

(株) グランテック 委託研究

報告書

平成 26 年 7 月 31 日

長岡技術科学大学 環境防災研究室

教授 大塚 悟

1. 概 要

(株) グランテックで開発したスクリー・プレス工法の現場試験に関して、地盤調査およびその分析を実施した。現場試験の目的は、1) スクリー・プレス工法によるグラベル・パイルの出来型調査、2) グラベル・パイルの有無及び杭間距離の変化による改良効果の検討、3) グラベル・パイルの施工前後の杭間地盤の締固め効果、についての調査である。本委託研究では、現場試験を実施した現地地盤の力学特性の調査とグラベル・パイルの施工による杭間地盤の締固め効果の検討である。

現地の地盤調査については、チューブ・サンプリングにより採取された試料の静的および繰り返し三軸試験を実施した。また試料の物理試験及び透水試験を合わせて実施した。これらの調査データは地盤の最新の構成関係を用いて現地試験の数値シミュレーションを実施するための基礎データに用いる。

また、グラベル・パイルの施工前後の標準貫入試験およびスウェーデン式サウンディングによる調査結果に基づいて、グラベル・パイルによる杭間地盤の締固め効果の検証を液状化判定に基づいて実施した。

グラベル・パイルによる液状化対策効果は本来、1) グラベル・パイルの支持力、2) グラベル・パイルの排水機能、3) グラベル・パイルによる食い感地盤の締固め効果、がある。本委託研究の目的は、地盤の力学試験を実施する点にあり、将来に上記の1)、2)を数値解析的に検討する際の、地盤定数を定めるための基礎的試験を実施することと、3) グラベル・パイルの打設による杭間地盤の締固めによる液状化耐力の上昇効果に関する検証にある。

2. 不攪乱試料の物理試験

高岡市伏木万葉ふ頭より採取した土試料を用いて物理試験を実施した。試験試料の物理的力学特性を求める試験方法を表-2.1に示す。表の規格番号は日本工業規格もしくは地盤工学会の基準を示している。試験結果を表-2.2、及び図-2.1に示す。伏木現地採取試料の大部分は砂質土で、粒径 0.106~0.25mm の細砂で構成される。試料の内訳は、粘土・シルト分が 12.5%、砂が 87.5%である。

表-2.1

試験	規格番号	基準名
物理試験	JIS A 1202	土粒子の密度試験
	JIS A 1204	土の粒度試験
	JIS A 1224	土の湿潤密度試験(ノギス法)
	JIS A 1225	砂の最小密度・最大密度試験
せん断試験	JGS 0523	土の圧密非排水三軸圧縮試験
	JGS 0541	土の繰返し非排水三軸圧縮試験

表-2.2

最大乾燥密度 $\rho_{d \max}$	1.508 g/cm ³	最大粒径	2.00 mm
最小乾燥密度 $\rho_{d \min}$	1.124 g/cm ³	60% 粒径 D60	0.15 mm
土粒子密度 ρ_s	2.627 g/cm ³	50% 粒径 D50	0.12 mm
最大間隙比 e_{\max}	1.338	30% 粒径 D30	0.098 mm
最大間隙比 e_{\min}	0.724	10% 粒径 D10	0.063 mm
細粒分含有率 F_c (%)	12.5	均等係数 U_c	2.38
		曲率係数 U'_c	1.02

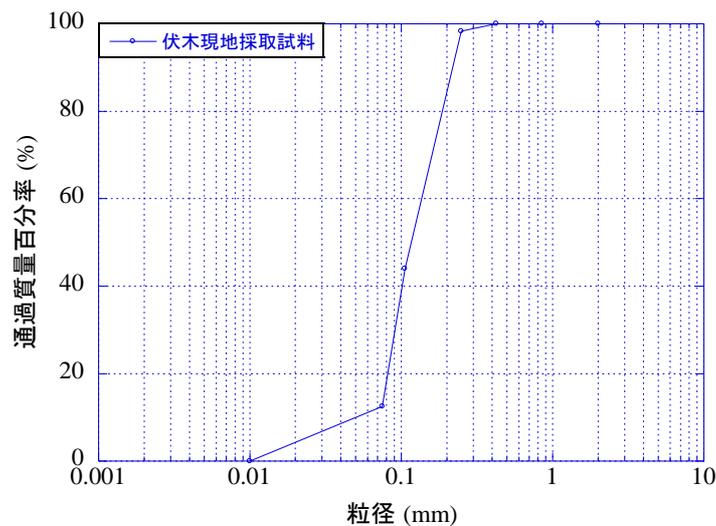


図-2.1 伏木現地採取試料の粒径加積曲線

3. 不攪乱試料の力学試験

3. 1 試験装置の概要と試験手順

三軸圧縮試験装置は供試体の圧力をコントロールできる三軸室とそれに接続している空気・水系の経路によって構成されている。供試体上部のキャップおよび下部のペDESTALには、ポーラスメタルが取り付けられており、供試体内の間隙水の出入りはこれを通じて行われる。排水・非排水の制御は三軸室の外に設けられている弁の開閉によって行われる。

本試験では試験中の計測及び制御を自動で行なうことで人為的誤差を排除し、より再現性の高い試験を行う。試験中に計測される項目は、軸変位・軸荷重・セル圧・間隙水圧・吸排水量の 5 項目である。各計測器で測定される情報は、ギャップセンサーはアンプを介して、水圧計・ロードセル・垂直変位計は直接デジタルロギングシステムを通じて、コンピュータのハードディスクに記録される。非排水試験では飽和供試体の体積変化量は吸排水量に等しいことを利用して、吸排水量をギャップセンサーにより測定して 1/100 cc まで正確に測定できる。また、飽和度を高めるためにギャップセンサーを介して、供試体上下端からバックプレッシャーを作用させている。軸変位は、垂直変位計により 20 mm まで連続して計測することが可能であり、1/100 mm の精度で軸方向変位を測定する。軸荷重は防滴型の耐水圧水中ロードセルを使用し、5 kN まで測定できる。

繰返し荷重は空圧式のサーボコントローラにより、ピストン制御している。載荷荷重は、 ± 5 kN まで載荷することが可能である。載荷サイクル及び周波数は正弦波・矩形波及び外部から載荷波を入力でき、周波数は 0.01~10 Hz まで制御できる。

飽和供試体の圧密非排水試験の試験手続き（フロー・チャート）を図-3.1 に示す。供試体は三軸試験機に設置してメンブレンを取り付ける。二重負圧法によって脱気・通水し、供試体を飽和させる。その後、1 日間放置して飽和度を高めた後に、供試体下部から脱気水を水頭差により供試体に通水する。飽和度を確認するために、間隙水圧係数 B を計測する。 B 値が 0.95 以上であれば、飽和していると見なして試験を実施する。 B 値が 0.95 未満の場合は、飽和度が十分でないために二重負圧法からやり直す。試験の実施に際して、供試体を飽和させるためにバックプレッシャーを 100 kPa 作用させた。その後、等方圧密により所定の初期応力状態を設定する。圧密の判定は 3t 法を用いる。非排水試験は軸

ひずみ速度を 0.05 %/min（6 時間せん断）として実施した。

繰り返しせん断試験では等方圧密終了後、所定の繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$ となるように繰返し荷重を設定し、荷重振幅 0.1 Hz 一定、拘束圧一定で、非排水条件のもとで繰返しせん断を行う。繰返しせん断の終了は、両振幅軸ひずみ DA が 5%以上に達した場合、もしくは、繰返し回数が 200 回を超えた場合とした。

