

プラスチックボードドレーン群工法の改良効果の評価方法

Estimated Method for Reinforcing of Liquefiable Ground using Anchored Plastic Board Drain

浅田 毅* 溝口 義弘*

要 旨

前回までの報告では、プラスチックボードドレーン（以下、PDという）群工法はドレーンとジオグリッドとによる土粒子の拘束効果と、過剰間隙圧を消散させるドレーンの排水効果が相互に働いて地盤の液状化を抑止することを述べた。本報では、これまで行った振動台実験の結果からPD敷設地盤の改良効果について検討し、PDを敷設することによって地盤の相対密度が見かけ上増加し、液状化強度比が大きくなることに着目した設計法を示した。

キーワード：設計法／プラスチックボードドレーン／拘束効果／排水効果／液状化強度比

1. はじめに

兵庫県南部地震をはじめとして、この10年間で大規模な地震がかなりの頻度で発生しており、河川堤防、埋立て地盤上の建築物などの既設構造物に対する耐震対策の必要性が高まっている。

筆者らは、液状化対策工法として、プラスチックボードドレーンを従来のドレーン材としての機能に加え、せん断補強材として発揮させる構造であるPD群工法を考案し、単純せん断土槽を用いた振動台実験、中空ねじりせん断試験などを行うとともに、それらについて個別要素法解析（以下、DEM解析という）によるシミュレーションを行ってきた。その結果、PD群工法では、(1)PDとジオグリッドとによる土粒子の拘束効果と、(2)過剰間隙水圧を消散させるPDの排水効果が相互に働き、地盤の液状化を抑止する効果が大きくなることがわかった。

ここでは、これまでに行った振動台実験結果について、ドレーン工法の設計法等の既往の設計法によって計算した結果と実験結果とを比較して、その適用性を検討する

とともに、PD群工法敷設地盤の改良効果に対する評価方法を提案する。

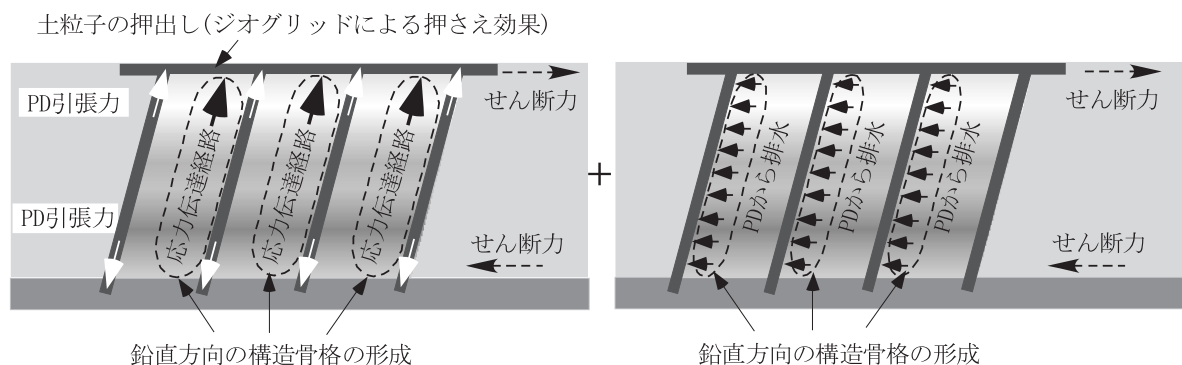
2. PD群工法の補強メカニズム

PD群工法は、PD下部をアンカーで地盤に、上部をジオグリッドと固定することで、地盤をPDとジオグリッドで囲まれた区間に分割し、その区間ごとに拘束効果と排水効果が有効に作用することによって地盤の液状化を抑止する工法である。

図－1に沿って、その補強メカニズムについて述べる。

(1) PDとジオグリッドによる拘束効果

地震動による繰り返しせん断力が液状化層に作用すると、PDとジオグリッドで囲まれた領域の土粒子は再配列されて鉛直方向に連なった土粒子の構造骨格を形成するとともに、応力伝達が上方向に向かって起こり、土粒子は上方に移動しようとする。その移動をジオグリッドが拘束し、地盤の変形を抑える。その際、ジオグリッドと連結したPDは上方へ引っ張られる。



図－1 PD群工法の補強メカニズム

*土木研究グループ

(2) PDの排水効果

土粒子の再配列に伴って発生した過剰間隙水圧は即座にPDから消散されることによって、PD周辺部の土粒子の移動量が小さく抑えられ、土粒子の鉛直方向の構造骨格がさらに領域全体に広がる。

(3) 工法の補強メカニズム

地盤をPDとジオグリッドで囲まれた区間に細かく分割することで、地震動による繰り返しせん断力の作用方向が水平方向からPDに沿った鉛直方向に変わる。それに伴い、上方に向かって領域内の土粒子の移動が起こるが、ジオグリッドがその移動を抑制し、その際、ジオグリッドとPDに引張り応力が働く。また、土粒子の移動で発生した過剰間隙水圧はPDから速やかに排水されるので、土粒子に働く有効応力が減少しない。

