

二次元解析を用いた揚排水機場の耐震性能照査における
応答値の算出方法に関する検討資料

令和6年3月

一般財団法人国土技術研究センター

はじめに

本資料は、国土交通省 九州地方整備局より受託した「令和3年度 河川構造物の耐震性能照査法に関する検討業務」において、揚排水機場の耐震性能照査手法に係る検討成果の一部をとりまとめたものである。

これまで、揚排水機場の耐震性能照査は「河川構造物の耐震性能照査指針・解説 V. 揚排水機場編」（平成24年3月、国土交通省 水管理・国土保全局 治水課）¹⁾に基づき実施されているが、揚排水機場の耐震性能に基づく限界状態を具体的かつ定量的に示すことや、限界状態を超えないことの照査についても、より具体的な方法の提示が求められている。また、耐震性能照査に用いる構造解析手法の具体的な選定条件は示されていない状況にある。

揚排水機場の機場本体を構成する各部材の配置、耐荷機構は複雑であり、これらが地震時挙動に与える影響を考慮した構造解析を実施することが、揚排水機場の適切な耐震性能照査及び耐震対策に繋がるものと考えられる。

耐震性能照査は、実務上、一般に三次元ではなく二次元の構造解析で実施されており、解析に用いる二次元モデルの作成方法によっては、地震による変位を実際よりも過大評価し、結果として対策規模が不必要に大きくなる恐れがある。このため、上記業務では、機場本体を構成する各部材の耐荷機構等を適切に反映し、実際に近い変位を算出できるモデル化手法を検討している。なお、検討にあたっては、国土交通省が管理する揚排水機場のうち、最頻的と考えられる施設規模・構造を持ち、比較的強い地震動を経験した施設を1つ選び、層間変形角に着目して三次元解析結果と二次元解析結果を比較している。

本検討結果は、すべての施設に適用可能な二次元モデル化手法を網羅するものではないが、機場本体を構成する部材の剛性に関する力学的メカニズムを考慮したものであり、揚排水機場の耐震性能照査の合理化に資することができれば幸いである。

目次

1. 検討対象施設	1
2. 二次元解析モデル化方法の検討	2
2.1. 三次元モデルを用いた構造解析	2
2.1.1. 構造解析手法	2
2.1.2. 地震力（応答震度）の算出	3
2.1.3. 解析モデルの作成	4
2.1.4. 解析における震度の作用方向	4
2.1.5. 解析結果	5
2.1.6. 考察	9
2.2. 二次元モデルを用いた解析	10
2.2.1. 構造解析ブロックの分割及び解析対象としたブロックの設定	10
2.2.2. 二次元解析の実施及び三次元解析結果との比較	12
2.3. まとめと考察	16

1. 検討対象施設

国管理の揚排水機場の施設規模・構造等の情報を整理し、以下に示すものが最頻的であることを確認した。

- ① 機場構造 : 一床式 (一床式：約 53%、二床式：約 30%)
- ② 主ポンプ形式 : 横軸斜流形式
(一床式構造における横軸斜流形式：約 37%、二床式構造における立軸斜流形式：約 70%)
- ③ 1 機場あたりのポンプ台数 : 2 台～3 台 (約 77%)
- ④ 1 台あたりのポンプ排水量 : 2 m³/s～5 m³/s (約 38%)
- ⑤ 機場深度 : 5 m～8 m (約 53%)
- ⑥ ポンプ設置年 : 1974 年～1992 年 (横軸斜流形式の約 61%)

上記に該当し、かつ比較的強い地震（最大加速度 4 m/s² 以上）を経験している機場として、十勝川水系利別川の池田排水機場を検討対象施設に選定した。当該機場は、平成 15 年（2003 年）十勝沖地震を経験しているが、排水機場の機能に支障をきたす被害は確認されていない。

検討対象施設の概要は以下に示すとおりである。また、機場本体及び基礎の構造図・平面図の抜粋を図 1-1 に示す。^{2), 3)}

- ① 機場構造 : 一床式 (SRC 構造)
- ② 主ポンプ形式 : 横軸斜流形式
- ③ ポンプ台数 : 2 台
- ④ 1 台あたりのポンプ排水量 : 4 m³/s
- ⑤ 機場深度 : 7.8 m
- ⑥ ポンプ設置年 : 1983 年
- ⑦ その他
 - ・ 機場本体延長（流水方向）：16.5 m、幅（流水直角方向）：9.9 m、高さ：7.8 m
 - ・ 基礎構造：杭基礎（鋼管杭 φ 600t9）

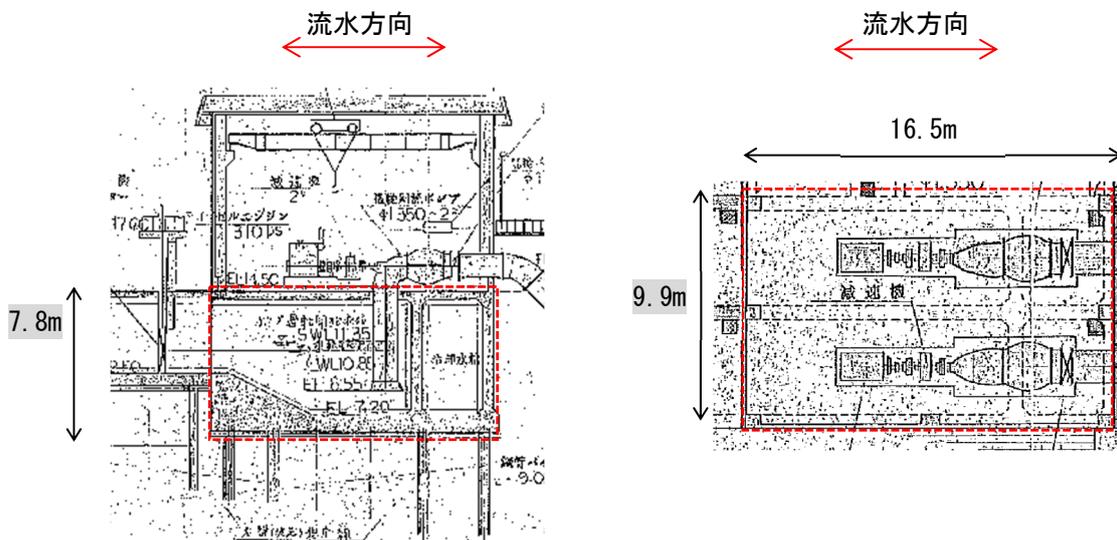


図 1-1 池田排水機場の機場本体及び基礎

2. 二次元解析モデル化方法の検討

平成 15 年(2003 年)十勝沖地震における池田排水機場の実際の応答値は確認できないことから、検討にあたっては、平成 15 年(2003 年)十勝沖地震における地震外力を与えた場合の応答値を、三次元モデルを用いた構造解析により算出した上で、それと同等の応答値を得られるような二次元解析モデル化の方法を検討することとした。以降は、三次元での構造解析手法、モデルの作成方法及び解析結果について述べたのち、三次元解析と同等の変位量の算出が可能な二次元解析モデル化方法の検討結果を整理する。

2.1. 三次元モデルを用いた構造解析

2.1.1. 構造解析手法

三次元モデルを用いた解析(以下、3D 解析)には応答震度法を用いた。応答震度法は、片山ら⁴⁾により地中ダクト横断面や地中送電線用立杭の解析のために提案された耐震計算手法であり、概略的な手順は以下に示すとおりである。

- [1] 地下構造物の存在しない地盤(自然地盤)の一次元モデルを作成し、対象とする地震動に対する地震応答解析を行う。
- [2] [1]で得られた自然地盤の応答変位の時刻歴データより、地下構造物が位置する深さの地盤において生じるせん断変形量が最大となる瞬間の時刻を特定する。応答震度法では、この時刻において地下構造物に生じる地震時応答も最大となるものと見なす。
- [3] [1]で得られた自然地盤の応答加速度の時刻歴データより、[2]で特定した時刻の地盤加速度の深さ方向分布を抽出し、これを重力加速度で除して、地盤の応答震度の深さ方向分布を得る。
- [4] 地盤・構造物の全体系を FEM でモデル化する。地盤要素の剛性には[1]で得られた収束剛性を用いる。
- [5] FEM モデルの各要素に[3]で得られた地盤の応答震度に対応する物体力を静的に作用させることで、地震時の構造物の応力を得る。

