

文章编号: 1000-4750(2011)Sup.I-0090-04

碎石桩加固液化砂土地基的数值模拟分析

*牛琪瑛¹, 刘建君¹, 张 明¹, 刘少文²

(1. 太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西, 太原 030024; 2. 山西省交通科学研究院, 山西, 太原 030006)

摘 要: 该文采用三维有限差分程序 FLAC^{3D}(Fast Lagrangian Analysis of Continua)对未加固和碎石桩加固的液化砂土地基进行数值模拟, 对其建立模型以及进行地震响应分析, 得到碎石桩加固液化地基土模型的抗液化效果。经数值分析, 证实了碎石桩具有显著的排水效果。同时与振动台试验数据相比较, 论证了数值模拟结果的可靠性。

关键词: 岩土工程; 液化砂土加固; 数值模拟分析; 碎石桩; 超孔隙水压力; 孔压比

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A

ANALYSIS ON NUMERICAL SIMULATION OF LIQUEFIABLE SAND SOIL REINFORCED BY GRAVEL PILE

*NIU Qi-ying¹, LIU Jian-jun¹, ZHANG Ming¹, LIU Shao-wen²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. Shanxi Traffic Science Research Institute, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: In the paper, the liquefiable sand soil non-improved and improved by gravel piles under earthquake action is numerically simulated by using the three-dimensional finite difference program 'FLAC^{3D}' (Fast Lagrangian Analysis of Continua), and a model to analyze seismic response is established in order to investigate the results of liquefiable sand soil reinforced by gravel piles. According to the analysis of the numerical simulation, the gravel piles confirmed have remarkable drainage effect. Compared with the result of shaking table tests, it is demonstrated that the test of Numerical simulation is reliable.

Key words: geotechnical engineering; liquefiable sand soil; numerical simulation; gravel pile; pore-water pressure ratio; pore pressure ratio

目前工程上通常采用标准贯入试验法进行可液化土层的液化判别, 该方法耗时长, 对操作人员素质要求高, 并对土体的复杂性及桩的各向异性考虑较少。数值模拟分析法具有其独特的优点, 可模拟土体的复杂变化和桩体各向异性, 但必须有实验的论证, 才能应用于工程中。本文采用 FLAC^{3D}[1]对地震作用下的未加固和碎石桩加固后的液化砂土地基进行数值模拟分析, 论证了加固的效果, 解释了碎石桩加固机理, 同时与振动台试验数据相比

较, 验证了数值模拟试验的可靠性, 为数值模拟分析方法应用于工程实际提供了科学依据。

1 计算模型简介

1.1 模型尺寸及计算参数

计算模型的土层分布: z 方向上分布有底部、顶部厚度各为 1m 的非液化土层和中部厚度为 6m 可液化土层。在振动方向 x 方向上, 模型范围为 20m, 在 y 方向上, 模型范围为 12m。模型计算参

收稿日期: 2010-10-27; 修改日期: 2011-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578104); 山西省自然科学基金项目(2006011046); 山西省交通厅科技项目(10-1-06)

作者简介: *牛琪瑛(1957—), 女, 山西人, 教授, 硕士, 主要从事土的工程性质与地基处理方面的研究(E-mail: Niu.qiying@163.com);

刘建君(1985—), 男, 山西人, 硕士生, 主要从事土的工程性质与地基处理方面的液化研究(E-mail: liujianjun_ty@126.com);

张 明(1986—), 男, 湖北人, 硕士生, 主要从事土的工程性质与地基处理方面的液化研究(E-mail: guanhuaying@163.com);

刘少文(1970—), 男, 山西人, 高工, 博士生, 主要从事路面工程的研究(E-mail: lsw1970@hotmail.com)。

数如表 1 所示。

表 1 模型计算参数

Table 1 calculation parameters

材料	高度/m	干密度/ (kg/m ³)	孔隙率	粘聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa
非液化 粘土层	1	1040	0.66	10	25	14.71	5.64
可液化 砂土层	6	1520	0.43	0	30	29.41	11.28
非液化 粘土层	1	1100	0.60	15	25	14.71	5.64

碎石桩复合地基布桩方式为正方形布桩。桩径为 0.6m, 按桩截面面积等效成方桩后截面尺寸为 0.53m×0.53m, 按桩截面周长等效成方桩后截面尺寸为 0.47m×0.47m, 参考两者之后取方桩截面尺寸为 0.50m×0.50m, 桩长 8m, 桩间距为 3 倍桩径即 1.5m, 计算模型如图 1, 其中地基顶层中心坐标为 (0, 0, 0)。

