

礫径調査のはなし

しま じょうじ
嶋 丈示

(一財)砂防・地すべり技術センター
砂防技術研究所 次長

はじめに

透過型堰堤は、コンクリートスリットのような堰上げタイプと鋼製透過型砂防堰堤のような閉塞タイプがあります。堰上げタイプは、洪水時に堰堤上流を湛水させ一旦土砂を貯留しますが、洪水後期に土砂がスリットから抜けます。このため、土石流区間では堰上げタイプは使われず、確実に石礫を捕捉する閉塞タイプが用いられています。閉塞タイプの部材間隔は最大礫径の1～2倍です。最大礫径より広くしても礫が捕捉されるのは、アーチアクションが働くからです。さらに、巨礫は土石流フロント部に集中するため、巨礫をアーチアクションで捕捉できれば、開口部が目詰まりして、後続の細粒土砂も捕捉することができます。(図-1・写真-1)

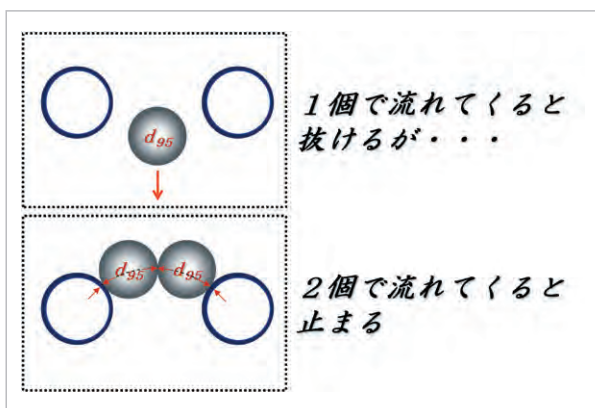


図-1

部材間隔を礫の2倍より広くすると、アーチアクションを発揮させるためには礫が3個以上必要になります。3個以上でもアーチアクションは発現しますが、維持が難しくアーチが崩れ礫が再移動してしまうため、土石流の捕捉性能が極端に落ちます。閉塞タイプは土石流中の巨礫を確実に捕捉する必要があるため、アーチアクションを起こす部材間隔に設定する必要があります。

このように最大礫径は、透過型砂防堰堤の機能を決定する最重要因子ですが、部材間隔の設定に用いる最大礫径は現地に点在する巨礫の最大値ではありません。最大礫径の現行の求め方ですが、堰堤設定予定箇所の上下流200mを測定対象とし、土石流の痕跡と思われる礫堆積群を目安に、その堆積群の中から100個または200個



写真-1

の礫をランダムに選びます。この礫の2辺(長辺、短辺)あるいは3辺(長辺、中辺、短辺)の平均値を礫径として累加曲線を描き、この曲線の95%を最大礫径(d_{95})と定義しています。「最大礫径= d_{100} 」にしないのは、数が少ないため、 d_{100} のような礫径で部材間隔を設定するとアーチアクションが発揮されず、礫が部材の間を通過してしまうからです。

礫径分布から求めた d_{95} は、測定した礫の上から6番目(100個測定)または11番目(200個測定)の礫になります。鋼製透過型砂防堰堤の土石流捕捉性能を決定する部材間隔は、この1個の礫径によって決定しているわけです。礫径のばらつきの度合や頻度といった現地の礫分布の特徴がまったく考慮されていません。例えば、現実には巨礫が数個しかなく累加曲線を描くために必要な100個を測定することが難しい場合や、大半の礫が開口部の閉塞に寄与しないような小礫であっても、大きい方から6番目(11番目)の礫がそれなりの大きさであれば d_{95} が設定できてしまいます。この結果、開口部を埋めるほどの礫が無くても部材間隔を設定できてしまうこ



