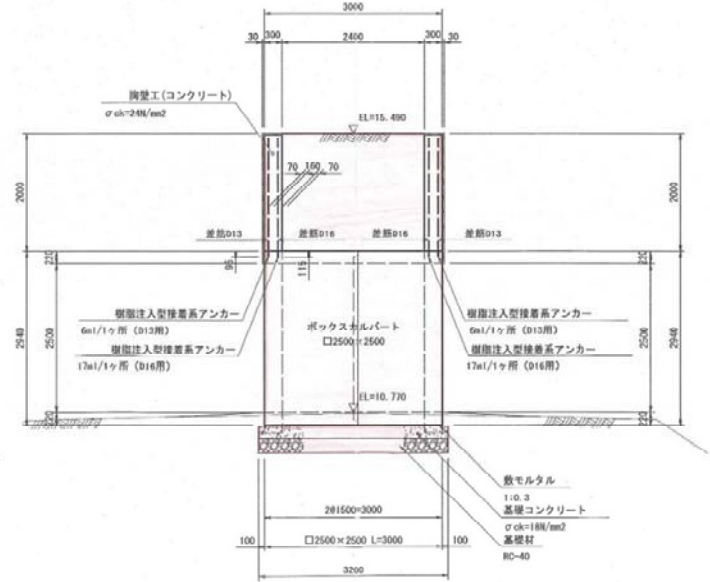
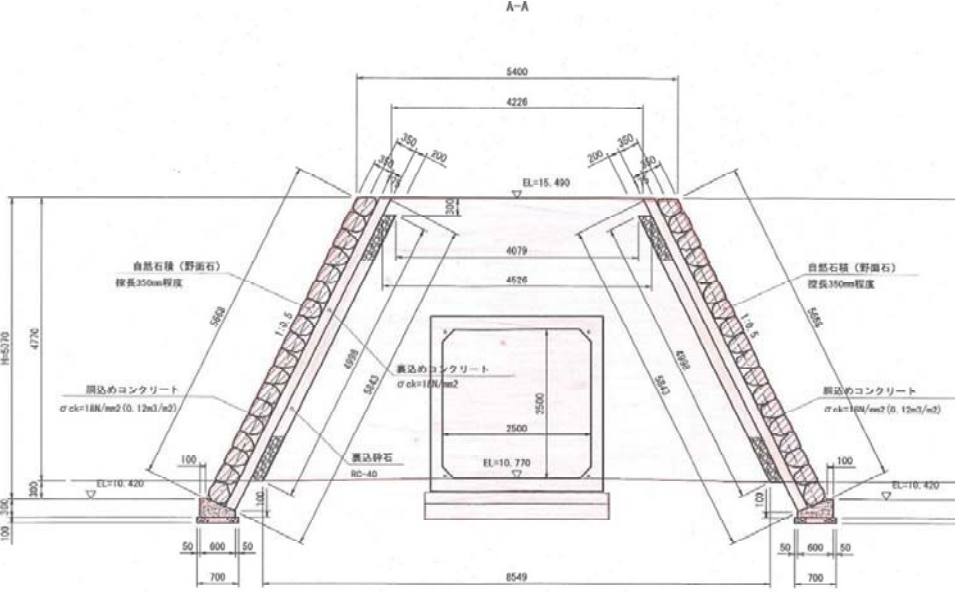
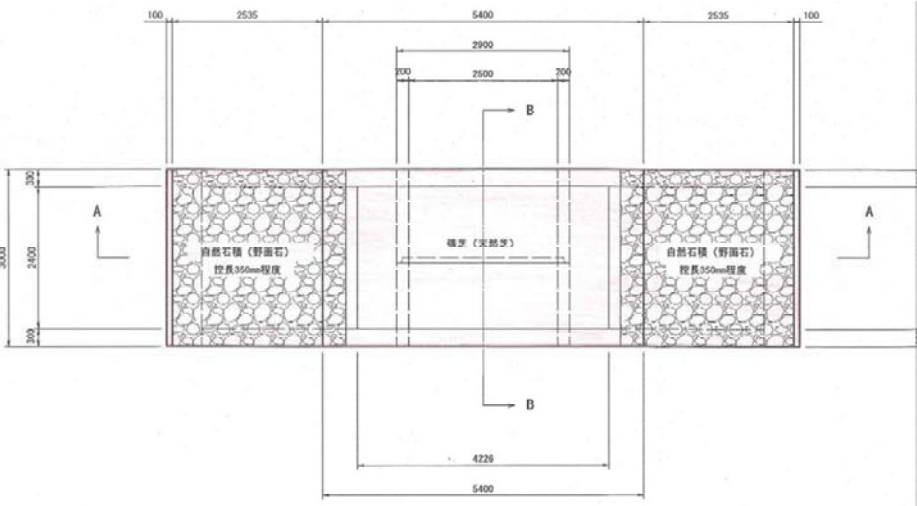
下部材

2 分割アーチカルハート構造
(2200×2200×700)
上部材 1461kg
下部材 1484kg

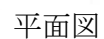
〈整備事例④：霧島山（霧島市）〉



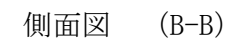
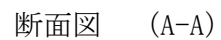
〈設置事例⑤：霧島山（霧島市）〉



16



種別	規格	数量	単位
掘削	掘削積込	605.2	m ³
床掘	W < 2 m	4.1	m ³
埋戻し	W1 < 1 m	3.7	m ³
埋戻し	W2 ≥ 4 m	25.2	m ³
盛土 (W ≥ 4 m)	敷き均し締固め	451.9	m ³
残土処理	他現場流用	75.1	m ³
切土法面整形	砂質土	4.4	m ²
ボックスカルバート	2500×2500 L = 6.00m	1.0	式
石積工(自然石)	控長350mm程度	1.0	ヶ所
U型擁壁工	L = 1.36m	1.0	ヶ所
舗装版切断	アスファルト版	16.2	m
舗装版破碎	アスファルト版	10.3	m ²
歩道舗装復旧	アスファルト舗装	19.8	m ²
既設石積取壊し		15.0	m ²



(3) 整備に要する費用の例

実際に整備された退避壕の整備費用の例を示す。

①既設退避壕の整備費用

既設の退避壕の整備費用の例は以下の通りである。

表2-2 既設退避壕の整備費用の例(1基あたり)

施設概要	設置 年度	事業費 または整備費	面積	資材 運搬方法	備考
鉄筋コンクリート造 平屋建て退避壕	H26	約 400 万円	11.44m ² (B2.2m×L5.2m)	車両	現場打ちコンクリート 生活道路沿いに設置
鉄筋コンクリート造 退避壕	H4	約 3,200 万円	124m ²	車両	ロープウェイ停留場(低標高側)に 隣接して設置
ボックスカルバート (高さ 2m 程度)	H13	約 260 万円	20m ²	車両	登山道入り口に設置
ボックスカルバート 及び盛土	H25	約 600 万円	7.5m ² (B2.5m×L3m)	車両	緩衝材として上部に砂を盛土 (厚さ 2m) <u>15 ページの図面に対応</u>
ボックスカルバート 及び盛土	H25	約 700 万円	15m ² (B2.5m×L6m)	車両	緩衝材として上部に砂を盛土 (厚さ 2m) <u>16 ページの図面に対応</u>
アーチカルバート	H25	約 140 万円	8m ² (B2m×L4m)	車両	同規模の物を合計 4 基設置
アーチカルバート (コンスパン工法)	H25	約 600 万円	12.24m ² (B2.55m×L4.8m)	車両	登山道入り口に設置 <u>14 ページの図面に対応</u>
2 分割アーチカルバート (部材幅 0.7m)	H19	約 2,600 万円	20.02m ² (B2.2m×L9.1m)	ヘリ 約 1,700 万円	山頂付近に設置 外周は焼石積み <u>13 ページの図面に対応</u>

②ヘリコプターによる資材運搬

退避壕を整備する場合、火山によっては陸路による搬送経路が確保できないため、ヘリコプターによる空輸が必要となる。空輸例として、カルバート部材品を山頂付近へ搬送する場合の費用の試算について以下に示す。

●飛行条件

- ・火山山麓の臨時ヘリポート（空き地等）から重量約 1.5t のカルバート部材 10 個を山頂まで吊り上げることを想定
- ・拠点ヘリポートから臨時ヘリポートまでの飛行時間を約 2 時間と想定
- ・臨時ヘリポートから山頂までの運搬時間を約 1 時間と想定

●作業諸元

- ・作業期間：1 日あたりの部材搬送を 5 個として、2 日間を想定
- ・使用機体：アエロスパシアル社 AS332L（スーパーピューマ）を想定
- ・飛行経路：1 日目 拠点ヘリポート～臨時ヘリポート～山頂（5 往復）～拠点ヘリポート
2 日目 同上

●概算費用試算

①拠点ヘリポートから臨時ヘリポートまでの飛行費用

往復（約 2 時間）× 1.250 千円/時間 × 2 日 = 5,000 千円

②臨時ヘリポートから山頂までの運送費用

1 回の搬送（約 1 時間）× 1.350 千円/時間 × 5 回 × 2 日 = 13,500 千円

③作業にかかる諸経費（事前調査費、ヘリポート設置費用、出張費など）

一式 1,500 千円

想定条件での概算運搬費・・・約 20,000 千円

●その他留意点

- ・運搬に使用するヘリコプターの機種により、つり下げ可能な重量は変動する。
- ・高度が高くなり、空気密度が薄くなることでヘリコプターの性能が低下するため、標高によってはつり下げることの重量に制限が発生する。
[参考：アエロスパシアル社 AS332L（つり下げ能力約 3.5t）の場合、富士山山頂（標高 3,775m、外気温 0℃）で 0.63t 程度、標高 2,500m（外気温 0℃）で 1.6t 程度の性能となる]
- ・カルバート部材を吊り下げる時の固定金具の着脱は、運航会社の社内教育を受けたもの（通常はヘリコプターに同乗する整備士）が行わなければならない。
- ・高高度を長時間飛行する場合には燃料消費が激しくなるため、費用が高額となる場合もある。
- ・山岳地帯特有の気流条件等からヘリコプターの使用が困難となる場合もある。

3. 構造物の衝突耐力について

(1) コンクリートの衝突耐力

1) はじめに

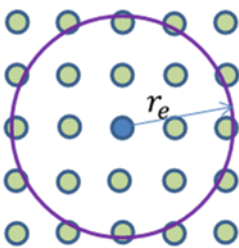
噴石から身を守るための簡易な退避壕としてボックスカルバートが用いられた場合を想定し、噴石衝突に対して鉄筋コンクリート造のボックスカルバートがどのくらいの耐力を有しているか、簡易な検討を行った。

噴石がコンクリート版に高速で衝突した場合、既往研究等から裏面剥離や貫通が生じることが知られており、その可能性の有無は簡易な経験式を用いて評価可能であるが、剥離片の大きさやその飛散速度等は不明である。今回の検討では、粒子法と個別要素法の連成解析を用いて噴石衝突時の状況をシミュレーションすることで、剥離片の飛散エネルギー等も含めて評価し、噴石衝突に対するボックスカルバートの健全性について検討する。また、剥離片の飛散防止策や頂版上に緩衝材として敷砂を敷いた場合の衝撃吸収効果についても検討する。

2) 計算手法の概要

本検討では、コンクリート版の変形と破壊を考慮するために粒子法（SPH 法）を用いる。この手法は、連続体を有限要素法のようなメッシュでなく、粒子の集合体としてモデル化するため、有限要素法等で取り扱いが困難な大変形を伴う破壊を比較的容易に取り扱うことができる手法である。SPH 法による離散化方法の概要を図3-1に示す。

なお、敷砂の挙動については砂粒子の大きな移動が考慮可能な個別要素法を用いる。敷砂の動きとコンクリート版の変形・破壊を同時に考慮する必要があるケースでは粒子法と個別要素法の連成解析を実施する。計算プログラムは、(株) 構造計画研究所で開発を行っている DYBECS を使用する。



SPH法では任意座標の物理量を影響半径内の計算点物理量の重み付き和で表現します。

$$\phi(x) \approx \langle \phi_i \rangle = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \phi_j W(r_{ij}, h)$$

※ m_j / ρ_j は粒子片 j の支配体積

重み分布を表す内挿関数は微分可能であり、偏微分方程式は内挿関数を微分することで離散化できます。

$$\nabla W(r_{ij}, h) = \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}} \frac{\partial W(r_{ij}, h)}{\partial r}$$

連続体の運動量保存式：
$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \nabla \sigma + \mathbf{F} = \sum_j \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} (\sigma_i + \sigma_j) \nabla W(r_{ij}, h) + \mathbf{F}$$

※ \mathbf{v} は任意点の速度, σ はコーシー応力, \mathbf{F} は外力項

図3-1 SPH 法による離散化方法の概要

3) 検討ケース

検討ケースは以下の3種類とした。落石に対する緩衝材としてよく用いられる敷砂をボックスカルバートの上に載せた場合の衝撃吸収効果についても検討を行う。

1. 直径 30cm の噴石に対するボックスカルバート（敷砂無）の耐力検討
2. 直径 50cm の噴石に対するボックスカルバート（敷砂有）の耐力検討
3. 直径 50cm の噴石に対する敷砂の衝撃吸収効果の確認

検討ケース1.と2.では、ボックスカルバート頂版の破壊シミュレーションを実施するが、以下の3つの観点から評価を行う。

- a. 裏面剥離・貫通の可能性
- b. 飛散する剥離片の運動エネルギーの想定
- c. 貫通、または、裏面剥離後の慣性力による頂版の落下可能性

なお、噴石に対する衝突耐力や敷砂等の緩衝材による緩衝効果の評価等に対する研究は十分に成熟しておらず、その設計の考え方についても確立されていない状況にある。そのため、可能な限り安全側の評価になるように検討方針を選定する。

a. については、計算時間等の観点から簡易な検討とし、二次元の計算モデルを用いて解析を実施する。二次元の解析では奥行方向に衝突エネルギーが拡散しないため、コンクリートが過剰に破壊したり、敷砂による衝撃緩衝効果が過小に評価される傾向があることから、コンクリートの局部破壊を評価するための既往の経験式や実験結果と整合するよう、パラメータを調整した上で、シミュレーションを実施する。なお、b.・c.においては、シミュレーションでの評価が困難なため、シミュレーション結果を基に別途手計算で評価を実施する。

c. においては、コンクリート版に噴石が衝突した際の破壊モードについては研究途上であるが、今回の検討では、図3-2に示す2種類の破壊モードが生じると仮定した上で、頂版の落下可能性を判定した。一つ目は、ボックスカルバート頂版が崩壊メカニズム状態になった場合を想定し、シミュレーションにより得られた支点反力と終局曲げ耐力に達する時点の支点反力を比較する。二つ目は、コンクリートが大きく破壊して、コンクリートでは噴石を受け止められなくなった状態を仮定し、定着がおおきくとられている上端鉄筋だけでハンモックのように噴石を受け止められるかどうかを判定する（判定方法の詳細は後述する）。なお、今回想定した2種類の破壊モード以外については評価出来ないことに留意する必要がある。

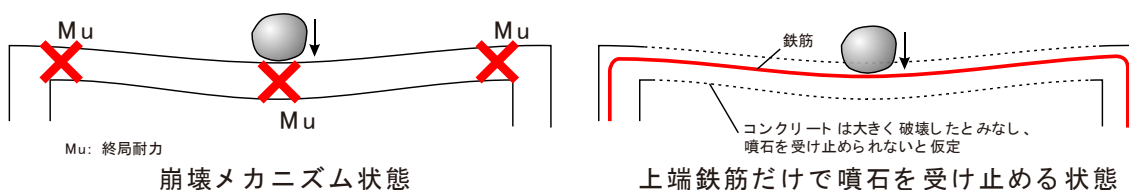


図3-2 貫通または裏面剥離後の慣性力による頂版の落下可能性検討で想定する破壊モード

4) 想定するボックスカルバート

本検討で想定したボックスカルバートを図3-3に示す。幅は 294cm、頂版の厚さは 22cm、鉄筋のピッチは 25cm とした。また、頂版のコンクリートのかぶり厚は 4 cm とし、鉄筋比は片側約 0.2%としている。なお、このボックスカルバートは、300cm 厚程度の土の荷重に耐えられる仕様である。

なお、噴石の直径が 50cm の場合での検討ケースは、衝突エネルギーが非常に大きくなるため、頂版の版厚を 40cm、かぶりを 6 cm と設定した。

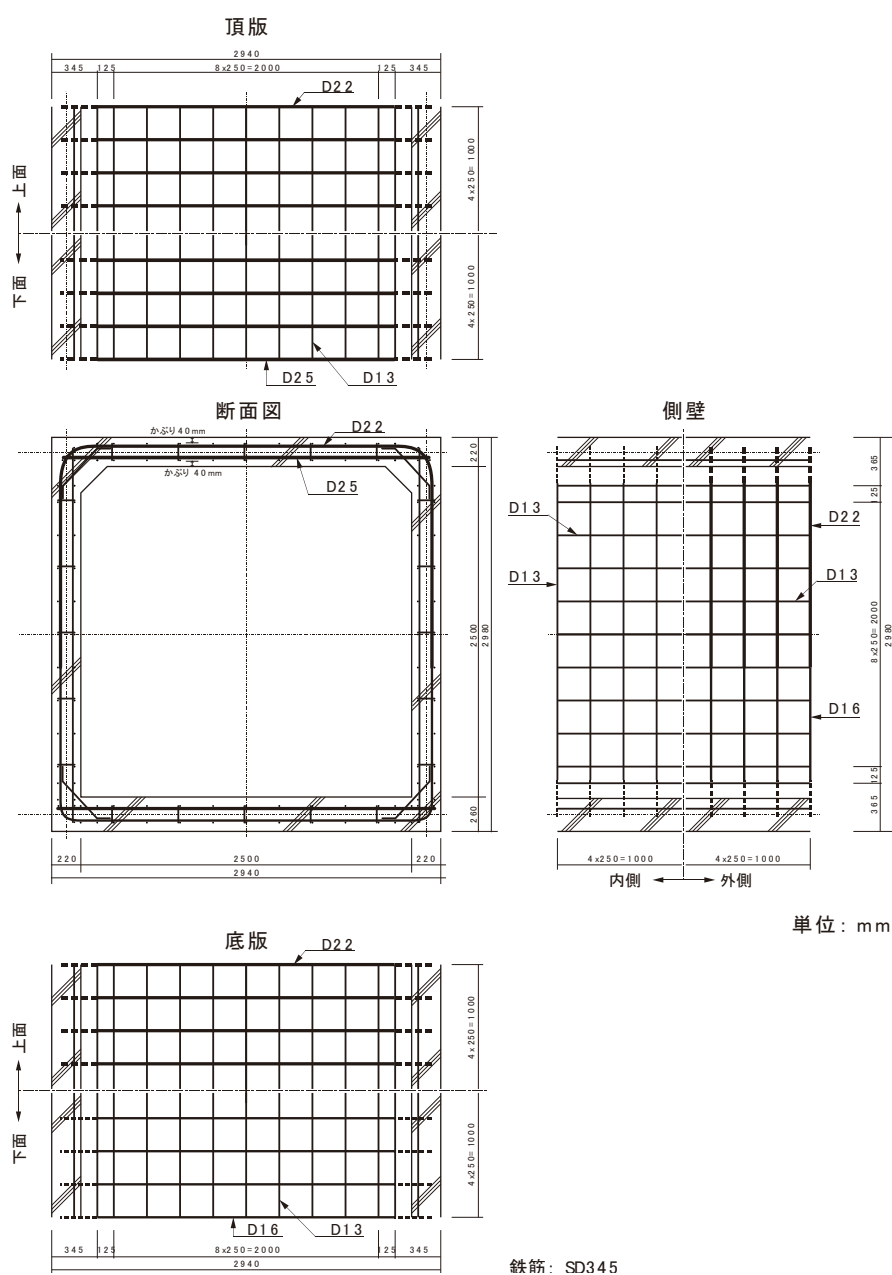


図3-3 想定するボックスカルバート

5) 直径 30cm の噴石に対するボックスカルバート（敷砂無）の耐力検討

直径 30cm の噴石が敷砂無のボックスカルバートの頂版に落下した場合について検討した結果を述べる。

計算条件を以下に示す。

- ・敷砂：無
- ・噴石：直径 30cm、質量 34.2kg
- ・コンクリート版寸法：縦 294cm×横 294cm×厚 22cm
- ・衝突速度：50m/s・80m/s・100m/s
- ・噴石の変形と破壊を考慮する。破壊条件はコンクリート版と同じと仮定。
- ・安全側の評価とするため、鉄筋は考慮しない
- ・コンクリート版端部固定
- ・粒子径：15mm
- ・重力加速度：考慮しない
- ・コンクリート：
ヤング係数 $2.55 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 、ポアソン比 0.15、密度 2320kg/m^3
圧縮強度 84.8N/mm^2 （動的倍率 1.8 倍×二次元補正倍率 2 倍、倍率考慮前 24N/mm^2 ）
引張強度 20.3N/mm^2 （動的倍率 4.1 倍×二次元補正倍率 2 倍、倍率考慮前 2.5N/mm^2 ）
非線形 Drucker-Prager、負圧限界 引張強度の 1/3
- ・噴石：密度 1951kg/m^3
（噴石の密度は 2421kg/m^3 であるが、二次元解析のために体積が同じ等価な立方体の 1 辺と球の直径の比をかけて補正した。その他条件はコンクリート版と同様とした。）
- ・コンクリートと噴石が衝突する際に用いるばね・減衰：
法線方向ばね $5.0 \times 10^9 \text{N/m}$ 、接線方向ばね $1.0 \times 10^9 \text{N/m}$ 、減衰定数 0.05、
摩擦係数 0.2、転がり摩擦係数 0.05

