

3次元 FEM 解析を用いた起伏式ゲートを有する

中空断面堰柱に対する耐震性能照査

パシフィックコンサルタンツ (株) ○小野寺 貴
パシフィックコンサルタンツ (株) 松浦 功

論文要旨

既設の河川構造物における耐震補強設計では、河川構造物の耐震性能照査指針・解説¹⁾(以下、河川指針)に基づいた耐震性能照査を実施し、補強要否や補強工法の検討を行う。ただし、特殊構造の場合は、河川指針では安全性を確認することが難しい場合がある。

起伏式ゲートを有する堰柱は、ゲートの開閉を担う駆動部が堰柱内部に設置されており、一般的な門柱を有する堰柱とは異なる特殊な構造である。起伏式ゲートを有する堰柱における耐震性能照査の課題は、河川指針に準じた地震時保有水平耐力法(以下、保耐法)を用いた照査を満足した場合であっても、中空断面堰柱における側壁部(以下、側壁部)に、浸水につながるひび割れが発生しているか把握できないことが挙げられる。地震時において側壁部にひび割れが生じ、堰柱内部が浸水すると、起伏式ゲートの開閉性に甚大な被害が及ぼされるが、保耐法ではひび割れの発生有無や発生箇所を詳細に把握することは難しい。

本論文では、起伏式ゲートを有する堰柱に対して保耐法を用いた耐震性能照査に加えて、3次元 FEM 解析を実施し、側壁部の安全性を確認した結果を述べる。3次元 FEM 解析によりひび割れ発生箇所を可視化し、堰柱の安全性を確認した。また、主応力が作用している箇所にせん断力が集中する傾向があり、中立軸から離隔のある中空断面の側壁部にはせん断力が大きく作用しないことを3次元 FEM 解析結果から確認することができた。

キーワード：3次元 FEM 解析、起伏式ゲート、中空断面堰柱、耐震性能照査

まえがき

河川構造物の一つである堰は、洪水のスムーズな流下や農業用水の取水位の確保、塩害の防止等を目的として建設されている、我々の生活に欠かせない重要構造物である。そのため、既設の河川構造物に対する耐震補強設計では、河川指針に基づいて、耐震性能照査を実施し補強要否や補強工法の検討を行う。ただし、特殊構造の場合(河川指針では網羅できない、特殊形状を有する河川構造物の場合)については河川指針による耐震性能照査に加えて、構造物の特殊性を踏まえた更なる照査を実施することで、地震時における河川構造物の安全性を確認することが望ましい。

起伏式ゲートを有している堰柱(図-1)は、ゲートの開閉を担う駆動部が堰柱内部に設置されており、一般的な門柱を有する堰柱とは異なる特殊な構造である。起伏式ゲートを有する堰柱における耐震性能照査の課題は、河川指針に準じた保耐法の結果だけでは、側壁部にひび割れが生じているか判断できないことが挙げられる。地震時において側壁部にひび割れが生じ、堰柱内部が浸水すると、起伏式ゲートの開閉性に甚大な被害を及ぼすが、河川指針の照査方法ではひび割れの発生有無や発生箇所を詳細に把握



図-1 耐震性能照査を実施した河口堰

することは難しい。

本論文では、起伏式ゲートを有する堰柱に対して保耐法を用いた耐震性能照査に加えて、3次元 FEM 解析を実施し、側壁部の安全性を確認した結果を論述する。以下では、照査対象の構造諸元と保耐法を用いた耐震性能照査を示したうえで、設計上の課題について述べる。加えて、3次元 FEM 解析によりひび割れの発生箇所および応力分布の確認結果と確認結果から得られた知見について述べる。

1. 設計上の課題

1. 1. 構造諸元

本論文で扱う中間堰柱の構造諸元を以下に示す。また、断面図を図-2に、正面図および平面図を図-3に示す。

- ・ゲート型式：起伏式ゲート（扉体高：2.64m）
- ・開閉方式：油圧シリンダ両端駆動式
- ・基礎：杭基礎（鋼管杭）（ ϕ 600, L=24.0m）
- ・堰柱使用材料： $\sigma_{ck}=21\text{ N/mm}^2$, SD295
- ・管理橋：プレートガーターI桁橋（3連）
- ・地盤種別：II種地盤



