

粉粒含量对粉土地液化后变形影响的试验研究

曾长女

(河南工业大学土木建筑学院, 河南 郑州 450052)

摘要:利用全自动多功能三轴仪进行了粉土地液化后变形试验,探讨了粉粒含量对液化后应力应变关系的影响。试验时施加动加载使试样达到设定的液化程度,然后立即施加单调荷载,以模拟地震现场发生强震时初始液化到液化后变形的整个过程。研究发现,不同粉粒含量粉土地发生液化后变形得到的液化后应力应变关系可采用推导的同一理论关系式表示,其系数的差异表明了粉粒含量对粉土液化后变形的影响。验证结果表明该关系式能较好地模拟粉粒含量对粉土地液化后应力-应变的影响,为同一地区或相似地区粉粒含量变化的粉土地液化评估提供依据。

关键词:粉土地; 粉粒含量; 液化后变形; 室内试验

中图分类号: TU411; P642.11⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2008)02-0139-06

Experimental Study on the Influence of Silt Particle Content to Post-liquefaction Deformation in Silt Ground

ZENG Chang-nü

(Department of Civil and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Many silt post-liquefaction deformation tests are carried out in a new universal triaxial apparatus of Hehai University in order to study the influence of silt particle content on post-liquefaction stress-strain relationships. The whole process from liquefaction to post-liquefaction deformation in a strong shock is simulated by forcing dynamic loading to some severity liquefaction and then forcing monotonic loading. The stress-strain relationship for different silt particle contents of silt soil can be demonstrated by same formula. It is found that the influence of silt particle content can be obtained only from analyzing the coefficients of the formula. The results predicted by the formula compared favorably with experiment observation.

Key words: Silt ground; Silt particle content; Post-liquefaction deformation; Lab test

0 前言

在地震荷载作用下,不仅饱和砂土地基会发生液化现象,饱和粉土地基也会发生液化现象^[1],且破坏程度并不亚于砂土。粉土是由砂粒、粉粒、粘粒组成的土类,含有大量粉粒。粉粒是粒径为0.075~0.005 mm的颗粒,透水性小,湿时稍有粘性,在粉土中起着骨架的作用^[2]。有必要开展粉土液化相关问题的研究,为工程场地液化评估提供理论依据。

液化研究源于对地震现场的实地勘察,近十几

年来逐渐开展了砂土液化后特性研究。Hamada教授^[3]进行了液化后研究的开创性工作,此后这方面的研究逐渐成为岩土地震工程领域的前沿和热点,许多学者进行了深入的研究。我国这方面的研究起步较晚,刘惠珊等^[4-5],高玉峰等^[6],张建民等^[7-8],刘汉龙等^[9]对地震液化引起的砂土地面大位移及其对桩基等周围环境的影响进行了总结和深入研究。1975年唐山地震中,天津地区发生了大面积粉土地基液化现象^[10],震害调查表明很多震害现象与

收稿日期:2007-09-13

基金项目:郑州市科技攻关计划(074SGYS38252-1);河南省教育厅自然科学研究计划项目(2008A560002)

作者简介:曾长女(-),女(汉族),江西南丰人,博士,讲师。主要从事土动力学与地基基础方面的研究工作。

砂土液化后变形的现象相似,表明粉土液化后也存在变形现象。粉土中的颗粒含量变化对液化发展有重要的影响,甚至影响到液化产生的机理,但目前这方面的研究较少。本文在粉土范围内对不同粉粒含量粉土进行液化后变形试验研究,探讨粉粒含量变化对粉土液化后变形特性的影响。

1 试验仪器、试样制备及试验过程

1.1 试验仪器

试验所用仪器采用全自动多功能静三轴仪,该仪器为河海大学岩土所与日本圆井株式会社合作定制的专门仪器。该仪器的特殊功能对研究液化后相关问题具有突出的优势,可方便按不同的试验要求控制试验方式,如应力控制或应变控制,试验时可从一种控制方式切换到另一种控制方式。常规动三轴试验通常用来进行液化试验,但不能在液化后改变加载方式并进行数据采集因而无法进行液化后变形试验。河海大学的全自动多功能静动三轴仪能够在液化发生后的一定时间内(主要取决于试验结束条件和测试传感器量程决定)结束试验并立即施加静荷载,以模拟液化后应力-应变关系。试验数据由计算机自动采集并生成相应的数据文件,并有实时监测试验中应力、应变及孔压发展的功能。