二次元の解析では奥行方向に衝突エネルギーが拡散しないため、コンクリートが過剰に破壊する傾向がある。そのため、コンクリート強度に倍率をかけることで、裏面剥離等の有無を評価する経験式に整合するように調整した。検討に用いた経験式を以下に示す。

- ・裏面剥離限界厚さ：修正 NDRC 式 (Kennedy, 1976・他)
- ・貫通限界厚さ：Degen 式 (Degen, 1980)

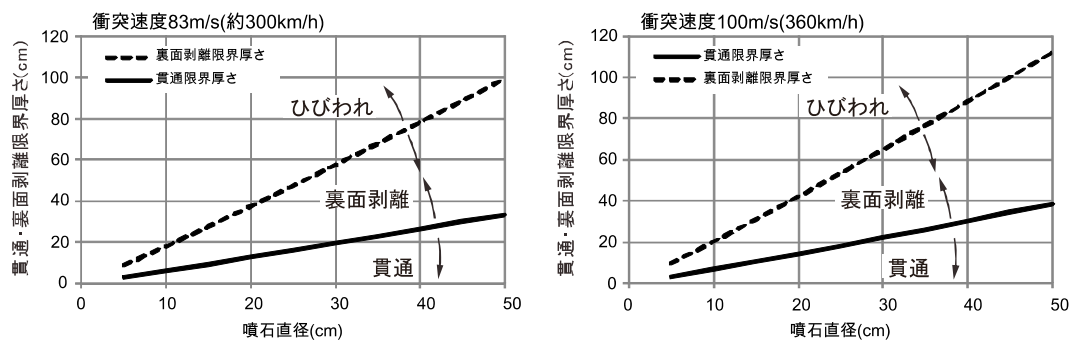
$$X_c = \sqrt{4KWND \left(\frac{V}{1000D} \right)^{1.8}} \quad \left(\frac{X_c}{D} < 2.0 \right) \quad \dots \quad \text{式(1) 修正 NDRC 式 (貫入深さ)}$$

$$t_p = D \left\{ 2.2 \left[\frac{X_c}{D} \right] - 0.3 \left[\frac{X_c}{D} \right]^2 \right\} \quad \left(\frac{X_c}{D} < 1.52 \right) \quad \dots \quad \text{式(2) Degen 式 (貫通厚さ)}$$

$$t_s = D \left\{ 7.91 \left[\frac{X_c}{D} \right] - 5.06 \left[\frac{X_c}{D} \right]^2 \right\} \quad \left(\frac{X_c}{D} < 0.65 \right) \quad \dots \quad \text{式(3) 修正 NDRC 式 (裏面剥離限界厚さ)}$$

X_c : 貫入深さ(in)	W : 飛来物重量(lb)	K : $180/\sqrt{F_c}$
D : 飛来物直径(in)	V : 衝突速度(ft/s)	N : 形状係数(1.00 : 丸い形状)
F_c : コンクリート強度(psi)	t_p : 貫通厚さ(in)	t_s : 裏面剥離限界厚さ(in)

修正 NDRC 式は安全側の評価結果となる傾向があると指摘されている式（電力中央研究所, 1991）であり、衝突に関する文献で引用されることが多い（例えば、三輪・他, 2009）。Degen 式は修正 NDRC 式の貫通限界厚さの評価部分を改良した式である。なお、これらの経験式と同様に広く引用されている Chang 式による裏面剥離限界厚さよりも修正 NDRC 式の結果の方が安全側の評価となることを確認している。このような経験式は、比較的簡単な手計算で破壊モードを推定することができることから、設置するボックスカルバート等の構造物の仕様を考える上で有用である。参考として、図 3－4 に経験式から得られる噴石の直径と破壊モードの関係図を示す。



式(1)～式(3)を基に、コンクリート強度 $\bar{F}_c=24\text{N/mm}^2$ 、噴石の密度 $\bar{\rho}=2421\text{kg/m}^3$ として、貫通厚さ \bar{t}_p (cm)・裏面剥離限界厚さ \bar{t}_s (cm)と飛来物直径 \bar{D} (cm)・衝突速度 \bar{V} (m/s)の関係式を求めると以下ようになる。

$$\bar{t}_p = \bar{D}^2 \left\{ 8.709 \times 10^{-3} \times (\bar{V}/\bar{D})^{0.9} - 4.702 \times 10^{-6} \times \bar{D} (\bar{V}/\bar{D})^{1.8} \right\}$$

$$\bar{t}_s = \bar{D}^2 \left\{ 3.131 \times 10^{-2} \times (\bar{V}/\bar{D})^{0.9} - 7.930 \times 10^{-5} \times \bar{D} (\bar{V}/\bar{D})^{1.8} \right\}$$

※式(1)～式(3)とは数値の丸め誤差により厳密には計算結果が同じにならず、使用している記号の単位も異なることに注意する必要がある。

図3-4 経験式により得られる噴石の直径と破壊モードの関係

a. 裏面剥離・貫通の可能性検討結果

経験式により裏面剥離と貫通の可能性を評価した結果を表3-1に示す。衝突速度80m/s以下であれば貫通の可能性は小さく、速度100m/sでは噴石が丁度貫通する、あるいは速度が丁度失われる程度となる結果となった。

一方、裏面剥離は速度50m/sであつても生じる結果となった。このため、剥離片が頂版裏側から飛散する恐れがあり、剥離片に対する対策が必要といえる。

表3-1 経験式による裏面剥離・貫通の可能性評価結果

衝突速度 (m/s)	版厚 (cm)	Degen 式 貫通限界 厚さ t_p (cm)	貫通の 可能性	修正 NDRC 式 裏面剥離 限界厚さ t_s (cm)	裏面剥離 の可能性
50	22	12.1	無	39.2	有
80	22	17.2	無	53.2	有
100	22	22.0	有	64.5	有

b. 飛散する剥離片の運動エネルギーの想定結果

剥離片の大きさと速度を推計するために実施したシミュレーションのうち、衝突速度を100m/sとしたケースのシミュレーション結果を図3-5に示す。検討にあたっては、安全側の評価とするために無筋の状態を想定した。図中の赤い部分は、コンクリートが引張破壊した部位であり、時刻0.0001秒より噴石衝突位置の反対側で裏面剥離（引張破壊）が始まり、コーン状の裏面剥離領域が形成され、時刻0.001秒前後で裏面剥離による破壊がほぼ終了した。その後は全体応答による破壊モードに移行した。

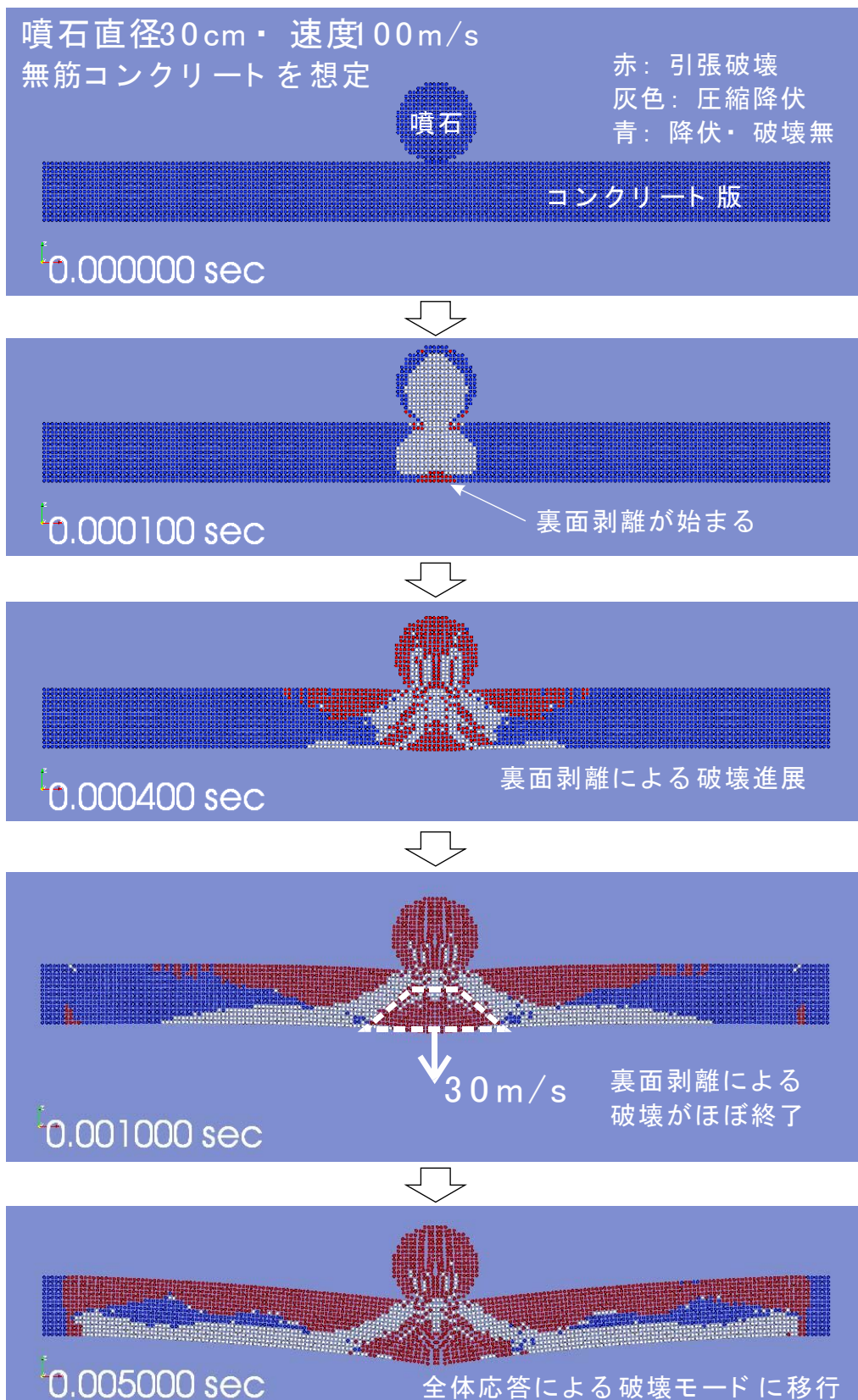
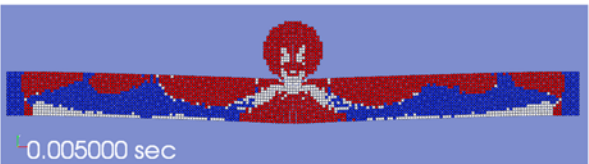

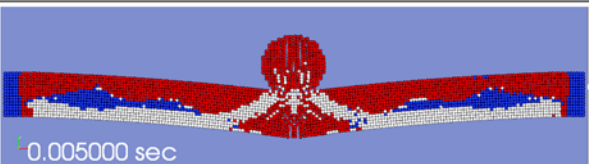


図3-5 直径 30cm の噴石が速度 100m/s で衝突した際のシミュレーション結果

直径 30cm の噴石がコンクリート版に衝突した際のシミュレーション結果一覧を表 3-2 に示す。シミュレーション結果は全てのケースで貫通は無いものの、裏面剥離は発生する結果となった。表中では、経験式による判定結果も示しており、裏面剥離の有無については、シミュレーションの結果が経験式による判定と整合する結果となった。貫通の有無についても、貫通限界厚さと今回想定した版厚がほぼ同じ値となっている衝突速度 100m/s のケースを除き、シミュレーション結果は経験式と整合していることが分かる。

表3-2 コンクリート版の衝突耐力に対する検討結果一覧

衝突速度 (m/s)	版厚 (cm)	Degen式 貫通限界 厚さ t_p (cm)	貫通 可能性	修正NDRC式 裏面剥離 限界厚さ t_s (cm)	裏面剥離 可能性	シミュレーション結果 赤：引張破壊、灰色：圧縮降伏、青：降伏・破壊無
50	22	12.1	無	39.2	有	
80	22	17.2	無	53.1	有	
100	22	22.0	有	64.5	有	

衝突によって生じた裏面剥離片の大きさや速度をシミュレーションの結果から簡易に想定する。検討方法を以下に示す。

1. シミュレーション結果から裏面剥離が生じた直後の剥離領域とその領域の平均的な移動速度を抽出
2. 直径が剥離領域の底辺の長さで、剥離領域の高さがかぶり厚（4cm）の円柱が剥離片の大きさと仮定し、体積と質量を計算

※一般に、無筋コンクリートの場合、衝突側を頂点とする円錐状のコンクリート片が剥離（図 3-5 の白破線で囲った領域）することが知られている。一方、鉄筋が入っている場合、主に剥離するのはかぶりコンクリート部分であるという結果が得られている（電力中央研究所，1991）。今回はその結果に従って剥離片の大きさや形状を設定した。

剥離片の領域と速度の抽出結果を図3－6に示し、その結果から求めた剥離片の運動エネルギーを表3－3に示す。今回の検討では、剥離片の質量は約 20kg で、そのスピードは噴石の衝突速度の 30%弱（13～30m/s）、運動エネルギーは元の噴石の運動エネルギーに対して3～5%程度となっていた。

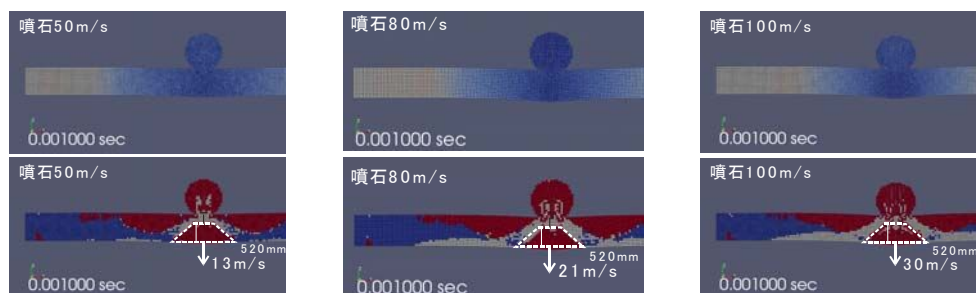


図3－6 剥離片の領域と速度の抽出結果

表3－3 剥離片の運動エネルギーの想定結果

噴石速度 (m/s)	噴石 質量 (kg)	剥離片 体積 (m³)	質量 (kg)	剥離片 速度 (m/s)	剥離片速度 ／ 噴石速度	剥離片 運動エネルギー (N・m)	噴石 運動エネルギー (N・m)	運動エネルギー 剥離片／噴石
50	34.2	0.00849	19.7	13	26.0%	1665	42750	3.9%
80	34.2	0.00849	19.7	21	26.3%	4346	109440	4.0%
100	34.2	0.00849	19.7	30	30.0%	8869	171000	5.2%

※コンクリートの密度：2320kg/m³

c. 貫通、または、裏面剥離後の慣性力による頂版の落下可能性検討結果

噴石は質量が大きいため、貫通、あるいは、裏面剥離をした後に慣性力により頂版が大きく変形して落下する可能性が考えられる。図3－2に示す2種類の破壊モードを想定し、貫通、または、裏面剥離後の慣性力による頂版の落下可能性について検討を実施する。各想定破壊モードに達する頂版端部の力（支点反力）とシミュレーションにより得られた支点反力を比較し、OK/NGを判定する。

以下に各想定破壊モードに達する頂版端部の力の考え方と計算結果を示す。

■崩壊メカニズム状態時の頂版端部の力

右図のようにコンクリート頂版が終局曲げ耐力 M_u に達した時を崩壊メカニズム状態と考える。 M_u は以下の式により求める。なお、引張鉄筋の降伏強度は JIS 材のため 1.1 倍する。

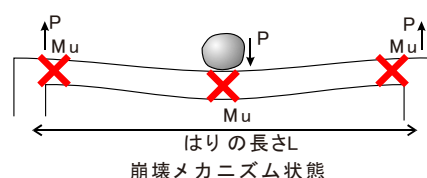
終局耐力 $M_u = 0.9 a_t \sigma_y d$ (N・mm)

a_t ：引張鉄筋断面積(mm²) σ_y ：引張鉄筋の降伏強度(N/mm²)

d ：はり有効せい（引張鉄筋が2段に配筋される場合、その重心から圧縮縁までの距離）(mm)

支点反力 P (N) は、 M_u とはりの長さ L (mm) を用いて以下の式により求める。

支点反力 $P = 2M_u / (L/2) = 4M_u / L$ (N)



ボックスカルバートの中央部下側配筋は D25 で 25cm ピッチであるため、鉄筋一本分の引張鉄筋断面積を考えると、終局曲げ耐力 M_u と支点反力 P は以下になる。

