

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.09.023

# 饱和层状砂土三轴液化试验

修占国, 王述红, 李纯, 王斐笠

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

**摘要:** 为了研究具有层状结构的饱和砂土液化时孔隙水压力的发展规律, 利用 GCTS-STX-050 气动三轴测试系统对层状饱和砂土进行等幅应变控制下的液化试验研究, 分析了试样中不同粉粒夹层厚度、位置及分布层数对液化影响。试验结果表明, 试样液化所需的循环加载次数与粉粒夹层的厚度呈非线性关系, 存在一临界厚度使得循环加载次数最大; 粉粒层能够有效地阻碍细粒层产生的超孔隙水压力的传递, 而细粒层对粉粒层产生的超孔隙水压力阻碍效果不明显; 相同厚度下, 粉粒夹层两层分布较一层分布对超孔隙水压力的阻碍作用更加明显。试验结论可为地震作用下具有层状结构的饱和砂土液化规律的探索提供一定的参考依据。

**关键词:** 饱和砂土; 层状结构; 等幅应变加载; 超孔隙水压力; 液化

**中图分类号:** TU 443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)09-1350-05

## Triaxial Liquefaction Test of Saturated Stratified Sand

XIU Zhan-guo, WANG Shu-hong, LI Chun, WANG Fei-li

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Fei-li, E-mail: wangfeili109@126.com)

**Abstract:** In order to study the developments of pore water pressure in the liquefaction processes of saturated sands with stratified structure, the liquefaction tests under equal amplitude strain control for saturated sands were carried out by using GCTS-STX-050 dynamic triaxial testing system. The effect of different thickness, position and number of layers on liquefaction was analyzed. It is showed that the cyclic loading times required for liquefaction is non-linearly related to the thickness of the silt interlayer. There is a critical thickness that causes the cyclic loading times to be maximum. And the silt can effectively prevent the transfer of excess pore water pressure generated by fine sand. But the inhibition of fine sand for excess pore water pressure generated by silt is not obvious. Under the same thickness of silt interlayer, the distribution of two-layered interlayer is more obvious than one layer on obstruction of excess pore water pressure. The conclusion can provide a reference for the liquefaction of saturated sand with stratified structure under earthquake.

**Key words:** saturated sand; stratified structure; equal amplitude strain loading; excess pore water pressure; liquefaction

以往研究表明, 液化发生于土体内部孔隙水压力达到有效围压, 即有效应力减小至零的情况<sup>[1]</sup>。土体液化代表土体彻底丧失承载力, 呈流动状态。液化试验研究大多着眼于均匀混合砂, 而对具有层状结构的饱和砂土研究较少<sup>[2]</sup>。在冲积或沉积地层中, 具有层状结构的易液化土层普遍

存在。以往的地震过程中, 该土层也发生过液化现象<sup>[3]</sup>。所以, 针对层状易液化土层的液化机理需展开深入研究分析。

针对不同土体的液化问题, 国内外众多学者展开了试验研究。Jongkwan 等<sup>[4]</sup>建立了一种新的实验室测试程序, 该程序可考虑现场土层的分类, 以

收稿日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050, U1602232); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LN2014006)。

作者简介: 修占国(1991-), 男, 山东烟台人, 东北大学博士研究生; 王述红(1969-), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授, 博士生导师。

此来评估土体液化情况。Takch 等<sup>[5]</sup>通过实验室试验研究了粉土和粉砂土的液化特点,控制粉土的百分比,得出了循环强度比(CRR)、孔隙水压力比( $\gamma_u$ )、剪切应力波速( $v_s$ )等参数之间的关系。Wang 等<sup>[6]</sup>对等幅应变循环加载条件下砾砂的液化特征进行试验和数值模拟研究。结果表明,随砂与砂之间的接触面积增大可提高抗液化强度,且液化过程中呈现各向同性的性质。Karamitros 等<sup>[7]</sup>针对由于液化诱发的浅基础承载力退化问题进行数值分析,通过降低砂土的内摩擦角实现液化模拟,模拟得到一个临界深宽比( $H/B$ ),从而保证其地基承载力安全系数  $F > 2$ 。Evans 等<sup>[8]</sup>针对砾-砂混合材料展开了一系列的不排水三轴试验,结果表明,随着砾石含量的增加,能够有效地提高试样的抗液化能力。Chang 等<sup>[9]</sup>通过一系列的  $K_0$  条件下不排水三轴剪切试验,研究无黏粒砾砂间断续配条件下的液化特征。试验表明,剪切波速与孔隙比存在线性关系。但是,上述研究都针对均匀混合砂土进行研究,其结论与规律并不一定符合层状结构。

