

地盤改良後における
原子炉施設（高速実験炉）の基礎地盤の安定性について

別添 1

3-2. 地盤改良後における
原子炉施設（高速実験炉）の基礎地盤の安定性
に関する説明書

耐震設計上の重要度分類Sクラスの機器・配管系及びそれらを支持する建物・構築物（耐震重要施設）が設置される基礎地盤について、十分な安定性を有することを確認する。

対象施設は原子炉建物及び原子炉附属建物、主冷却機建物とし、基礎地盤の地震時の支持性能については、基礎地盤のすべり、基礎地盤の支持力及び基礎底面の傾斜を評価する。主冷却機建物については、周辺地盤の改良を行い、基礎地盤のすべりに対して安定性を確保する。

1. 地震力に対する基礎地盤の安定性評価

1.1 評価方法

(1) 解析手法

基礎地盤のすべり、基礎地盤の支持力及び基礎底面の傾斜に関する安定性について、2次元有限要素法による地震応答解析により検討した。

地震応答解析は、2次元有限要素モデルを用いた周波数応答解析とし、等価線形化法により動せん断弾性係数及び減衰率のひずみ依存性を考慮する。

地震時の応力は、静的有限要素法解析による常時応力及び地震応答解析による地震時増分応力を重ね合わせるにより求める。常時応力は建物の荷重及び地盤の初期応力を考慮して求め、地震時増分応力は水平地震動及び鉛直地震動を同時加振した場合の応答を考慮して求める。基礎地盤の安定性評価フローを第1.1図に示す。

(2) 解析条件

a. 解析断面

解析の対象とする断面は、基礎地盤の地質構造及び対象施設の配置を考慮し、対象施設を中心に直交する3断面A-A'、B-B'及びC-C'とする。解析断面位置図を第1.2図に示す。

b. 解析モデル

有限要素法解析に用いる解析用地盤モデルは、第1.4図(1)から第1.4図(3)に示す鉛直地質断面図に基づき作成する。また、建設時の掘削範囲の埋戻土及び主冷却機建物の改良地盤を解析用地盤モデルに反映する。解析用建物モデルは、多質点系モデルに基づき作成する。解析モデルを第1.5図(1)から第1.5図(3)に、改良地盤の範囲を第1.5図(4)に示す。

常時応力を算定する静的解析における境界条件は、モデル下端を固定境界、側方を鉛直ローラー境界とする。また、動的解析における境界条件は、モデル下端を粘性境界、側方をエネルギー伝達境界とする。境界条件を第1.6図に示す。

c. 解析用物性値

解析用物性値は、地盤調査結果に基づき設定する。解析用物性値を第1.1表(1)及び第1.1表(2)に示す。また、地盤強度のばらつき（平均値-1.0×標準偏差（ σ ））を考慮した検討も実施する。改良地盤については、試験施工に基づいた各種試験から強度を設定している。

d. 解析用地下水位

解析用地下水位は、保守的な評価となるよう地表面に設定する。

e. 入力地震動

入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動を第1.5図(1)から第1.5図(3)に示す解析モデルの下端に入力する。なお、応答スペクトル手法に基づく基準地震動 (Ss-D) 及び震源を特定せず策定する地震動による基準地震動 (Ss-6) については水平地震動及び鉛直地震動の位相反転を考慮する。

1.2 評価内容

(1) 基礎地盤のすべり

すべり安全率は、想定すべり線上のせん断抵抗力の和を想定すべり線上のせん断力の和で除して求め、すべり安全率が1.5を上回ることを確認する。想定すべり線は対象施設の基礎底面を通り、地表面へ立ち上がる連続したすべり線とする。地表面へ立ち上がるすべり線は局所安全率、応力状態及び受働崩壊角を踏まえて設定する。

すべり安全率算定に用いる地盤強度は、せん断強度に達した要素では残留強度を用いる。また、引張破壊が生じる要素ではすべり線の垂直応力が圧縮の場合は残留強度、引張の場合は強度をゼロとしてすべり安全率を算定する。

さらに、最小すべり安全率を示すケースについて、地盤強度のばらつきを考慮した評価を行う。

(2) 基礎地盤の支持力

地震時における基礎底面の接地圧が評価基準値（支持力）を下回ることを確認する。

(3) 基礎底面の傾斜

地震時における基礎底面の傾斜が評価の目安である1/2,000を下回ることを確認する。

1.3 評価結果

(1) 基礎地盤のすべり

想定すべり線におけるすべり安全率を第1.2表(1)から第1.2表(3)に示す。

原子炉建物及び原子炉附属建物の最小すべり安全率は2.0、最小すべり安全率を示すケースについて、地盤強度のばらつきを考慮した場合は1.8であり、いずれも評価基準値1.5を上回ることから、基礎地盤はすべりに対して十分な安定性を有している。

主冷却機建物の最小すべり安全率は2.1、最小すべり安全率を示すケースについて、地盤強度のばらつきを考慮した場合は1.7であり、いずれも評価基準値1.5を上回ることから、基礎地盤はすべりに対して十分な安定性を有している。

(2) 基礎地盤の支持力

評価基準値は、対象施設の基礎地盤（東茨城層群Is-S₁、M1段丘堆積物Mu-S₂）における平板載荷試験の最大荷重から設定し、原子炉建物及び原子炉附属建物で2.94N/mm²、主冷却機建物で2.69N/mm²とする。地震時における基礎底面の接地圧は、原子炉建物及び原子炉附属建物で最大1.14N/mm²、主冷却機建物で最大0.62N/mm²であり、評価基準値を下回ることから、基礎地盤は十分な支持性能を有している。

(3) 基礎底面の傾斜

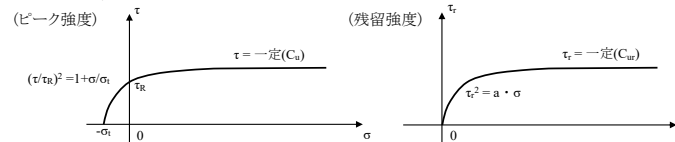
基礎底面両端の鉛直方向の相対変位・傾斜を第1.3表に示す。基礎底面の最大傾斜は、原子炉建物及び原子炉附属建物で1/2,370、主冷却機建物で1/7,600であり、評価の目安である1/2,000を下回ることから、施設の安全機能に支障を与えるものではない。

