

文章编号: 1000-7598 (2014)增 2-0593-07

# 夯扩挤密碎石桩加固液化砂土地基的动力数值分析

杨继红<sup>1</sup>, 董金玉<sup>1</sup>, 黄志全<sup>1</sup>, 马述江<sup>2</sup>, 耿运生<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学 资源与环境学院, 郑州 450011; 2. 河北省水利水电第二勘测设计研究院, 石家庄 050021)

**摘 要:** 砂土液化问题一直是土动力学与岩土地震工程研究领域的重要课题之一。基于南水北调中线某工程, 通过现场和室内试验获取土体的物理力学参数, 利用岩土数值分析软件 FLAC<sup>3D</sup> 对夯扩挤密碎石桩加固干渠液化砂土地基进行了动力数值分析。结果表明, 由于夯扩挤密碎石桩的排水作用, 干渠底部饱和砂土地基中的超静孔隙水压力和孔压比与加固前相比明显减小; 干渠底部饱和砂土中的监测曲线表明, 随着地震荷载持续时间的增加, 饱和砂土地基中超静孔隙水压力和孔压比峰值较加固前大幅降低, 且时程曲线达到峰值之后也由加固前的基本保持不变改为迅速消减降低; 由于夯扩挤密碎石桩的排水和挤密作用, 有效消除了干渠底部以及渠堤坡面外侧平台至坡脚底部砂土层的液化现象, 加固后干渠底部饱和砂土地基中没有液化现象产生。

**关 键 词:** 夯扩挤密碎石桩; 液化砂土; 动力数值分析; 超静孔隙水压力; 孔压比

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

## Dynamic numerical analysis of liquefiable sand soil foundation reinforced by compacted gravel pile

YANG Ji-hong<sup>1</sup>, DONG Jin-yu<sup>1</sup>, HUANG Zhi-quan<sup>1</sup>, MA Shu-jiang<sup>2</sup>, GENG Yun-sheng<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;

2. The Second Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** The sand liquefaction problem has been one of the important topics in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering. Based on a project of the Middle Route of South-to-North Water Transfer, physico-mechanical parameters of soil have been obtained through field and laboratory tests. And the dynamic numerical analysis on the liquefied sand foundation of the main canal which has been reinforced by compacted gravel piles is conducted with FLAC3D. The results show that, for the drainage of the compacted gravel piles, the excess pore water pressure and pore pressure ratio in the saturated sand foundation of the main canal bottom have been significantly reduced compared to ones before reinforcement. Monitoring curves of the saturated sand in the bottom of the main canal show that, with the duration of the seismic loading, the peak values of the excess pore water pressure and pore pressure ratio in the saturated sand foundation decrease significantly compared to ones before reinforcement; and the time-history curve declines quickly when to the peak value, which keeps essentially unchanged before reinforcement. For the drainage and compaction effect of the compacted gravel piles, the liquefaction of the sand layers, in the bottom of the main canal, and from the outside platform of the embankment to the bottom of the slope foot, is eliminated effectively. And no liquefaction occurs in the saturated sand foundation of the main canal bottom after reinforcement.

**Key words:** compacted gravel pile; liquefiable sand soil; dynamic numerical analysis; excess pore water pressure; pore pressure ratio

## 1 引 言

1966年的邢台地震、1975年的海城地震、1976年的唐山地震、1995年日本神户地震、1999年中国

台湾集集地震以及2008年的汶川地震等都出现了大面积的砂土液化现象, 给公路、桥梁、水利设施、地下管道等造成了严重的损害<sup>[1-5]</sup>。饱和砂土在地震荷载作用下会发生液化, 其根本原因在于:一是地

收稿日期: 2014-06-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 41102203); 水利部公益性行业科研专项经费项目 (No. 201301034); 郑州市创新型科技人才培育计划领军人才项目 (No. 10LJRC185); 河南省基础与前沿技术研究项目 (No. 122300410146); 华北水利水电学院高层次人才引进项目 (No. 201105)。

第一作者简介: 杨继红, 女, 1976 生, 博士, 副教授, 主要从事地质工程和岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: yjh04616@126.com

