

本資料のうち、枠囲みの内容は営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

## 立坑構造の屋外重要土木構造物の設計方針

## 目 次

1. 立坑構造の屋外重要土木構造物.....	1
2. 評価方針.....	2
3. 評価条件.....	5
4. 水平断面の設計.....	17
4.1 円筒形立坑.....	17
4.1.1 頂版の設計.....	19
4.1.2 中床版の設計.....	21
4.1.3 底版の設計.....	22
4.2 矩形立坑.....	24
4.2.1 側壁の設計.....	24
4.2.2 頂版及び中床版の設計.....	28
4.2.3 底版の設計.....	30
5. 底版・中床版等の隅角部の影響評価方針（曲げ）.....	31
5.1 矩形立坑.....	31
5.2 円筒形立坑.....	33
6. カルバート接続部の設計.....	35

1. 立坑構造の屋外重要土木構造物

図 1-1 に立坑構造の屋外重要土木構造物の配置図を示す。

立坑は、直接岩盤に設置する構造物の底面長さに対して、高さ方向に長い構造である。

立坑構造の施設としては、円筒形のものとして SA 用海水ピット取水塔， SA 用海水ピット，代替淡水貯槽がある。矩形のものとしては、常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部），常設低圧代替注水系ポンプ室及び緊急用海水ポンプピットがある。



図 1-1 屋外重要土木構造物の平面配置図

## 2. 評価方針

立坑構造の屋外重要土木構造物の耐震評価では、地盤と構造物の相互作用を考慮する2次元有効応力解析により得られる解析結果に基づき、構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価を行う。

鉛直断面の健全性評価については、地震応答解析に基づく発生応力が許容限界以下であることを確認する。

水平断面の健全性評価については、地震応答解析結果より、各部材の照査値が最も厳しい荷重条件を抽出して静的フレーム解析を実施し、発生応力が許容限界以下であることを確認する。

基礎地盤の支持性能評価については、基礎地盤に作用する接地圧が極限支持力に基づく許容限界以下であることを確認する。

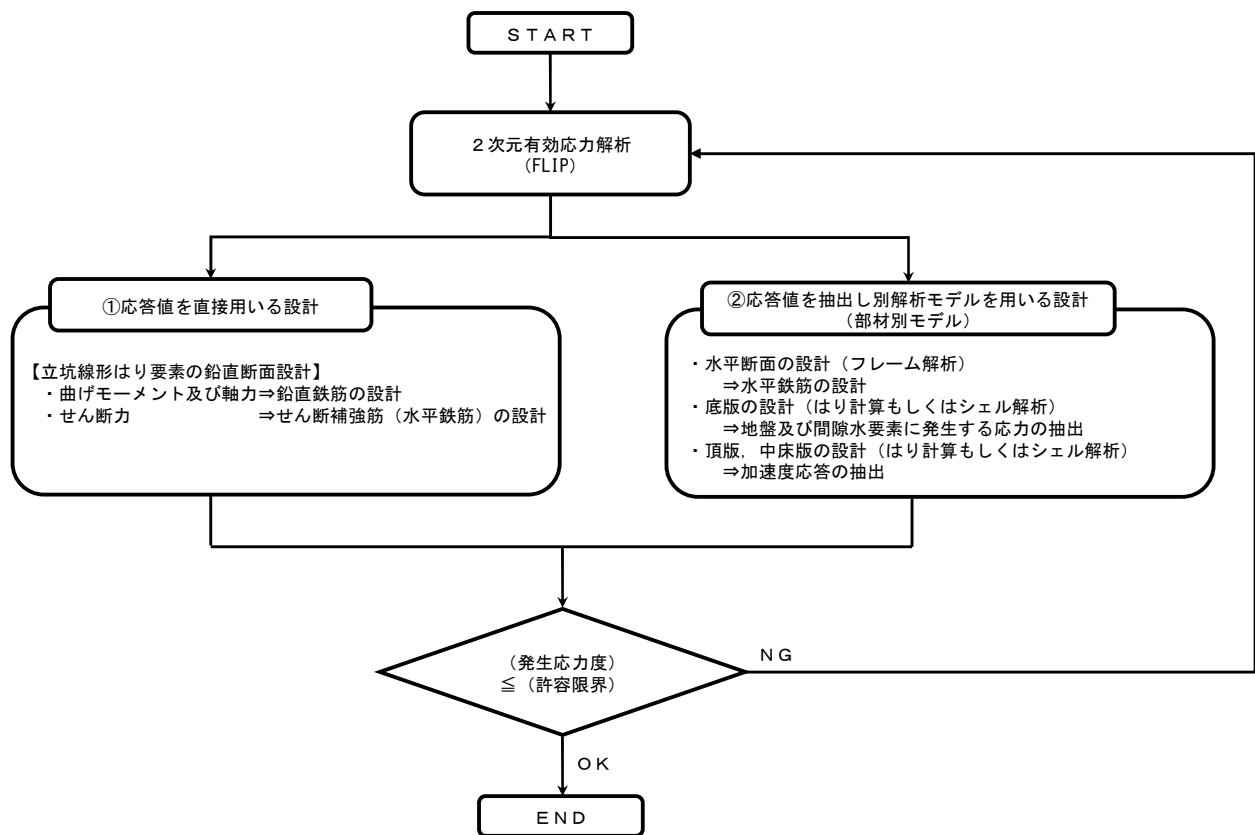
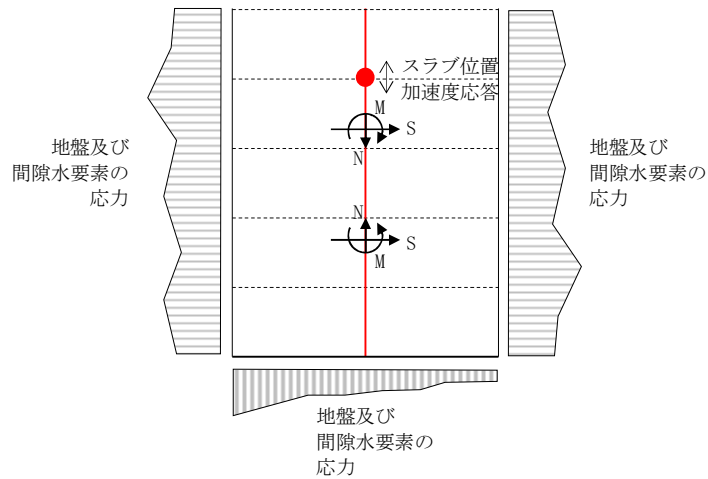


図 2-1 部材評価フロー



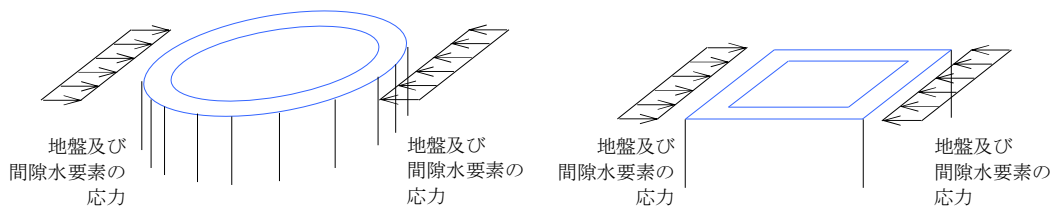
a) 2次元有効応力解析からの応答値の抽出



円筒形立坑

矩形立坑

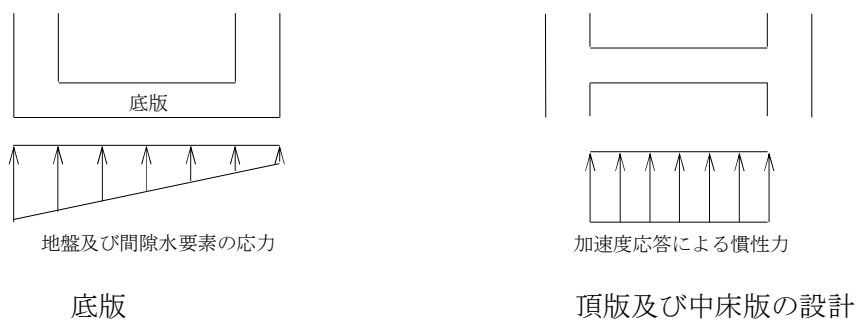
b) 立坑線形はり要素の鉛直断面設計



円筒形立坑

矩形立坑

c) 水平断面の設計 (フレーム計算)



底版

頂版及び中床版の設計

d) スラブの設計

図 2-2 部材評価概念図

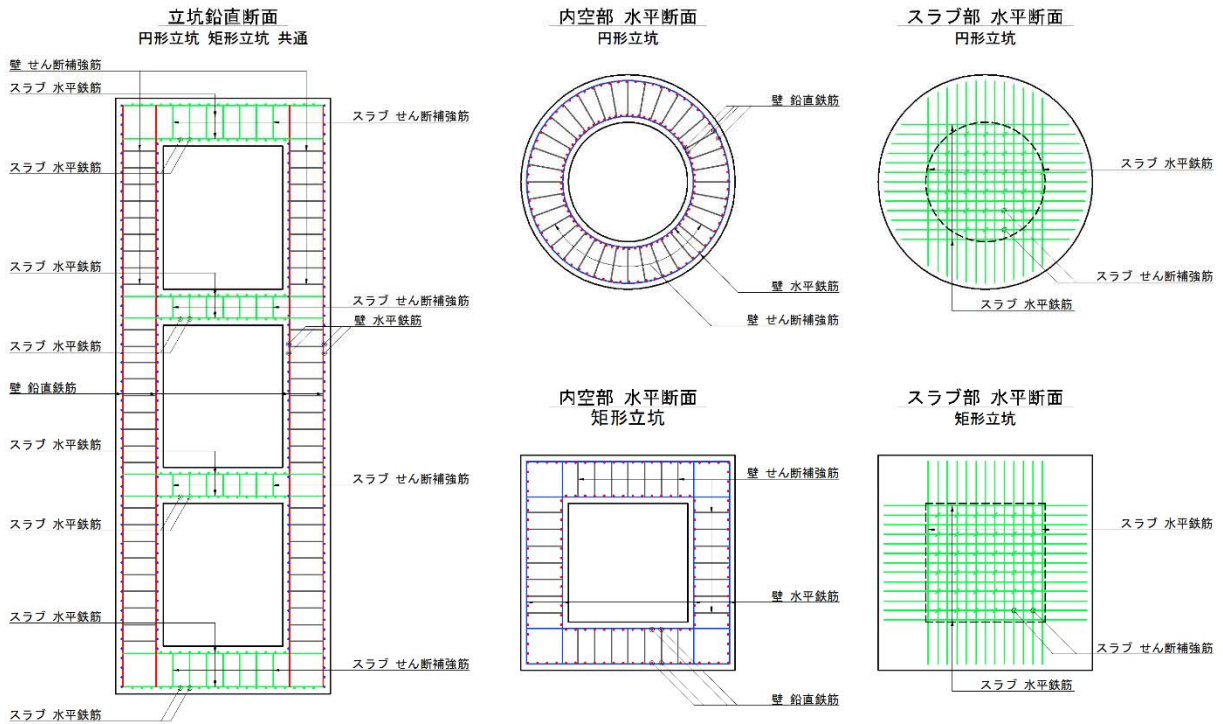


図 2-3 各部材評価で照査対象とする鉄筋

表 2-1 各部材評価で照査対象とする鉄筋

部材	照査対象鉄筋	記号	部材評価
壁	鉛直鉄筋	—	立坑線形はり要素の鉛直断面設計 (曲げモーメント及び軸力)
	水平鉄筋	—	立坑線形はり要素の鉛直断面設計 (せん断力)
			水平断面の設計 (曲げモーメント及び軸力)
	せん断補強筋	—	水平断面の設計 (せん断力)
底版	水平鉄筋	—	底版の設計 (曲げモーメント)
	せん断補強筋	—	底版の設計 (せん断力)
頂版及び 中床版	水平鉄筋	—	頂版及び中床版の設計 (曲げモーメント)
	せん断補強筋	—	頂版及び中床版の設計 (せん断力)

\*注記) 壁の水平鉄筋には、鉛直断面設計におけるせん断力と水平断面の設計における曲げモーメント及び軸力が同時に作用するため、各々に対して必要となる鉄筋量を足し合わせた鉄筋量を配置する。

### 3. 評価条件

#### (1) 適用基準

適用する規格，基準を表 3-1 に示す。

表 3-1 適用する規格，基準類

項目	適用する規格，基準類	備考
使用材料及び材料定数	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] ( (社) 土木学会, 2002 年制定)</li> <li>・道路橋示方書 ( I 共通編・IV 下部構造編) ・同解説 ( (社) 日本道路協会, 平成 24 年 3 月)</li> </ul>	—
荷重及び荷重の組合せ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] ( (社) 土木学会, 2002 年制定)</li> <li>・道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編 ( (社) 日本道路協会, 平成 24 年 3 月)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・永久荷重 + 偶発荷重の適切な組合せを検討</li> <li>・水平断面の地震時荷重状態</li> </ul>
許容限界	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] ( (社) 土木学会, 2002 年制定)</li> <li>・道路橋示方書 ( I 共通編・IV 下部構造編) ・同解説 ( (社) 日本道路協会, 平成 24 年 3 月)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐震評価により算定した曲げ圧縮応力, 曲げ引張応力及びせん断応力が許容限界以下であることを確認</li> <li>・基礎地盤に作用する接地圧が極限支持力に基づく許容限界以下であることを確認</li> </ul>
地震応答解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>・J E A G 4 6 0 1 -1987 ( (社) 日本電気協会)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・有限要素法による 2 次元モデルを用いた時刻歴非線形解析</li> </ul>

#### (2) 地下水位

地下水位は地表面とする。

#### (3) 地震応答解析手法

立坑構造物の地震応答解析は，地盤と構造物の相互作用を考慮できる 2 次元有限要素法を用いて，基準地震動  $S_s$  に基づき設定した水平地震動と鉛直地震動の同時加振による逐次時間積分の時刻歴応答解析にて行う。構造梁は，線形はり要素でモデル化する。また，地盤については，有効応力の変化に応じた地震時挙動を考慮できるモデル化とする。

地震応答解析については，解析コード「FLIP Ver. 7.3.0\_2」を使用する。なお，解析コードの検証及び妥当性確認の概要については，「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

地震応答解析手法の選定フローを図 3-1 に示す。

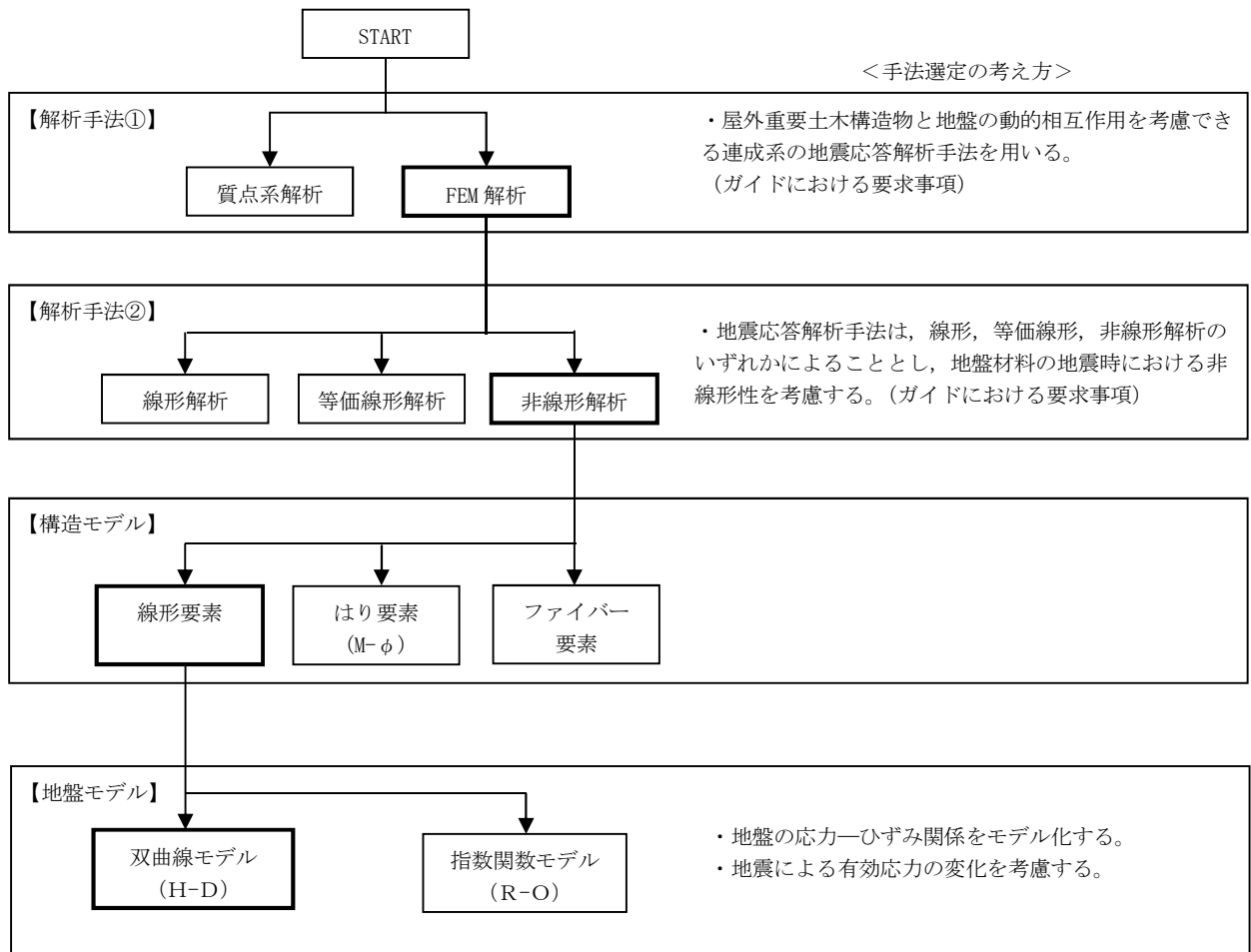


図 3-1 地震応答解析手法の選定フロー

地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線の構成則を有効応力解析へ適用する際は、地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線に関するせん断ひずみ及び有効応力の変化に応じた特徴を適切に表現できるモデルを用いる必要がある。

一般に、地盤は荷重を与えることによりせん断ひずみを増加させていくと、地盤のせん断応力は上限値に達し、それ以上はせん断応力が増加しなくなる特徴がある。また、地盤のせん断応力の上限値は有効応力に応じて変化する特徴がある。

よって、耐震評価における有効応力解析では、地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線の構成則として、地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線に関するせん断ひずみ及び有効応力の変化に応じたこれら 2 つの特徴を表現できる双曲線モデル (H-D モデル) を選定する。



(4) 解析モデル領域

地震応答解析モデル領域は、境界条件の影響が地盤及び構造物の応力状態に影響を及ぼさないよう、十分広い領域とする。具体的には、J E A G 4 6 0 1-1987 を参考に、モデル幅を構造物基礎幅の5倍以上、構造物下端からモデル下端までの高さを構造物幅の2倍以上確保する。なお、解析モデルの境界条件は、側方における波動の反射の影響を低減するとともに、下方への波動の逸散を考慮するために、側面及び底面ともに粘性境界とする。立坑構造物の地震応答解析モデルを図3-2に示す。

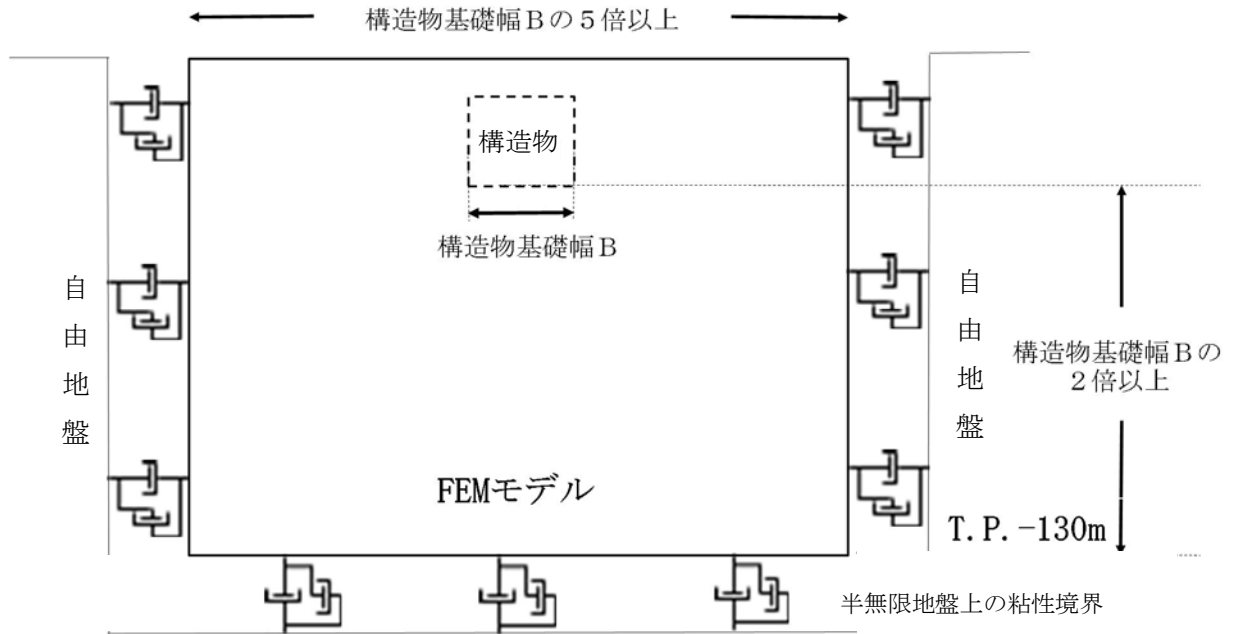


図3-2 解析モデル領域の考え方

(5) 構造物のモデル化（円筒形立坑及び矩形立坑）

立坑の構造部材は、立坑中心位置での構造梁（線形はり要素）に縮合してモデル化する。

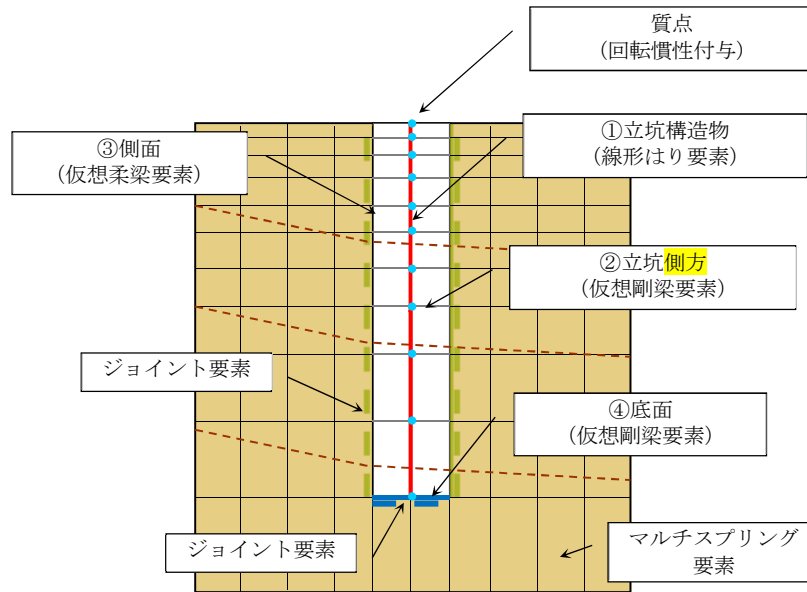


図 3-3 立坑構造物の解析モデル概念図

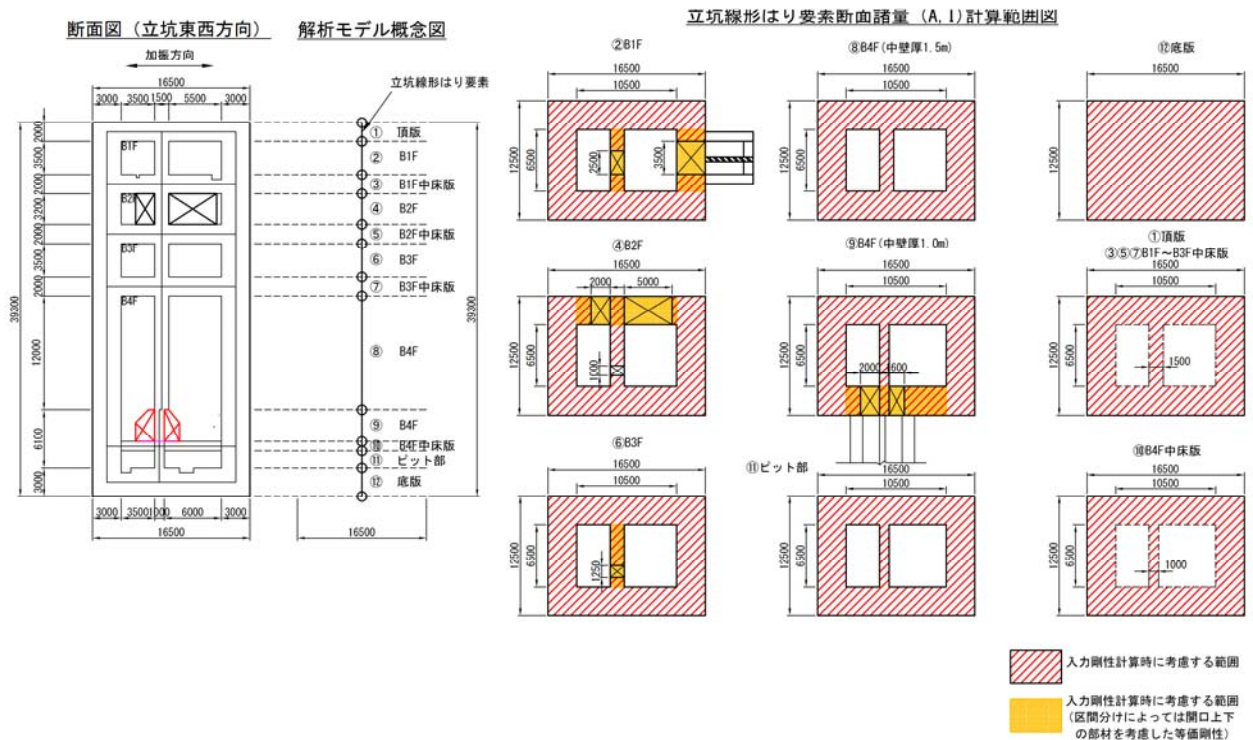


図 3-4 立坑構造物（線形はり要素）の入力剛性設定例（矩形立坑）

①立坑構造物（線形はり要素）

図 3-4 に示すように各層における開口配置を考慮し、開口を控除した断面諸量（断面積  $A$ 、断面 2 次モーメント  $I$ ）を設定する。

開口については、部材厚よりも開口サイズ（1 辺の長さ）が大きい場合には開口として評価する。また、部材厚よりも開口サイズが小さい場合には開口なしとして評価し、実配筋としては、

