

応答震度法による排水機場の解析事例の紹介

エンジニアリング本部 防災・環境解析部 地盤・構造解析グループ

西村 貴一

1. はじめに

指針¹⁾では排水機場の静的照査法による耐震性能の照査は、地盤変形の影響が支配的であるときは、応答変位法と応答震度法に基づいて行うのがよいと記述されているが、今まで多くの場合で応答変位法が選択され、応答震度法が用いられることはほとんどなく、扱うことの出来る技術者も少なかった。

しかし、最近では解析手法として応答震度法を指定する案件も増加傾向にあり、応答震度法に対応すべく準備する必要がある。

本稿では、応答震度法の概要や特長、および応答変位法との違いについて論じ、応答震度法の解析事例を紹介する。

2. 応答震度法とは

2.1 解析手法の理論

応答震度法は、周辺地盤を土要素としてモデル化し、構造物および土要素に対して応答加速度を外力条件として考慮する解析手法である。土要素のモデル化には、メッシュ作成を伴う。

応答変位法は、構造物の周辺地盤をバネ要素としてモデル化し、周辺地盤の地震時変位を外力条件として考慮する解析手法であり、構造物には地盤変位をバネ反力として考慮する。(図1参照)

いずれの手法においても、地盤応答解析を実施し、応答値の深度分布を算出する。また、地盤変位を簡

易式により手計算で設定する方法も広く採用されている。

2.2 応答変位法との違い

応答変位法は、メッシュ作成が不要なのでモデル作成が簡便である。しかし、地盤バネの値は、外力の大小に対して、直接的な支配条件であるため、解析結果への影響が大きいにもかかわらず、地盤バネの地盤反力係数の設定に関しては、技術者の判断によるばらつきが大きく、このことが応答変位法の解析結果に、差異が生じる原因であると考えられる。

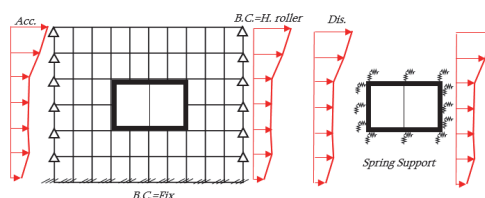


図1 手法概念(左:応答震度法 右:応答変位法)

応答震度法は、メッシュを作成する必要があるが、地盤応答解析結果より定まる地盤の変形係数を平面ひずみ要素の変形係数として設定することができるので、応答変位法の地盤反力係数設定時のような、曖昧さを回避できる。

上記の2手法に動的解析手法を加えた3種類の解析手法について、それぞれの特徴は図2のように示され、応答震度法は動的解析と応答変位法の中間程に位置する手法と言える。

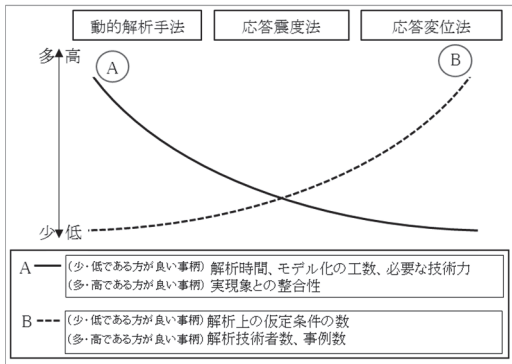


図 2 解析手法の短所と長所

3. 排水機場の応答震度法適用事例

排水機場を対象構造物として、実際に応答震度法を適用して解析した事例について紹介する。

3.1 使用プログラム

地盤の応答解析は、有効応力解析プログラムである「FLIP ROSE@Ver7.3」(一般財団法人 FLIP コンソーシアム)を使用した。応力解析は、汎用構造解析プログラム「TDAP III@Ver3.08.1」(株式会社アーク情報システム、大成建設株式会社)を使用した。

3.2 解析モデル及び条件

対象構造物の図面を図 3 から図 5 に示す。

また、解析に用いる条件は表 1 のとおり設定した。

解析モデルは、排水機場を流水方向に直交する単位幅モデルに切り出した断面モデルとした。

指針では河川構造物に対する照査は、レベル 2-1 地震動とレベル 2-2 地震動の両方に対して実施することになっているが、ここでは解析事例を示すことが目的であるため、レベル 2-1 地震動に対してのみ計算することにした。本排水機場は、常用の排水機場であるので耐震性能 2 の構造物として取り扱った¹⁾。

