

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202107005

# 基于基本物理指标的饱和砂类土液化评价方法的通用性\*

吴琪<sup>1,2</sup>, 李浩<sup>1</sup>, 陈国兴<sup>1,2</sup>

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 210009; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏南京 210009)

**摘要:** 基于基本物理指标的饱和砂类土液化评价方法, 包括等效骨架孔隙比的确定及液化强度参数预测公式, 理论上已经被证实是有效的, 但其通用性和敏感性尚需检验。通过独立试验数据, 验证该液化评价方法的适用性和可靠性, 分析试样尺寸、制样方法、液化判别标准、测试方法以及试验人员熟练程度等因素对预测准确性的影响, 并探讨细粒影响系数  $b$  值确定方法对拟合参数及预测误差的影响。结果表明: 基于基本物理指标的饱和砂类土液化评价方法适用于不同地域的砂类土的液化评价; 试验条件差异略微增大评价方法的预测误差, 但液化强度最大预测误差小于 21%, 且有 50% 的液化强度预测误差小于 10%。 $b$  值的确定方法对液化强度预测的准确性影响较小, 呈现出较低敏感性。

**关键词:** 砂类土; 液化强度; 基本物理指标; 预测误差

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0883-10

## Applicability of the Evaluation Method for Saturated Sandy Soil Liquefaction based on Basic Physical Index

WU Qi<sup>1,2</sup>, LI Hao<sup>1</sup>, CHEN Guoxing<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** The established evaluation method for liquefaction resistance of saturated sandy soils based on basic physical index, including the determination of equivalent skeleton void ratio and prediction formula of liquefaction resistance parameters, has been proven to be effective in theory, but its applicability and sensitivity need to be verified. The influence of sample size, preparation method, liquefaction criterion, test category and proficiency of testers on forecast accuracy were analyzed, and the effect of the fine-grain influence coefficient  $b$ -value determination methods on the fitting parameters and prediction errors was also investigated. The results indicate that the evaluation method for saturated sandy soils liquefaction resistance based on basic physical indicators is applicable to sandy soils distributed in different regions. Test conditions deviation will slightly increase the prediction error of the evaluation method, but the maximum prediction error is still less than 21%, in which most of the predic-

\* 收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2021-08-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504301)、国家自然科学基金项目(52008206)资助

作者简介: 吴琪(1991—), 男, 讲师, 硕导, 博士。主要从事混合料动力特性研究。E-mail: qw09061801@163.com

通讯作者: 陈国兴(1963—), 男, 教授, 博士。主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: gxc6307@163.com

tion errors are less than 20%, and 50% of the liquefaction resistance test prediction errors are less than 10%. The b-value determination method has little effect on the accuracy of the prediction, showing low sensitivity. This evaluation method for liquefaction resistance can be popularized and applied in actual engineering.

**Keywords:** sandy soil; liquefaction resistance; basic physical index; prediction errors

## 引言

我国地震活动的主要特点是频度大、强度大、震源浅、分布广。依据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)<sup>[1]</sup>,地震烈度Ⅶ度及以上地区的面积占国土面积的59%,地震烈度Ⅷ度及以上地区的面积占国土面积的18%,28个省会城市和超过2/3的百万人以上城市位于Ⅶ度以上高烈度区域,且全部国土面积均处于地震烈度Ⅵ度及以上地区。多次地震现场调查发现,场地土液化是地震破坏严重的重要原因之一。土体液化可以引起地表喷砂冒水、地表裂缝、侧向位移或滑坡、地面沉陷等现象,从而引起建筑物沉降或倾斜、地下管线与水槽上浮、河岸侧移与桥梁倒塌、堤坝/堤岸滑坡、地下结构与码头设施损坏等。然而,1964年美国阿拉斯加地震、1995年日本阪神地震、1999年中国台湾集集地震、2008年中国汶川地震以及2011年东日本大地震等都发现<sup>[2-6]</sup>:液化砂土并非仅限于纯砂,具有不同细粒含量 $FC$ (粒径小于0.075 mm的土颗粒质量百分比)的砂类土也会发生液化。

T.Mogami等<sup>[7]</sup>较早发现饱和砂类土存在液化敏感性;K.L.Lee等<sup>[8]</sup>的试验结果表明含细粒的砂也会发生液化现象。J.H.Trancoso等<sup>[9]</sup>分析表明:当孔隙比 $e$ 为定值时,液化强度 $CRR$ (对于应力控制不排水循环加载试验, $CRR$ 定义为在给定循环次数下使饱和土样发生初始液化所需施加的循环应力比 $CSR$ )随 $FC$ 的增大而减小。随后,R.Kuerbis等<sup>[10]</sup>亦曾得出类似结论。与上述结论不同,刘雪珠等<sup>[11]</sup>、周健等<sup>[12]</sup>研究结果表明:砂类土的 $CRR$ 随 $FC$ 的增加先降低后增强,但值得关注的是,各类砂类土的 $CRR$ 达到最小值所需的 $FC$ 有显著差异。此外,C.P.Polito等<sup>[13]</sup>指出: $CRR$ 与 $e$ 或 $D_r$ 没有明显的相关性。W.J.Chang等<sup>[14]</sup>的研究结果表明: $FC$ 的增加会显著提高砂类土的 $CRR$ 。吴琪等<sup>[15]</sup>研究了 $FC$ 对不同密实状态的砂类土 $CRR$ 的影响,试验表明:当 $D_r=30\%$ 时(松散), $CRR$ 随 $FC$ 的增大先减小后

基本保持不变;当 $D_r=50\%$ (中密)和 $70\%$ (密实)时, $CRR$ 随 $FC$ 的增大先减小后略有增大,这与M.E.Karim等<sup>[16]</sup>的试验结果一致。综上可知, $FC$ 是砂类土 $CRR$ 最为重要的影响因素之一,但其影响规律不尽相同。

