

# 格子状改良体で拘束された地盤の簡易液状化評価法

石川 明 社本 康広 木村 匠  
(技術研究所) (技術研究所) (設計・プロポーザル統括)

## A Simplified Method for Evaluating the Liquefaction of Sandy Soil Confined by a Lattice-type Deep Mixing Wall.

by Akira Ishikawa, Yasuhiro Shamoto and Takumi Kimura

### Abstract

A simplified method for evaluating the liquefaction of sandy soil confined by a lattice-type deep mixing wall is proposed in this paper. The method calculates the accumulative excess pore water pressure from the initial shear strain using an equivalent shear-stiffness model by homogenization method. The method uses only parameters that are clear in their physical meaning, and can evaluate not only the effect of variations in the external forces, but also the physical properties of the ground. This paper first explains the proposed idea and then presents a specific calculation procedure using an actual site plan.

### 概要

砂のせん断ひずみの蓄積による累積損傷の概念と均質化法による等価な地盤せん断モデルを用いた格子状改良地盤の簡便な液状化評価法を提案した。評価法は、必要な諸定数の物理的な意味が明確であり、地震外力の評価だけでなく異なった地盤の影響を合理的に評価できる点に特徴がある。まず、提案法の考え方について示し、次に実案件を例とする具体的な計算方法を提示する。

### § 1. はじめに

格子状地盤改良工法は地盤内にセメント系改良により格子状の壁を作成することで液状化防止を行う工法である<sup>1) 2) 3)</sup>。従来、提案されていた設計法<sup>4)</sup>は、入力地震動の強さを考慮できない問題点があり、田屋・内田ら(2007)<sup>4)</sup>は、この問題を解決した新たな設計法を提案している。しかしながら、提案手法は、特定の地盤条件に対する安全評価に基づいて、設計に用いる諸係数を決めたものであり、条件の異なる地盤に対してどの程度一般性があるのか不明である。

本論文では、格子状の地盤改良によって地震時の地盤のせん断ひずみが低減することを評価するために、累積損傷の概念と均質化理論<sup>5)</sup>を組み合わせた簡便な評価法を提案した。提案した評価法に必要な諸定数は、物理的な意味が明確であり、地震外力の評価だけでなく異なった地盤の影響を合理的に評価できる点に特徴がある。

### § 2. 格子状改良地盤の液状化評価法

#### 2.1 評価法の考え方

砂地盤はある一定レベル以上の初期せん断ひずみが

蓄積されると液状化に至り、その後はひずみレベルが急激に増加する(図-1左)。ここに、初期せん断ひずみの「初期」とは地震時外力を受けて生じるせん断ひずみのうち、液状化に達する以前のものを意味する。同じ外力を受けても、剛性の高い格子状改良により初期せん断ひずみを一定レベル内に抑制できれば、液状化に至るだけのひずみエネルギーが蓄積されず、液状化が生じないことになる(図-1右上)。

提案する評価法では、このことを累積損傷度の考えに基づいて、初期せん断ひずみと過剰間隙水圧の一意な関係として定める<sup>6)</sup>。また、改良地盤を均質化法により等価なせん断剛性を有する仮想地盤として考えることで、地盤の非線形性を考慮しつつ初期せん断ひずみは簡易に求めることができる(図-1右下)。以下に具体的な手順について示す。

#### 2.2 沖積砂の繰返し変形特性

既往の研究成果から、繰返しせん断に伴うせん断応力 $\tau$ とせん断ひずみ $\gamma$ には次のような関係が存在する<sup>7)</sup>。

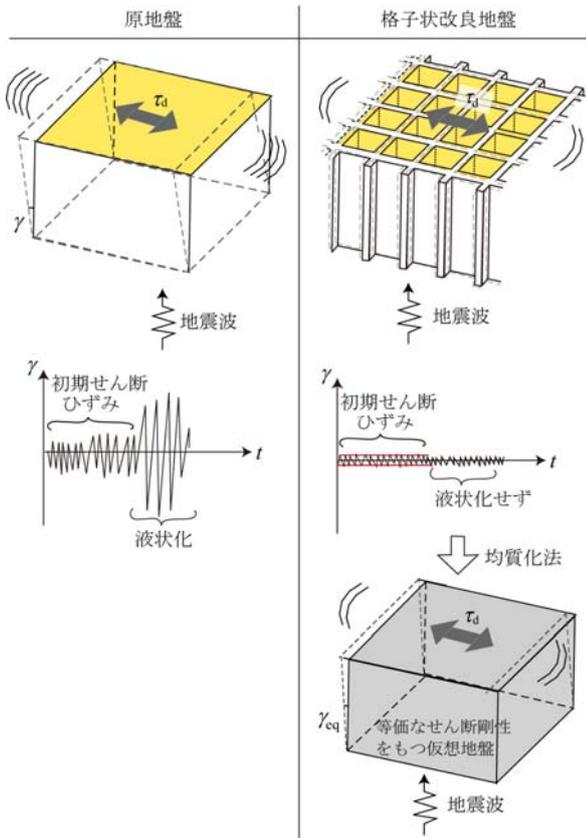


図-1 評価法の考え方

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0} \times \left[ 1 + \left( \frac{2}{\gamma_{rf}} \cdot \frac{\tau}{G_0} \right)^{\beta-1} \right], \beta = \frac{1 + \pi \cdot h_{\max}}{1 - \pi \cdot h_{\max}} \quad (1)$$

