

ケーブル制震工法の検討

○大浜 巧¹・吉久 寧²・武田 実³

概要：

水路等施設の耐震性を確保する対策は、施設の重要度区分を行い、規模の大きいものや利水影響度の大きいものを優先して実施してきた。一方、水路の調節堰のような中小附帯構造物は、損傷した場合の利水影響度は大きいものの二次災害の危険度が低く、応急復旧が規模の大きい施設と比べて簡易であるなどの理由から、対策の優先度が低く設定されている。

水路附帯施設の代表的な施設である調節堰はコンクリート柱とゲートおよび上部の頂版と巻上機からなり各水路において共通する構造であるが、耐震性能照査を行うと柱が基部で損傷判定となる場合が多い。この場合の一般的な耐震工法は鉄筋コンクリート巻立等になるが、通水断面の減少、通水停止や用水切替などの工事費増高、施工時期の制約等の課題がある。

本報は、このような課題を解決し、鉄筋コンクリート巻立等の従来対策より経済的かつ効率的な、調節堰の耐震工法の検討を、国立大学法人富山大学と連携協定を締結し進めている取り組みについて紹介する。

キーワード 水路施設、耐震対策、制震、ケーブル

1. はじめに

水路途中に水位を調節する目的で設置されている調節堰（写真-1）は、上部にゲート巻上機がありトップヘビーな構造物で、地震時には上部が大きく揺れるモードとなり、基部が損傷しやすい傾向がある（図-1）。



写真-1 水路に設けられている調節堰

従来対策では、①調節堰の所定の損傷を超える部位を直接補強、②調節堰が支える重量物との間に免震構造を設置、③調節堰の周囲に新たな構造物を設置して揺れを制御、などの手法が用いられてきた。

しかし、これらの工法は、水路上の調節堰という構造物を考えた場合、②は免震構造部位が塑性変形することによりゲートの巻き上げ機能が喪失することになり、③は水路沿いの管理用道路や民地との境界などの用地的制約により採用し難いことから、現実的な耐震対策工法としては①のRC増厚などの耐震工法が考えられるが、通水断面の減少や通水停止、用水切替など施工時期の制約等の課題があった。これらのことから、従来の耐震技術にはない原理や手法での耐震工法を検討し、有効とした工法がケーブル制震工法である。

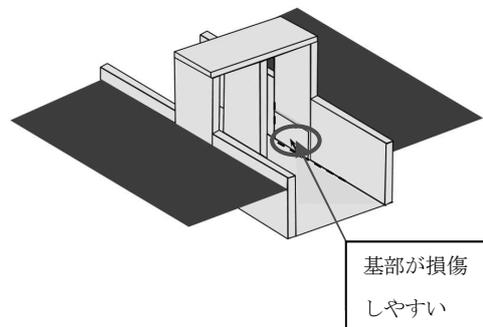


図-1 調節堰の構造と損傷しやすい部位

1. 総合技術センター 水路グループ
2. 総合技術センター 水路グループ長
3. 総合技術センター 水路グループチーフ

2. ケーブル制震工法の特性

トップヘビーな構造物は、**図-2**左側のように頭部が大きく揺れる1次モードである。これを**図-2**右側のように多次モードとすることで頭部の揺れを制御する方法を検討した（必ずしも多次モード卓越になるわけではない）。

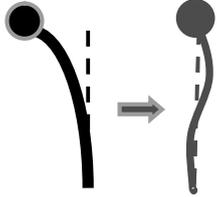


図-2 振動モードの変化（1次モード→多次モード）

現実的な方法として、調節堰頭部と調節堰と連続する水路壁をケーブルで連結し、上下流に交差するように配置した（**図-3**）。ケーブルを連結することにより必ずしも多次モードになるわけではないが、この工法の最大の利点は、振動モードの異なる構造物（調節堰と水路壁）を連結することで、より一層の減衰・制震効果が発現されるところにあると考えられる。ケーブル制震工法により、通水に支障とならずに気中部のみで施工ができ、また水路上内で完結することで管理用道路にも支障にならず、新たな用地確保も不要となる。

