

DOI: 10.11779/CJGE202009019

振动作用下碎石桩复合地基渗流理论分析与物理模拟

刘 凯^{1, 2}, 周燕国^{*1, 2}, 孙政波³, 陈云敏^{1, 2}

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058;
3. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 碎石桩技术是常用的抗液化处理措施之一。在地震荷载作用时, 由于桩体材料比桩间土渗透性更高, 能够加快地基土体超静孔压的消散从而部分或完全消除地基的液化可能性。首先将单根碎石桩及其影响范围的地基土当做一个表征体元, 将碎石桩影响边界处的孔压作为已知条件, 基于已有解析解推导了碎石桩复合地基竖向和水平向渗流的计算表达式。并开展了一组碎石桩处理地基超重力振动台模型试验, 用提出的碎石桩复合地基竖向渗流解得到总渗流量, 并基于地基土体的体积守恒关系得到计算沉降值, 与试验结果吻合, 从而验证了提出的碎石桩复合地基渗流计算公式的正确性。进一步基于所推导的渗流计算表达式, 分析了本次超重力振动台模型试验碎石桩复合地基水平向和竖向渗流演化规律。

关键词: 碎石桩复合地基; 振动荷载; 解析解; 渗流排水; 超重力模型试验

中图分类号: TU435; TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)09-1742-09

作者简介: 刘 凯(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事土动力学与地震工程方面的研究工作。E-mail: 11612027@zju.edu.cn。

Theoretical analysis and physical modeling of stone columns-improved ground under shaking loading

LIU Kai^{1, 2}, ZHOU Yan-guo^{1, 2}, SUN Zheng-bo³, CHEN Yun-min^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research Institute, Hangzhou 310006, China)

Abstract: The stone column technique is one of the liquefaction mitigation methods used in liquefiable deposits. Owing to the higher permeability of stone column materials than that of the surrounding soil, the stone columns may expedite the drainage process of the excess pore pressure under seismic loading so that to partly or completely eliminate the triggering of liquefaction. One stone column with the influenced surrounding soil is treated as a representative element, and based on the previous analytical solution to this problem, the analytical solutions for vertical and radial drainages are obtained by considering the excess pore water pressure on the boundary of single stone column-influenced area as the known condition. The centrifugal model tests on stone column-improved ground are carried out. The total drainage water in the centrifuge model improved by stone columns is calculated using the above analytical solution, and is further converted into the settlement based on the equivalent relationship between the seepage discharge and the volumetric change of the surrounding soil. The calculated settlement is found to be in good agreement with the measured one in experiment, which verifies the proposed solution. Furthermore, the evolution of horizontal and vertical drainages of stone column composite deposit in the model tests is analyzed by combining the derived analytical solutions for water drainage with the test results.

Key words: stone column-improved ground; shaking loading; analytical solution; water drainage; hypergravity physical modeling

0 引言

地震液化是国内外历次大地震中导致土工构筑物失效破坏和造成严重经济损失的主要因素之一^[1-3]。地震液化导致的地面上过大沉降和水平侧移是造成房屋、桥梁和地下生命管线等基础设施破坏的主要原因。

当前国内外采用的可液化地基处理技术主要包括换填

基金项目: 国家自然科学基金项目(51988101, 51578501, 51778573, 51978613); 高等学校学科创新引智计划项目(B18047)

收稿日期: 2019-11-18

*通信作者(E-mail: qzking@zju.edu.cn)

法、加密处理、固化技术(水泥、微生物固化等)、导排法(加速超静孔压消散)等, 碎石桩法被认为是最经济和抗液化内涵最全面的技术手段, 其抗液化效果在以往国内外历次大地震中得到检验^[4-5]。在碎石桩复合地基中, 桩体材料渗透性比地基土更大, 在地震过程中和震后可以作为排水通道, 缩短渗流路径, 改善排水条件。因此, 可加速地震时场地超静孔隙水压力消散, 使振动时孔压增长和消散同时发生, 降低孔压峰值, 提高处理地基的抗液化能力。

黄茂松等结合实际工程对振冲碎石桩加固饱和粉砂地基各施工过程的孔压规律进行了全面研究^[6], 并建议了可应用于工程分析的碎石桩排水效应简化分析方法^[7]。此外, 国内外许多学者从模型试验和理论研究层面对碎石桩复合地基排水效应或固结过程展开研究。李立军等^[8]通过常重力振动台模型试验对比了碎石桩和水泥土桩加固液化地基的效果, 发现碎石桩模型中地基土的超静孔压明显更小, 由此得出碎石桩复合地基的排水效应对地基土抗液化贡献更为显著; Sasaki 等^[9]将饱和砂箱固定在常重力振动台上研究砾石桩的排水性能和地基土超静孔压增长和消散特性, 发现砾石排水桩可以迅速降低土体中的超静孔压水平, 防止地基液化; Huang 等^[10]通过常重力振动台试验发现, 经碎石桩处理后的场地在振动过程中超静孔压累积速率明显降低, 地基土体的整体刚度增强, 地表沉降显著减小; Dashti 等^[11]开展的超重力振动台试验表明, 碎石桩加速了地震过程中地基土体三维排水过程, 显著减小液化持时并进一步减小了震后残余沉降量; Badanagki 等^[12]通过离心模型试验发现碎石桩的排水效应显著减小了倾斜场地的水平和竖向位移。

