

◆特集：新しい時代に向けたダム技術◆

砂礫流下による水理施設の損傷量予測手法 — 減勢工の副ダム水叩きを例として

井上清敬* 柏井条介**

1. はじめに

近年の流域一貫した土砂管理の観点から、また、ダム貯水池の堆砂対策の観点から、貯水池に流入する土砂を下流に供給する施設の要望が高まっている。下流への土砂供給方法として、一時的に貯水位を低下させて流水の掃流力を回復させる土砂フラッシングや、貯水池末端とダム下流を結ぶ水路により流入土砂をダム下流に迂回させる土砂バイパスなど、流水のエネルギーを用いる方法が計画・一部運用されるようになっており、将来の展開が期待されている。このような土砂輸送施設の計画では、流下する土砂による施設の磨耗・損傷に対する検討が必要となる。特に、河床構成材料となる比較的大きな粒径の土砂が流下する場合には、施設の安全性確保、機能維持の観点から、磨耗・損傷対策が不可欠の検討項目となる。

砂礫による磨耗・損傷量の予測方法については、2次元水路を対象とした石橋¹⁾によるものなどいくつかあるが、土砂輸送施設全体を通してみると、そこには様々な流れの場があり、既往の知見は生じ得る流れ場の一部に適用されるに過ぎないものである。特に、流入部や屈折・湾曲部などの急変流場や、減勢工等の乱れの大きい流れ場での知見、また、損傷が進み施設の境界条件が変化した場合の影響についての知見はほとんどないといっている。

こうした状況に鑑み、土木研究所水工研究グループでは、様々な流れ場での磨耗・損傷量を予測する方法を検討してきており、模型壁面を模型実験で損傷可能な材料により製作し、実際に損傷させる方法を提案している²⁾。本報告は、こうした一連の検討のうち、副ダム直下流での洗掘を対象とした検討結果をとりまとめたものである。

副ダムは、跳水状態を確保するため設けられる堰上げ施設であり、土砂排出を行う治水専用ダムの減勢工や土砂バイパス施設出口部減勢工等では、多量の土砂が流下することが想定される。

検討では、損傷の生じていない状態での礫の挙動を、高速度カメラを用いて明らかにし、壁面への衝突速度および衝突エネルギーを求めた。今回の検討では、損傷材料としてパラフィンを用いており、実験ではパラフィンおよび通常の本製水路の両者を対象とし、材料の違いが衝突後の礫の挙動に与える影響を調査した。また、パラフィンを用いた実験により、損傷が進行した場合の影響を調査するとともに、挙動実験結果に基づき損傷材料特性の影響を補正する方法を提示した。なお、通常のコクリート材料では、損傷量は砂礫の衝突エネルギーの積分値に比例して大きくなると考えられ、以下では損傷量を表すパラメータとして衝突エネルギーを対象に考えるものとする。

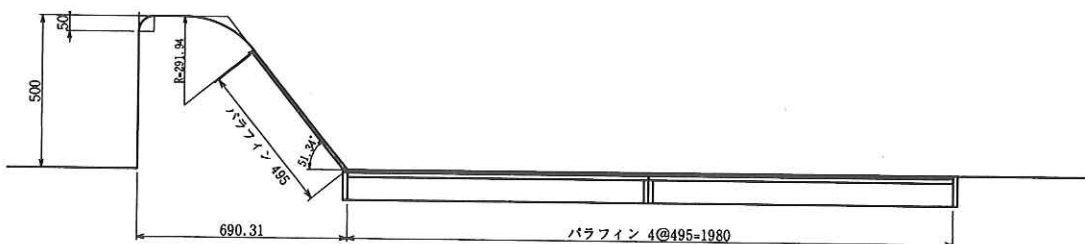


図-1 水路模型縦断面図 (単位: mm)

表-1 実験ケース

		流下砂礫	流量 (m ³ /s)	水路底面の材質	土砂投入量	流下砂礫の 平均質量 (g)	撮影範囲 (副ダム 下流端からの距離)
砂礫の流下 挙動把握実験	Case1-1	砕石粒径： 25～50mm	0.060	パラフィン	53個	49.4	副ダム直下流
	Case1-2				70個	53.8	0.3～0.7m下流
	Case1-3			木	65個	49.7	副ダム直下流
	Case1-4				47個	53.0	0.3～0.7m下流
損傷実験	Case2			パラフィン	1699kg	56.7	—