该仪器的主要指标为^[11]:试样尺寸 $\phi 61.8 \times 140$ mm; $\phi 60 \times \phi 100 \times 150$ mm;振动频率 1 ~ 50 Hz;最大竖向荷载 30 kN;最大围压 1 MPa;最大反压 0.6 MPa;轴向最大变形 -50 ~ 50 mm;振动波为正弦波或随机波。

1.2 试样制备

本文研究对象是粉土,包括直接取自工地的粉土(称之为典型粉土),以及在粉土范围内配置的不同粉粒含量的粉土。典型粉土取自杭千高速公路西湖区段,取土埋深约 5 m。土样取出后立即蜡封,贴标签,标明上下。但是在运输过程中土样扰动较大,天然状态下的物性指标不好控制,因此试验所用粉土为重塑粉土。

配置不同粉粒含量的粉土时对细砂粒、粉粒、粘粒只考虑细砂粒粒径取 0.25 ~ 0.075 mm 之间,粉粒取 0.075 ~ 0.005 mm 之间,粘粒取小于 0.005 mm 为标准。为配置不同粉粒含量粉土,根据所取粉土和粘土的颗分曲线分析,要得到粉粒含量变化范围更大的粉土,可在必要时添加少量的细砂。表 1 为细砂、典型粉土、粘土的粒径分布情况。

控制不同粉粒含量的试样时,粘粒含量保持

8%不变,粉粒含量变化为 50%,60%,70%,80%,具体如表 2 所示。百分含量均指质量百分含量。在配置土样时,粘粒含量不易直接提取出来,因此配置土样时只要根据配土试样的干密度及试样体积得到配土样的质量,按照配土中的粘粒含量、粉粒含量、砂粒含量计算出该配土样总的砂粒、粉粒、粘粒的质量,然后根据砂粒质量、粉粒质量、粘粒质量列出三个方程计算出需要的细砂、典型粉土、粘土原料的质量。再称量需要的粉土和细砂或粘土的质量,秤好后充分混匀,加入适量的无气水,控制含水率在 15% 左右。在密封的塑料袋内静置过夜,然后取袋内不同位置处的土测试其含水率,其差值不超过 0.2%。

表 1 原料土的粒径分布

土类	砂粒含量 / %	粉粒含量 / %	粘粒含量 / %
细砂	100	0	0
典型粉土	12	80	8
粘土	2.92	76.74	20.34

表 2 配土的粒径分布

配置土 序号	细砂粒含量 / % (0.25 ~ 0.075 mm)	粉粒含量 / % (0.075 ~ 0.005 mm)	粘粒含量 / % (小于 0.005 mm)
1	42	50	8
2	32	60	8
3	22	70	8
4	12	80	8

试验采用直径 61.8 mm,高度 140 mm 的试样。所有粉土样分七层捣实,根据土样的干密度及预先设计的含水率确定每层土样的重量,击实到相应高度。各层接触面刮毛,以保证上下层接触良好。

1.3 试验过程

试样制备完成后,采用抽真空饱和法及反压饱和法,保证饱和度大于 95%,再进行固结过程。固结完毕后关闭阀门,施加动荷载使其达到设定液化程度;之后立即施加一定的单调荷载,以模拟土体在自重产生的剪应力下发生液化后变形的过程,即在动加载后缓慢施加轴向的单调荷载。试验加载过程如图 1 所示。试验采用应力控制的方式。

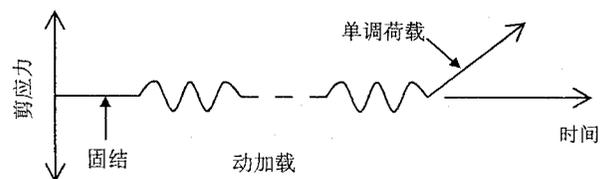


图 1 试验加载过程

Fig. 1 Procedure of loading during test.