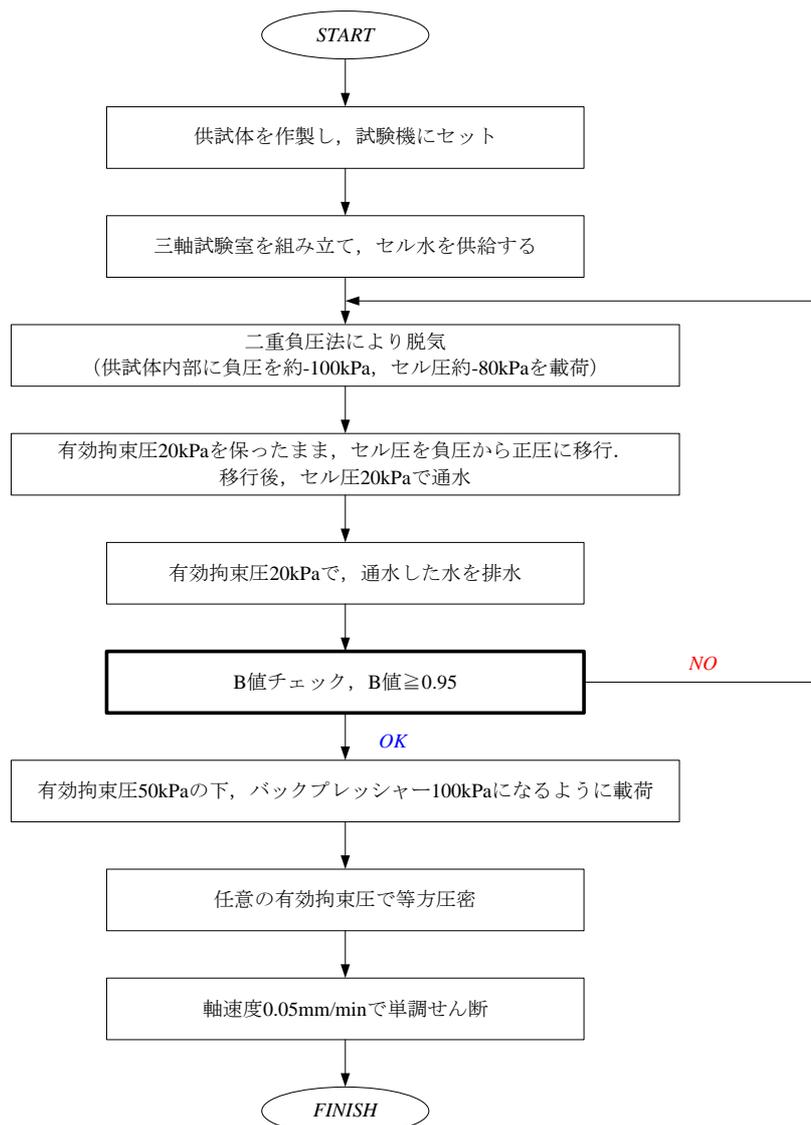


図-3.1 飽和供試体の圧密非排水三軸圧縮試験のフロー・チャート

3. 2 静的せん断試験

表-3.1 に圧密非排水三軸圧縮試験の実施ケースを示す。実験に当たり、供試体の飽和度が上がらない問題が発生した。現地で採取した不攪乱試料を飽和さ

せるために、バックプレッシャーを載荷したり、通水したが飽和度が上昇しない問題が発生した。数多くの供試体を用いて試験を実施するとともに、試験法の見直しや、現地採取土と異なる室内人工作成試料の試験を実施するなどの検討を実施したが、現地採取土の場合には飽和度が上がらない事例が多数発生して試験をやり直した。

人工供試体の場合には試料の飽和度が上がることから、現地採取土に問題があると判断して、試料下端からの通水時間を大きく変化（長期化）させて、 B 値により飽和度のチェックを行った。その結果、今回の現地採取土は通常のチューブ・サンプリングによる供試体採取後に凍結して試料を保存しているが、凍結するまでに試料から水分が流出して相当程度不飽和になっていたと推察される。その後凍結して不飽和状態が保存されたまま、三軸試験機にセットしたと考えられる。三軸試験機での試料の飽和化や通水は動水勾配が小さいために、試料を飽和化させる能力は小さく、試料が著しい不飽和土の場合には砂質土にもかかわらず、簡単に飽和しないことが分かった。試料の飽和化に長時間を費やす方法に変えたところ、飽和度が上がり、試験を実施することがようやく可能になった。検討に多数の供試体と実験時間が必要であったため、当初の予定に対して実験ケースが少なくなった。

表-3.1 圧密非排水三軸圧縮試験の実施ケース

試料	有効拘束圧(kPa)	背圧(kPa)	載荷速度(%/min)
伏木現地採取試料	50	100	0.1
	70		
	100		

供試体（直径 5 cm・高さ 10 cm）に背圧 100 kPa, 有効拘束圧 50・70・100 kPa, の条件を与えて、軸ひずみ速度 0.05 mm/min にて圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。図-3.2 は軸差応力 q と平均有効主応力 p' の関係図、図-3.3 は軸差応力 q と軸ひずみ ε の関係図、図-3.4 は間隙水圧 u と軸ひずみ ε の関係図である。モールの応力円を作製した。図-3.5 にモール・クーロンの破壊基準を示す。破壊基準による結果を表-3.6 に示す。

