

表層地盤の物性値に係る検討について

- 本資料は、4月24日審査会合にて示した、地盤モデルの設定に係る因子のうち、表層地盤（埋戻し土）の物性値に係る検討結果を示すものである。
- 表層地盤（流動化処理土）の物性値に係る検討結果は追而とする。
- 本資料の内容については、今後、補足説明資料「耐震建物08 耐震設計の基本方針に関する地震応答解析における地盤モデル及び物性値の設定について」への取り込みを検討する。

目 次

	ページ
1. はじめに	1
2. 埋戻し土の物性に係る検討	1
2.1 均質性及び物性値設定について	1
2.1.1 埋戻し土の施工管理状況及び均質性	1
2.1.2 埋戻し土の物性値設定について	4
2.1.3 数値統計学に基づく埋戻し土の物性値 (G_0) の最尤モデル	6
2.1.4 まとめ	9
2.2 物性値の不確実性に関するパラメータスタディ	10
2.2.1 ばらつきを有する表層地盤の加速度応答	10
2.2.2 ばらつきを有する地盤の実現象範囲	13
2.2.3 まとめ	15
2.3 埋戻し土の物性設定のまとめ	16
3. 流動化処理土の物性に係る検討（追而）	17

1. はじめに

表層地盤の物性値をエリア毎に設定する際において、表層地盤は人工材料であることから均質に管理されているならば、各エリアに同一の物性値を用いることができる。この場合、敷地内の複数のボーリング孔から得られる統計的に信頼できる物性値を設定できるものと考えられる。

以上のことを踏まえ、本資料では、当該敷地における表層地盤(埋戻し土)の均質性について、施工管理の観点から検討を行う。表層地盤(埋戻し土)の物性値の設定については、本来の土質材料としての力学特性に基づき考察を行い、さらに、数値統計理論により、物性値として与えるべき最適な統計的モデルについて説明する。また、施工管理された埋戻し土においても一定のばらつきを有することを前提とし、埋戻し土が有する確率分布モデル(平均と標準誤差による正規分布)を適用したモンテカルロシミュレーションにより不確かさに関する考察を行った。

なお、表層地盤(流動化処理土)についても、その均質性について施工管理の観点から検討を行い、物性値の設定についての検討を行う。

2. 埋戻し土の物性に係る検討

2.1 均質性及び物性値設定について

2.1.1 埋戻し土の施工管理状況及び均質性

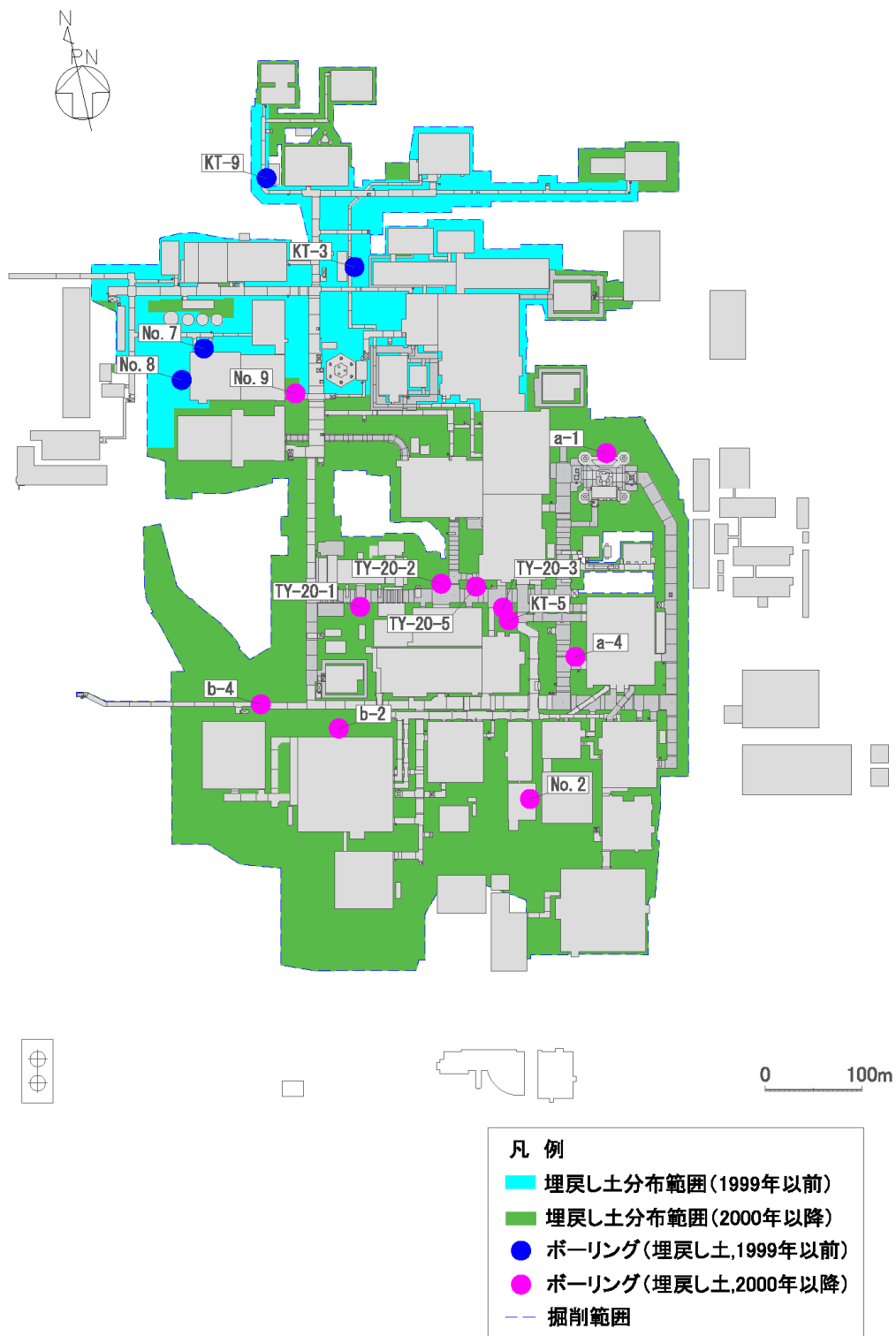
埋戻し土は、第 2.1.1-1 図に示すとおり、敷地内北側が 1999 年以前、敷地内中央部から南側にかけて 2000 年以降に施工しており、第 2.1.1-1 表に示す品質管理(参考 1)を実施している。

埋戻し土の施工については、敷地における掘削土を段丘砂又は六ヶ所層の砂及び鷹架層掘削に伴う岩ズリに対し、土質性状に応じて粒度毎に仮置きし、水分調整及び粒度調整をして混合する手法(ストックパイル方式)により、1999 年以前と 2000 年以降の力学特性が同等となるように管理をしている。

1999 年以前の埋戻し土については、敷地北側のエリアにおいて撒き出した各層毎にコーン貫入試験を実施しており、一軸圧縮試験で得られる一軸圧縮強度 qu と同等の評価ができるコーン貫入抵抗により管理を行っている。2000 年以降は、敷地南側のエリアにおいて締固め度 $D_c=90\%$ 以上を締固め仕様として管理を行っている。両者とも最大乾燥密度と最適含水比による締固め材料基準に基づき、既定の撒出し厚における振動ローラ、ブルドーザ等による転圧が行われ、品質記録の確認により土質材料として十分に締め固まった品質が確保されている。

土の締固め管理として 1999 年以前はポータブルコーン試験により、一軸圧縮強度 $qu \geq 0.2\text{MPa}$ を目標に管理を行っている。したがって、せん断強度は、 $\tau = qu/2 = 0.2/2 = 0.1\text{MPa}$ となる。第 2.1.1-2 図に埋戻し土の強度特性として 1999 年以前と 2000 年以降を合わせた非排水せん断強度と圧密応力の関係を示す。埋戻し土の非排水せん断強度は、深度 10m 相当で 0.11MPa 程度の値が得られており、敷地全体の埋戻し土の強度について

て均質な品質となるように管理されている。

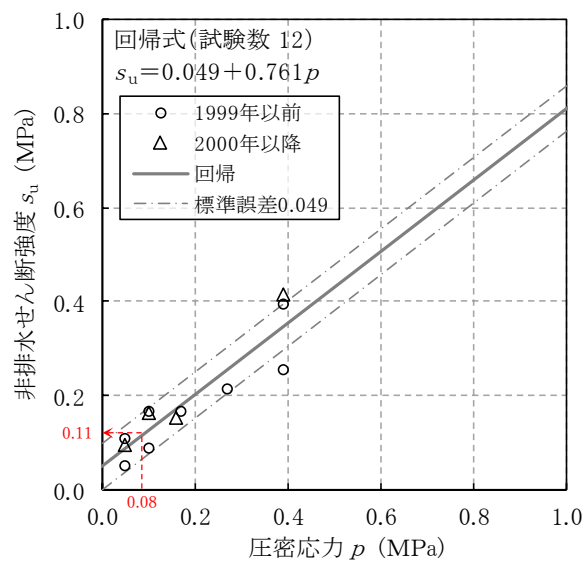


第 2.1.1-1 図 埋戻し土の施工範囲及び施工年代平面図

第 2.1.1-1 表 埋戻し土の密度及び力学特性に係る品質管理一覧
 (設工認に係る補足説明資料 耐震設計の基本方針に関する地盤の支持性能
 について[耐震地盤 01]より抜粋)

施工年	材料基準	締固め仕様
1999 年以前	段丘砂 (中位段丘) 最大乾燥密度, 最適含水比	コーン貫入抵抗 $q_c \geq 1.0\text{MPa}$ (道路土工施工指針: (社)日本道路協会) $q_u = 0.2 \times q_c = 0.2 \times 1.0 = 0.2\text{MPa}^*$
2000 年以降	ブレンド材(鷹架層及び六ヶ所層) 最大乾燥密度, 最適含水比	締固め度 $D_c \geq 90\%$

※再処理施設及び MOX 燃料加工施設の事業変更許可申請書における埋戻し土の強度特性のうち、非排水せん断強度 $s_u = 0.049 + 0.761p$ (MPa) より
 深度 10m 相当の圧密応力 $p = 0.08\text{MPa}$ のとき, $s_u \cong 0.11\text{MPa}$ となる。



第 2.1.1-2 図 埋戻し土の強度特性 (非排水せん断強度と圧密応力の関係)
 (再処理施設及び MOX 燃料加工施設の事業変更許可申請書より抜粋して加筆)

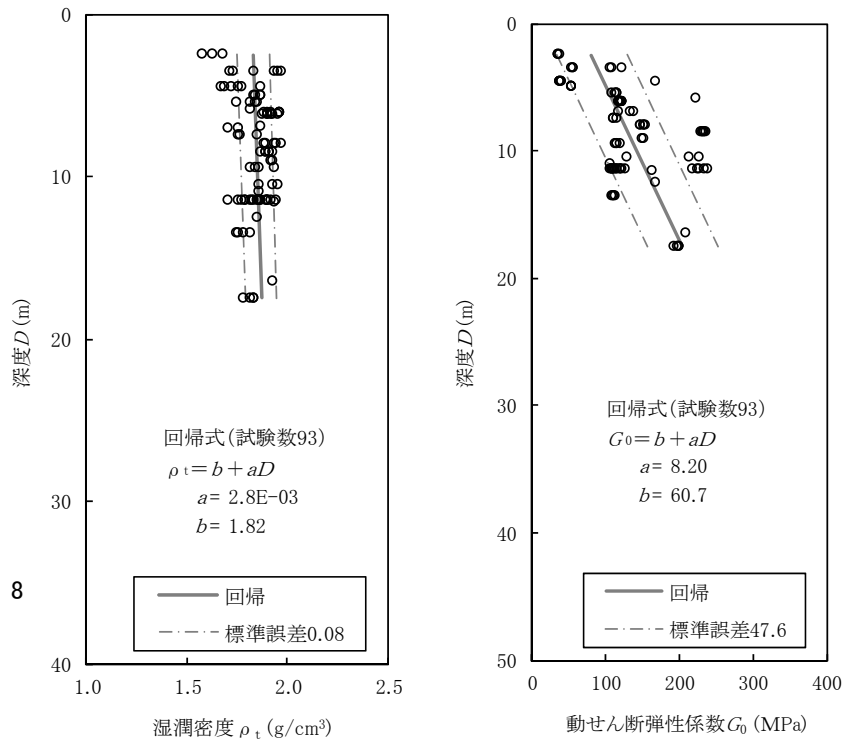
2.1.2 埋戻し土の物性値設定について

埋戻し土については、ボーリング柱状図を確認した上で、物理特性試験及びPS検層に基づき解析物性値を設定している。埋戻し土のボーリング柱状図及び物理・力学特性を参考2に示す。