写真-2

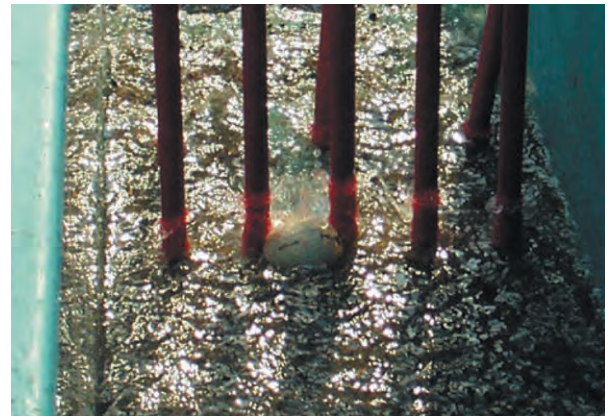


写真-3

とになります。次項で、部材間隔と礫径の関係、礫径調査の方法について詳しく見ていくことにします。

1. 部材間隔と礫径

写真-2の石は3辺平均すると隣のゴルフボールと同じ外径です。この2つを水路上流から転がすと写真-3のようにゴルフボールのみ引っかかりました。「石の長径>ゴルフボール>石の短径」であり、これが部材に引っかかるかどうかは平均径より実際にはどのように流れてくるかが重要ということです。透過型堰堤の設計では、最大礫径に対して部材間隔を決定しますが、平均した外径にこだわりすぎる必要はありません。礫同士の絡みや礫個数、礫径分布の方が需要ですが、現行ではこれらが設定されておらず、最大礫径のみで透過型の最も重要な礫捕捉機能を決定しています。

2. 一次閉塞と二次閉塞

写真-3のように礫が単独で流れてくれば、礫径より部材間隔が広いと通過してしましますが、土石流のように巨礫が群衆で流下してくれば、鋼管に衝突した礫は絡み合い、部材間隔より小径でもアーチアクションが発揮さ

れ捕捉されます。これが透過型堰堤が土石流を捕捉できる所以なのですが、この機能がわかっていないと「透過型堰堤は土砂が通過してしまうから不安だ」ということになりますので、詳しく述べます。

部材が巨礫を捕捉すると、開口部は捕捉された巨礫により狭くなり、これが新たな開口部形状になります。そして、さらに小さい礫径が捕捉されます。こうしたことが繰り返されると、不透過型の砂防堰堤と同様の土砂捕捉効果が発揮されます。ここで、鋼管部材に捕捉されるときを一次閉塞、その次の閉塞を二次閉塞、その次の閉塞を三次閉塞、その次の閉塞を四次閉塞…と定義します。開口部が礫により閉塞されると連鎖反応により開口部がどんどん狭くなり、捕捉される礫径はベキ乗則に則って小さくなります。この結果、部材間隔が1m以上ある透過型堰堤でも、細粒分を含む土砂も捕捉できることとなります(写真-4)。ただし部材間隔が広すぎて一次閉塞が生じないと、それ以降の二次閉塞も生じません。例えば、昔の堰堤で横材がなく柱間隔を最大礫径の2倍に設定していた頃は、土石流フロント部の巨礫は捕捉されるため開口部は土石流波高あたりまでは閉塞しますが、それより上方は空いたままといった形態が多く見られま

