

含细粒饱和砂土的液化特性研究综述

丰土根^{1,2}, 钱秋莹^{1,2}, 张福海^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:综述了国内外有关含粉粒饱和砂土和含黏粒饱和砂土液化特性的试验研究成果,对于含粉粒饱和砂土,粉粒质量分数、粉粒粒径和砂骨架颗粒级配对饱和砂土的液化特性影响显著,粉粒的存在或可以增加或降低含粉粒饱和砂土的动强度,或存在临界粉粒质量分数使饱和砂土的动强度随粉粒质量分数的增加呈非单调性变化;对于含黏粒饱和砂土,临界黏粒质量分数使饱和砂土的抗液化强度随粉粒质量分数的增大先减小再增大;黏粒的塑性指数对饱和砂土的抗液化强度有较大影响;不同颗粒组成的饱和砂土对塑性指数的反应不尽相同。

关键词:饱和砂土;粉粒质量分数;黏粒质量分数;塑性指数;液化特性;综述

中图分类号:TU435 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)04-0089-06

Review of liquefaction properties of saturated sands containing fines//FENG Tugen^{1,2}, QIAN Qiuying^{1,2}, ZHANG Fuhai^{1,2}(1. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract:In this review, we present the main researches on liquefaction characteristics of saturated sand containing silt or clay. The research results show that silt content, silt particle size and sand grain composition have a great impact on liquefaction characteristics of saturated sand containing silt. The liquefaction resistance of saturated sand containing silt may increase or decrease as silt content increases. In some cases, there might exist a limit silt content such that the dynamic strength of sand containing silt changes non-monotonously as the silt content increases. For sand-clay mixtures, the liquefaction resistance initially decreases as the clay content increases and then turn to increase as the clay content continues to increase. Liquefaction characteristics of clay sand greatly relate to plasticity index (PI) of clay particles. Sand in different grain composition situations may have different reactions to PI values of clay particles.

Key words: saturated sand; silt content; clay content; plasticity index; liquefaction characteristic; review

自20世纪60年代以来,地震活动频繁,引发国内外学者对地震荷载作用下饱和土体的液化现象进行了深入研究,其中对饱和砂土的液化特性研究成为岩土工程界的热点问题。在过去50年中,对地震荷载作用下饱和砂土的液化强度特性、变形特性、孔压发展规律及相关影响因素等方面的研究比较深入,并取得了一系列丰硕的成果。这些研究成果大多建立在纯砂的基础上,对于含细粒饱和砂土(如粉细砂、砂质粉土等)的液化特性研究尚显不足。

实际上,自然界中纯砂并不多见。据多数地震资料显示,由地震活动引发的地基液化现象多发生在以含粉质砂土和砂质粉土等砂粉混合的水力回填土层、海岸线附近的自然沉积冲积土层。这类土层在颗粒的组成上与纯砂有明显不同,含细粒的砂性

土或砂质粉土等砂粉混合土的液化特性也明显有别于纯砂的液化特性,将适用于纯砂的液化理论完全套用于此类砂粉混合土的液化问题是不科学的。因此,对含细粒的非纯砂土的液化特性研究具有一定的针对性和科学适用性。

1 含粉粒饱和砂土的液化特性研究

自然界中的砂土普遍含有细粒(粒径小于0.075 mm的颗粒),主要包括黏粒和粉粒。Mogami等^[1]最早研究发现含细粒砂土存在液化敏感性;Lee等^[2]通过室内试验研究证明含细粒砂土也会发生液化现象;随后Lee等^[3]相继提出黏粒和粉粒对土动力强度的影响;Carraro等^[4]通过试验研究发现饱和砂土的临界状态摩擦角和峰值应力随着粉粒质量

分数的增大而增大,而随黏粒质量分数的增大而减小,小应变剪切模量随两者质量分数的增大均呈减小趋势,其中粉粒质量分数对小应变剪切模量的影响更为显著。由此可知,粉粒和黏粒的存在对饱和砂土的强度特性均有影响,但各自的影响作用有所差别,有必要进行分别研究。