针对层状土的试验研究,Praghan<sup>[10]</sup>通过对黏性土夹层试样进行液化试验,结果表明,黏土夹层对饱和砂土的液化强度影响较小。Amini 等<sup>[3]</sup>研究了不同成样方法的均匀和层状砂土对液化特性的影响,结果表明,层状结构对抗液化性能的影响不大。但是,Yoshimine 等<sup>[11]</sup>对不同颗粒尺寸的层状分布进行液化试验分析,结果表明,具有层状结构的抗液化

能力明显高于均匀砂样。Ozener 等<sup>[12]</sup>对层状砂土进行振动台液化试验及数值模拟分析,指出粉粒夹层对层状砂土的液化具有很大影响。目前,层状土体的液化试验研究多针对不同层间的相对密实度、孔隙率及土性等因素的考虑,往往忽略了土层厚度及分布的问题。由于所考虑的因素不同,往往导致不同的试验结果。所以,对于层状结构砂样的液化及变形特性一直处于探索阶段,由于其特殊结构,导致液化和变形的复杂性<sup>[13]</sup>,尚且没有一个统一的定论。

本文通过对细-粉粒层状结构的饱和试样展开液化试验分析,研究具有层状结构试样的液化机理和孔隙水压力的增长规律,为具有层状结构土层的地震液化提供一定的参考依据。

## 1 试验设备、材料及方案

### 1.1 试验设备

试验设备为美国进口 GCTS (geotechnical consulting & testing system) - STX - 050 气动三轴测试系统,整个系统由动力系统、控制系统和数据采集系统三部分组成<sup>[14]</sup>。适用于 30, 50, 70 mm 直径的土样;最高液压为 1 MPa;最高气压为 250 kPa;轴向位移范围为 -25 ~ 25 mm (可调)。可实现常规的静、动三轴试验。动态加载可实现最大 5 Hz 的应力或应变控制的正弦波、三角波和方波的循环加载。其系统连接如图 1 所示。

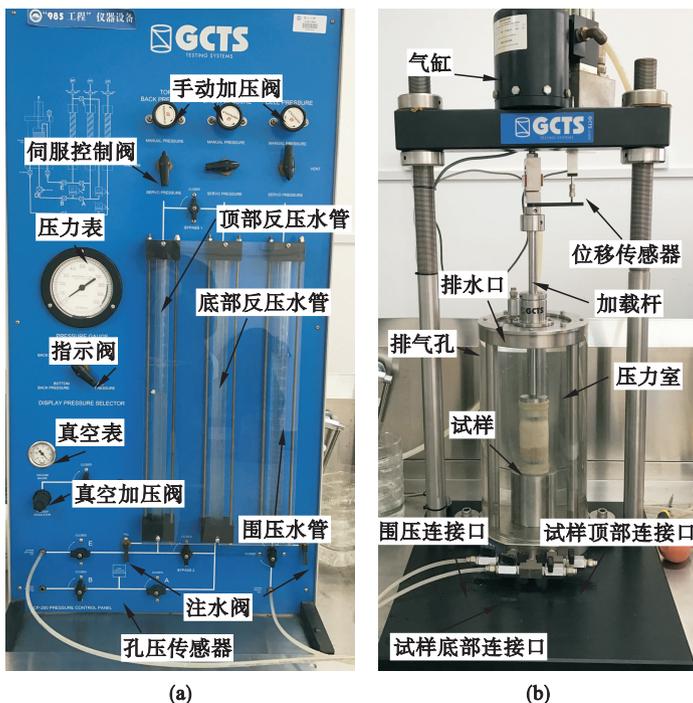


图 1 GCTS 气动三轴仪连接系统  
Fig. 1 Pneumatic triaxial connection system of GCTS  
(a) — 控制面板连接图; (b) — 压力室连接图。

## 1.2 试验材料

试验材料分为细粒和粉粒两种砂样,细粒来自于沈阳市区,由粒径为 0.25 ~ 0.075 mm 的纯净砂组成;粉粒为粒径小于 0.075 mm 的石英粉组成.对试验材料进行颗粒级配分析,其颗粒级配如图 2 所示.