開口により切断される鉄筋と同等以上を開口部周辺に配置する（周囲への鉄筋の配置で補強が可能な規模の開口については、開口がない部材としての質量ならびに剛性を考慮して断面力を保守的に算定する）。

#### ②立坑側方（仮想剛梁要素）

立坑の構造部材に対して剛な断面性能を有する仮想剛梁として、地盤との相互作用を表現する。

$$\text{軸剛性} = 100 \times EA$$

$$\text{曲げ剛性} = 100 \times EI$$

$$\text{質量密度 } \rho = \text{ポアソン比 } \nu = \text{有効せん断面積} = 0.0$$

#### ③側面（仮想柔梁要素）

側面ジョイント要素との接合面に、解析モデルの挙動に影響を及ぼさないよう十分に柔な断面性能を有する仮想柔梁を配置する。

$$\text{軸剛性} = EA/10^6$$

$$\text{曲げ剛性} = EI/10^6$$

$$\text{質量密度 } \rho = \text{ポアソン比 } \nu = \text{有効せん断面積} = 0.0$$

#### ④底面（仮想剛梁要素）

立坑構造部材に対して剛な断面性能を有する仮想剛梁を設定し底面のロッキング挙動を表現する。

$$\text{軸剛性} = 100 \times EA$$

$$\text{曲げ剛性} = 100 \times EI$$

$$\text{質量密度 } \rho = \text{ポアソン比 } \nu = \text{有効せん断面積} = 0.0$$

ここに、E：コンクリートのヤング率

- ・側面および底面と地盤との間にジョイント要素を配置し、接合面の剥離及びすべりを考慮する。
- ・構造梁の質量は節点付加質量および回転慣性で考慮する。
- ・内部配管、内水、積雪荷重についても節点付加質量で考慮する。積雪については回転慣性も考慮する。

(6) 地盤のモデル化

地盤は、マルチスプリング要素及び間隙水要素にてモデル化し、地震時の有効応力の変化に応じた非線形せん断応力～せん断ひずみ関係を考慮する。

(7) ジョイント要素

地盤と構造体の接合面にジョイント要素を設けることにより、強震時の地盤と構造体の接合面における剥離及びすべりを考慮する。

ジョイント要素は、地盤と構造体の接合面で法線方向及びせん断方向に対して設定する。法線方向については、常時状態以上の引張荷重が生じた場合、剛性及び応力をゼロとし、剥離を考慮する。せん断方向については、地盤と構造体の接合面におけるせん断抵抗力以上のせん断荷重が生じた場合、せん断剛性をゼロとし、すべりを考慮する。図 3-5 に、ジョイント要素の考え方を示す。

なお、せん断強度  $\tau_f$  は次式の Mohr-Coulomb 式により規定される。  $c$ 、 $\phi$  は周辺地盤の  $c$ 、 $\phi$  とする。

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi$$

ここで、

- $\tau_f$  : せん断強度
- $c$  : 粘着力
- $\phi$  : 内部摩擦角

ジョイント要素のばね定数は、数値計算上不安定な挙動を起こさない程度に十分大きい値として、港湾構造物設計事例集（沿岸開発技術センター）に従い、表 3-2 の通り設定する。

表 3-2 ジョイント要素のばね定数

	せん断剛性 $k_s$ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	圧縮剛性 $k_n$ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )
側方及び底面	$1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$

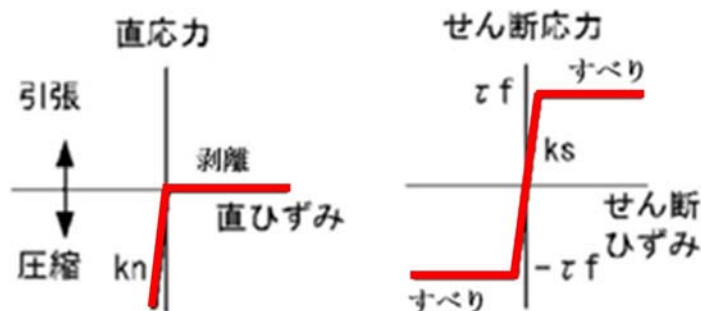


図 3-5 ジョイント要素の考え方

(8) 水荷重

満水状態の範囲においては、固定水として付加質量でモデル化し、自由水面がある範囲については、Westergaard 式により動水圧を考慮する。図 3-6 に水荷重設定に係る概念図を示す。



図 3-6 水荷重のモデル化概念図

表 3-3 水荷重の設定

記号	状態	水平	鉛直	内容
○	自由水面	○		負担高分の動水圧を付加質量として設定する。
●	自由水面	○		負担高分の動水圧を付加質量として設定する。
			○	中床版より上の容積の水重を付加質量として中床版上面に付加する。
○	満水	○		負担高分の水重を付加質量として付加する。
●	満水	○		負担高分の水重を付加質量として付加する。
			○	中床版より下の内空容積分の水重を 1/2 ずつ付加質量として中床版底面ならびに底盤上面に付加する。初期応力解析時は全水重を底盤上面に付加質量として設定する。

(9) 要素分割

要素分割については、地盤の波動をなめらかに表現するために、対象とする波長に対して 5 または 4 分割した値を考慮し、要素高さを 1m 程度まで細分割して設定する。波長算定のための最大周波数は 20Hz とする。

(10) 評価方針（円筒形立坑）

円形立坑は直交する 2 断面を解析断面として選定し、2 次元有効応力解析を実施し部材の設計を行う。立坑の鉛直鉄筋は 2 次元有効応力解析にて算出される線形はり要素の発生断面力（曲げモーメント及び軸力）を用いて照査を行う。

円形立坑においては、円周方向に配置した鉛直鉄筋を全断面有効として照査する。

鉛直断面のせん断照査については、発生せん断力  $S$  に対し有効断面積 ( $A_w$ ) で抵抗するものとし、せん断応力度  $\tau = S/A_w$  がコンクリート標準示方書に示される許容せん断応力度  $\tau_{a1}$  以下である場合はせん断補強筋は不要である。

せん断応力度が許容せん断応力度  $\tau_{a1}$  を超える場合はせん断補強筋が必要となるが、鉛直断面せん断照査におけるせん断補強筋は、水平断面照査における主鉄筋に相当する。このため両設計で必要となる配筋量を足し合わせた配筋量で設計を行う。

なお、せん断照査においては、コンクリート標準示方書に準拠し、円と同面積を有する正方形断面に対して、せん断抵抗部材の有効高さを設定する。

(11) 評価方針（矩形立坑）

矩形立坑は強軸断面方向及び弱軸断面方向が明確でないことから、矩形立坑二方向を設計断面として選定する。矩形立坑二方向に対し 2 次元有効応力解析を実施し部材の設計を行う。立坑の鉛直鉄筋は 2 次元有効応力解析にて算出される線形はり要素の発生断面力（曲げモーメント及び軸力）を用いて照査を行う。

図 3-7 に鉛直鉄筋配置の概念図を示す。鉛直鉄筋を配置する範囲は側壁内—内幅（図 3-7 の青塗り範囲）とし、隅角部に配置される鉛直鉄筋は設計において原則考慮しない。RC 断面計算に用いる鉛直鉄筋配置をこのようにすることで矩形二方向断面を独立して設計することができる。

鉛直断面のせん断照査については、発生せん断力 ( $S$ ) に対し図 3-7 の有効断面積 ( $A_w$ , 図 3-7 の赤塗り範囲) で抵抗するものとし、せん断応力度  $\tau = S/A_w$  がコンクリート標準示方書に示される許容せん断応力度  $\tau_{a1}$  以下である場合はせん断補強筋は不要である。

許容せん断応力度  $\tau_{a1}$  を超える場合はせん断補強筋が必要となるが、鉛直断面せん断照査におけるせん断補強筋は、水平断面照査における主鉄筋に相当する。このため両設計で必要となる配筋量を足し合わせた配筋量で設計を行う。

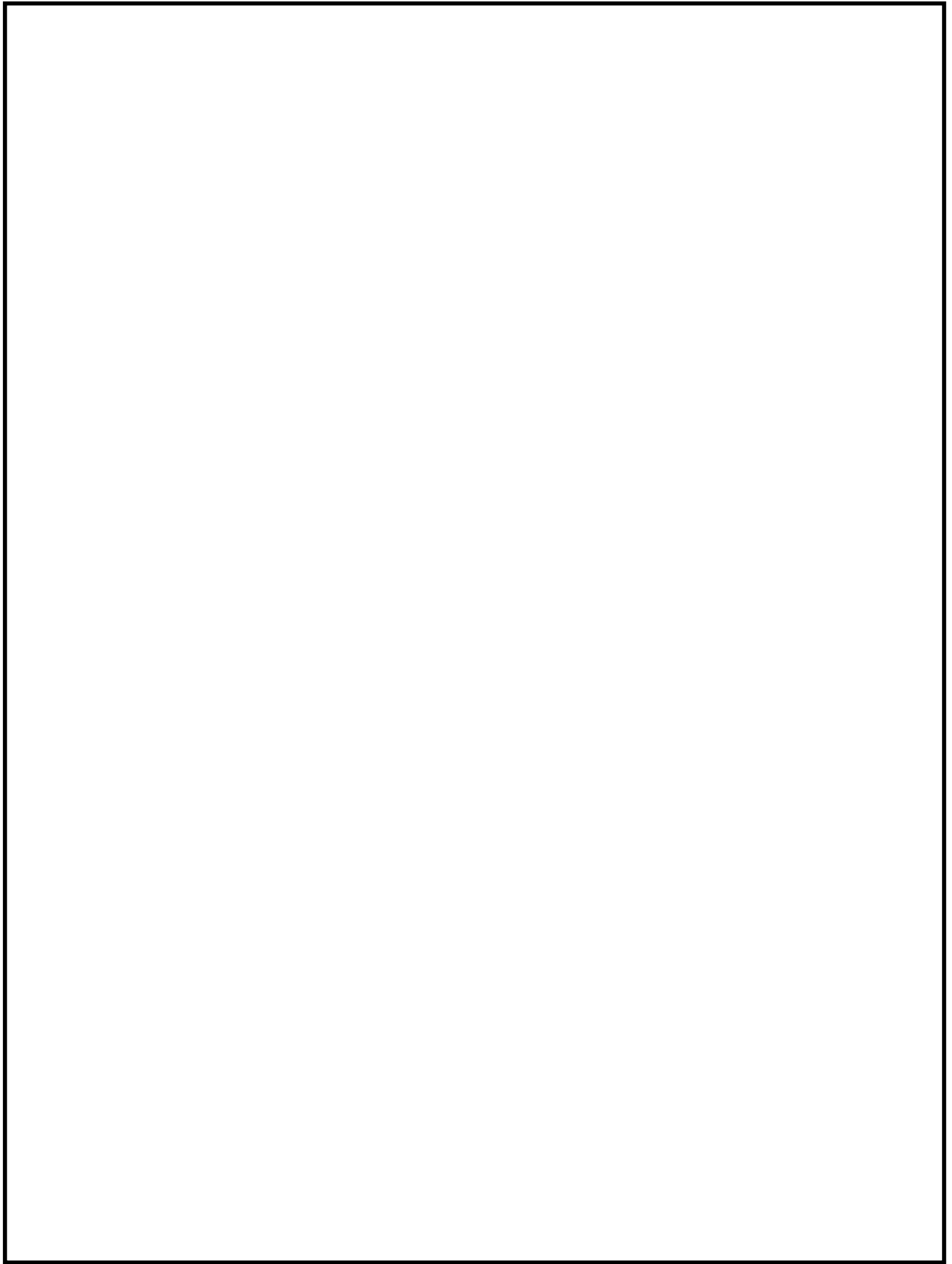


図 3-7 矩形立坑の鉛直鉄筋配置概念図

(12) 開口部の大きさに応じた壁部材の耐震壁としての評価

壁部材の場合、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（1999年版 日本建築学会）に基づき、開口と壁の面積比が 0.4 以下である場合、その壁部材を有開口耐震壁として考慮する。開口と壁の面積比が 0.4 以上である場合は、有開口耐震壁として考慮しない。

19条 耐 震 壁

1. 水平荷重を受ける耐震壁の許容水平せん断力  $Q_A$  は、(22) 式のうち、いずれか大きいほうをとることができる。

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= r t f_c \\ Q_2 &= r (Q_w + \sum Q_c) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

ただし、 $r$ ：開口に対する低減率で、(23) 式の  $r_1$  と  $r_2$  のうち、いずれか小さいほうによる。

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= 1 - \frac{l_o}{l} \\ r_2 &= 1 - \sqrt{\frac{h_o l_o}{h l}} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

$$\left( \text{適用範囲 } \sqrt{\frac{h_o l_o}{h l}} \leq 0.4 \right)$$

$Q_w$ ：無開口壁板の壁筋が負担できる許容水平せん断力で、(24) 式による。

$$Q_w = \rho_s t' f_t \quad (24)$$

ただし、 $\rho_s$  の値が 1.2% 以上の場合は、 $\rho_s$  を 1.2% として計算する。

$Q_c$ ：壁板周辺の柱（1本）が負担できる許容水平せん断力で、(25) 式による。

$$Q_c = b j (1.5 f_c + 0.5 \rho_s f_t (\rho_w - 0.002)) \quad (25)$$

ただし、 $\rho_w$  の値が 1.2% 以上の場合は、 $\rho_w$  を 1.2% として計算する。

- 記号
- $t$ ：壁板の厚さ
  - $l$ ：壁板周辺の柱中心間距離
  - $h$ ：壁板周辺の梁中心間距離
  - $l_o$ ：開口部の長さ
  - $h_o$ ：開口部の高さ
  - $l'$ ：壁板の内法長さ
  - $h'$ ：壁板の内法高さ
  - $\rho_s$ ：壁板の直交する各方向のせん断補筋比のうち小さいほうの値
  - $f_c$ ：コンクリートの短期許容せん断応力度
  - $f_t$ ：壁筋のせん断補強用短期許容引張応力度

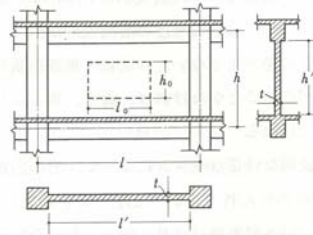


図 9

一方、本規準で定める等価開口周比を適用し非構造部材と判断し構造計算上その存在を無視した有開口壁や、安易なスリット配置で非構造部材と見なした壁などの存在が被害を大きくした原因となった事例も報告されている<sup>4)</sup>が、本規準では耐震壁とみなされる条件を等価開口周比で示し、開口が大きい ( $\sqrt{h_o l_o / h l} > 0.4$ ) 壁は剛域を考慮したラーメン解法によってその応力を求めることが適当であるとしている。すなわち、等価開口周比はその値の大小によって応力算出モデルが異なることを示すもので、構造計算上、開口壁の存在を無視して良い条件を示すものではないことに注意されたい。

(出典：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 1999年11月 日本建築学会)



(13) 側壁の開口部のせん断力に対する考え方

立坑を1本の線形はり要素としてモデル化した場合、加振方向の側壁（耐震壁）は、はり要素のウェブとして機能する。はり要素に発生する面外せん断力に対し、はり要素のウェブでせん断に抵抗するものとし、はり要素の発生せん断応力度  $\tau = S/A_w$  を算定する。このとき  $A_w$  ははりの有効せん断面積（=ウェブの断面積）である。

上記のせん断応力度  $\tau$  は、はり要素断面のウェブに発生するせん断応力度であり、平面応力要素に発生する面内せん断応力度相当である。

はり要素のせん断に対する照査は、「コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] 2002 年版」に示されるはりの許容せん断応力度に対する設計を行う。はりに発生するせん断応力度  $\tau$  がコンクリートのみで受け持つことのできるはりの許容せん断応力度  $\tau_{a1}$  以下であればせん断補強筋は不要であり、 $\tau_{a1}$  を超える場合ははりのせん断補強筋が必要となる。

以上より、はりのせん断応力度  $\tau$  の算定に際し、はりのせん断有効面積（ウェブの面積）について開口がある場合はその影響を考慮して面積を減少させる。この方法によりせん断力に対する開口の影響を考慮する。

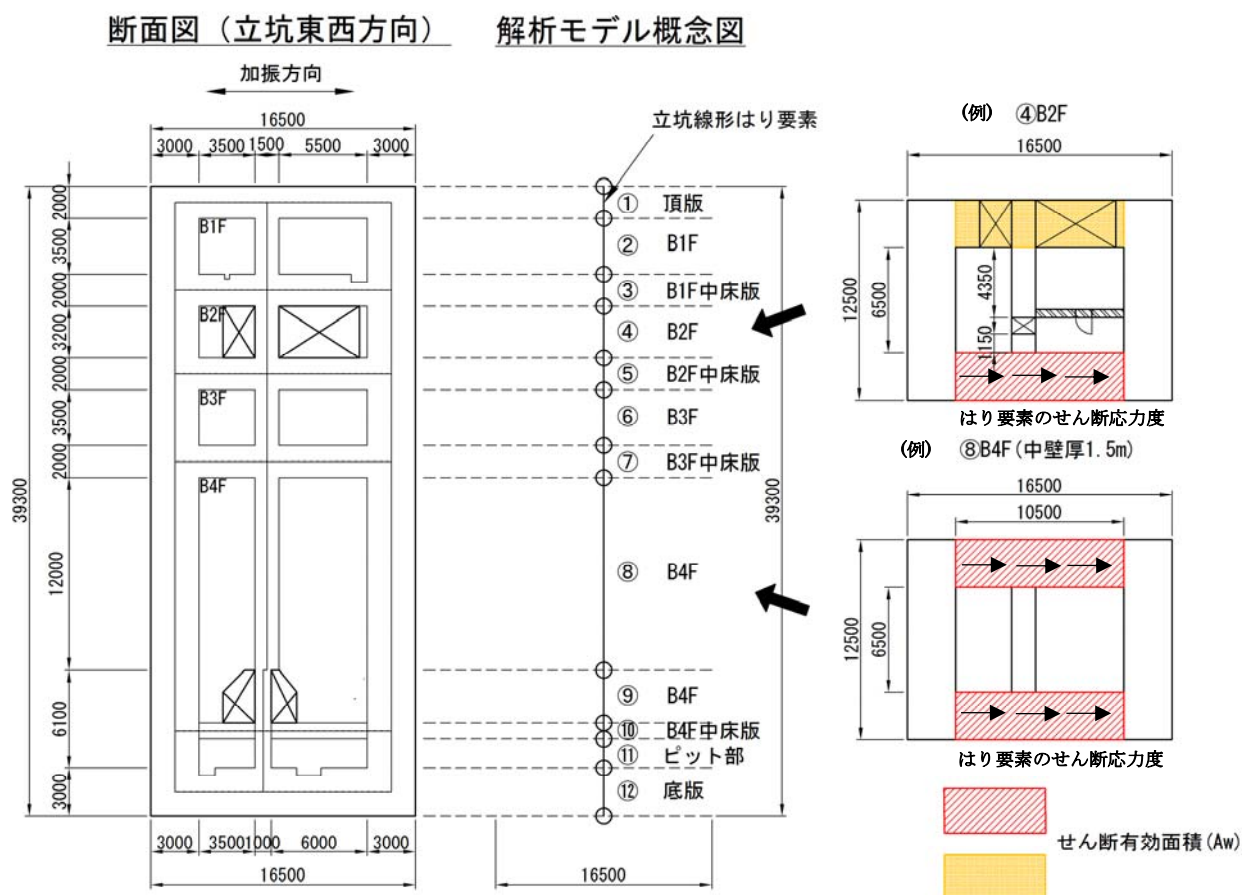


図 3-8 立坑を線形はり要素でモデル化した場合の概念図

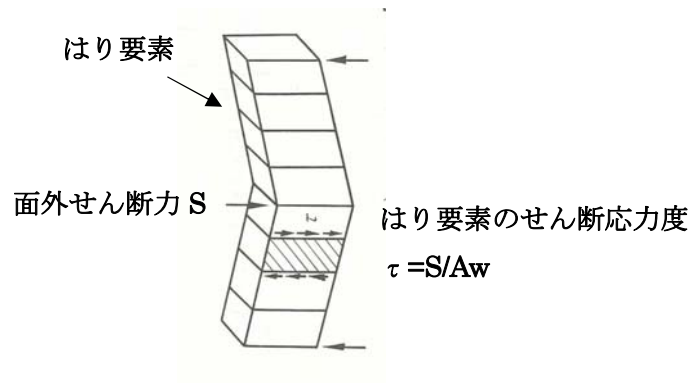


図 3-9 はり要素のせん断変形概念図

#### 4. 水平断面の設計

##### 4.1 円筒形立坑

円形立坑の側壁開口の最大箇所はS A用海水ピットならびにS A用海水ピット取水塔で、内径 1.2m の鋼製管によるものであるが、立坑とは岩盤内で接続すること、周長及び壁厚に比べて開口規模が小さいことから、影響は微小であると考えられる。したがって開口によって不足する鉄筋ならびに補強鉄筋を開口部周囲に配置する設計とする。

立坑水平断面については、側壁を線形はり要素としてモデル化した静的フレーム解析により照査を行なう。

地震時の立坑鉛直はり変位と地盤変位の関係により、立坑線形はり要素両側の立坑側方仮想剛梁に圧縮軸力が発生する場合（両押し）と、片側のジョイント要素が剥離して片側の仮想剛梁のみに圧縮軸力が発生する場合（片押し）の状況が想定される。水平断面評価においてはこの両押し、片押しの両者の状況を踏まえて評価を実施する。

水平断面の設計荷重は、片押し時は2次元有効応力解析により得られる立坑側方の仮想剛梁要素に作用する地盤反力（地盤要素の水平有効直応力（ $\sigma_x'$ ）+間隙水要素の発生応力（ $\Delta u$ ）の前背面差分が最大となる位置の応答を抽出し、片側のみにこの地盤反力を作用させる。両押し時は、立坑側方の仮想剛梁要素に作用する地盤反力（地盤要素の水平有効直応力（ $\sigma_x'$ ）+間隙水要素の発生応力（ $\Delta u$ ）が最大となる位置の応答を抽出し、同時刻の背面側の荷重とともに両側から作用させる。

常時荷重については静止土圧及び静水圧を考慮する。設計断面の適用範囲ごとに最浅部（最小）及び最深部（最大）の常時荷重を算定し、静的フレーム解析に用いる。

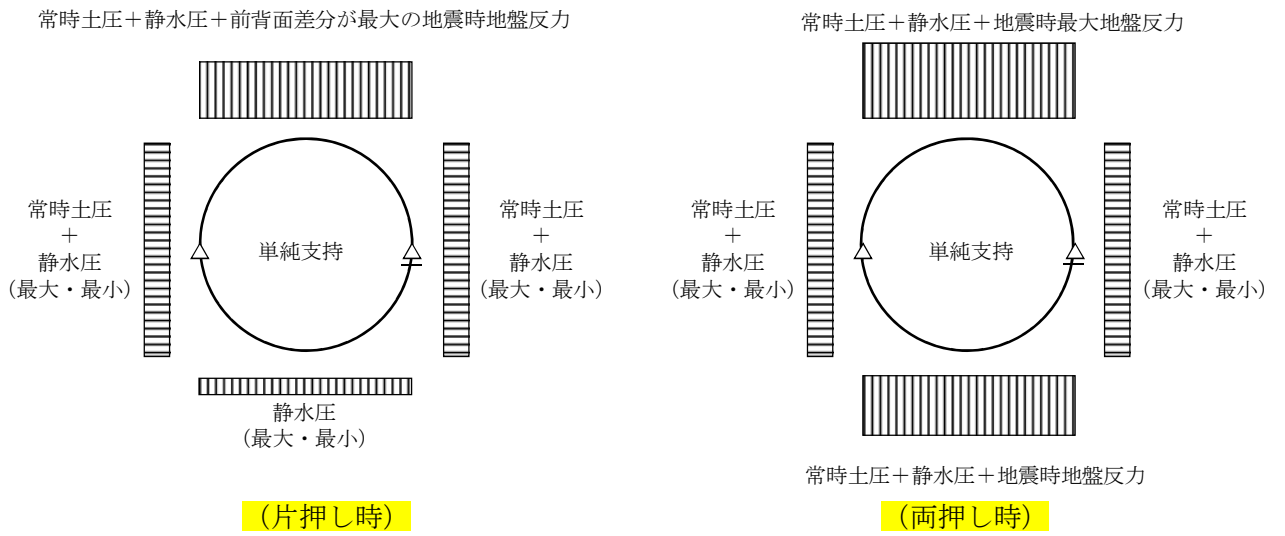
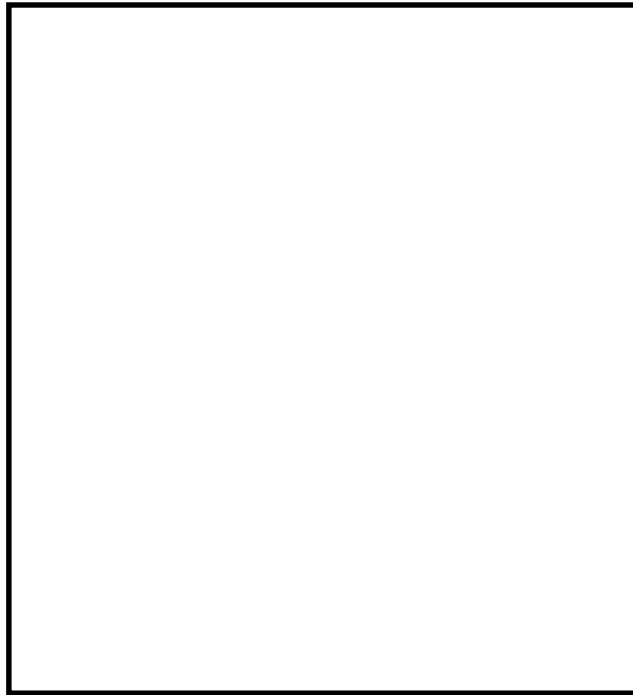


