

総合的な土石流対策の考え方

株式会社アリサワ技術 技術士(建設部門) 有澤良一

1. はじめに

わが国の国土の70%余が山地であり、台風や集中豪雨等により土石流や崖くずれが多発している。

これらの土砂災害を防止するために種々の対策がとられており、本報告書では土石流災害に対するハード面の対策とソフト面の対策について、事例をまじえてまとめたものである。

2. 総合的な土石流対策

総合的な土石流対策を進める際、基本的には土石流対策工事によってハード的に対応し安全度を高めていくことが好ましいが施設整備が進められるまでの間、警戒避難などのソフト対応が必要になる。

これらの総合的な土石流対策フローを図-1に示す。

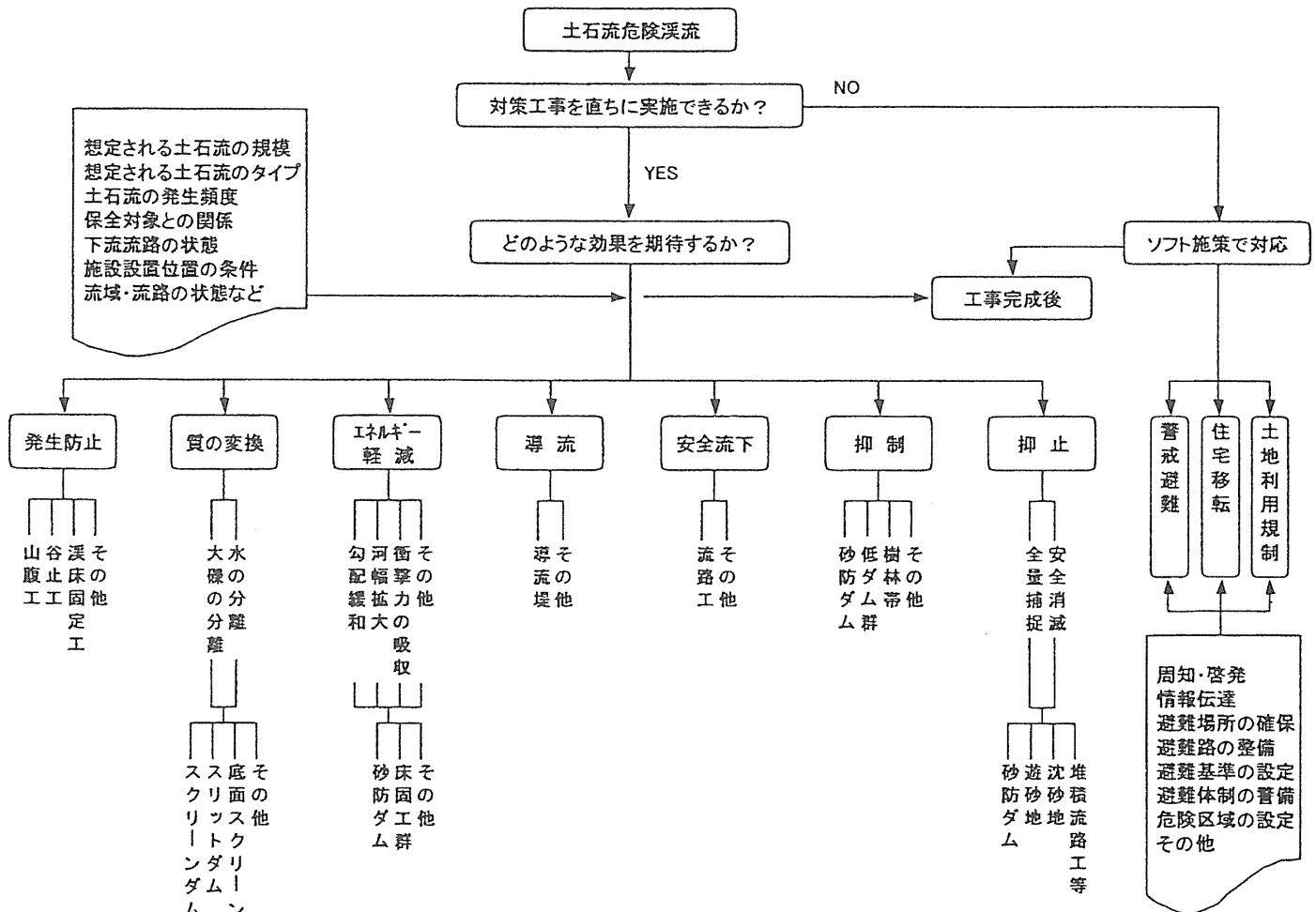


図-1 総合的な土石流対策のフロー

3. 土石流の規模の推定

土石流対策計画にあたっては土石流の規模の推定が必要となる。

計画流出土砂量は原則として流域内の移動可能土砂量と計画規模の土石流によって運搬できる土砂量とを比較し、小さい方の値を対象とする。

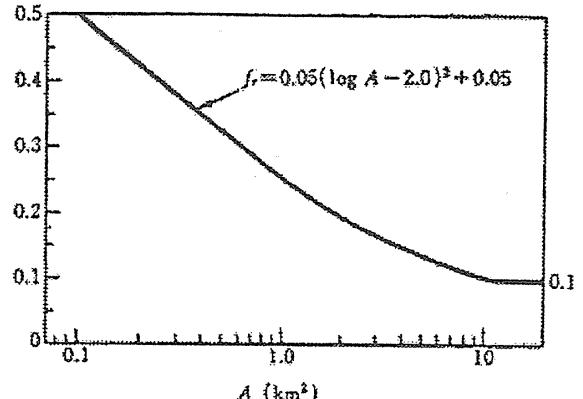


図-2

運搬可能土砂量 (V_{ec}) は式 (1) によって算定される。

$$V_{ec} = \frac{10^3 \times R_T \times A}{1-\lambda} \left(\frac{C_d}{1-C_d} \right) f_r \quad (1)$$

式 (1)において、 R_T は一般には計画規模の 24h 降雨量を用いる。 λ は、空隙率で 0.4 程度とし、 f_r は流域面積により 0.5 から 0.1 の間で図-2 を用いる。 C_d は土石流濃度渓床勾配 20° 以上で $0.9 c_*$ (c_* 堆積土砂の容積土砂濃度で 0.6 程度とされる) とし、20° 以下では式 (2) で算出する。

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (2)$$

ここで、 σ : 積砂の密度 (2.6t/m³程度)

ρ : 水の密度 (1.2t/m³程度)

ϕ : 堆積土砂の内部摩擦角 (30° ~ 40° 程度)

θ : 渓床勾配 (度)

である。なお、計算した C_d が $0.9 c_*$ より大きい場合は $0.9 c_*$ とし、0.3 より小さい場合は 0.3 とする。

4. 土石流危険渓流の調査手法

“高橋”は表面流水深 (h_0) を流量の関数として表現し、土石流発生渓流の勾配を推定している。土石流発生を力学的にとらえた研究で、無限長斜面の安定条件を拡張したモデルによるもので次式により釣合の基本式が示される。

$$g \times \sin \theta \{c_*(\sigma - \rho)a + \rho(a + h_0)\} = g \cos \theta \times \tan \phi [c_*(\sigma - \rho)a] + c \quad (3)$$