粉土有着特殊的颗粒组成,其粉粒含量不具有

塑性,液化后土颗粒对其变形具有非常重要的作用。本文着重考虑粉土中粉粒含量变化时的液化后变形特性,为此主要设计了以下条件进行试验:

(1) 试样干密度 $\rho_d = 1.556 \text{ g/cm}^3$; 试验时固结压力为 100 kPa;

(2) 试验液化程度以动加载时的双幅动荷载确定;

(3) 粉粒含量 $F_r = 50\%, 60\%, 70\%, 80\%$ 。

实验中测计的是轴向应变 ε 。Ishihara 提出如果在试验过程中控制为不排水试验,则可以将实心圆柱样的轴向应变式转换为剪应变,文中使用的剪应变采用式(1)换算,即:

$$\gamma = 1.5\varepsilon \quad (1)$$

2 试验结果

图 2 为不同粉粒含量影响的液化后粉土应力 - 应变关系。由图 2 分析可得,液化后粉土有不同的两个变形阶段^[12]: (1) 在动加载后静荷载的初期,轴向应变以较大的速率增加,应力几乎为零。该阶段称为低强度段,该阶段发生的应变称为低强度段应变 ε_0 或称低强度段剪应变 γ_0 (γ_0 取 $\tau = 2 \text{ kPa}$ 时应变值)。(2) 土体从过渡段逐渐进入一个稳定变形区,此后剪切模量基本保持为常量,土体强度逐渐恢复。该阶段称为强度恢复段,发生的应变成为强度恢复段应变 ε_d 或称强度恢复段剪应变 γ_d 。

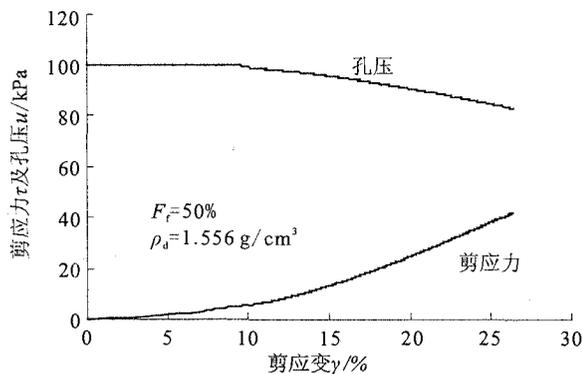


图 2 粉粒含量 50% 粉土液化后应力 - 应变及孔压消散

Fig. 2 Stress-strain and water pressure response of post-liquefaction silt with silt content 50%.

张建民^[13]等研究表明液化后砂土始终表现为剪胀特性,粉土液化后也有相似特性。液化后静加载阶段的孔压发展与应力发展表现出类似的规律:在加载的初始阶段孔压值几乎不发生变化,当应变发展到一定量时,试样表现出明显的剪胀特性,孔隙

水压力开始下降,粉土强度得到恢复,应力 - 应变曲线斜率开始快速增加。这一特殊的应力 - 应变关系与传统认为的模量随应变增加而降低的观点不同,是由于试样在液化后静加载过程中始终表现出剪胀性而引起的。

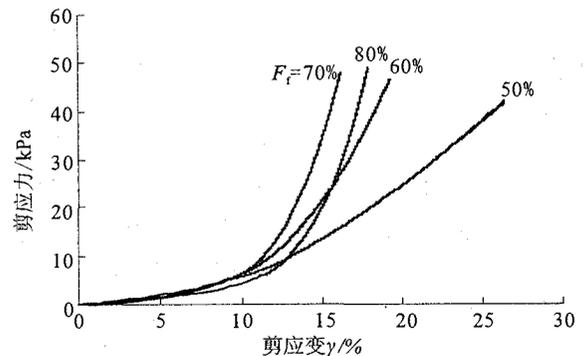


图 3 不同粉粒含量粉土液化后静加载应力 - 应变关系

Fig. 3 Stress-strain response of post-liquefaction silt with different silt contents under the monotonic loading.

