

地震後の排水設備の機能に期待しない場合の止水壁内の地下水流量評価

地震後の排水設備の機能に期待しない場合の止水壁内の地下水流量及び許容水位への到達時間について検討した。

1. 止水壁天端標高の嵩上げ及び止水壁内外の地下水位標高の設定

止水壁の天端は、EL. +4.5mであるが、防潮堤設置後、堤内側の地下水位が変化する可能性があること、及び構造物の耐震評価の設定条件として保守的に地下水位を地表面に設定していることから、止水壁の天端を地表面（EL. +8m）まで嵩上げすることとする。

図1に止水壁の天端嵩上げ概念図を示す。

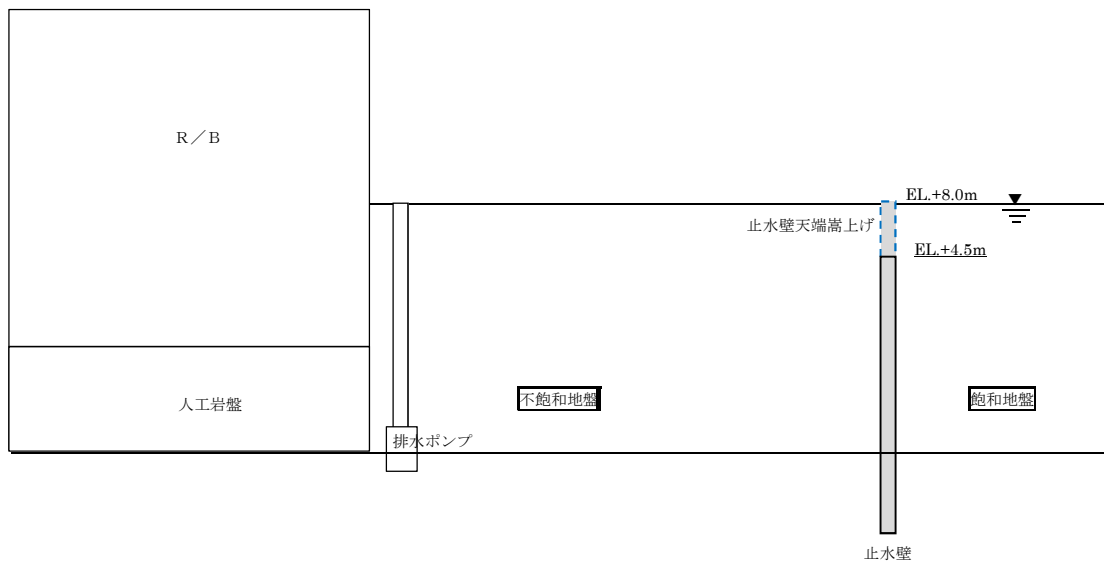


図1 止水壁の天端嵩上げ概念図

2. 地震後の排水設備の機能に期待しない場合における止水壁内の許容地下水位到達までの時間評価

(1) 止水壁の地震時損傷状況の**仮定**

1) 検討内容

止水壁を非線形の梁でモデル化し応答変位法を実施した。止水壁のモデル化位置は図2に示すように岩盤が深い位置（壁高が高い位置）及び浅い位置（壁高が低い位置）とした。

応答変位法に入力する地盤変位量は、近傍の地層モデルによる1次元有効応力解析により求め、第四系は敷地に存在しない豊浦標準砂の液状化特性により強制的に液状化させることを仮定し、止水壁に作用する土圧を保守的に設定した。

1次元有効応力解析により算定した各要素の平均有効主応力 σ_m' 及びせん断ひずみ γ を用いて、「道路橋示方書・同解説IV下部構造編（日本道路協会、平成14年3月）」に基づき地盤ばねのばね定数及び反力上限値を設定した。止水壁内側の地盤ばねは埋土地盤、止水壁外側の地盤ばねは豊浦標準砂により**仮定**した。