第 1.1 表(1) 解析用物性値

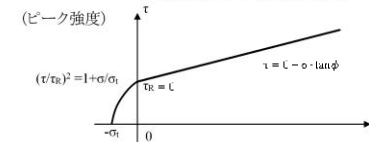
地層名	地質記号	物理特性		強度特性		強度特性(地盤物性のばらつきを考慮)				
		湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	ピーク強度		残留強度 τ_r (N/mm ²)	ピーク強度		残留強度 τ_r (N/mm ²)		
			粘着力 C (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)		粘着力 C (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)			
埋戻土	B	1.90	0.008	34.9	$\tau_r = 0.008 + \sigma \cdot \tan 34.2^\circ$	0.000	34.0	$\tau_r = \sigma \cdot \tan 34.0^\circ$		
M1段丘堆積物	Lm	1.35	0.042	19.7	$\tau_r^2 = 0.052 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.066$ N/mm ²) $\tau_r = 0.040 + \sigma \cdot \tan 15.8^\circ$ ($\sigma \geq 0.066$ N/mm ²)	0.031	19.7	$\tau_r^2 = 0.033 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.056$ N/mm ²) $\tau_r = 0.027 + \sigma \cdot \tan 15.8^\circ$ ($\sigma \geq 0.056$ N/mm ²)		
	Mu-S ₁	1.86	0.021	37.0	$\tau_r^2 = 0.068 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.004$ N/mm ²) $\tau_r = 0.014 + \sigma \cdot \tan 33.0^\circ$ ($\sigma \geq 0.004$ N/mm ²)	0.002	37.0	$\tau_r = \sigma \cdot \tan 32.9^\circ$		
	Mu-C	1.72	0.227	16.6	$\tau_r^2 = 0.227 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.196$ N/mm ²) $\tau_r = 0.179 + \sigma \cdot \tan 9.3^\circ$ ($\sigma \geq 0.196$ N/mm ²)	0.178	16.6	$\tau_r^2 = 0.169 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.170$ N/mm ²) $\tau_r = 0.142 + \sigma \cdot \tan 9.3^\circ$ ($\sigma \geq 0.170$ N/mm ²)		
	Mu-S	1.87	0.060	36.0	$\tau_r^2 = 0.124 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.003$ N/mm ²) $\tau_r = 0.018 + \sigma \cdot \tan 35.5^\circ$ ($\sigma \geq 0.003$ N/mm ²)	0.034	36.0	$\tau_r = \sigma \cdot \tan 34.8^\circ$		
	Mu-S ₂	1.86	0.040	38.4	$\tau_r = \sigma \cdot \tan 38.0^\circ$	0.001	38.4	$\tau_r = \sigma \cdot \tan 36.0^\circ$		
東茨城層群	Mm-Sg	2.23	0.086	40.0	$\tau_r = 0.003 + \sigma \cdot \tan 40.1^\circ$	0.007	40.0	$\tau_r = \sigma \cdot \tan 38.8^\circ$		
	Is-S ₁	1.83	0.399	27.7	$\tau_r^2 = 0.660 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.228$ N/mm ²) $\tau_r = 0.268 + \sigma \cdot \tan 27.7^\circ$ ($\sigma \geq 0.228$ N/mm ²)	0.322	27.7	$\tau_r^2 = 0.455 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.149$ N/mm ²) $\tau_r = 0.182 + \sigma \cdot \tan 27.7^\circ$ ($\sigma \geq 0.149$ N/mm ²)		
	Is-C	1.85	0.543	0.0	$\tau_r^2 = 0.409 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.527$ N/mm ²) $\tau_r = 0.464$ ($\sigma \geq 0.527$ N/mm ²)	0.450	0.0	$\tau_r^2 = 0.297 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.460$ N/mm ²) $\tau_r = 0.370$ ($\sigma \geq 0.460$ N/mm ²)		
	Is-S ₂ U	1.82	0.725	12.4	$\tau_r^2 = 1.01 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.787$ N/mm ²) $\tau_r = 0.719 + \sigma \cdot \tan 12.4^\circ$ ($\sigma \geq 0.787$ N/mm ²)	0.521	12.4	$\tau_r^2 = 0.670 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.646$ N/mm ²) $\tau_r = 0.516 + \sigma \cdot \tan 12.4^\circ$ ($\sigma \geq 0.646$ N/mm ²)		
	Is-Sc	1.78	0.559	10.0	$\tau_r^2 = 0.664 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.658$ N/mm ²) $\tau_r = 0.559 + \sigma \cdot \tan 8.8^\circ$ ($\sigma \geq 0.658$ N/mm ²)	0.424	10.0	$\tau_r^2 = 0.446 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.613$ N/mm ²) $\tau_r = 0.428 + \sigma \cdot \tan 8.8^\circ$ ($\sigma \geq 0.613$ N/mm ²)		
	Is-S ₂ L	1.91	0.631	20.0	$\tau_r^2 = 1.02 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.793$ N/mm ²) $\tau_r = 0.611 + \sigma \cdot \tan 20.0^\circ$ ($\sigma \geq 0.793$ N/mm ²)	0.413	20.0	$\tau_r^2 = 0.621 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.627$ N/mm ²) $\tau_r = 0.396 + \sigma \cdot \tan 20.0^\circ$ ($\sigma \geq 0.627$ N/mm ²)		
	Is-Sg	1.91	0.631	20.0	$\tau_r^2 = 1.02 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.793$ N/mm ²) $\tau_r = 0.611 + \sigma \cdot \tan 20.0^\circ$ ($\sigma \geq 0.793$ N/mm ²)	0.413	20.0	$\tau_r^2 = 0.621 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.627$ N/mm ²) $\tau_r = 0.396 + \sigma \cdot \tan 20.0^\circ$ ($\sigma \geq 0.627$ N/mm ²)		
	Is-S ₃	1.94	0.888	16.9	$\tau_r^2 = 1.27 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.812$ N/mm ²) $\tau_r = 0.768 + \sigma \cdot \tan 16.9^\circ$ ($\sigma \geq 0.812$ N/mm ²)	0.701	16.9	$\tau_r^2 = 0.939 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.686$ N/mm ²) $\tau_r = 0.594 + \sigma \cdot \tan 16.9^\circ$ ($\sigma \geq 0.686$ N/mm ²)		
久米層	Km	1.78	Cu=0.660-0.00440·Z $\sigma_i = 0.160$ $\tau_R = 0.359$		Cur=0.295-0.00495·Z a=0.208-0.00417·Z		Cu=0.588-0.00440·Z $\sigma_i = 0.120$ $\tau_R = 0.314$		Cur=0.196-0.00495·Z a=0.098-0.00417·Z	
	Ks	1.81								
多賀層群	Tg	1.86	-	-	-	-	-	-	-	
改良地盤	I	2.05	$\tau = 1.12 + \sigma \cdot \tan 21.0^\circ$ $\sigma_i = 0.300$ $\tau_R = 1.12$		$\tau_r^2 = 1.10 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.314$ N/mm ²) $\tau_r = 0.468 + \sigma \cdot \tan 21.0^\circ$ ($\sigma \geq 0.314$ N/mm ²)		$\tau = 1.09 + \sigma \cdot \tan 21.0^\circ$ $\sigma_i = 0.300$ $\tau_R = 1.09$		$\tau_r^2 = 1.05 \cdot \sigma$ ($\sigma < 0.302$ N/mm ²) $\tau_r = 0.448 + \sigma \cdot \tan 21.0^\circ$ ($\sigma \geq 0.302$ N/mm ²)	

σ : 垂直応力 Z: 標高(m)

久米層(Km,Ks)の強度特性: 下図のとおり



改良地盤の強度特性: 下図のとおり

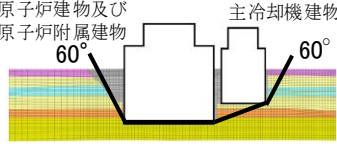
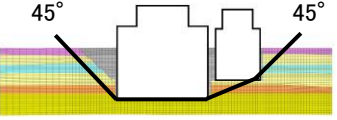
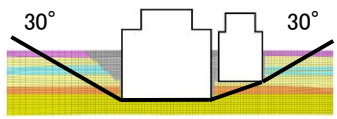
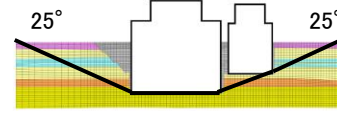