ここで、 $h_{\max}$  は最大減衰定数で、砂の場合は 0.2～0.25 の値をとる。 $G_0$  は初期せん断剛性、 $\gamma_{rf}$  は基準せん断ひずみでせん断剛性が 1/2 になるせん断ひずみである。 $G_0$  や  $\gamma_{rf}$  は砂の種類によって異なるが、典型的な事例として  $G_0 = 38 \text{ MPa}$ 、 $h_{\max} = 0.2$ 、 $\gamma_{rf} = 0.1\%$ 、鉛直有効応力  $\sigma'_v = 100 \text{ kPa}$  とした場合の計算例を図-2、3に示す。図-2 はせん断剛性の低下率とせん断ひずみの関係を、図-3 はせん断応力とせん断ひずみの関係を図示したものである。

### 2.3 液状化強度と繰返しせん断に伴う過剰間隙水圧の変化

液状化強度を表現する場合、繰返しせん断応力比  $R_l$  と液状化に至った繰返し回数  $N_l$  の関係をプロットし、繰返し回数が 20 回で液状化に至るせん断応力比  $R_{20}$  を求めて液状化強度として規定している。沖積砂や埋立て砂のような緩い砂の場合、 $R_l$  と  $N_l$  の関係は図-4のように両対数軸上でほぼ直線を示し、次式のような

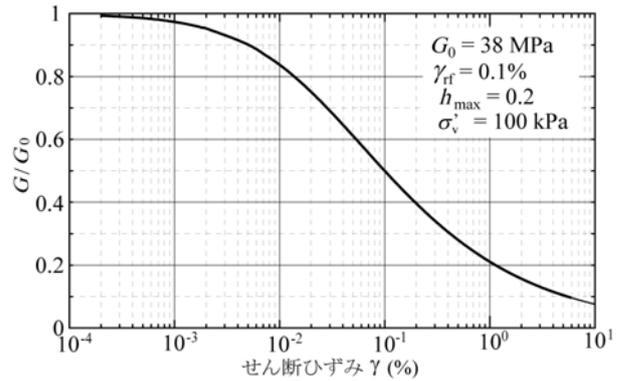


図-2 砂のせん断剛性低下率とせん断ひずみの関係

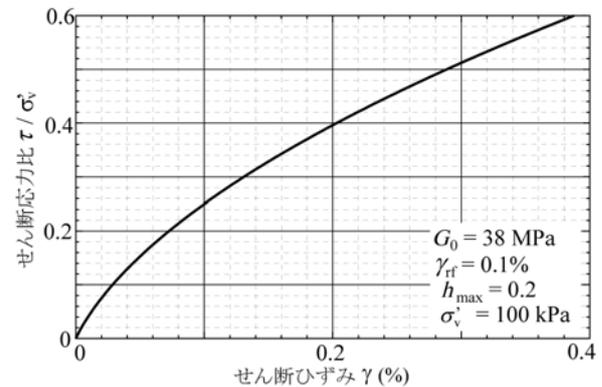


図-3 砂のせん断ひずみとせん断応力の関係

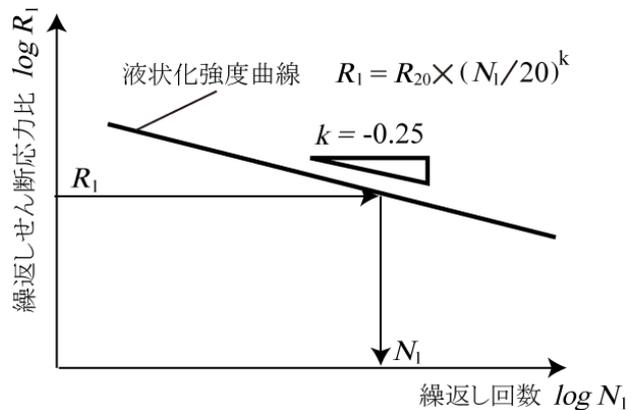


図-4 液状化強度曲線の模式図

関係式で表すことができる<sup>8)</sup>。

$$R_l = R_{20} \times \left( \frac{N_l}{20} \right)^k \quad (2)$$

上式で  $k$  は、実験定数であり、緩い砂の場合は -0.25 程度の値をとる。式(2)から、繰返しせん断応力比  $R_l$  が与えられると液状化に至る回数  $N_l$  を計算することができる。 $R_l$  1 回の繰返しで  $1/N_l$  だけ液状化に近づいたと見なせるので、20 回の繰返しせん断が生じた際の累積損傷度を求めると次式のように表せる。

