

文章编号: 1000-7598-(2008) 05-1320-06

碎石桩设计参数对复合地基抗液化性能的影响

张艳美¹, 张鸿儒²

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061; 2. 北京交通大学 土建学院, 北京 100044)

摘 要: 对碎石桩复合地基进行完全耦合的三维有效应力动力分析, 探讨了碎石桩桩径、桩长和桩间距等设计参数对碎石桩复合地基抗液化性能的影响。结果表明, 浅层范围内桩长对孔压比的影响较小, 随深度的增大, 桩长的影响有增大的趋势; 在其他条件不变的情况下, 随桩径的增大, 桩间土中的超孔隙水压力降低, 桩径对超孔压发展的影响沿深度方向不同, 主要表现在中下部; 当仅改变桩间距时, 随桩间距的增大, 桩间土中的超孔压升高, 在工程设计时, 桩径与桩间距的比值宜大于 0.27, 即桩间距的设计值不宜超过 $3.75D$ (D 为碎石桩桩径); 随碎石桩本身渗透系数的增加, 复合地基中不同深度处的超孔压都有所降低, 并且随深度的增大, 这种影响有增大的趋势。

关 键 词: 碎石桩复合地基; 动力分析; 超孔隙水压力; 液化

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Influence of stone columns design parameters on anti-liquefaction nature of composite foundation

ZHANG Yan-mei¹, ZHANG Hong-ru²

(1. College of Architecture & Storage Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying 257061, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Stone columns composite foundation is analyzed by the developed fully coupled three-dimension effective-stress dynamic analysis procedure; the influence of stone columns design parameter on anti-liquefaction nature of composite foundation is discussed. The research shows that the influence of column length is minor in superficial layer and is major in deep level; under other condition fixed, with the diameter of stone columns increasing, the excess pore water pressure decreases; with the spacing of columns increasing, the excess pore water pressure increases. In engineering design, the ratio of the diameter and spacing of columns should be bigger than 0.27, or the spacing of columns is smaller than $3.75D$; with the permeability of stone columns increasing, the excess pore water pressure in different depths decreases; and the influence is stronger with the depth increasing.

Key words: stone columns composite foundation; dynamic analysis; excess pore water pressure; liquefaction

1 引 言

大量国内外震害调查表明, 地震所引起地基液化现象对建(构)筑物造成了严重危害。为了提高地基的抗液化性能, 目前已经发展了多种可液化地基加固处理方法, 其中碎石桩复合地基法由于具有加固效果好、造价低和施工速度快等优点, 在工程界得到了广泛的应用, 但是碎石桩复合地基的工作机理十分复杂, 除了需要考虑碎石桩本身的加密、排水和减震效应以及各种效应的相互耦合作用外, 碎石桩的加固效果还受桩身设计参数、施工工艺等

因素的影响。已有的工程经验表明, 尽管有些工程经过了碎石桩处理, 但在地震时地基仍然发生了液化现象, 这与目前对碎石桩复合地基抗液化性能认识的不足以及工程上采用的复合地基抗液化判别标准的局限性有密切的关系。

目前所有的碎石桩复合地基抗液化判别标准基本都存在以下几方面的缺陷: (1) 主要以桩间土作为研究对象而不是以复合地基整体作为研究对象。实际上, 在地震荷载作用下碎石桩与桩间土是相互作用、协调工作, 不是相互孤立的, 碎石桩作用的发挥与桩间土的约束作用密切相关^[1], 将桩间

收稿日期: 2007-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. G50278003), 校基金资助项目 (No.y061515)。

作者简介: 张艳美, 女, 1972 年生, 博士, 主要从事土动力学与地基处理方面的研究工作。E-mail: zhangym@upc.edu.cn

土孤立出来作为研究对象, 尤其是以桩间土临界标贯击数为基础的判别标准与实际工程情况有较大差距。(2) 不能综合考虑碎石桩各效应的相互耦合作用。在地震荷载作用下, 碎石桩的加密、排水、减震效应同时发挥作用并相互影响, 但是目前的抗液化判别标准主要只考虑了碎石桩的加密效应, 实际工程应用时不能充分考虑碎石桩的潜在作用。(3) 几乎所有的判别标准都没有考虑桩身设计参数的影响。