計算例に用いる入力地震波形は、地盤種別(II 種

地盤)より判断して、「I-II-1 波」を採用した³⁾。

水槽内水による地震時動水圧は、指針より Westergaard の動水圧として取り扱う²⁾が、応答震度法では、質点として取り扱う方が簡便であるので、土研資料の方法⁴⁾により付加質量として質点換算した。壁と床の接合部などの剛域は、剛な梁要素としてモデル化した。地盤応答解析結果

地盤応答解析を実施し、解析に用いる応答加速度深度分布と地盤のせん断弾性係数の深度分布を求めた。

入力加速度波形に対応して、地盤は時刻歴応答を示す。ここでは、一番厳しい条件として、構造物の上端深度と下端深度の相対的な変位差が最大となる時刻を抽出し、この時刻の各応答値を採用することにした。それぞれの深度の変位とその差の時刻歴図を図 6 に示す。時刻 31.37 秒で両者の変位差は最大値 1.44mm を記録するので、この時刻の地盤応答を解析条件として採用した。

時刻 31.37 秒の応答深度分布図を図 7 に示す。地盤のせん断弾性係数 G (kN/m^2) は、せん断応力 τ (kN/m^2) とせん断ひずみ γ の比率として定義した。

$$G = \tau / \gamma$$

時刻 31.37 秒の地盤応答は、Z 座標 15m 程度よりも上の As1 層の応答加速度がそれ以深の各層よりも大きく、地表面においては 0.9m/s^2 を示し、それ以深の地盤応答加速度分布はほぼ一定の約 0.2m/s^2 を示す。Z 座標 10m 前後に分布する As2 層において、せん断ひずみとせん断応力が、低下する領域があることが分かる。

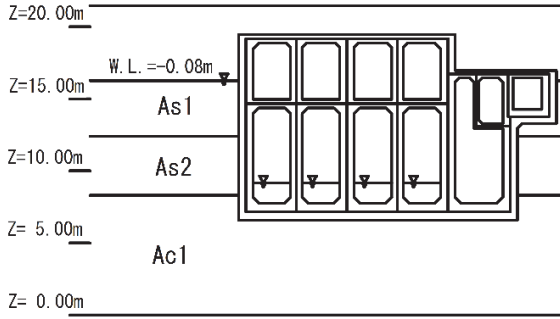


図 3 解析モデル

表 1 解析条件

構造	地中埋設 RC 構造物
耐震性能	耐震性能 2
材料	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ (コンクリート) SD345 (鉄筋)
地盤種別	II 種地盤 (河川指針 I)
入力波形	I-II-I 波 (道示 V)