検討対象施設の構造的特性を考慮すると、周辺地盤をばねに置き換えてモデル化する応答変位法でも構造解析が可能と考えられたものの、本検討では、地震力(応答震度)の算出方法が明快であり、より細緻な検討が行えることから応答震度法を用いることとした。

なお、本検討では構造部材を線形弾性体としてモデル化した。この理由は、平成 15 年(2003 年)十勝沖地震において排水機場の機能に支障をきたす被害が確認されておらず、機場本体及び基礎の変位量が大きくなかったと考えられることである。

2.1.2. 地震力（応答震度）の算出

検討の対象とする地震動は、K-NET HKD092 で観測された平成 15 年（2003 年）十勝沖地震における加速度時刻歴波形⁵⁾を、一次元等価線形解析により引き戻した同地点の工学的基盤上面の波形とした。地盤の応答震度の算出にあたり、まず、地盤の一次元モデルに対し、一次元等価線形解析により地震応答解析を行い、全時刻における地盤の応答加速度及び応答変位の深さ方向分布および地盤の収束剛性を算出した。また、せん断変形量が最大となる瞬間の時刻として、機場本体の底版と頂版の変位の差を確認し、これが最大となる瞬間の時刻を抽出し、この時刻における地盤加速度の深さ方向分布を基に、地盤の応答震度の深さ方向分布を決定した。

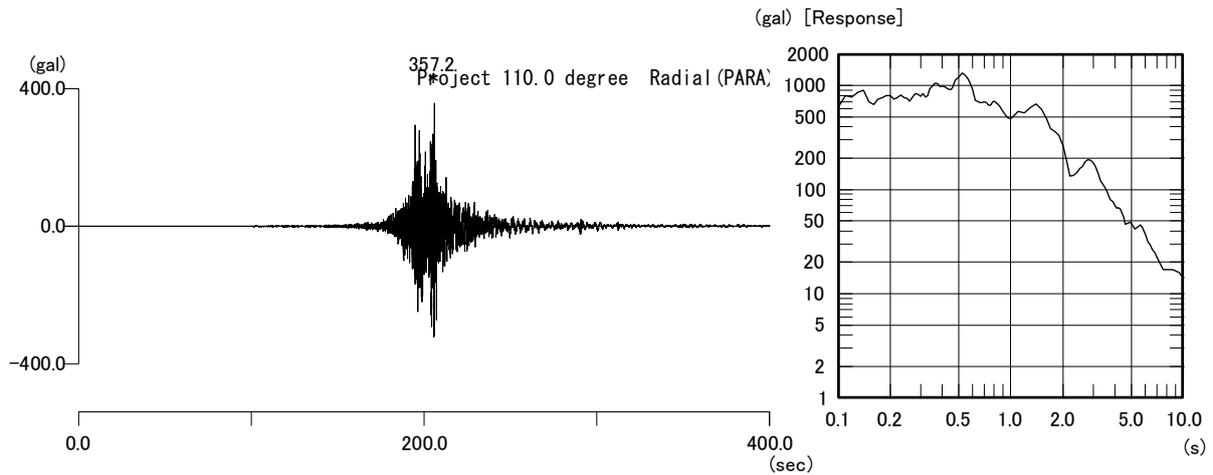


図 2-1 一次元等価線形解析に入力した工学的基盤上面の波形

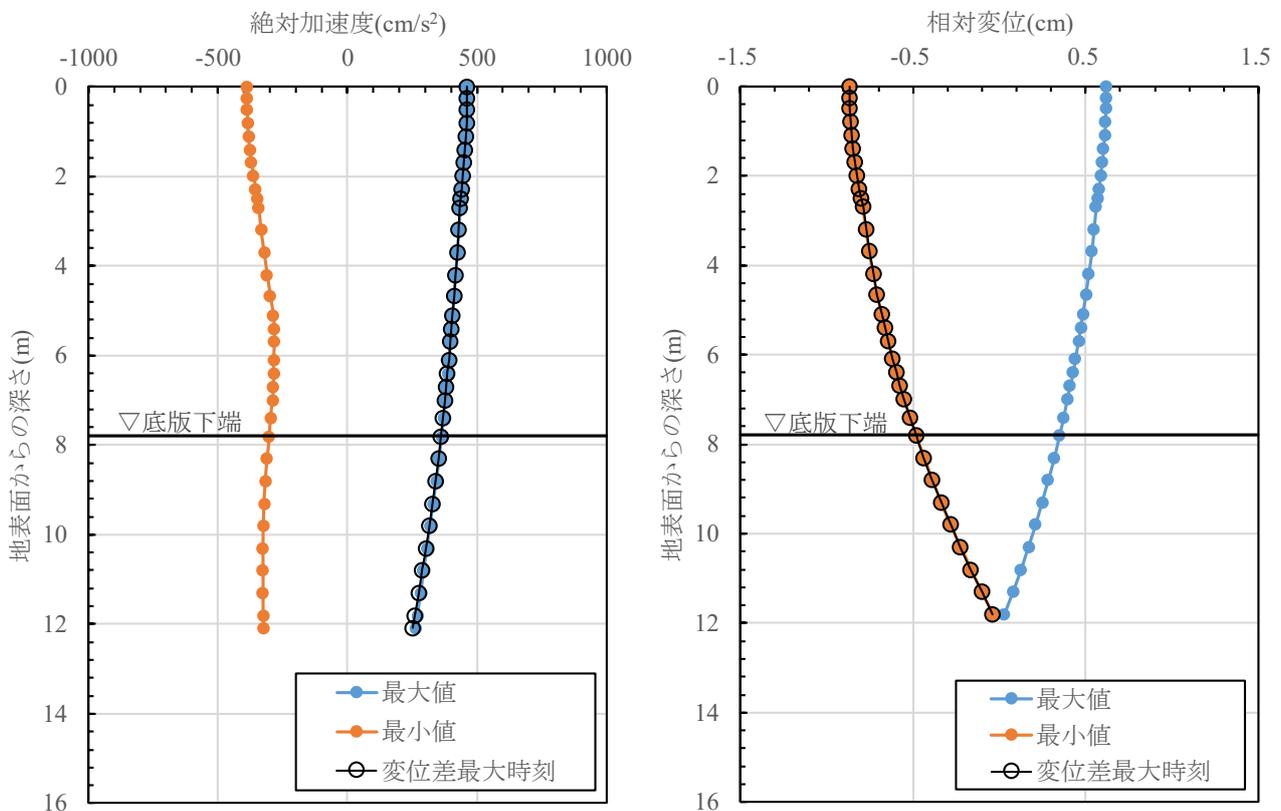


図 2-2 一次元等価線形解析結果（左：絶対加速度、右：相対変位の応答値深度分布図）

2.1.3. 解析モデルの作成

3D 解析におけるモデル化方法は以下のとおりである。

- ・ 機場本体：板曲げ要素を用いる。
- ・ 基礎杭：梁要素を用いる。
- ・ 地盤：6 面体 8 節点要素（ブリック要素）を用いる。
せん断剛性として一次元等価線形解析による収束剛性を用いる。