応答変位法のモデルを図3に示す。なお、地盤変位量は止水壁のRC部材の下端位置に対する上端位置の最大相対変位発生時刻に着目して抽出した。

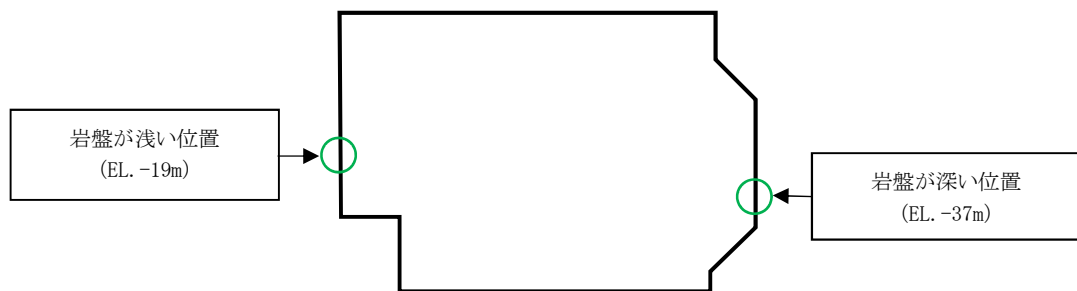


図2 止水壁のモデル化位置

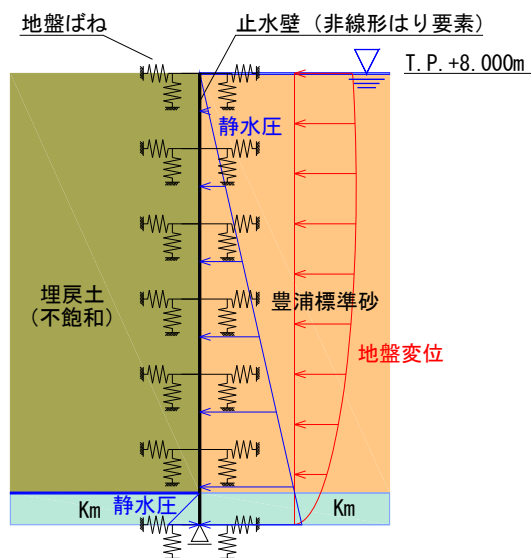


図3 応答変位法解析モデル図

2) 評価結果

応答変位法の評価結果を表1及び図4に示す。

鉄筋コンクリート部材の曲げ軸力に対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、圧縮縁コンクリートひずみ1.0%に対応する曲率(以下、「限界曲率」という。)を許容限界として行い、その結果、照査用の発生曲率が限界曲率以下であることを確認した。

鉄筋コンクリートのせん断力に対する照査は、発生せん断力が鉄筋コンクリート部のうちコンクリートのみのせん断耐力で受け持てることを確認した。

表1 (1) 止水壁の曲げ軸力に対する照査結果

	曲率 ϕ [1/m]	限界曲率 [1/m]	判定
岩盤が浅い位置 (EL. -19m)	8.63×10^{-5}	6.84×10^{-1}	OK
岩盤が深い位置 (EL. -37m)	3.45×10^{-4}	6.83×10^{-1}	OK

表1 (2) 止水壁のせん断に対する照査結果

	せん断力 [kN]	せん断耐力 [kN]	照査値	判定
岩盤が浅い位置 (EL. -19m)	19	277	0.07	OK
岩盤が深い位置 (EL. -37m)	143		0.52	OK

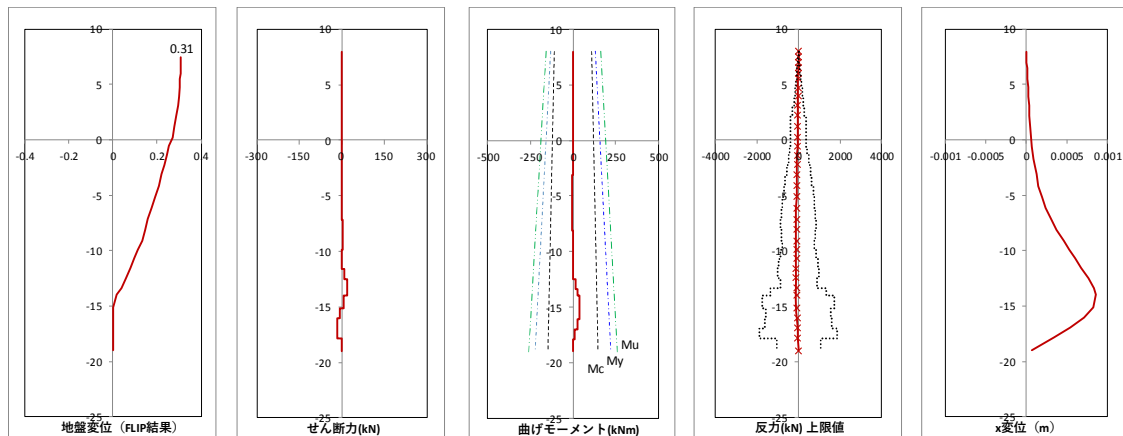


図4 (1) 最大地盤変位量、断面力、地盤反力、止水壁躯体の変位量 (岩盤が浅い位置)