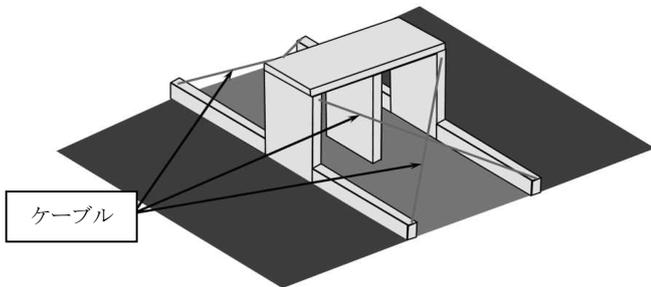


図-3 ケーブル制震工法の概念図

3. ケーブル制震工法の効果検証

前項で述べたケーブル制震工法の効果について、3次元動的解析により検証した。ここでは例をひとつ紹介する。

3.1 解析条件・解析モデル

解析に用いた地震動（**図-4**）は、中央防災会議より公表されている南海トラフ地震動のうち最大加速度が1127galと比較的大きいとともに、最大応答スペクトルが対象構造物の固有周期に近く（**図-5**）、慣性力相互作用の観点から厳しい地震動を選定した。解析に用いたモデルを**図-6**（無対策）と**図-7**（ケーブル制震工法）に示す。モデルはケーブル（φ75.5mm）により制震効果を発

揮するためにプレロード（300kN）を与えた。

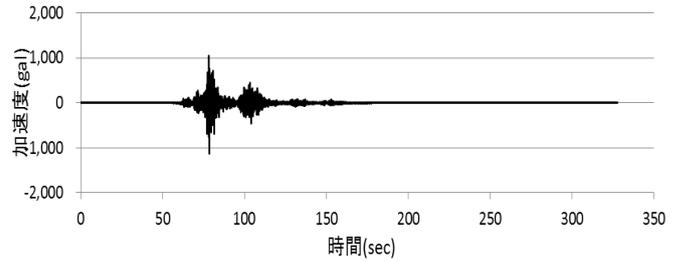


図-4 対象地震動の時刻歴波形

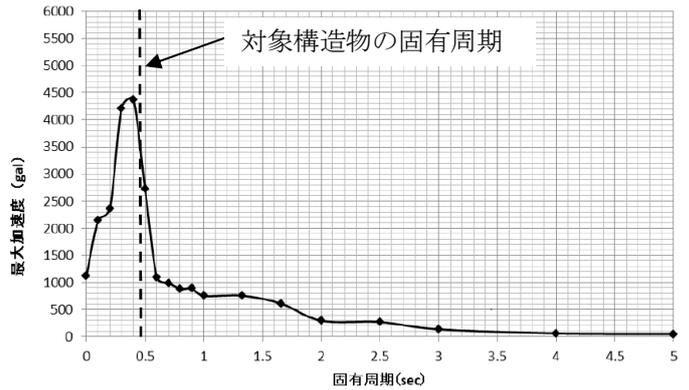


図-5 対象地震動の応答スペクトル

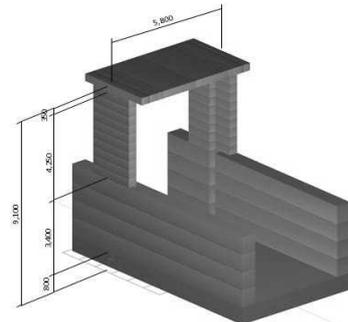


図-6 モデル（無対策）

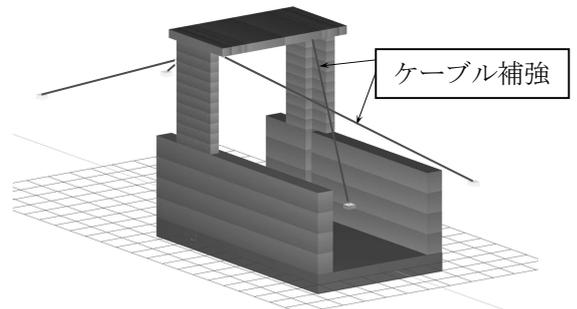


図-7 モデル（ケーブル制震工法）

3.2 解析結果

解析の結果から次のとおりケーブル制震工法の効果が検証された。**図-8**は無対策とケーブル制震工法による対策済みの調節堰天端の変位の時刻歴を示しているが、対策により大きく変位が減少しているのが分かる。また**図-9**は無対策時の調節堰天端と水路壁天端の変位の時

刻歴を示しているが、固有周期の違いから揺れ方が異なっており、このような揺れ方が異なる構造物をケーブルで連結することにより、減衰と制震の効果が増加しているものと推測される。