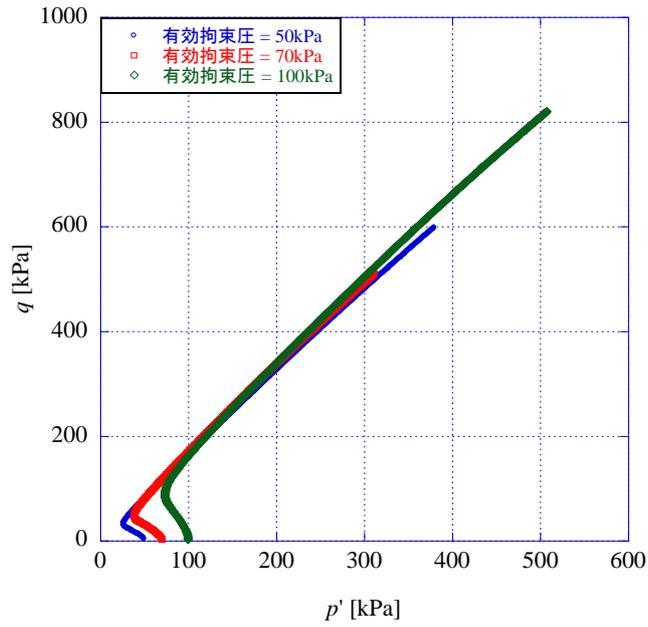


図-3.2 有効応力経路

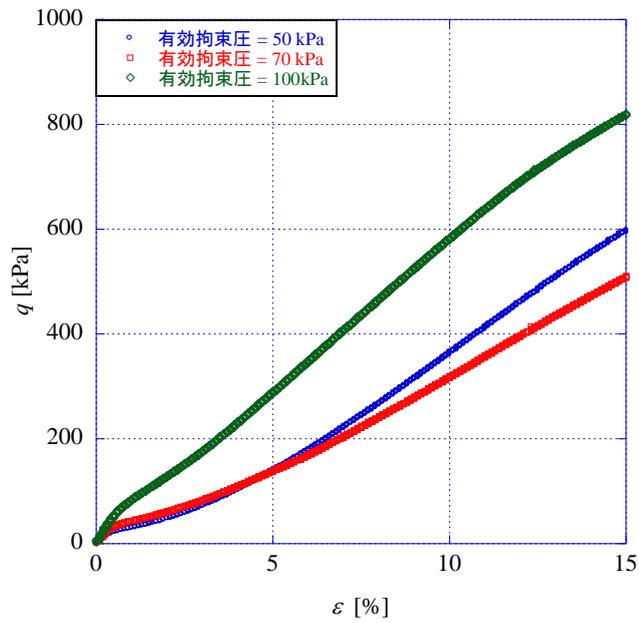


図-3.3 軸差応力 q —軸ひずみ ε 関係

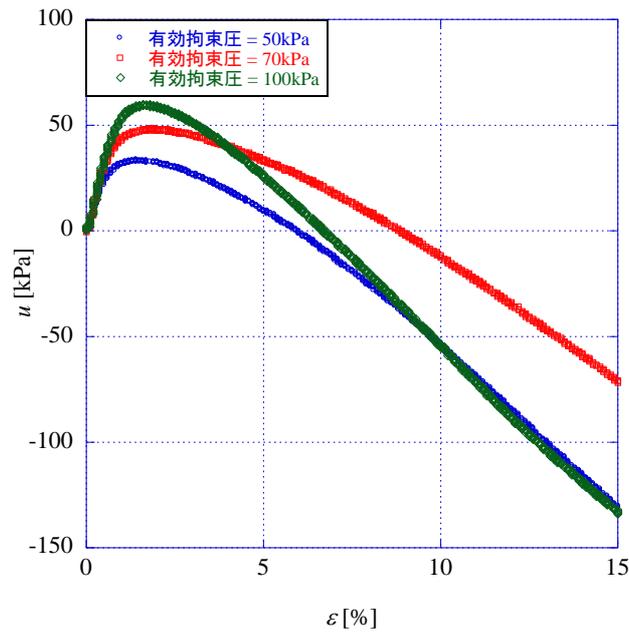


図-3.4 間隙水圧 u - 軸ひずみ ε 関係

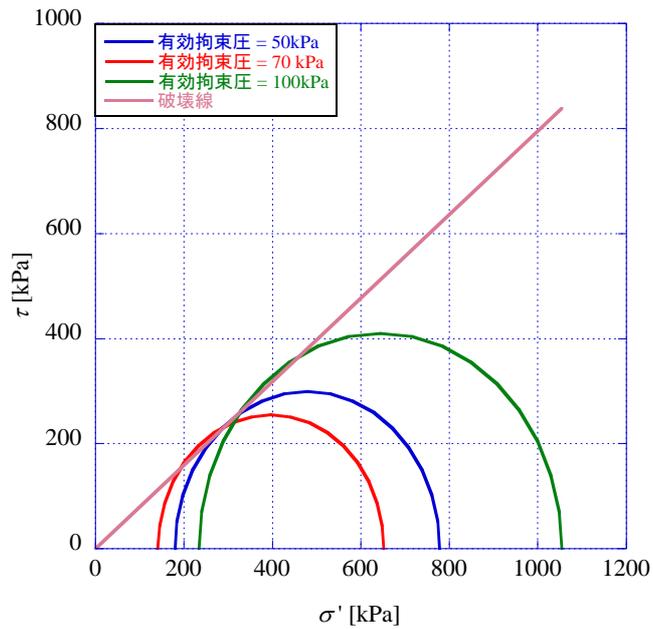


図-3.5 非排水試験のモールの応力円

表-3.2 得られた強度定数

粘着力 c' (kPa)	0
内部摩擦角 φ' (°)	38.5

3. 3 繰り返しせん断試験

表-3.3 に非排水繰り返し船団試験の試験ケースを示す。試験は背圧 100 kPa, 有効拘束圧 100 kPa, 周波数 0.1 Hz にて繰返し非排水三軸圧縮試験を行った。繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0 = 0.275$ の試験結果を, 図-3.6, 3.7 に示す。図-3.6 は, 軸差応力 q と平均有効主応力 p' の関係図である。図-3.7 は軸差応力 q と軸ひずみ ε の関係図である。図-3.8 に両振幅ひずみ $DA=5\%$ における, 繰返し応力振幅比と繰返し回数との関係図を示す。液状化強度は図で繰返し回数 20 回時の繰返し応力比から定義される。試験結果より液状化強度は $\sigma_d/2\sigma'_0 = 0.225$ と得られた。

表-3.3 非排水繰り返し三軸圧縮試験の実施ケース

試料	有効拘束圧(kPa)	背圧(kPa)	周波数(Hz)	繰返し応力振幅比
伏木現地採取試料	100	100	0.1	0.179
				0.219
				0.275

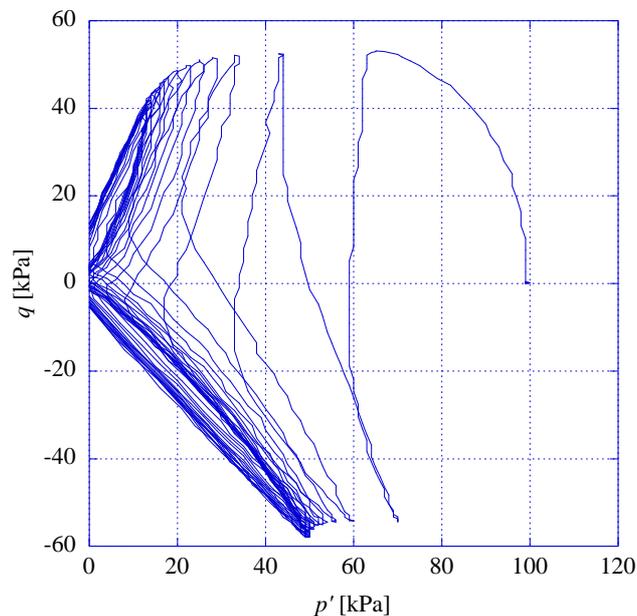


図-3.6 有効応力経路 (繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0 = 0.275$)

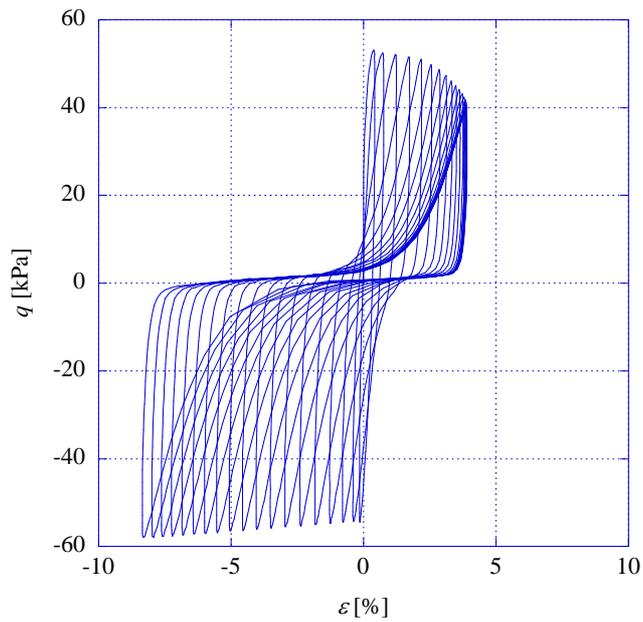


図-3.7 軸差応力 q —軸ひずみ ε 関係 (繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0 = 0.275$)

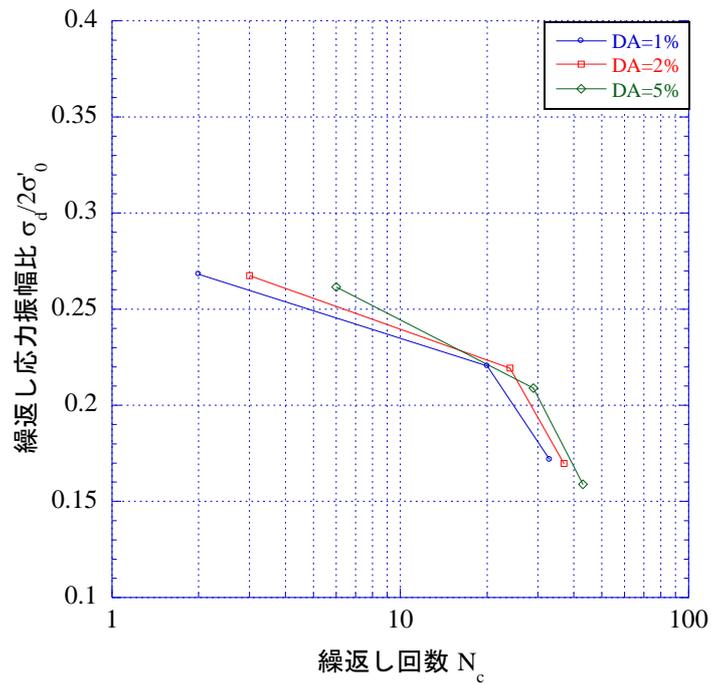


図-3.8 液状化強度曲線 (液状化強度 $\sigma_d/2\sigma'_0 = 0.225$)

4. 地盤改良による杭間地盤の締固め効果

グラベル・パイルの施工による杭間地盤の締固め効果は SCP (締固め砂杭工法) と同様の施工原理であることから、SCP で確立されている設計手法を用いて杭間地盤の締固め効果の評価について考察する。以下に、締固め砂杭工法 (SCP) の設計法および液状化判定法の手法を示し、グラベル・パイルの杭間地盤の締固め効果についての定量的評価を行う。この検討はスクリー・プレス工法の設計法の検討の視点から重要である。

4. 1 SCP (締固め砂杭工法) の設計法

SCP の設計法を用いて、地盤の初期 N 値、全応力、有効応力、パイルピッチから、地盤改良後に期待される N 値を経験式から求める。この算出過程で、地盤の初期 N 値は SWS 試験の結果、全応力、有効応力は三成分コーン貫入試験の結果を用いる。また、計算はパイルピッチが同じ値のエリアにおけるデータを平均して用いる。また、細粒分含有率 F_c は、現地試料の物理実験より得られた 12.5% を用いる。

4. 1. 1 細粒分含有率を考慮した設計法

この設計法では、 $N-D_r-e$ の関係にマイヤーホッフの式を用い、最大・最小間隙比の推定に平間の実験式を用いる。原地盤の N 値および改良目標 N 値、地盤の有効上載圧から、原地盤の間隙比および改良後地盤の間隙比を決定して、地盤改良の置換率を求める設計法である。

