

饱和砂的动孔压演化特性试验研究

王艳丽¹, 王勇²

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 利用 GDS 10 Hz/20 kN 双向振动三轴系统, 对饱和砂进行不排水动三轴液化试验, 研究了液化进程中动孔压的发展规律, 并阐述了动孔压的演化机理. 基于试验结果, 提出适用于饱和砂的动孔压应变模型. 该模型直接和动力分析中应变幅相联系, 能够弥补应力模型的不足, 并具有较好的适用性. 等压固结条件下, 动应力和固结压力对动孔压比与动应变比的关系影响较小, 动孔压发展规律可近似用同一模型表示. 不同动应力和固结压力下, 饱和砂土动孔压的增长模式用 Seed 提出的孔压应力模型描述时, 试验常数可取相同值.

关键词: 饱和砂; 动三轴; 等压固结; 动孔压

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Experimental Study on Evolutionary Characteristics of Dynamic Pore Water Pressure of Saturated Sands

WANG Yanli¹, WANG Yong²

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences State Key Laboratory and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, China)

Abstract: With the GDS 10 Hz/20 kN dynamic triaxial system undrained tests on the saturated sands during liquefaction process were performed. Development of dynamic pore water pressure of saturated sands during liquefaction process was studied and its evolution mechanism was represented. Based on the results a practical strain model of dynamic pore water pressure under isotropic consolidation was proposed. The model relates with the strain amplitude in dynamic analysis directly, which can make up for the deficiency of stress pore water pressure model and has better applicability. There is little effect on the relationship between

dynamic pore water pressure ratio and dynamic strain ratio from the variation of dynamic stress and confining pressure under isotropic consolidation and the law of dynamic pore water pressure can be described by the same model. The test constant can adopt an identical value when the characteristics of dynamic pore water pressure is described by dynamic pore water pressure model under isotropic consolidation proposed by Seed in different dynamic stresses and confining pressures.

Key words: saturated sands; dynamic triaxial test; isotropic consolidation; dynamic pore water pressure

饱和砂土是由土颗粒与孔隙水组成的多孔两相介质. 饱和砂土的液化是在一定条件下由于荷载作用导致的孔隙水压力增长的结果^[1]. 动荷载作用下孔隙水压力的变化是改变土体强度、引起土体变形的根本原因, 也是应用有效应力法分析土体稳定性的关键影响因素. 动孔压演化规律的研究日益受到人们的关注. Seed 等^[2] 根据循环三轴试验, 建立了适用于各向等压固结条件下土体孔隙水压力比与循环次数比的反正弦函数模式. 对于非等向固结情况, Finn^[3]、Chang^[4] 和徐志英^[5] 等都相继提出了修正公式. 随后陈国兴^[6]、王权民^[7]、靳建军^[8] 等通过试验分别对不同地区砂土的动力特性进行了研究, 得到了不同地区砂土的动孔压增长模型. 这类模型的共同特点是将施加的应力和孔压联系起来, 称为孔压的应力模型. 但该类模型无法解释偏应力发生卸荷时引起孔压增长的重要现象, 即反向剪缩特性^[9], 且以往的大部分研究成果仅是对实验现象的描述和对实验数据的简单拟合, 对饱和砂动孔压的演化机理尚缺乏深入研究. Martin 等^[10] 将饱和砂在不排水条件下的孔隙水压力增量与其在排水条件下体积应变的增量之间建立了联系, 称为孔压的应变模型, 可以

收稿日期: 2008-10-14

作者简介: 王艳丽(1981-), 女, 博士生, 主要研究方向为岩石渗流力学与土动力学. E-mail: wyldh@126.com

解决孔压应力模型的不足,但使用起来较复杂.近年来,随着研究的进一步深入,将循环荷载作用下动孔压与动应变建立联系的思想成为了动孔压演化研究的一个新方向^[9].