近年来,随着对砂类土液化强度影响因素认识的深入,多位学者尝试建立饱和砂类土液化强度评价方法。Y.T.Huang等<sup>[17]</sup>与A.Papadopoulou等<sup>[18]</sup>基于稳态线的临界孔隙状态参数 $\psi$ 建立了砂类土的 $CRR$ 评价方法。H.K.Dash等<sup>[19]</sup>基于稳态强度线,引入临界应力状态参数 $p'/p_{cs}'$ 评价砂类土的 $CRR$ ,分析表明具有不同密实状态和颗粒组成的混合料 $CRR$ 随着 $p'/p_{cs}'$ 的增大而降低,且两者基本呈线性关系。U.Kim等<sup>[20]</sup>及L.G.Oka等<sup>[21]</sup>先后引入 $e_{sk}^*$ 表征砂类土颗粒接触状态,试验表明: $CRR$ 随 $e_{sk}^*$ 的增大而减小,认为 $e_{sk}^*$ 是评价砂类土 $CRR$ 的一个有效状态指标。笔者<sup>[22-23]</sup>基于多类砂类土的液化强度试验数据,验证了 $e_{sk}^*$ 作为表征砂类土 $CRR$ 的一个综合状态指标的合理性,发现 $CRR$ 与 $e_{sk}^*$ 成负幂函数关系,且 $CRR-e_{sk}^*$ 关系曲线的表征参数仅仅由砂粒和细粒的物理特性共同决定,据此,建立了基于基本物理指标的饱和砂类土液化强度预测公式(详见下文)。

综上,学者们通过室内单元试验尝试建立各种材料特性参数或物理状态参数与饱和砂类土液化强度之间的联系,同时,基于试验数据,提出砂类土液化强度评价方法,然而,已有的液化强度评价方法大多只针对某种特定的砂类土,其适用性和合理性没有得到系统验证,这不利于实际工程推广。笔者<sup>[22-23]</sup>提出了适用于多种砂类土的液化强度预测公式,该方法无需进行复杂的不排水循环三轴试验,仅需确定各类砂类土的基本物理指标,即可初步预测不同工况条件下砂类土的液化强度,可在工程现场应用。但需要指出的是,该方法尚缺乏独立验证,且其通用性及敏感性也有待开展系统研究。针对上述问题,本文开展了独立验证试验,并结合现有文献数据,对液化强度预测公式普适性及敏感性

进行分析,目的是验证基于基本物理指标的饱和砂类土液化强度评价方法的可靠性、准确性、实用性,为提出的砂类土液化评价方法的推广应用提供支撑。

## 1 饱和砂类土液化强度预测公式

试验研究发现砂类土的等效骨架孔隙比  $e_{sk}^*$  与液化强度  $CRR$  存在单一负幂函数关系<sup>[22-23]</sup>:

$$CRR = A \times (e_{sk}^*)^{-B} \quad (1)$$

式中,  $A$ 、 $B$  为液化强度参数,由多元回归分析确定:

$$A = C_1 \left[ \frac{\sqrt{C_u^s C_u^f}}{10e_{range}^s} \right]^{C_2} \quad (2)$$

$$B = C_3 \left( \frac{d_{50}^s}{d_{th} \sqrt{\chi}} \right)^2 + C_4 \left( \frac{d_{50}^s}{d_{th} \sqrt{\chi}} \right) + C_5 \quad (3)$$

式中,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  和  $C_5$  为拟合参数;  $d_{50}^s$  为砂粒的平均粒径;  $C_u^s$  为砂粒的不均匀系数;  $C_u^f$  为细粒的不均匀系数;  $e_{range}^s$  为砂粒的孔隙比极差(其值为砂粒的最大孔隙比与最小孔隙比之差);  $d_{th}$  为砂粒和细粒的界限粒径,即  $d_{th}=0.075$  mm; 颗粒粒径比  $\chi = d_{10}^s/d_{10}^f$ ,  $d_{10}^s$  为砂粒有效粒径。

式(1)中的  $e_{sk}^*$  由下式计算获得:

$$e_{sk}^* = [e + (1-b)FC] / [1 - (1-b)FC] \quad (4)$$

式中,  $b$  为细粒影响系数,其值与砂类土的  $FC$  及  $\chi$  有关,由 A.Mohammadi 等<sup>[24]</sup> 提出的简化公式确定:

$$b = \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{0.3}{k} \right] \right\} \left( r \times \frac{FC}{FC_{th}} \right)^r \quad (5)$$

式中,  $r = \chi^{-1}$ ,  $k = 1 - r^{0.25}$ ;  $FC_{th}$  为阈值细粒含量,由 Rahman 半经验公式确定<sup>[25]</sup>:

$$FC_{th} = 0.40 \times \left( \frac{1}{1 + \exp(0.5 - 0.13\chi)} + \frac{1}{\chi} \right) \quad (6)$$

由式(6)可知,砂类土的  $FC_{th}$  仅与  $\chi$  有关,且当  $\chi < 5$  时,  $FC_{th}$  随  $\chi$  的增大迅速降低;当  $5 < \chi < 30$  时,  $FC_{th}$  随  $\chi$  的增大逐渐增大,但其增长速率迅速减小;当  $\chi > 30$  时,  $FC_{th}$  随  $\chi$  的增大基本保持不变。为进一步验证式(6)的适用性,利用已有 11 类砂类土试验数据对 Rahman 半经验公式<sup>[25]</sup> 进行独立验证,结果如图 1 所示。基于 9 类砂类土试验数据建立的 Rahman 半经验公式法<sup>[25]</sup> 获得的  $FC_{th}$  预测值与独立验证的 11 类砂类土试验所获得的  $FC_{th}$  基本保持一致,表明该半经验公式法可合理预测不同种类砂类土的  $FC_{th}$ 。

