

基于地震变形控制的隧道地基注浆抗液化加固效果评价

黄雨^{1,2}, 金晨^{1,2}, 庄之敬^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 目前理论上主要有两种液化防治思路: 一种是限制超孔隙水压力的产生与发展; 另一种是减少液化产生的过大变形。目前, 基于前一种设计思想的液化处理方法和研究较多, 而对基于变形控制的处理方法实施效果的研究则相对有限。从后一种思路出发, 基于 Biot 固结理论, 利用循环弹塑性本构模型, 通过数值模拟方法, 对上海某电厂取排水隧道的地震液化问题进行模拟, 建立一种平面应变条件下隧道地震液化变形的数值模拟方法, 以评估其注浆预防液化的加固效果。其中重点分析了地震作用下加固前后该隧道地基的位移、加速度、超孔隙水压力等动力反应。结果表明, 采用适当的抗液化处理措施可以较好地抑制地基液化变形, 这为工程场地抗震设计及液化防治提供了科学依据, 对类似工程的可液化场地处理具有良好的借鉴作用。

关键词: 隧道工程; 地震液化; 循环塑性; 动力耦合分析; 有限元法

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)07 - 1484 - 07

ASSESSMENT OF ANTI-LIQUEFACTION GROUTING REINFORCEMENT EFFECT OF TUNNEL FOUNDATION BASED ON EARTHQUAKE-INDUCED DEFORMATIONS CONTROL

HUANG Yu^{1,2}, JIN Chen^{1,2}, ZHUANG Zhijing^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: At present, there are two kinds of theories for anti-liquefaction, i.e. prevention of excess pore water pressure generation and development, and reduction of liquefaction-induced deformations. Up to now, most of researches have paid more attentions to the former, while the latter one has not been fully analyzed. Therefore, focused on the latter theory for anti-liquefaction, by using a cyclic elastoplastic constitutive model, liquefaction analysis of a water intake and outlet tunnel of a power plant in Shanghai is carried out by means of finite element method based on Biot's consolidation theory. A numerical simulation method for earthquake-induced liquefaction deformation is proposed under plane strain conditions to assess anti-liquefaction grouting effect. The dynamic responses including displacements, accelerations, and excess pore water pressures of tunnel foundation before and after reinforcement are analyzed. It is proved that the liquefaction deformations of the tunnel foundation can be effectively reduced by the proper anti-liquefaction measures. Some scientific suggestions for aseismic designs of this project are proposed based on the results of numerical simulation, and they can provide good references for liquefiable ground treatment of other similar projects.

收稿日期: 2008 - 11 - 06; **修回日期:** 2009 - 02 - 25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40841014, 40802070); 上海市重点学科建设项目(B308)

作者简介: 黄雨(1973 -), 男, 博士, 1995年毕业于同济大学工程地质与水文地质专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事地质工程与岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: yhuang@tongji.edu.cn

Key words: tunneling engineering; earthquake-induced liquefaction; cyclic plasticity; dynamic coupled analysis; finite element method

1 引言

1995 年日本阪神大地震中, 神戸市管道和地铁结构发生严重的变形破坏^[1]; 1999 年台湾集集地震中, 输水隧道上浮且产生过大横向变形, 导致破裂损坏^[2]。这些都促使地下结构的震害问题日益受到重视。目前减轻液化威胁的工程措施大体可归为地基处理和结构措施。理论上, 常用的抗液化地基处理措施主要来自以下两类设计思想: (1) 阻止孔隙水压力的产生和发展; (2) 控制液化产生的过大变形。其中常见的基于孔隙水压力消散原理的措施有砂桩、碎石桩、设排水沟渠等; 基于变形控制的措施主要有振密法、强夯法、注浆围封法等^[3]。目前, 基于前一种设计思想的液化处理方法和研究较多: 袁大军等^[4]采用 Byrne 模型, 模拟了南京长江盾构隧道穿越液化地层部分的动力力学响应特征, 分析了地震波对地层孔隙水压力及有效应力的不同影响; 凌贤长等^[5]针对非自由可液化场地地震反应的大型振动台试验建立数值计算模型, 进行可液化场地地基孔隙水压力动力增长数值模拟。而对基于变形控制的处理方法实施效果的研究则相对有限^[6], 亟待进行相关抗震设计方面的研究。鉴于此, 本文结合上海某电厂取排水隧道工程实例, 对该方面问题进行分析和研究。根据隧道地基处于海底以下的现场实际情况, 选择从控制液化过大变形的思路出发, 拟采取注浆围封的抗液化处理措施。为预测及验证工程抗液化措施的效果, 应用数值模拟方法对其进行分析和评估。