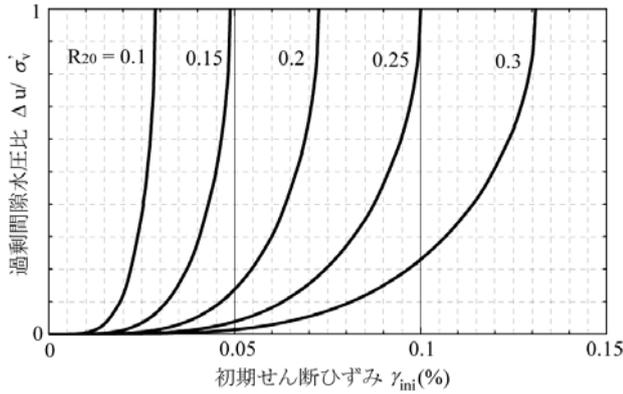


図-5 初期せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係

$$R_n = \frac{20}{N_l} \quad (3)$$

この状態で生じる過剰間隙水圧比は De Alba の提案式<sup>9)</sup>を用いて次式で表すことができる。

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_v} = \frac{2}{\pi} \cdot \text{Arc sin} \left( R_n \alpha_{rf} \right) \quad (4)$$

ここで、 $\alpha_{rf}$  は実験定数であるが、緩い砂では 0.7 である。 $R_l = \tau / \sigma'_v$  であることから、式(4)に(3)、(2)、(1)を順次代入すると図-5に示す初期せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係が得られる。図から、液状化強度が小さいほど小さな初期せん断ひずみで液状化に至ることがわかる。

## 2.4 格子状改良地盤の液状化検討フロー

前節で求めた図-2、3、5を用いて、格子状改良で拘束された地盤の液状化を以下の手順で評価する。

### ① 等価繰返しせん断応力比の算定

地震時に地盤に生じるせん断応力 $\tau_d$ は、地震応答解析等から算定できるが、簡便には簡易液状化判定法<sup>10)</sup>に用いられている次式を用いて求めることができる。

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_v} = 0.1 \times (M - 1) \times \frac{\alpha_{\max}}{g} \times \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v} \times (1 - 0.015 \times z) \quad (5)$$

ここに、 $M$ : マグニチュード、 $\alpha_{\max}$ : 未改良地盤での地表最大加速度、 $z$ : 深度(m)、 $g$ : 重力加速度、 $\sigma'_v$ : 鉛直有効応力、 $\sigma'_v$ : 鉛直全応力、である。

### ② 拘束された地盤のせん断ひずみの算定

上式で算定された $\tau_d$ に対する初期せん断ひずみを次式により求める。

$$\gamma_{ini} = \frac{\tau_d}{G_{eq}} \quad (6)$$

ここに、 $G_{eq}$  は格子状改良地盤の等価なせん断剛性で

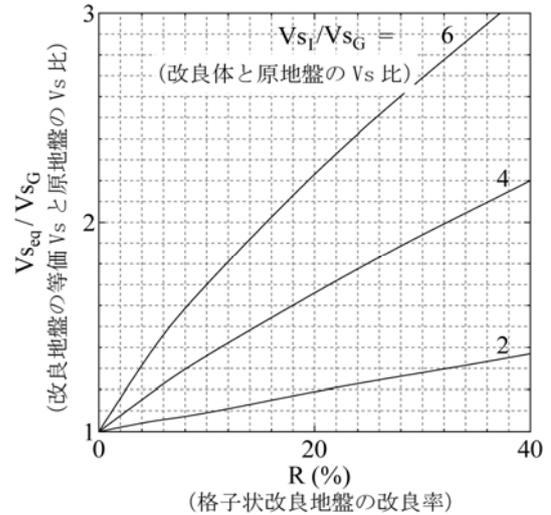


図-6 改良地盤の等価せん断波速度の設計チャート

ある。図-6は均質化法による計算を用いて格子状改良地盤の改良率と等価なせん断波速度の関係をチャート化したものである<sup>5)</sup>。この関係から、改良率と改良体の剛性が定まれば、改良地盤全体としての等価なせん断剛性が一意に定まることになる。

式(6)により得られた $\gamma_{ini}$ の値に応じて、図-2により地盤のせん断剛性を低下させ、図-6の設計チャートにより再度、 $G_{eq}$ を求める。このサイクルを $\gamma_{ini}$ が収束するまで数度繰返し、 $\gamma_{ini} = \gamma_{eq}$ を決定する。 $\gamma_{eq}$ は改良地盤に生じる等価な初期せん断ひずみである。

③ 求めた $\gamma_{eq}$ を用いて図-5から地盤に生じる過剰間隙水圧比を求める。図-5において、過剰間隙水圧比が 1.0 未満であれば水圧上昇は限定的で地盤は液状化に至らない。

原地盤(未改良地盤)の液状化の有無は、(2)式による繰返しせん断応力比を図-3に代入して対応するせん断ひずみを図-5のチャートに代入することで判定できる。図-7は以上の手順をフローにまとめたものである。