值得关注的是,现有的  $e_{sk}^*$  确定方法仅适用于

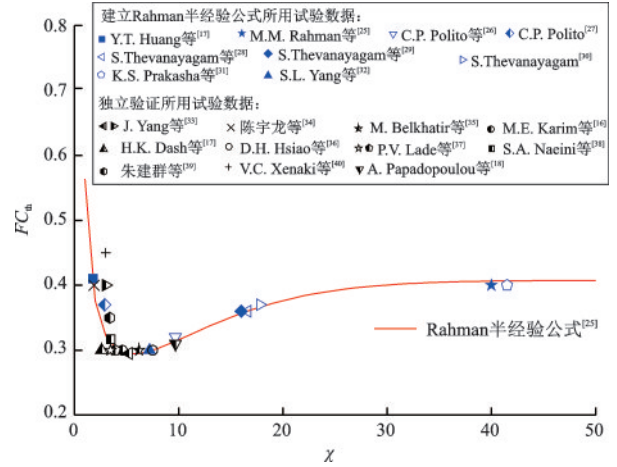


图 1 文献所述砂类土阈值细粒含量与颗粒粒径比的关系  
Fig.1 Relation between the fines content threshold and particle size disparity ratio from the literature

$FC < FC_{th}$  的砂类土,对于  $FC > FC_{th}$  的砂类土的  $e_{sk}^*$  仍然处于反分析确定阶段;其次对于  $FC > FC_{th}$  的砂类土液化强度试验数据相对匮乏,难以开展系统分析。因此,前期提出的饱和砂类土液化强度预测公式只针对  $FC < FC_{th}$  的砂类土,对于  $FC > FC_{th}$  的砂类土液化强度评价方法,笔者将开展较系统的试验研究,此处不再探讨。

## 2 液化强度预测公式普适性验证

为独立验证笔者<sup>[22]</sup> 提出的饱和砂类土液化强度预测公式的普适性,选取矿物成分、颗粒形状及级配特性都有显著差异的福建标准砂-I、福建标准砂-II 及云南砂三种砂作为砂类土的砂粒;两种福建标准砂由商业采购获得,属于典型的石英砂,其石英含量超过 95%,颗粒基本呈圆状或近圆状;云南砂取自云南某坝体,由花岗岩分化形成,颗粒呈次角状,矿物成分包括 42% 的石英,33% 的钾长石,18% 的斜长石以及少部分黑云母角闪石。选取南通沿海滩涂的粉土作为砂类土的细粒,南通粉土为海相沉积土,烘干后呈灰色,松散,分选性较好,颗粒呈次角状,塑性指数为 3.2,液限为 23.5%。三种试验砂粒以及细粒的级配曲线如图 2 所示,其部分基本物理属性指标见表 1,依据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)<sup>[41]</sup>,三种砂粒都属于级配不良砂(SW),细粒属于低液限粉土(ML)。选择三种不同的砂粒,目的是体现颗粒粒径梯度与级配特征的差异,以扩大可液化砂类土的粒径与级配范围;将三种砂粒分别与细粒均匀混合获得不同物理

特性的砂类土。为便于描述,将福建砂-I、福建砂-II、云南砂与南通粉土混合所获得的砂类土分别简称为福建砂类土-I(FJS-I)、福建砂类土-II(FJS-II)和云南砂类土(YNS)。

为独立验证各砂类土的  $e_{sk}^*$  与  $CRR$  的单一相关

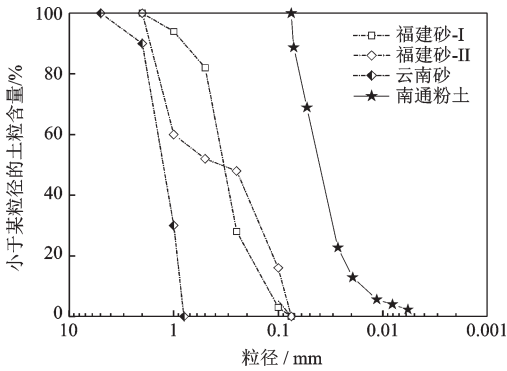


图2 试验所用的六种砂粒和细粒的级配曲线

Fig.2 Grain size distributions of the three host sands and a pure fines used in the tests

性,并研究笔者<sup>[22]</sup>提出的基于基本物理指标的饱和砂类土液化强度预测公式的通用性,利用 GDS DYNTTS 循环三轴仪,对  $FC=0\sim 30\%$  的 3 类饱和砂类土开展不排水循环三轴试验,试验方案见表 2,试验步骤及方法详见文献[22]。

表 1 试验所用的 3 种砂粒和细粒的物理属性指标

Table 1 Index properties of the three host sands and a pure fines used in the tests

物理属性	福建砂-I	福建砂-II	云南砂	南通粉土
平均粒径 $d_{50}/mm$	0.330	0.350	1.265	0.035
有效粒径 $d_{10}/mm$	0.130	0.090	0.869	0.016
不均匀系数 $C_u$	2.89	11.1	1.64	2.95
曲率系数 $C_c$	0.90	0.79	0.81	—
比重 $G$	2.68	2.68	2.69	2.77
最大孔隙比 $e_{max}$	0.83	0.61	0.86	1.53
最小孔隙比 $e_{min}$	0.57	0.39	0.53	0.83
土的分类	SW	SW	SW	ML