図-4 中間堰柱の現地写真（側面）

1. 2. 現場状況

中間堰柱の現地写真（側面）を図-4に示す。上流側には管理橋を兼用する歩道橋が架橋されている。中空断面内部の現地写真を図-5に示す。中空断面内部にはゲートの開閉を担う駆動部が堰柱内部に設置されている。

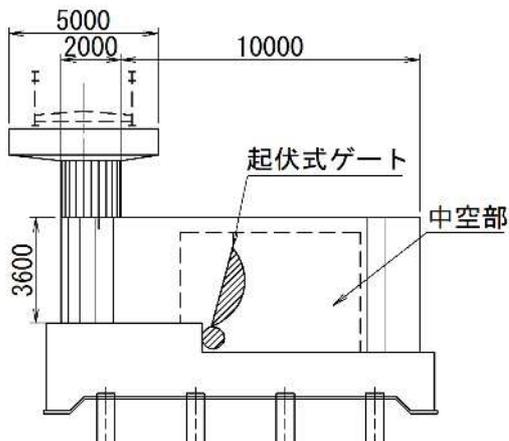


図-2 断面図



図-5 中空断面堰柱内部の現地写真

正面図

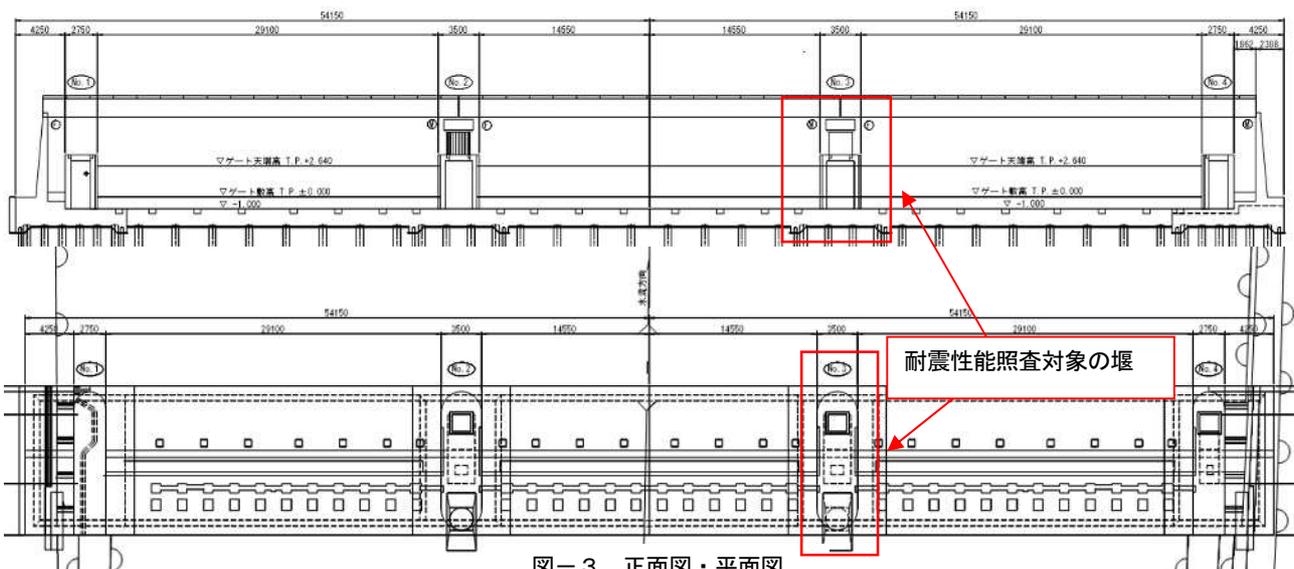


図-3 正面図・平面図

1. 3. 河川指針に基づいた保耐法による照査

河川指針に基づき保耐法を用いて耐震性能照査を実施した。骨組みモデルの節点振り割り図(No.3 堰柱)を図-6に示す。破壊形態としてはせん断破壊型であったため、地震時の設計水平震度 k_{hc} がせん断破壊時の震度 k_{hs0} 以下であることを照査した。なお、本論文では側壁部に焦点を当てているため、水流直角方向に対する結果のみ整理している。照査結果を表-1に示す。地震時の設計水平震度 k_{hc} がせん断破壊時の震度 k_{hs0} 以下であり、耐震性能を満足していることが分かった。解析結果が現況照査を満足したのは、堰柱の断面形状が地震等の外力ではなく、起伏式ゲートの開閉装置を設置するスペースが確保できるよう決定しているためと考えられる。