随着国内外学者对构筑物抗震分析的研究, 土的动力分析方法不断改进, 主要从总应力法和有效应力法的选择、本构模型的应用、动静应力的耦合这几方面入手研究。与总应力法相比, 有效应力法的优势在于不仅考虑了孔隙水压力变化过程对土体动力特性的影响, 而且可以在饱和土体的动力渗流和动静应力耦合变化的动力反应基础上考虑土体中的应力场、应变场及孔隙水压力场^[7]。目前的本构模型可分为基于等价黏弹性模型的等效线性分析方法和基于弹塑性模型的真非线性分析方法。前者只

刻画了动应力 - 应变关系中的非线性和滞后性, 加卸载时采用相同的模量, 故不能考虑土体在动力荷载作用下的累积变形; 而后者可直接计算残余变形和永久变形, 反映动力过程中土处于压缩、回胀等不同物态的交替变化, 更接近土体动力响应过程的实际情况。另外, 在动静应力的耦合分析中, 太沙基动力固结理论没有考虑多维问题中的变形协调条件对固结过程中总应力的影响及动力反应、动力固结相互影响的情况, 而 Biot 动力固结理论在推导过程中正确考虑了孔隙水压力消散和土骨架变形的相互关系, 更适用于二、三维问题, 使动力固结与动力反应相耦合^[8]。

根据上述比较, 本文采用基于 Biot 动力固结理论、水土耦合的有效应力二维动力分析法, 使用循环弹塑性模型, 通过 LIQCA 有限元程序, 对地震作用下加固前后该隧道地基的位移、加速度、超孔隙水压力等动力反应进行计算分析。该程序已得到国内外众多学者的认可, 并已成功应用于地震液化的项目研究中^[9-11]。有关可液化土体动力耦合分析方法及本构模型的详细介绍, 参见相关研究^[9], 在此不再赘述。

2 工程实例与分析

2.1 计算断面

计算区域选为上海某电厂取排水隧道穿越⑤₂层砂质粉土的典型断面, 经 SPT 液化试验判别该土层具中等液化可能性。图 1 所示为抗液化处理后的有限元计算断面模型, 拟采用高压注浆或深层搅拌桩的注浆围封的液化处理手段, 从平面应变问题的计算角度, 予以适当简化, 等效成厚度为 2.4 m 的水泥土加固体。由于本文主要是从工程设计角度进行数值模拟, 因此在计算中假设加固体均匀, 整体加固效果良好。

2.2 有限元模型

为减少地震作用时人工边界带来的误差, 建模时取足够范围的土层。本算例计算范围在宽度方向取 155 m, 深度方向取到⑦₂层粉细砂。计算采用四节点平面应变单元, 图 2 为平面有限元模型。

