

饱和地基中地下结构地震反应若干问题研究^①

李 鹏¹, 刘光磊², 宋二祥¹

(1.清华大学土木工程系, 北京 100084; 2.北京中岩大地工程技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 简要综述笔者所在课题组近十年在饱和地基中地下结构抗震研究方面的主要成果, 包括: (1) 饱和两相介质中波动方程及波动特性的探究; (2) 动力有限元计算的传输边界研发; (3) 饱和地基中地下结构地震反应离心机模型试验研究; (4) 饱和地基中地下结构地震响应的有限元分析; (5) 饱和砂土地基中地下结构上浮机理研究等。这些成果以较为深入地研究饱和两相介质波动理论为基础, 通过模型试验、数值仿真、机理探究等方法认知饱和地基中地下结构地震反应机理, 对于完善饱和地基中地下结构抗震设计方法及提高抗震安全措施等均具有参考价值。

关键词: 饱和地基; 抗震分析; 传输边界; 地下结构; 离心机振动台试验

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0843-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0843

Research on Seismic Response of Underground Structures in Saturated Foundation

LI Peng¹, LIU Guang-lei², SONG Er-xiang¹

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Zhongyan-Geotech. Engineering Technology Co. Ltd, Beijing 100041, China)

Abstract: The main achievements of 10 years of research on the seismic response of underground structures in a saturated foundation are presented in this paper. Systematic clarification and investigation are conducted on the dynamic basic formulations and wave propagation characteristics of saturated soils. In the dynamic analysis of saturated soils, the interaction between the soil skeleton and pore water consists of two parts: seepage force and inertial coupling force. It is also revealed that due to the existence of the inertial coupling force, the speeds of two dilatational waves are not equal to those in single-phased solid skeleton and pore water even if the permeability approaches infinity. Moreover, several transmitting boundaries for dynamic analysis of saturated porous media are developed, including the viscous-spring transmitting boundaries derived from both the u - p formulation and u - U formulation in addition to the high-order time-domain transmitting boundary derived from the cylindrical elastic wave radiation problem based on the u - p formulation. Despite the zero permeability assumption made in the derivation of the undrained boundary, results show that it can provide sufficiently accurate results for earthquake engineering problems. The drained boundary performs well for all permeabilities. In addition, four dynamic centrifuge tests at 1:50

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 清华大学自主科研计划项目(20121087977); 国家自然科学基金重点项目(51038007); 博士后科学基金项目(2014M560978)

作者简介: 李鹏(1985-), 男, 助理研究员, 主要从事饱和土动力学、地下结构地震反应及抗震减震等方面的研究。E-mail: lipeng_2013@tsinghua.org.cn

通讯作者: 宋二祥(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事深基坑支护设计分析方法、地基基础及地下结构静、动力分析以及块碎石填方土工后变形机理等方面的研究。E-mail: songex@tsinghua.edu.cn

scale are performed to study the earthquake response of a subway tunnel in liquefiable soils. The response characteristics of the subway tunnel in horizontal or oblique liquefiable soils including floatation, lateral displacement of the tunnel, and internal force increments in tunnel segments due to earthquake-induced liquefaction are investigated in addition to the effectiveness of cut-off walls in resisting tunnel floatation. Further, finite element simulation is conducted to analyze the earthquake response of underground structures in saturated soils. We adopt the finite element program DIANA SWANDYNE II, which is a two dimensional (2D), effective stress-based program compiled from the fully coupled $u-p$ formulation. The liquefiable sandy soil is modeled by using the generalized plasticity constitutive model Pastor-Zienkiewicz III, which is capable of simulating cyclic liquefaction, contraction of loose sand, and dilatation of dense sand. The contact characteristics between soil and the structure are also considered. Finally, the mechanism of underground structure floatation in liquefiable soils during earthquakes is studied. Due to the smaller apparent density of the tunnel structure compared with the saturated liquefiable sand, the soils at both sides beneath the tunnel structure tend to intrude into the space underneath the tunnel structure, leading to the structure floatation. The mechanisms of various remedial treatment methods for liquefiable soils such as increasing the tunnel buried depth, retrofitting the soil under the tunnel structure, and setting cut-off walls are studied by finite element simulation. The effectiveness of these methods is evaluated, and references for parameter design are proposed. These new achievements, which allow insight into the mechanism of the seismic response of underground structures in saturated foundations, are obtained from theoretical research on the wave propagation characteristics and are based on model tests, numerical simulations, and mechanism analysis. The study outcome will be beneficial for further research on the improvement of seismic design methods and seismic safety measures for underground structures in saturated foundations.