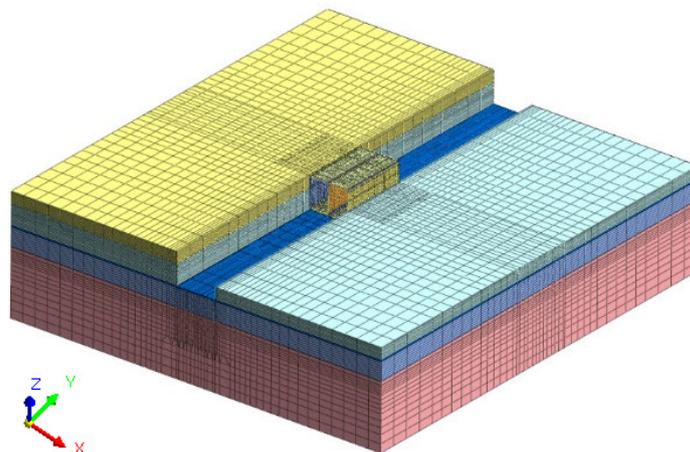


図 2-3 3D 解析に用いたモデル（全体）

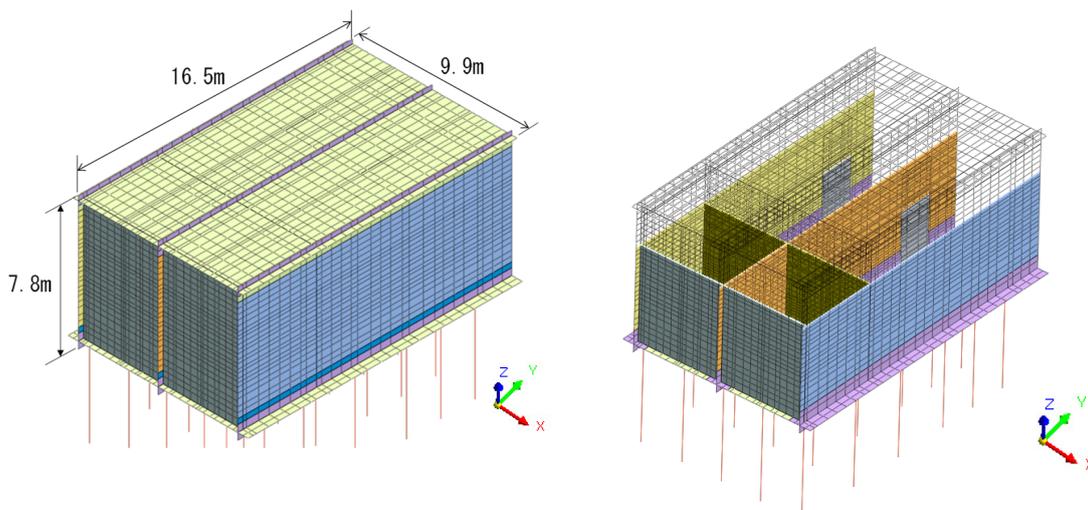


図 2-4 3D 解析に用いたモデル（機場本体及び基礎・右の図は上部を透過させたもの）

2.1.4. 解析における震度の作用方向

機場本体及び基礎と地盤の全体系のモデルに対し、2.1.2 で得られた地盤の応答震度に対応する物体力を静的に作用させる。このとき、作用させる方向は流水直角方向とした。これは、本検討の対象施設は流水方向に平行な方向に側壁（以下、面内壁）が配置されているため、その面内剛性により流水方向の作用に対する抵抗が大きいことが想定されることから、より厳しい結果となる方向での検討を行ったものである。

2.1.5. 解析結果

(1) 各部材に生じるモーメント

3D解析の結果、機場本体の側壁、頂版、底版に生じるモーメントは、降伏モーメントより十分に小さい値となっていることを確認した。このことは、当地震により排水機場の機能に支障をきたす被害（降伏点を超えるような著しい損傷等）が確認されていないことと整合する。吸水槽内の代表断面として、冷却水槽の端部の壁から 7.4 m 付近の断面のモーメントと降伏モーメントの値を図 2-5～図 2-9 に示す。