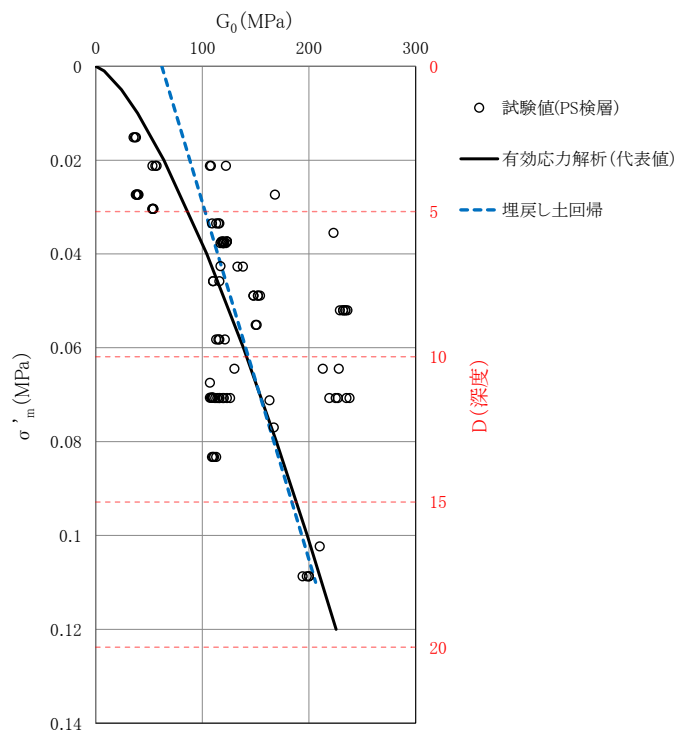
埋戻し土のせん断波速度(V_s)は、深くなるとおおむね大きくなる傾向を示しており、土質材料の力学特性における拘束圧依存と整合する結果を示している。第2.1.2-1図に埋戻し土の解析用物性値のうち、湿潤密度(以下、 ρ_t という。)と動せん断弾性係数(以下、 G_0 という。)を示す。いずれも深度方向に物性値が増加しており、深度方向依存の1次回帰により整理できる。 G_0 については、 $G_0 = \rho_t \cdot V_s^2$ で与えられることから、参考2に示した埋戻し土の V_s が一定であっても ρ_t が深度依存していれば、 G_0 は深度依存することとなる。

なお、埋戻し土の解析用物性値については、「再処理施設及びMOX燃料加工施設の事業変更許可申請書」における基礎地盤安定性評価において、第2.1.2-1図に示した解析用物性値(湿潤密度と動せん断弾性係数に深度方向依存を考慮した回帰式)を適用している。

また、第1回申請における安全冷却水B冷却塔(A4B)の竜巻防護ネットの液状化検討(FLIP:砂の応力-ひずみと過剰間隙水圧モデル)においては、第2.1.2-2図に示すとおり、第2.1.2-1図に示した埋め戻し土の G_0 のデータを用いた、有効拘束圧に応じた指数関数の拘束圧依存式(FLIP関数型指定)を適用している。なお、図中には、深度依存の1次回帰も示す。



第 2.1.2-1 図 埋戻し土の湿潤密度及び動せん断弾性係数の回帰式と標準誤差



第 2.1.2-2 図 液状化応答解析の初期せん断弾性係数 G_0 物性値

2.1.3 数値統計学に基づく埋戻し土の物性値 (G_0) の最尤モデル

2.1.1 に述べたように当該地点の埋戻し土は、均質な施工管理が実施されており、動的変形特性については、深度方向依存の物性値を示している。そこで、得られた試験データから現状における統計学的に最も適した物性値の設定方法について検討を行った。

得られたデータからその元となる構造を推定する、あるいは、将来、起こることを予測する手法は統計的モデリング*1と呼ばれている。統計的モデリングは、客観的に存在するものではなく、解析する対象に関する知識や期待、経験や過去のデータに基づく知識から解析の目的に応じて作られる。統計的モデルによって、特定のモデルが得られても実際の対象物が厳密にそのモデルに従って変動しているわけではなく、他の要因の影響も受けると考えるべきである。しかし、統計的モデルは真の構造を正確に表現しているかどうかではなく、必要とする情報を取り出すために適当かどうかということである。良いモデルを用いれば良い結果が得られるが、不適切なモデルを用いれば、良い結果が期待できない。そのモデリングでは、正確さ（偏りとばらつき）、複雑さ（適用のしやすさやパラメータの数）、物理的意味との整合性などの種々の視点があり、出来具合にも優劣がある。この場合、パラメータの数や次数を増やせば増やすほど、その測定データとの適合度を高めることができるが、その反面、ノイズなどの偶発的な（測定対象の構造と無関係な）変動にも無理に合わせてしまうため、同種のデータには合わなくなることもある。

そのようなモデルの良さの評価を行う手法として、情報量規準があり、主観性を持ったモデルの良さを客観的に評価するものである。

代表的な情報量規準として AIC (Akaike Information Criterion: 赤池情報量基準*1) があり、以下の式で表される。

$$AIC = -2 \cdot \ln L + 2k$$

ここで L は最大尤度、 k は自由パラメータの数である。
各標本（観測データ）の確率分布が正規分布の場合、

$$AIC = \sum_{i=0}^n \ln(2\pi\sigma_i^2) + 2k = \sum_{i=0}^n \ln \sigma_i^2 + 2k + n \ln 2\pi$$
$$AIC = \sum_{i=0}^n \ln \sigma_i^2 + 2k$$

と表せる。 n は標本サイズ、 σ_i は各標本の標準誤差である。2行目は、定数項を省略した値である。それに加えさらに、各標本の標準誤差が等しい場合は、

$$AIC = n \ln(2\pi\sigma^2) + 2k = n \ln \sigma^2 + 2k + n \ln 2\pi$$

$$AIC = n \ln \sigma^2 + 2k$$

AICは、数理統計理論を駆使して編み出したモデル選択指標のパラダイムであり、この値が小さいほど良いモデル（＝選択すべきモデル）という基準を定量的に示すものである*2。

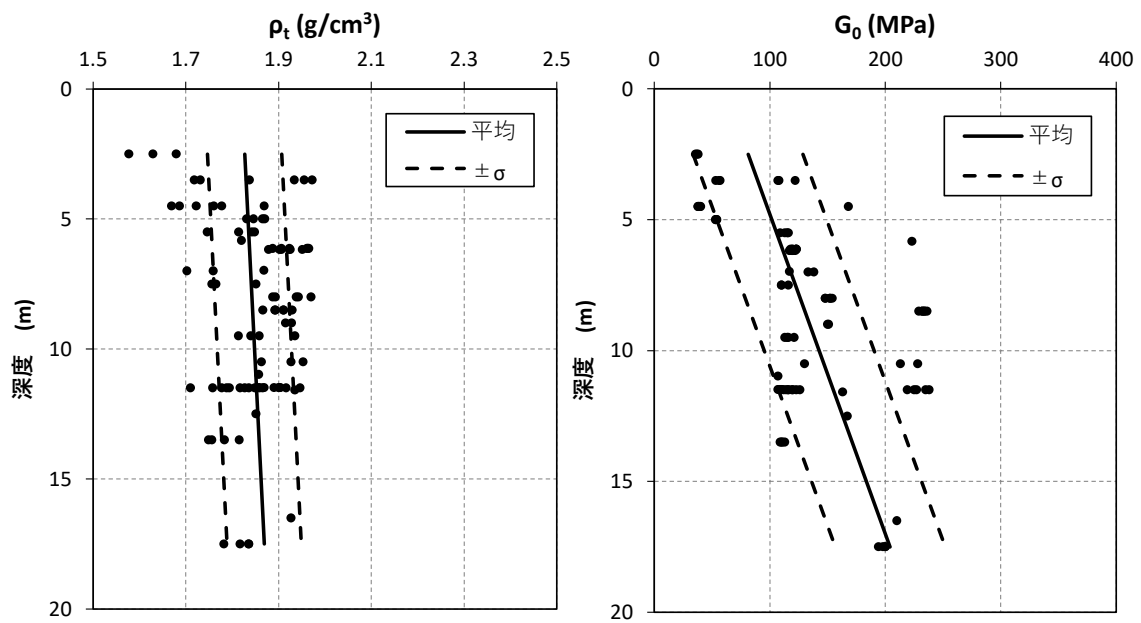
先述したように、パラメータを多くすると残差平方和を小さくできるが、統計的モデリングにおいてはバランスが大事であり、誤差が同じ程度なら予測値との乖離を少なくするにはパラメータ数の少ないモデルを選ぶべきである。

上記のAICを埋戻し土の G_0 の深度依存回帰の指標に適用し、現状の試験結果の統計情報からモデルに与えるべき最適（最尤：最も尤もらしい）な地盤物性値モデルを検討した。

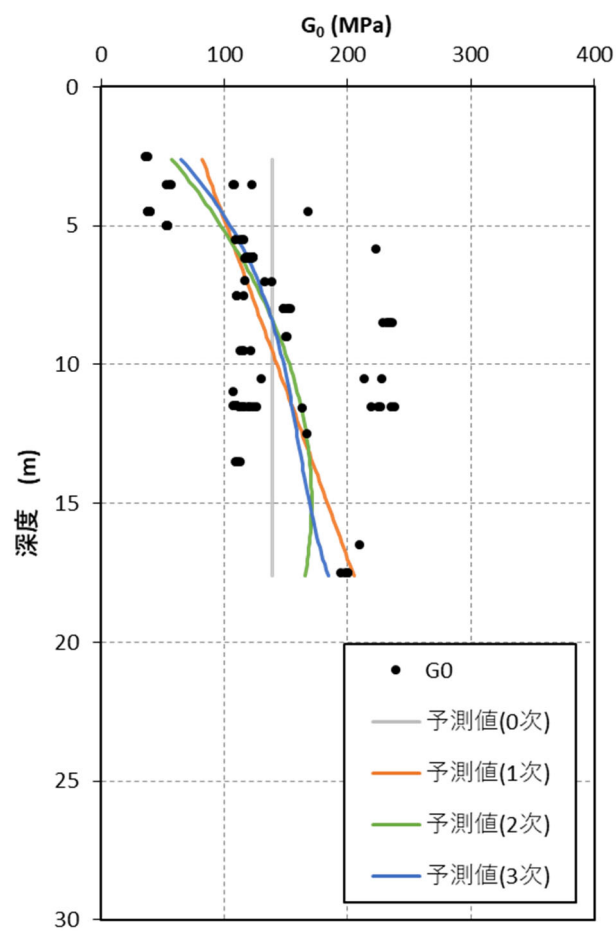
第2.1.3-1図（第2.1.2-1図の主要箇所拡大図）に、埋戻し土の動的変形特性として用いる ρt 、 G_0 の深度分布と深度依存回帰式を示す。第2.1.3-2図に既往データの0次（平均）、1次関数回帰、2次関数回帰のフィッティングと回帰式（最小二乗法）を示す。数値統計学的なフィッティングの良否を定量的に評価するため、第2.1.3-3図に各次数に対するAIC（オレンジ線）と残差平方和（青線）を示す。AICは、0次（平均）に比べると1次回帰で大きく減少し、2次、3次と次数が増えるのに伴い緩やかに減少する。誤差（残差平方和）が同程度であれば、パラメータの少ないモデルが適切と考えられる。

（参考文献）*1:情報量規準；小西貞則，北川源四郎，予測と発見の科学，朝倉書店

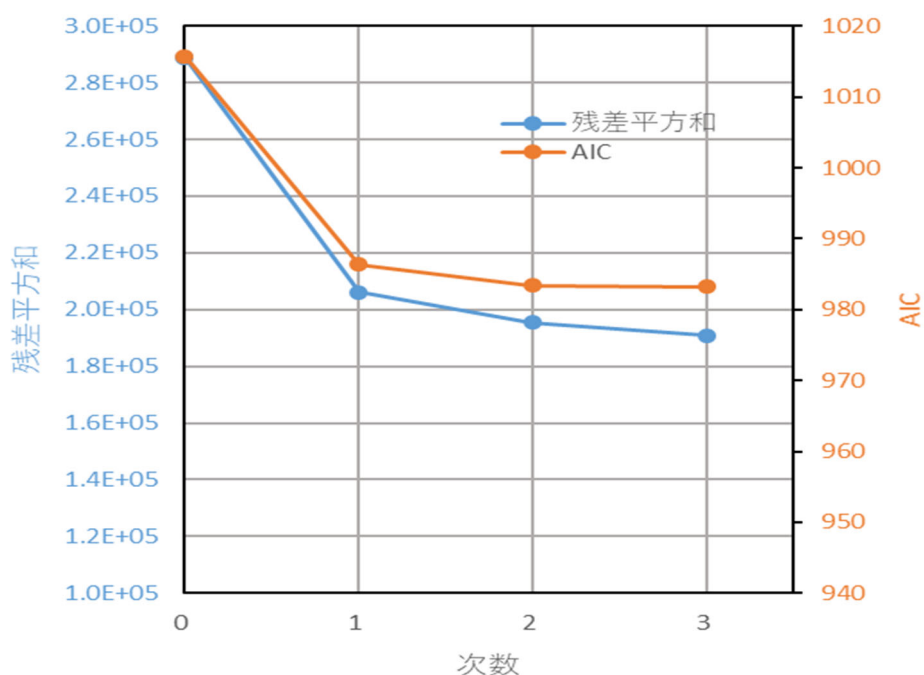
*2:AIC(赤池情報量規準)を学ぶ；唐沢好男，デジタル移動通信の電波伝搬基礎 補足資料 YK-048, 2020.