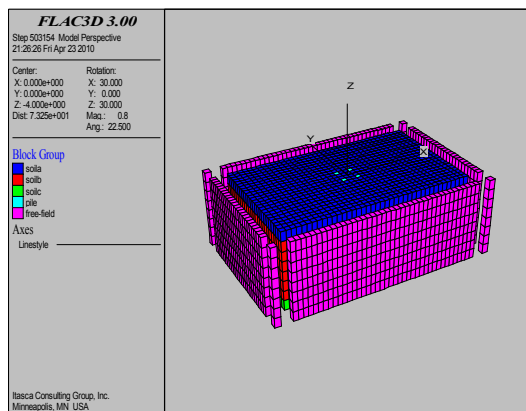


图 1 碎石桩加固液化土地基计算模型

Fig.1 Gravel pile reinforcement liquefied soil foundation calculation model

1.2 边界条件、力学阻尼和地震荷载

为了吸收振动过程中波在边界上的反射, 在动力计算中模型各侧面设置为自由场边界。

设置自由场边界后, 程序会自动在模型的四周生成一圈自由场网格。通过自由场网格与主体网格的耦合作用来近似模拟自由场的振动情况。施加自由场边界后的网格如图 1 所示。

对于动力问题中的阻尼, 需要在数值模拟中重现自然系统在动荷载作用下的阻尼大小。本文在动力计算过程中全部采用局部阻尼。局部阻尼在振动循环中通过在节点或结构单元节点上增加或减小质量的方法达到收敛, 由于增加的单元和减小的单元质量相等, 因而系统保持质量守恒。局部阻尼系数不用求解系统的自振频率, 也不会减小时间步,

因此具有较大的优势, 但局部阻尼只适合于简单问题的求解。本文动力计算模型比较简单, 并且输入规则的正弦波模拟地震荷载, 正弦波频率范围为 1Hz—5Hz, 属于低频, 故动力计算阻尼形式采用局部阻尼。

在模型底部施加正弦变化的加速度, 振幅为 0.2g, 频率为 5Hz。计算过程中, 只考虑地震剪切波单向垂直传入地基, 不考虑双向和三向传入^[2-3]。

1.3 模型基本假定

模型计算过程中, 符合以下基本假定^[4]: 1) 土体为完全饱和土, 土中水的流动服从达西定律; 2) 土颗粒、孔隙水不可压缩; 3) 土体的渗透系数和压缩系数为常数, 且各向渗透系数相等。

2 未加固与群桩加固液化地基土模型计算结果对比

2.1 监测点位置

为了便于分析碎石桩的抗液化效果, 在未加固模型和群桩加固模型中的同一位置设置了一些监测点, 具体情况见表 2。

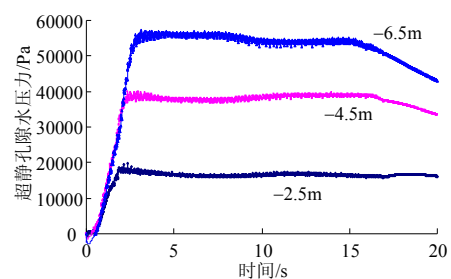
表 2 监测点坐标表

Table 2 Monitoring point coordinates table

监测点编号	监测单元中心坐标(x, y, z) /m
1	(0, 0, -2.5)
2	(0, 0, -4.5)
3	(0, 0, -6.5)

2.2 数值模拟试验结果^[5-6]

由图 2 可见, 浅层和中层加固后的土体超静孔隙水压力峰值比未加固略有减小, 深层的超静孔隙水压力峰值大大减小; 未加固液化土地基模型中超静孔隙水压力达到峰值后, 在地震过程中基本保持不变, 超静孔隙水压力基本没有消散, 而群桩加固液化土地基模型中超静孔隙水压力达到峰值后, 在地震过程中发生明显的消散现象。充分证明了群桩的排水效应。



(a) 未加固

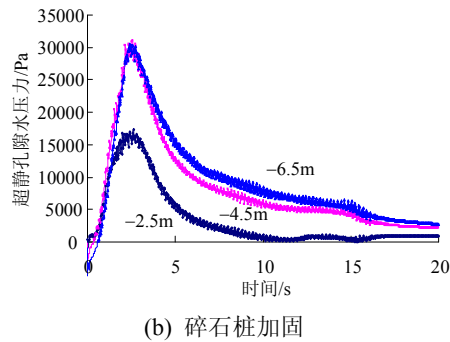
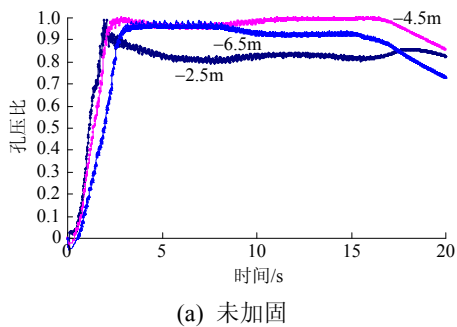