第 1.1 表(2) 解析用物性値

地層名	地質記号	変形特性				
		動的変形特性				静的変形特性
		初期動せん断 弾性係数 G_0 (N/mm ²)	動ポアソン比 ν_d	$G/G_0 \sim \gamma$ (%)	h (%) $\sim \gamma$ (%)	静弾性係数 E_{s0} (N/mm ²)
埋戻土	B	733-19.8・Z	0.35	$1/(1+15.3 \gamma^{0.935})$	$22.5 \gamma / (\gamma + 0.0734) + 0.171$	25.3
M1段丘 堆積物	Lm	71.4	0.43	$1/(1+4.56 \gamma^{0.711})$	$8.80 \gamma / (\gamma + 0.0579) + 1.70$	9.38
	Mu-S ₁	179	0.42	$1/(1+13.6 \gamma^{0.873})$	$20.7 \gamma / (\gamma + 0.0758) + 0.180$	45.0
	Mu-C	155	0.45	$1/(1+4.34 \gamma^{0.791})$	$10.1 \gamma / (\gamma + 0.148) + 1.82$	136
	Mu-S	191	0.46	$1/(1+6.20 \gamma^{0.830})$	$20.4 \gamma / (\gamma + 0.141) + 0.004$	59.9
	Mu-S ₂	328	0.30	$1/(1+6.86 \gamma^{0.827})$	$22.8 \gamma / (\gamma + 0.130) + 0.472$	80.6
東茨城層群	Mm-Sg	626	0.34	$1/(1+6.69 \gamma^{0.801})$	$13.2 \gamma / (\gamma + 0.0512) + 1.72$	188
	Is-S ₁	323	0.47	$1/(1+5.08 \gamma^{0.817})$	$23.7 \gamma / (\gamma + 0.203) + 0.374$	55.9
	Is-C	267	0.47	$1/(1+5.21 \gamma^{0.913})$	$13.6 \gamma / (\gamma + 0.149) + 1.19$	279
	Is-S ₂ U	263	0.47	$1/(1+3.79 \gamma^{0.937})$	$24.0 \gamma / (\gamma + 0.501) + 0.892$	109
	Is-Sc	299	0.47	$1/(1+3.73 \gamma^{0.918})$	$17.4 \gamma / (\gamma + 0.277) + 0.877$	251
	Is-S ₂ L	370	0.46	$1/(1+5.30 \gamma^{1.04})$	$28.1 \gamma / (\gamma + 0.453) + 0.803$	162
	Is-Sg	370	0.46	$1/(1+5.30 \gamma^{1.04})$	$28.1 \gamma / (\gamma + 0.453) + 0.803$	162
	Is-S ₃	376	0.46	$1/(1+4.72 \gamma^{1.00})$	$29.6 \gamma / (\gamma + 0.517) + 0.740$	176
久米層	Km	463	0.45	$1/(1+2.32 \gamma^{1.04})$	$15.3 \gamma / (\gamma + 0.763) + 1.54$	327-2.74・Z
	Ks	588	0.44	$1/(1+3.09 \gamma^{0.986})$	$15.0 \gamma / (\gamma + 0.603) + 1.30$	
多賀層群	Tg	1190	0.41	$1/(1+1.75 \gamma^{0.925})$	$9.59 \gamma / (\gamma + 0.346) + 1.00$	1080
改良地盤	I	1090	0.41	$1/(1+3.44 \gamma^{0.998})$	$12.5 \gamma / (\gamma + 0.393) + 1.40$	1720

G: 動せん断弾性係数 γ : せん断ひずみ h: 減衰率 Z: 標高(m)

第 1.2 表 (1) すべり安全率 (A-A' 断面)

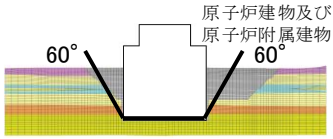
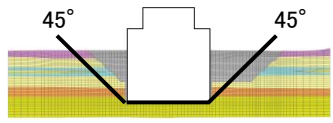
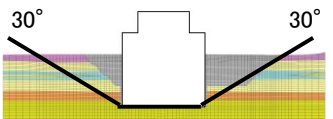
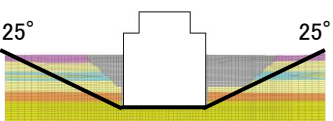
番号	想定すべり線形状	地震動※1	すべり安全率※3	
			基本モデル※2	地盤強度 ばらつき考慮
1		S s - D (+, -)	2.9 [46.62]	—
2		S s - D (+, -)	2.6 [46.63]	—
3		S s - D (+, -)	2.3 [46.63]	—
4		S s - D (+, -)	2.2 [46.63]	1.9 [46.63]

※1 (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、(+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転

※2 地盤強度を平均強度、解析用地下水位を地表面に設定したモデルを基本とする。

※3 [] は発生時刻 (秒)

第 1.2 表 (2) すべり安全率 (B-B' 断面)

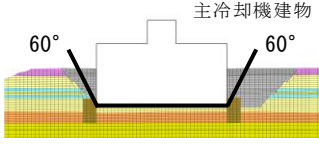
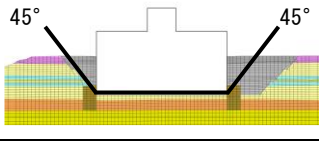
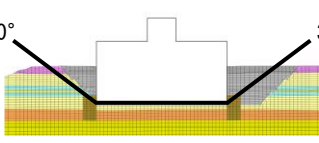
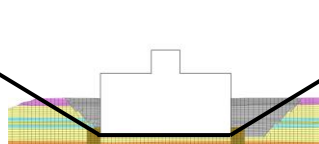
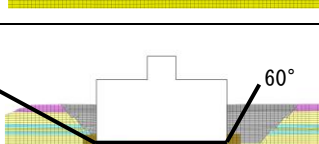
番号	想定すべり線形状	地震動※1	すべり安全率※3	
			基本モデル※2	地盤強度 ばらつき考慮
1	 <p>原子炉建物及び 原子炉附属建物</p>	S s - D (+, -)	3.6 [46.62]	-
2		S s - D (+, -)	2.8 [46.65]	-
3		S s - D (+, -)	2.2 [46.66]	-
4		S s - D (+, -)	2.0 [46.67]	1.8 [46.67]

※1 (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、(+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転

※2 地盤強度を平均強度、解析用地下水位を地表面に設定したモデルを基本とする。

※3 [] は発生時刻 (秒)

第 1.2 表 (3) すべり安全率 (C-C' 断面)

番号	想定すべり線形状	地震動 ^{※1}	すべり安全率 ^{※3}	
			基本モデル ^{※2}	地盤強度 ばらつき考慮
1		S s - 6 (-, -)	2.4 [14.53]	-
2		S s - D (+, -)	2.3 [46.64]	-
3		S s - D (+, -)	2.3 [46.64]	-
4-1		S s - D (+, -)	2.2 [46.64]	-
4-2		S s - D (+, -)	2.1 [46.63]	1.7 [46.63]

※1 (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、(+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転

※2 地盤強度を平均強度、解析用地下水位を地表面に設定したモデルを基本とする。

※3 [] は発生時刻 (秒)

第 1.3 表 基礎底面両端の鉛直方向の相対変位・傾斜

断面	施設名	地震動 ^{※1}	基礎底面両端の最大相対変位 ^{※2} ($ \delta_{v1} - \delta_{v2} $)	基礎底面両端の最大傾斜 ($ \delta_{v1} - \delta_{v2} /L$ ^{※3})
A - A'	原子炉建物 及び 原子炉附属建物	S s - D (+, +)	2.32cm [39.69]	1/2,370
	主冷却機建物	S s - 2 (+, +)	0.36cm [8.09]	1/7,600
B - B'	原子炉建物 及び 原子炉附属建物	S s - D (+, +)	1.39cm [39.66]	1/3,500
C - C'	主冷却機建物	S s - D (+, +)	0.84cm [22.88]	1/7,900

※1 (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、(+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転

