

不均質地盤における地震時の信頼性支持力係数の評価

九州大学大学院 学生会員○忽那 惇

九州大学大学院 フェロー 善 功企

九州大学大学院 正会員 陳 光斉

九州大学大学院 正会員 笠間 清伸

1. 背景および目的

事前混合処理や浸透固化処理などの液状化対策を目的として固化処理した地盤では、改良条件や地盤物性などの不均質性が原因で、せん断剛性や液状化強度に空間的な不均質性が存在する。そのため、地震時に局所的な液状化やせん断破壊を生じる可能性があり、地盤の支持力や破壊モードなどに影響すると予想される。

本文では、液状化強度の空間的な不均質性をランダム理論場で表現し、数値極限解析を用いたモンテカルロ・シミュレーションによって、不均質地盤の支持力解析を行った。さらに、その結果を用いて、建築物の限界状態設計指針¹⁾における限界状態設計法に基づいた耐力係数の算出を試みた。

2. 解析概要

本文では、地盤の支持力を数値解析的に求める手法として、上界数値極限解析²⁾を用いた。使用した解析メッシュ図を図-1に、解析フローを図-2に示す。液状化に起因したせん断強度 τ_f の低下を考慮するため、各要素に液状化安全率 $F_L (= R/L)$ を与えた。 F_L は、液状化に対する地盤の安全性を表す指標であり、 $F_L < 1$ のときに地盤が液状化すると判断される。ここで、 F_L は液状化強度比 R と繰返しせん断応力比 L より算出した。地震外力により上昇した間隙水圧を Δu とすると、各要素のせん断強度の低減は、式(1)で表せる。

$$\tau_f = (\sigma' - \Delta u) \tan \phi' = \sigma' (1 - \Delta u / \sigma') \tan \phi' \quad (1)$$

上式の過剰間隙水圧比 $(\Delta u / \sigma')$ は、共同溝設計指針³⁾で用いられる式(2)を用いて、液状化安全率 F_L から算出した。

$$\frac{\Delta u}{\sigma'} = (F_L)^{-7} \quad (2)$$

以上のようにして、各要素での F_L からせん断強度を計算し、数値極限解析を用いて地盤の極限支持力を算出した。図-1に、ランダム理論場で得られた F_L の空間分布の一例を示す。要素の色が濃い箇所ほど F_L が小さく、不均質性を有する地盤が表現されている。

表-1に解析ケースを示す。荷重の傾斜角 β は、鉛直方向と載荷荷重のなす角を表しており、地表面最大加速度 $\alpha_{\max}$ から一意的に決まる。つまり、図-1のような傾斜荷重($\beta = 11.3^\circ$)を、基礎に作用する慣性力と考えて解析を行った。また、液状化強度の自己相関距離 Q_{FL} を非常に小さいと仮定したため、各要素間の強度や F_L に相関性はない、非常に不均質な砂地盤を想定した。