1.1 粉粒质量分数对饱和砂土液化特性的影响

粉质砂土是现场最为常见的具有液化敏感性的砂土地基,与纯砂在一般情况下随围压的增加而产生体积压缩性有所不同,粉质砂土在围压作用下常发生反向行为,表现为剪胀性。Lade 等^[5]研究指出含粉粒砂土比纯砂更易于发生液化现象,其抗液化强度随围压的增大而降低。近年来国内外有关粉粒质量分数对饱和砂土液化特性影响的研究已取得诸多成果,然而所得结论不尽相同。

Troncoso 等^[6]对相同孔隙比条件下的尾矿砂进行不同粉粒质量分数(0~30%)影响的循环剪切试验,表明在孔隙比不变的情况下,循环抗剪强度随粉粒质量分数的增大而减小,Finn 等^[7-13]随后亦曾得出类似结论;Chang 等^[14-17]通过试验研究认为粉粒质量分数的增大会提高饱和砂土的抗液化能力;Law 等^[18-19]研究表明,含粉粒饱和砂土的抗液化强度先随粉粒质量分数的增大而减小,当抗液化强度达到某一最小值时又随粉粒质量分数的增大而逐渐提高,并定义使强度趋势发生改变时的粉粒质量分数为临界粉粒质量分数。显然以上结论并不完全相同,甚至有的观点存在较大分歧,这与各学者研究过程中所采用的试验条件和砂土试样等因素密切相关。通过这些不同的试验结果可知,粉粒对饱和砂土的影响并不完全受粉粒质量分数这一参数控制,其不同试验条件和试样条件下对饱和砂土液化特性的影响研究仍有待进一步深入。

针对上述情况,Polito 等^[20]采用两种不同类型的砂(蒙特利砂,砂粒形状介于角粒和圆粒之间,粒径为0.18~0.84 mm, $d_{50}=0.43$ mm;伊利诺州砂,砂粒形状介于角粒和圆粒之间,粒径小于0.84 mm, $d_{50}=0.18$ mm),通过控制砂样类型、粉粒质量分数、砂样相对密度、砂骨架孔隙比和砂间孔隙比等因素,研究粉粒质量分数在不同因素条件下对含粉粒饱和砂土的动强度影响。试验结果表明,当以砂间孔隙比为控制条件时,两种类型砂土的动强度特性相似,表现为存在临界粉粒质量分数使砂土的动强度呈非单调变化,其动强度均先随粉粒质量分数的增大而降低,当粉粒质量分数继续增大并超过35%时,饱和砂土的动强度又随粉粒质量分数的增大呈缓慢增涨趋势,在粉粒质量分数相同的条件下,两种类型下砂土

的动强度均随砂间孔隙比的增大而降低;当以砂骨架孔隙比为控制条件时,两种类型砂样对粉粒质量分数的动力响应表现出不同特性,表现为蒙特利砂的动强度不随粉粒质量分数的增大而变化,而伊利诺州砂的动强度随粉粒质量分数的增大有所提高。Polito 据此进一步指出,当粉粒质量分数较小且低于临界粉粒质量分数时,粉粒被包裹在砂骨架中,此时砂土的动强度主要由相对密度控制,随相对密度的增大而提高,与粉粒质量分数无关;当粉粒质量分数较大,砂粒被较多粉粒包围时,砂土的动强度则由粉粒质量分数和相对密度控制,此时与砂土的类型和粉粒质量分数无关。Xenaki 等^[21]进一步研究证实临界粉粒质量分数的存在,并表明在砂间孔隙比一定的条件下,使饱和砂土抗液化强度最低的粉粒质量分数一般为30%~44%。