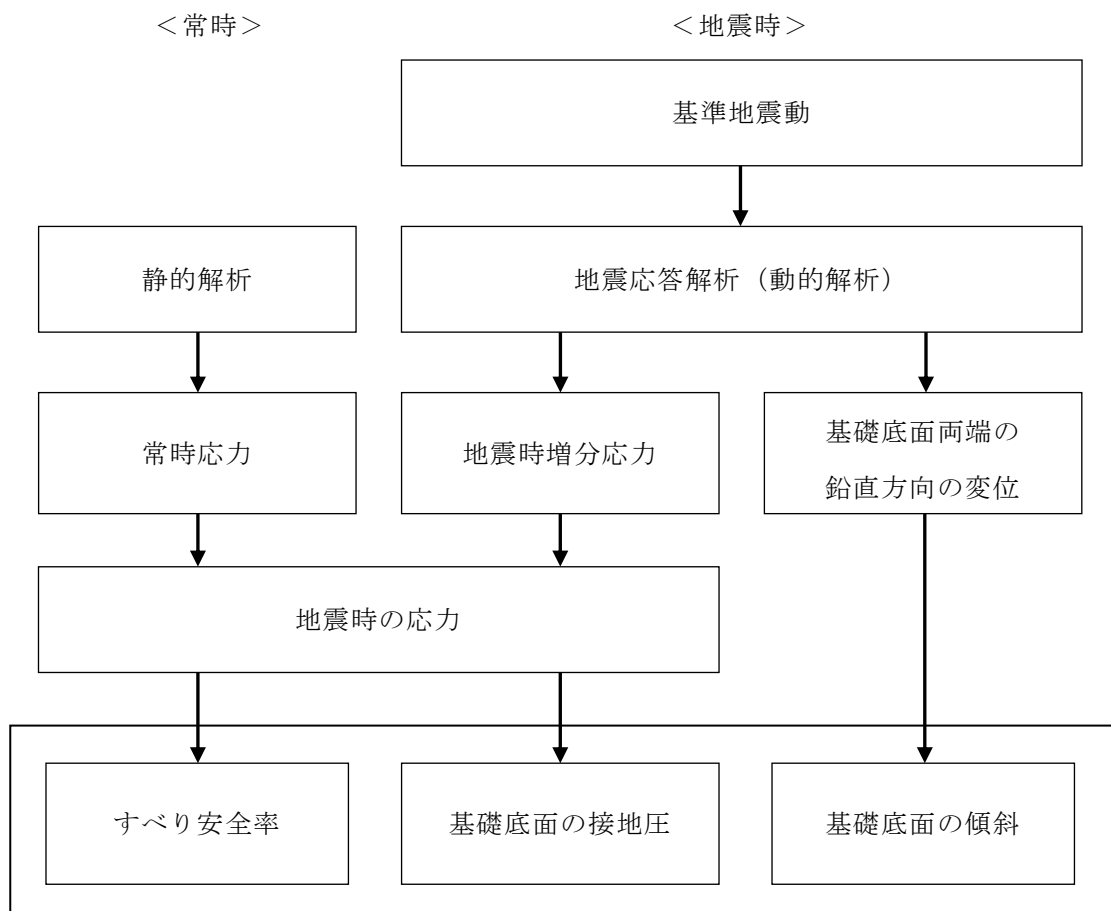
※2 [] は発生時刻 (秒)