ここに、 c_* : 堆積層の容積濃度

g : 重力加速度

σ : 積砂の密度

a : 堆積層表面からの深さ

ρ : 水の密度

h_0 : 表面流水深

ϕ : 内部摩擦角

θ : 渓床勾配

c : 粘着力

である。

式(3)は堆積層表面から深さ a の点における釣合式であり、左辺(剪断力)が大きくなると土石流が発生することになる。

“高橋”は、剪断抵抗力が粒子間に働く力のみを有効と考え、また崩落物の堆積層では粘着力は無視して取扱えるとして土石流発生の限界勾配を式(4)で与えた。

$$\tan \theta = \frac{c_*(\sigma - \rho)}{c_*(\sigma - \rho) + \rho(1 + h_0/d)} \tan \phi \quad (4)$$

ここに、 d は粒径である。

式(4)において、 $c_* = 0.7$ 、 $\sigma = 2.6$ 、 $\sigma = 1.0$ 、 $h_0/d = 1.4$ 、 $\tan \phi = 0.8$ を与えると、 $\tan \theta = 14.3^\circ$ となり、土石流発生地点の下限値を示している。

また、この値は“大同”が示した河床面での剪断力と河床の剪断抵抗の釣合式における境界値ともよく一致している。

これらの点を念頭において建設省(国土交通省)では、図-3に示すように土石流危険渓流の調査を行っている。

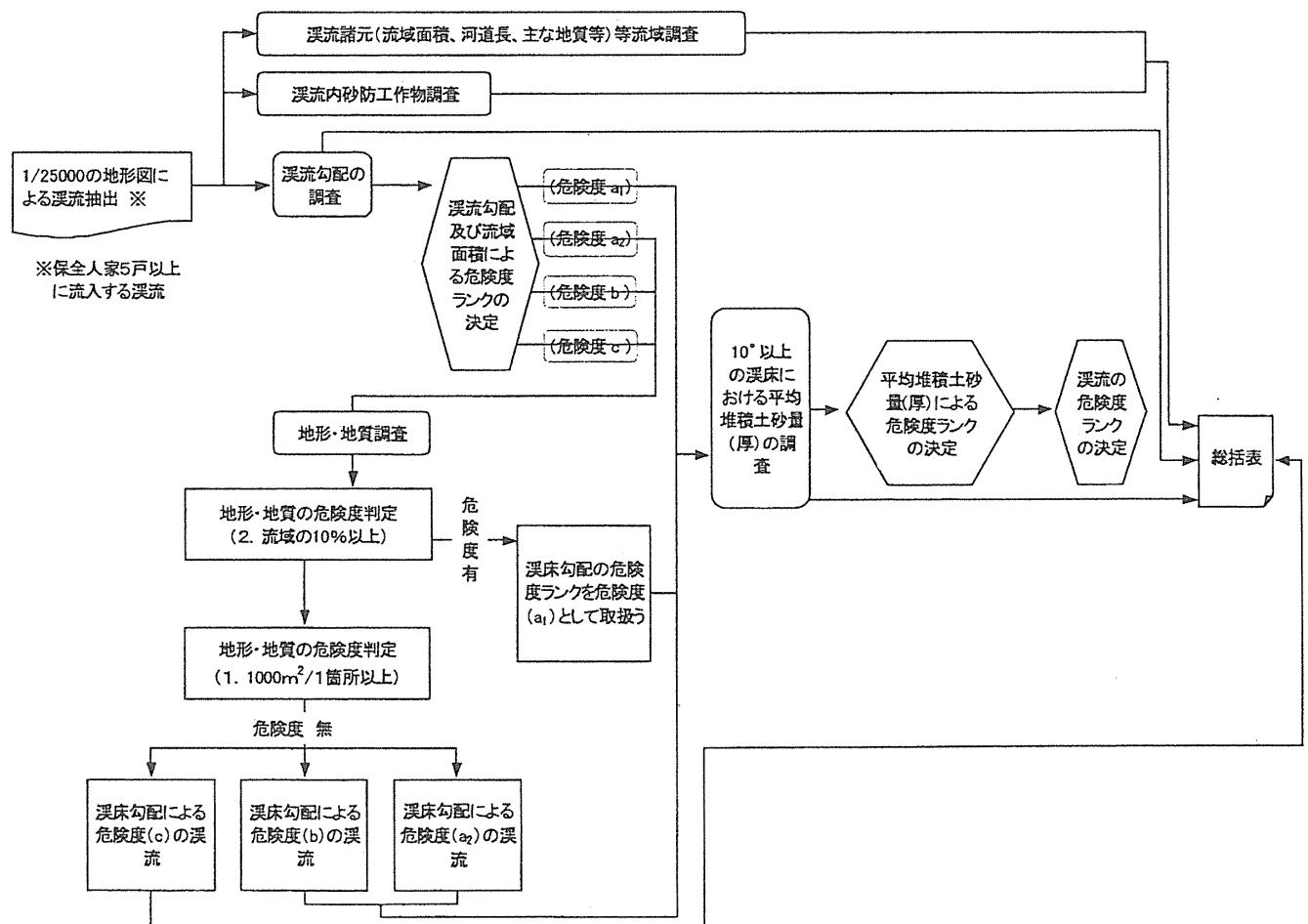
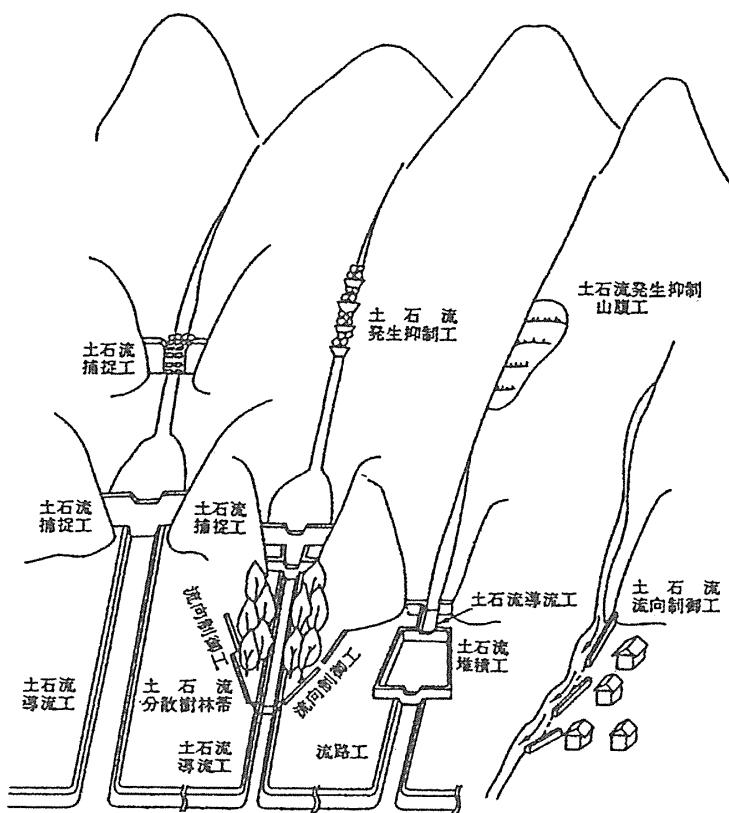


図-3 土石流危険渓流調査フロー

5. ハード対策の考え方及び実施例

ハード対策の施設の代表例は図-4に示すようなものがあり、ここでは土石流を安全な方向に流向抑制する土石流導流堤についての事例を紹介する。



* 土石流導流工は土石流が上流で十分処理された場合は、流路工の設計となる。

図-4 土石流対策施設の代表例

5-1 分散導流堤の形状

土石流対策工は土石流の流向を強制的に変える構造物で、以下の部材によって構成されている。

- ① コア材 ···· 背面安定材を防護する不透過性の構造物。
- ② クッション材 ··· 土石流の衝撃力を緩和させる目的で設けたもので大きな衝撃力を受けた場合は破損する形態の構造物。
- ③ 背面安定材 ··· コア材の背面に設けるもので土石流の衝撃力を吸収する構造物。