我国对含粉粒饱和砂土的研究起步较晚,目前仍主要研究粉粒质量分数对饱和砂土强度和孔压特性的单一影响。朱建群等^[22]对低粉粒质量分数的片状砂抗剪强度特征进行了研究,试验表明粉粒质量分数对粉砂的颗粒组成和结构具有重要作用,主要影响粉砂的强度和变形。通过对粉粒质量分数为0.6%、9%、12%和15%的5组砂土试样进行三轴固结不排水试验,表明当粉粒质量分数为6%、9%和12%时,松散粉砂土均出现静态液化现象,当粉粒质量分数为15%时该现象消失;并指出当粉粒质量分数从0~9%时,试样稳定性逐渐减弱,而超过9%以后试样的稳定性随粉粒质量分数的提高而逐渐升高。由此进一步证实了临界粉粒质量分数的存在。王艳丽等^[23]通过对不同细粒质量分数(0~45%)的定量分析,以粒径为0.075~0.250 mm的南京地区粉细砂为砂骨架,探讨细粒(粒径小于0.075 mm)质量分数对饱和砂土动孔压的影响。结果表明,细粒质量分数对砂土孔压发展影响较大,其影响主要体现在孔压发展过程中模型函数的拟合参数不同,其拟合参数随细粒质量分数的增大先减小,在细粒质量分数为30%时达到最小值;之后随细粒质量分数的增大逐渐增大,但其后的增大趋势较平缓。其试验过程中孔压模型的拟合参数与细粒质量分数的关系揭示了粉粒质量分数对饱和砂土孔压发展的影响机制,结果如图1所示。

1.2 颗粒组成对饱和砂土液化特性的影响

国外学者较早发现含细粒饱和砂土的砂骨架颗粒级配不同,饱和砂土就表现出不同的液化特性。Rahman 等^[24]对砂骨架颗粒级配不同而粉粒质量分数相同的两组试样进行三轴加载试验,试验结果表明,在相同的粉粒质量分数及试验条件下,含粉粒饱

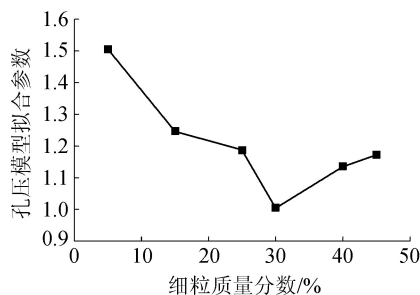


图1 孔压模型拟合参数与细粒质量分数的关系曲线

和砂土的抗液化强度随着砂骨架颗粒级配不均匀系数的增大而增大,二者呈单调增加关系。

Monkul 等^[25]对砂骨架颗粒级配相同、粉粒粒径不同的3组试样进行不排水的三轴压缩试验,指出平均粒径比(即砂骨架的颗粒平均粒径与粉粒平均粒径之比)对含粉粒饱和砂土的液化性能具有重要的影响,与粉粒质量分数存在交叉影响;当平均粒径较小时,随着粉粒质量分数(0~20%)的增大,饱和砂土的液化可能性呈增大趋势;当平均粒径较大时,随着粉粒质量分数的增大,饱和砂土的液化可能性呈先增大后减小的变化规律;在一定条件下,含粉粒饱和砂土的液化可能性会低于纯砂的液化可能性。由此表明粉粒的粒径大小对含粉粒饱和砂土的液化特性有着较大的影响。

Monkul^[26]在进一步分析粉粒对粉细砂液化特性的主要影响因素时明确指出,砂骨架中所含粉粒的粒径大小是除粉粒质量分数之外影响粉细砂液化特性的最主要因素,这主要是由于不同粒径的粉粒颗粒将构成粉细砂的不同物理结构,从而影响粉细砂的液化特性。并由此提出可通过砂粒骨架和粉粒颗粒的平均粒径比(D_{50}/d_{50})来衡量含不同粉粒的砂土的液化特性。其试验研究表明,当所含粉粒的质量分数相同时,砂样的抗液化强度随平均粒径比的减小有显著降低。

基于以上含粉粒饱和砂土的研究现状可知,粉粒质量分数、砂土类型、砂骨架颗粒级配、粉粒粒径等因素对饱和砂土液化特性存在相互交叉影响,不同试验条件下的结论有相对局限性,对以上各因素间的相互交叉作用仍有待更全面的深入研究。

2 含黏粒饱和砂土的液化特性研究

Mitchell^[27]曾指出,粒径较小的黏土颗粒在相对较粗的砂粒骨架中,并不承担颗粒间的动力传递作用,属于非活动性因素,可近似当作孔隙来看待。后来的学者也普遍将黏粒当作砂粒间的孔隙来研究。直到1990年,Georgiannou 等^[28]对含高岭土的饱和砂样进行了三轴压缩和拉伸试验,试验表明,含