1. 4. 耐震設計上の課題

保耐法による照査で用いる曲げモーメント M -曲率 ϕ 関係の算出にあたっては、側壁部(図-7)も含め鉄筋が配置されているすべての範囲を考慮して算出している。したがって、ひび割れ曲率に達した際に、ひび割れが発生する箇所が具体的に分からないという課題がある。一方、せん断の照査においては、側壁部はせん断耐力算出時の有効断面として考慮できず、照査対象外のため(図-8)、せん断ひび割れの発生有無や発生箇所は確認できないという課題がある。地震時において側壁部にひび割れが生じ、堰柱内部が浸水すると、起伏式ゲートの開閉性に甚大な被害を及ぼす。そこで、構造物の特殊性を踏まえた更なる照査として、3次元FEM解析を実施する。

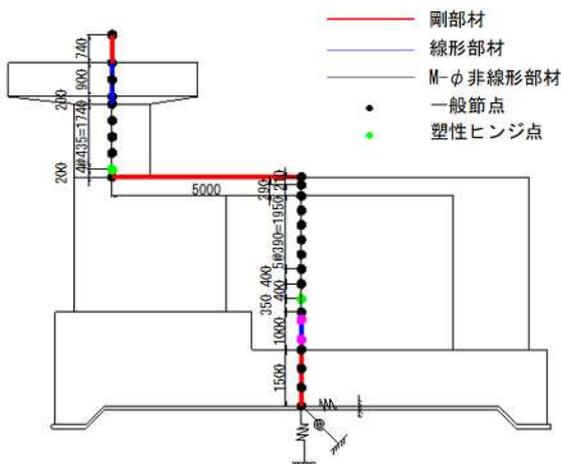


図-6 骨組みモデルの節点分割

表-1 保耐法による耐震性能照査結果

L2地震動	設計水平震度 k_{hc}	せん断破壊時の震度 k_{hs0}	照査結果	超過率
タイプI	1.296	1.346	OK	0.96
タイプII	0.994	1.346	OK	0.74

※設計水平震度 k_{hc} は構造物の固有周期から算出される水平震度 k_{h0} , 地域別補正係数 C_z , 構造物特性補正係数 C_c の積
※せん断破壊時の震度 k_{hs0} は堰柱の構造諸元から整理されるせん断耐力より算出