図 4.1-1 円形立坑の水平断面解析モデル概念図

#### 4.1.1 頂版の設計

##### (1) SA用海水ピット

可搬用ポンプ投入口による開口が一定間隔で配置されることから、開口の間を通る補強梁として設計する。概念図を図4.1.1-1に示す。

スパンは頂版が接続する側壁の中心間距離とし、境界条件は単純支持とする。

設計荷重としては、面外方向に躯体及び積雪の慣性力を静的に作用させる。

中央の梁①の設計においては、頂版に作用する全荷重を負担するものとして設計することで、梁②の設計における支点反力を改めて考慮する必要はない。

慣性力については、2次元有効応力解析により各床版位置における最大鉛直加速度を算出し、重力加速度で除することで鉛直設計震度を求め算定する。

単純支持によるはり設計で求めた主鉄筋を、頂版上下面に配置する。

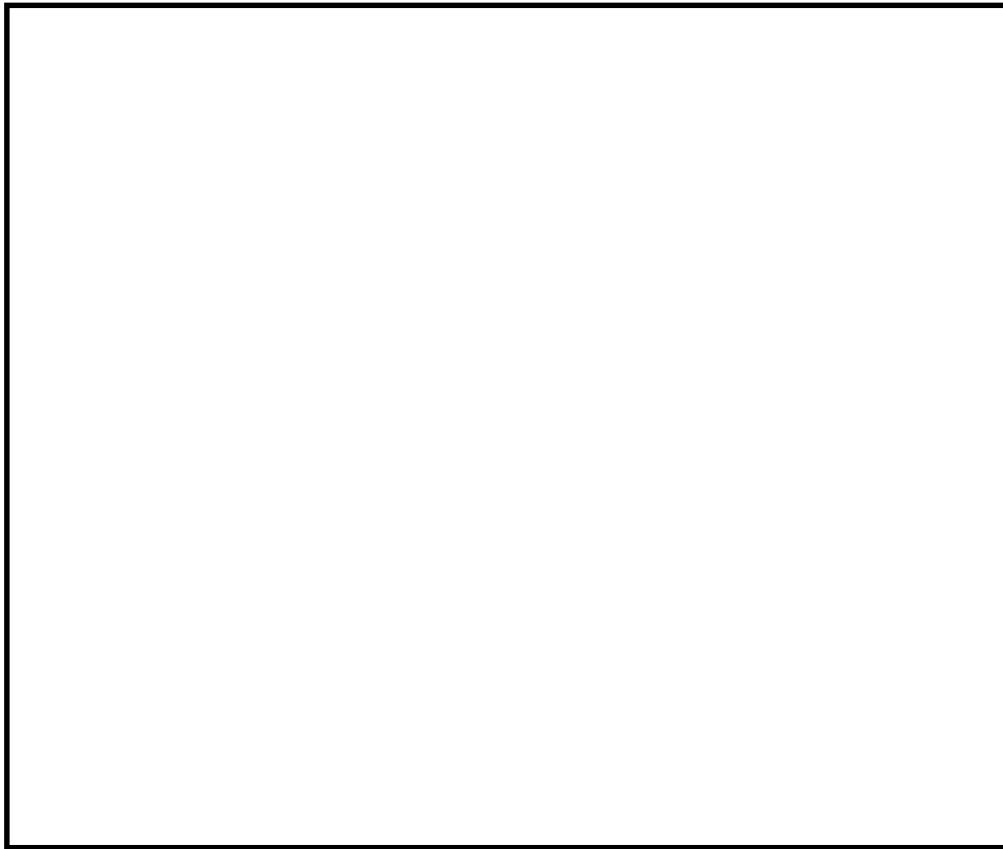


図4.1.1-1 SA用海水ピットにおける頂版の設計モデル概念図

(2) SA用海水ピット取水塔

海水の取水口による開口が半月状に存在することから、残りの半月状の版に対して単位幅のはりとして断面力を算出し設計する。概念図を図 4.1.1-2 に示す。

スパンは頂版が接続する側壁の中心間距離とし、境界条件は単純支持として設計する。

設計荷重としては、面外方向に躯体の慣性力を静的に作用させる。

慣性力については、2次元有効応力解析により各床版位置における最大鉛直加速度を算出し、重力加速度で除することで鉛直設計震度を求め算定する。

単純支持によるはり設計で求めた主鉄筋を、頂版上下面に格子状に配置する。

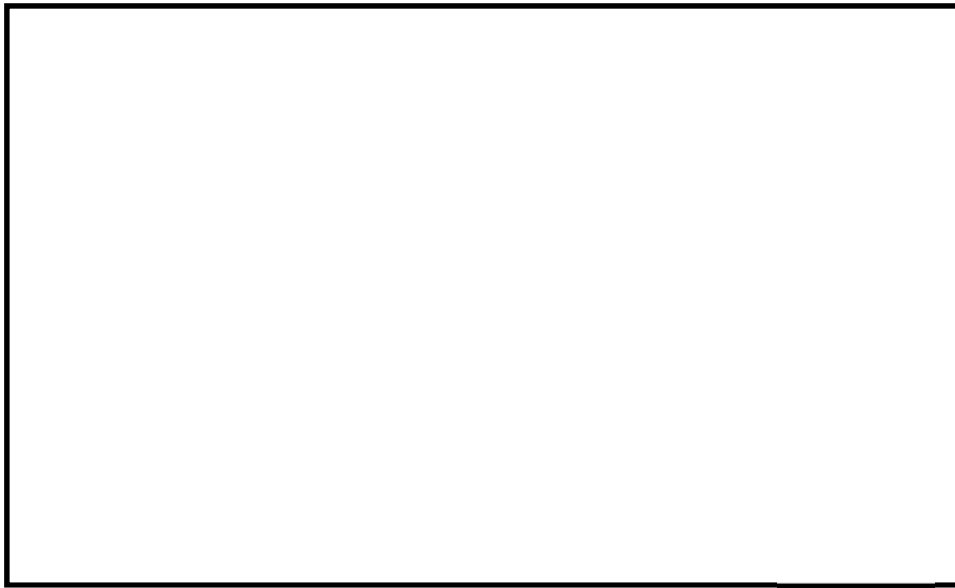


図 4.1.1-2 SA用海水ピット取水塔における頂版の設計モデル概念図

#### 4.1.2 中床版の設計

円形立坑のうち，SA用海水ピットのみ中床版を有する。

SA用海水ピットの中床版には，津波に伴う水位上昇による可搬型ポンプの揺動を低減するための開口が存在するが，開口の床版面積に占める割合は小さいことから開口は考慮せず，単位幅の版として断面力を算出し設計する。概念図を図4.1.2-1に示す。

スパンは頂版が接続する側壁の中心間距離とし，境界条件は単純支持とする。

設計荷重としては，面外方向に躯体の慣性力を静的に作用させる。

慣性力については，2次元有効応力解析により各床版位置における最大鉛直加速度を算出し，重力加速度で除することで鉛直設計震度を求め算定する。

単純支持によるはり設計で求めた主鉄筋を，中床版上下面に格子状に配置する。

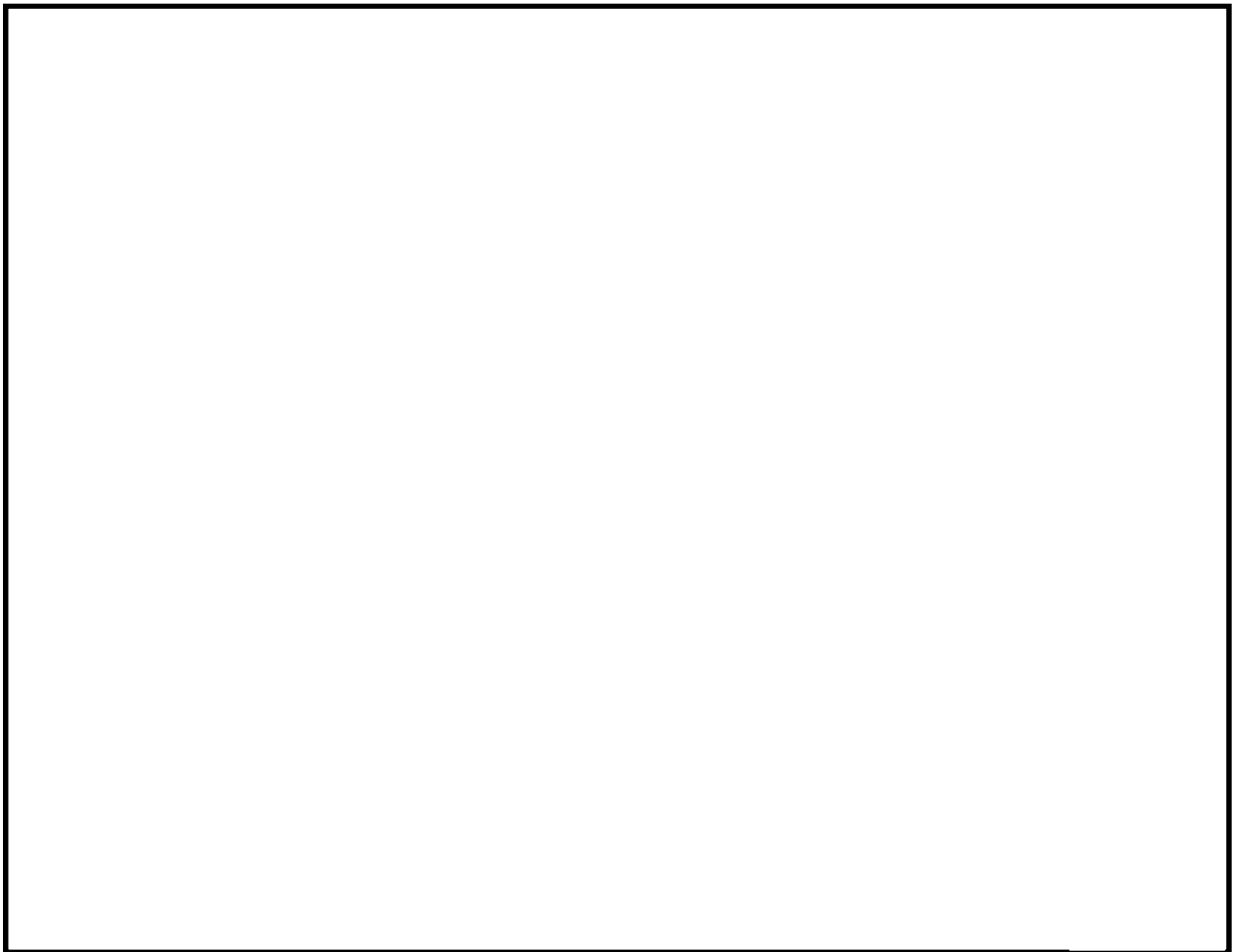


図4.1.2-1 SA用海水ピットにおける中床版の設計モデル概念図

#### 4.1.3 底版の設計

底版の設計は、接続する側壁の中心線を境界とするシェル解析を基本として設計断面力を算定するが、単位幅の版としてモデル化し断面力を算出し設計する場合もある。

シェル解析の概念図を図 4.1.3-1 に、単位幅の版の概念図を図 4.1.3-2 に示す。

いずれも境界条件は単純支持とする。

2次元有効応力解析により、底版下面の地盤要素に発生する鉛直方向有効直応力 ( $\sigma y'$ )、間隙水要素の発生応力 ( $\Delta u$ ) 及び静水圧の合計の時刻歴最大値を求め、設計荷重として作用させる。

単純支持によるシェル解析及び単位幅の版設計で求めた主鉄筋を、底版上下面に格子状に配置する。

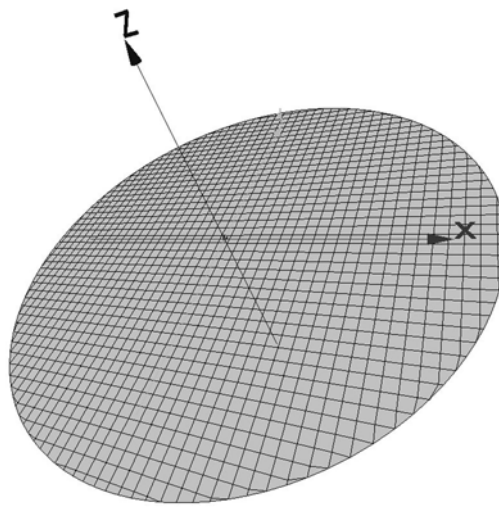


図 4.1.3-1 代替貯水水槽における底版の設計モデル概念図





図 4.1.3-2 S A用海水ピット及びS A用海水ピット取水塔における底版の設計モデル概念図

## 4.2 矩形立坑

### 4.2.1 側壁の設計

#### (1) 開口部がない構造部

立坑水平断面については、立坑側壁及び中壁を線形はり要素としてモデル化した静的フレーム解析により水平断面の照査を行なう。

地震時の立坑鉛直はり変位と地盤変位の関係により、立坑線形はり要素両側の立坑側方仮想剛梁に圧縮軸力が発生する場合（両押し）と、片側のジョイント要素が剥離して片側の仮想剛梁のみに圧縮軸力が発生する場合（片押し）の状況が想定される。水平断面評価においてはこの両押し、片押しの両者の状況を踏まえて評価を実施する。

水平断面の設計荷重は、片押し時は2次元有効応力解析により得られる立坑側方の仮想剛梁要素に作用する地盤反力（地盤要素の水平有効直応力（ $\sigma_x'$ ）+間隙水要素の発生応力（ $\Delta u$ ））の前背面差分が最大となる位置の応答を抽出し、片側のみにこの地盤反力を作用させる。両押し時は、立坑側方の仮想剛梁要素に作用する地盤反力（地盤要素の水平有効直応力（ $\sigma_x'$ ）+間隙水要素の発生応力（ $\Delta u$ ））が最大となる位置の応答を抽出し、同時刻の背面側の荷重とともに両側から作用させる。

常時荷重については静止土圧及び静水圧を考慮する。ある設計断面の適用範囲内において最浅部及び最深部の常時荷重を算定し、静的フレーム解析に用いる。

境界条件については、道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編（ケーソン基礎の設計）に準拠し、単純支持とする。

静的フレーム解析におけるはり要素の要素分割については、土木学会マニュアルに準拠して、各分割要素が断面厚さまたは有効高さの1.0倍程度の長さとし、各分割要素が部材の断面厚または有効高さの約2.0倍の長さを超えないように設定する。

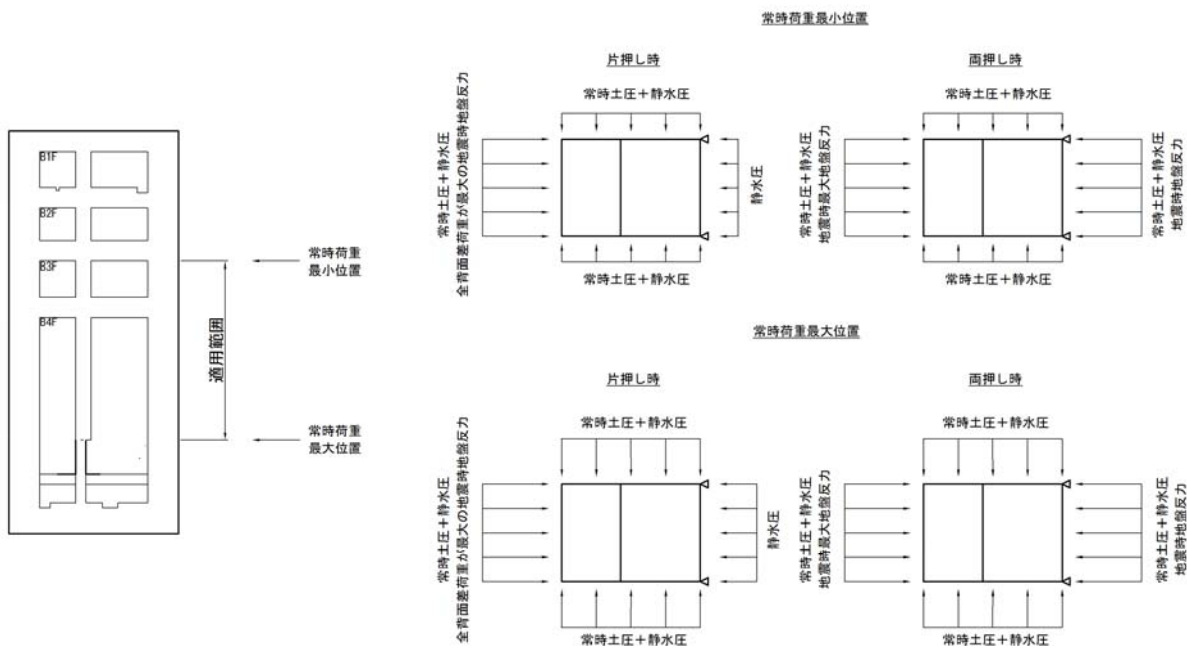


図 4.2.1-1 水平断面解析モデル概念図 (開口部がない構造部)

## (2) 開口部を含む構造部

側壁に開口がある場合については、立坑側壁及び中壁を線形はり要素としてモデル化し、開口部は開口部上下に位置する部材に相当する等価剛性を入力した静的フレーム解析により水平断面の照査を行なう。

等価剛性の設定にあたっては、図 4.2.1-2 に示す全高中に開口上下の部材及び開口部が存在するが、これら剛性を足し合わせ、それを解析奥行 1.0m 相当にして入力する。全高とする範囲は、開口が存在する側壁に接続する上下床版の上面から下面までとする。

得られた断面力に対し水平鉄筋を決定するが、等価剛性を入力した部材（図 4.2.1-2 中赤線にて示す範囲）については、スターラップで内外主鉄筋を拘束するはりの配筋を施すことで対応する。

地震時の立坑鉛直はり変位と地盤変位の関係により、立坑線形はり要素両側の立坑側方仮想剛梁に圧縮軸力が発生する場合（両押し）と、片側のジョイント要素が剥離して片側の仮想剛梁のみに圧縮軸力が発生する場合（片押し）の状況が想定される。水平断面評価においてはこの両押し、片押しの両者の状況を踏まえて評価を実施する。

水平断面の設計荷重は、片押し時は図 4.2.1-2 に示す全高範囲の中で 2 次元有効応力解析により得られる立坑側方の仮想剛梁要素に作用する地震時荷重（地盤要素の水平有効直応力（ $\sigma_{x'}$ ）+間隙水要素の発生応力（ $\Delta u$ ））の前背面差分が最大となる位置の応答を抽出し、片側のみにこの地盤反力を作用させる。両押し時は、立坑側方の仮想剛梁要素に作用する地盤反力（地盤要素の水平有効直応力（ $\sigma_{x'}$ ）+間隙水要素の発生応力（ $\Delta u$ ））が最大となる位置の応答を抽出し、同時刻の背面側の荷重とともに両側から作用させる。

常時荷重については、静止土圧及び静水圧を考慮する。設計断面の適用範囲内において最浅部及び最深部の常時荷重を算定し、静的フレーム解析に用いる。

境界条件については、道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編（ケーソン基礎の設計）に準拠し、単純支持とする。

静的フレーム解析におけるはり要素の要素分割については、土木学会マニュアルに準拠して、各分割要素が断面厚さまたは有効高さの 1.0 倍程度の長さとし、各分割要素が部材の断面厚または有効高さの約 2.0 倍の長さを超えないように設定する。

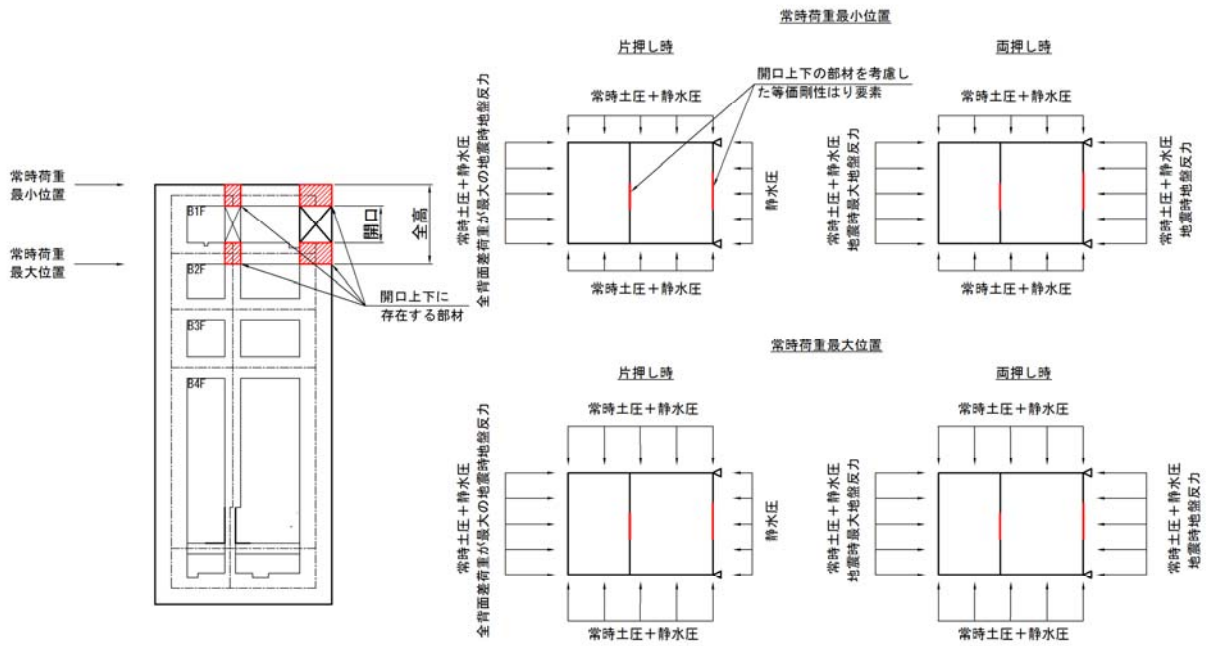


図 4.2.1-2 水平断面解析モデル概念図（開口部を含む構造部）

### (3) 剛域の考え方

水平断面フレーム解析においては、コンクリート標準示方書【構造性能照査編】2002年版に準拠し、隅角部に剛域を設ける。

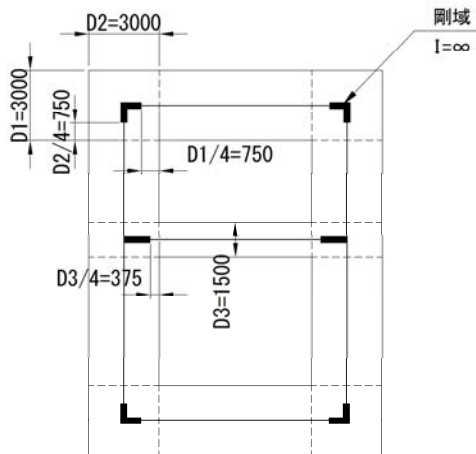


図 4.2.1-3 水平断面フレーム解析における剛域の考え方

#### 4.2.2 頂版及び中床版の設計

頂版及び中床版については、開口形状を模擬したシェル解析により設計断面力を算定する。

スパンは頂版及び中床版が接続する側壁及び中壁の中心間距離とし、境界条件は単純支持とする。

設計荷重は、面外方向に躯体及び機器類の慣性力を静的に作用させる。頂版については積雪の慣性力も考慮する。

慣性力については、2次元有効応力解析により各床版位置における最大鉛直加速度を算出し、重力加速度で除することで鉛直設計震度を求め算定する。

単純支持によるシェル解析により求めた主鉄筋を、頂版及び中床版上下面に格子状に配置する。

シェル解析における要素分割については、土木学会マニュアルに準拠して、各分割要素が断面厚さまたは有効高さの1.0倍程度の長さとし、各分割要素が部材の断面厚または有効高さの約2.0倍の長さを超えないように設定する。

シェル要素のアスペクト比については、「コンクリート構造物の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン（1989年3月 日本コンクリート工学協会）」を参考に原則1:1とし、最大でも1:5程度を限度とする。

図4.2.2-4にガイドラインの抜粋を示す。

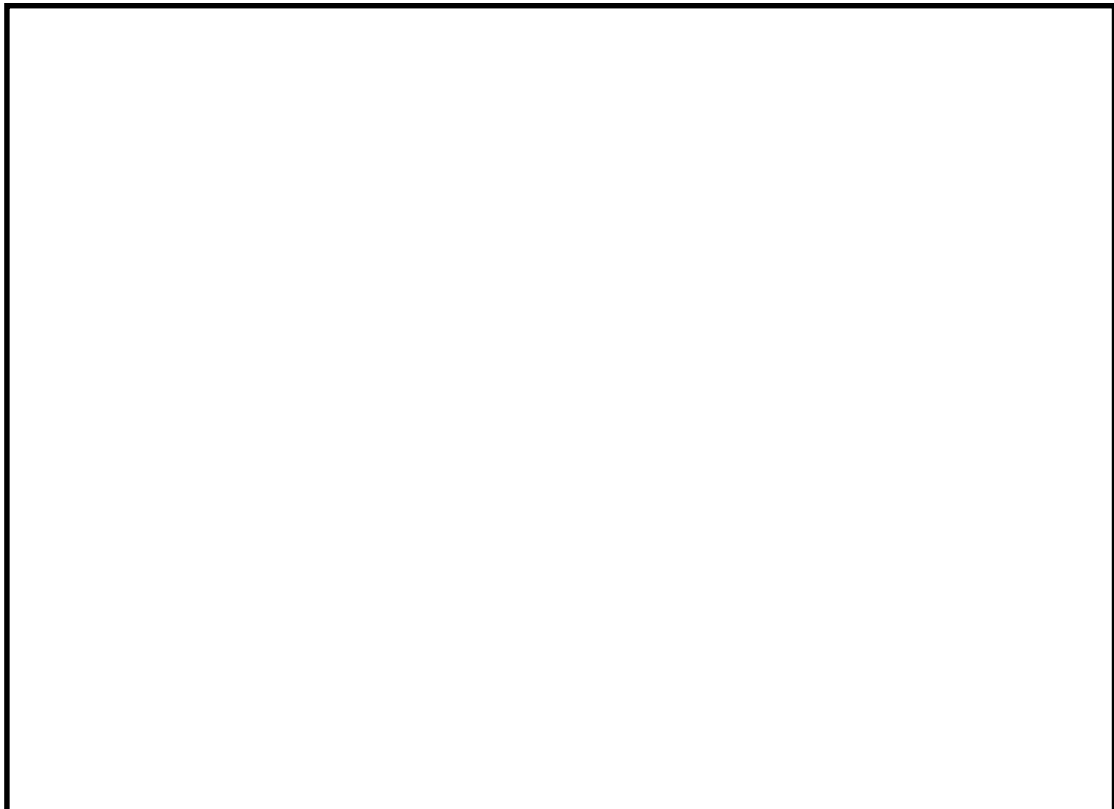


図 4.2.2-1 頂版及び中床版平面図



図 4. 2. 2-2 頂版及び中床版シェル解析概念図

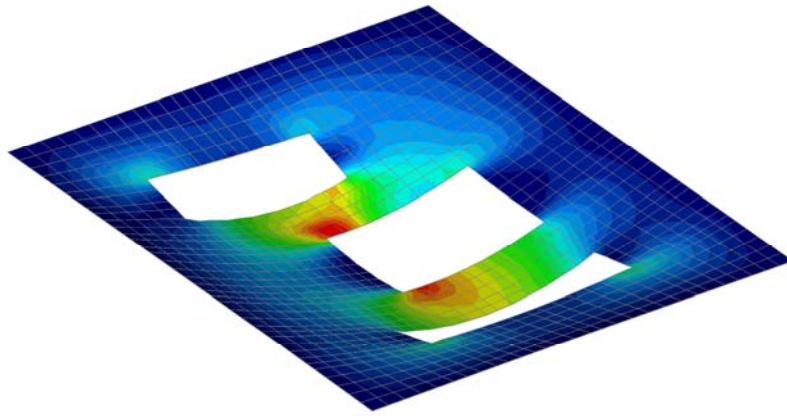


図 4. 2. 2-3 シェル解析断面力図 (例)