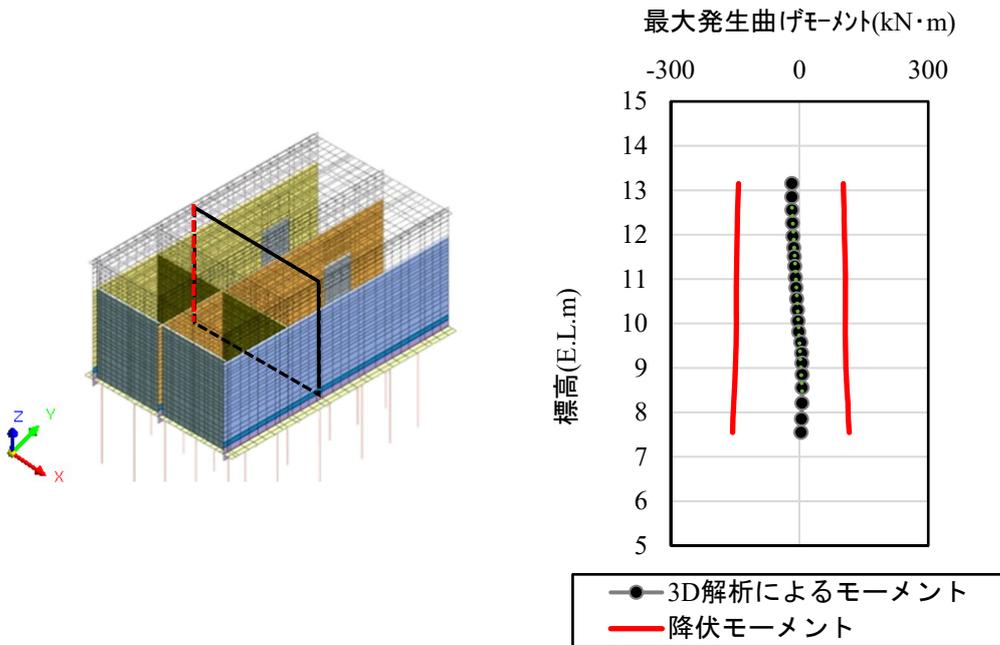


図 2-5 3次元解析によるモーメントと降伏モーメントの比較（X軸原点側 側壁）

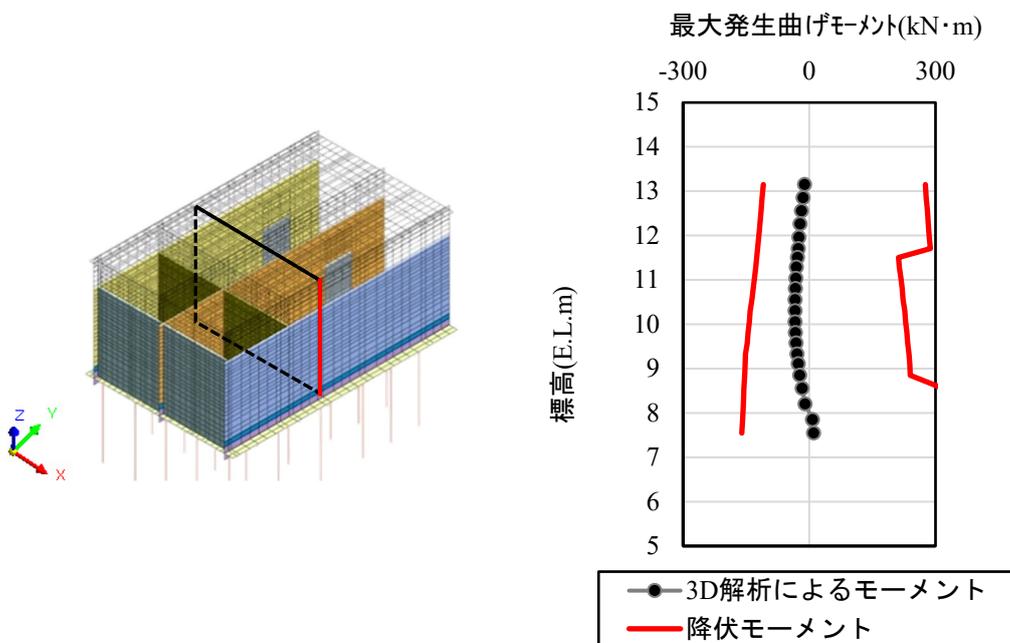


図 2-6 3次元解析によるモーメントと降伏モーメントの比較（X軸正側 側壁）

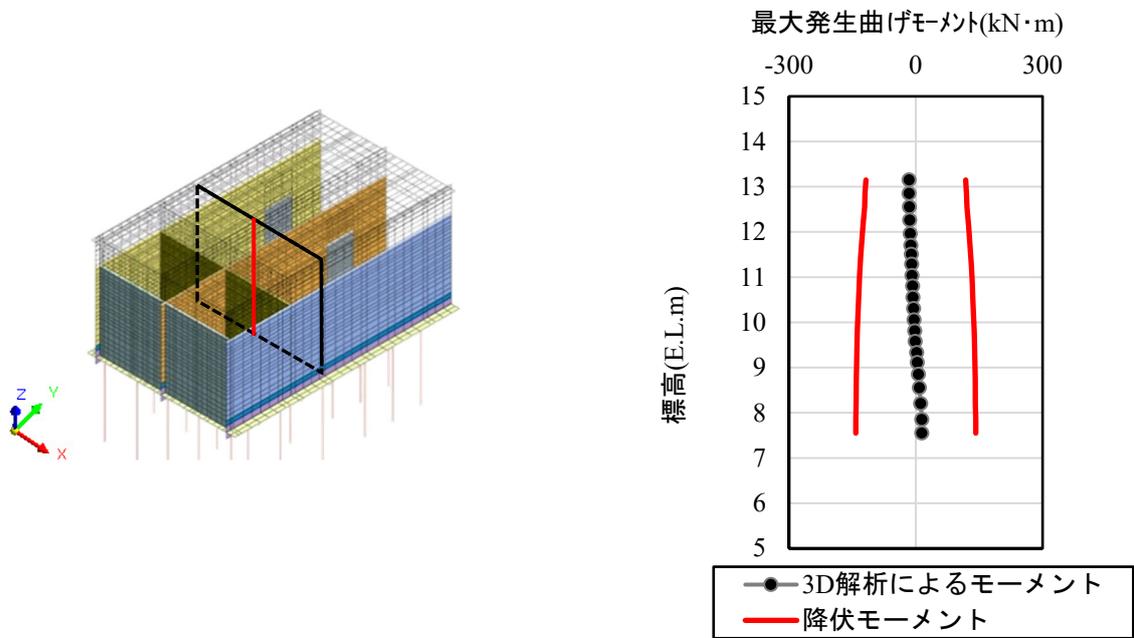


図 2-7 3次元解析によるモーメントと降伏モーメントの比較（隔壁）

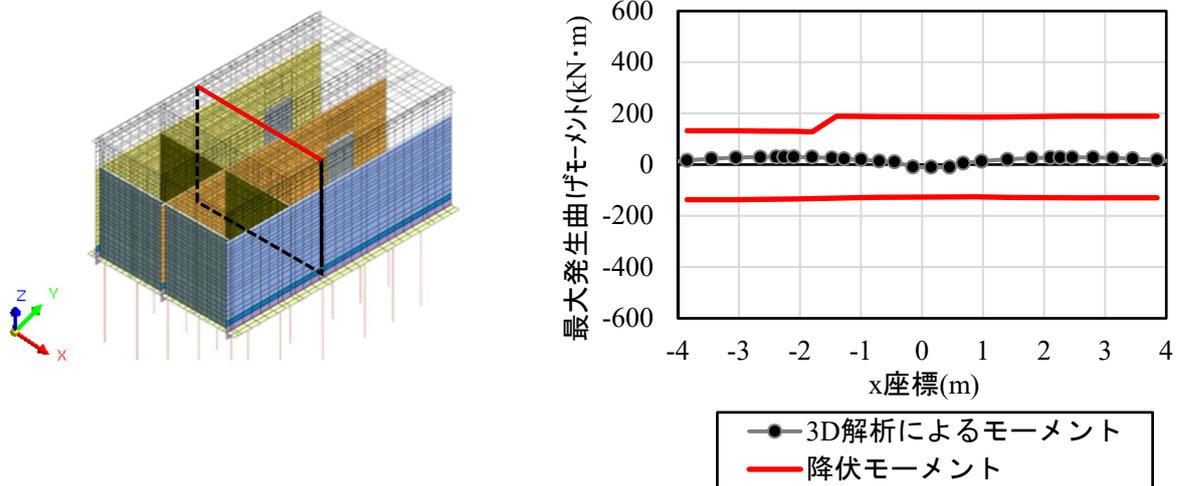


図 2-8 3次元解析によるモーメントと降伏モーメントの比較（頂版）

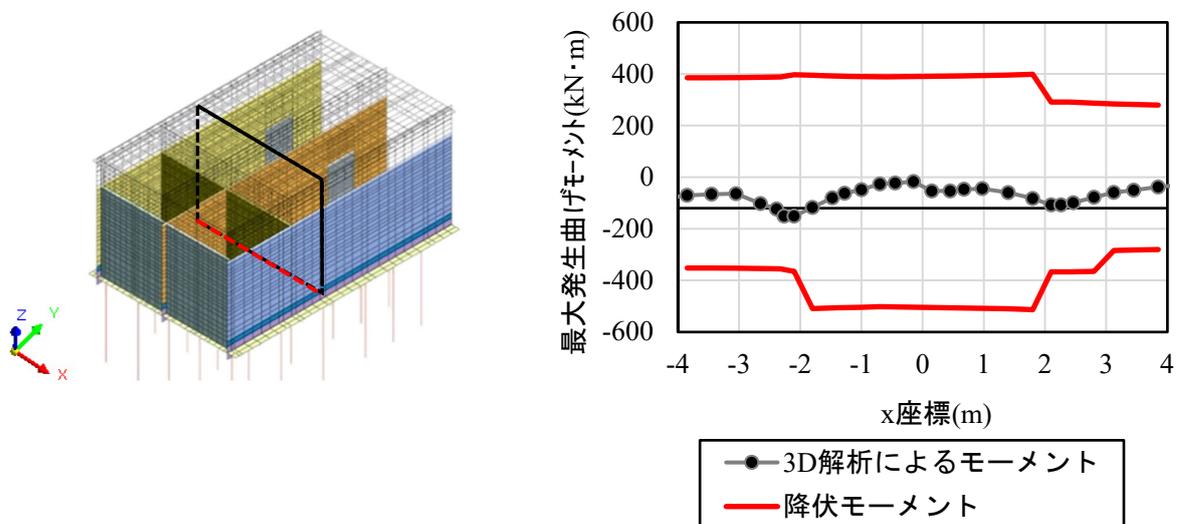


図 2-9 3次元解析によるモーメントと降伏モーメントの比較（底版）

(2) 機場本体の変形モード

3D解析の結果より得られた水平変位のコンターを図 2-10 に、鉛直変位のコンターを図 2-11 に示す。この結果から読み取れることは以下のとおりである。

- ・冷却水槽から Y 軸正側に離れるにつれて、せん断変形量が大きくなる。
- ・冷却水槽側 (Y 軸原点側) の側面では、比較的、水平変位量が小さい。
- ・鉛直変位は、X 軸正側では鉛直上向き、X 軸原点側では鉛直下向きの変位が生じる結果となり、XZ 平面での回転モードが生じている。この傾向は冷却水槽 (Y 軸原点側) で顕著であり、吸水槽では卓越しない。すなわち、冷却水槽から Y 軸正側に離れるにつれて、剛体的な回転量が小さくなる。
- ・上記の傾向を示す要因として、吸水槽の Y 軸正側は開口であり、端部の壁と面内壁とに挟まれる冷却水槽に比して、面内壁の剛性により地震力に抵抗する効果が小さいことと考える。