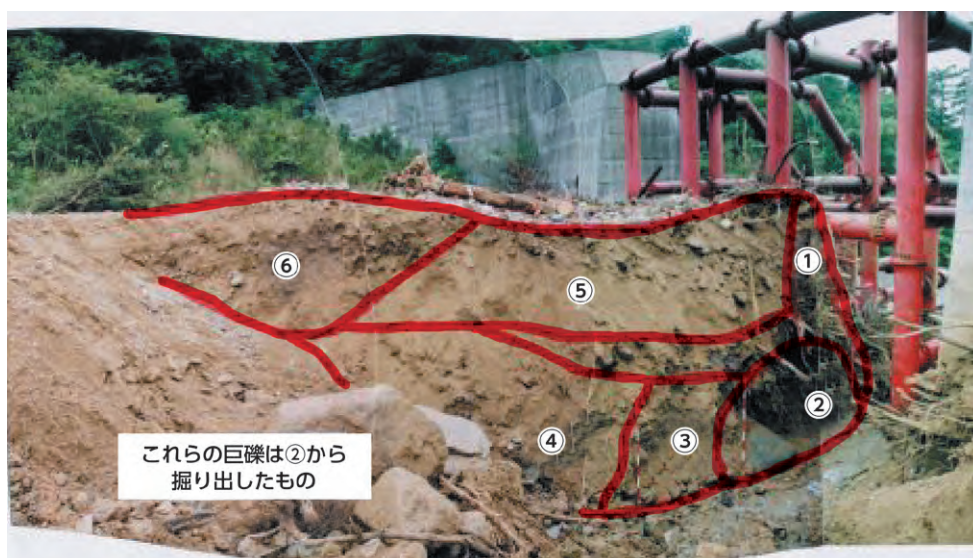


写真-4

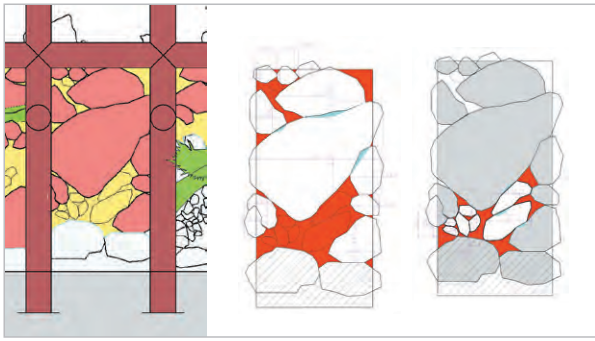


図-2

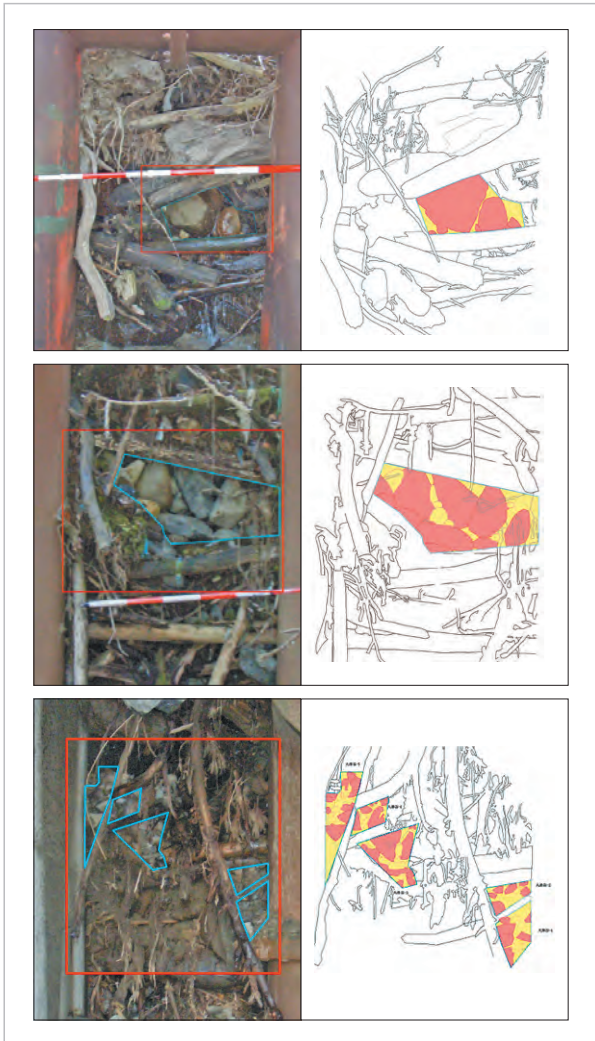


図-3

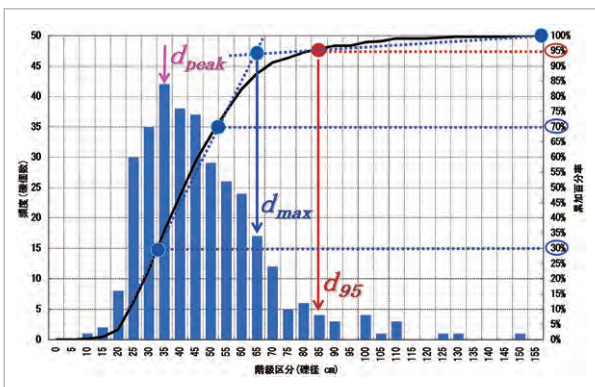


図-4

した(写真-4)。

一次閉塞している礫の大半は部材間(二次閉塞では礫間になる)に1~2個なので、アーチアクションが発揮される礫径と部材間隔の関係は、一次閉塞、二次閉塞に係わらず、「礫径×2>開口幅」になります。一次閉塞が発揮されても礫個数が少ない現場では、二次閉塞が生じず堰堤直上流には空隙の多い礫群が堆積することになりますが、これは透過性の高いロックフィルダムができたようなもので、別に悪いわけではありません。

