

V-11 土砂による水路の磨耗・損傷予測と対策に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 14～平 17

担当チーム：河川・ダム水理チーム

研究担当者：柏井 条介、井上 清敬

【要旨】

近年の流域一貫した土砂管理の観点や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土砂輸送施設の展開が期待されており、施設の磨耗・損傷対策の確立が求められている。本調査は、土砂輸送施設の磨耗・損傷量予測方法を開発するとともに、ライニング材料の磨耗・損傷特性を解明するために実施しているものである。調査項目は、局所洗掘を含む様々な水理構造物形状に適用可能な磨耗・損傷量の推定方法の検討、コンクリート材料を主とするライニング材料の磨耗・損傷負荷量と損傷量の関係の把握及び関係把握のための試験装置の開発、水理構造物のライニング計画立案方法の検討の各項目であり、最終年度である 17 年度はこれら項目について更に検討を進めるとともに取りまとめた。ここに、磨耗・損傷量の推定は、水理模型実験を通じて実施する方法を提案・検討している。

キーワード：土砂管理、堆砂、土砂輸送施設、損傷、衝突エネルギー

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。

土砂を下流に供給する方法として、流水の土砂輸送力を用いる方法が計画・一部運用されており、今後の発展が期待されているが、これら施設的设计・管理では、施設の磨耗・損傷対策の検討が不可欠である。

本調査は、土砂輸送施設の磨耗・損傷量予測方法を開発するとともに、ライニング材料の磨耗・損傷特性を解明するために実施しているものである。

磨耗・損傷量の予測方法については、2 次元開水路を対象にした石橋による方法が提案されているが¹⁾、実際の水理構造物の流れは、3 次元的なものであり、また開水路流のみで構成される訳でもない。本調査では、水理構造物で生じる様々な流れ場での予測が可能なよう水理模型実験による方法を対象とし、検討を進めてきた。

具体的には、水理模型実験で用いる模型材料を、水理模型実験上の流れ場、土砂により損傷される材料とし、実験により得られる損傷量から原型の損傷量に換算しようとするものである。この場合、模型材料が問題になるが、本調査ではパラフィン及び発泡フェノール樹脂について検討を行い、パラフィンについては損傷量が小さいことから発泡フェノール

を主体に検討をすすめることとした。

ライニング材料の損傷負荷量と損傷量の関係についてはステンレス球を用いた落下損傷試験により調査した。試験対象材料はコンクリート材料であり他の材料については既往文献から検討した。コンクリートの落下損傷試験では落下範囲により損傷量が影響を受けることが明らかになり、面的な損傷を再現するのに必要な範囲を検討するとともに、数種のコンクリート品質に対し損傷特性を把握した。また、落下損傷試験はかなりの労力を要することから、今後の様々な材料試験に供することができるよう、損傷試験を簡便に行うための試験機を考案・試作した。

以上が本調査の中心であるが、最後に上記成果を用いて、土砂輸送施設の磨耗・損傷量が予測されるものとして、具体的構造物におけるライニング計画の検討方法を考察した。

2. 水理模型実験による損傷量の予測

2.1 予測の基本となる考え方

本調査では、水理模型実験の壁面材料に実験で損傷可能な材料を用い、実験での損傷量から原型での損傷負荷量を予測する方法を検討している。その基本的な考えは以下の通りである。

文献 2) の試験結果より、1 回の粒子の衝突におけるコンクリート損傷量 ΔV （以下特に断らない限り体積をあらわすものとする）は、衝突エネルギー E

$= 0.5mv_1^2$ (ここに、 m : 粒子の質量、 v_1 : 衝突直前の粒子速度) を用いて次式で表すことができる。

$$\Delta V = af(\theta)E - b \quad (1)$$

ここに、 a, b : 定数、 θ : 衝突直前の粒子の運動方向と衝突面のなす角である。 $f(\theta)E$ は衝突による粒子のエネルギー損失を表しており、

$$f(\theta) = 1 - \alpha_z^2 \sin^2 \theta - \alpha_x^2 \cos^2 \theta \quad (2)$$

と表される。ここに、 α_z, α_x : それぞれ v_1 の衝突面に垂直、平行方向速度成分の衝突後の低減率である。

式(1)より単位土砂量流下時の単位面積あたりの損傷量 ΔV_a は

$$\Delta V_a = a \sum_{i=1}^n f(\theta_i) E_i - nb \quad (3)$$

により計算される。ここに、 n は単位土砂量通過時の単位面積あたりの衝突回数である。

今、水理模型実験の模型上の模型値を添字 m で表して、式(2)と同じ式形で損傷量と衝突エネルギーの関係が表されるものとする、

$$\Delta V_{am} = a_m \sum_{i=1}^n f(\theta_{mi}) E_{mi} - n_m b_m \quad (4)$$

となる。ただし、模型の $\Delta V_{am}, n_m$ は、それぞれ $1/K^3$

(K : 模型縮尺) の通過土砂量における $1/K^2$ の面積当りの損傷量、衝突回数を表わすものとしている。

ここで、掃流砂の運動を考えた場合、流水中の粒子の運動は概ねフルードの相似則に従うものと考えられる³⁾。問題は α_z, α_x で異なることによる衝突後の飛び出し速度、方向の相似性であるが、後に示すように、本調査で模型材料と考えている発泡フェノール樹脂を用いた調査結果によれば、垂直方向の飛び出し速度に対する α_z の影響は小さく、 α_x については、コンクリートと同程度の値が得られている。従って、模型での砂の跳躍現象にはフルードの相似則が成立するものと考えてよく、この場合原型と模型に以下の関係が成立する。

$$E = K^4 E_m \quad (5)$$

$$\theta = \theta_m \quad (6)$$

$$n = n_m \quad (7)$$

また、発泡フェノール樹脂を用いると、

$$\alpha_x = \alpha_{mx} \quad (8)$$

であり、これらの関係を用いると、 ΔV_a と ΔV_{am} に

次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} \Delta V_a = K^4 \frac{a}{a_m} \Delta V_{am} + K^4 (\alpha_{mz}^2 - \alpha_z^2) \sum_{i=1}^{n_m} \sin^2 \theta_{mi} E_{mi} \\ + n_m \left(K^4 \frac{ab_m}{a_m} - b \right) \end{aligned} \quad (9)$$

上式を用いて模型損傷量から原型損傷量の予測が可能になる。

以上が模型実験結果を用いて原型での損傷量を予測する場合の基本的な考えである。ここで、右辺第2項 $\sum_{i=1}^{n_m} \sin^2 \theta_{mi} E_{mi}$ 及び第3項の n_m を求めるのは手続きを複雑にする。これらは模型値であるので、例えば、後に示すように、模型上の土砂粒子の運動を高速ビデオ映像から解析し、求めることが可能であるが、より簡便には次のような設定も考えられる。

まず、第2項であるが、模型損傷材料として発泡フェノール樹脂を用いた場合、 $\alpha_{mz} < \alpha_z$ と考えて問題なく、従って、第2項は負値をとるので、省略すれば計画上安全側(ΔV_a として大きめの値となる)の設定がなされる。第2項は、求められる損傷量が設計や管理計画上現実的なものであれば、省略することが考えられる。