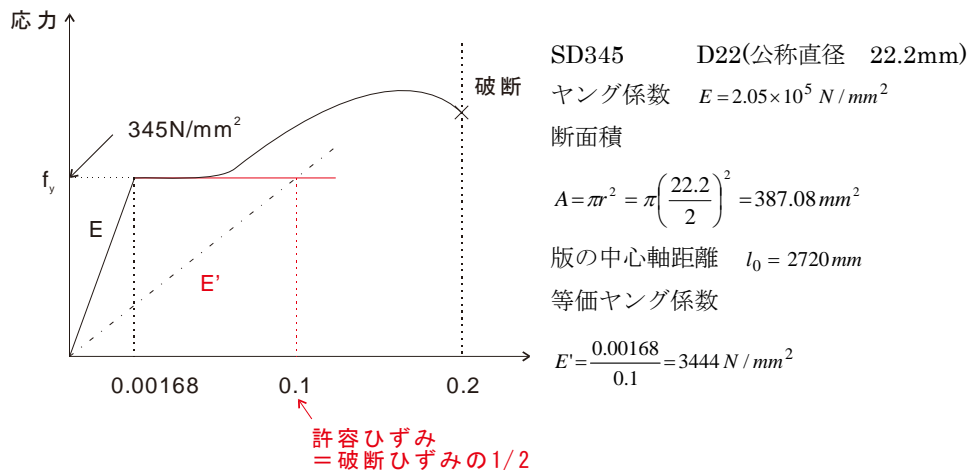
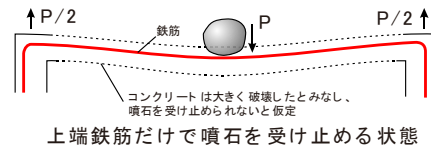
$$M_u = 0.9 \times 507 (\text{mm}^2) \times (345 \text{ (N/mm}^2) \times 1.1 \text{ 倍}) \times (220 - 40 - 25/2) / 10^6 = 29 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

$$P = 4 \times 29 (\text{kN} \cdot \text{m}) / (2720 (\text{mm}) / 1000) = 42 \text{ kN}$$

■ 上端鉄筋だけで噴石を受け止める状態における頂版端部の力

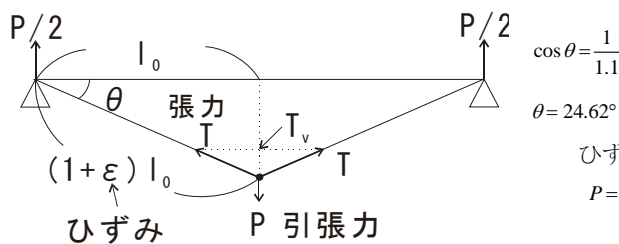
鉄筋の破断ひずみ 0.2 の半分 0.1 を許容ひずみとし、鉄筋が両端ピンの条件で中央に力 P をかけた時にひずみが 0.1 となる時の力を求める。その際のヤング係数は、鉄筋の応力-ひずみ関係において、許容ひずみと降伏耐力から求められる点と原点を結んだ等価ヤング係数 E' を用いる。

コンクリート版端部の支点反力 ($P/2$) を求める過程を以下に示す。



ひずみ $\varepsilon = 0.1$ となるとき θ は、

$$\cos \theta = \frac{l_0}{(1 + \varepsilon) l_0}$$



ひずみ $\varepsilon = 0.1$ となるとき P は、

$$P = 2T_v = 2T \sin \theta$$

$$T = \varepsilon l_0 \times \frac{E'A}{l_0}$$

$$\begin{aligned} P &= 2\varepsilon E'A \sin \theta \\ &= 2 \cdot 0.1 \cdot 3444 \cdot 387.08 \cdot \sin \theta \\ &= 111074 \text{ N} = 111 \text{ kN} \end{aligned}$$

∴ 両端にかかる力の許容値

$$P/2 = 55 \text{ kN}$$

慣性力による頂版の落下可能性検討結果を図3-7に示す。図で示した領域で生じた最大の鉛直応力から版の両端にかかる力を求めた。検討の結果、全てのケースにおいて鉄筋は噴石を受け止めることが可能と評価され、頂版が落下する可能性は低い結果となった。

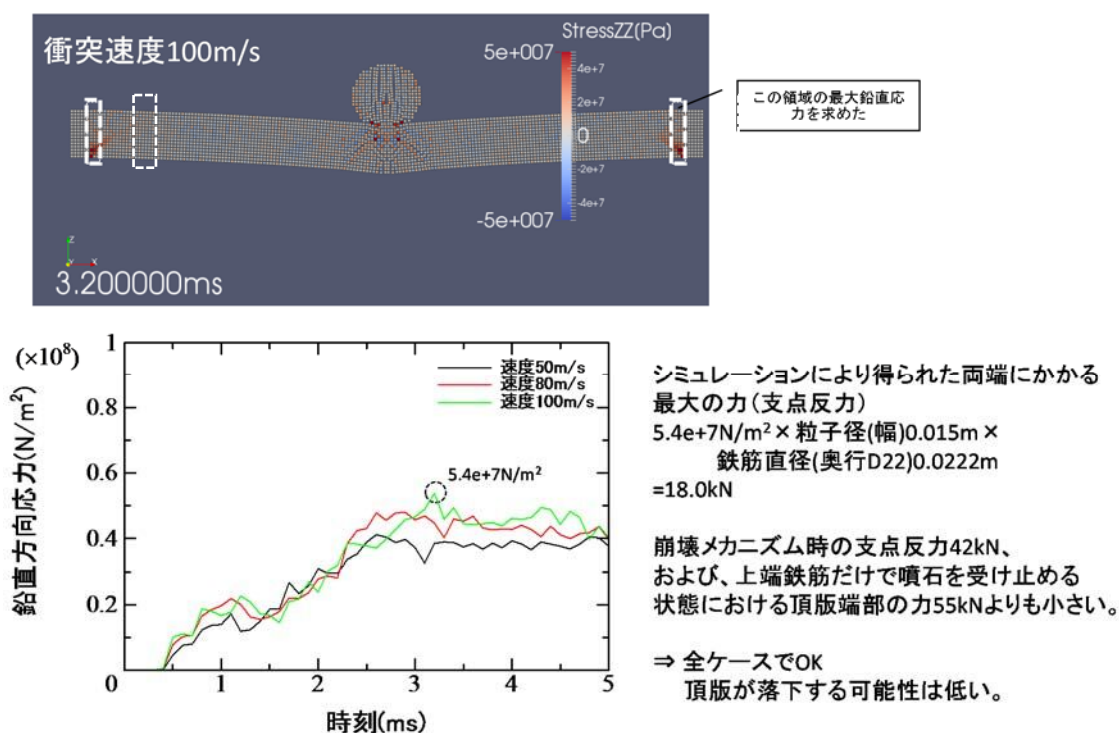


図3-7 慣性力による頂版の落下可能性検討結果

6) 直径 50cm の噴石に対するボックスカルバート（敷砂有）の耐力検討

直径 50cm の噴石が敷砂を敷いたボックスカルバートの頂版に落下した場合について検討した結果を述べる。なお、敷砂の効果とコンクリートの破壊を考慮に入れられる簡易な経験式は見当たらないため、シミュレーションによる評価のみを実施している。

計算条件を以下に示す。

- ・敷砂：有
- ・噴石：直径 50cm、質量 158kg
- ・コンクリート版寸法：縦 294cm×横 294cm×厚 40cm
※噴石の直径が 50cm の場合の検討ケースでは衝突エネルギーが非常に大きくなるため、頂版の版厚を 40cm、かぶりが 6 cm であると仮定した。
- ・衝突速度：50m/s・80m/s・100m/s
- ・敷砂厚：20cm・50cm・70cm
- ・噴石は剛体で、コンクリート版は変形と破壊を考慮する。

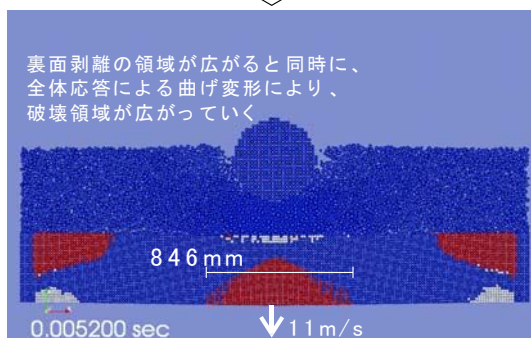
- ・安全側の評価とするため、鉄筋は考慮しない
- ・コンクリート版端部固定
- ・粒子径：コンクリート版・噴石 15mm、砂粒子：15～30mm
- ・重力加速度は考慮しない
- ・コンクリート（粒子法 SPH）：
 ヤング係数 $2.55 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 、ポアソン比 0.15、密度 2320kg/m^3
 圧縮強度 84.8N/mm^2 （動的倍率 1.8 倍×二次元補正倍率 2 倍、倍率考慮前 24N/mm^2 ）
 引張強度 20.3N/mm^2 （動的倍率 4.1 倍×二次元補正倍率 2 倍、倍率考慮前 2.5N/mm^2 ）
 非線形 Drucker-Prager、負圧限界 引張強度の 1/3
- ・噴石（個別要素法・剛体）：密度 1951kg/m^3
 （噴石の密度は、体積が同じ等価な立方体の 1 辺と球の直径の比をかけて補正、その他条件はコンクリート版と同様とした。）
- ・砂粒子（個別要素法）：
 法線方向ばね $5.0 \times 10^7 \text{N/m}$ 、接線方向ばね $1.25 \times 10^7 \text{N/m}$ 、減衰定数 0.826、
 摩擦係数 0.1、転がり摩擦係数 0.2
 ※砂粒子のパラメータは、事前検討にて重錘落下実験（山口・他，2014）が再現できるように調整したもの。

a. 裏面剥離・貫通の可能性検討結果

噴石の衝突速度 100m/s 、敷砂厚 50cm の場合におけるシミュレーション結果を図 3-8 に示す。敷砂がある場合、噴石は敷砂の中に貫入していくが、それより早いスピードで衝撃波が砂粒子を介してコンクリート版に伝わり、版の裏面に達した直後（時刻 0.0032 秒 ）に裏面剥離が発生し始める。その後、裏面剥離による破壊領域が広がると同時に、全体応答による曲げ変形により破壊領域が横方向にさらに広がり、裏面剥離の現象が終了していると考えられる時刻 0.0052 秒 では、剥離片の底辺の幅は約 85cm に達した。ただし、剥離領域の移動速度は約 10m/s で、噴石の元の衝突速度の 10 分の 1 程度まで落ちる結果となった。時刻 0.0078 秒 では噴石が跳ね返され、その後は、コンクリート版は自由振動を続けた。このケースでは、コンクリート中央裏面の破壊領域は全体応答による曲げ変形に起因して発生した割合が多いと考えられ、裏面剥離のように剥離片が大きな塊で飛散する可能性は低いと考えられるものの、破片が落下する可能性はある。

直径 50cm の噴石が敷砂有のコンクリート版に衝突した際のシミュレーション結果の一覧を図 3-9 に示す。検討の結果、全てのケースで裏面剥離は生じるが、貫通は生じない結果となった。

噴石直径50cm・速度100m/s
無筋コンクリートを想定



赤：引張破壊 灰色：圧縮降伏
青：降伏・破壊無

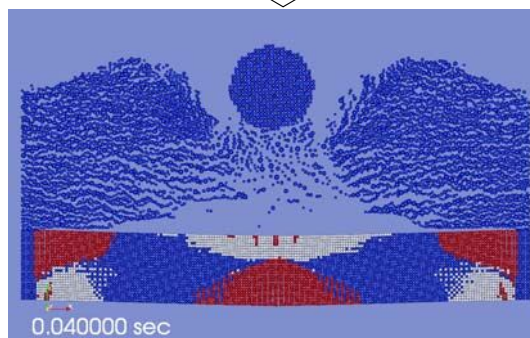


図3-8 直径 50cm の噴石が速度 100m/s で衝突した際のシミュレーション結果

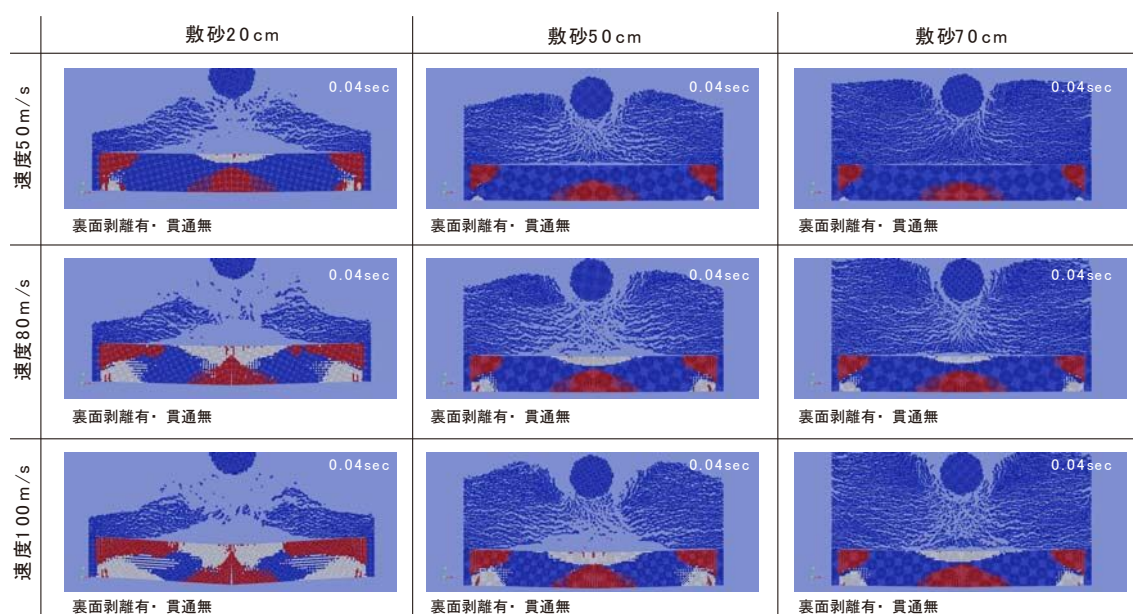


図3-9 直径 50cm の噴石が敷砂有のコンクリート版に衝突した際の
シミュレーション結果一覧

b. 飛散する剥離片の運動エネルギーの想定結果

剥離片の大きさや速度をシミュレーションの結果から求めた結果を図3-10に示す。今回の検討では、裏面剥離と同時に曲げによる引張破壊も進行していたため、裏面剥離のみによる破壊領域を判定することが困難であった。そのため、裏面剥離が始まった時刻から2ミリ秒後の時点における引張破壊領域とその領域の平均的な移動速度を求めた。そのため、版中央の剥離の領域には、曲げによる引張破壊の領域も含まれており、領域が過大に評価されている可能性がある。

剥離片の運動エネルギーを表3-4に示す。今回の検討では、剥離片の質量は30～100kgで、そのスピードは噴石の衝突速度の5～25%前後（3～25m/s）、運動エネルギーは噴石の元の運動エネルギーの0.2～2.0%程度となっていた。また、同じ衝突速度であれば、敷砂厚が大きいほど剥離片の速度が小さくなる傾向が見られた。

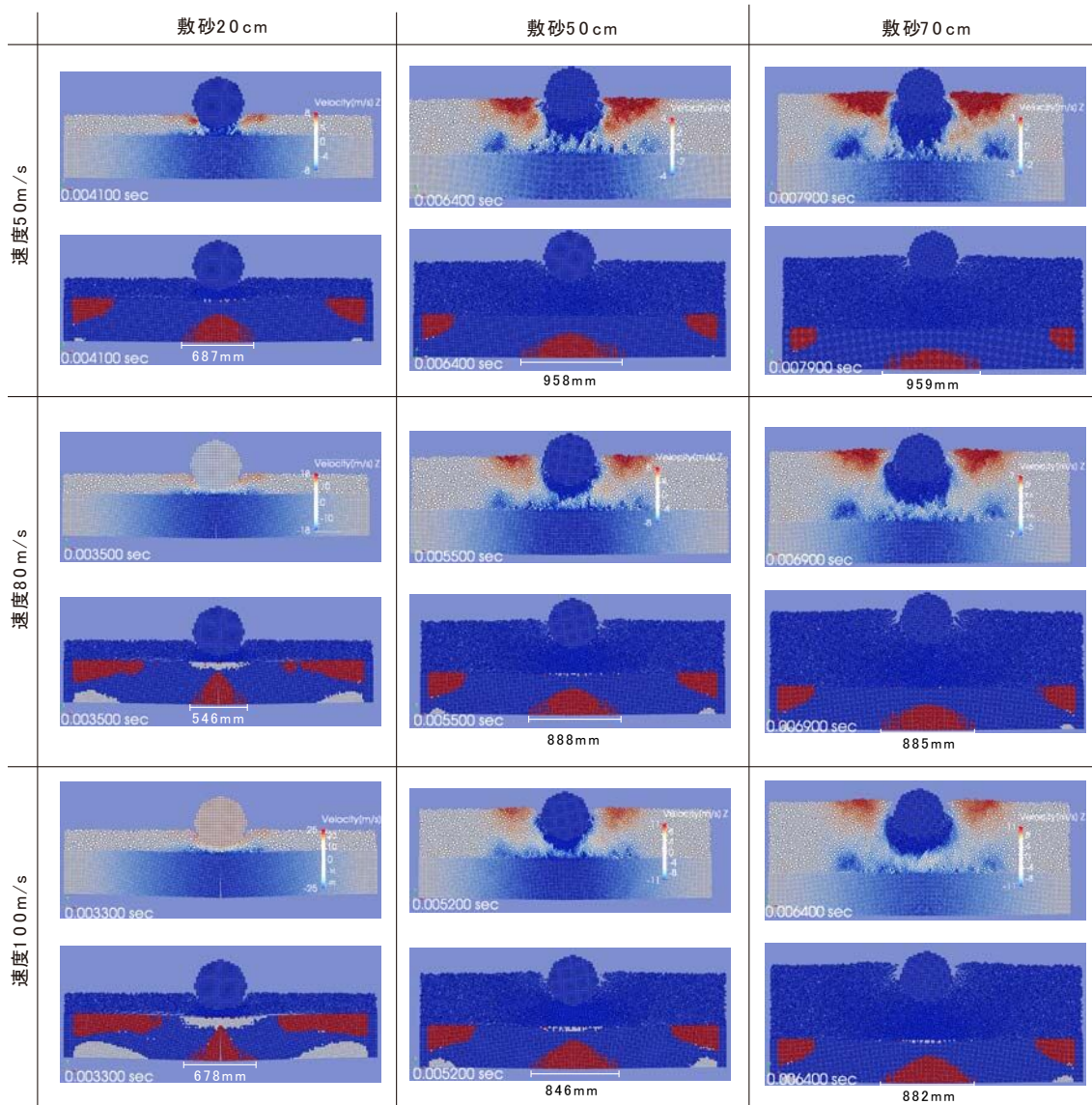


図3-10 剥離片の大きさと速度

表3-4 剥離片の飛散可能性検討結果

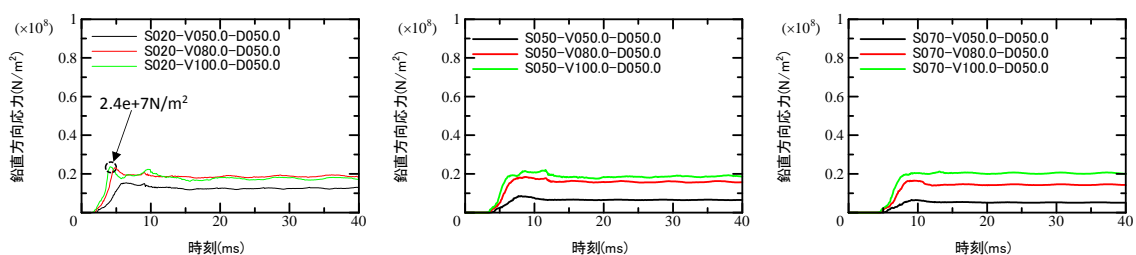
検討ケース	数砂厚 (cm)	噴石 速度 (m/s)	噴石 質量 (kg)	剥離片 体積 (m³)	質量 (kg)	剥離片 速度 (m/s)	剥離片 速度 ／ 噴石 速度	剥離片 運動 エネルギー (N・m)	噴石 運動 エネルギー (N・m)	運動エネルギー - 剥離片／噴石
S020-V050.0-D050.0	20	50	158	0.02224	51.6	8	16.0%	1651	197500	0.8%
S020-V080.0-D050.0		80	158	0.01405	32.6	18	22.5%	5280	505600	1.0%
S020-V100.0-D050.0		100	158	0.02166	50.3	25	25.0%	15705	790000	2.0%
S050-V050.0-D050.0	50	50	158	0.04325	100.3	4	8.0%	803	197500	0.4%
S050-V080.0-D050.0		80	158	0.03716	86.2	8	10.0%	2759	505600	0.5%
S050-V100.0-D050.0		100	158	0.03373	78.2	11	11.0%	4734	790000	0.6%
S070-V050.0-D050.0	70	50	158	0.04334	100.5	3	6.0%	452	197500	0.2%
S070-V080.0-D050.0		80	158	0.03691	85.6	7	8.8%	2098	505600	0.4%
S070-V100.0-D050.0		100	158	0.03666	85.0	11	11.0%	5145	790000	0.7%