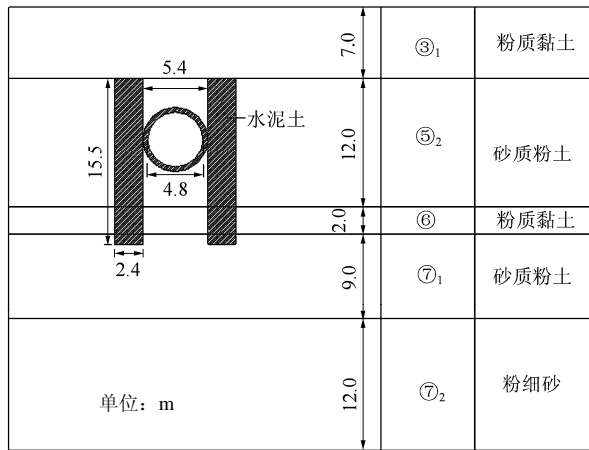


图1 隧道断面模型

Fig.1 Model of tunnel cross-section

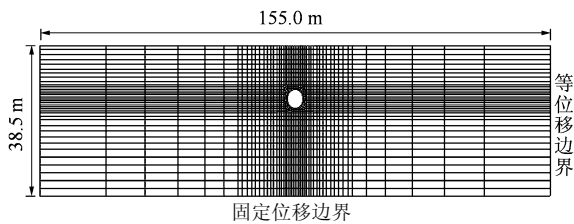


图2 隧道的平面有限元模型

Fig.2 Plane finite element model of tunnel

(1) 边界条件: 模型两侧采用等位移边界, 即

侧向边界的节点位移等于同一深度的自由场位移, 以等效自由场边界条件^[11]。底部施加固定位移边界, 地震波由模型底部输入。

(2) 排水边界: 计算时土层表面与海底接触的单元设为排水边界, 下部的土层设为渗流单元, 底面及侧向的单元为封闭边界。

(3) 接触面: 采用全接触面, 即材料与土体完全耦合的接触方式。

采用时间积分程序 Newmark-β方法, 时间步长为 0.001 s。地震发生之前的初始应力场以 Drucker-Prager 屈服准则为条件, 采用弹塑性模型进行重力作用下的静态分析。

2.3 计算参数

计算中⑤₂层砂质粉土及其上部土层采用循环弹塑性模型, 下部稳定土层则采用 Ramberg-Osgood 模型。根据该工程的土工勘察测试结果, 土层参数如表 1, 2 所示。

衬砌采用线弹性模型, 材料参数按 C30 混凝土进行取值, 见表 3; 注浆水泥土和其余土层则根据本项目勘察结果及工程设计建议值进行取值。

2.4 地震荷载输入

表 1 液化层及其上部土层的计算参数

Table 1 Calculation parameters of liquefiable layer and above soil layers

土层名称	密度 (kg · m ⁻³)	渗透系数 (m · s ⁻¹)	孔隙比	泊松比	压缩参数λ	回弹参 数 k	超固结 比 OCR	初始剪切模 量 G ₀ / σ' _m	变相应 力比 M _m
③ ₁ 层粉质黏土	1 870	2.1×10 ⁻⁷	0.97	0.3	0.263	0.002 5	1.0	700	0.91
⑤ ₂ 层砂质粉土	1 900	1.0×10 ⁻⁵	0.94	0.3	0.035	0.005 0	1.0	826	0.91

土层名称	破坏比 M _f	硬化参数		参考剪应变参数		各向异性发展速度参数 C _d	剪胀参数	
		B ₀	B ₁	γ _{ref} ^P	γ _{ref} ^E		D ₀	n
③ ₁ 层粉质黏土	1.30	1 850	50	0.005	0.010	2 000	0.0	0.0
⑤ ₂ 层砂质粉土	1.25	3 000	70	0.005	0.010	2 000	1.0	10.0

表 2 液化层下部土层的计算参数

Table 2 Calculation parameters of soil layers below liquefiable layer

土层名称	密度 (kg · m ⁻³)	渗透系数 (m · s ⁻¹)	孔隙比	泊松比	剪切模量参数		黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	Ramberg-Osgood 模型参数	
					a	b			α	r
⑥层粉质黏土	2 010	1.7×10 ⁻⁷	0.935	0.350	38 250	0.0	58	13	6	2
⑦ ₁ 层砂质粉土	1 950	9.6×10 ⁻⁶	0.763	0.350	9 304	0.5	10	31	3	2
⑦ ₂ 层粉细砂	1 930	1.2×10 ⁻⁵	0.785	0.435	9 918	0.5	6	36	3	2

表 3 衬砌材料计算参数

Table 3 Calculation parameters of lining materials

材料	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
衬砌	2 500	2.1×10 ⁵	0.17
混凝土	2 000	100	0.30

