# 土砂バイパストンネルにおける摩耗損傷対策技術に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 3～令 3
担当チーム：水理チーム
研究担当者：石神孝之、猪股広典、宮川仁、
中西哲、新保友啓

【要旨】
ダムの長寿命化やダム下流の河川環境保全の観点から土砂バイパストンネル（SBT）等が運用されてきているが SBT における課題として、砂礫を流下させる施設に対してはトンネル水路に土砂を流下させることに伴い生じる摩耗・損傷があり、ライニング材の工夫や損傷量の予測手法に関する研究を行っていく必要がある。本研究では、SBT 等における摩耗・損傷のメカニズムを踏まえた摩耗・損傷量の予測手法と対策手法を提案していく上で既往の予測手法のレビューを行うとともに、ライニング材であるコンクリートにおける摩耗・損傷の評価試験の課題を抽出し、今後の研究の方向性の検討を行った。なお、本研究は、令和４年度からの第５期中長期計画の研究開発プログラム「気候変動下における継続的な流域及び河道の監視・管理技術の開発」に関する研究に引き継いだ。
キーワード：土砂バイパストンネル、摩耗・損傷予測、コンクリート、摩耗・損傷試験法

## 1. はじめに

ダムの長寿命化やダム下流の河川環境保全の観点から土砂バイパストンネル（以下、SBT）等が運用されてきているが SBT における課題として、砂礫を流下させる施設に対してはトンネル水路に土砂を流下させることに伴い生じる摩耗・損傷があり、ライニング材の工夫や損傷量の予測手法に関する研究を行っていく必要がある。本研究では、SBT 等における摩耗・損傷のメカニズムを踏まえた摩耗・損傷量の予測手法と対策手法を提案していく上で既往の予測手法のレビューを行うとともに、ライニング材であるコンクリートにおける摩耗・損傷の評価試験の課題を抽出し、今後の研究の方向性の検討を行った。

## 2. 土砂バイパストンネルの現状と課題

SBT とは、貯水池の上流に分流施設を設置し、洪水時の土砂を含む流れの一部をトンネル水路によってダムの下流にバイパスする技術であり、排砂バイパスとも称され、堆砂対策技術として有力な技術の１つである [1]。堆砂軽減対策は、掘削・浚渫、土砂フラッシングをはじめとした「流入土砂の排出」と「貯水池流入土砂量の軽減」に分けられ、SBT は後者に分類されており、基本的には洪水流入する土砂をそのまま下流に流すものである [2]。日本では、神戸市水道局の布引五本松ダムにおいて、ダム完成年である 1900 年の 8 年後に SBT が造られたのが初めての SBT 施設である。これにより布引五本松ダムは、約 25 年で貯水池が満砂になるところを容量的には千年以上の機能維持が実現されたと推定されることから SBT による長寿命化における効果が示された [3]。この技術は、日本とスイスが世界をリードしている [3]。日本では約 100 年前に建設された歴史的な立ヶ畑ダム(烏原ダム)［SBT 完成年：1905 年、ダム管理者：神戸市(以下のダムについても同様の標記。)］と布引ダム［1908 年、神戸市］の SBT の他、旭ダム［1998 年、関西電力］、美和ダム［2005 年、国土交通省］、松川ダム［2016 年、長野県］、小渋ダム［2016 年、国土交通省］の合計 6 つの事例がある。表-1 に計画中も含め SBT の事例をまとめて示す。

今後も矢作ダム等での導入が予定されている。また海外においては主にスイスにおいて SBT が造られてきている状況である [4]。

利水専用ダムでは、洪水時の流入水を全量バイパスする運用も可能であり、堆砂対策としての効果が大きい。一方、多目的ダムでは、貯水池の運用面から洪水時に貯留する必要がある場合もあり、貯水池の運用とバイパス施設の運用のバランスを考慮する必要がある。日本では SBT の呑口が貯水池上流端付近に設置されることが多いが、スイスでは貯水池内に呑口を設置し、貯水位低下操作と組み合わせた運用がされているバイパス施設もある。

表-1　ダム等及び土砂バイパストンネルの諸元 [4)]

| ダム名 | 国名 | 管理者 | ダム及び貯水池 | | | | | | 土砂バイパストンネル | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 完成年 | 目的 | 流域面積 (km$^2$) | 貯水容量 (m$^3$) | 型式 | ダム高 (m) | 完成年 | 延長 (m) | 勾配 (%) | 幅 (m) | 高さ (m) | 断面形状 | 最大流量 (m$^3$/s) |
| 布引ダム | 日本 | 神戸市 | 1900 | 水道用水 | 9.8 | 759,521 | 重力式コンクリート | 33.3 | 1908 | 264 | 1.33% | 3.00 | 3.00 | 幌型 | 39 |
| 旭ダム | 日本 | 関西電力 | 1978 | 揚水発電（下池） | 39.2 | 15,470,000 | アーチ | 86.1 | 1998 | 2,350 | 2.94% | 3.80 | 3.80 | 幌型 | 140 |
| 美和ダム | 日本 | 国土交通省中部地方整備局 | 1959 | 発電、灌漑、洪水調節 | 311.1 | 29,952,000 | 重力式コンクリート | 69.1 | 2005 | 4,308 | 1.00% | 7.80 | 7.00 | 馬蹄形 | 300 |
| 松川ダム | 日本 | 長野県 | 1975 | 洪水調節、生活用水、灌漑 | 60.0 | 7,400,000 | 重力式コンクリート | 84.3 | 2015 | 1,417 | 4.00% | 5.20 | 5.20 | 幌型 | 200 |
| 小渋ダム | 日本 | 国土交通省中部地方整備局 | 1969 | 発電、灌漑、洪水調節 | 288.0 | 58,000,000 | アーチ | 105.0 | 建設中（2016） | 3,982 | 2.00% | 7.90 | 7.20 | 馬蹄形 | 370 |
| Pfaffensprung ダム | スイス | 国有鉄道会社 SBB | 1922 | 調整池（発電） | 30.6 | 200,000 | 石積アーチ | 32.0 | 1922 | 280 | 3.00% | 4.70 | 4.85 | 馬蹄形 | 220 |
| Palragnedra ダム | スイス | 電力会社 Ofima | 1953 | 発電 | 138.0 | 4,860,000 | 重力式コンクリート | 72.0 | 1977 | 1,760 | 2.00% | 6.20 | 6.13 | 馬蹄形 | 250 |
| Runcahez ダム | スイス | 電力会社 TFB | 1961 | 発電 | ― | 480,000 | 重力式コンクリート | 33.0 | 1962 | 572 | 1.40% | 3.80 | 4.50 | 幌型 | 110 |
| Solisダム | スイス | 電力会社 ewz | 1986 | 発電 | 900.0 | 4,100,000 | アーチ | 61.0 | 2012 | 968 | 1.80% | 4.40 | 4.68 | 幌型 | 170 |
| 石門ダム（Shihmen） | 台湾 | 政府 | 1963 | 灌漑、生活用水、発電、洪水調節、レクリエーション | 762.4 | 310,000,000 | ロックフィル | 133.1 | 2012年に発電用放流管を濁水排出用に改良 バイパストンネルについて検討中 | | | | | | |
| 南化ダム（Nanhua） | 台湾 | Taiwan Water Co. | 1993 | 生活用水 | 108.3 | 158,000,000 | アースフィル | 87.5 | 計画中（2018） | 1,287 | 1.85% | 9.50 | 9.50 | 馬蹄形 | 1,000 |
| Rizzaneseダム | フランス | 電力会社 EDF-CIH | 2012 | 発電 | ― | 1,000,000 | RCC | 40.0 | 計画中 | 133 | 6.90% | 4.20 | 4.20 | 円形 | 280 |
| Chespiダム（Chespi-Palma Realプロジェクト） | エクアドル | - | ― | 発電 | 4500.0 | 4,400,000 | ダブルカーブアーチ | 63.0 | 計画中 | 2,240 | 1.71% | 6.60 | 6.60 | ― | 400 |
| Patrind 水力発電事業 | パキスタン | ― | 2016 予定 | 発電 | ― | 6,000,000 | 重力式コンクリート | 44.0 | 計画中 | 約150 | ― | 9.00 | 9.00 | 円形 | 650 |

表-2　バイパストンネルを通過する土砂の性状 [5)]

| Country | Reservoir | Geology | Quartz content | $D_m$ [cm] | $D_{90}$ [cm] |
|---|---|---|---|---|---|
| CH | Pfaffensprung | Granite | High | 25 | 270 |
| CH | Egschi | Grisons schist | Low | 6 | 15 |
| CH | Runcahez | Gneiss | High | 23 | 50 |
| CH | Ual da Mulin | Verrucano | High | - | - |
| CH | Palagnedra | Gneiss | High | 7.4 | 16 |
| CH | Rempen | Flysh/Nagelfluh* | Low | 6 | 20 |
| CH | Solis | Grisons schist | Low | 6 | 15 |
| J | Asahi | Sandstone/shale | Low | 5 | 10/20** |