※コンクリートの密度：2320kg/m³

※剥離片の体積について、数砂厚 50・70cm のケースで噴石の衝突速度と体積の大小関係が逆になっているが、この原因としては、噴石が数砂に貫入するスピードの違いにより衝撃波の拡散度合いが異なることが一因と推測される。また、裏面剥離と同時に曲げによる引張破壊も進行するため、どの時刻までを裏面剥離による破壊とするかの判定が難しく、改善の余地があることに留意する必要がある。

c. 貫通、または、裏面剥離後の慣性力による頂版の落下可能性

慣性力による頂版の落下可能性を検討した結果を図3-11に示す。検討方法は5)節と同じであるが、噴石の直径が50cm、鉄筋のピッチが25cmであるため、鉄筋2本で噴石を受け止めると仮定している。検討の結果、全てのケースにおいて崩壊メカニズム状態、および、上端鉄筋だけで噴石を受け止める状態時の支点反力の許容値に対し、シミュレーションにより得られた支点反力は小さくっており、頂版が落下する可能性は低い結果となった。



噴石の直径が50cmで、鉄筋のピッチが25cmなので、鉄筋2本で噴石を受け止めると仮定
⇒ 支点反力の許容値
・崩壊メカニズム状態: 42kN × 2本 = 84kN
・上端鉄筋だけで噴石を受け止める状態: 55kN × 2本 = 110kN

シミュレーションにより得られた両端にかかる最大の力(支点反力)
 $2.4 \times 10^7 \text{ N/m}^2 \times \text{粒子径(幅)} 0.015 \text{ m} \times \text{鉄筋直径(奥行)} 0.0222 \text{ m} \times 2 \text{ 本}$
= 16.0kN

⇒ 全ケースでOK
頂版が落下する可能性は低い。

図3-11 慣性力による頂版の落下可能性検討結果

7) 直径 50cm の噴石に対する敷砂の衝撃吸収効果の確認

本節では、噴石衝突時に敷砂によりどのくらいのエネルギー吸収が見込めるか検討する。図 3-12 は、直径 50cm の噴石が 100m/s で、50cm 厚の敷砂に衝突した場合におけるエネルギーの時間推移を示した図である。敷砂のエネルギー吸収効果のみに着目するため、コンクリート版は剛体と仮定した。噴石の運動エネルギーのみ存在する時刻 0 秒から始まり、噴石が敷砂に貫入していくにつれて、そのエネルギーが砂粒子の減衰で失われたり、砂粒子の運動エネルギーに変換されていく。図中の黒い破線の時刻ではコンクリート版に伝わった最大衝撃力が発生した時刻（図 3-12 参照）であるが、この時点におけるエネルギーの内訳を見ると、噴石の運動エネルギーは 3 割以下で、初期の衝突エネルギーの約 7 割が敷砂により吸収されており、敷砂が衝突エネルギーの緩衝材として有効であることが分かる。

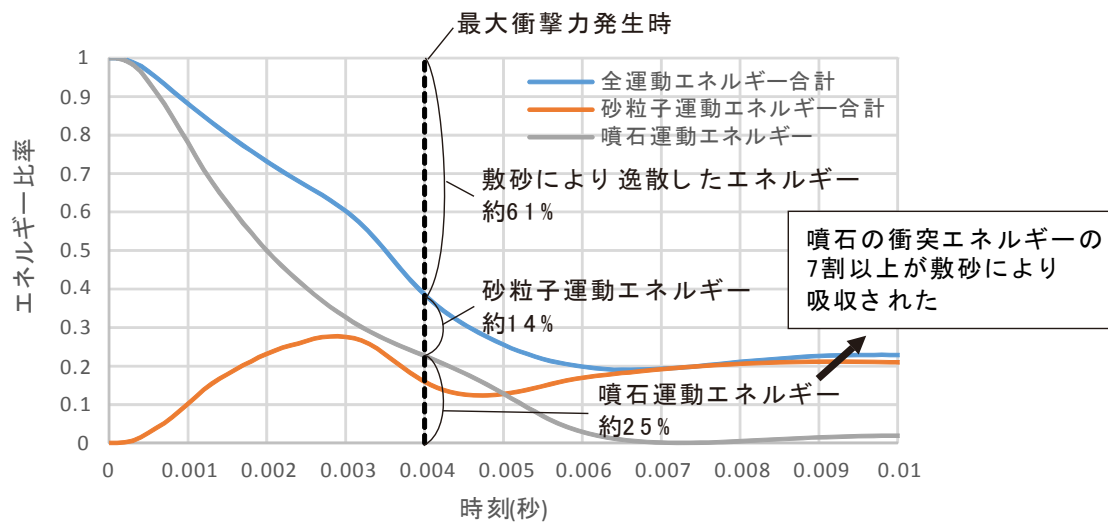


図3-12 噴石が敷砂に衝突した場合のエネルギーの推移
(噴石:直径 50cm・速度 100m/s、敷砂厚:50cm、コンクリート版剛体)

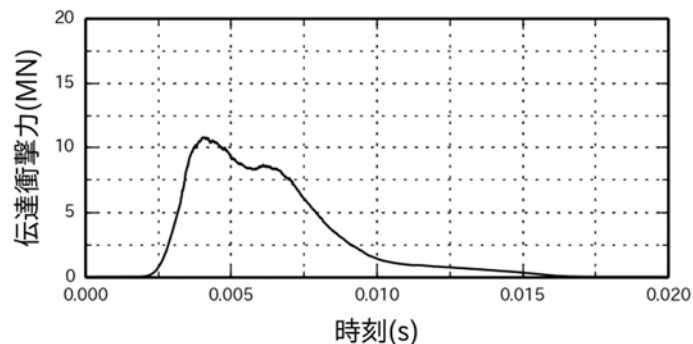


図3-13 噴石が敷砂に衝突した場合のコンクリート版への衝撃力の時刻歴
(噴石:直径 50cm・速度 100m/s、敷砂厚:50cm、コンクリート版剛体)

図3-14は、衝突する噴石直径Dと敷砂厚Tが同じ場合(T/D=1.0)の衝撃力を1として、その衝撃力がT/Dによりどのように変化するか示した図である。黒い破線が落石対策便覧式の割増係数 $\alpha=(T/D)^{-0.58}$ で、それ以外の線は、噴石径が50cm・25.6cm・12.8cmの際のシミュレーション結果(コンクリート版は剛と仮定)を示している。図を見ると、敷砂が厚くなるほど衝撃吸収効果は高くなり、噴石の直径と同程度の厚さまで敷くと、遮減率が特に高いことが分かる。

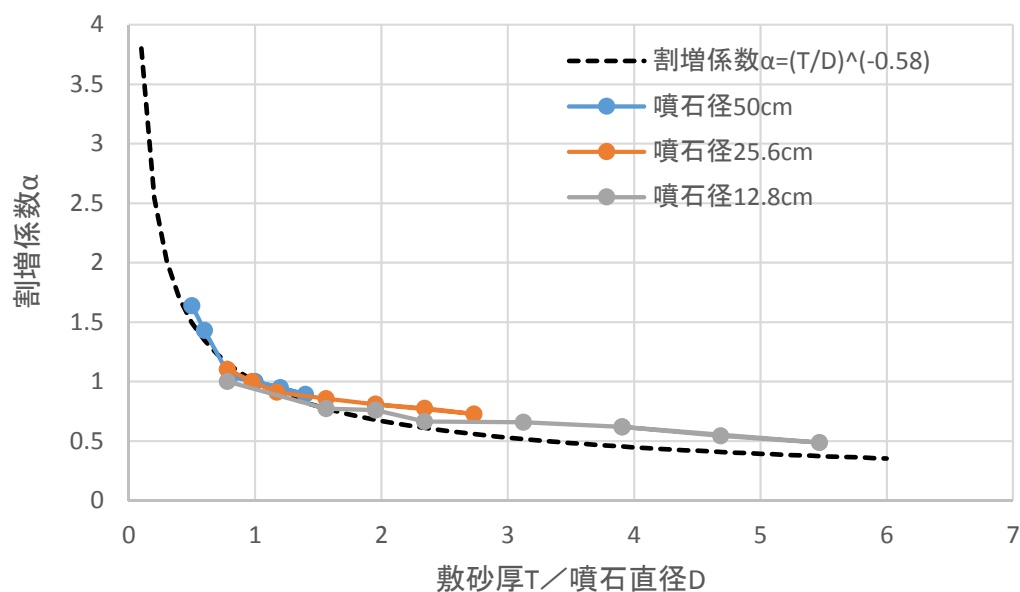


図3-14 敷砂厚 T／噴石直径 D と衝撃力の割増係数の関係(衝突速度 80m/s)

8) まとめ

以上の検討をまとめると以下のようになる。

○直径 30cm の噴石 (34.2kg) に対して、

- 版厚 22cm のボックスカルバートは衝突速度 80m/s 以下であれば貫通可能性は低く、速度 100m/s では噴石が丁度貫通する、あるいは速度が丁度失われる程度となる可能性がある。ただし、速度 100m/s でも頂版が落下する可能性は低い。
- ただし、裏面剥離は生じるので、剥離片の飛散防止措置を講ずる必要がある。今回の検討では、剥離片の質量は約 20kg、剥離片の速度は 13~30m/s 程度であった。

○噴石 50cm の噴石 (158kg) に対して、

- 版厚 40cm のボックスカルバートは敷砂厚 20cm 以上あれば、衝突速度 100m/s 以下であれば貫通せず、頂版が落下する可能性も低い。
- ただし、裏面剥離は生じるため、剥離片の飛散防止措置を講ずる必要がある。今回の検討では剥離片の質量は 30~100kg 程度で、剥離片の速度は 3~25m/s 程度であった。
- 敷砂は噴石衝突時の緩衝材として有効であり、特に、噴石の直径と同程度の厚さまで敷くと、得られる衝撃吸収効果が大きい。

なお、噴石が高速で鉄筋コンクリート構造物に衝突した際の被害や対策に関する研究は十分に成熟しておらず、その設計の考え方についても確立されてはいない状況にある。今後、衝突時の挙動についてのシミュレーションの推定精度の向上はもとより、鉄筋コンクリート構造物の現実的で効率性の高い緩衝材の敷設方法、上部からの衝突に有利な屋根の形状、様々なタイプの既設構造物の補強方法、様々な材料による安価で効率的な木造家屋の補強方法等、更なる研究が期待される。

(2) 鋼製退避壕の耐力

鋼製退避壕の耐力の参考として、鋼板の強度に関する既往研究を以下に示す。

○鋼板の強度に関する既往データ

Sato et al. (2015) により、鋼材の変形と衝突エネルギーとの関係が示されている。これは、厚さ 1.0mm、1.6mm、2.3mm、3.2mm の一般構造用圧延鋼材 (SS400) に、重さ 3.4kg、2.08kg、6.75kg の砥石を衝突させて、鋼材の変形や貫通の有無を検証したものである。それぞれの結果は、A～C として評価されている。衝突実験結果を表 3－5 および表 3－6 に示す。

A：貫通あり

B：貫通なし、破損あり

C：破損なし

表3－5 発射速度約 65m/s のときの衝突実験結果 (Sato et al., 2015)

Steel thickness [mm]	Projectile velocity [m/s]	Collision energy [J]	Result
1.0	63.6	6876	A
1.6	63.7	6898	A
2.3	65.7	7338	B
3.2	66.0	7405	C

表3－6 速度と鋼材厚さを変えた時の衝突実験結果 (Sato et al., 2015)

Target thickness [mm]	Projectile velocity [m/s]	Collision energy [J]	Result
1.0	51.0	4421	A
1.6	36.4	2252	C
1.6	45.9	3582	B
2.3	41.8	2970	C
2.3	77.9	10316	A
3.2	73.3	9134	C
3.2	64.9	7160	C
3.2	91.4	14201	B

前述の実験結果より、鋼材の厚さと衝突エネルギーによる変形の関係は、図 3-15 に示す破線のように推定される。

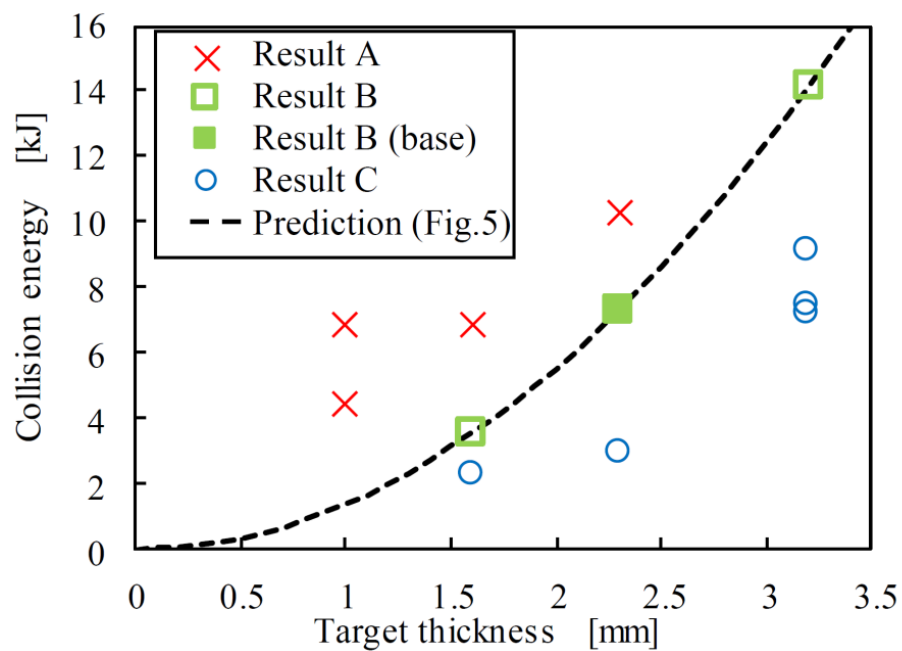


図3-15 一般構造用圧延鋼材(SS400)の厚さと衝突エネルギーの関係
(Sato et al., 2015)

(3) 既存の山小屋等における屋根の衝突強度の向上の検討

噴石等の飛散物に対して山小屋等の衝突強度を向上させるために、標準的な山小屋の仕様に高機能繊維織物（アラミド繊維織物）を追加することが例として挙げられる。

〈標準的な山小屋の仕様〉

垂木部分で芯木を固定し、鋼板を立ち上げる瓦棒葺きによるものが作られている。

垂 木：幅 45mm×高さ 90mm。あるいは、幅 45mm×高さ 75mm。

野 地 板：杉板 18mm 又は 21mm。

環境が厳しく湿気も多いため、構造用合板は用いない。

防水シート：アスファルトルーフィング 940（旧基準で 22kg 品）。

厚さ 1.3mm 程度であり、防水性能向上のため二重張りにすることもある。

屋根葺き材：ガルバリウム鋼板等。厚さ 0.4mm のものを用いることが多い。

高機能繊維織物（アラミド繊維織物）の使用イメージを図 3－16 に示す。

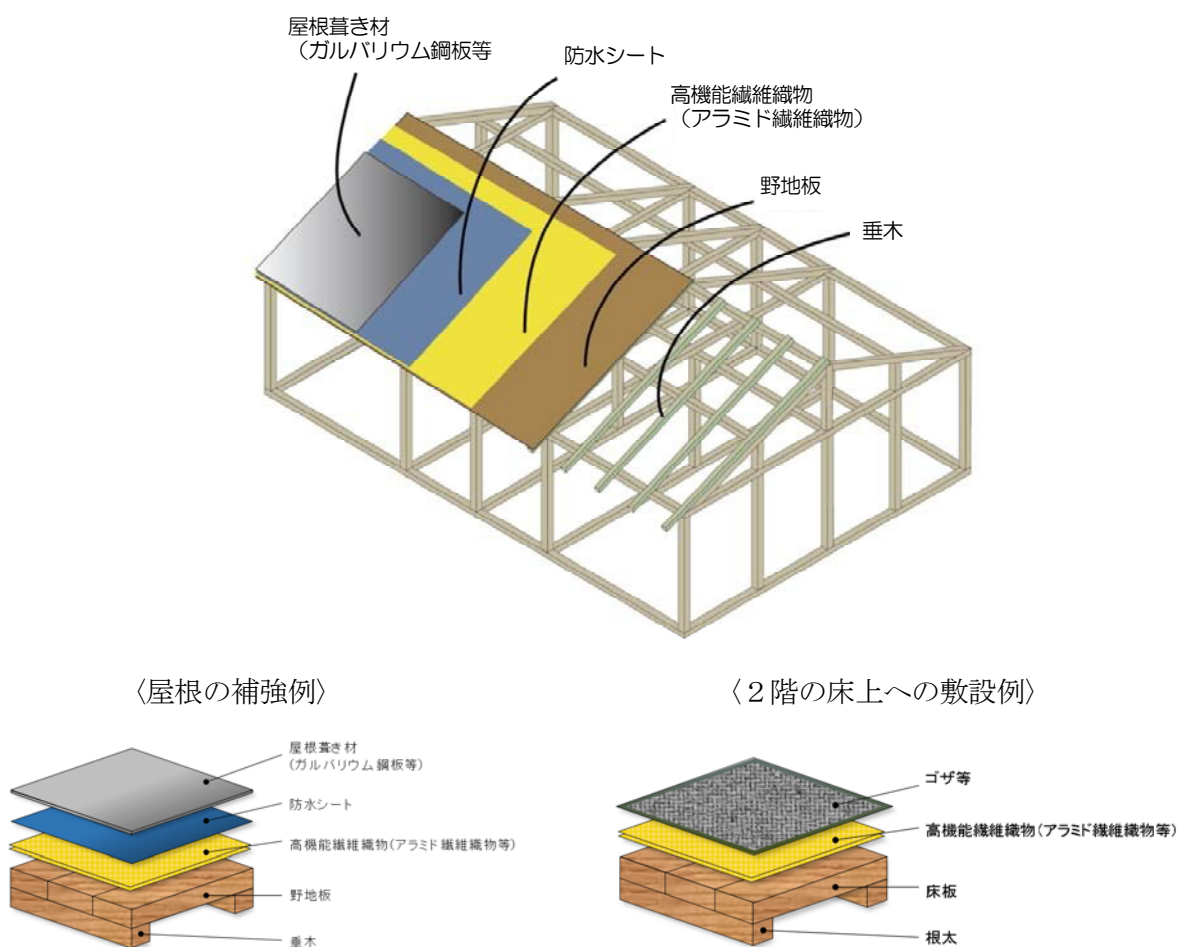


図 3－16 高機能繊維織物を使用した山小屋等の補強イメージ

(4) 噴石衝突模擬実験

既存の山小屋等の補強方法を検討するために、噴石衝突模擬実験を行った。

○ 実験実施主体

：内閣府（防災担当）、防衛大学校、山梨県富士山科学研究所

○ 試料提供協力

：東レ株式会社、帝人株式会社

○ ハイスピードカメラ撮影協力

：株式会社ナックイメージテクノロジー

1) 衝突実験概要

衝突模擬実験は、山小屋の屋根に見立てた材料（供試体）を固定枠に設置し、噴石に見立てた飛翔体を圧力により発射して衝突させることにより実施した。材料の組み合わせを変えながら、衝突による飛翔体の貫通有無などを記録し、補強方法の検討のための基礎資料とした。