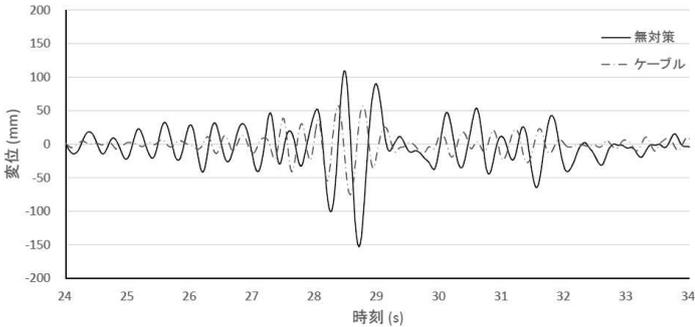


図-8 対策前後の調節堰天端変位の比較

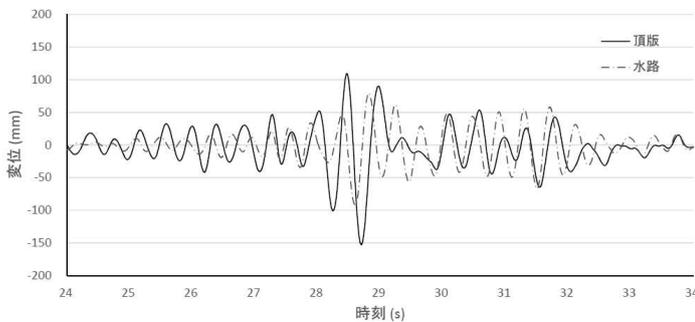


図-9 調節堰天端と水路壁天端変位の比較（無対策）

3.3 効果検証

無対策のモデルに対象地震動を入力すると表-1 に示すように頂版がせん断で NG となり、頂版と気中の側壁基部が曲げ変形で NG となった。水中部の基部が損傷しない理由としては、気中の側壁基部が終局変位を超えるまでのひずみを発生することにより地震のエネルギーを吸収し、この部分が緩衝材となり側壁の水中部では制限値を超えるひずみが発生しないものと考察できる。これら損傷に対する対策として、比較的補強しやすい気中部の制限値を超える箇所に従来対策で耐震補強を実施した場合（図-10）、無対策時で確認された気中の側壁基部での緩衝効果が得られないため、損傷は補強が困難な水中の側壁基部で発生することが分かる。すなわち、従来対策では気中部に加えて、通水切替を行い水中部の補強も行う必要があることとなる。

一方、ケーブル制震工法では、この対策のみでどの部位にも制限値を超える損傷が発生していないことから、対象構造物の揺れを制御して構造物の損傷箇所とその程度をコントロールすることができることを確認した。

表-1 解析結果による損傷部位

照査	部位	無体策	気中部のみ従来対策	ケーブル制震
せん断	頂版	NG (1.23)	OK	OK
	側壁 (気中)	OK	OK	OK
	側壁 (水中)	OK	OK	OK
曲げ	頂版	NG (2.58)	OK	OK
	側壁 (気中)	NG (2.85)	OK	OK
	側壁 (水中)	OK	NG (1.27)	OK

※カッコの数値は、応答率（応答値／制限値）で、NG は応答値が制限値を上回っていることを示す

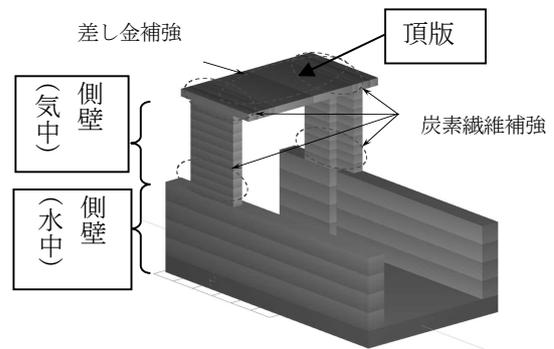


図-10 従来対策による気中部の対策

4. ケーブル制震工法の適用性

ケーブル制震工法の有用性を検証するために、対象地震動の大きさ、対象構造物の規模及び強度を数パターン解析した。対象地震動は、中央防災会議から公表されている南海トラフ地震動からほぼ 200gal 刻みになるよう 6 ケース、直下型を 1 ケース選定した。図-11 は対象構造物の規模と強度を 1 つの指標とする A 値というものを考案しケーブル制震工法の適用性を示したものである。

$$A \text{ 値} (m^3/kN) = \frac{10 \times \text{全高} \times \text{全幅} \times \text{奥行き}}{\text{水中壁せん断耐力}}$$

