

資料の修正点

No.	pp.	修正点
1	3	将来的な土地の改変の可能性について追記した。
2	4	建屋周辺以外の地下水位観測結果とその傾向を記載。
3	5,6	液状化判定の検討対象層を田名部層としていたが、これに加えて砂子又層も対象層として修文した。また砂子又層の物性値を追記。
4	8,9	田名部層の試験方法に加えて砂子又層の試験方法を追記するとともに、算定したせん断応力比 R の値を記載。
5	10	水平動 2 方向と鉛直動同時入力の液状化判定結果に砂子又層の結果を追記。
6	11	前回ヒアリングで参考資料としていた室内試験結果を【別添1】として資料に追加。
7	12	室内試験に用いた供試体の採取位置に関する記載を【別添2】として資料に追加。
8	13	砂子又層の供試体代表性に関する記載を追加

液状化評価の手順について

1. 液状化の検討手法の流れ(設2-補-013-02 「6.3 液状化検討手法について」*P34 参照)

液状化検討は、乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程(以下、「JEAC4616-2009」という。)に示される方法に基づくFL値による判定(=繰返しせん断応力比(R)/地震時せん断応力比(L))を用いている。

※ 設2-補-013-02 サイクル燃料備蓄センター 設計及び工事の計画の変更認可申請書(補足説明資料) 使用済燃料貯蔵建屋の耐震性

その流れは、図1のとおりである。

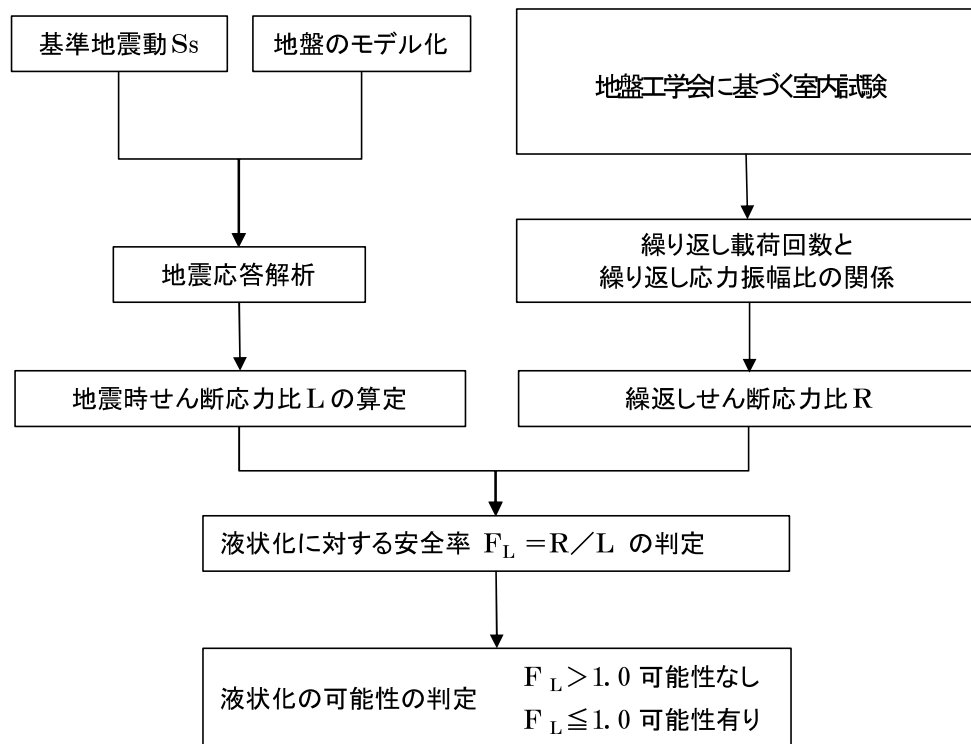


図1 液状化判定の流れ

上記のように、基準地震動による地盤の地震応答解析結果から求まる「地震時せん断応力比(L)」と室内試験結果から求まる「繰返しせん断応力比(R)」を用いて求めた液状化に対する下式の安全率(F_L)によって判定する。

$$F_L = R/L$$

以下手順に従って、それぞれの項目の詳細を記載する。

2. 地下水位の設定と液状化判定対象層の選定(設2-補-013-02 「6.3 液状化検討手法について」※P33～P35 およびコメント回答(管理 No.0209-58,59)参照)

(1) 地下水位の設定

液状化判定には、地下水位の設定が必要となるが、この値は地下水位の観測記録(2016.4.1～2021.3.31)に基づき T.P.14.0m(地表面下 2.0m)としている。観測位置とその記録は図2及び図3に示すとおりであり、貯蔵建屋東側の3-E 孔の値を参考にして保守的に設定している。

なお、将来計画として貯蔵建屋西側に建屋の増設を計画しているが、その際に増設予定地(T.P.16m～25m)の地盤の整地を行うことが考えられるが、敷地の水下側であることから水位に大きな影響を与えることはないと考えられる。