## 2.5 改良前後の地盤の液状化安全率(FL 値)

改良地盤に生じる等価な初期せん断ひずみ $\gamma_{eq}$ および、図-5から求められる液状化に至る初期せん断ひずみ $\gamma_l$ をそれぞれ図-3に示す砂のせん断応力—せん断ひずみ関係に代入することにより、対応するせん断応力 $\tau_{eq}$ 、 $\tau_l$ を求めることができる(図-8)。液状化安全率(FL 値)は液状化をひき起こすせん断応力 $\tau_l$ に対する改良前後の地盤のせん断応力の比であることから、次式により求めることができる。

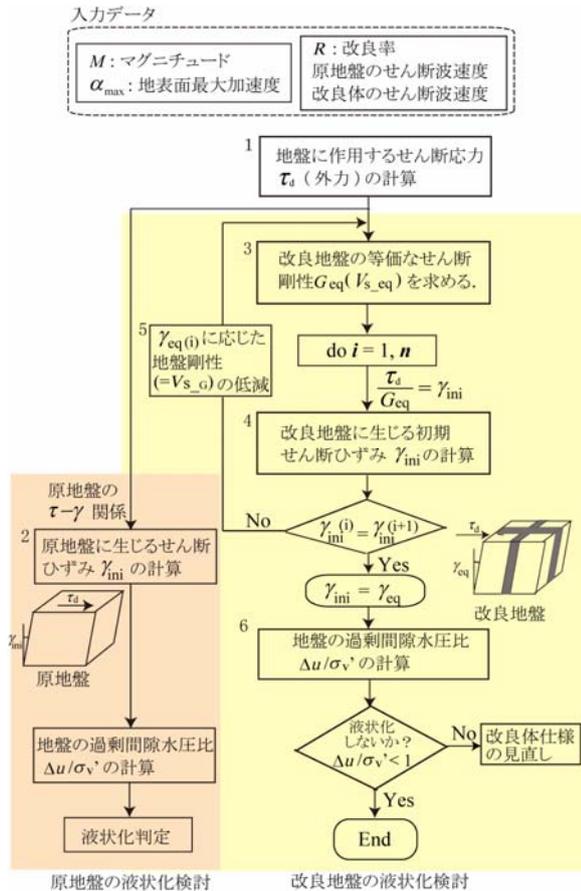


図-7 格子状改良地盤の液状化検査フロー

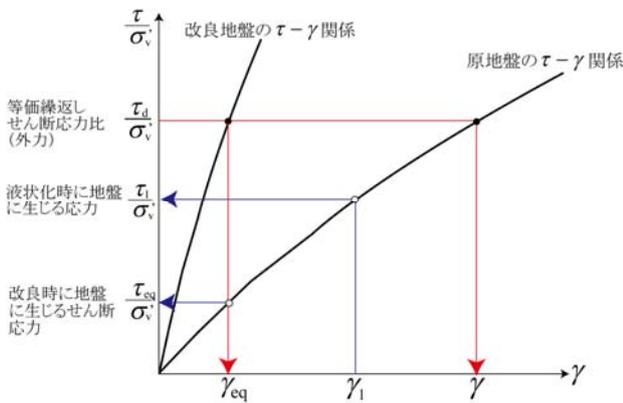


図-8 改良前後の地盤のFL値

$$\text{(未改良地盤の FL 値)} \quad FL = \frac{\tau_l}{\tau_d} \quad (7)$$

$$\text{(改良地盤の FL 値)} \quad FL = \frac{\tau_l}{\tau_{eq}} \quad (8)$$

### § 3. 実案件における設計例

#### 3.1 建物と地盤概要

本章では提案手法を実案件の格子状改良地盤の設計に適用した例について述べる。この案件は、地上 29F の免震高層マンションである。敷地地盤は N 値 1~20 の緩い細砂層とシルト層の互層となっている(図-9)。基礎構造設計指針による簡易液状化評価法<sup>11)</sup>によれば、地表面最大加速度  $\alpha_{max} = 3.5 \text{ m/s}^2$  で FL 値は最小 0.43 となり、強い地震が生じた際には液状化の可能性がある(表-1)。

#### 3.2 格子状改良体

図-10 は地盤の液状化を防止するために、本現場で計画された格子状改良の平面図を示したものである。改良は直径 1200mm の柱状の改良体をその端部を有効幅 1m となるようにラップさせて打設する。改良深度は約 15m であり、敷地全体に対する改良率は約 20% である。改良体のせん断波速度は平均値として  $V_s = 600 \text{ m/s}$  とした。

#### 3.3 提案法による格子間地盤の液状化評価

表-1 に示した簡易液状化評価法による液状化判定の結果、FL 値が小さかった GL-8.3m、GL-10.3m の 2 深度と、地中応力が小さく液状化し易いと想定される GL-4.3 m の 3 深度で、提案法による検査を行った。ここでは、例として GL-4.3m の結果について示す。

まず、GL-4.3 m における以下のパラメーターから図-11~13 の関係が一意に定まる。

[G.L-4.3 m の地盤パラメーター]