表 2 饱和砂类土液化强度试验方案

Table 2 Test cases for the liquefaction resistance of saturated sandy soils

试验材料	材料特性		
	组成	细粒含量 $FC/\%$	相对密实度 $D_r/\%$
福建砂类土-I	福建砂-I + 南通粉土	0, 10, 20, 30	50, 70
福建砂类土-II	福建砂-II + 南通粉土	0, 10, 20, 30	50, 70
云南砂类土	云南砂 + 南通粉土	0, 10, 20, 30	50, 70

基于三类砂类土的不排水循环三轴试验结果,以孔压比  $r_u=1.0$  作为饱和砂类土的液化判别标准,确定各类砂类土的  $CRR$ 。此外,为更具普适性,对 L.G. Oka 等<sup>[21]</sup>给出的砂类土液化强度试验数据进行重新整理汇总,利用  $e_{sk}^*$  重新评价了文献所述砂类土的  $CRR$ 。图 3 为验证试验 3 类砂类土及文献所述一类砂类土的  $CRR$  与  $e_{sk}^*$  的关系曲线,与之对应的相关试验信息见表 3。由图可知,与笔者<sup>[22]</sup>之前的发现一致,4 类砂类土的  $CRR$  与  $e_{sk}^*$  呈现单一的负幂函数关系,且 4 类砂类土的液化强度参数  $A$  与  $B$  有显著差异。图 4 为笔者前期建立的液化强度参数预测曲线以及验证试验涉及的 4 类砂类土的液化强度参数。由图可知,笔者提出的饱和砂类土液化强度参数公式可以合理预测本次验证试验 3 类砂类土以及 L.G. Oka 等<sup>[21]</sup>文献所述砂类土的  $A$  与  $B$ 。需要指出,用于计算图中  $e_{sk}^*$  的  $e$  为固结后,本实验所

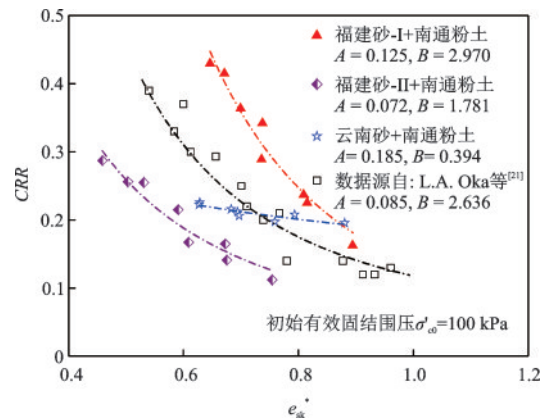
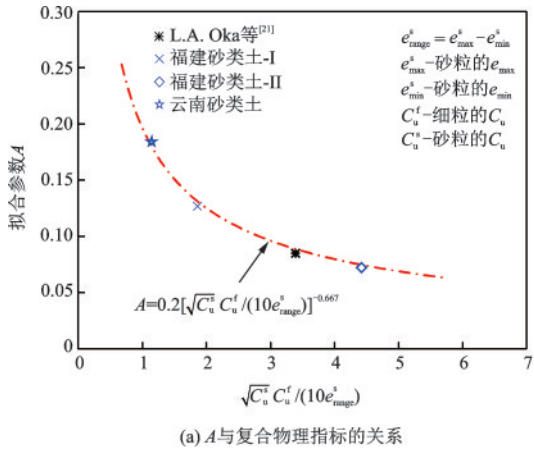


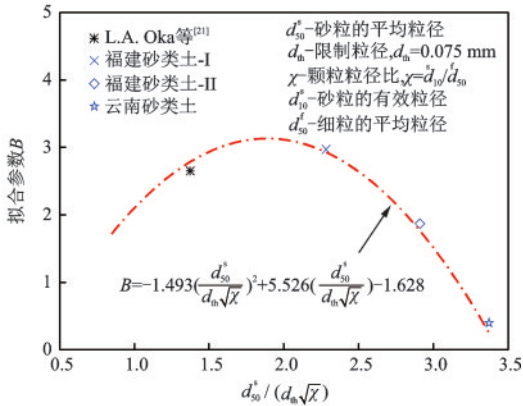
图 3 4 类砂类土的液化强度与等效骨架孔隙比关系曲线  
Fig.3 Liquefaction resistance versus equivalent skeleton void ratio for four sandy soils

用砂类土的孔隙比固结后实测的  $e$  略小于固结前初始  $e$ ,两者的最大相对偏差约为 2.5%。

为分析饱和砂类土液化强度评价方法的合理



(a) A与复合物理指标的关系

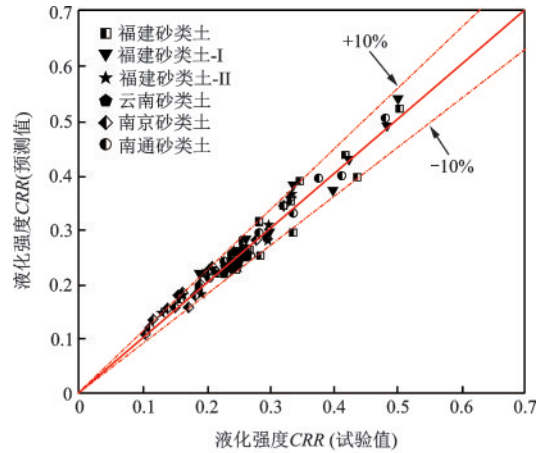


(b) B与复合物理指标的关系

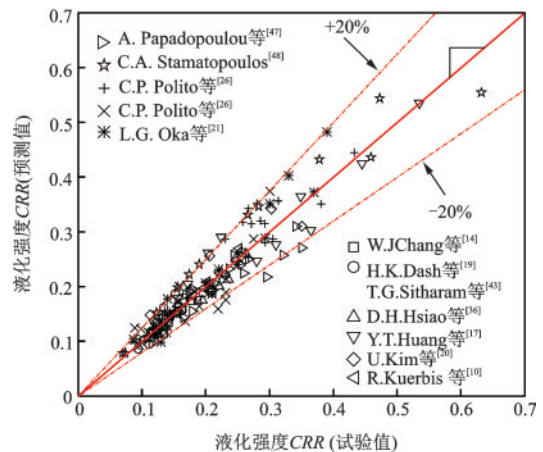
图4 液化强度参数预测公式有效性验证

Fig.4 Verification of the prediction formula for liquefaction resistance parameter