Key words: saturated foundation; seismic analysis; transmitting boundary; underground structure; dynamic centrifuge test

0 引言

我国是地震活动多发国家,随着地下结构在我国经济建设领域得到越来越广泛的应用,地下结构抗震已逐步成为抗震工程界的热点问题。对于饱和砂土地基,一旦地震过程中出现明显的软化甚至液化现象,其地下结构的破坏往往比其他地层更为严重^[1-3]。以有限元法为代表的数值计算技术的应用,极大地促进了土动力学领域的研究进展。通过数值计算这一工具,人们逐渐认识到只有将饱和土视为两相介质,充分考虑土骨架和孔隙水之间的相互作用,才能得到与实际地震反应相一致的数值模拟结果,解释诸如由于地震等循环加载引起的软化和液化等现象。饱和地基中的地下结构,其地震反应规律与在单相土地基中有较大差异。因而采用饱和两相介质理论研究地基土—地下结构动力相互作用具有重要意义。

本文简要介绍笔者所在课题组近十年来围绕饱和地基中地下结构地震反应开展的工作,主要成果

包括:(1)以饱和两相介质波动理论研究为基础,探究了波动特性及其物理本质,研发了用于模拟半无限饱和地基波动辐射分析的传输边界;(2)针对可液化地基中地铁隧道结构的地震反应,设计并完成了4项1:50比尺的离心机振动台模型试验;(3)应用考虑饱和两相介质动力固结的二维有限元程序对饱和地基中地下结构地震反应进行了数值模拟研究;(4)通过数值模拟和模型试验研究了可液化地基中地下结构的上浮机理,以及不同地基处理方法的作用效果及机理。这些成果注重从工程实际出发,是通过较为系统的理论研究、模型试验研究以及数值模拟研究基础上获得的认知,以期对深入认识饱和地基中地下结构地震反应特点,指导地基处理方法等工程实践能有所裨益。

1 饱和两相介质波动方程及波动特性的探讨

Biot^[4]最早提出了饱和两相介质运动控制方程,并成功预言了饱和两相介质中存在两类压缩波

和一类剪切波。继 Biot 之后,国内外不少学者^[5-7]对饱和两相介质的波动方程进行研究。但深入研究不难发现,对于在渗透系数无穷大这一极端情况下,两类压缩波是否等于干土骨架和纯水中的波速这一问题,不同学者给出了相互矛盾的结论。笔者通过深入分析饱和两相介质波动控制方程,提出惯性耦合力的概念^[8],对这一问题加以澄清。

1.1 波动方程及惯性耦合力

目前对饱和土动力问题进行分析时,多采用 Zienkiewicz 在 Biot 理论的基础上给出的 $u-\omega-p$ 形式的基本控制方程。土水混合物整体和流体部分的平衡方程、土骨架的本构关系及有效应力原理、渗流连续性条件共同构成基本控制方程的描述^[7]。

值得注意的是,土骨架和孔隙水之间的相互作用,既包括黏性的相互作用,又包括惯性的相互作用。后者经常被一些学者忽视^[6],从而得出渗透系数无穷大情况下,饱和土中两类压缩波波速分别等于各自单相体中的波速这一错误结论。

实际上,在进行土水微元体受力分析时,假定孔隙水以加速度 $\ddot{W}$ 沿 x 轴正向做加速运动,在以孔隙水为参考的非惯性系中,给孔隙水施加与加速度方向相反的惯性力(体积力),孔隙水仍保持平衡。这就仿佛在 x 的反方向施加了一个重力加速度为 $\ddot{W}$ 的重力场,孔隙水对所包围的土颗粒将产生沿 x 正向的“浮力”(压差力),这一相互作用力称为惯性耦合力^[8]。当考虑固体颗粒的可压缩性时,惯性耦合力可以在一维问题中取单位体积微元体中的土骨架为研究对象来分析,如图 1 所示:

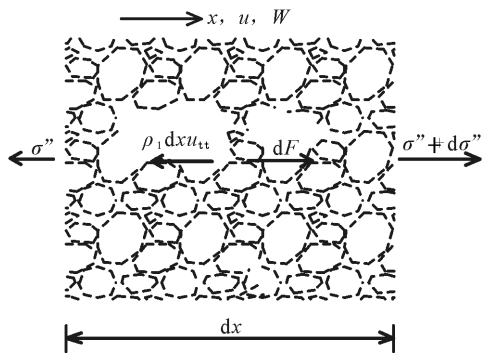


图 1 惯性耦合力计算示意图

Fig.1 Sketch for calculation of inertial-coupling force

惯性耦合力的表达式为 $dF = (a - n)\rho_i \ddot{W} dx$, 它是一种体积力,由于它的存在,使得在饱和土中即使渗透系数无穷大,水在孔隙中可以自由渗流,在振动过程中土骨架和孔隙水也存在耦合作用,各自的

振动相互约束,不可能以在单相体中振动传播的波速来发生波动。

1.2 波动特性

饱和土中土骨架和孔隙水两相之间存在着惯性、黏性的耦合。渗透系数为零时黏性耦合效应最明显,孔隙水的运动完全由土骨架限制,饱和两相介质表现的犹如单相体,此时仅存在一类压缩波和一类剪切波;渗透系数为无穷大时黏性耦合消失,而惯性耦合使得两类压缩波的波速并不等于各自单相介质的波速,其中快 P 波对应于土骨架和孔隙水同向振动,慢 P 波对应于反向振动。上述两种极端情况下,波速仅由土性参数决定,与频率无关。当渗透系数取为有限值时,黏性耦合使得波的传播具有弥散性。波速受频率和渗透系数的影响可以用一无量纲频率 f/f_c 来反映。无量纲频率可分为三个频段:低频段、过渡段和高频段。当无量纲频率处于低频段时,P2 波很快衰减,P1 波和 S 波波速与渗透系数取零时的结果几乎相同;当渗透系数处于高频段时,P1 波、P2 波和 S 波均几乎不衰减,波速几乎等于渗透系数为无穷大时的波速;当无量纲频率处于过渡段时,三类体波波速连续变化,由低频段到高频段过渡的频率区域很窄。

对于岩土工程中遇到的饱和土,其渗透系数最大量级为 10^{-3} m/s,地震工程频率通常在 25 Hz 以内,可得无量纲频率基本处于低频段,相应的波动特性也与渗透系数为零时的情况类似。

1.3 $u-p$ 方程的适用性

Zienkiewicz^[7]最先给出了 $u-p$ 格式的饱和两相介质动力方程,并指出其适用于低频和中频段问题。笔者通过对比由 $u-p$ 方程和 $u-w$ 方程推得的两相介质体波波速,发现两者在低频段和中频段的结果一致,从而论证了 $u-p$ 方程适用于包括地震工程在内的中低频问题。

2 饱和两相介质动力有限元分析的传输边界

近年来,针对有限元模拟无限饱和两相介质的动力分析的传输边界研发已有所开展,主要包括旁轴边界、黏性边界和黏弹性边界。各类边界的推导中均采用了两相体线弹性波动理论,由于一般渗透系数情况下饱和土中的波动具有频散性,只有在渗透系数极端情况下推得的零阶旁轴边界、黏性边界和黏弹性边界才是时间上的局部边界。

2.1 黏弹性传输边界

黏弹性边界可以模拟波扩散过程中的几何衰

减,避免了低频稳定性问题。笔者所在课题组分别针对柱坐标形式的 $u-p$ 方程以及 $u-U$ 方程,假定渗透系数为 0,推导了适用于饱和两相介质动力计算的“不透水”黏弹性传输边界^[9-10]。该套边界忽略了 P2 波的影响,算例研究验证其对于包含地震工程在内的中低频问题精度良好。针对柱坐标形式的 $u-U$ 方程,假定渗透系数为无穷大,笔者推导了“透水”的黏弹性边界,与王子辉、赵成刚推导的黏弹性边界^[11]相比,不再忽略 P2 波的影响,算例研究表明,在任何渗透系数情况下该边界均具有良好精度,是一种普适的饱和地基动力传输边界。

2.2 高阶传输边界

笔者首次将单相介质动力问题的高阶人工边界构建思想引入到饱和两相介质中^[12]。根据柱面波形式的 $u-p$ 方程,假定渗透系数为 0,将动力刚度系数采用有理函数近似的形式拟合,运用有理近似的连分式展开技术,在时域内等价为高阶弹簧-阻尼-质量模型。将推导得出的高阶传输边界编程植入基于 $u-p$ 方程的动力有限元程序 DIANA SWAN-DYNE II,实现了施加高阶传输边界后有限域动力问题的无条件稳定的时域求解技术。