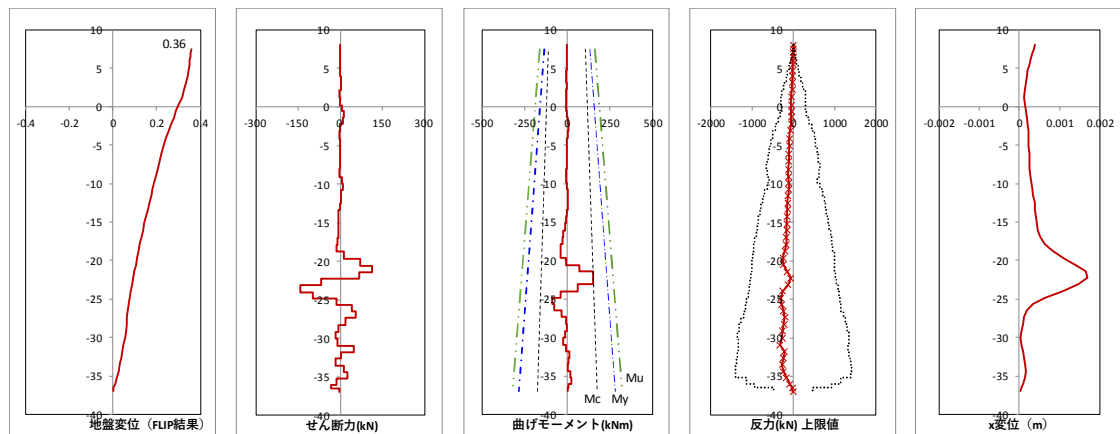


図4 (2) 最大地盤変位量、断面力、地盤反力、止水壁躯体の変位量 (岩盤が深い位置)

(2) 止水壁のひび割れ位置の仮定

止水壁は、図5に示すとおり厚さ 0.6m、幅約 6m の鉄筋コンクリートのブロックからなる構造である。

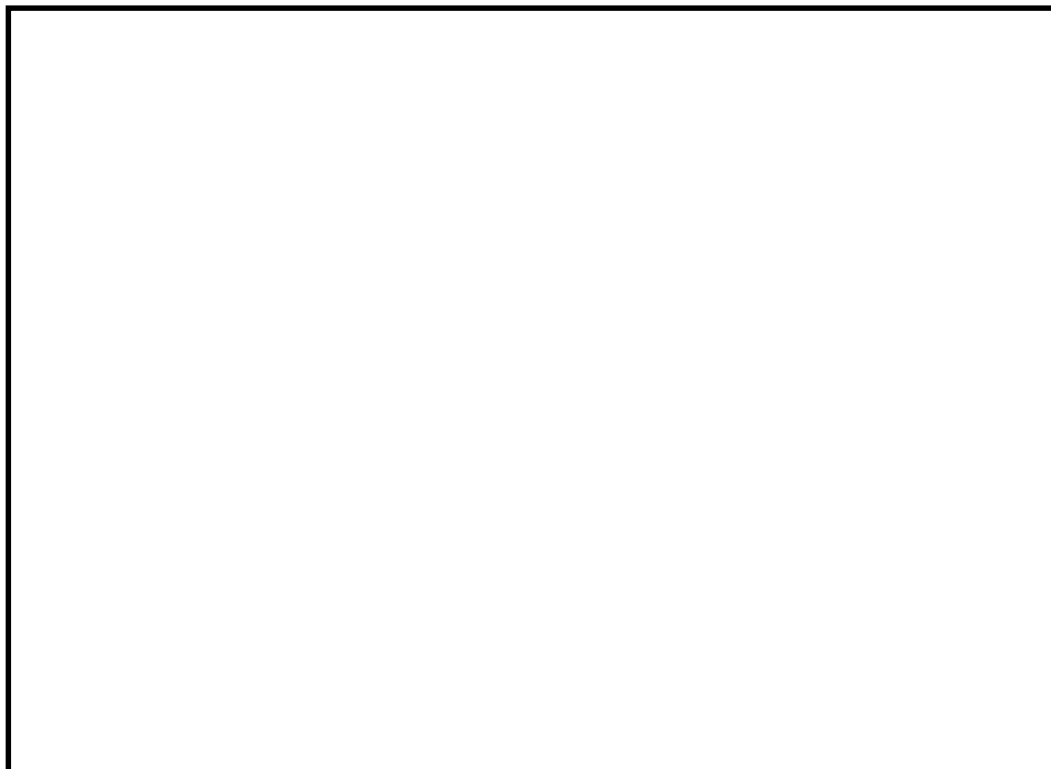


図5 止水壁構造図

止水壁の横断断面の曲げモーメントに対する発生曲率は限界曲率以下であるものの、保守的な設定として、曲げモーメント分布における曲げモーメントがやや卓越する2箇所に水平方向の曲げひび割れを仮定する。