このように、PD群工法の補強メカニズムは、拘束効

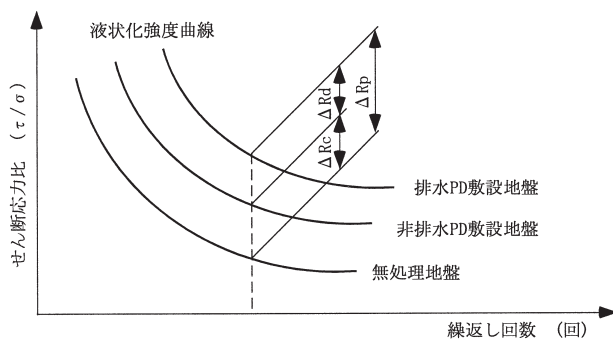
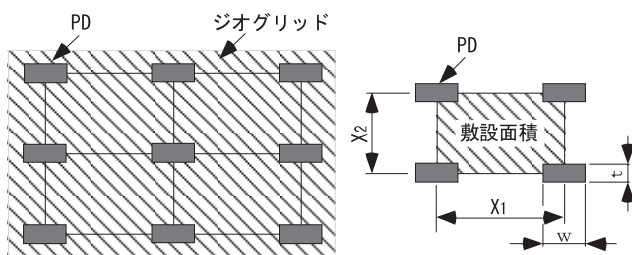
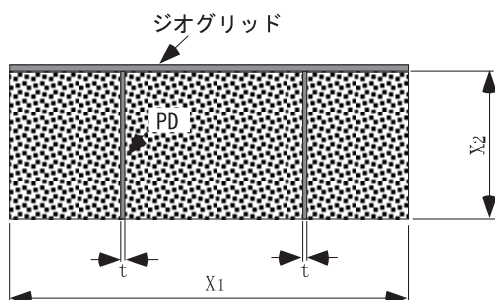


図-2 PD敷設地盤の強度増加関係



(1) 振動台実験における置換率



(2) DEM解析における置換率

図-3 置換率の定義

果と排水効果が有効に組合わさったものである。

3. 拘束効果と排水効果による地盤の改良効果の評価

これまでにを行った模型地盤の振動台実験、要素試験およびDEM解析による結果から、PD群工法の拘束効果と排水効果を定量的に評価する。

図-2に示すように、PD群敷設地盤の液状化強度は、無処理地盤の液状化強度に、拘束効果による強度増加量(ΔRc)と排水効果による強度増加量(ΔRd)とを加算したものである。

振動台実験およびDEM解析において、図-3に示すように、敷設面積に対するPDの占有面積比率を表す置換率 a_s を(1)式と(2)式で定義する。

$$a_s = (t \times w) / (X_1 \times X_2) \cdots (1) \text{式}$$

ここに、 a_s : 置換率(振動台実験)

t, w : PDの厚さ、幅

X_1, X_2 : PDの敷設間隔

$$a_s = (t \times X_2) / (X_1 \times X_2) \cdots (2) \text{式}$$

ここに、 a_s : 置換率(DEM解析)

t, X_2 : PDの厚さ、敷設深度

X_1, X_2 : 敷設延長、敷設深度

図-4に、振動台実験等から得られた置換率と繰り返し回数20回におけるせん断応力比を、排水性PD敷設地盤と非排水性PD敷設地盤に分けてプロットしたものを示す。また、図-5、図-6に、排水性PDと非排水性PDの敷設地盤について行ったDEM解析結果から求めた置換率とせん断応力比をプロットしたものを示す。

これらの図において、全強度増加量(ΔRp)のうち、非排水性PD敷設地盤とPDを敷設しない地盤(以下、無処理地盤という)のせん断強度比の差がPDの拘束効果による強度増加量(ΔRc)、排水性PD敷設地盤と非排水性PD敷設地盤のせん断強度比の差が排水効果による強度増加(ΔRd)であると考えられる。

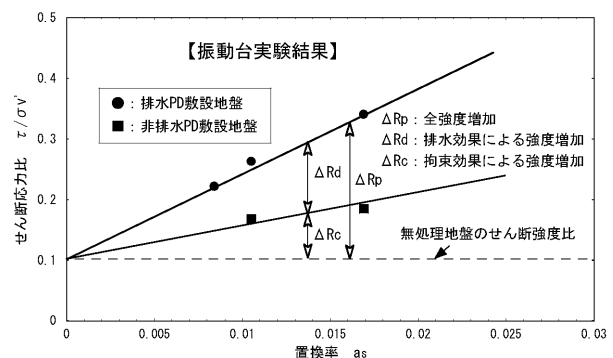


図-4 置換率とせん断応力比(振動台実験)

図-7に、全強度増加量 (ΔR_p) に対する排水効果による強度増加量 (ΔR_d) の実験結果における比率 ($\Delta R_d/\Delta R_p$) を、図-4から求めてプロットしたものを示す。同様に、図-8に、図-5、図-6からDEM解析結果における比率を求めたものを示す。

$\Delta R_d/\Delta R_p$ は、図-7では0.6程度、図-8では0.4程度であることがわかる。ここに、DEM解析結果における比率が実験結果での比率より大きい値となったのは、DEM解析が2次元解析であり、拘束効果による強度増加量が少し過大に評価されたため、排水効果による強度増加量比率が小さくなったものと思われる。

