

第6章 結論

ダムに設けられる洪水吐きには、下流保護のためにエネルギーを減じるための減勢工が設けられる。現在、我が国で最も採用事例が多いのは副ダムによって下流水深を確保し、水平な水叩き上に強制的に跳水を発生させる型式であるが、跳水時に人間には聞こえにくい超低周波成分が卓越した周波数特性を持つ音が発生することが知られている。この超低周波音が大きい場合などに周辺の建物の窓ガラスや建物内の建具を振動させる等の問題を引き起こす場合があり、その特性を明らかにし、低減対策を確立することが求められている。また、今後建設が予定されているダムにおいても環境アセスメントの一環としてダム放流時の発生音を定量的に予測することが求められている。

しかし、跳水時の発生音は、音源や共鳴構造の有無など音が発生する系全体としてのメカニズムが解明されておらず、放流形態や流量等の水理条件と発生音等との関係についても系統だった検討は行われていないのが現状である。そのため、現時点では、ダム計画時に、放流時の低周波音が発生することがある程度予想されても、定量的な予測が困難であることや抜本的な対策が確立していないことから、ダムの設計において放流時の発生音対策が講じられることはほとんどなく、運用を開始してから発生音が問題となって、対策を迫られる事例が見受けられる。しかし、ダムが完成し、運用を開始してしまうと、発生音源側での対策は一層難しくなり、結局、対策は家屋の補強等の対症療法的なものにならざるを得ない。したがって、ダムの計画・設計段階において発生音を定量的に予測し、具体的な対策を講じておく必要がある、そのための検討手法を確立する必要がある。

また、減勢工における超低周波音の発生は、減勢工の目的である水理学的エネルギーの減衰に伴い生じるものであるから、現行の減勢工の基本的仕組みを変えずに発生音そのものを大きく低減させることは難しい。しかし、減勢工全体を地下構造物として、外部に拡散する音響エネルギーを最小限に抑えることは、超低周波音の低減対策のひとつとして有効と考えられる。

以上の状況に鑑み、本研究では、減勢工として代表的な形式である跳水式減勢工を取り上げ、模型実験および実際の構造物における発生音を測定し、その基本的な特性を分析し、音の発生メカニズムを推定するとともに、模型実験結果から実物における発生音を予測する手法の検討を行った。また、発生音の低減対策として減勢工をトンネル構造とすることを考え、その低減効果を推定した。

まず、副ダムを有する跳水式減勢工を対象として実際の構造物における放流時の発生音の測定を行い、水理学的条件と発生音の音圧レベルや音響出力など発生音の大きさとの関係、さらに周波数特性との関係について把握した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 跳水時に発生する音の音圧レベルは、減勢工に流入する水脈のエネルギーの増加に伴い大きくなる。

- 2) 発生音の音響出力と水脈のエネルギーフラックスの比、すなわち変換効率は減勢工内の流況の変化に対応して変化する。
- 3) 発生音は 2~3Hz に不明瞭ではあるが卓越周波数を持ち、周波数が大きくなるほど各周波数成分が小さくなるピンクノイズに近い特性を持つ。
- 4) 発生音の周波数分布は、流量に関わらず、一定の形状を持つ。

次に、副ダムを有する跳水式減勢工を対象として、規模の異なる模型による発生音の測定を行い、水理学的条件、幾何学的条件と発生音の音響出力、周波数特性の関係について把握し、これらの結果をもとに、模型実験から実機における発生音を予測する手法についての検討を行うとともに、実際の構造物における測定結果と比較することにより、予測手法の検証を行った。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

跳水時に発生する音の特性については、以下の結果が得られた。

- 1) 跳水時に発生する音は、跳水始端部からの発生音が支配的であり、音源は幅方向へ分布する線音源とみなすことができる。
- 2) 発生音の音響出力と流入エネルギーの比すなわち音のエネルギーへの変換効率は、減勢工内の流況の変化に対応して変化する。また、変換効率は、放流条件をフルード相似とすれば模型規模に依らず、一定の値をとり、この値は実機の値ともほぼ一致する。
- 3) 発生音の周波数分布は、一定の放流条件の範囲においては、放流条件（フルード数）に依らず一定の形状をとる。
- 4) 発生音の周波数分布に現れる卓越周波数は、減勢池内における共鳴周波数とほぼ一致する。