〈固定枠〉

固定枠の露出面には、山小屋の屋根を構成するガルバリウム鋼板、防水シート、杉板、ベニヤ板をはじめ、高機能繊維織物（アラミド繊維織物）、ナイロン等を組み合わせて設置した。

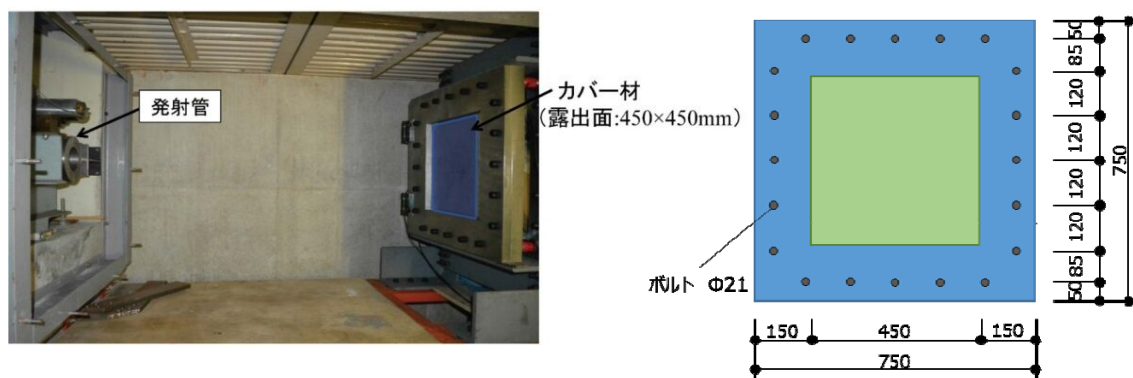


図3－17 固定枠外観

〈発射装置〉

発射装置は、コンプレッサで圧力タンクに所定の圧力をかけた後、隔膜を破ることで、このエネルギーで飛翔体を発射するものである。



発射装置	発射管内径	$\phi 100\text{mm}$
	発射管長さ	6m
	最大ゲージ圧 (隔膜の限界)	0.5MPa
	許容負荷	3000kN

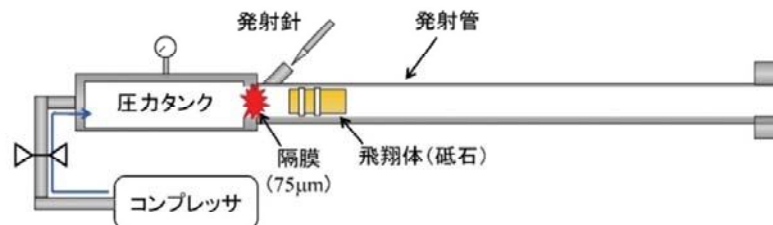
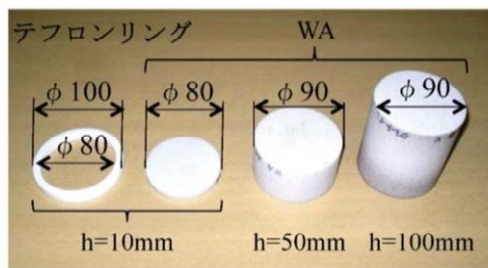


図3-18 発射装置外観

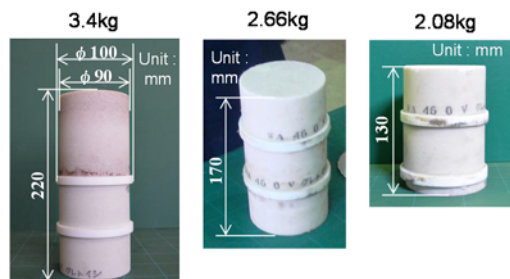
〈飛翔体〉

飛翔体は白色アルミナからなる砥石を組み合わせたものとした。

実験には、質量 3.4kg、2.66kg、2.08kg のものを用いた。



砥石	砥粒	白色アルミナ
	粒度	300~355μm
	気孔率	46%
	結合剤	ビトリファイドボンド
	密度	2421kg/m ³
	硬さ	O



質量	3.4kg	2.66kg	2.08kg
密度 [kg/m ³]	2421	2421	2421
体積 [m ³]	1404×10^{-6}	1098×10^{-6}	859×10^{-6}
球体換算した時の直径 [m]	13.9×10^{-2}	12.8×10^{-2}	11.8×10^{-2}

図3-19 使用した飛翔体

なお、様々な噴石のサイズと衝突エネルギーの目安は以下の通りである。衝突実験における標準供試体（直径 128mm、噴石換算重量 2.66kg）が 100m/s（360km/h）で衝突したときのエネルギーは、13,000J 程度と見積もられる。

表3-7 様々な噴石のサイズと衝突エネルギーの目安

	直径 [mm]	体積 [cm ³]	噴石換算 重量 [kg]	速度		衝突 エネルギー [J]
				[m/s]	[km/h]	
『火山れき』の下限（直径＝2の1乗[mm]）	2	0.0042	0.0000101	100	360	0.051
“ラムネ玉”程度（直径＝2の4乗[mm]）	16	2.1	0.00519			26
“ゴルフボール”程度	43	42	0.101			500
『火山れき』の上限（直径＝2の6乗[mm]）	64	140	0.332			1,700
“こぶし大”程度	100	520	1.27			6,300
標準試験体（直径＝2の7乗[mm]）	128	1100	2.66			13,000
“ボーリングの玉”程度	220	5400	13.1			66,000
30cmクラス	300	14000	34.2			170,000
『小さな噴石』の上限	500	65000	158			790,000

※試験体の密度:2,421kg/m³

衝突実験で使用した、供試体ごとの衝突エネルギーの目安は、以下の通りである。

表3-8 衝突実験で使用した、供試体ごとの衝突エネルギーの目安

	直径 [mm]	体積 [cm ³]	試験体 重量 [kg]	速度		衝突 エネルギー [J]
				[m/s]	[km/h]	
軽量試験体：1.4kg の円柱	103	580	1.40	128	460	11,000
標準試験体：2.66kg の円柱	128	1100	2.66	100	360	13,000
重量試験体：3.4kg の円柱	139	1400	3.40	81	293	11,000

〈衝突実験で用いたアラミド繊維織物の仕様〉

衝突実験で用いたアラミド繊維織物の仕様を表 3－9 に示す。

表3－9 衝突実験で用いたアラミド繊維織物の仕様

項目		仕様①	試験方法	仕様②	仕様③	試験方法
品名		Kevlar®織物		Twaron®織物	Technora®織物	
品番		#FS3300		TWF-N3001	TNF3002	
生地幅		105cm	—	105cm	110cm	—
素材		パラ系芳香族 ポリアミド 100%	JIS L1030-2 を 準用	パラ系芳香族 ポリアミド 100%	パラ系芳香族 ポリアミド 100%	JIS L1030-2 を 準用
繊維引張強度 (原系) (cN/dTex)		18 以上	ASTM D7269	18 以上	22 以上	ASTM D885
繊維引張伸度 (原系) (%)		3.3～4.3		3～4.5	4～5	
繊維引張弾性率 (原系) (GPa)		50～70		50～80	60～85	
融点または熱分解 温度(原系) (°C)		400 以上	JIS K0129	400 以上	400 以上	JIS K0129
組織		平織	JIS L1096	平織	平織 ／バスケット織	JIS L1096
織度 (dtex)	タテ	3333±99	JIS L1013	3460±100	(1670±60) × 2	JIS L1013
	ヨコ	3333±99		3460±100	(1670±60) × 2	
フィラメント 数 (本)	タテ	1333 (参考値)		2000 (参考値)	1000 (参考値)	
	ヨコ	1333 (参考値)		2000 (参考値)	1000 (参考値)	
密度 (本 /25mm)	タテ	16 以上	JIS L1096	16 以上	16 以上 (1670dTex 換算 32 本以上)	JIS L1096
	ヨコ	15 以上		15 以上	14 以上 (1670dTex 換算 28 本以上)	
厚さ(mm)		0.60±0.10		—	—	
質量〔標準状態〕 (g/m ²)		450 以上		430 以上	430 以上	
引張強さ (N/30mm)	タテ	9000 以上		9000 以上	9000 以上	
	ヨコ	9000 以上		9000 以上	9000 以上	
防護性能		515m/sec 以上 (生地を 15 枚重 ねた場合)	MIL-STD-662F を準用 (試験装置: MIL-STD-1161) (模擬弾: MIL-DTL-46593B)	500m/sec 以上 (参考値) (生地を 13 枚重 ねた場合)		Stanag2920 1.1g FSP

2) 衝突実験結果一覧

表3-10 衝突実験結果一覧(1)

回 [実施日]	実験 番号	供試体の諸元		飛翔体の諸元			実験結果 ○:貫通なし ×:貫通あり	備考
		表面	骨組	重量	衝突速度	衝突 エネルギー		
第1回 [5月8日]	(1)	表面 ① ペニヤ板 骨組	12 mm 1枚	3.4 kg (	80.9 m/s 291 km/h)	11126 J	×	【ペニヤ板の強度確認のため実施】 ・衝突部分が円形に抜ける
	(2)	表面 ① ペニヤ板 骨組	12 mm 1枚	2.08 kg (	80.15 m/s 289 km/h)	6681 J	×	【垂木による固定の効果確認のため実施】 ・衝突部分が円形に抜ける
	(3)	表面 ① ケブラー繊維 ② ケブラー繊維 ③ ペニヤ板 骨組	3300 dtex 3300 dtex 12 mm 1枚 45×45 mm 面端	2.08 kg (	78.47 m/s 282 km/h)	6404 J	○	【ケブラー繊維の効果を確認するため2枚張りにて実施】 ・1枚目のケブラー繊維は、一部がせん断により断裂 ・2枚目を含め飛翔体は貫通せず ・背面のペニヤ板が大きく破断 ・面端の垂木が中心部に向かって破断
第3回 [6月25日]	(4)	表面 ① ケブラー繊維 ② ペニヤ板 骨組	6600 dtex 12 mm 1枚 45×45 mm 面端	2.08 kg (	83.1 m/s 299 km/h)	7181 J	×	【繊維2倍のケブラー繊維の1枚張りとして実施】 ・ケブラー繊維は円形に貫通、貫通部より水平方向(垂木とは直行方向)に繊維が引っ張られた痕跡あり ・ペニヤ板も円形に貫通。貫通部より水平方向(垂木とは直行方向・合板の繊維とは直行方向)に破断 ・垂木の損傷なし。
	(5)	表面 ① ケブラー繊維 ② ペニヤ板 骨組	6600 dtex 12 mm 1枚 75×45 mm 面端	2.08 kg (	83.1 m/s 299 km/h)	7181 J	×	【既存屋根を模倣し、ガルバリウム鋼板を追加】 ・(4)の飛翔体衝突側に、屋根に用いられるガルバリウム鋼板を追加 ・応力が全体に分散し、ペニヤ板は大きく破断したもの、垂木は破断せず、貫通
	(6)	表面 ① ガルバリウム鋼板 ② 防水シート ③ 杉板(無垢材) 骨組	0.4 mm 1 mm 18 mm 1枚 45×45 mm 面端	2.66 kg (	84.3 m/s 303 km/h)	9452 J	×	【標準的な屋根の仕様における衝突耐力の確認】 ・ペニヤ板(12mm)に代えて杉板(18mm)を使用 ・ガルバリウム鋼板と防水シートを追加 ・飛翔体を“標準重量(球体換算の直径128mm(2の7乗mm))”に変更して実施
第5回 [7月7日]	(7)	表面 ① ガルバリウム鋼板 ② 防水シート ③ 杉板(無垢材) 骨組	0.4 mm 1 mm 18 mm 1枚 45×45 mm 面端	2.66 kg (	83.6 m/s 301 km/h)	9295 J	×	【天井のみ補強した場合の効果の閾値確認①】 ・天井部分ならば、耐水性が要求されないため、構造用合板を使用したと仮定 ・高機能繊維を使わずに、天井のみ補強した場合 ・固定枠の背面に構造用合板を設置
	(8)	表面 ① ガルバリウム鋼板 ② 防水シート ③ 杉板(無垢材) 骨組	0.4 mm 1 mm 18 mm 1枚 45×45 mm 面端	2.66 kg (	49.6 m/s 179 km/h)	3288 J	×	【天井のみ補強した場合の効果の閾値確認②】 ・飛翔体の速度を半分近くまで減速
	(9)	表面 ① ガルバリウム鋼板 ② 防水シート ③ 杉板(無垢材) 骨組	0.4 mm 1 mm 18 mm 1枚 45×45 mm 面端	2.66 kg (	37.0 m/s 133 km/h)	1815 J	○	【天井のみ補強した場合の効果の閾値確認③】 ・(8)と同じ仕様 ・(8)の結果を踏まえて、速度を調整、衝突耐力の上限を検証
第7回 [7月15日]	(10)	表面 ① ガルバリウム鋼板 ② 防水シート ③ ケブラー繊維 ④ 杉板(無垢材) 骨組	0.4 mm 1 mm 6600 dtex 18 mm 1枚 45×45 mm 面端	2.66 kg (	81.7 m/s 294 km/h)	8870 J	×	【繊維1枚、天井補強ありの場合の効果】 ・(5)に対して、(7)試験体の重さ増、(7)垂木断面減少、(7)天井の補強を追加。
	(11)	表面 ① ガルバリウム鋼板 ② 防水シート ③ ケブラー繊維 ④ 杉板(無垢材) 骨組	0.4 mm 1 mm 6600 dtex 18 mm 1枚 45×45 mm 面端	2.66 kg (	78.9 m/s 284 km/h)	8277 J	○	【屋根補強のみの効果の確認(6600dtex)】 ・施工性を考慮し、屋根のみの補強に留め、2枚使いとした場合 ・天井補強なし(屋根繊維補強のみ)の場合の標準仕様。

表3-1-1 衝突実験結果一覧(2)

回 [実施日]	実験 番号	供試体の諸元	飛翔体の諸元		実験結果 ○:貫通なし ×:貫通あり	備考									
			重量	衝突速度 衝突エネルギー											
第8回 [7月17日]	(12)	表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚	2.66 kg	(83.4 m/s 300 km/h)	9250 J	○ 【屋根補強のみの効果の確認(3300tex)】 ・③の結果について、6400J ⇒ 9200J超となった場合の効果を確認 (ガルバリウム鋼板、ペニヤ板(12mm)⇒杉板(18mm)の強度向上を含む) ・(11)の結果について、3300texとした場合の耐力の検証									
		① 防水シート 1 mm 1枚													
		② ケブラー織物 3300 dex 1枚													
		③ ケブラー織物 3300 dex 1枚													
		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚													
		骨組 垂木 45×45 mm 面端													
		(13)					表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚	2.66 kg	(80.7 m/s 291 km/h)	8661 J	× 【ナイロン66の2枚張りの間値の確認(ケブラー織物織物との比較)①】 ・ケブラー織物織物のかわりに、ナイロン66で2枚張り。				
		① 防水シート 1 mm 1枚													
		② ナイロン66 470 dex 1枚													
		③ ナイロン66 470 dex 1枚													
		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚													
		骨組 垂木 45×45 mm 面端													
第9回 [7月23日]	(14)	表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚	2.66 kg	(47.6 m/s 171 km/h)	3013 J	× 【ナイロン66の2枚張りの間値の確認(ケブラー織物織物との比較)②】 ・(13)の結果を踏まえて、速度を下げる。									
		① 防水シート 1 mm 1枚													
		② ナイロン66 470 dex 1枚													
		③ ナイロン66 470 dex 1枚													
		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚													
		骨組 垂木 45×45 mm 面端													
		(15)					表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚	2.66 kg	(99.9 m/s 360 km/h)	13273 J	○ 【ケブラー織物2枚張り(上張り)の間値の確認((12)の効果の上限)】 ・(12)の結果を踏まえ、速度を調整、ケブラー織物織物2枚張り(3300tex)の上限を確認。				
		① 防水シート 1 mm 1枚													
		② ケブラー織物 3300 dex 1枚													
		③ ケブラー織物 3300 dex 1枚													
		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚													
		骨組 垂木 45×45 mm 面端													
第10回 [7月28日]	(16)	表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚	2.66 kg	(83.3 m/s 300 km/h)	9229 J	× 【杉板の後ろ側に繊維を貼る場合】 ・同じ材料を用いながら、垂木と野地板(杉板)の間に繊維を入れる場合									
		① 防水シート 1 mm 1枚													
		② 杉板(無垢材) 18 mm 1枚													
		③ ケブラー織物 3300 dex 1枚													
		④ ケブラー織物 3300 dex 1枚													
		骨組 垂木 45×45 mm 面端													
		(17)					表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚	2.66 kg	(50.8 m/s 183 km/h)	3432 J	○ 【杉板の後ろ側に繊維を貼る場合(間値の確認)】 ・(16)の結果を踏まえ、速度を調整。(15)との結果を比較。				
		① 防水シート 1 mm 1枚													
		② 杉板(無垢材) 18 mm 1枚													
		③ ケブラー織物 3300 dex 1枚													
		④ ケブラー織物 3300 dex 1枚													
		骨組 垂木 45×45 mm 面端													
第11回 [7月30日] 第12回 [8月4日]	(18)	表面 軽石入り土壌 約300 mm 1袋	3.4 kg	(75.3 m/s 271 km/h)	9639 J	— 【「土」のめり込み実験(エネルギー減衰効果試験)は可能か。】 ・衝突面は衝撃耐力を期待しない素材(ビニール) ・普通の山小屋の様子 ・ハイスピードカメラでの撮影 ・補強を行わない場合の噴石が貫通する様子の撮影。									
		① 鋼板(SS400) 2.3 mm 1枚													
		(19)					表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚					2.66 kg	(83.2 m/s 299 km/h)	9207 J	× 【繊維で噴石が止まる状況について映像で確認】 ・ハイスピードカメラでの撮影 ・これまでの結果を踏まえ、止まる速度で実施。
		① 防水シート 1 mm 1枚													
		② 杉板(無垢材) 18 mm 1枚													
		③ 杉板(無垢材) 45×45 mm 1枚													
		骨組 垂木 45×45 mm 面端													
		(20)					表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚	2.66 kg	(81.2 m/s 292 km/h)	8769 J	○				
		① 防水シート 1 mm 1枚													
		② ケブラー織物 3300 dex 1枚													
		③ ケブラー織物 3300 dex 1枚													
		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚													
骨組 垂木 45×45 mm 面端															

表3-12 衝突実験結果一覧(3)