基的密实度不足,在动荷载作用下孔隙水压力上升,有效应力降低,颗粒处于悬浮状态,使地基承载力不足,变形增大;二是地震作用下产生的孔隙水压力不能及时消散,造成地基的喷砂冒水或砂土的流动<sup>[6-7]</sup>。近10余年来,许多学者进行了这方面的研究,如王绍彪等<sup>[8]</sup>应用地震剪应力理论对饱和砂土振冲加固的振动压密作用机制进行了研究;牛琪瑛等<sup>[9-10]</sup>数值模拟对比了碎石桩与水泥土桩加固液化地基的处理效果;李进元<sup>[11]</sup>研究了振冲碎石桩法地基在阴坪水电站液化处理中的应用。

夯扩挤密碎石桩技术是利用重锤冲击成孔,在成孔的同时,使桩端和桩周土体得到一次挤密,成孔至设计标高后在孔中分层填入碎石或其他置换料,提升重锤到一定高度,令其自由下落,夯击碎石到松散土体之中,使桩端及周围土体得到第2次挤密,依次填入碎石,夯击碎石,直至设计标高。此法可以有效挤密土体,消散孔隙水压力<sup>[12-13]</sup>。本文以南水北调中线某工程为例,通过现场和室内试验获取土体的物理力学参数,砂土本构模型考虑为 Finn 体变孔压模型,利用岩土数值分析软件 FLAC<sup>3D</sup> 对夯扩挤密碎石桩加固干渠液化砂土地基进行了动力数值分析,对比分析了夯扩挤密碎石桩加固前后干渠

饱和砂土地基超静孔隙水压力、孔压比和液化情况。

## 2 工程概况

南水北调中线一期某工程,地形平坦开阔,地面高程为 83.1~85.24 m,设计渠底高程为 85.87~85.80 m,渠道底宽为 24.5 m,为填方渠段,填土高度为 10 m 左右。根据钻孔揭露,在钻探范围内出露的地层为全新统冲洪积 (Al+plQ<sub>4</sub>) 细砂、中砂和卵石,其中细砂、中砂层厚度约为 6~8 m,卵石层厚度为 22 m,地下水位埋深为 4.9~5.4 m。细砂 (X): 淡黄褐色、干-稍湿、松散、较纯净、有植物根,主要成分为石英、长石;中砂 (Z): 黄褐-灰褐色、稍湿、松散,成分主要为石英、长石,4.9 m 以上为黄褐色,较纯净,4.9 m 以下,颜色变深,且含少量泥质;卵石 (Lu): 灰褐色、棕褐色以石英砂岩、石英岩为主,磨圆度较好,含量约 50% 左右,最大粒径约 12 cm,砂为细砂,见图 1。经按实测标贯击数判别,饱和砂土具轻微~中等液化,采用夯扩挤密碎石桩对渠道底部以及渠堤外侧坡面平台至坡脚底部砂土层进行加固处理,设计桩径为 0.55 m,桩长为 7.0 m,桩间距为 1.8 m,加固断面图如图 2 所示。

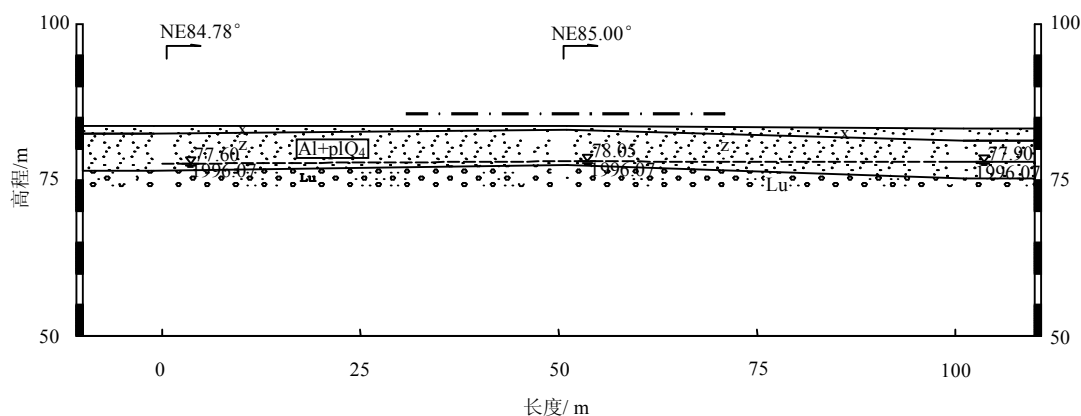


图 1 工程地质剖面图 (单位: m)