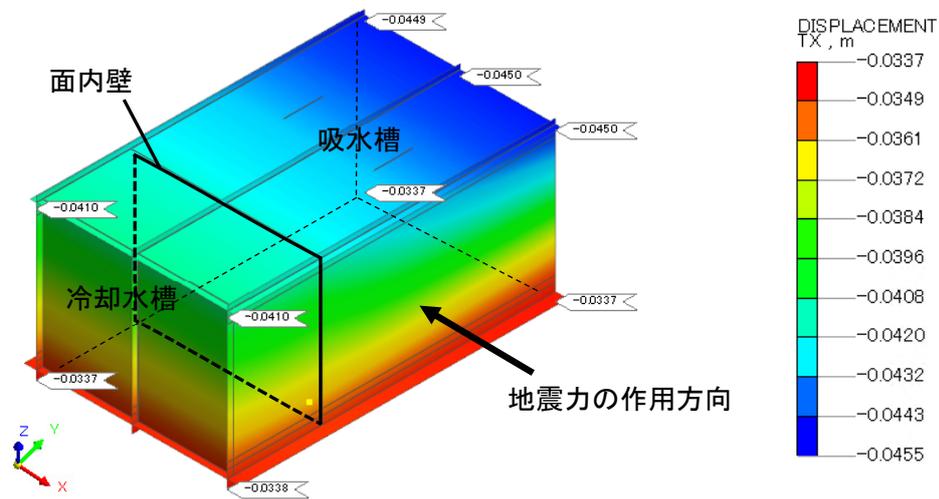


図 2-10 3D 解析によって得られた水平変位のコンター

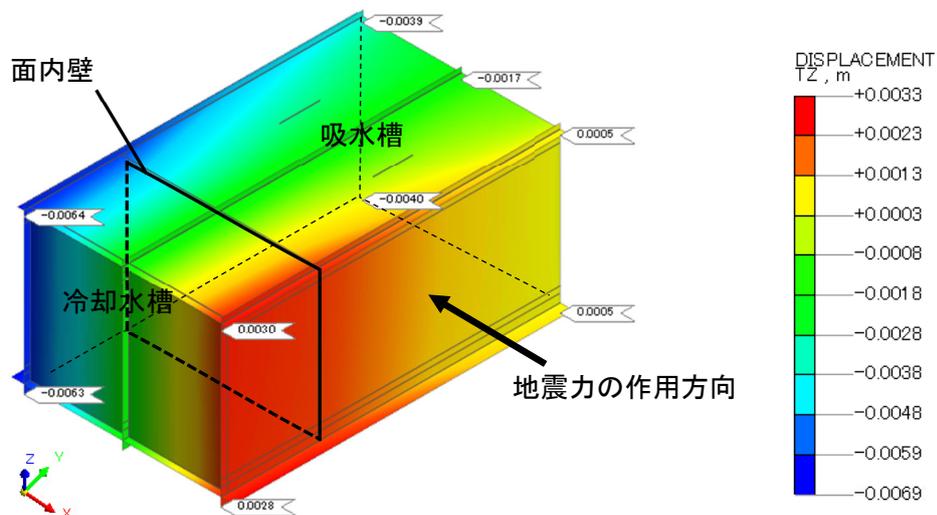


図 2-11 3D 解析によって得られた鉛直変位のコンター

(3) 層間変形角

前項で述べたとおり、吸水槽側は冷却水槽側に比して回転モードが卓越しておらず、せん断変形モードが卓越しているものと考えた。そこで、せん断変形量を代替する指標として、機場本体の頂版と底版との水平変位量の差と高さの比である層間変形角（図 2-12）を確認した。

層間変形角は、面内壁からの距離や機場本体の横断形状等に基づく値の違いを確認するため、流水方向の複数断面（図 2-13）において、式 2-1（例えば、文献 6）に示される）により算出した。これにより、せん断変形量（剛体回転成分を除いた変形量）を定量化することができる。

$$\gamma = (d_2^2 - d_1^2) / 4bh \dots\dots\dots (式 2-1)$$

ここに、

- γ : 層間変形角
- h : 機場本体の高さ
- b : 機場本体の幅
- d_1 : 機場本体の短い方の対角線長さ
- d_2 : 機場本体の長い方の対角線長さ

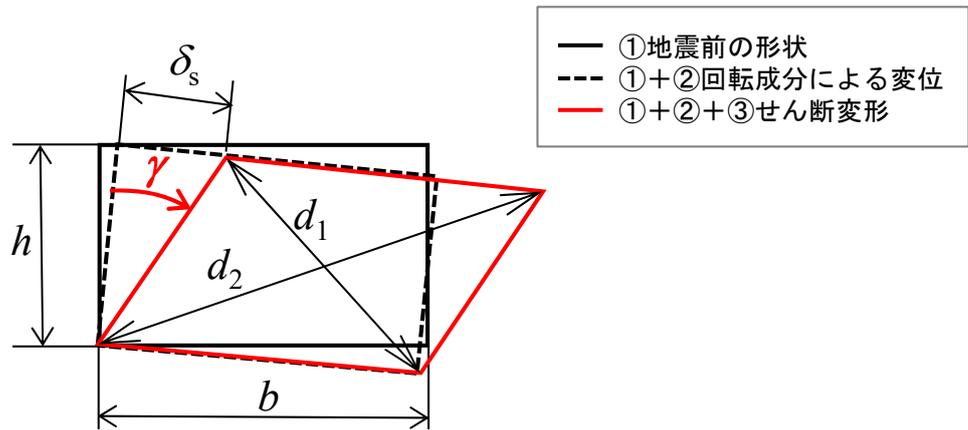


図 2-12 層間変形角の模式図

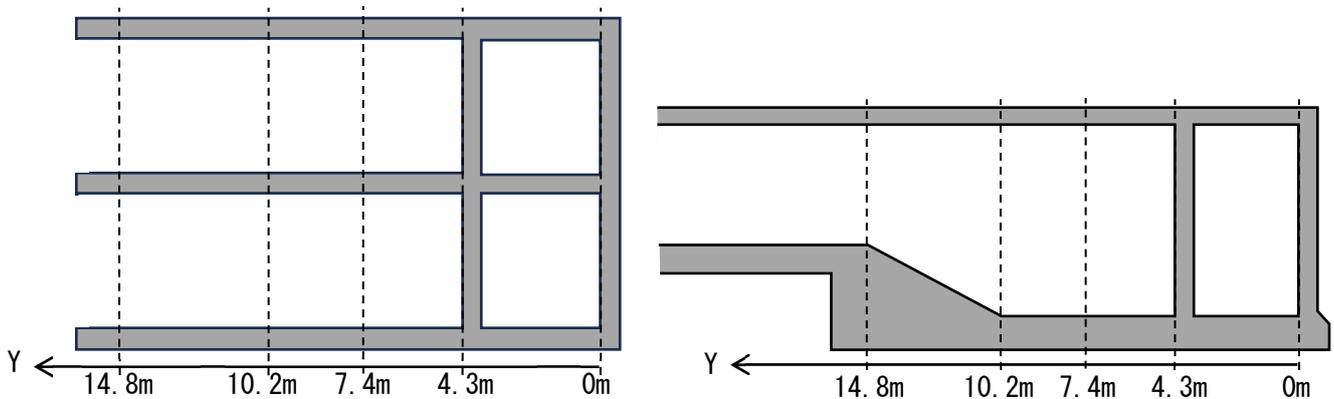


図 2-13 層間変形角の確認位置（左：平面図、右：横断図）

冷却水槽の端部壁からの距離と層間変形角との関係を図 2-14 に示す。この結果より読み取れることは以下のとおりである。

- ・底版厚が同じである $Y=4.3\text{ m}$ 、 7.4 m 、 10.2 m の層間変形角は、それぞれ 2.0×10^{-4} 、 5.0×10^{-4} 、 8.0×10^{-4} となり、面内壁からの距離に応じて増加する傾向にある。
- ・ $Y=14.8\text{ m}$ における層間変形角は上記 3 断面における増加量（勾配）から算出される値と比べると小さい。この理由は、上記 3 断面の底版厚が 0.8 m であるのに対し、当断面は底版厚が 3.1 m ($0.8 + 2.3\text{ m}$ 、約 4 倍) であることにより、せん断変形を抑制する効果が反映されているものと考えられる。ただし、面内壁からの距離による層間変形角の増分を上回るほどの抑制は生じていない。

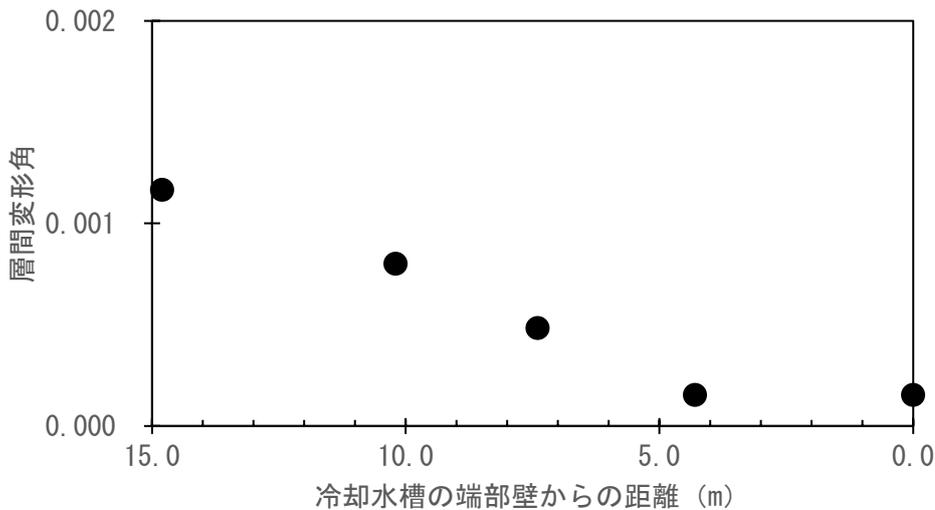


図 2-14 各断面における層間変形角

2.1.6. 考察

3D 解析より得られた機場本体の変形モード及び層間変形角より、以下のことが言える。

- ・両側が壁に挟まれる部分と片側のみが壁である部分では変形モードが異なり、前者は回転モードが卓越するが、後者はせん断変形モードが卓越する。
- ・片側のみが壁である部分では、壁部材から近いほどにせん断変形量（層間変形角）が抑制され、壁部材からの距離が大きくなる程にせん断変形量（層間変形角）が大きくなる。
- ・底版厚を大きくすることによってもせん断変形量（層間変形角）を抑制する効果が見込める可能性はあるが、当施設の底版厚の違いは 4 倍程度であるものの、3D 解析による層間変形角の差は 2.0×10^{-4} であったことから、抑制効果は比較的小さいことが想定される。

