

DOI: 10.11779/CJGE2023S20047

# 考虑沉积时间效应的原位砂土抗液化强度剪切波速评价

周燕国<sup>1</sup>, 周鑫辉<sup>1</sup>, 桑毅佳<sup>2</sup>, 石安池<sup>2</sup>, 陈云敏<sup>1</sup>

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江大学超重力研究中心, 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

**摘要:** 剪切波速是评价饱和砂土抗液化强度的常用指标之一。在基于初始液化标准的砂土抗液化强度剪切波速表征模型(即“周-陈模型”)的基础上, 进一步引入考虑沉积时间效应的修正系数, 分别对原位测得的剪切波速和重塑砂土抗液化强度进行修正, 使得“周-陈模型”能适用于原位砂土抗液化强度评价。针对云南巧家县某工程场地, 进行原位剪切波速测试、现场取样并开展室内单元体试验, 得到了“周-陈模型”的关键表征参数, 据此建立了相应的地震液化剪切波速判别方法。利用该判别方法对该工程场地砂土层不同钻孔土层进行了地震液化判别, 并与国内外其它液化判别方法进行比较, 发现判别结果基本一致。本文发展的考虑沉积时间效应的剪切波速表征模型为评价实际工程场地原位砂土抗液化强度提供了有效手段。

**关键词:** 抗液化强度; 原位砂土; 沉积时间效应; 剪切波速; 表征模型

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0019-06

**作者简介:** 周燕国(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与岩土地震工程、超重力物理模拟方面的研究和教学工作。E-mail: qzking@zju.edu.cn。

## Shear wave velocity-based evaluation of liquefaction resistance of in-situ sand with aging effects

ZHOU Yanguo<sup>1</sup>, ZHOU Xinhui<sup>1</sup>, SANG Yijia<sup>2</sup>, SHI Anchi<sup>2</sup>, CHEN Yunmin<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Center for Hypergravity Experiment and Interdisciplinary Research, MOE Key Laboratory of

Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. PowerChina Huadong Engineering

Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** The shear wave velocity is one of the commonly used parameters to evaluate liquefaction resistance of sandy soils. In this study, based on the initial liquefaction criterion-based shear wave velocity characterization model (i.e., the “Zhou-Chen model”), two correction parameters are introduced to consider the aging effects to correct the field measured shear wave velocity and the liquefaction resistance of reconstituted sand, respectively, so that the “Zhou-Chen model” can be used to evaluate the liquefaction resistance of in-situ sandy soils. In an engineering case from Qiaojia County, Yunnan Province, both field measurements of shear wave velocity and laboratory testings are conducted to determine the parameters of the “Zhou-Chen model”, and then a simplified procedure to evaluate liquefaction potential using the field shear wave velocity measurement is established. This simplified procedure is then used to evaluate the liquefaction potential of the engineering site, and the results are consistent with those by other methods. The proposed characterization model with further consideration of the aging effects provides a promising way to evaluate the liquefaction resistance of in-situ sandy soils with the ageing effects.

**Key words:** liquefaction resistance; in-situ sand; aging effect; shear wave velocity; characterization model

## 0 引言

国内外砂土地震液化判别大多以 Seed 简化方法为框架建立<sup>[1-2]</sup>。Seed 简化方法通过对比地震剪应力比(CSR)与砂土抗液化强度(CRR), 若  $CSR > CRR$ , 则判为液化, 反之则不液化。通常抗液化强度可与原位测试指标(标贯击数  $N$ 、静力触探端阻  $q_c$  和剪切波速  $V_s$  等)建立联系。在这些方法中, 基于剪切波速的

液化判别法因其无损检测和土类适用性的优势得到较快发展<sup>[3-8]</sup>, 得到了地震液化案例数据库的验证<sup>[9-10]</sup>。但是无论是抗液化强度, 还是剪切波速等原位测试指标都会受到覆盖层沉积年代(沉积时间效应)影响<sup>[11]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278374, 51988101, 51978613);  
高等学校学科创新引智计划(B18047)

收稿日期: 2023-11-30

这一影响在定性上主要表现为：沉积年代越久远，场地原位测试指标（如剪切波速）越大<sup>[12-14]</sup>，其抗液化强度也越大<sup>[15-16]</sup>。

对于沉积年代久远的砂土，直接采用原位测试剪切波速可能会高估砂土实际抗液化强度。Andrus 提出“测量与估算波速比”参数（MEVR）用于修正原位剪切波速，可定量评价砂土沉积时间效应对剪切波速的影响<sup>[16]</sup>。一些学者则引入参数  $K_{DR}$  表征沉积时间效应对抗液化强度的影响，建立了重塑土和原状土抗液化强度之间的换算关系<sup>[15, 17]</sup>，提供了一种通过重塑土抗液化强度评价原位砂土抗液化强度的方法。