Fig.1 Geological profile (unit: m)

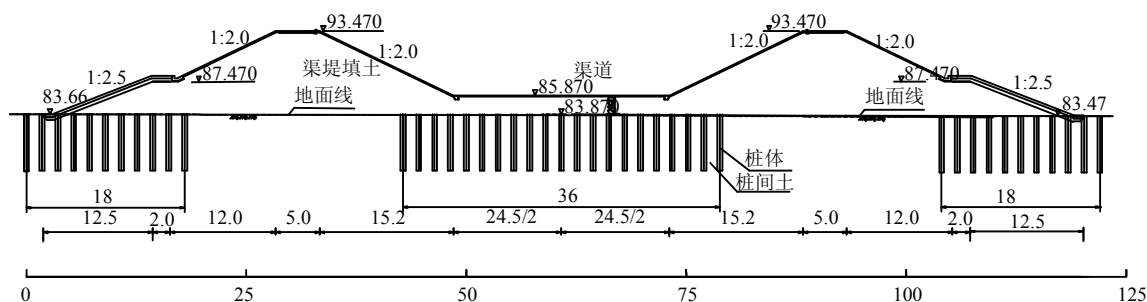


图 2 夯扩挤密碎石桩加固断面图 (单位: m)

Fig.2 Reinforced profile by compacted gravel piles (unit: m)

### 3 模型建立及计算过程

#### 3.1 计算模型

根据现场调查和工程实际情况, 计算模型范围垂直方向上高为 38 m (Z 轴方向, 从高程 55.47 m

到高程 93.47 m), 渠堤宽度方向上为 200 m (X 轴方向), 渠堤延伸方向上为 1 m (Y 轴方向)。数值模型简化为渠堤填土+夯扩挤密碎石桩+桩间挤密砂土+砂土+卵石层组合, 共划分 4 591 个单元, 9 558 个节点。其数值模型及网格划分如图 3 所示。

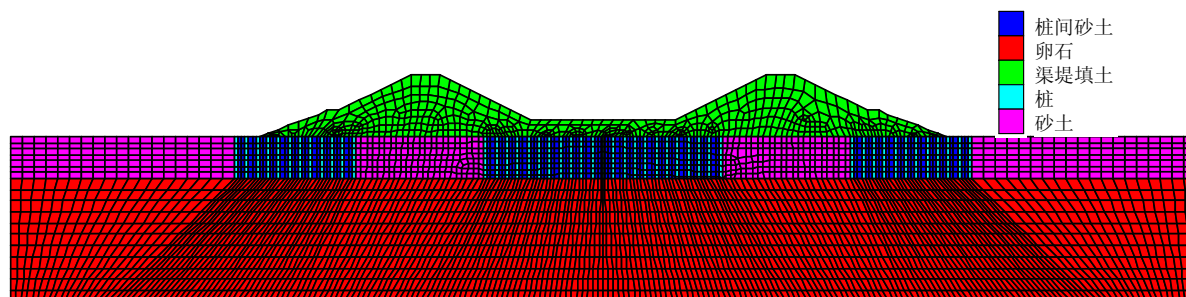


图 3 计算模型

Fig.3 Model used in calculation

#### 3.2 材料本构模型及参数选取

##### (1) 材料本构模型

将桩、渠堤填土和卵石层材料本构模型选为理想弹塑性模型, 屈服准则采用 Mohr-Coulomb 强度准则; 砂土本构模型选为 Finn 模型。Finn 模型的实质是在 Mohr-Coulomb 模型的基础上增加了动孔压的上升模式, 并假定动孔压的上升与塑性体积应变增量相关。设在有效应力为  $\sigma'_0$  时, 砂土的一维回弹模量为  $\bar{E}_v$ , 则对于不排水条件下孔隙水压力的增量  $\Delta\mu$  与塑性体积应变增量  $\Delta\varepsilon_{vd}$  的关系为

$$\Delta\mu = \bar{E}_v \Delta\varepsilon_{vd} \quad (1)$$

Byrne<sup>[14]</sup>提出了一种简便的计算塑性体积应变增量的方法:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp\left(-C_2 \frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma}\right) \quad (2)$$