Seed 等^[13]最早建立了考虑碎石桩水平向排水的微分方程, 通过引入室内三轴不排水试验得到的孔压增长模型, 得到考虑地震荷载的碎石桩复合地基的孔压控制方程, 通过数值求解得到了不同碎石桩设计参数下超静孔压增长和消散规律并用于指导工程实践; 徐志英^[14]建立了考虑地震过程中砾石排水桩径向排水的处理场地超静孔压演化偏微分方程, 给出了超孔隙水压力的一般解析式。其后, 国内学者在理论层面对碎石桩复合地基的堆载固结问题研究较多: Tang 等^[15]建立了变荷载作用下考虑井阻效应和涂抹效应的径向组合渗流解析解; 郭彪等^[16]推导了考虑桩体和土体径向渗流、上部荷载逐级施加、扰动区渗透系数线性变化的较全面的散体材料桩复合地基解析解; 卢萌盟等^[17-18]给出了考虑桩体固结与土体渗透性抛物线变化和地基中附加应力沿深度线性分布的荷载效应的碎石桩复合地基固结解析解。

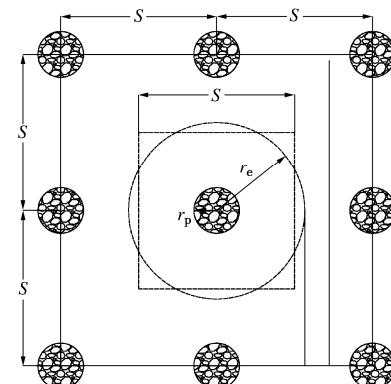
由此可见, 模型试验主要集中在碎石桩排水效应和抗液化效果的宏观现象观测, 尚未和理论研究相结

合; 而碎石桩理论研究多集中于对碎石桩复合场地堆载预压固结的孔压解析表达, 而考虑地震荷载的研究成果多把建立的超静孔压解析式与按照 Seed 简化方法得到的等效振次相联系, 并未对碎石桩复合地基的排水性能进行深入研究。振动荷载作用下碎石桩复合地基的渗流与排水性能值得进一步研究。

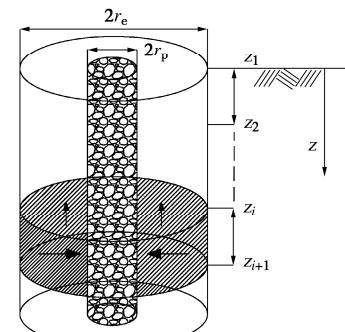
本文在已有解析解的基础上, 进一步推导了任意荷载作用下考虑径向渗流的碎石桩复合地基水平向和竖向渗流计算表达式, 并开展了一组碎石桩处理地基超重力振动台模型试验, 结合本文推导的径向渗流量表达式, 发现计算得到的沉降量与模型试验实测沉降量吻合良好, 验证了本文提出的碎石桩复合地基径向渗流计算表达式的正确性。

1 微分方程的建立

地震引起的振动荷载作用于散体材料桩复合地基时, 可认为各桩体和桩周土的受力性状相同, 任选一受力变形复合体作为分析计算模型, 如图 1 所示。本文做以下假设: ①桩体和桩周土遵循等应变假设, 即在同一深度处地基土体和桩体的竖向变形相等; ②复合地基中水的渗流符合达西定律; ③忽略桩体内的水平向渗流; ④在任一深度 z 处, 从土体流入桩体的水量等于桩体中向上水流的增量; ⑤土体饱和、土颗粒和水不可压缩。



(a) 碎石桩地基示意图



(b) 表征体元计算模型

图 1 碎石桩处理地基计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of numerical model for stone column-improved ground

根据有效应力原理, 任意时刻变荷载作用下土体的应力应变关系满足下式:

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma'}{E_s} = \frac{q - \bar{u}_s}{E_s} , \quad (1)$$

式中, ε_v 为土体体变, E_s 为土体压缩模量, q 为任意荷载作用下产生的总应力, 一般用经验孔压模型替代^[13], \bar{u}_s 为土体任一深度的平均超静孔压。

式(1)两边对时间求偏导得

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = -\frac{1}{E_s} \left[\frac{\partial \bar{u}_s}{\partial t} - \frac{\partial q}{\partial t} \right] . \quad (2)$$

根据文献[15, 19], 对于径向渗流情况, 由饱和土体变与固结排水量等量关系以及达西定律, 可得

$$-\frac{k_{sh}}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_s}{\partial r} \right) - \frac{k_{sv}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}_s}{\partial z^2} = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} , \quad (3)$$

式中, k_{sh} 和 k_{sv} 分别为地基土的水平向和竖向渗透系数, γ_w 为水的重度。

根据假设④, 且根据碎石桩与土体交界面处连续条件可得

$$\frac{\partial^2 u_p}{\partial z^2} = -\frac{2k_{sh}}{r_p k_p} \frac{\partial u_s}{\partial r} \Big|_{r=r_p} , \quad (4)$$

式中, u_p 为任一深度处桩体内的超静孔压, r_p 为桩体半径, k_p 为桩体渗透系数。

任一深度地基土的平均超静孔压值定义参考已有研究^[15-17]:

$$\bar{u}_s = \int_{r_p}^{r_e} \frac{1}{\pi(r_e^2 - r_p^2)} \times 2\pi r u_s dr , \quad (5)$$