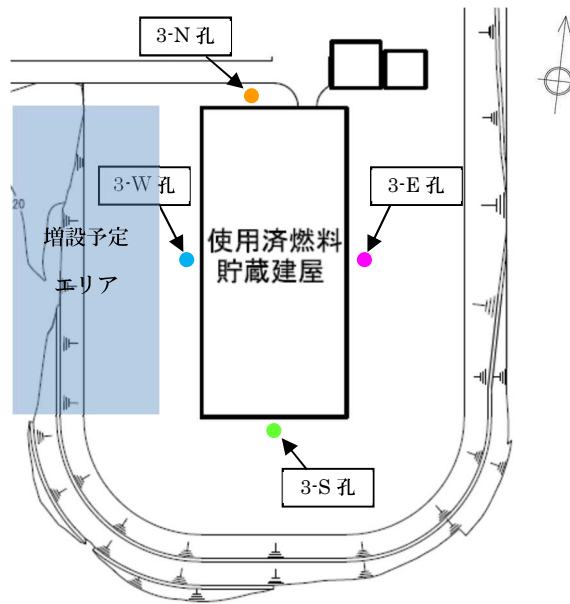


図2 建屋周辺地下水位観測位置

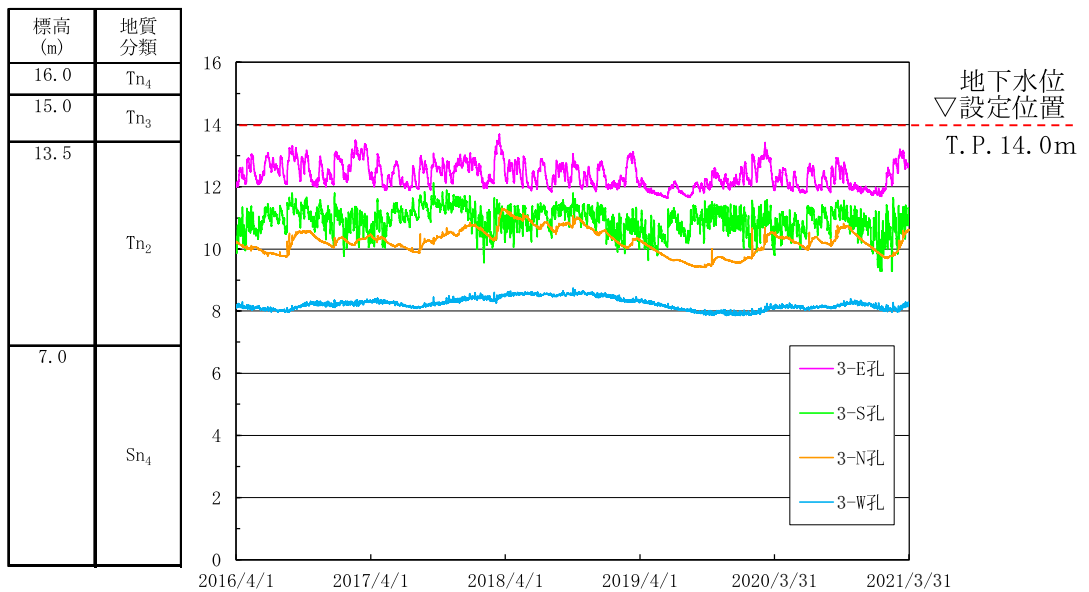


図3 地下水位の観測結果(2016.4.1～2021.3.31)

なお、敷地では上記の建屋周辺の地下水位の観測の他に図4に示す位置でも地下水位の観測を実施して

いる。その結果を図5に示す。

貯蔵建屋東側法尻の 1-N-2 孔の水位は概ね地表面下 4m 程度で安定しており、建屋東側 2-N-2 孔の水位は概ね地表面下 8m で安定している。水位の傾向は、建屋周辺の水位観測記録の傾向と整合して、敷地東側から西側にかけて水位が低下していることがわかる。

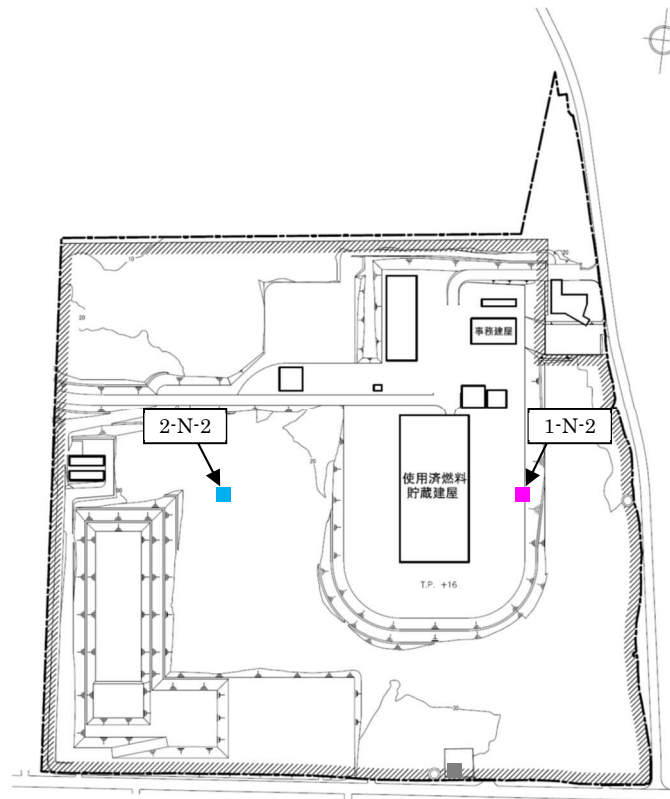


図4 敷地内地下水位観測位置

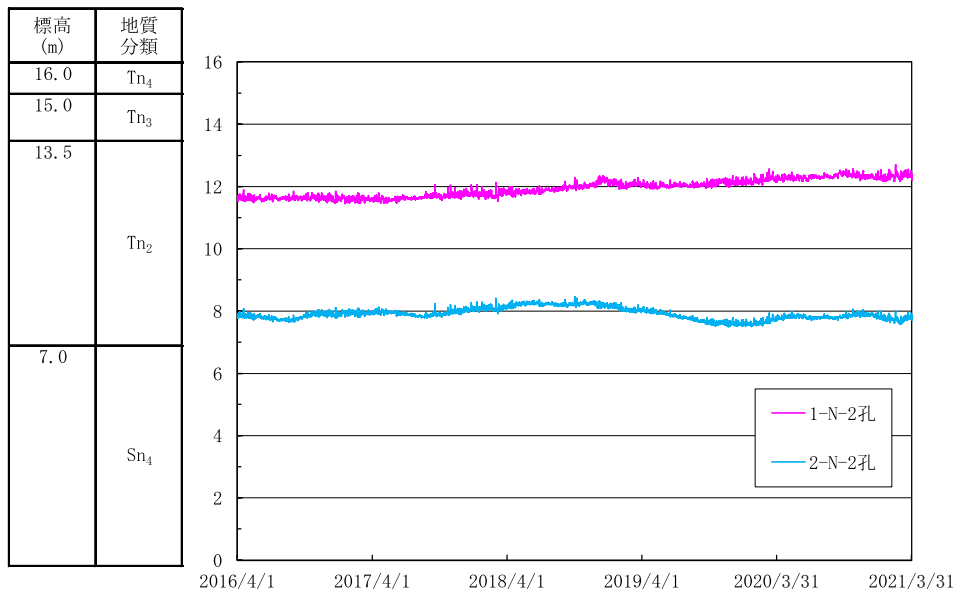


図5 地下水位の観測結果(2016.4.1～2021.3.31)

(2) 液状化判定対象層の選定

液状化対象層の選定にあたっては、液状化判定については、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」の「第4章 4.5節 地盤の液状化 1.液状化判定」の項に、以下の記載を踏まえて対象層を決定している。※

※ 設2-補-013-02 「6.3 液状化検討手法について」P33 およびコメント回答(管理表 No.0209-58)参照

液状化の判定を行う必要がある飽和土層は、一般に地表面から 20m程度以浅の沖積層で、考慮すべき土の種類は、細粒分含有率が 35%以下の土とする。ただし、埋立地盤等の造成地盤で地表面から 20m程度以深まで連続している場合には、造成地盤の下端まで以下の(2)の手順※などにより液状化判定を行う必要がある。また、埋立地盤等の造成地盤では、細粒分含有率が 35%以上の低塑性シルト、液性限界に近い含水比を持ったシルトなどが液状化した事例も報告されているので、粘土分(0.05mm 未満の粒径を持つ土粒子)含有率が 10%以下、または塑性指数が 15%以下の埋立あるいは盛土地盤については液状化の検討を行う。ただし、20m以深に関しては、(2)の液状化危険度予測の精度が悪くなるので、地盤応答解析を用いることが推奨される。また、細粒分を含む礫や透水性の低い土層に囲まれた礫、洪積層でもN値が小さな土層では液状化の可能性が否定できないので、そのような場合にも液状化の検討を行う。

※ 「(2)の手順」とは液状化危険度予測

日本建築学会「建築基礎構造設計指針」の記載から、液状化判定を行う層の条件は以下のとおりである。

- (1) 地表面から 20m程度以浅の沖積層で、細粒分含有率が 35%以下の土(飽和土層)
- (2) 埋立地盤等の造成地盤で地表面から 20m程度以深まで連続している場合には、造成地盤の下端まで以下の(2)の手順などにより液状化判定を行う必要がある。
- (3) 粘土分(0.05mm 未満の粒径を持つ土粒子)含有率が 10%以下、または塑性指数が 15%以下の埋立あるいは盛土地盤