2. 実験の概要

実験は、片側側面が透明な幅0.5mの水平直線水路に、落差0.5m、下流勾配1：0.8の副ダムを設けて行った（図-1）。

各実験の実験ケースを表-1に示す。表中、砂礫挙動把握実験は、施設が損傷を受けていない状態での流下礫の挙動を明らかにするために実施したもので、水路底面の材質として、木材および損傷材料（パラフィン）のそれぞれについて実施した。

実験では、礫を1個ずつ副ダム直上流に投入し、副ダム下流面流下後の挙動を高速度カメラ（シャッタースピード1/2000sec、撮影コマ数1000枚/sec）で撮影した。撮影範囲は副ダム下流端から0.75m程度までの範囲であり、高速ビデオの撮影範囲が限られることから2区間に分けて撮影を行った。撮影された画像をもとに、底面に衝突直前・直後の土粒子の速度、および流下方向の衝突位置を求めた。用いた礫は不定形のもので、回転運動を伴うことから、各速度は礫の重心に近い位

置の座標変化より求めた。なお、角速度も衝突エネルギーに関係するものであるが、今回の解析では、重心の速度に対して回転速度の影響が小さいものとして省略した。

損傷実験は、損傷が進行した場合の影響を調査するために実施したものであり、0.3 kg/sec程度の一定の給砂量で、横断方向の偏りが生じないように連続的に給砂した後、損傷量を計測した。損傷量の計測は、レーザー変位計を用いて行い、水路底面高さを横断方向に1mmピッチで1/10mm程度の精度で計測した。計測線は、斜面下流端より0.05、0.10、0.15、0.20、0.30、0.40、0.60、0.80、1.00、1.20、1.50、1.80mの各位置である。

3. 損傷初期の砂礫の挙動

図-2、3に、それぞれ副ダム下流端からの距離に対する衝突回数、底面への衝突エネルギーの分布を示す。図では、流下方向の距離を分割し、それぞれの区間の値を単位幅当たりに単位土砂量を給砂した場合の、単位面積当たりに換算して示し