本文在基于初始液化标准的饱和砂土抗液化强度剪切波速表征模型（即“周-陈模型”）<sup>[7-8]</sup>的基础上，通过引入考虑沉积时间效应的修正系数，使得“周-陈模型”能适用于具有沉积时间效应的原位砂土抗液化强度评价，并建立了相应的地震液化剪切波速判别方法。进一步针对云南巧家县某工程场地，开展原位剪切波速测试、现场取样和室内单元体试验，利用所建议的判别方法对该工程场地进行了地震液化判别，并与其它液化判别方法进行了比较。

## 1 考虑沉积时间效应的“周-陈模型”

浙江大学岩土工程研究所研究揭示了饱和砂土抗液化强度与剪切波速之间存在幂函数相关关系，国内外大量动三轴试验研究也佐证了这一认识。据此建立了基于初始液化标准的饱和砂土抗液化强度剪切波速表征模型（即“周-陈模型”）<sup>[7-8]</sup>，其表征函数如下：

$$CRR = r_c \frac{1}{P_a} \left[ k_N \frac{\rho V_{s1}^2}{F(e_{min})} \right]^{f/n} \quad (1)$$

式中： $r_c$  为考虑地震多向振动作用的折减系数，取值范围 0.9~1.0，本研究  $r_c=0.9$ ； $P_a$  是参考应力， $P_a=100$  kPa； $k_N$  为反映砂土抗液化强度和刚度之间的相关系数，下标  $N$  与震级  $M_w$  相关，对应于室内三轴试验的液化振次； $\rho$  为土的饱和密度； $e_{min}$  为最小孔隙比； $F(e)$  为孔隙比  $e$  的函数， $F(e)=1/(0.3+0.7e^2)$ ； $f$  为土类相关参数，反映土体密实度与上覆应力的综合效应，取值范围 0.6~1.0，除高上覆应力场地（如深厚坝基），一般可取  $f=1.0$ ； $n$  为土类相关参数； $V_{s1}$  为上覆有效应力修正至 100 kPa 后的剪切波速<sup>[18]</sup>，其表达式如下：

$$V_{s1} = V_s C_v = V_{s1} \left( \frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^{\frac{n}{2}} \quad (2)$$

式中， $V_s$  为原位剪切波速测量值， $C_v$  为上覆应力修正系数，一般  $C_v \leq 1.4$ 。

需要注意的是，“周-陈模型”是基于重塑砂土的室内单元体试验建立的表征模型。当原位土层的沉积

年代较为久远时，沉积时间效应导致砂土颗粒间产生轻微胶结作用，此时“周-陈模型”中的剪切波速与原位场地测得的剪切波速便不再严格相同。

参数 MEVR 可用于表征砂土沉积时间效应对剪切波速的影响，沉积年代越久远的砂土具有更大的 MEVR 值。该参数定义如下<sup>[16]</sup>：

$$MEVR = \frac{V_{s,M}}{V_{s,E}} \quad (3)$$

式中： $V_{s,M}$  为原位测试剪切波速，反映了沉积时间效应； $V_{s,E}$  为估算剪切波速，其本质为消除沉积时间效应后的重塑砂土剪切波速，可通过现场 CPT 和 SPT 等数据估算<sup>[17, 19]</sup>，也可通过重塑土 Hardin 公式计算：

$$G_{max} = \rho V_s^2 = AF(e)(\sigma'_m)^n \quad (4)$$

式中， $A$  为与土类矿物和结构性相关参数， $\sigma'_m$  为平均有效应力。

如果能获得高质量原状样，则原状样的抗液化强度可由室内动三轴试验直接测得。在实际工程中获取原状样十分困难，需要保证在取样、运输和储存制样等过程中不对土样产生扰动。若引入修正系数  $K_{DR}$ ，则可通过重塑土的三轴试验将重塑土抗液化强度修正至原状土抗液化强度，修正公式如下<sup>[17]</sup>：

$$CRR_{fic} = K_{DR} CRR_{lab} \quad (5)$$

式中： $CRR_{fic}$  为原状土的抗液化强度； $CRR_{lab}$  为对应室内重塑土试验获得的抗液化强度； $K_{DR}$  为重塑到原状砂土的抗液化强度换算系数，与原位砂土的 MEVR 存在如下关系， $K_{DR}=0.92MEVR+0.12$ 。