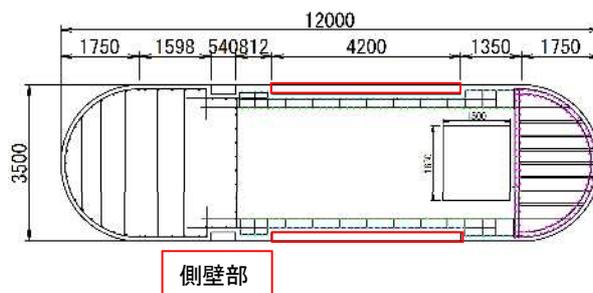
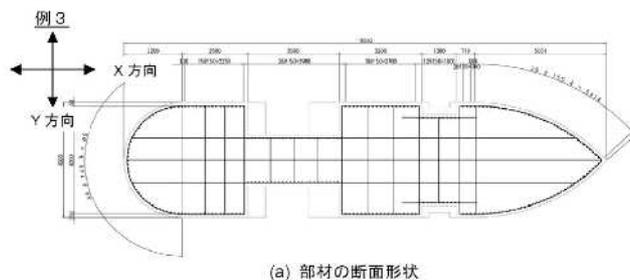
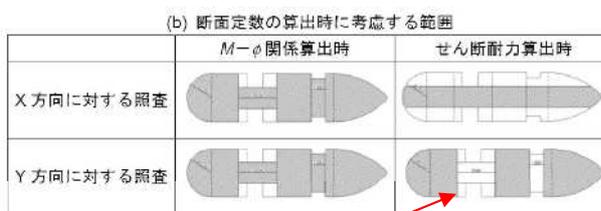


図-7 照査対象の部材断面



(a) 部材の断面形状



側壁部は有効断面として見込まない
■ : 有効断面

図-8 河川構造物の耐震性能照査指針(案) 一問一答²⁾

2. 3次元FEM解析による耐震性能照査

2. 1. 解析概要

1章で述べた通り、保耐法では側壁部に主応力やせん断応力に伴うひび割れが生じているか判断できないため、3次元FEM解析を実施し、設計水平震度が堰柱に作用した際のひび割れ位置をひび割れ図として可視化することにより安全性を確認する。また、側壁部が位置している堰柱天端(中央)の水平震度 kh ・水平変位 δ 関係 (kh - δ 関係)および構造物全体の損傷イベントをプロットする。

堰柱の3次元非線形FEM解析モデルは六面体ソリッド要素としてモデル化した。モデル図を図-9および図-10に示す。全体座標はX軸方向を水流方向、Y軸を水流直角方向、Z軸を鉛直方向と定義した。本解析では、水平震度 kh を一方向のみに漸増する単調载荷の解析(静的プッシュオーバー解析)であり、荷重载荷方向は水流直角方向である。

2. 2. 解析結果

解析結果を図-11に示す。設計水平震度が作用するまでに、門柱基部および堰柱基部にひび割れが生じており、また門柱基部で主鉄筋の降伏が起こっている。また、門柱基部・堰柱基部いずれもせん断破壊に至っていないことが分かる。ひび割れの発生位置を確認するために、設計水平震度が作用した際のひび割れ図を図-12に示す。ひび割れ位置は赤線で表示している。歩道橋が架橋されている位置直下における堰柱基部および門柱基部にて、ひび割れが生じていることが分かる。また、側壁部にはひび割れが生じていないことが分かり、安全性を視覚的に確認することができた。

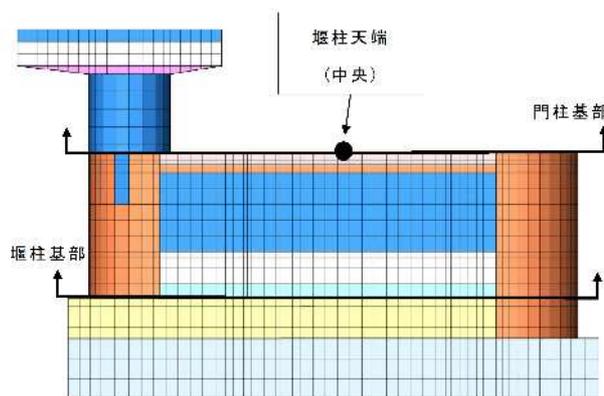


図-10 FEM解析モデル(側面図)