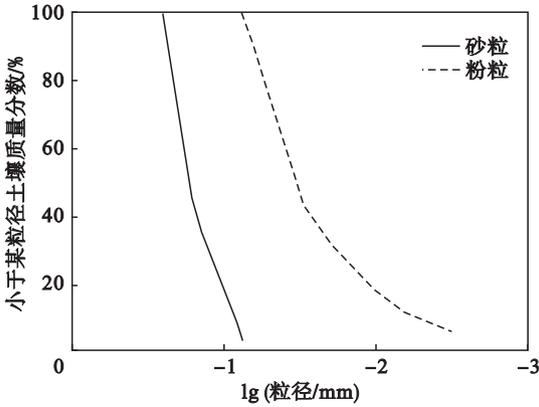


图 2 粒径级配曲线

Fig. 2 Curves of grain size distribution

细粒材料的主要物理特性指标为:最大、最小孔隙比  $e_{\max} = 1.058$ ,  $e_{\min} = 0.656$ ;密度  $\rho_{s, \text{fine}} = 2.621 \text{ g/cm}^3$ ;平均粒径  $d_{50} = 0.165 \text{ mm}$ .粉粒材料的主要物理特性指标为:最大、最小孔隙比  $e_{\max} = 1.705$ ,  $e_{\min} = 0.867$ ;密度  $\rho_{s, \text{silt}} = 2.699 \text{ g/cm}^3$ ;平均粒径  $d_{50} = 0.030 \text{ mm}$ .两种材料如图 3 所示.



图 3 试验材料

Fig. 3 Testing materials

(a)—细粒材料; (b)—粉粒材料.

## 1.3 试验方案

将试验砂样放置于容器内,煮沸静置,加无气水放置在真空缸内,进行抽气饱和.试样采用“水中沉砂”的制样方法<sup>[15]</sup>,极大程度上保证不同砂层的相对密实度接近.试验分为三种工况:1)粉粒夹层厚度为 20, 40, 60 mm;2)40 mm 厚的粉粒夹层位于试样的上、中、下三个位置;3)共计 40 mm 厚的粉粒层在试样中呈两层分布.

图 4 为粉粒夹层 60 mm 及 2 × 20 mm 分布的三轴试验试样.重塑样采用水头和反压联合饱和方法,控制饱和度达到 0.95 以上.试样等向固结,固结完成的标志为:关闭排水阀,孔隙水压力在

5 min 内不再增长.试样直径 50 mm,高度 100 mm,有效固结围压 50 kPa,等幅应变控制加载,加载幅值为 0.5%,频率为 1 Hz,试样液化的标志为孔隙水压力达到有效围压.

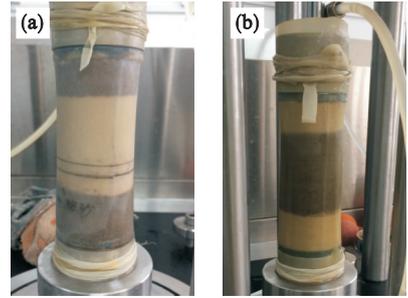


图 4 层状砂三轴试样

Fig. 4 Triaxial sample of stratified sand

(a)—60 mm 粉粒夹层; (b)—2 × 20 mm 粉粒层.

## 2 试验成果分析

### 2.1 粉粒夹层厚度对液化的影响

本节主要研究粉粒夹层不同厚度对液化的影响程度.控制夹层厚度分别为 20, 40, 60 mm;围压  $p_c = 50 \text{ kPa}$ ;振幅  $\text{AMP} = 0.5\%$ ;频率  $f = 1 \text{ Hz}$ ,等幅应变加载至液化.