上記の 3つの条件と貯蔵建屋設置位置直下地盤との関係は以下のとおりである。

(1)の条件

貯蔵建屋設置位置直下地盤は田名部層および砂子又層からなり、建屋を支持する基礎杭の先端は根入れ部先端で T.P.-21.5m(地表面標高は T.P.16.0m)であることから、考慮の対象となるのは、田名部層および砂子又層となるが、地下水位以浅の田名部層は検討対象層から除外し、地下水位以深の田名部層(Tn₂層)を液状化判定対象層としている。

砂子又層上部軽石混じり砂岩(Sn₄層)は、土ではなく岩に分類されていることから、日本建築学会の基礎構造設計基準の考え方に従えば液状化検討対象層とはならないが、田名部層と同様の手順で FL 値の算定を行うこととした。(判定結果については後述)

(2)の条件

貯蔵建屋の設置されている地盤は自然地盤(地山)であり、「埋立地盤等の造成地盤」に当たらないことから、この条件で液状化対象層となることはない。

(3)の条件

貯蔵建屋の設置されている地盤のうち、田名部層および砂子又層については自然地盤であり、「埋立あるいは盛土地盤」に当たらないことから、いずれもこの条件で液状化対象層となることはない。

参考として、表1に田名部層および砂子又層の細粒分含有率、粘土分含有率及び塑性指数を示す。

田名部層(Tn₂層)については、粘土分含有率および塑性指数の条件のいずれも(3)の条件に該当せず、砂子層(Sn₄層)については粘土分含有率が(3)の条件である10%を下回る値を示し、塑性指数について数値が得られていない。

表1 田名部層および砂子又層の細粒分含有率、粘土分含有率及び塑性指数

地層分類		層厚 m	細粒分 含有率 %	粘土分 含有率 %	塑性指数 %
Tn ₄	田名部層中部砂質土	1.0	33.8	5.5	22.9
Tn ₃	田名部層中部粘性土	1.5	55.3	19.6	8.5
Tn ₂	田名部層下部砂質土	6.5	13.5	4.4	49.4
Sn ₄	砂子又層上部 軽石混じり砂岩	46.5	16.9~29.0	3.8~7.0	—

地下水位
▽ 設定位置
T.P.14.0m

以上の3つの条件より、液状化検討対象層は田名部層下部砂質土(Tn₂層)とするが、田名部層の低位砂子層(Sn₄層)についてもFL値の算出を行うこととした。(判定結果については後述)

下表に建屋直下地盤の概要を示す。

No.	地層名	地盤分類		上端深度 T.P.(m)	層厚 (m)
1	田名部層	Tn ₄	田名部層中部 砂質土	16.0	1.0
2		Tn ₃	田名部層中部 粘性土	15.0	1.5
3		Tn ₂	田名部層下部 砂質土	13.5	6.5
4	砂子又層	Sn ₄	砂子又層上部 軽石混じり砂岩	7.0	46.5

地下水位
▽ 設定位置
T.P.14.0m

FL値算定
対象層

図6 建屋直下地盤の概要

3. 地震時せん断応力比 L の算定

地震時せん断応力比 L は、地盤の地震応答解析から求まるせん断応力度 τ と土被り圧の比として算定される。その詳細は以下のとおりである。

(1) 地震時せん断応力度の算定

地震時せん断応力度 τ の算定は、基準地震動を解放基盤表面に入力した地盤の地震応答解析から求めており、モデルは「添付 5-1-2 地盤の支持性能に係る基本方針」の表 3-1 解析用物性値及びその設定根拠に示す地盤モデルを用いている。検討に用いるせん断応力度は、検討対象の深度におけるせん断応力度を採用することとしている。

(2) 有効上載圧(土被り圧)の算定

有効上載圧の算定は、当該深さより上部の土の重量により算定するが、水による浮力を考慮して下式にて算定する。

$$\sigma'_z = (\gamma_s - \gamma_w)H$$

ここに

- σ'_z : 有効土被り圧
- γ_s : 土の密度(地盤の地震応答解析モデルで採用している密度)
- γ_w : 水の密度
- H : σ'_z を算定する深さ

(3) 地震時せん断応力比 L の算定

地震時せん断応力比 L は、上記の地震時せん断応力度と有効上載圧の比率であり、下式で算定される。

$$L = \frac{\tau_d}{\sigma'_z} \quad ※$$

ここに

- σ'_z : 有効土被り圧
- τ_d : 水平面に生じるせん断応力振幅

※ 建築基礎構造設計指針 3章敷地地盤の安定性 3.2節 地盤の液状化 (3.2.8)式分母に相当

この値は、後述の繰返しせん断応力比 R と比較し、その比率(R/L)が 1.0 以上であれば、液状化に対する安全性が確保されていることとなる。

4. 繰返しせん断応力比 R の算定

繰返しせん断応力比 R の算定にあたっては、地盤工学会で定められた試験法に従ってその値を求めている。田名部層については、「JGS 0541-2020 土の繰返し非排水三軸試験方法」に、砂子又層については「JGS 0543-2009 土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法」を参考にその値を定めている。

三軸試験方法室内試験においては、一定振幅の繰返し载荷においてひずみが5%に達した際の繰返し応力振幅比($\sigma_d / 2\sigma'_v$)として、円筒供試体によるねじりせん断試験方法一定振幅の繰返し载荷においてひずみが7.5%に達した際の繰返し応力振幅比(τ_d / σ_v)として求めている。

「土の繰返し三軸試験」においては、せん断力が等方拘束状態からの軸差応力(主応力の差分の1/2)によって生じるのに対し、「円筒供試体によるねじりせん断試験」では直接的にせん断力を加力することが可能なため、拘束圧(土被り圧に相当)に比べて大きなせん断力を加力することができる。この特性から、田名部層に比べて繰返しせん断応力比 R の高い砂子又層の試験として適している試験法である。

求めたで繰返しせん断応力比 R の値は以下のとおりである。別添1には田名部層および砂子又層の試験結果を、別添2には室内試験に用いた供試体の採取位置を示す。

表2 繰返しせん断応力比 R の値

	せん断応力比 R
田名部層下部砂質土(Tn2 層)	0.956
砂子又層上部軽石混じり砂岩(Sn4 層)	1.504

5. 液状化の判定結果

液状化の判定においては、上記の地震時せん断応力比 L と繰り返しせん断応力比 R の比率で下式の FL 値を算出し、この値が 1.0 以上であることを確認することとしている。

$$F_L = \frac{R}{L} \quad ※$$

※ 建築基礎構造設計指針 3 章敷地地盤の安定性 3.2 節 地盤の液状化 (3.2.8) 式に相当対象となる田名部層の液状化判定の結果を以下に記す。

田名部層下部砂質土 (Tn₂ 層) の判定結果

表3 田名部層下部砂質土 (Tn₂ 層) の判定結果

地震動	有効上載圧 σ_v (kN/m ²)	繰り返し応力 振幅比 R	地震時 せん断応力 τ (kN/m ²)	地震時 せん断応力比 $L = \tau / \sigma_v$	F _L 判定 (=R/L)
Ss-AH	86.15	0.956	57.94	0.673	1.42
Ss-B1H			58.64	0.681	1.40
Ss-B2H1			27.00	0.313	3.05
Ss-B2H2			36.17	0.420	2.27
Ss-B3H1			30.75	0.357	2.67
Ss-B3H2			32.54	0.378	2.52
Ss-B4H1			34.64	0.402	2.37
Ss-B4H2			45.47	0.528	1.81