以上三方面的缺陷, 使得在实际工程中对碎石桩复合地基抗液化效果的判断不够准确, 经碎石桩处理后的地基在地震时仍然发生了液化失效, 或者过分保守而提高了工程造价, 造成不必要的浪费。下面将针对第3个缺陷, 通过对碎石桩复合地基进行三维有限元动力分析来探讨碎石桩设计参数对复合地基抗液化性能的影响。

2 有限元方程及计算参数

由于碎石桩本身是三维排水, 复合地基在动荷载作用下不仅有超孔隙水压力的产生, 也伴随着超孔隙水压力的消散和扩散。过去对碎石桩复合地基的动力分析一般将其简单地简化成为二维问题, 即将碎石桩简化成碎石墙^[2-4], 与碎石桩的实际工作情况相差较大, 并且, 在已有的动力分析过程中主要以黏弹性理论为基础, 采用部分耦合分析方法, 即在分析过程中引入了动孔压计算模式, 并没有实现真正意义上的动力反应与动力固结相耦合。本文将饱和砂土视为土-水两相介质, 以 Zienkiewicz 提出的 $u-p$ 形式的 Biot 动力固结方程为基础^[5], 编制了完全耦合的三维排水有效应力动力反应分析程序, 用该程序对碎石桩复合地基作动力响应分析, 并通过模型实验验证了程序的正确性^[6]。

2.1 有限元方程

有限元方程为

$$\left. \begin{aligned} [\bar{K}]\{\Delta u\} &= \{\Delta F\} - ([K_c] + [Q])\{\Delta P\} + [K_d]\{\Delta u\} \cdot \\ (a_1[S] + [K_s])\{\Delta P\} &= [K_c]^T\{\Delta \dot{u}\} + ([K_m] + [\bar{M}]) \cdot \\ \{\Delta \ddot{u}\} + [S]\{(a_4 + 1)\{\dot{p}\}_t + a_5\{\ddot{p}\}_t\} &- \{\Delta R_q\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中

$$[\bar{K}] = a_0[M] + [K] + a_1[\bar{C}] + [K_d]; [M] = \sum_e \int_{V^e} N^T \cdot$$

$$\rho N dV \text{ 为总体质量矩阵; } [K] = \sum_e \int_{V^e} B^T D_{ep} B dV \text{ 为总}$$

$$\text{体刚度矩阵; } [K_d] = \sum_e Q_b \int_{V^e} B^T m m^T B dV \text{ 为总体水刚}$$

$$\text{度矩阵; } [K_c] = \sum_e \int_{V^e} B^T m \bar{N} dV \text{ 为总体耦合矩阵;}$$

$$[S] = \frac{1}{Q_b} \int_{V^e} \bar{N}^T \bar{N} dV \text{ 为总体孔隙水压缩矩阵; } [K_s] =$$

$$\int_{V^e} \bar{N}^T \{\partial'\}^T k \{\partial'\} \bar{N} dV \text{ 为总体渗流矩阵; } [K_m] =$$

$$\sum_e \int_{V^e} \bar{N}^T m^x [\partial] k \rho_w N dV \text{ 为总体土体运动惯性力矩}$$

$$\text{阵; } \{\Delta R\} = \sum_e \left(\int_{V^e} N^T \Delta X dV + \int_{\Gamma_u^{qe}} N^T \Delta F_s d\Gamma \right) \text{ 为等效}$$

$$\text{节点荷载增量列阵; } \{\Delta R_q\} = \sum_e \left(\int_{\Gamma_w^{qe}} \bar{N}^T \Delta v_n d\Gamma + \right.$$

$$\left. \int_{V^e} \bar{N}^T m^T [\partial] k \Delta X dV \right) \text{ 为等效节点流量增量列阵;}$$