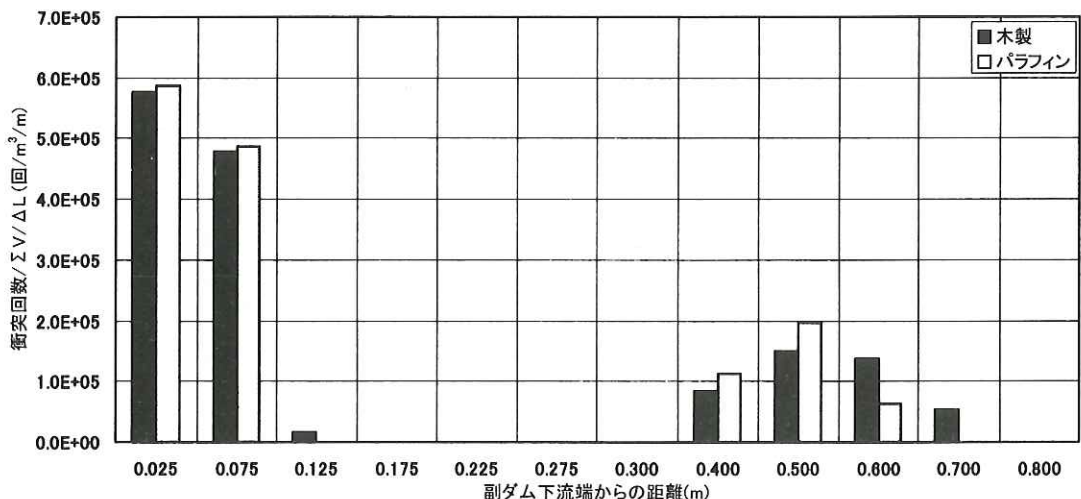


図-2 単位面積当たりの衝突回数の分布（単位幅当たりに単位土砂量を給砂）

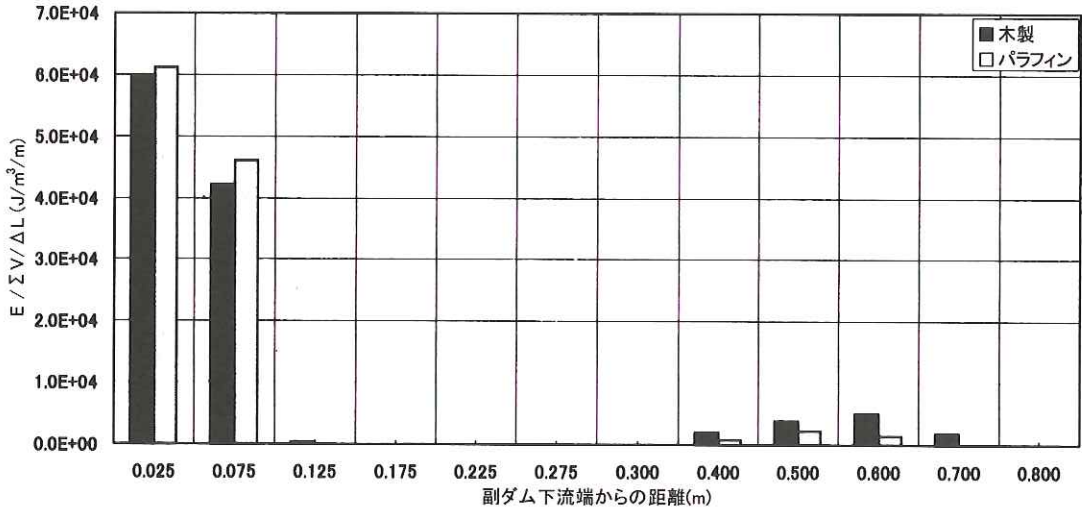


図-3 単位面積当たりの衝突エネルギーの分布 (単位幅当たりに単位土砂量を給砂)

ている。なお、ある区間の単位面積当たりの衝突回数 N および衝突エネルギー E_j (単位幅当たりに単位土砂量を給砂) はそれぞれ次式で求められる。

$$N = \frac{N_e}{\Delta L \sum_i V_i} \quad (1)$$

$$E_j = \frac{1}{\Delta L \sum_i V_i} \sum_i \frac{1}{2} m_i v_{yi}^2 \quad (2)$$

ここに、 N_e : 実験での衝突回数、 ΔL : 区間長、 $\sum_i V_i$: 実験で投入した礫の全体積、 m : 礫の質量、 v_y : 衝突直前での礫の鉛直方向の速度成分である。

図-2より、衝突は副ダム直下流および0.35～0.75mの区間に集中しており、0.15～0.35mの区間には顕著な衝突が生じていないことが分かる。これは副ダム下流面を流下した礫が直下流で衝突し、ある一定区間を跳躍するためであり、跳躍長は木に対し、パラフィンでのそれがやや小さくなっている。一方、図-3の衝突エネルギーをみると、副ダム直下流における木とパラフィンの差はほとんど無いが、0.35～0.75mの区間では、パラフィンがやや小さい結果となっている。この差は直下流での衝突後の挙動の違い、具体的には反発係数の違いによるものと考えられる。このことについてさらに検討する。

図-4、5には、副ダム直下流の衝突における衝突前後の鉛直 (v_y) および水平 (v_x) 方向の速度

成分を示す。使用した礫は不定形のものであり、結果のばらつきは比較的大きい。特に衝突後のばらつきが大きくなっている。

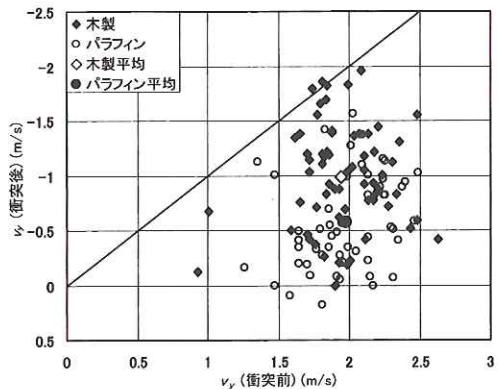


図-4 副ダム直下流における衝突前後の鉛直方向速度成分 v_y

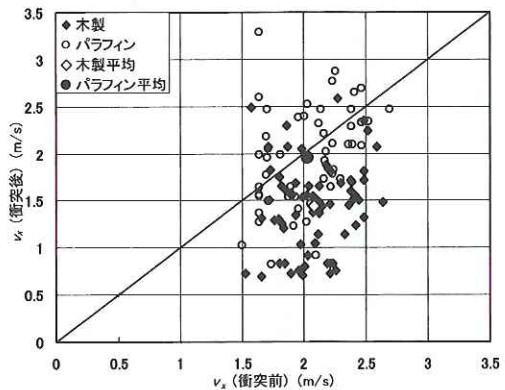


図-5 副ダム直下流における衝突前後の水平方向速度成分 v_x

衝突前の v_x 、 v_y の平均値は、木製、パラフィンではほぼ等しく、それぞれ v_x が 2.1m/s 程度、 v_y が 2.0m/s 程度となっている。一方、越流流れとして計算される平均流速は、 $v_x=2.18\text{m/s}$ 、 $v_y=2.72\text{m/s}$ であり³⁾、水平方向についてはほぼ一致するものの、鉛直方向の速度が小さくなっている。