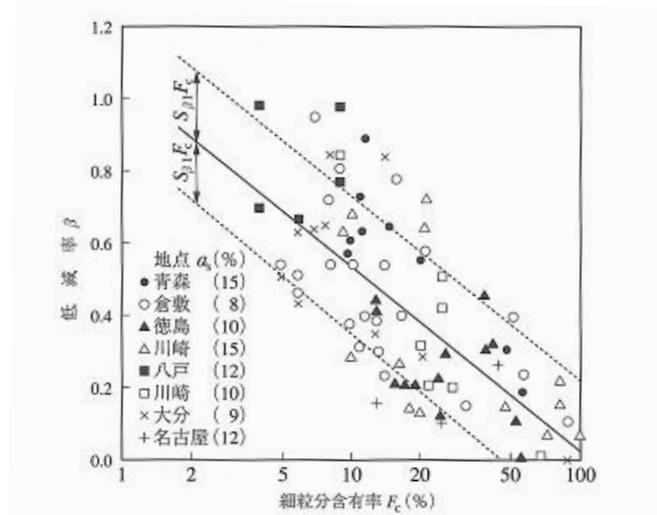


図-4.1 細粒分含有率と N 値低減率 β との関係

手順 2.での改良効果低減率と細粒分含有率は図-4.1 に示す関係がある。細粒分が多いと $\beta < 1$ であり、改良率が細粒分のない状態の計算改良率より大きくなる。この設計法を応用し、以下の手順で改良後地盤に期待される N 値を求める。

1. 細粒分含有率 F_c (%)より改良前地盤の最大間隙比 e_{max} と最小間隙比 e_{min} を求める。

$$\text{最大間隙比 } e_{max} = 0.02F_c + 1.0$$

$$\text{最小間隙比 } e_{min} = 0.008F_c + 0.6$$

2. 細粒分含有率 F_c による増加 N 値に対する改良効果低減率 β を以下の式から求める。

$$\beta = \frac{\Delta N}{\Delta N'} = \frac{N_1 - N_0}{N'_1 - N_0} = 1.05 - 0.51 \log F_c$$

3. 改良前地盤 N 値 N_0 および拘束圧 σ'_v (kN/m²)から相対密度 D_{r0} と改良前地盤の間隙比 e_0 を以下の式から求める。

$$\text{相対密度 } D_{r0} = 21\sqrt{N_0/(0.7 + \sigma'_v/98)}$$

$$\text{初期間隙比 } e_0 = e_{max} - \frac{D_{r0}}{100}(e_{max} - e_{min})$$

4. 改良率 a_s を求める。

$$\text{正方形・矩形配置 } a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x^2} = \frac{A_s}{x_1 \cdot x_2}$$

$$\text{正三角形配置 } a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_s}{x^2}$$

5. 改良率 a_s から改良後地盤の間隙比 e_1 を求める。

$$a_s = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0}$$

$$e_1 = e_0 - a_s(1 + e_0)$$

6. 改良地盤の間隙比 e_1 を用いて、改良後地盤の相対密度 D_{r1} を求める。

$$e_1 = e_{max} - \frac{D_{r1}}{100}(e_{max} - e_{min})$$

$$D_{r1} = \frac{100(e_{max} - e_1)}{e_{max} - e_{min}}$$

7. 改良後地盤の相対密度 D_{r1} を用いて改良後地盤の細粒分の影響がない場合の計算 N 値 N_1' を求める.

$$D_{r1} = 21\sqrt{N_1/(0.7 + \sigma_v'/98)}$$

$$N_1' = (D_{r1}/21)^2 \times (0.7 + \sigma_v'/98)$$

8. 低減率を考慮し、改良後の期待 N 値 N_1 を求める

$$\beta = \frac{N_1 - N_0}{N_1' - N_0}$$

$$N_1 = N_0 + (N_1' - N_0) \cdot \beta$$

4. 1. 2 SCP の細粒分含有率，体積変化を考慮した設計法

前節での設計法は地盤改良施工後の N 値の N_1 を事前 N 値の N_0 ，細粒分含有率 F_c および改良率 a_s から推定しており，**図-4.2(a)**のように杭の打設時に地盤は体積変化を生じないものと仮定している．すなわち，杭の圧入はすべての地盤の密度増加に寄与するものとし，この密度状態での推定 N 値である N_1' をまず求めている．しかし，実際には地盤中の細粒分含有率 F_c が増加すると，締固め効果が減殺されて杭圧入時に地盤の盛り上がりが生じるため，設計計算の最終段階で改良効果低減率 β を用いて事後 N 値である N_1 を求めている．したがって，計算の途中で導かれる改良後の間隙比 e_1 および相対密度 D_{r1} は細粒分を含む地盤については妥当な値とはならない．そこで，**図-4.2(b)**のように杭打設後の地盤の変化を考え，その体積変化率を地盤の細粒分含有率 F_c と関連付けている．これにより，改良後の間隙比 e_1 および相対密度 D_{r1} について正当な評価を行うことが可能であり，現場での地盤の盛り上がり，あるいは室内での締固め試験などの結果と関連付けることができる．そこで，細粒分による体積変化のパラメータとして“有効締固め係数 R_c ”を導入すると，改良後の間隙比 e_1 は**図-4.2(b)**のようになる．

本推定方法の提案における有効締固め係数 R_c への寄与率の高いパラメータとなる地盤要素には，現場実測データの解析より細粒分含有率 F_c が最も有効締固め

係数 R_C に対して相関関係が高い結果が得られている。図-4.3と図-4.4に振動式SCP、静的締固め砂杭の細粒分含有率 F_C -有効締固め係数 R_C の関係を示す。

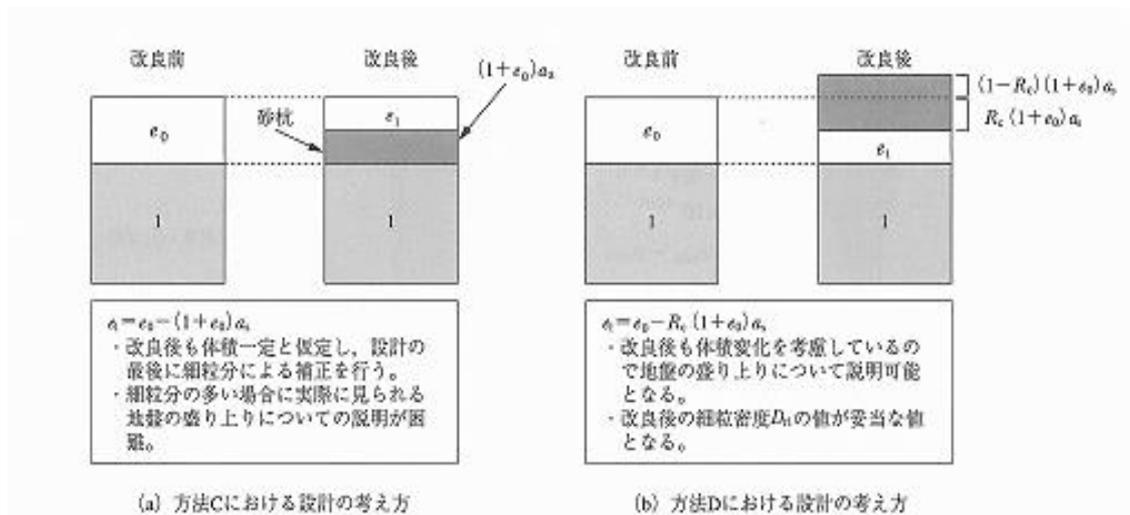


図-4.2 有効締固め係数 R_C の考え方

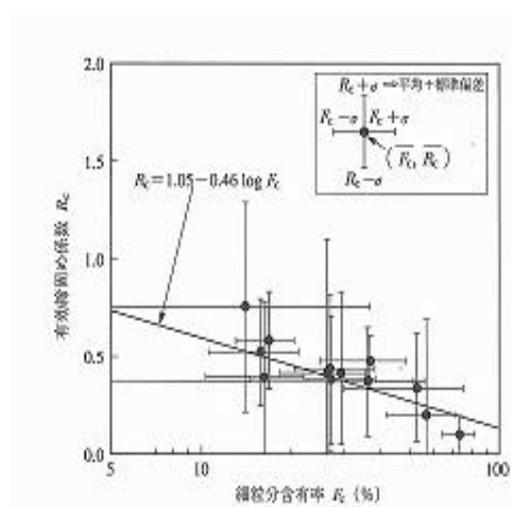


図-4.3 $F_C - R_C$ の関係

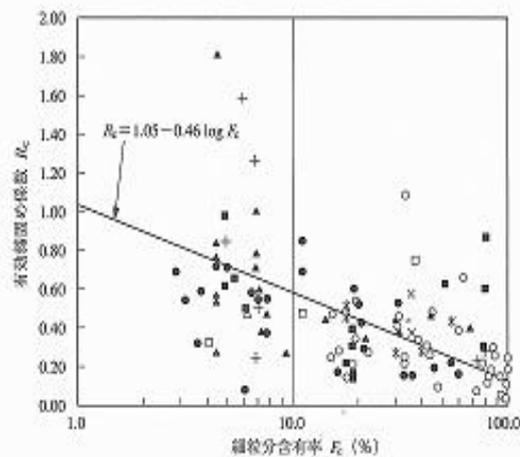


図-4.4 $F_C - R_C$ の関係 (静的)

以上の設計法を応用し、以下の手順で改良後地盤に期待されるN値を求める。

1. 細粒分含有率 F_C (%)より改良前地盤の最大間隙比 e_{max} と最小間隙比 e_{min} を求める。

$$\text{最大間隙比 } e_{max} = 0.02F_C + 1.0$$

$$\text{最小間隙比 } e_{min} = 0.008F_C + 0.6$$

2. 細粒分による補正 N 値増分 ΔN_f を求める.