※3 [A - A' 原子炉建物及び原子炉附属建物] L = 55.00 m、

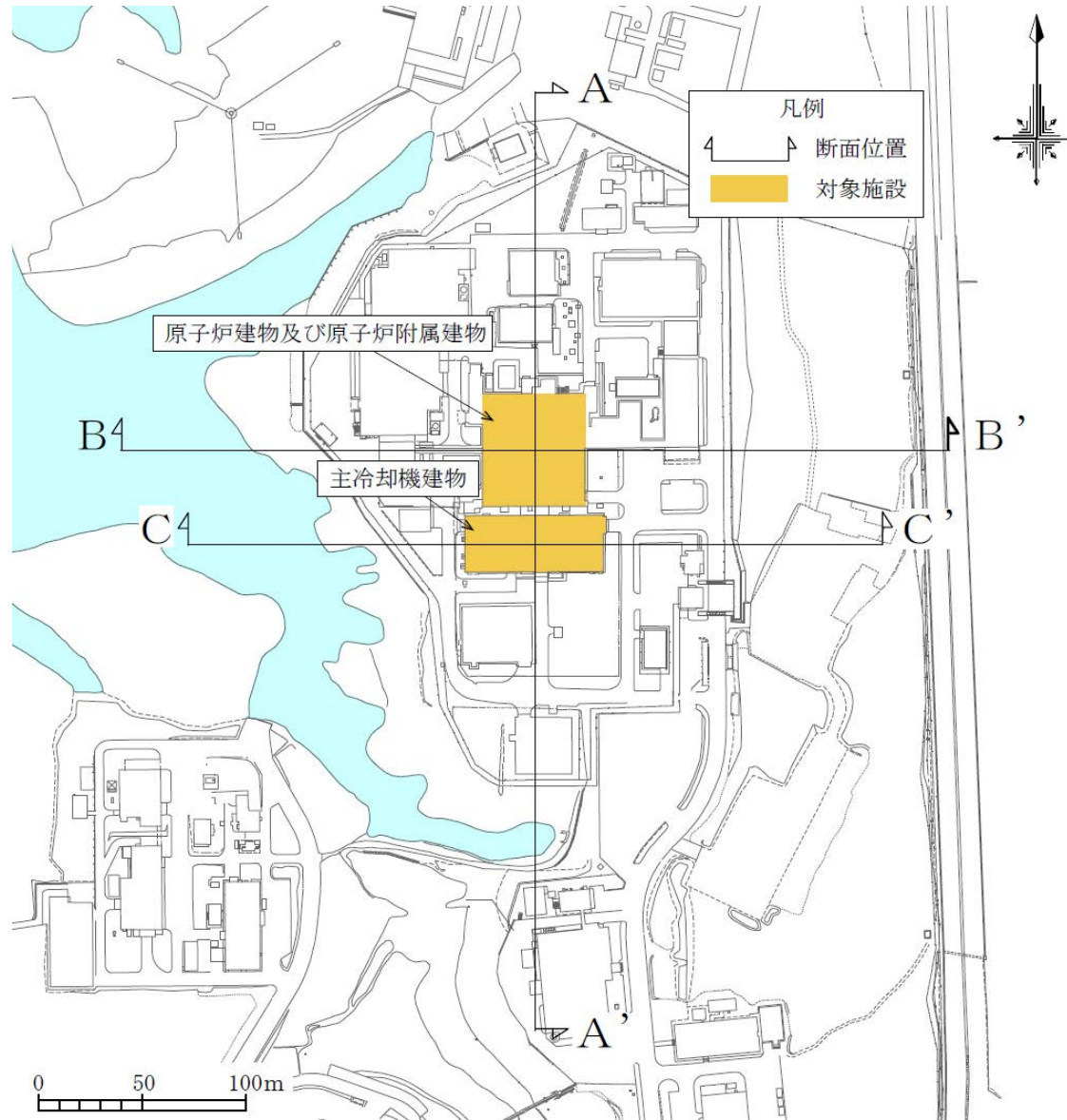
[A - A' 主冷却機建物] L = 27.40 m、

[B - B'] L = 50.00 m、

[C - C'] L = 67.00 m



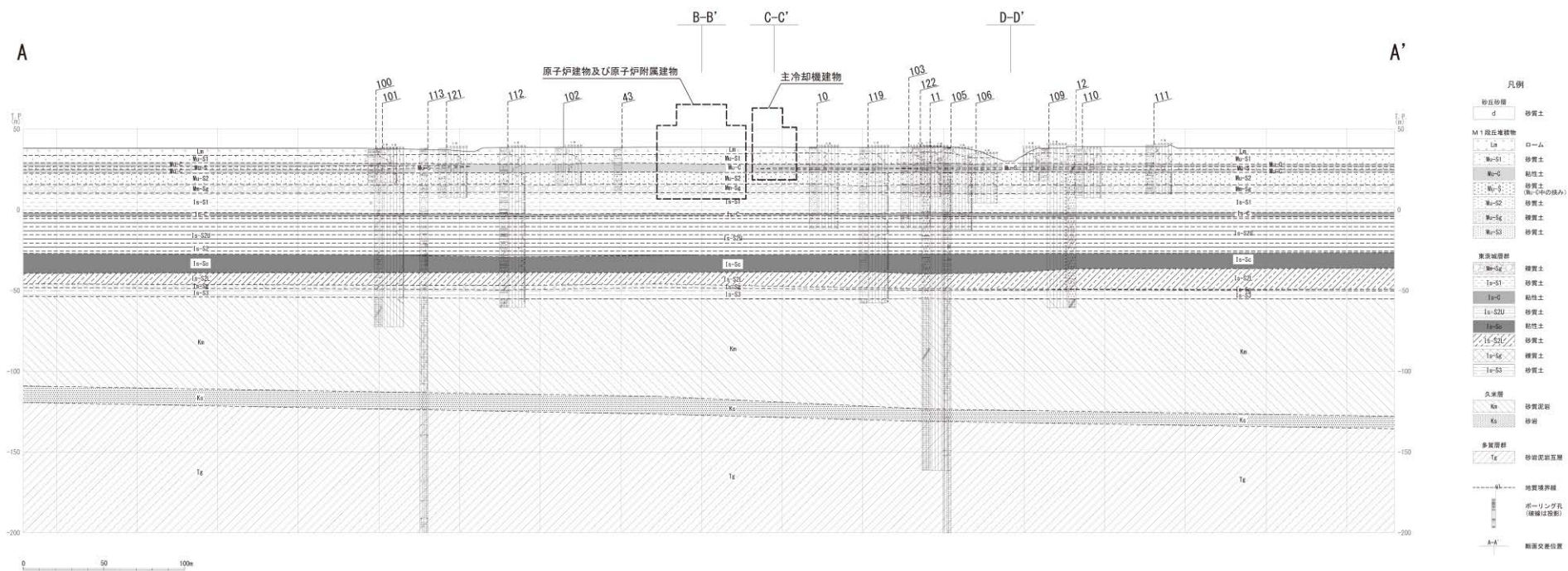
第 1.1 図 基礎地盤の安定性評価フロー



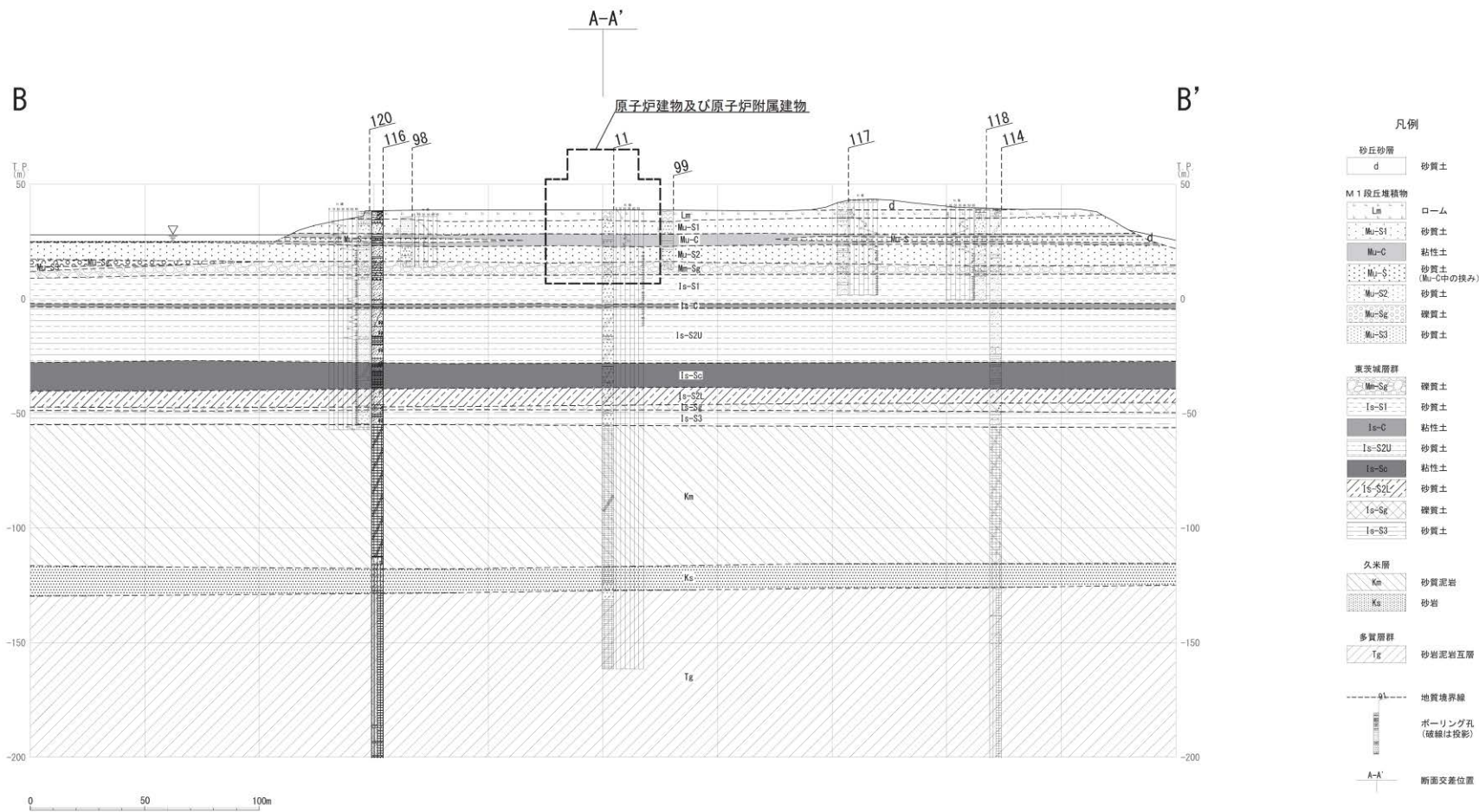
第 1.2 図 解析断面位置図