第 2.1.3-1 図 埋戻し土の湿潤密度と動せん断弾性係数の回帰式と標準偏差



第 2.1.3-2 図 動せん断弾性係数 G_0 の任意次数回帰



第 2.1.3-3 図 既往データによる AIC の算定結果 (AIC・残差～次数関係)

2.1.4 まとめ

当該地点の埋戻し土の動的変形特性のうち G_0 については、一般的な土質材料であることから土質力学的には拘束圧依存を示し、品質管理された均質材料であることから深度依存(均質であれば深度方向に拘束圧が大きくなる)を示すものと判断される。

また、数理統計理論に基づく AIC による最尤推定モデルとしては、0 次(平均)よりも 1 次回帰(深度依存)の方が小さな値となり、2 次、3 次と次数が増えるのに伴い緩やかに減少するものの誤差(残差平方和)が同程度であれば、パラメータの少ないモデルが適切であることと合わせると 1 次関数回帰式がより選択すべきモデルとの指標が得られ、統計的(予測)モデルとしては最適と考える。

2.2 物性値の不確実性に関するパラメータスタディ

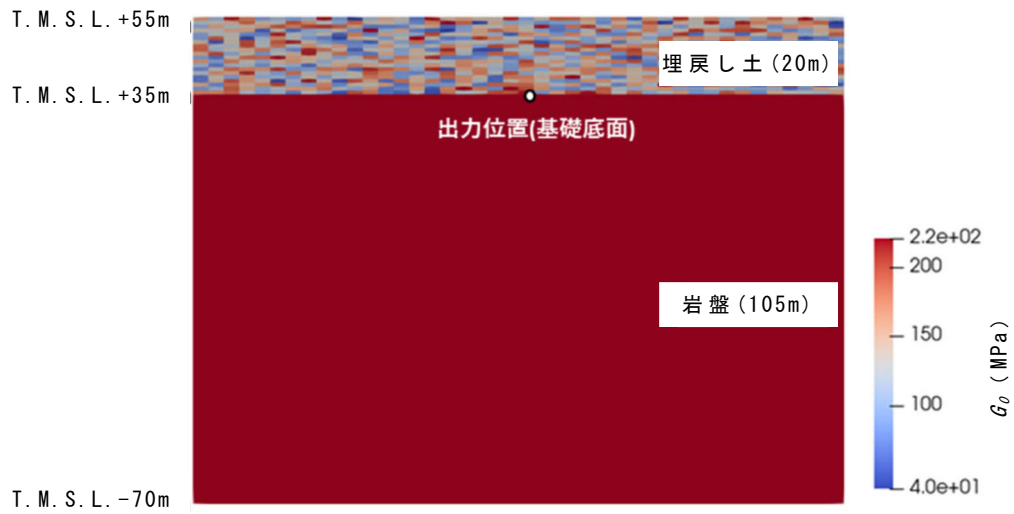
2.2.1 ばらつきを有する表層地盤の加速度応答

地震時のせん断弾性波（S波）は，地表面に向かって面的に振動しながら伝播してくる。当該地点の埋戻し土は平面的にも均質な品質となるように管理されていることから地盤の加速度応答は，周辺岩盤を包絡した平均的な挙動を呈するものと考えられる。

そこで，表層地盤（埋戻し土）のばらつきの確率密度分布を表層部にランダムに与えた場合の加速度応答による平均とばらつきの比較及び表層地盤（埋戻し土）の深度依存も考慮した場合の不確からしさ（ばらつきの特徴）についてモンテカルロシミュレーションを用いて検討した。

この検討では，第2.2.1-1図に示すような簡易的に地表から20mを表層地盤（埋戻し土），T.M.S.L.+35m～-70mの層厚105mを岩盤部としたモデルを設定した。解析手法は，2次元周波数応答解析の解析コード（Super FLUSH/2D）を用いて，建屋の基礎底面相当位置（岩盤上限面）での応答加速度の考察を行った。解析に用いた物性値を第2.2.1-1表に示す。

表層地盤については，埋戻し土の G_0 の全データ（ $N=93$ ）について，平均値と標準偏差を算定すると，それぞれ $G_0=131\text{MPa}$ ， $\sigma=56\text{MPa}$ が算出される。岩盤部については，平均的な岩盤の細粒砂岩層の解放基盤面相当の G_0 を一様に与え，表層地盤20mに対しては，埋戻し土の統計的な確率密度を用いて，モンテカルロシミュレーション（ $N=200$ 回）を実施した。

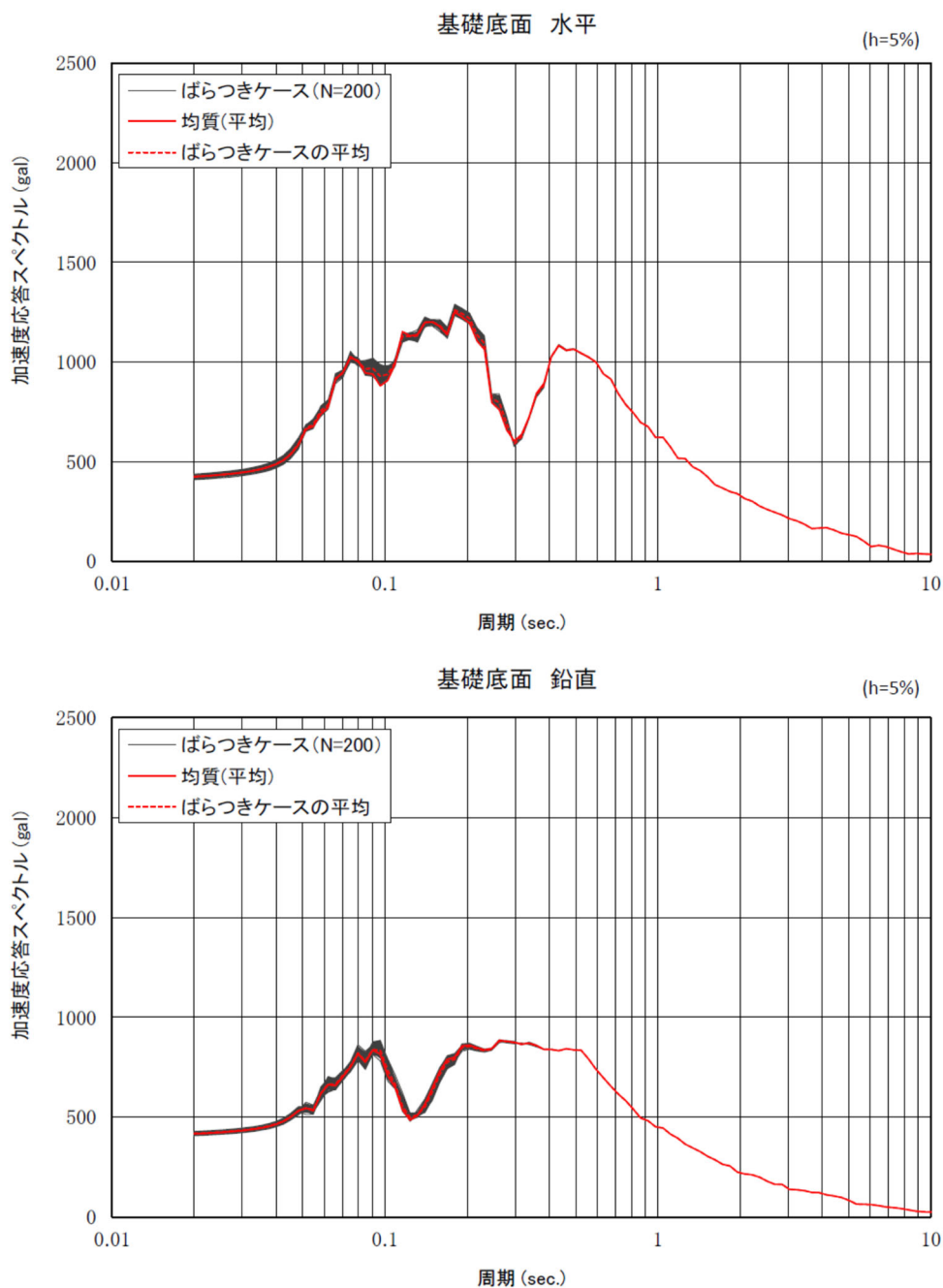


第2.2.1-1図 解析モデル図（深度方向依存なし）

第2.2.1-1表 解析モデル物性諸元

項目	仕様	備考
モデルサイズ	幅168m×深さ125m	
要素数	埋戻し土：840 鷹架層：1176	
境界条件	側方：自由境界 底盤：粘性境界	
表層物性値 (200モデル)	$G_0 = 131$ (MPa) $\sigma = 56$ (MPa) $\nu d = 0.39$ $h = 0.03$	G_0 の平均，標準偏差は， 全サンプル (N=93) の 平均値
岩盤物性値	$G_0 = 1600$ MPa $\nu d = 0.38$ $h = 0.03$	細粒砂岩解放基盤相当
入力地震動	Ss-A (T.M.S.L. -70m：2E入力)	

解析結果として、第2.2.1-2図に岩盤上限面（第2.2.1-1図における出力位置）の加速度応答スペクトルを示す。第2.2.1-1図の岩盤上限面の加速度応答スペクトルの結果によれば、表層地盤20mに埋戻し土の有する確率密度分布で独立に物性値を与えたとしても、図中赤線で示す平均値の均質地盤の加速度応答スペクトルとおおむね一致し、平均値とばらつきの関係が確認された。

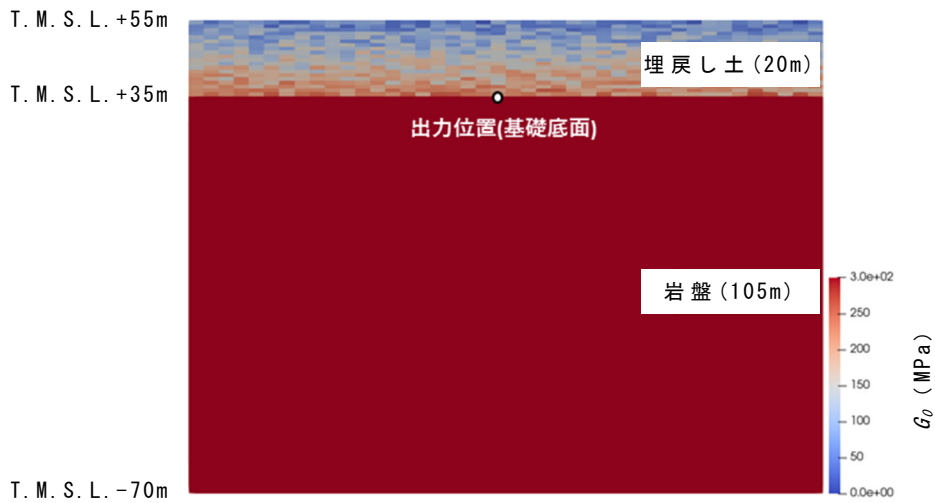


第2.2.1-2図 モンテカルロシミュレーションにおける加速度応答スペクトル

2.2.2 ばらつきを有する地盤の実現象範囲

表層地盤の G_0 を深度依存と考えたモデルにおいて、起こりうる事象の範囲についてパラメータスタディを実施した。

ここでは、表層地盤について、深度毎（1メッシュ毎）に $\pm 1\sigma$ の標準誤差の確率密度を平面的にランダムに与えたモデルと深度方向依存の平均値及び $\pm 1\sigma$ を与えたモデルの岩盤上限面の加速度応答スペクトルを比較する。第2.2.2-1図に解析モデル図、第2.2.2-1表に解析に用いた物性諸元を示す。