3. 細粒分含有率 F_c による補正 N 値に対する有効締固め係数 R_c を求める

$$R_c = 1.05 - 0.46 \log F_c$$

4. 改良前地盤 N 値 N_0 および拘束圧 σ_v' (kN/m²)から相対密度 D_{r0} と改良前地盤の間隙比 e_0 を以下の式から求める

$$\text{相対密度 } D_{r0} = 21 \sqrt{N_0 / (0.7 + \sigma_v' / 98) + \Delta N_f / 1.7}$$

$$\text{初期間隙比 } e_0 = e_{max} - \frac{D_{r0}}{100} (e_{max} - e_{min})$$

5. 改良率 a_s を求める

$$\text{正方形・矩形配置 } a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{x^2} = \frac{A_s}{x_1 \cdot x_2}$$

$$\text{正三角形配置 } a_s = \frac{A_s}{A} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_s}{x^2}$$

5. 改良率 a_s から改良後地盤の間隙比 e_1 を求める

$$a_s = \frac{e_0 - e_1}{R_c(1 + e_0)}$$

$$e_1 = e_0 - a_s \cdot R_c(1 + e_0)$$

6. 改良地盤の間隙比 e_1 を用いて, 改良後地盤の相対密度 D_{r1} を求める

$$e_1 = e_{max} - \frac{D_{r1}}{100} (e_{max} - e_{min})$$

$$D_{r1} = \frac{100(e_{max} - e_1)}{e_{max} - e_{min}}$$

7. 改良後地盤の相対密度 D_{r1} を用いて改良後地盤の期待 N 値 N_1 を求める

$$D_{r0} = 21 \sqrt{N_1 / (0.7 + \sigma_v' / 98) + \Delta N_f / 1.7}$$

$$N_1 = ((D_{r1}/21)^2 - \Delta N_f/1.7) \times (0.7 + \sigma_v'/98)$$

表-4.1 補正 N 値算出式

$F_c(\%)$	ΔN_f
0~5	0
5~10	$1.2(F_c - 5)$
10~20	$6 + 0.2(F_c - 10)$
20~	$8 + 0.1(F_c - 20)$

4. 2 液状化判定方法

4. 2. 1 液状化指数による判定

液状化判定は表-4.2 に示す方法で行われる。国土交通省が公開している「宅地の液状化被害可能性判定シート」は推奨法を基に判定を行っている。今回は「宅地の液状化被害可能性判定シート」にいくつかの変更点を加え、地盤改良前後の液状化判定を行う。

表-4.2 液状化対策に関する検討方法

検討内容	検討項目	選択手段	具体的手法
液状化対策	液状化判定	簡便法	・基礎指針に準じた液状化安全率 F_L により簡易判定法
		推奨法	・液状化安全率 F_L により判定のほか、終局限界状態においては、液状化時の地表面動的変位 D_{cy} 、液状化指数 P_L により液状化程度の判定方法を併用
		詳細法	・損傷限界状態において、不合格率($FL \leq 1.0$ となる点数の割合)を用いた判定方法 ・有効応力解析などにより、直接、過剰間隙水圧、地盤変形量を算出する方法

図-4.5 に示したフロー・チャートに従って、液状化判定に用いるパラメータを算出する。液状化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%以下の土である。ただし、埋立地盤など人口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（0.005 mm以下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。細粒土を含む礫や透水性の低い土層に囲まれた礫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。

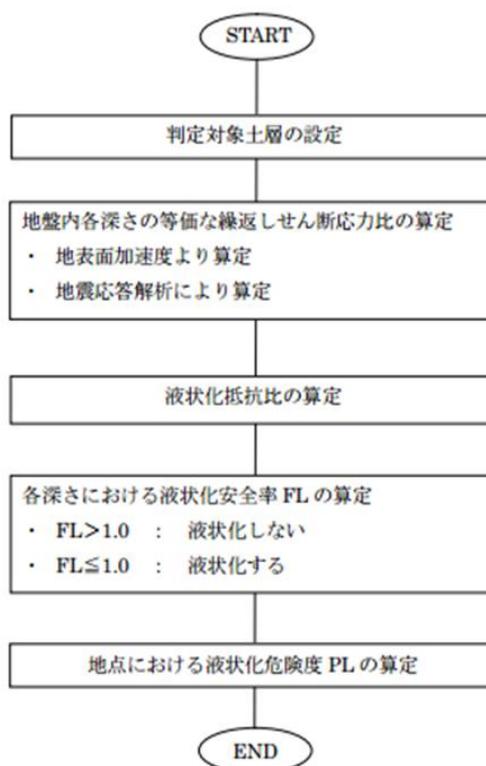


図-4.5 液状化判定フロー

検討地点の地盤内の各深さに発生する等価な繰返しせん断応力比を次式により計算する。

$$(\tau_d/\sigma_z') = \gamma_n \cdot (\alpha_{max}/g) \cdot (\tau_L/\sigma_z') \cdot \gamma_d$$

τ_d : 水平面に生じる等価な一定繰返しせん断応力振幅(kN/m²)

σ_z' : 検討深さにおける有効土被り圧(鉛直有効応力) (kN/m²)

γ_n : 等価な繰返し回数に関する補正係数 $\gamma_n = 0.1(M - 1)$, M は地震のマグニチュード

α_{max} : 地方面における設計用水平加速度(gal)

g : 重力加速度(980gal)

σ_z : 検討深さにおける全土被り圧(鉛直全応力) (kN/m²)

γ_d : 地盤が剛体でないことによる低減係数 (1-0.015z), z はメートル単位で表した地表面からの検討深さ

図-4.6 のせん断ひずみ振幅 5%の曲線を用いて, 補正 N 値 N_a に対する飽和土層の液状化抵抗比(τ_L/σ_z')を求める.

$$R = \tau_L/\sigma_z'$$

τ_L : 水平面における液状化抵抗

σ_z' : 検討深さにおける有効土被り圧(kN/m²)

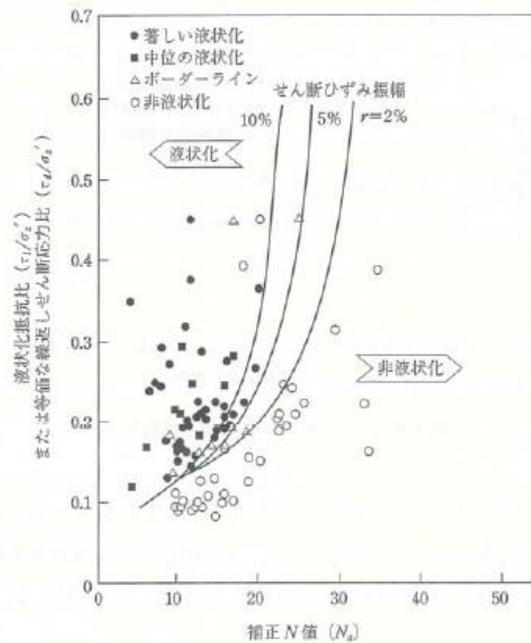


図-4.6 補正 N 値と液状化抵抗と動的せん断ひずみの関係

また, N_a は以下の式により算定する.

$$N_a = N_1 + \Delta N_f$$

N_a : 補正 N 値

N_1 : 換算 N 値 $N_1 = C_N \cdot N$

ΔN_f : 細粒土含有率に応じた補正 N 値増分で図-4.7 による。

C_N : 拘束圧に関する換算係数 $C_N = \sqrt{98}/\sigma_z'$
 σ_z' : ボーリング調査時の有効土被り圧(kN/m²)