* Conglomerate rock in the European Alps also designated as gompholite. ** $D_{80}/D_{95}$

表-2 には、表-1 に挙げた SBT のいくつかのダムについて、バイパスの対象となる土砂の粒径に関する情報が示されており、ここに挙げた SBT の多くで摩耗・損傷が発生していることが報告されている。その修繕費用として、例えば旭ダム（関西電力）では年間 1800 万円程度を要している [5)]。

旭ダムの SBT[6),7)]は、高さ 3.8m、幅 3.8m、全長 2350m の勾配 1/35 の幌型で通水能力 140m$^3$/s のトンネルである。設計時の摩耗量の予測は、石橋 [8)]が考案した式を基に(1)式を用いて設計され、コンクリートおよび鋼材の年間平均摩耗厚は 40～50mm/年、0.2mm/年程度と推定され、コンクリートは設計強度 36N/mm$^2$、巻厚 400mm として設計された。

$$V = C_1 E_t + C_2 W_t \qquad \text{式(1)}$$

ここに、$V$：摩耗（損傷）量(m$^3$)、$C_1$：衝撃による損傷係数（m$^2$/N）、$C_2$：摩擦による摩耗係数（m$^2$/N）、$E_t$：水路床に作用する礫の総運動エネルギー(N・m)、$W_t$：摩擦による総仕事量(N・m)を示す 。

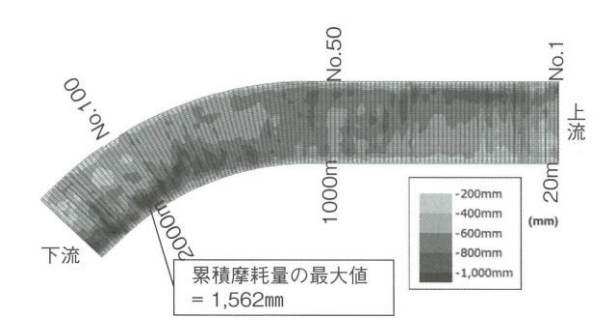



図-1　インバートの累積摩耗量（バイパス運用開始 1998 年～2015 年 11 月までの合計）[6)]

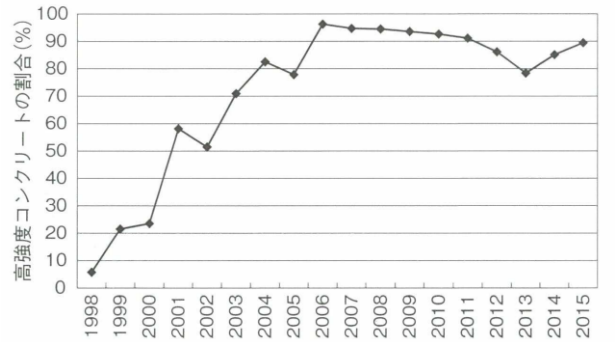



図-2　高強度コンクリートの補修割合 [6)]

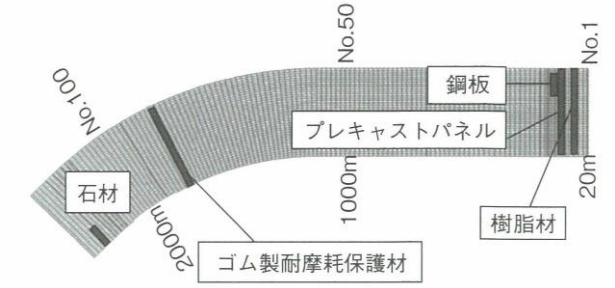



図-3　試験施工概略位置図 [6)]

そして、この設計のもと、明らかに摩耗が激しいと予想される呑口部については鋼板、トンネル部は下流端の一部に圧縮強度 70MPa のコンクリートを用い、それ以外の箇所は圧縮強度 36MPa のコンクリートで施工された。しかし、運用を繰り返すにしたがって図-1 に示すとおりトンネル内が全体的に摩耗し、最大累積摩耗量は 1562mm と報告されている。また、定期的な補修では高強度コンクリートを用い、その割合は 2015 年で 90%とほぼ高強度コンクリートによるインバートに置き換わっており、高強度コンクリートの割合が 70%を超える 2003 年以降は、図-2 に示すとおり通過土砂量に対する摩耗量は減少している。また、補修費用の効率性向上を目的として、図-3 に示すとおり高強度コンクリート(圧縮強度 70MPa)、樹脂材、プレキャストパネル、鋼板、ゴム製摩耗保護材、石材を選定し、摩耗･損傷量が激しい箇所にそれぞれ試験施工を行い、

図-4　小渋ダムおよび土砂バイパストンネル全景 [9)]

図-5　小渋ダムおよび土砂バイパストンネル吐口
（平成 28 年５月）

ライフサイクルコストの低減のための補修材料に関する検討が行われ、検討の結果、旭ダムでは高強度コンクリートによる補修が効率的と評価している [6)]。

また、小渋ダムの SBT は、高さ 8m、幅 6m、全長 3999m の勾配 1/50 の主に馬蹄型で通水能力 370m$^3$/s のトンネルである。設計時の摩耗量の予測は小渋ダムでも石橋 [8)]が考案した式を基に(1)式によって設計され、呑口部はステンレスおよび鋼板、トンネル部は圧縮強度 50MPa、巻厚 450mm の高強度コンクリートを用いて施工され、2016 年から試験運用を行ってきたが、2020 年 7 月の洪水時の運用によって、損傷がインバートコンクリートを突き破ってインバート下の基岩まで到達したため（図-6）、圧縮強度 70MPa の高強度コンクリートでの全面補修が行われており、長期間運用休止している。また、局所的な摩耗・損傷のメカニズムの解明が必要とされている[10),11)]。

以上、SBT における課題は、トンネル水路に土砂を流下させることに伴い生じる摩耗・損傷がある。シル

図-6　小渋ダムバイパストンネルの損傷状況（令和 2 年 8 月）

ト程度以下の小さい粒径を対象とした美和ダムのバイパスは施設の損傷が見られないが、砂礫を流下させる施設に対してはライニング材の工夫や損傷量の予測手法に関する技術が現時点で適切に確立していない状況で、各種研究が進められている[12),13),14)]。また、SBT は施設が大規模であるためイニシャルコストが大きいことも課題であり、今後に計画される SBT については経済的な設計・施工を行うための技術開発が必要となっている。

## 3. 既往の摩耗・損傷推定方法のレビューと課題

### 3.1　既往の摩耗・損傷予測式

表-1 に示した全ての SBT についてインバート部コンクリートがどのように設計されたかは確認できないが、例えば小渋ダムの SBT においては摩耗・損傷量を石橋らの手法[8)]により予測・評価して設計値の中で用いていることが分かっている[10)]。ここでは、石橋らの手法を含めてこれまでに提案されている 3 種類の摩耗・損傷量の予測手法について述べる。

1) 石橋らの手法[8)]

石橋らの手法は式(1)で示される通り、

- 土砂粒子のコンクリート衝突
- 土砂粒子のコンクリート表面上の滑動に伴って生じる摩擦

上記 2 現象によってコンクリートに伝達されるエネルギーの和から摩耗・損傷量を算出するものである。

$$V = C_1 E_t + C_2 W_t \qquad \text{式(1)}$$

$E_t$及び$W_t$は次式で与えられる。

$$E_t = 1.5 V_{ts} \sum E_i N_i n_i \qquad \text{式(2)}$$

$$W_t = 5.513 \mu_s V_{ts} \sum \gamma_{im} E_i N_i n_i \qquad \text{式(3)}$$

ここで、$V_{ts}$：流下される土砂量(m$^3$)、$\mu_s = 0.3$：動摩擦係数、$E_i$：一つの粒子の運動エネルギー、$N_i = L/L_p$：衝突回数、$L$：インバートコンクリートの延長、$L_p$：土砂粒子の跳躍距離、$n_i$：単位体積当たりの粒子数、$\gamma_{im}$：土砂粒子の衝突角度

式(1)から計算される摩耗・損傷量の次元は体積である。インバートコンクリート厚の設計値は、式(1)で計算された体積をインバートコンクリートの面積で割ることで摩耗・損傷厚を計算し、この値に余裕代等を加えることで得られる。このようにして得られる摩耗・損傷厚はインバートコンクリート部において全面的に等しく進行する摩耗・損傷を評価しているものと考えられる。