性,将笔者试验的6类砂类试验(验证试验3类,前期试验3类)及文献所述11类砂类土的液化强度试验结果进行汇总(表3),并基于17类砂类土的基本物理指标,计算各试验条件下饱和砂类土的CRR预测值。图5给出了这17类砂类土试验值与预测值的对比。由图5(a)可知,笔者试验6类砂类土的CRR预测值误差小于10%,图5(b)可知,除了个别试验工况,文献所述11类砂类土的CRR预测值误差均小于20%,砂类土CRR预测经验公式法对文献11类砂类土的CRR预测误差(20%)明显大于试验6类砂类土的CRR预测误差(10%),其误差增大的可能原因有:(1)文献11类砂类土的液化强度试验的试样尺寸和制样方法有明显差异;(2)文献11类砂类土的液化判别标准不同会对CRR的确定有一定影响;(3)试验人员的熟练程度和操作流程会明显影响液化强度试验的准确性;(4)试验设备传感器的测量量程以及测量精度的差异对试验结果有明显影响。



(a) 试验6类砂类土



(b) 文献11类砂类土

图5 试验6类砂类土和文献中11类砂类土的液化强度试验值与预测值对比

Fig.5 Comparison of the measured and the predicted CRR values of 6 sandy soils tested in this study and 11 sandy soils from the literature

然而,即使上述差异会增大砂类土CRR经验公式预测误差,但最大预测误差仍然小于21%,绝大部分预测误差都小于20%,且有50%的液化强度试验预测误差小于10%。这表明,笔者<sup>[22]</sup>建立的饱和砂类土液化强度评价方法可以合理预测各类砂类土的CRR,且砂类土CRR经验公式法预测合理性基本不受液化强度试验试样尺寸,制样方法,液化判别标准,测试方法以及试验人员熟练程度等因素的影响。

### 3 液化强度评价方法敏感性分析

基于基本物理指标的饱和砂类土液化强度评价方法的建立,其最关键的环节是确定具有不同

FC的各类砂类土的细粒影响系数 $b$ ,而上述评价方法中的 $b$ 值由A.Mohammadi等<sup>[24]</sup>建立的半经验公式(5)确定,其中 $FC_{th}$ 由M.M.Rahman等<sup>[25]</sup>提出的经验公式(6)获得。最初, $b$ 值的确定都是由砂类土的试验结果反分析确定<sup>[28]</sup>:即当 $FC < FC_{th}$ 时,相同 $e_{sk}^*$ 的砂类土与纯砂粒土( $FC=0\%$ )的力学特性基本一致<sup>[28]</sup>,给定 $b$ 值,可计算出各砂类土的不同工况的数据对( $CRR, e_{sk}^*$ );改变 $b$ 值大小,可计算各砂类土的不同工况新的数据对( $CRR, e_{sk}^*$ )。通过试算,获取数据对( $CRR, e_{sk}^*$ )与纯砂粒土( $FC=0\%$ ) $CRR$ 和 $e_{sk}^*$ 的关系线拟合度最优对应的 $b$ 值,即为砂类土的 $b$ 值。S.Thevanayagam等<sup>[29,49]</sup>的研究认为:对于同一种类砂类土,随 $FC$ 的增大,其 $b$ 值为定值;而M.M.Rahman等<sup>[50]</sup>研究表明:对于同一种砂类土, $b$ 值随着 $FC$ 的增大而变化。此外,由A.Mohammadi等<sup>[24]</sup>建立的 $b$ 值半经验公式可知,阈值细粒含量 $FC_{th}$ 的确定对 $b$ 值也有一定影响,由图1可知,大部分砂类土的 $FC_{th}$ 分布在 $30\% \sim 40\%$ ,且当 $FC < 30\%$

时,各类砂类土全部属于类砂粒土。综上所述,至少有以下4种确定细粒影响系数 $b$ 的方法:

- (1) $b$ 值由式(5)确定,其中 $FC_{th}$ 由式(6)获得;
- (2) $b$ 值由式(5)确定,对于各砂类土,令 $FC_{th}=30\%$ ;
- (3) $b$ 值由砂类土的液化强度试验数据反分析获得,随 $FC$ 的增加, $b$ 值为定值;
- (4) $b$ 值由砂类土的液化强度试验数据反分析获得, $b$ 值随着 $FC$ 的增加而变化。

表4汇总了基于4种 $b$ 值确定方法的砂类土 $CRR$ 预测公式对应的拟合参数 $C_1, C_2, C_3, C_4$ 和 $C_5$ 以及预测误差。由表4可知,当要求预测误差小于 $10\%$ 时,4种预测方法的准确率依次为 $60\%, 60.1\%, 57.3\%$ 及 $67.9\%$ ;当要求预测误差小于 $20\%$ 时,4种预测方法的准确率依次为 $94\%, 89.9\%, 83.9\%$ 及 $95.4\%$ 。这表明,当要求对各类砂类土的液化强度进行精准预测时(预测误差小于 $10\%$ ),方法4明显优于其他3种方法,其准确率约提升 $8\%$ 以