(1) 深度方向依存ランダムモデル例



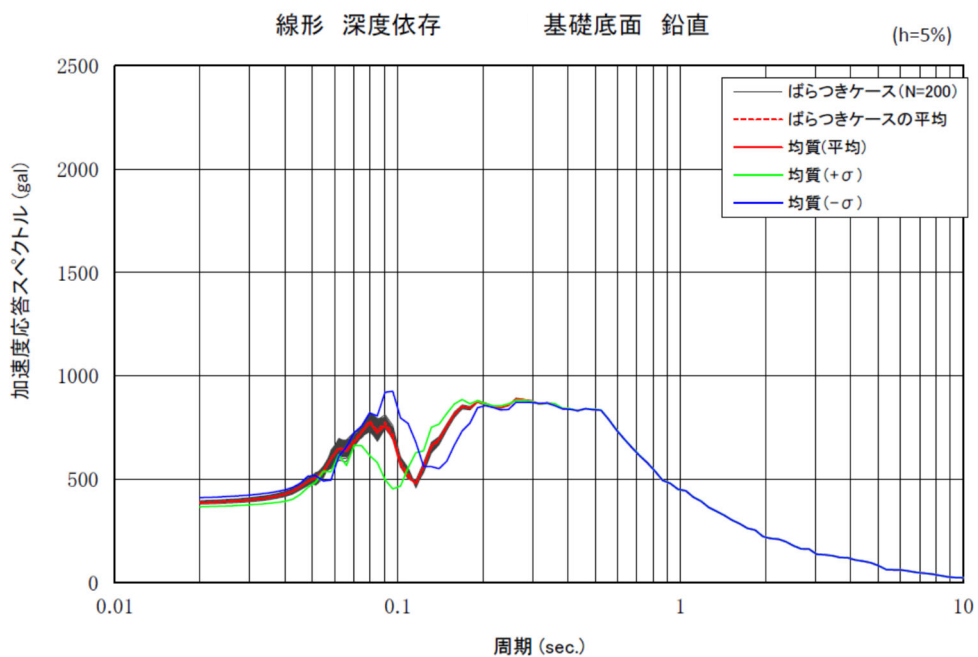
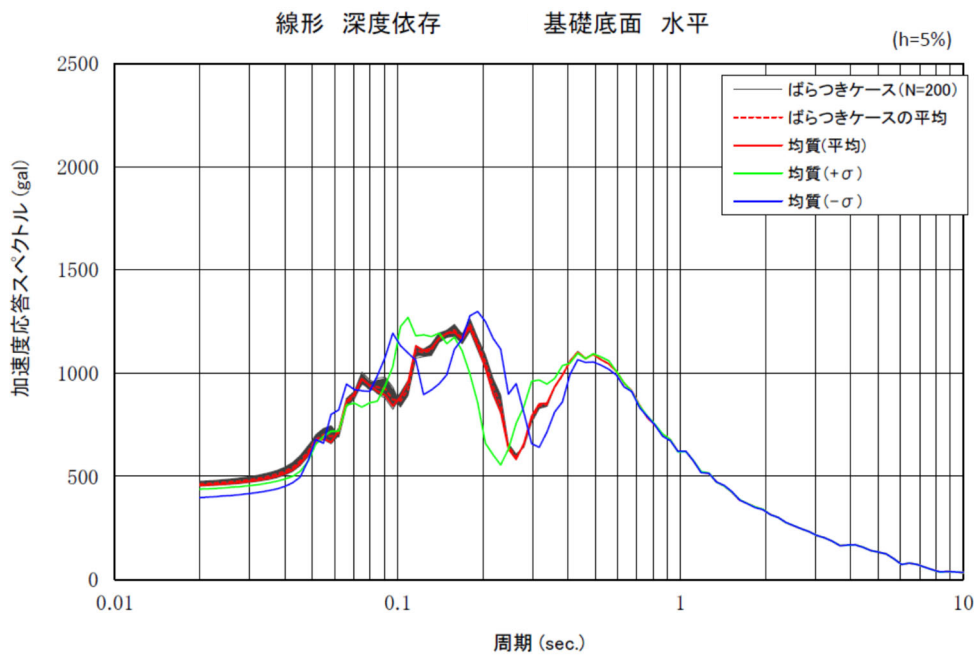
(2) 深度方向依存平均モデル例(+1 σ)

第2.2.2-1図 解析モデル図（深度方向依存考慮）

第2.2.2-1表 解析モデル物性諸元

項目	仕様	備考
モデルサイズ	幅168m×深さ125m	
要素数	埋戻し土：840 鷹架層：1176	
境界条件	側方：自由境界 底盤：粘性境界	
表層物性値 (200モデル)	$G_0 = 60.7 + 8.20D$ (MPa) G_0 標準誤差 = 47.6 (MPa) D : 深度 (m) $\nu d = 0.39$ $h = 0.03$	正規分布 (事業変更許可申請において設定した物性値)
岩盤物性値	$G_0 = 1600$ MPa $\nu d = 0.38$ $h = 0.03$	細粒砂岩解放基盤相当
入力地震動	Ss-A (T. M. S. L. - 70m : 2E入力)	

解析結果として、第2.2.2-2図に岩盤上限面（第2.2.2-1図における出力位置）の加速度応答スペクトルを示す。表層地盤に深度方向依存のばらつきを与えたケース（赤線：均質，グレー：ばらつき）においても加速度応答スペクトルは、平均値を均質に与えた加速度応答スペクトルとおおむね一致することを確認した。また、表層地盤に深度方向依存の $\pm 1\sigma$ を均質物性として与えたケース（ $+\sigma$ ：緑線， $-\sigma$ ：青線）の加速度応答スペクトルは、それぞれ表層地盤の固有周期が変化する方向（ $+\sigma$ は低周期側， $-\sigma$ は高周期側）へおおむね平行に移動する。平均値の赤線とばらつきのグレーがほぼ一致することから、 $\pm 1\sigma$ でばらつきを有していても加速度応答スペクトルはこの範囲にほぼ収まることが確認できた。



第2.2.2-2図 モンテカルロシミュレーションにおける加速度応答スペクトル

2.2.3 まとめ

表層地盤（埋戻し土）の平均値とばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーションの結果から表層地盤全体の G_0 が一定の確率密度分布（品質管理下の限定的なばらつき）を有していれば，平均値で与えた均質地盤の加速度応答スペクトルとおおむね一致することが確認できた。

2.3 埋戻し土の物性設定のまとめ

- 埋戻し土は、一定の品質管理の下で施工されていることが確認できたことから、全エリアのボーリングデータを統計的に扱って得られる同一の物性値を用いることが適切である。
- 物性値は、平均値よりも1次の深度依存回帰を用いる方が予測モデルとしては適切である。
- 均質であることが確認された物性値のばらつきは、平均値 $\pm 1\sigma$ に包含される。