石橋の手法は早くから提案されており、上述した通り小渋ダム SBT の設計において利用された実績があるが、その精度はかならずしも十分に検証が行われているわけではない。例えば、旭ダムの 1998 年 4 月から 12 月までの実績によれば、約 83,000 m$^3$ の土砂をバイパスしたことにより 45 mm の摩耗が生じており、石橋の手法での推定値は 40 mm であったことが報告されている[15)]。その一方で、同じく旭ダムを対象としてバイパス運用開始の 1998 年から 2011 年までの毎年の摩耗体積について検討した事例では、式(1)の第 1 項で計算される衝突による損傷体積と第 2 項に示される摩擦による損傷体積を加算すると、実績の損傷体積を過大評価するため、第 2 項である摩擦による損傷量を計算から除外することも提案されている[13)]。

2) 柏井らの手法 [16)]

摩擦による損傷は衝突による損傷と比較して軽微であると仮定して損傷量を計算する方法として柏井らによる手法がある。柏井らの方法は、一つの土砂粒子の衝突により発生する損傷量を計算し、土砂粒子の数だけ積分することにより全損傷量を算出するものである。また、損傷量は土砂粒子の衝突前と衝突後の速度変化分に相当するエネルギーによって発生するとしている。

一つの土砂粒子による損傷量を計算するに当たっては、衝突前後の速度を計算するために土砂と底面の衝突角度を確率的に考慮している（一つ一つの粒子の衝突計算において、衝突角度を乱数発生により変化させる）。さらに、衝突前後の速度についても確率的な振る舞いをすることを水理実験から別途見出したため、衝突前後の速度についても乱数発生を組み入れた計算を行っている。一つの粒子に関する損傷量計算毎に衝突角度や衝突速度等について乱数発生をさせているため、特定の損傷個所の時間的進展を計算しているものではないと考えられる。一つの粒子について計算された損傷量を、跳躍距離と水路幅の積で割ることにより一つの粒子について損傷厚を計算し、これを土砂粒子の数だけ積算することでトータルとしての損傷厚が得られるとしている。

粒子径、流量、粗度といったパラメータを変化させて複数ケースの計算を実施した結果として、全体的な傾向としては粒径が大きくなると損傷厚が大きくなるとが示されたとしている。また、旭ダムの SBT について計算したところ、実績の損傷量と比較してオーダーが異なるような極端な差は生じていないとしている。

3) Auel et al.による手法 [12),13)]

その他に損傷のみに着目した計算方法としては、Auel et al.による手法がある。Auel et al.の手法も柏井の手法と同じく、損傷量は土砂粒子の衝突前と衝突後の速度変化分に相当するエネルギーによって決定されるという仮定に立っている。石橋の手法は式(1)で示される通り損傷量を体積で計算するが、Auel et al.の手法は式(4)で示され、損傷速度を算出するものである。損傷速度は、「1 粒子の 1 回当たりの衝突によって損傷・剥離するコンクリートの量」に、「単位面積・単位時間あたりの衝突回数」を乗じることで求まるとしており、様々な経験式・実験式等を組み入れて式(4)の形式となっている。

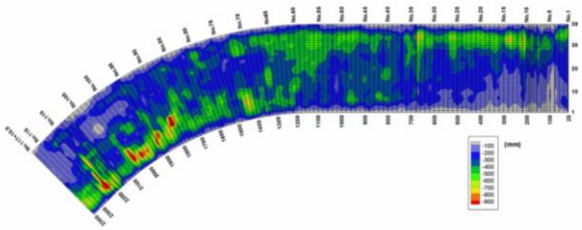


図-7　運用開始（1998 年）から 2011 年までの累積摩耗厚 [7),13)]

$$A_r = \frac{Y_M}{k_v f_t^2} W_{im}^2 \cdot I \cdot q_s \qquad 式(4)$$

ここで、$A_r$：損傷速度(m/s)、$k_v$：損傷抵抗係数、$Y_M$：インバートコンクリートのヤング率(Pa)、$f_t$：インバートコンクリートの割裂引張強度(Pa)、$W_{im}$：鉛直方向の平均衝突速度(m/s)、$I$：単位長さ当たりの衝突回数(1/m)、$q_s$：specific gravimetric bedload rate (kg/(sm))

Auel et al の手法では、式(4)中の$k_v$の値を調整することで実績の損傷量の再現が図られている。先述した 1998 年から 2011 年までの旭ダムの実績損傷量を対象とした検討では、1998 年から 2011 年までのデータを 1998 年から 2006 年、2007 年から 2011 年の 2 期間に分け、1998 年から 2006 年のデータを用いて$k_v$の値の同定、その$k_v$の値を用いて 2007 年から 2011 年の推定値の精度を検証したところ、相対誤差は±15%程度になったことが報告されている [13)]。

### 3.2　損傷の実績、必要な検討

図-7 は、旭ダムにおいて計測されている 1998 年の運用開始から 2011 年までの累積の損傷厚であり、損傷厚に平面的な分布が存在することが確認できる。さらに図-8 に示す小渋ダムの令和 2 年の出水後の調査結果においても、損傷厚について平面的な分布が存在することが確認されている。特に小渋ダムにおいては局所洗掘がインバートコンクリートを突き破りインバート下の基盤まで洗掘が到達したことが確認され、復旧に長期間を要することとなっている。以上の状況を考えると、設計において局所的な洗掘についても考慮することが望ましいと考えられるが、上述してきた 3 つの損傷厚予測手法は、インバート部全面で均等に進行する損傷厚を主たる計算対象としていると考えられ、局所的な洗掘に対する適用性や設計においてこれらの予測式をどのように考慮するべきなのか等について明らかになっていない。また、損傷量を検討するに当たって最も重要と考えられるパラメータの一つとして粒径

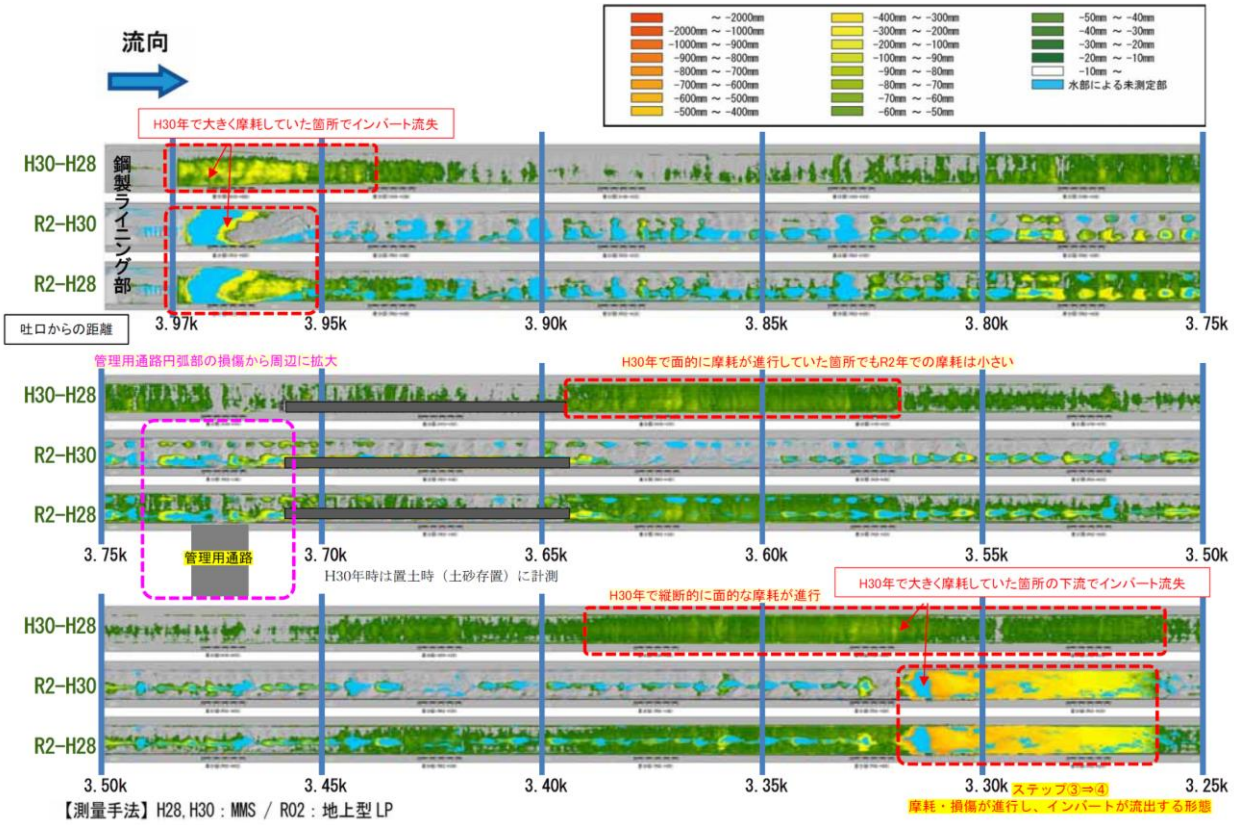



図-8　小渋ダムバイパストンネルの洗堀深（呑口～3.25km までを抜粋）[17)]