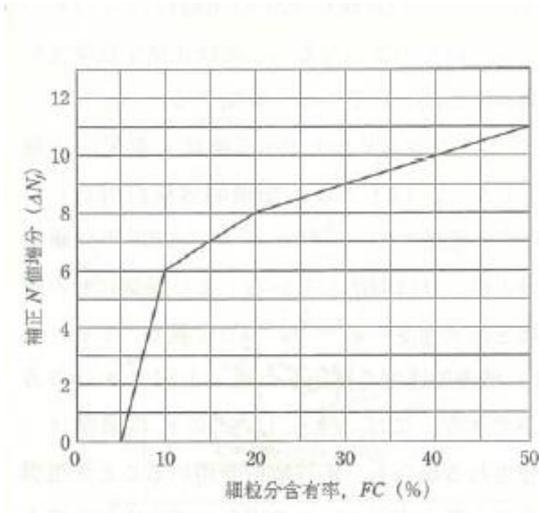


図-4.7 細粒分含有率とN値の補正係数

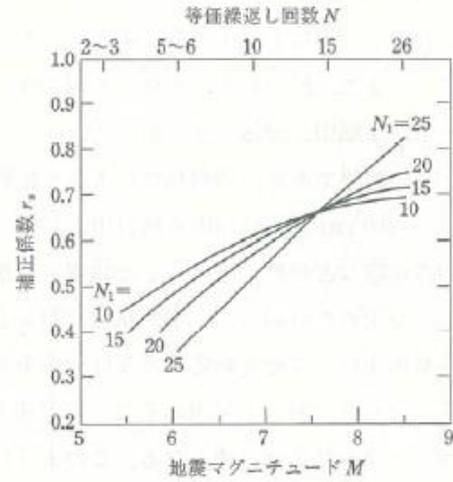


図-4.8 補正N値, マグニチュード, 繰返し回数と補正係数

液状化安全率 F_L は次式によって定義される.

$$F_L = C_h \cdot (\tau_L/\sigma_z') / (\tau_d/\sigma_z')$$

F_L : 液状化に対する安全率

(τ_L/σ_z') : 液状化抵抗比

(τ_d/σ_z') : 等価な繰返しせん断応力比

C_h : 地盤生成年代による補正係数(C_h)

$F_L > 1.0$: 液状化しない

$F_L \leq 1.0$: 液状化する

液状化指数 P_L は F_L を用いて以下のように算出される.

$$P_L = \sum F \cdot w(Z) \cdot \Delta Z$$

$$F = 1.0 - F_L \quad (F_L \leq 1.0) \quad F = 0.0 (F_L > 1.0)$$

F_L : 液状化に対する安全率

$w(Z)$: 深さ方向の重み関数

判定深度 20m $w(Z) = 10.0 - 0.5 \cdot Z$

判定深度 10m $w(Z) = 20.0 - 2.0 \cdot c$

Z : 地表面からの深さ(m)

ΔZ : ある深度の F_L が分布されると予想される土層厚(今回は 0.25m で算定)

$P_L = 0$: 液状化の可能性はない

$0 < P_L \leq 5$: 液状化の可能性が低い

$5 < P_L \leq 15$: 液状化の可能性がある

$15 < P_L$: 液状化の可能性が高い

4. 2. 2 国土交通省「宅地の液状化被害可能性判定シート」による判定

「液状化被害可能性判定シート」は図-4.9 の手順で判定を行う。このシートでは、「建築基礎構造設計指針」と「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」を基本として判定している。今回は「建築基礎構造設計指針」に基づいた液状化判定を行う。

本指針は、震度 5 程度の中地震を対象としており、液状化に対する安全率 F_L の算定には、下記の数値を用いる。

- ・マグニチュード : 7.5
- ・想定最大加速度 α_{max} : 200(gal)

判定対象層と非液状化層厚(H_L)を表-4.3 に示す。非液状化層厚は、地盤面から連続する表-4.3 の層とする。

表-4.3 判定対象層・非液状化層厚

	地表面から20m程度以浅の沖積層・埋立土・盛土			地下水位より浅い層	地下水位より深い層			
	細粒分含有率35%以下の層	細粒分含有率35%を超える層			液状化の安全率 F_L が1.0より大きい層	N値が2より大きい粘性土層	細粒分含有率35%を超える層(沖積層・埋立土・盛土)	
		粘土分含有率が10%以下の層	塑性指数15以下の層				粘土分含有率が10%以上の層	塑性指数15以上の層
判定対象層	○	○	○	---	---	---	---	---
非液状化層厚(H_L)	---	---	---	○	○	○	○	○

地表変位(D_{cy} 値)は、「建築基礎構造設計指針」4.5 節地盤の液状化、“2.液状化に伴う地盤物性と地盤変形量の予測”に準拠し、判定対象層は表-4.3、液状化に対する安全率(F_L)は、上記の定義による。ただし、沖積層で圧密時間が 400~500 年以上経過していることが明らかな場合には、地盤の生成年代効果を考慮する。

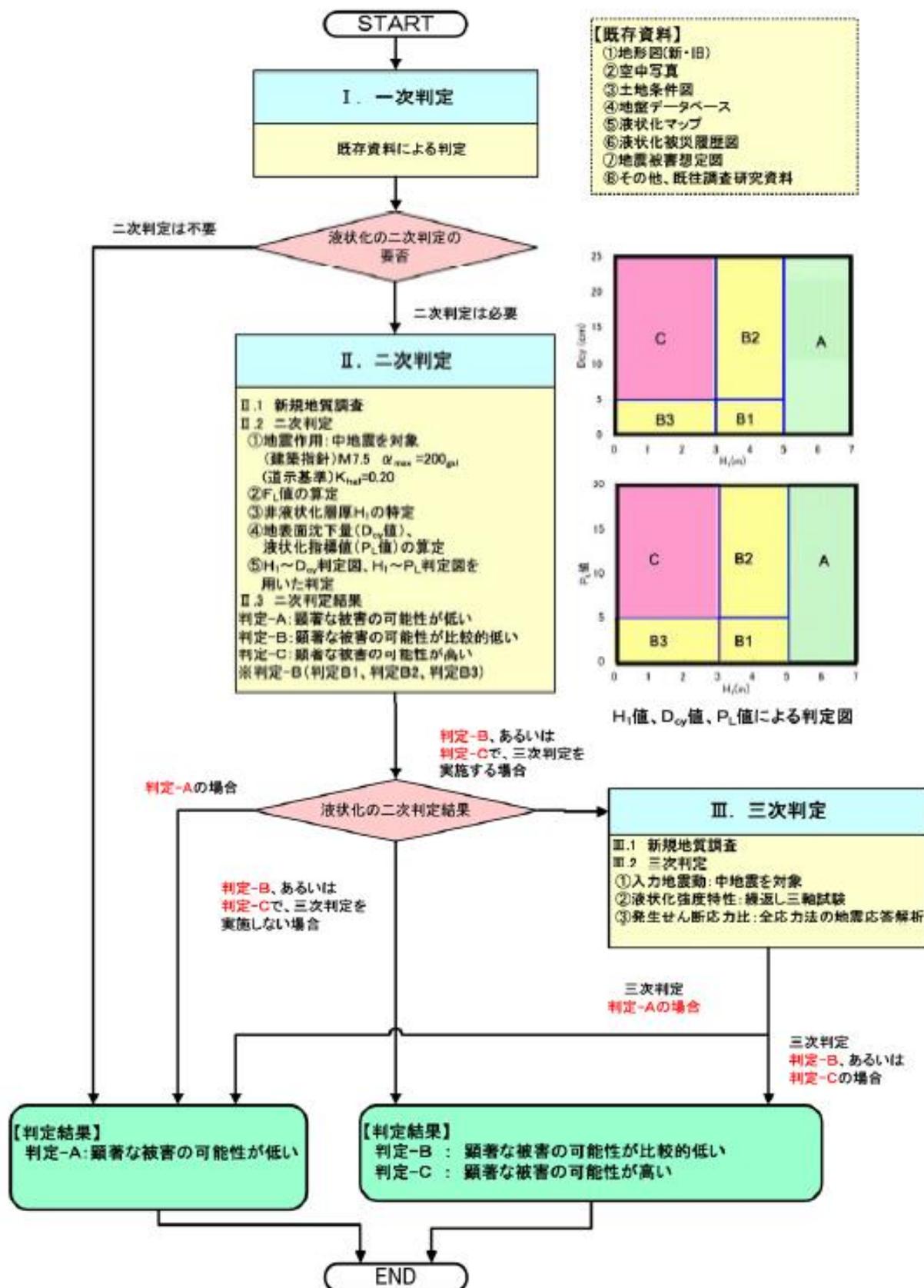


図-4.9 宅地の液状化被害可能性の判定フロー

水平地盤での動的水平変位，残留水平変位，沈下量，液状化の程度と動的水平変位の予測は，適当な応答解析によるほか，液状化判定の後，以下の手順によることができる．

1. 図-4.10 から N_a , τ_d/σ'_z に対応する各層の繰返しせん断ひずみ γ_{cy} を推定する．
2. 各層のせん断ひずみが同一方向に発生すると仮定して，これを鉛直方向に積分して，振動中の最大水平分布とする．
3. 地表変位を D_{cy} とし，液状化程度の指標とする．液状化の程度は D_{cy} の値により，表-4.4 のように評価する．