3. 流動化処理土の物性に係る検討

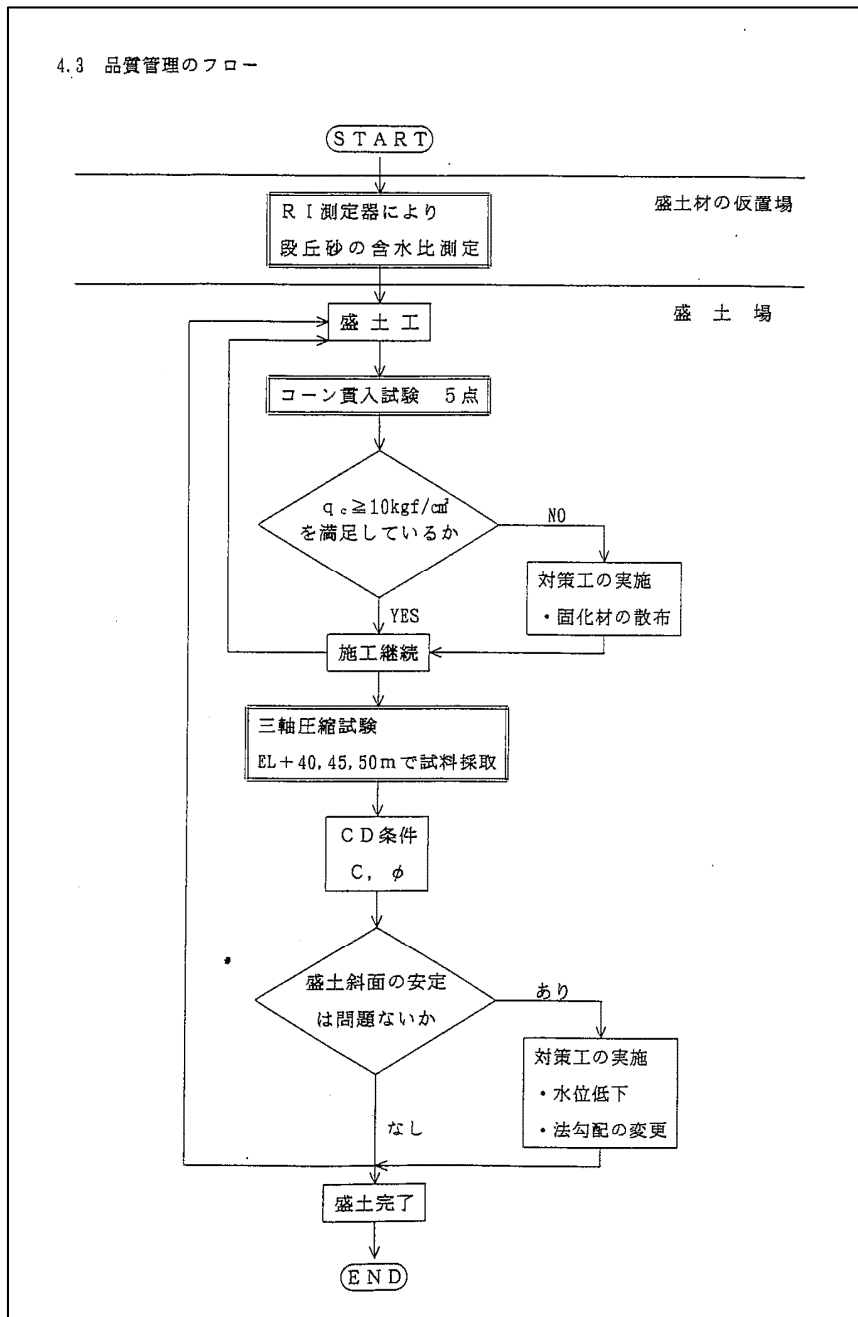
追而

参考 1

埋戻し土の施工に係る品質管理要領について

本編 2.1.1 埋戻し土の施工管理状況及び均質性の検討における品質管理要領を施工年代別に参考 1-1 図～参考 1-2 図のとおり示す。

4.3 品質管理のフロー



参考1-1図 1999年以前の品質管理要領

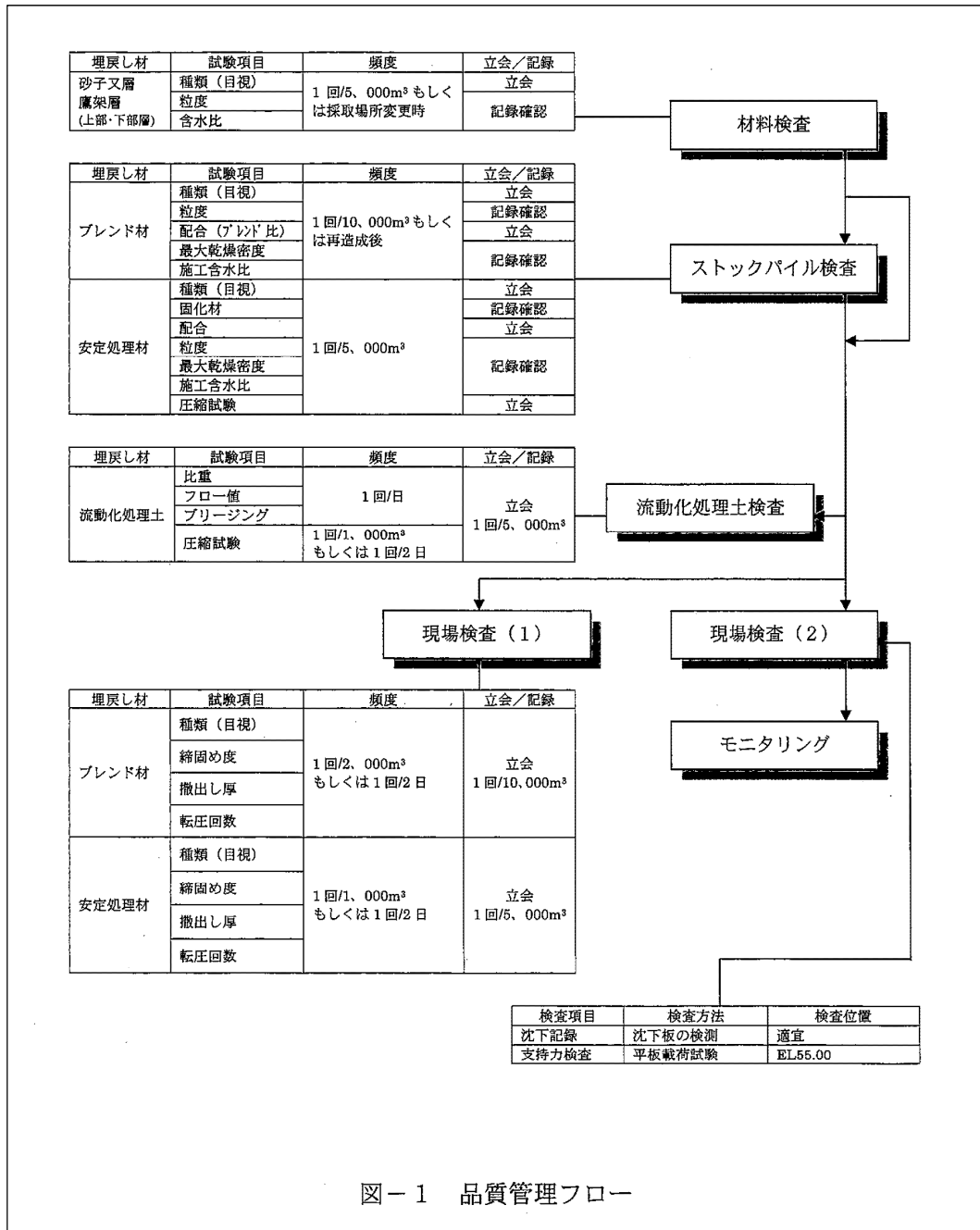


図-1 品質管理フロー

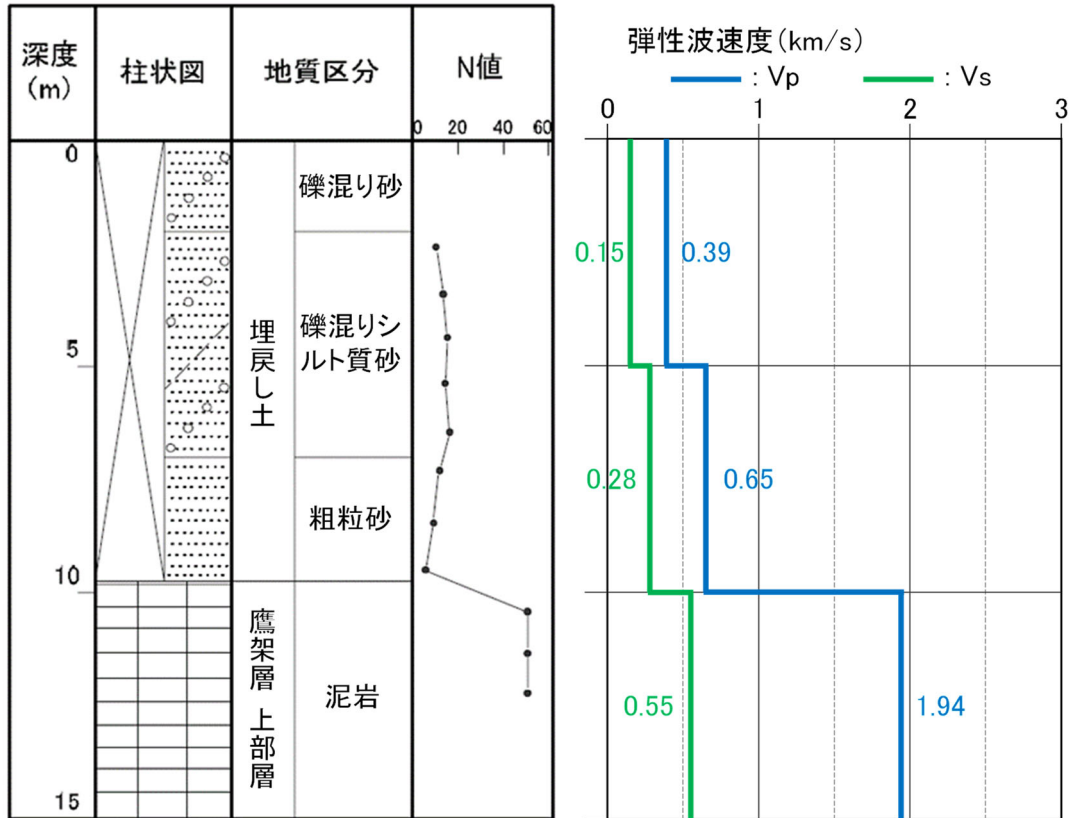
参考1-2図 2000年以降の品質管理要領

参考 2

埋戻し土のボーリング柱状図について

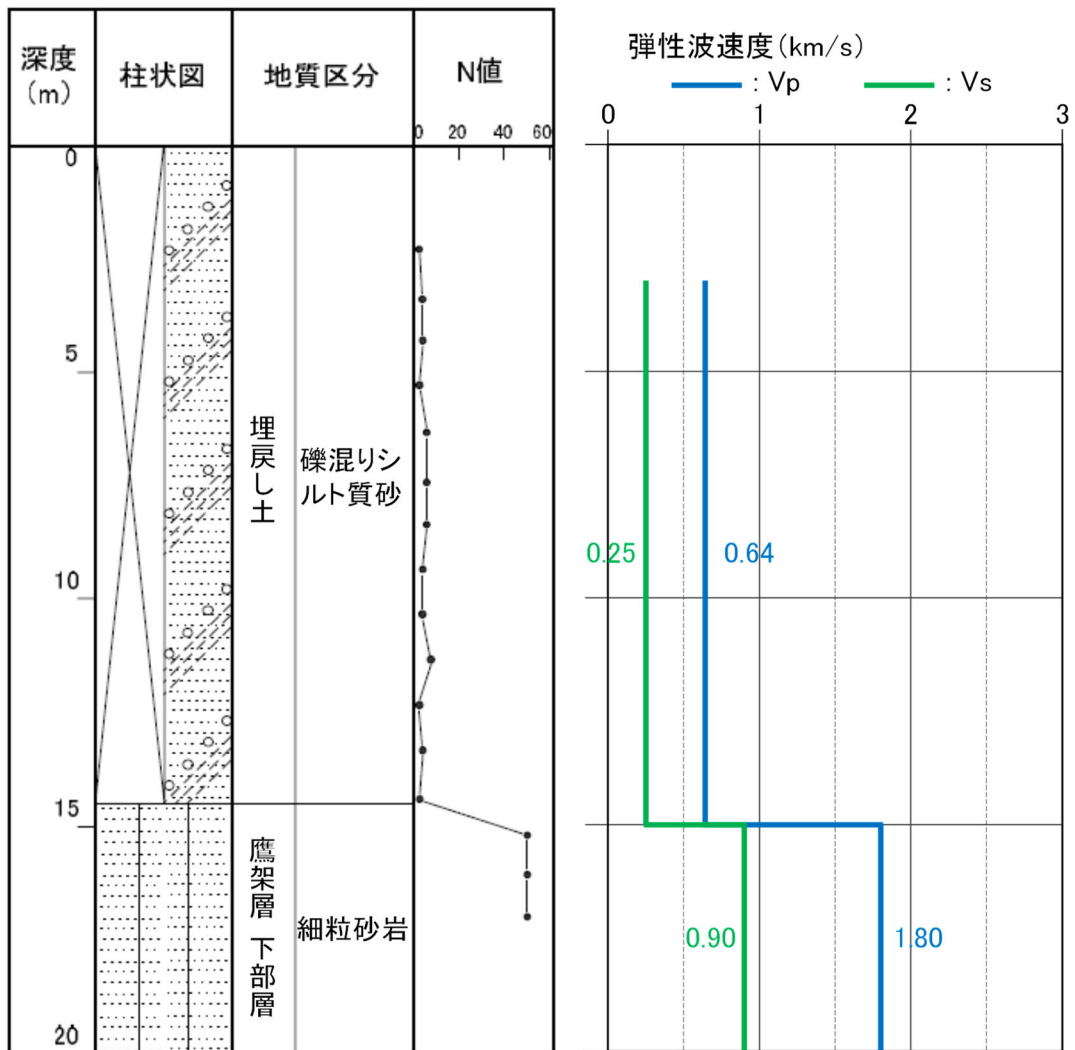
本編 2.1.2 埋戻し土の物性値設定の検討における事業変更許可申請書で設定した埋戻し土のボーリング柱状図及び物理・力学特性を参考 2-1 図～参考 2-15 図に示す。

KT-3 (孔口標高 55.17m)



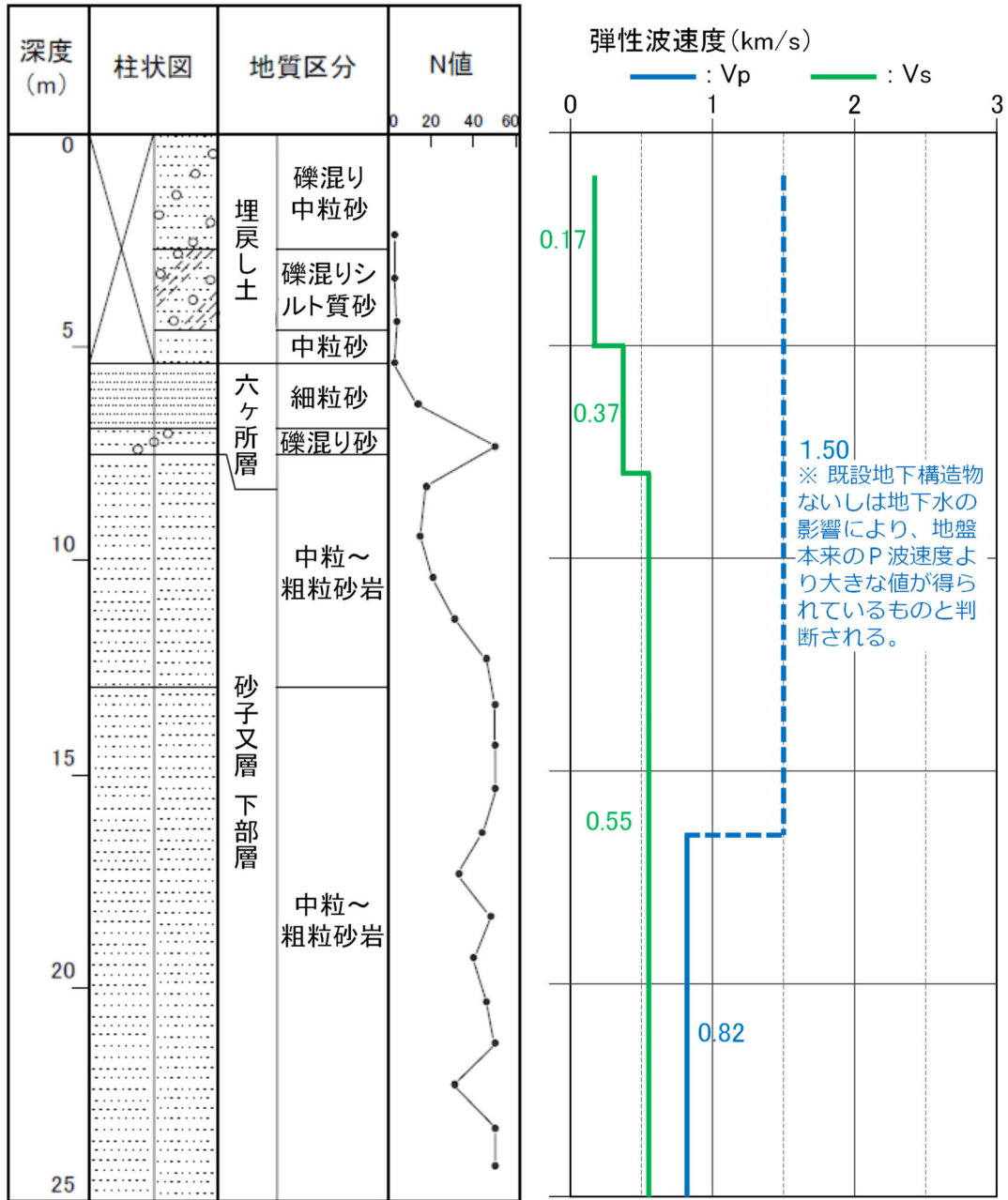
参考 2-1 図 ボーリング柱状図 (KT-3孔)

KT-5 (孔口標高 54.93m)