表3 文献所述11类砂类土及试验6类砂类土液化强度试验结果汇总

Table 3 Summary of previous experimental study on liquefaction resistance for 11 sandy soils from the literature and 6 sandy soils tested in this study

试验编号	数据来源	试验材料(砂粒+细粒)	制样方法	试样尺寸/ mm <sup>2</sup> (直径×高)	试验方式	FC/%	$\sigma'_{c0}/kPa$	液化判别标准	$FC_{th}/\%$	土类(USCS)
M1	W.J. Chang等 <sup>[42]</sup>	细石英砂+高岭土	MT	25×68	CS	0~15	100	$\epsilon_{DS}=6\%$	40.6	SP, SP-SM, SM
M2	H.K. Dash等 <sup>[19]</sup> / T.G. Sitharam等 <sup>[43]</sup>	艾哈迈达巴德砂+班加罗尔粉土	DR	50×100	CTX	0~30	100	$\epsilon_{DA}=5\%$	31.6	SP, SP-SM,
M3	D.H. Hsiao等 <sup>[36]</sup>	台湾高雄砂+台湾高雄粉土	MT	71×150	CTX	0~30	100	$r_u=1$	30.0	SP, SC-SM,
M4	Y.T. Huang等 <sup>[44]</sup>	台湾高雄砂+台湾高雄粉土	MT/WS/ DR	50×100	CTX	0~30	100	$r_u=1$	42.5	SP, SM,
M5	U. Kim等 <sup>[45]</sup>	三河硅砂+岩国海洋粘土	MT	50×100	CS	0~16.7	100	$\epsilon_{DS}=5\%$	40.0	SP, SW-SC, SC
M6	R. Kuerbis等 <sup>[46]</sup>	brenda矿尾砂+kamloops粉土	SD	N.D.	CTX	0~13.5	350	$\epsilon_{SA}=2.5\%$	30.6	*
M7	A. Papadopoulou等 <sup>[47]</sup>	希腊亚述砂+希腊亚述粉土	MT	50×100	CTX	0~25	100	$\epsilon_{DA}=5\%$	32.6	*
M8	C.A. Stamatopoulos <sup>[48]</sup>	埃及石英砂+希腊亚述粉土	MT	38.2×84.9	CTX	0~25	50~200	$\epsilon_{DA}=5\%$	30.6	SP, SM

续表3

试验编号	数据来源	试验材料 (砂粒+细粒)	制样方法	试样尺寸/ mm <sup>2</sup> (直径×高)	试验方式	FC/%	$\sigma'_{c0}/\text{kPa}$	液化判别标准	$FC_{th}/\%$	土类 (USCS)
M9	C.P. Polito 等 <sup>[26]</sup>	蒙特利砂+耶茨维尔粉土	N.D.	71×154	CTX	0~25	100	$r_u=1$	31.4	SP, SP-SM, SM
M10	C.P. Polito 等 <sup>[26]</sup>	耶茨维尔砂+耶茨维尔粉土	N.D.	71×154	CTX	0~26	100	$r_u=1$	33.1	SP, SP-SM, SM
M11	L.G. Oka 等 <sup>[21]</sup> (验证数据)	F-75石英砂+Sil-Co-Sil 125粉土	MT	71×140	CTX	0~30	100	$r_u=1$	30.2	SP, SP-SM, SM
M12	吴琪等 <sup>[22]</sup> (前期试验)	福建砂+南通粉土	MT	50×100	CTX	0~30	100	$r_u=1$	31.4	SP, SW-SM, SM
M13	吴琪等 <sup>[22]</sup> (前期试验)	南京砂+南通粉土	MT	50×100	CTX	0~30	100	$r_u=1$	32.2	SP, SP-SM, SM
M14	吴琪等 <sup>[22]</sup> (前期试验)	南通砂+南通粉土	MT	50×100	CTX	0~30	100	$r_u=1$	35.5	SP, SP-SM, SM
M15	验证试验	福建砂-I+南通粉土	MT	50×100	CTX	0~30	100	$r_u=1$	30.6	SW, SP-SM, SM
M16	验证试验	福建砂-I I+南通粉土	MT	50×100	CTX	0~30	100	$r_u=1$	33.9	SP, SP-SM, SM
M17	验证试验	云南砂+南通粉土	MT	50×100	CTX	0~30	100	$r_u=1$	39.2	SP, SP-SM, SM

注:DR为干装法,MT为湿击法,WS为水沉法,SD为泥浆固结法;CTX为循环三轴试验,CS为循环直剪试验;FC为细粒含量, $FC_{th}$ 为阈值细粒含量; $\epsilon_{DA}$ 为双幅轴向应变; $\epsilon_{DS}$ 为双幅剪应变; $\epsilon_{SA}$ 为单幅轴向应变; $r_u$ 为孔压比;N.D.指没有描述

表4 基于4种b值确定方法的砂类土CRR<sub>15</sub>经验公式法的拟合参数及预测误差Table 4 Fitting parameters and prediction error for the CRR<sub>15</sub> prediction empirical formulas of sandy soils based on 4 types of b determination methods