- ・拘束圧  $\sigma'_v = 65 \text{ kPa}$
- ・地盤の初期せん断剛性  $G_0 = 35 \text{ MPa}$   
( $V_s = 140 \text{ m/s}$ )
- ・地盤の基準ひずみ  $\gamma_{IT} = 0.03 \%$
- ・地盤の最大減衰定数  $h_{max} = 0.2$
- ・地盤の液状化強度  $R_{20} = 0.15$

図-13 に示した初期せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係から、この深度では、せん断ひずみ  $\gamma_1$  が  $6.5 \times 10^{-2} (\%)$  より大きくなると過剰間隙水圧が 1 に達し、地盤が液状化することがわかる。また、地表面最大加速度  $\alpha_{max} = 3.5 \text{ m/s}^2$  が生じた場合に地盤に生じる外力(等価繰返しせん断応力比)  $\tau_d / \sigma'_v = 0.24$  を図-12 に代入すると、未改良の場合に地盤に生じる初期せん断ひずみ  $\gamma = 0.14$  が求められる。このせん断ひずみは液状化に達するせん断ひずみ  $\gamma_1$  より大きいため、未改良の場合は地震時に地盤が液状化する(図-13)。

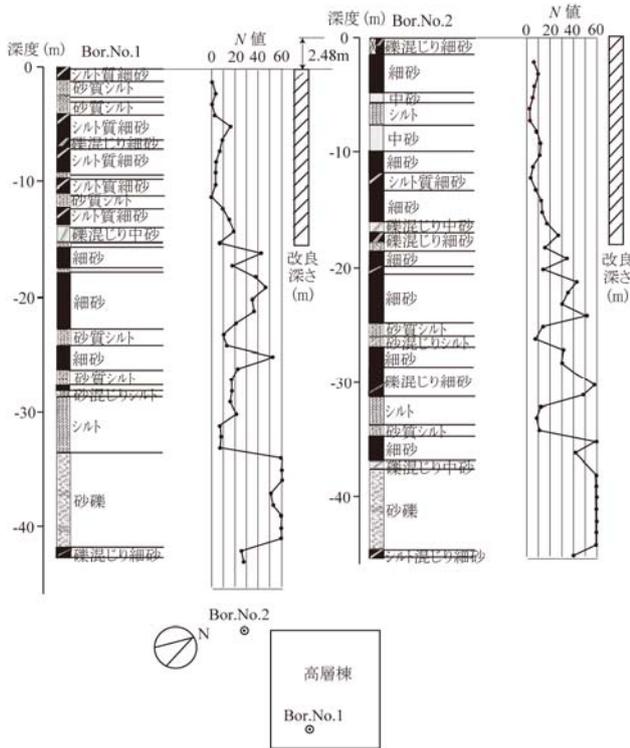


図-9 地盤柱状図

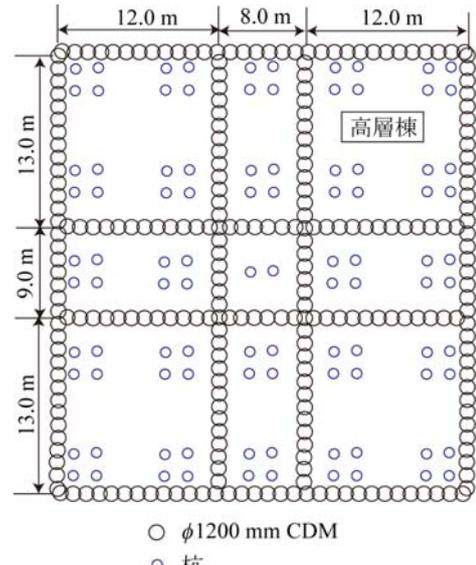


図-10 地盤改良平面図

表-1 簡易液状化評価法による未改良地盤の液状化判定

ボーリングNo.1 地下水位 G.L.-3.5m, 地震のマグニチュード M=7.5, 地表面水平加速度  $\alpha_{max} = 3.5 \text{ m/s}^2$