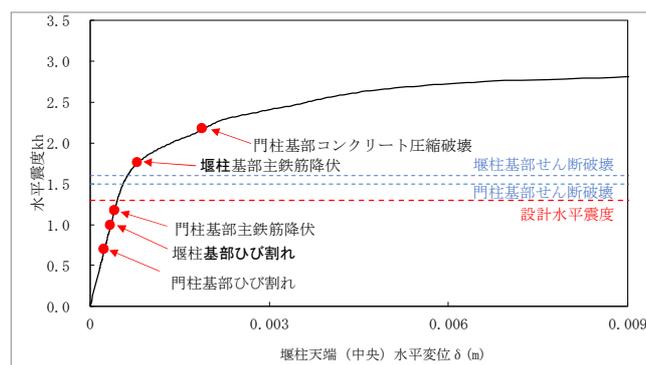


図-11 水平震度-堰柱天端(中央)水平変位グラフ

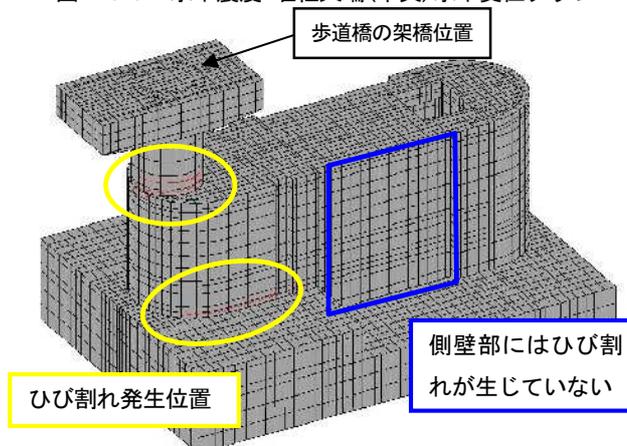


図-12 ひび割れ図(設計水平震度作用時)

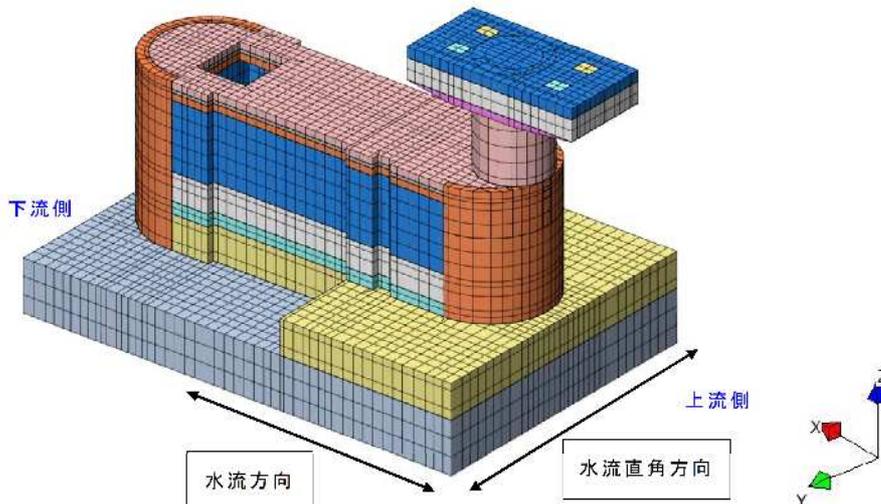


図-9 FEM解析モデル(鳥瞰図)