また、第3項については、文献3)にも示したように、模型規模を、

$$K \leq (a_m b / ab_m)^{1/4} \quad (10)$$

とすることでゼロ以下とすることができる。

なお、式(3)には粒子の回転の影響は入っていない。一方、先に述べた垂直方向の飛び出し速度に対する α_z の影響が小さい理由の一つとして粒子の回転運動の影響が考えられ、回転運動の影響を無視できない可能性がある。回転運動の取り扱いについては今後の課題としている。

2. 2 発泡フェノールの損傷特性

2. 2. 1 試験方法

2. 1 で示した考え方を実践するためには、以下の条件を満たす材料が必要になる。

- ① 式(4)の磨耗・損傷特性を持つ
- ② フルードの相似則のもとでの模型上の土砂移動により、計測可能な損傷を受ける
- ③ 衝突時の粒子運動の相似性を満足するため、原型と同様の反発係数を持つ

本調査で用いた発泡フェノール樹脂は、乾燥状態の比重が0.018程度と小さく、模型製作時の形状維

持が可能であるとともに容易に損傷を受ける材料である。②の条件を満足するとともに、衝突エネルギー領域を限定することで①の条件を満足することができる。③の反発係数に関しては、小さい傾向があり、その影響を検討するため、高速ビデオを用いた粒子運動調査を実施しているが、2. 1に述べたように、大きな問題はなく、適用可能との結果を得ている。これについては、次節で述べる。

発泡フェノール樹脂の損傷特性については、水平に設置した樹脂上にプラスチック球を鉛直落下させた場合について、既に検討を行っているが¹⁾、損傷物が斜めに衝突する場合の特性が明らかでなく、斜め衝突の場合も含めて再度調査するものとした。

その際、図-1に示す試験装置の製作を行った。これは損傷物体を打ち上げ、上方に設置した供試体に衝突させようというもので、鉛直落下させた場合に複数回の衝突が生じることが避け得ないこと（ただし、2回目以降の衝撃エネルギーは小さい）、衝突後に損傷物体が供試体表面に残るため、回収の作業が非常に手間であることに対する改善策として考えたものである。

損傷物体の打ち上げには、電磁式ソレノイドを用いた打ち上げ装置を用いており、落下後に自動回収し繰り返し使用が可能である。打ち上げ精度は上下方向の誤差(0.5mm)の粒子を用いて0.50mに打ち上げた際の平均打ち上げ高さ(0.50m)に対する標準偏差の割合が1.7%程度、横方向へのばらつき(損傷試験での計測結果の損傷範囲から目標衝突範囲を引いて得られる、目標衝突範囲から外れた範囲の衝突位置までの高さに対する割合)が1.7%程度である。

試験ケースを表-1に示す。なお、供試体の発泡フェノール樹脂は、水を十分吸収した飽和状態としている。また、打ち上げは、20mm×20mmの範囲に千鳥に配置した41点の目標点めがけて、250回ごとに目標点をずらして2サイクル(合計20,500回)実施した。損傷量の計測は、一定の打ち上げ回数ごとにレーザー変位計(1/10mm精度)を用いて行っている。用いた損傷物体は粒径1.2mmの実験砂である。

2. 2. 2 試験結果

図-2に各ケースの衝突(打ち上げ)回数と損傷量の関係を示す。図より、ケース2を除き、衝突回数に比例して損傷量が増加していることが分かる。ケース2では40,000回までの損傷が大きく、それ以上で急激に小さくなっているが、その原因は不明である。或いは試験機の不具合があったかもしれ

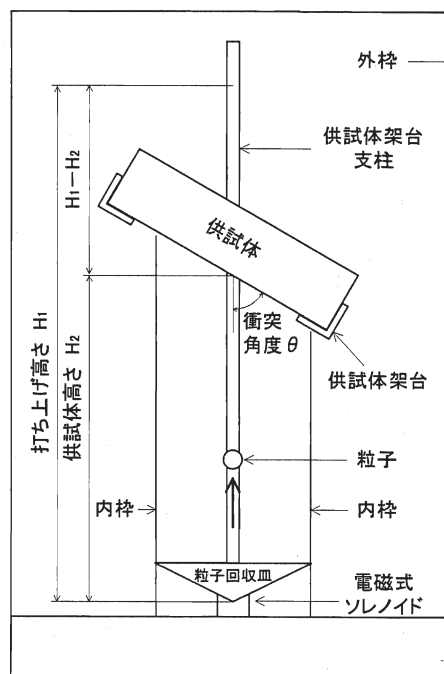


図-1 粒子打ち上げ装置概要図

表-1 損傷材料の損傷特性試験の試験条件と試験結果

| Case | 打ち上げ高さ | 損傷面高さ | 高さの差 | 衝突角度 | 粒子直径 | 粒子質量 | 衝突前運動エネルギー | |
|-------|--------|-------|-------|----------------|------|---------|------------|----------|
| | H1 | H2 | H1-H2 | θ (deg) | | | | E(J) |
| Case1 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 90 | 1.2 | 2.4E-06 | 4.70E-06 | |
| Case2 | | | | 60 | | | | |
| Case3 | | | | 30 | | | | |
| Case4 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 90 | | | | 9.40E-06 |
| Case5 | | | | 60 | | | | |
| Case6 | | | | 30 | | | | |

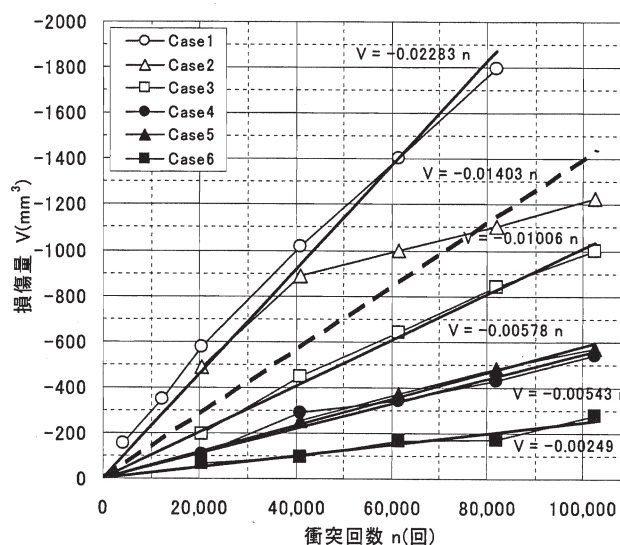


図-2 発泡フェノール樹脂の衝突回数と損傷量の関係

ない。

ケース2を除き、直線近似が可能なることから、ここでは、原点を通る直線にて図-2の結果を近似し衝突1回当たりの損傷量 ΔV を求めることとした。これと次式で求められる衝突による損傷物体のエネルギー損失 ΔE との関係を図-3に示す。

$$\Delta E = f(\theta)E \quad (11)$$

$$= (1 - \alpha_z^2 \sin^2 \theta - \alpha_x^2 \cos^2 \theta)(0.5mv_1^2)$$

ここで、 α_z としてフェノール発泡樹脂の反撥係数0.2を用いた。また、 α_x は垂直方向の試験を基準として求めることもできるが、ここでは次に示す高速ビデオの解析から求められた0.74を用いている。図-3に示されるように得られた ΔV と ΔE の関係における線形性は良好であり、 α_x の妥当性が確認される。なお、図-3のケース(2)は括弧書きとしているが、先に述べたように、直線近似の悪いことを考慮したものである。