柱面波波动问题的算例结果表明,只要渗透系数的量级满足 $u-p$ 方程适用条件,该高阶传输边界均能给出足够精确的结果。将其直接运用于一般二维平面应变内源波动问题时只要将传输边界布置在离散射波源稍远的位置,所得结果仍可满足工程问题的精度要求。

2.3 传输边界的适用性

由于 $u-p$ 方程在岩土地震工程中广泛适用,采用 $u-p$ 方程建立的黏弹性边界可以很好地满足工程精度要求。高阶边界针对柱面波动辐射问题具有高精度,直接运用于一般二维问题时精度与黏弹性边界相当。由于传输边界的推导采用了弹性波动方程,当土体软化严重甚至出现液化时,由于参数确定的困难而不便应用,此时选用捆绑边界^[13]则更为合适。

3 饱和地基中地铁隧道离心机振动台模型试验研究

3.1 试验设计

笔者所在课题组共进行了 4 项离心机振动台试验^[14]。试验一是水平砂层自由场反应振动试验。试验二研究地铁隧道结构在地震作用下的反应情况。试验三针对设置截断墙减小隧道上浮的处理方

法进行了振动试验。试验四研究了地铁隧道模型在倾斜砂土地层中的地震反应情况。

采用清华大学岩土工程研究所的 TH-50g-tons 土工离心机设备,试验均在 50 g 离心加速度下进行。采用叠环式模型箱模拟自由场的反应。选取中细砂及黏土制备地基模型,地基模型总厚度为 28 cm,其中最下层 3 cm 为黏土,以上为砂土。隧道模型截面尺寸 10 cm×10 cm,埋深 4 cm。采用有机玻璃制作的隧道模型以及隧道端头的特殊处理方法可合理模拟结构的刚度。饱和过程在真空下进行,孔隙流体为 1.59%的羟丙基甲基纤维素水溶液,黏度为水的 50 倍,可有效解决动力时间与渗流时间在相似比关系上的矛盾。模型箱示意如图 2 所示。

各组试验中测量了水平及竖向位移、地基内加速度反应、超静孔压、土压力增量以及结构应变。所记录数据既包括振动期间的反应,也包括地震后地基固结期间的结果。

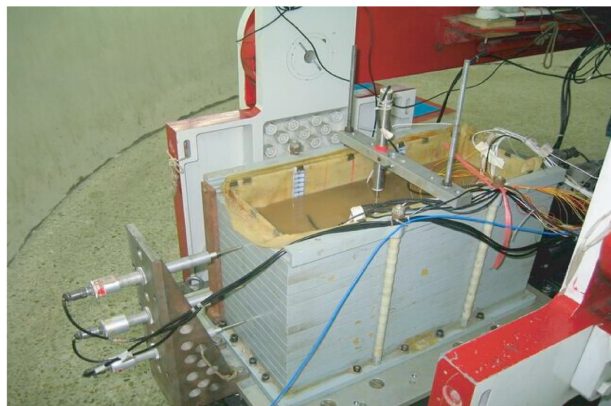


图 2 安装在振动台上的模型箱

Fig.2 Sketch of the model box on shaking table

3.2 试验主要结论

试验结论:(1)饱和松砂地层在地震作用下会出现地基的液化,并由浅向深发展。一段时间后超静孔压逐渐消散,下层消散较快,随着时间的推移各深度处超静孔压逐渐趋于一致,大体同步消散,最终基本恢复到振动发生前的大小;(2)饱和地基中地震引起的隧道壁截面内的附加应变可视为土水压力平缓增长引起的附加应变与地震过程中的附加振动应变的叠加;(3)地震液化条件下,隧道下两侧土体有向隧道下方流动的趋势,从而引起结构发生明显上浮,设置截断墙的处理方法可限制这种趋势,减小结构的上浮量;(4)位于倾斜地层中的隧道结构,当砂土地震液化时不仅会出现上浮,还会随周围砂土发生明显的侧移。