分散導流堤の形状決定にあたり、コア材、クッション材、背面安定材の各々について形状、使用材料等について比較検討を行い、現地に最も適する形式を選定した。

衝撃を緩和する前面クッション材の形式比較は表-3に、土石流の衝撃力を吸収する役目をする背面安定材の侵食防止用被覆工の比較は表-4に示す。また、各部材を組合せた分散導流堤の断面形状比較を表-2、表-3に示す。

これらを比較検討した結果、最終的に現地で施工を行った、縦横断平面形状を図-10、図-11、図-12に示す。

表-1 分散導流堤の断面形式比較（その1）

	① 盛土案	② コンクリート案	③ 鋼製案	④ 折衷案（①+②）	⑤ 折衷案（①+③）
断面形状					
経済性	最も経済的である	コンクリート単独の構造物とした場合かなり高価になるが、中詰石を用いると経済的である	材料費、工事費ともに最も工費がかさむ	他の案と比較して最も高くなる	同左
施工性	ほとんどが盛土工事であるため、最も簡単な工事である	擁壁の高さ等に多少問題があるが施工性は割りよい	地盤条件より判断して矢板の打込みは困難	施工期間が長い	同左
耐久性	土石流の衝撃に耐えるには無理がある	耐久性が最も高い	衝撃に対して変形が残るが耐久性は高い	第2、3案より劣るが特に問題ない	同左
耐衝撃性	最も弱いが、衝撃力を分散させて抵抗できる	巨石に対しても安全であるが、構造物が大きくなる	使用材料にもよるが、第1案と第2案の中間である	衝撃力を分散させて低減し、構造物を小さくできる	同左
止水性	盛土材料にもよるが期待できない	コンクリートブロックは止水性に対しては考えていない最も高い	鋼矢板工法及びコルゲートセル工法は止水性が高いが、その他は問題がある	止水性も第1案よりすぐれ、特に問題ない	同左
評価	土石流に対する耐衝撃性、耐久性に問題があり、単独構造物としては使用できない	耐衝撃性、耐久性は最も高いが、クッション材がないため構造物が大きくなり不経済である	耐衝撃性、耐久性はすぐれているが施工性に問題があり、第2案同様不経済である	クッション材を用いて衝撃力を緩和し、盛土案の欠点を補い、コンクリート案の経済性もカバーした折衷案で、好ましい案である	同左

表-2 分散導流堤の断面形式比較（その2）

	第1案 重力式コンクリート 衝撃力をクッション材でカバーし、コンクリートの耐久性を生かした工法	第2案 コンクリート+中詰石 中詰石を用いて重力式擁壁タイプよりコンクリート立積を減らし経済的にした工法	第3案 異形コンクリートブロック コンクリートブロックを用いて自由に変形できるようにし地盤の沈下にも追随できる工法	第4案 鋼製枠 コア部に鋼製枠を用いた構造で第3案と同じようにある程度の地盤沈下等に追随できる工法
標準断面				
数量	コンクリート 43m ³ 型枠 18m ² 石張工 16m ² 蛇籠工 11m ² 前面盛土工 26m ³ 背面盛土工 44m ³	コンクリート 43m ³ 型枠 31m ² 中詰土 20m ³ 鋼製壁 16m ² 蛇籠工 11m ³ 前面盛土工 26m ³ 背面盛土工 44m ³	コンクリートブロック 85m ³ 鋼製壁 11m ² 前面盛土工 25m ³	鋼製枠工 石張工 16m ² 鋼製壁 11m ² 前面盛土工 4.4m ³ 背面盛土工 44m ³
構造性	本体コンクリートと背面盛土の合成によって抵抗するため、クッション材が破損しても問題ない	同左 ただし、中詰土砂の単重が少し軽い分、断面が大きくなる	耐久性は低いがブロック全体で抵抗するため 変形して対抗する 地盤沈下に追随できる	第1案と第3案の折衷案になり、衝撃力に強い上、地盤の沈下にも追随できる
経済性	工事費は第2案とほぼ同じで第3案、第4案より安い ただし、現場近くに生コンがない場合は別途となる	同左	他の3案より割高になり緊急を要する場合以外は好ましくない	第3案について高い
施工性	コンクリートの打継ぎ目等に注意すれば施工工期が短く施工性も良い	中詰土砂の詰め方や、コンクリート枠を施工するのに時間を要す	任意にブロックを積み上げていくため施工工期も短く施工性も良い	鋼製枠の組立と中詰土砂の施工に時間がかかり施工性が悪い
維持管理面	クッション材の補修は必要だが、本体の維持管理の必要がない	同左	クッション材の補修は常時、発生するがコンクリートブロック本体は屈撓性があり維持管理しやすい	コンクリートブロックほど屈撓性はないが地盤沈下等に追随でき、クッション材以外に維持管理の必要性がない
評価	動力式擁壁で完全に受け止めるため、止水性等にすぐれ、安全性が高い	第1案とほぼ同じ構造であるが、中詰土の有無により第1案より経済的になる場合もある	ブロックの乱積により屈撓性が高いが、クッション材の安定度に欠け経済的にも割高になる	構造的には第3案と変わらないが、施工性が他の案と比して劣る
判定	◎	○	△	○

表-3 前面クッション材の形式比較

	a. 盛 土	b. 盛土+練石積	c. 盛土+松丸太	d. 木材積	e. 木材中詰	f. 古タイヤ	g. 盛土+鋼製壁
構造							
補修	○ 容易であるが補修頻度は高い 5	○ 簡易な練石積とすれば、補修も行い易く安価 3	○ 盛土案の次に容易 3	○ 予め組んで置いておけば容易 3	✗ 最もやっかい 0	△ 比較的容易 5	○ 比較的容易で補修頻度も少ない 5
経済性	○ 最も経済的 5	○ 盛土単独案の次に経済的 5	△ 丸太、そだ等が近くから調達できれば経済的 3	✗ 大量に木材を必要とするため不経済 0	✗ 木材積の次に不経済 0	△ 古タイヤの再利用となるため、入手方法に問題 3	△ 安全性が増した分だけ経済性に劣る 3
施工性	○ 最も容易 5	○ 永久的構造物ではないため、簡易な練石積とすれば比較的容易 5	△ 中位 3	△ 組立作業と据付作業に区分できれば容易に施工できる 3	✗ 中詰作業に手間どり、施工性に劣る 0	△ 離散しないような工夫が必要となり、比較的やっかい 3	○ 土砂を詰めながら立ち上るので施工が容易である 5
耐久性	✗ 小規模の出水によって、流失、崩壊する可能性大 0	△ 小規模の出水には、耐久できる 3	△ 有り 3	△ 有り 3	△ 不明 0	△ 耐久性にすぐれ被覆材として、数々の方面で実績がある 3	○ 耐久性にすぐれている 5
評価	15	16	12	9	0	14	18
判定		◎	△			○	◎