$$[\bar{M}] = \sum_e \int_{\Gamma_a^e} \bar{N}^T A_{up} T N d\Gamma; [\bar{C}] = \sum_e \int_{\Gamma_a^e} N^T T^T B_{up} T N \cdot$$

$$d\Gamma; [Q] = \sum_e \int_{\Gamma_a^e} N^T T^T C_{up} N d\Gamma; \{\Delta F\} = \{\Delta R\} + [\bar{C}] \cdot$$

$$\{(a_4 + 1)\{\dot{\delta}_t\} + a_5\{\ddot{\delta}_t\}\} + [M]\{a_2\{\dot{\delta}_t\} + (a_3 + 1)\{\ddot{\delta}_t\}\};$$

$$a_0 = 1/\gamma \Delta t^2; a_1 = \delta/\gamma \Delta t; a_2 = 1/\beta \Delta t; a_3 = \frac{1}{2\gamma} - 1;$$

$$a_4 = \frac{\delta}{\gamma} - 1; a_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\gamma} - 2 \right); \Delta X \text{ 为体积力增量向}$$

量; ΔF_s 为面力增量向量; Δv_n 为边界面外法线方向上已知的流速增量; $m = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 其他符号的意义、有限元方程的推导过程、边界条件的选取等参见文献[4]。

2.2 计算参数

复合地基的计算参数见表1。

表1 复合地基计算参数
Table 1 Calculation parameters of composite foundation

土类	厚度 / m	$\mu_{\text{砂}}$	$\mu_{\text{砂}}$	E / MPa	ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$K_{2\text{max}}$	c / kPa	ϕ' / ($^\circ$)	ϕ'_d / ($^\circ$)	K_f / kPa	K_0
砂土	8.0	0.33	0.4	33	1.9	55	0	30	36	2 000	0.25
碎石桩	8.0	0.30	0.4	200	2.2	65	0	35	45	2 000	0.20

注: $K_{2\text{max}}$ 为动剪模量系数; ϕ'_d 为动内摩擦角; K_f 为水的体积压缩模量; K_0 为静止侧压力系数。

2.3 有限元模型

复合地基为正方形桩，如图 1 和图 2 所示。计算时，初始静孔隙水压力和初始位移均为 0。底面为不透水基岩固定端；顶面为透水自由面；周边为自由透水且设置人工边界。碎石桩采用线弹性模型，在有限元网格划分时将圆形桩等效成正方形桩。

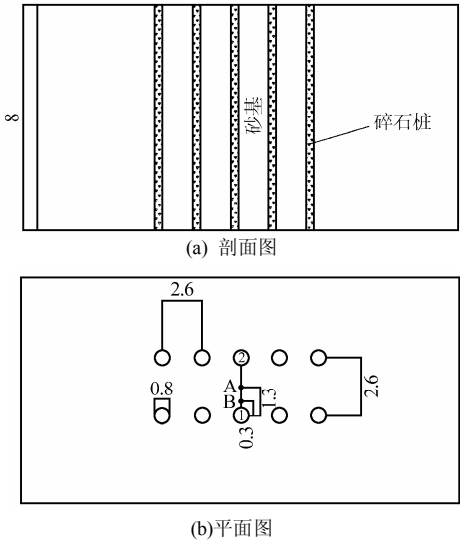


图 1 碎石桩复合地基示意图(单位: m)
Fig.1 Schematics of stone columns composite foundation(unit: m)

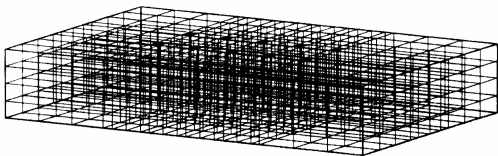


图 2 有限元网格示意图
Fig.2 Schematics of finite element meshes

2.4 地震波的输入

采用 EI CENTRO 南北方向的波作为地震输入波（图 3），将设计基本抗震加速度调整至 0.2 g 作为 8 度设防时的最大地震加速度。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。