これらのことから、全強度増加量に対する排水効果による強度増加量の比率は、0.4~0.6程度であると考ええる。

4. PD群工法の設計法

PD群工法は拘束効果と排水効果とが有効に組み合わせられた工法であることを前述した。ここでは、既往の設計法である(1)グラベルドレーン工法の設計法^{1)~3)}および(2)サンドコンパクション工法の設計法¹⁾の適用性を検討するとともに、地盤の相対密度と液状化強度比に着目したPD群工法の設計法を示す。

4.1 ドレーン工法の設計法の適応性

4.1.1 ドレーン工法の設計法

ドレーンの配置間隔の算出手順を図-9に示す。

ドレーン材の物性値 (半径 a 、透水係数 k_d)、および地盤の材料特性 (透水係数 k_s 、体積圧縮係数 m_v) を(3)式、(4)式に代入して時間係数 T_1 とウェルレジスタンス係数 R_w を計算し、設計図表から許容間隙水圧比 ($u_{\max}/\sigma'_v$)_{ave} に対応するドレーンの半径 a と等価有効半径 b の比 (a/b) を求め、ドレーンの打設間隔 s を算定する手順となっている。

$$T_1 = k_s \cdot t_1 / (m_v \cdot \gamma_w \cdot a^2) \cdots (3) \text{式}$$

ここに、 k_s : 地盤の透水係数 (cm/s)

$$t_1 : N_1 \cdot t_d / N_{eq}$$

N_1 : 一定振幅に換算した地震動で

液状化する繰り返し回数

t_d : 地震動の有効継続時間 (s)

N_{eq} : 地震動の等価繰り返し回数

m_v : 地盤の体積圧縮係数 (cm²/kgf)

γ_w : 水の単位体積重量 (kgf/cm³)

a : ドレーン半径

$$R_w = (8/\pi^2) \cdot (k_s/k_d) \cdot (h/a) \cdots (4) \text{式}$$

ここに、 k_s : 地盤の透水係数 (cm/s)

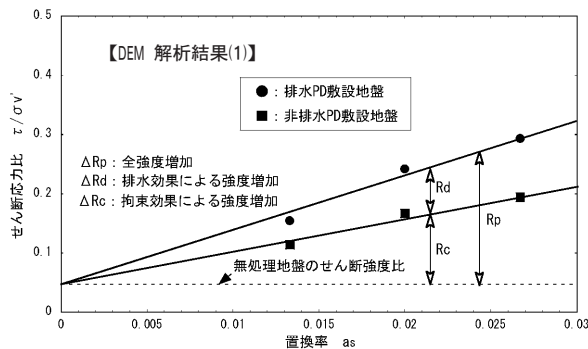


図-5 置換率とせん断応力比
(DEM解析結果 $\Delta u/\sigma_v=0.05$)

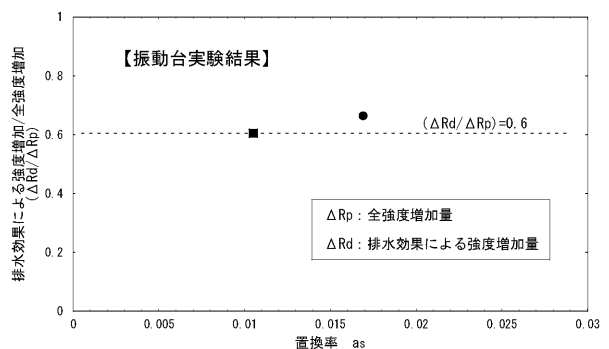


図-7 全強度増加量に対する排水効果による強度増加量の比率 (振動台実験)

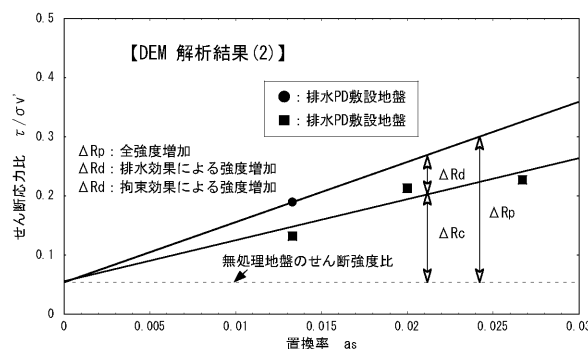


図-6 置換率とせん断応力比
(DEM解析結果 $\Delta u/\sigma_v=0.01$)

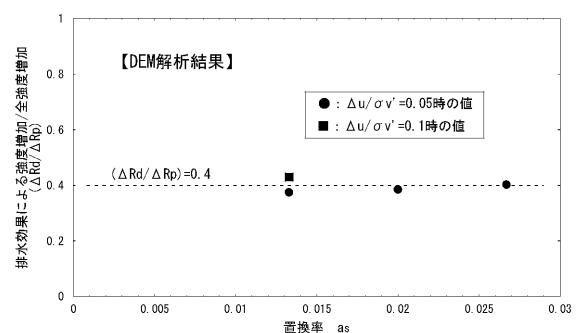


図-8 全強度増加量に対する排水効果による強度増加量の比率 (DEM解析結果)

k_d : ドレーンの鉛直透水係数 (cm/s)
 h : ドレーンの長さ (cm)
 a : ドレーン半径 (cm)