表-4 背面盛土被覆工の比較

	a. 蛇 篠	b. コンクリートブロック張	c. コンクリートマット	d. 石 張
構造				
越流に対する安全性	○ 重量があり、越流水に対して排水性が良く安定している 5	△ 背面の水圧に対して充分な排水施設が必要である 直高5m程度が限度である 3	○ 硬化すればコンクリートそのものであり、強度も大きく越流水に対しても安定である 5	× 直高5m、法長7mが限度であり越流水に対してやや不定がある 3
経済性	△ 同種径の詰石の調達が難しい場合には不経済となる 6,000~8,000円/m ² 3	△ 10,000円/m ² 3	△ 8,000~10,000円/m ² (t=10cm~20cm) 3	○ 比較的安い 6,000~8,000円/m ² 5
施工性	△ 河川工事における実績が多く、比較的単純・容易であるが詰石の砂礫土が不足している 3	○ 実績も多く、比較的容易 5	○ 施工速度は速く 300m ² /日程度可能 5	○ 昔からの実績が多く、施工性にすぐれる 5
評価	古来からある工法であるが詰石が準備できれば経済性もすぐれ安定度も高い 応急手当的な印象を与え景観はあまり良くない 11	斜面の安定度は3案と同様で施工性にもすぐれるが、経済性に劣る 景観は良い 11	斜面の安定度は最も良く、経済性にやや劣るが、施工速度が速く、景観も良い 13	法長が長くなると安定度に欠けるが、現場に材料がある場合、最も経済的にすぐれ、周辺の景色とも調和がとれる 13
判定	△	△	○	◎

5-2 土石流衝撃力の低減

土石流のフロント部には巨礫が集合し、流下することが確認されており、この場合の荷重分散幅をどのように考えるかが躯体形状の決定に大きな影響を与える。

ここでは、落石対策便覧（日本道路協会刊）を参考にし、以下のように考える。

クッショニン材の衝撃力の低減効果を衝突によるめり込み深さと荷重分散幅から推定する。

めり込み深さは、落石対策便覧の実験式を用いる。

$$\delta_{\max} = \{(n+1) \times \frac{W \times H}{k}\} \quad (5)$$

$$P = 2.455 \times W^{2/3} \times \lambda^{2/5} \times H^{3/5} \quad (6)$$

δ_{\max} : 最大めり込み量 (m)

n : 係数 通常の場合 1.5

$$W : 磯の重量 \quad \frac{4}{3} \pi \times r^3 \times \rho = \frac{4}{3} \times \pi \times 1.5^3 \times 2.6 \\ = 37 \text{ t / 個}$$

H : 落下高 (m)

$$k : 定数 \quad \frac{4}{3} \times \sqrt{R} \times \frac{E}{1-\nu^2}$$

R : 磯の半径 (m)

$$E : クッショニン材のヤング係数 18 \text{ kg/cm}^2 = 175 \text{ t/m}^2$$

$$\nu : ポアソン比 0.3$$

$$\lambda : クッショニン材のラーメ定数 500 \text{ t/m}^2$$

まず、式(6)から衝撃力がわかっているので、換算落下高を算出する。

$$\begin{aligned} \text{換算分散幅} & \quad \text{磯の半径} \quad R = 1.5 \text{ m} \\ & \quad P = 1,134 \text{ t / 個} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H^{3/5} &= \frac{P}{2.455 \times W^{2/3} \times \lambda^{2/5}} \\ &= \frac{1,134}{2.455 \times 37^{2/3} \times 500^{2/5}} \\ &= 3.5 \text{ m} \end{aligned}$$

従って、換算落下高は $H = 8.0 \text{ m}$ となる。

次に、式(5)に代入して、めり込み厚を算出する。

$$\begin{aligned} k &= \frac{4}{3} \times \sqrt{R} \times \frac{E}{1-\nu^2} = \frac{4}{3} \times \sqrt{1.5} \times \frac{175}{1-0.3^2} \\ &= 314 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &= \{(n+1) \times \frac{W \times H}{k}\}^{1/(n+1)} \\ &= \{(1.5 + 1) \times \frac{37 \times 8.0}{314}\}^{1/(1.5 + 1)} \\ &= 1.40 \text{ m} \end{aligned}$$