止水壁の横断断面に発生するせん断力は、コンクリートのせん断耐力以下であることから、水平方向のせん断ひび割れは仮定しない。

止水壁の縦断断面においては、直線部と隅角部が存在する。直線部においては、表2に示すとおり1次元有効応力解析で求めた地表面最大相対変位量を用いた引張りひずみの算定結果がコンクリートの引張強度から求められる限界引張ひずみ以下であることから、直線部における鉛直方向のひび割れは仮定しない。

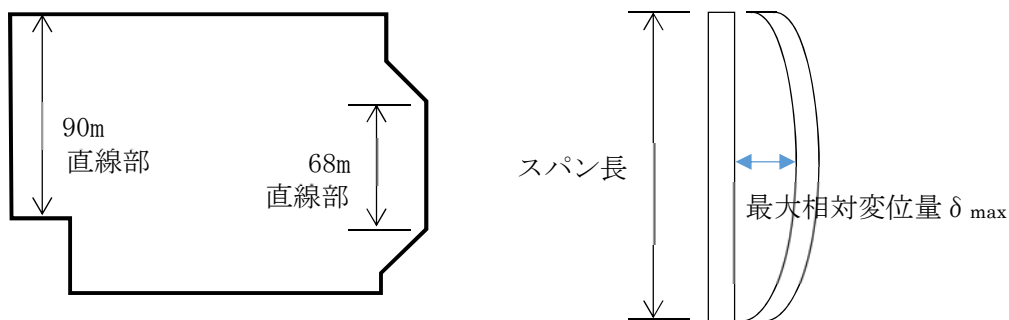


図6 止水壁直線部の評価位置図及び評価法

表2 止水壁直線部のコンクリートの引張りひずみ

	最大相対変位量 δ_{max} (m)	スパン長 (m)	応答変位時のスパン長 (m)	引張ひずみ ϵ_d	判定
90m 直線部	0.31	90	$2 \times \sqrt{\{(90/2)^2 + (0.31)^2\}}$ =90.00214	$0.00214/90$ = 23.8×10^{-6}	$\epsilon_d < \epsilon_{tk}^{**}$ OK
68m 直線部	0.36	68	$2 \times \sqrt{\{(68/2)^2 + (0.36)^2\}}$ =68.00381	$0.00381/68$ = 56.0×10^{-6}	$\epsilon_d < \epsilon_{tk}^{**}$ OK

※コンクリートの引張り強度から求められる限界引張ひずみ

- ・止水壁コンクリートの引張強度 $f_{tk} = 0.23 \times 21^{2/3} = 1.75 \text{N/mm}^2$
- ・止水壁コンクリートの限界引張ひずみ $\epsilon_{tk} = f_{tk}/E_c = 1.75/23.5/1000 = 74.5 \times 10^{-6}$

止水壁の縦断断面の隅角部においては、直線部に比べ応力集中しやすい可能性がある。止水壁の北側においては、岩盤が深く隅角部が複数存在することから、応答変位法を用いて隅角部の地震時の影響評価を行った。

応答変位法に用いる地盤変位量は、1次元有効応力解析で抽出した相対変位量を用い、止水壁内側の地盤ばねは埋土地盤、止水壁外側の地盤ばねは豊浦標準砂により設定した。

応答変位法のモデル図を図7に、評価結果を表3及び図8に示す。隅角部の最大曲率は、限界曲率以下、せん断力に対しては鉄筋コンクリートのうちコンクリートのせん断耐力のみでも受け持てることから、隅角部に損傷は生じないものと判断される。しかしながら、保守的な評価とするため、隅角部10箇所にはび割れを仮定することとした。

なお、仮定したひび割れは、実際には貫通していないひび割れであるが、保守的な配慮として、一様に壁厚方向に貫通したひび割れ幅と仮定して評価した。仮定したひび割れ位置について表4及び図9及び図10に示す。