矩形プラスチックドレーンでは、ドレーン断面積と等価な円の半径 (等価換算半径) として求める。

4.1.2 設計法の妥当性

振動台実験におけるPDの敷設本数の違いにより発生する過剰間隙水圧をドレーン設計法から逆算した値と、実験で得られた値とを比較し、PD群工法の設計法とし

て妥当かどうかを検討した。

実験に用いた地盤の材料特性を表-1に、PDの材料特性を表-2に示す。これらの値を用いて、逆算した各ケースの計算値を表-3に示す。

図-10に、実験で得られた過剰間隙水圧比と計算値を比較したものを示す。

この図から、両者の値とも置換率が大きくなると過剰間隙水圧比が低くなるが、実測値がケース①を除いて計算値の1/2以下の値となっており、ドレーン工法の設計

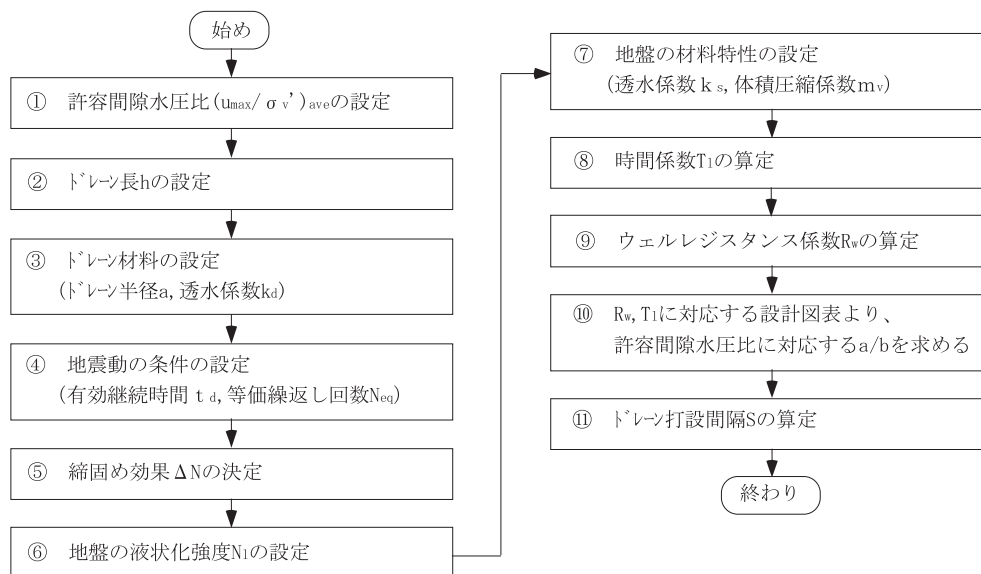


図-9 ドレーンの配置算出の手順
 (液化化対策工法設計・施工マニュアル (案) より)

表-1 地盤の材料特性

項 目	数 値
(1)透水係数 k_s (cm/s)	0.01
(2)体積圧縮係数 m_v (cm ² /kgf)	0.005
(3)水の単位体積重量 γ_w (kgf/cm ³)	0.001

表-2 PDの材料特性

ケース		①	②	③
項 目				
(1)本数 n (本)		24	9	6
(2)厚さ t (cm)		0.6		
(3)幅 w (cm)		4.5		
(4)等価換算半径 a (cm)		1.623		
(5)ドレーン長 h (cm)		72		
(6)有効円半径 b (cm)		25.2	41.2	50.5
(7)透水係数 k_d (cm/s)		1.0		

表-3 過剰間隙水圧比の計算結果

ケース		①	②	③
項 目				
(1)液化化に要する時間 t_l (s)		5		
(2)時間係数 T_1		3795		
(3)ウェルレジスタンス係数 R_w		16.0		
(4) a/b		0.06	0.04	0.03
(5)過剰間隙水圧比 $(u_{max}/\sigma_v')_{ave}$		0.3	0.5	0.65

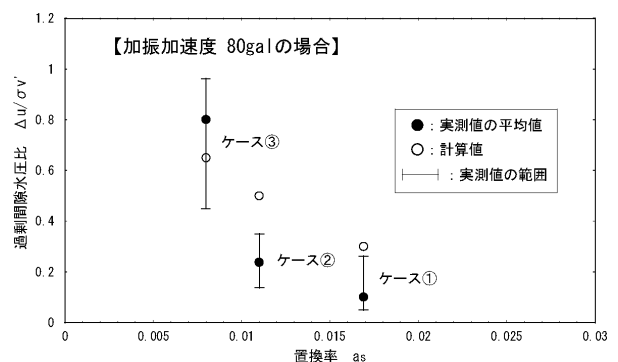


図-10 計算値と実験値の比較

法では、PD群工法の補強効果が過小に評価されることが分かる。

4.2 締固め工法の設計法の適用性

4.2.1 締固め工法の設計法

サンドコンパクションパイル工法（以下、SCP工法という）は、原地盤に砂を圧入して地盤の密度を大きくし、地盤の液状化強度を高める工法である。

図-11に、SCP工法の打設間隔算定手順を示す。目標N値を設定し、原地盤の細粒分含有率を考慮したN値の増加量から間隙比 e の増加量を算定して、増加量に対する砂杭の間隔を決定する手順となっている。