经验公式	参数	方法1	方法2	方法3	方法4
	$FC_{th}$	SEF( $FC_{th}$ )	= 30%	SEF( $FC_{th}$ )	SEF( $FC_{th}$ )
	b值	EF(b)	EF(b)	BA1(b)	BA2(b)
$A = C_1 \left[ \sqrt{C_u^s} C_u^f / (10e_{range}^s) \right]^{-C_2}$	$C_1$	0.200	0.187	0.194	0.195
	$C_2$	0.667	0.609	0.644	0.665
	$R^2$	0.967	0.964	0.951	0.977
$B = -C_3 \left( \frac{d_{50}^s}{d_{th} \sqrt{\chi}} \right)^2 + C_4 \left( \frac{d_{50}^s}{d_{th} \sqrt{\chi}} \right) - C_5$	$C_3$	1.334	1.350	1.26	1.31
	$C_4$	5.000	5.140	4.73	4.91
	$C_5$	1.556	1.760	1.38	1.48
	$R^2$	0.951	0.941	0.944	0.949
CRR预测值 VS CRR试验值	$\sigma$	$8.1 \times 10^{-3}$	$9.1 \times 10^{-3}$	$9.9 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-3}$
	$CRR_{15} = A \times (e_{sk}^*)^{-B}$	$R^2$	0.905	0.867	0.830
	error < 10%	60.0%	60.1%	57.3%	67.9%
	error < 20%	94.0%	89.9%	83.9%	95.4%

注:SEF( $FC_{th}$ )- $FC_{th}$ 由半经验公式(6)计算获得;EF(b)-b由经验公式(5)计算获得;BA1(b)-反分析(b为定值);BA2(b)-反分析(b随FC的变化)

上;而当对各类砂类土的液化强度进行初判时(预测误差小于20%),方法1与方法4都有94%及以上的预测准确率,方法2的预测效果略小于其方法1与方法4,但也有约90%的准确率,而方法3的预测准确率明显小于其他3种方法。此外,由前述可知,方法3和方法4需要获得已有的液化强度试验数据,然后通过反分析法确定各类砂类土的 $b$ 值,在没有液化强度试验数据的情况下,该方法无法进行预测;而方法1只要获取各类砂类土基本物理指标,无需进行液化强度试验,就可利用经验公式对各类砂类土的液化强度进行初步判别,且预测误差小于20%,表明笔者提出的饱和砂类土液化强度评价方法具有较好的适用性,且其敏感性较低,有利于实际工程应用。

## 4 结 论

基于验证试验及已有文献数据,独立验证了饱和砂类土 $CRR$ 与 $e_{sk}^*$ 呈现单一的负幂函数关系,并证实笔者前期提出的饱和砂类土的液化强度参数公式可以合理的预测各类砂类土的液化强度参数。分析表明,基于基本物理指标的饱和砂类土液化强度评价方法可以有效评价各砂类土的 $CRR$ ,对于试验6类砂类土,预测误差小于10%,对于文献11类砂类土,预测误差小于20%。且该预测方法具有较好的通用性。此外,制样方法、试样尺寸、试验方式、液化判别标准以及细粒影响系数 $b$ 值的确定方法对该砂类土 $CRR$ 经验公式法预测的准确性影响较小。这表明,基于基本物理指标的饱和砂类土液化强度评价方法敏感性较低,有利于实际工程应用。

### 参考文献:

- [1] 中国地震动参数区划图:GB18306—2015[S].北京:中国国际标准出版社,2015.
- [2] Terzaghi K, Peck R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. New Jersey:Wiley, 1967.
- [3] Chan Y F, Alagappan K, Gandhi A, et al. Disaster management following the Chi-Chi earthquake in Taiwan[J]. Prehospital and Disaster Medicine, 2006, 21(3): 196-202.
- [4] 袁晓铭,曹振中,孙锐,等.汶川8.0级地震液化特征初步研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6): 1288-1296.
- [5] Yuan X M, Cao Zh Zh, Sun R, et al. Preliminary research on liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1288-1296. (in Chinese)
- [5] 曹振中,袁晓铭,孙锐,等.汶川大地震液化宏观现象概述[J].岩土工程学报,2010,32(4): 645-650. Cao Zh Zh, Yuan X M, Sun R, et al. Summary of liquefaction macrophenomena in Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 645-650. (in Chinese)
- [6] Sasakia Y, Towhata I, Miyamoto K, et al. Reconnaissance report on damage in and around riverlevees caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(5): 1016-1032.
- [7] Mogami T, Kubo K. The behavior of soil during vibration procedure[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanical and Foundation. Switzerland:[s.n.], 1953:152-153.
- [8] Lee K L, Seed H B. Cyclic stress condition causing liquefaction of sand[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1967, 93(1): 47-70.
- [9] 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 and Francis, 1985: 1311-1314.
- [10] Kuerbis R, Negussey D, Vaid Y P. Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand[J]. Geotechnical Special Publication, 1988, 21: 330-345.
- [11] 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 X Zh, Chen G X. Experimental study on influence of clay partical content on liquefaction of Nanjing fine sand [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(6): 150-155. (in Chinese)
- [12] 周健,杨永香,贾敏,等.细粒含量对饱和砂土液化特性的影响[J].水利学报,2009,40(10):1184-1188. Zhou J, Yang Y X, Jia M, et al. Effect of fines content on liquefaction properties of saturated silty sands [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1184-1188. (in Chinese)
- [13] Polito C P, Martin II J R. Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(5): 408-415.