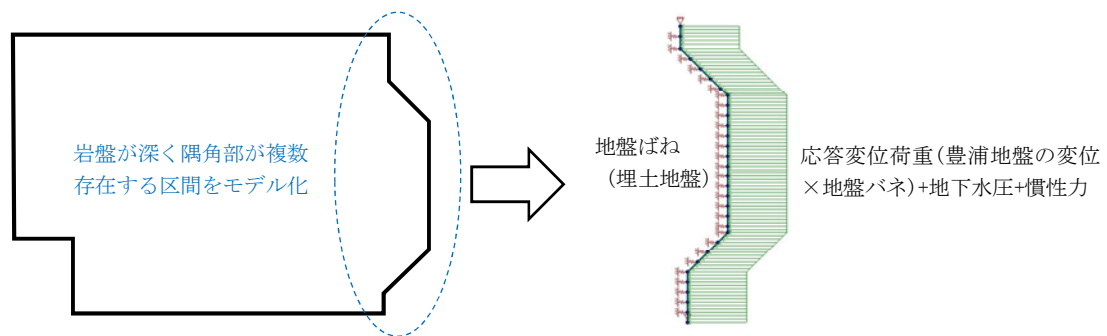


図7 縦断断面の応答変位法モデル図

表3 (1) 隅角部の曲げモーメントに対する照査結果

	曲げモーメント [kNm]	曲率 ϕ [1/m]	限界曲率 [1/m]	判定
隅角部	100	3.12×10^{-3}	6.84×10^{-1}	OK

表3 (2) 隅角部のせん断力に対する照査結果

	せん断力 [kN]	せん断耐力 [kN]	照査値	判定
隅角部	181	277	0.66	OK

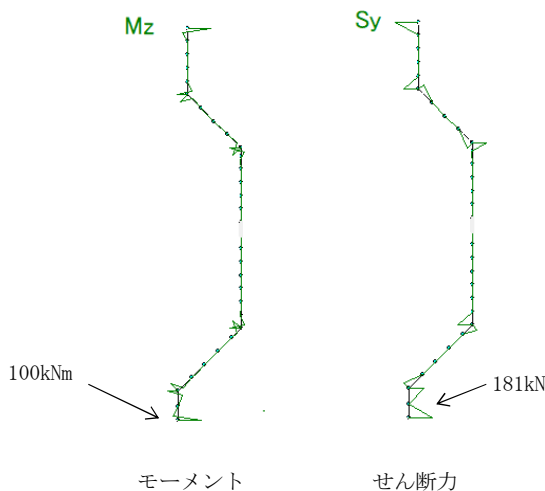


図8 評価結果図 (断面力図)

表4 ひび割れ位置の設定表

設定	ひび割れ位置
水平方向のひび割れ	<ul style="list-style-type: none"> 曲げモーメント図から2箇所を設定 保守的な設定として、ひび割れ幅を貫通ひび割れと仮定し、かつ止水壁全周に設定
鉛直方向のひび割れ	<ul style="list-style-type: none"> 止水壁隅角部 10 箇所を設定 保守的な設定として、ひび割れ幅を貫通ひび割れと仮定し、止水壁天端～下端に設定

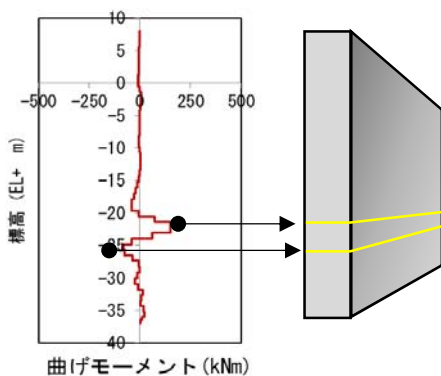


図9 水平方向ひび割れ設定位置図

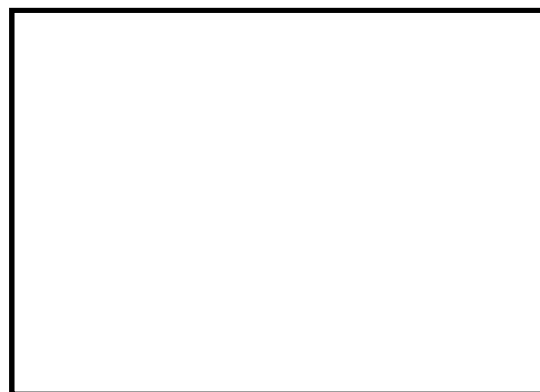


図10 鉛直方向ひび割れ設定位置図

(3) ひび割れ幅の仮定

ひび割れ幅の算定は、「コンクリート標準示方書【構造性能照査編】(土木学会, 2002年)」に基づき行った。

なお、仮定したひび割れから流入する地下水量の算定では、実際には貫通していないひび割れであるが、保守的な配慮として、一様に壁厚方向に貫通したひび割れ幅と仮定して評価した。

① 止水壁の横断断面に仮定する水平方向のひび割れ幅

止水壁の横断断面に仮定する水平方向のひび割れ幅は、応答変位法から抽出した最大曲げモーメントから断面計算により鉄筋応力を算出し、その鉄筋応力を用いて「コンクリート標準示方書【構造性能照査編】」(土木学会, 2002年)の式により算定した。表5に設定値を示す。

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] = 0.44\text{mm} \approx 0.5\text{mm}$$

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7 \quad k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$$