一次閉塞によって閉塞する面積は最初の開口面積の70%程度で、部材で捕捉される礫は d_{95} 近傍の大きな礫ですが、この礫が捕捉されると、さらに小さい礫も捕捉されるので d_{95} より小さい礫も閉塞に寄与することになります。

図-2は閉塞された開口部を図化したものです。鋼管部材に捕捉された礫によって開口部は相当小さくなっています(真ん中の図の赤部分)。その開口部をさらに小さな礫が捕捉されています(右端の図の赤部分)。残った開口部はさらに小さな礫によって捕捉されますが、図化できないほど小さな礫です。つまり、二次閉塞まで生じれば開口部は閉塞されたと言って良いでしょう。礫径調査で測定した礫($d_{100} \sim d_1$)を見ると、一次閉塞と二次閉塞に寄与している礫に相当します。つまり、礫径調査によって求めた礫径分布は開口部の閉塞を左右する礫であり、 d_{95} より小さい礫径の分布状況や個数が開口部の閉塞にとって重要であることがわかります。

これまで礫の捕捉について述べましたが、鋼製透過型堰堤の捕捉事例を見ると、ほとんど流木も捕捉しています。流木は部材に捕捉されやすいですから、流木が捕捉されると捕捉される礫径は一気に小さくなります。これは一次閉塞、二次閉塞などが同時に起こったようなもので、実際の鋼製透過型堰堤の捕捉事例を見れば、とても捕捉できないような小さな礫しかなくても、流木が捕捉されればほぼ確実に開口部は閉塞されます。図-2 ただ、今の基準では流木捕捉を考慮していませんが、流木捕捉を考慮した計画になれば透過型堰堤の捕捉機能に懐疑的な人でも、安心して使えるのではないのでしょうか。

3. 最大礫径と最多礫径

土石流堆積区間や谷出口などの土石流のフロント部を形成しにくい場合など、礫が各個運搬されると d_{95} を対象礫径に設定しても、アーチアクションが発揮されない可能性があります。そこで現地にそれなりの個数があり、かつ大きい礫を基に部材間隔を決めてやれば土石流の流下形態に関わらず、土砂捕捉効果が発揮されやすくなります。このような礫径は累加曲線の最多礫径帯から求めることができます。累加曲線は不連続な曲線であるため、 d_{100} と d_{95} を結んだ直線と、最多礫径帯に相当する礫径帯である d_{30} と d_{70} を結んだ直線の交点を最多礫径

帯の最大値 (d_{max}) とします。
図-4は礫径の頻度と累積を同時に図化したものです。礫の最頻値 (d_{peak}) と d_{95} では礫径に相当の開きがあります。最頻値 (d_{peak}) を基に部材間隔を決めると間隔が土石流が来る前に透過が閉塞してしまうことが考えられます。しかし、最多礫径帯の最大値 (d_{max}) なら設計可能な部材間隔に収まります。

渓床勾配と流域面積で最大礫径、最頻値、最多礫径帯の最大値の関係をみると**図-5**や**図-6**のようになります。流域面積の大小、径床勾配の緩急によって前後しますが、ほぼ最多礫径帯の最大値は d_{80} 近辺になります。そこで、土石流の堆積区間や、保全対象の直上流など、確実に礫を捕捉したい場合、最多礫径帯の最大値 d_{80} を部材間隔の設定に使うことが考えられます。

透過型堰堤はアーチアクションが発揮されることが大事と言いましたが、現行指針では部材間隔は d_{95} の1倍です。 d_{95} と d_{80} を比較すると**図-7**のようになり、 $d_{95} \times 1$ で部材間隔を決めるということは、 d_{80} のアーチアクションを期待できるということです。つまり d_{95} が動かなくても現地に多数ある d_{80} によってアーチアクションが働き、開口部は閉塞されます。

4. 礫径調査の極意

礫径調査では、現地に点在している礫群の性状を把握するため調査対象区間の礫の全体を網羅するようランダムに礫を選定しますが、この礫の選定自体に個人差があります。礫の選定に客観性を持たせる方法として線格子法などの調査方法があります。透過型堰堤を建設する箇所には礫が無数に点在している方が少なく、このような場合に線格子法で礫を選定すると、200個選定できず、最大礫径が選定から漏れることもあります。線格子法は誰がやっても同じ値を導く意味では客観的なのですが、ランダム法は作作的ではあっても線格子法より巨礫の分布を把握するには向いています。