本文利用 GDS 10 Hz/20 kN 双向振动三轴系统,对饱和粉砂进行不排水动三轴液化试验.从孔隙水压力的演化机理出发,对饱和砂振动液化过程中的剪胀、剪缩、卸荷体缩等体积变化过程进行详细的分析,以此为基础,研究液化进程中动孔压的发展规律.基于实验结果,寻求一种等压固结条件下简便的孔压应变模型.该模型直接和动力分析中应变幅联系起来,可以克服应力模型的不足,并为抗震稳定性分析提供依据.

1 试验仪器、试样制备及试验方法

1.1 试验仪器

本试验设备主要为 GDS 10 Hz/20 kN 双向振动三轴系统,它是由英国 GDS 公司研制生产的高精度三轴仪,利用高速直流伺服马达施加动荷载(轴向和径向),根据电子荷重传感器和位移传感器的反馈对荷载和变形的大小进行计算机控制.其基本功能包括:①可在 10 Hz 范围内同时进行轴压和围压的循环加载(力控制式);②可在 10 Hz 范围内对试样施加循环的轴向变形(应变控制式);③可模拟复杂的静、动应力路径;④可进行常规的三轴试验,包括

拉伸和压缩试验,应力控制和应变控制;⑤可进行 K_0 (静止侧压力系数)固结和膨胀试验.通过更换底座和三轴拉伸试样帽,可适用于 39.1, 50, 70, 100 mm 直径的试样.该仪器包括:制动单元,三轴压力室和平衡器,围压控制器,反压控制器,信号控制器,高速数据采集和控制卡.设备由计算机自动采集,处理各种信号,生成相应的数据文件.

1.2 试样制备、试验方法及方案

试验所用土样为粉砂.土样的基本物性指标参见表 1.由表 1 知,试样的颗粒粒径主要集中在 0.075 ~ 0.25 mm 之间,没有出现大于 0.25 mm 的颗粒.试验采用直径 39.1 mm,高度 80 mm 的重塑土样.重塑试样的制备为多层湿捣法,分 5 层进行,控制粉砂样的干密度为 $1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.根据土样的干密度及预先设计的含水量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接触良好,成样后测量直径和高度.在三轴压力室内联合使用抽真空、通无气水和加反压 2 种方法饱和,当孔隙水压力系数 B 值达到 0.95 以上,认为试样满足饱和度要求.然后进入固结阶段,当试样的体变在 5 min 之内不再增加时认为达到了等压固结标准.随即在不排水条件下施加一定幅值的循环荷载,振动频率采用 1 Hz,直至土样的孔压达到有效围压,即土样液化为止.本试验固结压力分别采用 50, 100, 150 kPa.在一定的固结应力状态下施加 3 个不同幅值的动应力进行试验.试验操作和数据整理均参见土工试验规程.

表 1 试验土样的基本物性指标

Tab. 1 Physical indices and grain size distribution of test specimens

土样	比重 ¹⁾	含水率/%	初始孔隙比	不同粒径下的质量百分数/%		
				0.25 ~ 0.50 mm	0.075 ~ 0.250 mm	< 0.07 mm
粉砂	2.7	22	0.623	0	72	28

1) 比重为土粒的质量和 4 °C 时同体积纯水的质量的比值.

2 试验结果与分析

2.1 动孔压演化规律及分析

图 1 给出了循环荷载作用下典型的动三轴试验曲线,其中有效围压 σ'_3 为 150 kPa.循环剪应力比为 $\sigma_d/2\sigma'_3=0.25$.由图 1 可以看到,加载初期,动孔压波动频繁并随时间逐步增长,轴向应变变化幅度较小.当动孔压接近围压时,孔压时程曲线在波峰附近出现不规则凹槽,轴向应变开始大幅度增加,随后试样发生破坏.

砂土在动荷载作用下颗粒之间发生相对错动和

滑移,产生体变.体变包含 2 部分:由有效球应力变化引起的体变分量 ϵ_{vc} 和由剪应力作用引起的体变分量 ϵ_{vd} .假设砂土颗粒和孔隙水不可压缩,不排水条件下的体积相容条件为^[1]

$$\epsilon_{vc} + \epsilon_{vd} = 0 \quad (1)$$

由于在不排水振动过程中,作用在砂样上的固结应力始终维持不变,所以孔压的变化只能由剪切作用引起,即^[1]

$$\Delta u = -K_t \Delta \epsilon_{vc} = K_t \Delta \epsilon_{vd} \quad (2)$$

式中: Δu 为动孔压的变化量; K_t 为土骨架的切线体积模量.