式中, r_e 为碎石桩单桩影响半径。

式(2)~(5)为碎石桩复合地基微分控制方程。方程求解的初始条件和边界条件为

$$\frac{\partial u_s}{\partial r} \Big|_{r=r_e} = 0 , \quad (6)$$

$$u_p \Big|_{z=0} = 0 , \quad \bar{u}_s \Big|_{z=0} = 0 , \quad (7)$$

$$\frac{\partial u_p}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0 , \quad \frac{\partial \bar{u}_s}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0 , \quad (8)$$

$$\bar{u}_s \Big|_{t=0} = u_0(z) = 0 , \quad (9)$$

$$u_s \Big|_{r=r_p} = u_p . \quad (10)$$

2 微分方程的求解

参照 Tang 等^[15, 19]对该类问题的求解过程和解的形式, 可得如下 \bar{u}_s 的解析表达式:

$$\bar{u}_s(z, t) = \int_0^t \frac{dq}{d\zeta} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-A_{rv}(t-\zeta)} d\zeta , \quad (11)$$

式中, ζ 为任意荷载施加的时刻, $A_{rv} = A_r + A_v$,

$$A_v = \frac{k_{sv} E_s}{\gamma_w} \cdot \frac{M^2}{H^2}, \quad A_r = \frac{\beta}{1 + \psi^2 \left(\frac{H}{M} \right)^2 - A \psi^2}, \quad M = \frac{2m+1}{2} \pi$$

$$(m=0, 1, 2, \dots), \quad \beta = 2E_s k_h / (\gamma_w r_e^2 C_n), \quad \psi^2 = 2(N^2 - 1) \cdot k_h / (k_w r_e^2 C_n), \quad N = \frac{r_e}{r_p} \text{ 为井径比。}$$

式(3)两边对 r 积分两次, 并利用边界条件(6)和(10)可得

$$u_s = \frac{\gamma_w}{2k_{sh}} \left(r_e^2 \ln \frac{r}{r_p} - \frac{r^2 - r_p^2}{2} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{k_{sv}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}_s}{\partial z^2} \right) + u_p . \quad (12)$$

将式(11)和式(2)代入式(12)可得

$$u_s = R(r) \cdot G(q, t, z) + u_p , \quad (13)$$

式中,

$$G(q, t, z) = \frac{\gamma_w}{2k_{sh}} \cdot \left\{ \frac{1}{E_s} \left\{ \frac{\partial q}{\partial \zeta} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} \right\} - \int_0^t \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{dq}{d\zeta} \right) e^{-A_{rv}(t-\zeta)} - A_{rv} \frac{dq}{d\zeta} e^{-A_{rv}(t-\zeta)} \right] \cdot d\zeta \right\} - \frac{k_{sv}}{\gamma_w} \int_0^t \frac{dq}{d\zeta} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2M}{H^2} \sin \frac{Mz}{H} e^{-A_{rv}(t-\zeta)} d\zeta \Big\}, \\ R(r) = \left(r_e^2 \ln \frac{r}{r_p} - \frac{r^2 - r_p^2}{2} \right) .$$

由式(13)可见, 在碎石桩桩径影响范围内(影响半径为 r_e), 土体任一深度的超静孔压 u_s 可以写成 R 与 G 的乘积与该深度桩体内孔压值 u_p 的和。其中, 函数 R 仅仅是关于半径 r 的函数, 而函数 G 与 z , t 和 q 相关。以上说明土体中某一深度距离碎石桩中心距为 r ($r_p \leq r \leq r_e$) 的超静孔压 u_s 分布形式仅与 r 有关, 不同外荷载仅是通过函数 G 和 u_p 影响超静孔压的大小。

在 dt 时间内, 深度 z 处桩周土径向(水平向)通过碎石桩排水的流量为

$$\Delta(q_{sc})_z = k_{sh} i A = \frac{k_{sh}}{\gamma_w} \frac{\partial u_s}{\partial r} \Big|_{r=r_p} 2\pi r_p dz dt . \quad (14)$$

进一步考虑式(13), 式(14)可化为

$$\Delta(q_{sc})_z = \frac{k_{sh}}{\gamma_w} G(z, t, q) \left(\frac{r_e^2}{r_p} - r_p \right) 2\pi r_p dz dt . \quad (15)$$

式(15)对时间积分即可得到超静孔压累积和消散过程中桩周土深度 z 处通过碎石桩的水平向排水量。

假设碎石桩处理地基中单桩影响范围边界处的超静孔压为 $u_e \Big|_{r=r_e=u_e(z,t)}$, 且假设在地基土体中超静孔压从产生到消散过程中满足 $u_e(z, t) \gg u_p$, 则式(13)可化为

$$u_s \approx G(q, z, t) \left(r_e^2 \ln \frac{r}{r_p} - \frac{r^2 - r_p^2}{2} \right) , \quad (16)$$

且,

$$u_e(z, t) \approx G(q, z, t) \left(r_e^2 \ln \frac{r_e}{r_p} - \frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right)。 \quad (17)$$

结合式 (15), (16), (17) 可得

$$\Delta(q_{sc})_z = \frac{k_{sh}}{\gamma_w} \frac{u_e(z, t)}{\left(r_e^2 \ln \frac{r_e}{r_p} - \frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right)} \left(\frac{r_e^2}{r_p} - r_p \right) 2\pi r_p dz dt。 \quad (18)$$

式 (18) 即为在 dt 时间内深度 z 处地基土通过桩体水平向排水的流量计算式。

将式 (16) 代入式 (5), 并结合式 (17), 可得某一深度土体的平均孔压为

$$\bar{u}_s \approx \frac{\frac{r_e^4}{r_e^2 - r_p^2} \ln \frac{r_e}{r_p} - \frac{3}{4} r_e^2 + \frac{1}{4} r_p^2}{\left(r_e^2 \ln \frac{r_e}{r_p} - \frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right)} u_e(z, t)。 \quad (19)$$