注: ハッチングは F_L 値の最小値を示す。

砂子又層上部軽石混じり砂岩 (Sn₄ 層) の判定結果

表4 砂子又層上部軽石混じり砂岩 (Sn₄ 層) の判定結果

地震動	有効上載圧 σ_v (kN/m ²)	繰り返し応力 振幅比 R	地震時 せん断応力 τ (kN/m ²)	地震時 せん断応力比 $L = \tau / \sigma_v$	F _L 判定 (=R/L)
Ss-AH	127.58	1.504	91.07	0.714	2.10
Ss-B1H	147.6		107.23	0.726	2.07
Ss-B2H1	127.5		42.09	0.330	4.55
Ss-B2H2	147.68		64.92	0.440	3.41
Ss-B3H1	107.48		38.04	0.354	4.24
Ss-B3H2	147.68		59.60	0.404	3.72
Ss-B4H1	107.48		43.82	0.408	3.68
Ss-B4H2	127.58		70.16	0.550	2.73

注: ハッチングは F_L 値の最小値を示す。

さらに、水平動 2 方向と上下動を同時入力した場合の液状化判定も行っており、その結果は以下のとおりである。(コメント管理表 No.0209-60 参照)

田名部層下部砂質土(Tn₂層)の判定結果

表5 田名部層下部砂質土(Tn₂層)の判定結果(水平上下動同時入力)

地震動	有効上載圧 σ_v (kN/m ²)	繰返し応力 振幅比 R	水平 1 方向入力時		水平 2 方向+鉛直方向 入力時	
			地震時 せん断応力 τ (kN/m ²)	F _L 判定 (=R/L*)	地震時 せん断応力 τ (kN/m ²)	F _L 判定 (=R/L*)
Ss-A	86.15	0.956	57.94	1.42	66.08	1.24
Ss-B1			58.64	1.40	59.79	1.37

注記

* : 地震時せん断応力比 $L = \tau / \sigma_v$

ハッチングは F_L 値の最小値を示す。

砂子又層上部軽石混じり砂岩(Sn₄層)の判定結果

表6 砂子又層上部軽石混じり砂岩(Sn₄層)の判定結果(水平上下動同時入力)

地震動	有効上載圧 σ_v (kN/m ²)	繰返し応力 振幅比 R	水平 1 方向入力時		水平 2 方向+鉛直方向 入力時	
			地震時 せん断応力 τ (kN/m ²)	F _L 判定 (=R/L*)	地震時 せん断応力 τ (kN/m ²)	F _L 判定 (=R/L*)
Ss-A	127.58	1.504	91.07	2.10	103.01	1.86
Ss-B1	147.68	1.504	107.23	2.07	118.57	2.01

注記

* : 地震時せん断応力比 $L = \tau / \sigma_v$

ハッチングは F_L 値の最小値を示す。

繰り返しせん断応力比 R の値の実験結果について

貯蔵建屋直下地盤から採取した田名部層下部砂質土 (Tn₂ 層) と砂子又層上部軽石混じり砂岩 (Sn₄ 層) の室内試験による液状化に対応する繰り返しせん断応力比 R の値は以下のとおりであり, 一般的な緩い砂層の R に比べて大きな値となっている。

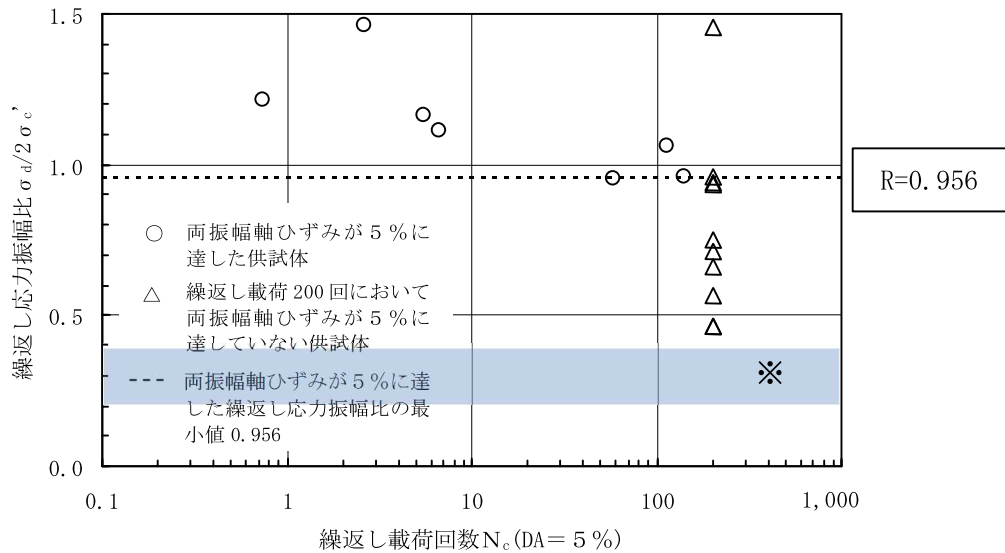
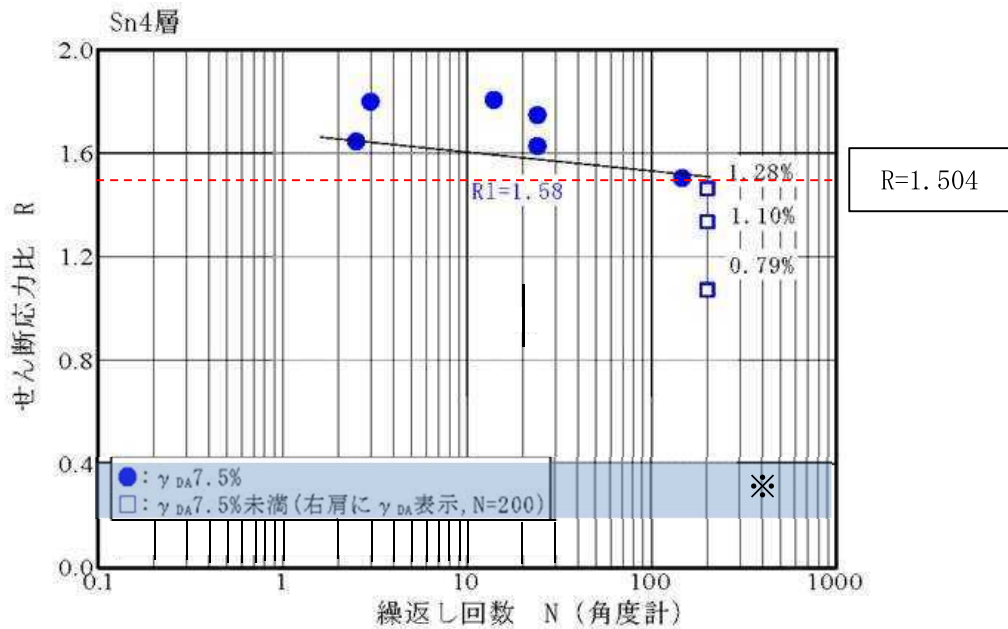