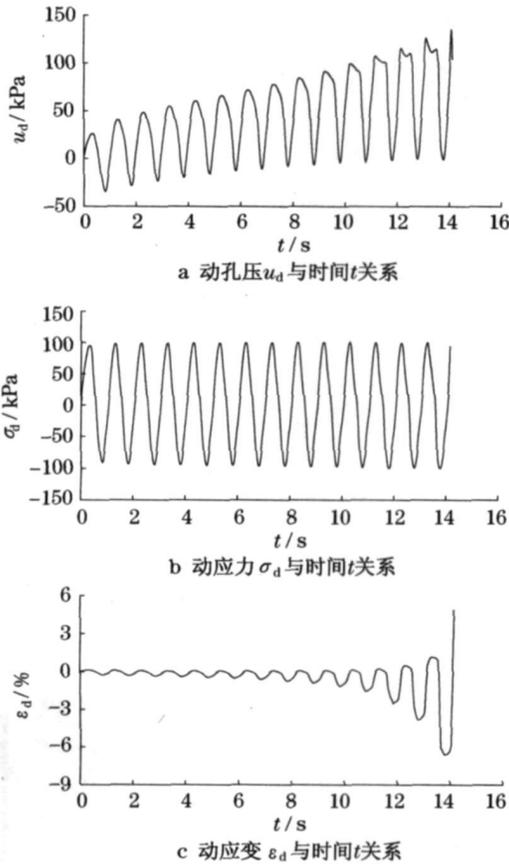


图 1 典型动三轴试验曲线

Fig. 1 Typical curves of dynamic triaxial test

由式(2)可知, 饱和砂土在循环荷载作用下孔压变化规律与体应变密切相关. 不排水条件下, 孔隙水压力的变化能够反映出土的剪胀、剪缩、卸荷体缩等变化过程^[11].

动载作用初始阶段, 砂土结构在动应力作用下进行调整, 颗粒间出现小范围的相对滑动与滚动, 剪胀与剪缩同时存在; 在不同的时刻和不同的区域, 表现为剪缩与剪胀交替出现^[12]. 当动载持续一定时间, 轴向应变和孔压累积到一定程度后, 孔压时程曲线在波峰附近出现凹槽. 图 2 为孔压曲线出现凹槽时动应力和动孔压之间的对应关系, 由图 2 可知, 动孔压随轴向压应力的增加逐步达到峰值, 砂土体积收缩. 当轴向压应力继续增加, 在达到峰值的过程中, 砂土孔压又会有小幅减小, 呈现出凹槽型曲线, 砂土表现为剪胀特性. 轴向压应力在达到峰值后开始减小, 孔压则又会有少许上升并在轴向压应力减小为零时, 达到第二个峰值, 这就是饱和砂土在循环剪切过程中所呈现的卸荷体缩特性; 当轴向拉应力

开始逐渐增加时, 砂土体积回胀, 使得孔压逐步下降. 待轴向拉应力达到最大时, 孔压跌至波谷, 这就形成一个振动循环中砂土剪缩—剪胀—卸荷体缩交替出现的现象. 这种前期累积体缩和后期加载剪胀与卸荷体缩的交替作用, 形成了饱和砂土在循环剪切作用下的循环活动性^[13]. 这种循环活动性的出现是由于砂颗粒在振动过程中相互滑移和错动, 引起孔隙大小和分布的调整, 使砂土的形状结构发生变化所引起的.