图 5 为不同粉粒夹层厚度时孔隙水压力  $u$  随等幅应变循环加载次数  $N$  的变化时程曲线.

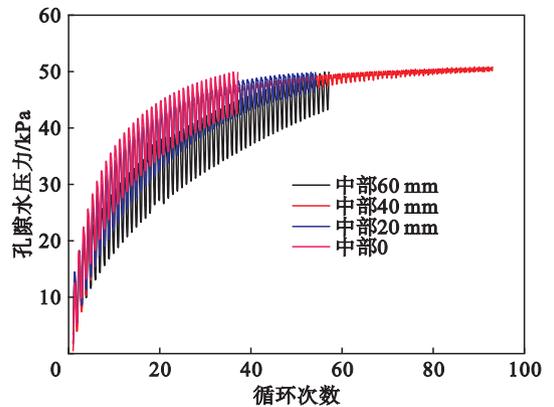


图 5 不同粉粒夹层厚度下孔隙水压力与循环次数的变化时程曲线

Fig. 5 Relationship of cycle times and pore pressure under different thickness of silt interlayer

由图 5 知,不同粉粒夹层厚度时,试样在等幅应变控制下孔隙水压力呈现不同的增长模式.从整体的变化趋势看,当粉粒夹层存在时,夹层阻碍了孔隙水压力的增长速度,需要更多的循环次数达到有效围压后液化.控制夹层厚度分别为 0, 20, 40, 60 mm 时,对应液化所需的循环次数分别为 40, 53, 93, 55.

当夹层厚度为 20 mm 和 60 mm 时,所需的循环次数很接近. 这说明液化加载次数并不是与夹层厚度呈线性关系,而是存在一个临界厚度使液化所需的循环次数最大. 当夹层厚度小于临界厚度时,循环次数随夹层的增厚而增加;当大于临界厚度时,循环次数随厚度的增厚而减小. 从微观角度分析,由于粉粒层的存在,使得试样整体的渗透性改变,粉粒层的渗透率较细粒层低,粉粒层存在较强的吸附力,需要更多的循环破坏其结构. 另外,循环荷载作用于试样的顶端,超孔隙水压力从顶端产生并下传,当遇到粉粒层时,渗透率较小,阻碍了孔隙水压力的继续传递. 随粉粒层的不断增厚,粉粒夹层在试样中起到了主导的作用,相对于细粒层来说,相同条件下,粉粒更容易液化,加快试样的液化速度,导致所需液化的加载循环次数降低.

虽然粉粒层的厚度对液化循环次数的影响是非线性的,但对孔隙水压力峰值的影响则有所不同. 由图 6 所示,夹层为 0 时,孔隙水压力的峰值包络线增长速率最快,随着夹层厚度的增加,孔隙水压力峰值逐渐降低. 原因在于当试样的渗透特性较均匀,对孔隙水压力增长的阻碍作用不明显. 随夹层增厚,孔隙水压力的峰值曲线逐渐降低,反映了夹层对孔隙水压力峰值增长的阻碍作用.

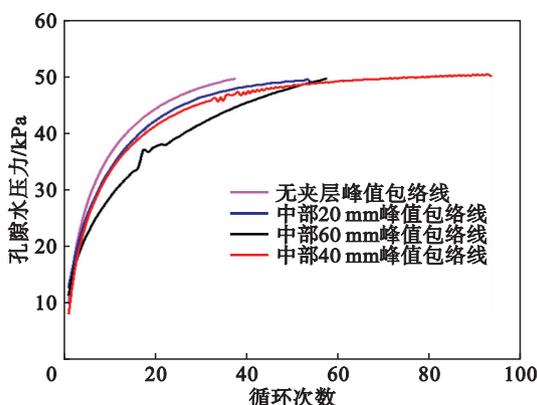


图 6 不同粉砂夹层厚度下孔隙水压力峰值曲线  
Fig. 6 Peak curves of pore water pressure under different thickness of silt interlayer

## 2.2 粉粒层位置对液化的影响

考虑粉粒层的不同位置对液化的影响程度. 控制粉粒层(厚度为 40 mm)分别位于试样上、中、下三个位置. 采用等幅应变控制;围压  $p_c = 50$  kPa;振幅  $AMP = 0.5\%$ ;频率  $f = 1$  Hz. 图 7 为粉粒层不同位置时孔隙水压力  $u$  随等幅应变循环加载次数  $N$  的变化时程曲线.