図1 三軸試験室内試験結果(田名部層下部砂質土(Tn₂))



※ 青色部は通常砂地盤で液状化が生じる可能性の高い繰り返しせん断応力比の範囲 (0.2~0.4) を示す。

図2 中空ねじりせん断試験結果(砂子又層上部軽石混じり砂岩(Sn₄))

室内試験に用いた供試体について

液状化特性把握のための試験は、田名部層については、「JGS 0541-2020 土の繰返し非排水三軸試験方法」に、砂子又層については「JGS 0543-2009 土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法」を参考にその値を定めている。

室内試験に用いた供試体は、田名部層についてはトリプルチューブサンプリングにより採取し、砂子又層については凍結サンプリングにより採取している。

田名部層の三軸圧縮試験に用いる供試体は、下図に示す建屋直下の2孔(A-C孔およびA-U孔)および高台の1孔(R-1孔)から18体の供試体を採取して室内試験を行っている。液状化判定に用いる繰返し応力振幅比の値は、繰返し载荷回数200回未満で両振幅ひずみが5%に達した9体の試験体における繰返し応力振幅比のうち最も小さい値である0.956を採用している。

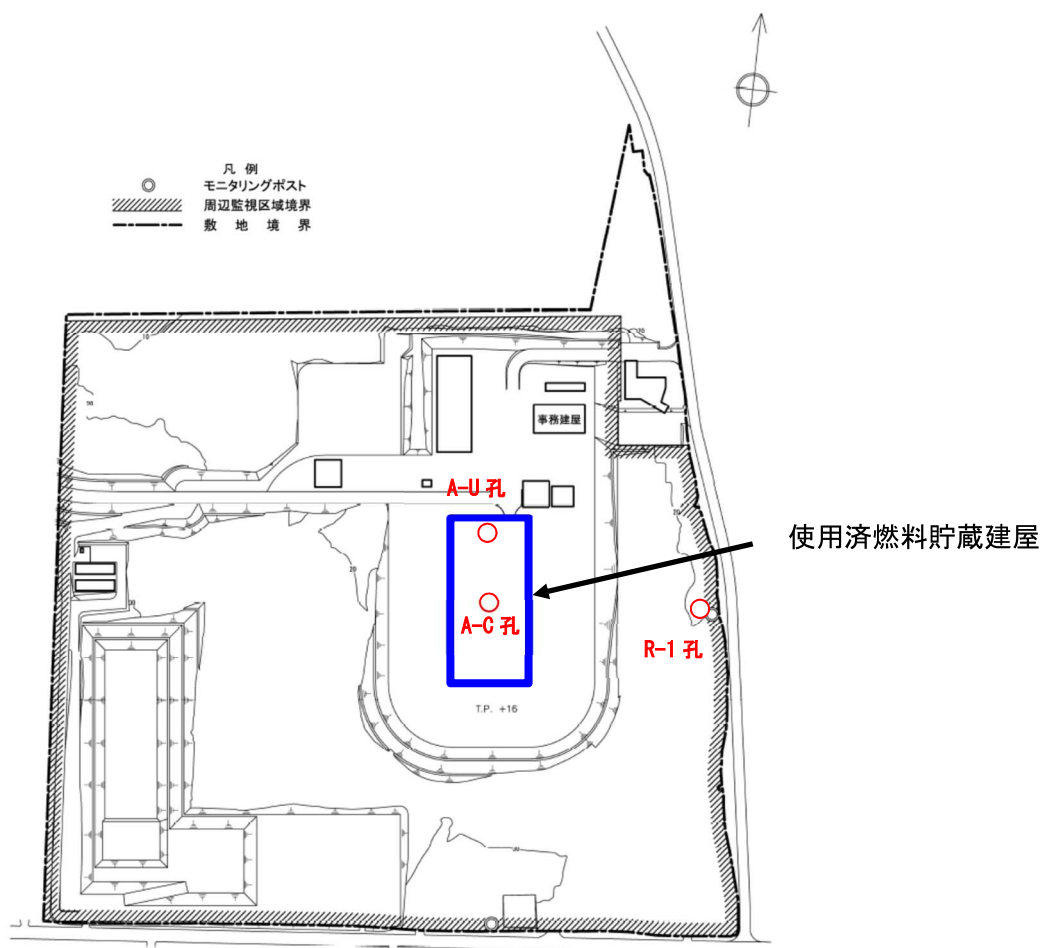


図1 田名部層の室内試験に用いる供試体採取位置

砂子又層の中空ねじりせん断試験に用いる供試体は、建屋直下地盤から採取している。室内試験に用いた供試体は、下図に示す建屋直下の FS 孔のうち N 値の小さい深度 17m 前後から 9 体の試験体を採取して室内試験を行っている。液状化判定に用いる繰返し応力振幅比の値は、繰返し载荷回数 200 回未満で両振幅せん断ひずみが 7.5% に達した 6 体の供試体における繰返しせん断応力振幅比のうち最も小さい値である 1.504 を採用している。