鉛直方向の速度が低下する理由として、副ダム下流端で水流の流向が水平方向に変化し、鉛直方向に抗力が作用すること等が考えられる。今回の流速に対する礫の速度の低減量は約 25% であるが、これらの影響は粒径により変化し、粒径が小さい程、抗力の影響を受けやすいと考えられる。今回用いた礫径はかなり大きいものであり、これらの影響による低減量は、通常の砂礫径に比べ小さいと考えてよいであろう。

なお、流向変化に伴う抗力の影響は水平方向にも存在し、加速の方向で作用する。今回の実験では、水平方向の礫の速度は水流のそれとほぼ一致しているが、副ダム下流面を流下することにより生じる摩擦抵抗による減速の影響と水流による加速の影響が相殺しあっている可能性がある。今後の検討課題としたい。

衝突直後の速度であるが、鉛直方向については木製、パラフィンともに衝突前に対し、速度低減が見られており、パラフィンでの低減が大きくなっている。一方水平方向については、木製において平均値で 30% 程度の低減が見られるが、パラフィンではほとんどない。これは、各材料の摩擦特性の違いによるものと思われ、パラフィンでは摩擦抵抗があまり作用していないものと思われる。

表-2 は、副ダム直下と 0.35～0.75m 区間のそれぞれについて、衝突前後の水平および鉛直速度成分の平均値の絶対値を示したものである。副ダム直下流での衝突直後と下流での衝突直前、すなわち 1 回の跳躍の初速と終速をみると、鉛直方向の速度成分の変化はほとんどないようである。一方、水平方向については終速が初速よりかなり大きくなっており、水流により加速されたことが推定される。跳躍前後の水平方向速度の比は木製、パラフィンによらず 1.5 倍程度の値となっているが、主流の流速は 3.0～3.5m/s 程度と推定され、粒子径

表-2 衝突位置・模型材料別の礫の衝突前後の速度水平および鉛直成分の平均値

		副ダム直下流		副ダム下流端から 0.35～0.75m の区間	
		衝突直前	衝突直後	衝突直前	衝突直後
木	速度水平成分 v_x	2.08	1.44	2.24	1.95
	速度鉛直成分 v_y	1.95	0.99	0.99	0.59
パラフィン	速度水平成分 v_x	2.03	1.96	2.67	2.61
	速度鉛直成分 v_y	1.98	0.57	0.60	0.27

表-3 礫の跳躍距離の計算値と実験値（平均値）の比較

跳躍距離 (m)	実験値	計算値
木	0.51	0.63
パラフィン	0.46	0.49

が小さければさらに加速されることも考えられる。

両材料について反発係数を別途求めた結果、木製で 0.47、パラフィンで 0.31 の値を得ている。これらの値を用いて得られる副ダム直下流での衝突後速度鉛直成分は、それぞれ 0.91m/s、0.61m/s であり、実験値とほぼ一致する。なお、既往のコンクリートと河床砂礫の反発係数を検討した結果によれば、礫の性状にもよると思われるが、0.47 の値を得ており⁴⁾、木製での値がこれと一致し、パラフィンは小さい値となっている。

表-3 は、礫の鉛直方向の運動方程式から跳躍時間を求め、その間の水平方向移動距離として跳躍距離を求め、実験値（平均値）と比較したものである。ここで、跳躍時間の計算は、石橋¹⁾ が提案した方法を用い、水平方向移動速度は、実験で得られた水平方向の初速、終速の平均値を用いて計算した。木製水路の計算結果が実験値より若干大きくなっているが、両者は概ね一致しており、平均的な跳躍距離を表すことができている。

因みに今回の実験における木製での跳躍距離の平均は、パラフィンでのその 1.12 倍となっており、パラフィンでの水平速度が大きい影響よりも、鉛直速度が小さく跳躍時間が短い影響の方が大きかったものと思われる。

