

# 砂防施設に突如として発生した爆裂状の損傷の原因究明と今後の対応方針

金井 駿杜<sup>1</sup>・廣井 幸治

<sup>1</sup>関東地方整備局 日光砂防事務所 工務課 (〒321-1414栃木県日光市萩垣面2390)

現在、気候変動により大雨や高温などの極端な現象の発生頻度と強度が増加している。このような豪雨や台風による出水で、これまで整備してきた砂防施設は摩耗や損傷が進行しているため、日光砂防事務所ではさらなる防災・減災に向け砂防施設の新設や改築を含めた整備を順次進めているところである。本稿では、約3年前に日光市芹沼地区の床固工で突如として発生した爆裂状の損傷の原因究明と今後の対応方針について報告する。

キーワード 砂防設備, 床固工, 電磁界解析, 落雷

## 1. はじめに

日光砂防事務所管内は、火山地帯で急峻な地形や脆弱な地質で形成されており、多数の崩壊地が存在している。大規模な崩壊地を抱える溪流において、土砂流出の抑制を図るために砂防堰堤や山腹工の整備を促進し、市街地や世界文化遺産である二社一寺を含む観光資源、重要交通網を保全している。また、老朽化した砂防堰堤や床固工の改築等による補強・保全を実施し、砂防施設の整備を進めているところである。

近年、世界中で自然災害の激甚化、頻発化が進んでいる。我が国においても、毎年のように落雷を伴って時間雨量100mmを超過する豪雨が生じる「極端現象」<sup>1)</sup>と呼ばれる現象が各地で発生している。

コンクリートを主体に構成される土木構造物は、この「極端現象」に伴う落雷により、その機能が失われるほどの深刻な損傷を受ける可能性が高く、重力式コンクリート構造物が多い砂防施設においても例外ではない。

こうした状況から本事案では、落雷によるものと推定された日光砂防事務所管内の芹沼床固工において、突如として発生した爆裂状の損傷の原因究明および今後の対応方針について調査した結果を報告する。

## 2. 芹沼床固工の概要

芹沼床固工(図-1)は、利根川水系鬼怒川右支大谷川(栃木県日光市豊田地先)の下流部に位置し、1977年に完成した、重力式コンクリート構造(堤高H=3.0m、堤長L=185m)である。本床固は本堤、副堤からなる床固工である。無筋コンクリート製であるが、施工時に用いられた少量の鉄筋や番線等がコンクリート中にみられる。

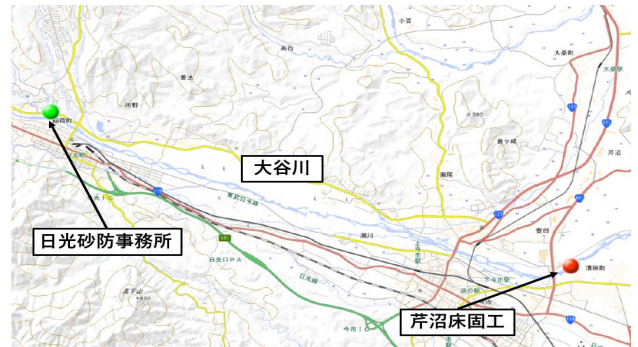


図-1 芹沼床固工位置図

## 3. 爆裂状の損傷原因の推定

### (1) 損傷状況

砂防施設である芹沼床固工に、突如として発生した爆裂状の損傷について、原因の推定をすべく現地調査を行った。

本床固工における爆裂状の損傷は、左岸側袖部に集中して発生しており、その損傷部周辺の状況を図-2及び写真-1に示す。

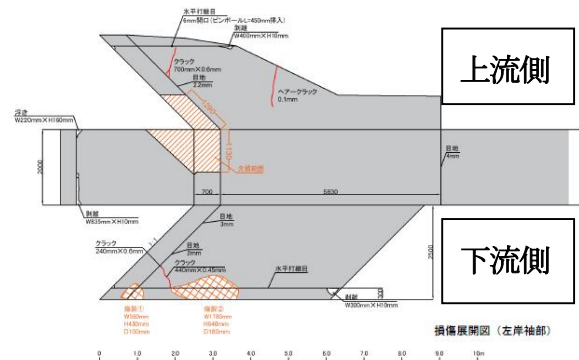


図-2 芹沼床固工損傷状況



写真1 左岸側袖部損傷状況

## (2) 原因の推定

本床固工において爆裂状の損傷が生じた原因について、推定を行う。砂防施設において大きな損傷が生じる原因は、一般的に「①大規模出水に伴う巨礫の移動」・「②地震」・「③コンクリートの劣化」・「④落雷」の4つが考えられる。また、「UFO攻撃説」や「隕石落下」なども話題に上がっていたが、この2つの説と現地条件を照らし合わせると、さらに広範囲に損傷が広がるのではないかと考えられるため除外した。上記の①～④のうちのいずれかが損傷の原因であると考えた。