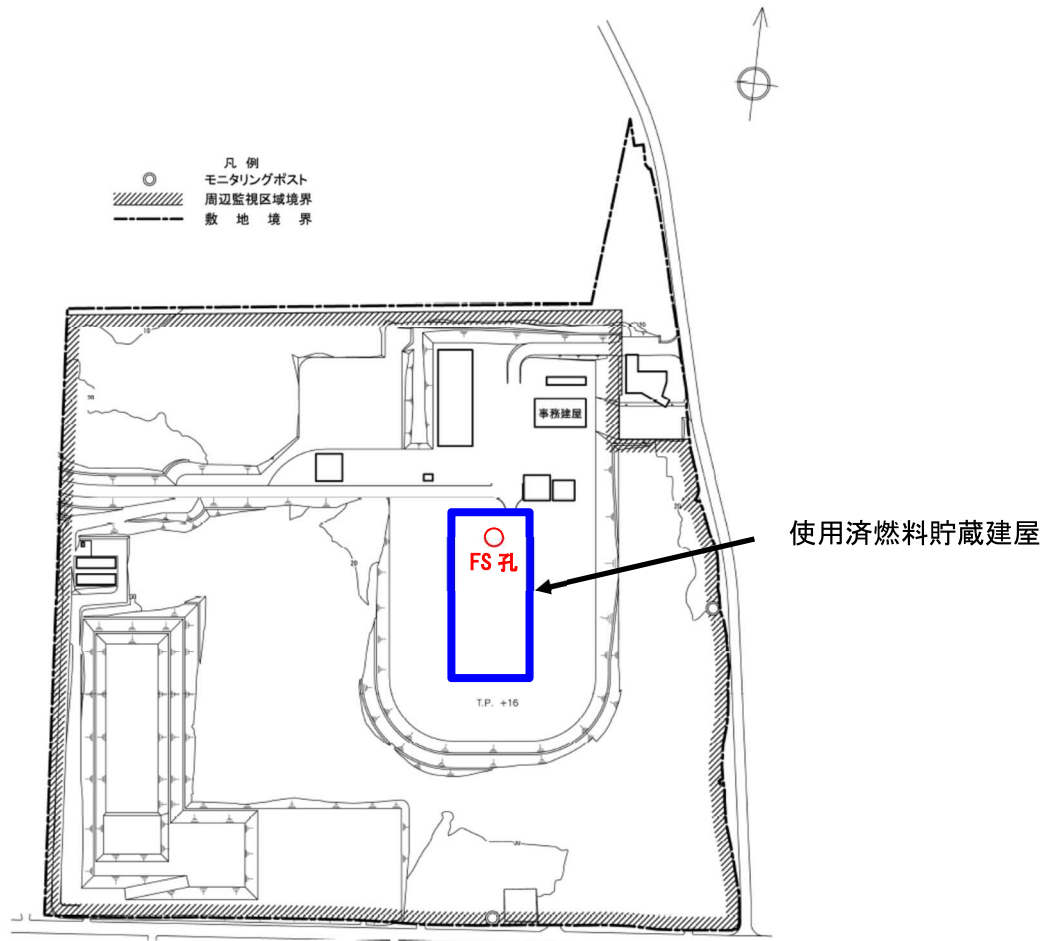


図2 砂子又層の室内試験に用いる供試体採取位置

上記の供試体の採取孔は FS 孔であり、液状化に係る室内試験で用いる供試体としては、この FS 孔のうち図3に示すように比較的深度が浅い部分に位置し、N 値と相対密度が低い層である地表面下 17m の深度から採取した供試体を用いている。

供試体を採取したボーリング孔は FS 孔1孔であることから、供試体が適切なものであることを確認するために、敷地内の砂子又層のうち供試体採取位置の土質区分と同種の他のボーリング孔から採取したボーリングコアにおける組成の比較を行った。

図4には、敷地内外の地質調査で実施したボーリング孔の位置を示す。

各孔の砂子又層の組成の比較のため、各孔でえられた粒度組成を示す値である成分の比率、平均粒径に係るデータ (D_{50} および D_{20} , D_{10})、細粒分含有率について FS 孔に近い A-U 孔との比較を行った。その結果を表1～表3に、図化して比較した結果を図6～図7示す。

比較の結果、建屋から離れた3孔の組成については、建屋周辺のボーリング孔における砂子又層の組成と若干の差異はあるものの、建屋周辺のボーリング孔の砂子又層の組成は概ね同等であり、A-U孔に近いFS孔の試験結果は砂子又層の特性を代表できると考えられる。

以上

表1 各ボーリング孔の粒度組成

(単位%)

記号	孔名	粘土分	シルト分	砂分	礫分	石分
A	A-U 孔	11.6	30.7	99.6	100.0	100.0
B	A-4 孔	8.0	27.1	99.3	100.0	100.0
C	A-C 孔	7.0	29.0	99.5	100.0	100.0
D	A-5 孔	8.2	27.9	97.4	100.0	100.0
E	A-6 孔	12.0	35.2	99.2	100.0	100.0
F	A-R 孔	4.4	18.6	95.9	100.0	100.0
G	U-1 孔	5.2	20.5	99.0	100.0	100.0
H	R-1 孔	3.7	15.7	99.0	100.0	100.0
I	D-1 孔	4.3	23.7	96.4	100.0	100.0

※ 粒径の小さい成分からの累積加算割合を示す。

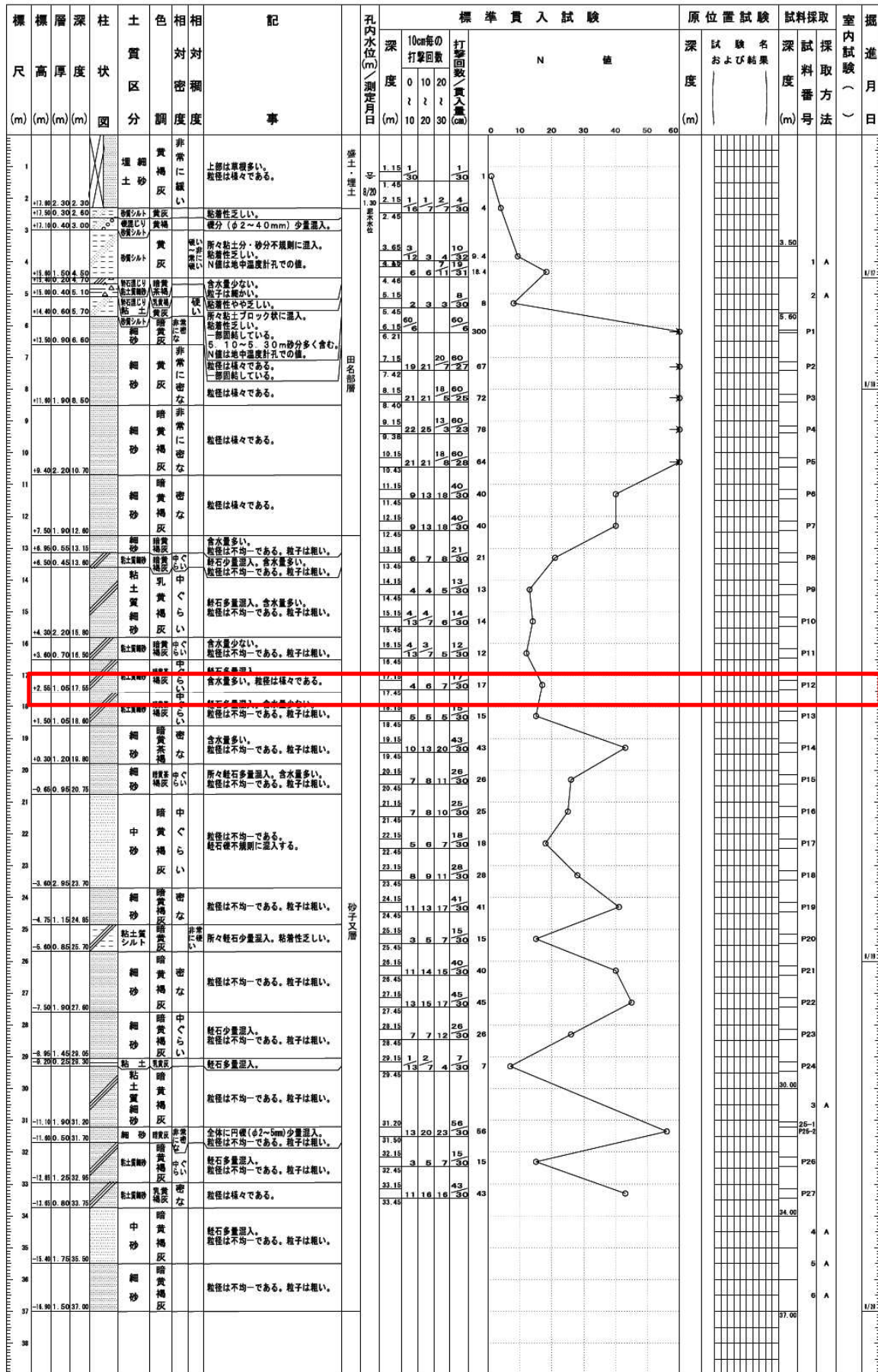
表2 各ボーリング孔の細粒分含有率

(単位%)