式中:  $C_1$  和  $C_2$  为两个参数, 大多数情况下两者存在如下关系:

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \quad (3)$$

参数  $C_1$  与标准贯入击数存在如下关系:

$$C_1 = 8.7(N_1)^{-1.25}_{60} \quad (4)$$

由于 Finn 模型的基础是 Mohr-Coulomb 模型, 因此, Finn 模型参数包含 Mohr-Coulomb 的所有参数<sup>[15]</sup>。

##### (2) 计算参数选取

计算参数的选取对液化分析至关重要, 直接影响到计算结果的可靠性。在夯扩挤密碎石桩未加固

区和加固区现场布置钻孔, 进行砂土标准贯入试验, 并取样进行室内动力试验, 以测定夯扩挤密碎石桩的挤密效果。从图 4、5 可以看出, 加固后砂土层标贯击数较加固前提高了约 1 倍, 动剪切模量也有很大提高, 说明夯扩挤密碎石桩的挤土效果明显。结合室内其他试验结果, 确定计算的物理力学参数如表 1 所示。

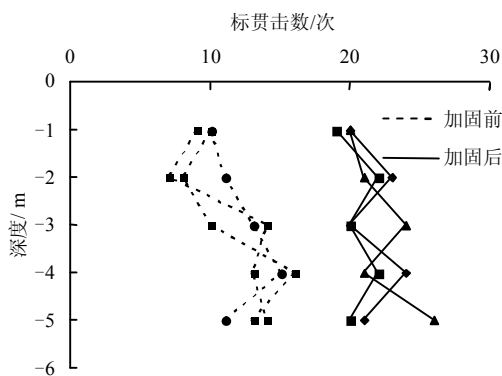


图 4 加固前后的标贯击数对比

Fig.4 SPT blow count

##### (3) 地震波输入及边界设置

采用近场地地震台记录的实际地震波作为输入波, 将最大加速度调整至 0.15g 作为 7 度设防时的最大地震加速度, 在计算过程中, 考虑地震为水平和竖直双向输入, 计算输入的加速度时程曲线如图 6 所示。

模型静力分析的边界条件采用底部边界固定约束, 两侧边界水平方向约束。动力分析时, 在模型底部采用黏滞边界, 两侧采用自由场边界。在计算中假定地基土体为完全饱和, 地基地部视为不排水边界, 地基顶部为自由排水边界。

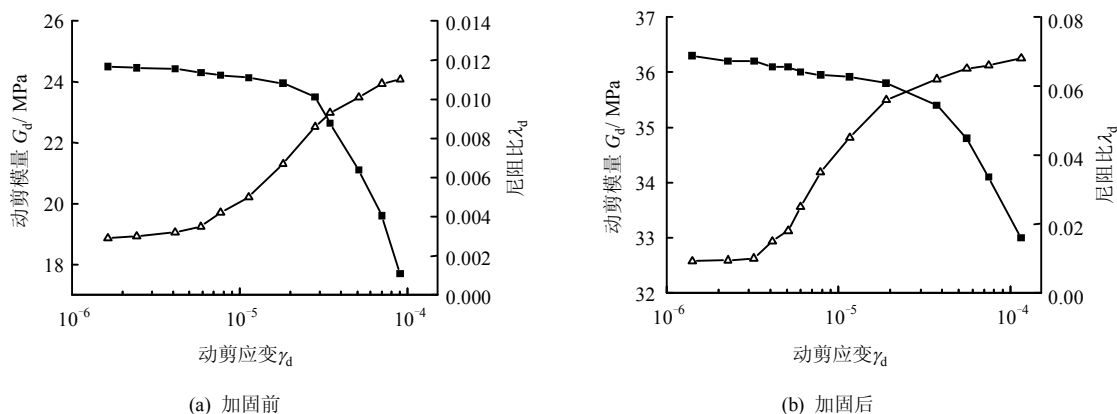
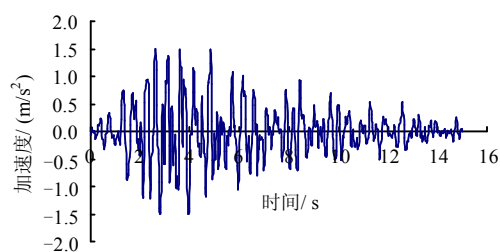
图5 动剪切模量及阻尼比与动剪应变关系曲线 ( $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$ )