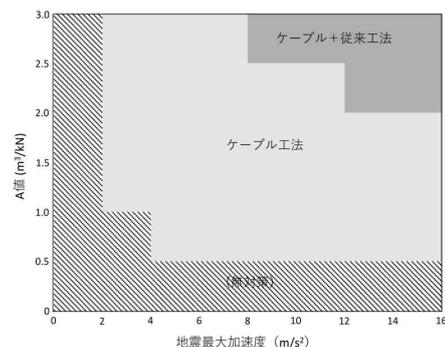


図-11 ケーブル制震工法の適用性（直接基礎）

図-11 は直接基礎ケースのものである。横軸に地震動の大きさをとり、縦軸の A 値は数値が大きくなるほど規模が大きく強度が弱いことを示している。左下から右上にいくに従い構造物には厳しい条件となる。しかしながら、ケーブル制震工法は、図上右上の構造物に厳しい条件では、一部従来対策との組み合わせが必要となるが、この図の範囲では全ての条件で効果があることが分かった。

次に、ケーブル制震工法と従来対策との経済比較を行ったものが図-12 である。図-11 の A 値の中央値である 1.5 での経済比較であるが、最大加速度 400gal を超えるとケーブル制震工法が優位となっている。

以上の検討から、ケーブル制震工法は地震動の大きさ、対象構造物の規模及び強度にかかわらず効果があり、ほとんどのケースで従来対策より経済的にも有利であることが分かった。

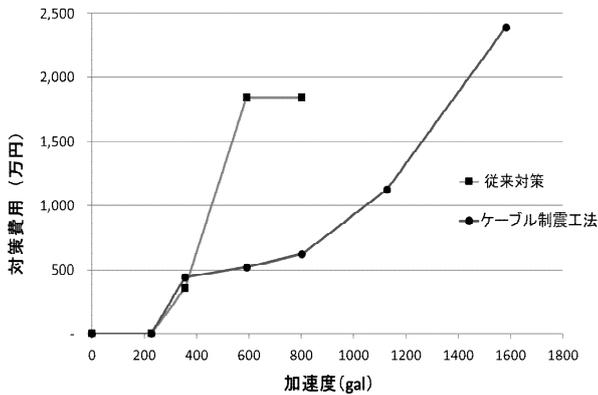


図-12 ケーブル制震工法と従来対策の経済比較

5. 今後の展開

これまでの検討から、ケーブル制震工法は水路附属施設である調節堰に対しては、従来対策と比較して施工面でも経済面においても有用で合理的な工法であることが解析上検証することができた。ただし、実際の構造物に適用するための課題として、既設の構造物に悪影響を与えることなく緊張することが可能なかの確認が必要であり、地震時における水門の挙動が解析と再現性があるのかということも確認が必要である。そこで今年度、国立大学法人富山大学と協力し、木曾川用水の飛島調節堰をモデルとして実証試験を行っている。

実証試験の目的は、以下の2つである。

- ① 緊張作業時における既設構造物の安全性確認のため、既設構造物の多側面にひずみ計を設置し、既設構造物に発生する応力を確認しながら安全に4本のケーブルにプレロードを導入することができるか確認す

る。ケーブルの緊張は、事前解析により、既設構造物に悪影響を及ぼさない応力変化を算出して、これを管理基準値（偏心 10%以内で緊張）とし構造物の安全性を確認しながら行う。

- ② 図-13 に示すように地震計を設置し、ケーブル設置後約半年間計測して、その間発生した地震による計測値と再現解析により効果を検証する。

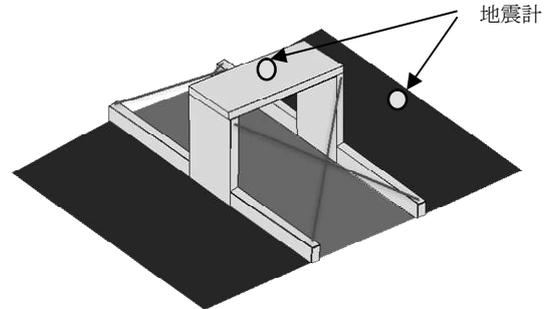


図-13 ケーブル設置効果の検証

令和元年7月23日にケーブルの緊張を実施した（写真-2）。現在は地震観測期間中であり、既設構造物のひずみおよびケーブル張力は引き続き計測している。



写真-2 ケーブル緊張完了

実証試験を経て、ケーブル制震工法の採用に向けた課
実証試験を経て、ケーブル制震工法の採用に向けた課題の抽出とその対応を検討し、類似構造物への適用を目指している。なお、ケーブル制震工法は「塔状構造物の制震構造」という名称で特許出願中（審査請求中）である。

最後に、特許共同出願および試験施工の実施にあたり、共同研究者としてご助言、ご協力いただいている国立大学法人富山大学大学院原隆史教授、竜田尚希助教に感謝の意を表します。