記号	孔名	細粒分含有率
A	A-U 孔	30.7
B	A-4 孔	27.1
C	A-C 孔	29.0
D	A-5 孔	27.9
E	A-6 孔	35.2
F	A-R 孔	18.6
G	R-1 孔	15.7
H	U-1 孔	20.5
I	D-1 孔	23.7

表3 各ボーリング孔の粒度組成(D50 および D20, D10)

記号	孔名	50%粒径	20%粒径	10%粒径
A	A-U 孔	0.253	0.0186	0.0378
B	A-4 孔	0.313	0.0296	0.00718
C	A-C 孔	0.205	0.0366	0.00934
D	A-5 孔	0.243	0.0303	0.00736
E	A-6 孔	0.149	0.0175	0.00321
F	A-R 孔	0.238	0.0856	0.0176
G	U-1 孔	0.195	0.0721	0.0163
H	R-1 孔	0.309	0.103	0.0336
I	D-1 孔	0.22	0.0509	0.0151



供試体採取深度

図3 TP孔※ボーリング柱状図

※ TP孔はFS孔に隣接するN値調査等を目的としたボーリング孔

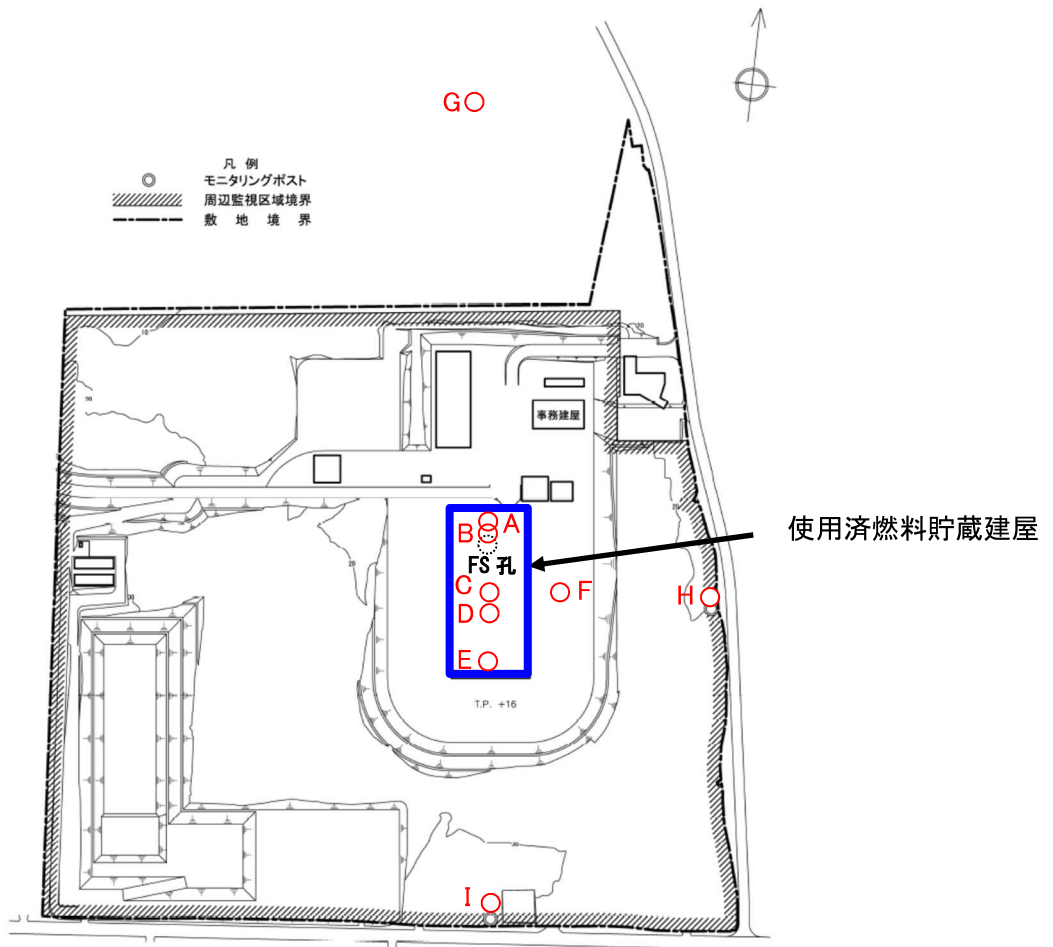


図4 敷地および敷地近傍のボーリング孔

表4 各ボーリング孔の名称

記号	孔名
A	A-U 孔
B	A-4 孔
C	A-C 孔
D	A-5 孔
E	A-6 孔
F	A-R 孔
G	U-1 孔
H	R-1 孔
I	D-1 孔

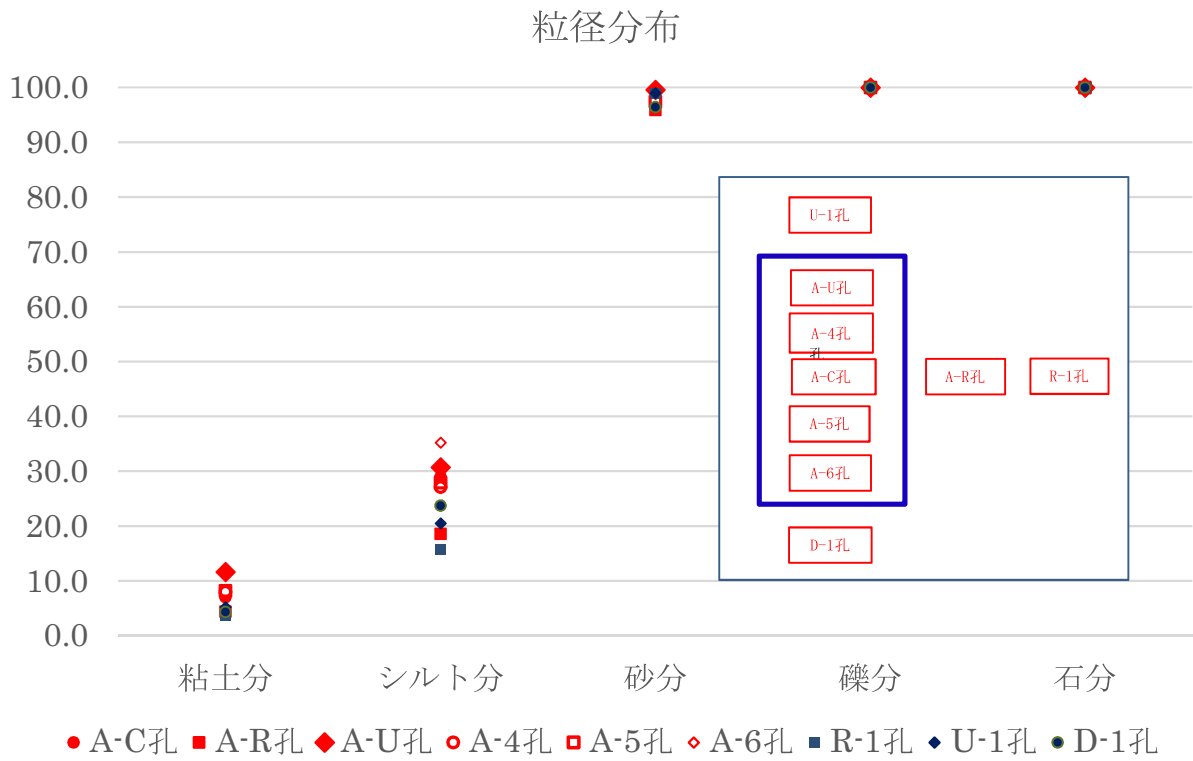


図5 敷地内砂子又層の組成

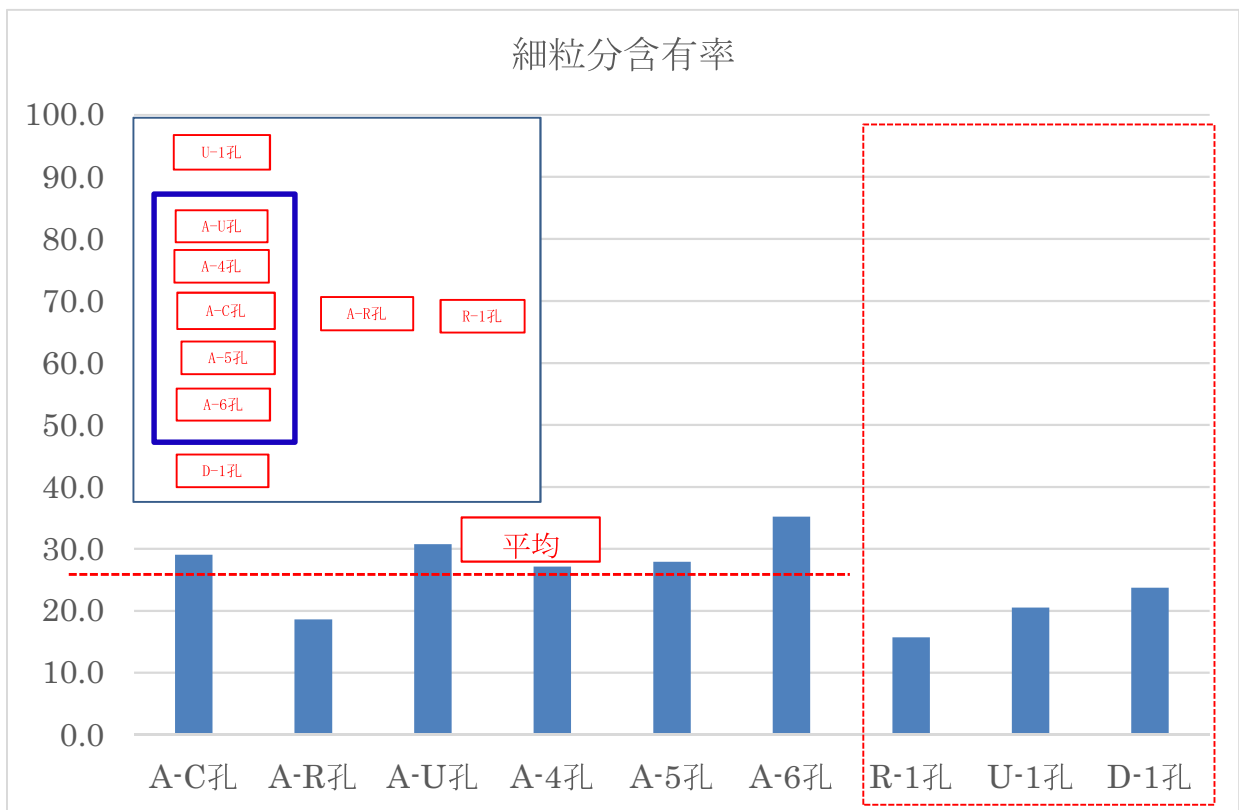


図6 敷地内砂子又層の細粒分含有率

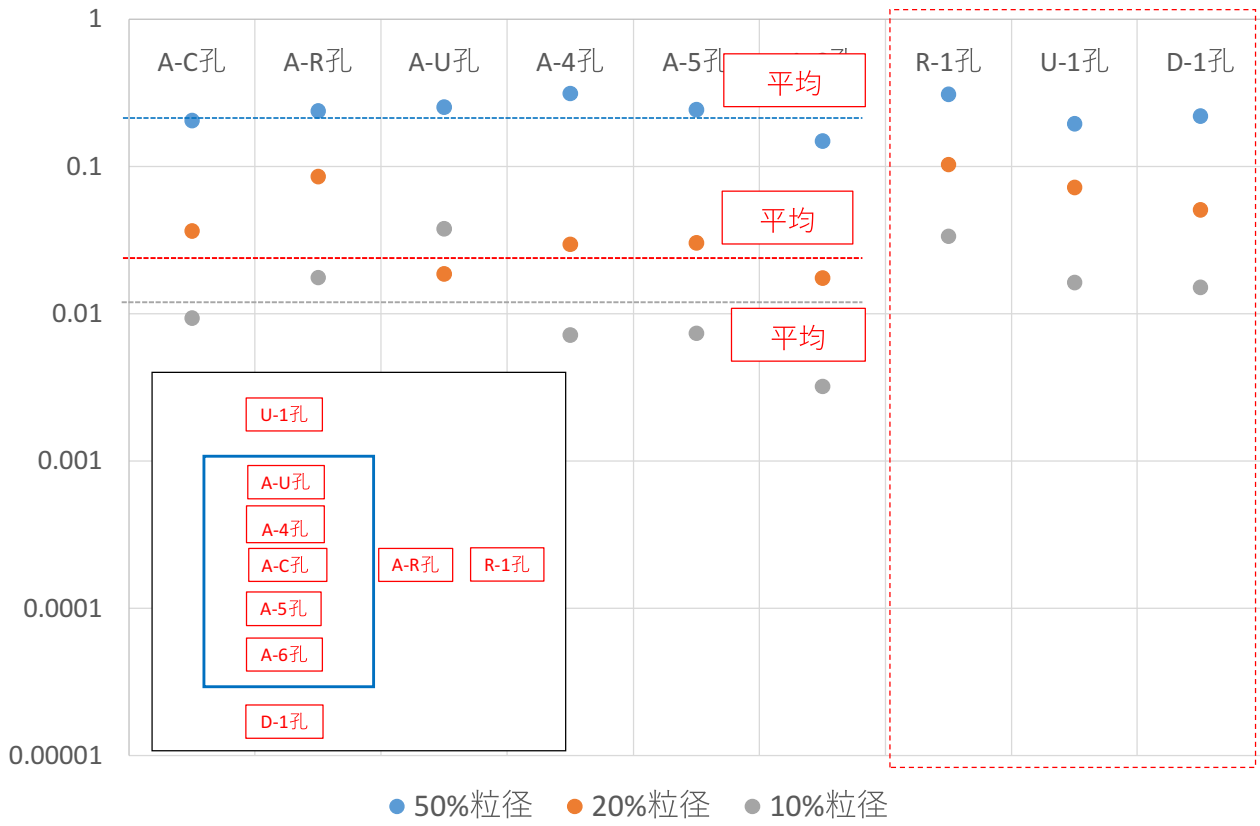


図7 敷地内砂子又層の粒径(50%, 20%, 10%)