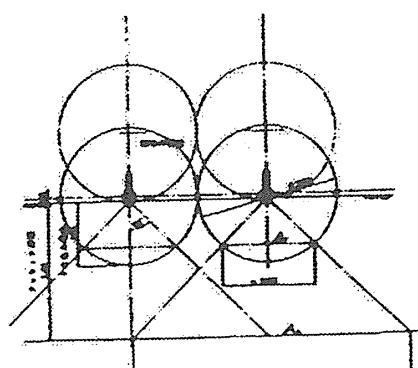


図-5

巨礫の荷重の考え方

土石流波高を6.0mで計画するため、断面方向に2個の巨礫 $R = 1.5\text{m}$ が同時に衝突すると仮定する。

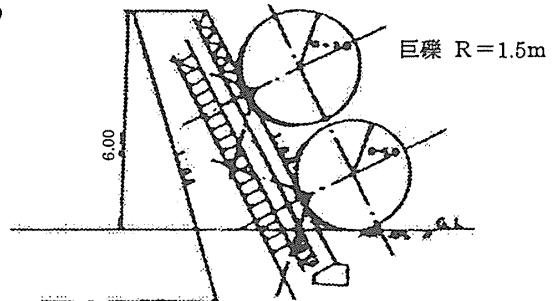


図-6

また、長手方向に対しては、施工目標間を10.0mで計画しているため、長手方向には最大3列衝突するので、10.0m当たり6個の巨礫を同時に作用させて設計する。

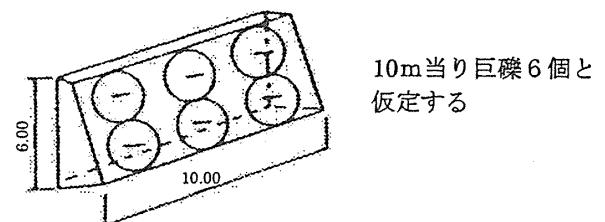


図-7

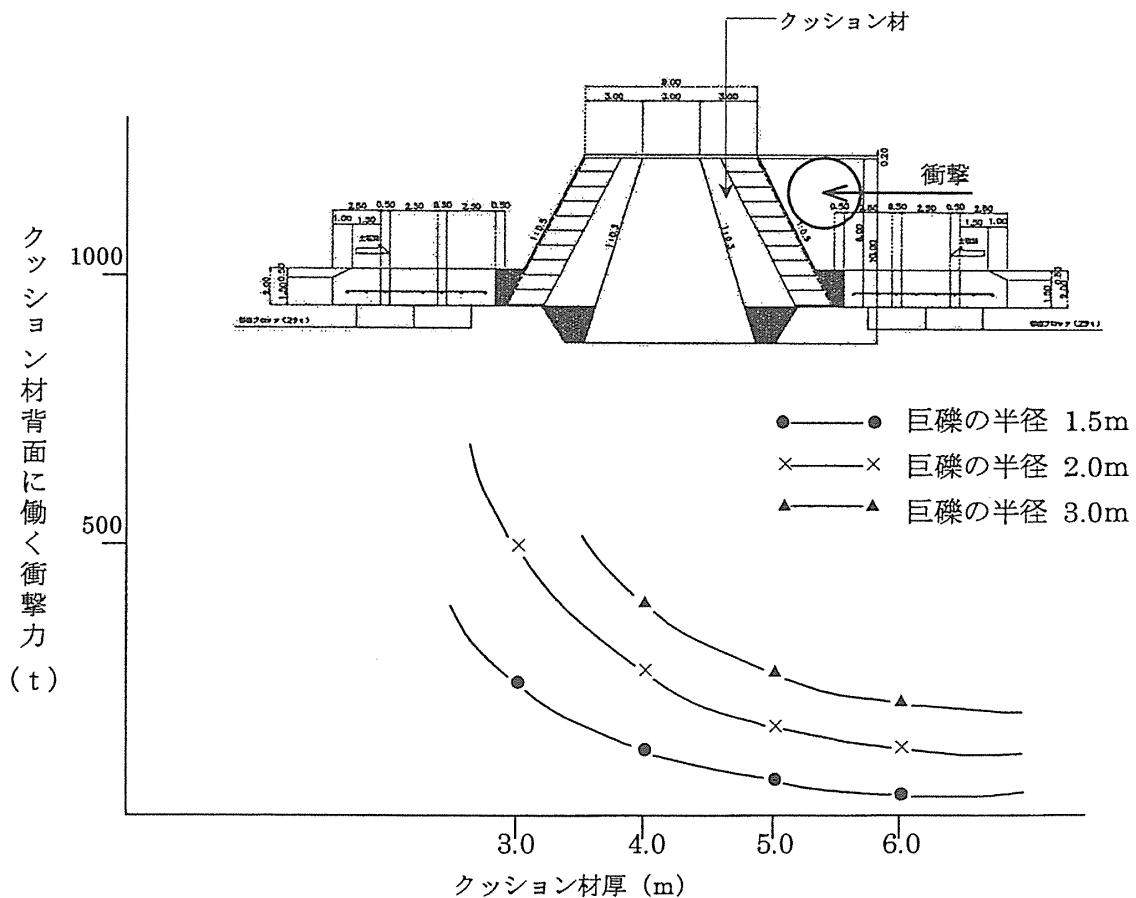
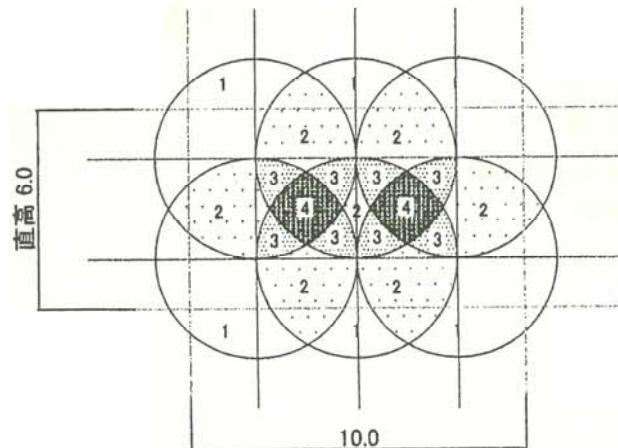