### 3. 3. 2 要素分割

#### (1) 要素分割と要素の縦横比

四辺形要素の縦横比は原則的に1:1が望ましく、特に、着目点近傍では1:1とするのがよい。応力解析で、応力勾配が急な場合のみならず応力の流れがほぼ一定となる場合でも、1:5程度を限度とするように心がけるべきである。

止むを得ず縦横比の大きい要素を使用する場合でも、解析結果の連続性をチェックするのがよい。一般的な変位法に基づく有限要素法では、変位の連続性は確保されるが、応力は連続していない。これに対して、応力法、ハイブリッド法等では、応力の連続性を満足するように解が求められている。すなわち、このことを理解した上で、かつ、使用している有限要素法の解法を理解し、連続性のチェックを行うことが肝要となる。

図 4. 2. 2-4 コンクリート構造物の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン  
(日本コンクリート工学協会 1989 年 3 月)

#### 4.2.3 底版の設計

底版は接続する側壁及び中壁の中心間距離をスパンとしたシェル解析により設計断面力を算定する。境界条件は単純支持とする。

設計荷重は2次元有効応力解析において、底版下面の地盤要素に発生する鉛直方向有効直応力 ( $\sigma_y'$ )、間隙水要素の発生応力 ( $\Delta u$ ) 及び静水圧の全時刻最大値を作用させる。

シェル解析における要素分割は、頂版及び中床版における設定と同じとする。

単純支持によるシェル解析により求めた主鉄筋を、底版上下面に格子状に配置する。

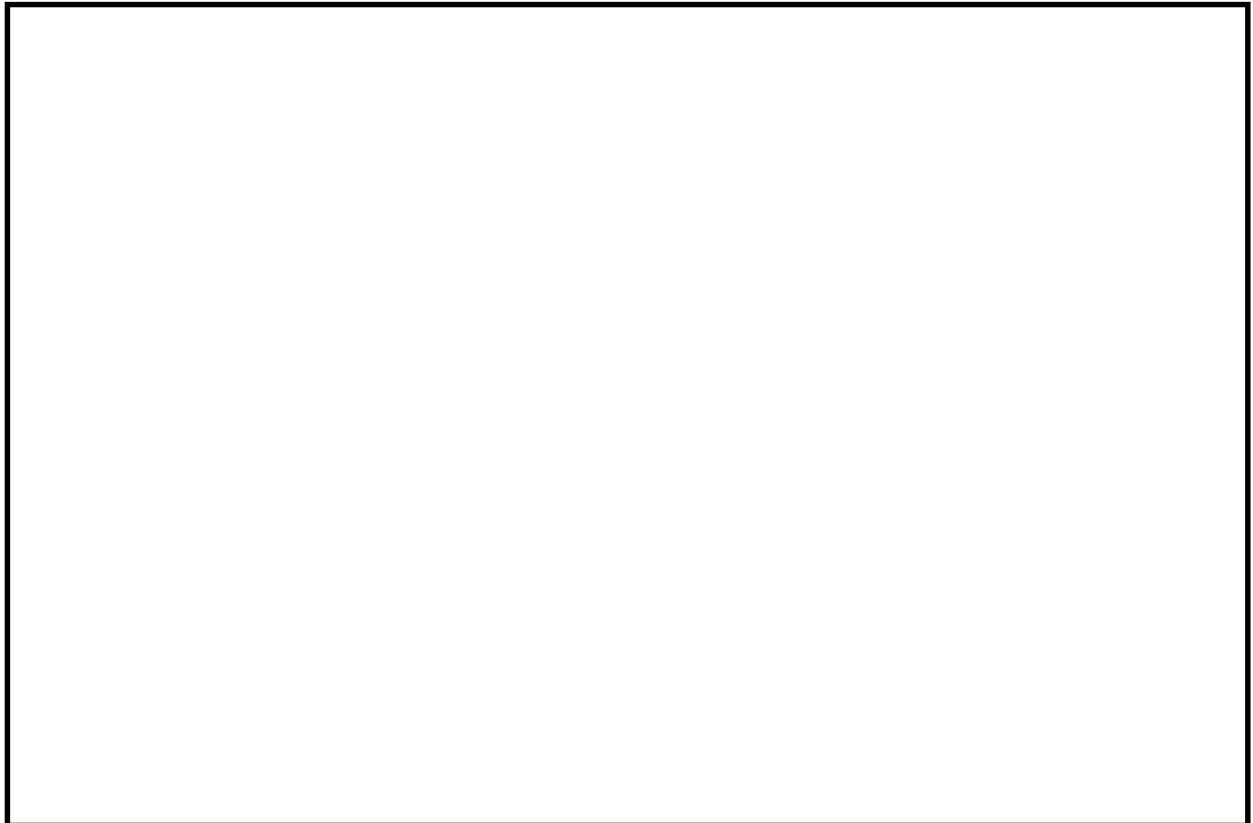


図 4.2.3-1 底版シェル解析概念図



5. 版部材が側壁を固定することによる隅角部の評価（曲げ）

5.1 矩形立坑

側壁と版部材の隅角部には、各部材の剛性に起因する端曲げが発生するため、隅角部における曲げモーメントの廻り込みの影響検討方針を示す。

(1) 中床版の拘束効果による側壁の検討

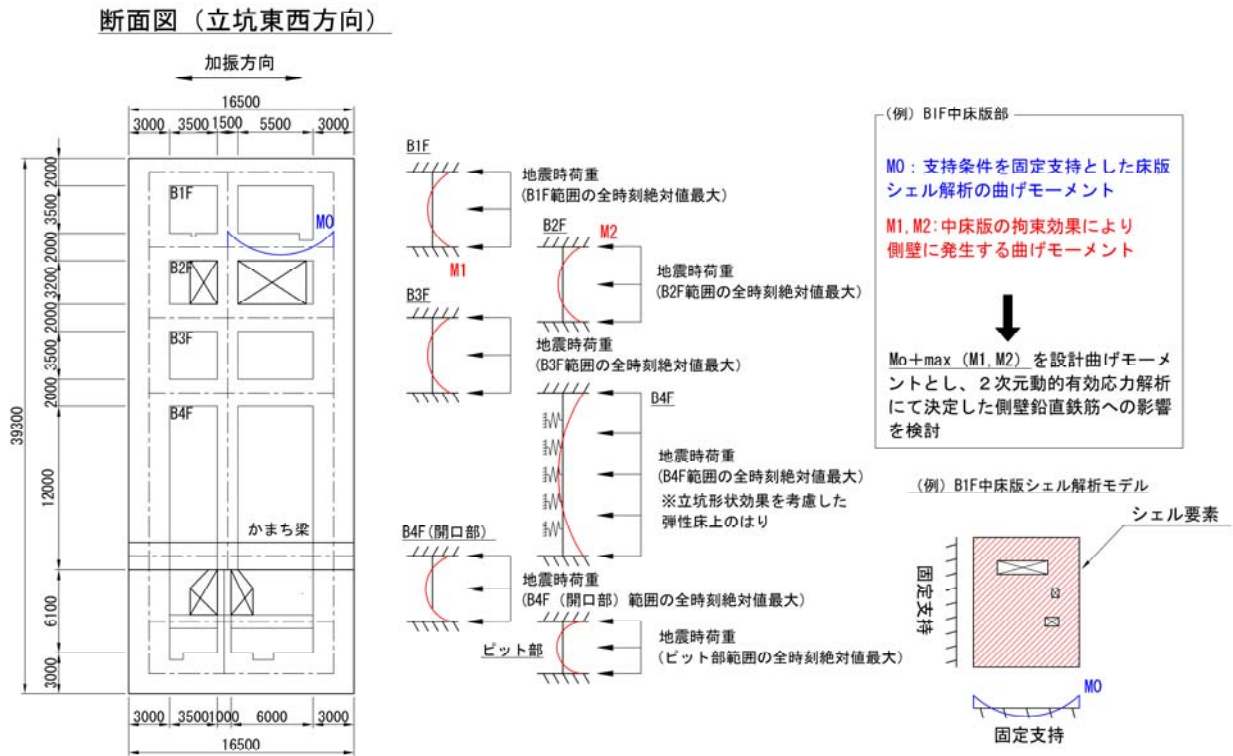


図 5.1-1 版部材から側壁に廻り込む曲げモーメント算定概念図

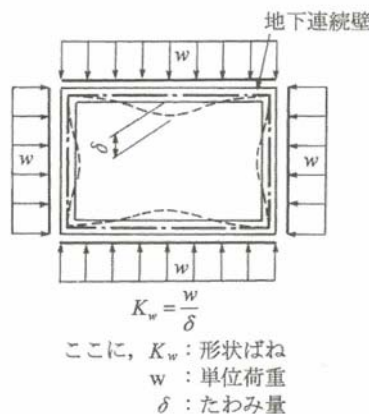


図 5.1-2 立坑の形状ばねの算出方法（トンネル標準示方書・同解説【開削工法編】）

版部材から側壁に廻り込む曲げモーメントを計算する場合の概念図を図 5.1-1 に示す。

版部材と側壁の隅角部には、床版の曲げモーメント ( $M_0$ ) が側壁に廻り込む。また側壁が版部材に支持される拘束効果により、地震時荷重を面外方向に受けた場合に曲げモーメントが反転する ( $M_1, M_2$ )。この現象は2次元動的有効応力解析において考慮することができない。

版部材の端曲げモーメント ( $M_0$ ) は、境界条件を固定支持としたシェル解析により算定する。

側壁は床版中心間距離で固定支持された両端固定はりとしてモデル化し、各層における地震時荷重を作用させた場合に、支持位置に発生する曲げモーメント ( $M_1, M_2$ ) を算定する。

地震時荷重については、各層における地盤反力（地盤要素の水平有効直応力 ( $\sigma_x'$ ) + 間隙水要素の発生応力 ( $\Delta u$ )）の全時刻絶対値最大値を用いる。

立坑 B4 階のトンネル開口付近については、開口上部にかまち梁を想定し、床版とかまち梁中心間をスパンとした両端固定はりにより曲げモーメントを算定する。

立坑 B4 階（トンネル開口より上部）には床版が存在しない。この範囲は立坑側壁に開口が存在せず、立坑の形状効果を期待することができるため、立坑の形状ばねを考慮した弾性床上のり（端部は固定支持）としてモデル化を行い曲げモーメントを算定する。立坑の形状ばねの算定については、「トンネル標準示方書【開削工法編】・同解説 2016年8月 土木学会」を参考にする。

版部材の端曲げモーメント ( $M_0$ ) 及び版部材に拘束された側壁に発生する端曲げモーメント ( $M_1, M_2$  のうちモーメントの連続性を考えて両者の最大値を用いる) の和を設計曲げモーメントとする。

上記により得られる設計曲げモーメントに対し、2次元動的有効応力解析における立坑線形はり要素に発生する曲げモーメントに対して決定した鉛直鉄筋に対する影響検討を行い、必要な場合は補強鉄筋を配置する。

## (2) 側壁の拘束効果による中床版の検討

版部材については、版部材の端曲げモーメント ( $M_0$ ) 及び側壁から底版へ廻り込むモーメント ( $M_1, M_2$  のうち最大値) の和を設計曲げモーメントとする。

2次元動的有効応力解析より抽出した設計荷重に対するシェル解析により決定した版部材主鉄筋に対する影響検討を行い、必要な場合は補強鉄筋を配置する。

## 5.2 円筒形立坑

代替淡水貯槽の頂版および底版の設計は、他の立坑と同様に、接続する側壁の中心線を境界とするシェル解析を用い、境界条件を単純支持として設計断面力を算定する。得られた設計断面力を用いて応力照査を行い、許容応力度を満足する鉄筋を上・下筋として配置させる。

側壁から廻り込んでくるモーメントを算出するために、「シールド工用立坑の設計（土木学会，平成 27 年）」において、円形立坑の設計として記載されている方法を参考にして、図 5.1-1 のようなはりモデルによる解析を実施する。これは、側壁をモデル化したはり要素に、円形立坑であることによる三次元効果をリングばねでモデル化して、立坑の鉛直断面方向の断面力を算出する方法である。モデルに作用させる荷重は、2 次元有効応力解析において、立坑に作用する地盤応力+間隙水要素の発生応力の総和が最大になる時の地盤応力分布を作用させる。同図の上・下端部に発生するモーメントが頂版および底版に廻り込むモーメントとなる。なお、リングばねは次式による。

$$K = \frac{p + \Delta p}{\frac{pr^2}{AE} + \frac{\Delta pr^4}{12EI}}$$

なお、ここに

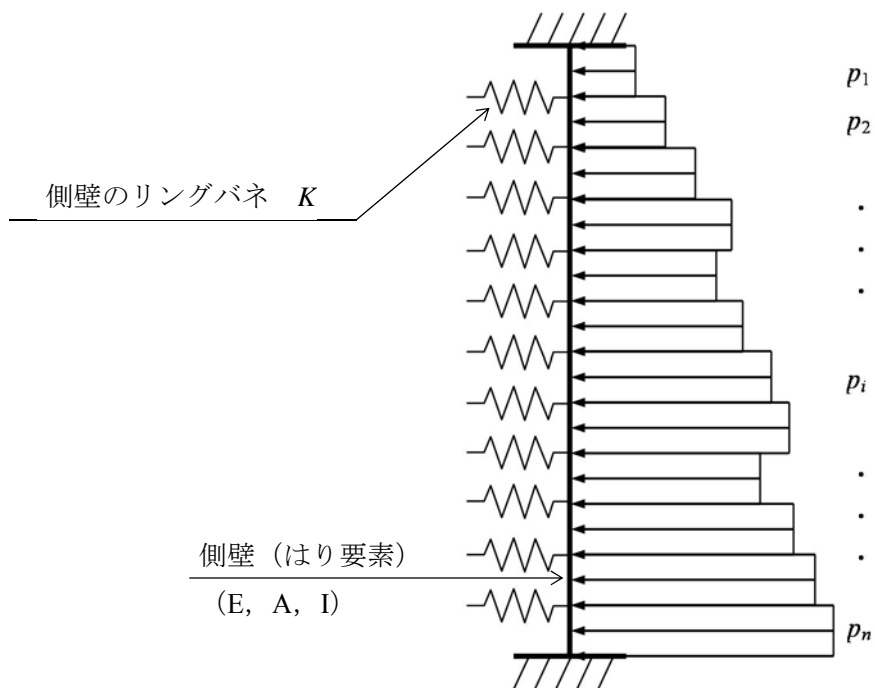
K：リングばねのばね定数， E：側壁のヤング係数， A：側壁の断面積，

I：側壁の断面二次モーメント， r：立坑の半径， p：側壁の作用する側圧，

$\Delta p$ ：側壁に作用する偏圧

確認用の検討モーメントには、頂版および底版に廻り込むモーメントにシェル解析の端モーメントを重ね合わせた値を用いる。その際の、シェル解析の境界条件は、単純支持ではなく、固定として解析した結果とする。

図 5.2-1 に示す側壁モデルにおいて固定境界に発生する曲げモーメントに、頂版・底版シェル解析で固定境界に発生する曲げモーメントを加算したものを設計曲げモーメントとし、2 次元動的有効応力解析により決定される鉛直鉄筋に対する影響検討を行い、必要な場合は補強鉄筋を配置する。



$p_i$  : 地盤応力+間隙水要素の応力

(抽出時刻 : 立坑に作用する地盤応力+間隙水要素の発生応力の総和が最大の時)

図 5.2-1 側壁の廻り込みモーメント算出モデル

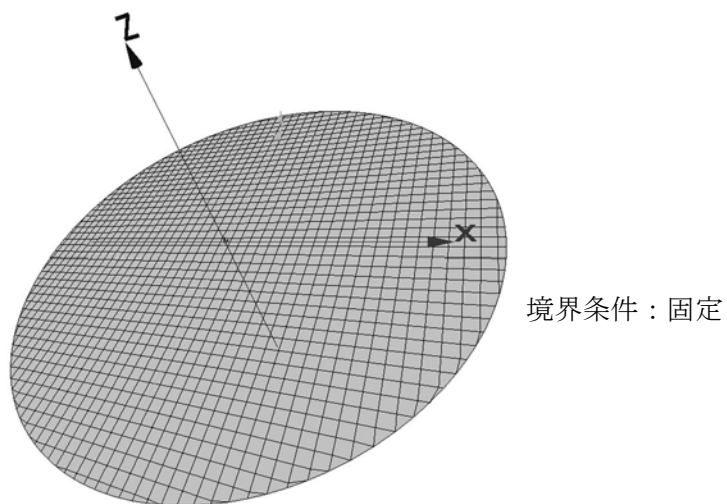


図 5.2-2 底版部の端モーメント算出モデル

## 6. カルバート接続部の設計

側壁に鉄筋コンクリートカルバートが接続する断面では，カルバートの影響を考慮したモデル化ならびに設計を行なう。図 6-1 にカルバート接続部の地震応答解析モデルを示す。

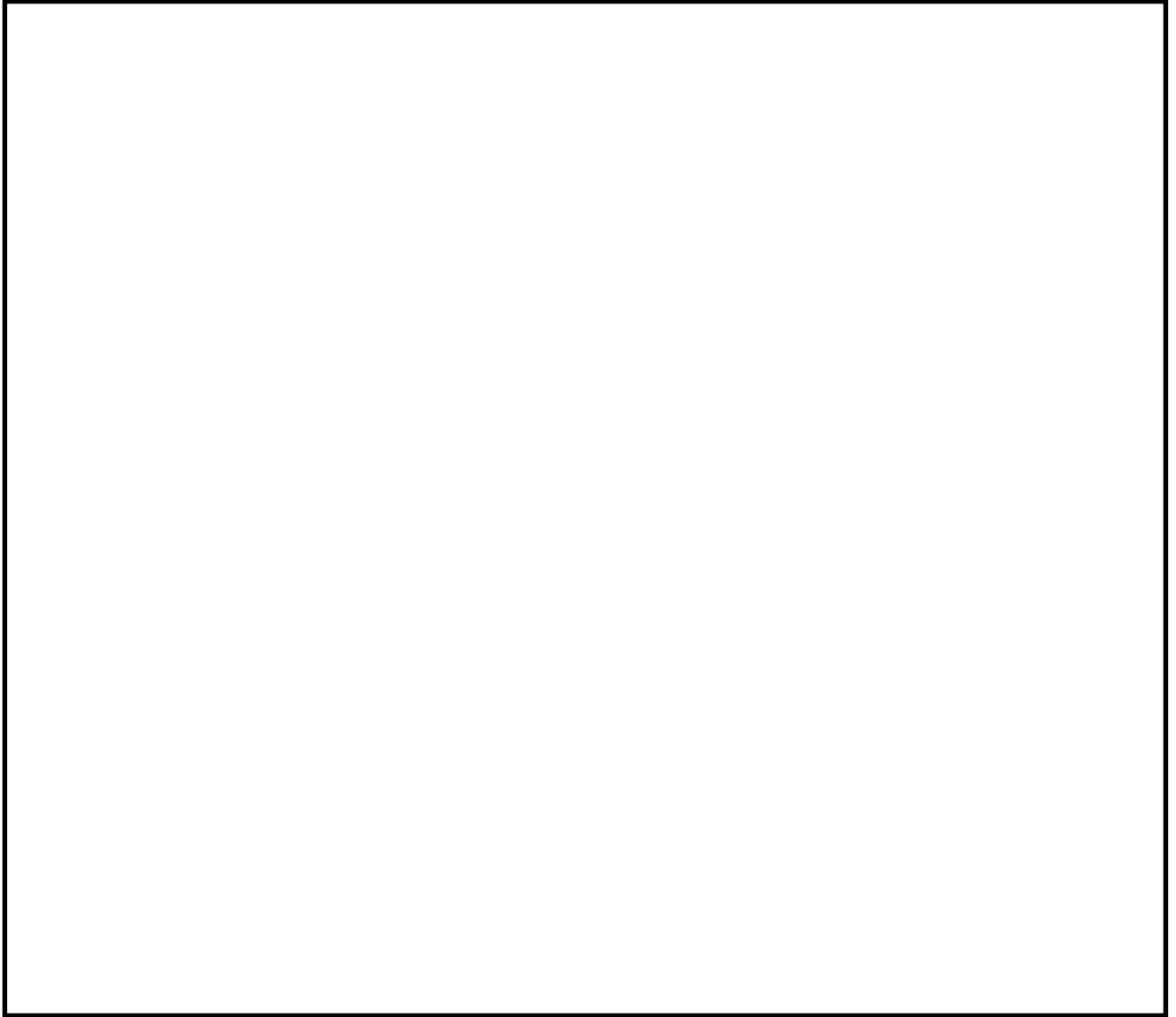


図 6-1 カルバート接続部の地震応答解析モデル図

(1) カルバート延長方向

1) 上下方向の曲げ，せん断

地震応答解析におけるカルバート部はり部材の断面力 (M, S, N) を用いて，カルバート断面 (ロの字) に対して部材照査を行う。設計モデルの概念図を図 6-2 に示す。

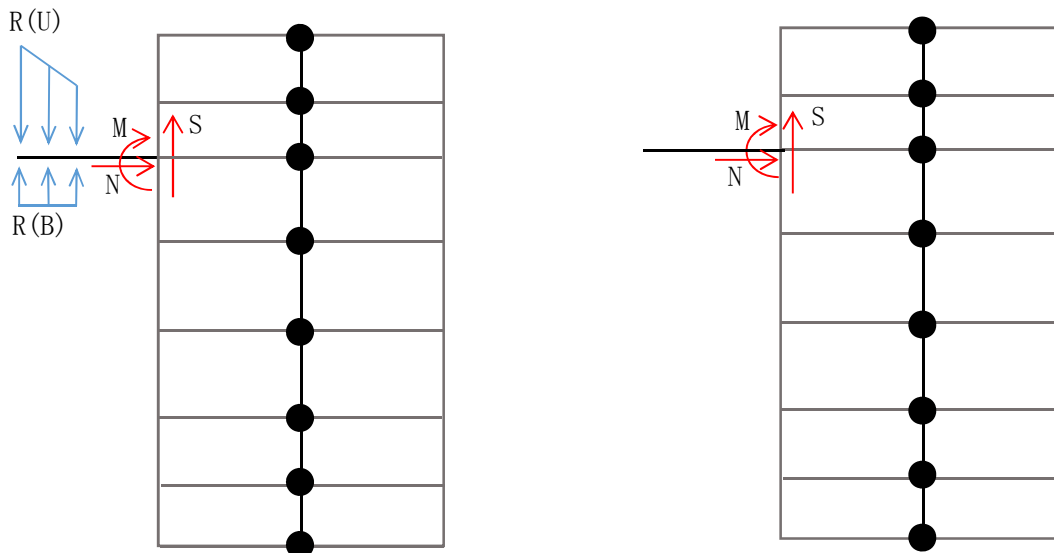


図 6-2 カルバート延長方向鉛直曲げに対する設計モデル概念図

2) 水平方向の曲げ，せん断

直交方向 (モデル上カルバートが無い断面) の地震応答解析におけるカルバート高さにおける左右の土圧差が最大となる時刻の (地盤応力+間隙水応力) を用いて，立坑外面を固定端とする片持ち梁として断面力を算定し，部材照査を行う。設計モデルの概念図を図 6-3 に示す。

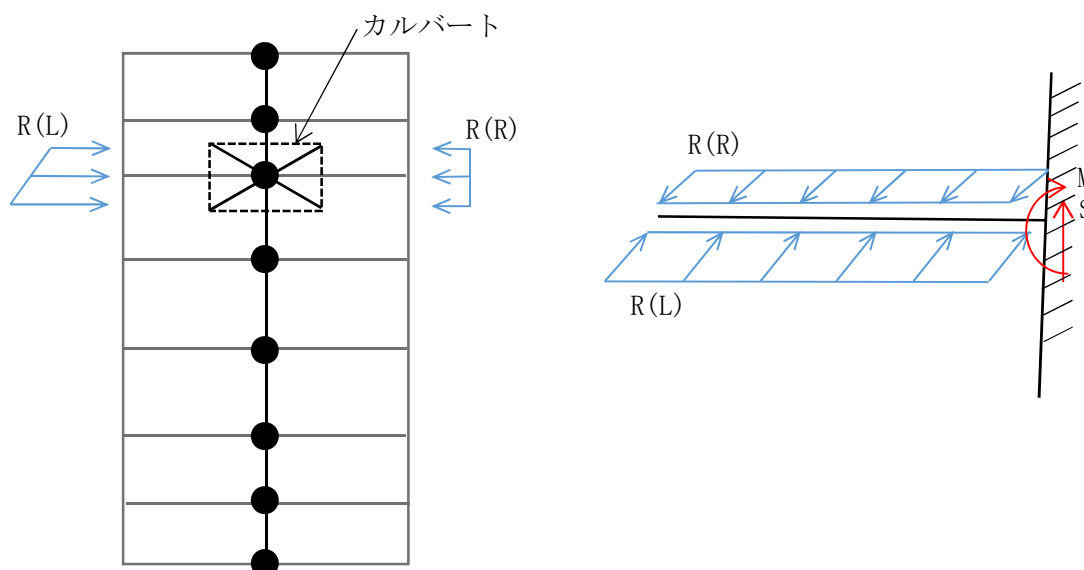


図 6-3 カルバート延長方向水平曲げに対する設計モデル概念図

## 参考資料

参考 1.	円筒形の立坑構造図 .....	2
参考 2.	矩形の立坑構造図 .....	15
参考 3.	既工認プラントの事例 .....	28

参考1. 円筒形の立坑構造図

円筒形の立坑構造物は、SA用海水ピット取水塔、SA用海水ピット及び代替淡水貯槽がある。

(1) SA用海水ピット取水塔

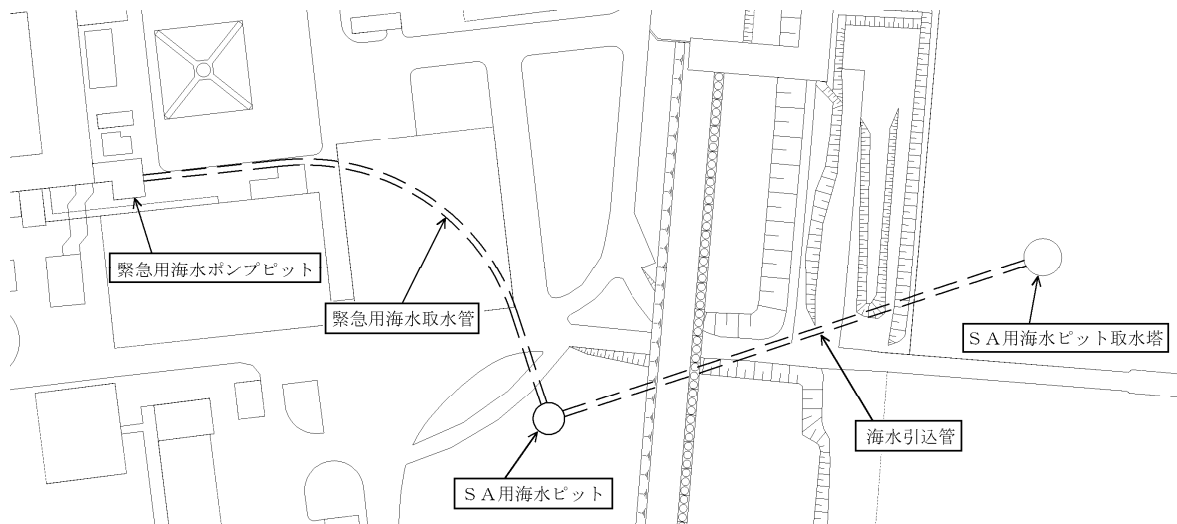


図1-1 (1) SA用海水ピット取水塔位置図(拡大図)