したがって、実機とフルード相似とする模型実験を行うことにより、以下の方法によって、模型実験の値から実機の値を予測することができる。

- 5) 実機の流入エネルギーに模型実験から得られた変換効率を乗じることにより、実機において生じる発生音の音響エネルギーを求めることができる。
- 6) 模型実験から得られた発生音の周波数分布は、音の相似則により実機の周波数分布へ換算することができる。

また、低周波音の発生メカニズムを考察するために、ヘルムホルツ方程式の固有値問題を解くことにより減勢池内の気泡群の固有振動数を求め、実験値との比較を行った。これによって、ボイド率の大きな楔形領域の存在が実験で測定された振動数を説明するために重要であること、減勢池から空中に放射される低周波の音波は自由表面に接したボイド率の大きな領域が音源となって空中へ放出されることを示した。

さらに、ダム減勢工の放流時の発生音対策として減勢工全体を地下構造とすることを提案し、この対策による発生音の低減量を模型実験によって予測する手法を検討した。そのために、規模の異なる模型を用いた模型実験を行い、模型規模、水理学的条件とトンネル

出口における観測音の周波数特性の関係および跳水始端部において発生した音がトンネル内を伝播する際の変化について把握した。また、これらの結果をもとに減勢工を地下構造とした場合の発生音の予測手法を検討した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 跳水始端部で発生した音は、トンネル内の空間部を伝播する際に共鳴を生じ、その卓越周波数は、空間部を気柱と見なした場合の共鳴周波数とほぼ一致する。
- 2) 跳水始端部における発生音とトンネル出口における観測音の比（伝達率）の周波数特性は、空間部の形状にのみ依存し、一定の模型形状・縮尺に対して固有の関数形を持つ。
- 3) 模型における伝達率は音の相似則により実機の伝達率に換算することができる。
- 4) 以上の結果および前述の地下構造としない減勢工の発生音の検討結果から、減勢工を地下に設けた場合については、地下構造としない場合の模型実験も併せて行うことにより、以下の方法によって模型値から実機の値を予測することができる。
 - ① 模型実験の結果から水始端部における発生音とトンネル出口における観測音の比（伝達率）を周波数毎に求める。
 - ② 上記の模型における伝達率を音の相似則により実機の値に換算する。
 - ③ 前述の方法により跳水始端部における実機の発生音のパワースペクトルを求め、これに実機の伝達率を周波数毎に乗じることによりトンネル出口における実機の観測音のパワースペクトルが得られる。

最後に、天ヶ瀬ダムに新たに設けられるトンネル式放流設備の減勢工の計画形状を対象として、提案した発生音の予測手法を適用し、トンネル出口における観測音の推定を行い、減勢工を地下構造とすることによる発生音の低減効果についての評価を行った。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 新たに設けられるトンネル式放流設備において設計対象流量を放流する際にトンネル出口付近において観測される音圧レベルは、115 から 120dB 程度である。また、トンネル式放流設備から外部へ放出される音響エネルギーは、130 から 120dB 程度である。
- 2) 減勢工をトンネル構造とすることにより、発生する音のエネルギーを 10~20 dB 程度（エネルギーの絶対値では 90%以上）低減することが可能である。

以上、本論文に述べた検討により、これまで定量的な予測が困難であるとされてきたダム放流時に減勢工において発生する音について、模型実験から実際の構造物において発生する音を予測する一連の手法を提案することができたと考えている。また、提案した手法を用いて、減勢工を地下構造とすることによる発生音の低減量を定量的に評価し、低減対策として有効であることを示した。

今後は、さらにデータの蓄積を行い、実験・解析手法の確立を図っていく必要がある。特に、本手法の検証、適用範囲の確認のために、実際の構造物における観測結果の収集が重

要であると考えられる。また、予測手法の精度を向上させ、低減対策を検討するためには音の発生メカニズムを解明することが重要である。そのためには、減勢池内への気泡の混入、気泡振動の励起等音の発生源を取り込んだ定量的なモデルを構築することが課題となる。

なお、本研究で対象としたのは発生音源の推定手法である。したがって、音源であるダムから実際に被害の生じる家屋等までの音の伝播については別途検討が必要である。これについては、低周波音が減衰しにくい特性を持っていることから、通常は音の拡散のみを考慮すれば任意の地点の音圧レベルを求めることができるが、渓谷等共鳴を生じるような特殊な地形である場合音響実験や数値シミュレーション等による解析が必要となる。