由此得到在 dt 时间内, 在深度 z_i 和 z_{i+1} 处地基土竖向渗流流量公式为

$$\Delta(q_s)_{z=z_i \sim z_{i+1}} = \frac{\pi k_{sv} r_e^2 (1 - A_r)}{\gamma_w (z_{i+1} - z_i) \left(r_e^2 \ln \frac{r_e}{r_p} - \frac{r_e^2 - r_p^2}{2} \right)} \cdot \left[\frac{r_e^4}{r_e^2 - r_p^2} \ln \frac{r_e}{r_p} - \frac{3}{4} r_e^2 + \frac{1}{4} r_p^2 \right] [u_e(z_i, t) - u_e(z_{i-1}, t)] dt。 \quad (20)$$

3 超重力模型试验验证

3.1 试验设备和试验材料

利用浙江大学 ZJU-400 超重力离心机振动台开展了一组碎石桩处理地基的模型试验, 以验证本文所提出计算公式的正确性。超重力离心机通过高速旋转使得模型土体恢复原型自重应力, 然后通过机载振动台在模型底部实现地震输入, 从而模拟原型场地地震响应和液化灾变过程^[20]。本次试验在 50g 离心加速度下进行, 选用粘滞系数为水的 50 倍的甲基硅油保证模型动力时间与渗流时间相似比尺一致。

采用层状剪切模型箱模拟自由场地边界条件, 内部尺寸(长×宽×高)为 730 mm×330 mm×425 mm。为了合理模拟现场地基土的渗透特性, 试验地基土体选用福建细砂掺 10% 的粉土(钱塘江粉土), 碎石桩采用粗粒径的福建砂, 两种材料的基本物性参数和颗粒曲线分别见表 1 和图 2。由表 1 可见, 碎石桩材料渗透系数约为地基土体的 800 倍。Seed 等^[13]建议对于碎石桩处理地基, 碎石桩材料的渗透系数一般为处理地基土体的两个数量级以上。因此, 模型试验设计地基土体和碎石桩材料的渗透特性符合工程实际情况。

表 1 试验材料基本物理参数
Table 1 Physical properties of test materials

| 指标 | G_s | ρ_{\max} /(g·cm ⁻³) | ρ_{\min} /(g·cm ⁻³) | ρ_{\min} /(g·cm ⁻³) | k /(m/s, 27°C) |
|---------------|-------|---|---|---|------------------------|
| 福建砂掺 10%粉土 | 2.647 | 1.765 | 1.386 | 1.695 | 1.864×10^{-5} |
| 福建粗砂 | 2.644 | 1.713 | 1.489 | 1.605 | 1.49×10^{-2} |

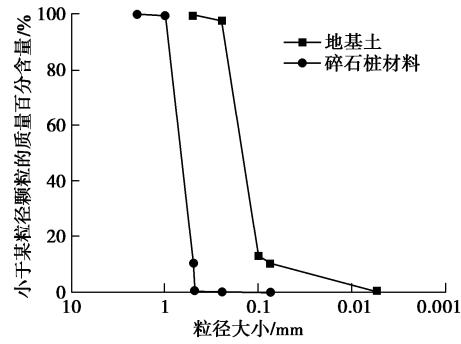


图 2 试验材料级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of test materials

3.2 模型布置

模型试验传感器布置如图 3 所示。模型土层厚度为 400 mm。在振动台台面布置一个三向加速度计记录模型底层振动输入, 在中轴线左侧 50 mm 沿深度布置 6 个水平加速度计, 在中轴线右侧 50 mm 沿深度布置 6 个孔压计, 分别在距离中轴线左右两侧各 150 mm 对称布置土压力计和弯曲元, 在模型地表布置 1 个激光位移传感器监测模型的表面沉降。

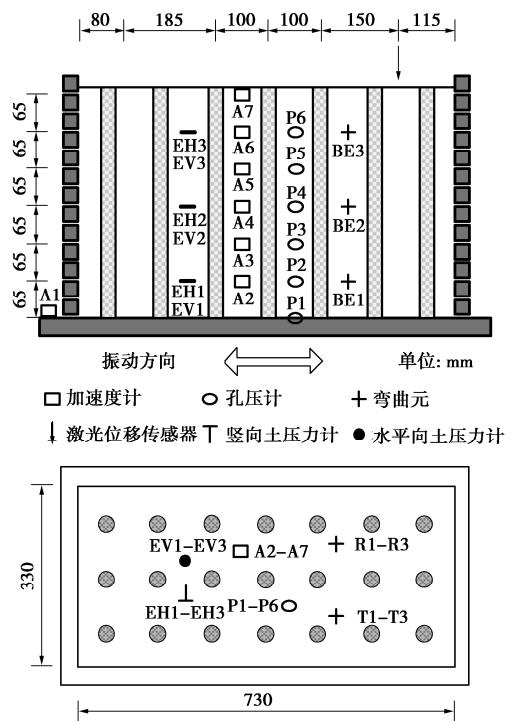


图 3 离心模型试验布置图

Fig. 3 Schematic configurations of centrifuge model

在模型地基中设计了 3×7 共 21 根碎石桩，桩体贯穿整个液化土层。碎石桩的桩径 d 采用和 Adalier 等^[21]的离心模型试验原型尺寸一致，为 1.5 m，对应模型尺寸为 3 cm，桩间设计为 10 cm，计算得到碎石桩处理地基的置换率为 7%。