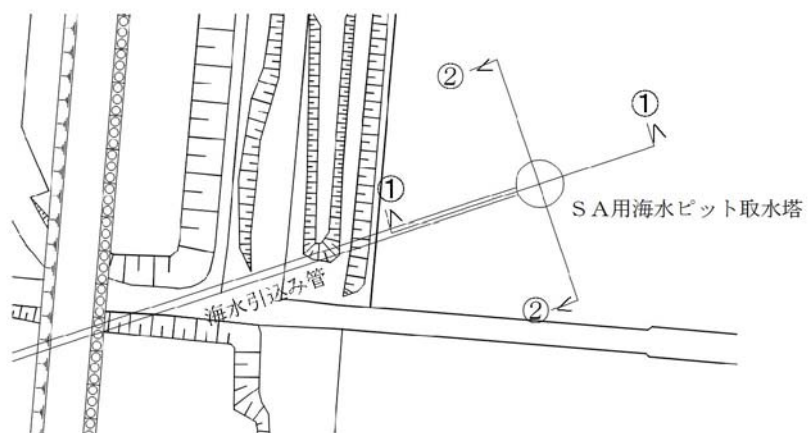


図1-1 (2) SA用海水ピット取水塔 評価対象断面位置図



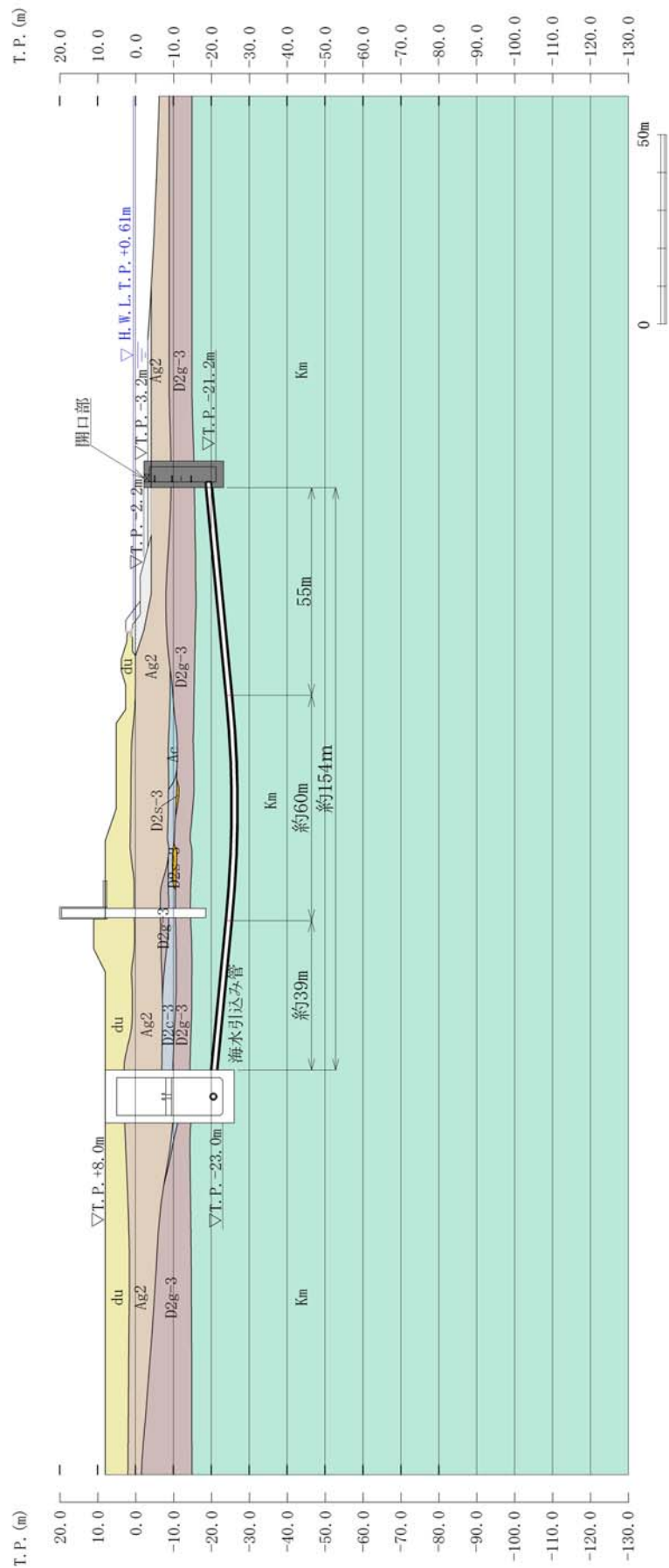


図 1-1 (3) SA用海水ピット取水塔 評価対象断面図 (①-①断面)

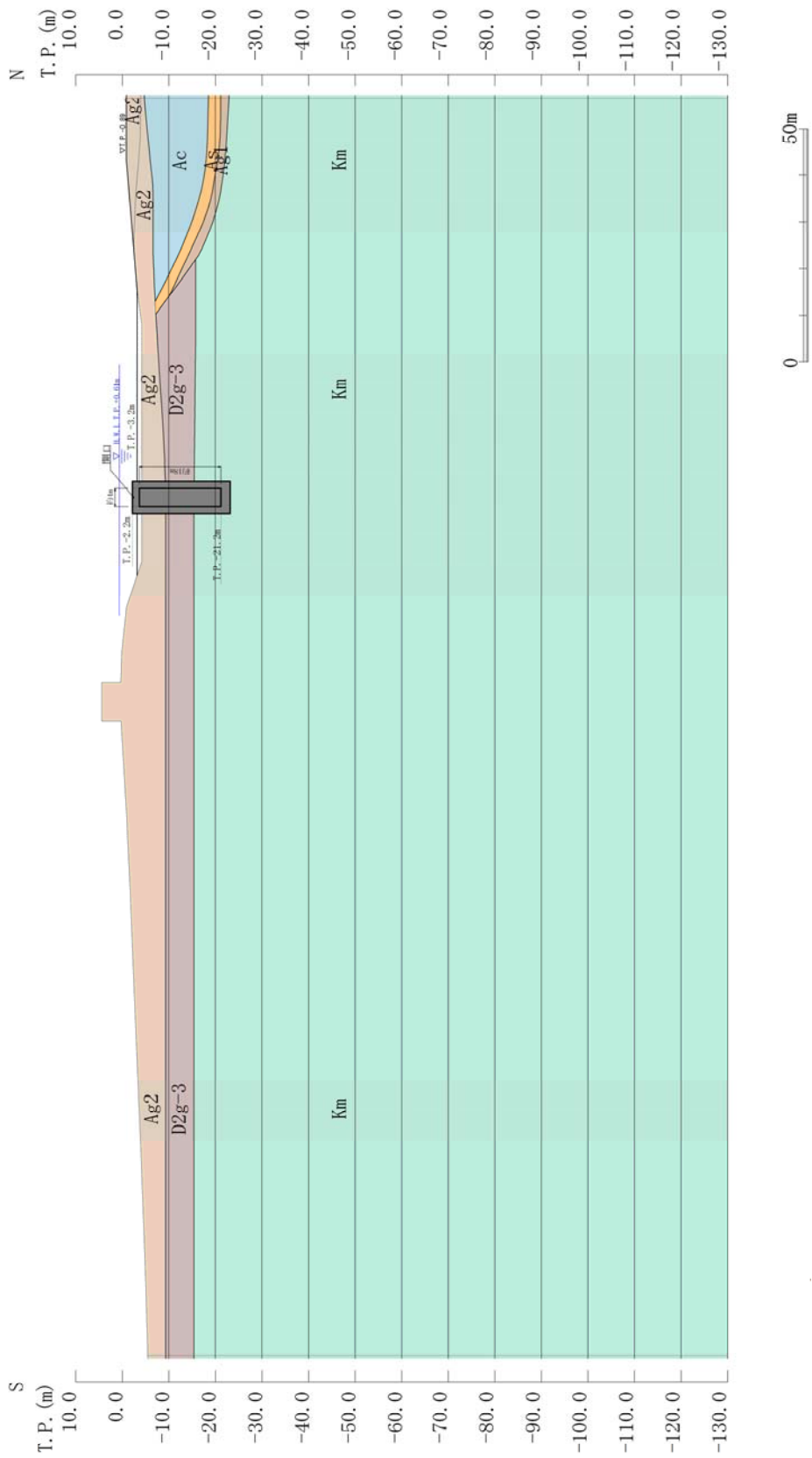


図 1-1 (4) SA用海水ピット取水塔 評価対象断面図 (②-②断面)

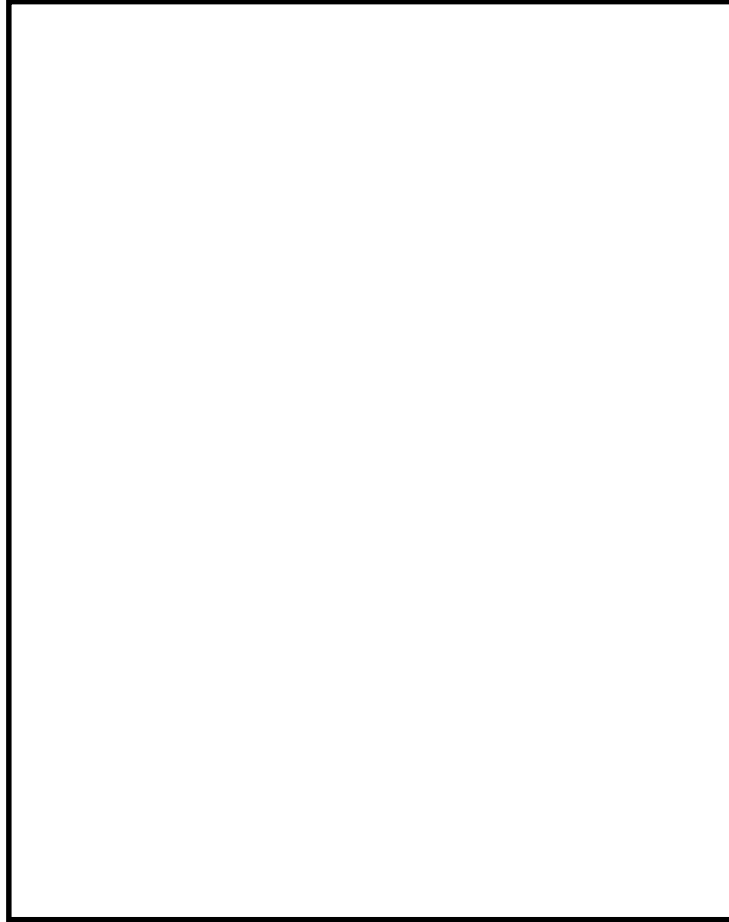


図 1-1 (5) SA用海水ピット取水塔 構造平面図

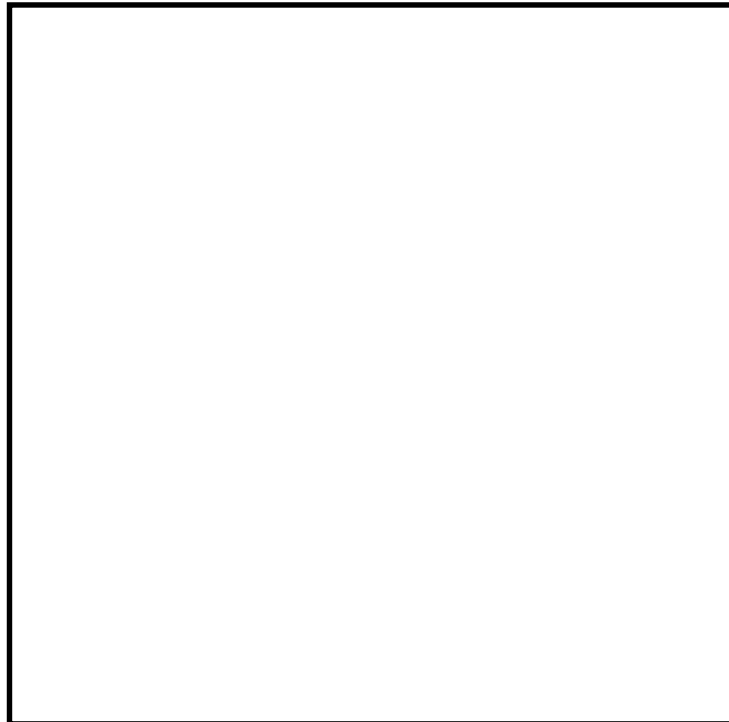


図 1-1 (6) SA用海水ピット取水塔 構造断面図

(2) SA用海水ピット

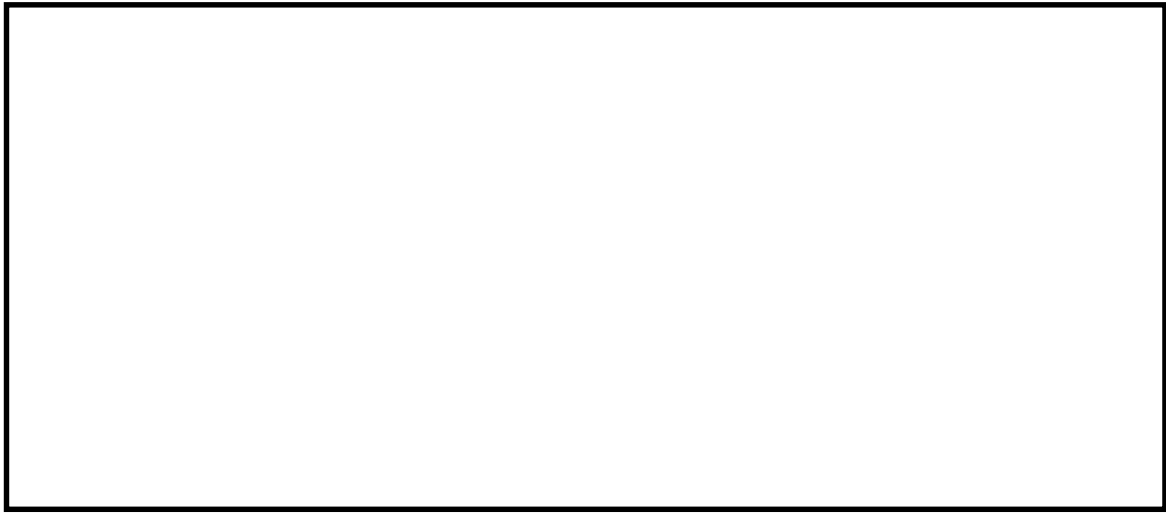


図 1-2 (1) SA用海水ピット 評価対象断面位置図

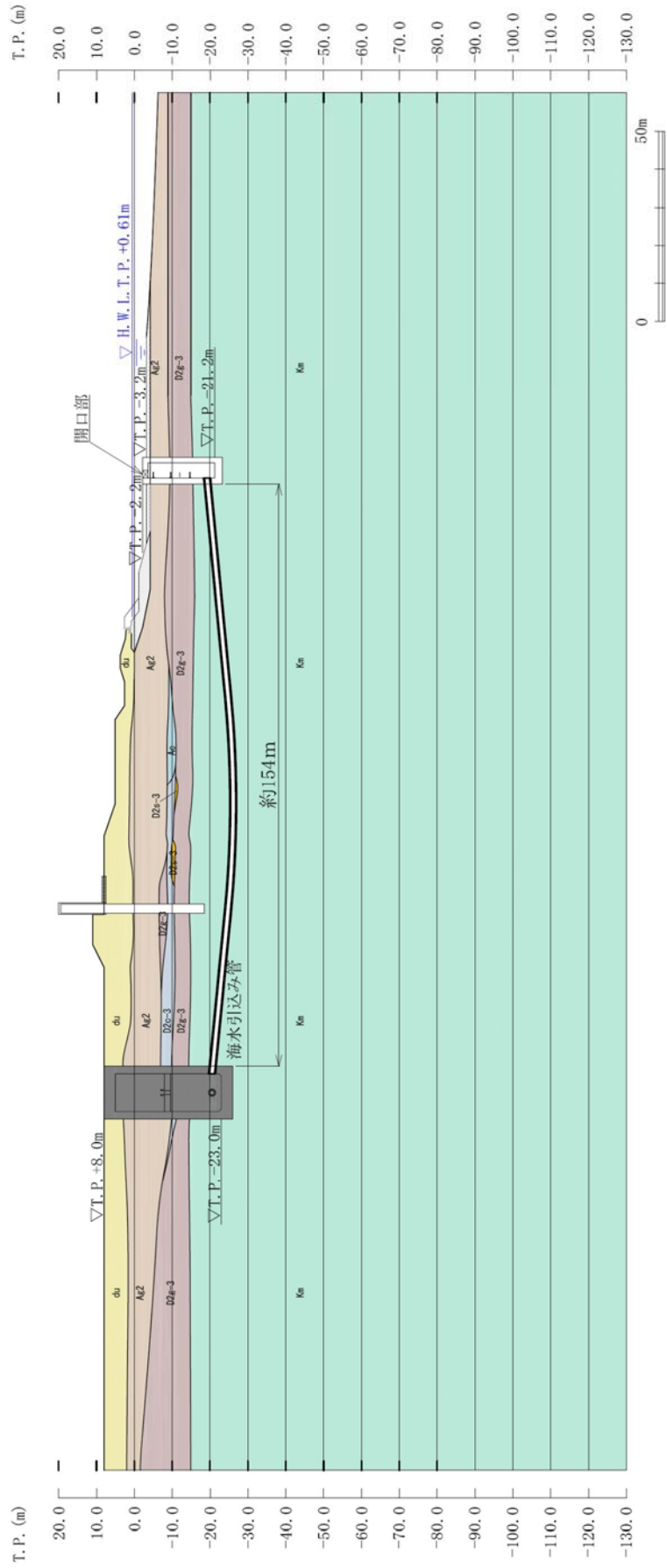


図1-2 (2) SA用海水ピット 評価対象断面図 (①-①断面)

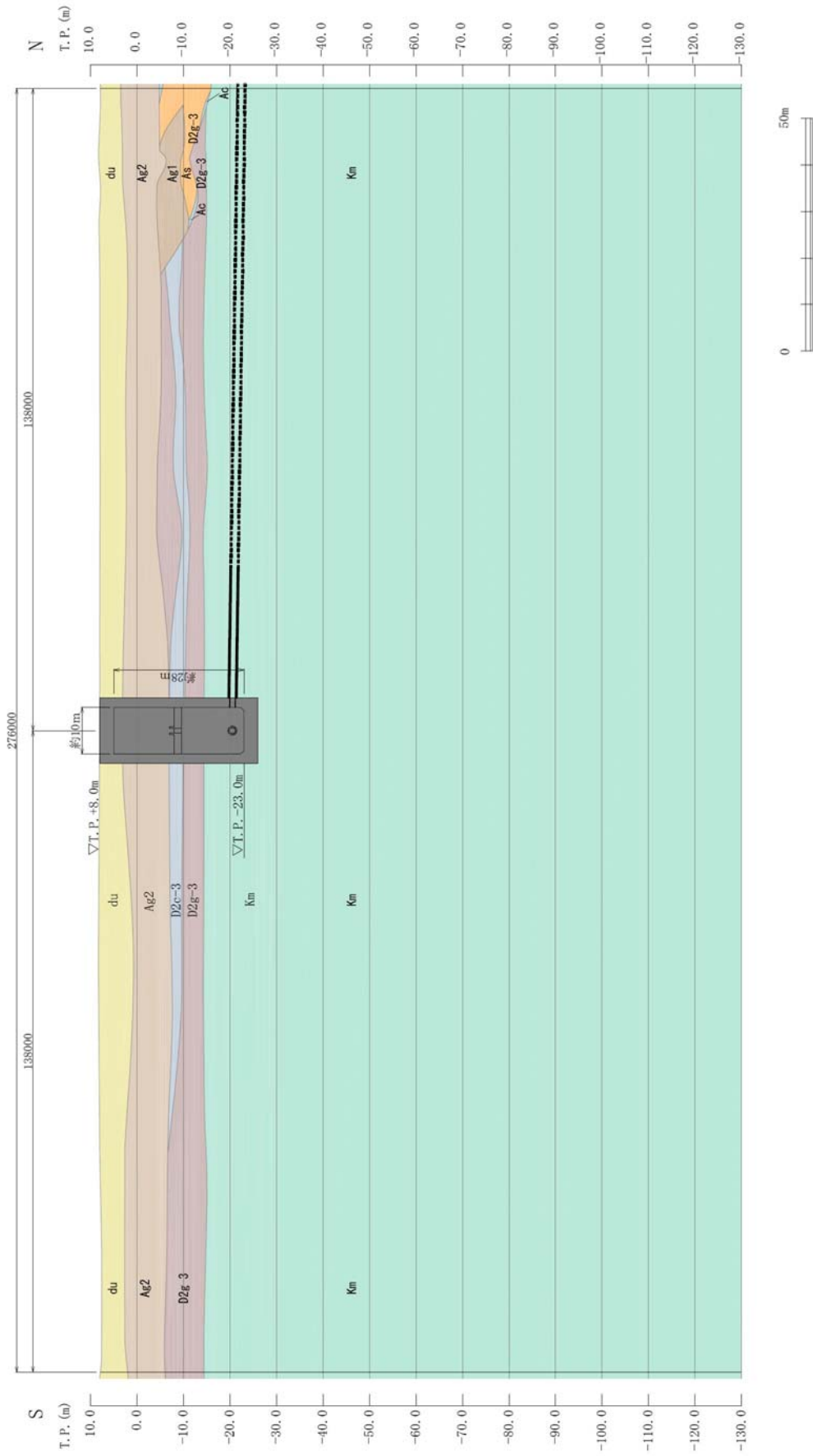


図1-2 (3) SA用海水ピット 評価対象断面図 (②-②断面)



図 1-2 (4) S A用海水ピット 構造平面図



図 1-2 (5) S A用海水ピット 構造断面図

(3) 代替淡水貯槽

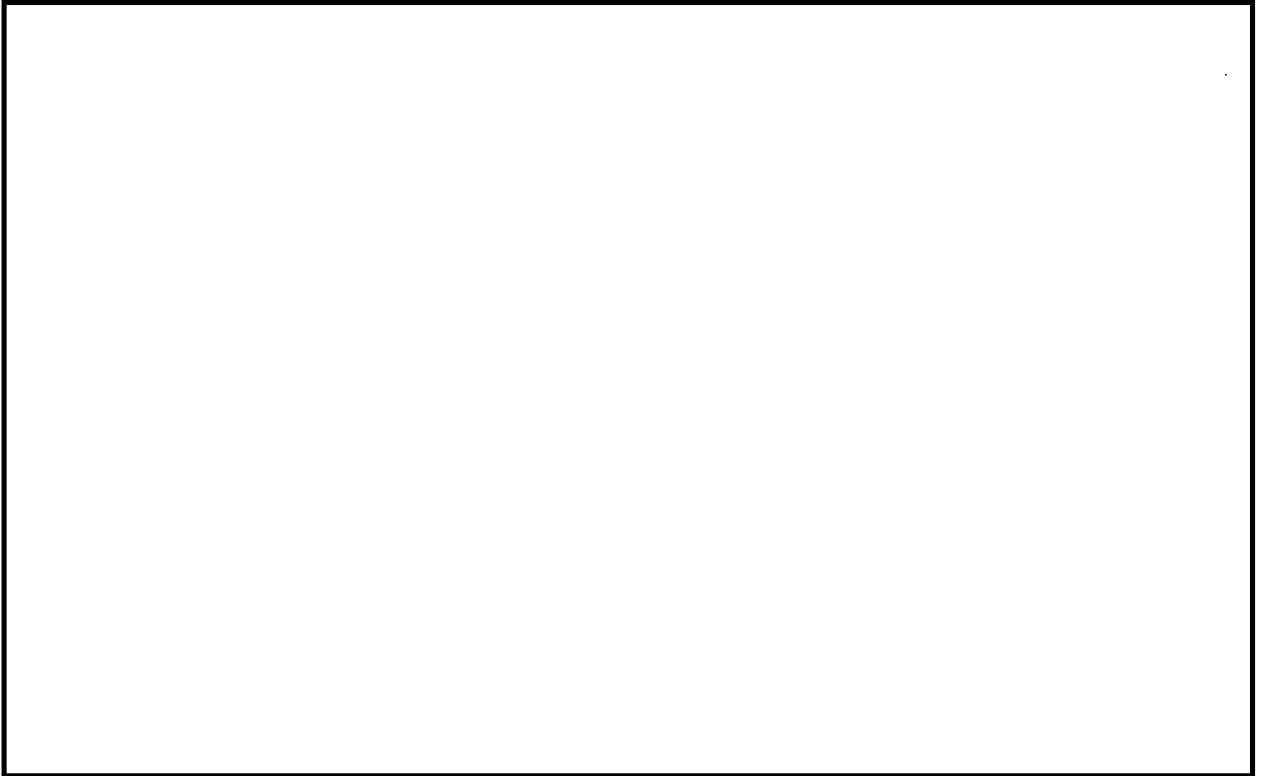


図 1-3 (1) 代替淡水貯槽 平面配置図 (拡大図)



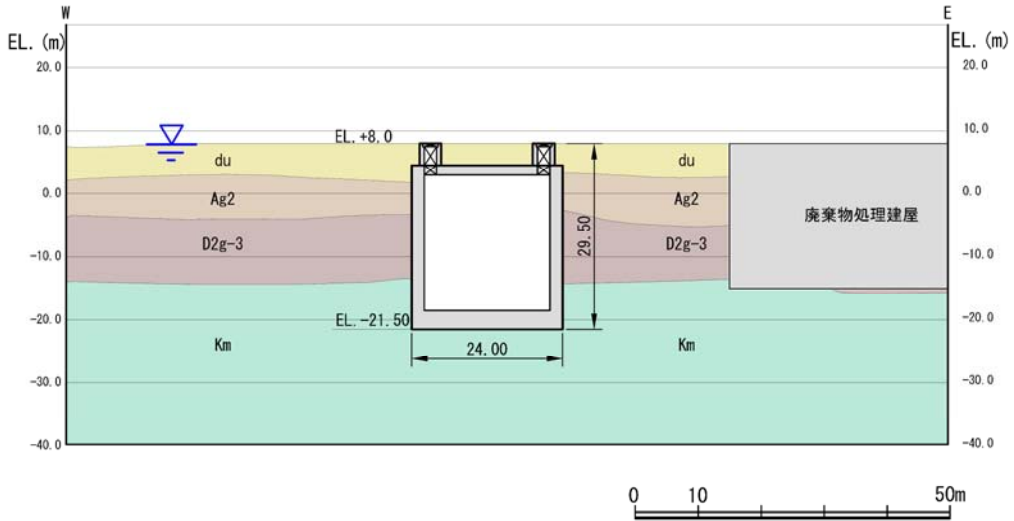


図 1-3 (2) 代替淡水貯槽地質断面図 (A-A 断面)