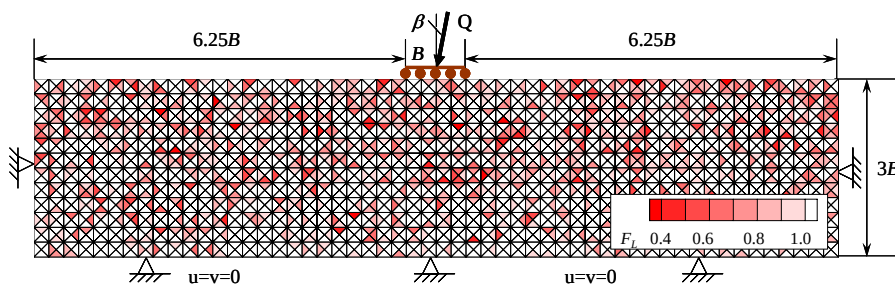
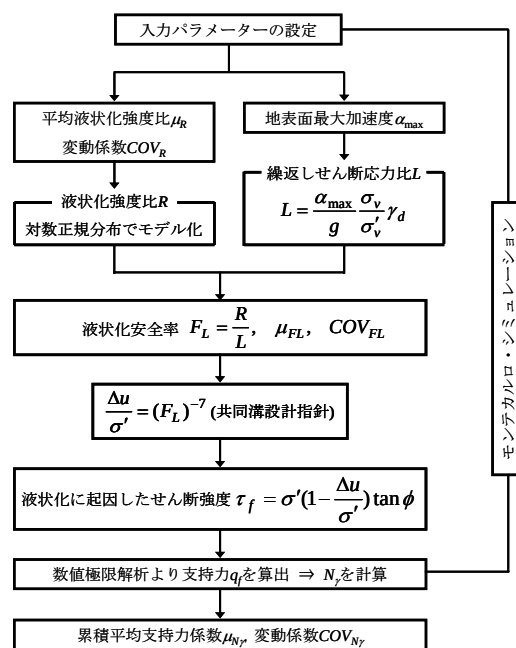
図-1 解析メッシュ図と境界条件($\mu_{FL} = 1.30$, $COV_{FL} = 0.4$, $\alpha_{\max} = 200\text{gal}$, $\beta = 11.3^\circ$)

図-2 解析フロー

表-1 解析ケース

内部摩擦角 ϕ	°	30
単位体積重量 γ	kN/m ³	18.5
有効単位体積重量 γ'	kN/m ³	8.5
地表面最大加速度 $\alpha_{\max}$	gal	50, 100, 150, 200
平均液状化強度比 μ_R		0.5
R の変動係数 COV_R		0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4
荷重の傾斜角 β	°	0, 2.8, 5.7, 8.5, 11.3
自己相関距離 Q_{FL}	m	RANDOM

3. 解析結果および考察

図-3 に、地震時支持力と地表面最大加速度 $\alpha_{\max}$ の関係を示す。ただし、本解析では、基礎への慣性力は考慮せず、液状化のみの影響で支持力が低減した。縦軸の正規化支持力係数とは、各ケースの累積平均支持力係数 μ_{N_f} を平常時の N_f で除した値である。液状化安全率 F_L の変動係数 COV_{FL} が増加する、つまり地盤の不均質性が増すほど F_L の小さな要素が増加し、顕著に支持力が低減した。特に、100gal, $COV_{FL} = 0.4$ で、支持力は平常時の約 0.53 であった。

地震時の支持力低減では、基礎への慣性力の影響を考慮する必要があるため、図-4 に地震時の基礎への慣性力および不均質地盤と地震時支持力の関係を示す。慣性力を考慮した場合、50gal ですでに支持力が低減し始めた。しかし、液状化のみの場合では、100gal までに支持力の低減はあまり見られず、液状化した要素が表れた 150gal で急激に低減した。

次に、限界状態設計法に基づいた地震時支持力係数および式(3)を用いて耐力係数 ϕ_f の算出を行った。

$$\phi_f = \frac{1}{\sqrt{1+V_R^2}} \exp(-\alpha_R \beta_T \zeta_R) \frac{\bar{R}}{R_n} \quad (3)$$

ここで、 α_R , β_T はそれぞれ分離係数(地震時は 0.5)、目標信頼性指標(想定した限界状態の信頼性を定量的に示す尺度)である。また、 ζ_R , $\bar{R}$, R_n および V_R は、それぞれ支持力の対数標準偏差、平均値、公称値および変動係数を表す。各諸変数に関しては参考文献を参照されたい。なお、 $\bar{R}/R_n$ は、本解析で得られた地盤の不均質性と基礎への慣性力を考慮したさいの正規化支持力係数に相当する。

図-5 に、目標信頼性指標 $\beta_T = 2.0$ の場合の耐力係数 ϕ_f と $\alpha_{\max}$ の関係を示す。 ϕ_f は、 $\alpha_{\max}$ と COV_{FL} の増加に伴って大きく低減した。例えば、150gal では、 COV_{FL} が大きくなるほど ϕ_f が大きく低減し、 $COV_{FL} = 0.4$ でほぼ 0 になった。これは、地盤の不均質性を無視して(均質地盤として)設計を行った場合、危険側で判断する可能性があると考えられる。