考虑到前述公式推导假设地基土的渗透系数为常数，本文选用频率 1 Hz、峰值加速度小于 $0.05g$ 的等幅正弦波作为台面输入（如图 4 所示），以避免过大的振动引起过高的超静孔压甚至触发液化，导致地基土体渗透系数发生显著变化^[22]。试验共进行两次振动，振动 1 结束后，所有通道稳定 15 min 以上等待振动 1 产生的超静孔压完全消散，再开始振动 2。

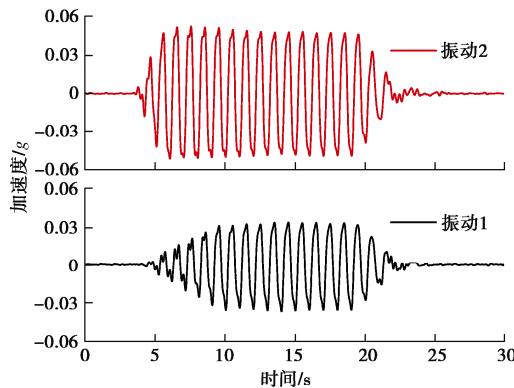


图 4 两次台面振动输入

Fig. 4 Input motions at base of two shaking events

3.3 典型试验结果

图 5,6 分别给出了两次振动的模型地表沉降和模型内部超静孔压时程曲线。由图 5 可见，振动初期地表沉降出现“不降反升”的异常现象。有两个可能的原因：首先，在振动初期的近似不排水循环剪切过程中，由于模型土体需要满足变形协调导致模型地表出现上下起伏的动态变形，但平均（残余）位移是向下发展的；此外，振动造成超静孔压上升，模型土体骨架有瞬态卸载、有限膨胀的响应，也会造成模型地表短时的微小隆起。

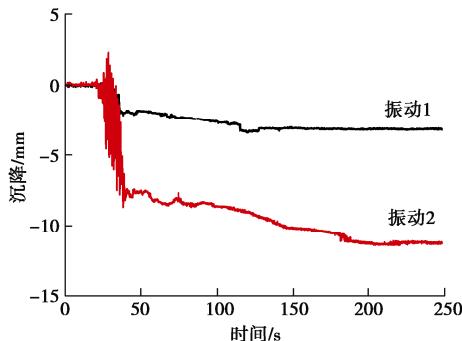
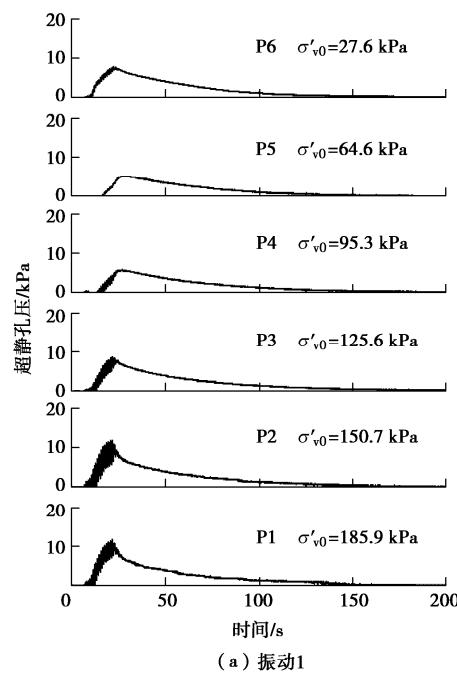


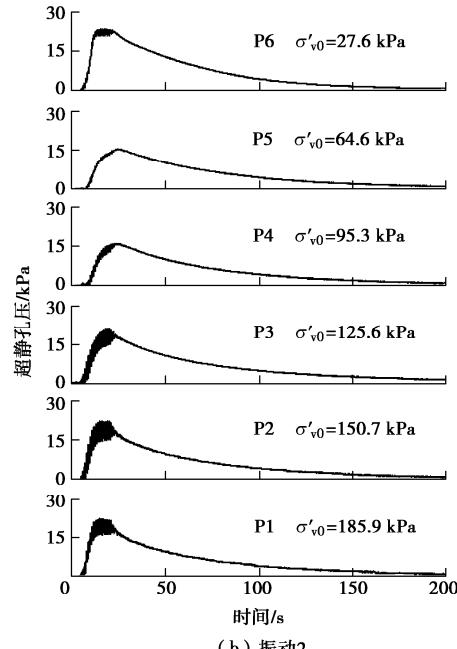
图 5 模型地表沉降时程曲线

Fig. 5 Time histories and prediction of surface settlement

由图 6 可见，随着振动的发生，模型不同深度土层的超静孔压随着振动迅速累积，并在振动结束时达到峰值。振动 1 中，不同深度超静孔压峰值在 6~13 kPa；振动 2 中，不同深度的超静孔压峰值在 16~22 kPa。振动停止后，模型深层的超静孔压消散比浅层更快，说明振后模型内孔隙水向上渗流。



(a) 振动1



(b) 振动2

图 6 超静孔压时程曲线

Fig. 6 Time histories of excess pore water pressure

对照图 5,6，可以发现地表沉降发展与超静孔压消散存在对应关系。地表沉降与超静孔压累积主要发生在振动过程，振后随着超静孔压消散沉降继续发生，但振后固结沉降比例相对较小，这与以往离心机振动

台试验结果一致^[23]。主要原因在于模型地基地表是自由排水边界, 振动过程中就发生了显著的孔隙水向上消散。由图 6 可见, 振动 1 情况模型全部深度的超静孔压比 ($r_u = u/\sigma'_{v0}$, u 为任意时刻的超静孔压, σ'_{v0} 为初始上覆有效应力) 都小于 0.4, 振动对模型地基造成的损伤较小, 对应模型地表沉降较小; 振动 2 情况模型浅层 r_u 接近 0.8, 其余深度 r_u 小于 0.3, 模型地表沉降大于振动 1 引起的地表沉降。