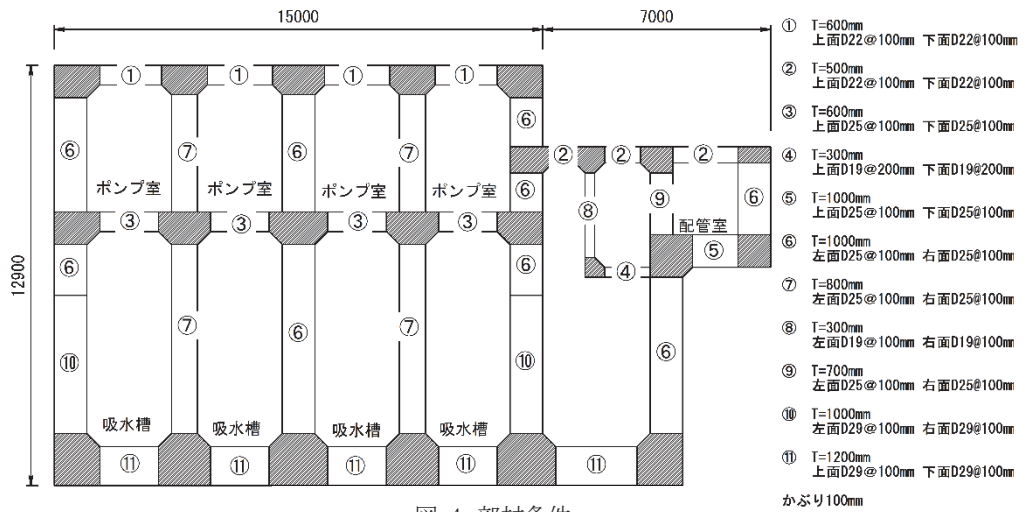


図 4 部材条件

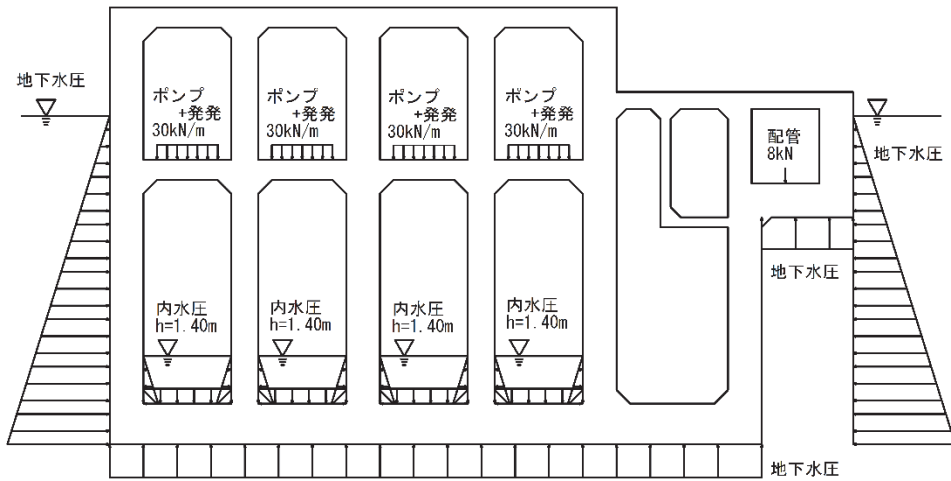


図 5 外力条件

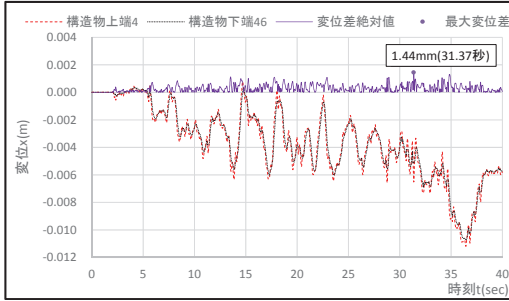


図 6 時刻歴変位関係

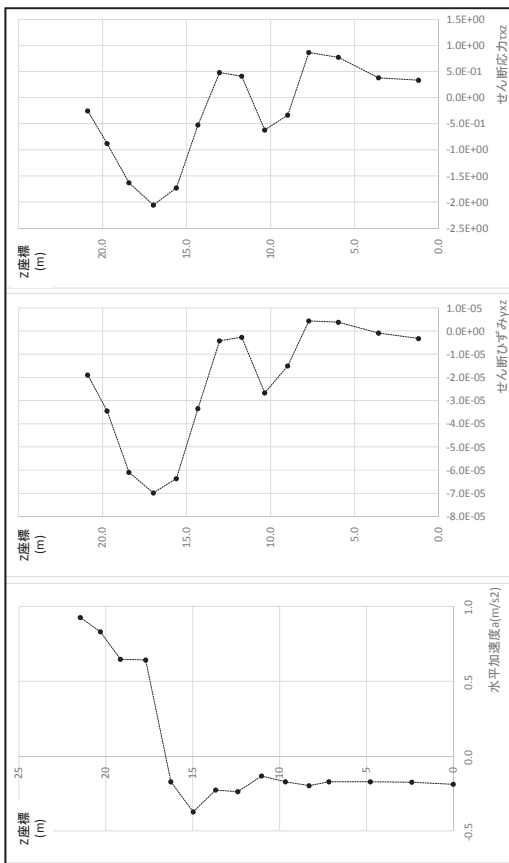


図 7 応答深度分布(t=31.37 秒)

3.3 応力解析結果

時刻 31.37 秒の加速度深度分布を外力条件とし、同時刻の地盤剛性を土要素のせん断剛性とした。以

上の条件を設定し、応力解析した結果の断面力図（曲げモーメント図及びせん断力図）を図 8 に示す。底版端部や吸水槽外壁の下端、配管室の床において比較的大きな断面力が生じることが判明した。

3.4 照査基準の設定

対象としている排水機場は、常用の排水機場であり耐震性能 2 の構造物である。構造物の外周部は、発生曲率が初降伏曲率を超過しないこと（弾性挙動を示すこと）と発生せん断力がせん断耐力を超過しないことを照査基準とした。

ポンプ室の床と配管室の床は、損傷すると排水機能に障害をもたらす可能性があるため、発生曲率が初降伏曲率を超過しないこと（弾性挙動を示すこと）と発生せん断力がせん断耐力を超過しないことを照査基準とした。