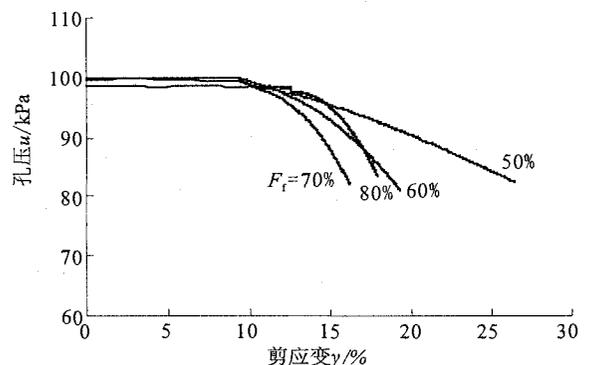


图 4 不同粉粒含量时粉土液化后孔压消散规律
Fig. 4 Water pressure-strain response of post-liquefaction silt with different silt contents under the monotonic loading.

图 3 和图 4 分别表示了动加载后静加载时粉土样的剪应力、孔压与应变的关系。由两图可得,不同粉粒含量粉土液化后静加载试验得到的应力 - 应变关系图相似,在液化后静加载的初始阶段,试样强度极低,此时试样应变迅速增加,应变在很短的时间内从百分之几迅速发展到了百分之十几,而孔压基本不变,有效应力很小,土体呈现出很低的强度;随着应变的增加,试样的剪胀性明显,孔压开始减小,有效应力开始增加,土体强度逐渐得到恢复。在液化后静加载的初始阶段,在干密度、有效固结压力、液化度、粘粒含量均相同的条件下,尽管不同粉粒含量粉土试样表现出相似的应力 - 应变关系,但还有一定的差别:动加载后静加载的初始阶段应变值随着粉粒含量的增加而缓慢增加,在土体强度恢复阶段,应

力-应变关系成线性表示,随着粉粒含量的增加,该直线的斜率也增加。

不同粉粒含量粉土液化后静加载应力-应变特性不同的原因,可从粉土特殊的微观颗粒特征来分析。粉土中粉粒被砂粒和粘粒包围,本试验粘粒含量保持为8%不变。当粉土粉粒含量较少时砂粒和粘粒包围着粉粒;随着粉粒含量增加,砂粒和粘粒不能完全占据粉颗粒之间的孔隙,使得粉土中颗粒间的相对稳定性发生微妙的变化;当粉粒含量继续增加时,粉土中的砂粒含量逐渐减少,部分粉粒脱离砂粒和粘粒的胶结,产生更大的孔隙。因而随着粉粒含量的增加液化后静加载时低强度的变形也更大,随着粉颗粒的增加粉土液化后静加载表现出的剪胀也随之增强,粉粒含量越高剪胀作用越明显。液化后静加载时孔隙水压力的发展规律与应力发展规律类似,由图4所示。

3 粉粒含量对粉土液化后应力-应变关系影响的试验描述

粉土液化后变形的应力-应变关系与砂土相似,液化后变形机理也与砂土相似。但是粉土有着特殊的颗粒组成,本文重点考虑粉粒含量影响下粉土液化后应力-应变关系,分析粉粒含量变化对低强度段应变和强度恢复段应变的影响。并将试验结果总结一个能反映粉粒含量影响的液化后应力-应变关系式。

由以上的试验分析知粉土液化后应变可以分为两段,第一段的变形与有效应力无关,称为低强度段,应变记为 ε_0 ,第二段应变与有效应力相关,称为强度恢复段,应变记为 ε_d 。总的应变有

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_d \quad (2)$$

其中 ε_0 为产生的应变值(通常取为剪应力为 2 kPa 时的应变值),此时应力很小而产生的应变很大,且低强度段应变占液化后总应变的比例很大; ε_d 称为强度恢复段应变,即 ε_0 后直至试验结束的应变。

3.1 低强度段应变

根据上述说明,由试验分析低强度段应变 ε_0 ,发现 $\varepsilon_0 - \varepsilon_{\max}$ 表现很好的线性关系。即与动强度段最大双幅动应变成比例关系,表示为图5及图6。