2.2. 二次元モデルを用いた解析

前節で述べたように、機場本体及び基礎と地盤を三次元でモデル化して構造解析を行えば、面内壁により機場本体のせん断変形量が抑制されるという効果を反映した解析結果が得られる。一方で、二次元モデルを用いた解析（以下、2D 解析）では面内壁をどのようにモデルに組み込むかが確立されていない。面内壁のない断面で解析すると変位量を過大に、面内壁位置で解析すると変位量を過少に算出することになるため、このモデル化の方法を課題と考えた。

そこで、複数の検討ケースでの 2D 解析を行い、3D 解析結果と比較することにより、等価な応答値の算出が可能なモデル化の方法を検討した。なお、解析結果の比較にあたっては、せん断変形量を代替する指標である層間変形角に着目した。

2D 解析の実施にあたり、機場本体及び基礎を複数の構造解析ブロックに分割して解析対象断面を設定し、これらの断面における機場本体及び基礎と地盤の全体系モデルを作成した上で、2.1 と同様、応答震度法（線形解析）により流水直角方向に地震力を作用させた解析を実施した。

2.2.1. 構造解析ブロックの分割及び解析対象としたブロックの設定

揚排水機場の耐震性能照査において 2D 解析を用いる場合は、各部材の三次元的な配置及び耐荷機構等を考慮した上で、機場本体及び基礎を適切な位置で複数の構造解析ブロック（以下、ブロック）に分割し、ブロックごとに構造解析を行うことが必要となる。本節では、ブロックの分割方法及び解析対象とするブロックを検討した。

3D 解析と同様、流水直角方向に地震力を作用させるため、ブロックの分割にあたっては、機場本体の横断形状の変化点や、機場本体を構成する各部材の持つ流水方向の断面に対する耐荷機構、主要機械設備や上載荷重の配分・作用位置等、様々な条件を考慮する必要がある。検討対象施設の機場本体は、冷却水槽と吸水槽で構成されていることから、この 2 槽は別のブロックとするものとした。さらに、吸水槽内は、底版厚が 0.8m の部分、底版厚が 0.8m～3.1m の部分があることから、吸水槽を 2 つのブロックに分割するものとした。なお、2.1 では底版厚の違いによる層間変形角の差があまり大きくなかったことから、吸水槽を 1 つのブロックとして解析することも可能と考えられるが、本検討では想定される 1 つの例として分割方法を検討したものである。分割したブロックは図 2-15 に示す A～C の 3 つである。

また、解析対象とするブロックとして、ブロック B を選定した。この理由は、ブロック A（冷却水槽）は両側を壁に囲まれており地震力に対して一定程度の抵抗を有すること、かつ、ブロック C はブロック B に比して底版厚が大きいことから、ブロック B が地震力に対して最も厳しい条件を有すると想定されるためである。

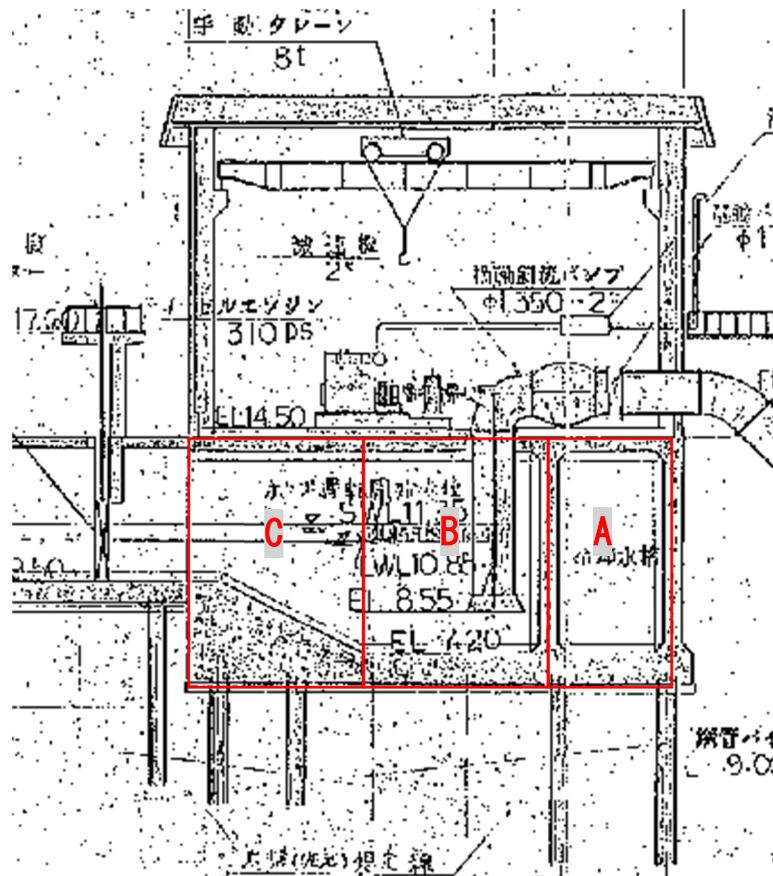


図 2-15 構造解析ブロックの分割位置

2.2.2. 二次元解析の実施及び三次元解析結果との比較

(1) 解析モデルの作成

2D 解析におけるモデル化は面内壁を含む形でモデル化している。例として、図 2-15 に示したブロック B に対するモデル図を図 2-16、図 2-17 に示す。このモデルに対し、面内壁の剛性の与え方を変えた複数ケースの解析を行い、3D 解析により得られる層間変形角との比較を行った（後述）。

解析モデル作成の考え方は以下のとおりである。

- ・側壁、頂版、底版、隔壁基礎杭：梁要素を用いる。
- ・面内壁：板曲げ要素を用いる。
- ・地盤部：3D 解析モデル（図 2-3）の XZ 平面と同じ形状とする。

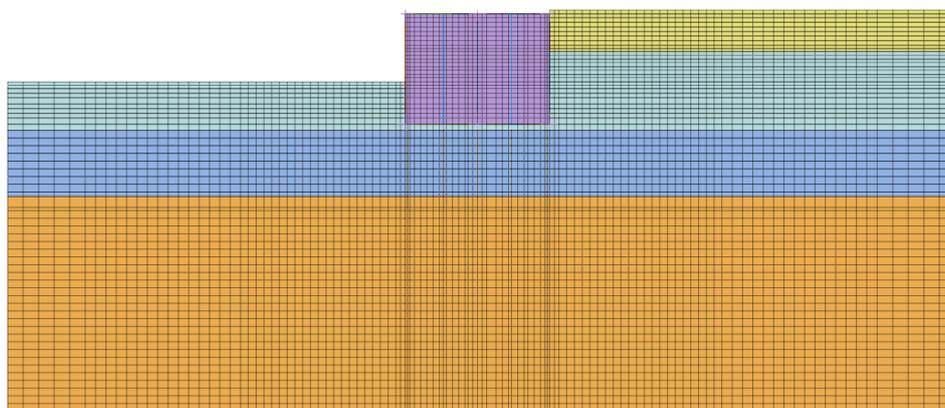


図 2-16 2D 解析に用いたモデル（全体）

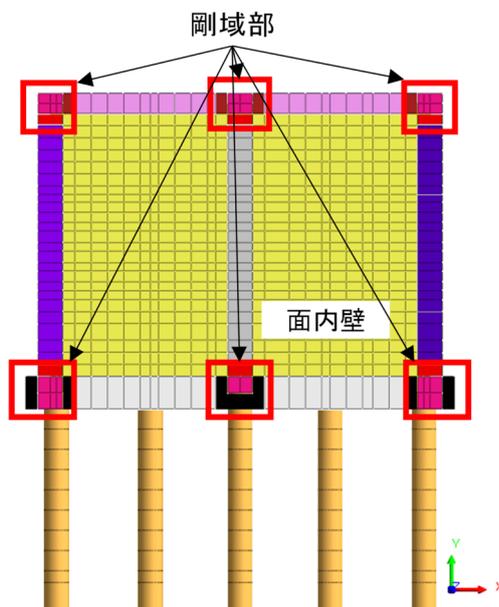


図 2-17 2D 解析に用いたモデル（機場本体及び基礎）

なお、上載荷重、機械荷重は、検討ケースによらず、流水方向の奥行き 16.5m 当たりの荷重として作用させた。また、基礎杭の平面配置がほぼ一定間隔であることから、基礎杭についても検討ケースによらず、流水方向の杭間隔 3.1m 当たりの曲げ剛性を用いた。

