

流水域ロープ事故における力学的解析 —2点支持ロープ事故およびロープ拘束事故の検討—

幸山 直史・斎藤 秀俊・犬飼 直之・安倍 淳（長岡技術科学大学）、木村 隆彦（京都・明治国際医療大学）

1. はじめに

水難救助においてロープは、救助者が陸上などの安全領域を維持しながら遠隔で溺水者へ接触可能な資器材として用いられている。池・湖などの静水域では、ロープや浮力体を用いた遠隔救助は有効であり、防波堤など高所では沈水防止や呼吸確保にも寄与する。一方、流水域では人体に作用する流水抗力（動水圧）が流速の2乗に比例して増大し、その力がロープ張力として保持者側へ伝達されることで、拘束、転倒、巻付き、沈水など二次災害の危険を生じさせる。消防救助や急流救助分野では、固定ロープ拘束事故（fixed line entrapment）やロープ角による荷重増幅の危険性が指摘されているが、訓練事例に即してその力学的機序を整理した報告は限定的である。本発表では、2点支持ロープ想定事故および流水域ロープ拘束事故（明治国際医療大学救急救命学科の河川実習）を対象とし、流体力学およびロープ力学の観点から現象解析を行った。

2. 2点支持ロープ想定事故に基づく解析

対岸に渡した2点支持ロープによる救助を想定すると、人体へ作用した流水抗力は中央荷重としてロープへ加わる。この中央荷重は流速の2乗に比例して急激に増大し、さらにロープが直線に近いほど、荷重は両端へ増幅して伝達される。中央荷重を W 、水平線からのロープのたわみ角を θ とすると、理論上の片側張力 T は $T = W / (2 \sin \theta)$ で表され、たわみ角 30° （内角 120° ）では W 相当、 15° では約 1.9 倍、 5° では約 5.7 倍に増幅する。要救助者 1 名（約 60kg 相当）であっても、流水抗力およびロープ角条件によっては保持者側へ数百 kg 級の張力が作用し、人力での保持限界を超える可能性がある。保持者は主に自重、および足底部と接地面の静止摩擦によって抵抗するが、張力が摩擦限界を超えると滑走や姿勢破綻が生じ、保持は困難となる。また、足元ロープへの四肢侵入や身体への巻付きは拘束・転倒を招き、自力離脱不能から二次災害へ進展する危険がある。

3. 流水域ロープ拘束事故の物理的解析

流水域にて対岸へ展張したロープを用いた訓練中のヒヤリハット事例を解析した。流下者がロープ通過時に上半身へ半掛け状態となり、ロープが身体へ回り込むことで巻付き摩擦（capstan effect）が生じ、流下に伴う身体牽引によって締め込み現象が進行し頸部に巻き付いた。保持者がロープを保持し続けた結果、張力が締め付け方向へ変換され、人体に作用した動水圧がロープ張力として増幅し、頸部圧迫が急速に増強する危険状態となった。本事例は固定ロープ拘束事故と類似機序を呈し、流水域におけるロープ拘束事故の発生機序を示す事例と考えられた。

4. 結論

ロープは一定条件下では有効な救助手段となる一方、条件を誤れば重大事故を招き得る二面性を有する。流水域におけるロープ事故は、流水抗力、ロープ角による張力増幅、巻付き摩擦が複合的に作用することで発生する。特に2点支持ロープではロープ角の減少に伴い張力が急増し、人力保持が困難となる可能性がある。また、身体への巻付きは結び目が存在しなくても張力と摩擦により締め込みが進行し、拘束・頸部圧迫を生じ得る。本解析結果は、流水救助において身体への結着や解除困難な固定を避け、離脱可能性を確保するという安全原則に物理学的合理性を与えるものと考えられる。今後は、流体力学、ロープ力学、および人体支持機構を統合した流水域ロープ事故の継続的解析が重要と考えられた。