黏粒砂与纯砂相比,表现出更不稳定的性状。之后学者们才开始从黏粒组成及黏粒的相关性质方面对土的液化特性影响进行研究。

2.1 黏粒质量分数对饱和砂土液化特性的影响

Perlea 等^[29]对不同黏粒质量分数的饱和砂土进行三轴试验,在相同试验条件下,饱和砂土的抗液化强度与黏粒质量分数呈非单调变化关系,当饱和砂土中黏粒的质量分数低于15%时,饱和砂土的抗液化强度随黏粒质量分数的增大而减少;当黏粒质量分数超过20%时,饱和砂土的抗液化强度又随黏粒质量分数的增大而逐渐增大。

Ghahremani 等^[30]对不同高岭石黏粒质量分数(10%~50%)的饱和砂土进行循环三轴试验,在孔隙比相同的条件下,含黏粒饱和砂土的动强度随黏粒质量分数的增大不断减小,当黏粒质量分数为30%时减到最小,其后随着黏粒质量分数的增大而不断增大。

吴建平等^[31]对黏粒质量分数小于9%的重塑砂土进行了自振柱和动三轴试验研究,探讨黏粒质量分数(0~9%)对饱和砂土剪切模量和液化势的影响。试验结果表明,当黏粒质量分数小于9%时,含黏粒饱和砂土的动剪切模量随黏粒质量分数的增大而减小,其抗液化性能也逐渐下降。

衡朝阳等^[32]研究了黏粒质量分数对饱和砂土动剪应力比的影响,通过对3组不同黏粒质量分数及不同黏粒成分的试样进行室内动三轴试验,指出饱和砂土的动剪应力比与所含黏粒的矿物成分无关,与黏粒质量分数的关系曲线总是向上开口的抛物线形;当黏粒质量分数为9%左右时,动剪应力比最小,饱和砂土的抗液化强度最小。

刘雪珠等^[33]对黏粒质量分数为5%、10%和15%的3种南京片状粉细砂进行液化研究,表明黏粒质量分数对南京粉细砂的抗液化强度影响较大且呈非单调变化,当黏粒质量分数为10%时抗液化强度达到一个低谷;动剪应力比与黏粒质量分数的关系曲线呈向上开口的近似抛物线形。

潘剑峰等^[34]通过对含黏粒的粗细粒混合砂土(粗颗粒粒径为1~2mm,细颗粒为不小于0.075mm的黏粒)进行动三轴试验,试验结果进一步表明土样的动强度并不是随黏粒质量分数单调增加的,当黏粒质量分数为10%~20%时,动强度最低,抗液化性能最弱;当黏粒质量分数大于30%时,混合砂土的动强度相对较高,抗液化性能较好。

由以上试验研究成果可知,不同类型的饱和砂土对黏粒质量分数的响应基本一致,其动强度随黏粒质量分数的增大都表现为先减小后增大的趋势,

使动强度发生变化的黏粒质量分数一般为 9% ~ 20%。

2.2 塑性指数对饱和砂土液化特性的影响

除黏粒质量分数外,塑性指数也是分析黏粒性质的重要指标。砂土中所含黏粒的塑性指数不同,黏粒对砂土液化特性的影响也可不同。Ghahremani 等^[30,35]分别对两种黏粒质量分数的饱和砂土进行了循环三轴试验,研究黏粒的塑性指数对饱和砂土抗液化强度的影响。试验结果表明,当塑性指数为 19% ~ 48% 时,不同黏粒质量分数的饱和砂土的动强度都随黏粒塑性指数的增大而增大。

Sadek 等^[36]对黏粒质量分数为 10%、相对密度为 60% 的饱和砂土进行了动循环三轴试验,试验结果表明塑性指数对于含黏粒饱和砂土的液化特性影响是非单调的,存在一个临界值,约为 11%;当塑性指数低于 11% 时,含黏粒饱和砂土的动强度随塑性指数增大而减少;当塑性指数超过 11% 以后,动强度才随塑性指数的增大而增大,且增幅较小,试验得出的抗液化强度曲线如图 2 所示。