(2) 通常の面内壁の剛性を与えた二次元解析の実施

二次元解析の実施にあたり、まずは面内壁の剛性を通常どおり面内壁のヤング率から定まる剛性 ($2.35 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$) として与えるものとした。なお、2D 解析における各地点での剛性の値は、上記の値を面内壁厚と面内壁からの距離の比で除した値として設定する。ブロック B 内の複数地点での層間変形角の値を確認するため、10 地点を想定した解析を実施した (表 2-1)。

解析結果の一例として地点 1 の変形図を図 2-18 に示す。ケース 1 では、層間変形角は 2.0×10^{-6} となり、せん断変形が生じない結果となった。

表 2-1 2D 解析の検討地点

No.	面内壁からの距離 (m)	面内壁厚/面内壁からの距離	2D 解析に入力する各地点の剛性 (kN/m^2)
1	0.6	1.000	2.35×10^7
2	3.1	0.194	3.81×10^6
3	5.9	0.102	2.17×10^6
4	10.5	0.057	1.27×10^6
5	20.0	0.030	6.84×10^5
6	30.0	0.020	4.61×10^5
7	40.0	0.015	3.47×10^5
8	50.0	0.012	2.79×10^5
9	100.0	0.006	1.40×10^5
10	200.0	0.003	7.03×10^4

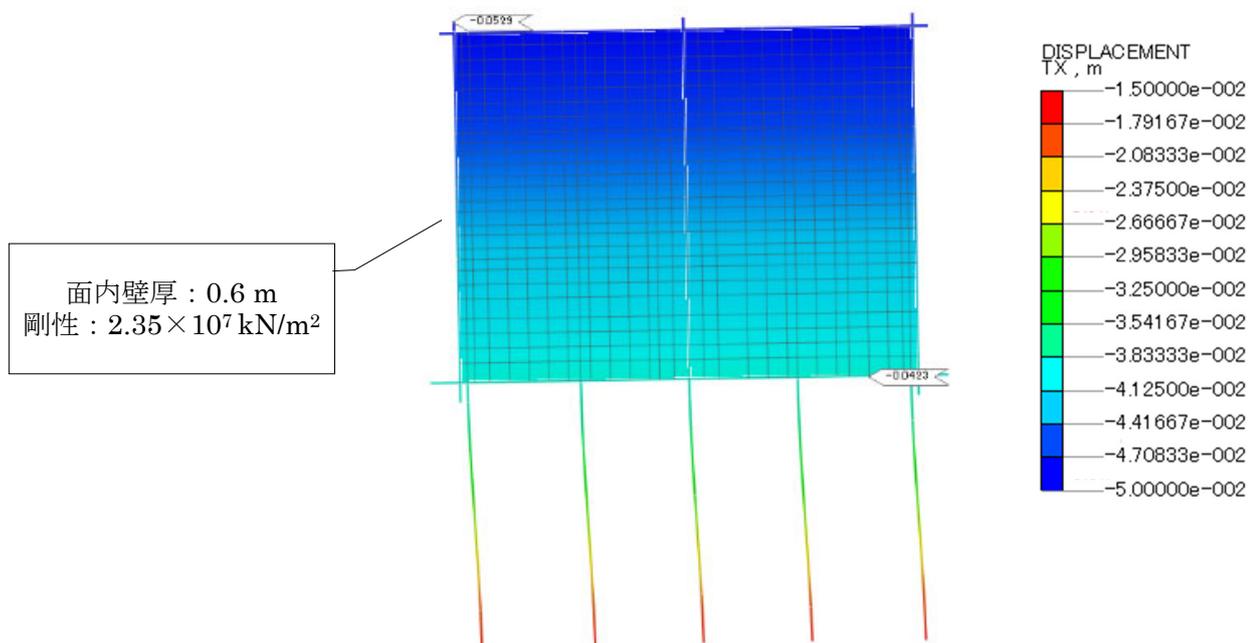


図 2-18 ケース 1 の 2D 解析による水平変位のコンター

地点 1~10 における 2D 解析による層間変形角の一覧表を表 2-2 に、散布図を図 2-19 に示す。この図より、面内壁からの距離に対し、層間変形角は対数的に増加する傾向となることが分かる。

表 2-2 2D 解析による層間変形角 一覧

No.	面内壁からの距離(m)	層間変形角
1	0.6	2.0×10^{-6}
2	3.1	4.4×10^{-5}
3	5.9	6.4×10^{-5}
4	10.5	11.7×10^{-5}
5	20.0	20.1×10^{-5}
6	30.0	28.6×10^{-5}
7	40.0	33.9×10^{-5}
8	50.0	40.2×10^{-5}
9	100.0	6.3×10^{-4}
10	200.0	9.2×10^{-4}

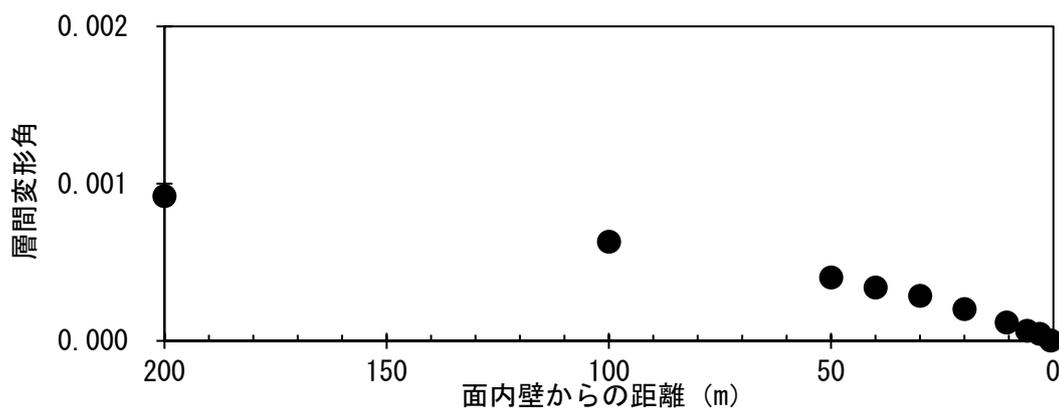


図 2-19 2D 解析による層間変形角 散布図

(3) 二次元解析結果と三次元解析結果との比較による面内壁の剛性の与え方の検討

前項で整理した 2D 解析による層間変形角と 2.1.5 に示した 3D 解析による層間変形角をプロットした散布図を図 2-20 に示す。2D 解析と 3D 解析の結果を比較すると、同位置における層間変形角が小さく算出されていることが分かる。

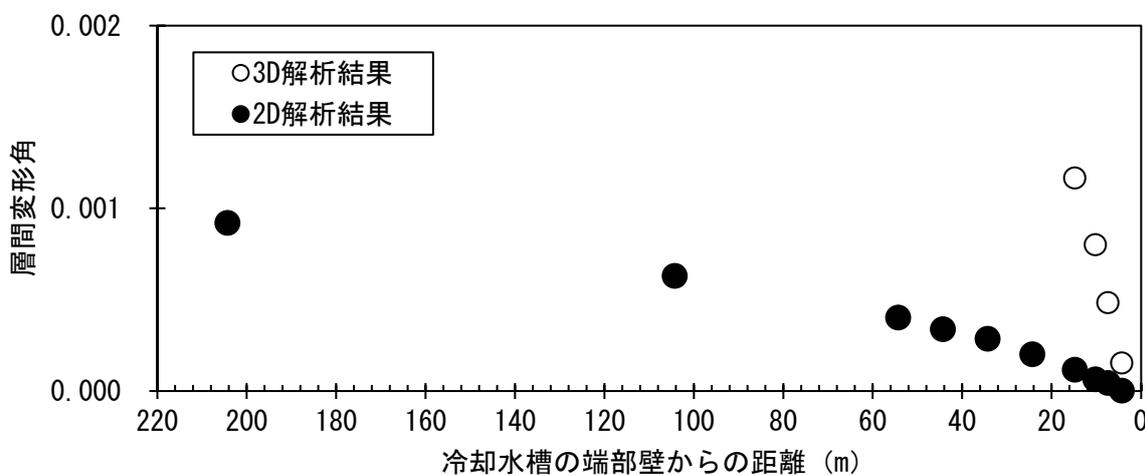


図 2-20 2D 解析・3D 解析による層間変形角の比較

ここで、2D 解析における奥行き 1m あたりの面内壁の剛性と算出された層間変形角との関係を基に、3D 解析結果において確認した 4 地点（図 2-13）の層間変形角のうち、底版厚が大きいことによるせん断変形抑制効果が含まれていない 3 地点（面内壁からの距離：0.6m、3.1 m、5.9m）と、同様の層間変形角（ 2.0×10^{-4} 、 5.0×10^{-4} 、 8.0×10^{-4} ）を得るためには 2D 解析に入力する剛性の値を 9.40×10^5 、 1.52×10^5 、 8.68×10^4 とする必要があると考えられる。