回 [実施日]	実験 番号	供試体の諸元	飛翔体の諸元			実験結果 ○:貫通なし ×:貫通あり	備考
			重量	衝突速度	衝突エネルギー		
第13回 [9月16日] <公開>	(21)	表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚	3.4 kg (81.4 m/s 293 km/h)	11264 J	○	【重量が大きい場合】 ・(15)を踏まえ、重量を大きくした場合
		① 防水シート 1 mm 1枚					
		② ケブラー織物 3300 dtex 1枚					
		③ ケブラー織物 3300 dtex 1枚					
(22)		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚	1.4 kg (127.9 m/s 460 km/h)	11451 J	○	【速度が速い場合】 ・(15)を踏まえ、速度を速めた場合
		① 防水シート 0.4 mm 1枚					
		② ケブラー織物 3300 dtex 1枚					
		③ ケブラー織物 3300 dtex 1枚					
第14回 [10月7日]	(23)	④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚	2.66 kg (79.2 m/s 285 km/h)	8342 J	○	【トワロン織物2枚張り】 ・アラミド繊維の製品を変えた場合
		表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚					
		① 防水シート 1 mm 1枚					
		② トワロン織物 3460 dtex 1枚					
(24)		③ トワロン織物 3460 dtex 1枚	2.66 kg (86.2 m/s 310 km/h)	9882 J	○	【トワロン織物2枚張りの効果の確認】 ・(23)を踏まえ、速度を速めた場合
		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚					
		表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚					
		① 防水シート 1 mm 1枚					
第15回 [10月21日]	(25)	② トワロン織物 3460 dtex 1枚	2.66 kg (およそ100 m/s およそ360 km/h)	約13300 J	○	【トワロン織物2枚張りの効果の上限の確認】 ・(24)を踏まえ、速度を速めた場合 ※速度はゲージ圧から推定
		③ トワロン織物 3460 dtex 1枚					
		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚					
		表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚					
(26)		① 防水シート 1 mm 1枚	2.66 kg (78.6 m/s 283 km/h)	8216 J	○	【テクノール織物(バスケット織の場合)2枚張り】 ・アラミド繊維の製品を変えた場合
		② テクノール織物 1670×2 dtex 1枚					
		③ テクノール織物 1670×2 dtex 1枚					
		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚					
(27)		表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚	2.66 kg (97.7 m/s 352 km/h)	12695 J	○	【テクノール織物(バスケット織の場合)2枚張りの効果の上限の確認】 ・(26)を踏まえ、速度を速めた場合 ・繊維に亀裂が生じたものの飛翔体は貫通せず
		① 防水シート 1 mm 1枚					
		② テクノール織物 1670×2 dtex 1枚					
		③ テクノール織物 1670×2 dtex 1枚					
		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚					
		表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚					
		① 防水シート 1 mm 1枚					
		② テクノール織物 1670×2 dtex 1枚					
		③ テクノール織物 1670×2 dtex 1枚					
		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚					
		表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚					
		① 防水シート 1 mm 1枚					
		② テクノール織物 1670×2 dtex 1枚					
		③ テクノール織物 1670×2 dtex 1枚					
		④ 杉板(無垢材) 18 mm 1枚					
		表面 ガルバリウム鋼板 0.4 mm 1枚					

3) 衝突実験結果写真

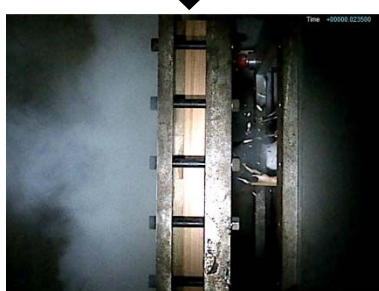
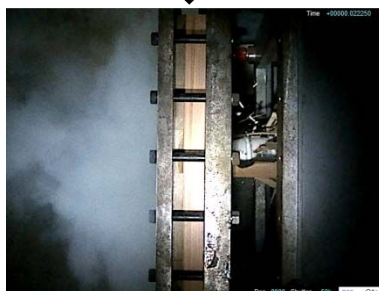
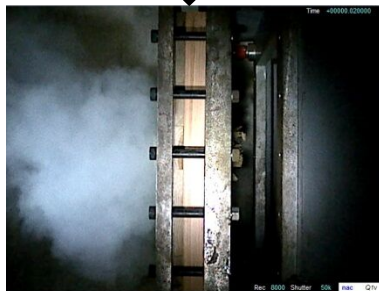
〈ハイスピードカメラ撮影による衝突時の状況〉

○実験番号(19)

・補強しない場合

・2.66kg、時速 300km

表面	ガルバリウム鋼板
①	防水シート
②	杉板（無垢材）
骨組	垂木



○実験番号(20)

・補強した場合

・2.66kg、時速 290km

表面	ガルバリウム鋼板
①	防水シート
②	ケブラー織物
③	ケブラー織物
④	杉板（無垢材）
骨組	垂木

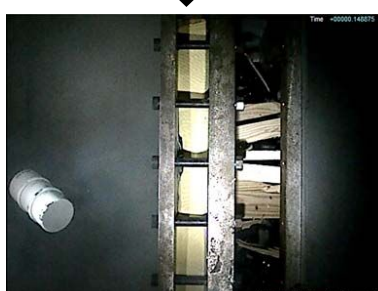
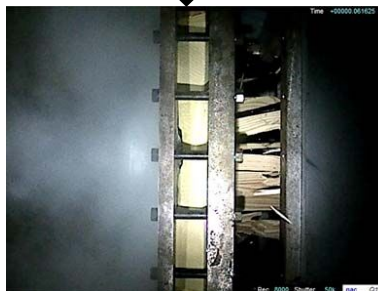
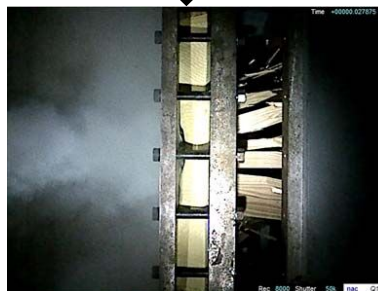


図3-20 衝突時の状況(ハイスピードカメラによる撮影)

〈衝突後の供試体の状況〉

表3-13 衝突後の供試体の状況(実験番号1~5)







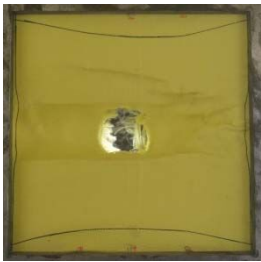
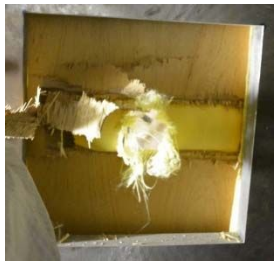


実験 番号	衝突面	衝突裏面	供試体
(1)			表面：－ ①ベニヤ板 骨組：－ 衝突速度：80.9m/s 衝突エネルギー：11126J <u>貫通あり</u>
(2)			表面：－ ①ベニヤ板 骨組：垂木 衝突速度：80.15m/s 衝突エネルギー：6681J <u>貫通あり</u>
(3)			表面：－ ①ケブラー織物 ②ケブラー織物 ③ベニヤ板 骨組：垂木 衝突速度：78.47m/s 衝突エネルギー：6404J <u>貫通なし</u>
(4)			表面：－ ①ケブラー織物 ②ベニヤ板 骨組：垂木 衝突速度：83.1m/s 衝突エネルギー：7181J <u>貫通あり</u>
(5)			表面：ガルバリウム鋼板 ①ケブラー織物 ②ベニヤ板 骨組：垂木 衝突速度：83.1m/s 衝突エネルギー：7181J <u>貫通あり</u>

表3-14 衝突後の供試体の状況(実験番号6~10)

実験 番号	衝突面	衝突裏面	供試体
(6)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：84.3m/s 衝突エネルギー：9452</p> <p>貫通あり</p>
(7)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②杉板（無垢材） ③杉板（無垢材） 骨組：垂木 天井：構造用合板</p> <p>衝突速度：83.6m/s 衝突エネルギー：9295J</p> <p>貫通あり</p>
(8)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②杉板（無垢材） 骨組：垂木 天井：構造用合板</p> <p>衝突速度：49.6m/s 衝突エネルギー：3288J</p> <p>貫通あり</p>
(9)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②杉板（無垢材） 骨組：垂木 天井：構造用合板</p> <p>衝突速度：37.0m/s 衝突エネルギー：1815J</p> <p>貫通なし</p>
(10)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②ケブラー織物 ③杉板（無垢材） 骨組：垂木 天井：杉板（無垢材）</p> <p>衝突速度：81.7m/s 衝突エネルギー：8870J</p> <p>貫通あり</p>

表3-15 衝突後の供試体の状況(実験番号 11~15)











実験 番号	衝突面	衝突裏面	供試体
(11)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②ケブラー織物 ③ケブラー織物 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：78.9m/s 衝突エネルギー：8277J</p> <p>貫通なし</p>
(12)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②ケブラー織物 ③ケブラー織物 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：83.4m/s 衝突エネルギー：9250J</p> <p>貫通なし</p>
(13)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②ナイロン 66 ③ナイロン 66 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：80.7m/s 衝突エネルギー：8661J</p> <p>貫通あり</p>
(14)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②ナイロン 66 ③ナイロン 66 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：47.6m/s 衝突エネルギー：3013J</p> <p>貫通あり</p>
(15)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②ケブラー織物 ③ケブラー織物 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：99.9m/s 衝突エネルギー：13273J</p> <p>貫通なし</p>

表3-16 衝突後の供試体の状況(実験番号 16~20)




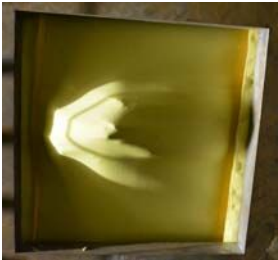


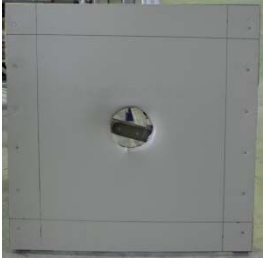



実験 番号	衝突面	衝突裏面	供試体
(16)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②杉板（無垢材） ③ケブラー織物 ④ケブラー織物 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：83.3/s 衝突エネルギー：9229J</p> <p>貫通あり</p>
(17)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②杉板（無垢材） ③ケブラー織物 ④ケブラー織物 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：50.8m/s 衝突エネルギー：3432J</p> <p>貫通なし</p>
(18)			<p>表面：軽石入り土嚢 ①鋼板（SS400）</p> <p>衝突速度：75.3m/s 衝突エネルギー：9639J</p> <p>貫通なし</p>
(19)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：83.2m/s 衝突エネルギー：9207J</p> <p>貫通あり</p>
(20)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②ケブラー織物 ③ケブラー織物 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：81.29m/s 衝突エネルギー：8769J</p> <p>貫通なし</p>

表3-17 衝突後の供試体の状況(実験番号 21~25)















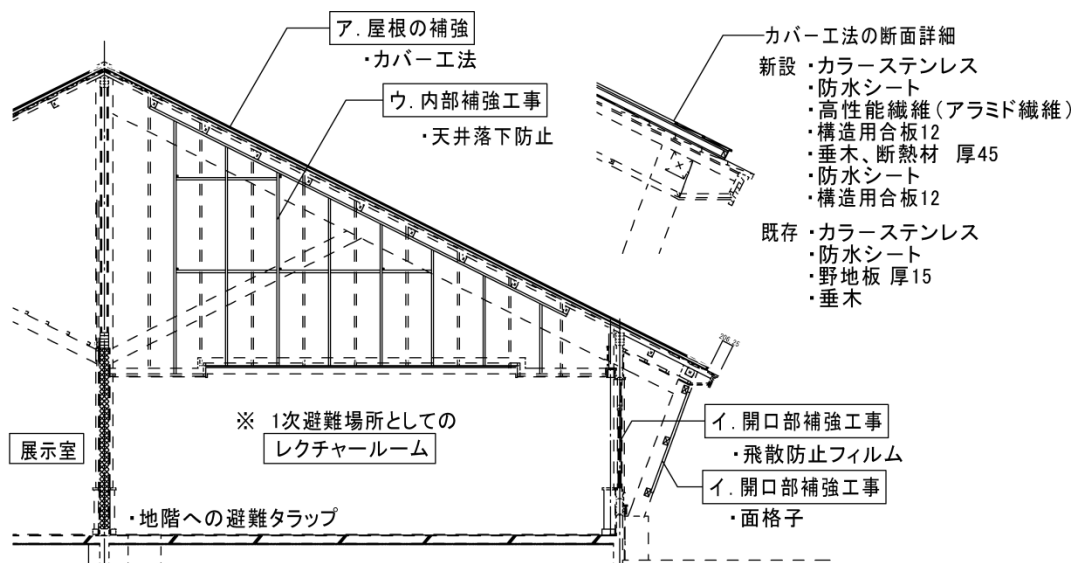
実験 番号	衝突面	衝突裏面	供試体
(21)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②ケブラー織物 ③ケブラー織物 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：81.4m/s 衝突エネルギー：11264J</p> <p>貫通なし</p>
(22)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②ケブラー織物 ③ケブラー織物 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：127.9m/s 衝突エネルギー：11451J</p> <p>貫通なし</p>
(23)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②トワロン織物 ③トワロン織物 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：79.2m/s 衝突エネルギー：8342J</p> <p>貫通なし</p>
(24)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②トワロン織物 ③トワロン織物 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：86.2m/s 衝突エネルギー：9882J</p> <p>貫通なし</p>
(25)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②トワロン織物 ③トワロン織物 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：およそ 100m/s 衝突エネルギー：約 13300J</p> <p>貫通なし</p>

表3-18 衝突後の供試体の状況(実験番号 26~27)

実験 番号	衝突面	衝突裏面	供試体
(26)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②テクノーラ織物 ③テクノーラ織物 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：78.6m/s 衝突エネルギー：8216J</p> <p>貫通なし</p>
(27)			<p>表面：ガルバリウム鋼板 ①防水シート ②テクノーラ織物 ③テクノーラ織物 ④杉板（無垢材） 骨組：垂木</p> <p>衝突速度：97.7m/s 衝突エネルギー：12695J</p> <p>貫通なし</p>

〈補強改修工事事例（施工中）〉



レクチャールーム補強概要図（断面図）

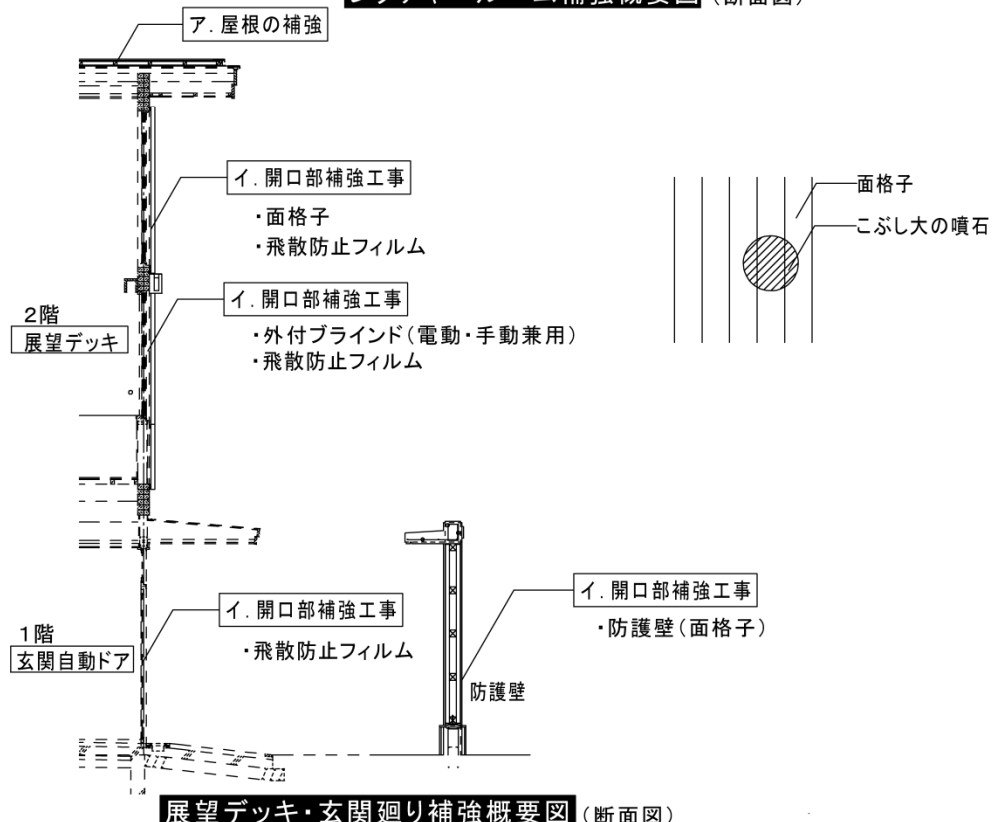


図3-21 えびのエコミュージアムセンターの補強改修工事の例

（環境省九州地方環境事務所 HP）

※屋根の補強において使用する高機能繊維織物（アラミド繊維織物）は、本手引きの検討内容を踏まえて採用した。

4. 関係法令・諸手続等

(1) 活動火山対策特別措置法（抜粋）

（火山災害警戒地域）

第三条 内閣総理大臣は、基本指針に基づき、かつ、火山の爆発の蓋然性を勘案して、火山が爆発した場合には住民等の生命又は身体に被害が生ずるおそれがあると認められる地域で、当該地域における火山の爆発による人的災害を防止するために警戒避難体制を特に整備すべき地域を、火山災害警戒地域（以下「警戒地域」という。）として指定することができる。

2～5 （略）

（火山防災協議会）

第四条 前条第一項の規定による警戒地域の指定があつたときは、当該警戒地域をその区域に含む都道府県及び市町村は、想定される火山現象の状況に応じた警戒避難体制の整備に関し必要な協議を行うための協議会（以下「火山防災協議会」という。）を組織するものとする。

2 火山防災協議会は、次に掲げる者をもつて構成する。

- 一 当該都道府県の知事及び当該市町村の長
- 二 警戒地域の全部若しくは一部を管轄する管区気象台長、沖縄気象台長若しくは地方気象台長又はその指名する職員
- 三 警戒地域の全部若しくは一部を管轄する地方整備局長若しくは北海道開発局長又はその指名する職員
- 四 警戒地域の全部若しくは一部を警備区域とする陸上自衛隊の方面総監又はその指名する部隊若しくは機関の長
- 五 警視総監又は当該道府県の道府県警察本部長
- 六 当該市町村の消防長（消防本部を置かない市町村にあつては、消防団長）
- 七 火山現象に関し学識経験を有する者
- 八 観光関係団体その他の当該都道府県及び市町村が必要と認める者

3 火山防災協議会において協議が調つた事項については、火山防災協議会の構成員は、その協議の結果を尊重しなければならない。

4 （略）

（市町村地域防災計画に定めるべき事項等）

第六条 市町村防災会議は、第三条第一項の規定による警戒地域の指定があつたときは、市町村地域防災計画（災害対策基本法第四十二条第一項の市町村地域防災計画をいう。以下同じ。）において、当該警戒地域ごとに、次に掲げる事項について定めなければならない。

- 一 前条第一項第一号に掲げる事項
- 二 警戒地域内の住民等がとるべき立退きの準備その他の避難のための措置について

市町村長が行う通報及び警告に関する事項

三 避難施設その他の避難場所及び避難路その他の避難経路に関する事項

四 災害対策基本法第四十八条第一項の防災訓練として市町村長が行う火山現象に係る避難訓練の実施に関する事項

五 警戒地域内に次に掲げる施設（火山現象の発生時における当該施設を利用している者の円滑かつ迅速な避難を確保する必要があると認められるものに限る。）がある場合にあっては、これらの施設の名称及び所在地