表5 水平方向のひび割れ幅算定の設定値

係数	設定値	単位	備考
E_s	200	kN/mm ²	鉄筋のヤング係数
k_1	1.0	—	鉄筋の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数 (異形鉄筋=1.0, 普通丸鋼及びPC鋼材=1.3)
f'_c	21	N/mm ²	コンクリート圧縮強度 (設計基準強度を使用)
n	1	段	引張鉄筋の段数
c	90.5	mm	かぶり (純かぶり)
c_s	300	mm	鉄筋の中心間隔
ϕ	19	mm	鉄筋径
ε'_{csd}	100×10^{-6}	μ	コンクリートの収縮及びクリープによるひび割れ幅の増加を表す係数 (収縮量: 常時湿潤環境 (土中部材))
σ_{se}	115.2	N/mm ²	鉄筋位置のコンクリートの応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量

②止水壁の縦断断面に仮定する鉛直方向のひび割れ幅

止水壁の縦断断面に仮定する鉛直方向のひび割れ幅は、応答変位法から抽出した最大曲げモーメントから断面計算により鉄筋応力を算出し、その鉄筋応力を用いて「コンクリート標準示方書【構造性能照査編】」（土木学会，2002年）の式により算定した。表6に設定値を示す。

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] = 0.89\text{mm} \doteq 0.9\text{mm}$$

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7 \quad k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$$

表6 鉛直方向のひび割れ幅算定の設定値

係数	設定値	単位	備考
E_s	200	kN/mm ²	鉄筋のヤング係数
k_1	1.0	—	鉄筋の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数 (異形鉄筋=1.0, 普通丸鋼及びPC鋼材=1.3)
f'_c	21	N/mm ²	コンクリート圧縮強度 (設計基準強度を使用)
n	1	段	引張鉄筋の段数
c	92.0	mm	かぶり (純かぶり)
c_s	400	mm	鉄筋の中心間隔
ϕ	16	mm	鉄筋径
ε'_{csd}	100×10^{-6}	μ	コンクリートの収縮及びクリープによるひび割れ幅の増加を表す係数 (収縮量: 常時湿潤環境 (土中部材))
σ_{se}	218.5	N/mm ²	鉄筋位置のコンクリートの応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量

(4) 地下水浸透流解析

1) 解析モデル

解析モデルを図 1 1 に示す (ダルシー則に基づく 1 次元定常浸透流地盤モデル)。

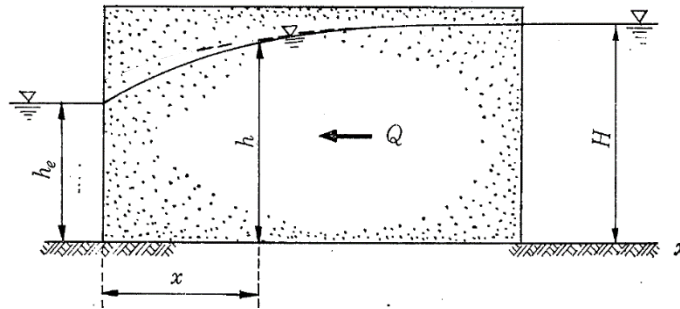


図 1 1 一次元定常浸透流地盤モデル

$$Q = \kappa \times h \times \frac{dh}{dx} = \frac{\kappa}{2 \times L} (H^2 - h_e^2)$$

ここに, Q : 流量 ($m^3/日$), κ : 透水係数 ($m/日$), H : 地下水位 (m)

2) 解析用物性値

解析に用いた物性値を表 7 に示す。

表 7 地下水浸透流解析に用いた物性値

物性値	設定値	設定内容
土層の透水係数 (飽和地盤) κ_{sat}	3.23×10^{-2} cm/s	東海第二発電所の止水壁近傍の地層は埋戻土 (f1 層) であるが, 保守的な評価とするため, 地盤の透水性に影響を及ぼす粒度試験結果の D10 (通過質量百分率 10% の粒径) 又は D20 (通過百分率 20% 時の粒径) が小さく, 細粒分含有率も少ない砂層 (du 層) の揚水試験結果を用いる。
土層の透水係数 (不飽和地盤) κ_{unsat}	$\kappa_{sat} \times 0.1$ $= 3.23 \times 10^{-3}$ cm/s	東海第二発電所敷地内の砂層 (du 層) の飽和・不飽和透水試験結果では, 不飽和地盤の透水係数と飽和地盤の透水係数の比 ($\kappa_{unsat} / \kappa_{sat}$) は 0.003~0.07 であることから, 保守的な評価とするため 0.1 を用いる。
土層の間隙率	0.30	東海第二発電所敷地内の砂層 (du 層) の間隙率は 0.30~0.32 の範囲であることから, 保守的な評価とするため 0.30 を用いる。
止水壁の透水係数	1.98×10^{-6} cm/s	止水壁内の排水設備の排水記録から算定した透水係数 (日最大排水量約 230 $m^3/日$ が, 止水壁外から内側に浸透したと仮定した場合の透水係数。参考資料参照)。 なお, 止水壁の貫通ひび割れを仮定した貫通ひび割れ部の透水係数は, 周辺地盤の土粒子に埋もれることを仮定し, ひび割れ幅範囲に砂 (du 層) の透水係数を用いる。
止水壁から原子炉 までの到達距離	44m	止水壁内部の地下水流域と R/B 領域の面積と同様な円状の半径 (等価半径距離) を用いる。