このうち、芹沼床固工における爆裂状の損傷は、以下の理由により「④落雷」である可能性が高いと考えた。

原因①：巨礫は河床面に沿って移動するため、袖天端への損傷は生じ得ない。

原因②：後述する損傷発生の推定期間付近では、大規模地震の発生実績が確認できなかった。

原因③：コンクリートの劣化は多少影響があると考えられるが、本床固工は複数箇所でも爆裂の損傷が見られるため、直接的な原因とは考えられない。

原因④：爆裂状の損傷は、床固工内部に何らかの爆発の発生によるものだと考えられる。これは落雷に伴い、床固工内部に含まれていた水分の温度が急激に上昇したことによる水蒸気爆発である可能性が高い。

## (3) 損傷発生期間

本研究対象の損傷は、管内の砂防設備点検において実施された2023年9月末のUAVによる空撮（写真2）と、2023年11月3日に取得されたLPデータ（写真3）との比較により、2023年9月末～2023年11月3日の間に発生したと考えられる。



写真2 UAV撮影写真（2023年9月末撮影）

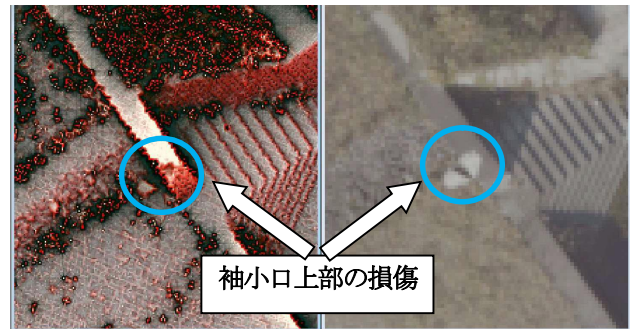


写真3 LPデータ（2023年11月3日撮影）

## (4) 損傷発生期間における落雷実績

(3) の損傷発生期間における気象庁宇都宮地方気象台観測記録では、2023年10月27日から28日にかけて、芹沼床固工付近での落雷が複数回記録されている。

また、株式会社フランクリン・ジャパンによる「JLDN全国雷観測ネットワーク」により、芹沼床固工付近において同時期に2度の落雷が記録されている。このうち、芹沼床固工から南西に約110mの最も距離が近く、推定電流+152kAの規模である落雷が記録されている。この落雷は、2023年10月27日の12時29日に発生し、本床固工における爆裂状の損傷の直接的原因となった可能性が高いと考えた。

## 4. 堤体コンクリート内部の調査

### (1) 各種調査手法と結果

床固工コンクリートの損傷状況を確認するため、コンクリート強度の確認と弾性波速度の把握による床固工内部の損傷を把握した。

以下に、コンクリート強度の確認として実施した「シュミットハンマー」および「コア採取による軸圧縮試験」、「高周波衝撃弾性波法（透過法）」の結果を示す。

#### a) シュミットハンマー

シュミットハンマーの調査手法は、土木学会基準「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法（JGCE-G504）」に基づき実施した。

調査位置は、施工資料に基づき打設リフト毎に8ブロック（6～13打設リフト）に分けて調査を行った。

シュミットハンマーの試験結果（表-1）より、本床固施工時に要求されていた設計強度 $19.5\text{N/mm}^2$ より高強度であることが分かった。

表-1 芹沼床固工コンクリート強度試験結果一覧

打設リフト番号	強度試験結果	
	反発強度 による推定値	圧縮試験
	( $\text{N/mm}^2$ )	( $\text{N/mm}^2$ )
6ブロック	30.9	28.7
7ブロック	37.3	-
8ブロック	39.3	-
9ブロック	31.0	28.1
10-1ブロック	28.2	33.5
10-2ブロック	28.7	-
11ブロック	36.2	-
12ブロック	34.4	26.7
13ブロック	38.3	-

b) コア採取による一軸圧縮試験

一軸圧縮試験を行う上で必要となる、コンクリート供試体を4本採取することを目的にダイモドリルを用いた削孔を行った。コア採取を行った箇所は補修による原型復旧を実施した。コア採取箇所については、上記「シュミットハンマー」を実施した箇所と同じ位置で行った。