4 饱和地基中地下结构地震响应的有限元分析

4.1 有限元模型

地基土分层情况对比模型试验进行设置。地震前生成自重应力的过程中,砂土和黏土均采用模量与围压相关的弹性本构模型 General Power Elastic-One^[13],该本构考虑了土体模量的围压相关性。振动过程中砂土采用 Pastor-Zienkiewicz III^[13]模型进行模拟,该本构模型可模拟不同砂土的特性,较好地模拟砂土应力-应变关系的非线性滞回特性,密砂的剪胀和松砂的剪缩以及饱和松砂的液化等现象。黏土近似采用线弹性模型。采用一种有厚度的 8 结点薄层单元模拟土体与隧道结构的接触面。接触面的本构关系应用摩尔-库仑模型。除材料本构自身体现的阻尼外,还加入了阻尼比为 5% 的刚度相关的黏性阻尼作为补偿。在土体不出现液化的情况下(中密砂和密砂),计算区域的侧边采用黏弹性传输边界;当土体液化时(松砂),由于黏弹性边界参数确定的困难,改用捆绑边界替代。

4.2 饱和地基中地下结构地震反应特性

超静孔压增长、土体软化是引起结构地震反应特性变化的主要原因。饱和地基中结构总内力可视为 3 部分的叠加^[15]: (1) 初始静载作用下的内力; (2) 土水压力平缓增长所引起的附加内力; (3) 地震过程中的附加振动内力,如图 3 所示。

当土体较软时,土层变形一般较大,当其刚度仍以约束结构随之一同变形时,引起的结构内力最大。土相对较硬时,结构主要发生水平剪切变形;土体相对结构较柔时,结构将发生明显的刚体转动。对于稍复杂的地铁区间隧道结构,地震引起的柱中弯矩和剪力占总弯矩和剪力中的比例很大,下侧墙与底板的交角处弯矩和剪力均为全结构最大。土体接近液化时结构断面内的内力反而会减小,但由于

可能出现明显的上浮,对结构来说可能更危险。

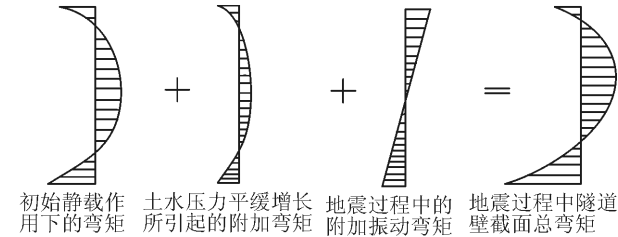


图 3 隧道侧壁弯矩分析

Fig.3 Bending moment analysis on the side walls of tunnel

5 饱和砂土地基中地下结构上浮机理

5.1 上浮机理

地下结构的液化上浮有两个条件: (1) 结构位于可液化地层中,且其下部有一定厚度的可液化土层。 (2) 地震作用较强,地基出现了较明显的液化。模型试验和有限元分析都表明,隧道结构的上浮并不只发生在地震期间,在地震结束后还会持续增长一段时间才达到稳定。

当地基完全液化时,饱和地基近似于一种密度比水大的混合液体,由于隧道结构的表观密度较小,在浮力作用下便会出现上浮。当地基土不完全液化时,上浮原理可用图 4 来解释。

设隧道底面所在深度为基准平面,隧道对其下部土层作用的竖向荷载为隧道及其上覆土层的自重,隧道两侧土体对其下部土层作用的竖向荷载为土体自重。由于隧道的表观密度较小,隧道对其下方土体施加的竖向荷载较两侧要小。地震作用下超静孔压上升,土体有效应力降低,承载能力下降,基准平面下隧道两侧土体在其上较大荷载作用下,受挤压流向隧道下方推动隧道下方土体向上隆起,从而带动隧道向上移动。如隧道两侧土体也发生液化,失去抗剪能力,两侧土体限制隧道向上运动的能力也随之丧失,上浮现象将更为明显。