が挙げられるが、柏井の手法以外の 2 手法では粒径の大きさによる損傷量への影響は明らかになっていない。これら 3 つの損傷厚予測手法の局所洗掘に対する適用性や粒径に対する感度について考察することから開始して、インバートコンクリート厚の設計法や効率的な維持管理方策の確立につなげていくことが必要と考えられる。

また、小渋ダム SBT においては、令和 2 年 7 月洪水による損傷時に、粒径 10cm 以上の粒径の大きな土砂が流下したことも指摘されており、これら大きな粒形の土砂による損傷への影響についても評価することにより、設計や管理の指針に反映させることが必要と考えられる。

## 4. ライニング材の摩耗・損傷に関する評価手法の現状と課題

前述の旭ダムでの事例 [6)]ではライニング材について複数の材料を複数の場所に現場で試験施工して、最適な補修材料について検討しているが、そもそもトンネル内は複雑な水と土砂の流れとなっているため、必ずしも最適な補修材料の比較検討となっていないと考えられる。

最適な材料の選定は、水と土砂の流れを再現した上で、水や土砂によるライニングへの局所的な作用を基にした摩耗・損傷量を予測・評価して、経済性を考慮したライニング材が選定されることが理想と考える。

そこで、SBT におけるライニング材への作用として考えられる耐摩耗性、耐衝撃性に関し、一般に行われているコンクリート材料の評価手法について調査した。調査においては「耐久性に優れる超高強度繊維補強コンクリート技術」の技術比較表 [18)]から抽出した。大手のコンクリートメーカーにおいて開発した超高強度繊維補強コンクリートのスリムクリート、ダクタルフォーム、サクセム部材、ESCON、J-ティフコム工法の各製品について比較表では各種性能指標による評価がなされており、一般に用いられている耐摩耗性、耐衝撃性の試験法は網羅されていると考えられた。

耐摩耗性を評価する試験法を表-2 に示す。

① 電力中央研究所で考案した O 式すり減り試験
② ASTM C 779 の回転ディスク法による摩耗性試験法
③ ASTM C 418 のサンドブラストによる耐衝撃摩耗性試験法
④ ロサンゼルス式摩耗試験法

⑤　（社）日本道路協会のラベリング試験法

⑥　現場暴露評価法

がある。

また、耐衝撃性の試験法を表-3 に示す。

① JIS K 7111-1「プラスチック-シャルピー衝撃特性の求め方-第 1 部：非計装化衝撃試験」に準拠した試験法

② 鋼球落下衝撃摩耗試験法

がある。また、耐衝撃性については実施していない事例もあった。

以上、耐摩耗性および耐衝撃性の試験法については手法が統一されておらず、ライニング材の性能を的確に比較・評価できない状況となっていることや、耐衝撃性の JIS K7111 のシャルピーの衝撃性試験はプラスチックを対象とする試験法であり、コンクリートの衝撃強さを評価する試験法としては適切でないと考えられた。また、流水型ダムの副ダムなど土砂が通過する水路構造物にも施工されているダクタルフォームを開発した太平洋セメント（株）に独自に鋼球落下衝撃摩耗試験を実施した理由を問い合わせたところ、文献調査した結果、衝撃を伴う摩耗試験を行っている事例が見当たらなかったとのことであった。また、土木研究所に対してスタンダードとなる試験法の開発について要望があった。

以上の調査から、SBT のコンクリートインバート材料の最適な選定にあたっては、耐摩耗性および耐衝撃性の性能評価に関し、的確に比較・評価できる手法を整理・開発し、規準化することが必要になると考えられた。

## 5. コンクリートの耐衝撃性に関する試験法の検討

４．調査結果を基に、「実施してない」事例も散見された耐衝撃性の試験法の中で、太平洋セメント（株）で独自に行った鋼球落下試験法に着目し、試験法の詳

表-2　「耐久性に優れる超高強度繊維補強コンクリート技術」の技術比較表（耐久性能評価（耐摩耗性））[18]

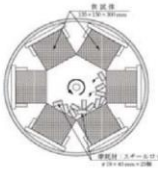
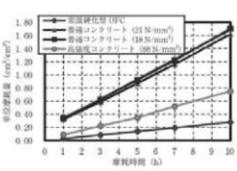
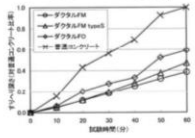
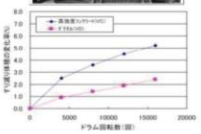
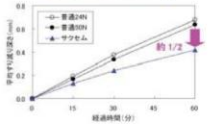
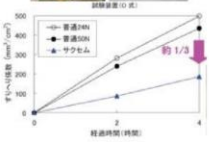
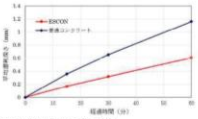
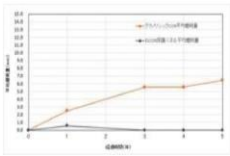
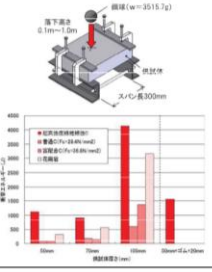
| スリムクリート | ダクタルフォーム | サクセム部材 | ESCON | Jーティフコム工法 |
|---|---|---|---|---|
| 試験方法：電力中央研究所で考案したO式すり減り試験機を参考に作製したスチールロッド式摩耗試験装置を用いて実施。<br><br>摩耗時間10時間における単位摩耗量：0.28cm$^3$/cm$^2$<br>※参考：21N/mm$^2$の普通コンクリートの場合1.6 cm$^3$/cm$^2$，88N/mm$^2$の高強度コンクリートの場合0.75 cm$^3$/cm$^2$<br><br>※スチールロッド式摩耗試験装置は，回転するドラムの外側に6つの供試体（135×150×300mm，摩耗面の面積367.5cm$^2$）を設置し，摩耗材（スチールロッドφ19×L40mm×25個，総重量約2.2kg）を入れ，流量0.5m$^3$/hの水を流しながら，ドラムを50rpmの速度で回転させることにより，供試体の摩耗面に衝撃作用を与え，下記に示す式を用いて10時間後の単位摩耗量（単位面積当たりの摩耗面積）を求めた。<br>  <br>  | ①試験方法：ASTM C 779「Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces」（回転ディスク法による耐摩耗性試験）を実施<br>試験結果：ダクタル（σ＝214N/mm$^2$）とコンクリート（σ28＝45N/mm$^2$）とを比較試験の結果、すり減り深さは0.38mmと1.0mmの差となった。<br> <br>  <br>②試験方法：ASTM C 418「Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting」（サンドブラストによる耐衝撃摩耗性試験）を実施<br>試験結果：ダクタル（σ＝208N/mm$^2$）、コンクリート（σ28＝38N/mm$^2$）の比較試験の結果、損失すり減り量は0.011cm$^3$/cm$^2$、0.074cm$^3$/cm$^2$であった。<br> <br>③試験方法：O式摩耗試験によるすりへり抵抗性試験を国土交通省北陸地方整備局　北陸技術事務所にて実施<br>試験結果：ダクタル（σ＝210N/mm$^2$）、コンクリート（σ28＝50N/mm$^2$）の比較試験の結果、ダクタルの摩耗特性は高強度コンクリートの0.35～0.46倍程度であった。<br> <br>  | 試験方法：回転ディスク法（ASTM C779，乾式）および電中研奥田式（O式すり減り試験，湿式）にて評価<br>試験結果：圧縮強度50N/mm$^2$の普通コンクリートに対して約2～3倍の耐摩耗性を有している。<br> <br>  <br> <br>  | ①試験方法：ASTM C779「Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surface」<br>試験結果：60分経過後の磨耗深さは平均0.6mmであった。<br> <br>  <br>②ロサンゼルス式磨耗試験<br>試験結果：2000回転後の質量減少率は約20%（普通コンクリート約50%）<br> <br>③立山砂防事務所管内の護床工にて、従来技術（グラノリシックコンクリート）との耐摩耗性能比を行った。（5年間計測）<br>5年経過後の計測結果として、従来技術の平均摩耗量は6.4mmに対し、ESCONは0mmと優れた耐摩耗性を示した。<br>（グラノリシックコンクリート：細骨材を使用せず粗骨材をセメントペーストで固めたコンクリート。一般的なコンクリートと比較し、耐摩耗性能が高い。）<br>  | 試験方法：（社）日本道路協会 舗装調査・試験法便覧　第3分冊　B002「ラベリング試験方法」<br>試験結果：平均すり減り量は，超速硬コンクリートの1/2～1/3と小さく，高い耐摩耗性を有することを確認している。<br> |