基于上述认识，对基于室内重塑土动三轴试验建立的“周-陈模型”进行修正，使其能考虑原位砂土沉积时间效应，以评价原位砂土抗液化强度，相关步骤如下：首先，测量原位场地砂土剪切波速  $V_{s,M}$ ，现场取样并测量原位土体密度，利用式（4）估算重塑砂土的剪切波速  $V_{s,E}$ ，根据式（3）得到参数 MEVR；然后，利用式（1）“周-陈模型”和  $V_{s,E}$  计算重塑土抗液化强度；最后，利用式（5）将重塑土抗液化强度修正至原状土抗液化强度。上述步骤归纳起来，表达为如下修正形式的“周-陈模型”：

$$CRR_{fic} = K_{DR} r_c \frac{1}{P_a} \left[ k_N \frac{\rho (V_{s1}/MEVR)^2}{F(e_{min})} \right]^{f/n} \quad (6)$$

式（6）考虑了沉积时间效应对原位剪切波速和抗液化强度的影响，为综合利用原位剪切波速和室内重塑土剪切波速评价原位砂土抗液化强度提供了依据。

## 2 工程案例研究

### 2.1 工程概况

金沙江白鹤滩水电站水库建成蓄水后，将淹没云

南省巧家县城西侧及北部高程 825 m 以下的大片缓坡区域, 其为库区岸坡地震液化提供了水力条件。根据《中国地震动参数区划图》, 该地区的地震基本烈度可达 VIII 度。图 1 是巧家县工程场地典型地形剖面, 地形坡度 4~7 (°), 且斜坡内部有一层厚度均匀且分布较连续的细砂。一旦该砂层发生液化, 斜坡可能产生侧向变形甚至流滑, 严重危害防护工程安全。例如, 2018 年印尼 Palu 地震 ( $M_w=7.5$ ) 就出现了缓坡液化引发长距离流滑灾害<sup>[20]</sup>。因此对白鹤滩水电站建成蓄水后处于库区浸没区的巧家县城周边场地进行地震液化判别, 可为该地区地震液化风险评估提供科学依据。

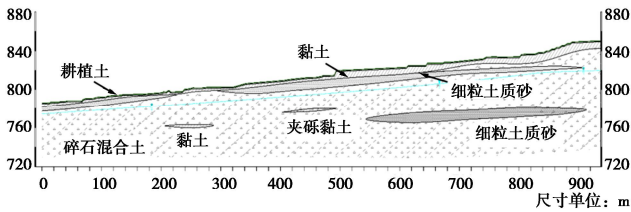


图 1 典型地形和土层剖面

Fig. 1 Typical topography and soil profile

图 2 给出了典型钻孔 QFK01 内易液化砂层的原位剪切波速和标贯测试。注意到 10~17 m 深度范围砂土层的平均剪切波速约为 300 m/s, 最高可达 320 m/s。这一测量值显著大于该深度范围内常见砂土的平均剪切波速值 (160~250 m/s)<sup>[9, 11, 21-22]</sup>。这种原位剪切波速显著偏大的主要原因来源于土层的沉积时间效应。

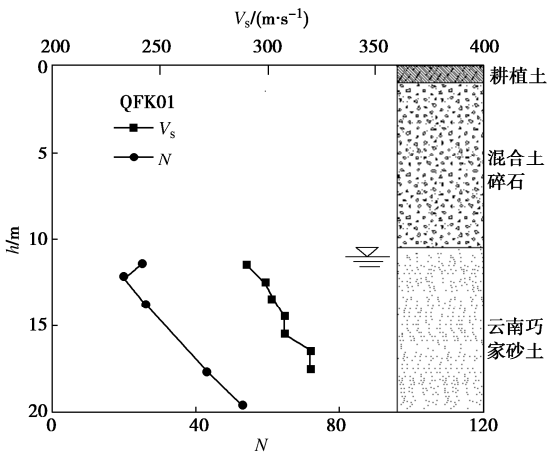


图 2 钻孔 QFK01 的剪切波速  $V_s$  和标贯数据  $N$

Fig. 2  $V_s$  and SPT- $N$  for borehole QFK01

2.2 室内单元体试验

室内单元体试验所用砂土取自云南巧家县金沙江右岸坡阶地, 其颗粒级配曲线如图 3 所示, 物理性质如下: 颗粒的相对质量密度  $G_s=2.71$ , 特征粒径  $D_{10}=0.01$  mm,  $D_{60}=0.17$  mm, 不均匀系数  $C_u=2.43$ , 曲率系数  $C_c=0.47$ , 最大孔隙比  $e_{max}=0.985$ , 最小孔隙比  $e_{min}=0.438$ , 粉粒含量  $FC=30\%$ 。