一軸圧縮試験結果（表-1）より、各供試体の圧縮強度は、 $26.7\sim 33.5\text{N/mm}^2$ となり、いずれも砂防施設で要求される設計基準強度（ $19.5\text{N/mm}^2$ ）を上回っていることが確認できた。

c) 高周波衝撃弾性波法（透過法）

高周波衝撃弾性波法を実施して堤体内部の弾性波速度分布を把握し、内部構造（亀裂や劣化等）を把握することを目的に高周波衝撃弾性波法により採取したデータを用いてトモグラフィ解析を行った。

高周波衝撃弾性波法（透過法）は、発信側と受信側にAEセンサを設置し、センサ間を伝播する弾性波（P波）を計測することにより、測線部の弾性波速度を算出する。堤体内部の構造（亀裂や劣化等）を詳細に把握するためには、この測線を面的に配置する必要があるため、本業務では、測点配置を25cm間隔で密に配置することで内部構造を詳細に把握できる測線配置とした。

解析結果断面図（図-3）から、床固工の内部で弾性波速度の低速度帯は分布しておらず、健全な状態であると推測される。床固工コンクリートの弾性波速度 $V_p$ は、健全なコンクリートで概ね $4.0\text{km/sec}$ 以上であり、芹沼床固工の左岸袖小口における計測結果は $4.0\sim 4.8\text{km/sec}$ で分布しており「健全」な状態である。トモグラフィ解析結果図では、 $0.05\text{km/sec}$ ピッチの速度差が極小さい範囲でコンタ図として表現すると水平打ち継ぎ目を境界として速度差があるように見える。

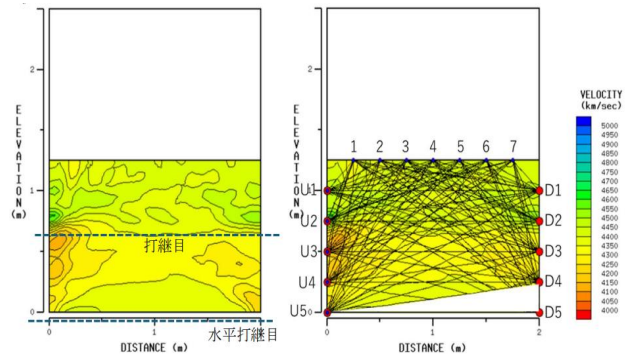


図-3 高周波衝撃弾性波法調査結果（袖小口部）

5. 損傷原因調査

(1) 電磁界解析

建築物や土木構造物等では、直撃した落雷に伴う電流により、その周辺を含めて強い電磁界が生じる<sup>2)</sup>。本事業では、芹沼床固工における損傷状況の再現と損傷原因の推定を目的として、電磁界解析を行った。

a) 解析手法

本事業の電磁界解析は、FDTD法（時間領域差分法）を用いた。FDTD法は、電磁波シミュレーションとして広く用いられている<sup>3)</sup>。FDTD法によって得られた電磁界分布により電解の集中箇所と実際の損傷部位との定性的な比較を行った。加えて、打継ぎ目等の隙間に存在する接点に作用する電圧・電流値を取得し、これを用いて熱量を試算し、これがコンクリートや水分に及ぼす影響を定量的に分析した。

b) 解析ケース

本事業の電磁界解析ケースは、最も損傷の大きい床固工の左岸側水通し肩部を着雷地点として、「case①堤体に隙間がないケース」「case②打継ぎ目の隙間（不連続部）を考慮したケース」「case③case②の隙間内に接点を設けた場合」「case④case③のモデルで電流継続時間を変化させた場合」の4つとした。

c) 解析結果

4ケースで電磁界解析を行ったところ、「case①着雷地点からコンクリート面に沿って電界が分布」「case②打継ぎ目の不連続部に電界が集中」「case③隙間内の接点部に電界が集中」「case④時間の経過に伴って電界が増大」といった結果が得られた（図-4）。

