

I-B 84

独立塔型取水塔の地震応答解析

建設省土木研究所 正会員 岩下 友也
 (株)建設技術研究所 正会員 石田 裕哉
 建設省北陸地方建設局 中村 昭

1. まえがき

現在、独立塔型取水塔の耐震設計は、震度法あるいは取水塔高さ方向に設計震度を変化させる修正震度法を用い、地震力を静的荷重として扱う静的解析により行われている。また、大規模な取水塔においては、静的解析とは別に個々に動的解析を行い、取水塔の地震時安定性を照査している。取水塔毎に耐震設計方法が異なり、合理的な耐震設計法の整備が必要となっている。

本研究は、一部が水中に没する独立塔型コンクリート構造取水塔の2次元FEMモデルを用い動的解析を行い、そのモデル定数、応答特性についてパラメトリックに検討した。

2. モデル条件の検討

2.1 解析モデル

本研究では、取水塔(コンクリート構造物)、基礎岩盤部および貯水池(流体部)の3要素により構成される2次元FEMモデルを用い、周波数領域における複素応答解析を行った。なお、境界条件は基礎岩盤下面に粘性境界を、側面には α -伝達境界を用い、流体要素は、非圧縮性非粘性流体とした。解析モデル(図-1)の境界条件(貯水池長さ、基礎岩盤厚さ)が取水塔部の動的挙動におよぼす影響度を検討した。その条件を表-1に、結果を図-2,3に示す。これより、貯水池長さは貯水池水位の2倍、岩盤厚さは取水塔高さ程度を解析対象範囲として、モデル化することにより、取水塔部の動的挙動におよぼす貯水池および基礎岩盤の境界の影響は小さくなる。

2.2 実測挙動解析による検証

本節では、実物取水塔(H=75m)で観測された実測地震動(取水塔基礎、中標高部および頂部の3ヵ所で観測)および、実物取水塔モデル(断面2次元要素が同一となるよう取水塔幅を調節しモデル化、図-4)を用い実測地震動解析を行った。物性値は、建設時の調査および品質試験結果より設定した。取水塔部の減衰定数は、コンクリート単体では2%程度であるが、表-2の様に数種の内部減衰定数を設定した解析を行い、取水塔と貯水池および基礎岩盤との動的相互作用による α -逸散等と等価な減衰定数を上乘せした内部減衰定数を決定する。各観測位置毎の実測地震波形と解析応答波形のフーリエスペクトルを図-5に示す。頂部のフーリエスペクトルは、取水塔1次の固有周波数1.0~1.5Hzで実測値と解析値とのフーリエ振幅に差があるものの、中標高部では内部減衰定数5%で比較的良好に一致する。解析最大応答加速度分布を図-6に示す。実測地震波の最大値は、頂部・中標高部とも内部減衰定数2~5%に設定した応答解析分布の間にある。以上の検討から、取水塔部の動的相互作用を考慮した内部減衰定数を5%とすれば、解析応答値は地震時の取水塔での実測値との整合をとることができる。

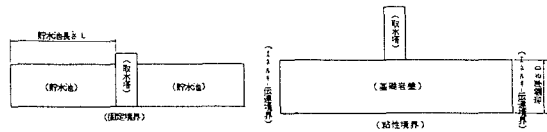


図-1 解析モデルの概略図

表-1 解析モデルの検討条件

解析モデル	貯水池長さの検討	基礎岩盤厚さの検討
貯水池長さ	貯水池水位の2倍	基礎岩盤厚さが取水塔高さの0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0の11モデル
取水塔高さ	80m	水位なし
貯水池水位	50m(20%水位)	解析時に示す変動値
岩盤厚さ	空盤野なし	解析時に示す変動値
入力定数	取水塔コンクリート部: $E=2.35 \times 10^{10} \text{ t/m}^2$, $\nu=0.2$, $\rho=2.5 \text{ t/m}^3$, 減衰定数: 10%	基礎岩盤部: $\gamma=2000 \text{ t/m}^3$, $\nu=0.25$, $\rho=2.5 \text{ t/m}^3$, 減衰定数: 2%

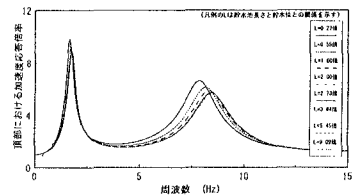


図-2 貯水池長さ検討結果

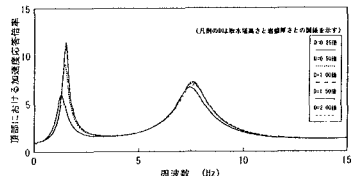


図-3 岩盤厚さ検討結果

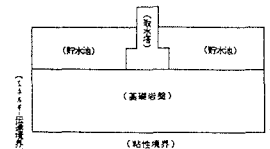


図-4 実物取水塔モデルの概略図

表-2 実測挙動解析の検討条件

解析モデル	取水塔高さ 75m, 貯水池長さ 150m, 岩盤厚さ 80m, 水位 33.58m
入力波	実測地震波(観測位置)の複素応答
入力定数	取水塔コンクリート部: $E=2.35 \times 10^{10} \text{ t/m}^2$, $\nu=0.2$, $\rho=2.5 \text{ t/m}^3$ 基礎岩盤部: $\gamma=2000 \text{ t/m}^3$, $\nu=0.25$, $\rho=2.5 \text{ t/m}^3$, 減衰定数: 2%
内部減衰定数	2%, 5%および10% (取水塔コンクリート部)

