水門端堰柱の地震時土圧に関する模型実験および動的解析

1. はじめに

河川管理施設の水門は、ゲート全閉時に周辺堤 防と一体となって堤防機能を発揮することが求め られるため、その端部に位置する構造壁(端堰 柱)は堤防からの土圧に抗する構造となっている。 また、写真-1に示すように、水門の堰柱は地上に 突出した門柱やゲート操作台等を支持する場合が 多いため、特に端堰柱は、地震時に自由振動する 構造体と、地盤との相互作用の影響を受ける抗土 圧構造物から構成される構造を有し、複雑な地震 時挙動を示すものと考えられる。

その耐震性評価にあたって適用される静的照査 法¹⁾では、端堰柱の前面側(支川の河道側)に向 かう躯体慣性力と地震時土圧を同時に作用させる ため堰柱基部や床版端部に非常に大きな耐荷力が 必要となる一方、既往の地震において水門の端堰 柱や床版に損傷が生じた事例は確認されていない のが現状である。また、上述した構造の複雑さの ため、土圧理論で仮定されるように壁体と背面土 が一体的に挙動しない可能性が考えられ、慣性力 と地震時土圧がどのような大きさの組合せで作用 するかについては未解明な点が多い。

そこで、著者らは、動的遠心力模型実験と動的 FEMによるその再現解析により、水門端堰柱の 地震時挙動に関する分析を行った。本報では、こ れらのうち主として動的FEM解析に基づく分析 の結果について報告する。

2. 検討の方法

2.1 解析対象とした実験の概要

まず、解析対象とした実験の概要について示す。 実験方法及び結果の詳細は文献2)に示している。

実験で想定したのは、単径間の引き上げ式ゲートを有するU形水門の実構造物である。これに対し、模型実験は、各部の質量、剛性等の相似則を 考慮した1/60モデルの模型に対し、60Gの遠心力

Dynamic Centrifuge Test and Dynamic Analysis of Seismic Earth Pressure Acting on the Edge Walls of Water Gates

谷本俊輔·佐々木哲也

場で加振を行ったものである。以降に示す数値は、 全て実物スケールに換算した値である。

模型概要を図-1に示す。模型の形状寸法は同図 の中心線(CL)に対して対称であるため、模型 の左半分のみを図示している。

門柱、堰柱および床版の模型はいずれもアルミ ニウム製であり、曲げ剛性が実物の降伏曲げ剛性 と概ね一致するように部材厚を設定している。門 柱天端に設置した錘1では、ゲート操作室、巻き 上げ機、ゲート操作台、ゲート(上側1/2)等の 自重(455t相当)を模擬している。また、堰柱天 端の錘2では、ゲート(下側1/2)、管理橋等の自 重(569t相当)を模擬している。堰柱基部と剛結 合した床版は、層厚3m、相対密度*Dr*=90%の東 北硅砂7号による支持層に直接支持させた。堰柱 背面土(堤防)は、層厚12.6m、締固め度 *Dc*=90%の江戸崎砂により模した。模型地盤の形



写真-1 引き上げ式ゲートを有する水門の例



状は紙面奥行き方向に一様である。

入力地震動は、道路橋示方書³⁾に示されている 動的解析用標準波形のうちI-I-3(新晩翠橋周辺地 盤上、NS成分)である。

なお、本実験は背面土のない条件に対しても 行っており、背面土の有無による2ケースの比較 から、背面土が堰柱の応答に対して地盤反力とし て寄与すること、堰柱の減衰を向上させる効果を 有すること等を確認している²⁾。

2.2 動的FEM解析の方法

続けて、上述の模型実験に対して行った動的 FEM解析の方法を以下に示す。モデル概要を図-2に示す。解析モデルも形状寸法が中心線(CL) に対して対称であるため、左半分のみを図示して いる。