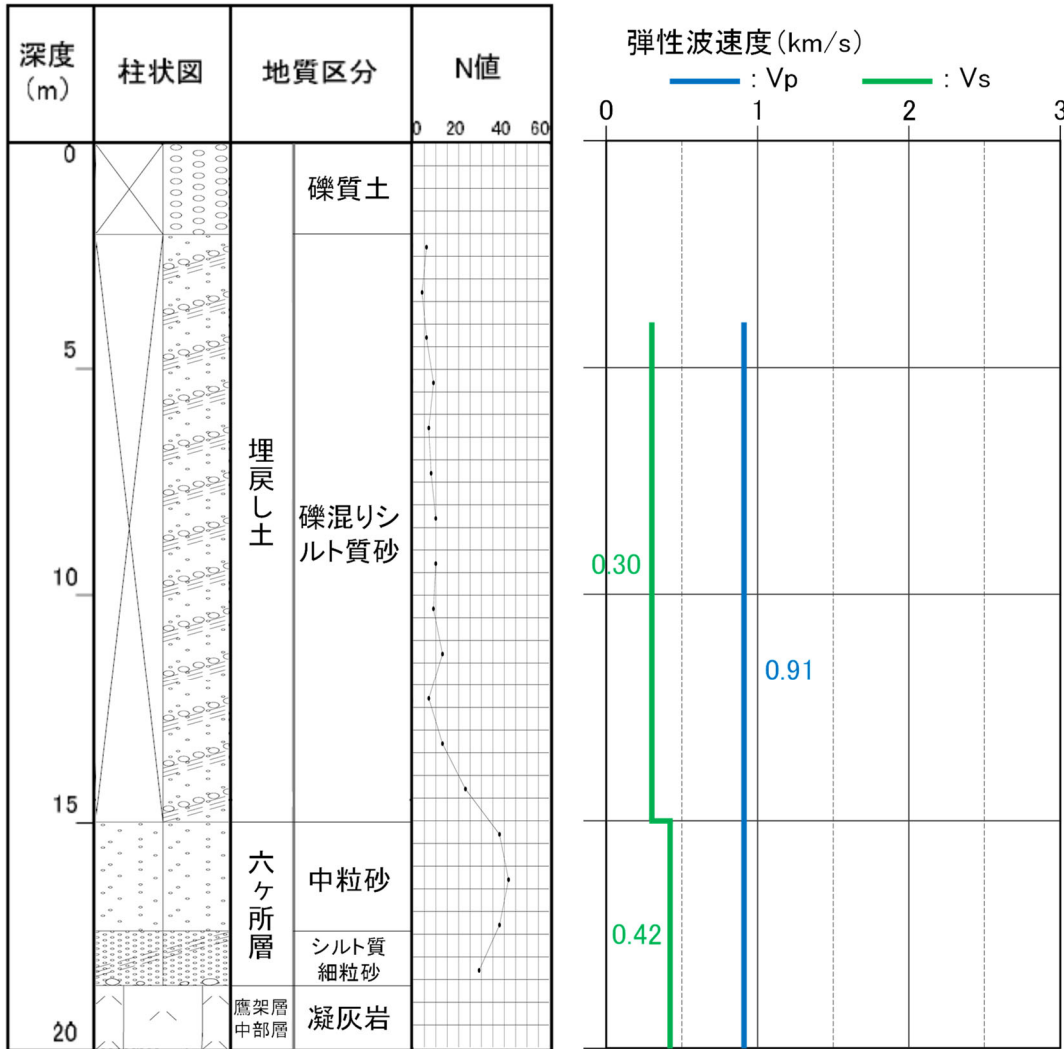
参考2-2図 ボーリング柱状図 (KT-5孔)

KT-9 (孔口標高 54.94m)



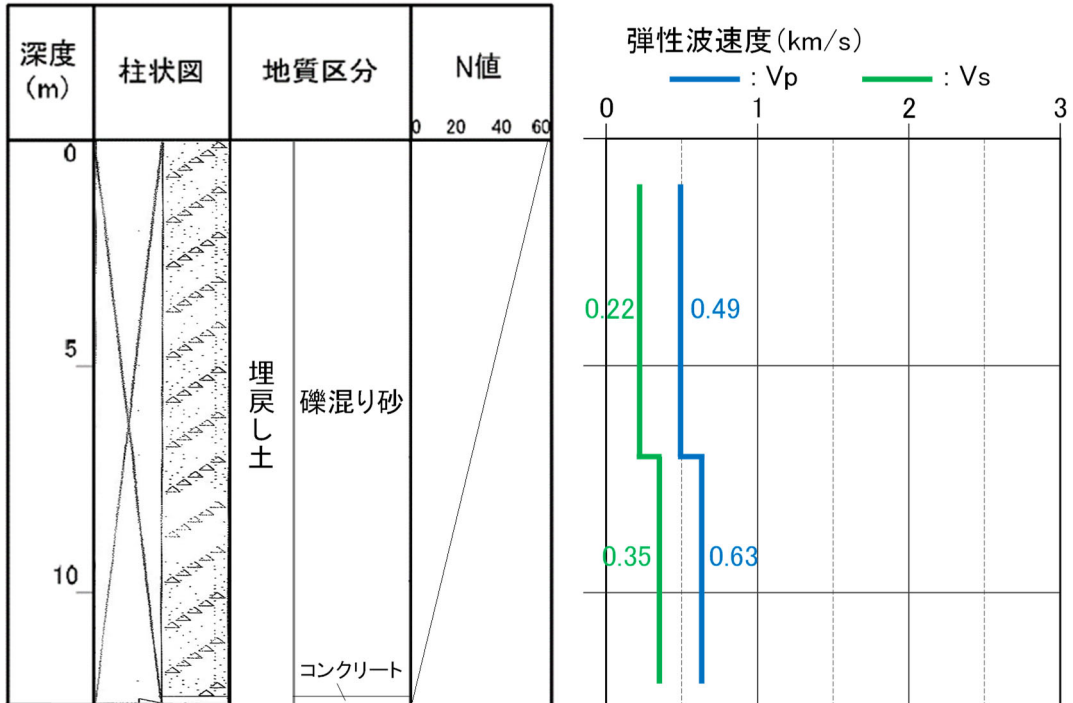
参考2-3図 ボーリング柱状図 (KT-9孔)

No.2 (孔口標高 54.99m)



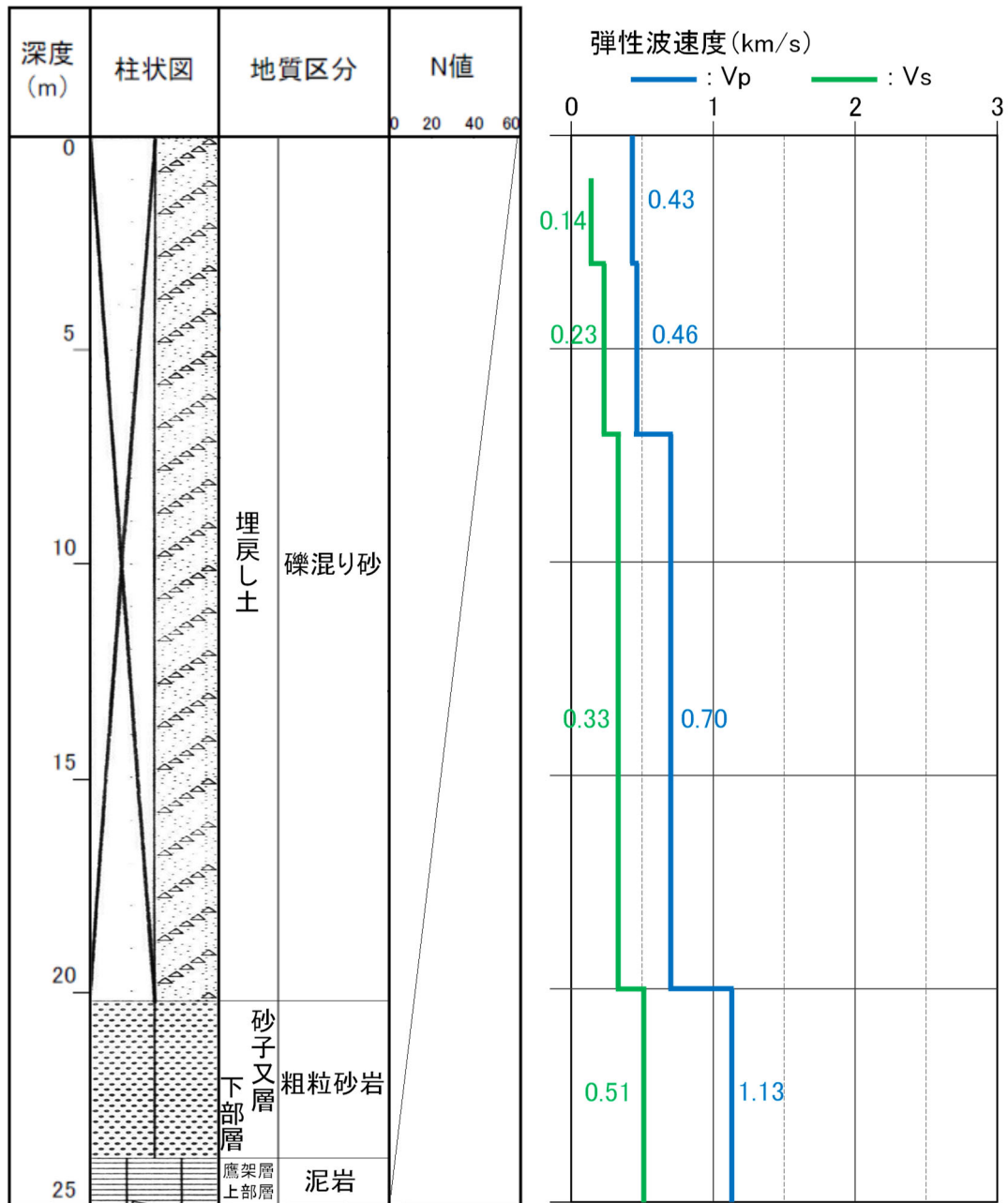
参考2-4図 ボーリング柱状図 (No. 2孔)

No.7 (孔口標高 55.20m)



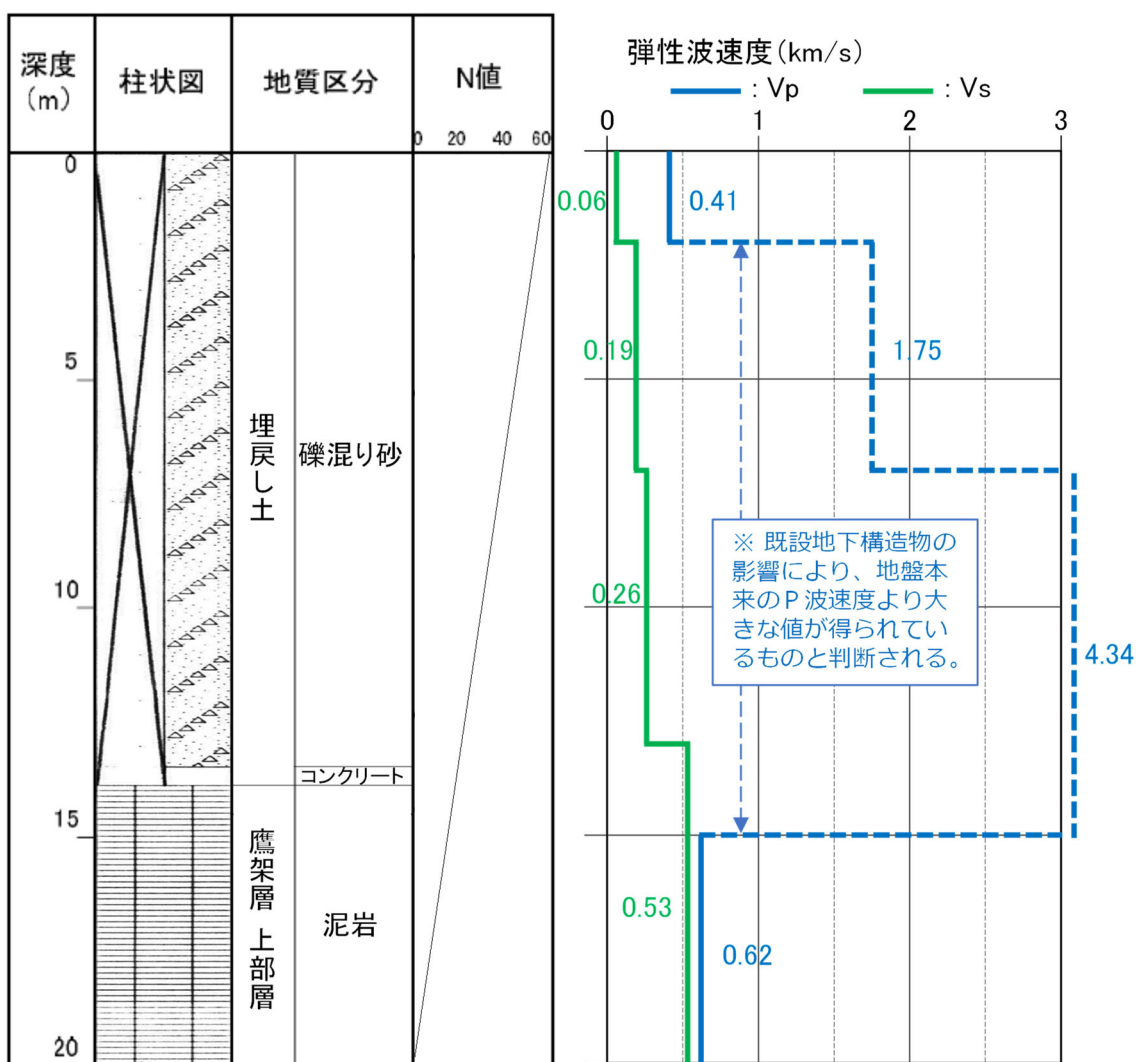
参考2-5図 ボーリング柱状図 (No.7孔)

No.8 (孔口標高 55.03m)