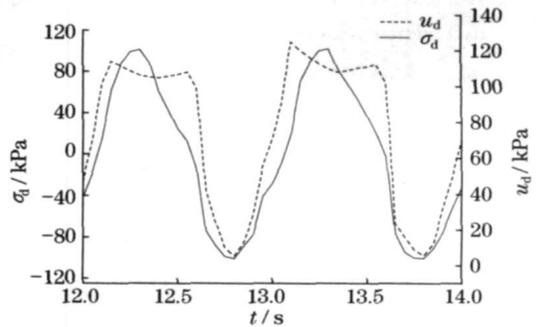


图 2 动应力 σ_d 和动孔压 u_d 之间的对应关系

Fig. 2 Corresponding relationship of dynamic stress and dynamic pore water pressure

2.2 孔压的应变模型

孔压应变模型的特点是将孔压和轴向动应变联系起来, 由典型动三轴试验曲线和上述动孔压的演化规律可知, 在一个振动周期内, 孔压变化的趋势与轴向应变变化的趋势基本一致, 且循环荷载下饱和砂的孔压增长与轴向动应变有很好的相关性. 这样就避免了孔压应力模型中无法解释偏应力发生卸荷时引起孔压增长的现象, 即反向剪缩特性的不足. 等压固结时, 不同动应力作用下动孔压比 u_d / σ'_0 与应变比 $\epsilon_d / \epsilon_{max}$ 之间的典型关系见图 3. 施加的动应力可用破坏振动次数 N_f 来隐现. 不同固结围压 σ_{3c} 作用下, 动孔压比 u_d / σ'_0 与应变比 $\epsilon_d / \epsilon_{max}$ 的关系见图 4. 其中, u_d 为振动次数为 N 的循环峰值振动孔压, σ'_0 为固结平均有效应力, ϵ_d 为振动次数为 N 的双幅轴向应变, ϵ_{max} 为试样破坏时的最大双幅轴向应变.

由图 3 可知, 在固结应力相同时, 施加不同动应力得到 u_d / σ'_0 与 $\epsilon_d / \epsilon_{max}$ 关系图上试验点的离散性较小, 说明动应力的变化对 u_d / σ'_0 与 $\epsilon_d / \epsilon_{max}$ 关系的影响相对较小, 不同动应力下 u_d / σ'_0 与 $\epsilon_d / \epsilon_{max}$ 的关系曲线可以近似地归一.

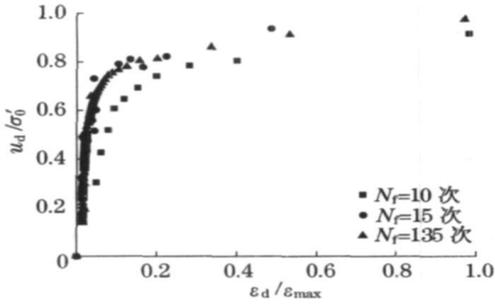


图 3 不同动应力作用下 u_d/σ'_0 与 $\varepsilon_d/\varepsilon_{max}$ 的关系

Fig. 3 Relationship between u_d/σ'_0 and $\varepsilon_d/\varepsilon_{max}$ under different dynamic stresses

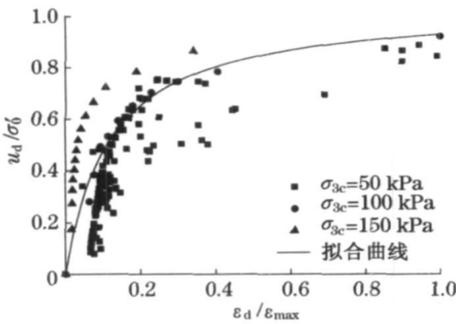


图 4 不同固结围压作用下 u_d/σ'_0 与 $\varepsilon_d/\varepsilon_{max}$ 的关系

Fig. 4 Relationship between u_d/σ'_0 and $\varepsilon_d/\varepsilon_{max}$ under different consolidation confining pressures