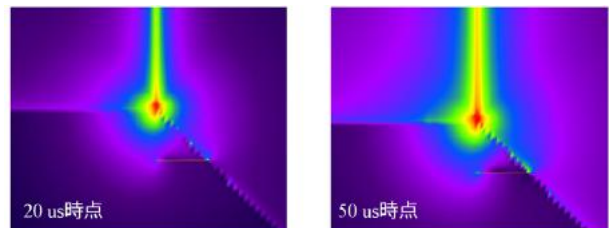


図-4 電磁界解析結果（case④）

ここで、電磁界解析を行った4ケースのうちcase④に対して、電磁界解析で得られた電圧・電流値等を用いて接点における温度変換解析を行い、当該地点での電流の継続時間に伴う温度上昇値を推定した。

その結果、温度上昇値が電流の継続時間が20 $\mu$ s時点では約36℃だったものが、50 $\mu$ s時点ではコンクリートの溶解温度（1200℃）を大きく上回る約3600℃にまで上昇することが明らかとなった。

## (2) 床固工における磁場変化の有無

コンクリート等の物質に対して落雷による大電流が生じると、磁場の異常変化が伴う場合がある<sup>4)</sup>。芹沼床固工における落雷痕跡の確認を目的として、簡易的な方法である、方位磁石（写真-4）を用いた磁場変化の有無を確認した。



写真-4 方位磁石を用いての磁場の確認

### a) 確認結果

各鋼材の磁極性を確認した結果、損傷部位周辺を境界に水通し側と袖側のそれぞれで、磁極性が同一となっていることが判明した（図-5）。

この結果から芹沼床固工においては、型枠支保工の鋼材に対して落雷に伴う大電流が生じ、これにより鋼材が持つ磁極が一定方向に揃った可能性があると考えられる。

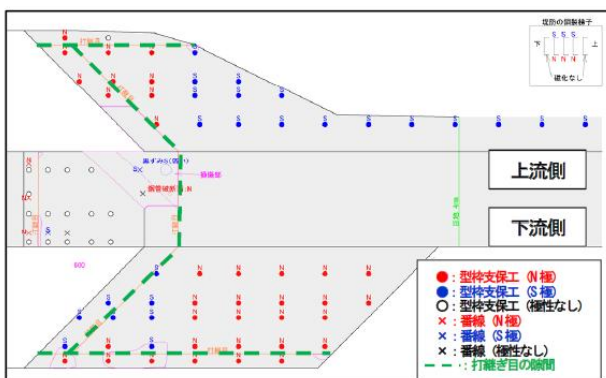


図-5 磁場変化の簡易的な確認結果

## 6. 調査結果から推定される損傷メカニズム

本事案における調査・解析等により、以下のメカニズムによって損傷が発生したと推定した。

始めに左岸側水通し肩に着雷し、コンクリート面や打継ぎ目等を伝って堤体内を大電流が通過した。その際に、打継ぎ目内の骨材等で急激な温度上昇を起こり、接点に存在していた水分が急激に膨張し、水蒸気爆発によって爆裂状の損傷が発生した。

## 7. 今後の対応方針

芹沼床固工では、様々な解析結果から落雷により砂防施設が損傷したと考えた。そこで、既設および新設の砂防施設においての落雷対策について検討を行い、「避雷針」や「アースの設置」などの対策が挙げられたが、実際に施工するにはコストの問題や、避雷針については、ドローンを用いた砂防施設点検時に接触の危険が考えられるため、困難であると感じた。そのため、落雷対策に付いては、被害を受けてからその都度補修した方が、現実的であるのではないかと考える。

また、芹沼床固工について損傷部位以外は、健全なコンクリートであることが確認されたので、完全に補修を行うのでは無く、損傷部位を後世への研究資料として残した上での対策方法についても検討を行う。

## 8. おわりに

本事案では、様々な調査により芹沼床固工における爆裂状の損傷が、落雷が原因であると考え、落雷による損傷メカニズムの推定および今後の対応方針について考察した。コンクリートの内部に水分が残ってしまうと、今回のような大きな損傷に繋がることが分かった。

損傷したコンクリート片を用いた物性値の詳細調査等を実施することで、芹沼床固工で生じた爆裂状の損傷メカニズムの更なる解明を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 鈴木ら（2017）：落雷による農業用水路の破損の特徴と判定マニュアル 水土の知：農業農村工学会誌（85巻9号）
- 2) 公益社団法人 全国有物件災害共済会（2015）：公共施設のための雷害対策ガイドブック
- 3) 柴山（2018）：FDTD 法入門 MDE2018 電磁界シミュレーション基礎講座
- 4) 山崎ら（2003）：落雷に伴う磁場の異常変化に関する調査-草津白根山での観測例- 地震発生域及びその周辺の電気伝導度構造の研究，京都大学防災研究所研究集会（一般）14K-08