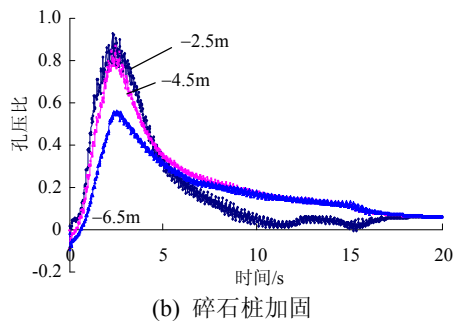
图2 超静孔隙水压力时程曲线

Fig.2 Excess pore water pressure-time curve

由图3可见,群桩加固后的浅层和中层的孔压比峰值比未加固的略小,但深层的孔压比峰值则大大减小,由未加固前的1.0变为加固后的0.55;未加固液化地基模型中孔压比达到峰值后,在地震荷载作用过程中基本保持不变,而群桩加固液化土地基模型中孔压比达到峰值后,在地震过程中迅速减小,也证明了群桩的排水效应。



(a) 未加固



(b) 碎石桩加固

图3 孔压比时程曲线

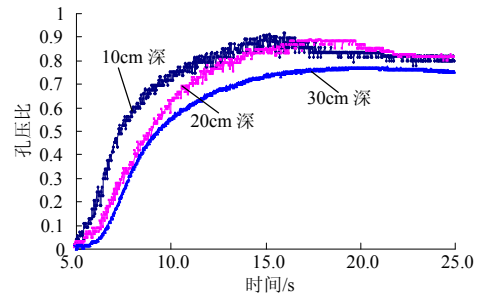
Fig.3 Variation of pore water pressure ratio

3 振动台试验与数值模拟试验结果对比^[7-10]

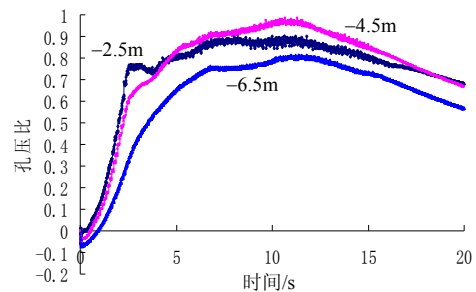
为了验证数值试验的可靠性,特选取振动台试验结果与数值试验结果进行对比。振动台试验结果取自吴永娟的硕士论文“碎石桩加固不同密度液化砂土的振动台试验研究”^[11]。

由图4可见,未加固地基数值模拟试验的深层、中层、浅层的孔压比峰值分别为0.8、0.85、0.95,

与振动台试验的深层、中层、浅层的孔压比峰值相差很小。数值模拟试验的孔压比在上升阶段浅层发展最快,中层其次,深层最慢;之后,孔压比进入比较稳定的阶段,发展到最后,中层的孔压比继续增大进而超越浅层,这一规律也与振动台试验结果相同。



(a) 振动台试验



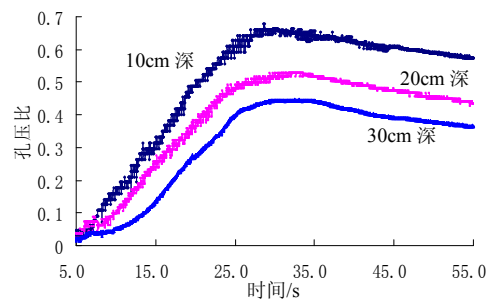
(b) 数值模拟试验

图4 未加固模型地基孔压比时程曲线

Fig.4 Variation of pore water pressure ratio non-improved soil

由图5可见,碎石桩加固地基数值模拟试验的深层、中层的孔压比峰值分别为0.4、0.5,与振动台试验的深层、中层的孔压比峰值基本相等,而碎石桩加固地基数值模拟试验的浅层孔压比峰值为0.42,远小于振动台试验浅层的孔压比峰值0.68,主要原因是振动台试验中土体中的水排到土体表面后,因箱体边缘阻隔,使水无法排出,仍留在土体表面,导致孔压比峰值变大。