Fig.5 Relationships between dynamic shear modulus and damping ratios or dynamic shear strain

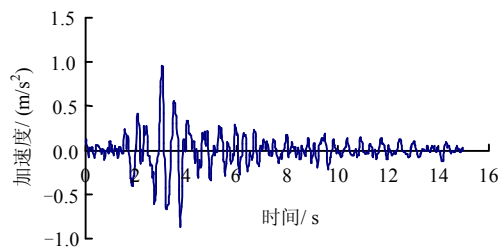
表1 模型材料计算参数

Table 1 Parameters of model material

| 土层类型 | 模型                             | 重度<br>/( $\text{kN/m}^3$ ) | 体积模量<br>/MPa | 剪切模量<br>/MPa | 黏聚力<br>/kPa | 内摩擦角<br>/( $^\circ$ ) | 渗透系数<br>/( $\text{cm/s}$ ) | 液化<br>参数                                                         |
|------|--------------------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 渠堤填土 | Mohr-Coulomb                   | 20.0                       | 97           | 45           | 10          | 25                    | $1.0 \times 10^{-5}$       |                                                                  |
| 桩间砂土 | Mohr-Coulomb (静态)<br>Finn (动态) | 17.0                       | 80           | 37           | 0           | 32                    | $1.5 \times 10^{-3}$       | Byrne<br>( $N_1$ ) <sub>60</sub> =19<br>$C_1=0.22$<br>$C_2=1.82$ |
| 桩    | Mohr-Coulomb                   | 21.0                       | 220          | 160          | 1           | 35                    | $3.0 \times 10^{-1}$       |                                                                  |
| 砂土   | Mohr-Coulomb                   | 16.5                       | 53           | 24           | 0           | 29                    | $1.5 \times 10^{-3}$       | Byrne<br>( $N_1$ ) <sub>60</sub> =9<br>$C_1=0.56$<br>$C_2=0.71$  |
| 卵石   | Mohr-Coulomb                   | 16.0                       | 130          | 100          | 4           | 36                    | $1.0 \times 10^{-1}$       |                                                                  |



(a) 水平向 (X 向)



(b) 竖直向 (Z 向)

图6 动力输入加速度时程曲线

Fig.6 Acceleration time-history curves in calculation

## 4 计算结果及分析

### 4.1 超静孔隙水压力

夯扩挤密碎石桩加固前、后干渠地基中超静孔

隙水压力分布如图7所示。可以看出,在地震作用下,超静孔隙水压力最大值位于干渠渠堤底部的饱和砂土层中,加固前在5s时刻为140~150.36 kPa,加固后由于夯扩挤密碎石桩的排水作用,在5s时刻为90~96.33 kPa,与夯扩挤密碎石桩加固前相比超静孔隙水压力值明显减小。

计算过程中在干渠的渠道中心处底部砂土层不同深度布置监测点,监测对比夯扩挤密碎石桩加固前、后超静孔隙水压力的变化特征,结果如图8所示。从图中可以看出,夯扩挤密碎石桩加固前,渠道中心底部砂土层超静孔隙水压力随着埋置深度的增加而增大,1 m深度处的超静孔隙水压力峰值为82.19 kPa,3 m深度处为104.40 kPa,5 m深度处为130.70 kPa,在地震作用下,砂土层中的超静孔隙水压力发生明显的震荡变化,孔隙水压力先增长,然后至峰值,之后基本保持不变;夯扩挤密碎石桩加固后,渠道中心底部砂土层1 m深度处的超静孔隙水压力峰值为17.79 kPa,3 m深度处为40.98 kPa,5 m深度处为57.76 kPa,与加固前相比,超静孔隙水压力峰值大幅度减小,且随着地震荷载持续时间的增加,孔隙水压力达到峰值之后迅速消减降低,充分表明了夯扩挤密碎石桩的排水作用。