由图5可得

$$\frac{d\varepsilon_0}{d\varepsilon_{\max}} = C \quad (3)$$

式中 ε_{\max} 为动加载下双幅轴向应变, C 为常数。

式(3)也可表示为

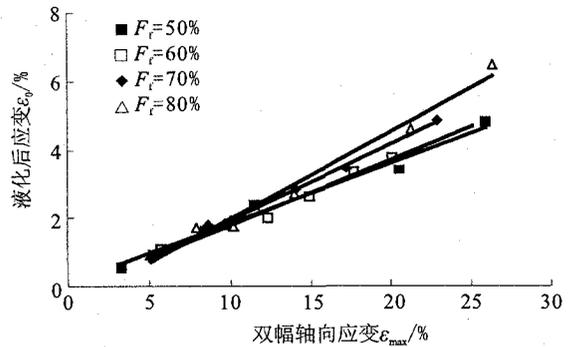


图5 ε_0 与 ε_{\max} 关系 ($F_f = 50\% \sim 80\%$)

Fig. 5 Relationship between ε_0 and ε_{\max} with different silt contents.

$$\varepsilon_0 = C(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\max,a}) + \varepsilon_{0,a} \quad (4)$$

由图6知 $\varepsilon_{\max,a} = 10\%$, 表示为本试验动加载最大双幅轴向应变; $\varepsilon_{0,a}$ 为双幅轴向应变为 10% 时粉土样产生的液化后低强度段应变。

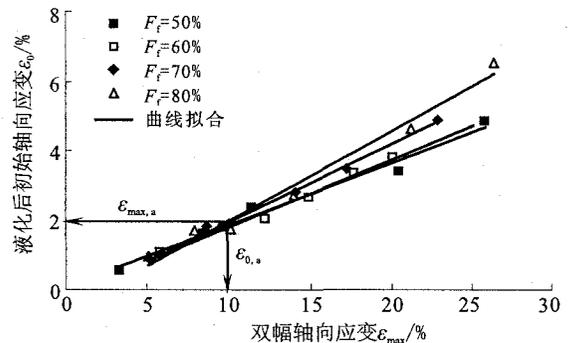


图6 不同粉粒含量 $\varepsilon_{\max,a}$, $\varepsilon_{0,a}$ 的确定

Fig. 6 $\varepsilon_{\max,a}$ and $\varepsilon_{0,a}$ with different silt content.

由图7可得到,当粉土中粉粒含量从50%变化到80%时,曲线 $\varepsilon_0 - \varepsilon_{\max}$ 的斜率 C 随着粉粒含量的增加而单调增加且有如下的关系:

$$C = 0.003 \times F_f + 0.014 \quad (5)$$

式中 F_f 为粉土中的粉粒含量。粉粒含量变化时粉土液化后变形的影响可通过参数 C 表示。

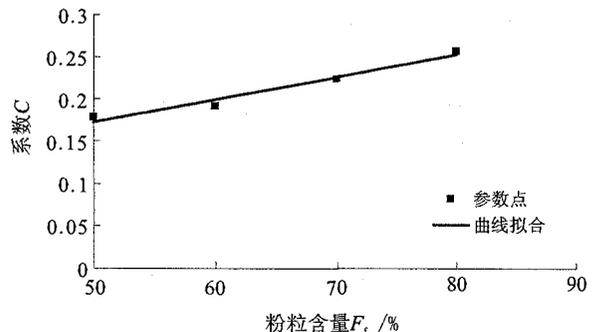


图7 参数 C 与粉粒含量关系

Fig. 7 Relationship between parameter C and silt contents.