図-3より、斜め衝突の場合も含め ΔV と ΔE には線形の関係があることが分かり、ケース2を除くデータから次の関係を得た。

$$\Delta V = 6643.5 \Delta E - 0.00773 \quad (12)$$

式(2)の適用範囲は、表-1の実験範囲である $\Delta E \geq 1.37 \times 10^{-6}$ 程度以上であり、これより小さい ΔE での ΔE に対する ΔV の変化は、式(12)で表されるよりかなり小さいものと思われる。そこで、表-1のケースに加え、より小さい ΔE の領域での関係を調査した。図-3に示した高さ50mm、90度のケースがこのケースであり、推定された通り ΔE に対する ΔV の変化は小さくなっている。ケースが少ないが、 $\Delta E < 1.37 \times 10^{-6}$ の場合の関係として次式を得た。

$$\Delta V = 3414.3 \Delta E - 0.001748 \quad (13)$$

なお、上記結果は、文献3)で示した鉛直落下による試験結果に対し、同じ ΔE に対する損傷量が大きくなっている。この原因は明確ではないが、文献3)の試験はプラスチック系の球を用いており、形状の違いが原因の一つと考えられる。

2. 3 壁面材料と粒子の挙動

2. 3. 1 実験概要

発泡フェノール樹脂の砂礫に対する反撥係数は、コンクリートや鉄などの原型の材料と比較して小さい値となっている。このため実験の流下砂礫の挙動が原型とのそれと異なることが予想され、損傷実験

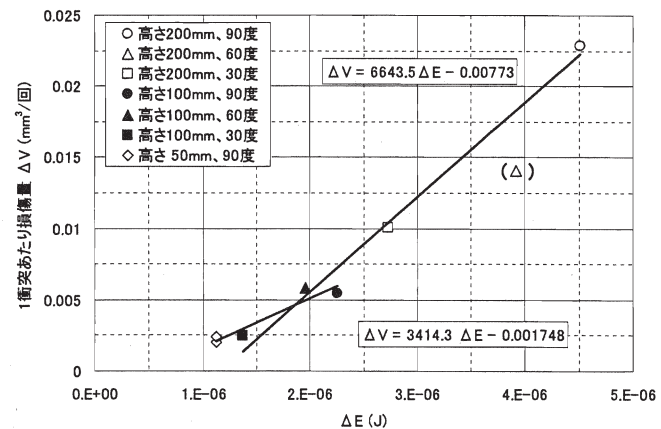


図-3 発泡フェノール樹脂の衝突エネルギー損失と1回の衝突当たりの損傷量の関係

表-2 流下挙動実験ケース

| | 底面材料 | 流量 Q (L/s) | 土砂平均 粒径 d _m (mm) | 給砂量 | |
|---------|---------------|---------------|-----------------------------------|----------------------|---------|
| | | | | (cm ³ /s) | (粒/sec) |
| Case1-1 | 木 | 10.0 | 1.2 | 2.19 | 約2420 |
| Case1-2 | | 20.0 | | | |
| Case2-1 | 発泡フェ ノール樹脂 | 10.0 | 1.2 | 2.19 | 約2420 |
| Case2-2 | | 20.0 | | | |

で求められた ΔE を補正する必要がある。

上記を考慮し、水路底面を木製(砂礫に対する反撥係数が0.47で概ねコンクリートと一致⁴⁾)と発泡フェノール樹脂(同0.2)の両者について、高速ビデオによる流下砂礫の挙動撮影を行い、両者の比較調査を実施した。

実験は、長さ30m、幅0.15mで水路勾配1/50の直線水路を用いて実施しており、実験ケースを表-2に示す。実験で用いた砂はほぼ一様粒径の珪砂であり、掃流状態で床面を跳躍しながら流下する。

実験では、水路上流端付近で給砂した砂の挙動が概ね一定となる上流端から17.5mの位置で、粒子挙動の高速ビデオ撮影を実施した。撮影は、シャッター速度1/2000秒で毎秒1000コマの撮影を連続

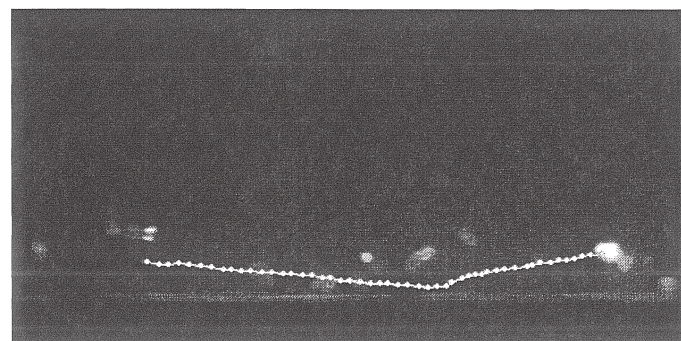


図-4 砂粒子の運動状況例

2秒間行い、これを何回か繰り返して200程度の土砂粒子の挙動を録画し、衝突前及び衝突後の速度を求めた。なお、砂の運動は回転運動を伴うことが認められており、速度は土粒子の重心に近い位置の座標変化として求めている。

撮影範囲は、上下流方向に45mm、高さ方向に22.5mm、水路横断方向に40mmであり、水路中央付近に焦点を合わせた。なお、給砂は砂粒子相互の干渉が生じない程度の量(約2400粒/s)を連続して行っている。撮影された砂粒子の運動状況例を図-4に示す。