4. まとめ

本文で得られた結論を、以下に示す。(1) 基礎への慣性力を考慮した砂地盤の支持力解析において、地盤の不均質性が増すと、地震時の液状化に起因したせん断強度の小さな要素が増加し、支持力の低減が顕著に表れた。(2) 得られた解析結果を信頼性設計法に展開し、地震時における液状化を考慮した砂地盤の耐力係数を導入した。地盤の不均質性を考慮しなければ、耐力係数を危険側で判断する可能性がある。＜参考文献＞ 1) 日本建築学会: 建築物の限界状態設計指針, 2002. 2) Sloan, S.W. & Kleeman, P.W.: Upper Bound Limit Analysis Using Discontinuous Velocity Fields. Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 127, pp.293-314, 1995. 3) (社)日本道路協会: 共同溝設計指針, 1986.

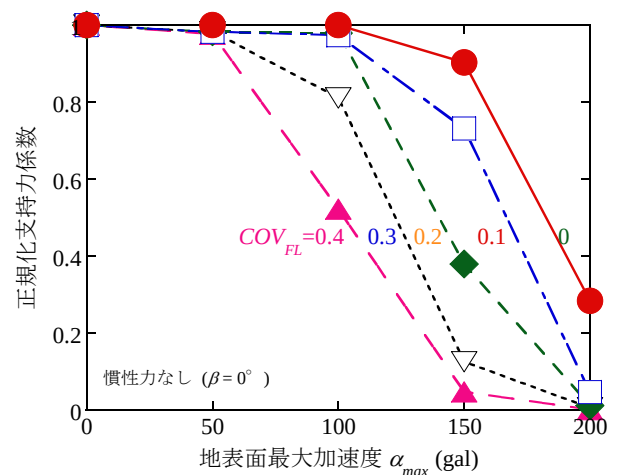


図-3 地震時の不均質地盤における支持力低減

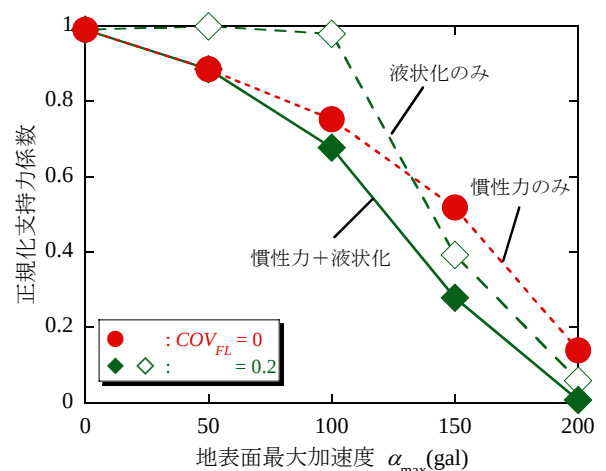


図-4 基礎の慣性力が支持力低減に与える影響

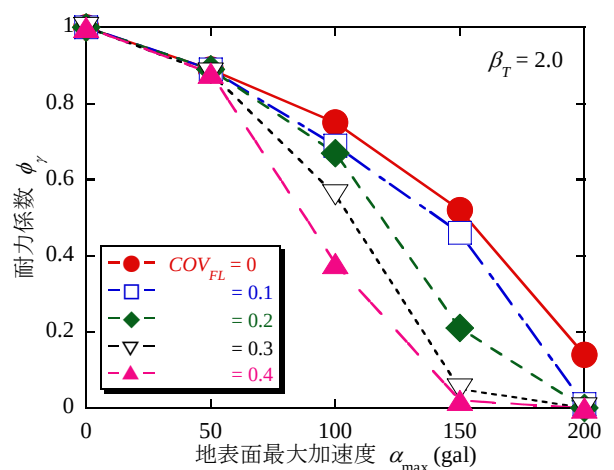


図-5 耐力係数 ϕ_f