ランダム法の問題は測定者の主観で礫を選定することですが、やり方次第で客観性を持たせることができます。普通に人が礫を測る場合、大きな礫を優先的に選ぶ傾向があり、実際の礫分布より大きめに設定される傾向にあります。また、大きめの礫を選定するため時間も掛かります。しかし、測定する礫個数が多くなると選

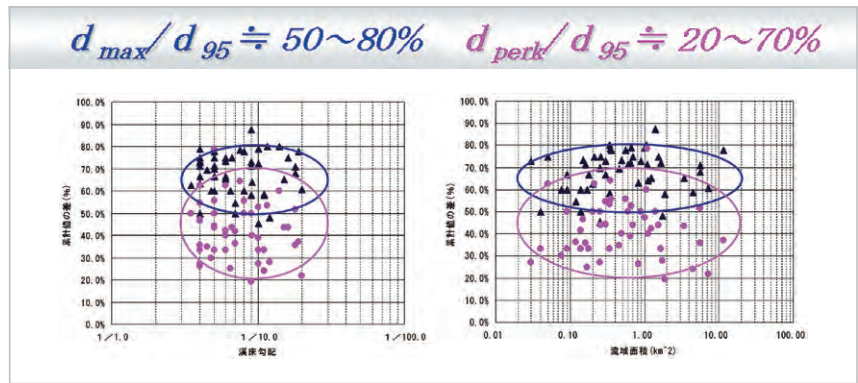


図-5

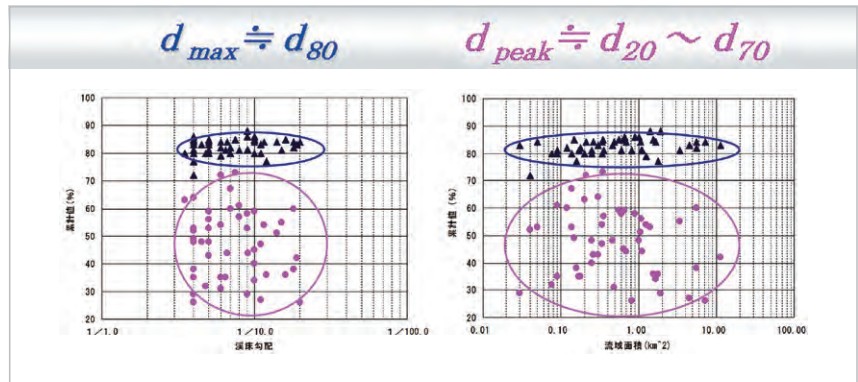


図-6

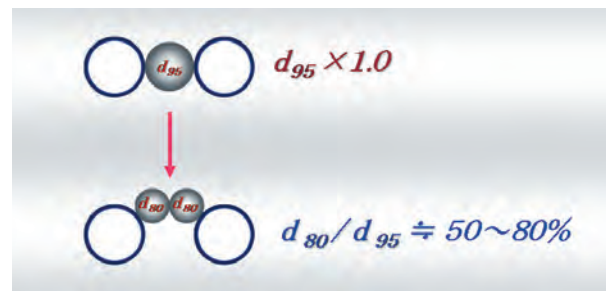


図-7

んでいる暇はなくなってきます。そうなると目に止まった礫を測るようになります。つまり、意識的ではなく、無意識に礫を選択するようになるということです。こうなると、礫群から無作為に礫を選択するため測定者ごとの差が小さくなります。この境地に達するには測定個数を多くすることです。

図-9は日光砂防の日向堰堤の堆砂敷で礫径調査したときのものです（位置は**図-8**参照）。測定はA、Bの2チームに分け、Aチームには上記のような説明をして、できるだけ目の前にある礫を測定するよう指示し、Bチームには説明をせず礫径を測定するよう指示しました。①から⑨へ下流から上流に向かって調査していったのですが、 d_{95} と d_{50} を比較するとAチームよりBチームの方が大きめになっています。累加曲線を見ると下流（①、②）より上流（⑧、⑨）の方が頻度分布の傾向が似かよってきているのがわかります。