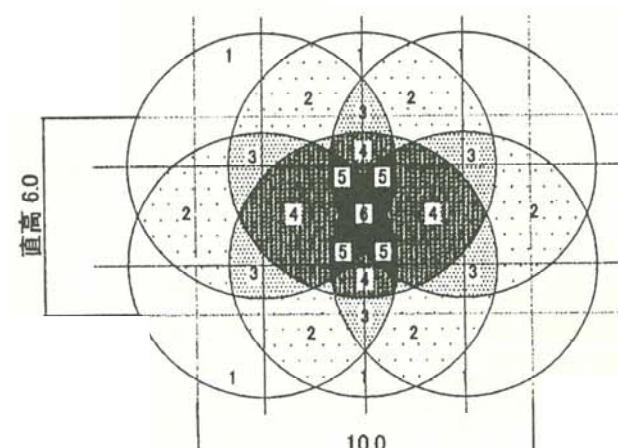
図-8

衝撃荷重分散図

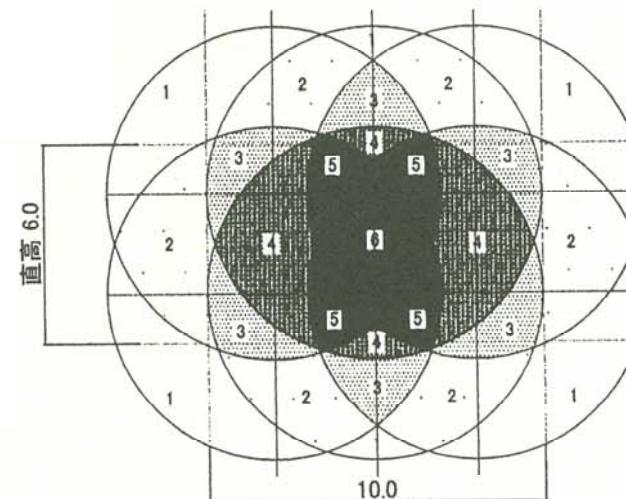
(1) クッション材厚 3m



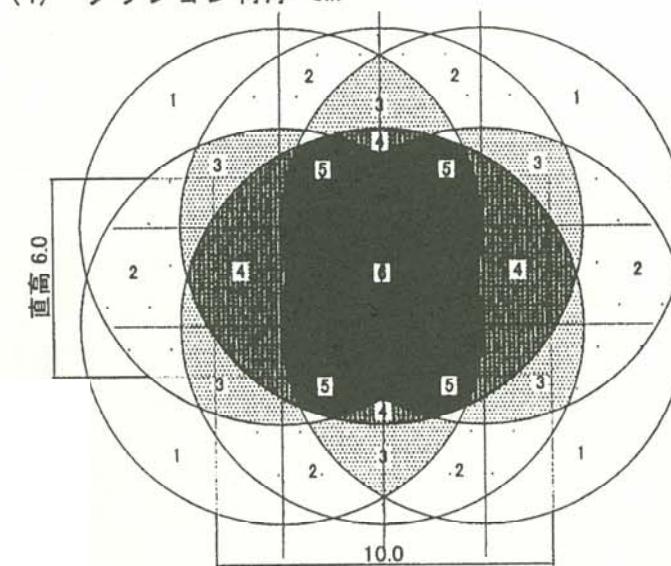
(2) クッション材厚 4m



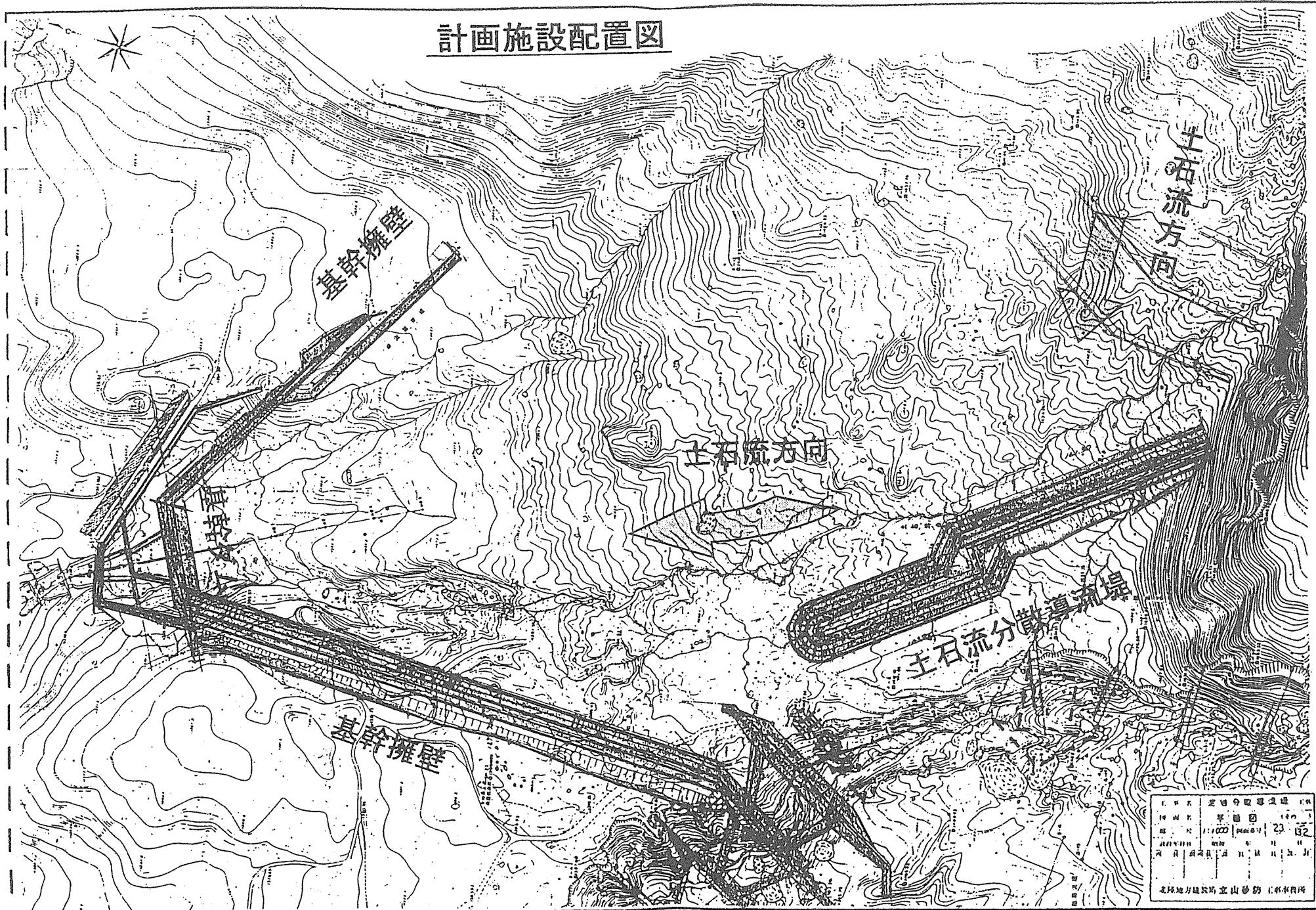
(3) クッション材厚 5m



(4) クッション材厚 6m



計画施設配置図



土石流分散導流堤縦断図

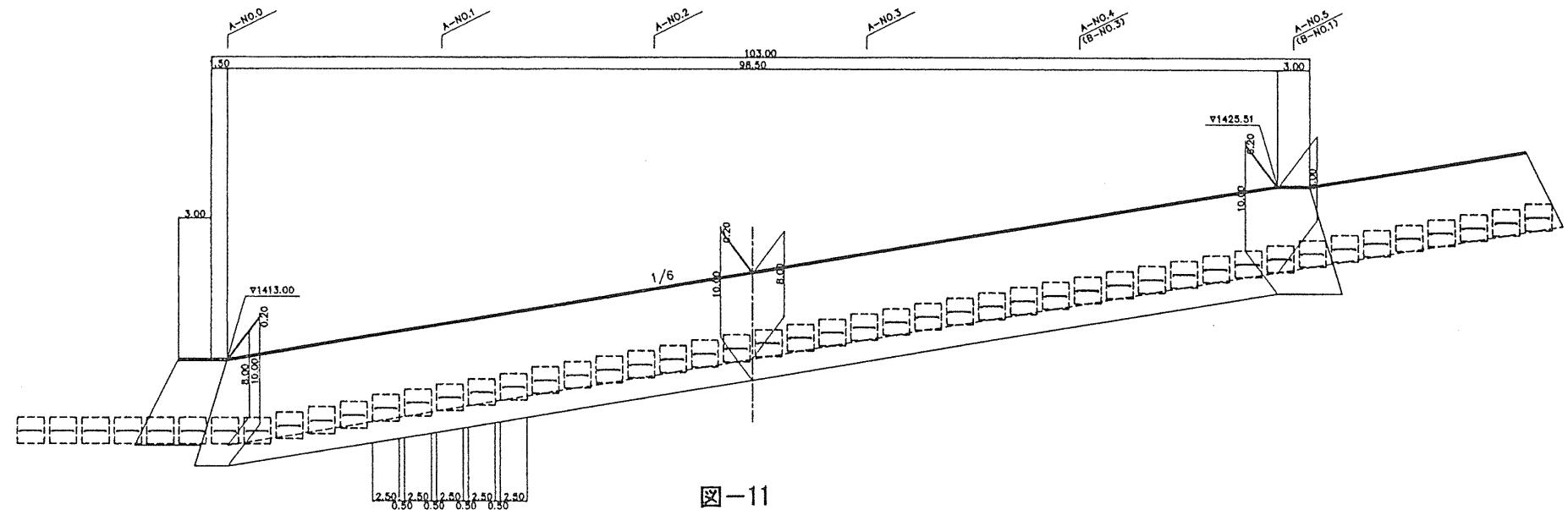


図-11

土石流分散導流堤標準断面図

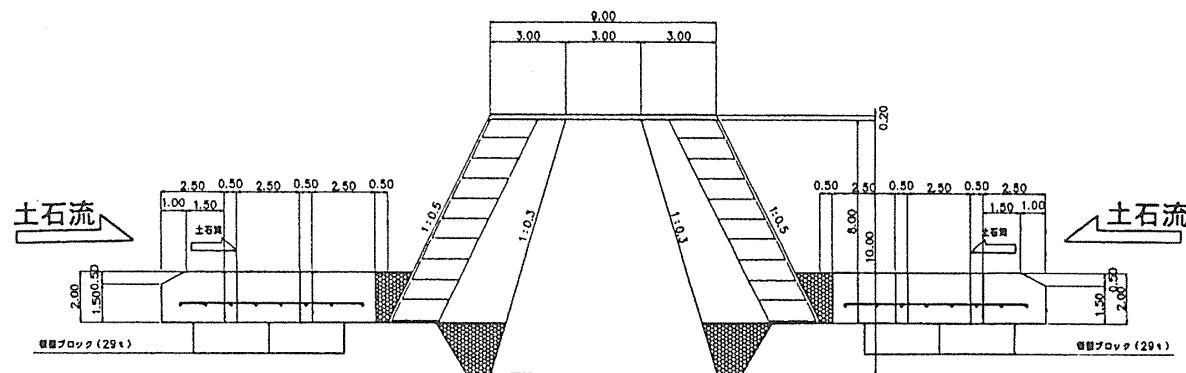


図-12

6. ソフト対策の考え方

土石流危険渓流の砂防施設による整備状況はきわめて低い水準にあり、すべての渓流を整備するには多大の時間と経費を要する。こうした状況から警戒避難等のソフト的な対応を考える必要がある。

以下に、警戒避難のために用いる基準雨量の設定手法を述べる。

6-1 警戒非難のための基準の設定

土石流対策のソフト面での中心となる警戒避難体制の整備にあたっては、警戒非難の基準をどのように設定するかがポイントとなる。崩壊等により渓流を一時的にせき止め、その崩壊に伴い発生する土石流等は別として、一般には土石流の発生は降雨との相関が強く、また基準のためのデータも得られやすいことから、警戒避難の基準には降雨量（基準雨量）が用いられる。基準雨量の設定手順は、図-13に示すとおりである。

雨量資料解析のための観測所（代表観測所）は土石流危険渓流に近く、かつ時間雨量資料があり観測機関も10年以上あることが望ましい。代表観測所においては近傍での土石流の発生時とかなりの降雨（おおむね総雨量で80mm以上または雨量強度で20mm以上）にもかかわらず発生を見なかつたときのそれぞれの降雨量（発生降雨および非発生降雨）について資料を収集整理する。