式 (1) 中“周-陈模型”的参数  $n$  和  $k_N$  可分别通过带弯曲元的多级固结三轴试验和动三轴试验测得。首先对重塑砂土开展多级固结静力三轴试验, 试样直径 50 mm, 高度 100 mm。采用水中砂雨法制备单元体试样,  $B$  值检验均高于 0.95。试样所受各向等压固结压力  $\sigma'_m=13\sim400$  kPa。在施加每级围压并排水稳定后用压电弯曲元测量剪切波速, 并计算小应变剪切模量  $G_{max}=\rho V_s^2$  (见图 4)。用式 (4) 拟合后可得 Hardin 公式参数  $A=3.489$  和  $n=0.571$ 。

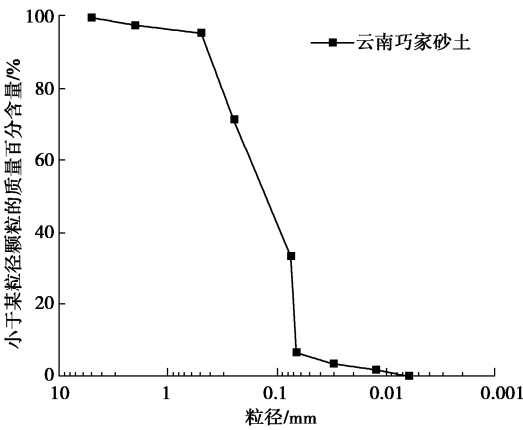


图 3 试验材料颗粒级配曲线

Fig.3 Grain-size distribution curve of testing materials

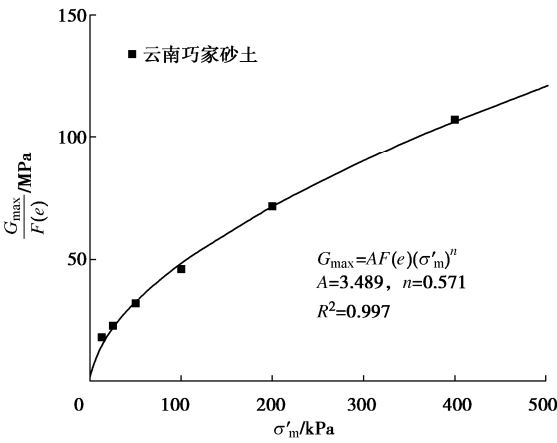


图 4 试验材料的 Hardin 曲线

Fig. 4 Hardin curve of testing materials

接着对饱和和重塑砂土开展动三轴试验, 试样尺寸和制样方法、饱和方法与前面相同。参照原位土体物理力学状态, 控制固结围压分别为 100, 200 kPa, 固结后试样相对密实度分别为 65%和 80%, 得到动强度曲线如图 5 所示。基于各动强度曲线振次  $N=15$  所对应的抗液化强度  $CSR_{N=15}$  和剪切波速  $V_s$ , 以归一化小应变刚度  $G_N=G_{max}/[F(e_{min})(\sigma'_m)^n]$  为横坐标, 归一化抗液化强度  $CRR^n=CSR^n$  为纵坐标, 拟合直线斜率得到参数  $k_{N=15}=0.161\times10^{-3}$   $\text{kPa}^{n-1}$ 。

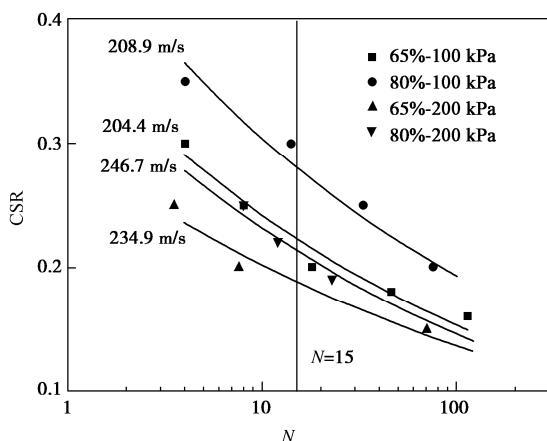


图 5 试验材料的动强度曲线

Fig. 5 Cyclic resistance curves of testing materials

2.3 原位砂土沉积时间效应参数 MEVR 和  $K_{DR}$

结合原位跨孔法波速测量和室内 Hardin 公式试验，利用式 (3) 求参数 MEVR，进而估算  $K_{DR}$ 。有效围压  $\sigma'_m = (1+2K_0)\sigma'_v/3$ ，其中  $K_0$  可按 Jaky 公式计算 ( $K_0=1-\sin\varphi'$ )，取砂土有效内摩擦角  $\varphi'=32.2^\circ$ ，得到  $K_0=0.47$ 。孔隙比  $e$  可通过钻孔时所取土样测得。