采用上海人工波, 从土层底部输入, 震动持续时间 35 s, 峰值加速度为 0.5 m/s², 其加速度时程曲线如图 3 所示。

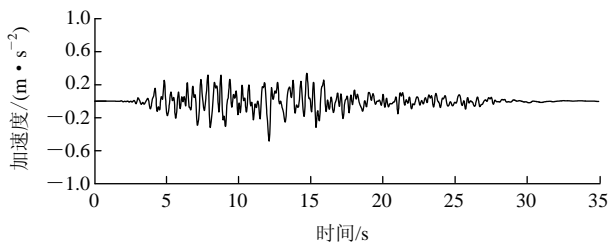


图 3 输入的地震波
Fig.3 Input seismic wave

图 4, 5 分别是模拟得到的液化层土体单元的偏应力比 - 剪应变及偏应力比 - 平均有效应力比关系曲线, 图 6 则是其循环应力比模拟结果和试验结果的对比, 二者具有良好的一致性, 较好地反映了该土层的液化特性, 同时也证明了有关液化土体计算所用本构参数比较合理。

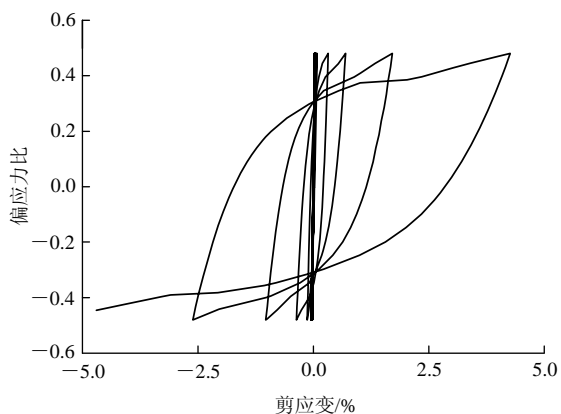


图 4 液化层土体单元偏应力比 - 剪应变关系
Fig.4 Deviatoric stress ratio-shear strain relation of soil elements in liquefiable layer

2.5 有限元结果分析

选取包含隧道结构在内的部分有限元模型, 对具代表性的节点与单元进行分析, 如图 7 所示。

(1) 位移反应

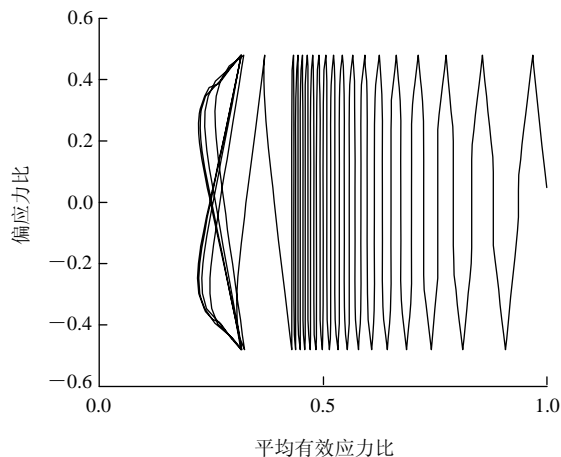


图 5 液化层土体单元偏应力比 - 平均有效应力比关系
Fig.5 Deviatoric stress ratio-average effective stress ratio relation of soil elements in liquefiable layer

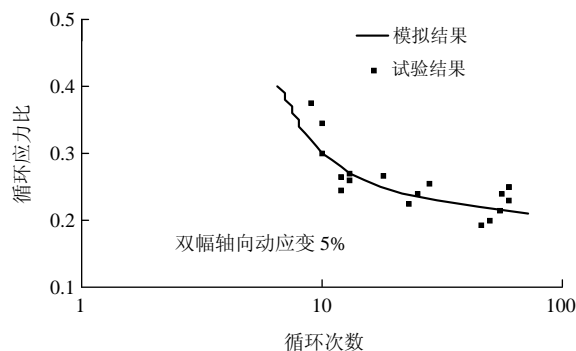


图 6 液化层土体单元循环应力比模拟结果与试验结果对比
Fig.6 Comparison between simulated and testing results of cyclic stress ratio of soil elements in liquefiable layer