表-3　「耐久性に優れる超高強度繊維補強コンクリート技術」の技術比較表（構造特性評価（耐衝撃性））[18)]

| スリムクリート | ダクタルフォーム | サクセム部材 | ESCON | J－ティフコム工法 |
|---|---|---|---|---|
| 実施していない。 | 【①シャルピー衝撃強さ】<br>試験方法：JIS K 7111-1「プラスチック―シャルピー衝撃特性の求め方―第1部：非計装化衝撃試験」に準拠<br>試験結果：シャルピー衝撃強さは13.4 kJ/m$^2$以上であった。<br><br>【②鋼球落下衝撃摩耗試験】<br>独自試験によるコンクリートとの比較<br>試験内容：1.5kgの鋼球を高さ1,500mmから3,000回自由落下させ、落下による摩耗欠損部の体積を測定しコンクリートとの相対比較を行った。<br>試験結果：ダクタル　σ＝210N/mm$^2$・・・・摩耗による損失体積　60cm$^3$<br>コンクリート　σ28＝39N/mm$^2$・・・・摩耗による損失体積 275cm$^3$ | 実施していない。 | 試験方法：鋼球（質量：3515.7g）落下試験を実施した。落下高さは、最初0.1mから以後0.1mずつ高さを増加させ、各々の高さで10回ずつ鋼球を落下し、供試体が破壊に至るまでの累積衝撃エネルギーを比較した。<br>試験結果：供試体厚さ100mmの試験では、一般的なコンクリート（圧縮強度28.4N/mm$^2$）に比べて6.8倍の耐衝撃性を示した。<br>  | 実施していない。 |

細や試験結果について情報提供をいただいた。その上で、本研究ではその試験法を参考しつつ、適切な評価法とするための工夫も行って、高強度コンクリートに対する耐衝撃性試験を実施した。また、太平洋セメント（株）の試験、本研究で実施した試験および過去に土木研究所で行った鋼球落下試験の結果を比較し、試験法の違いによる耐衝撃性の評価の違い等を確認した。

### 5.1　耐衝撃性試験（鋼球落下試験）結果とその比較

#### 5.1.1　太平洋セメント（株）が実施した耐衝撃性試験

太平洋セメント（株）では、2006 年に鋼球落下衝撃摩耗試験を、当時開発中であったダクタルフォームの繊維種類による表面の損傷状況、付着層の剥離等の有無について確認することを目的に独自の試験法として実施した [18),19)]。

太平洋セメント（株）から当時の試験法および試験データの提供をいただくとともに問い合わせを行って、詳細な試験条件を可能な限り整理した。ここでは、他の鋼球落下試験との比較のため、普通コンクリートに関する試験結果のみ取り上げる。

①　供試体と圧縮強度

使用した普通コンクリートの供試体は幅 400mm、長さ 400mm、高さ 500mm の直方体で、圧縮強度はσ＝30MPa であった。なお、配合については記録が残っておらず不明である。

②　耐衝撃特性試験の方法および試験結果

試験方法は図-9 に示す鋼球落下試験装置により重量 1.5kg の鋼球（鉄球）を高さ 1.5m から落下させ、錘はワイヤーで固定し、滑車により人力にて上昇させ 1.5m の高さで繰り返し 3000 回落下させた。試験開始後、定期確認頻度（10、50、100、200、500、1000、2000、3000 回）を設定した上で、所定の回数ごとに損傷面積（平均径面積）、損傷深さ（最大深さ）、損傷体積を測定、写真撮影を行った。なお、滑車およびワイヤーはグリスアップを行い、ワイヤーおよびフック部重量は含まない鋼球部分を 1.5kg としている。試験は目に見える欠片が確認できた際には、刷毛等で取り除いている。１回の落下で１回の衝撃となるように衝撃後はワイヤーにより鋼球が再び供試体に当たらない配慮を行ったかは不明である。

また、平均径面積は計測時点での最大直径部とその直角の直径部を測定し平均して求めた。最大深さはデプスゲージ等で測定した。損傷体積は、水による体積の計測とし、測定時にエアーで埃等を吹き飛ばした後、ビーカーで水を流し込み体積を計測した。試験の結果、平均径面積 148mm、最大深さ 47mm、損傷体積 275cm$^3$ であった。試験結果の詳細については 5.1.2 で示す。

#### 5.1.2　太平洋セメント（株）が実施した試験法を参考にした高強度コンクリートの試験

5.1.1 の試験方法を参考にして本研究において高強度コンクリートを対象とした圧縮強度試験、引張強度試験および鋼球落下試験を実施し、耐衝撃特性を確認することとした。試験の概要を次に示す。なお、計測方法についてもより的確な計測ができるように後述する方法で工夫を行った。

①　供試体の製作

試験に用いた供試体はコンクリートの作製、養生期間を十分に確保できなかったことから、既に製作していた 600mm×600mm×600mm（材齢５年）の設計圧縮強度 70MPa の高強度コンクリート供試体（以下、既設供試体）から作製した。圧縮強度計測用供試体は、既設供試体からφ12.5cm、高さ 25cm でコアカッターにより３体抽出して製作した。また、引張強度計測用供試体は、既設供試体からφ12.5cm、高さ 20cm でコアカッターにより３体抽出して作製した。鋼球落下試験

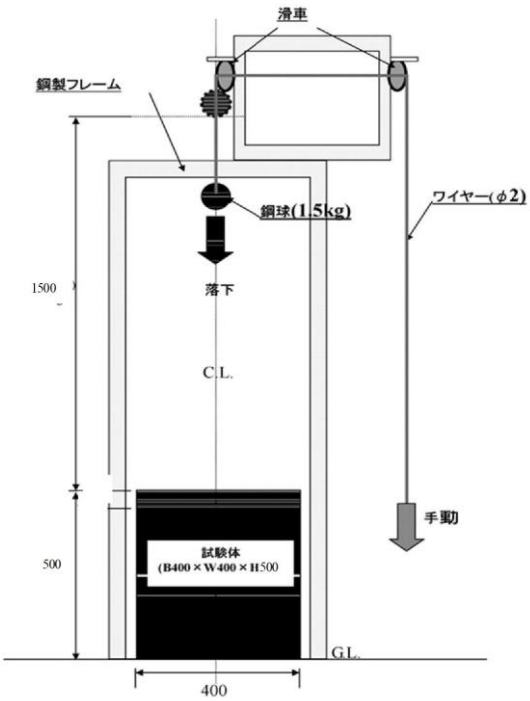



図-9　鋼球落下試験の概要図 19)を一部加工

用供試体は、コア抜き後の既設供試体を切削して400mm×400mm×厚さ 500mm の直方体の供試体として作製した。なお、粗骨材は、笠間産の硬質砂岩で、混和材は使用していない。

②　圧縮強度および引張強度試験の方法と結果

JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して圧縮強度試験を行った。その結果、圧縮強度は σ＝ 75.35MPa であった。また、JIS A1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠して求めた引張強度は $\sigma_t$=4.72MPa であった。

以上、試験に用いる供試体が SBT で採用されている高強度コンクリートの圧縮強度 70MPa と同程度の強度を有していることを確認した。

③　耐衝撃特性試験の方法および試験結果

耐衝撃特性を確認するために、図-9 に示す鋼球落下試験を行った。試験は重量 1.5024kg（直径 70mm）の鋼球（鉄球）に φ2mm のワイヤー（フック含み重量 6.236g）をつなぎ、人力にて上昇させ供試体上面の高さ 1.5m から手放し自由落下に近い状態として各供試体に 3000 回の衝撃を与える耐衝撃性試験を行った。なお、ワイヤーおよび滑車にはグリスを塗布し可能な限り自由落下に近づける配慮を行い、１回の落下で１回の衝撃となるように衝撃後はワイヤーにより鋼球が再び供試体に当たらない配慮を行い実施した。

所定の回数毎に損傷の周囲長、最大摩耗深さ、損傷

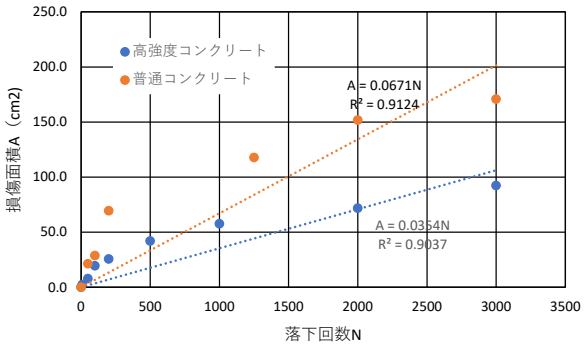



図-10　鋼球落下回数と損傷面積の関係

体積を測定した。試験中、コンクリートの剥離が認められた場合や供試体が割裂した場合は試験を中止して破片を除去することとした。

また、損傷面積は損傷箇所周囲をプラニメータによって計測して求めた。最大摩耗深さは、損傷箇所にテーパーゲージと定規を使用して最大の深さを見つけ、その読み値をノギスで測定した。損傷体積は、水による計測の場合、コンクリートへの浸透により損傷体積が正確に計測できないと考え、供試体の凹部に 5 号珪砂を流し込み砂の体積から求めた。なお、鋼球の落下位置にガイド等を設けていないが、概ね鉛直位置に落下する試験となったと考えている。