門柱、堰柱および床版については、文献4)を参 考に、平面要素とはり要素を組合せた線形弾性体 としてモデル化した。背面土および基礎地盤につ いては平面要素とし、多方向の繰返しせん断特性 を適切に表現するため、拘束圧依存性を考慮した 双曲線モデルを多重せん断ばねモデル⁵に適用す ることでモデル化した。構造部材と地盤の境界面 にはジョイント要素を配置することで、すべり及 び剥離を表現した。

モデルの底面境界は固定境界、側面境界は鉛直 ローラーとした。

3. 解析の結果

3.1 固有振動特性

動的解析に先立ち、系全体を構造物系と地盤系 の2つに分けて各々の固有振動解析を行った。

構造物系の主要なモードにおける固有振動特性 を表-1、モード図を図-3に示す。モデル全体が左 右対称形であるため、偶数次の固有振動モードは 奇数次の逆対称モードとなっている。奇数次と偶 数次の固有振動数が同程度であり、かつ、偶数次 のモードの有効質量比が非常に小さいのはこのた めであり、この解析における偶数次のモードは重 要ではない。そこで、奇数次のモードに着目する と、1次、3次モードで門柱と堰柱の変形がそれ ぞれ同位相、逆位相となっている。

地盤系の1次固有振動数fi=3.607Hzであり、今 回検討対象とした水門では構造物系の3次固有振 動数fs=3.800Hzと地盤の1次固有振動数が近接す る条件となっている。

3.2 動的FEMによる実験の再現状況

図-4に示す各部の時刻歴から、動的FEMによ る実験の再現状況を確認する。構造物及び背面土 の応答はモデルの左右で特徴的な傾向の違いが認 められなかったため、ここでは左側の堰柱の応答 のみについて述べる。なお、加速度については右 向きを正、曲げモーメントについては背面側引張 を正として表示している。

応答加速度については、門柱天端において短周 期成分が小さめに算出されているものの、この点 を除けば大きさ、波形形状が概ね再現されている。 堰柱に作用する土圧についても増減傾向がよく再 現されており、特に上部においては一部時刻で土 圧が零となる(剥離が生じる)様子が再現されて いる。これらの結果として、門柱基部と堰柱基部 の曲げモーメントは大きさや波形形状が良好に再 現されている。



図-2 モデル概要図



図-3 構造物系の固有振動モード

堰柱基部の断面力と堰柱背後の土圧の推移に着 目すると、静的照査法における着目時刻は堰柱に 正側への大きな曲げモーメントが発生する時刻で あるが、実験・解析ともに、このタイミングにお ける背面土圧は非常に小さく、土圧が部材断面力 にあまり寄与していないことが推察される。

3.3 堰柱に作用する地震時土圧とその発現メカニズム

次に、解析結果から、堰柱に対する地震時土圧 の発現状況やメカニズムを確認する。

図・5は、堰柱背面の土圧と堰柱・背面土 (Line2)間の相対変位の関係を示したものであり、 土圧と相対変位の関係がわずかに右上がりの相関 を有すること、履歴ループ形状が大きく膨らんで いることが特徴的である。これは、土圧が堰柱・ 背面土間の相対変位に応じて発現されている様子 と、背面土がエネルギーを大きく吸収している様 子を示すものである。

そこで、解析で得られた堰柱天端と背面土天端 の変位時刻歴を図-6により確認する。例えば90~ 94s付近に見られるように、周期0.5s程度の成分 は振幅、位相ともに両者で概ね一致している。こ れは、堰柱の変形が卓越する構造物系の3次固有 振動数と地盤系の1次固有振動数が近接している ことによるものであり、この周波数成分のみにつ いて言えば堰柱と背面土が一体的な挙動を示して いる。その一方で、95.5s、99.0s、100.5s付近の ように堰柱が背面土の応答変位を大きく上回るタ イミングが存在する。これらのタイミングは、図 -4において門柱の応答加速度のうち周期1.5s程度 の成分が負側のピークを示す時刻と一致している ことから、構造物系の1次モードによる慣性力が 堰柱に大きな相対変位を生じさせたものと考えら れ(加速度と慣性力の作用方向が逆向きとなる点 に注意を要する)、構造物系と地盤系の固有振動 特性の違いに起因した挙動であると言える。