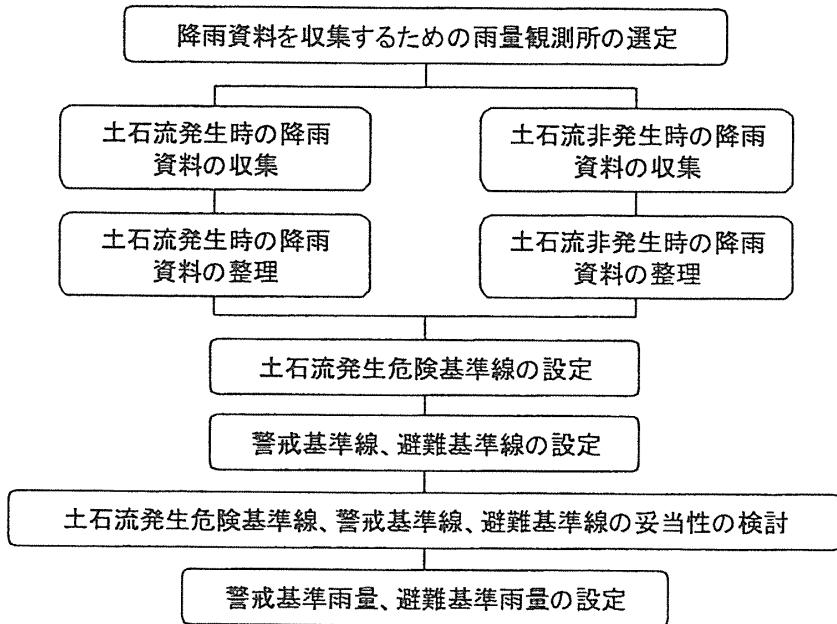


図-13 基準雨量の設定手順

土石流発生の基準雨量の設定手法はいろいろ提案されているが、一時的に以下のように行われている。

- ① 発生雨量と非発生雨量について実行雨量と1時間雨量強度を図-14のようにプロットする。ここで実行雨量とは対象とする一連の降雨以前の前期降雨も土石流発生に影響を与えることから、一定の低減率(現象係数)を乗じて土石流発生時または最大時間雨量発生時(非発生)までの一連の降雨量をえたもので、また1時間雨量としては、土石流発生時または最大時間雨量発生時の1時間雨量としている。

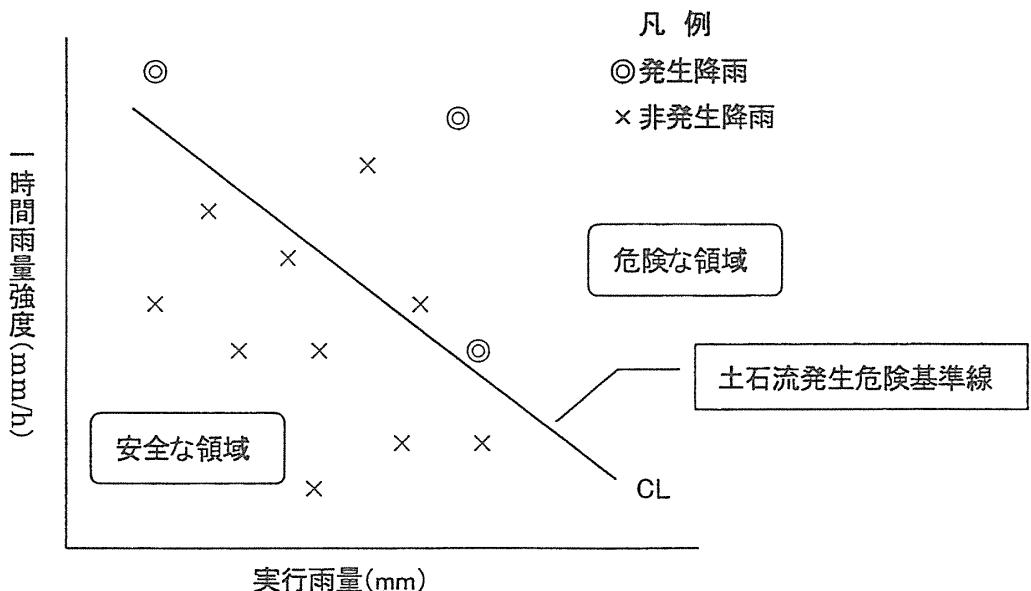


図-14 土石流発生危険基準線の設定

- ② 図-14で発生と非発生の境界線を引くと右側は土石流発生の危険な領域、左側は安全な領域と一応区分できる。この線を土石流発生危険基準線(CL)という。発生雨量のプロット数が少ない場合が多く、CLの設定には十分な検討が必要である。
- ③ 警報や避難の発令は過去の災害調査等から、それぞれ土石流発生の2時間前、1時間前程度が適当とされ(伝達システム整備や避難場所によって異なり実情を良く判断して決める必要がある)、その時の基準雨量を示す基準線を警戒基準線(WL)、避難基準線(EL)と称するが、このWLおよびELを設定する。ELの設定は、既往最大1時間雨量とCLとがクロスする時の実行雨量をR₂とすると、R₂を境界としてそれより実行雨量が大きくなると1時間後には危険な領域に達する恐れがある。したがって、CLとの交点からの垂直線をELとする。WLは既往最大2時間雨量と既往最大1時間雨量の差だけ図の左方向へ平行移動した線で示す(図-15)。

CL、EL、WLの妥当性の検討により適正と判断されればEL、WLの実行雨量が警戒、避難それぞれの基準雨量となる。

以上の検討においては、雷雨生降雨等に対する取扱いと、周辺の基準雨量との関係、気象警戒や他の規制基準とのバランス、さらには雨量資料期間と流域変化(地震、開発等)との関係等をも十分調査して設定が必要である。