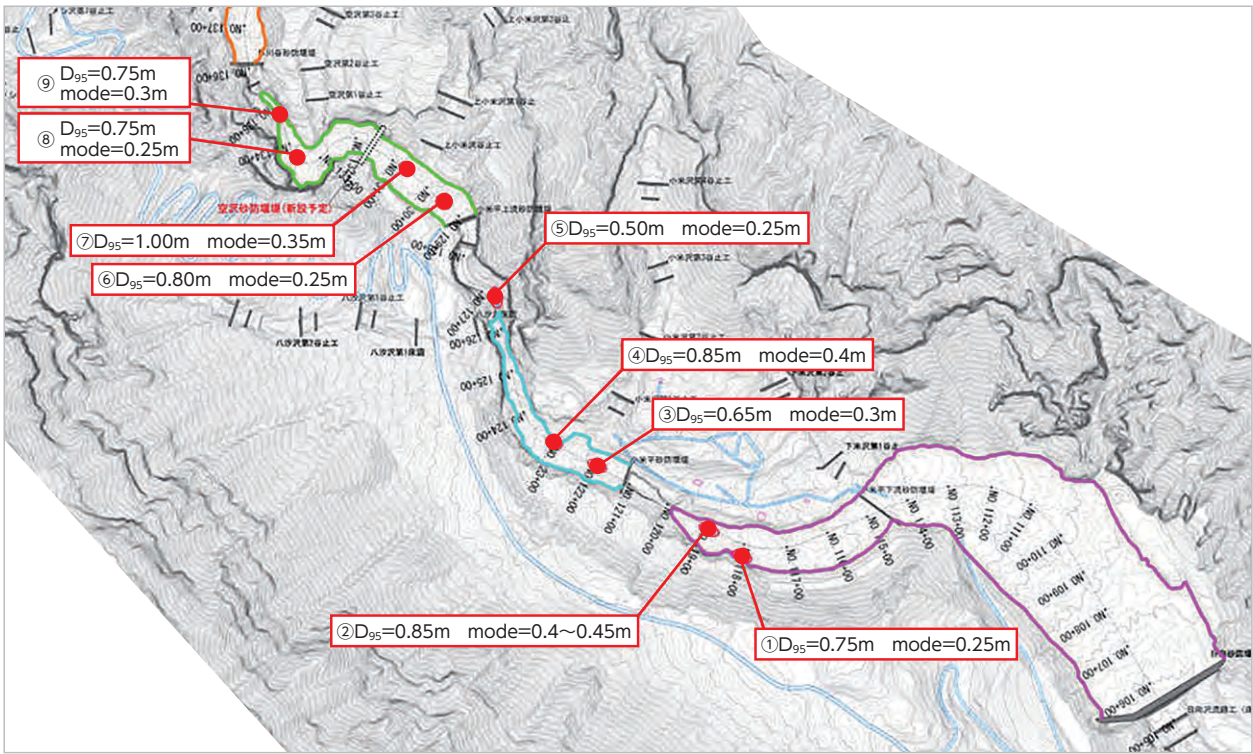


图-8

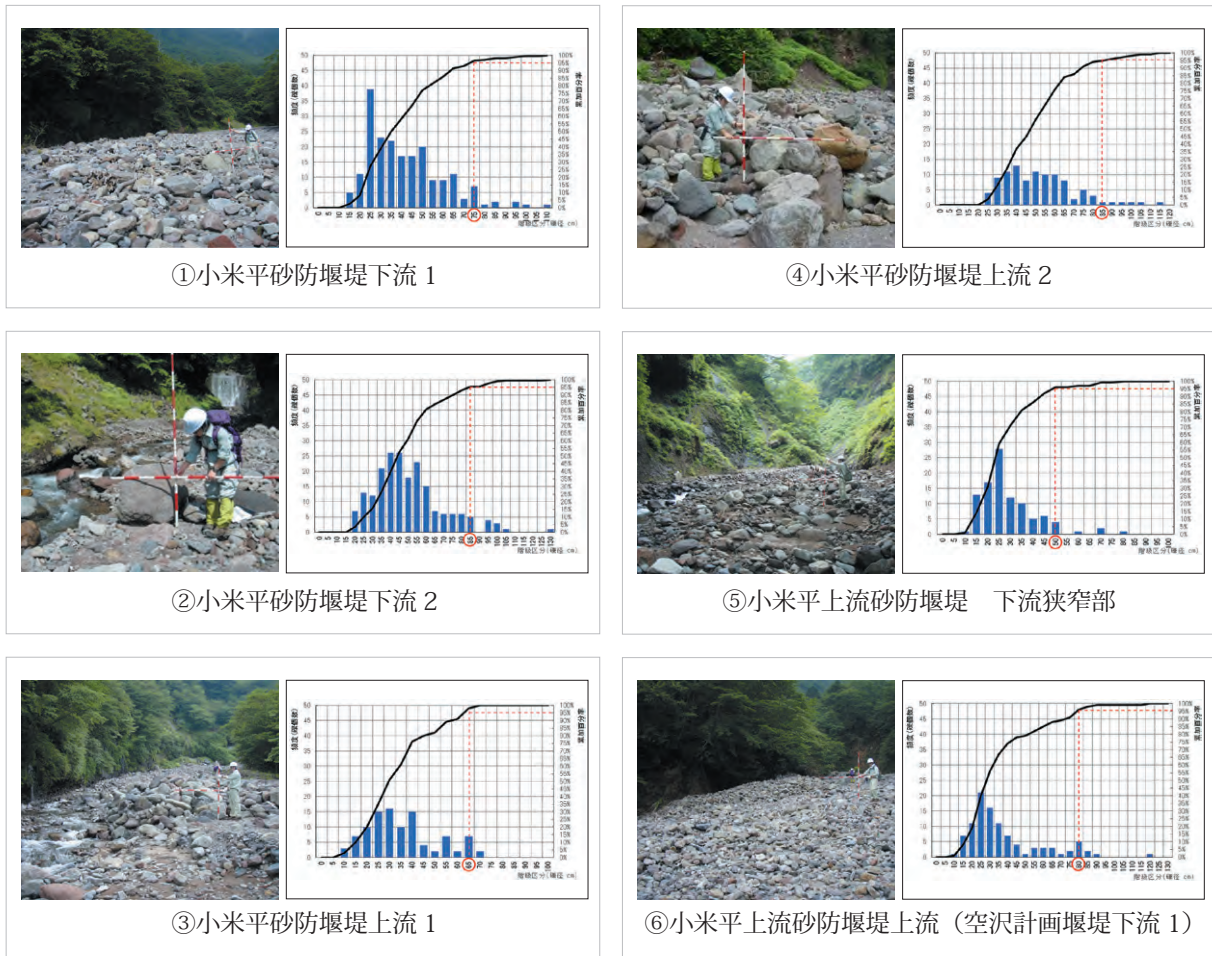


图-9

Aチーム	Bチーム
① D ₉₅ =0.75m D ₅₀ =0.35m	② D ₉₅ =0.85m D ₅₀ =0.45m
③ D ₉₅ =0.65m D ₅₀ =0.30m	④ D ₉₅ =0.85m D ₅₀ =0.50m
⑤ D ₉₅ =0.50m D ₅₀ =0.30m	—
⑥ D ₉₅ =0.80m D ₅₀ =0.25m	⑦ D ₉₅ =1.00m D ₅₀ =0.35m
⑧ D ₉₅ =0.75m D ₅₀ =0.25m	⑨ D ₉₅ =0.75m D ₅₀ =0.30m

1箇所目は礫を選んで測りますが、2箇所目、3箇所目になると、めんどくさくなって選ばなくなります。このように作業が多くなれば選んでいる暇はなく、目に飛び込んだ礫を淡々と測るようになります。意識的に判断するより無意識で行った方が五感をすべて使って最適な行動をとるようです。この無意識を作り出すために頭を使わないようたくさん作業させることで、考えるより動いたほうがよい状態を作り出すことができます。このような状態になると放っておいてもベストな礫選定になります。