由图 4 可知,在等压固结条件下,动孔压的产生和发展与围压的大小关系不大.在循环荷载施加的瞬间,孔隙水压力迅速升高,当 $\varepsilon_d/\varepsilon_{max}$ 达到 0.3 左右时,孔压的增加开始趋于缓慢;直到 $\varepsilon_d/\varepsilon_{max}$ 为 1 时,孔压达到围压而发生液化.根据等压固结下粉砂动孔压的发展规律, u_d/σ'_0 与 $\varepsilon_d/\varepsilon_{max}$ 的关系可用下式来描述:

$$\frac{u_d}{\sigma'_0} = \frac{\varepsilon_d/\varepsilon_{max}}{a + b(\varepsilon_d/\varepsilon_{max})} \quad (3)$$

式中: u_d 为振动次数为 N 的循环峰值振动孔压; σ'_0 为固结平均有效应力,等压固结条件下 σ'_0 等于固结围压 σ_{3c} ; ε_d 为振动次数为 N 的双幅轴向应变; ε_{max} 为试样破坏时的最大双幅轴向应变; a, b 为双曲线参数, a 是 $u_d/\sigma'_0 - \varepsilon_d/\varepsilon_{max}$ 曲线上初始切线斜率的倒数, b 是 $u_d/\sigma'_0 - \varepsilon_d/\varepsilon_{max}$ 曲线上 u_d/σ'_0 渐近线的倒数.根据试验结果,模型参数 a 取 0.96, b 取 0.115,将 a, b 代入式(3),可得等压固结时不同围压下动孔压的应变模型.该模型简单实用,可以较好地描述饱和粉砂土等压固结时动孔压的变化规律.

2.3 孔压的应力模型

孔压应力模型的特点是将孔压和施加的应力联

系起来,施加的动应力可用破坏振次 N_f 来隐现,孔压的应力模型可用孔压比 u_d/σ'_0 和振次比 N/N_f 之间的关系来表示.等压固结条件下,不同动应力下动孔压比 u_d/σ'_0 与振次比 N/N_f 之间的典型关系见图 5.不同固结围压 σ_{3c} 作用下动孔压比 u_d/σ'_0 与振次比 N/N_f 之间的关系见图 6.由图可知,在等压固结条件下,动应力和围压的变化对 u_d/σ'_0 与 N/N_f 关系的影响都很小,在循环荷载施加的瞬间,孔隙水压力迅速升高,当 N/N_f 达到 0.15 左右时,孔压的增加趋缓;当 N/N_f 达到 0.75 左右时,孔压又开始快速增加;直到 N/N_f 为 1 时,孔压接近达到围压时,砂土发生液化.2 种情况下 u_d/σ'_0 与 N/N_f 的关系曲线与文献[2]提出的孔压模型具有相同的变化形态,可近似地归一.其表达式为

$$\frac{u_d}{\sigma'_0} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left[\left(\frac{N}{N_f} \right)^{1/2\theta} \right] \quad (4)$$

式中, θ 为试验常数,取决于土类和试验条件,而与动应力和固结围压的大小无关.本次试验中 $\theta = 1.061$ 和试验结果较为吻合.因此,可用式(4)预测饱和粉砂等压固结时动孔压的变化情况.

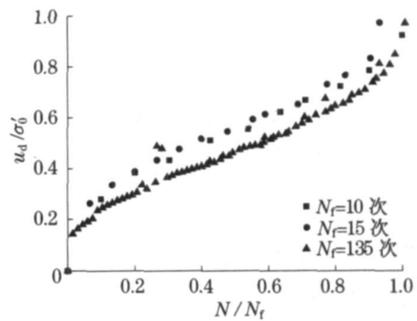


图 5 不同动应力作用下 u_d/σ'_0 与 N/N_f 的关系

Fig. 5 Relationship between u_d/σ'_0 and N/N_f under different dynamic stresses

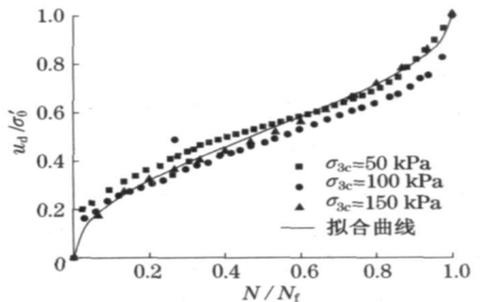


图 6 不同固结围压作用下 u_d/σ'_0 与 N/N_f 的关系

Fig. 6 Relationship between u_d/σ'_0 and N/N_f under different consolidation confining pressures

3 结论

(1) 研究了液化进程中动孔压的发展规律. 不排水条件下, 动孔压的变化与砂土的剪胀、剪缩、卸荷体缩特性密切相关.