イ 索道の停留場、宿泊施設その他の不特定かつ多数の者が利用する施設で政令で定めるもの

ロ 社会福祉施設、学校、医療施設その他の主として防災上の配慮を要する者が利用する施設で政令で定めるもの

六 救助に関する事項

七 前各号に掲げるもののほか、警戒地域における火山の爆発による人的災害を防止するために必要な警戒避難体制に関する事項

2、3 （略）

（避難確保計画の作成等）

第八条 第六条第一項の規定により市町村地域防災計画にその名称及び所在地を定められた同項第五号の施設（以下この条において「避難促進施設」という。）の所有者又は管理者は、単独で又は共同して、内閣府令で定めるところにより、避難訓練その他火山現象の発生時における当該避難促進施設を利用している者の円滑かつ迅速な避難の確保を図るために必要な措置に関する計画（以下この条において「避難確保計画」という。）を作成しなければならない。

2 避難促進施設の所有者又は管理者は、避難確保計画を作成したときは、遅滞なく、これを市町村長に報告するとともに、公表しなければならない。当該避難確保計画を変更したときも、同様とする。

3 避難促進施設の所有者又は管理者は、避難確保計画の定めるところにより避難訓練を行うとともに、その結果を市町村長に報告しなければならない。

4 市町村長は、前二項の規定により報告を受けたときは、避難促進施設の所有者又は管理者に対し、火山現象の発生時における当該避難促進施設を利用している者の円滑かつ迅速な避難の確保を図るために必要な助言又は勧告をすることができる。

5 避難促進施設の所有者又は管理者の使用人その他の従業者は、避難確保計画の定めるところにより、第三項の避難訓練に参加しなければならない。

6 避難促進施設の所有者又は管理者は、第三項の避難訓練を行おうとするときは、避難促進施設を利用する者に協力を求めることができる。

第四章 避難施設の整備その他の事業の実施等

（避難施設緊急整備地域の指定等）

第十三条 内閣総理大臣は、基本指針に基づき、火山の爆発により住民等の生命又は身体に被害が生じ、又は生ずるおそれがある地域で、その被害を防止するための施設を緊急

に整備する必要がある地域を避難施設緊急整備地域として指定することができる。

2、3 （略）

（避難施設緊急整備計画）

第十四条 前条第一項の規定による避難施設緊急整備地域の指定があつたときは、関係都道府県知事は、基本指針に基づき、当該避難施設緊急整備地域について、住民等の速やかな避難のために必要な施設を緊急に整備するための計画（以下「避難施設緊急整備計画」という。）を作成しなければならない。この場合においては、あらかじめ、内閣総理大臣に協議し、その同意を得なければならない。

2 都道府県知事は、避難施設緊急整備計画を作成しようとするときは、あらかじめ、関係市町村長の意見を聴かなければならない。

3 内閣総理大臣は、第一項の同意をしようとするときは、あらかじめ、関係行政機関の長と協議しなければならない。

4 前三項の規定は、避難施設緊急整備計画の変更について準用する。

第十五条 避難施設緊急整備計画は、次に掲げる事項について定めるものとする。

- 一 道路又は港湾の整備に関する事項
- 二 広場の整備に関する事項
- 三 退避壕その他の退避施設の整備に関する事項
- 四 学校、公民館等の不燃堅牢化に関する事項

（避難施設緊急整備計画に基づく事業の実施）

第十六条 避難施設緊急整備計画に基づく事業は、当該事業に関する法律（これに基づく命令を含む。）の規定に従い国、地方公共団体その他の者が実施するものとされているものを除き、市町村が実施するものとする。

（国の予算への経費の計上及び特別な助成）

第十七条 政府は、毎年度、国の財政の許す範囲内において、避難施設緊急整備計画に基づく事業を実施するために必要な経費を予算に計上しなければならない。

2 国は、避難施設緊急整備計画に基づく事業を実施する地方公共団体その他の者に対し、地方財政法（昭和二十三年法律第百九号）第十六条の規定に基づく補助金を交付し、必要な資金を融通し、又はあつせんし、その他必要と認める措置を講ずることができる。

（起債の特例）

第十八条 避難施設緊急整備計画に基づく事業で地方公共団体が実施するものにつき当該地方公共団体が必要とする経費については、地方財政法第五条 各号に規定する経費に該当しないものについても、地方債をもつてその財源とすることができる。

2 前項の地方債は、国が、その資金事情の許す限り、財政融資資金をもつて引き受けるものとする。

(2) 自然公園法 (抜粋)

(特別地域)

第二十条 環境大臣は国立公園について、都道府県知事は国定公園について、当該公園の風致を維持するため、公園計画に基づいて、その区域（海域を除く。）内に、特別地域を指定することができる。

2 第五条第三項及び第四項の規定は、特別地域の指定及び指定の解除並びにその区域の変更について準用する。この場合において、同条第三項中「環境大臣」とあるのは「環境大臣又は都道府県知事」と、「官報」とあるのは「それぞれ官報又は都道府県の公報」と読み替えるものとする。

3 特別地域（特別保護地区を除く。以下この条において同じ。）内においては、次の各号に掲げる行為は、国立公園にあつては環境大臣の、国定公園にあつては都道府県知事の許可を受けなければ、してはならない。ただし、非常災害のために必要な応急措置として行う行為又は第三号に掲げる行為で森林の整備及び保全を図るために行うものは、この限りでない。

一 工作物を新築し、改築し、又は増築すること。

二 木竹を伐採すること。

三 環境大臣が指定する区域内において木竹を損傷すること。

四 鉱物を掘採し、又は土石を採取すること。

五 河川、湖沼等の水位又は水量に増減を及ぼさせること。

六 環境大臣が指定する湖沼又は湿原及びこれらの周辺一キロメートルの区域内において当該湖沼若しくは湿原又はこれらに流水が流入する水域若しくは水路に汚水又は廃水を排水設備を設けて排出すること。

七 広告物その他これに類する物を掲出し、若しくは設置し、又は広告その他これに類するものを工作物等に表示すること。

八 屋外において土石その他の環境大臣が指定する物を集積し、又は貯蔵すること。

九 水面を埋め立て、又は干拓すること。

十 土地を開墾しその他土地の形状を変更すること。

十一 高山植物その他の植物で環境大臣が指定するものを採取し、又は損傷すること。

十二 環境大臣が指定する区域内において当該区域が本来の生育地でない植物で、当該区域における風致の維持に影響を及ぼすおそれがあるものとして環境大臣が指定するものを植栽し、又は当該植物の種子をまくこと。

十三 山岳に生息する動物その他の動物で環境大臣が指定するものを捕獲し、若しくは殺傷し、又は当該動物の卵を採取し、若しくは損傷すること。

十四 環境大臣が指定する区域内において当該区域が本来の生息地でない動物で、当該区域における風致の維持に影響を及ぼすおそれがあるものとして環境大臣が指定するものを放つこと（当該指定する動物が家畜である場合における当該家畜である動物の放牧を含む。）。

十五 屋根、壁面、塀、橋、鉄塔、送水管その他これらに類するものの色彩を変更すること。

十六 湿原その他これに類する地域のうち環境大臣が指定する区域内へ当該区域ごとに指定する期間内に立ち入ること。

十七 道路、広場、田、畑、牧場及び宅地以外の地域のうち環境大臣が指定する区域内において車馬若しくは動力船を使用し、又は航空機を着陸させること。

十八 前各号に掲げるもののほか、特別地域における風致の維持に影響を及ぼすおそれがある行為で政令で定めるもの

4 環境大臣又は都道府県知事は、前項各号に掲げる行為で環境省令で定める基準に適合しないものについては、同項の許可をしてはならない。

5 都道府県知事は、国立公園について第三項の許可をしようとする場合において、当該許可に係る行為が当該国立公園の風致に及ぼす影響その他の事情を考慮して環境省令で定める行為に該当するときは、環境大臣に協議しなければならない。

6 第三項の規定により同項各号に掲げる行為が規制されることとなつた時において既に当該行為に着手している者は、同項の規定にかかわらず、引き続き当該行為をすることができる。この場合において、その者は、その規制されることとなつた日から起算して三月以内に、国立公園にあつては環境大臣に、国立公園にあつては都道府県知事にその旨を届け出なければならない。

7 特別地域内において非常災害のために必要な応急措置として第三項各号に掲げる行為をした者は、その行為をした日から起算して十四日以内に、国立公園にあつては環境大臣に、国立公園にあつては都道府県知事にその旨を届け出なければならない。

8、9 (略)

(特別保護地区)

第二十一条 環境大臣は国立公園について、都道府県知事は国立公園について、当該公園の景観を維持するため、特に必要があるときは、公園計画に基づいて、特別地域内に特別保護地区を指定することができる。

2 第五条第三項及び第四項の規定は、特別保護地区の指定及び指定の解除並びにその区域の変更について準用する。この場合において、同条第三項中「環境大臣」とあるのは「環境大臣又は都道府県知事」と、「官報」とあるのは「それぞれ官報又は都道府県の公報」と読み替えるものとする。

3 特別保護地区内においては、次の各号に掲げる行為は、国立公園にあつては環境大臣の、国立公園にあつては都道府県知事の許可を受けなければ、してはならない。ただし、非常災害のために必要な応急措置として行う行為は、この限りでない。

一 前条第三項第一号、第二号、第四号から第七号まで、第九号、第十号、第十五号及び第十六号に掲げる行為

二 木竹を損傷すること。

三 木竹を植栽すること。

四 動物を放つこと（家畜の放牧を含む。）。

五 屋外において物を集積し、又は貯蔵すること。

六 火入れ又はたき火をすること。

七 木竹以外の植物を採取し、若しくは損傷し、又は落葉若しくは落枝を採取すること。

- 八 木竹以外の植物を植栽し、又は植物の種子をまくこと。
- 九 動物を捕獲し、若しくは殺傷し、又は動物の卵を採取し、若しくは損傷すること。
- 十 道路及び広場以外の地域内において車馬若しくは動力船を使用し、又は航空機を着陸させること。
- 十一 前各号に掲げるもののほか、特別保護地区における景観の維持に影響を及ぼすおそれがある行為で政令で定めるもの
- 4 環境大臣又は都道府県知事は、前項各号に掲げる行為で環境省令で定める基準に適合しないものについては、同項の許可をしてはならない。
- 5 都道府県知事は、国立公園について第三項の許可をしようとする場合において、当該許可に係る行為が当該国立公園の景観に及ぼす影響その他の事情を考慮して環境省令で定める行為に該当するときは、環境大臣に協議しなければならない。
- 6 第三項の規定により同項各号に掲げる行為が規制されることとなつた時において既に当該行為に着手している者は、同項の規定にかかわらず、引き続き当該行為をすることができる。この場合において、その者は、その規制されることとなつた日から起算して三月以内に、国立公園にあつては環境大臣に、国立公園にあつては都道府県知事にその旨を届け出なければならない。
- 7 特別保護地区内において非常災害のために必要な応急措置として第三項各号に掲げる行為をした者は、その行為をした日から起算して十四日以内に、国立公園にあつては環境大臣に、国立公園にあつては都道府県知事にその旨を届け出なければならない。
- 8 (略)

(普通地域)

第三十三条 国立公園又は国立公園の区域のうち特別地域及び海域公園地区に含まれない区域（以下「普通地域」という。）内において、次に掲げる行為をしようとする者は、国立公園にあつては環境大臣に対し、国立公園にあつては都道府県知事に対し、環境省令で定めるところにより、行為の種類、場所、施行方法及び着手予定日その他環境省令で定める事項を届け出なければならない。ただし、第一号、第三号、第五号及び第七号に掲げる行為で海域内において漁具の設置その他漁業を行うために必要とされるものをしようとする者は、この限りでない。

- 一 その規模が環境省令で定める基準を超える工作物を新築し、改築し、又は増築すること（改築又は増築後において、その規模が環境省令で定める基準を超えるものとなる場合における改築又は増築を含む。）。
- 二 特別地域内の河川、湖沼等の水位又は水量に増減を及ぼさせること。
- 三 広告物その他これに類する物を掲出し、若しくは設置し、又は広告その他これに類するものを工作物等に表示すること。
- 四 水面を埋め立て、又は干拓すること。
- 五 鉱物を掘採し、又は土石を採取すること（海域内においては、海域公園地区の周辺一キロメートルの当該海域公園地区に接続する海域内においてする場合に限る。）。
- 六 土地の形状を変更すること。
- 七 海底の形状を変更すること（海域公園地区の周辺一キロメートルの当該海域公園地

区に接続する海域内においてする場合に限る。)

- 2 環境大臣は国立公園について、都道府県知事は国定公園について、当該公園の風景を保護するために必要があると認めるときは、普通地域内において前項の規定により届出を要する行為をしようとする者又はした者に対して、その風景を保護するために必要な限度において、当該行為を禁止し、若しくは制限し、又は必要な措置を執るべき旨を命ずることができる。
- 3 前項の処分は、第一項の届出をした者に対しては、その届出があつた日から起算して三十日以内に限り、することができる。
- 4 環境大臣又は都道府県知事は、第一項の届出があつた場合において、実地の調査をする必要があるとき、その他前項の期間内に第二項の処分をすることができない合理的な理由があるときは、その理由が存続する間、前項の期間を延長することができる。この場合においては、同項の期間内に、第一項の届出をした者に対し、その旨及び期間を延長する理由を通知しなければならない。
- 5 第一項の届出をした者は、その届出をした日から起算して三十日を経過した後でなければ、当該届出に係る行為に着手してはならない。
- 6 環境大臣は国立公園について、都道府県知事は国定公園について、当該公園の風景の保護に支障を及ぼすおそれがないと認めるときは、前項の期間を短縮することができる。
- 7 次の各号に掲げる行為については、第一項及び第二項の規定は、適用しない。
 - 一 公園事業の執行として行う行為
 - 二 認定生態系維持回復事業等として行う行為
 - 三 第四十三条第一項の規定により締結された風景地保護協定に基づいて同項第一号の風景地保護協定区域内で行う行為であつて、同項第二号又は第三号に掲げる事項に従つて行うもの
 - 四 通常管理行為、軽易な行為その他の行為であつて、環境省令で定めるもの
 - 五 国立公園、国定公園若しくは海域公園地区が指定され、又はその区域が拡張された際既に着手していた行為
 - 六 非常災害のために必要な応急措置として行う行為

(3) 国有林野の管理経営に関する法律（抜粋）

（国有林野の貸付け、売払い等）

第七条 第二条第一項第一号の国有林野は、次の各号のいずれかに該当する場合には、その用途又は目的を妨げない限度において、契約により、貸し付け、又は貸付け以外の方法により使用（収益を含む。以下同じ。）させることができる。

- 一 公用、公共用又は公益事業の用に供するとき。
- 二 土地収用法（昭和二十六年法律第二百十九号）その他の法令により他人の土地を使用することができる事業の用に供するとき。
- 三 第六条の二第一項の計画に従つて整備される公衆の保健の用に供する施設の用に供するとき。
- 四 放牧又は採草の用に供するとき。
- 五 その用途又は目的を妨げない限度において、貸し付け、又は使用させる面積が五ヘクタールを超えないとき。

2 前項の規定により国有林野を貸し付け、又は貸付け以外の方法により使用させる場合には、国有財産法第二十一条から第二十五条まで（鉄道、道路その他政令で定める施設の用に供される土地に地上権を設定する場合にあつては、第二十一条及び第二十三条を除く。）の規定を準用する。

第八条 第二条第一項第二号の国有林野を売り払い、貸し付け、又は使用させようとする場合において、次に掲げる者からその買受け、借受け又は使用の申請があつたときは、これを他に優先させなければならない。

- 一 当該林野を公用、公共用又は公益事業の用に供する者
- 二 当該林野を基本財産に充てる地方公共団体
- 三 当該林野に特別の縁故がある者で農林水産省令で定めるもの
- 四 当該林野をその所在する地方の農山漁村の産業の用に供する者

(4) 森林法（抜粋）

（伐採及び伐採後の造林の届出）

第十条の八 森林所有者等は、地域森林計画の対象となつてゐる民有林（第二十五条又は第二十五条の二の規定により指定された保安林及び第四十一条の規定により指定された保安施設地区の区域内の森林を除く。）の立木を伐採するには、農林水産省令で定める手続に従い、あらかじめ、市町村の長に森林の所在場所、伐採面積、伐採方法、伐採齢、伐採後の造林の方法、期間及び樹種その他農林水産省令で定める事項を記載した伐採及び伐採後の造林の届出書を提出しなければならない。ただし、次の各号のいずれかに該当する場合は、この限りでない。

- 一 法令又はこれに基づく処分により伐採の義務のある者がその履行として伐採する場合
 - 二 第十条の二第一項の許可を受けた者が当該許可に係る同項の開発行為をするために伐採する場合
 - 三 第十条の十一の四第一項（第十条の十一の六第二項において読み替えて準用する場合を含む。）の裁定（第十条の十一の二第一項第一号の契約の締結に関するものを除く。）に基づいて伐採をする場合
 - 四 第十条の十七第一項の規定による公告に係る第十条の十五第一項に規定する公益的機能維持増進協定（その変更につき第十条の十八において準用する第十条の十七第一項の規定による公告があつたときは、その変更後のもの）に基づいて伐採する場合
 - 五 第十一条第五項の認定に係る森林経営計画（その変更につき第十二条第三項において読み替えて準用する第十一条第五項の規定による認定があつたときは、その変更後のもの）において定められている伐採をする場合
 - 六 森林所有者等が第四十九条第一項の許可を受けて伐採する場合
 - 七 第百八十八条第三項の規定に基づいて伐採する場合
 - 八 法令によりその立木の伐採につき制限がある森林で農林水産省令で定めるものの以外の森林（次号において「普通林」という。）であつて、立木の果実の採取その他農林水産省令で定める用途に主として供されるものとして市町村の長が当該森林所有者の申請に基づき指定したものに付き伐採する場合
 - 九 普通林であつて、自家の生活の用に充てるため必要な木材その他の林産物の採取の目的に供すべきもののうち、市町村の長が当該森林所有者の申請に基づき農林水産省令で定める基準に従い指定したものに付き伐採する場合
 - 十 火災、風水害その他の非常災害に際し緊急の用に供する必要がある場合
 - 十一 除伐する場合
 - 十二 その他農林水産省令で定める場合
- 2 前項第十号に掲げる場合に該当して森林の立木を伐採した森林所有者等は、農林水産省令で定める手続に従い、市町村の長に伐採の届出書を提出しなければならない。

（保安林における制限）

第三十四条 保安林においては、政令で定めるところにより、都道府県知事の許可を受け

なければ、立木を伐採してはならない。ただし、次の各号のいずれかに該当する場合は、この限りでない。

- 一 法令又はこれに基づく処分により伐採の義務のある者がその履行として伐採する場合
- 二 次条第一項に規定する択伐による立木の伐採をする場合
- 三 第三十四条の三第一項に規定する間伐のための立木の伐採をする場合
- 四 第三十九条の四第一項の規定により地域森林計画に定められている森林施業の方法及び時期に関する事項に従つて立木の伐採をする場合
- 五 森林所有者等が第四十九条第一項の許可を受けて伐採する場合
- 六 第百八十八条第三項の規定に基づいて伐採する場合
- 七 火災、風水害その他の非常災害に際し緊急の用に供する必要がある場合
- 八 除伐する場合
- 九 その他農林水産省令で定める場合

2 保安林においては、都道府県知事の許可を受けなければ、立竹を伐採し、立木を損傷し、家畜を放牧し、下草、落葉若しくは落枝を採取し、又は土石若しくは樹根の採掘、開墾その他の土地の形質を変更する行為をしてはならない。ただし、次の各号のいずれかに該当する場合は、この限りでない。

- 一 法令又はこれに基づく処分によりこれらの行為をする義務のある者がその履行としてする場合
- 二 森林所有者等が第四十九条第一項の許可を受けてする場合
- 三 第百八十八条第三項の規定に基づいてする場合
- 四 火災、風水害その他の非常災害に際し緊急の用に供する必要がある場合
- 五 軽易な行為であつて農林水産省令で定めるものをする場合
- 六 その他農林水産省令で定める場合