3) 評価結果

原地盤の調査結果から得られた止水壁内の観測地下水流量を再現計算することにより、透水係数を同定し、止水壁外の水位を地表面と仮定した場合における止水壁内の地下水位の変化量及びこれに関する経過日数を推定した。その際、止水壁内は不飽和であること及び止水壁内の水位の変化に応じて止水壁内外の水頭差が減少して行くことを考慮する。

図12に検討概念図を、表8に止水壁内の地下水流量及びR/B基礎盤下端まで上昇する時間を算定した結果を示す。その結果、R/B基礎盤下端まで上昇する地下水位の時間は30日程度以上となった。また、止水壁内への最大地下水流量としては546m³/日であり、現状の排水設備の排水能力2016m³/日・台以下であることから、問題ないことを確認した。

なお、止水壁内への最大地下水流量に日最大降雨量を考慮しても、排水設備は十分な排水機能を有していると判断される。

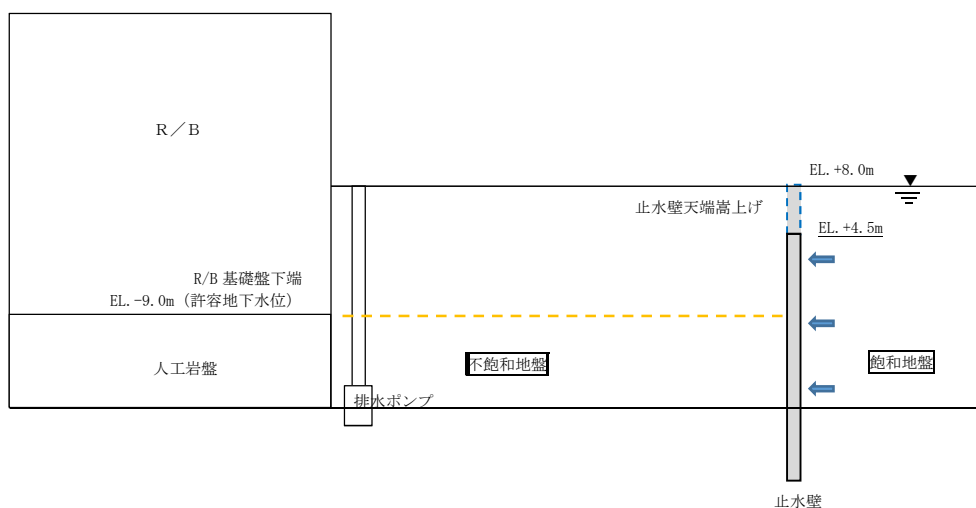


図12 検討概念図

表8 地震後の排水設備の機能に期待しない場合の止水壁内の地下水流量及び許容水位到達までの時間算定結果表

	R/B基礎盤下端まで 上昇する時間(日)	止水壁内への最大地 下水流量(m ³ /日)	備考
地震後の止水壁のひび 割れを仮定しない場合	81日	445m ³ /日	・現状、排水設備は2系 統設置されている。 ・R/B基礎盤下端標高は EL. -9.0m
地震後の止水壁のひび 割れを仮定した場合	63日	546m ³ /日	