3 计算结果与分析

3.1 桩长的影响

关于桩长对碎石桩加固效果影响的研究成果目前还很少，在实际工程中碎石桩的处理深度一般要求穿越可液化土层，由于附加压重的作用，也可能使得原来液化的下部土层不再液化，所以所有的碎石桩穿越液化土层不可避免地会造成工程上的浪费。图 4 为单桩复合地基中碎石桩的桩长对超孔压

比（超孔压比是指超孔隙水压力与初始有效球应力之比）发展的影响， R 为距离碎石桩中心的距离。将桩长 6 m 时的超孔压比与桩长 8 m 时的超孔压比相比较可以看出，虽然前者比后者数值上大些，但与天然地基相比，超孔压比仍有较大程度的降低，且深部土体不会出现液化现象。

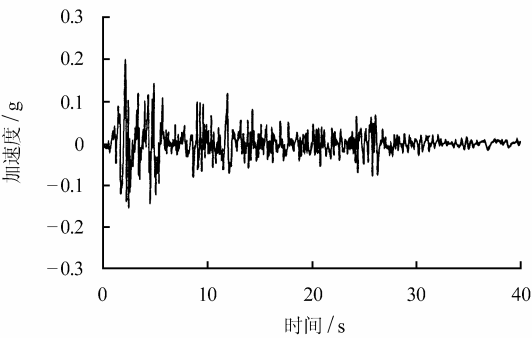


图 3 EI CENTRO 波加速度时程曲线
Fig.3 Acceleration time curve of EI CENTRO wave

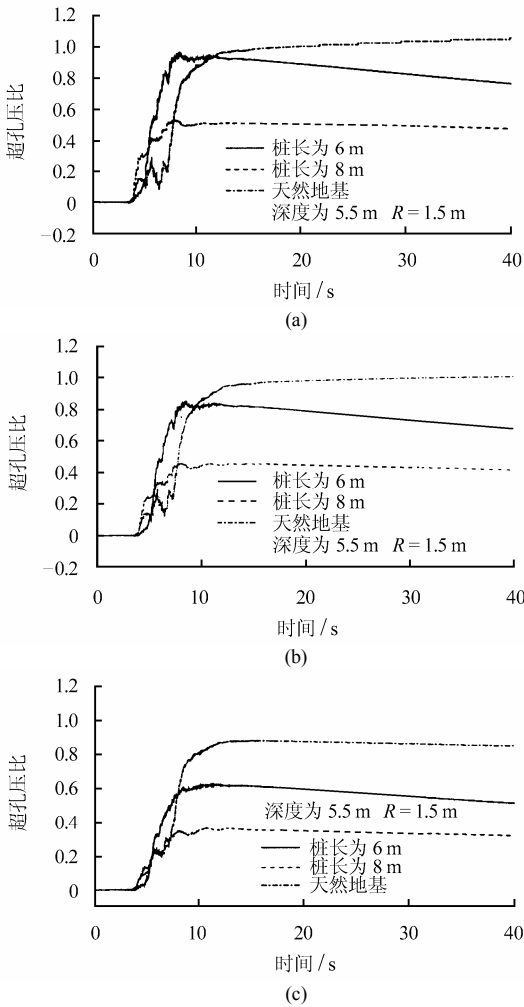


图 4 单桩复合地基中不同桩长对超孔压比发展的影响
Fig.4 Influence of different column lengths on the development of excess PWPR in single column composite foundation

对于群桩复合地基, 在桩径为 0.8 m 和桩间距 2.6 m 不变的条件下, 分别取桩长 8.0 m 和 6.0 m 进行计算。将计算结果与天然地基计算结果进行对比 (图 5) 可以看出, 在浅层范围内桩长对超孔压比的影响很小; 在 6.0 m 以下范围内, 碎石桩复合地基中的超孔压比在桩长 6.0 m 时比桩长 8.0 m 时大, 超孔压消散现象不明显, 但仍比天然地基中的超孔压比小, 则从计算结果可以推测, 仅从消除地基液化的角度讲, 实际工程中没有必要将所有的碎石桩都穿越可液化土层, 可以适当缩短碎石桩的桩长或采用长短桩间隔设置的方案, 以达到抗液化和经济的目的。