综上所述,碎石桩加固地基数值模拟试验结果是可靠的。



(a) 振动台试验

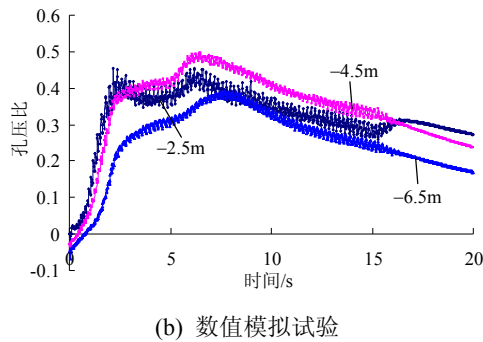


图5 碎石桩加固模型地基孔压比时程曲线

Fig.5 Variation of pore water pressure ratio in improved soil with sand-gravel pile

4 结论

通过采用三维有限差分程序 FLAC^{3D} 对未加固及碎石桩加固土体建立模型并进行数值分析, 得到如下结论:

(1) 数值模拟试验中, 未加固液化土地基模型中超静孔隙水压力达到峰值后, 在模拟地震荷载继续作用下基本保持不变, 而群桩加固液化土地基超静孔隙水压力达到峰值后迅速减小, 充分证明了群桩的排水效应。

(2) 数值模拟试验中, 未加固液化土地基模型中孔压比达到峰值后, 在地震荷载继续作用下基本保持不变, 而群桩加固液化土地基模型中孔压比达到峰值后, 在地震过程中迅速减小, 也充分证明了群桩排水效应。

(3) 通过数值模拟结果与振动台试验结果对比, 验证了碎石桩加固地基数值模拟试验结果是可靠的。

参考文献:

- [1] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
Chen Yumin, Xu Dingping. FLAC/FLAC^{3D} basis and project case [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese)
- [2] 杨庆陶. 桩体加固液化砂土的振动台试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
Yang Qingtao. Study on the shaking table experimental liquefiable sand soil improved by pile [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [3] 张明. 碎石桩复合地基抗液化性能的数值模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
Zhang Ming. Numerical simulation of anti-liquefaction characteristics of gravel pile composite foundation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [4] 张艳美, 张鸿儒, 张旭东. 碎石桩复合地基三维地震响应分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 47—52.
Zhang Yanmei, Zhang Hongru, Zhang Xudong. Gravel pile composite foundation of 3D seismic response analysis [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 47—52. (in Chinese)
- [5] 牛琪瑛, 郭英, 吴永娟, 张明. 碎石桩加固不同密实度液化土的孔隙水压力变化规律探讨[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊 I): 159—163.
Niu Qiying, Guo Ying, Wu Yongjuan, Zhang Ming. Study on pore water pressure variation of different density liquefiable sand soil reinforced by gravel pile [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Sup. I): 159—163. (in Chinese)
- [6] 牛琪瑛, 张明, 杨庆陶. 桩体加固液化砂土模型地基沉降分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(6): 116—119.
Niu Qiying, Zhang Ming, Yang Qingtao. Study on settlement of liquefiable sand soil model improved by pile [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(6): 116—119. (in Chinese)
- [7] 杨庆陶, 魏剑伟, 牛琪瑛. 碎石桩复合地基的抗液化研究[C]. 第16届全国结构工程学术会议论文集, 2007, II: 368—372.
Yang Qingtao, Wei Jianwei, Niu Qiying. Study on composite foundation of gravel pile for liquefaction resistance [C]. Proceedings of the 16th National Conference on Structural Engineering, 2007, II: 368—372. (in Chinese)
- [8] 张艳美, 张鸿儒. 碎石桩设计参数对复合地基抗液化性能的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1320—1324.
Zhang Yanmei, Zhang Hongru. Influence of stone columns design parameters on anti-liquefaction nature of composite foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1320—1324. (in Chinese)
- [9] 牛琪瑛, 闫韦则, 杨庆陶, 魏剑伟. Research on liquefaction of sandy soil in shaking table test [C]// Yeung Albert T. 9th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, 2008: 435—441.
- [10] 李培振, 任红梅, 吕西林, 程磊. 液化地基自由场振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(2): 172—178.
Li Peizhen, Ren Hongmei, Lu Xilin, Cheng Lei. Study on shaking table test on free field considering soil liquefaction [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(2): 172—178. (in Chinese)
- [11] 吴永娟. 碎石桩加固不同密实度液化砂土的振动台试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
Wu Yongjuan. Study on the shaking table experimental liquefiable sand soil with different density improved by gravel pile [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009. (in Chinese)