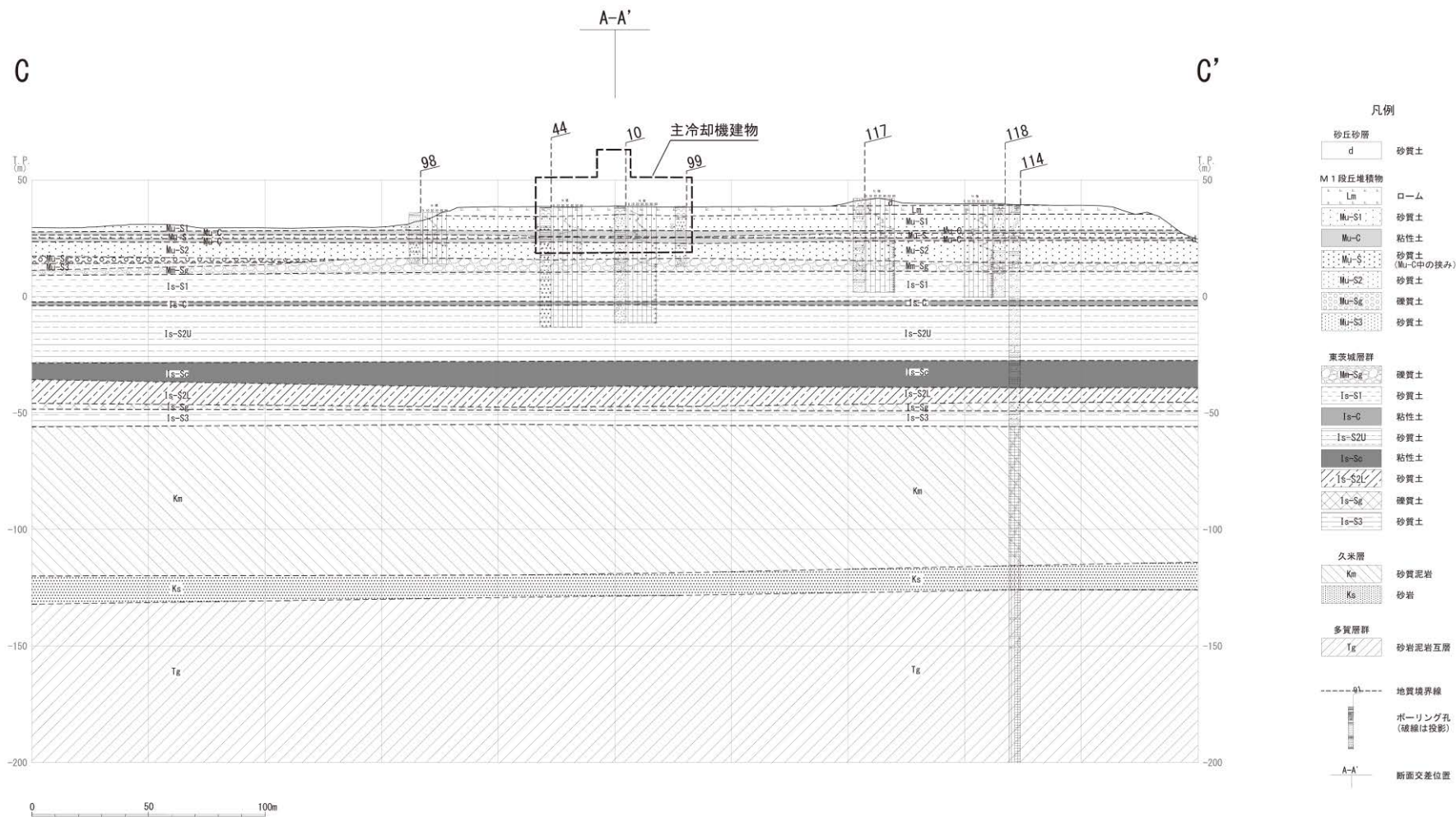
第 1.3 図 原子炉施設設置位置付近の水平地質断面図



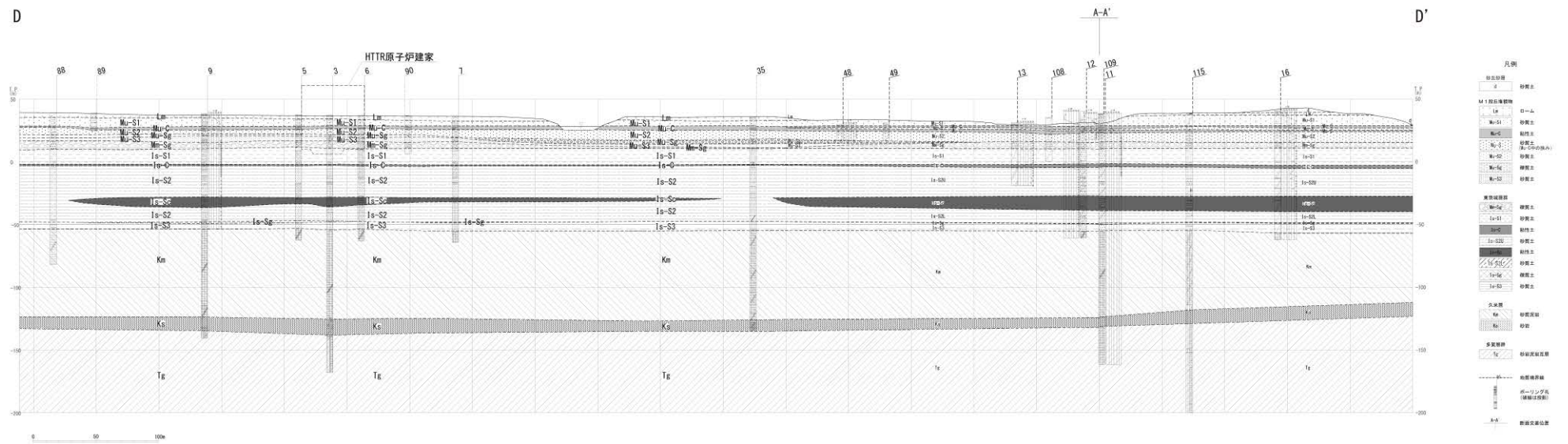
第 1.4 図(1) 原子炉施設設置位置付近の鉛直地質断面図及び地盤分類図 (A-A' 測線)



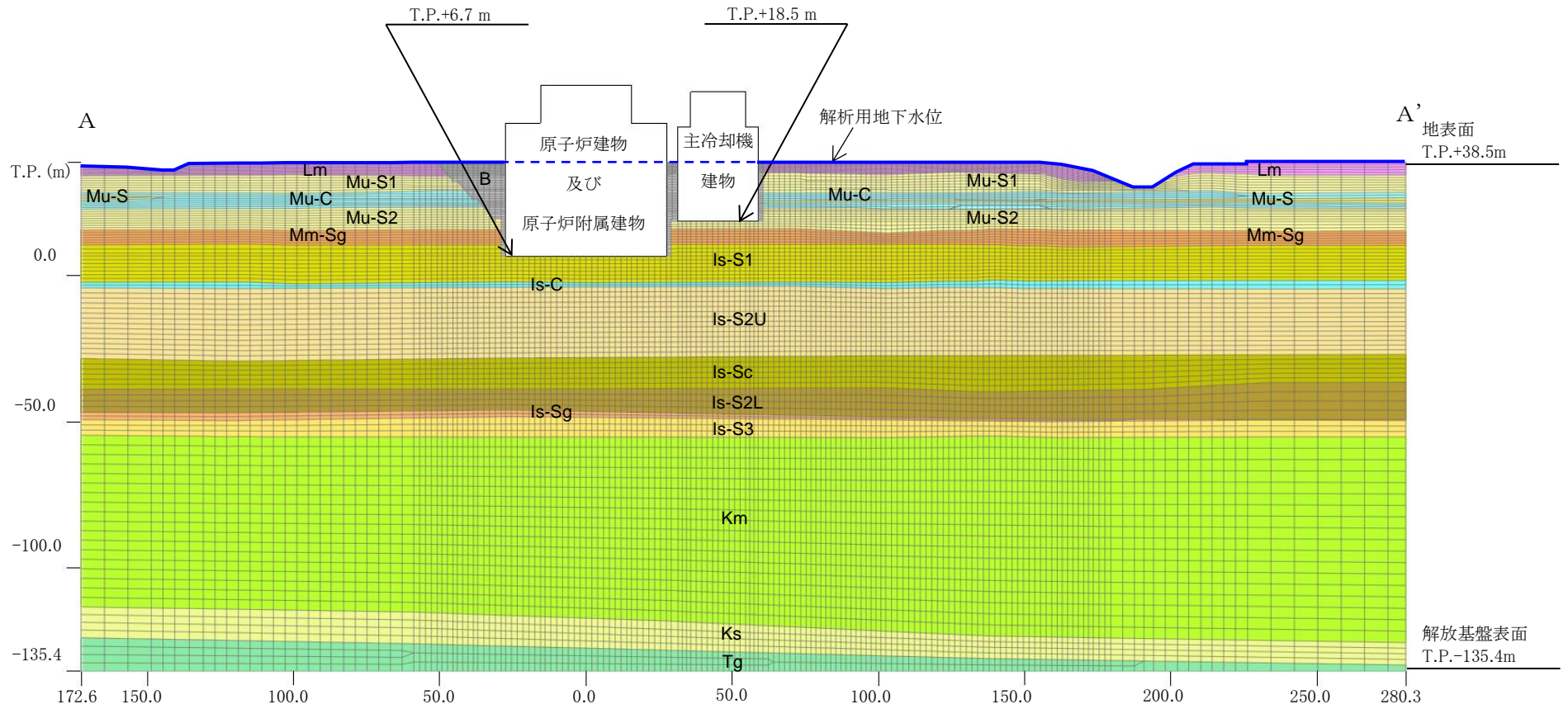
第 1.4 図(2) 原子炉施設設置位置付近の鉛直地質断面図及び地盤分類図 (B-B' 測線)



第 1.4 図(3) 原子炉施設設置位置付近の鉛直地質断面図及び地盤分類図 (C-C' 測線)