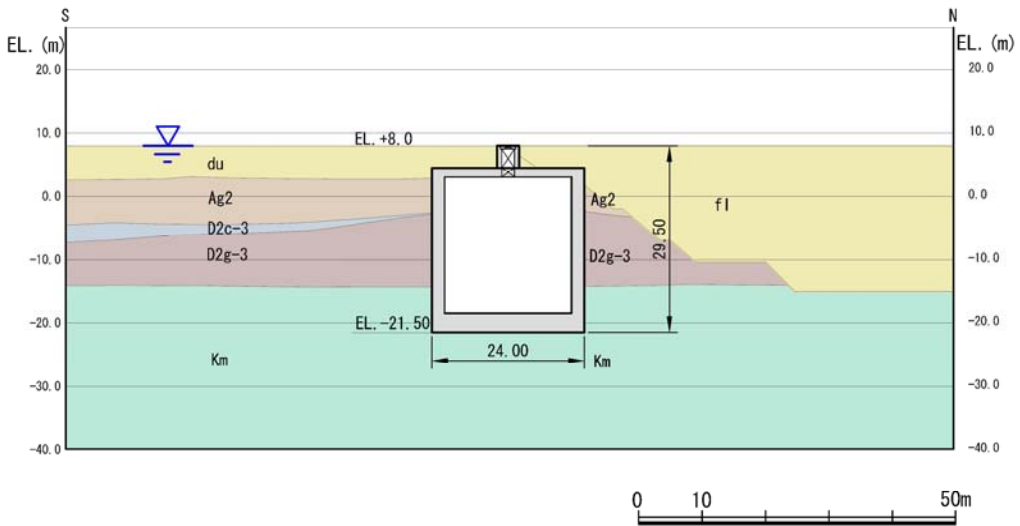


図 1-3 (3) 代替淡水貯槽地質断面図 (B-B 断面)

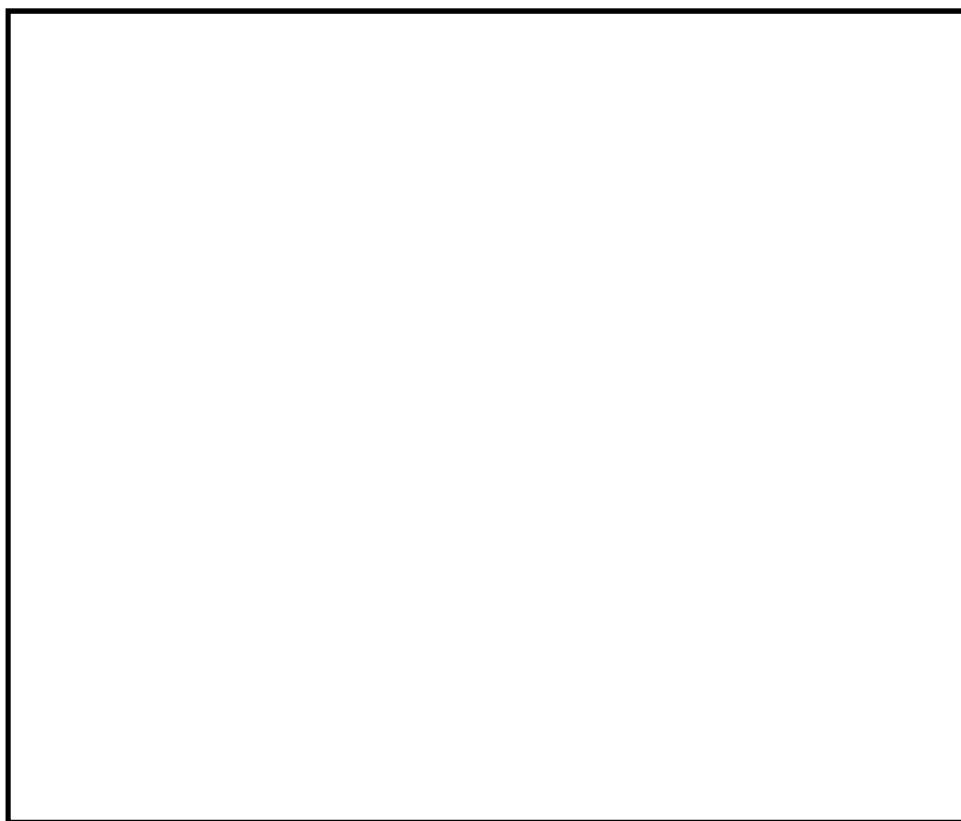


图 1-3 (4) 代替淡水貯槽 平面図

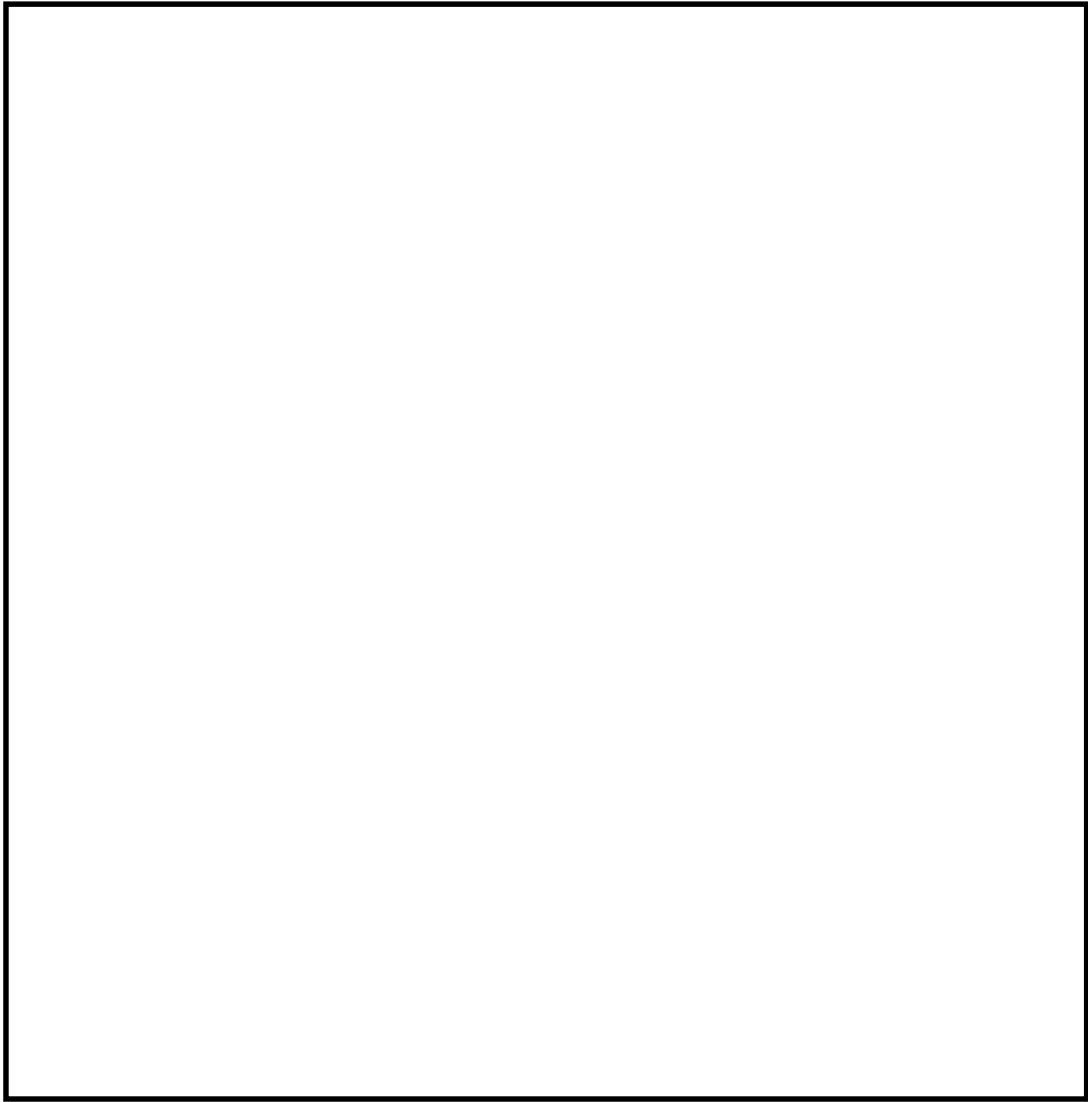


图 1-3 (5) 代替淡水貯槽断面图 (東西方向断面)

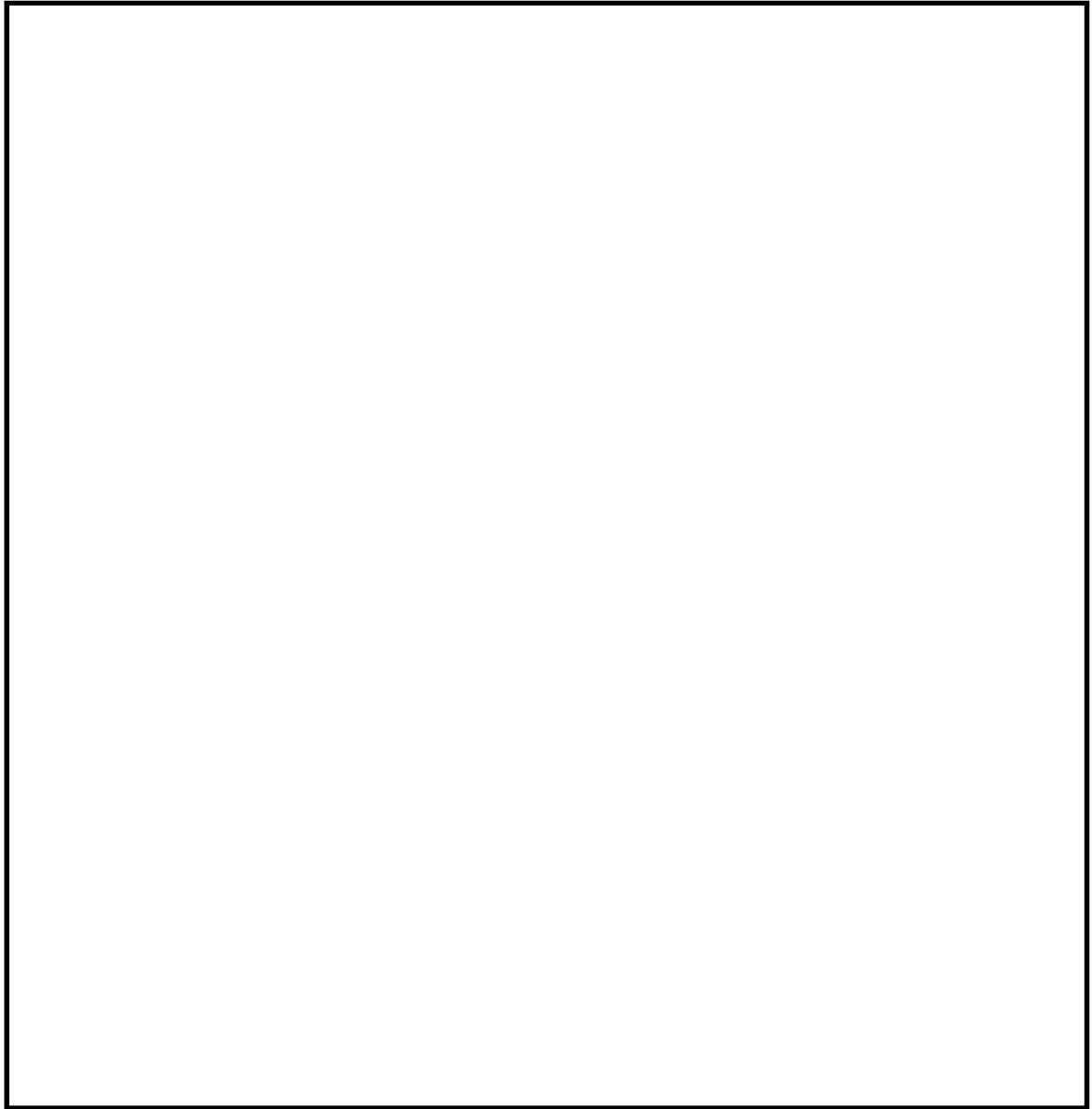


图 1-3 (6) 代替淡水貯槽断面图 (南北方向断面)

参考 2. 矩形の立坑構造図

矩形の立坑構造物は、緊急用海水ポンプピット、常設低圧代替注水系ポンプ室及び常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）がある。

(1) 緊急用海水ポンプピット

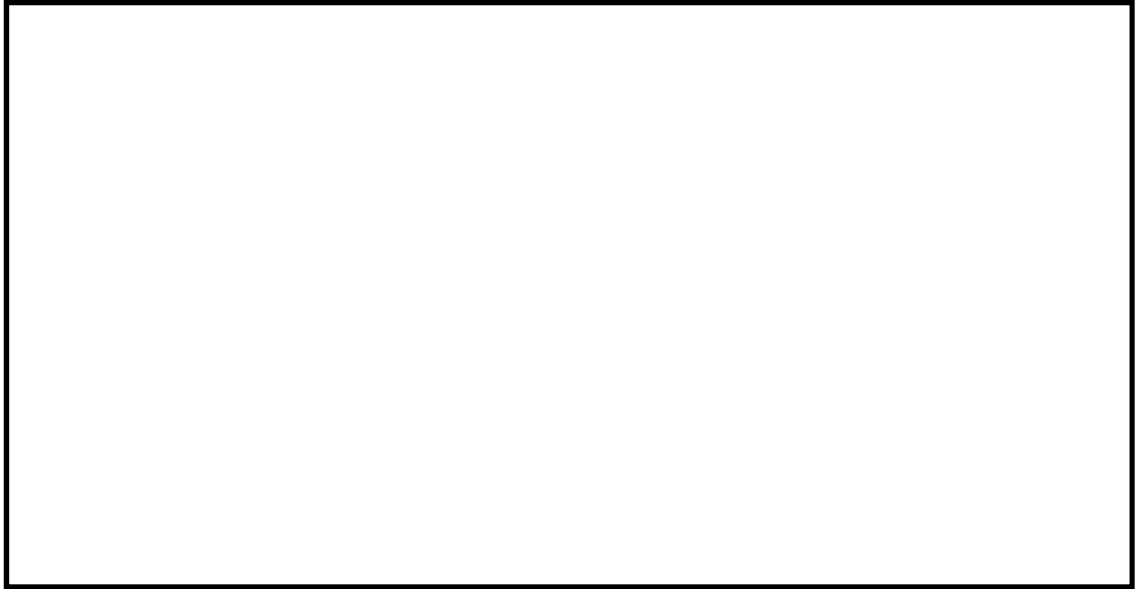


図 2-1 (1) 緊急用海水ポンプピット平面配置図（拡大図）

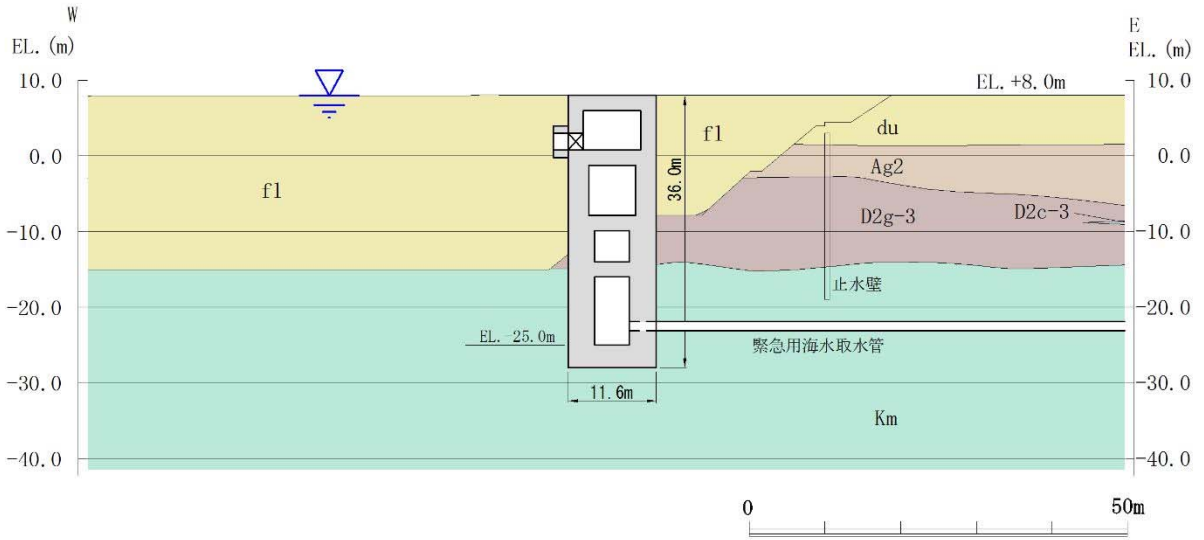


図 2-1 (2) 地質断面図 (東西方向 A-A断面)

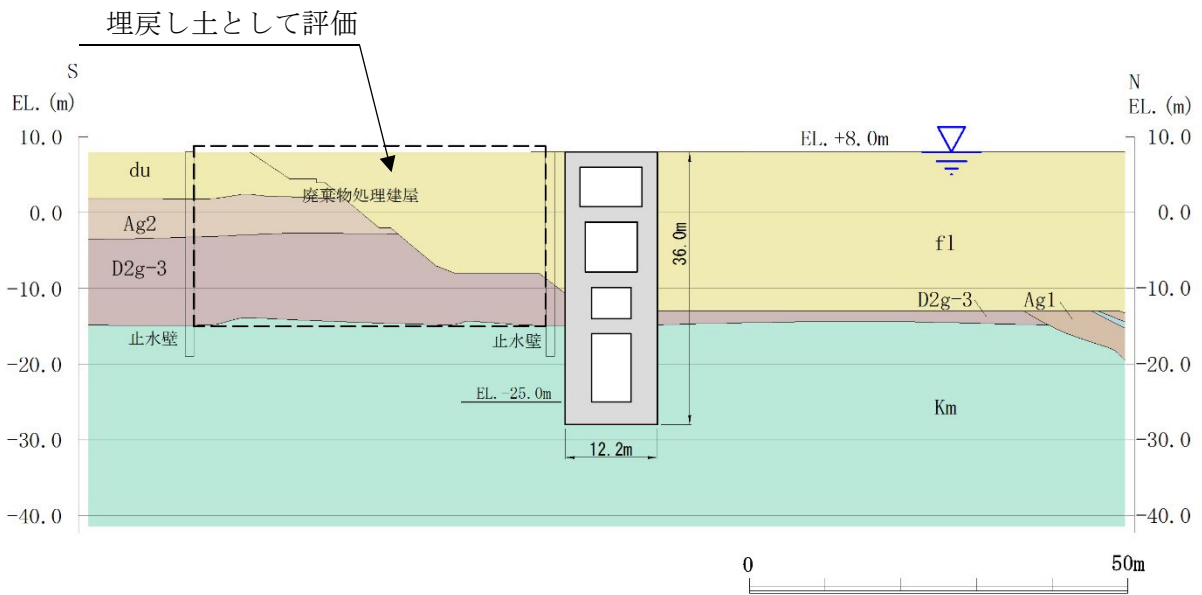


図 2-1 (3) 地質断面図 (南北方向 B-B断面)

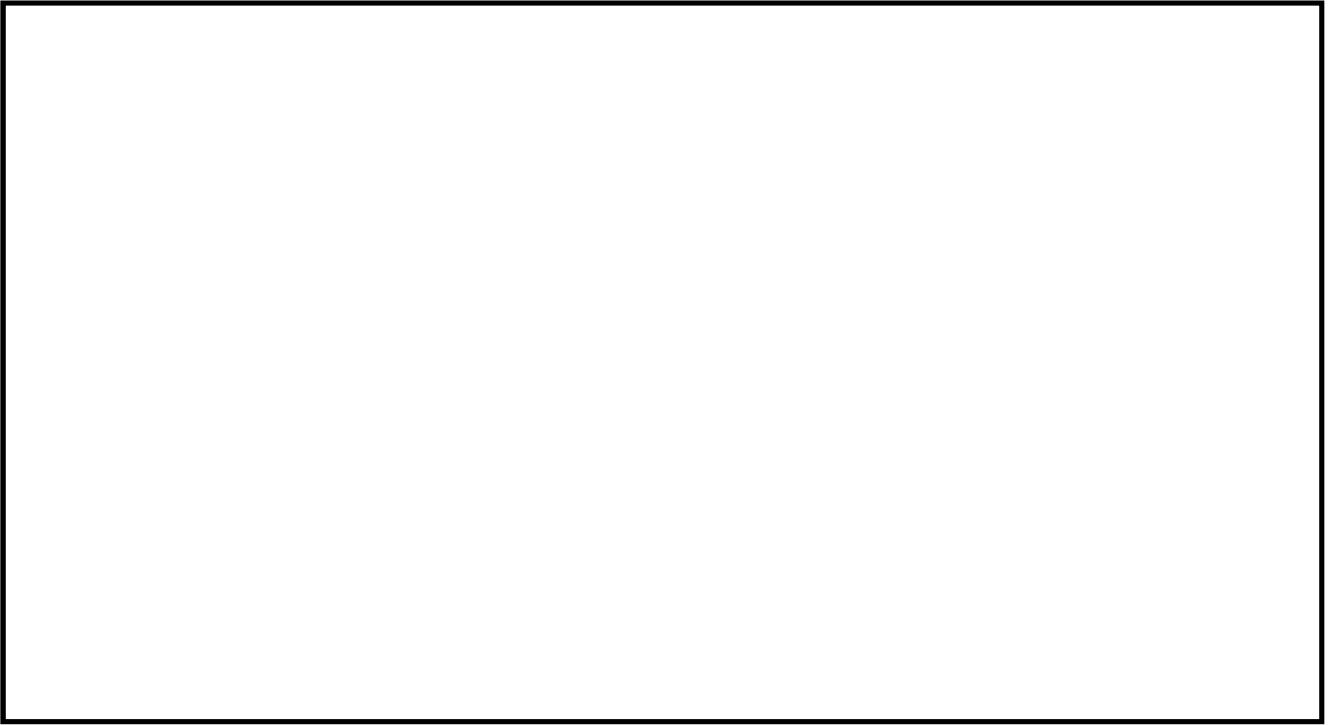


図 2-1 (4) 緊急用海水ポンプピット平面図

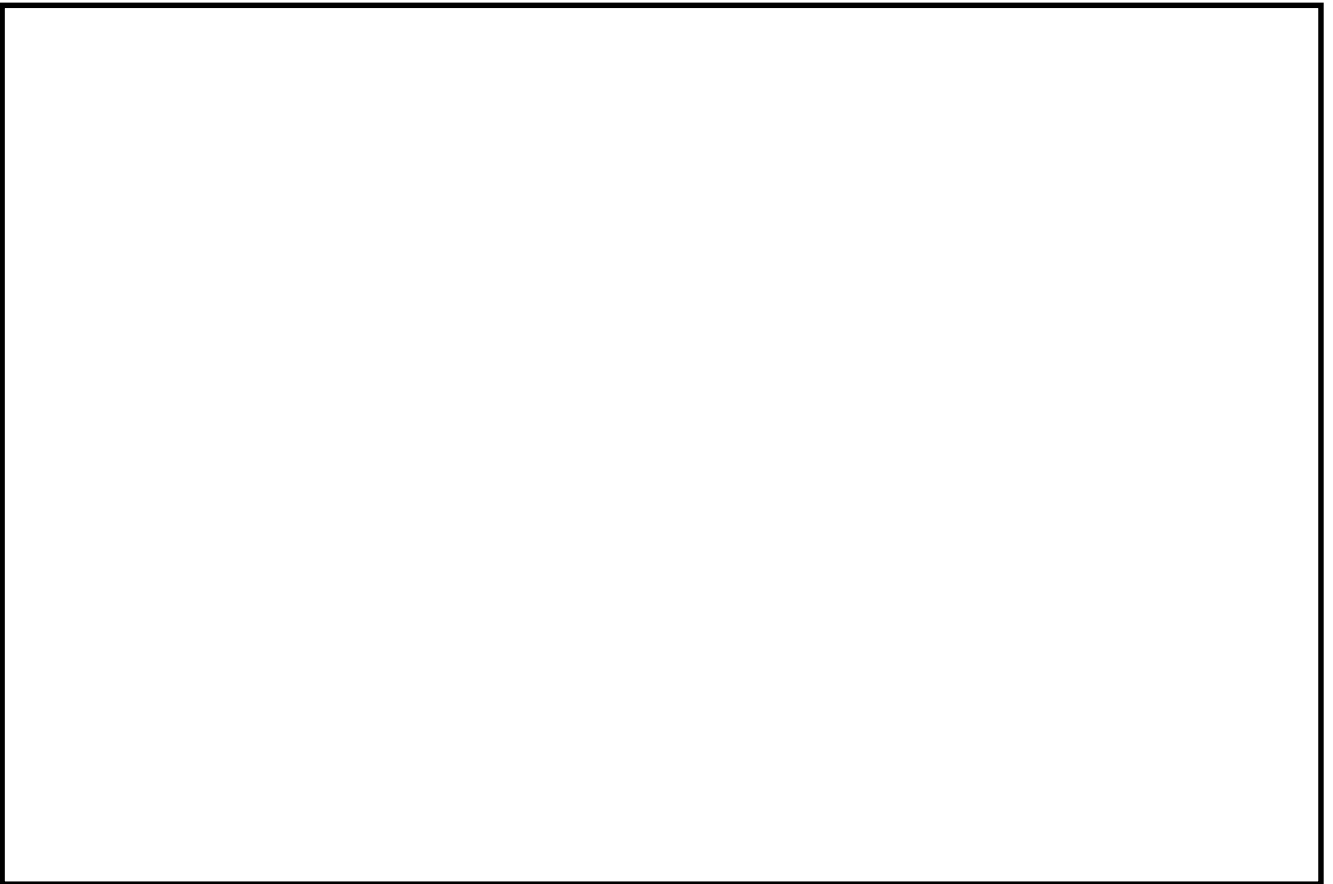


図 2-1 (5) 緊急用海水ポンプピット断面図 (東西方向 ①-①断面)