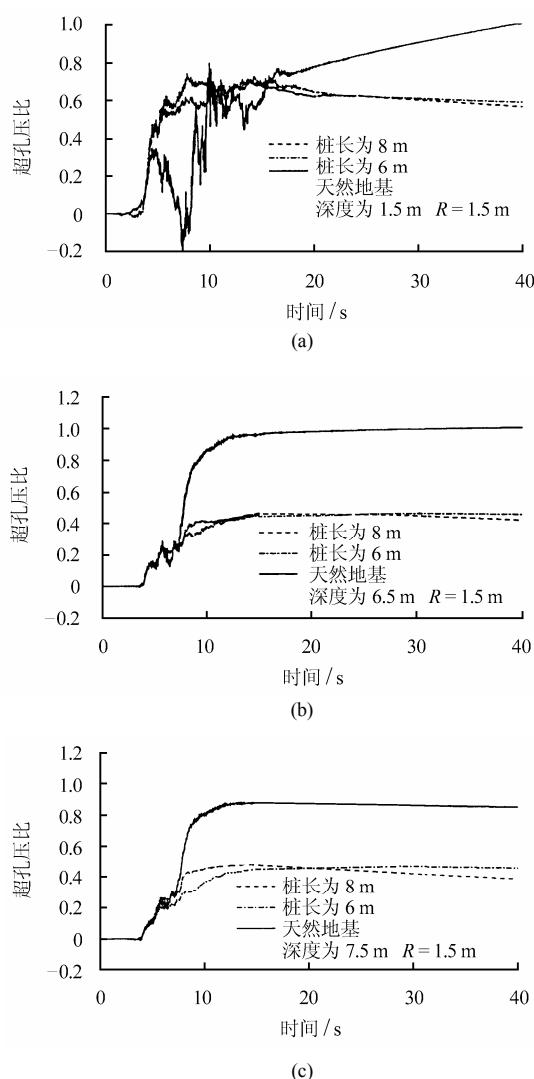


图5 碎石桩复合地基中不同桩长对超孔压比发展的影响
Fig.5 Influence of different column lengths on the development of excess PWP in stone column composite foundation