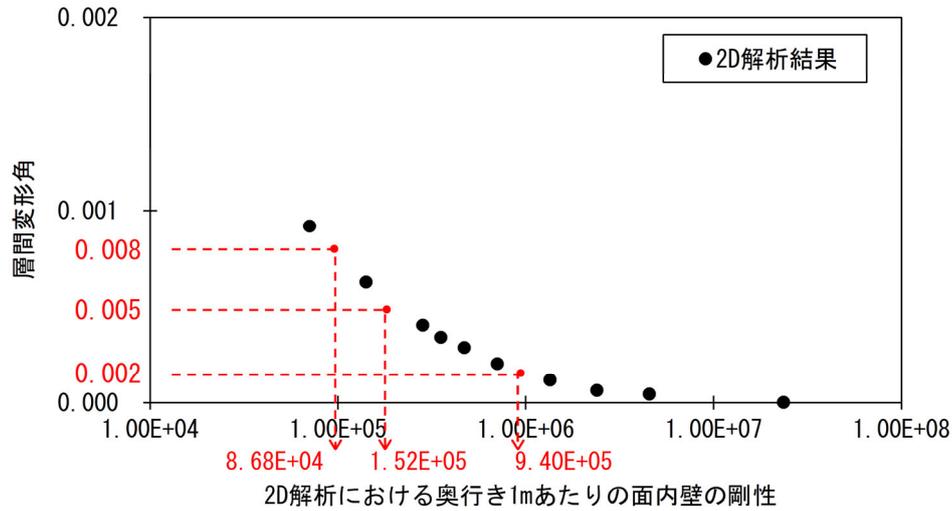


図 2-21 2D 解析による層間変形角と面内壁の剛性の関係（赤字は 3D 解析による層間変形角）

奥行き 1m あたりの面内壁の剛性について、3D 解析結果を再現するために必要な値と実際の値を比較したものを図 2-22 に示す。これらの結果より、2D 解析を行う際には、2D 解析で用いる面内壁の剛性として、実際の剛性に 1/25 を乗じた値を用いれば、両手法で同等の層間変形角を算出することができる。

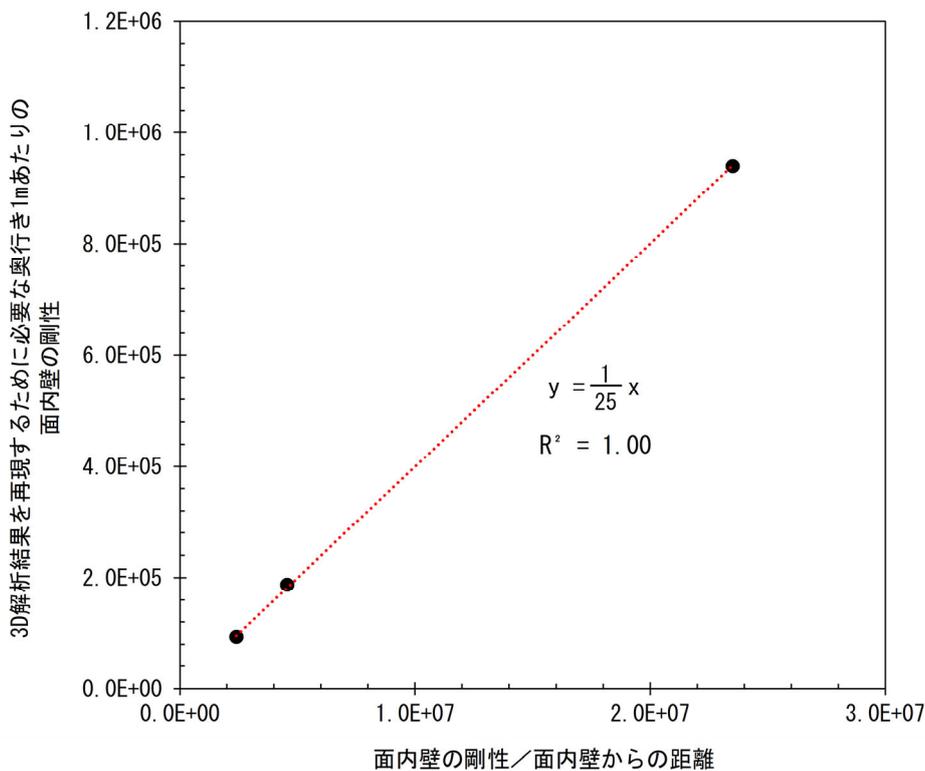


図 2-22 3D 解析結果を再現するために必要な奥行き 1m あたりの面内壁の剛性

2.3. まとめと考察

本検討では、国管理の揚排水機場の中で最頻的な構造・施設規模と考えられる池田排水機場を対象に応答震度法を用いた三次元解析及び二次元解析を実施し、これらの結果を比較することにより、二次元解析でも妥当な変位量を推定することができるモデル化方法として、面内壁の剛性の与え方を検討した。

検討の結果、二次元解析において考慮する面内壁の剛性を $1/25$ に低減させることで、三次元解析と同等の変位量を推定可能であることが示唆された。本検討で対象とした池田排水機場と構造・施設規模が大きく異なる揚排水機場であれば、二次元解析を行う際に同様のモデル化方法が適用可能と考えられる。

今後は、検討事例を増やすこと等により、本検討の対象施設より複雑な構造の揚排水機場においても、同様の二次元解析方法による変位推定の可否を確認することが必要であると考えられる。また、解析結果と実績の変位量等との比較等により、さらに精度を高めていくことも求められる。

おわりに

わが国の揚排水機場は、これまでの地震による大きな被害は報告されていないが、今後発生することが予想されている南海トラフ巨大地震や首都直下地震等の大規模地震に備えた対応は重要である。一方で、限られた予算の中で効果的・効率的な防災整備を進めていくためには、対象地点において想定される地震外力によって生じうる状況を的確に予測し、必要とされる対策を適切かつ確実に実施することも求められる。

本資料で示したモデル化方法を基に、耐震性能の照査ならびに関連する研究・技術開発が進み、揚排水機場のより確実な耐震対策が進められていくことを期待する。

《謝辞》

本資料は「令和3年度河川構造物の耐震性能照査法に関する検討業務」の検討成果の一部をとりまとめたものである。また、土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 谷本主任研究員には、多岐にわたりご助言をいただいた。検討の実施に際し、国土交通省水管理・国土保全局治水課を通じて、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部池田河川事務所から各種データの提供を受けた。ここに記して謝意を表する。

【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, V.揚排水機場編, 平成24年2月.
- 2) 一般社団法人河川ポンプ施設技術協会：河川ポンプ施設総覧 2020, 上巻, 北海道・東北・関東・北陸・中部編, p.146, 令和2年1月.
- 3) 帯広開発建設部：十勝川改修工事の内池田排水機場新設工事, 一般図, 図番号 72-4, 昭和56年度.
- 4) 片山幾夫、足立正信、島田穰、都築富雄、瀬下雄一：地下埋設構造物の実用的な準動的解析手法「応答震度法」の提案、第40回土木学会年次学術講演会講演概要集、I-369、pp.737-738、1985.
- 5) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：強震観測網 K-NET, KiK-net (<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>)
- 6) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人土木研究所：国土技術政策総合研究所資料第1247号, 土木研究所資料第4440号, 大型のボックスカルバートの耐震性照査手法に関する研究, p30, 令和5年4月.