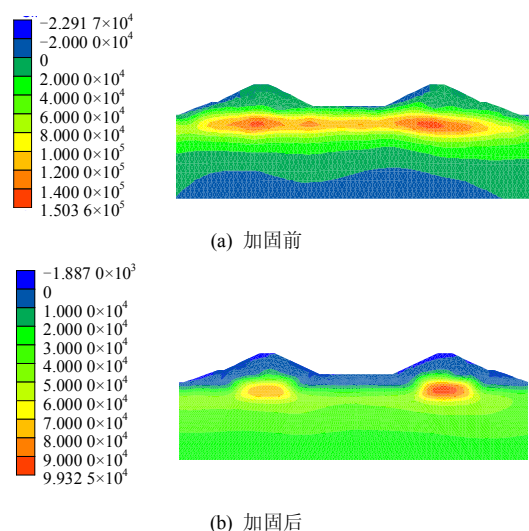
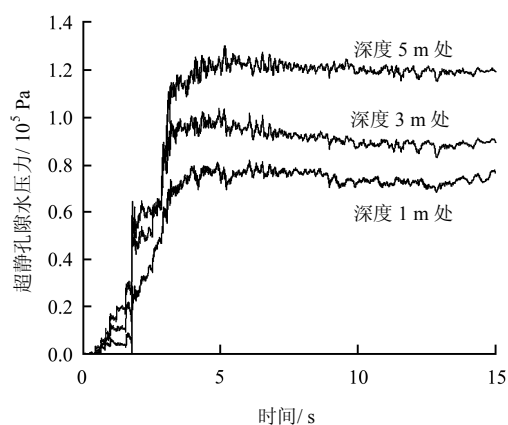
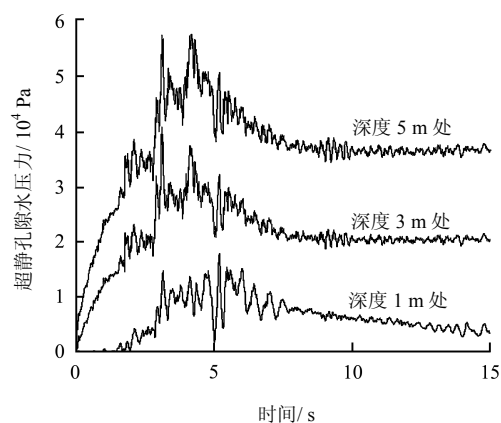


图7 超静孔隙水压力分布云图(5s时刻)(单位: Pa)

Fig.7 Nephograms of excess pore water pressure (5 s)(unit: Pa)



(a) 加固前



(b) 加固后

图8 渠道中心处砂土层中超静孔隙水压力监测曲线

Fig.8 Curves of pore water pressures in different depths in center of canal section

## 4.2 孔压比

孔压比为超静孔隙水压力与初始有效应力之比。夯扩挤密碎石桩加固前、后干渠地基中孔压比分布如图9所示。可以看出, 夯扩碎石桩加固前,

在地震作用下, 尽管超静孔隙水压力最大值位于干渠渠堤底部砂土层中, 但渠堤底部砂土层由于初始有效应力较大, 其孔压比不高, 孔压比最大值位于干渠渠道底部饱和砂土层中, 5 s 时刻的幅值达到了 0.9~1.0; 夯扩挤密碎石桩加固后, 由于干渠渠道底部桩体的排水作用, 孔压比最大值位于干渠渠堤底部饱和砂土层中, 5 s 时刻幅值为 0.35~0.39, 与加固前相比, 幅值也明显减小。

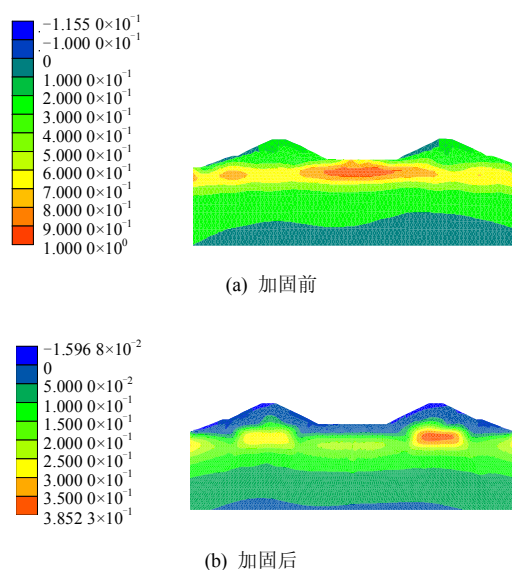


图9 超孔压比分布云图(5s时刻)