地盤条件			計算条件				等価繰返しせん断応力比			液状化抵抗比				安全率	
下端深度	地盤区分	単位体積重量 $\gamma_t$	計算深度	N値	細粒分含有率 $F_c$	粘土含有率 $C_c$	有効応力 $\sigma'_v$	$\gamma_d$	せん断応力比 $\tau_d/\sigma'_v$	換算N値係数 $C_n$	換算N値 $N_1$	補正N値増分 $\Delta N_f$	補正N値 $N_a$	液状化強度 $\tau_1/\sigma'_v$ ( $R_{20}$ )	$F_1$
G.L.-m		$\text{kN/m}^3$	G.L.-m		%	%	kPa								
5.1	シルト質細砂	17.6	4.3	3	28.8	13.8	64	0.94	0.24	1.24	3.7	8.9	12.6	0.15	0.62
6.1		17.6	5.3	16	23.4	8.8	72	0.92	0.27	1.17	18.6	8.3	26.9	0.60	2.23
6.9		17.6	6.3	10	5.4	1.9	80	0.91	0.28	1.11	11.1	0.5	11.6	0.14	0.50
9.2		17.6	7.3	7	25.2	8.5	87	0.89	0.30	1.06	7.4	8.5	15.9	0.17	0.58
		17.6	8.3	4	10.9	1.7	96	0.88	0.30	1.01	4.0	6.2	10.2	0.13	0.44
9.5		16.7	9.3	3	35.9	17.8	103	0.86	0.31	判定対象外					
10.9	17.6	10.3	3	21.4	5.6	109	0.85	0.32	0.95	2.8	8.1	10.9	0.14	0.43	
12	砂質シルト	16.7	11.3	0	53.2	21	117	0.83	0.32	判定対象外					
13.7	細砂	17.6	12.3	10	33.6	9	124	0.82	0.32	0.89	8.9	9.4	18.3	0.20	0.62
			13.3	15	10.9	3.2	132	0.80	0.32	0.86	12.9	6.2	19.1	0.21	0.66
15.2	細砂	17.6	14.3	19	8.9	2.8	140	0.79	0.32	0.84	15.9	4.7	20.6	0.25	0.76
17.4			17.3	18	27.8	14.1	162	0.74	0.32	0.78	14.0	8.8	22.8	0.32	0.99

一方、格子状改良した場合に地盤に生じるせん断ひずみ $\gamma_{eq}$ は以下のように求められる。ここで、改良体は弾性体と仮定し、そのせん断剛性は密度 $\rho = 1.8 \text{ g/cm}^3$   $V_s = 600 \text{ m/s}$  から求めた。

(1 回目のイタレーション)

まず、改良体と地盤の  $V_s$  比から、

$$V_1/V_{SG} = 4.3 \quad (9)$$

この  $V_s$  比と改良率 20% から、等価せん断剛性のチャートを用いると、

$$V_{Seq}/V_{SG} = 1.7 \quad (10)$$

となる(図-14)。これより、

$$V_{Seq} = 1.7 \times V_{SG} = 1.7 \times 140 \text{ m/s} = 238 \text{ m/s} \quad (11)$$

等価せん断剛性  $G_{eq}$  は、

$$G_{eq} = \rho V_{Seq}^2 = 1.8 \times 238^2 = 102 \text{ MPa} \quad (12)$$

と計算されるため、外力作用時のせん断ひずみ $\gamma_{eq}$ は、

$$\gamma_{eq} = \tau_d/G_{eq} = (0.24 \times 64) / (102 \times 1000) = 1.5 \times 10^{-2} (\%) \quad (13)$$

となる。

(2 回目のイタレーション)

(13)式から求めた $\gamma_{eq}$ に応じて、地盤のせん断剛性を低減させる(図-11)。

$$G/G_0 = 0.62 \therefore G = 0.62 \times G_0 = 0.62 \times 35 = 22 \text{ MPa} \quad (14)$$

$$V_{SG} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 110 \text{ m/s} \rightarrow V_{S1}/V_{SG} = 5.4 \quad (15)$$

(15) 式の関係を用いて、(10)式と同様に等価せん断波速度  $V_{Seq}$  を求める。せん断ひずみ $\gamma_{eq}$  が一定値に収束するまで同様の計算を繰り返す。本計算ではイタレーション 3 回で $\gamma_{eq} = 1.8 \times 10^{-2} (\%)$  の一定値に収束した。図-13 から、この初期せん断ひずみでは液状化に至らないことがわかる。表-2 は各深度における改良間地盤のせん断ひずみの計算結果を、図-15、16 は-8.3m、-10.3m のせん断ひずみと過剰間隙水圧の関係を示したものである。図からわかるように、検討対象としたすべての深度で改良後は液状化が抑制されている。

### 3.4 改良前後の液状化安全率(FL 値)

改良前後の FL 値は(7)、(8)式から求められる。

(G.L-4.3 m)

$$\text{未改良地盤} \quad FL_1 = \tau/\tau_d = 0.15/0.24 = 0.63$$

$$\text{改良地盤} \quad FL_2 = \tau/\tau_{eq} = 0.15/0.06 = 2.5$$

(G.L-8.3 m)

$$\text{未改良地盤} \quad FL_1 = 0.43$$

$$\text{改良地盤} \quad FL_2 = 1.6$$

(G.L-10.3 m)