2.3.2 実験結果

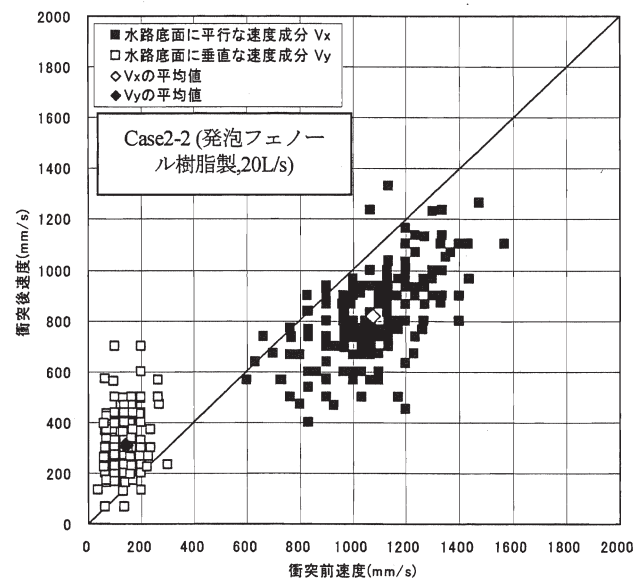
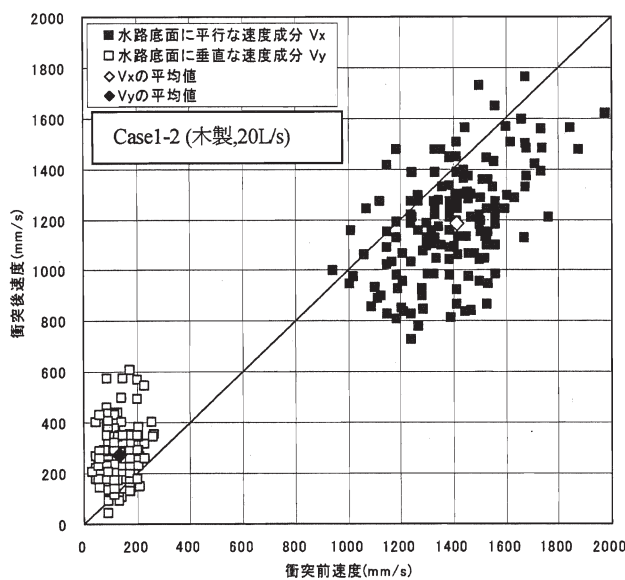
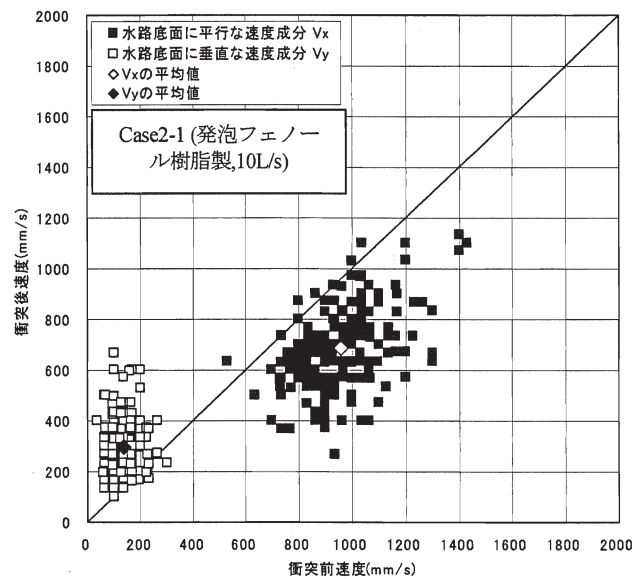
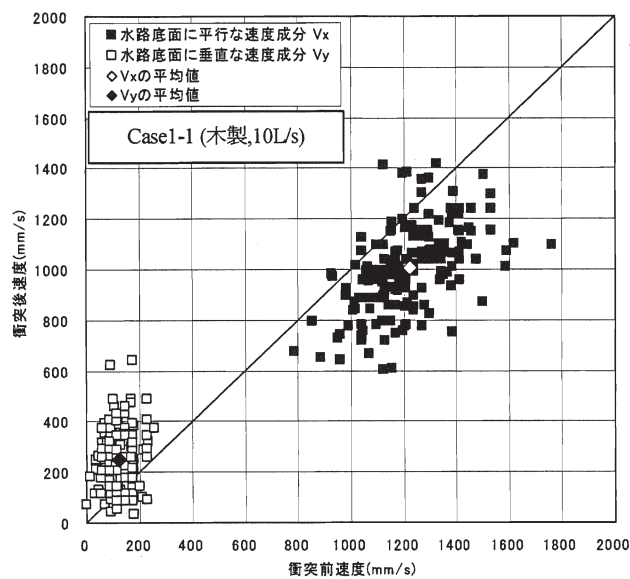


図-5に各ケースの衝突前、衝突後の砂粒子の速度を床面に垂直、平行のそれぞれの成分に分けて示す。図より、床面に平行な成分については速度の減少が生じているが垂直な成分は増加が生じていることが分かる。

垂直成分に増加が生じる原因として、揚力によるもの及び回転運動によるものの両者が考えられる。単純な衝突現象のみを考えると、垂直方向の速度成分は衝突するたびに(1-反撥係数)分減少し、0に漸近していく訳であり、こうした揚力等の効果により飛び出し速度が再生されていることが確認される。因みに、床面に平行な速度成分については、飛び出

図-5 衝突前後の砂粒子の速度(床面に垂直成分と平行成分)

し後に流れにより加速され、速度の再生が行われる。なお、揚力及び回転運動のそれぞれの影響については、今後、例えば球形の粒子を用いて比較する等の検討により確認する必要がある。

ここで、垂直成分の飛び出し速度に比較して衝突速度のばらつきが小さくなっている。この原因は明確でないが、流体抵抗や壁面近傍で生じる負荷質量の影響により、衝突速度の絶対値が小さくなり、従ってばらつきも小さくなっていることが考えられる。

衝突、飛び出し速度のばらつきは比較的大きいが、ここで平均値を示すと表-3の通りである。表には、平均値から求められる式(2)の衝突、飛び出し角度についても併せて示してある。

ここで、平行方向 α_x を求めると、木材で0.82~0.84、発泡フェノール樹脂で0.69~0.76となっている。損傷を受けるコンクリート材料では $\alpha_x=0.7\sim 0.8$ の結果を得ており²⁾、発泡フェノール樹脂の値もほぼ同様の値となっていることが分かる。

床面の材質の違いによる影響は、主として平行成分に生じており、垂直成分の差は小さい。平行成分の違いの原因として、木材と比較して発泡フェノール樹脂の α_x が小さく、衝突時のエネルギー損失が大きいことが挙げられる。一方、垂直成分の差が小さい理由は明確でない。反撥係数は発泡フェノール樹脂が小さく、平行成分と同様に衝突時のエネルギー損失は発泡フェノール樹脂が大きいと考えられることから、垂直成分における揚力や回転運動の影響が

表-3 砂粒子の衝突前後の速度と衝突角度・飛び出し角度の平均値

| Case | 衝突前 | | 衝突後 | | 衝突角度 θ (度) | 飛び出し角度 θ' (度) |
|------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|-------------------------|
| | 平行成分 Vx(mm/s) | 垂直成分 Vy(mm/s) | 平行成分 Vx(mm/s) | 垂直成分 Vy(mm/s) | | |
| | 1-1 | 1,225.40 | 123.3 | 1,006.50 | 248.4 | 5.8 |
| 1-2 | 1,412.90 | 131.8 | 1183.7 | 270.9 | 5.3 | 13.5 |
| 2-1 | 959.8 | 136.8 | 685.2 | 296.8 | 8.1 | 24.6 |
| 2-2 | 1,075.10 | 139.7 | 817.6 | 310.7 | 7.4 | 21.6 |

支配的であることが考えられる。実際、反撥係数から求められる垂直方向速度は、計測されたそれよりかなり小さい値となっている。

以上、床面材料の違いによる衝突時の速度変化を示したが、先に述べたように、発泡フェノール樹脂の α_x はコンクリート損傷時のそれと同程度と考えられ、その妥当性は2.2で示したキャリブレーションにおいても確認されている。また、垂直成分には単なる反撥とは別の要因が作用しているものと考えられ、結果として土砂の運動に対する発泡フェノール樹脂の材料特性の影響は小さいことが示された。