4. 損傷進行の影響

図-6 に損傷実験後における副ダム下流水路の損傷深さの縦断分布を示す。損傷は幅方向にほぼ一様に生じており、図には幅方向の計測値の平均値を示している。図より、副ダム直下流の深掘れは

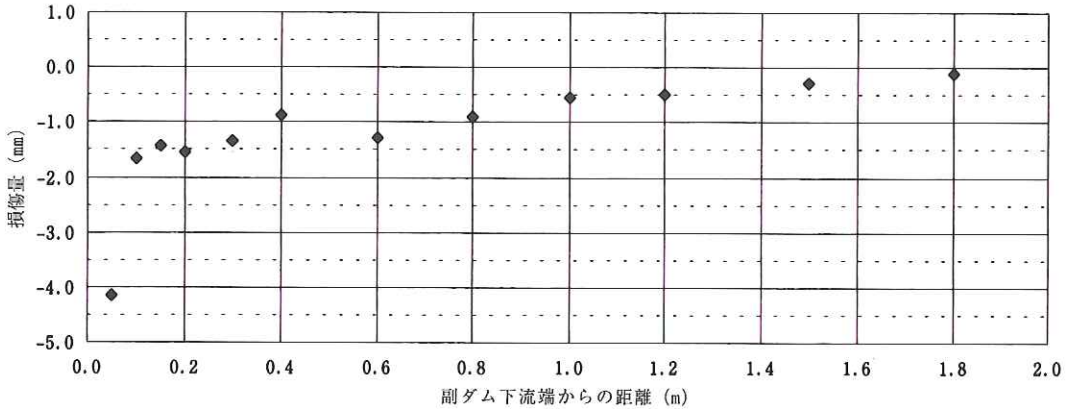


図-6 副ダム下流水路の損傷深さの縦断分布

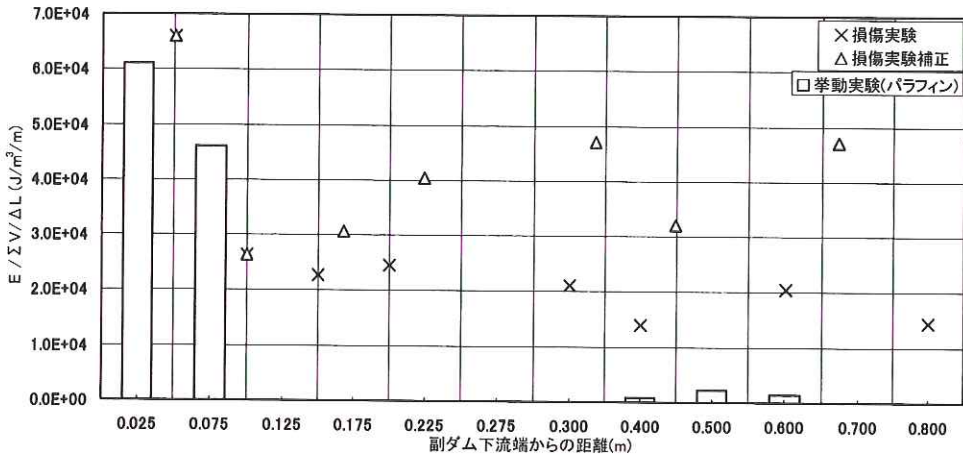


図-7 損傷実験結果から得られる単位面積当たりの衝突エネルギー分布 (単位幅当たりに単位土砂量を給砂)

3. で示した衝突エネルギー分布と一致するが、その下流の状況はかなり異なっており、3. で衝突が見られなかった0.15～0.35m区間の損傷も比較的大きい。また、0.6mにおける損傷量がやや大きい、これは図-3の0.35～0.75m区間の衝突エネルギーに符合するものかもしれない。その下流では逐次損傷量が低減している。

以上示したように、損傷の縦断分布は3. の衝突エネルギーの分布傾向とは必ずしも一致してない。このことは、損傷初期の状況については、3. で示したような方法による予測が可能であるが、損傷が進んだ場合の予測については損傷による形状変化の影響を無視できないことを示しており、本実験のような損傷材料による方法が有効であることが分かる。