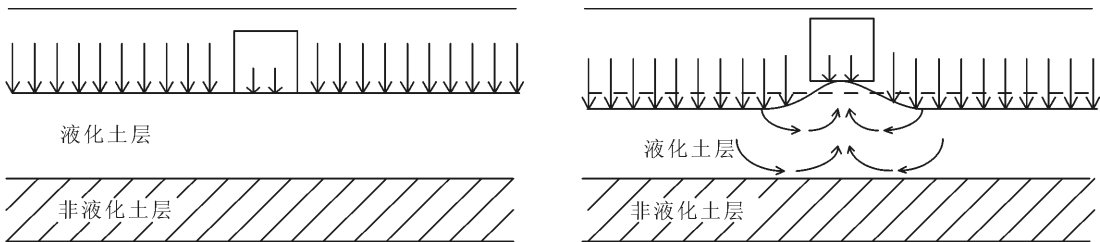


图 4 可液化地层中隧道上浮原理示意

Fig.4 Sketch of the mechanism of tunnel uplift in liquefiable layer

5.2 地基处理方法及效果

笔者针对目前工程中应用较多的避免结构上浮破坏的方法(加固隧道下方土体、隧道内二次注浆和设置截断墙)进行了有限元计算讨论,分析各自的处理效果及作用机理。

加固隧道下方土体可抵抗两侧土体的挤压。明显的挤入是从下方未加固土体处开始出现的,且其幅值随深度增加明显减小,因而加固隧道下方土体,与增大结构埋深的效果相似。对于液化层较厚的情况,因其处理范围有限,效果可能无法满足要求。对于暗挖隧道,隧道内二次注浆是一种较为经济的方法,

但其处理范围有限,当结构周围土体液化严重或液化层较厚时应考虑采用其他处理措施。设置截断墙是遇到较厚液化层时一种比较适合的处理方法。该法通过限制隧道下两侧土体向隧道下方的挤入从而减轻结构上浮,如图 5 所示。根据其作用机理,要求截断墙具有足够的刚度来承受两侧向中间的挤压力,不产生过大的变形,同时将截断墙尽可能靠近地下结构,如受到条件限制,可考虑在设置截断墙的同时对隧道侧面土体进行加固,搭接长度 L 和嵌入深度 d 应使得截断墙的上下两端受到稳定的支撑。

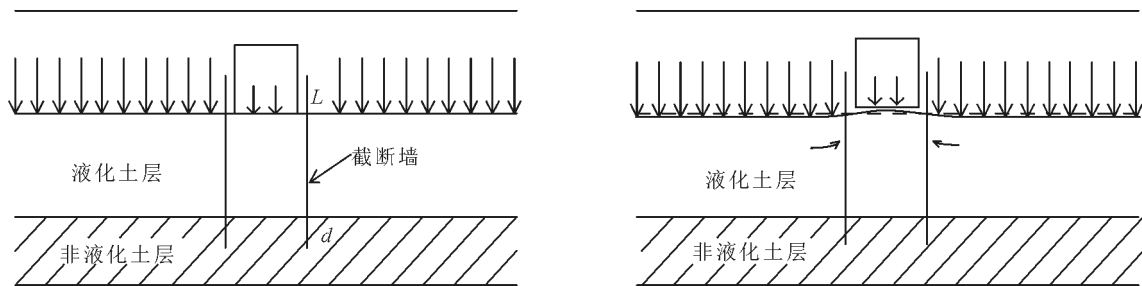


图 5 设置截断墙对减轻隧道上浮作用示意

Fig.5 Mechanism of the reduction of tunnel uplift with cut-off walls

6 结论

在设计具有良好抗震性能的地下结构,满足抗震减灾的实际需求的背景下,地下结构抗震问题已成为当今研究的热点。因饱和土复杂的波动及振动特性,使得饱和地基中的地下结构抗震问题成为抗震工程研究的难点。本文简要总结并概括了笔者所在课题组近十年在此领域的探索及获得的初步成果,包括:深入分析饱和两相介质波动方程,探究其波动的物理本质;系统研发了应用于饱和两相介质动力计算的传输边界,并通过比较,选用了便于实际工程计算且精度良好的传输边界形式;开展 4 组离心机振动台模型试验进行饱和地基中地下结构地震反应特性的试验研究;利用有限元方法分析饱和地基中地下结构地震反应规律,探究了可液化地基中地下结构地震导致上浮的机理,并分析了不同地基处理方法的效果及其作用原理。本文研究成果以期对指导实际饱和地基中地下结构工程抗震设计,并对可液化地基中提高结构安全性的处理措施提供建议及参考。

参考文献 (References)

[1] Hwang J H, Yang C W, Chen C H. Investigations on Soil Liq-

uefaction During the Chi-Chi Earthquake[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(6): 107-123.

[2] Elnashai AS. Analysis of the Damage Potential of the Kocaeli (Turkey) Earthquake of 17 August 1999 [J]. Engineering Structures, 2000, 22(7): 746-754.

[3] Samata S, Ohuchi H, Matsuda T. A Study of the Damage of Subway Structures During the 1995 Hanshin-Awaji Earthquake[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(3): 223-239.