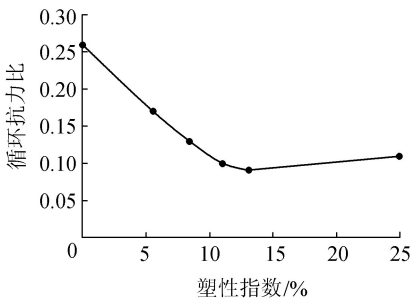


图 2 含黏粒饱和砂土的抗液化强度曲线

Park 等^[37]分别对黏粒质量分数为 10% 的饱和松砂、中砂和密砂进行了塑性指数与抗液化强度的相关性研究,指出不同密实度砂土的动强度都随黏粒塑性指数的增大而有不同程度的减小;但塑性指数的增大对松砂和中砂的动强度影响较小,而对密砂的影响却相当显著,随塑性指数的增大,密砂的动强度可降低 40%。

由以上成果可知,塑性指数对饱和砂土液化特性的影响有着不可忽视的作用,但其对不同类型砂土的影响作用不尽相同,对砂土液化特性的影响机制仍有待进一步深入研究。

3 研究展望

纯砂与含细粒砂土的液化特性明显不同,含粉粒砂土和含黏粒砂土的液化特性也有较大差别,以往基于纯砂的液化特性研究理论并不完全适用于含细粒砂土。从现有成果分析,不同的研究者均以自己所用试验砂样的试验成果为主要结论依据,具有

一定片面性和局限性。对细粒质量分数的研究主要以国外学者居多,我国学者在这方面的研究相对较少,且研究的内容较为单一。因此对含细粒砂土的液化特性研究仍显得任重而道远,以下几个方面仍有待完善:

a. 细粒效应的微观研究在国外岩土界已得到较多的重视^[24-26,38],我国对于细粒的微观研究关注较少,对含细粒饱和砂土的研究仍主要局限于细粒质量分数和细粒种类等宏观方面的影响,尚未进一步深化到颗粒组成等微观层面上。因此,有必要对含细粒饱和砂土的微观结构特性进行深入研究,考虑微观机理的作用。

b. 我国地域宽广,境内分布的砂土类型较多、差异较大,圆粒、片状、角粒等类型都有不同程度的分布,所以有必要建立起以国内分布的砂土类型为依据的液化分析理论,可以按区域划分,选择代表性砂样进行研究,建立不同地区的液化判别标准体系,进一步探讨含细粒饱和砂土的细粒效应和细粒作用,以更好地指导工程实践。

c. 目前对饱和砂土液化特性的数值模拟主要基于均匀纯砂试样的试验结果,没有涉及含细粒饱和砂土的液化特性分析,今后应对含细粒饱和砂土的本构模型进行深入研究,建立适用于含细粒饱和砂土的本构模型理论体系,以推动含细粒砂土的数值模拟的研究发展。

参考文献:

[1] MOGAMI T, KUBO K. The behavior of soil during vibration procedure [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanical and Foundation. Zurich: [s. n.], 1953:152-153.

[2] LEE K L, SEED H B. Cyclic stress conditions causing liquefaction of sand [J]. Soil Mechanical and Foundations, 1967, 93 (1): 47-70.

[3] LEE K L, FITTON J A. Factors affecting the cyclic loading strength of soil [C]//Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication, 1968: 71-95.

[4] CARRARO J A H, PREZZI M, SALGADO R. Shear strength and stiffness of sands containing plastic or nonplastic fines [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135 (9): 1167-1178.

[5] LADE P V, YAMAMURO J A. Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34 (6): 918-928.

[6] TRONCOSO J H, VERDUGO R. Silt content and dynamic behavior of tailing sands [C]//Proceedings of the 11th