已有研究^[24]表明, 砂土液化时土体渗透系数比未液化时增大数量级的倍数。Shahir 等^[25]提出的随超静孔压比变化的砂土变渗透系数表达式如下:

$$\frac{k}{k_i} = \begin{cases} 1 + (\alpha - 1)r_u^{\beta_1}, & r_u < 1 \text{ (孔压累积阶段)} \\ \alpha, & r_u = 1 \\ 1 + (\alpha - 1)r_u^{\beta_2}, & r_u < 1 \text{ (孔压消散阶段)} \end{cases} \quad (21)$$

式中, k_i 为未液化前渗透系数初始值, α 为液化时渗透系数增大的倍数, β_1 和 β_2 分别为孔压累积阶段和消散阶段的常数, 与土体材料有关。

结合图 6, 对式(21)中参数取值 $\alpha=10$, $\beta_1=2$ 和 $\beta_2=10$, 可得当 r_u 分别等于 0.3, 0.4 和 0.8 时, 对应的渗透系数增大倍数分别为 1.8, 2.4 和 6.7。由图 6 可见, r_u 处于峰值的时间占整个超静孔压从产生到消散的时间比例不足 5%。因此, 两次振动引起的超静孔压比不足以引起整个模型深度土体渗透系数的显著变化, 本文采用常渗透系数假设基本合理。

3.4 渗流公式正确性验证

由图 3 可见, 孔压计布置在 4 根碎石桩围成的正方形的中点, 可近似认为孔压计测值为碎石桩桩径影响范围边界 r_e 上的值。为验证式(18)和(20)的正确性, 利用地基地表沉降量对振动过程中场地超静孔压从产生到消散时间 T 内的总排水量 Q 进行校核。假设土颗粒和饱和流体不可压缩, 则总排水量等于地基沉降引起的体变值。注意到本文计算模型是基于单桩影响范围的场地沉降, 排水量和地表沉降的计算都是基于单桩影响范围, 即得到的总排水量 Q 需除以单桩影响范围的地基土面积才得到对应的沉降量。碎石桩水平排水总量 Q_L 为地基各深度水平向排水量之和, 而竖向排水总量 Q_V 只考虑最浅层竖向排水量, 即

$$Q = Q_L + Q_V, \quad (22)$$

$$Q_L = \int_0^H \int_0^T \Delta(q_{sc})_z dt dz, \quad (23)$$

$$Q_V = \int_0^T \Delta(q_s)_{\text{top_layer}} dt. \quad (24)$$

图 7 为根据两次振动超静孔压时程, 通过式(22)计算沉降值和激光位移计实测沉降值。由图 7 可见, 振动 1 情况下本文计算值与实测值接近, 而振动 2 情

况下的计算值稍小于实测值。由前述可知, 振动 2 作用下模型浅层土体的渗透系数增大了 6.7 倍, 本文“振动过程中地基土体渗透系数不变”的假设略微低估了模型浅层桩体的渗流量。

图 8 给出了根据式(22)反算得到的沉降时程预测曲线。由图 8 可见, 振动阶段实测沉降比计算值显著偏大; 对于振后渗流固结过程, 实测值与计算值接近。由于本文提出的渗流量计算公式仅考虑渗流固结效应, 对模型在振动过程中可能出现的诸如渗流速率效应和液化时渗透系数变化等^[26-27]无法合理描述, 可以认为本文公式适用于预测土体振后沉降规律。

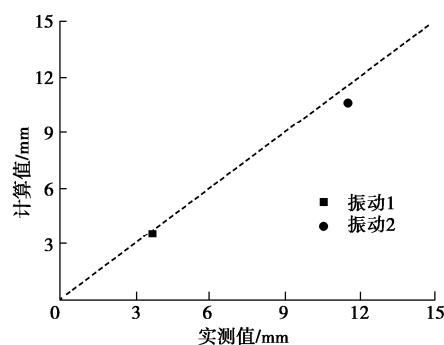


图 7 模型地表沉降实测值和计算值对比

Fig. 7 Comparison between measured and predicted surface settlements

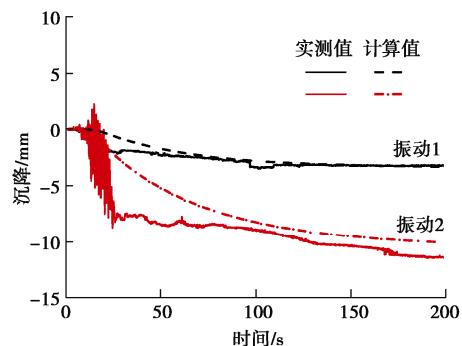


图 8 模型地表沉降时程实测值和计算值对比

Fig. 8 Time histories of measured and predicted surface settlement

3.5 碎石桩复合地基振动排水特性分析

结合本次离心模型试验土体参数、碎石桩布置和不同深度超静孔压时程, 根据式(18)和式(20)得到如图 9 所示的两次振动下碎石桩复合地基竖向和水平渗流流量随时间变化关系。

由图 9 可见, 水平向和竖向渗流排水在振动一开始就有, 表明一旦产生超静孔压, 在水力梯度作用下地基就开始进行竖向和水平向排水。在振动阶段地基土体不同深度通过碎石排水的渗流速率逐渐加快, 振动停止后渗流速率基本保持稳定, 随着超静孔压消散渗流速率逐渐降低。以上径竖向渗流随时间发展规律