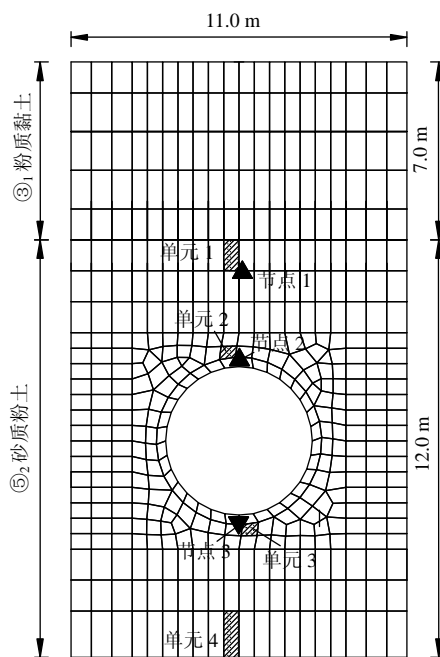


图 7 代表性节点及单元分布
Fig.7 Distribution of typical nodal points and elements

计算结果表明：在抗液化处理前，地震作用下的隧道结构暴露在液化层中，直接受液化土层挤压发生过大变形。在水平位移方面，液化土体存在向自由场方向的流动趋势，即液化破坏现象中所谓的“侧向扩展现象”。隧道两侧的衬砌受土体流动挤压发生变形，相对于地震前的总体位移约为 12 cm。竖向位移方面，由于隧道上部土层的液化程度大于隧道下部的土层，以及初始应力场的不同，导致隧道上部土体产生的竖向位移远大于隧道下部，总位移达 17 cm 之多，即液化破坏现象中所谓的“埋置结构的上浮现象”，如图 8(a)所示。

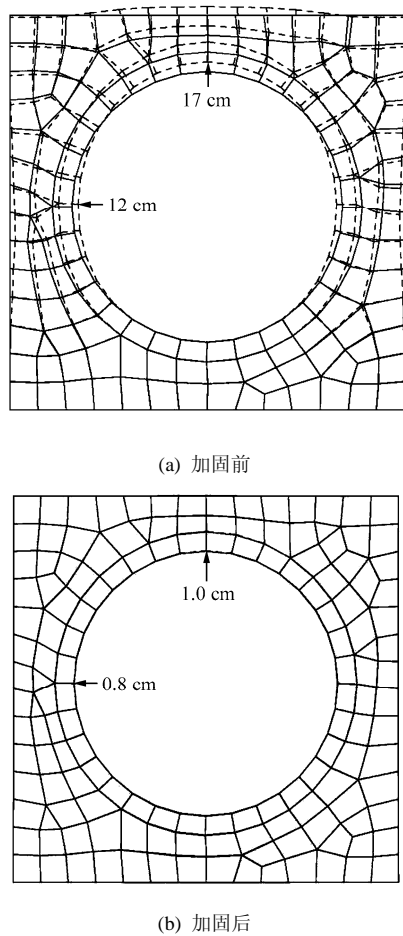


图 8 抗液化处理前后的隧道变形

Fig.8 Tunnel deformations before and after anti- liquefaction reinforcement

在液化处理之后，水平位移和竖向位移分别减少到 0.8 和 1.0 cm，有效控制了液化产生的过大变形，如图 8(b)所示。

通过图 9 所示抗液化处理前后的位移时程曲线对比可以看出，由于水泥土结合体本身不会发生液化，隧道周围土体加固之后，对隧道位移有明显的抑制作用，比较有效地控制了变形。