$$\text{未改良地盤} \quad FL_1 = 0.44$$

$$\text{改良地盤} \quad FL_2 = 1.8$$

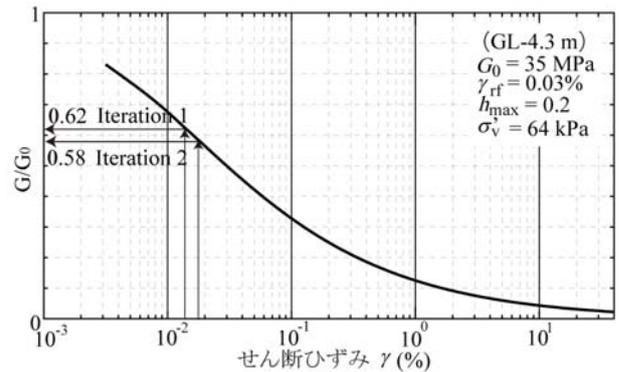


図-11 砂のせん断剛性低下率とせん断ひずみの関係と各イタレーションでの低下率

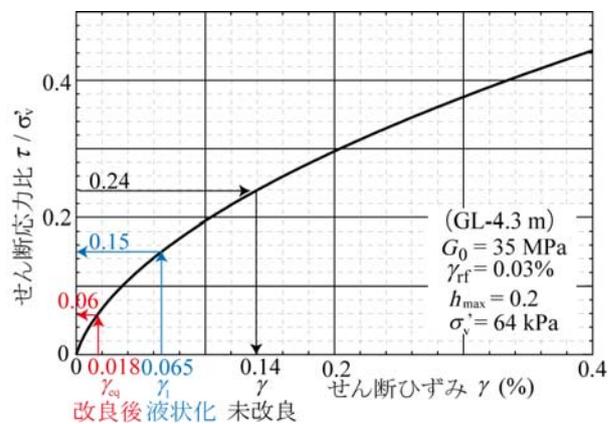


図-12 砂のせん断ひずみとせん断応力の関係と各せん断ひずみに対応するせん断応力比

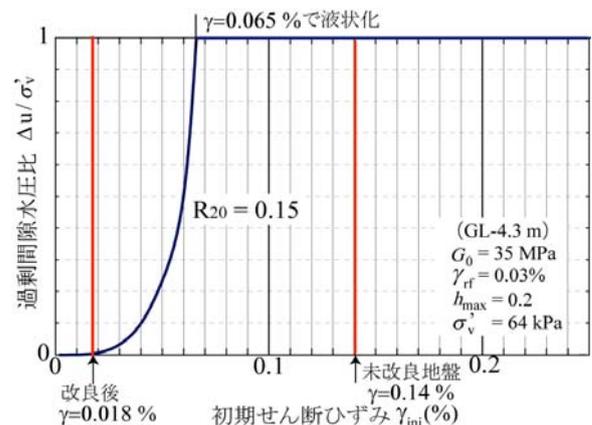


図-13 初期せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係と改良前後のせん断ひずみ

未改良地盤の FL 値は表-1 に示した簡易液状化評価法による FL 値とほぼ一致している。また、改良地盤の FL 値はいずれも 1 を越えており、液状化に対して安全であると判断できる。

表-2 改良間地盤のせん断ひずみの計算結果

深度	地盤		改良体		等価体		Vs比		せん断応力比	有効応力	せん断ひずみ	備考	
	V <sub>S<sub>G</sub></sub>	G <sub>G</sub>	V <sub>S<sub>I</sub></sub>	G <sub>I</sub>	V <sub>S<sub>eq</sub></sub>	G <sub>eq</sub>	V <sub>S<sub>I</sub></sub> /V <sub>S<sub>G</sub></sub>	V <sub>S<sub>eq</sub></sub> /V <sub>S<sub>G</sub></sub>	$\tau_d / \sigma'_v$	$\sigma'_v$	$\gamma_{eq}$		
	m/s	MPa	m/s	MPa	m/s	MPa					%		
GL-4.3m	140	35	600	648	238	102	4.3	1.70	0.24	64	0.015	0.62	Iteration 1
	110	22			220	87	5.4	2.00	0.24	64	0.018	0.58	Iteration 2
	107	20			221	88	5.6	2.07	0.24	64	0.018		Iteration 3
GL-8.3m	140	35	600	648	238	102	4.3	1.70	0.30	96	0.028	0.7	Iteration 1
	117	25			225	91	5.1	1.92	0.30	96	0.032	0.68	Iteration 2
	115	24			224	90	5.2	1.94	0.30	96	0.032		Iteration 3
GL-10.3m	140	35	600	648	238	102	4.3	1.70	0.32	109	0.034	0.67	Iteration 1
	115	24			222	89	5.2	1.94	0.32	109	0.039	0.65	Iteration 2
	113	23			222	89	5.3	1.97	0.32	109	0.039		Iteration 3