由图 7 可知,粉粒层的位置不同对孔压的增长影响较为明显. 位于上部时,仅循环 17 个加载

次数试样达到有效围压液化. 通常,粉粒较细粒粒径小得多,在循环荷载作用下孔压力增长速度快,液化快. 超孔压在粉粒层迅速产生,试样下部为细粒层,渗透率较大,对超孔压的传递没有阻碍作用. 位于中部时,93 个循环次数后试样液化. 较上部而言,超孔压力在传递过程中,受到中部渗透率较低的粉粒层的有效阻挡. 当位于下部时,超孔压在细粒层产生,由于细粒的粒径较大,同等条件下不易液化,所以其孔压发展相对较慢. 超孔压受到粉粒层的有效阻碍,最终的循环次数为 155.

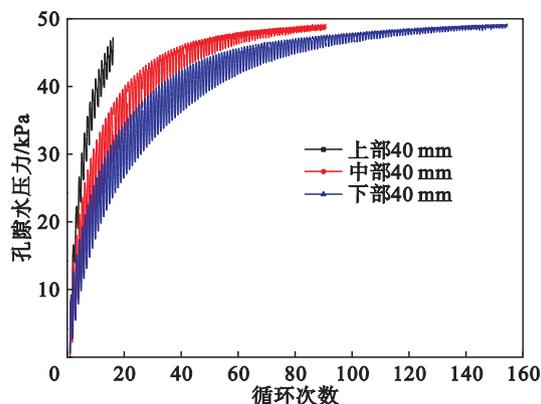


图 7 不同粉粒层位置下孔隙水压力与循环次数的关系曲线

Fig. 7 Relationship of cycles-pore water pressure under different location of silt layer

由试验结果可知,粉粒层的不同位置对超孔隙水压力的传递情况和增长模式产生重要影响. 随粉粒层的不断下移,试样液化所需要的循环次数急剧加大. 当粉粒层位于中、下部时,孔压后期平稳上升阶段过程中,其单位循环内孔压的变化幅值逐渐减小,这是由于粉粒层渗透率相对较低造成的,说明粉粒层对孔压的发展起到了充分的阻碍作用.

## 2.3 粉粒两层布置对液化的影响

考虑两层粉粒层对试样液化的影响. 试样共计 2 个(试样 1:自下而上依次为细粒、粉粒、细粒、粉粒、细粒,均 20 mm. 试样 2:自下而上依次为粉粒 20 mm、细粒 60 mm、粉粒 20 mm). 采用等幅应变控制;围压  $p_c = 50$  kPa;振幅  $AMP = 0.5\%$ ;频率  $f = 1$  Hz. 图 8 为试样孔隙水压力  $u$  随等幅应变循环加载次数  $N$  的变化曲线.

由图 8 可知,试样的孔压达到有效围压所需的循环次数差异较大. 试样 1 需 115 次循环达到有效围压,试样液化. 试样 2 仅 26 个循环即可. 试样 2 的超孔压产生于粉粒层,而试样 1 则产生于细粒层. 试验结果表明,细粒层对超孔隙水压力的阻碍可忽略,而粉粒层对孔隙水压力的阻碍十分

明显;试样 40 mm 厚粉粒夹层两层分布比一层分布(中部夹层 40 mm 一层分布需 93 个加载循环)对超孔隙水压力的阻碍效果明显。

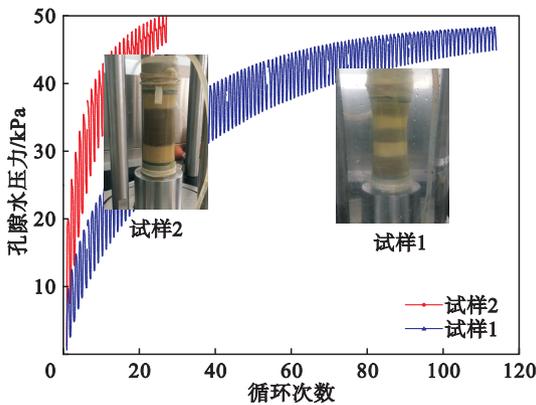


图8 粉粒两层分布时孔压与循环次数的关系曲线  
Fig. 8 Relationship of cycles-pore water pressure under two-layer silt layer