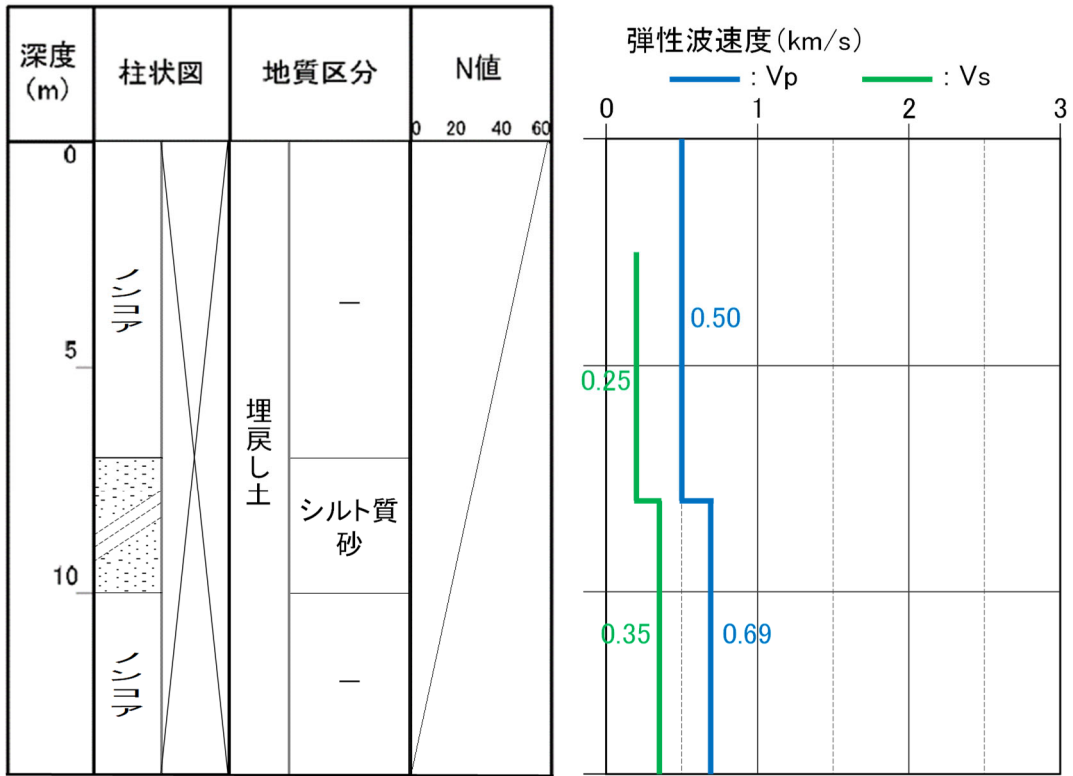
参考2-6図 ボーリング柱状図 (No. 8孔)

No.9 (孔口標高 55.10m)



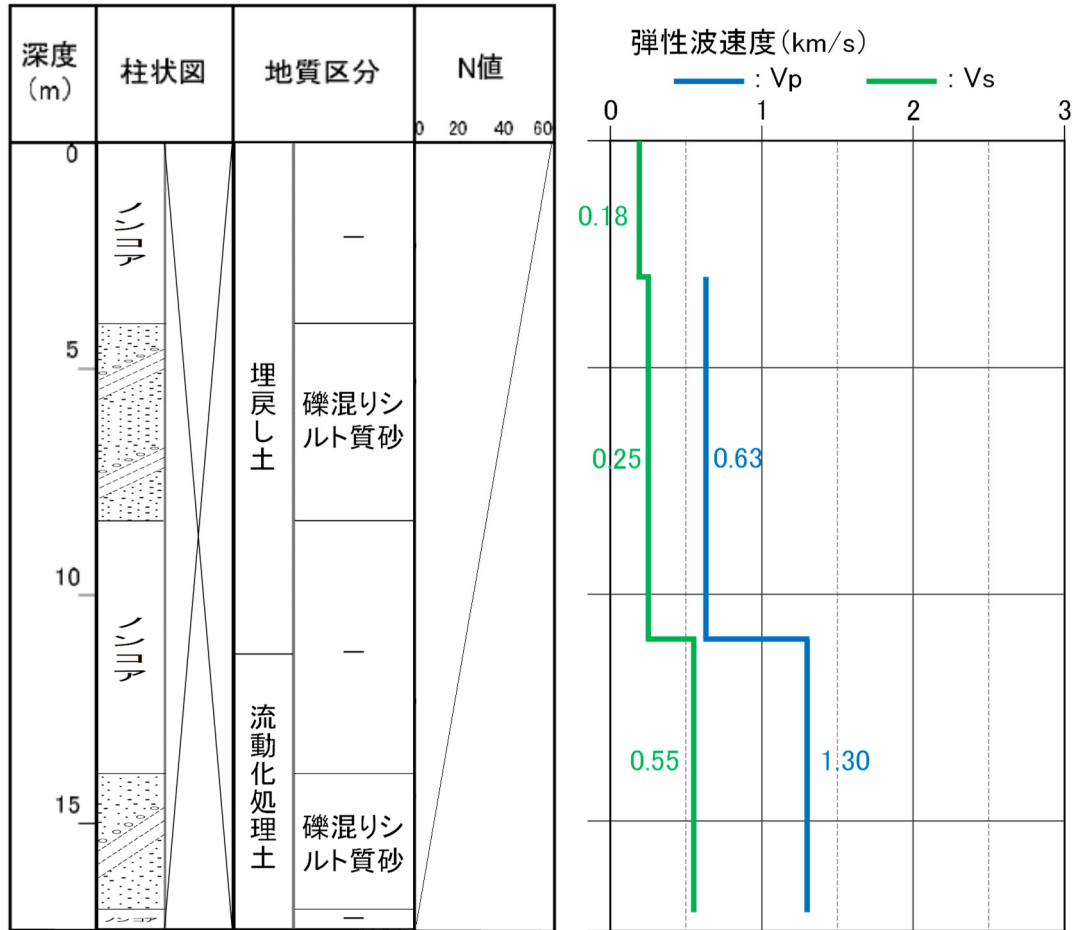
参考2-7図 ボーリング柱状図 (No. 9孔)

a-1 (孔口標高 55.03m)



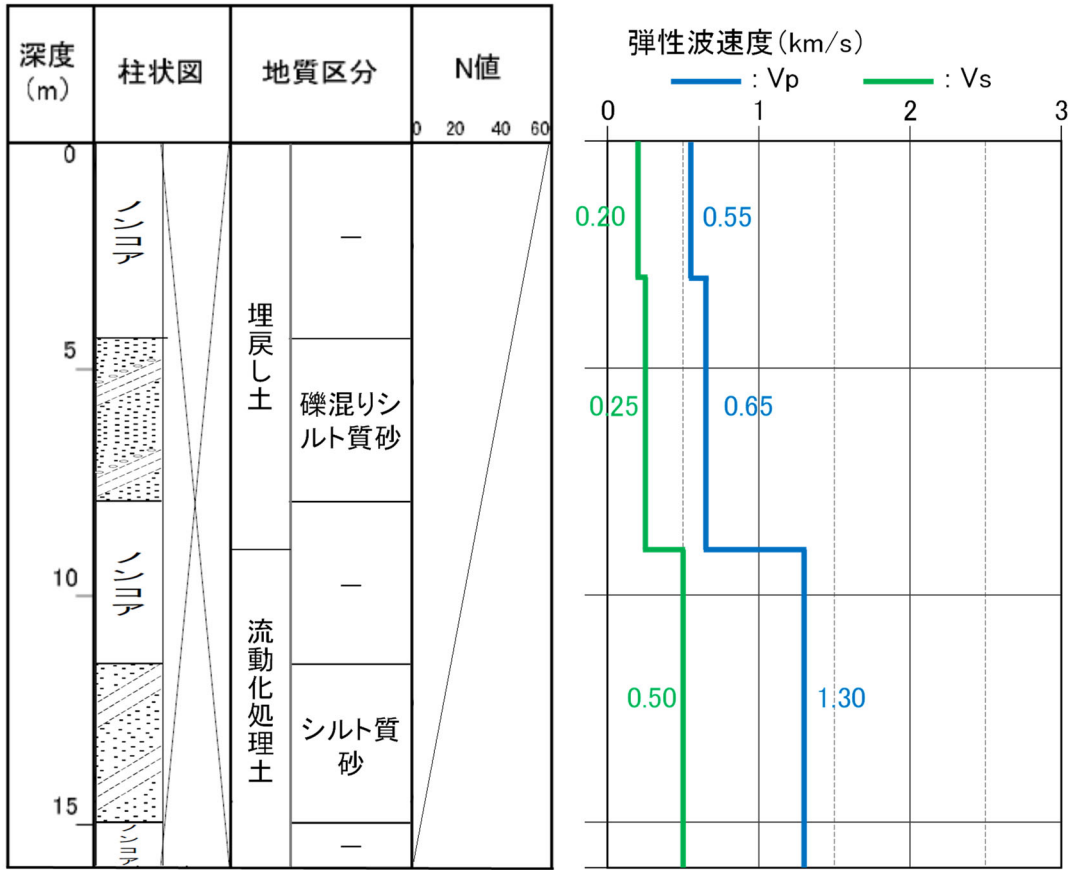
参考2-8図 ボーリング柱状図 (a-1孔)

a-4 (孔口標高 55.06m)



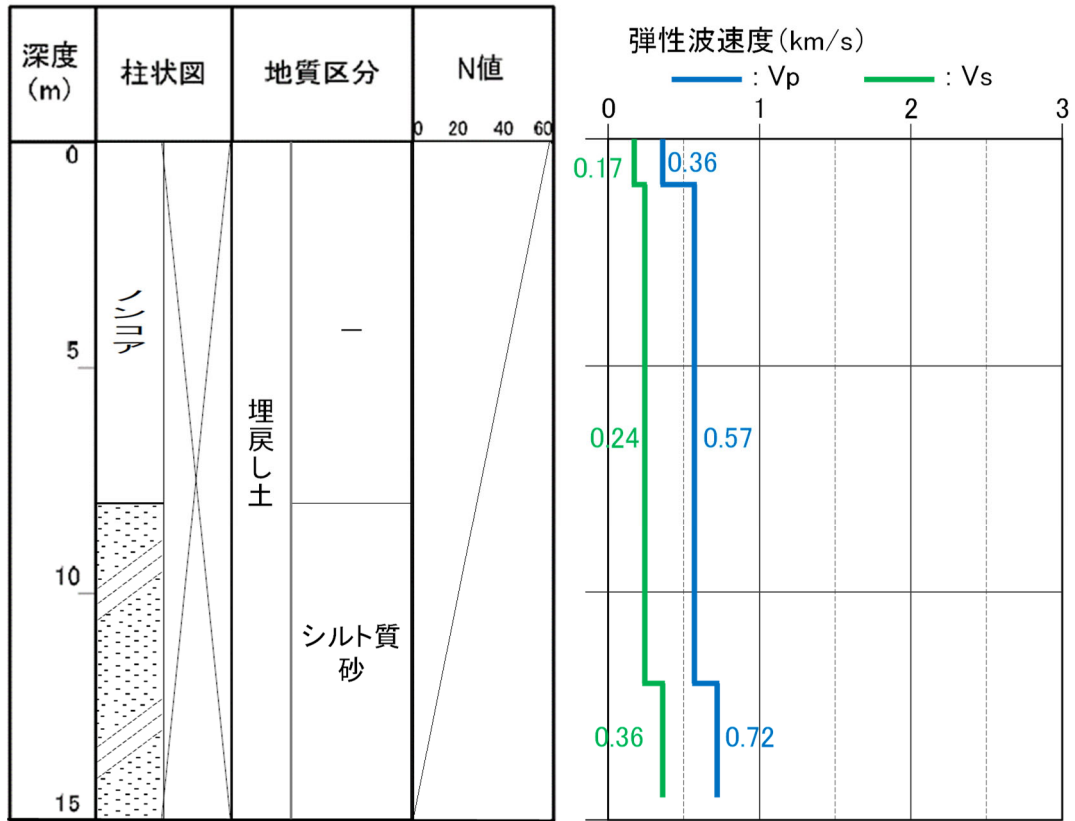
参考2-9図 ボーリング柱状図 (a-4孔)

b-2 (孔口標高 55.04m)