[4] Biot MA. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid Saturated Porous Solid; I. Low-frequency Range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168-178.

[5] 门福录. 波在饱和流体的孔隙介质中的传播问题[J]. 地球物理学报, 1981, 24(1): 65-75.

Men F L. Problems of Wave Propagation in Porous Fluid-saturated Media[J]. Acta Geophysica Sinica, 1981, 24(1): 65-75. (in Chinese)

[6] 吴世明. 土介质中的波[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

WU Shi-ming. Waves in Soil Medium [M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)

[7] Zienkiewicz O C, Shiomi T. Dynamic Behavior of Saturated Porous Media; The Generalized Biot Formulation and Its Numerical Solution[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(1): 71-96.

[8] 李鹏, 宋二祥. 渗透系数极端情况下饱和土中压缩波波速及其物理本质[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1979-1985.

Li P, Song EX. Compressional Wave Velocity and Its Physical

Nature in Saturated Soils with Extreme Permeability Values [J].Rock and Soil Mechanics,2012,33(7):1979-1985.(in Chinese)

[9] 刘光磊,宋二祥.饱和无限地基数值模拟的粘弹性传输边界[J].岩土工程学报,2006,28(12):2128-2133.
Liu G L, Song E X. Visco-elastic Transmitting Boundary for Numerical Analysis of Infinite Saturated Soil Foundation[J]. Chinese journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2128-2133.(in Chinese)

[10] Li P, Song E X. A Viscous-spring Transmitting Boundary for Cylindrical Wave Propagation in Saturated Poroelastic Media [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 65: 269-283.

[11] 王子辉,赵成刚,董亮.流体饱和多孔介质黏弹性动力人工边界[J].力学学报,2006,38(5):605-611.
Wang Z H, Zhao C G, Dong L. A Viscous-spring Dynamical Artificial Boundary for Saturated Porous Media[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(5): 605-611.(in Chinese)

[12] Li P, Song E X. A High-order Time-domain Transmitting Boundary for Cylindrical Wave Propagation Problems in Unbounded Saturated Poroelastic Media[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 48: 48-62.

[13] Zienkiewicz OC, Chan AHC, Pastor M, et al. Computational Geomechanics with Special Reference to Earthquake Engineering[J]. New York: John Wiley & Sons, 1998.

[14] 刘光磊,宋二祥,刘华北,等.饱和砂土地层中隧道结构动力离心模型试验[J].岩土力学,2008,29(8):2070-2076.
Liu G L, Song E X, Liu H B, et al. Dynamic Centrifuge Tests on Seismic Response of Tunnel in Saturated Sandy Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2070-2076. (in Chinese)

[15] 刘光磊,宋二祥,刘华北.可液化地层中铁隧道地震响应数值模拟及其试验验证[J].岩土工程学报,2007,29(12):1815-1822.
Liu G L, Song E X, Liu H B. Numerical Modeling of Subway Tunnels in Liquefiable Soil Under Earthquakes and Verification by Centrifuge Tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1815-1822. (in Chinese)

(上接 842 页)

[9] 杨永琦,杨仁树,成旭,等.定向断裂爆破机理实验研究[J].煤矿爆破,1995(2):3-8.
YANG Yong-qi, YANG Ren-shu, CHENG Xu, et al. Test Study on Mechanism of Directional Split with Blasting[J]. Coal Mine Blasting, 1995(2): 3-8. (in Chinese)

[10] 李彦涛,杨永琦,成旭.切缝药包爆破模型及生产试验研究[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2000(4):117-120.
LI Yan-tao, YANG Yong-qi, CHENG Xu. Study on Model and Production Test of Slotted Cartridge Blasting[J]. Liaoning Project Technology University Journal: Natural Science Edition, 2000(4): 117-120. (in Chinese)

[11] 成旭,叶图强.大幅度提高岩体边坡爆破开挖稳定性的缓冲垫研究[C]//中国爆破新技术(Ⅲ).北京:冶金工业出版社,2012:183-188.
CHENG Xu, YE Tu-qiang. Study of Cushions for Largely Improving the Stability of Rock Slopes While Excavating by Blasting[C]//New Technology of Blasting in China(Ⅲ). Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 183-188. (in Chinese)

[12] 夏祥.爆炸荷载作用下岩体损伤特征及安全阈值研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2006.
XIA Xiang. Study of Damage Characteristics and Safety Threshold of Rock Vibration by Blast[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)