それ以外の壁や床は、過度な損傷を生じないことを目標として、レベル 2-1 地震動に対しては応答塑性率が 3.0 以下であること³⁾と、発生せん断力がせん断耐力を超過しないことを照査基準とした。

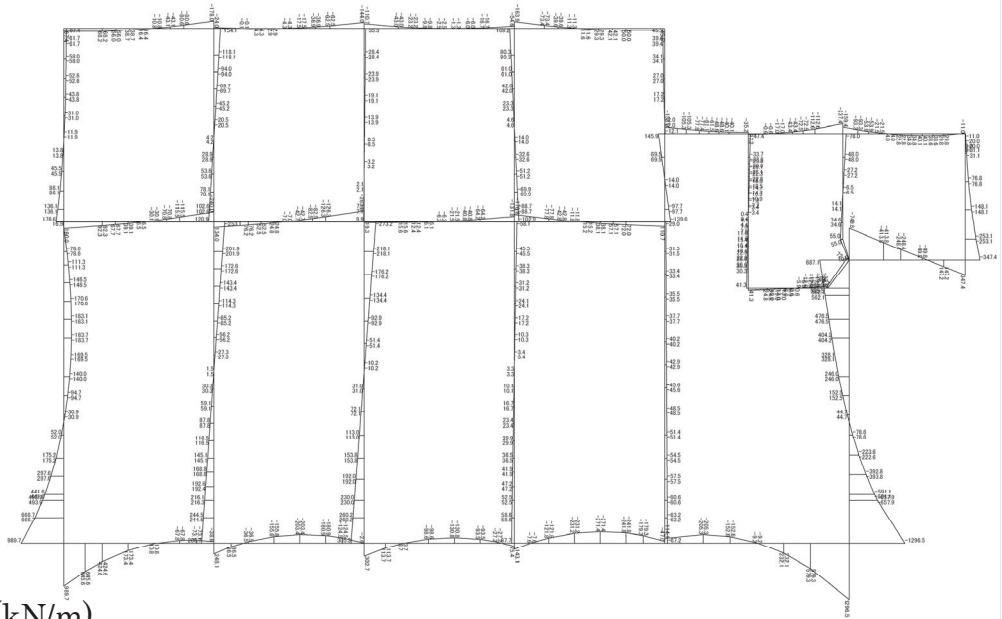
3.5 耐震性能照査

全ての部材の曲率照査を実施したところ、初降伏曲率を超過する部材はなかった。代表的な部材の曲率照査結果を表 2 に示す。

せん断耐力照査を実施したところ、底版端部、配管室床、外壁下端などの部材において発生せん断力がせん断耐力を超過した。代表的な部材のせん断耐力照査結果を表 3 に示す。なお、照査位置は、図 9 に示す通りである。

上記の照査結果より、本件排水機場はレベル 2-1 地震動に対して耐震性能 2 を満足せず補強を必要とすることが判明した。

BM(kNm/m)



S(kN/m)

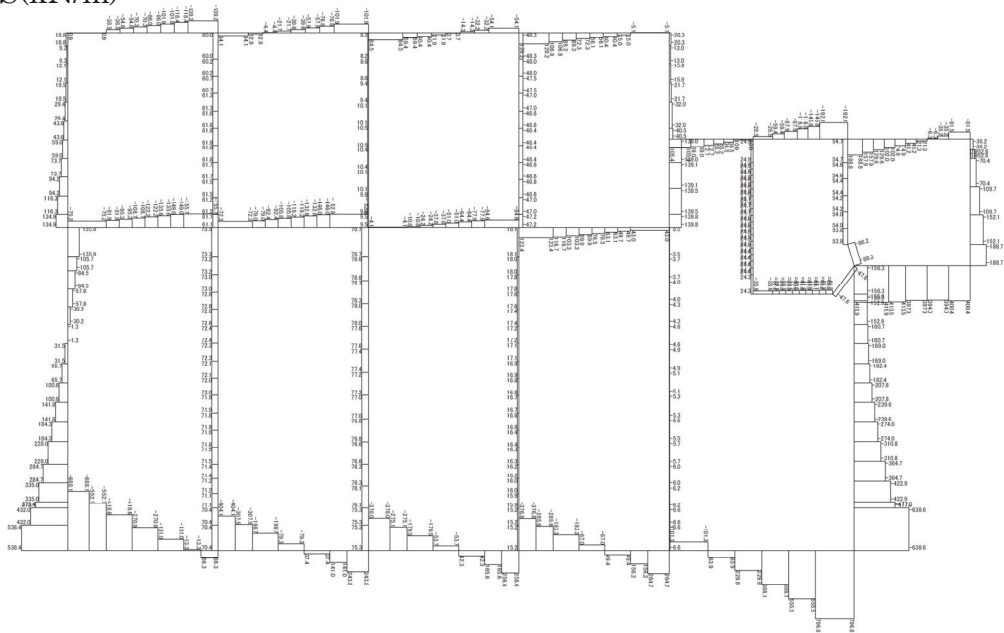


図 8 断面力分布(上:曲げモーメント 下:せん断力)