3.2 强度恢复段应变

Adrian F. L. Hyde^[14]通过试验得出等压固结条件下的粉土液化后体变和液化后轴向变形是通过圆点的线性关系,可以用式(6)表示,文献[14]中 $a = 3$ 。

$$\varepsilon_{v,PC} = a\varepsilon_{a,PC} \quad (6)$$

其中 $\varepsilon_{v,PC}$ 为动加载后的体积应变, $\varepsilon_{a,PC}$ 为动加载后的轴向应变,对于进行不排水的动加载后压缩试验的粉土样有

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{vd} + \varepsilon_{vc} = 0 \quad (7)$$

其中, ε_{vd} 为剪胀引起体变; ε_{vc} 为有效应力增加引起的体变。

而由有效应力 p' 改变引起的 ε_{vc} 可以由体积变形模型得到:

$$\varepsilon_{vc} = K \left(\frac{p_0'}{p_a} \right)^n \left(\frac{p'}{p_0'} \right)^m \quad (8)$$

其中 p' 为此时的有效应力; p_a 为一个大气压力; K, m, n 为试验常数,多数土的 m 在 0.0 ~ 1.0 之间。

因此,由式(6),(7)及(8)得到

$$\varepsilon_d = \frac{\varepsilon_{vc}}{a} = \frac{K}{a} \left(\frac{p_0'}{p_a} \right)^n \left(\frac{p'}{p_0'} \right)^m \quad (9)$$

由液化后不排水剪切试验可得到应力路径都落在临界应力状态线上,即有

$$q = M_{CS} p' \quad (10)$$

结合式(10),式(9)可以表示为

$$\varepsilon_d = \frac{\varepsilon_{vc}}{a} = \frac{K}{a} \left(\frac{p_0'}{p_a} \right)^n \left(\frac{q}{M_{CS} p_0'} \right)^m \quad (11)$$

因而有

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_d = C(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{max,a}) + \varepsilon_{0,a} + \frac{K}{a} \left(\frac{p_0'}{p_a} \right)^n \left(\frac{q}{M_{CS} p_0'} \right)^m \quad (12)$$

3.3 试验模型验证

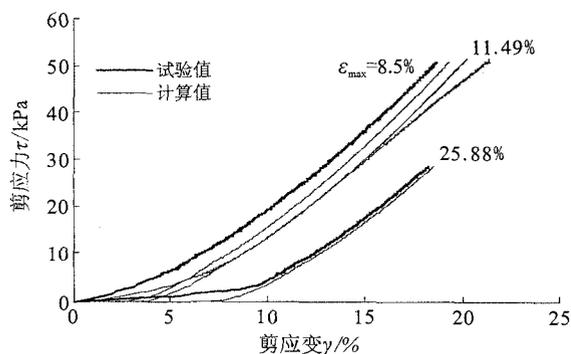


图8 试验曲线与预测曲线 ($F_t = 50\%$)

Fig. 8 Test and predicted curves with silt content 50%.

图8为不同粉粒含量的试验与计算验证对比图,表明该模型的计算与试验值具有较好的拟合度,即粉粒含量对粉土液化后应力应变关系的模型具有一定的适用性。

4 结论

本文进行了粉粒含量对粉土地液化后变形特性影响的试验研究,由不同粉粒含量粉土液化后试验得到的动加载后静加载应力-应变关系可用一个试验总结的关系式表示,不同的粉粒含量的影响可以通过分析该关系式的系数来研究。

(1) 粉土液化后的应变可以表示为 $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_d$,其中 ε_0 取为剪应力为 2 kPa 时的应变值, $\varepsilon_0 = C(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{max,a} + \varepsilon_{0,a})$; ε_d 为 ε_0 后直至试验结束的应变。不同粉粒含量粉土液化后应力应变关系具有相似性。

(2) 当粉粒含量变化时,参数 C 会发生变化,可用该参数的变化关系表示粉粒含量变化对其液化后变形的影响: $C = 0.003 \times F_t + 0.014$, $\varepsilon_{0,a} = 1.9619$, $\varepsilon_{max,a}$ 是一个常量。

(3) 通过试验结果的拟合表明该关系式拟合得较好,能反映不同粉粒含量对粉土液化后变形的影响。

[参考文献]