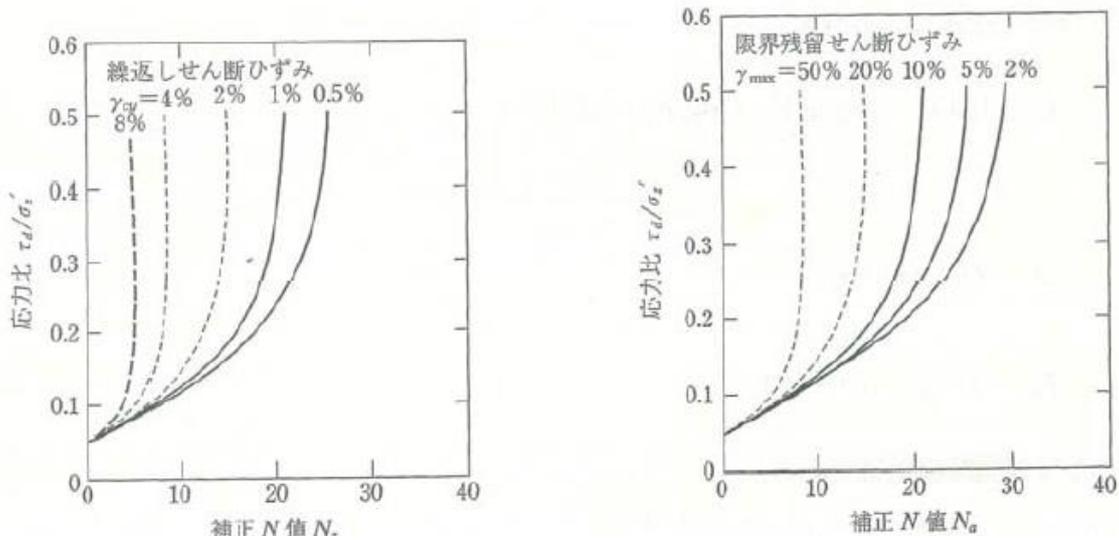


図-4.10 補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係，補正 N 値と限界残留せん断ひずみの関係

表-4.4 地表変位を D_{cy} とした液状化程度の関係

D_{cy} (cm)	液状化の程度
0	なし
~5	軽微
5~10	小
10~20	中
20~40	大
40~	甚大

「宅地の液状化被害可能性判定シート」は、ボーリング調査結果に基づいて、宅地の液状化被害の可能性を比較的簡易に判定可能な方法として定めるものである。今回は SWS 試験等の結果を用いて液状化判断を行うため、シート内にくつかの変更点が必要である。変更点を以下に示す。

- 単位体積重量から鉛直全応力と、鉛直有効応力を求める計算になっているが、今回は単位体積重量のパラメータがないため、三成分コーン貫入試験から得られた鉛直全応力と、鉛直有効応力のパラメータを用いている。三成分コーン貫入試験が行われた位置は、今回用いる SWS 試験の位置とは異なるため、パイルピッチ 1.0m と 1.5m の場合のパラメータとして平均を求めて応力とした。
- 作業シート内で N 値から補正 N 値を算出しているが、今回の判定では SWS 試験の結果である換算 N 値から算出するようにした。
- 液状化指数の算出の際に、判定深度は 20m として算出を行っている。しかし、橋梁等の大規模土木構造物と比較して、戸建て住宅の荷重は小さいことから、即地的には深度 20m とした場合に、必ずしも整合が図れない場合が生じる。この場合は判定深度 10m を用いる等の実態に即した検討を行うことも想定される。そのため、判定深度 10m を求められるように変更した。

4. 3 検討結果

4. 3. 1 パイルピッチの設定

現地試験ではグラベル・パイルのパイルピッチを 1.0m と 1.5m で施工した。改良後地盤の N 値を締固め砂杭工法（SCP）の設計法に基づいて評価する。細粒分含有率を考慮した設計法を方法 A とし、細粒分含有率と体積変化を考慮した設計法を方法 B とする。図-4.11, 12 に施工前後の SWS 試験の結果を用いた N 値を示す。試験結果にばらつきがあるものの、グラベル・パイルを打設した 0m-4m では N 値の上昇が確認される。パイルの杭長は 4m のために地表面から 4m 区間で N 値の上昇が確認されるが、4-5m 区間でも N 値が上昇する結果となった。パイルピッチの影響は杭間距離が短いほど地盤の締固め効果が大きい傾向が見られるが、ばらつきも大きいために限られた事例で結論できるまではいたらない。更なるデータの蓄積が求められる。

図-4.13, 14 に施工前後の SWS 試験から得られた N 値と方法 A で得られた N 値の比較を, また図-4.15, 16 に施工前後の SWS 試験から得られた N 値と方法 B で得られた N 値の比較を示す. 方法 A, B ともにパイルピッチが 1.5m の場合には比較的に地盤改良後の N 値分布を良好に推定することができるが, パイルピッチが 1m の場合には推定誤差が大きく, やや過大評価する結果となった. 方法 A, B では推定精度に大きな差異は見られない. グラベル・パイルによる杭間地盤の締固め効果は杭間距離が 1.5m の場合に締固め砂杭工法 (SCP) の設計法で比較的予測できる結果となった.