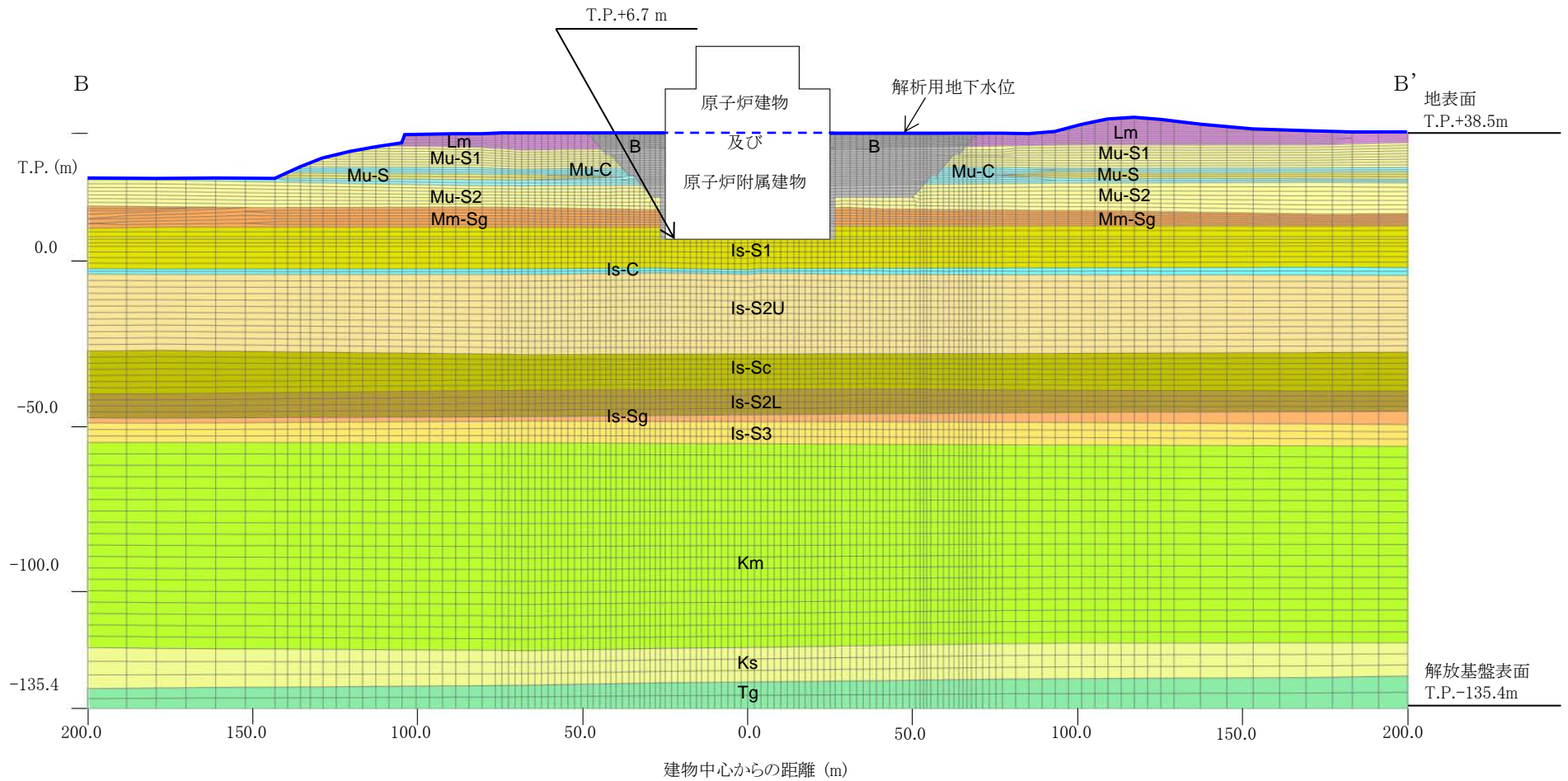


第 1.4 図(4) 原子炉施設設置位置付近の鉛直地質断面図及び地盤分類図 (D-D' 測線)

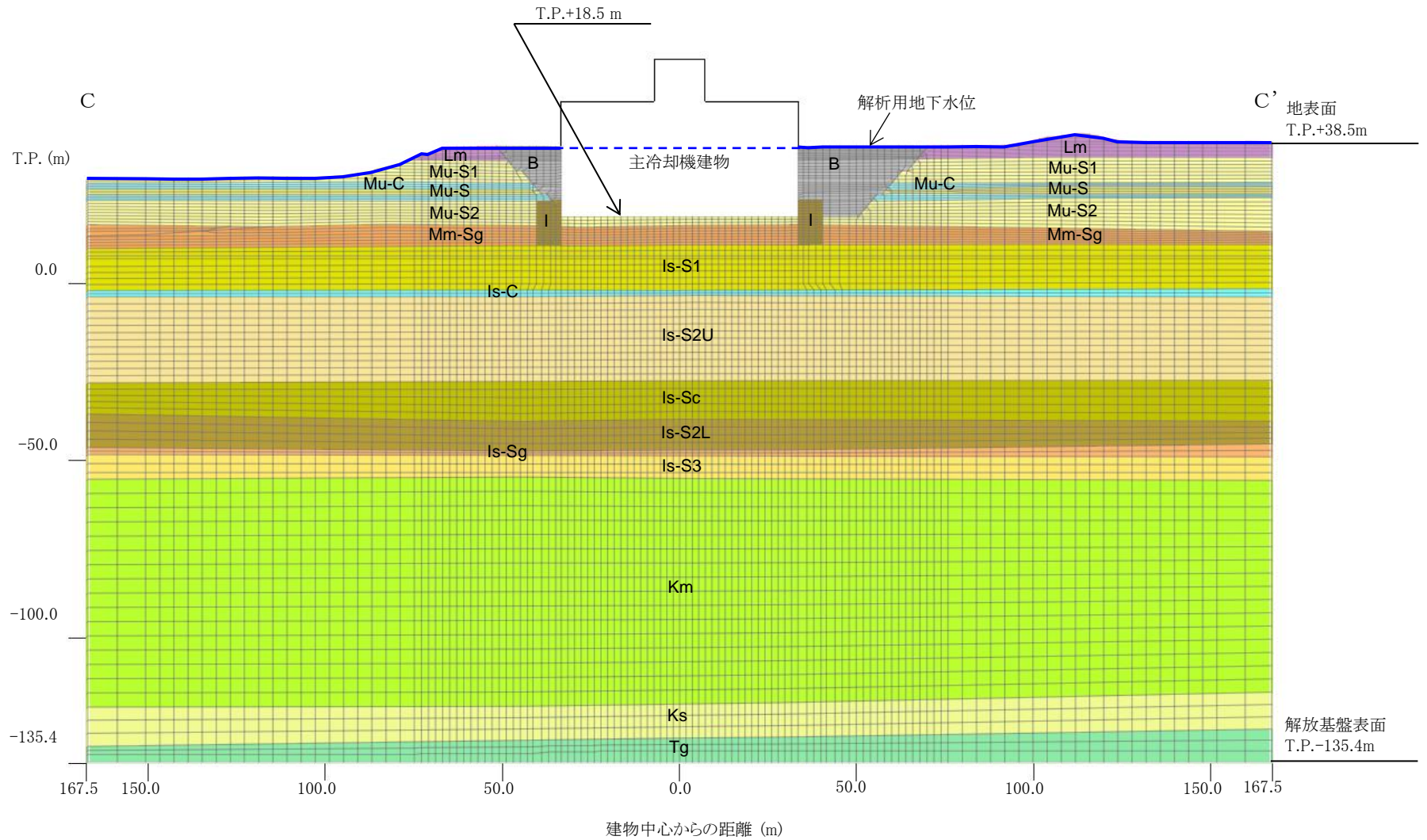


原子炉建物及び原子炉附属建物中心からの距離 (m)