4.2.2 設計法の妥当性

振動台実験におけるPD敷設本数などの実験条件を用いて、締固め工法の設計法から液状化抵抗率FLを計算し、FL値が1以下となる加速度と、実験で液状化した時の加速度を比較することで、設計法の妥当性を検討した。

FL値（ R/L ）の算定にあたっては、PDの敷設本数から置換率を求めて改良後の e_i, N_i 値を逆算し、その N_i 値を旧道路橋示法書⁶⁾に示される(5)式、(6)式に代入して液状化強度比 R 、繰り返しせん断応力比 L を求めた。

$$R=0.0882\sqrt{Na/1.7} \quad (Na < 14) \cdots (5)式$$

$$R=0.0882\sqrt{Na/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (Na - 14)^{4.5} \quad (14 \leq Na)$$

$$Na = C_1 \cdot N_i + C_2$$

$$N_i = 1.7 \cdot N / (\sigma_v' + 0.7)$$

$$C=1 \quad (0\% \leq F_c < 10\%)$$

$$= (F_c + 40) / 50 \quad (10\% \leq F_c < 60\%)$$

$$= F_c / 20 \quad (F_c \leq 60\%)$$

ここに、 R ：液状化強度比

N ：標準貫入試験から得られるN値

N_i ：有効上載圧 1 kgf/cm^2 相当に換算したN値

Na ：粒度の影響を考慮した補正N値

C_1, C_2 ：細粒分含有率によるN値の補正係数

F_c ：細粒分含有率（%）

$$L_{\max} = \tau_{\max} / \sigma_v'$$

$$= r_d \cdot (\alpha_{\max} / g) \cdot (\sigma_v' / \sigma_v') \cdots (6)式$$

$$\tau_{\max} = r_d \cdot m \cdot \alpha_{\max}$$

$$= r_d \cdot (\gamma \cdot Z / g) \cdot \alpha_{\max}$$

$$= r_d \cdot (\alpha_{\max} / g) \cdot \sigma_v'$$

ここに、 $L_{\max}$ ：最大せん断応力比

$\tau_{\max}$ ：最大せん断応力

r_d ：補正係数（ $=1-0.015Z$ ）

Z ：深度

$\alpha_{\max}$ ：最大加速度

g ：重力加速度

σ_v ：上載圧

σ_v' ：有効上載圧

m ：土柱の質量

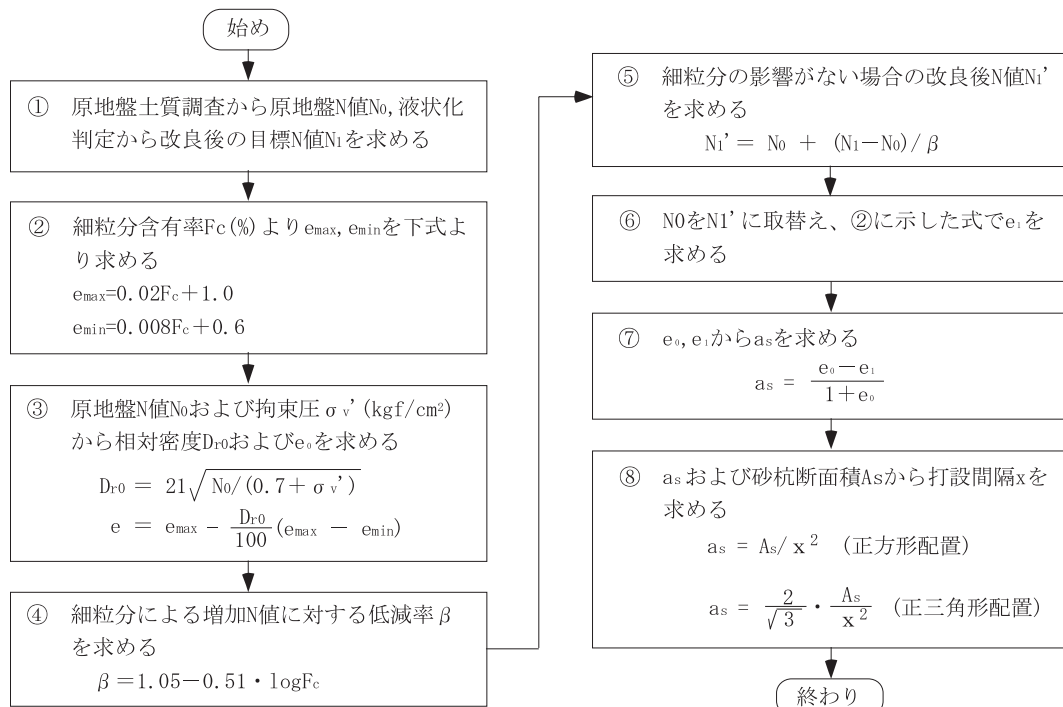


図-11 サンドコンパクションの打設間隔算出の手順
(液状化対策工法設計・施工マニュアル(案)より)