図-10 に鋼球落下回数と損傷面積の関係を示す。図-11 に鋼球落下回数と最大摩耗深の関係を示す。図-12 に鋼球落下回数と損傷体積の関係を示す。図-13 に最大摩耗深と平均摩耗深の関係を示す。図-14 に摩耗体積とエネルギーの関係を示す。また、図-10～図-14 には 5.1.1 の普通コンクリートによる試験結果も併せて示す。

なお、図-14 のエネルギーの算定にあたっては反発係数を後述する土木研究所で実施した試験における算出に準拠して 0.33 とし、以下の式(5)により損傷エネルギーを与えている。

$$E = mgh_1 - e^2 mgh_1 \qquad (5)$$

ここに、*E：損傷エネルギー(J)*、*m：鋼球の質量(kg)*、*g：重力加速度（m3/s2）*、*$h_1$:鋼球の落下高さ*、*e：反発係数*を示す。

なお、図-10～図-13 は計測方法が異なるので厳密な比較はできないことに留意が必要であるが、高強度コンクリートの方が、普通コンクリートよりも損傷が小さいことが明らかであることが分かる。

また、図−10、図-11 に示すとおり鋼球落下回数が増えると損傷面積、最大摩耗深が大きくなるが損傷の増加が小さくなる傾向にある。これは鋼球が球形状で、有することから得られた結果と考えられる。また、図

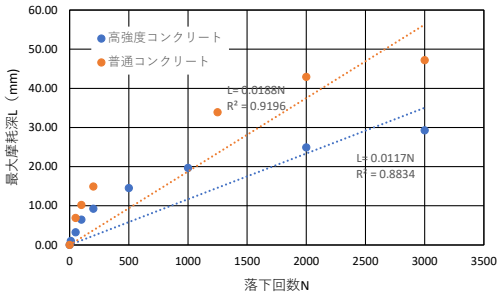



図-11　鋼球落下回数と最大摩耗深の関係

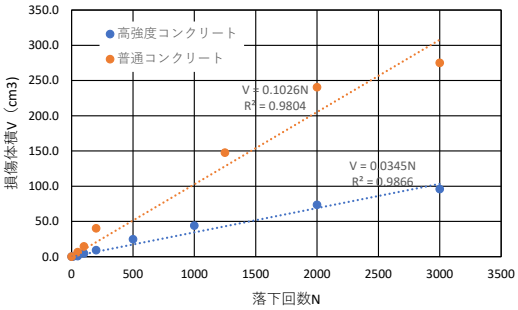



図-12　鋼球落下回数と損傷体積の関係

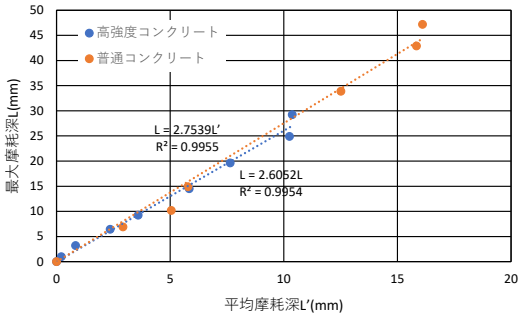



図-13　最大摩耗深と平均摩耗深の関係

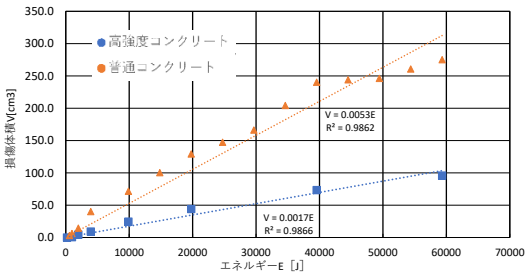



図-14　摩耗体積とエネルギーの関係

鉛直に落下し続けた場合、損傷深さが大きくなるにつれて接触面積が大きくなり、接触面積当たりの衝撃力が小さくなったため損傷量が小さくなったと考えた。また、図-12 に示すとおり鋼球落下回数と損傷体積では線形性が確認された。これは、与える衝撃エネルギーが損傷量に比例することを示唆するものである。図-13 に最大摩耗深と平均摩耗深の関係を示す。ほぼ線形の傾向が見受けられる。これは損傷部がほぼ球欠形状となるため、球欠形状の最大高さと断面積に比例関係を-14 に示すとおり、損傷エネルギーと損傷体積については線形性が認められた。

### 5.2　過去に土研が実施した鋼球落下試験との比較

土木研究所では、平成 11 年度から SBT を対象とした研究を実施してきている [16),20)-31)]。この中で、ライニング材のコンクリートの特性を把握する研究については平成 11 年度から平成 18 年度に重点的に実施され、鋼球落下試験について様々な条件のもと試験を行ってきている [16)]。

ここでは、5.1 で行った鋼球落下試験と過去に土木研究所が行った同等の試験 [20)]の結果の比較を通じて、5.1 で行った試験法の妥当性について検討した。

過去に土木研究所で行った鋼球落下試験は、普通コンクリートの損傷特性を把握するため、固定した 1 辺 500mm の立方体のコンクリート供試体を用いて図-15 に示す方法で鋼球落下試験を実施している。

① 実験条件および計測条件

試験は表-4 に示すケースを実施しており、衝撃はステンレス球および河床礫を落下させて与え、衝撃後の損傷量は測線を密にとってレーザー距離計を用いて供試体は複数の強度の材料、複数の角度で行っている。ここでは、$\theta$=90° つまり鋼球を鉛直落下させた試験のケース（1-1-1～1-1-4、1-2-1～1-2-4）についてのみ抽出する。

使用したステンレス球は（SUS304：比重 8、硬度 HB187 以下）の直径 63.5mm、1.06kg および 50.8mm、0.54kg である。ステンレス球を用いたのは、形状が単純で解析の容易な球形形状が得られやすいこと、およびコンクリートに対して材料強度が十分大きく、衝撃の影響が主としてコンクリート側に現れるであろうことを想定したことによる。落下高さは 1m または 2m であり、落下は人力によって行い、コンクリート上の同じ位置に行うものとし、落下材料は繰り返し用いた。

条件毎の総落下回数は 300 回とし、150 回までは 30 回ピッチで、150 回～300 回では 50 回ピッチでレーザー距離計によってコンクリート表面座標の計測を行った。計測は衝突点を中心に 7.5mm ピッチの格子点上で実施した。

② 実験結果

損傷状況としては、損傷がお椀型の窪地形状として生じていること、衝突回数の増加に伴い平面的に損傷影響範囲が拡がるとともに、深くなっていることや平面的な損傷影響範囲は落下回数が 120 回程度からあまり変化しなくなっており、ある程度、影響範囲が大きくなると、損傷は主として深さ方向に向かって生じたことが考察として挙げられた。

このことは図-10、図-11 に示す落下回数の増加に伴って損傷面積、最大摩耗深の増加量が低減していることにも表れている。

また、損傷量について、落下回数と累積損傷量の関係が図-16 に示されている。いずれのケースも 120 回程度までは下に凸の曲線となっており、それ以上はほぼ直線的に変化していると考察されている。図-12 について 200 回までの結果を拡大したものを図-17 に示す。以上の考察と比較すると普通コンクリートにおいては下に凸となる部分が 100 回～200 回の間となっており過去の土研で行った実験と同等の傾向となっていることが推定できる。また、高強度コンクリートについては 50 回から 100 回の間で下に凸となる現象がなくなることが推察された。

また　石橋 [8]は、礫による損傷が、衝突に伴うエネルギー損失に比例するものとしていることを参考にして、120 回以上の直線部分に対して、落下１回あたりの損失エネルギーと図-16 の直線部分から求められる落下１回あたりの損傷量の関係を調査した。その結果、ステンレス球における ΔE と ΔV の関係は式(6)で近似できるとし、図-18 に示す形で結果を整理し、石橋は b=0 の式形にて a=12.1（$mm^3/J$）の値を与えており、普通コンクリートの式(6)の a,b の値は妥当なものと考えて良いとしている。

なお、この文献 20)に掲載されている a=10.86(mm3/J)、b=2.24（J）を図-18 に示すと破線となっており、回帰式が適切となっていないことを確認した。また既存のデータから回帰式を見直したところ、a=10.292、b=2.63 となり、図-18 に直線で表した。文献 20)に掲載されたグラフと比較してもこの直線が回帰式として確からしいと判断された。なお、当時行った石橋の結果との比較による考察には変更はないと考えている。

$$\Delta V = a(\Delta E - b) \qquad (6)$$

a=10.86(mm3/J)、b=2.24（J）

また、図-18 には 5.1 で実施した２つの試験結果も反映した。なお、5.1 の試験は落下回数の小さい場合の計測について頻度を高くして計測していないため、落下回数が 100 回と 200 回の区間を対象とした。