Fig.9 Nephograms of excess pore water pressure ratios (5 s)

计算过程中在干渠渠道中心处底部砂土层不同深度处的孔压比监测曲线如图10所示。夯扩挤密碎石桩加固前, 在渠道中心底部砂土层 1、3 m 深度处的孔压比峰值为 1.00, 5 m 深度处为 0.89, 说明在 1、3 m 深处饱和砂土已经发生了液化, 且孔压比随着地震幅值的增加而增大, 达到峰值之后随着地震幅值的降低基本保持不变; 夯扩挤密碎石桩加固后, 在渠道中心底部砂土层 1 m 深度处的孔压比峰值为 0.34, 3 m 深度处为 0.36, 5 m 深度处为 0.35, 没有液化现象产生, 孔压比随着地震幅值的增加而增大, 达到峰值之后由于桩体的排水作用开始消减降低。

## 4.3 液化

夯扩挤密碎石桩加固前、后干渠底部砂土层的液化情况对比如图11所示。加固前, 在干渠渠道底部以及渠堤外侧坡面平台至坡脚局部区域砂土层发生了液化; 加固后, 干渠地基中超静孔隙水压力和孔压比较处理前大范围减小, 没有液化现象产生, 证明了碎石桩的抗液化性能与排水效应和挤密效应

直接相关。

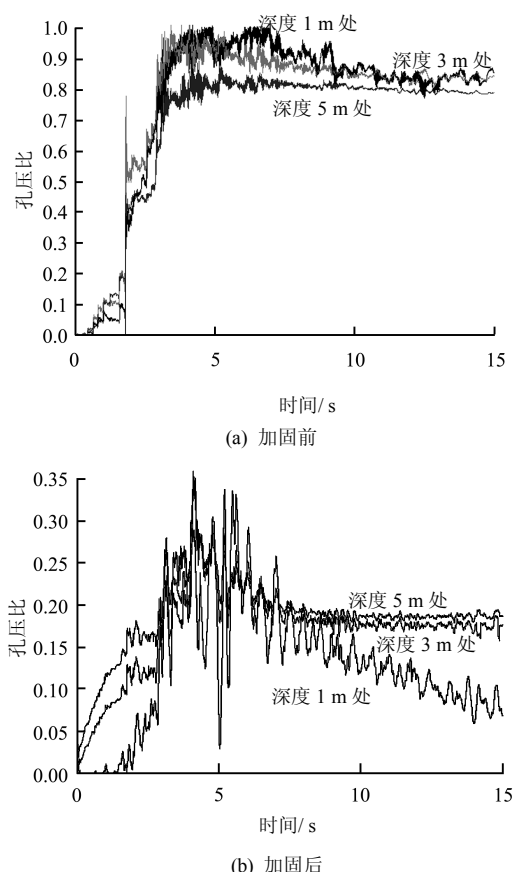


图 10 渠道中心处砂土层中孔压比监测曲线  
Fig.10 Curves of pore water pressure ratio in different depths in center of canal section

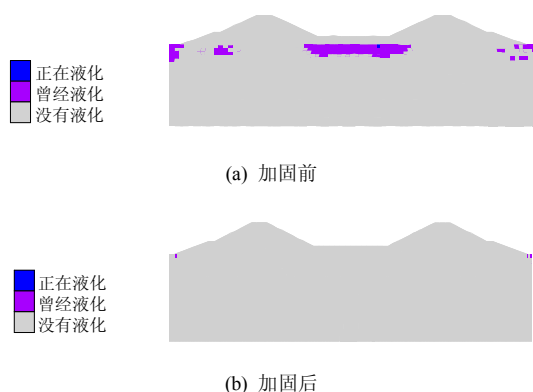


图 11 液化区域分布图 (地震结束时刻)  
Fig.11 Liquefaction region graph(after earthquake)

## 5 结 论

(1) 夯扩挤密碎石桩加固前, 超静孔隙水压力最大值位于干渠渠堤底部的饱和砂土层中, 孔压比最大值位于干渠渠道底部饱和砂土层中, 幅值达到了 0.9~1.0; 夯扩挤密碎石桩加固后, 干渠底部饱和砂土层中的超静孔隙水压力值明显减小, 孔压比最大值由加固前的干渠渠道底部转移到渠堤底部,