- International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco: Taylor & Francis, 1985;1311-1314.
- [7] FINN W D L, LEDBETTER R H, WU G. Liquefaction in silty soils: design and analysis [C]//Ground failures under seismic conditions. New York: Geotechnical Special Publication, 1994;51-76.
- [8] VAID V P. Liquefaction of silty soils [C]//Ground Failures Under seismic Conditions. New York: Geotechnical Special Publication, 1994:1-16.
- [9] KUERBIS R, NEGUSSEY D, VAID V P. Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand [C]//Hydraulic Fill Structures. New York: Geotechnical Special Publication, 1988;330-345.
- [10] LADE P V, YAMANMURO J A. Effects of nonplastic fines on static liquefaction sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 918-928.
- [11] YAMANMURO J A, LADE P V. Static liquefaction of very loose sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 905-917.
- [12] ZLATOVICI S, ISHIHARA K. Normalized behavior of very loose nonplastic soil: effects of fabric [J]. Soils and Foundation, 1997, 37(4): 47-56.
- [13] BAHADORI H, GHALANDARZADEH A, TOWHATA I. Effect of non plastic silt on the anisotropic behavior of sand [J]. Soils and Foundations, 2008, 48(4): 531-545.
- [14] CHANG N Y, YE H S T, KAUFMAN L P. Liquefaction potential of clean and silty sands [C]//Proceedings of the 3rd International Earthquake Microzonation Conference. Seattle: [s. n.], 1982;1017-1032.
- [15] DEZFULIAN H. Effects of silt content on dynamic properties of sandy soils [C]//Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering. San Francisco: Prentice-Hall, 1984;63-70.
- [16] AMINI F, QI G Z. Liquefaction testing of stratified silty sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(3): 208-217.
- [17] SALGADO R, BANDINI P, KARIM A. Shear strength and stiffness of silty sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5): 451-462.
- [18] LAW K T, LING Y H. Liquefaction of granular soils with noncohesive and cohesive fines [C]//Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering. Madrid: CRC Press, 1992;1491-1496.
- [19] KOESTER J P. The influence of fine type and content on cyclic resistance [C]//Ground Failures under Seismic Conditions. New York: Geotechnical Special Publication, 1994;17-33.
- [20] POLITO C P, MARTIN J R. Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(5): 408-415.
- [21] XENAKI V C, ATHANASOPOULOS G A. Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: an experimental investigation of the effect of fines [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23: 183-194.
- [22] 朱建群, 孔令伟, 钟方杰. 粉粒含量对砂土强度特性的影响 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1647-1652. (ZHU Jianqun, KONG Lingwei, ZHONG Fangjie. Effect of fines content on strength of silty sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(11): 1647-1652. (in Chinese))
- [23] 王艳丽, 饶锡保, 潘家军, 等. 细粒含量对饱和砂土动孔压演化特性的影响 [J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(3): 52-56. (WANG Yanli, RAO Xibao, PAN Jiajun, et al. Effects of fines content on evolutionary characteristics of dynamic pore water pressure of saturated sands [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(3): 52-56. (in Chinese))
- [24] RAHMAN M M, LO S R. Effect of sand gradation and fines type on liquefaction behavior of sand-fines mixture [C]//Proceedings of Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV. Sacramento, California: Geotechnical Special Publications, 2008;1-11.
- [25] MONKUL M M, YAMAMURO J A. Influence of silt size and content on liquefaction behavior of sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(6): 931-942.
- [26] MONKUL M M. On some of the factors influencing the fines' role on liquefaction of silty sands [C]//GeoCongress 2012. San Francisco: Curran Associates Incorporated, 2012;799-808.
- [27] MITCHELL J K. Fundamental of soil behavior [M]. New York: John Wiley & Sons Incorporated, 1976.
- [28] GEORGIANNOU V N, BURLAND J B, HIGHT D W. The undrained behavior of clayey sands in triaxial compression and extension [J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 431-449.
- [29] PERLEA V G, KOESTER J P, PRAKASHA K S. How liquefiable are cohesive soils [C]//Proceedings of second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Lisbon: [s. n.], 1999;611-618.
- [30] GHAHREMANI M, GHALANDARZADEH A. Effect of plastic fines on cyclic resistance of sands [C]//Soil and Rock Behavior and Modeling: Proceedings of Sessions of GeoShanghai. New York: ASCE, 2006;406-412.
- [31] 吴建平, 吴世明. 重塑含粘粒砂土的动模量和液化势 [J]. 浙江大学学报: 自然科学版, 1988, 22(6): 13-19. (WU Jianping, WU Shiming. Dynamic modulus and liquefaction potential of remolded sand with small amount of clay particles [J]. Journal of Zhejiang University: Natural Science, 1988, 22(6): 13-19. (in Chinese))
- [32] 衡朝阳, 何满潮, 裘以惠. 含粘粒砂土抗液化性能的试验研究 [J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 339-344.