図-18 から太平洋セメントが実施した試験が式(6)と大きく外れていることが分かる。この原因は鋼球の材質の違いによるものなのか、損傷体積の計測方法が適切でないことによるものなのか不明であるが、太平洋セメント（株）が実施した試験法では、適切に耐衝撃性を評価できていない可能性が高いと考えられた。

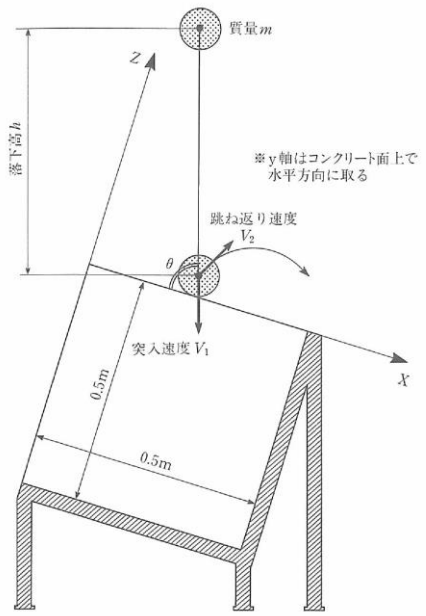



**図-15　土研で実施した試験法の諸量説明図** [20)]

**表-4　衝撃損傷実験ケース** [20)]

| ケース | 落下条件 | | | | | コンクリート | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 落下物 | | 落下高 | 衝突角度 | 最大落下回数 | 種類 | 呼び強度（28 日強度） | 最大粗骨材寸法 |
| | 材質 | 質量 m (kg) | h (m) | θ (度) | n (回) | | (N/mm²) | (mm) |
| 1-1-1 | ステンレス球（SUS304） | 0.54 | 1 | 90 | 300 | A | 17.6 | 20 |
| 2 | | 0.54 | 2 | | | | | |
| 3 | | 1.06 | 1 | | | | | |
| 4 | | 1.06 | 2 | | | | | |
| 1-2-1 | | 1.06 | 2 | 90 | 300 | B | 23.5 | 20 |
| 2 | | | | | | C | 39.2 | 20 |
| 3 | | | | | | D | 20.6 | 13 |
| 4 | | | | | | E | 20.6 | 40 |
| 1-3-1 | | 0.54 | 1 | 75, 60, 45 30, 15 | 300 | A | 17.6 | 20 |
| 2 | | 0.54 | 2 | | | | | |
| 3 | | 1.06 | 1 | | | | | |
| 4 | | 1.06 | 2 | | | | | |
| 2-1 | 河床礫 | 0.83 | 2 | 90 | 150 | A | 17.6 | 20 |
| 2 | | | | | | B | 23.5 | 20 |
| 3 | | | | | | C | 39.2 | 20 |
| 4 | | | | | | D | 20.6 | 13 |
| 5 | | | | | | E | 20.6 | 40 |

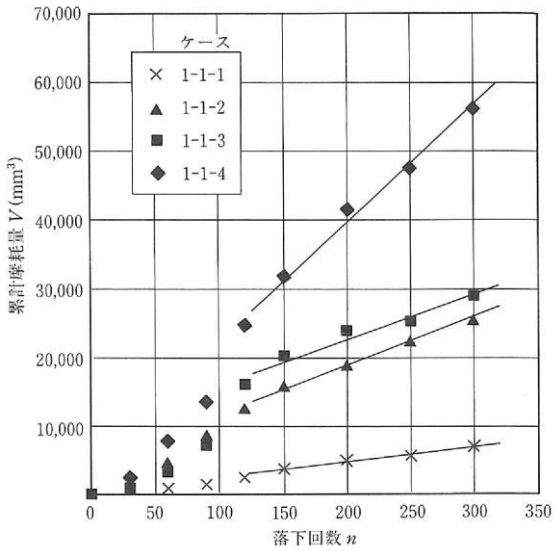



**図-16　落下回数と累積損傷量の関係** [20)]

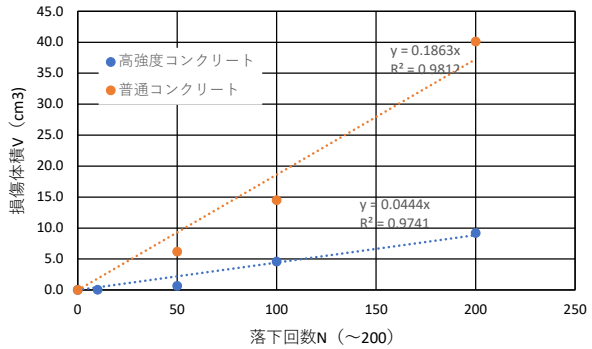



図-17　5.1 の試験における落下回数と損傷体積の関係（200 回以下）

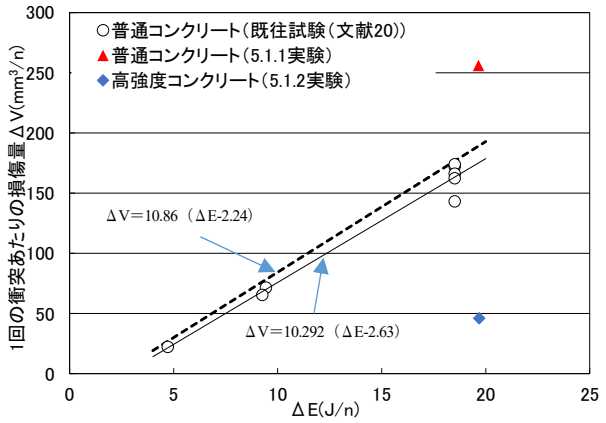



図-18　ΔE とΔV の関係 20)に加筆

また、高強度コンクリートの試験結果も式(6)の直線から大きく離れている。太平洋セメント（株）の試験結果と比較すると、エネルギーに比べて損傷量が小さくなっていることを示しており、ライニング、或いは補修コンクリートとして有効であることが確認できる。しかし、鋼球の材質に違いがあるなど、実施した試験方法および計測方法が異なっていることや、反発係数を計測していないことも、正しい評価が行えていない原因とも考えられる。

以上から過去の研究例を参考に試験法を見直す必要があると考える。

以上、過去に土木研究所で実施した鋼球落下試験の結果と、太平洋セメント（株）が実施した鋼球落下試験の結果およびこれを参考にした高強度コンクリートによる試験の結果を比較した。

その結果、太平洋セメント（株）で実施した試験法では適切な耐衝撃性評価が行えないことが確認された。

耐衝撃性試験の方法について、過去に土木研究所が行ってきた試験法を踏まえて、引き続き検討していくことが重要と考えられる。

### 5.3　既往の試験法における課題の抽出と今後の評価法の開発にあたっての留意点

本研究では、SBT において生じるコンクリートインバートの摩耗・損傷現象において、耐摩耗性・耐衝撃性を評価できる試験法について概観し、統一化や開発の必要性について確認した。また、太平洋セメント（株）が独自で行った耐衝撃試験法を例に耐衝撃性に関する試験法について検討し、過去に土木研究所で行った試験との比較を通じて、当該試験法については的確に耐衝撃性を評価できないことを確認した。

以上のことを踏まえて、SBT におけるライニング材に採用するコンクリートインバートの耐摩耗性・耐衝撃性の的確な評価方法の整理・開発にあたっては、本研究での取組を通じて以下の課題があると考えられ、留意が必要と考えられる。

①　鋼球およびその落下方法

鋼球については、材質が異なることで評価が異なることが考えられ統一が必要となると考えられる。また、既存の試験法では、1kg～2kg の鋼球を人力により持ち上げて、落下させており、試験に多大な労力と時間がかかるとともに、鋼球の反発による怪我のリスクも伴う。試験方法の開発に当たっては、省力化や安全が図られるように留意が必要と考えられる。

②　損傷計測方法

損傷量等の計測においては、レーザー計測器による計測、砂や水を用いた計測を行ったが、現在、現場においては図-8 に示した LP や MMS で損傷量が計測されてきている。このため損傷評価の試験法における計測方法についても現場で用いる計測方法と同等の方法としておくことが重要と考えられる。

③　開発方法

土木研究所における鋼球落下試験は 2000 年の論文で初めて発表されていたものの、太平洋セメントに情報が伝わらず、太平洋セメント（株）が独自で 2006 年に試験法を検討せざるを得なかった。最新の知見の関係者への共有化が技術の信頼性や開発のスピードに関わってくることが示唆され、今後の耐摩耗性・耐衝撃性の試験法の開発および標準化にあたっては、コンクリート材料メーカーなどの関係者と連携して取り組むことが重要になると考えられた。