量值也大幅度减小。

(2) 干渠渠道底部饱和砂土层中的超静孔隙水压力和孔压比监测曲线对比表明, 夯扩挤密碎石桩加固前, 超静孔隙水压力和孔压比随着地震幅值的增加而增大, 达到峰值之后随着地震幅值的降低基本保持不变; 加固后, 超静孔隙水压力和孔压比随着地震幅值的增加而增大, 达到峰值之后由于桩体的排水作用迅速消减降低。

(3) 夯扩挤密碎石桩加固前, 在干渠渠道底部以及渠堤外侧坡面平台至坡脚局部区域砂土层发生了液化; 加固后, 渠道及渠堤底部砂土层中孔压比较处理前大幅度减小, 干渠地基中没有液化现象产生, 说明采用夯扩挤密碎石桩加固后, 大大提高了饱和砂土地基的抗液化能力。

## 参 考 文 献

- [1] 刘恢先. 唐山大地震震害[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [2] Committee on Earthquake Engineering. Commission on engineering and technical systems, national research council liquefaction of soil during earthquakes[R]. Washington: National Academy Press, 1985.
- [3] 袁晓铭, 曹振中, 孙锐, 等. 汶川 8.0 级地震液化特征初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1288—1296.
- [4] YUAN Xiao-ming, CAO Zhen-zhong, SUN Rui, et al. Preliminary research on liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1288—1296.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [6] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [7] 黄春霞, 张鸿儒, 隋志龙. 碎石桩复合地基的抗液化特性探讨[J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 148—154.
- [8] HUANG Chun-xia, ZHANG Hong-ru, SUI Zhi-long. A study of resistance liquefaction of composite foundation of stone columns[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 12(2): 148—154.
- [9] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [10] 王绍彪, 谢蒙. 饱和砂土振冲加固的振动液化机制研究[J]. 人民珠江, 2010, (4): 12—15.
- [11] WANG Shao-biao, XIE Meng. Study of vibration liquefaction mechanism of saturated sandy soil vibroflotation reinforcement[J]. *Pearl River*, 2010, (4): 12—15.

- [9] 牛琪瑛, 刘建君, 张明, 等. 碎石桩加固液化砂土地基的数值模拟分析[J]. 工程力学, 2011, 28(增刊 1): 90—93.  
NIU Qi-ying, LIU Jian-jun, ZHANG Ming, et al. Analysis on numerical simulation of liquefiable sand soil reinforced by gravel pile[J]. **Engineering Mechanics**, 2011, 28(Supp.1): 90—93.
- [10] 牛琪瑛, 刘建君, 刘少文, 等. 碎石桩与水泥土桩加固液化地基的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 481—484.  
NIU Qi-ying, LIU Jian-jun, LIU Shao-wen, et al. Numerical simulation of liquefiable sandy ground reinforced by gravel piles and soil-cement piles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(Supp.1): 481—484.
- [11] 李进元. 振冲碎石桩法地基处理在阴坪水电站中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 1): 2968—2976.  
LI Jin-yuan. Application of foundation treatment with vibro-replacement stone piles to Yinping hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.1): 2968—2976.
- [12] 付殿武, 李凤起, 戚银生, 等. 夯扩挤密碎石桩处理液化砂土[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(2): 282—285.  
FU Dian-wu, LI Feng-qi, QI Yin-sheng, et al. Study on compacted crushing stone pile in treatment for saturated sand after liquefaction[J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)**, 2010, 26(2): 282—285.
- [13] 许芸芸, 孙忠强, 刘亚昌, 等. 夯扩挤密碎石桩在沿海高速公路砂土液化地基中的应用[J]. 铁道建筑, 2007, (4): 66—67.  
XU Yun-yun, SUN Zhong-qiang, LIU Ya-chang, et al. Application of compact expanded stone piles to consolidation of liquefiable sand soil under expressway in Tangshan seaboard[J]. **Railway Engineering**, 2007, (4): 66—67.
- [14] BYRNE P M. A cyclic shear-volume coupling and pore-pressure model for sand[C]//Proceedings of Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. St. Louis, Missouri: Geotechnical Special Republication, 1991, 47—55.
- [15] 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.