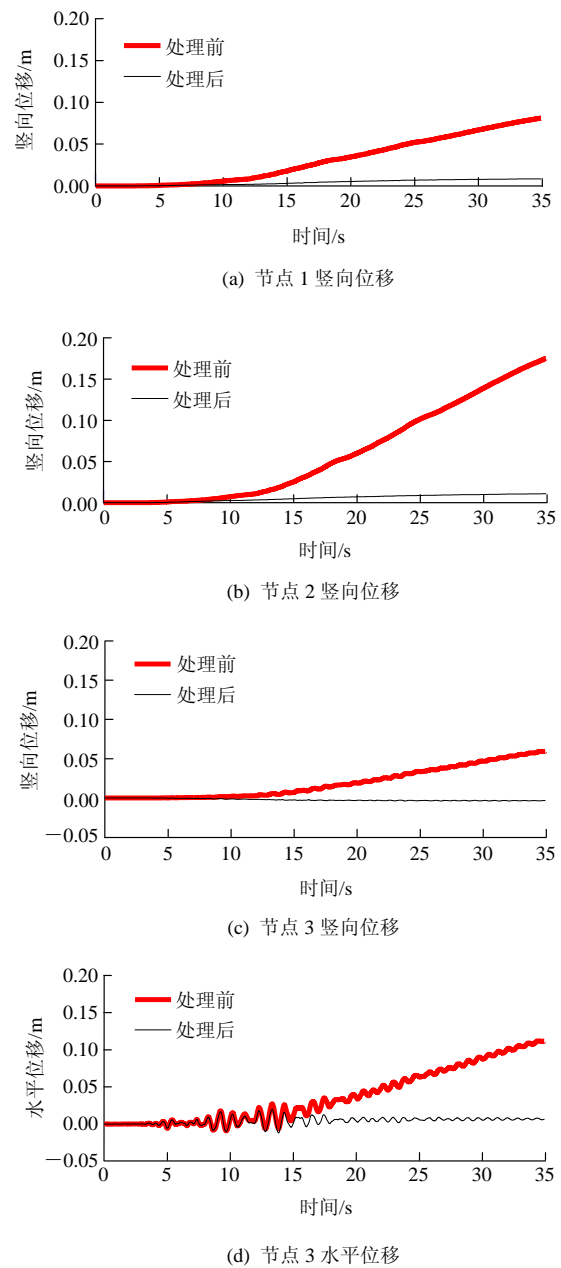


图 9 代表性节点的位移时程曲线

Fig.9 Time-history curves of displacements of typical nodal points

(2) 加速度反应

代表性节点加速度计算结果如图 10 所示。尽管加固措施对地基刚度的增加有所帮助，但几个输出点产生较大的超孔隙水压力导致土体刚度退化，并且地基接近或达到液化时其阻尼会明显增大，都会抑制加速度峰值的增大。鉴于此，图 10 中几个代表性节点的加速度峰值加固前后变化不大。与输入地震波相比，节点加速度的高频成份减少，低频成份有所放大，反映了液化地基的选择性滤波作用。