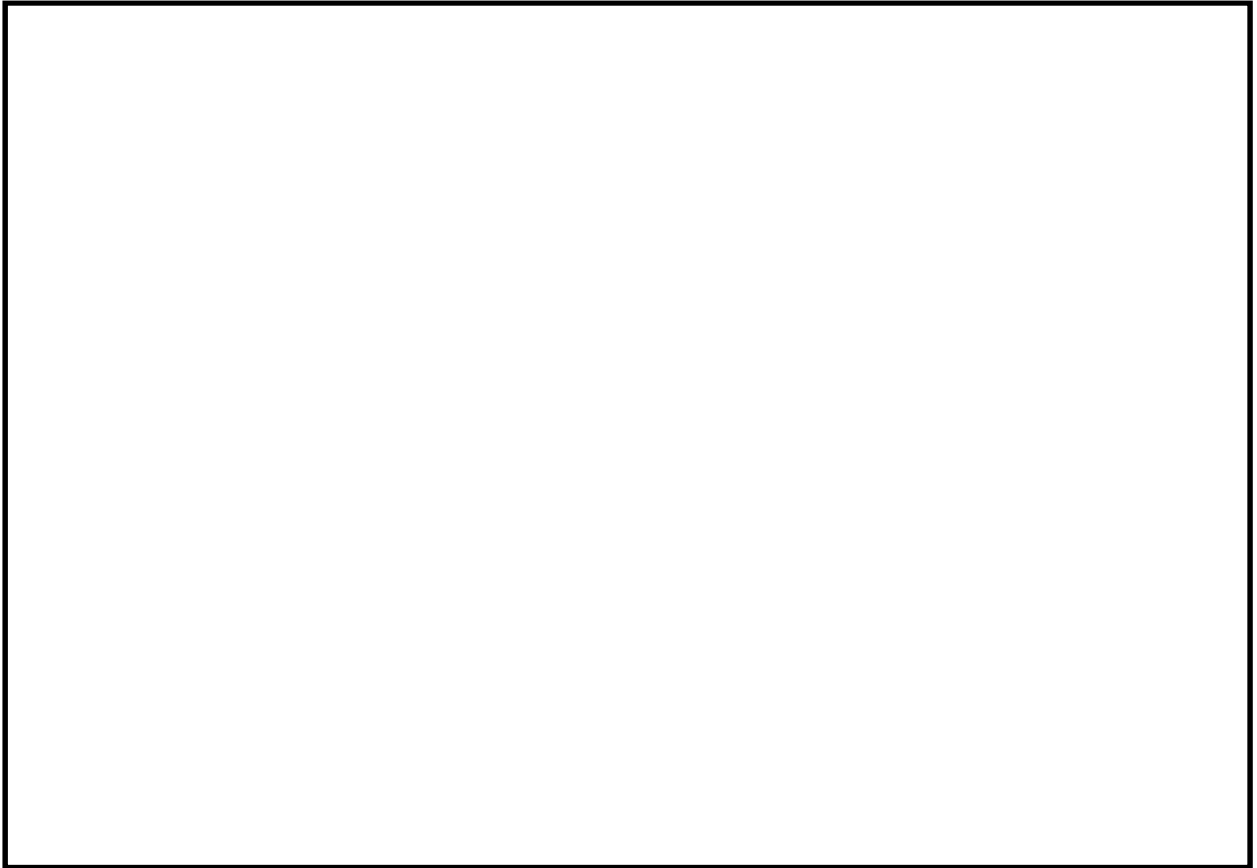


図 2-1 (6) 緊急用海水ポンプピット断面図 (東西方向 ②-②断面)

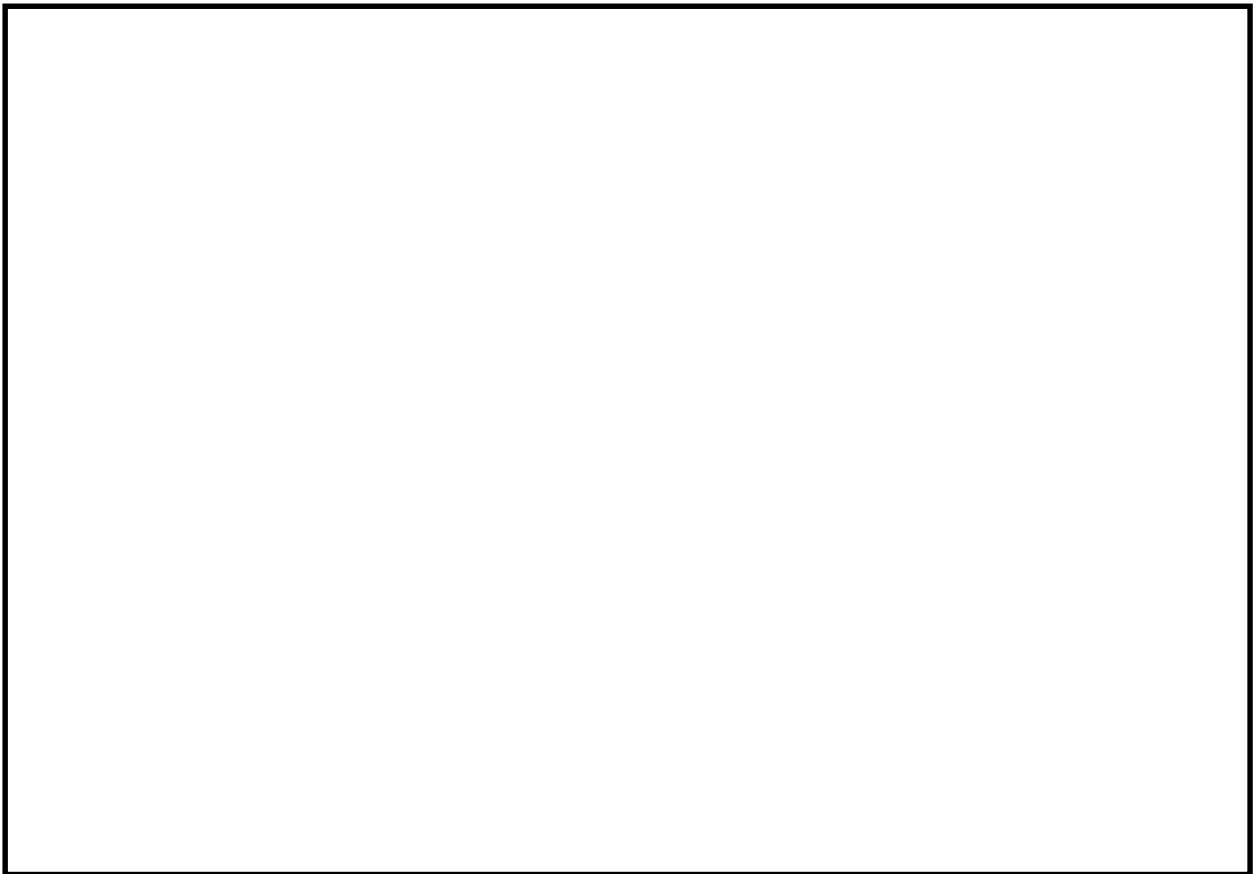


図 2-1 (7) 緊急用海水ポンプピット断面図 (東西方向 ③-③断面)



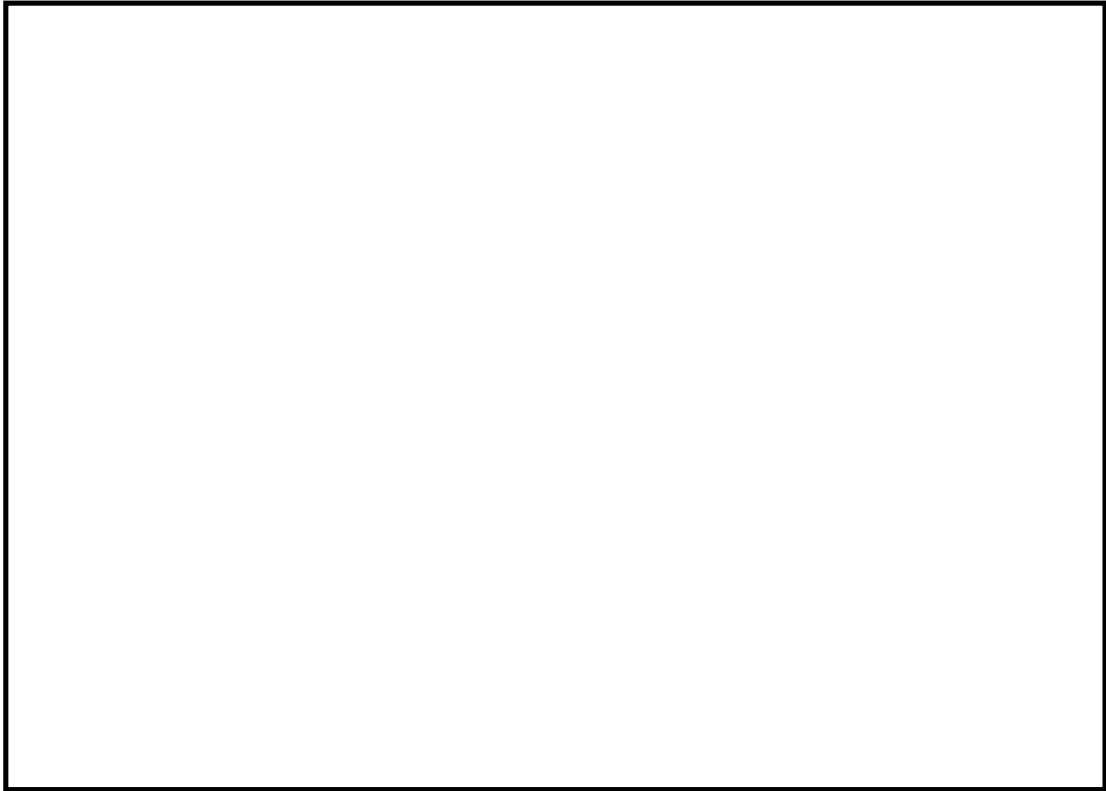


図 2-1 (8) 緊急用海水ポンプピット断面図 (東西方向 ④-④断面)

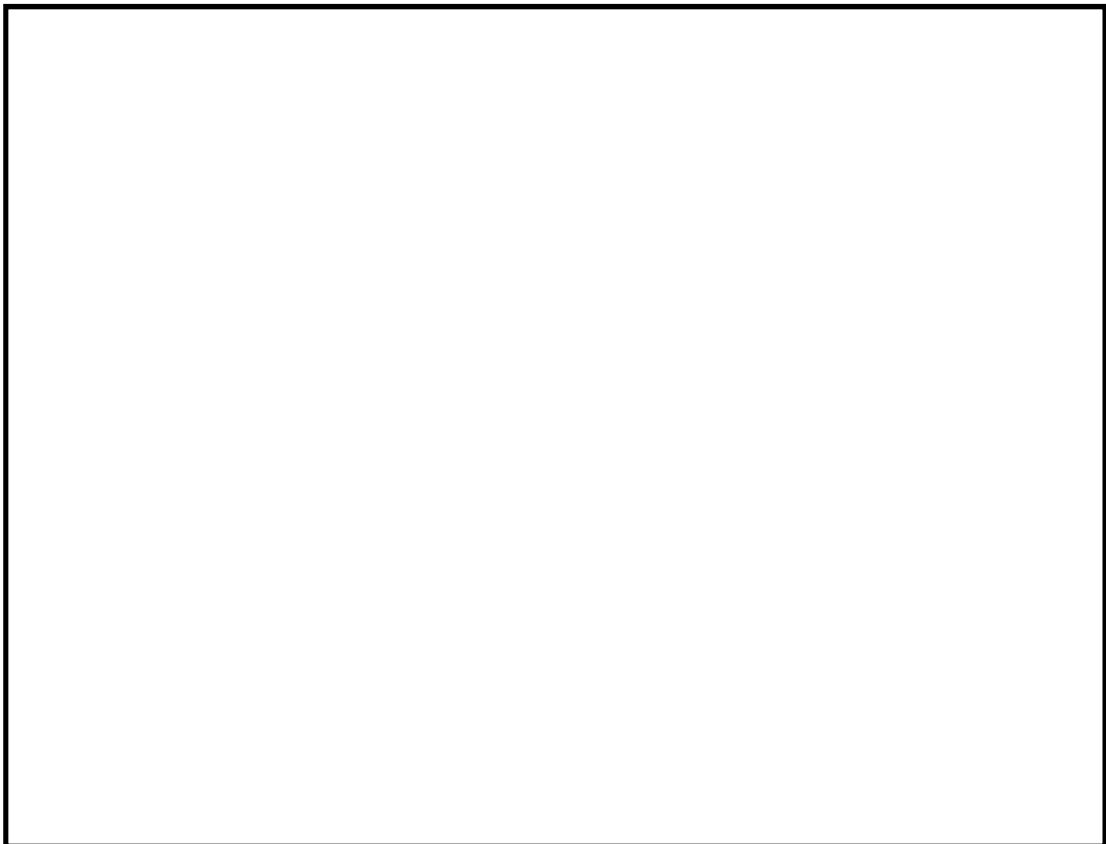


図 2-1 (9) 緊急用海水ポンプピット断面図 (南北方向 ⑤-⑤断面)

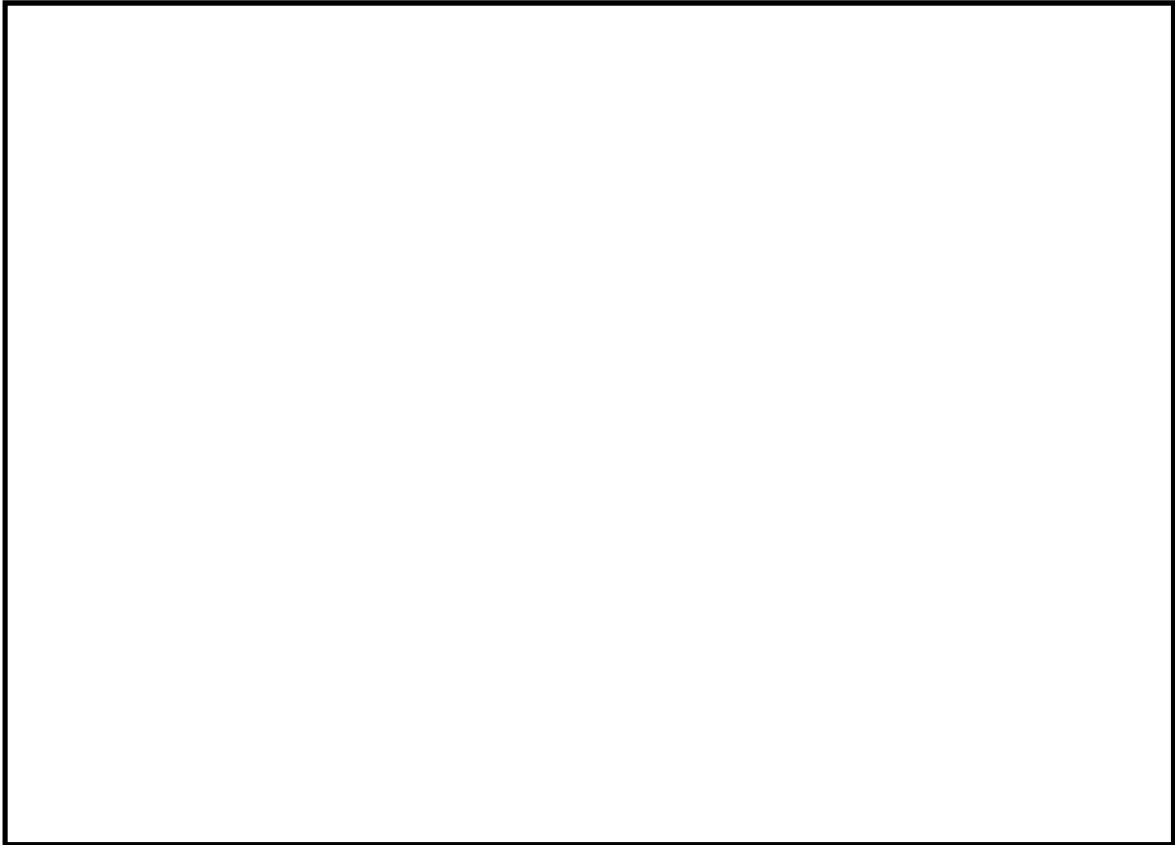


図 2-1 (10) 緊急用海水ポンプピット断面図 (南北方向 ⑥-⑥断面)

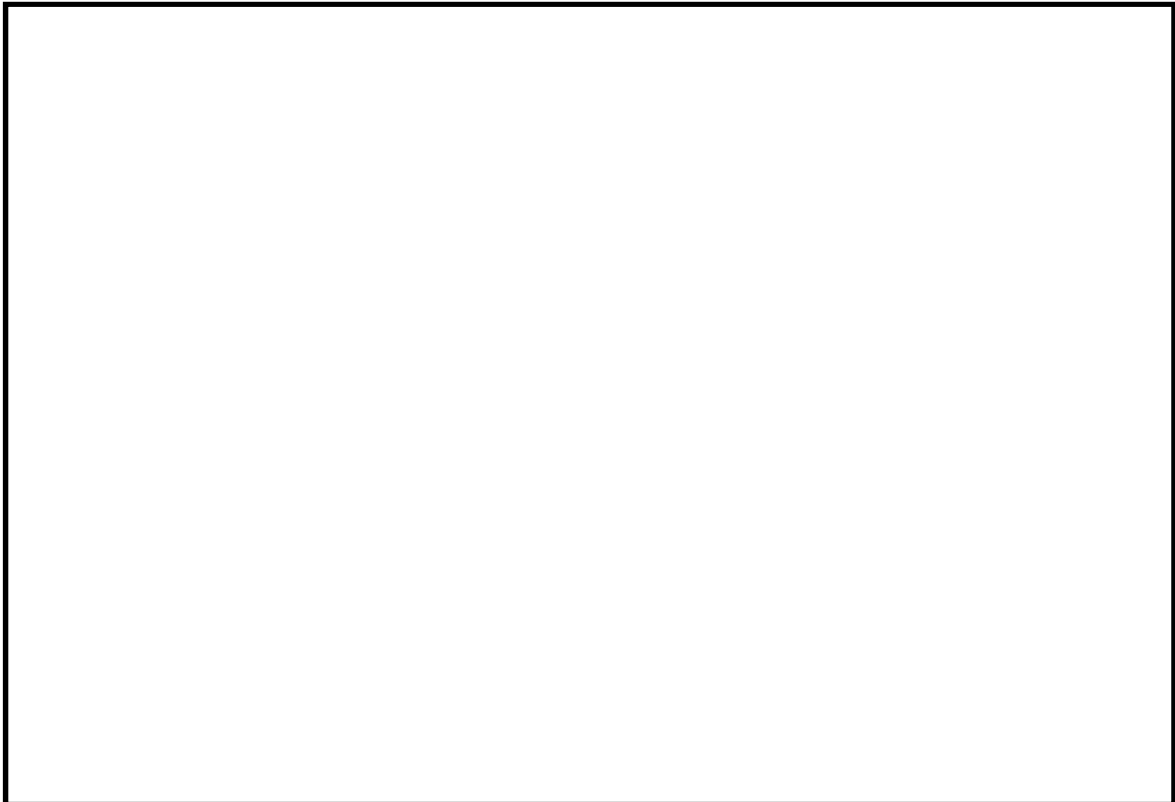


図 2-1 (11) 緊急用海水ポンプピット断面図 (南北方向 ⑦-⑦断面)

(2) 常設低圧代替注水系ポンプ室

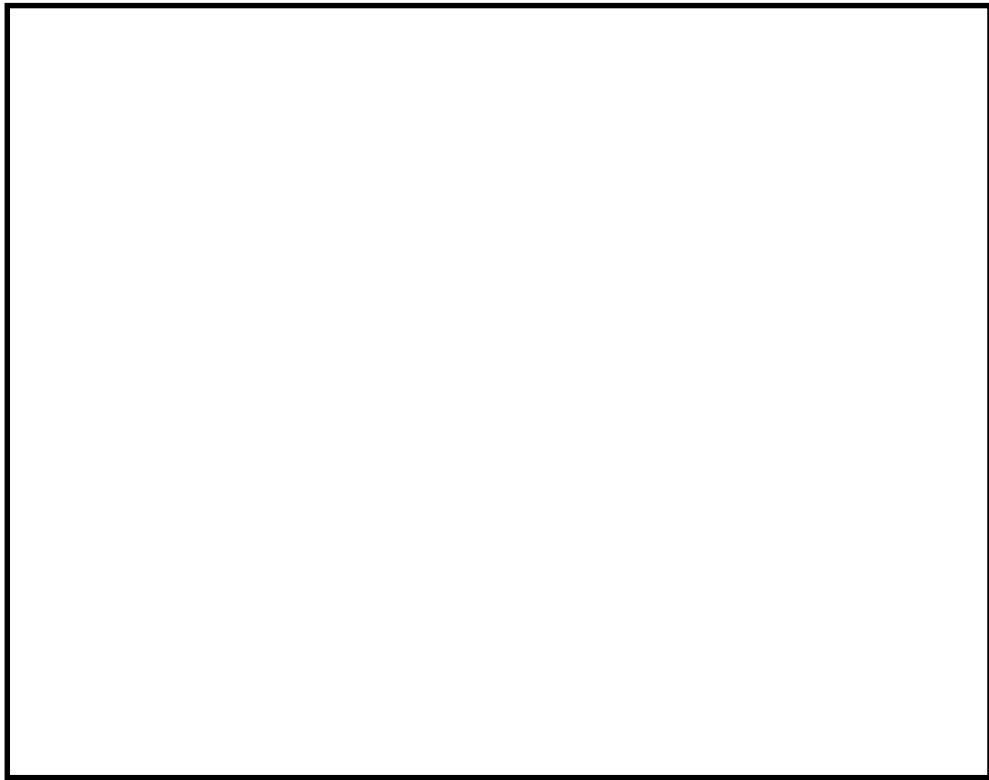


図 2-2 (1) 常設低圧代替注水系ポンプ室平面図

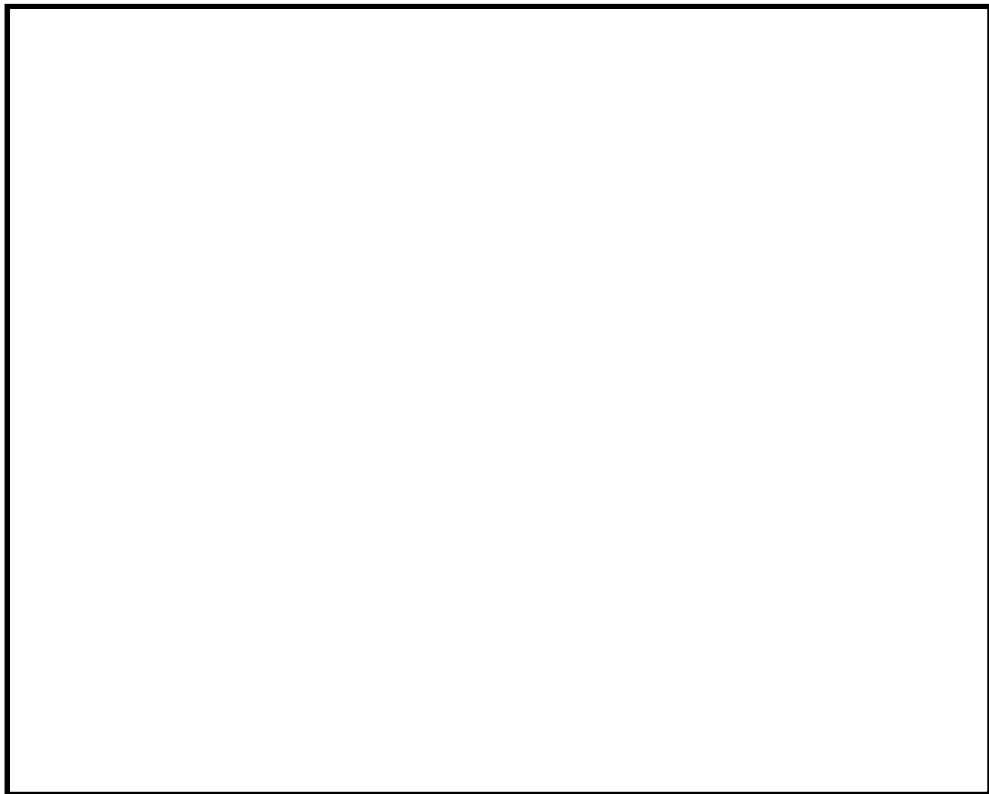


図 2-2 (2) 常設低圧代替注水系ポンプ室評価対象断面図 (東西方向①-①断面)

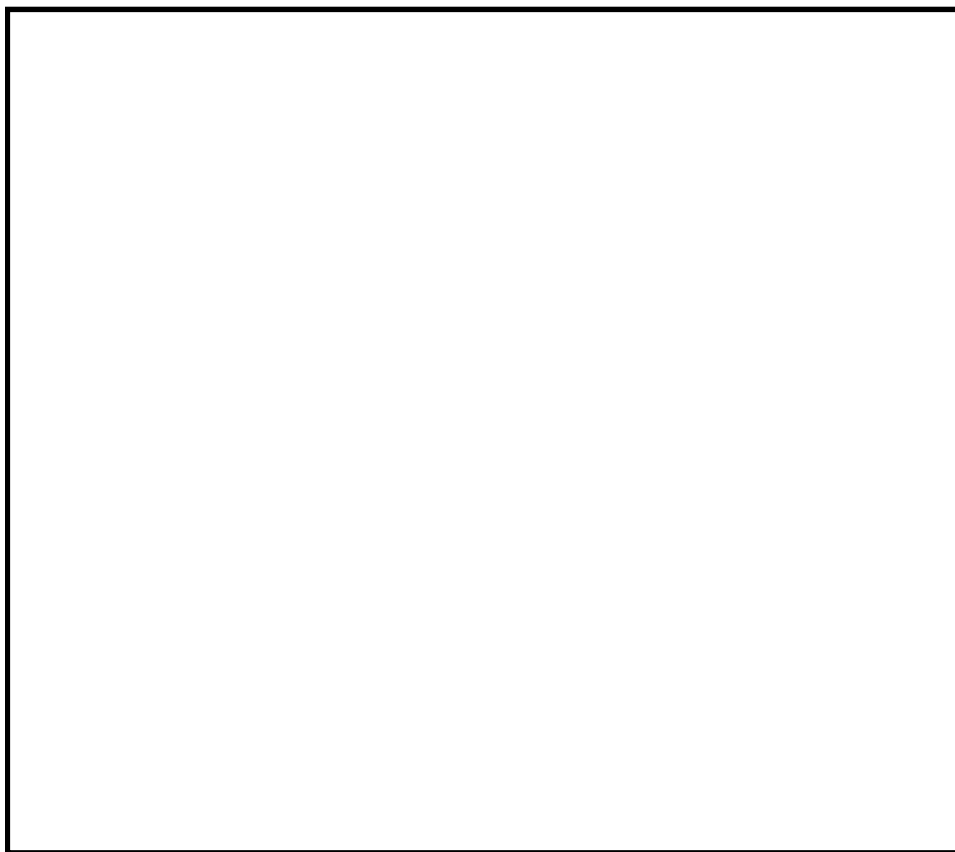


図 2-2 (3) 常設低圧代替注水系ポンプ室評価対象断面図 (東西方向②-②断面)