この境地になるのが何個とは言えないのですが、無意識に測るためには、測定個数が多いほど良いでしょう。指針で100個から200個に変更になったのは、客観性

の向上にもなっていると思います。

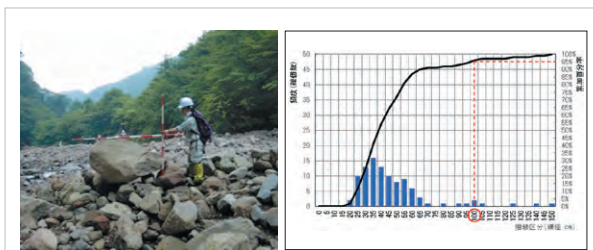
ただし、今ではUAVを用いて自動で計測できるシステムもあり、これらを使えばこのような心配は無くなります。まことに技術革新は人を楽にはしますが、工夫もしなくなるので、基礎となる考え方は十分理解して望みたいものです。

おわりに

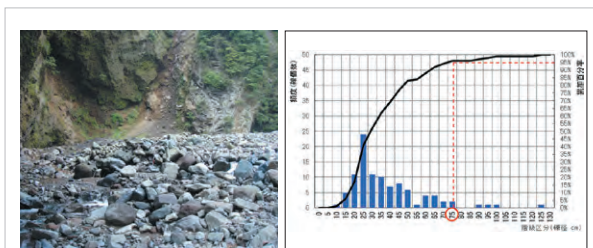
礫径調査をもとに設定する最大礫径は、透過型砂防堰堤の機能を規定する最も重要なパラメータです。しかし、礫径調査において礫の選定に個人差があり、礫形状は無視し長辺、短辺の平均を礫径としているなど、礫調査には曖昧さがつきまといます。さらに、d₉₅自体が現地では頻度分布の少ない礫になっています。閉塞タイプの透過型堰堤は開口部を閉塞する礫が重要ですから、開口部で何を捕捉するのか、どのように捕捉するのかを十分理解して、最大礫径の他に礫径分布や礫個数などの現地の状況を考えて、適切に最大礫径を設定する必要があります。

例えば、土石流の流下区間では部材間隔をd₉₅×1倍に設定しておけばd₈₀でアーチアクションが働き、礫径調査した礫群はほぼ捕捉されます。また、土石流の堆積区間のように土石流フロント部が形成されにくい箇所では、部材間隔をd₈₀×1倍にすることで捕捉機構を発揮することができるでしょう。このように透過型堰堤は安全に効率良く土石流を捕捉するには、どの礫を捕捉対象にするのか機械的に決めるだけではなく、「何が流れてくるのか」、「何を流して良いのか」、礫径分布を眺めて捕捉イメージを掴むことも必要ではないでしょうか。

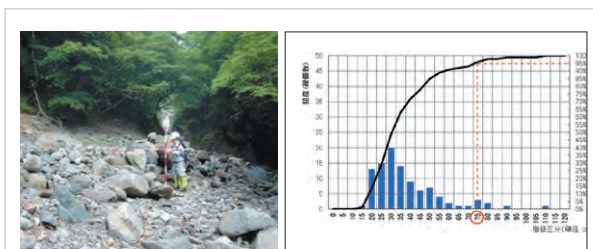
なお、日向堰堤の礫径調査にあたり、国土交通省日光砂防事務所にご多大なるご協力を頂きました。誌面をお借りして感謝の意を表します。



⑦ 小米平上流砂防堰堤上流（空沢計画堰堤下流 2）



⑧ 小米平上流砂防堰堤上流（空沢計画堰堤上流 1）



⑨ 小米平上流砂防堰堤上流（空沢計画堰堤上流 2）

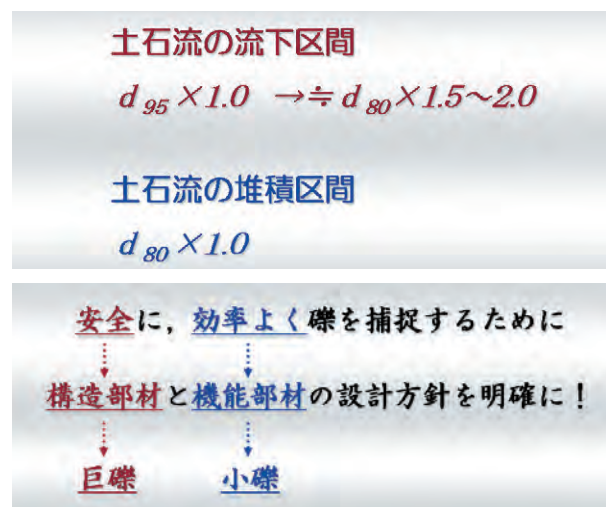


図-10