- [14] Chang W J, Hong M L. Effects of clay content on liquefaction characteristics of gap-graded clayey sands [J]. *Soils and Foundations*, 2008, 48(1): 101-114.
- [15] 吴琪,陈国兴,周正龙,等.基于颗粒接触状态理论的粗细粒混合料液化强度试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(3): 475-485.  
Wu Q, Chen G X, Zhou Zh L, et al. Experimental investigation on liquefaction resistance of fine - coarse - grained soil mixtures based on theory of intergrain contact state[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(3): 475-485. (in Chinese)
- [16] Karim M E, Alam M J. Undrained monotonic and cyclic response of sand-silt mixtures [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 10 (3) : 223-235.
- [17] Huang Y T, Huang A B, Kuo Y C, et al. A laboratory study on the undrained strength of a silty sand from Central Western Taiwan[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(9): 733-743.
- [18] Papadopoulou A, Tika T. The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of non-plastic silty sands[J]. *Soils and Foundations*, 2008, 48 (5): 713-725.
- [19] Dash H K, Sitharam T G, Baudet B A. Influence of non-plastic fines on the response of a silty sand to cyclic loading [J]. *Soils and Foundations*, 2010, 50 (5) : 695-704.
- [20] Kim U, Kim D, Zhuang L. Influence of fines content on the undrained cyclic shear strength of sand-clay mixtures [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 83: 124-134.
- [21] Oka L G, Dewoolkar M, Olson S M. Comparing laboratory-based liquefaction resistance of a sand with non-plastic fines with shear wave velocity-based field case histories [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 113: 162-173.
- [22] 吴琪,陈国兴,朱雨萌,等.基于等效骨架孔隙比指标的饱和砂类土抗液化强度评价[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(10): 1912-1922.  
Wu Q, Chen G X, Zhu Y M, et al. Evaluating liquefaction resistance of saturated sandy soils based on equivalent skeleton void ratio[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(10): 1912-1922. (in Chinese)
- [23] Chen G X, Wu Q, Zhao K, et al. A binary packing material-based procedure for evaluating soil liquefaction triggering during earthquakes[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2020, 146(6): 04020040.1-04020040.17.
- [24] Mohammadi A, Qadimi A. A simple critical state approach to predicting the cyclic and monotonic response of sands with different fines contents using the equivalent intergranular void ratio [J]. *Acta Geotechnica*, 2015, 10(5): 587-606.
- [25] Rahman M M, Lo S R, Gnanendran C T. On equivalent granular void ratio and steady state behaviour of loose sand with fines [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(10): 1439-1456.
- [26] Polito C P, Martin II J R. Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(5): 408-415.
- [27] Polito C P. The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils [D]. Virginia, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- [28] Thevanayagam S, Shenthan T, Mohan S, et al. Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts [J]. *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(10): 849-859.
- [29] Thevanayagam S, Martin G R. Liquefaction in silty soils-screening and remediation issue [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22 (9-12) : 1035-1042.
- [30] Thevanayagam S. Role of intergranular contacts on mechanisms causing liquefaction and slope failures in silty sands [R]. USA: US Geological Survey, 2003.
- [31] Prakasha K S, Chandrasekaran V S. Behavior of marine sand-clay mixtures under static and cyclic triaxial shear [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 131(2): 213-222.
- [32] Yang S L, Lacasse S, Sandven R F. Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines [J]. *Geotechnical Test Journal*, 2006, 29(2): 102-107.
- [33] Yang J, Wei L M. Collapse of loose sand with the addition of fines: the role of particle shape [J]. *Géotechnique*, 2012, 62(12): 1111-1125.
- [34] 陈宇龙,张宇宁.非塑性细粒对饱和砂土液化特性影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(2): 507-516.  
Chen Y L, Zhang Y N. Experimental study of effects of non-plastic fines on liquefaction properties of saturated sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37 (2) : 507-516. (in Chinese)
- [35] Belkhatir M, Schanz T, Arab A. Effect of fines content and void ratio on the saturated hydraulic conductivity

- and undrained shear strength of sand-silt mixtures [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70 (6): 137-151.
- [36] Hsiao D H, Phan V T A, Hsieh Y T, et al. Engineering behavior and correlated parameters from obtained results of sand-silt mixtures[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 77: 137-151.
- [37] Lade P V, Yamamuro J A. Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34 (6): 918-928.
- [38] Naeini S A, Baziar M H. Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered sampled of sand[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24 (3): 181-187.
- [39] 朱建群, 孔令伟, 高文华, 等. 无黏性混合土临界细粒含量的多途径判别研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(9): 1103-1109.
- Zhu J Q, Kong L W, Gao W H, et al. Multi-ways to identify the transitional fine content of cohesionless soil with fines[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46 (9): 1103-1109. (in Chinese)
- [40] Xenaki V C, Athanopoulos G A. Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: an experimental investigation of the effect of fines[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, 23 (3): 1-12.
- [41] 土的工程分类标准:GB/T50145—2007[S]. 北京:中国计划出版社,2007.
- [42] Chang W J, Hong M L. Effects of clay content on liquefaction characteristics of gap-graded clayey sands [J]. *Soils and Foundations*, 2008, 48(1): 101-114.
- [43] Sitharam T G, Dash H K, Jakka R S. Postliquefaction undrained shear behavior of sand-silt mixtures at constant void ratio[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2013, 13(4): 421-429.
- [44] Huang Y T, Huang A B, Kuo Y C, et al. A laboratory study on the undrained strength of a silty sand from Central Western Taiwan[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(9): 733-743.
- [45] Kim U, Kim D, Zhuang L. Influence of fines content on the undrained cyclic shear strength of sand-clay mixtures [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 83: 124-134.
- [46] Kuerbis R, Negussey D, Vaid Y P. Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand [C]//*Proceeding of Conference on Hydraulic Fill Structures*. New York, ASCE: Fort Collins, 1988:330-345.
- [47] Papadopoulou A, Tika T. The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of non-plastic silty sands[J]. *Soils and Foundations*, 2008, 48 (5): 713-725.
- [48] Stamatopoulos C A. An experimental study of the liquefaction strength of silty sands in terms of the state parameter [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(8): 662-678.
- [49] Thevanayagam S. Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(6): 479-491.
- [50] Rahman M M, Lo S R, Baki M A L. Equivalent granular state parameter and undrained behaviour of sand - fines mixtures [J]. *Acta Geotechnica*, 2011, 6 (4) : 183-194.

(本文责编:赵霞)