以上、発泡フェノール樹脂の損傷材料としての特徴を示した。発泡フェノール樹脂により水理構造物の局所洗掘の再現性については、土砂パイパス施設流入部や湾曲水路等において土砂の流下状況に応じた洗掘が生じることを確認しているが、ここではその詳細は省略する。

3. コンクリート材料の損傷特性

3.1 試験概要

コンクリートの損傷特性について、文献2)では衝突物の一定点への繰り返し落下により文献1)とほぼ同様の関係を得ている。一方、一定点への落下試験では、損傷が進むことにより損傷面が凹状に変形

表-4 コンクリート損傷試験ケース

| ケース | コンクリート種類 | コンクリート供試体寸法 | 衝突物 | 落下高 (m) | 衝突角度 (度) | 落下面寸法 (mm) | 格子間隔 (mm) | 落下点間隔 (mm) |
|-------|------------------------|--------------------------------------|---|---------|----------|------------|-----------|------------|
| A-1-1 | 普通コンクリート1 | 直方体 長さ 1.3m 幅 1.3m 厚さ 0.45m | ステンレス球 (SUS304) $\phi=63.5\text{mm}$ 質量 1.06Kg | 1 | 90 | 1定点 | - | - |
| A-1-2 | | | | | | 128×128 | 8 | 2.5 |
| A-1-3 | | | | | | 400×400 | 10 | |
| A-1-4 | | | | | | 720×720 | 10 | |
| A-1-5 | | | | | | 1120×1120 | 10 | |
| A-2-1 | 普通コンクリート2 | 直方体 長さ 0.9m 幅 0.9m 厚さ 0.5m | | | | 1定点 | - | - |
| A-2-2 | | | | | | 360×360 | 10 | 5 |
| A-2-3 | | | | | | 720×720 | 10 | 5 |
| A-3-1 | 高強度コンクリート (シリカフェーム) | | | | | 1定点 | - | - |
| A-3-2 | | | | | | 128×128 | 8 | 2.5 |
| A-3-3 | | | | | | 400×400 | 10 | 5 |
| B-1-1 | 普通コンクリート1 | | | 0.5 | | 400×400 | 10 | 5 |
| B-1-2 | | | | 2 | | 400×400 | 10 | 5 |
| B-2-1 | 普通コンクリート2 | | | 0.5 | | 360×360 | 10 | 5 |
| B-2-2 | | | | 2 | | 360×360 | 10 | 5 |

表-5 使用コンクリートの配合と強度

| コンクリート種類 | 粗骨材最大寸法 (mm) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | スランプ (cm) | 圧縮強度(91日) (N/mm ²) |
|-----------|--------------|------------|----------|-------------------------|--------------------------------|
| 普通コンクリート1 | 20 | 66.5 | 45.7 | 7.5 | 34.5 |
| 普通コンクリート2 | 40 | 59.5 | 39.4 | 8.0 | 33.3 |
| 高強度コンクリート | 20 | 30 | 45.7 | 63 [*] スランプフロー | 108.0 |

注) 普通コンクリート1と2では異なる骨材材質を用いている。

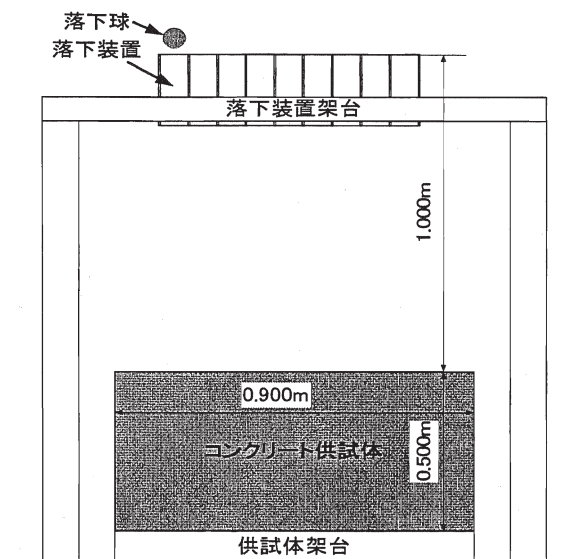


図-6 面的損傷装置概略図

し、衝突物との衝突面積が変化することが懸念された。すなわち、実際の水路の損傷は面的に生じ、凹凸はあるものの衝突に対し平均的には平面的な形状を保つことが想定される。

そこで試験では、文献2)と同様の落下試験を、落下定点数(つまり損傷領域)を変化させながら実施し、その影響調査も含め実施した。表-4に試験条件の一覧を示す。表中、ケースAは落下高を一定として落下範囲を変化させた一連の実験であり、ケースBは衝突時の損失エネルギーとの関係を調査するため落下高を変化させて実施した追加実験である。用いたコンクリートは最大粗骨材寸法及び骨材材質の異なる2種の普通コンクリート及びシリカフェームを添加した高強度コンクリートであり、各コンクリートの配合及び強度を表-5に示す。なお、試験は材齢91程度を目安に実施している。

図-6に試験装置の概要を示す。供試体上方には落下位置を設定するための導管を格子状に配置しており、表-4の格子間隔はこの導管の間隔を示している。落下は、導管を8×8の区画に分割し、区画内の1導管から1回、予め設定した区画順にステンレス球を落下させ、これを繰り返した。区画内の導

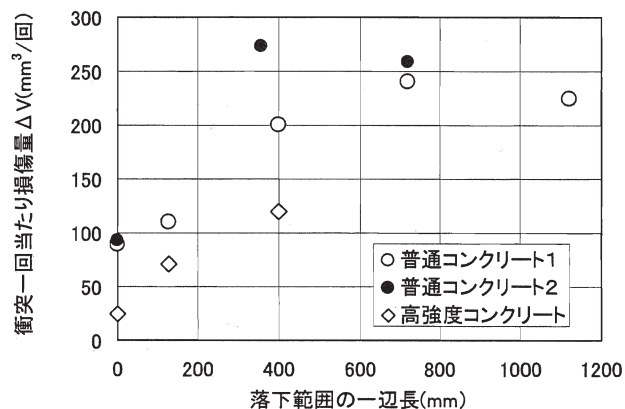


図-7 損傷量に及ぼす落下範囲の影響

管からの落下は、重複が無いように順番を決め、全導管からの1回の落下が終了後に導管格子全体を移動させ最終的に落下点間隔が所定値(2.5~5mm)になるよう繰り返し落下させている。

損傷量の計測は、レーザー変位計(0.1mm精度)を用い、10×10程度の格子状に設けた側線に沿って1mm間隔で計測した。計測は損傷状況に応じて行っており、各ケース5~10回程度計測した。