ここで、副ダム下流面上の礫の落下状況については、損傷の有無による変化が無いと考えられる。

したがって、副ダム直下流については、損傷の有無に拘らず、図-3に示す衝突エネルギーと同程度であろう。但し、損傷により底面と礫との衝突角度が変化することが考えられ、衝突角度による補正を行う必要がある。一方、パラフィンの損傷量は衝突エネルギーにほぼ比例すると考えられるから²⁾、副ダム直下流の衝突エネルギーを1とする衝突エネルギーの分布形状は、副ダム直下流の損傷量を1とする損傷量の分布形状に一致するものと考えられる。以上の考察より求めた、図-6に対応する単位面積当たりの衝突エネルギー分布 (単位幅当たりに単位土砂量を給砂) を図-7の×に示す。ここで、図-6における副ダム直下流の損傷量は副ダム下流の最初の測定点を用いている。

図には図-3で示したパラフィンにおける衝突エネルギー分布も併せて示しているが、全般に損傷実験での値が大きくなっていることが分かる。損

傷実験での礫の挙動は観測しておらず、この理由は必ずしも明確ではないが、図-6に示されるように損傷により水路底面は下流上がり勾配となっており、衝突角度が大きくなり、衝突回数や1回当たりの衝突エネルギーが大きくなったことが考えられる。

ところで、3. で示したようにパラフィンと木製では礫の挙動が異なる。ここでは、木製での反発係数が河床礫とコンクリートのそれに近いことから、木製水路がコンクリート水路の特性を表すものとし、パラフィンとの違いによる補正方法を検討してみる。

まず、副ダム直下流の衝突エネルギーについては、材料による差が生じないので、結果をそのまま用いるものとする。一方、2回目の衝突である下流区間については、反発係数による衝突エネルギーの違いおよび反発係数と摩擦特性の違いによる跳躍距離の差が生じる。そこで、ここでは跳躍距離の比である1.12を縦断分布の距離に乘じ、縦断形状を全体に引き伸ばすものとする。また、2回目の衝突における両材料の衝突速度の比が反発係数の比で表されることから、衝突エネルギーに両材料の反発係数の比の2乗 $=2.30$ を乗じて補正するものとした。問題は、挙動実験における副ダム直下から2回目の衝突位置間の補正係数であるが、この間は距離に対し、0.0から2.30まで直線的に増大するものとして設定した。結果を図-7の△に示す。△により、材料特性を補正した損傷進行後の衝突エネルギーを求めることが可能である。

今回は2回目の衝突までの影響を調査するに留めるが、これより下流でも同様の手続きで土砂の挙動を参照して補正が可能なものと思われる。しかし、今回対象とした副ダム下流の水路であれば、磨耗・損傷対策の対象となる水叩き長は今回の検討範囲程度と考えてよいものと思われる。また、今回の検討では損傷状態は1ケースのみであったが、損傷の進行に合わせて計測を行うことにより、進行に合わせた衝突エネルギーの推定を行うことが可能である。

5. まとめ

以上をまとめると、次のとおりである。

まず、損傷初期の状況について、

- (1) 衝突エネルギーは副ダム直下流および跳躍後のある区間に集中し、両者の間の衝突は少ない。

い。

- (2) 副ダム直下流の衝突前鉛直成分は、流速のそれより小さくなる。
- (3) 衝突後の鉛直方向速度成分は反発係数により求めることができ、跳躍初期と終期での変化は小さい。
- (4) 跳躍距離は、鉛直方向速度成分から求められる跳躍時間と水平方向速度成分により求めることができる。

の結果を得た。

また、損傷進行時には、損傷初期の衝突エネルギー分布と異なるエネルギー分布となることが示され、損傷材料による検討の必要性を示すとともに、損傷材料の反発係数等の特性を補正する方法を示した。

今後、上記方法を他の施設にも適用し、土砂輸送施設の損傷量の予測方法を確立していく予定である。

参考文献

- 1) 石橋：ダムの排砂設備の流下砂礫による磨耗・損傷に関する水理学的研究，土木学会論文報告集，第334号，1983年6月
- 2) 柏井、井上：砂礫流下による水理構造物損傷量を予測するための試案，ダム工学，Vol.12，No.3，2002
- 3) 野口、中西：ダムの堤趾導流部の流れと導流壁高の設計法，土木技術資料，第32巻，第3号，1990
- 4) 柏井、塚原、高橋：衝撃によるコンクリート損傷に関する基礎的検討，ダム技術，No.167，pp.55-62，2000

井上清敬*



独立行政法人土木研究所
水工研究グループダム水
理チーム研究員
Kiyotaka INOUE

柏井条介**



独立行政法人土木研究所
水工研究グループダム水
理チーム上席研究員
Josuke KASHIWAI