表－４に、液状化抵抗値の計算結果を示す。

図－１２に、加振加速度 α を横軸に、液状化抵抗率FLを縦軸に取り、計算結果をプロットしたものを示す。凡例中、()内の加速度は、各ケースの振動台実験における地盤の液状化時の加振加速度を示す。この図から、ケース①およびケース②では、加速度が $\alpha=80\text{gal}\sim 180\text{gal}$ においてFL値が１以下で、 $\alpha=80\text{gal}$ 以上では液状化するという結果となっていることが分かる。ケース①とケース②の実験では、液状化時の加速度がそれぞれ $\alpha=160\text{gal}$ 、 $\alpha=140\text{gal}$ であり、計算値と異なった結果となった。

従って、SCP工法の設計法では、PD群工法が有する拘束性、排水性に対する補強効果を評価していないことがわかる。

4.3 設計法の提案

4.3.1 設計法の考え方

これまで行った振動台実験の結果を表－５に示す。表中、ケース①～ケース④はPDを敷設した模型地盤の実験結果を、ケース⑤～ケース⑧は地盤密度を変えて行った無処理地盤の実験結果を示す。初期相対密度は加振前の地盤の相対密度で、繰返し回数は過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'v=0.95$ 時に達するまでの加振サイクル数であり、平

均最大せん断応力比 (τ/σ'_v) はその時点における地盤のせん断応力の平均値である。

表－５に示すケース①～ケース⑧の値から、図－１３および図－１４に示すように、繰返し回数20回に対応した繰返しせん断応力比（液状化強度比 R_{20} ）を、振動台実験で用いた試料の液状化強度曲線を用いて求めたものを表－６に示す。表中のケース①～ケース④に示した相対密度は、表－５の平均せん断応力比に対応する無処理地盤の相対密度として図－１３から求めた値（以下、改良相対密度 Dr_p という）である。

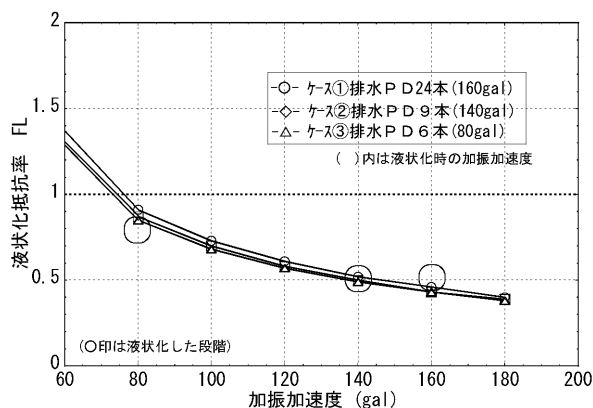
表－６の結果から、相対密度と液状化強度比の関係を

表－５ 振動台実験結果

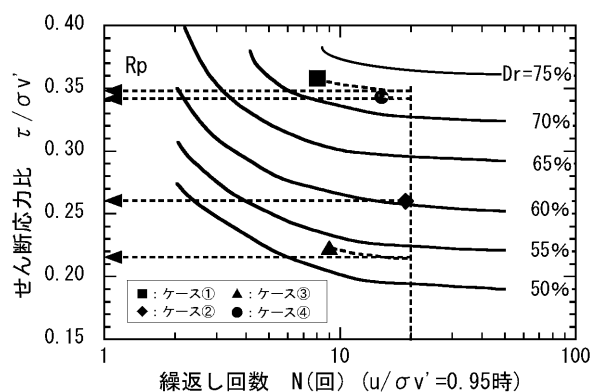
項目 ケース		初期相対密度 Dr_0 (%)	繰返し回数 N (回)	平均せん断 応力比 (τ/σ'_v)
①	PD24本	48.4	8.0	0.358
②	PD 9 本	56.9	19.0	0.260
③	PD 6 本	51.7	9.0	0.223
④	PD24本	43.9	15.0	0.343
⑤	無処理	50.6	5.0	0.213
⑥	〃	55.0	19.5	0.231
⑦	〃	66.0	19.0	0.277
⑧	〃	76.5	1.5	0.488

表－４ 液状化抵抗値の計算結果

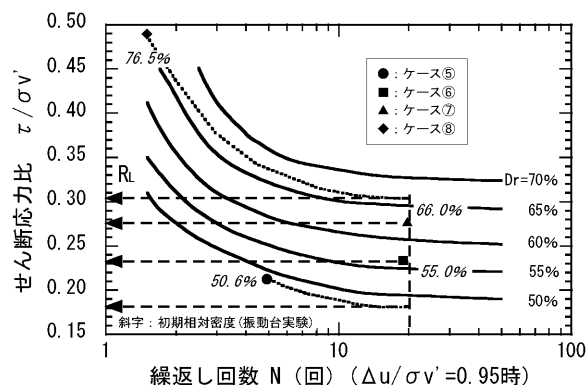
実験ケース		① PD24本	② PD 9 本	③ PD 6 本
項 目				
初期間隙比	e_0	0.899		
置換率	a_s	0.015	0.0094	0.0075
改良後間隙比	e_i	0.867	0.879	0.883
改良後	N 値	5.8	5.2	5.1
液状化抵抗率 FL	80gal	0.91	0.87	0.85
	100gal	0.73	0.70	0.68
	120gal	0.61	0.58	0.57
	140gal	0.52	0.50	0.49
	160gal	0.46	0.43	0.43
	180gal	0.40	0.39	0.38



図－１２ 加振加速度と液状化抵抗率の関係



図－１３ せん断応力比と相対密度(ケース①～ケース④)