④　損傷メカニズムを踏まえた試験法

開発にあたっては、SBT で生じる損傷メカニズムが開発すべき試験法で再現できることや今後検討していくべき摩耗・損傷予測式に反映できることが必

要と考えられる。耐摩耗性および耐衝撃性の試験の整理・開発にあたっては以上の点を踏まえることに留意が必要となると考える。

## 6. まとめ

本研究では、SBT 等における摩耗・損傷のメカニズムを踏まえた摩耗・損傷量の予測手法と対策手法を提案していく上で既往の予測手法のレビューを行うとともに、ライニング材であるコンクリートにおける摩耗・損傷の評価試験の課題を抽出し、今後の研究の方向性の検討を行った。研究の成果および今後の研究の方向性の詳細は以下のとおりである。

①摩耗・損傷推定方法の課題を踏まえた研究の方向性

1) 既存の損傷厚予測手法は、インバート部全面で均等に進行する損傷厚を主たる計算対象としていると考えられ、局所的な洗掘に対する適用性や設計において予測式をどのように考慮するべきなのか等について明らかになっていない。また、損傷量に与える粒径の感度も明確に示されていない。損傷厚予測手法の局所洗掘に対する適用性や損傷量に対する粒径の感度について考察することから開始して、インバートコンクリート厚の設計法や効率的な維持管理方策の確立につなげていくことが必要と考える。

2)大きな粒形の土砂による損傷への影響についても評価することにより、設計や管理の指針に反映させることが必要と考えられる。

②耐摩耗性・耐衝撃性に関する試験法の課題を踏まえた研究の方向性

1) コンクリート材料の耐摩耗性および耐衝撃性の評価法については統一的となっておらず、SBT の的確なインバートの材料選定にあたって、材料を的確に比較・評価できる手法の整理・策定が必要である。

2) SBT のライニング材に採用するコンクリートに対する耐摩耗性、耐衝撃性の評価法についてスタンダードとなる試験法の開発が望まれているが、少なくとも耐衝撃性の評価法については確立されていないため開発する必要がある。

3) SBT におけるライニング材に採用するコンクリートの損傷評価のための試験方法、計測方法及び評価方法の確立に当たっては、安全や省力化に配慮するとともに、現場で適用する計測方法も踏まえた方法を検討していくことが重要と考えられる。また、コンクリートメーカーなど関係者と連携して開発していくことも重要と考えられる。

4) 耐摩耗性および耐衝撃性の試験の整理・開発にあたっては、SBT で生じる損傷メカニズムが再現できることや今後検討していく摩耗・損傷予測式に反映できることが必要と考えられる。

最後に、昨今、気候変動による外力増大やダムの再開発等の施策が実施されることに伴い流況の変化が生じ、土砂の河道への流下が増加することが考えられる。本研究で対象とした SBT だけでなく、ダム下流の河川構造物に対しても土砂による損傷予測・対策・経済的設計が急務となると考えられる。こうした状況を踏まえ本研究は、第５期中長期計画の研究開発プログラム「気候変動下における継続的な流域及び河道の監視・管理技術の開発」に関する研究へ引き継ぎ、さらなる検討を進める計画である。

## 謝　辞

コンクリート材料の耐衝撃性試験の検討に際しては、太平洋セメント（株）からデータ提供等による多大なご協力をいただきました。ここに謝意を表す。

## 参考文献

1) 国土交通省：ダム再生ビジョン、平成 29 年 6 月
2) ダム技術センター：多目的ダムの建設　調査 II 編　第 17 章、2005
3) ダム工学会：ダム堆砂対策の促進に向けて（提言）、令和 2 年 3 月
4) 土木研究所：土砂による河川構造物の摩耗・損傷対策および維持管理に関する研究、令和元年度研究開発プログラム報告書巻末資料、令和 2 年 3 月
5) Auel Christian: Flow Characteristics, Particle Motion and Invert Abrasion in Sediment Bypass Tunnels, Doctor of Sciences of ETH Zurich, 2014
6) 西川亨、山根雄一、大本雄二：旭ダム排砂バイパストンネル摩耗量とその対応策について、大ダム、No.239、p.80-85、2017
7) Hiroshi Nakajima, Yusuke Otsubo, Yuji Omoto: Abrasion and corrective measures of a sediment bypass system at Asahi Dam, 1st International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, pp.21-32, 2015
8) 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、No.334、1983.6
9) 国土交通省天竜川ダム統合管理事務所パンフレット

10) 天竜川ダム統合管理事務所：第 8 回小渋ダム土砂バイパスモニタリング委員会資料、2020.
11) 天竜川ダム統合管理事務所：第 9 回小渋ダム土砂バイパスモニタリング委員会資料、2021.
12) Christian Auel, Ismail Albayrak, Tetsuya Sumi, Robert M.Boes :Saltation-abrasion model for hydraulic structures,International Workshop on Sediment Bypass Tunnels 2015.4
13) Christian Auel, Robert M.Boes,and Tetsuya Sumi,:Abrasion Damage Estimation of Sediment Bypass Tunnels:Validation and Comparison of two Prediction Models,京都大学防災研究所年報 第 58 号 B、2015.6
14) Michelle Muller-Hagmann,Imail Albayrak,Christian Auel, and Robert M. boes :Field Investigation on Hydroabrasion in High-Speed Sediment-Laden Flows at Sediment Bypass Tunnels,Water 2020
15) ダム技術センター：多目的ダムの建設　設計 II 編　第 27 章、2005
16) 柏井条介、井上清敬、箱石憲昭：排砂による直線コンクリート水路の摩耗・損傷量の推定、ダム技術、No.274、pp.36-51、2009
17) 天竜川ダム統合管理事務所：第 10 回小渋ダム土砂バイパスモニタリング委員会資料、2022
18) 国土交通省：報道発表資料「耐久性に優れる超高強度繊維補強コンクリート技術」の技術比較表を公表します～新技術活用システムにおけるテーマ設定型（技術公募）の取り組み～、2021.1
19) 太平洋セメント（株）：-技術資料-衝撃落下試験、2006
20) 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、p.55-62、2000
21) 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、p.209-217、2002
22) 柏井条介、井上清敬：長方形開水路の掃流砂輸送特性、ダム工学、Vol.12、No.4、p256-267、2002
23) 井上清敬、柏井条介：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、No.45、Vol.6、p.28-33、2003
24) 井上清敬、柏井条介：直線水路と湾曲水路の土砂流下による損傷特性、土木学会第 58 回年次学術講演概要集、Ⅱ、349-350、2003
25) 井上清敬、柏井条介：衝突によるコンクリート損傷に関する基礎的検討、第 33 回関東支部技術研究発表会講演概要集、No.33、Ⅴ-001、2006
26) 柏井条介：排砂水路、土砂バイパス水路における砂礫の輸送特性、ダム技術、p.32-43、No.246、2007
27) 櫻井寿之、角哲也、小柴孝太、宮脇千晴、石神孝之：土砂バイパストンネルを流下する土砂を把握する試み：土木学会水工学委員会環境水理部会研究集会 2016in 香川発表概要集、p.15-16、2016
28) 櫻井寿之、中西哲、石神孝之：プレート型センサの高速流中を流下する礫の計測特性、土木学会第 72 回年次学術講演概要集、Ⅱ、p.205-206、2017
29) 石田卓也、中西哲、石神孝之：高速流中において跳躍する砂礫の衝突圧力の計測、土木学会第 75 回年次学術講演会概要集、Ⅱ、2020
30) 石田卓也、中西哲、石神孝之：土砂バイパストンネル内における摩耗損傷の進展過程に関する研究、河川技術論文集、Vo.26、431-436、2020
31) 石田卓也、中西哲、宮脇千晴、石神孝之：高速流中の不陸により発生する負圧の実験的研究、土木技術資料、Vol62、No.7、p.26-29、2020

# Study on abrasion countermeasure at a sediment bypass tunnel

Research Period: FY2021-2021
Research Team: River and Dam Hydraulic Engineering Research Team, Hydraulic Engineering Research Group
Author: ISHIGAMI Takayuki
INOMATA Hironori
MIYAKAWA Masashi
NAKANISHI Satoru
NIIBO Tomohiro

Abstract: Sediment bypass tunnel (SBT) are operated for long-term use of dam reservoir and environment of downstream river of the dam, but there are technical issues such as abrasion damage due to the high-speed flow with sediment. This research has purpose to propose a countermeasure method for sustainable use according to the site conditions, as well as a method for predicting the amount of damage based on mechanism of SBT. In this study, we confirmed the issues of development on the wear and tear damage prediction model ,and on the evaluation method of wear and tear damage condition.

Keywords: sediment bypass tunnel, abrasion-predict, concrete, wear and tear test method