与图 5 所示的沉降时程一致。另外,两次振动下地基土体通过碎石桩的水平向渗流量随深度的增加而逐渐增大, 不同深度土体通过碎石桩水平向排水量与相应的超静孔压水平正相关。两次振动下竖向渗流量都在浅层最大, 且比较接近浅层水平向渗流量, 但远小于深层水平向排水量。

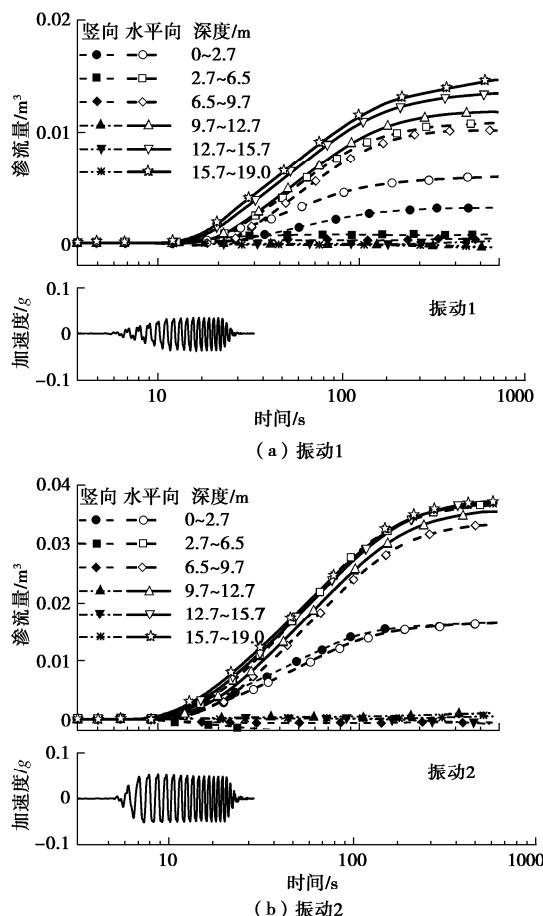


图 9 碎石桩复合地基渗流时程

Fig. 9 Time histories of discharge water in stone column-improved ground

4 结 论

本文针对振动荷载作用下碎石桩复合地基的渗流与排水性能问题, 基于已有的解析解, 进一步推导了任意荷载作用下碎石桩复合地基水平向和竖向渗流计算表达式, 并开展了一组碎石桩处理地基超重力振动台模型试验进行验证, 得到如下 3 点结论。

(1) 将单根碎石桩及其影响范围的地基土作为一个表征体元来研究, 以碎石桩单桩影响边界处的孔压值为已知条件, 得到了任意荷载作用下碎石桩复合地基竖向和水平向渗流量计算公式。

(2) 假设土颗粒和水不可压缩, 将计算得到的模型地基排水量换算为地表沉降值, 发现最终沉降的计

算值与模型试验实测值一致, 验证了本文推导的碎石桩复合地基渗流量计算公式的正确性。

(3) 将模型试验测得的超静孔压与本文推导的渗流量计算公式相结合, 给出了本次模型试验中不同深度水平向和竖向渗流时程, 与实测沉降时程基本吻合。碎石桩复合地基的水平向渗流起主要作用, 竖向渗流贡献较小; 受下大上小的孔压梯度场的驱动, 深层的水平向渗流量明显大于浅层。

在实际工程中, 如果能基于地震动强度指标等获得易液化场地的超静孔压水平, 则可以利用本文提出的计算公式估算处理地基的震后排水量和地表沉降值, 为工程设计和抗震性能调控提供依据。

参 考 文 献:

- [1] 黄雨, 于淼, BHATTACHARYA S. 2011 年日本东北地区太平洋近海地震地基液化灾害综述[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 834 - 840. (HUANG Yu, YU Miao, BHATTACHARYA S. Review on liquefaction induced damages of soils and foundations during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake(Japan)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 834 - 840. (in Chinese))
- [2] ZHOU Yan-guo, CHEN Yun-min, LING Dao-sheng. Shear wave velocity-based liquefaction evaluation in the great Wenchuan Earthquake: a preliminary case study[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 8(2): 231 - 239.
- [3] 周燕国, 李永刚, 丁海军, 等. 砂土液化后再固结体变规律表征与离心模型试验验证[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1838 - 1845. (ZHOU Yan-guo, LI Yong-gang, DING Hai-jun, et al. Characterization of reconsolidation volumetric strain of liquefied sand and validation by centrifuge model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1838 - 1845. (in Chinese))
- [4] BHATTACHARYA S, HYODO M, GODA K, et al. Liquefaction of soil in the Tokyo Bay area from the 2011 Tohoku (Japan) earthquake[J]. Soil Dynamics Earthquake Engineering, 2011, 31(11): 1618 - 1628.
- [5] 陈国兴, 顾小峰, 常向东, 等. 1989~2011 期间 8 次强地震中抗液化地基处理成功案例的回顾与启示[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1102 - 1118. (CHEN Guo-xing, GU Xiao-feng, CHANG Xiang-dong, et al. Review and implication of successful ground improvement cases about mitigating soil