図－１４ せん断応力比と相対密度(ケース⑤～ケース⑧)

求めたものを図-15に示す。図中に示した直線は一次回帰式（(7)式）であり、相関係数が $r=0.99$ で、両者の間に高い相関関係があることを示している。この式は岩崎・龍岡らが室内液化試験結果から導き出した式⁴⁾とほぼ一致する。

$$R=0.0043 D_r \cdots (7) \text{式}$$

ここに、 R ：液化化強度比

D_r ：地盤の相対密度（%）

このことから、PD敷設による地盤の液化化強度比の増加分を、改良相対密度から初期相対密度を差し引いた

表-6 液化化強度比と相対密度

項目 ケース	置換率 a_s	液化化強度比 R_{20}	相対密度 D_r (%)
① PD24本	0.015	0.341	72.3*
② PD 9 本	0.0094	0.263	60.5*
③ PD 6 本	0.0075	0.222	53.0*
④ PD24本	0.015	0.348	73.0*
⑤ 無処理	—	0.180	50.6
⑥ “	—	0.232	55.0
⑦ “	—	0.274	66.0
⑧ “	—	0.303	76.5

*：改良相対密度（ D_{rp} ）

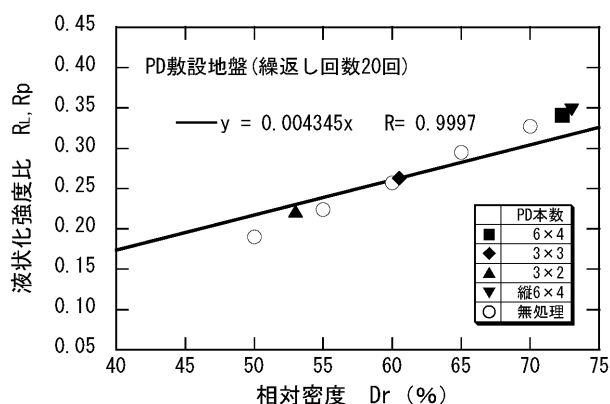


図-15 液化化強度比と相対密度(ケース①～ケース⑧)

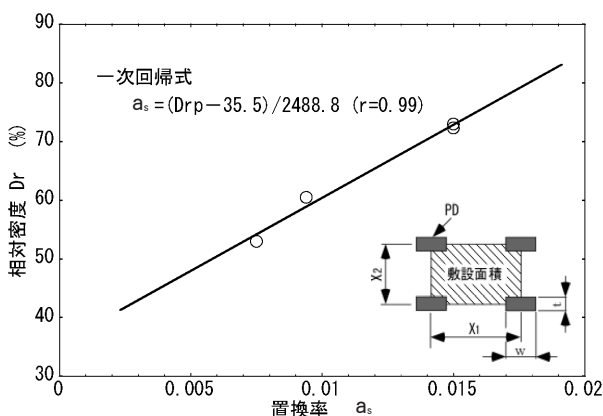


図-16 置換率と改良相対密度の関係

増加分に比例した値として計算できるものとする。

図-16に、表-6のケース①～ケース④における置換率と改良相対密度の関係を示したものを示す。図中の直線は一次回帰式（(8)式）であり、相関係数 $r=0.99$ と両者の間に高い相関関係が見られる。

$$a_s = (D_{rp} - 35.5) / 2488.5 \cdots (8) \text{式}$$

ここに、 a_s ：置換率、 D_{rp} ：改良相対密度（%）

4.3.2 設計手順

前節で述べたことを踏まえたPD群工法の設計法の基本的な考え方を図-17に示す。

地盤の初期相対密度 D_{r0} が置換率 a_s に比例して見かけの増加分 ΔD_{rp} だけ増加したのと考え、地盤の液化化強度比 R_p を相対密度（ $D_{r0} + \Delta D_{rp}$ ）に対応した値（ $R_0 + \Delta R_p$ ）として求めることを基本とする。

図-18に、PDの打設間隔算出手順を示す。

原地盤の液化化抵抗率 FL から液化化判定を行い、液化化する場合以下の手順でPDの打設間隔を決定する。

- (1) 地盤の土質調査結果から液化化強度比 R 、せん断応力比 L を求め、液化化抵抗率 FL を計算する。
- (2) 設計 FL 値（ FL_s ）を設定し、改良後の目標液化化強度比 R_p を計算する。
- (3) 改良後の目標液化化強度比 R_p から細粒分含有率 F_c による液化化強度比の増加分を差し引いて、 R_p を補正する。
- (4) 補正した R_p から改良後の相対密度 D_{rp} を計算する。
- (5) 改良後の相対密度 D_{rp} から置換率を求め、PDの打設間隔 X を計算する。