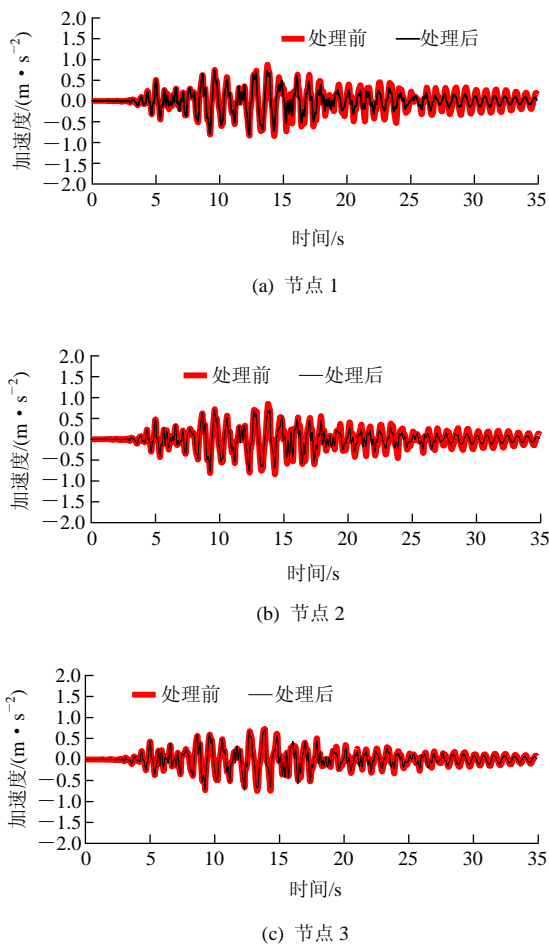


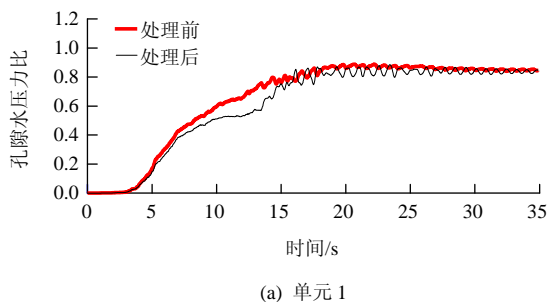
图 10 代表性节点的加速度时程曲线

Fig.10 Time-history curves of accelerations of typical nodal points

(3) 超孔隙水压力反应

当孔隙水压力比越趋近 1.00 时, 代表性单元所在土层就越接近于液化状态, 其超孔隙水压力反应如图 11 所示。抗液化处理前, 4 个代表性单元的孔隙水压力比峰值分别为 0.88, 0.80, 0.64, 0.52, 基本处于中等~完全液化状态。

值得注意的是, 抗液化处理后相应的 4 个单元的孔隙水压力比峰值变为 0.87, 0.97, 0.85, 0.79, 由超孔隙水压力过大产生的液化趋势没有得到缓解, 并有少许加剧, 但由于水泥土的置换作用, 液



(a) 单元 1

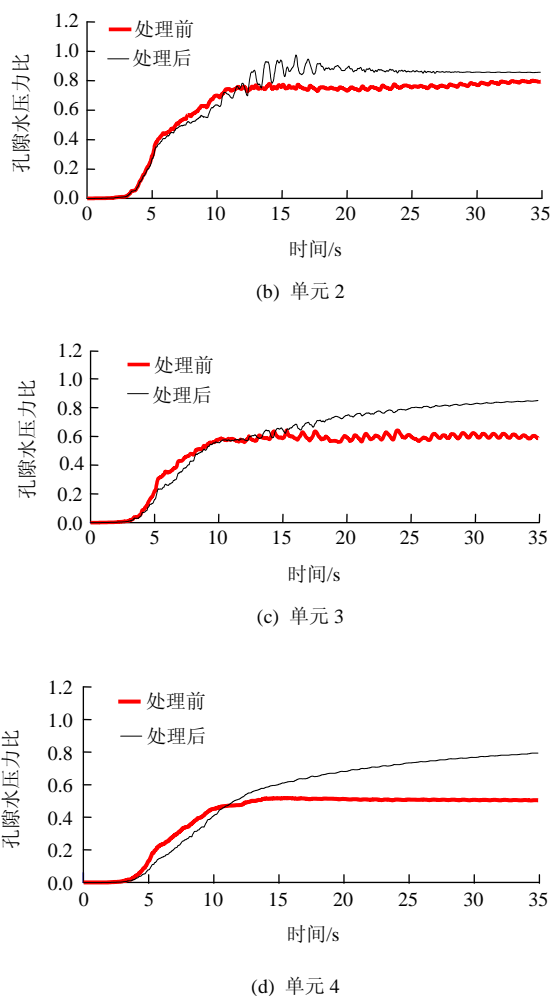


图 11 超孔隙水压力比时程曲线

Fig.11 Time-history curves of excess pore water pressure ratios

化位移仍得到较有效的控制。这一结果与上文提及的不是从阻止液化产生的角度, 而是从控制由液化产生的过大变形的液化防治角度出发是相符合的^[3]。

3 结 论

目前理论上主要有两种液化防治思路: 一种是阻止超孔隙水压力的产生与发展; 另一种是控制液化产生的过大变形。本文从后一思路出发, 基于 Biot 两相饱和和多孔介质动力耦合固结理论, 采用循环弹塑性本构模型, 建立了一种可以模拟隧道地基地震液化的数值模拟方法。应用这种方法, 对上海某电厂取排水隧道的地震液化问题进行了平面应变有效应力有限元分析, 模拟了隧道地基在地震作用下的位移、超孔隙水压力、加速度等动力反应情况。

对比地基抗液化处理前后的地震动力反应, 结

果表明:

(1) 根据地基土层处于地下水位以下的实际情况, 选择注浆围封的抗液化处理方法。该法较好地减小了隧道的变形, 而不是从抑制液化产生和发展的角度出发去降低隧道周围的超孔隙水压力, 验证了控制液化过大变形的液化防治机制。

(2) 本文中的工程有限元数值模拟验证了现场、室内试验液化判别的结果, 同时模拟出拟建工程在实际地震作用下可能的液化区域及其可能造成的破坏。计算结果与已有的震害经验基本相符, 为抗震设计提供了良好的参照和依据。

应该指出, 地基抗液化处理前后的隧道地震动力反应分析是理论性和实践性都很强的课题。尽管本文建立了基本的分析框架, 计算结果与已有的震害经验基本相符, 但今后仍应该继续开展这方面的研究, 在大量现场宏观震害调查和模型试验的基础上不断加以完善, 深入认识隧道地基的地震液化变形控制问题。

参考文献(References):

- [1] WANG W L, WANG T T, SU J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2001, 16(3): 133 - 150.
- [2] KUNITA M, TAKEMATA R, IAI Y. Restoration of a tunnel damaged by earthquake[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1994, 9(4): 439 - 448.
- [3] 黄绍铭, 高大钊. 软土地基与地下工程[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.(HUANG Shaoming, GAO Dazhao. *Foundation and underground engineering in soft ground*[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.(in Chinese))
- [4] 袁大军, 黄清飞, 王梦恕, 等. 水底液化地层大型盾构隧道地震响应分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增2): 3 609 - 3 615. (YUAN Dajun, HUANG Qingfei, WANG Mengshu, et al. Study on seismic response of large shield tunnel in submarine liquefiable strata[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.2): 3 609 - 3 615.(in Chinese))
- [5] 凌贤长, 唐亮, 于恩庆. 可液化场地地震振动孔隙水压力增长研究的大型振动台试验及其数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增2): 3 998 - 4 003.(LING Xianzhang, TANG Liang, YU Enqing. Large-scale shaking table test and its numerical simulation of research on build-up behaviour of seismically-induced pore water pressure in liquefiable site[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.2): 3 998 - 4 003.(in Chinese))
- [6] ZHENG J, SUZUKI K, OHBO N, et al. Evaluation of sheet pile ring countermeasure against liquefaction for oil tank site[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1996, 15(6): 369 - 379.
- [7] 李宏儒. 土体动力反应分析方法的分析与改进[硕士学位论文][D]. 西安: 西安理工大学, 2005.(LI Hongru. *Analyses and improvement of the methods for soil dynamic response analyses*[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.(in Chinese))
- [8] 周健, 白冰, 徐建平. 土动力学理论与计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.(ZHOU Jian, BAI Bing, XU Jianping. *Theory and calculation of soil dynamics*[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))
- [9] 黄雨, 八嶋厚, 张锋. 液化场地桩-土-结构动力相互作用的有限元分析[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(6): 646 - 651.(HUANG Yu, YASHIMA A, ZHANG Feng. Finite element analysis of pile-soil-structure dynamic interaction in liquefiable site[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(6): 646 - 651.(in Chinese))
- [10] 黄雨, 八嶋厚, 沢田和秀, 等. 堤防地基地震液化的数值模拟[J]. *工程力学*, 2007, 24(12): 82 - 87.(HUANG Yu, YASHIMA A, SAWADA K, et al. Numerical modeling of earthquake liquefaction in earth embankment foundations[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(12): 82 - 87.(in Chinese))
- [11] HUANG Y, YASHIMA A, SAWADA K, et al. Numerical assessment of the seismic response of an earth embankment on liquefiable soils[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2008, 67(1): 31 - 39.

本刊 2009 年第 5 和第 6 期 EI COMPENDEX 收录 100%情况通报

“EI 中国”公布的数据显示, 本刊 2009 年第 28 卷第 5 期共发表论文 25 篇, 其中 EI COMPENDEX 收录论文 25 篇; 第 6 期共发表论文 26 篇, 其中 EI COMPENDEX 收录论文 26 篇, 收录率均为 100%。

本刊编辑部

2009 年 7 月 10 日