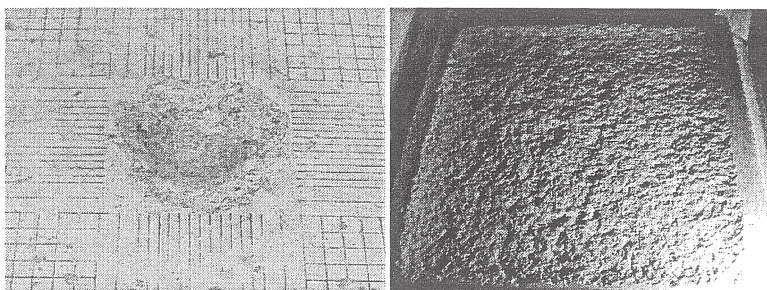
損傷試験は、水と共に流下する砂礫の衝突を考慮すると水中で行うべきであるが、衝突エネルギーの評価が難しいことと実験の簡便性を考慮して、コンクリート面に断続的に霧を拭き、表面湿潤状態を保ちつつ試験を実施するとともに、コンクリートの損傷片は送風により適宜排除して試験した。

なお、90度の落下試験では落下球がバウンドしたのち落下し、複数回の衝突を生じるが、2回目以降の落下高は非常に小さく影響が小さいと考えられることから無視するものとしている。

3. 1. 2 試験結果

面的試験は正方形の落下範囲に対して実施しており、正方形一辺の長さとの衝突1回当たりの損傷量 ΔV (mm³/回)の関係を図-7に示す。ここで、 ΔV は繰り返し落下により得られる損傷体積と落下回数との関係が線形になることを確認の上、求めている。図より、落下範囲が大きくなると ΔV も大きくなっていく様子が分かる。

図-8は落下範囲が異なることによる損傷状況の違いを示したものである。一定点の落下では損傷面が全体として碗型の凹形状になっているのに対し、落下範囲を広くすると、端部を除き、平坦性が維持されていることが分かる。凹形状になると、損傷物との設置面積が広くなり、衝突面積は広がるが衝撃力そのものは低下することが予想され、そのため ΔV が小さくなったものと推察される。



1 定点 720×720mm

図-8 落下範囲と損傷状況（普通コンクリート1）

今回の試験結果からは落下範囲が $400 \times 400\text{mm}$ 以上では ΔV の変化が小さいようであり、 $400 \times 400\text{mm}$ 程度の落下範囲の試験データより ΔV と式(11)の損失エネルギー ΔE の関係を求めた。ただし、 ΔE の算定では、コンクリート損傷時の反撥係数として文献2)で示されている0.33を用いている。

結果を図-9に示す。図より、 ΔV と損失エネルギー ΔE には線形関係があることが確認される。普通コンクリート1、2では最大粗骨材寸法の大きい普通コンクリート2の損傷量が大きくなっているが、これは参考文献2)とは異なる傾向であり、骨材の材質の影響もあるかもしれない。いずれにしても同じ普通コンクリートでも、使用する骨材により損傷特性が影響を受ける結果となっている。今回のコンクリートにおいて、式(1)の a 、 b は次の通りとなる。

普通コンクリート1

$$a = 34.5\text{mm}^3/\text{J}, b = -40.2\text{mm}^3$$

普通コンクリート2

$$a = 39.2\text{mm}^3/\text{J}, b = -134.8\text{mm}^3$$

高強度コンクリートについては、実験ケースが少ないが、普通コンクリートと比較して50%程度かそれ以下の損傷量となっている。シリカフリュームを用いた高強度コンクリートは耐久性に優れていることが知られているが、耐摩耗性にも優れることが確認される。

4. 損傷試験装置

3. に示されるように、同じ普通コンクリートでも骨材等により磨耗・損傷特性が異なることが想定される。このため、磨耗・損傷量と衝突損失エネルギーの関係を求めるため、現地材料のコンクリートを用いた試験を実施するのが望ましいが、人力による広い領域への落下試験はそれなりに労力を要するものである。

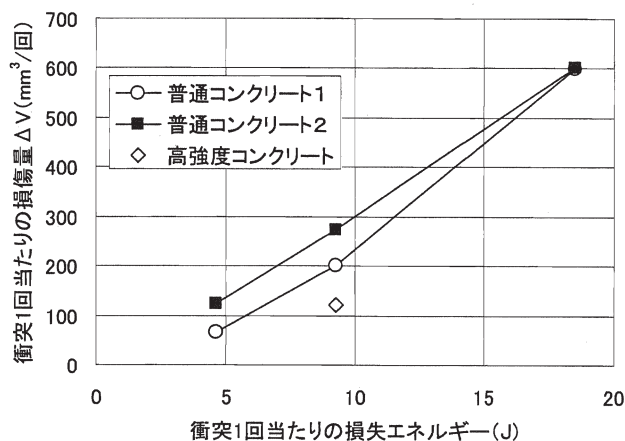


図-9 損傷量と衝突時損失エネルギーの関係

また、3. の試験は衝突角度90度の試験であったが、実際の砂礫の衝突では壁面に斜め方向から衝突し、水路に平行な方向の速度低減率 α_x が問題となる。

斜め方向の衝突を再現するため、文献2)ではコンクリート面を傾斜させて球を鉛直落下させる方法が採られているが、この場合、重力の作用方向が実際とは異なり、損傷メカニズムが異なる可能性がある。

以上のことを鑑み、斜め方向からの衝突を含め、簡易に試験実施可能な装置の考案、試作を行った。製作した試験装置を図-10に示す。装置はコンクリート供試体を $\phi = 1.0\text{m}$ の円柱とし、側面に損傷物を落下させるものである。供試体の中心軸は水平に設置しており、供試体を回転させることにより落下する損傷物とコンクリート面に水平方向の相対速度を生じさせ、斜め方向の衝突を再現することができる。

図-10には損傷物の自動回収装置が設置されていないが、ステンレス球等の球体を用いる試験であれば、衝突後の損傷物を自動回収・落下させることが可能であり、大幅な省力化を図ることができる。今回の調査では製作できなかったが、設計は行って