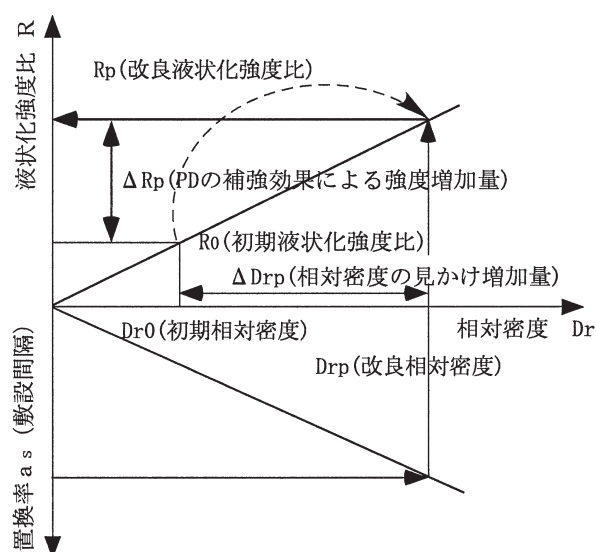


図-17 PD群工法の設計法における基本的な考え

5. まとめ

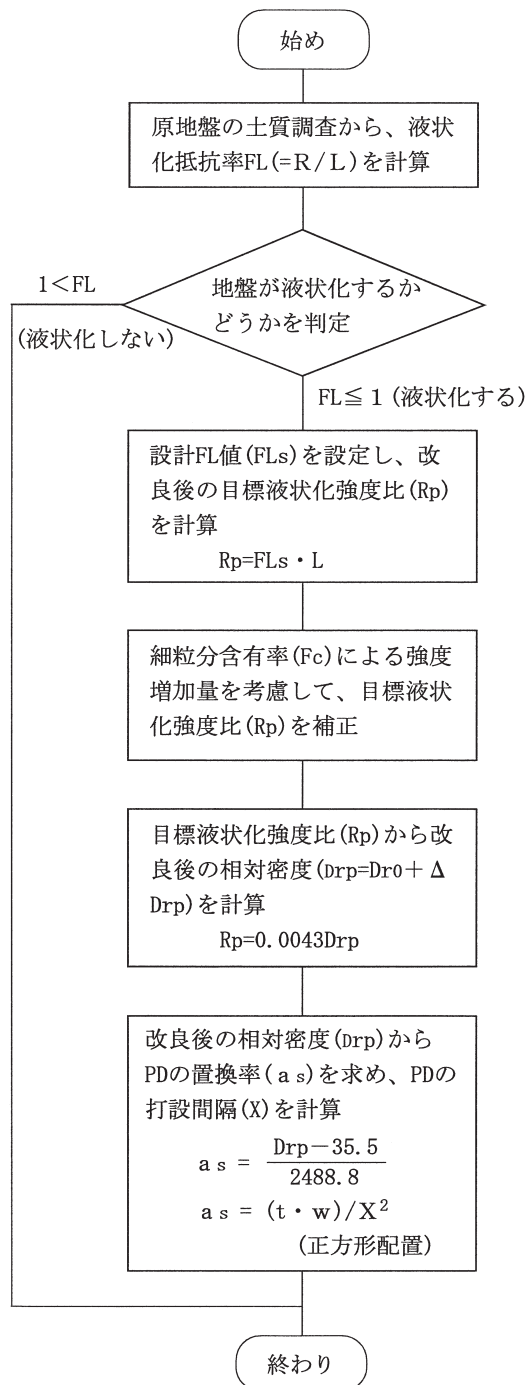
室内で行った振動台実験から得られた測定値と、実験に用いた試料・材料の材料特性、および相対密度、加振加速度などの実験条件を用いてグラベルドレーン工法（排水系対策工）とSCP工法（密度増加対策）の設計法から求めた計算値を比べた結果、両設計法の計算値とも実験値と大きな差異があり、PD敷設による液状化強度の増分が過小に評価されることが分かった。

それらを踏まえて、PDを敷設した地盤では、無処理地盤での相対密度（初期相対密度）がPD敷設により見掛け上増加し、地盤の液状化強度比が増加することを基本とする設計法を提案した。

今後、さらに室内振動台実験等を行い、それらの結果を検討して、PD群工法の評価法を確立していきたいと考える。

[参考文献]

- 1) 建設省土木研究所：液状化対策工法設計・施工マニュアル（案）と液状化対策工法設計・施工マニュアル（案）にもとづく試設計例、1999
- 2) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版）、1997
- 3) グラベルドレーン工法研究会：グラベルドレーン工法（技術資料）、1990
- 4) 龍岡文夫・岩崎敏男・常田賢一・安田進他：A Method for Estimating under Cyclic Strength of Sandy Soils using Standard Penetration N-values、土質工学会論文報告集、Vol 18、No.3、pp.43～58、1978
- 5) 安田進：液状化の調査から対策工まで、鹿島出版会、1990
- 6) 日本道路協会編：道路橋示法書・同解説Ⅴ、耐震設計編、1996
- 7) 石原研而：土質動力学の基礎、鹿島出版会、1991
- 8) 土質工学会編：地盤工学における模型実験（入門シリーズ19）、1994
- 9) 地盤工学会編：液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム、pp.245～248、1999
- 10) 田中泰雄、古石賢、溝口敬人、有村貴紀：空気圧浮上式振動台実験の構築と液状化実験、第38回地盤工学研究発表会、pp.1973～1974、2003
- 11) 阿知波文夫、水谷俊孝、上野誠、松尾稔：補強土工法の液状化抑止効果に関する実験的研究、土木学会論文集、No.487/Ⅲ-26、pp.41～50、1994



図－18 PD打設間隔算出手順