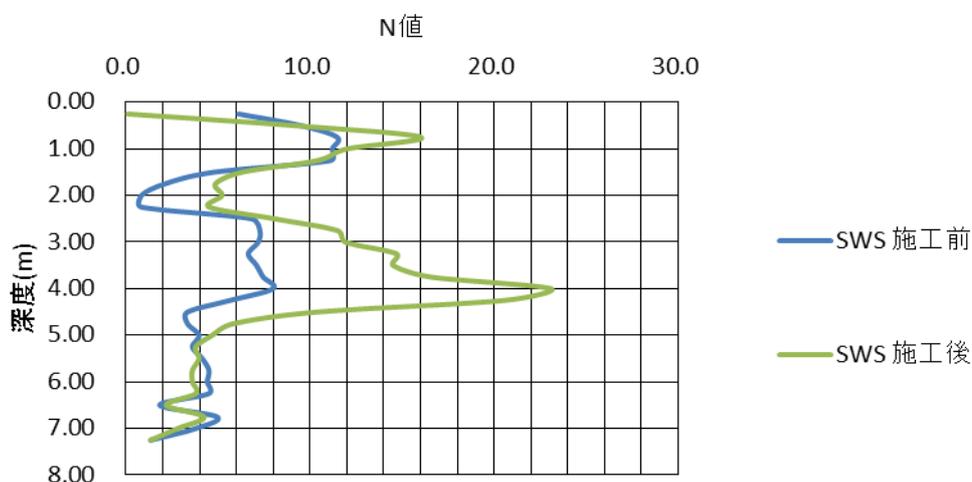


図-4.11 施行前後の SWS 試験 N 値比較 パイルピッチ 1.0m

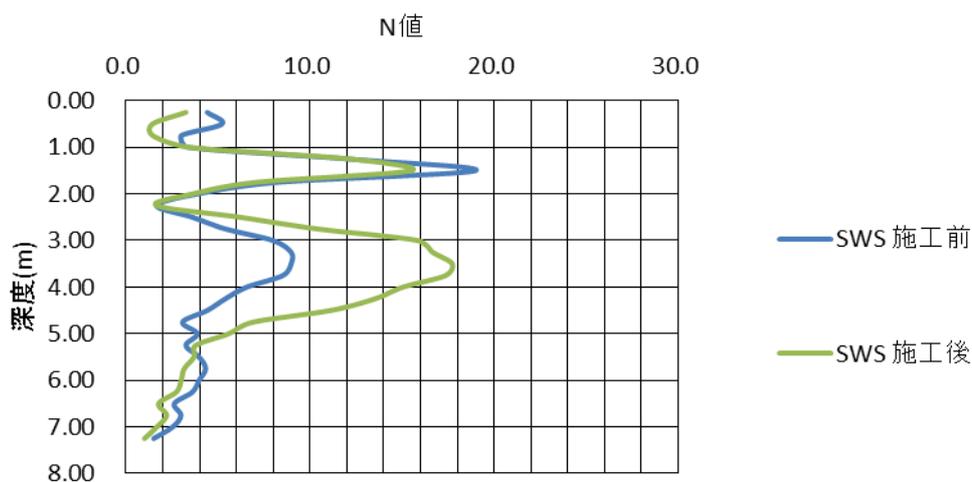


図-4.12 施行前後の SWS 試験 N 値比較 パイルピッチ 1.5m

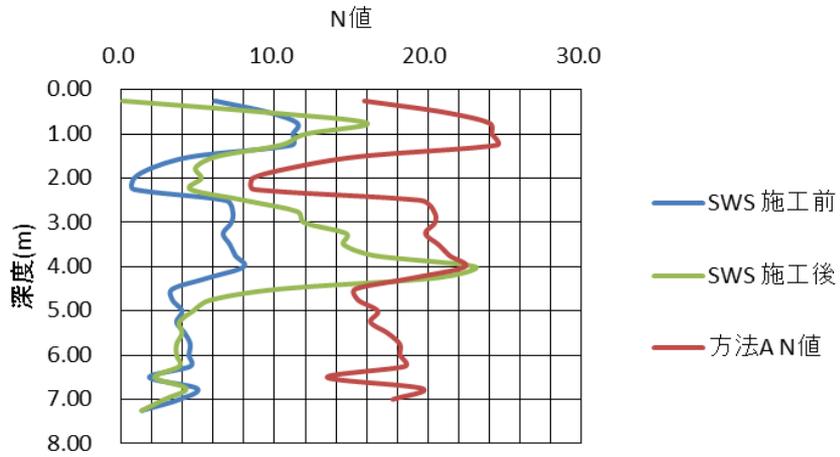


図-4.13 方法AによるN値 パイルピッチ 1.0m

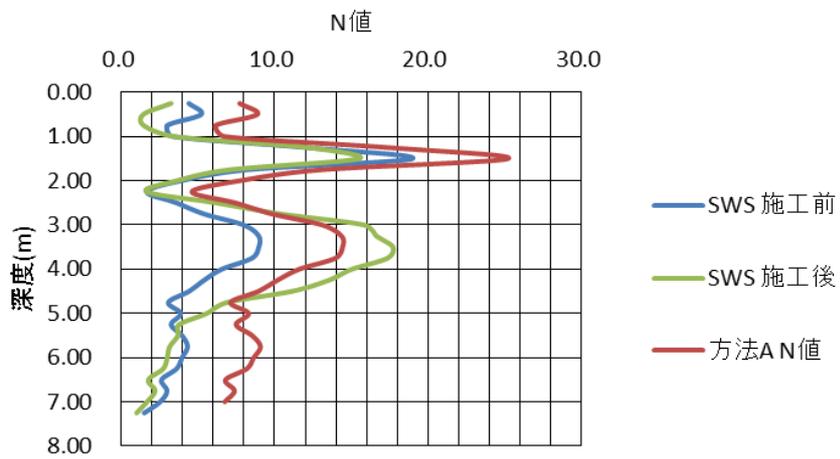


図-4.14 方法AによるN値 パイルピッチ 1.5m

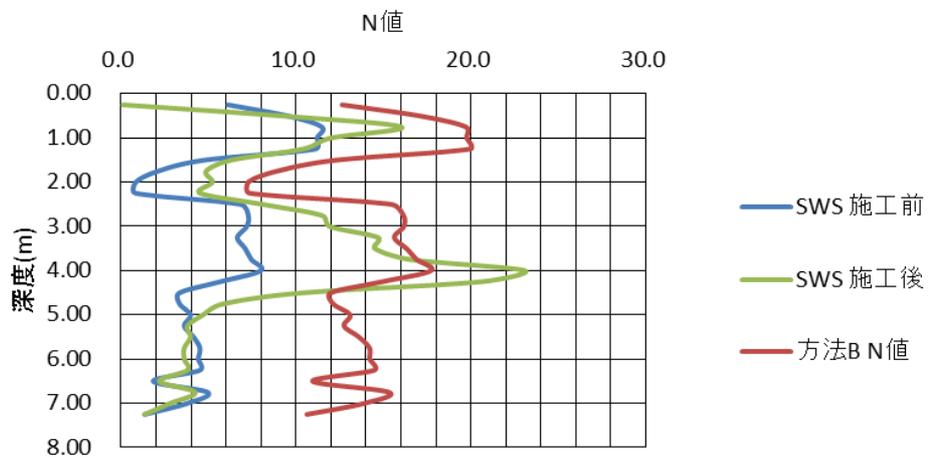


図-4.15 方法BによるN値 パイルピッチ 1.0m

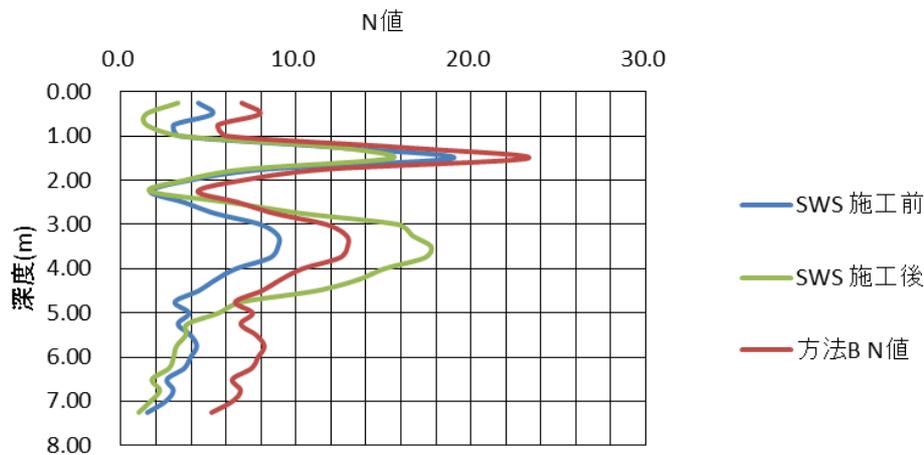


図-4.16 方法BによるN値 パイルピッチ1.5m

4. 3. 2 液状化指数による評価

N値から算出した液状化指数 P_L を表-4.5, 表-4.6に示す. 国土交通省が公開している「宅地の液状化被害可能性判定シート」に上記に示した変更点を加えた結果を次に示す. 結果は各パイルピッチで, 施工前後のSWS試験N値より判定したもの, 2つの設計法を応用し, 得られたN値より判定したものである. 液状化指数 P_L を算出する際の判定深度10mの結果は既存の判定基準を適用することに疑問が残るため, 参考程度に添付する.

グラベル・パイルの施工前後の P_L は大きく改善されており, グラベル・パイルの打設による杭間地盤の締固め効果のみでも, 地盤の液状化対策効果は十分に確認できる. 実際には, グラベル・パイルの剛性や排水機能が加わるために, 液状化対策効果は更に大きくなるものと思われるが, その検討には有限要素法を用いた大規模な数値解析による検討が必要であり, 本検討の範囲を超える. 今後の検討課題といえる. 表には締固め砂杭による設計法を用いた P_L を示したが, この場合はやや過大評価になっており, 方法A, Bともに P_L はずいぶん小さく得られた.

表-4.5 パイルピッチ1.0mの P_L 値

	施工前	施工後		
	sws	sws	設計法A	設計法B
判定深度10m	15.664	7.556	0.000	0.000
判定深度20m	10.366	5.502	0.201	0.527

表-4.6 パイルピッチ 1.5m の P_L 値

	施工前	施工後		
	sws	sws	設計法A	設計法B
判定深度10m	14.571	8.524	1.746	2.764
判定深度20m	9.980	6.043	4.447	5.355

5. 今後の課題

(株) グランテックで開発したスクリー・プレス工法の現場試験に関して、現地地盤調査を基に液状化対策効果の検討を実施した。現地の地盤力学特性に主眼をおいて、静的および繰り返し試験による地盤の強度定数および繰り返し強度を求めた。現地からサンプリングした試料は簡易サンプリングのために、不飽和した後に試料が凍結保存されており、三軸試験機に設置した後に完全飽和するのに試行錯誤を要した。本来は試験結果のばらつきなどの評価が必要であるが、十分な試験数を確保することができていない。しかし、得られた結果は比較的ばらつきの小さい結果が得られた。これらの地盤定数は有限要素法による解析的検討に適用される。一般に、地盤定数にはばらつきがあり、特に地盤の透水係数は試料による差異が大きく、また現地の透水係数との相関も高くない。今回はサンプリング試料の処理に関する問題もあり、透水係数は有意な値が得られなかった。現地試験の数値解析などによる逆算で透水係数を算出するのが妥当である。

また、スクリー・プレス工法によるグラベル・パイルの杭間地盤の締固め効果による液状化対策効果について改良効果を検討した。その結果、杭長は4mであるが、地表面から5mほどの領域で地盤のN値が上昇する効果が確認された。杭間距離が短いと締固め効果が大きくなると予測されるが、データにはばらつきが大きく、今回の事例で結論することはむずかしい。更なるデータの収集が必要である。液状化判定法からグラベル・パイルの杭間地盤の締固め効果を検討したが、液状化強度が上昇する結果が得られた。締固め砂杭工法(SCP)の設計手法を用いて杭間地盤の改良効果を予測した結果、杭間距離が1.5mの場合には比較的良好な推定が行えた。しかし、全般にやや改良効果を過大評価する傾向があるため、注意が必要な結果となった。

スクリー・プレス工法の液状化対策効果は杭間地盤の締固め効果の他に、杭の剛性や排水機能がある。これらの効果については今後、有限要素法を用い

た数値解析による検討が必要である.