表 2 曲率照査

部材位置	要素番号	曲げ曲率照査			判定
		発生曲率 Φ_d [1/m]	初降伏曲率 Φ_y0 [1/m]	応答塑性率 μ_d (Φ_d/Φ_y0)	
底板	1795	8.304E-05	2.139E-03	降伏以下	OK
底板	1810	1.127E-04	2.139E-03	降伏以下	OK
配管室床	1844	-1.802E-04	-2.614E-03	降伏以下	OK
吸水槽外壁L	1973	4.108E-04	2.700E-03	降伏以下	OK
外壁R	2117	-8.344E-04	-2.614E-03	降伏以下	OK

表 3 セン断耐力照査

部材位置	要素番号	せん断耐力照査			判定
		せん断力 S [kN/m]	せん断耐力 Ps0 [kN/m]	余裕度 S/Ps0	
底板	1795	418.6	463.1	0.90	OK
底板	1810	555.5	463.1	1.20	NG
配管室床	1844	413.5	379.3	1.09	NG
吸水槽外壁L	1973	373.4	404.9	0.92	OK
外壁R	2117	477.0	379.3	1.26	NG

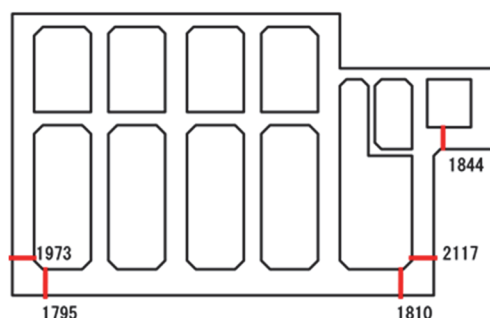


図 9 照査位置要素番号

本件構造物の場合、十分な曲げ耐力があることが示されているので、既設構造物に対するせん断耐力のみを向上させる各種のせん断補強鉄筋挿入工法が有効な耐震補強の一例と考える。

4. おわりに

地中構造物に対する静的照査手法として応答変位法と応答震度法があり、それぞれの特徴を簡単に論じた。

次に、地中埋設された排水機場を例として応答震度法を適用した照査事例を、解析手順を追って紹介した。

実務においては、「予算・工期」、「構造条件」、「要求性能」などの諸条件を勘案し、最適な解析手法を選択することが肝要であり、必ずしも高度な解析理論に基づくものが最適な解析手法ではない。応答震度法は、河川構造分野での採用例は少ないが他手法と異なった特徴があり、場合によっては最適な手法となり得る。このように、モデルの個々の特徴を把握し、案件に最適な解析手法を選択することにより、要求に応じた結果を得ることが出来る。より多くの解析モデルを使いこなす技術を保有し、状況に応じて様々なモデルを使い分けることは、最適な結果を得るために重要である。

加えて、筆者の属するエンジニアリング本部では様々な解析手法を用いて実務を遂行しており、お客様からのご提案、あるいは当社からの提案により毎年のように全く新しいモデル化手法や解析・照査手法を実施している。当社としては、今後とも様々な解析手法を蓄積し、社会資本整備の一翼を担うべく努力を続けていきたい。

<参考文献>

- 1) 「河川構造物の耐震性能照査指針・解説-V.揚排水機場編-」(pp.3-7, 平成 24 年 2 月, 国土交通省水管理・国土保全治水課)
- 2) 「河川構造物の耐震性能照査指針・解説-I.共通編-」(p.18, 平成 24 年 2 月, 国土交通省水管理・国土保全治水課)
- 3) 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」(pp.150-152,304-310, 平成 14 年 3 月, 社団法人日本道路協会)
- 4) 「土木研究所資料第 4103 号 地震時保有水平耐力法に基づく水門・堰の耐震性能照査に関する計算例」(p.18, 平成 20 年 3 月, 独立行政法人土研研究所耐震研究グループ(振動))