3.2 桩径的影响

图 6 反映了复合地基中不同碎石桩桩径对超孔压发展的影响, 其中桩间距为 2.6 m, 桩长 8 m。

可见在其他条件一定的情况下, 随桩径的增大, 桩间土中的超孔压降低; 桩径对超孔压发展的影响沿深度方向不同, 主要表现在中下部。

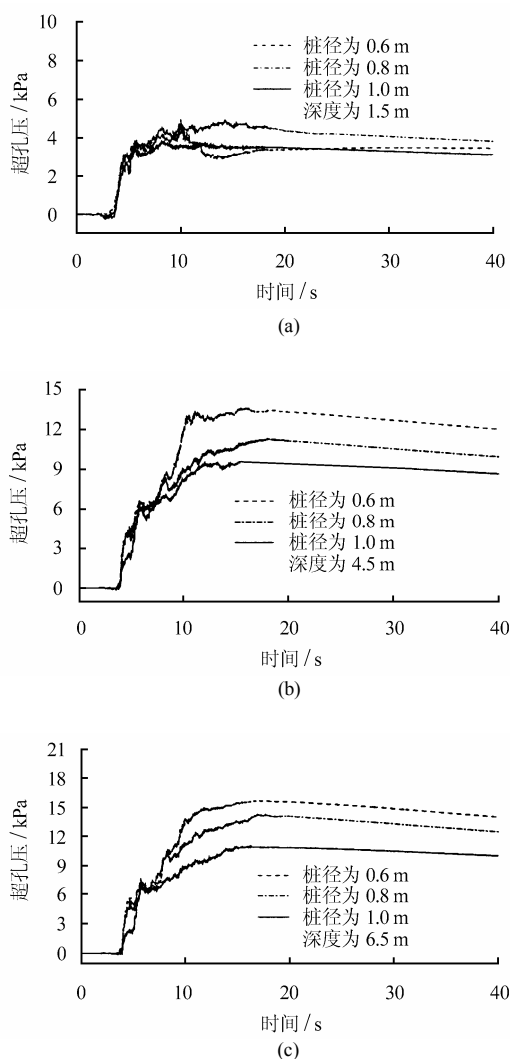


图6 复合地基中不同桩径对孔压发展的影响

Fig.6 Influence of different column diameters on the development of excess PWP in composite foundation

3.3 桩间距的影响

图 7 反映了复合地基中不同碎石桩桩间距对超孔压发展的影响, 桩径取 0.8 m, 桩长取 8.0 m, S 为桩间距。在其他条件不变仅改变桩间距时, 随桩间距的变大, 桩间土中的超孔压升高。表 2 分析结果表明, 在工程设计时, 桩径与桩间距的比值宜大于 0.27, 即桩间距的设计值不宜超过 $3.75D$ 。

3.4 桩身渗透系数的影响

对于单桩碎石桩复合地基, 分别取不同的碎石桩渗透系数为 0.005, 0.001 m/s 和 0.000 1 m/s 进行计算。图 8 为在距离桩心水平距离为 1.5 m 时不同深度处的超孔隙水压力都有所降低, 随深度的增

大，这种影响有增大的趋势，这是因为渗透性好的碎石桩更有利于超孔隙水的及时排除，避免了地震期超孔隙水压力的积累，因此在施工过程中控制碎石桩本身的含泥、含沙量，提高碎石桩的渗透性，将有利于发挥碎石桩的排水减压作用，提高复合地基本身的抗液化能力。

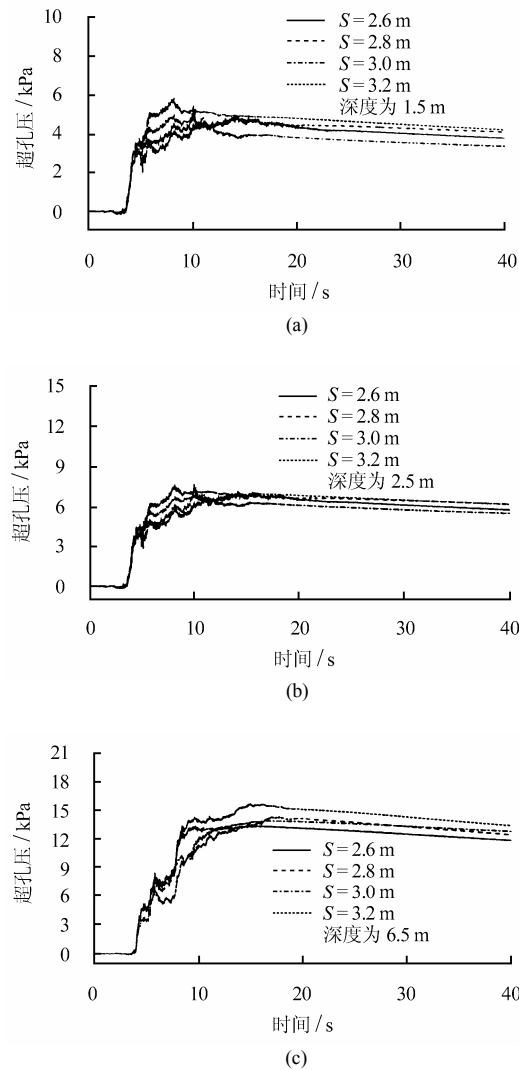


图 7 不同桩间距对超孔压发展的影响

Fig.7 Influence of different spacings of columns on the development of excess PWP in composite foundation