(参考) 止水壁の透水係数の設定について

止水壁の透水係数については、止水壁内の排水設備による最大地下水排水量が止水壁外側から内側に浸透したと仮定して求めた。

1. 排水設備による地下水排水量

2014年6月1日～2015年5月30日の1年間における排水設備による地下水排水量と同時期における降雨量を図1に示す。

排水設備による最大地下水排水量は約230m³/日である。

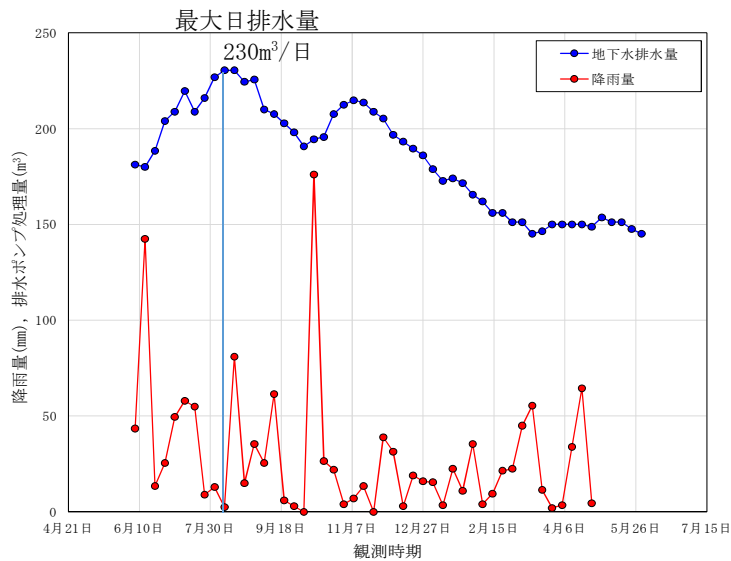


図1 排水設備による地下水排水量と降雨量

2. 止水壁の透水係数

止水壁の透水係数は、排水設備による最大地下水排水量 (Q=230m³/日) と止水壁外側の地下水位を用いて算定した。この最大地下水排水量が、止水壁外側から止水壁を通過して止水壁内側に浸透したものと仮定した結果、止水壁の透水係数は 1.98×10⁻⁶cm/s となった。図2に検討概念図を示す。

$$\kappa_{con} = \frac{Q \times 2 \times L}{(H^2 - h_e^2)}$$

ここに、

Q：止水壁 1m 当たりの流量 (m³/日/m)

L：止水壁厚さ (m)

H：止水壁外側で仮定した地下水位 (m)

h_e：止水壁内側の初期水位 (m)

$$\kappa_{con} = \frac{0.44 \times 2 \times 0.6}{(17.5^2 - 0.2^2)} = 0.0017(\text{day}) = 1.98 \times 10^{-6}(\text{cm/s})$$

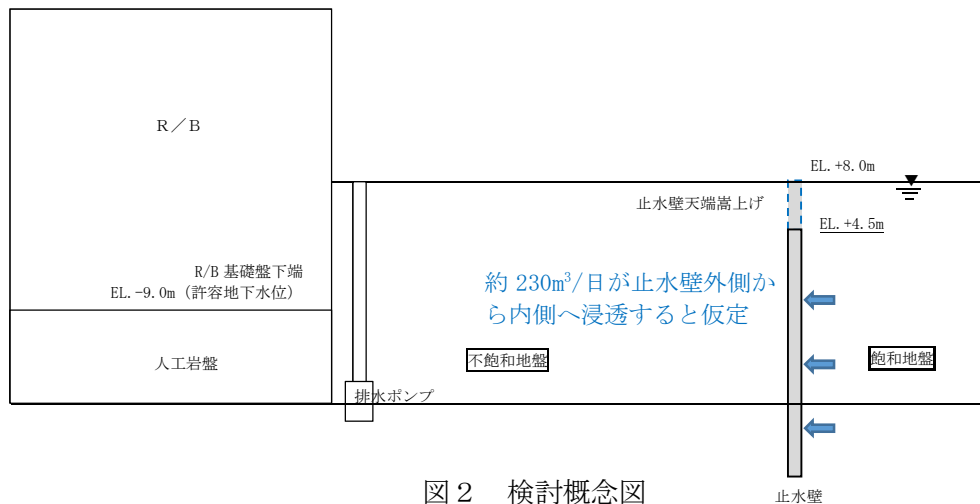


図2 検討概念図

なお、排水設備による地下水排水量は表1に示すとおり、降雨による止水壁内側の雨水を排水しているものがほとんどであり、止水壁を通過している地下水はほとんどないと判断される。したがって、止水壁の実際の透水係数は前述の $1.98 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ より小さいため保守的な設定となっている。図3に止水壁内側の状況図を示す。



図3 止水壁内側の状況図

表1 止水壁内側の降雨量と地盤に浸透する雨水量

止水壁内側	面積	降雨量	降雨量のうち地盤に浸透する雨量		
			最大浸透雨量	最小浸透雨量	平均浸透雨量
建屋構築物範囲	17,600m ²	24,000m ³ /年	建屋構築物範囲では表面流出係数は1.0		
舗装範囲	6,600m ²	9,000m ³ /年	1,350m ³ /年	900m ³ /年	1,130m ³ /年
緑地範囲 (砂利敷含)	6,600m ²	9,000m ³ /年	8,470m ³ /年	6,690m ³ /年	7,580m ³ /年
合計	30,800m ²	42,000m ³ /年	9,820m ³ /年	7,590m ³ /年	8,710m ³ /年
備考	最小表面流出係数を用いた舗装範囲及び緑地範囲からの最大地盤浸透雨量は約9,820m ³ /年であり、観測年間排水量8,850m ³ /年より約970m ³ /年の増加となった。なお、排水増加量970m ³ /年において、最大日排水時の増加量は25m ³ /日である。 ・舗装部の表面流出係数0.85~0.9、 ・緑地部の表面流出係数0.05~0.15				