堰柱基部のモーメント最大時刻においても、図
-7に示すように、堰柱には背面土の2倍以上の変
位が生じている。こうした変位量の差異に起因し、
背面土天端から3m程度の範囲で背面土との間に
剥離(土圧が零)が生じたり、3.5~8.0m程度の
範囲で土圧係数K=0.20程度となるなど、土圧は
小さな値にとどまったものと考えられる。背面土
天端から8.0m以深では大きな土圧が発生してい
るが、堰柱基部(背面土天端−10.8m)からの

アーム長を考えると、堰柱基部の曲げモーメント への寄与は小さい。

なお、静的照査法で適用される修正物部・岡部 の方法を用いると、堰柱基部のモーメント最大時 刻 (98.928s) 付近における地表最大加速度*PGA*





≒ 400galに対し、地震時主働土圧係数KEA = 0.57と算出された。したがって、実際に堰柱に作用した土圧は、深さ方向の大部分でその1/3程度以下の大きさであったことが分かる。この相違の原因は、次のように考えられる。

修正物部・岡部の方法などの土圧理論では、地 震時土圧の算出にあたり、背面土に前面方向への 一様な慣性力が作用した状態で、かつ、背面土が 極限状態(主働破壊)に達した状態が仮定されて いる。このため、壁体の変位量の大小による土圧 の違いは考慮されず、壁体・背面土間の大きな相 対変位により生じる瞬間的な剥離なども考慮され ない。また、図・8からは、モーメント最大時刻に おいて背面土の応答加速度が堰柱背後で局所的に 変化するなど、非一様であることが土圧理論と大 きく異なる。土圧理論による地震時土圧が過大と なったことの理由は、こうした動的応答特性が考 慮されていないことによるものと考えられる。

4. まとめ

本報では、地震時挙動が複雑な水門端堰柱を対 象とした動的FEM解析により、動的遠心力模型 実験の結果を再現するとともに、端堰柱に作用す る地震時土圧について考察を行った。得られた知 見は次のとおりである。

- ・ 堰柱基部の断面力が最大となる時刻で、堰柱 に作用する背面土圧が極小値を示した。また、 このタイミングにおける端堰柱への作用土圧 は、土圧理論による算出値に比べて0~1/3倍 程度の小さなものにとどまっていた。
- ・ 土圧理論による地震時土圧が過大となった理由としては、堰柱上部の構造体(門柱等)の自由振動により壁体(堰柱)と背面土が一体的に挙動しないことや、背面土の応答加速度分布が非一様であったことが挙げられる。

地震時土圧に及ぼすこうした動的応答の影響を 考慮することで、水門端堰柱の耐震性評価をより 合理的に行うことができる可能性が考えられる。 ただし、本報に示した動的FEMは実務者にとっ て使いやすい方法とは言い難いことから、本報に 示したような実験・解析事例を蓄積し、静的照査 法に適用できるような簡易評価法を検討すること が、今後の課題として挙げられる。



2-8 モーメント最大時刻 (98.928s) における 地盤の水平加速度分布

参考文献

- 国土交通省水管理・国土保全局治水課:河川構造 物の耐震性能照査指針・解説、2012.2
- 谷本俊輔、佐々木哲也:水門端堰柱の応答特性に 関する動的遠心力模型実験、第53回地盤工学研究 発表会発表講演集、pp.1485~1486、2018.7
- (公社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2017.11
- Kimura, M. & Zhang, F.: Seismic evaluations of pile foundations with three different methods based on three-dimensional elasto-plastic finite element analysis, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.113-132, 2000.10.
- 5) Towhata, I. & Ishihara, K.: Modelling soil behavior under principal stress axes rotation, *Proc. of 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya, Vol.1, pp.523-530, 1985.



研究グループ土質・振 動チーム、(併)構造物メ

ンテナンス研究セン

主任研究員

TANIMOTO Shunsuke

4-





土木研究所地質・地盤研 究グループ土質・振動 チーム 上席研究員 SASAKI Tetsuya