(2) 提出了一种适用于描述饱和粉砂在等压固结条件下动孔压演化规律的孔压应变模型. 该模型将孔压和轴向动应变建立联系, 可以避免孔压应力模型的不足, 并直接和抗震稳定性分析中的变形相联系, 具有较好的适用性.

(3) 等压固结条件下, 动应力和固结压力的变化对饱和粉砂 u_d/σ'_0 与 $\epsilon_d/\epsilon_{max}$ 的关系影响较小, 动孔压的增长模式可以近似地用同一模型来描述.

(4) 不同动应力和固结压力作用下, 饱和粉砂动孔压的增长模式可以用孔压应力模型来描述, 试验常数 θ 取 1.061.

致谢 本文试验是在浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室进行的, 在此向实验室的全体工作人员在试验期间提供的热心帮助表示衷心的感谢.

参考文献:

[1] 王刚. 砂土液化后大变形的物理机制与本构模型研究[D]. 北京: 清华大学水利土木学院, 2005.
WANG Gang. Research on physical fundamentals and constitutive model of large post-liquefaction deformation of sand[D]. Beijing: Tsinghua University, School of Civil Engineering, 2005.

[2] Seed H B, Martin P P, Lysmer J. Pore-water pressure changes during soil liquefaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering, 1976, 102(4): 323.

[3] Finn W D L, Lee K W, Maartman C H et al. Cyclic pore pressures under an isotropic conditions[C] // Proceedings of American Society of Civil Engineering Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics. New York: ASCE, 1978: 451-471.

[4] Chang S C, Kuo C L, Selig E T. Pore-water pressure changes during cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering

Division, American Society of Civil Engineering, 1983, 109(4): 103.

[5] 徐志英, 沈珠江. 地震液化的有效应力二维动力分析方法[J]. 河海大学学报, 1981(3): 1.
XU Zhiying, SHEN Zhujiang. 2-D dynamic analysis of effective stresses of seismic liquefaction [J]. Journal of Hohai University, 1981(3): 1.

[6] 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.
CHEN Guoxing, LIU Xuezh. 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.

[7] 王权民, 李刚, 陈正汉, 等. 厦门砂土的动力特性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1628.
WANG Quanmin, LI Gang, CHEN Zhenghan, et al. Research on dynamic characteristics of sands in Xiamen city[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1628.

[8] 靳建军, 张鸿儒. 砂土液化特性 MTS 动三轴试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(4): 60.
JIN Jianjun, ZHANG Hongru. Study on sand liquefaction characteristics by MTS dynamic tri-axial test[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2006, 30(4): 60.

[9] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
XIE Dingyi. Soil dynamics [M]. Xi' an, Xi' an Jiaotong University Press 1988.

[10] Martin G R, Finn W D L, Seed H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering, 1975, 101(S): 423.

[11] 何杨, 栾茂田, 许成顺, 等. 复杂应力条件下松砂振动孔隙水压力与体变特性的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(6): 127.
HE Yang, LUAN Maotian, XU Chengshun, et al. Experimental study on cyclic pore water pressure and volumetric changes of saturated loose sands under complex stress condition [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(6): 127.

[12] 周海林, 王星华. 动三轴实验中的饱和砂土孔隙水压力分析[J]. 铁道学报, 2002, 24(6): 93.
ZHOU Hailin, WANG Xinghuan. Study on the pore water pressure of saturated sand in dynamic triaxial test[J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(6): 93.

[13] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
WANG Wenshao. The dynamic strength and liquefaction characteristics of soil[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.