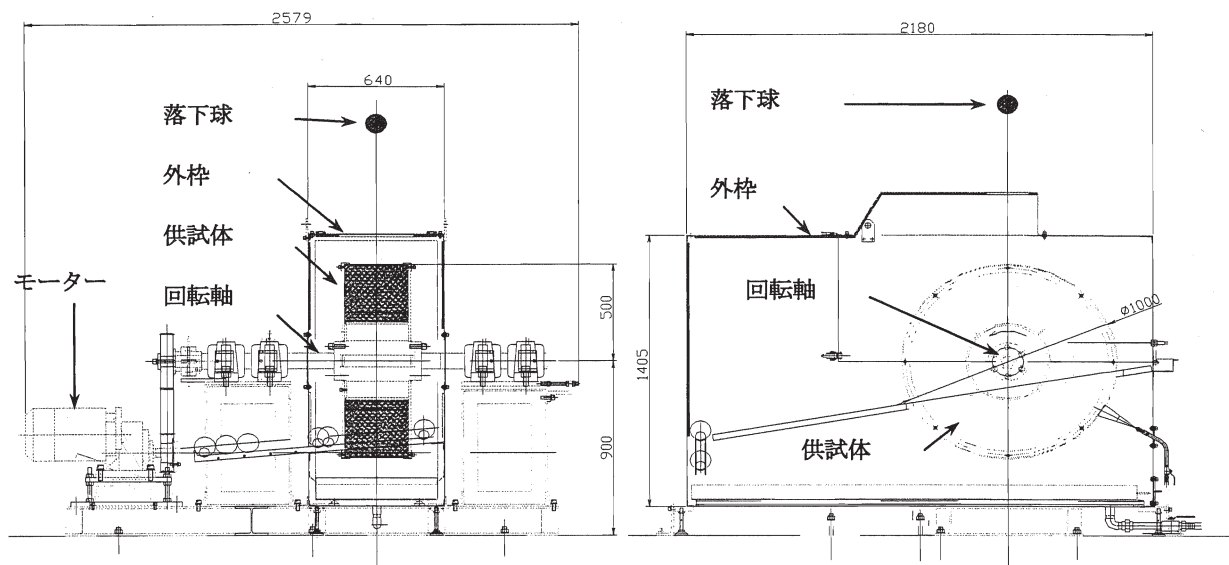


図-10 コンクリート損傷試験装置概要

いるので今後機会を見つけて製作したいと考えている。

本装置での磨耗・損傷状況を確認するため、普通コンクリート1の落差1mの条件で損傷試験を実施した。衝突角度は90度及び45度とし、90度のケースでは極めて低速で供試体を回転させた。45度の回転数は84.56/1minである。

なお、供試体の円柱厚さ(落下幅)は300mmであり、落下は両側に余裕を持たせた175mmの範囲で実施した。落下位置の幅方向の間隔は5mmとし同じ位置から50球落下させたのち位置を変化させた。

試験の結果衝突角度90度では3.1.2に示した落下範囲の広い場合に対し1.4~1.7倍の ΔV となり、水平面に落下させた場合に対し大きな損傷結果となった。本供試体の落下幅は先に示した必要落下範囲より狭いが、円周上に落下させていることから衝突位置でのエネルギーの集中が生じ、結果として大きな損傷量になったことが考えられる。本装置での結果をそのまま用いると課題な損傷評価となることが考えられ、得られた結果を補正する必要がある。補正方法については、今後更にデータを蓄積する必要があるが、今回の結果からは1/1.5程度の低減率を掛けることが考えられる。

一方、45度の ΔV は90度のその67%となった。これは、文献2)で得られている $\alpha_x=0.7\sim 0.8$ 、 $\alpha_z=0.33$ から求められる0.63~0.70%とほぼ一致しており、回転を与えることで斜め方向の衝突を表現

できることが確かめられる。

5. 土砂輸送施設のライニング対策

5.1 概要

以上、土砂を流下させた場合の水利構造物の壁面損傷量予測方法に関する成果を示した。ここでは、損傷量予測ができたものとして、これを用いたライニング計画について考察を行なう。

貯水池流入土砂を下流に補給するための土砂輸送施設は、土砂を導水する機能を有するのみでなく、流量制御を行う機能を一般に有している。また、導流部についても、例えば排砂を行う治水専用ダムのようにダム堤体内の放流設備を用いる場合と土砂バイパス施設のように地山に設けられる水路施設では水利環境や施設の重要度が異なることになる。

このことを踏まえ、ここでは、水利施設の持つ水利機能別に、その設置形式を仕分けしながらライニング計画の考え方を整理する。

5.2 流入部

流入部は流量調整機能を有する部分であり、バイパス水路の入口部や治水専用ダム洪水吐き入口部などが当たる。流入部で形状の変化が生じると、施設の流量制御機能に影響を及ぼすので、この部分は基本的に形状変化を許容しないライニングを計画する必要がある。

掃流成分の流下が多いと想定されるような場合には、本調査で主として検討してきたコンクリート面では機能を維持できないことが考えられ、鋼材、そ

れも耐摩耗性が高いステンレス材等によるライニングをまず検討する必要がある。

鋼材の磨耗・損傷量について、本調査では直接の検討を行っていないが、宇奈月ダム排砂設備のライニング検討において試験が行われている。

宇奈月ダム排砂設備ライニングの検討では、粒径40～80mmの河床砂礫を連続的に落下させる衝撃試験と材料を擦り合わせる磨耗試験が実施されており、衝撃試験では、高強度コンクリートの損傷量を1とすると、石材では1/20程度、ポリウレタンで1/80程度、鋼材で1/300～1/400程度の結果を得ている⁵⁾。従って、鋼材を用いることで磨耗損傷による施設の変形を大幅に低減することが可能である。

なお、排砂を行う治水専用ダムの洪水吐きでは、洪水調節時には高速流を流下させることになるが、25m以上の作用水頭が生じるダムの放流設備では、キャビテーション対策の一環として鋼製ライニングを施すこととされている。こうした施設では、耐キャビテーション性に優れたステンレスライニングが施されるのが一般的である。

鋼材によるライニングを行う場合、その維持補修はかなりの費用と労力、並びに期間を要するものである。従って、ライニング厚さについてはダム共用年数を勘案して100年といった十分長い期間で設定するのが望ましい。ライニング材の取替えを予め想定している宇奈月ダム排砂設備では、パネル形式のやや複雑な形式のライニングが施されているが、対象土砂量が非常に大きい場合の措置と位置づけられ、特別なケースと考えるのが適当である。

5.3 導流部

導流部について、重力式コンクリート形式の治水専用ダムでは堤体内の放流設備を通じて土砂が排出される。導流部は堤体内に内蔵された水路となるので、水路の損傷はそのまま堤体の損傷に繋がる。また、流入部と同様に、水路壁面は、洪水調節時には高水頭が作用し高速流に晒されるので、土砂による磨耗・損傷はキャビテーション損傷を誘発することになる。したがって、この場合も磨耗・損傷量をできるだけ抑えるとともに、耐キャビテーション性を有する鋼材、具体的にはステンレス材等を用いるのが適当と考える。

一方、土砂バイパストンネルのような比較的延長の長い水路について、全長に亘り鋼製ライニングを施すのは経済性に問題がある。バイパストンネルの水路では、ダム放流設備のような高速流に晒される

ことはないのでキャビテーションによる損傷も土砂のそれに比べて小さいものと考えられる。本重点プロジェクト研究の他の課題での検討によれば、主流流速19.2m/s、主流の作用圧力水頭0.5～5m程度の条件下で骨材が露出した波型形状のコンクリートの損耗量は1日0.2～0.3m程度であった⁶⁾。

こうした水路では、補修を前提にコンクリートライニングを計画するのが（勿論、詳細な経済性評価が必要であるが）一般に有利である。補修を前提としたライニング計画では、コンクリート厚の設定が問題となり、次のように整理される。

補修を考える上で、特に留意すべき点は次の2点である。

- ①コンクリートは、ある程度の損傷を受けないと補修が困難である。
- ②通過土砂量は、年変動が大きい。

ここで、点検補修の時間間隔を T とし、水路のインバートのコンクリート厚さを t_0 とする。また、コンクリートの補修可能な損耗厚さを t_1 とすると、補修は、点検時に t_1 以上の損耗が認められた場合に行うことになる。これは、 t_1 より小さい損耗箇所については、当該点検時には補修を見送られ、次の T 時間はそのまま損耗が進むことを意味する。従って、インバート厚さは、少なくとも t_1 に T 時間内に生じる可能性のある損耗量を加えた厚さ t_2 を有する必要がある。

t_2 は、②の通過土砂量の変動を考慮する必要がある。例えば、年間堆砂量は、水文統計で用いられている確率分布である程度表現することができるので⁷⁾、これをもとに、超過確率をもととした議論を行うことができる。