表 2 不同桩径/桩间距对地基抗液化性能的影响
Table 2 Influence of different ratios of column diameter and spacing of columns on anti-liquefaction nature

桩径 D / m	桩间距 S / m	D/S	液化情况
0.6	2.6	0.23	浅部液化
0.8	2.6	0.31	无
0.8	2.8	0.29	无
0.8	3.0	0.27	无
0.8	3.2	0.25	浅部液化
1.0	2.6	0.38	无

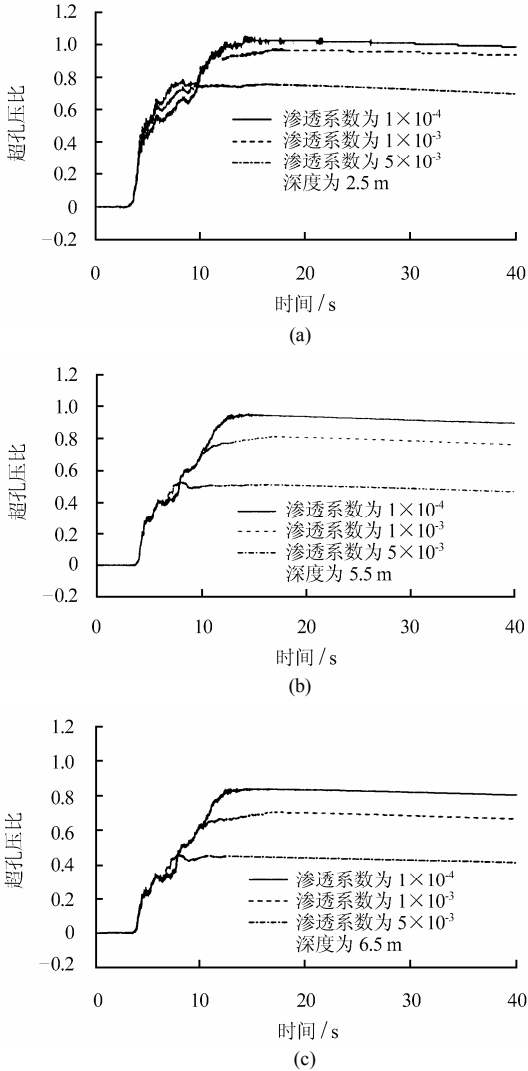


图 8 碎石桩不同渗透系数对超孔压比发展的影响

Fig.8 Influence of different permeability coefficients of stone columns on the development of excess PWP

4 结 论

通过对碎石桩复合地基进行三维有限元动力响应分析，探讨了碎石桩设计参数对碎石桩复合地基抗液化性能的影响。如果仅从抗液化的角度讲，根据分析结果，建议在实际工程设计中通过控制桩径与桩间距比值、控制碎石桩本身的含泥、含沙量以及采用长短桩间隔设置的方案等措施来达到既保证碎石桩复合地基的抗液化性能又经济的目的。另外，目前关于这方面的工程资料和试验数据较少，建议进一步加强这方面的研究工作，为工程设计提供准确的定量参考指标。

参 考 文 献

[1] 林本海, 谢定义. 复合地基的液化检验理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

-
- [2] SASAKI Y, TANIGUCHI E. Shaking table tests on gravel drains to prevent liquefaction of sand deposits[J]. **Soil and Foundations**, 1982, 22(3): 1—14.
- [3] AKIYOSHI T, FUCHIDE K, MATSUMOTO H, et al. Liquefaction analyses of sandy ground improved by sand compaction piles[J]. **Dynamics and Earthquake Engineering**, 1993, (12): 299—307.
- [4] 宣伟丽. 碎石桩复合地基抗液化分析[硕士论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [5] ZIENKIEWICZ O C, CHANG C T, BETTESS P. Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils[J]. **Limits of Validity. Geotechnique**, 1980, 30: 385—395.
- [6] 张艳美, 张鸿儒. 碎石桩复合地基抗液化性能数值模拟及应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.