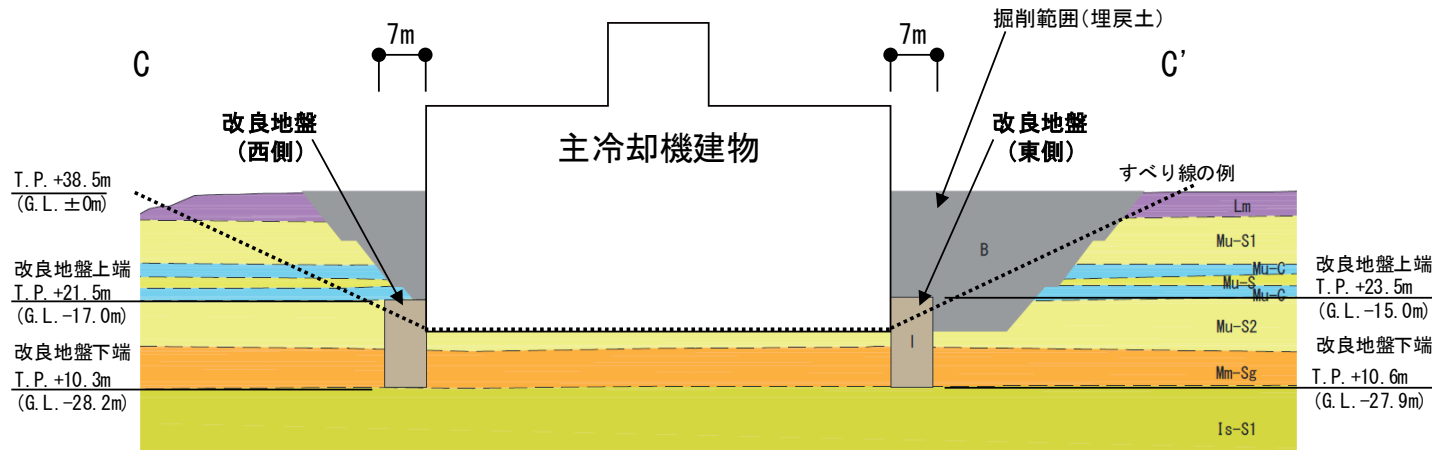
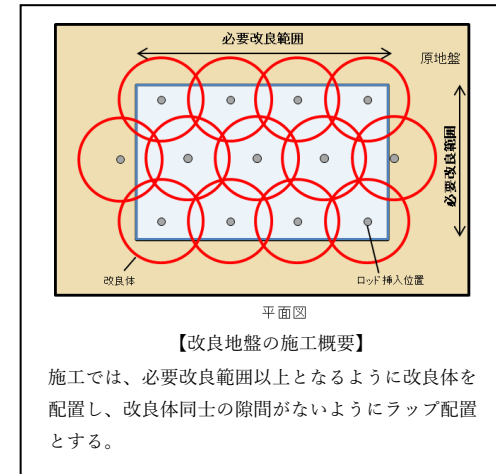
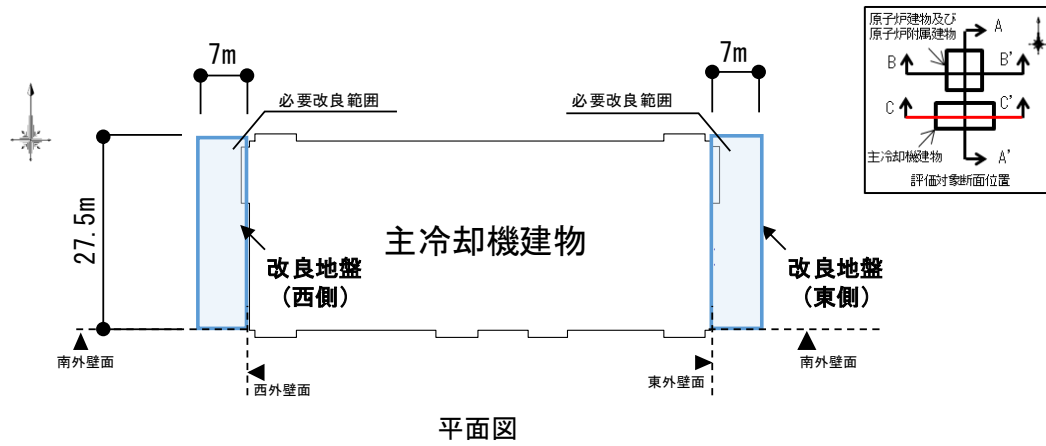
第1.5図(1) 解析モデル (A-A'断面)



第1.5図(2) 解析モデル (B-B'断面)

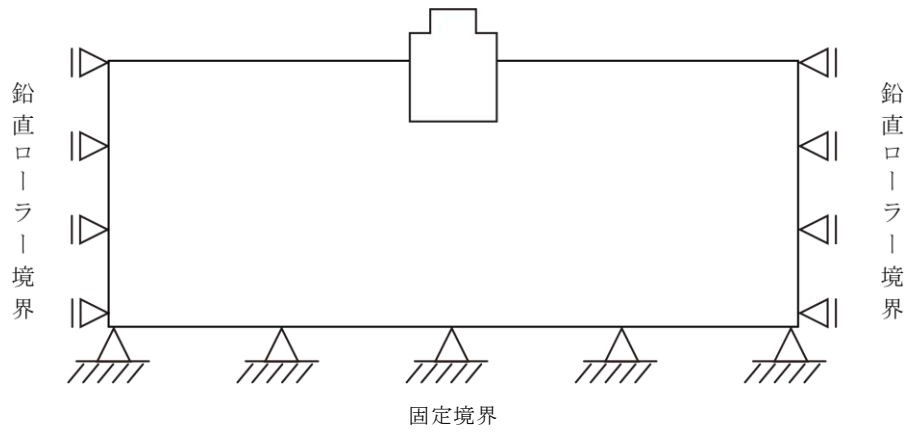


第 1.5 図(3) 解析モデル (C-C' 断面)

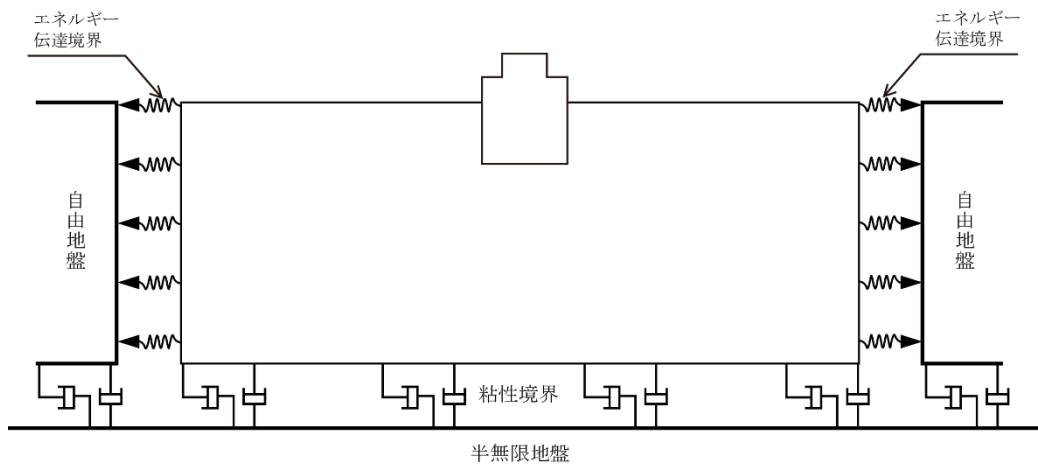


断面図 (東西(C-C')断面)

第 1.5 図(4) 改良地盤の範囲



(a) 静的解析



(b) 動的解析

第 1.6 図 境界条件