図-16では、スネークライン(実行雨量の時系列変化曲線)がWLを通過した時点が「警戒」、ELを通過した時点が「避難」の判断を要する時点となる。

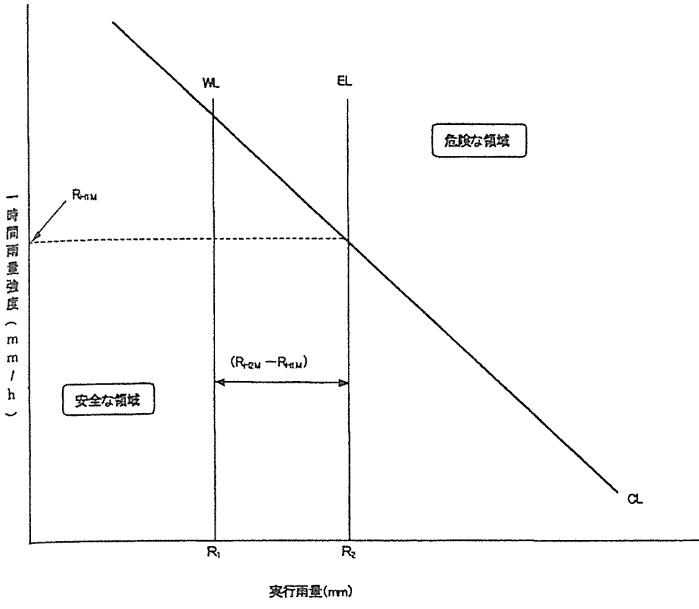


図-15 警戒基準線、避難基準線の設定

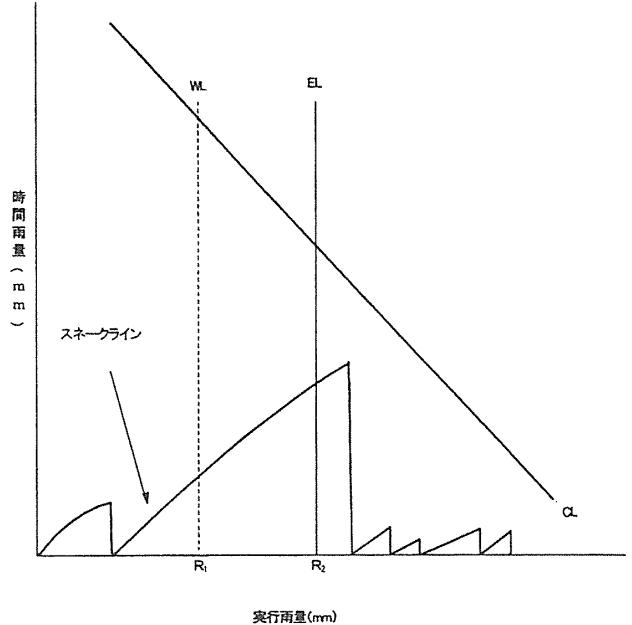


図-16

6-2 地形特性を考慮した発生基準雨量の設定手法（案）

土砂災害発生基準線（以下 CL と呼ぶ）の設定模式図を図-17 に示す。X 軸は、長期指標の降雨要因として有効雨量（mm）、Y 軸は短期指標としての降雨要因として時間雨量（mm/h）を用いると、CL は右下がり直線となり、土砂災害発生の危険性がある領域と安全な領域を区分することができる。また、時事刻々と変化する降雨をスネーク曲線で表すと、このスネーク曲線が CL を越えると土砂災害発生の危険領域に入ることになる。

往来の降雨要因による CL は、土砂災害の発生降雨を重視して、主観的ではあるが技術者の経験的な判断により設定されている。それに対して、本研究で提案する CL の設定は、重判別分析を用いているため、より客観的に決定される。また、CL の切片は、個々の渓流の地形要因の影響を受けており、渓流毎に異なっている。切片の大きい渓流ほど、崩壊危険度の低い渓流であり、逆に、切片の小さい渓流ほど崩壊危険度の大きい渓流となる。

ここで、ある渓流の降雨データを用いて先に述べた往来手法により設定した CL を図-18 に示す。CL の設定に用いた降雨要因は、本研究で提案している手法と比較するために有効雨量（mm）と時間雨量（mm/h）を用いることにする。また、CL は、発生降雨に対する判別を満足し、非発生降雨のスネーク曲線群から非発生領域が最も大きくなるように包絡線を設定している。また、スネーク曲線において太線が発生降雨、細線が非発生降雨を表している。

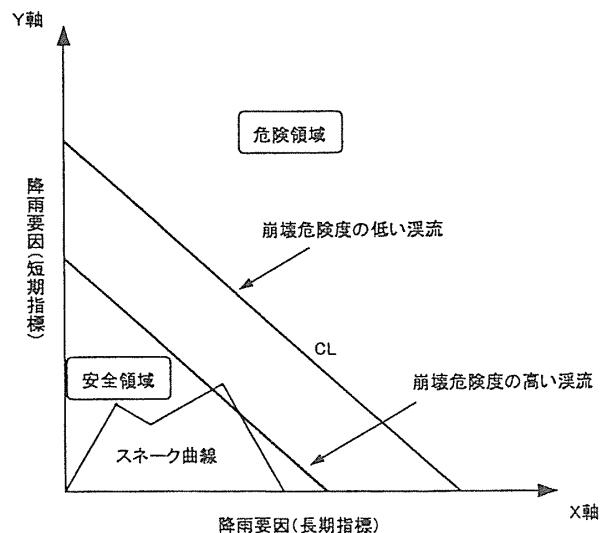


図-17 CL の設定模型図

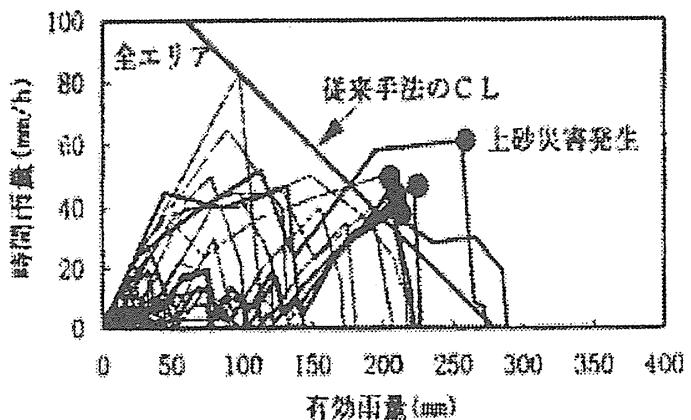


図-18 従来手法によるCLの設定

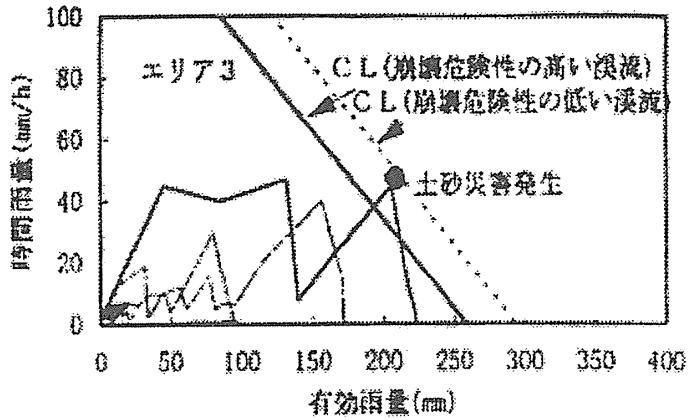


図-19 渓流ごとのCLと土砂災害発生との関係例

一方、本研究で提案している地形特性を考慮したCLは、渓流の地形要因により渓流毎に異なっている。ここでは、代表的な観測エリアに対してCLとスネーク曲線を描いたものを図-19に示す。CLの傾きは、判別システムの時間雨量(mm/h)と有効雨量(mm)の係数比によって決まるため、観測エリアや渓流には関係なく、全て一定値となる。ここでは、 -0.58 となり -1 よりも大きくなつた。実線で示したCLは、土砂災害の発生した渓流の中で最も地形的に崩壊危険度の高い渓流を示している。また、点線で示したCLは、非発生渓流の中で地形的に崩壊危険度の低い比較的安全な渓流を示している。図-19において崩壊危険性の高い渓流のCLは、発生降雨のスネーク曲線における発生時刻の降雨データに対して明らかに危険となつていることを示している。それに対して崩壊危険性の低い渓流のCLは、前述の発生降雨のスネーク曲線に対しても安全な領域となつてゐる。

7. 終わりに

総合的な土石流対策としてハード的な対策とソフト的な対策について事例をあげて記述したが、土石流の実態やメカニズムがまだ解明されていない部分が多く、今後は多くの研究論文や文献を参考にし、現場の計画・設計に反映していきたい。

《参考文献》

- 1) 砂防学講座 第6巻1, 2 土砂災害対策 (社)砂防学会監修
- 2) 土石流災害調査法 池谷浩著 砂防、地すべり技術センター発行
- 3) 砂防学会研究発表会 概要集 平成11, 12年度 (社)砂防学会発行
- 4) 土石流対策技術指針(案) 平成12年度 建設省砂防課発行
- 5) その他