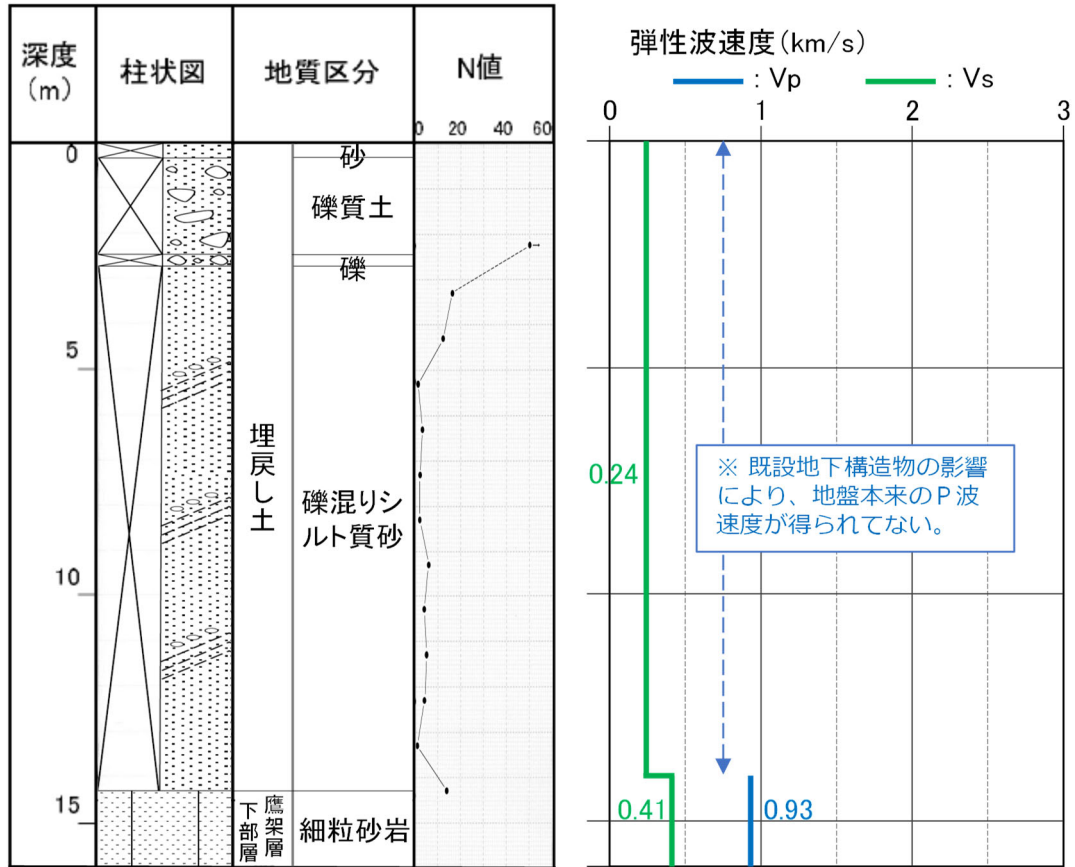
参考2-10図 ボーリング柱状図 (b-2孔)

b-4(孔口標高 54.95m)



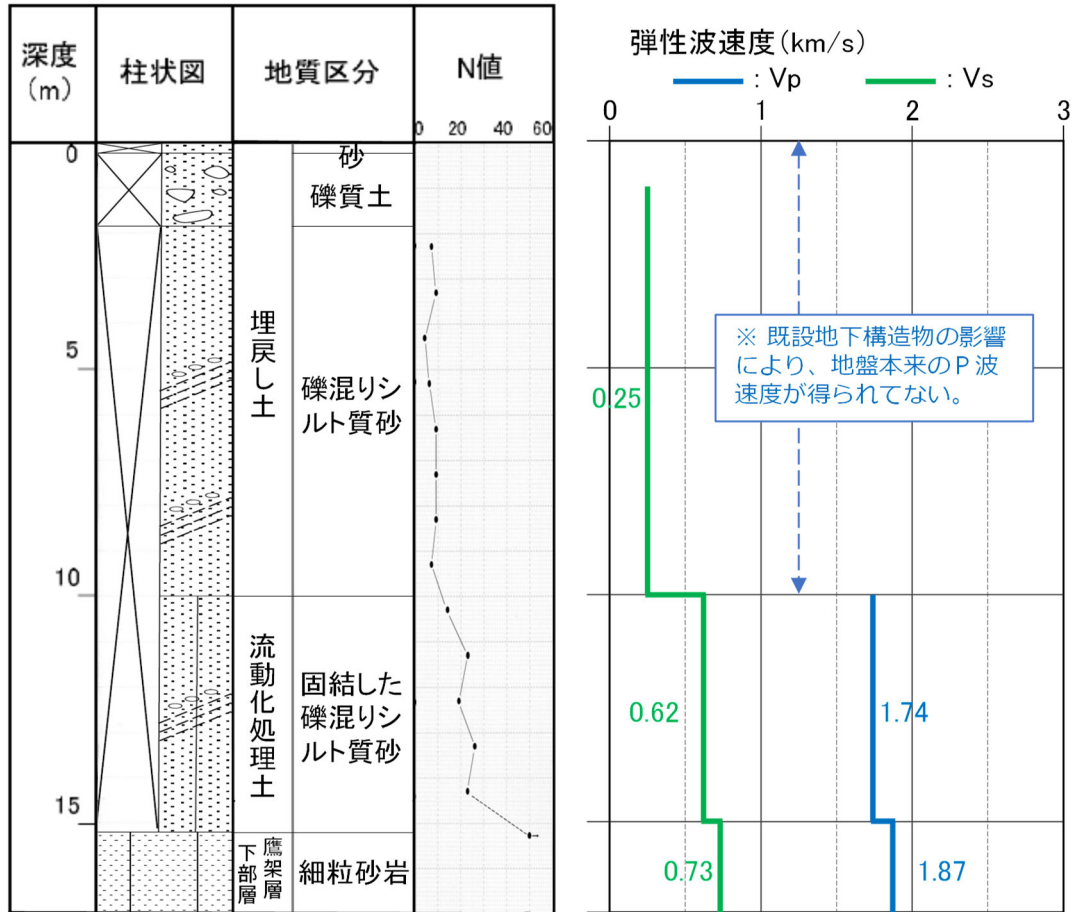
参考2-11図 ボーリング柱状図 (b-4孔)

TY-20-1 (孔口標高 54.98m)



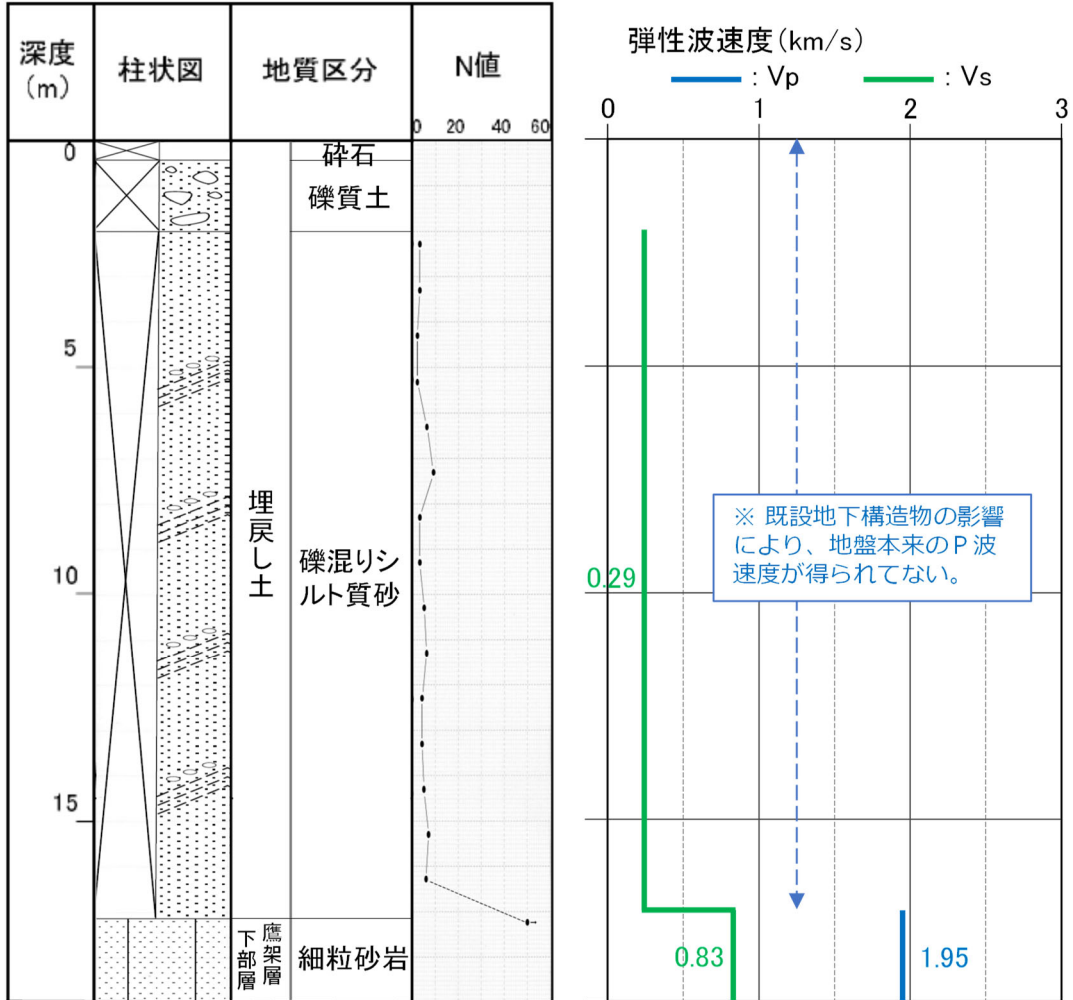
参考2-12図 ボーリング柱状図 (TY-20-1孔)

TY-20-2 (孔口標高 55.08m)



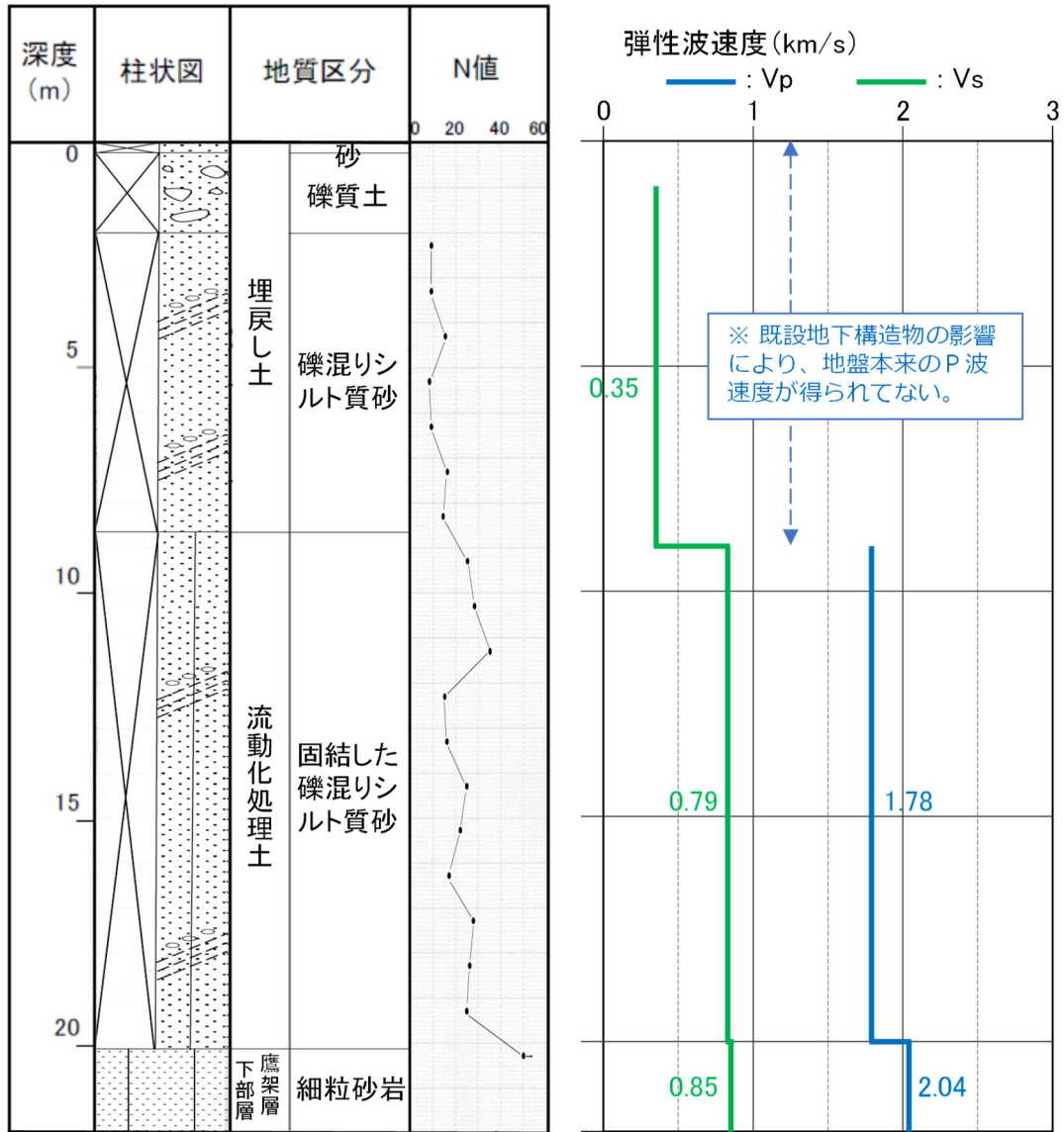
参考2-13図 ボーリング柱状図 (TY-20-2孔)

TY-20-3 (孔口標高 54.83m)



参考2-14図 ボーリング柱状図 (TY-20-3孔)

TY-20-5 (孔口標高 55.01m)



参考2-15図 ボーリング柱状図 (TY-20-5孔)