## 材料定数のばらつきを考慮した固化処理地盤の液状化確率

九州大学大学院 正〇笠間清伸 フェロー 善 功企 正 陳 光斉

## 1. はじめに

固化材などを混合して液状化対策した地盤は、対象地盤の不均質や固化混合の不均一性などにより液状化 強度やせん断波速度等にばらつきを有することが報告されている。本文では、材料定数にばらつきを有する 固化処理地盤の液状化ポテンシャルを評価するための確率統計手法を示す。提案する手法は、固化処理地盤 の一軸圧縮強度の空間的なばらつき、一軸圧縮強度から液状化強度を推定する過程で生じる不確定性、固化 処理地盤のせん断波速度のばらつきを取り入れた地震動の応答特性などを考慮している。提案手法を用いて、 固化処理地盤の材料定数が液状化ポテンシャルに与える影響を評価した。

## 2. 液状化ポテンシャルの評価

本文では、液状化安全率 *F*<sub>L</sub>と液状化指数 *P*<sub>L</sub>を地 盤の液状化ポテンシャルを評価する指標として用い る。液状化安全率 *F*<sub>L</sub>は、液状化に対する地盤要素の 安全性を表わす指標であり、以下の式で与えられる。

 $F_L = R/L$  (1) ここで、R は地盤要素が有する繰返しせん断強度比 であり、L は地盤要素に作用する繰返しせん断応力 比である。一般に、 $F_L < 1$  の時に地盤が液状化する と判断される。本文では、固化処理地盤の有する材 料定数のばらつきを考慮して、R と L を計算する。 それぞれの詳しい計算法は、次節で説明する。得ら れた  $F_L$ の平均値と変動係数を用いて、 $F_L < 1$  となる 確率  $P_r[F_L < 1]$ を計算し、地盤要素の液状化確率とし た。さらに、次式で与えられる液状化指数  $P_L$ を計算 し、 $P_L > 5$  となる確率  $P_r[P_L > 5]$ を求めた。

$$P_L = \int_{-\infty}^{20} F \cdot w(z) \cdot dz \tag{2}$$

ここで、  $F = 1 - F_L \ge w(z) = 10 - 0.5z$  である。

2.1 液状化強度のばらつき

繰返しせん断強度比Rは、液状化試験における繰返し回数 20 回において液状化が生じるときのせん 断応力比 $R_1$ であると定義される。図-1 は、事前混合処理工法技術マニュアル(1999)による一軸圧縮強度 $q_u \ge R_1$ の関係であり、一軸圧縮強度が増加すると多少のばらつきを示しながら直線的に増加する。図-1中の $R_1 \ge q_u$ の関係は、以下の式で表わせる。

$$R = R_l = a \cdot q_u + b \tag{3}$$

ここで、*a*と*b*は、それぞれ回帰曲線の傾きと切片である。式(3)を用いて*q*<sub>u</sub>から*R*<sub>1</sub>を推定するさいに、回帰曲線が有するバイアスや不確実性に起因した系





図-2 せん断波速度と一軸圧縮強度

統誤差(systematic error)が存在する。式(3)が有する系
統誤差を考慮するために、回帰曲線の傾き a は一定
で 0.0025 とし、b は、図-1 中の実験結果を用いて平

均値*b* = 0.24 と *COV<sub>b</sub>* = 0.41 とする統計的定数とした。 2.2 **地震応答特性のばらつき** 

繰返しせん断応力比Lを評価するさいには、固化 処理地盤のせん断波速度のばらつきを考慮し、一次 元地震応答解析を行った。一次元の地震応答解析で は、重複反射理論に基づいた等価線形計算を行った。 固化処理地盤の応力ひずみ関係の非線形性を表現す るために、Hardin-Drnevichモデルを採用し、規準ひ ずみと最大減衰定数は、地盤のばらつきの影響を受 けないと仮定し、それぞれ 5.0×10<sup>-4</sup> と 0.25 と固定し て用いた。ただし、解析に用いる固化処理地盤のせ ん断波速度は、前節で示した R と同様に qu の統計値 から推定することを行った。図-2 は、せん断波速度 Vs と一軸圧縮強度 qu の関係であり、qu と Vs は両対 数紙上で以下の式で示す直線関係があるとした。

$$Vs = 10^c \cdot (q_u)^d \tag{4}$$

ここでも、回帰式の系統誤差を考慮するために、 d=0.21 で定数とし、cは、平均値 c = 2.26 と変動係数 *COV*<sub>c</sub> = 0.04 を示す統計的変数とした。図中には、統 計値から推定した95%信頼性区間を示す。解析では、 深度 20m の地盤を想定し地盤を 1m ごとに 20 分割 した。基盤の入力加速度は、福岡西方沖地震におい て建設技術研究所九州支店の地下-65m 地点で観測 された南北方向の加速度波形を用いた。ただし、解 析では基盤加速度の最大値を、100, 200, 300, 400 お よび 500Gal に修正して使用した。さらに、式(4)を 用いて quの統計値から各層ごとの Vsを計算した後、 一次元の地震応答解析を行い地盤の深度ごとに応答 加速度の最大値を求めた。さらに、この計算を1,000 回行うモンテカルロシミュレーションを実施し、各 深度における応答加速度の最大値の統計値から、以 下の式を用いて繰返しせん断応力比Lを計算した。

$$L = \frac{\alpha_{\max}}{g} \frac{\sigma_{\nu}}{\sigma_{\nu}}$$
(8)

ここで、gは重力加速度、 $\sigma_v \ge \sigma'_v$ はそれぞれ鉛直応 力および鉛直有効応力であり、 $\gamma = 18.5 \text{kN/m}^3$  と  $\gamma = 8.5 \text{kN/m}^3$ として計算した。

## 3. 液状化ポテンシャルの解析結果

図-3 に、深度 10m における液状化確率 $P_r[F_L < 1]$ と 基盤加速度の関係を示す。液状化確率は、基盤加速 度が大きくなるにつれて増加し、その増加傾向は、

一軸圧縮強度が小さいほど顕著であった。



ー軸圧縮強度の変動係数が液状化確率に与える影響については、平均 *F*<sub>L</sub>が 1.0 以上(つまり、平均値で計算して液状化しない状態)では、変動係数が増加すると液状化する確率は増加した。逆に、平均 *F*<sub>L</sub>が 1.0 以下(つまり、液状化する状態)では、変動係数が増加すると液状化する確率は減少した。

図-4 に、一軸圧縮強度の変動係数が 0.6 の時の *P*,[*P*<sub>L</sub> >5]と基盤加速度の関係を示す。*P*,[*P*<sub>L</sub> >5]は、 一軸圧縮強度が小さいときには、急激に増加する。 今回の計算では、基盤加速度が 300Gal 程度の場合に は、平均一軸圧縮強度が 100kPa 以下で変動係数が 0.6 程度の固化処理地盤では液状化による被害が発 生する確率が大きい結果となった。今後は、実際に 施工された固化処理地盤に本提案手法を適応してい きたい。

【参考文献】1))沿岸開発技術研究センター (1999): "事前混合処理 工法技術マニュアル"