

落雷を原因とした芹沼床固工の損傷メカニズムについて

大日本ダイヤコンサルタント株式会社 ○高濱洋介, 阿部征輝, 諏訪園胡楠, 佐々木達生, 永野賢司
 国土交通省 関東地方整備局 日光砂防事務所 木下篤彦 (現 内閣府沖縄総合事務局開発建設部), 廣井幸治,
 秋元 裕, 上原浩明, 金井駿杜 (現 関東地方整備局利根川水系砂防事務所)

1. はじめに

現在は、地球規模で気象が大きく変動している時期であり、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」と呼ばれる気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あり、重力式コンクリート構造が多い砂防設備においても例外ではない。

こうした状況から本研究では、落雷によるものと推定される爆裂状の損傷が確認された日光砂防事務所管内の芹沼床固工において、**砂防設備としては初となる、落雷を原因とした構造物の損傷メカニズム解明**を試みた。

2. 芹沼床固工の概要

本研究対象の芹沼床固工は、大谷川床固工群の下流区間に位置し(図1)、重力式コンクリート構造(堤高H=3.0m、堤長L=185.0m)を有している。また、左岸側袖部にみられる損傷部周辺の形状は図2の通りである。



図1 芹沼床固工位置図

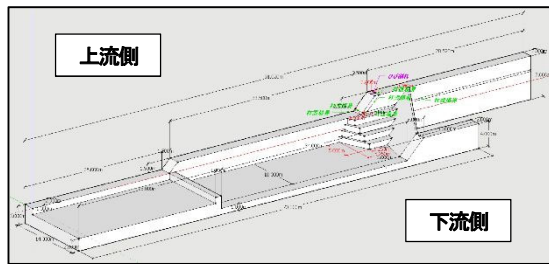


図2 芹沼床固工モデル図

3. 損傷原因の推定

3.1. 損傷状況

芹沼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、その状況は図3の通りである。

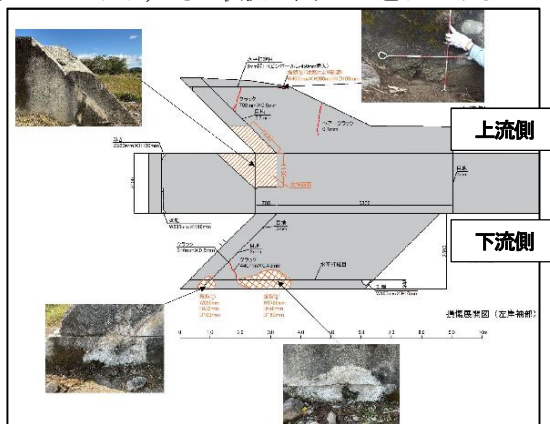


図3 芹沼床固工損傷状況

3.2. 原因の推定

3.2.1. 考え得る損傷原因

砂防設備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落雷の3つが

考えられる。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「**③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、袖天端の損傷は生じ得ない。

原因②:後述の損傷発生推定時期(3.2.2)付近で大規模地震の発生実績がない。

原因③: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。

3.2.2. 損傷原因となった落雷実績

(1) 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による空撮と、2023年11月3日に取得されたLPデータとの比較により、2023年9月末～11月3日の間に発生したと考えられる。

(2) 損傷発生期間における落雷実績

(1)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27～28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。加えて、(株)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と最も距離が近い、**2023年10月27日(12:29発生)の落雷が、損傷の直接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

4.1. 調査手法・結果

4.1.1. 高周波衝撃弾性波法(透過法)

高周波衝撃弾性波法(透過法)は、損傷部分を覆うように配置した測線毎に設けた受発信点にAEセンサーを設置し、手持ちのハンマーにより発信点で与えた打撃に伴ってセンサー間を伝播する弾性波(P波)速度の計測により、堤体内部の健全性を把握するものである(図4)。

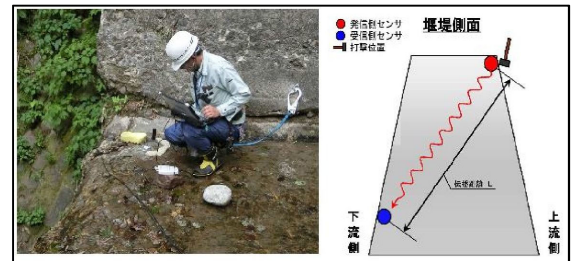


図4 高周波衝撃弾性波法の概念

高周波衝撃弾性波法(透過法)による弾性波速度は、**健全なコンクリート躯体で概ね4.0km/s以上**であり、本研究における**計測結果は4.0～4.8km/s**で推移している(図5)。

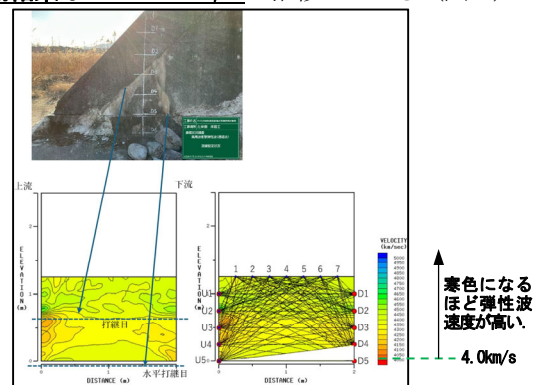


図5 高周波衝撃弾性波法調査結果(袖小口部)