- (HENG Chaoyang, HE Manchao, QIU Yihui. Experimental study of liquefaction-resistant characteristics clayey sand [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9 (4) : 339-344. (in Chinese))
- [33] 刘雪珠,陈国兴. 粘粒含量对南京粉细砂液化影响的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23 (6) : 150-155. (LIU Xuezhu, CEHN Guoxing. Experimental study on influence of clay particle content on liquefaction of Nanjing fine sand [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23 (6) : 150-155. (in Chinese))
- [34] 潘剑锋,刘喜康,王力,等. 粗细粒混合土液化特性研究综述[J]. 四川水利, 2010 (6) : 41-42. (PAN Jianfeng, LIU Xikang, WANG Li, et al. Review of the liquefaction properties of coarse-fine mixture soils [J]. Sichuan Water Resource, 2010 (6) : 41-42. (in Chinese))
- [35] GHAHREMANI M, GHALANDARZADEH A, MORADI M. Effect of plastic fines on the undrained behavior of sands [C]//Soil and Rock Behavior and Modeling: Proceedings of Sessions of GeoShanghai. New York: ASCE, 2006: 48-54.
- [36] SADEK S, SALEH M. The effect of carbonaceous fines on the cyclic resistance of poorly graded sands [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25 (2) : 257-264.
- [37] PARK S S, KIM Y S. Liquefaction resistance of sands containing plastic fines with different plasticity [J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (5) : 825-830.
- [38] MONKUL M M, YAMAMURO J A. The effect of nonplastic silt gradation on the liquefaction behavior of sand [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. San Diego, California: [s. n.], 2010: 23-26.

(收稿日期: 2013 - 07 - 04 编辑: 周红梅)

(上接第 88 页)

- [31] DICKEY T D. An experiment study of decaying and diffusing turbulence in neutral and stratified fluids [D]. Princeton: Princeton University, 1977.
- [32] MELLOR G L. One-dimensional, ocean surface layer modeling: a problem and a solution [J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31 (3) : 790-809.
- [33] RASCLE N, CHAPPON B, ARDHUIN F, et al. A note on the direct injection of turbulence by breaking waves [J]. Ocean Modelling, 2013, 70: 145-151.
- [34] 张敬. 海岸、河口区三维近岸环流与物质输运数值研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [35] QIAO F, YUAN Y, YANG Y, et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: distribution and application to a global ocean circulation model [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31 (11) : L11303. 1-L11303. 4.
- [36] CRAIG P D, BANNER M L. Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer [J]. Journal of Physical Oceanography, 1996, 26 (5) : 2546-2559.
- [37] TERRAY E A, DONELAN M A, Agrawal Y C, et al. Estimates of kinetic energy dissipation under breaking waves [J]. Journal of Physical Oceanography, 1996, 26 (5) : 792-807.
- [38] TERRAY E A, DRENNAN W M, DONELAN M A. The vertical structure of shear and dissipation in the ocean surface layer [C]//Csanady G T. Proceeding of symposium on air-sea interaction. Sydney: University of New South Wales, 2000: 239-245.
- [39] SOLOVIEV A, LUKAS R. Observation of wave-enhanced turbulence in the near surface layer of the ocean during TOGA COARE [J]. Deep Sea Research, 2003, 50 (3) : 371-395.
- [40] GEMMICH J R, FARMER D M. Near-surface turbulence in the presence of breaking waves [J]. Journal of Physical Oceanography, 2004, 34 (5) : 1067-1086.
- [41] KUDRYAVTSEV V, SHRIRA V, DULOV V, et al. On the vertical structure of wind-driven sea currents [J]. Journal of Physical Oceanography, 2008, 38 (10) : 2121-2144.
- [42] SULLIVAN P P, MCWILLIAMS J C, MELVILLE W K. The oceanic boundary layer driven by wave breaking with stochastic variability, part 1: Direct numerical simulation [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 507: 143-174.
- [43] SULLIVAN P P, MCWILLIAMS J C, MELVILLE W K. Surface gravity wave effects in the oceanic boundary layer: large-eddy simulation with vortex force and stochastic breakers [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 593: 405-452.

(收稿日期: 2013 - 07 - 04 编辑: 周红梅)