図 2-2 (4) 常設低圧代替注水系ポンプ室評価対象断面図 (東西方向③-③断面)

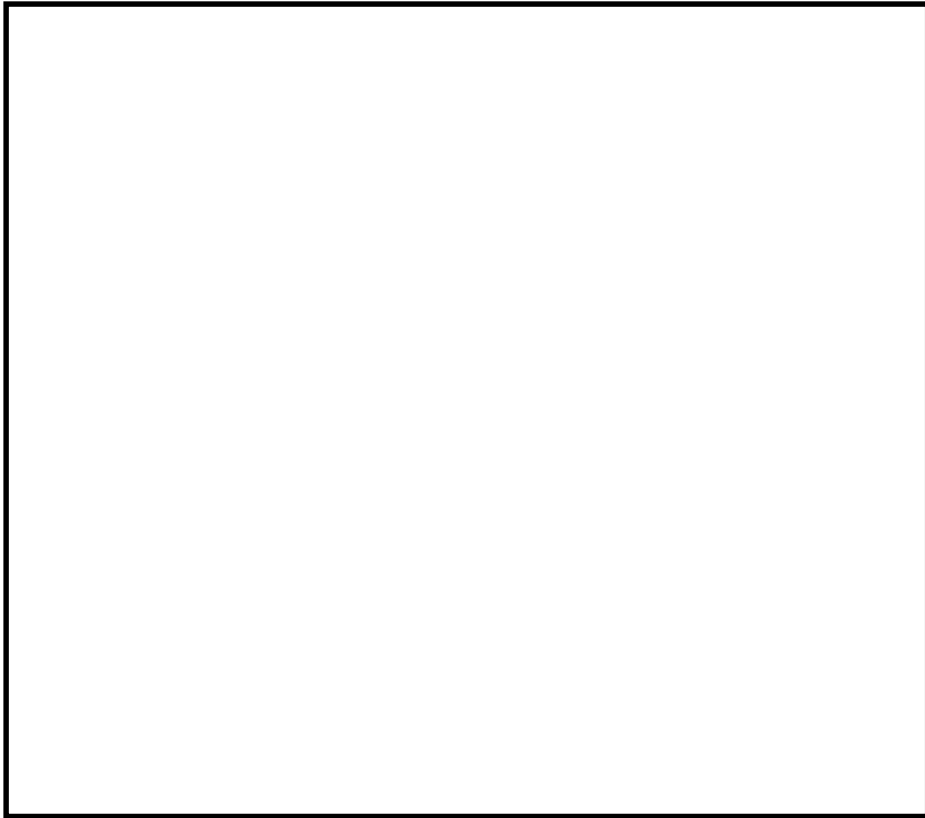


図 2-2 (5) 常設低圧代替注水系ポンプ室評価対象断面図 (南北方向④-④断面)

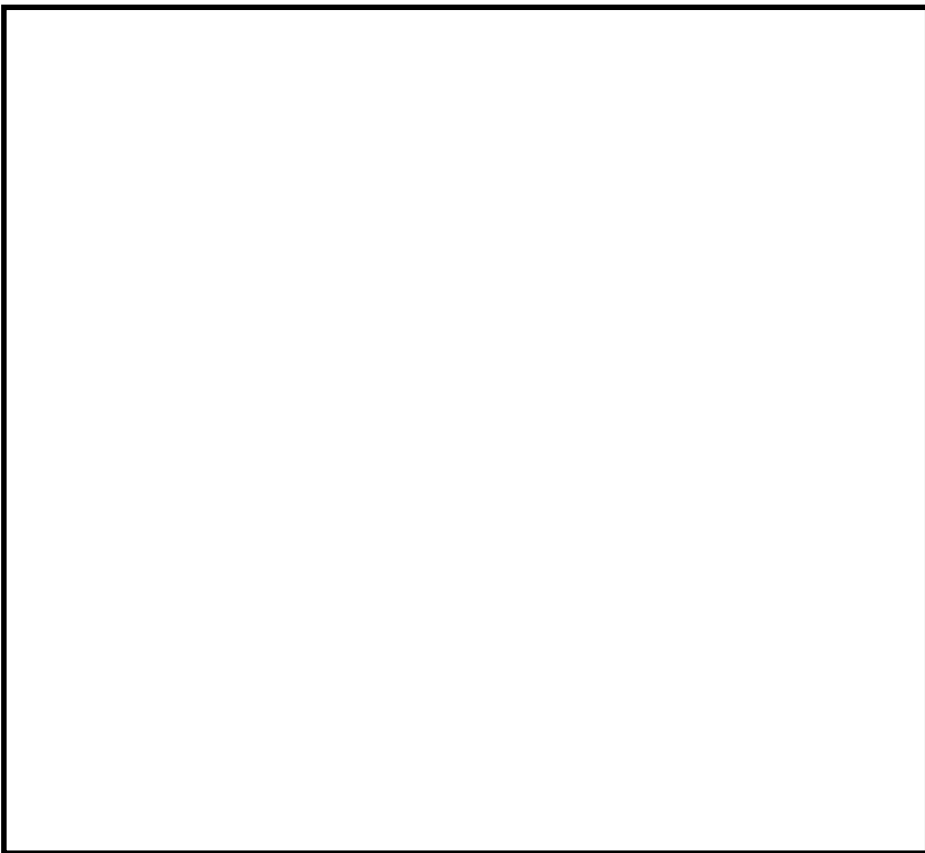


図 2-2 (6) 常設低圧代替注水系ポンプ室評価対象断面図 (南北方向⑤-⑤断面)

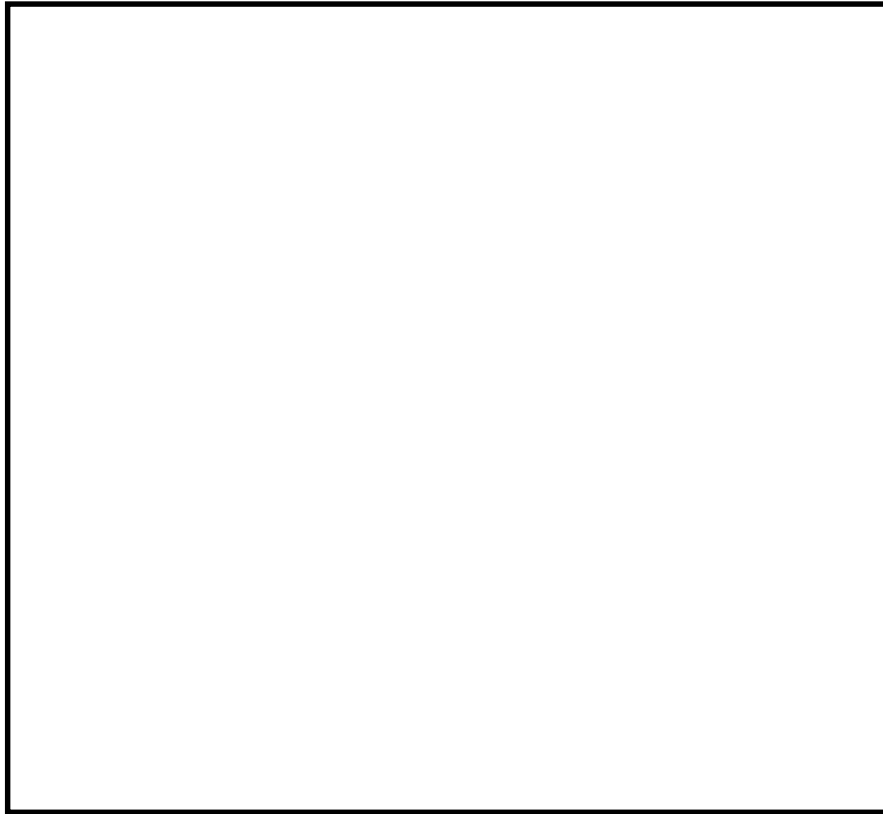


図 2-2 (7) 常設低圧代替注水系ポンプ室評価対象断面図 (南北方向⑥-⑥断面)

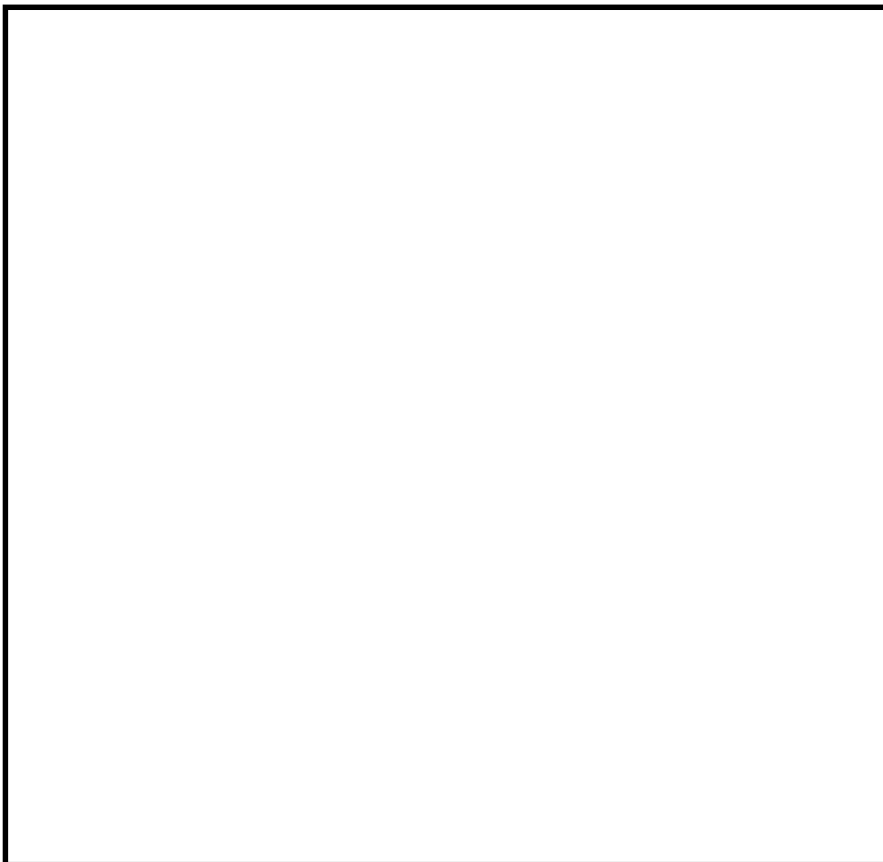


図 2-2 (8) 常設低圧代替注水系ポンプ室評価対象断面図 (南北方向⑦-⑦断面)

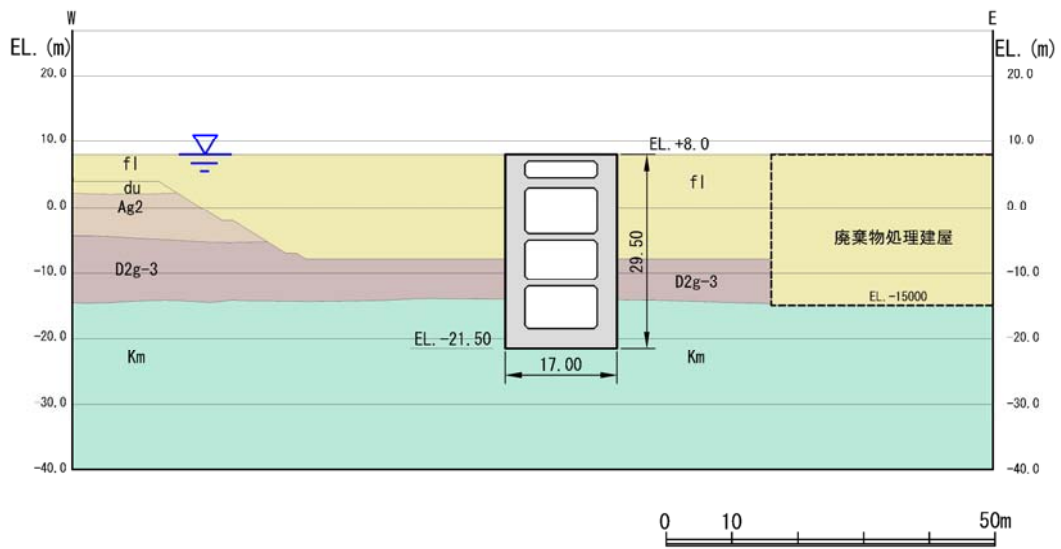


図 2-2 (9) 常設低圧代替注水系ポンプ室評価対象断面図 (東西方向断面)

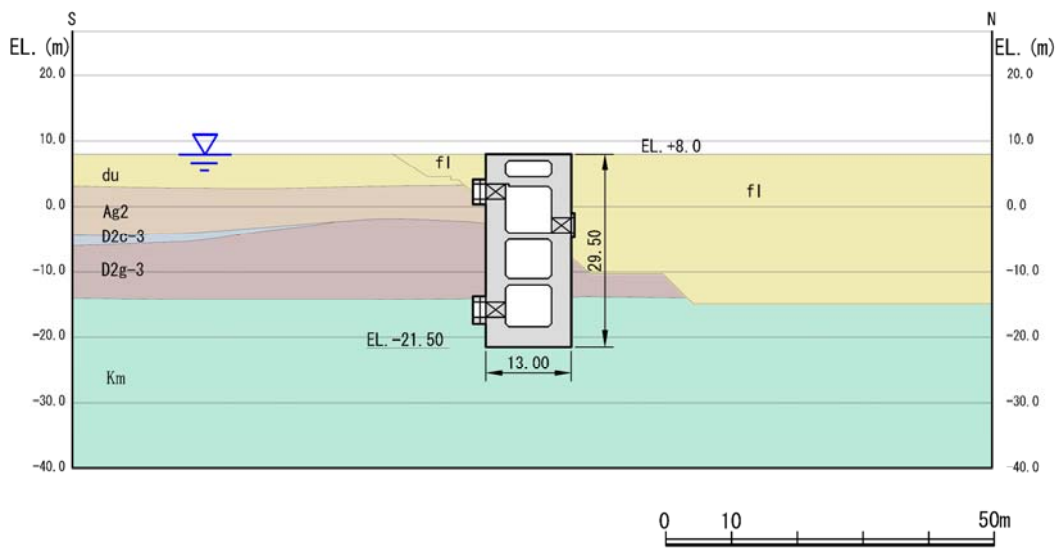


図 2-2 (10) 常設低圧代替注水系ポンプ室評価対象断面図 (南北方向断面)

(3) 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）

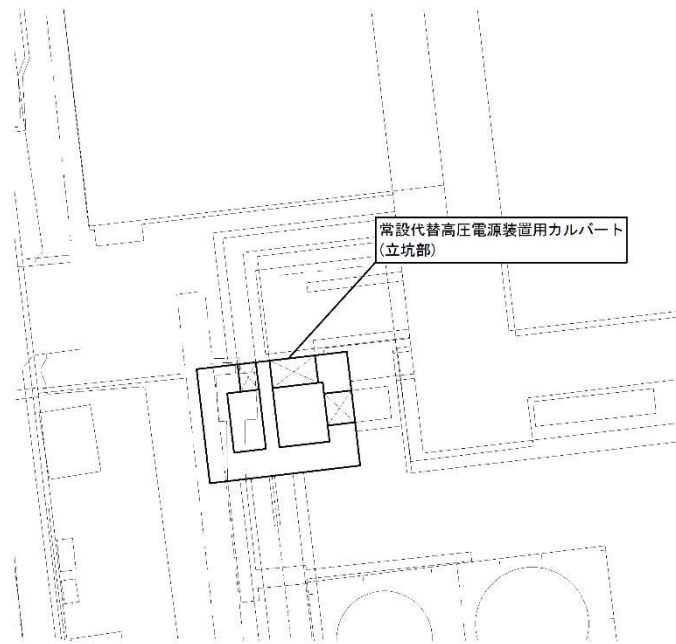


図 2-3 (1) 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）平面配置図（拡大図）

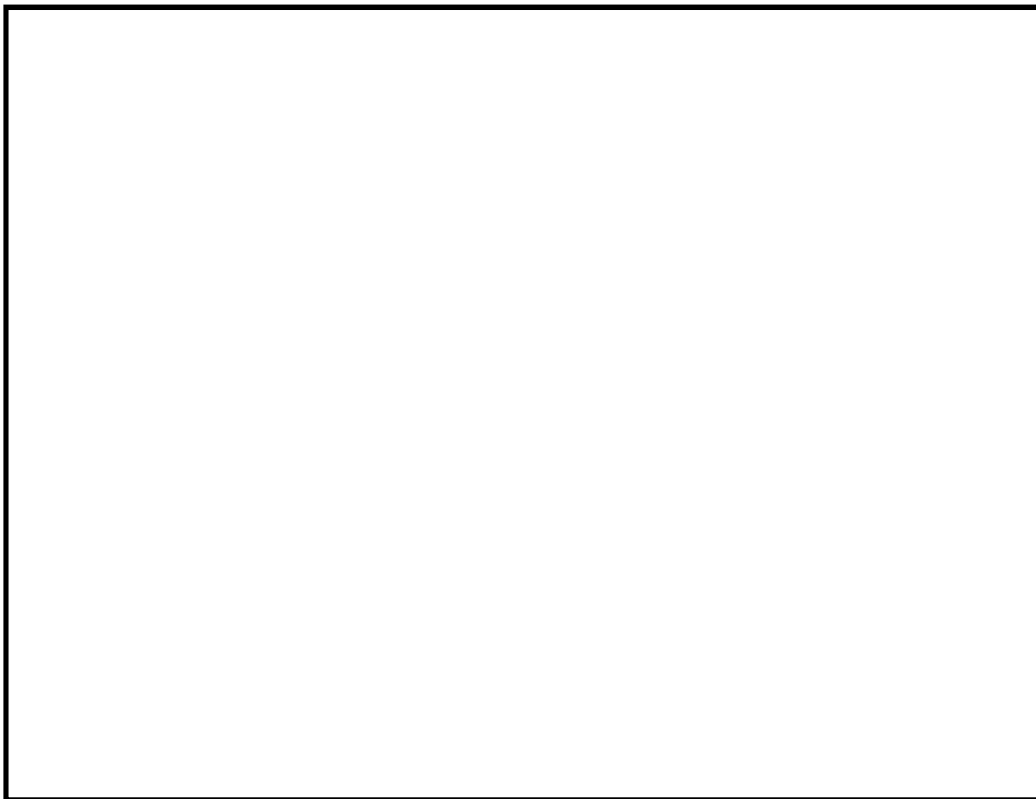


図 2-3 (2) 常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）平面図



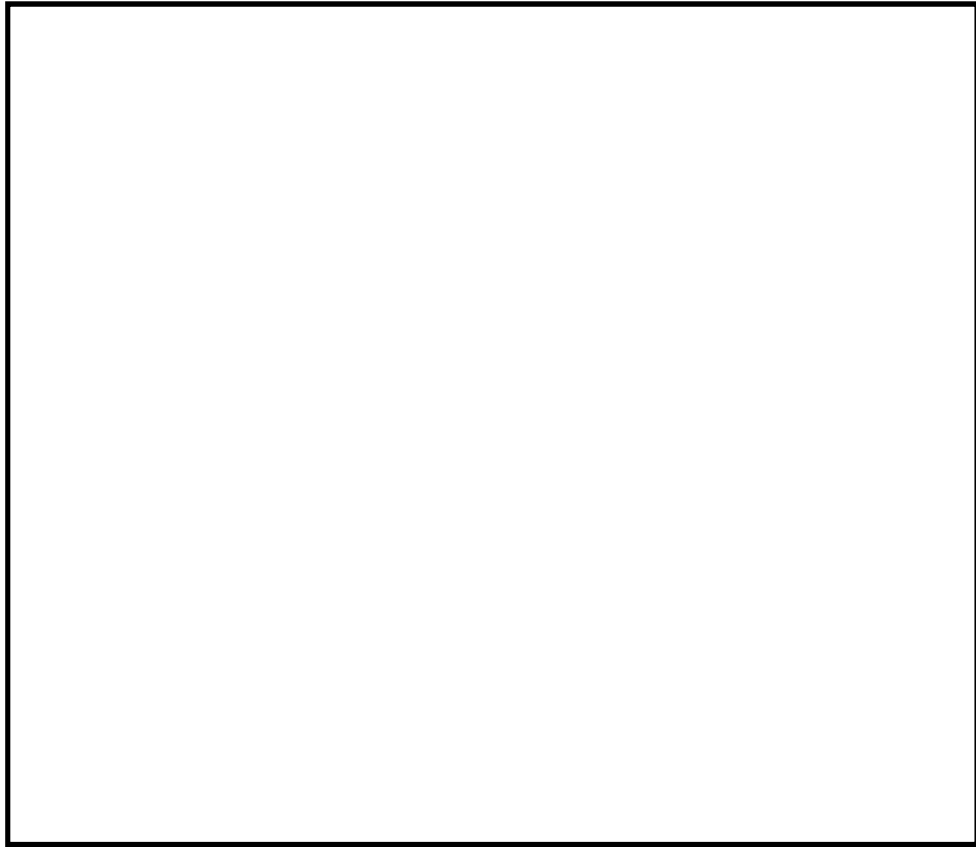


図 2-3 (3) 常設代替高圧電源装置用カルバート (立坑部) 断面図 (南北方向 ①-①断面)

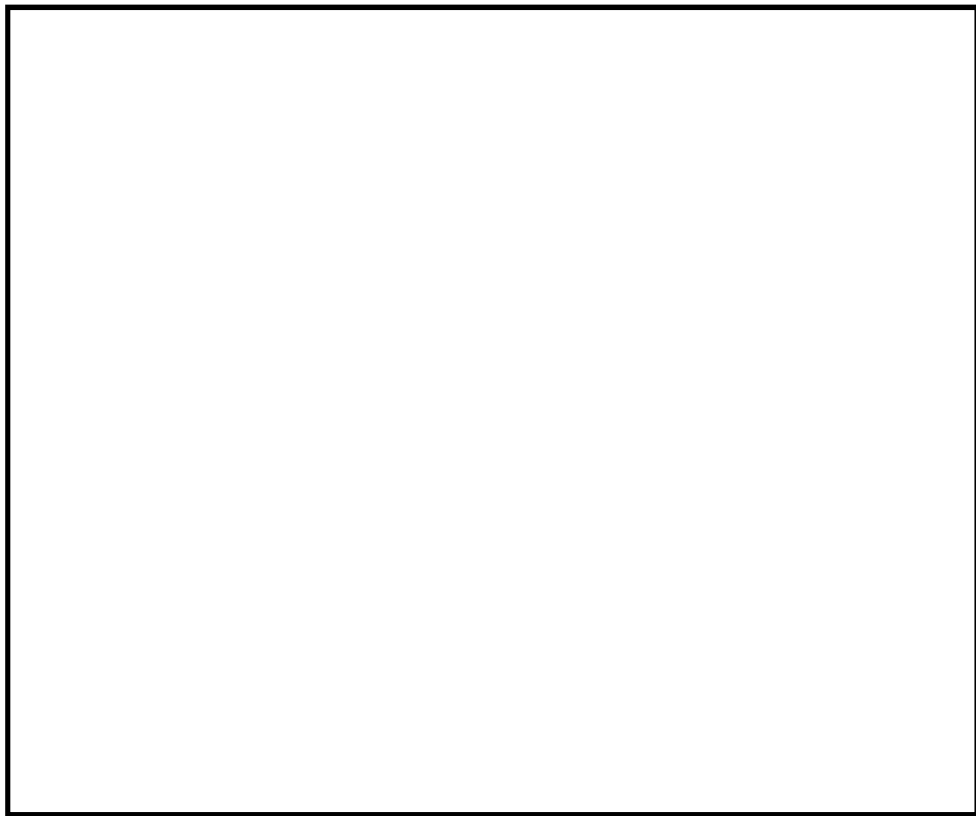


図 2-3 (4) 常設代替高圧電源装置用カルバート (立坑部) 断面図 (東西方向 ②-②断面)

### 参考 3. 既工認プラントの事例

#### 1. 玄海 3 号機 海水管ダクト堅坑

##### (1) モデル概要

- ・ 構造物：線形はり要素



図 1-1 玄海 3 号機海水管ダクト堅坑モデル図

##### (2) 設計方針

- ・ 鉛直方向

曲げに対して躯体の全断面積を考慮した断面性能（有効高さ），せん断に対して加振方向に平行に配置される壁部材にて受け持つ設計とする。

- ・ 水平方向

地震応答解析により得られる荷重を用いた 3 次元応力解析により断面力を算定する。

##### (3) 適用基準類

- ・ 荷重及び荷重の組合せ：コンクリート標準示方書 2002 年
- ・ 許容限界：コンクリート標準示方書，原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル 2005 年
- ・ 地震応答解析：J E A G 4 6 0 1-1987

## 2. 高浜 1, 2 号 海水ポンプ室側立坑

### (1) モデル概要

- ・ 構造物：円筒状立坑。立坑は線形の鉛直はり要素としてモデル化し，立坑高さ方向の形状（一般部，開口部，底版）に応じた断面諸量（A, I）を入力。地盤は平面ひずみ要素としてモデル化。
- ・ 構造寸法：内径 7m, 外径 11m, 高さ 46m

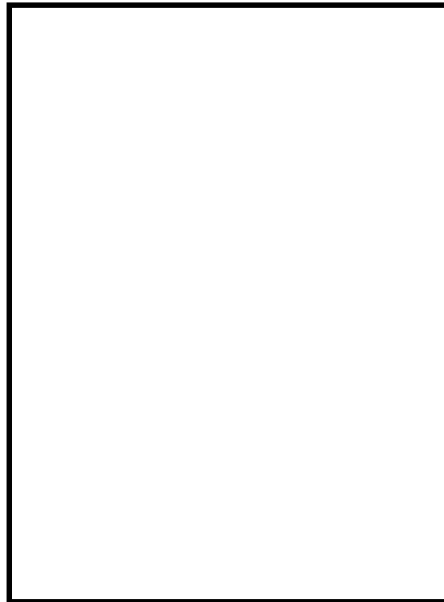


図 2-1 高浜 1, 2 号海水ポンプ室側立坑モデル図

### (2) 設計方針

- ・ 海水ポンプ室側立坑部とトンネル部を一体化せず，立坑の構造のみで開口の影響を考慮した評価を行う。底版は，両端固定梁でモデル化し，二次元動的解析における底版下面のジョイント要素に発生する鉛直方向地盤反力を作用させ評価する。

### (3) 適用基準類

- ・ コンクリート標準示方書 2002 年
- ・ 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル 2005 年
- ・ J E A G 4 6 0 1-1987