コンクリートの種類にもよるが、 t_1 は100mm以上とする必要がある。また、洪水期が年周期で訪れるわが国では、損耗が非常に少ないと予想される場合を除き T は1年間として設定するのが適当であろう。超過確率に関する基準は特にないが、トンネル断面計画が洪水調節計画とリンクして検討されることから考えて、計画洪水と同様の確率年を想定するのが適当と思われる。なお、湾曲等があり、局所的な洗掘が予想される場合には、局所的な最大値を考慮する必要があるのは言うまでもない。こうした局所洗掘の予測については、本調査成果を活用することができる。

推定精度の問題もあるので、設計のインバート厚さについては、 $t_1 + t_2$ に余裕厚を設けるのが望まし

い。余裕厚は、通常の導水路のインバートが 30cm 程度のコンクリート厚であることを考慮すると、10～数十 cm 程度でよいものと思われるが、推定される $t_1 + t_2$ を参考に決定する必要がある。

以上の記述は、インバート部がライニング材であることを念頭に行っている。即ち、堅岩がある場合には底部インバートは構造部材ではない。従って、軟岩上に設けられるトンネルのように、インバート部が構造部材である場合には、上記の厚さに加え、構造部材としてのコンクリート厚が必要になる。なお、何れにしても、側壁は構造部材であり、隅部の側壁との接合部に付いては、特別なライニングを行う、或いは、勾配を持たせて損耗量を低減するとともに厚さに余裕を持たせるなどの配慮が必要なものと思われる。

本調査で示されたように、コンクリートの磨耗・損傷量はコンクリートの品質でかなり異なる。従って、用いるコンクリートの品質については、初期及び維持補修費用を含めた経済性評価に基づき判断する必要がある。

なお、損傷量が大きいコンクリートを用いることは、損傷による水路抵抗の増大が大きくなるとともに、土砂輸送能力も低減するので注意が必要である。土砂輸送力の低減については必ずしも十分解明されていないが、本重点プロジェクト研究成果である文献 8) を参考にすることができる。また、損傷状況と水路抵抗の関係については余り知見が無いのが現状である。老朽化したコンクリート水路のマニングの粗度係数として 0.023 の値が用いられる場合が多いが、今後の研究課題である。

5. 4 減勢工

土砂を放流する施設の河道部への取り付け部は空中放流を行い水溜池を設けるのが有利である。磨耗・損傷対策を軽減することができる。また、掃流砂が多い場合には、排出土砂の河道内堆積による背水の影響を軽減することが可能である。

土砂バイパス水路のように流速が大きくない場合には、空中放流による減勢処理が可能な場合が多いと考えられるが、治水専用ダムのように放流設備を通じて土砂が排出される場合には、専用の減勢施設が必要になる場合が多いと考えられる。この場合は減勢機能維持のため施設のライニングが問題となる。

今、跳水式の水平水叩き式減勢工を考えてみる。放流水は水叩き始端で最も流速が速く、流下に伴い漸次減勢していく。流速の速い水叩き始端では、イ

ンバートによる流向変化も生じるので、損傷を受け易い部分といえることができる。インバート部は重力式コンクリートダムであればダムの堤趾部に相当する部分でもあり、導流部と同様に損傷量の少ない鋼製ライニングとするのが望ましい。

一方、水叩き全般に亘って鋼材によりライニングするのは経済性に問題がある。従って、水叩きの一般部についてはコンクリートとし、補修を前提に計画するのが適当であろう。基本的な考え方は導流部のコンクリート水路の場合と同様であるが、水叩き部のコンクリートは、通常の水路と比較して大流量を扱うこと、乱れを伴う高速流に晒されることからコンクリート厚が厚く設定されている。したがって、通常設けられるコンクリート厚の上に磨耗・損傷代として維持管理厚を設定する必要がある。

水叩きには、跳水に必要な下流水深を確保するための副ダムが設置される場合が多いが、副ダムは、磨耗・損傷を受けると越流特性が変化し、下流水深が変化する。従って、越流面については、流入部と同様に磨耗・損傷による変形が小さいよう鋼材によるライニングを施す必要があると考える。

6. まとめ

本調査では、土砂輸送水路の磨耗・損傷予測方法の検討、コンクリートを主とする材料の磨耗・損傷特性の把握及び土砂輸送施設のライニング計画に対する検討を行った。主な成果は以下の通りである。

まず、局所洗掘を含む施設の磨耗・損傷量を予測する方法として、水理模型実験の模型材料に損傷材料を用いる方法を提案し、

- 1) 損傷材料として発泡フェノール樹脂を用いることにより、模型上で計測可能な損傷を得ることができるとともに、掃流砂の粒子運動についても、模型実験で用いられるフルード則で扱って問題ないことが示された。
 - 2) 発泡フェノール樹脂の 1 回当たり損傷量と衝突時損失エネルギーの関係は、概ね線形関係が得られている。損失エネルギーが小さい領域で損傷量変化が小さくなる傾向がみられているが、模型実験での損失エネルギーの領域の設定により線形関係の確保が可能である。
- ことを示した。また、コンクリートの損傷試験を実施し、
- 3) コンクリートの 1 回当たり損傷量は衝突物の落下範囲の影響を受け、落下範囲が広がるに従っ

て大きくなるが、400×400mm 以上の範囲については影響が小さくなる。

- 4) 1 回当たり損傷量と衝突時損失エネルギーの関係は線形の関係となるが、勾配、切片についてはコンクリートの品質による異なり、同じ普通コンクリートでも骨材が異なると損傷特性も異なる。また、シリカフェームを含有する高強度コンクリートでは普通コンクリートの 50%程度かそれ以下の損傷量となる。

ことを示すとともに、落下損傷試験を斜め衝突の場合も含めて容易に実施するための装置を考案、試作し適当な補正を行うことで、適用可能なことを示した。

以上の結果を踏まえ、具体的施設のライニング方法について考察を行い、

- 5) 土砂輸送施設のライニング計画は、施設各部の水理機能と水理環境等を考慮して実施する必要がある。

ことを示し、流入部、導流部、減勢工の各部のライニング計画について鋼材とコンクリートの使い分けおよび必要厚さの設定方法について基本的な考え方を整理した。

参考文献

- 1) 石橋毅：ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究、土木学会論文報告集、第 344、1983
- 2) 柏井条介、塚原千明、高橋潤：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
- 3) 柏井条介、井上清敬：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
- 4) 井上清敬、柏井条介：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—、土木技術資料、No45-6、pp.28 - 33、2003
- 5) 高須修二、豊田高司：排砂水路の磨耗対策、大ダム No.138、pp.61～66、1991
- 6) 柏井条介、井上清敬：土砂輸送トンネルの設計手法に関する調査、平成 13 年度土木研究所成果報告書、2001
- 7) 柏井条介：水文統計ユーティリティを用いた年堆砂量変動の確率評価、ダム技術、No.206、pp.32～42、2003