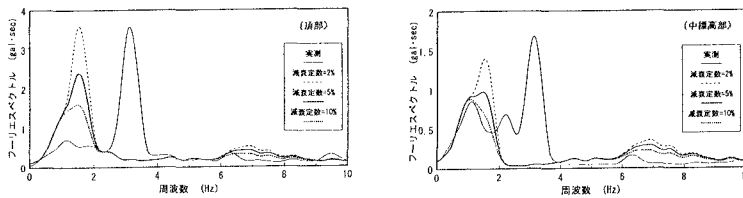


図-5 フリーレスベクトル図

3. 取水塔の地震応答特性

3.1 解析条件

取水塔高さ、貯水位および取水塔と基礎岩盤とのインピーダンス比の影響を検討するため、表-3に示す検討ケースを解析した。入力波形は、表-4に示す広範な卓越周波数を有する8個のダムサイト岩盤での実測地震動（取水塔基礎で最大加速度0.2gに調整した水平成分）を使用した。入力波は観測波形をSHAKEで入力基盤面までもとし、底面粘性境界の下より入力している。なお、解析に使用したFEM分割図を、図-7に示す。

3.2 解析結果

(1) 取水塔高さの影響

ケース1とケース5の解析による取水塔高さ方向の最大応答加速度分布を、図-8に示す。取水塔高さ75mメートルの固有周波数は1.5Hz程度（90%水位）であり、入力波の卓越周波数と近いA3, A4波形で天端での応答加速度は大きくなる。取水塔高さ120mメートルの固有周波数は、75mメートルより短周波数側にずれ、90%水位ではA1波形で上部付近での応答加速度は大きい。

(2) 貯水位の影響

ケース1とケース3の解析による、取水塔高さ方向の最大応答加速度分布を図-9に示す。90%水位時と空虚時とを比較した場合、各波形とも90%水位時の方が大きな値を示している。解析上では、取水塔に作用する動水圧を付加質量として作用させている。

(3) インピーダンス比の影響

空虚時のケース3とケース4の解析による、取水塔高さ方向の最大応答加速度分布を図-10に示す。頂部での最大加速度は、基礎岩盤のS波速度が2000m/sの方が1000m/sより大きな値を示す。これは、インピーダンス比が大きくなる程、基礎岩盤への逸散減衰が大きくなるためである。インピーダンス比が貯水による取水塔の応答増幅効果に及ぼす影響をみるため、インピーダンス比と頂部での最大加速度比（90%水位時/空虚時）との関係を図-11に示す。75mメートルではインピーダンス比が大きくなる程、応答加速度比は小さくなる傾向にある。120mメートルではインピーダンス比の変化に伴う応答加速度比の差異は小さい。取水塔と貯水池の動的相互作用に伴う貯水による応答増幅効果は、取水塔と基礎岩盤とのインピーダンス比により変化している。

4. まとめ

- (1) 取水塔、貯水池及び基礎岩盤とで構成される解析モデルでは、貯水位の約2倍の貯水池長さを、取水塔高さ程度の岩盤厚さを確保することにより、境界の影響は小さくなる。
- (2) 取水塔と基礎岩盤、及び取水塔と貯水池との動的相互作用に伴う取水塔の応答特性は、取水塔と基礎岩盤とのインピーダンス比により変化する。

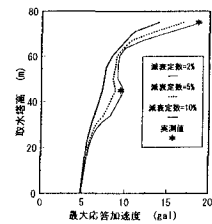


図-6 最大応答加速度分布

表-3 取水塔応答解析条件

ケース名	1-21	1-22	1-23	1-24	1-25	1-26	1-27	1-28
取水塔高さ	75m	75m	75m	75m	120m	120m	120m	120m
貯水池水位	90%水位	90%水位	90%水位	90%水位	空	空	空	空
基礎岩盤S波速度	2000	1000	2000	1000	2000	1000	2000	1000
入力波の卓越周波数	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.0	2.0

※ 基礎岩盤のE/G: 2.0/0.67, 1.0/0.33, 2.0/0.67, 1.0/0.33, 2.0/0.67, 1.0/0.33, 2.0/0.67, 1.0/0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のν: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のρ: 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0, 2.0, 1.0

※ 基礎岩盤のγ: 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0, 20.0, 10.0

※ 基礎岩盤のβ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のα: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のλ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33

※ 基礎岩盤のμ: 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33, 0.25, 0.33