### 3 结 论

1) 针对层状砂土液化展开试验研究,当考虑粉粒夹层厚度时,试验表明,液化所需的循环加载次数与夹层厚度呈非线性关系,存在一个临界厚度使液化所需的加载次数最大。

2) 当考虑粉粒的不同位置时,试验表明,粉粒层能够有效地阻碍细粒层产生的超孔隙水压力,而细粒层对粉粒层产生的超孔隙水压力的阻碍作用不明显。

3) 同一夹层厚度条件下,粉粒夹层两层分布较一层分布对超孔隙水压力的阻碍相对明显,多层分布在一定程度上对抵抗液化起到积极作用。

### 参考文献:

[1] Peyman A, Ali P. Liquefaction-induced settlement of shallow foundations on two-layered subsoil strata[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 94: 35-46.

[2] 周健, 陈小亮, 杨永香, 等. 饱和层状砂土液化特性的动三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(4): 967-972, 978. (Zhou Jian, Chen Xiao-liang, Yang Yong-xiang, et al. Study of liquefaction characteristics of saturated stratified sands by dynamic triaxial test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(4): 967-972, 978.)

[3] Amini F, Qi G Z. Liquefaction testing of stratified silty sands [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2000, 126(3): 208-217.

[4] Kim J, Kawai T, Kazama M. Laboratory testing procedure to assess post-liquefaction deformation potential [J]. *Soils and Foundations*, 2017, 57: 905-919.

[5] Takch A E, Sadrekarimi A, Naggar H E. Cyclic resistance and liquefaction behavior of silt and sandy silt soils [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 83: 98-109.

[6] Wang Y, Wang Y L. Liquefaction characteristics of gravelly soil under cyclic loading with constant strain amplitude by experimental and numerical investigations [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 92: 388-396.

[7] Karamitros D K, Bouckovalas G D, Chaloulos Y K, et al. Numerical analysis of liquefaction-induced bearing capacity degradation of shallow foundations on a two-layered soil profile [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 44: 90-101.

[8] Evans M D, Zhou S. Liquefaction behavior of sand-gravel composites [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(3): 287-298.

[9] Chang W J, Chang C W, Zeng J K. Liquefaction characteristics of gap-graded gravelly soils in  $K_0$  condition [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 56: 74-85.

[10] Praghan T B S. Liquefaction behavior of sandy soil sandwiched by clay layers [C]//Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering. Honolulu: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 1997: 676-682.

[11] Yoshimine M, Koike R. Liquefaction of clean sand with stratified structure due to segregation of particle size [J]. *Soils and Foundations*, 2005, 45(4): 89-98.

[12] Ozener P T, Ozaydin K, Berrilgen M. Numerical and physical modeling of liquefaction mechanisms in layered sands [C]//Proceedings of the Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV Congress 2008. Sacramento: American Society of Civil Engineers, 2008: 318-328.

[13] 陈国兴, 刘雪珠. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的振动孔压发展规律研究 [J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 79-82. (Chen Guo-xing, Liu Xue-zhu. Study on dynamic pore water pressure in silty clay interbedded with fine sand of Nanjing [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 79-82.)

[14] 修占国. 大型基础下层状地基土的变形计算及液化分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017. (Xiu Zhan-guo. Study on the deformation calculation and liquefaction of layered soil under large building foundation [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.)

[15] 潘华, 陈国兴, 刘汉龙. 饱和南京细砂液化后大变形特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(7): 1475-1481. (Pan Hua, Chen Guo-xing, Liu Han-long. Study of behaviour of large post-liquefaction deformation in saturated Nanjing fine sand [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(7): 1475-1481.)