- [1] Tianqiang Guo, Shamsher Prakash. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(8): 706-710.
- [2] 林本海,李业茂. 粉土工程性质的探讨[A]//中国土木工程学会第八届土力学及岩土工程学术会议论文集[C]. 北京:万国出版社, 1999, 181-184.
- [3] Hamada M, Yasuda S, Isoyama R. Observation of permanent displacements induced by soil liquefaction[J]. Proc. JSCE. 1986, 376/111-6: 211-220.
- [4] 刘惠珊,徐凤萍,李鹏程. 液化引起的地面大位移对工程的影响及研究现状[J]. 特种结构, 1997, 14(2): 47-50.
- [5] 刘惠珊,李鹏程,徐凤萍. 地下生命线工程防御地震液化产生地面大位移的对策[J]. 工程抗震, 1998, 12(4): 28-32.
- [6] 高玉峰,刘汉龙,朱伟. 地震液化引起的地面大位移研究进展[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 294-298.
- [7] 张建民. 水平地基液化后大变形对桩基础的影响[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(5): 75-78.
- [8] Shamoto Y, Jian-Min Zhang, Goto S. Mechanism of large post liquefaction deformation in saturated sand[J]. Soils and Foundations, 1997, 37(2): 71-80.
- [9] 刘汉龙,周云东,高玉峰. 砂土地震液化后大变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 142-146.
- [10] 石兆吉,郁寿松,王余庆,等. 饱和轻亚粘土地基液化可能性

- 判别[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(3): 71-81.
- [11] 刘汉龙, 周云东, 高玉峰, 等. 多功能静动三轴仪研制及在液化后大变形中的应用[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(5): 48-51.
- [12] 曾长女. 细粒含量对粉土液化及液化后影响的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [13] 张建民. 砂土的可逆性和不可逆性剪胀规律[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 12-17.
- [14] Adrian F L Hyde, Toru Higuchi. Post liquefaction characteristics of low plasticity silt[A] // Proceeding of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering [C]. Osaka, Japan: Millpress, 2005: 2659-2662.

(上接 127 页)

[参考文献]

- [1] Penzen J, Wu Ching L. Stress in linings of bored tunnels[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1988, 27: 283-300.
- [2] Drake J L, Walker R E, Slawson T. Backfill effect on buried structure response[A] // Coustin Lily C editor. Proceedings of the fourth international symposium on the interaction of non-nuclear munitions with structures, vol. 2 [C]. Panama City Beach, FL: IFS Ltd. Publishing Company, 1989: 209-221.
- [3] 高峰, 李德武, 严松宏, 等. 秦岭隧道抗爆炸荷载的分析研究[J]. 兰州铁道学院学报(自然科学版), 2001, 20(4): 48-53.
- [4] 李忠献, 田力. 地下爆炸波作用下基底滑移隔震建筑——土—隧道相互作用的动力分析[J]. 工程力学, 2004, 21(6): 56-64.
- [5] 王天运, 任辉启, 王玉岚. 接触爆炸荷载作用下核电站安全壳的动力响应分析[J]. 核动力工程, 2005, 26(2): 187-195.
- [6] 李忠献, 刘杨, 田力. 单侧隧道内爆炸荷载作用下双线地铁隧道的动力响应与抗爆分析[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(2): 173-181.
- [7] 刘沐宇, 卢志芳. 接触爆炸荷载下长江隧道的动力响应分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 113-117.
- [8] Feldgun V R, Kochetkov A V, Karinski Y S, et al.. Internal blast loading in a buried lined tunnel[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 74(1): 2-12.
- [9] 张庆元, 战人瑞. 爆轰荷载作用下球形空腔的动力响应[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(2): 182-185.
- [10] 杨俊, 宫全美, 吴世明, 等. 饱和土体中圆柱形孔洞的动力分析[J]. 上海力学, 1996, 17(1): 37-44.
- [11] Glenn L A, Kidder R E. Blast Loading of a Spherical Container Surrounded by an Infinite Elastic Medium[J]. Journal of Impact Engineering, 1983, 50(10): 723-726.
- [12] Auslender F, Combescure A. Spherical elastic-plastic structures under internal explosion Approximate analytical solutions and application[J]. Engineering, structures, 2000, 22: 984-992.