- liquefaction induced by 8 strong earthquakes from 1989 to 2011[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(4): 1102 – 1118. (in Chinese))
- [6] 黄茂松, 陈云敏, 吴世明. 振冲碎石桩加固饱和粉砂粉土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 1992, **14**(6): 69 – 73. (HUANG Mao-song, CHEN Yun-min, WU Shi-ming. Strengthening of saturated silty soils by vibro replacement stone columns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **14**(6): 69 – 73. (in Chinese))
- [7] 黄茂松, 吴世明, 赵竹占. 振动挤密砂桩与振冲碎石桩抗液化分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 1992, **26**(2): 165 – 171. (HUANG Mao-song, WU Shi-ming, ZHAO Zhu-zhan. Liquefaction analysis of subsoil strengthened by vibroflotation stone pile method and vibro-compaction sand pile method[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 1992, **26**(2): 165 – 171. (in Chinese))
- [8] 李立军, 牛琪瑛, 梁仁旺, 等. 碎石排水桩抗地震液化的试验研究与理论分析[J]. 工程力学, 2010(增刊2): 226 – 230. (LI Li-jun, NIU Qi-yinng, LIANG Ren-wang, et al. Experimental study and theoretical analysis on drainage gravel pile resistance of earthquake liquefaction[J]. Engineering Mechanics, 2010(S2): 226 – 230. (in Chinese))
- [9] SASAKI Y, TANIGUCHI E. Large scale shaking table tests on the effectiveness of gravel drains for liquefiable sand deposits[C]// Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1982, Southampton: 843 – 857.
- [10] HUANG Chun-xia, SUI Zhi-long, WANG Lei, et al. Mitigation of soil liquefaction using stone columns: an experimental investigation[J]. Marine Georesource and Geotechnology, 2016, **34**: 244 – 251.
- [11] DASHTI S, BRAY J D, PESTANA J M, et al. Centrifuge testing to evaluate and mitigate liquefaction-induced building settlement mechanisms[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(7): 918 – 929.
- [12] BADANAGKI M, DASHTI S, KIRKWOOD P. Influence of dense granular columns on the performance of level and gently sloping liquefiable sites[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, **144**: 0401806.
- [13] SEED H B, MARTIN P P, LYSMER J. Generation and Dissipation of Pore Pressure Water Pressures During Liquefaction[R]. California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1975.
- [14] 徐志英. 用砾石排水桩抗地震液化的砂基孔压计算[J]. 地震工程与工程振动, 1992, **12**(4): 88 – 92. (XU Zhi-ying. Calculation of pore pressure of liquefiable sand deposits using gravel drains[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1992, **12**(4): 88 – 92. (in Chinese))
- [15] TANG Xiao-wu, KATSUTADA O K. Consolidation by vertical drains under time-dependent loading[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, **24**(9): 739 – 751.
- [16] 郭彪, 龚晓南, 李亚军. 考虑桩体径向渗流的碎石桩复合地基固结解析解[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(8): 1485 – 1492. (GUO Biao, GONG Xiao-nan, LI Ya-jun. Analytical solution for consolidation of stone column-reinforced foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(8): 1485 – 1492. (in Chinese))
- [17] 卢萌盟, 谢康和, 刘干斌, 等. 考虑桩体固结和土体渗透性抛物线分布固结解[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(7): 1069 – 1074. (LU Meng-meng, XIE Kang-he, LIU Gan-bin, et al. Solution for consolidation considering column consolidation and parabolic distribution of soil permeability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(7): 1069 – 1074. (in Chinese))
- [18] 卢萌盟, 谢康和, 张玉国, 等. 考虑施工扰动和荷载效应的复合地基固结解[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(4): 549 – 554. (LU Meng-meng, XIE Kang-he, ZHANG Yu-guo, et al. Theoretical solution for consolidation of composite foundations considering construction disturbance and loading effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(4): 549 – 554. (in Chinese))
- [19] 唐晓武, 柳江南, 杨晓秋, 等. 开孔管桩动孔压消散特性的理论研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(9): 3335 – 3343. (TANG Xiao-wu, LIU Jiang-nan, YANG Xiao-qiu, et al. Theoretical study on dynamic pore water pressure dissipation characteristics of the open-hole pipe pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(9): 3335 – 3343. (in Chinese))
- [20] 陈云敏, 韩超, 凌道盛, 等. ZJU400 离心机研制及其振动台性能评价[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1887 – 1894. (CHEN Yun-min, HAN Chao, LING Dao-sheng, et al. Development of geotechnical centrifuge ZJU400 and performance assessment of its shaking table system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1887 – 1894. (in Chinese))
- [21] ADALIER K, ELGAMAL A, MENESSES J, et al. Stone

- columns as liquefaction counter-measure in non-plastic silty soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(7): 571 - 584.
- [22] SU D, LI X S, XING F. Estimation of the apparent permeability in the dynamic centrifuge tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 2009, 32(1): 22 - 30.
- [23] 周燕国, 谭晓明, 梁甜, 等. 利用地震动强度指标评价场地液化的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1869 - 1877. (ZHOU Yan-guo, TAN Xiao-ming, LIANG Tian, et al. Evaluation of soil liquefaction by ground motion intensity index by centrifuge model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1869 - 1877. (in Chinese))
- [24] SHAHIR H, MOHAMMADI-HAJI B, GHASSEMI A. Employing a variable permeability model in numerical simulation of saturated sand behavior under earthquake loading[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55(1): 211 - 223.
- [25] SHAHIR H, PAK A, TAIEBAT M, JEREMIC' B. Evaluation of variation of permeability in liquefiable soil under earthquake loading[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 40(3): 74 - 88.
- [26] ZHANG J M, WANG G. Large post-liquefaction deformation of sand, part I: physical mechanism, constitutive description and numerical algorithm[J]. Acta Geotechnica, 2012, 7(2): 69 - 113.
- [27] ELGAMAL A, YANG Z, PARRA E, et al. Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils[J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19(6): 883 - 905.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhr.ac.cn。

《岩土工程学报》编辑部