※計測結果を用いてトモグラフィ解析を行った結果

4.1.2. コア採取による強度試験

本研究では、損傷部周辺の堤体からコンクリートコアを

供試体として4本採取し、これらに対して一軸圧縮試験を行ってコンクリート強度を確認した。

一軸圧縮試験結果から各供試体の**圧縮強度は、26.7～33.5N/mm²**となり、いずれも**砂防構造物で要求される設計基準強度(18N/mm²)を上回る**ことが確認できた。

4.2. 調査結果に基づく堤体コンクリート内部の状況

高周波衝撃弾性波法(透過法)及び一軸圧縮試験の結果、いずれも健全なコンクリートが有する以上の数値結果が得られ、**堤体内部は損傷部を除き健全な状態**と確認できた。

5. 損傷原因調査

5.1. 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。²⁾本研究では、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。

5.1.1. 解析手法

本研究の電磁界解析は、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。³⁾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(ジュール熱)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。

5.1.2. 解析ケース

本研究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。

5.1.3. 解析結果

5.1.2の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6)。

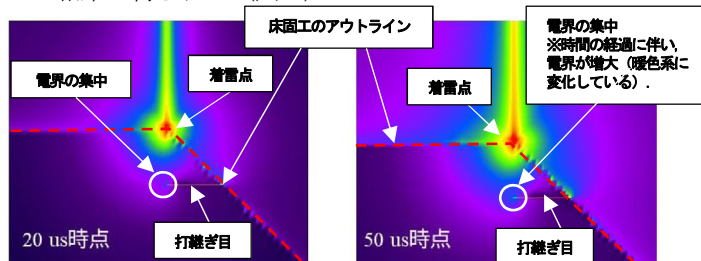


図6 電磁界解析結果(case④)

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20μs時点では約36℃だったものが、50μs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(表1)。

表1 温度変換解析結果

項目	数値	
電流継続時間 [μs]	20	50
タイムステップ [s]	8.30E-12	8.30E-12
総ジュール熱 (E) [J]	853.176	87136.525
厚さ (d) [m]	0.005	0.005
断面積 (A) [m ²]	0.002088295	0.002088295
密度 (ρ) [kg/m ³]	2300	2300
比熱 (c) [J/(kg·K)]	1000	1000
温度上昇量 ΔT [K]	35.526	3628.361

5.2. 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。⁴⁾本研究では、芹沼床固工における落雷痕跡の確認を目的として、簡易的な方法により磁場変化の有無を確認した。

5.2.1. 確認方法

磁場変化の簡易的な確認は、堤体コンクリート内に残存する型枠支保工の鋼材に対して、方位磁石を接近させて磁極性(S極またはN極)を調査することにより行った。

5.2.2. 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7)。

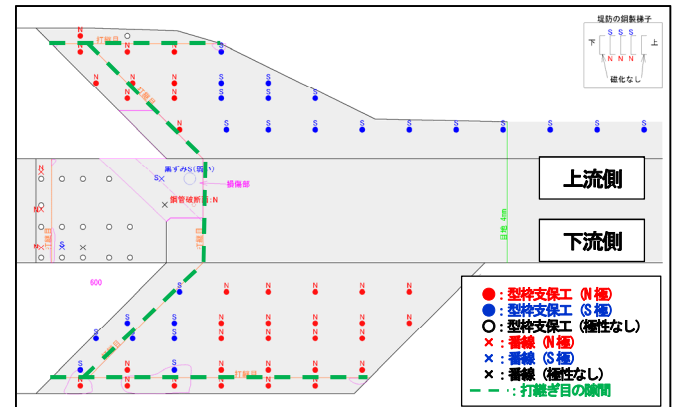


図7 磁場変化の簡易的な確認結果

通常、型枠支保工で用いるような棒状の鋼材は、製造過程で磁化することもあるが、その磁極は鋼材毎にばらつくことが多い。一方で、複数の鋼材に同一方向の大電流が生じた際は、その方向に応じて磁極が一定となる(右ねじの法則)。

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。

6. 調査結果から推定される損傷メカニズム

本研究における調査・解析等により、①損傷部以外のコンクリートは健全(4.2)、②打継ぎ目等隙間の接点部では落雷の電流により急激な温度上昇が生じる(5.1.3)、③鋼材に落雷に伴う大電流が生じた可能性がある(5.2.2)ことが明らかとなった。これにより、芹沼床固工で発生した爆裂状の損傷は、以下のメカニズム(図8)によるものと推定した。

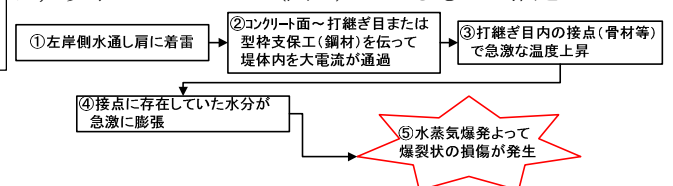


図8 推定した爆裂状の損傷メカニズム

7. おわりに

本研究では、芹沼床固工における爆裂状の損傷が、電磁界解析の結果等から落雷が原因であると考え、これに基づく損傷メカニズムを推定した。

今後、型枠支保工**鋼材の配置をモデル化した電磁界解析**、フラックスゲート等の**専用機器を用いた磁化率の詳細計測**、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。

【謝辞】本研究の実施に際して、貴重な御助言を賜りました富山大学理学部・酒井英男名誉教授、中部大学工学部・山本和男教授、一般財団法人電力中央研究所・斎藤幹久氏、共同研究者として多大な御協力を賜った日光砂防事務所の関係各位に対して、心よりの謝意を表します。

【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 MWE2018 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