2. 3. FEM 解析結果の考察

設計水平震度が堰柱に作用した際の主応力・せん断応力分布から結果を考察する。まず、主応力分布図(単位: kN/m^2)を図-13に示す。主応力は門柱基部および門柱直下の堰柱基部に集中していることが分かる。また、側壁部における主応力分布図(中空部の断面図)を図-14に示す。最大主応力は 536kN/m^2 であり、コンクリートのひび割れ強度は $1,751\text{kN/m}^2$ (コンクリート強度: 21N/mm^2)であるため、ひび割れ強度に達していないことが分かる。続いて、せん断応力分布図(堰柱基部の平面図)を図-15示す。せん断応力は門柱と堰柱付近に集中しており(最大値: 871kN/m^2)、側壁部にはひび割れが発生するようなせん断力が作用していないことが分かる。せん断応力分布から、主応力の大きい要素においてせん断応力が大きくなる傾向にあることが確認された。すなわち、中立軸からの離隔が大きく、更に管理橋の支柱が設置され、主応力が大きい上流側外縁部においてせん断応力が大きくなることが分かる。河川構造物の耐震性能照査指針(案)一問一答²⁾の解説において、切り欠きのある断面部はせん断耐力算出時に控除することとされている(図-8)。これは、切り欠きのある断面は中立軸から離隔のある最もせん断応力が大きくなる断面が切り欠かれていることから、せん断耐力として期待できないことためであると考えられる。また、本論文の堰柱は起伏式ゲートを有する構造であり、一般的な門柱を有する堰の堰柱と比較して主応力や地震時のせん断力が小さい。上流側の管理橋支柱付近は支柱による影響があるものの切り欠き部分からの離隔があるため、切り欠き部分の発生せん断応力は小さいものと考えられる。

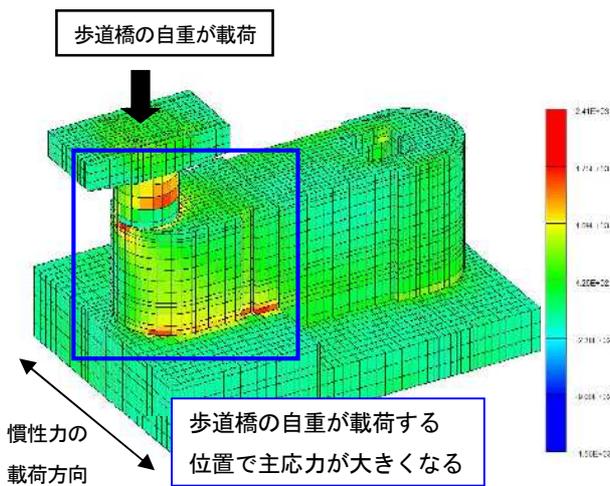


図-13 主応力分布図(設計水平震度作用時)

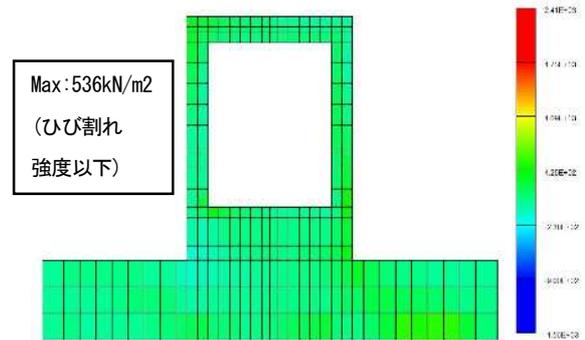


図-14 主応力分布図(中空部の断面図)

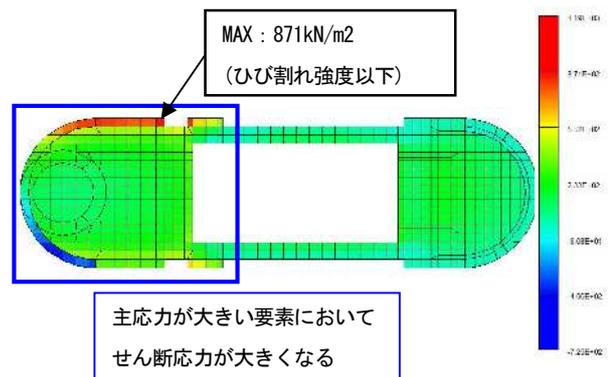


図-15 せん断応力図(堰柱基部の平面図)

あとがき

本論文では、起伏式ゲートを有する堰柱に対する3次元FEM解析結果について述べた。3次元FEM解析は、保耐法では把握することができない、ひび割れの発生有無や発生箇所および主応力・せん断応力分布を視覚的に確認することで地震時の安全性が確認できた。

参考文献

- 1) 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-IV.水門・樋門および堰編, R2.2
- 2) 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(案)一問一答, H19.11, p.40-42