3 都道府県知事は、第一項の許可の申請があつた場合において、その申請に係る伐採の方法が当該保安林に係る指定施業要件に適合するものであり、かつ、その申請（当該保安林に係る指定施業要件を定めるについて同一の単位とされている保安林又はその集団の立木について当該申請が二以上あるときは、これらの申請のすべて）につき同項の許可をすることとしてもこれにより当該指定施業要件を定めるについて同一の単位とされている保安林又はその集団に係る立木の伐採が当該指定施業要件に定める伐採の限度を超えることとならないと認められるときは、これを許可しなければならない。

4 都道府県知事は、第一項の許可の申請があつた場合において、その申請に係る伐採の方法が当該保安林に係る指定施業要件に適合するものであり、かつ、その申請（当該保安林に係る指定施業要件を定めるについて同一の単位とされている保安林又はその集団の立木について当該申請が二以上あるときは、これらの申請のすべて）につき同項の許可をするとすればこれにより当該指定施業要件を定めるについて同一の単位とされている保安林又はその集団に係る立木の伐採が当該指定施業要件に定める伐採の限度を超えることとなるが、その一部について同項の許可をするとすれば当該伐採の限度を超えることとならないと認められるときは、政令で定める基準に従い、当該伐採の限度まで、その申請に係る伐採の面積又は数量を縮減して、これを許可しなければならない。

- 5 都道府県知事は、第二項の許可の申請があつた場合には、その申請に係る行為がその保安林の指定の目的の達成に支障を及ぼすと認められる場合を除き、これを許可しなければならない。
 - 6 第一項又は第二項の許可には、条件を付することができる。
 - 7 前項の条件は、当該保安林の指定の目的を達成するために必要最小限度のものに限り、かつ、その許可を受けた者に不当な義務を課することとなるものであつてはならない。
 - 8 第一項の許可を受けた者は、当該許可に係る立木を伐採したときは、農林水産省令で定める手続に従い、その旨を、都道府県知事に届け出るとともに、その者が当該森林に係る森林所有者でないときは、当該森林所有者に通知しなければならない。
 - 9 第一項第七号及び第二項第四号に掲げる場合に該当して当該行為をした者は、農林水産省令で定める手続に従い、都道府県知事に届出書を提出しなければならない。
- 10 (略)

(5) 文化財保護法（抜粋）

（現状変更等の制限及び原状回復の命令）

第百二十五条 史跡名勝天然記念物に関しその現状を変更し、又はその保存に影響を及ぼす行為をしようとするときは、文化庁長官の許可を受けなければならない。ただし、現状変更については維持の措置又は非常災害のために必要な応急措置を執る場合、保存に影響を及ぼす行為については影響の軽微である場合は、この限りでない。

2 前項ただし書に規定する維持の措置の範囲は、文部科学省令で定める。

3 第一項の規定による許可を与える場合には、第四十三条第三項の規定を、第一項の規定による許可を受けた者には、同条第四項の規定を準用する。

4 第一項の規定による処分には、第百十一条第一項の規定を準用する。

5 第一項の許可を受けることができなかつたことにより、又は第三項で準用する第四十三条第三項の許可の条件を付せられたことによつて損失を受けた者に対しては、国は、その通常生ずべき損失を補償する。

6 前項の場合には、第四十一条第二項から第四項までの規定を準用する。

7 第一項の規定による許可を受けず、又は第三項で準用する第四十三条第三項の規定による許可の条件に従わないで、史跡名勝天然記念物の現状を変更し、又はその保存に影響を及ぼす行為をした者に対しては、文化庁長官は、原状回復を命ずることができる。この場合には、文化庁長官は、原状回復に関し必要な指示をすることができる。

(6) 特別史跡名勝天然記念物又は史跡名勝天然記念物の現状変更等の許可申請等に関する規則 (抜粋)

(許可の申請)

第一条 文化財保護法(昭和二十五年法律第二百十四号。以下「法」という。)第百二十五条第一項の規定による許可を受けようとする者(以下「許可申請者」という。)は、次に掲げる事項を記載した許可申請書を文化庁長官(法第百八十四条第一項第二号及び文化財保護法施行令(昭和五十年政令第二百六十七号。以下「令」という。)第五条第四項第一号の規定により当該許可を都道府県又は市の教育委員会が行う場合には、当該都道府県又は市の教育委員会)に提出しなければならない。

- 一 史跡(特別史跡を含む。以下同じ。)、名勝(特別名勝を含む。以下同じ。)又は天然記念物(特別天然記念物を含む。以下同じ。)の別及び名称
- 二 指定年月日
- 三 史跡、名勝又は天然記念物の所在地
- 四 所有者の氏名又は名称及び住所
- 五 権原に基づく占有者の氏名又は名称及び住所
- 六 管理団体がある場合は、その名称及び事務所の所在地
- 七 管理責任者がある場合は、その氏名及び住所
- 八 許可申請者の氏名及び住所又は名称及び代表者の氏名並びに事務所の所在地
- 九 史跡、名勝又は天然記念物の現状変更又は保存に影響を及ぼす行為(以下「現状変更等」という。)を必要とする理由
- 十 現状変更等の内容及び実施の方法
- 十一 現状変更等により生ずる物件の滅失若しくはき損又は景観の変化その他現状変更等が史跡、名勝又は天然記念物に及ぼす影響に関する事項
- 十二 現状変更等の着手及び終了の予定時期
- 十三 現状変更等に係る地域の地番
- 十四 現状変更等に係る工事その他の行為の施行者の氏名及び住所又は名称及び代表者の氏名並びに事務所の所在地
- 十五 その他参考となるべき事項

2 (略)

(許可申請書の添附書類等)

第二条 前条の許可申請書には、左に掲げる書類、図面及び写真を添えなければならない。

- 一 現状変更等の設計仕様書及び設計図
- 二 現状変更等に係る地域及びこれに関連する地域の地番及び地ぼうを表示した実測図
- 三 現状変更等に係る地域のキャビネ型写真
- 四 現状変更等を必要とする理由を証するに足る資料があるときは、その資料
- 五 許可申請者が所有者以外の者であるときは、所有者の承諾書
- 六 許可申請者が権原に基づく占有者以外の者であるときは、その占有者の承諾書

- 七 管理団体がある場合において、許可申請者が管理団体以外の者であるときは、管理団体の意見書
- 八 管理責任者がある場合において、許可申請者が管理責任者以外の者であるときは、管理責任者の意見書
- 九 前条第二項の場合において、許可申請者が発掘担当者以外の者であるときは、発掘担当者の発掘担当承諾書
- 2 前項第二号の実測図及び同項第三号の写真には、現状変更等をしようとする箇所を表示しなければならない。

(終了の報告)

- 第三条 法第百二十五条第一項の規定による許可を受けた者は、当該許可に係る現状変更等を終了したときは、遅滞なくその旨を文化庁長官（法第百八十四条第一項第二号及び令第五条第四項第一号の規定により当該許可を都道府県又は市の教育委員会が行った場合には、当該都道府県又は市の教育委員会）に報告するものとする。
- 2 前項の終了の報告には、その結果を示す写真又は見取図を添えるものとする。

(7) 消防防災施設整備費補助金交付要綱 (抜粋)

消防防災施設整備費補助金交付要綱

(平成14年4月1日消防消第69号)

最終改正 平成27年4月16日消防消第79号

(補助対象施設及び基準額等)

第3条 施設補助金の交付の対象となる消防防災施設 (以下「補助対象施設」という。) 及び次条に規定する規格に応ずる種類ごとの基準額は、別表第1及び別表第2のとおりとする。

(以下略)

(補助対象施設の規格)

第4条 補助対象施設の規格は、国が行う補助の対象となる消防施設の基準額 (昭和29年総理府告示第487号。以下「基準額告示」という。) 及び別表第3に定めるとおりとする。

2 補助対象施設は、すべて新規製品でなければならない。

(以下略)

(補助事業の対象者)

第5条 施設補助金の交付を受けることができる地方公共団体は、次の各号に掲げる補助対象施設の種類に応じ、それぞれ各号に掲げる地方公共団体 (沖縄県を除く。以下同じ。) とする。

(1) ~ (2) (略)

(3) 別表第1の第5号に掲げる施設にあっては、次のいずれかに該当する地域を有する地方公共団体

ア 活動火山対策特別措置法 (昭和48年法律第61号) 第2条第1項の規定により避難施設緊急整備地域として指定された地域

イ 火山噴火予知連絡会 (火山噴火予知計画 (昭和48年6月文部省測地学審議会建議) により設置) の火山活動評価検討会において選定された「監視・観測体制の充実等が必要な火山」 (47火山) の周辺で整備を必要とする地域でアに規定する地域以外の地域

(以下略)

(補助率)

第6条 施設補助金の補助率は、次に掲げるもののほか、予算の範囲内で別表第1又は別表第2に定める基準額の3分の1以内とする。

(1) ~ (6) (略)

(7) 活動火山対策特別措置法第3条の避難施設緊急整備計画に掲げる施設にあっては2分の1以内

(以下略)

別表第1 補助対象施設の種別及び型（級）別基準額

	補助対象施設及び型（級）		基準額（千円）
5	活動火山対策避難施設	退避壕	補助対象経費
		退避舎	補助対象経費
		ヘリコプター離着陸用広場	補助対象経費

備考

1～9 略

10 「活動火山対策避難施設」の補助対象経費は、(1) 工事費（施設の整備に必要な工事費）、
(2) 事務雑費（工事の施工に伴い必要な事務に要する経費。ただし、工事費の2.9%以内とする。）とする。

（以下略）

別表第3

第5 活動火山対策避難施設

1 退避壕及び退避舎の規格は次によるものでなければならない。

(1) 鉄筋コンクリート造又は鉄筋鉄骨コンクリート造のもので、火山爆発の際に落下する噴石等から、住民等の生命及び身体の安全を確保できるものであること。

(2) その他の規格は、消防庁長官が認めるものであること。

2 ヘリコプター離着陸用広場の規格は次によるものでなければならない。

(1) 地面が堅固でかつ付近に障害がなく、ヘリコプターが安全に離着陸できるものであること。

(2) その他の規格は、消防庁長官が認めるものであること。

（以下略）

(8) 地方債同意等基準運用要綱(抜粋)

平成27年度地方債同意等基準運用要綱

第一 簡易協議等手続に関する事項

一 (略)

二 対象事業に関する事項

1 通常収支分

簡易協議等手続の対象となる事業区分(通常収支分)の対象事業の取扱いについては、同意等基準及び第一の一の一般的事項に定めるもののほか、次に掲げるところによるものであること。

(一) 一般会計債

(1)～(4) (略)

(5) 一般単独事業

①～② (略)

③ 防災対策事業

ア 防災基盤整備事業は、消防防災施設整備事業、津波浸水想定区域移転事業及び消防広域化関連事業であり、具体的には次の事業を対象とするものであること。

(ア) 消防防災施設整備事業

防災・減災に資する消防防災施設の整備に関する事業で地域防災計画と整合性を図りつつ行う事業であり、具体的には、次の施設の整備に関する事業を対象とする。

a～c (略)

d 緊急時に避難又は退避するための施設(津波避難タワー、活動火山対策避難施設等)

(以下略)

⑤ 緊急防災・減災事業

緊急防災・減災事業については、防災対策事業のうち、次に掲げる事業を対象とするものであること。

ア 大規模災害時の防災・減災対策のために必要な施設の整備

(ア) ③ア(ア) a から g まで、j 及び k に掲げる事業

(以下略)

(9) 主な財政措置のイメージ

本項の記載事項は平成 27 年度の内容である。申請時には、消防庁の HP にて最新の内容を確認されたい。

1 国庫補助金

消防防災施設整備費補助金

○ 補助対象（活動火山対策避難施設）

次のいずれかに該当する地域を有する地方公共団体

ア 活動火山対策特別措置法（昭和 48 年法律第 61 号）第 2 条第 1 項（改正後第 13 条第 1 項）の規定により避難施設緊急整備地域として指定された地域

イ 火山噴火予知連絡会（火山噴火予知計画（昭和 48 年 6 月文部省測地学審議会建議）により設置）の火山活動評価検討会において選定された「火山防災のための監視・観測体制の充実等の必要がある火山」の周辺で整備を必要とする地域でアに規定する地域以外の地域

○ 補助率

原則として 1／3（活動火山対策特別措置法第 3 条（改正後第 14 条）の避難施設緊急整備計画に掲げる施設にあっては 1／2）

補助率 1/3・1/2 (嵩上げあり)	一般補助施設整備等事業債 90% (※特別交付税措置 80%)	一般財源 10% (※特別交付税措置 80%)
------------------------	------------------------------------	----------------------------

※ 活動火山対策に要する経費について、国の補助金を受けて施行するものは、同経費から補助金や地方債といった特定財源の額を控除した額の 80%、単独事業として実施するものは、同経費から特定財源の額を控除した額の 50%について特別交付税措置されている。

2 地方債

緊急防災・減災事業

防災対策事業のうち、東日本大震災を教訓として、全国的に緊急に実施する必要性が高く、即効性のある防災、減災のための地方単独事業を対象とする。

- ・ 大規模災害時の防災・減災対策のために必要な施設の整備

緊急防災・減災事業債 100% (交付税算入率 70%)

用語解説

退避壕の整備に関連する、主要な用語の解説を「火山防災マップ作成指針」（内閣府（防災担当）、消防庁、国土交通省水管理・国土保全局砂防部、気象庁）等を参考に取りまとめ、以下に示す。

火砕サージ：火砕流の周辺に発生することがある低密度の火砕物と火山ガスの流れ。

火砕物（火山砕屑物）：火口から放出される固形又は半固形の岩石の破片の総称。直径 64mm 以上は火山岩塊、64～2mm は火山れき、2mm 以下は火山灰に分類される。また多孔質のものについて、白色のものを軽石、暗色のものをスコリアという。

表－1 火砕物の分類

粒子の直径	粒子が特定の外形や内部構造をもたないもの
>50cm	火山岩塊
>64mm	
2～64mm	火山れき
<2mm	火山灰

火砕流：火口から噴出、又は溶岩ドームやスコリア丘から崩落した高温の岩塊、火山灰、軽石等の火砕物が高温の火山ガス（空気や水蒸気等）と混合し、それらが一体となって高速で地表を流下する現象。火砕流発生を確認してから脱出することは不可能である。大規模な場合は地形の起伏にもかかわらず広範囲に広がり、埋没、破壊、焼失させ、破壊力が大きく、甚大な被害をもたらす火山現象である。

火山ガス：マグマ中に含まれる揮発成分が噴気口や火口から噴出する現象。噴出した火山ガスの中には有毒成分（特に、二酸化硫黄（ SO_2 ）、硫化水素（ H_2S ）、二酸化炭素（ CO_2 ）等）が含まれることがある。火山ガスは無色透明であるため危険に気づくのが遅れがちで、高濃度になると呼吸器等に障害を受けたり、最悪の場合は死に至ることがある。

火山弾：マグマの破片が半固結のまま火口から放出されるもので、完全に固まらないうちに空中を飛行し着地するために独特な形となる。その形から紡錘形火山弾、パン皮火山弾、牛糞状火山弾等と呼ばれるものがある。

火山泥流：岩石や土砂が水と混合して一体となって流下する現象。時速数十 km に達し、谷沿いに遠方まで到達する大変危険な火山現象。

火山噴火予知連絡会：火山噴火予知計画（文部省測地学審議会（現文部科学省科学技術・学術審議会測地学分科会）の建議）により、関係機関の研究及び業務に関する成果及び情報の交換、火山現象についての総合的判断を行うこと等を目的として、昭和 49 年に設置された。

空振：爆発的噴火により発生した空気の急激な圧力変化が大気中を伝わる現象。空振により窓ガラスの破損などの被害が発生することがある。

降灰：火山灰が降ること、あるいは降った火山灰。被害は広域かつ長期にわたることがある。人体には呼吸器系などの障害のほか、農作物の被害、水質汚濁、鉄道・道路の不通、航行中の航空機のエンジントラブルなど、広く社会生活に影響する。

水蒸気噴火：マグマや高温のガスによって加熱された地下水が沸騰し、圧力が上昇して、既存の岩体を爆発的に地表に噴出する噴火。

スコリア：火砕物の一種。多孔質で暗色、鉄・マグネシウムに富むものをいう。

成層火山：中心火口から噴出した火砕物と溶岩との累積によって生じた火山。富士山のような大型の円錐形火山の多くは成層火山である。

単成火山群：数時間～数年にわたる一連の噴火活動によってできる火山（単成火山）が、ある地域に集合しているもの。

噴石：噴火によって火口から吹き飛ばされた岩石。大きな噴石は風の影響を受けず弾道を描いて火口周辺に飛散する。小さな噴石は、風に乗って遠くまで流され、火口から離れたところでも、家屋・車・道路などが被害を受けたりすることがある。

マグマ水蒸気噴火：マグマが水と直接接触して噴火するもの。水蒸気爆発と噴火の様式は似ているが、噴出物の中に新鮮なマグマが含まれる

マグマ噴火：地下から上昇してきたマグマが地表へ噴出して発生する噴火。

融雪型火山泥流：噴火に伴う融雪を原因とする火山泥流。熱水の噴出、火口湖の決壊、火砕流の河川への流入のほか、もろい火山堆積物が降雨により流されるといった要因で発生する。土砂により、道路、構造物、農耕地に大きな被害を与える。

溶岩流：火口から噴出した溶岩が粘性の高い流体として山腹斜面を流下する現象。流下速度は地形や溶岩の温度・組成によるが、比較的ゆっくり流れるので人の足による避難が可能である。溶岩流は高温のため、その流路にある建物、道路、農耕地、森林、集落を焼失、埋没させて完全に不毛の地と化す。

参考資料

- Degen, P. P. (1980) Perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles. *Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE*, **106**, No. ST7.
- 電力中央研究所 (1991) 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計法. 電力中央研究所報告, 総合報告 U24, 141p.
- 福岡管区気象台 (1990) 福岡管区気象台要報, 第 45 号.
- 鹿児島地方気象台 (1955 年～2015 年 7 月) 桜島爆発原簿.
- Kennedy, R. P. (1976) A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. *Nuclear Engineering and Design*, 37.
- 気象庁編 (2013) 日本活火山総覧 (第 4 版) . 1498p.
- 三輪幸治・別府万寿博・大野友則・伊藤雅晴・片山雅英 (2009) 改良理論モデルによるコンクリート版の局部破壊評価法. 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 4, 844-858.
- 内閣府 (防災担当), 消防庁, 国土交通省水管理・国土保全局砂防部, 気象庁 (2013) 火山防災マップ作成指針, 108p.
- 日本道路協会 (2000) 落石対策便覧 平成 12 年 6 月. 422p.
- Sato, M., Yamada, H., Ogasawara, N., Kitajima, T. and Yui, A. (2015) Collision Test of Abrasive Projectile Against Steel Sheet by Using Large Scale Launching System. *10th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics*, 062, 1-6.
- Simkin, T., Siebert, L. and Blong, R (2001) Volcano Fatalities-Lessons from the Historical Record. *Science*, 291, 5502, p.255.
- 総務省消防庁 (2014) 「火山防災のために監視・観測体制の充実等が必要な火山」(47 火山) における避難施設等の設置状況の実態調査結果. 平成 26 年 11 月 28 日報道資料.
- 東京大学地震研究所, 産業技術総合研究所, 山梨県富士山科学研究所, 帝京平成大学, 常葉大学 (2015) 2015 年 8 月 19-20 日の御嶽山山頂調査の速報 (http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/?page_id=183&id=4816).