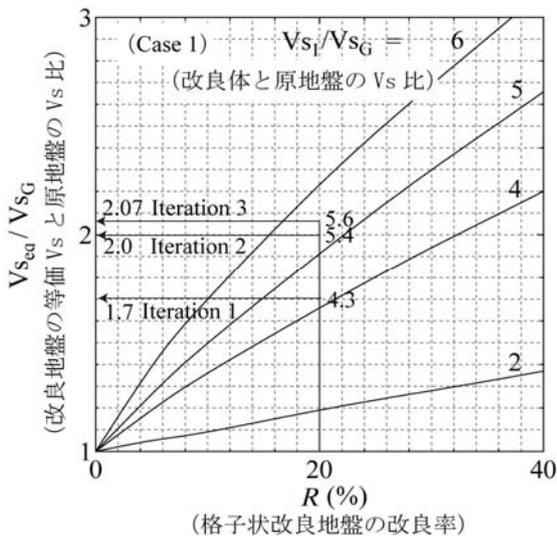


図-14 等価せん断波速度の設計チャートと計算例

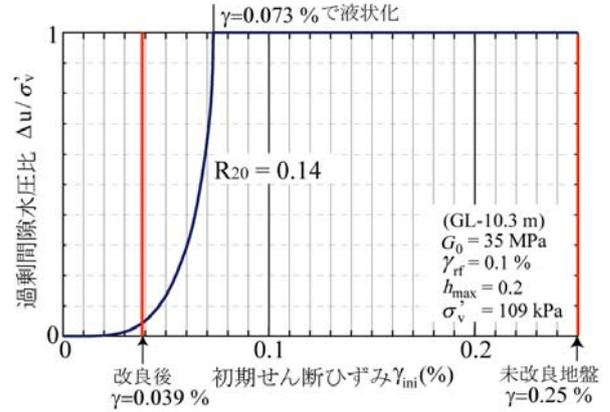


図-16 GL-10.3m における初期せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係

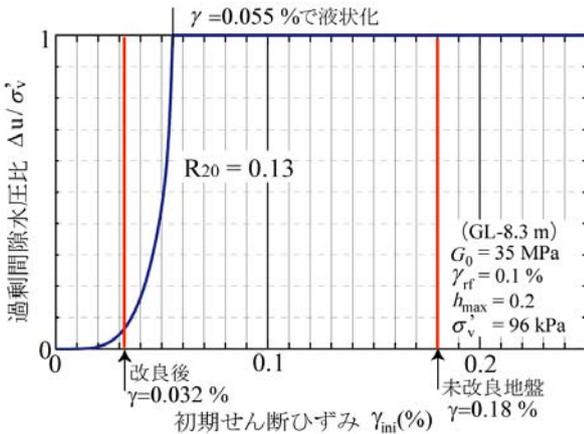


図-15 GL-8.3m における初期せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係

§ 4. 結論

本論文で得られた結論を以下に示す。

1. 砂のせん断ひずみの蓄積による累積損傷による液状化の概念を用いて、液状化に至るまでの初期せん断ひずみと過剰間隙水圧の間に一意の関係があることを示し、これをチャート化した。
2. このチャートと均質化法による等価な地盤せん断モデルを用いた格子状改良地盤の液状化評価法を提案した。この方法は、地震時に格子状改良地盤に生じるせん断ひずみを等価な地盤せん断モデルを用いて算出し、1 の初期せん断ひずみと過剰間隙水圧の関係を用いて液状化の有無を判定する方法である。
3. この評価法を用いた実案件における格子状改良の設計方法を提示した。

<参考文献>

- 1) 建設省土木研究所ほか, “耐震地盤改良工法に関する共同研究報告書(その6)”, 1992
- 2) 古賀泰之, 松尾修, 榎田実, 伊藤浩二, 鈴木吉夫: “深層混合処理工法による砂地盤の液状化対策に関する遠心模型実験(その2)—格子状改良地盤の液状化抑制効果について—”, 第23回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1019-1020, 1988.6.
- 3) Suzuki, K., Babasaki, R. & Suzuki, Y.: “Centrifuge tests on liquefaction-proof foundation.”, Proc. of Centrifuge 91, Colorado, pp.409-415, 1991.6
- 4) 田屋裕司, 内田明彦, 山下清, 鬼丸貞友, 津國正一: “格子状改良における格子間隔の設定法(その1)”, 第42回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1881-1882, 2007.7.
- 5) 石川明, 浅香美治, 社本康広: “均質化法を用いた部分改良地盤の等価S波速度の簡易評価法”, 日本建築学会構造系論文集, Vol.613, pp.67~72, 2007.
- 6) 社本康広, 田地陽一, 石川明, 長谷川正幸, 風間広志, 天利実: “液状化に伴う側方流動に対するバットレス改良工法—その2 改良体に拘束された地盤の液状化強度評価法—”, 第43回地盤工学研究発表会発表講演集, pp 1851-1852, 2008.7.
- 7) 龍岡文夫, 福島伸二: “砂のランダム繰返し入力に対する応力—ひずみ関係のモデル化について”, 生産研究, No.30 (9), pp. 356-359, 1978.
- 8) 社本康広, 時松孝次, 有泉浩蔵: “1次元有効応力解析の实地盤に対する適用性”, 日本建築学会構造系論文集, Vol.433, pp.113-119, 1992.3.
- 9) De Alba, P., Seed, H.B. & Chang, C.K.: “Sand Liquefaction in Large-Scale Simple Shear tests”, Proc. GED, ASCE, Vol 102, No.GT9, pp.909-927, 1976.
- 10) Tokimatsu, K. & Yoshimi, Y.: “Empirical Correlation of Soil Liquefaction based on SPT N-Value and Fine Content”, Soils and Foundations, Vol.23, No.4, pp.56-74, 1983.
- 11) 日本建築学会: “建築基礎構造設計指針”, pp.61-63, 2001.