图 6 给出了该工程场地典型钻孔 QFK01 的原位与估算剪切波速。由图 6 可见，MEVR 随砂层深度缓慢增长，其值由 1.40 增长至 1.42，故可近似认为砂层 MEVR 基本不变，并以砂层中部 MEVR 值作为该钻孔内砂层的代表性 MEVR 值。

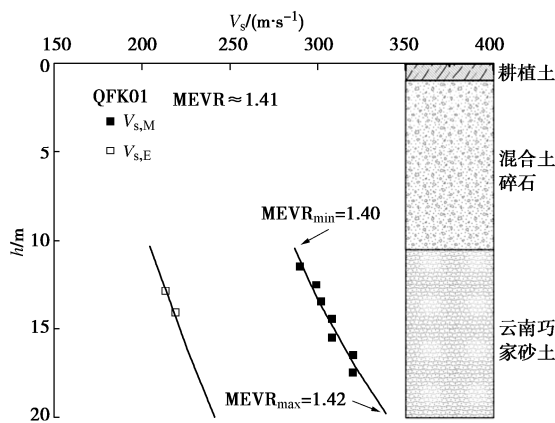


图 6 钻孔 QFK01 实测剪切波速  $V_{s,M}$  和估计剪切波速  $V_{s,E}$

Fig. 6 Values of  $V_{s,M}$  and  $V_{s,E}$  for borehole QFK01

共有 4 个钻孔同时开展了原位波速和孔隙比测试，表 1 给出了各钻孔内砂层 MEVR 值。各钻孔 MEVR 值相近，说明该区域内砂土的沉积年代较一致。后续案例分析中，将这 4 个钻孔的 MEVR 均值作为该区域的代表性 MEVR 值。

2.4 原位抗液化强度与地震液化判别

该工程项目对 8 个原位钻孔进行了剪切波速  $V_s$  和标贯击数  $N$  的测试 (见图 2)。采用本文提出的方法评价 8 个钻孔内易液化砂土层的抗液化强度。其中，

表 1 不同钻孔的沉积时间效应参数 MEVR

Table 1 Values of aging effect parameter MEVR for different boreholes

钻孔编号	测量波速 $V_{s,M}$	估算波速 $V_{s,E}$	MEVR
QFK01	312 m/s	221 m/s	1.41
QFK07	245 m/s	183 m/s	1.34
QFK17	288 m/s	191 m/s	1.51
QFK23	278 m/s	209 m/s	1.33
平均值/标准差	—	—	1.40 / 0.07

地震动剪应力比 CSR 参考 Seed 简化方法<sup>[1]</sup>计算如下：

$$CSR = 0.65 \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v} r_d MSF^{-1}, \quad (7)$$

式中： $a_{\max}$  为地表峰值加速度，按设防烈度 8 度取  $PGA=0.2g$ ； $g$  为重力加速度； $\sigma'_v$  和  $\sigma'_v$  分别为上覆有效应力和上覆总应力，按正常蓄水位 825 m 进行计算； $r_d$  为剪应力折减系数，参考 Liao 等<sup>[23]</sup>取值；MSF 为震级修正系数，震级  $M_w=7.5$  时对应  $MSF=1$ 。

原位砂土抗液化强度可根据重塑样室内试验结果，利用式 (6) 计算。图 7 给出了钻孔 QFK01 内易液化砂层 CSR 和 CRR 随深度的变化。可以看到砂层内浅层土体  $CSR > CRR$  (判为液化)，而深层土体  $CSR < CRR$  (判为不液化)，液化区厚度可占整个砂层厚度的 80% 左右，故判定该钻孔砂层会发生液化。

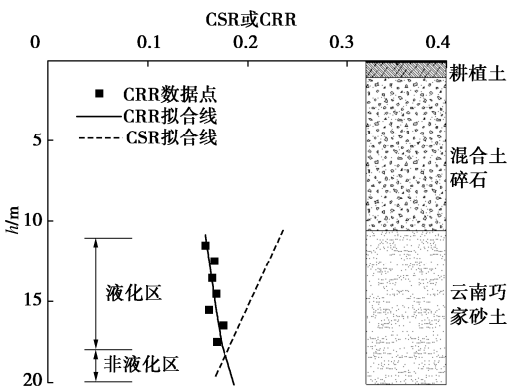


图 7 钻孔 QFK01 内 CSR 和 CRR 随深度的变化

Fig. 7 Variation of CSR and CRR with depth for borehole QFK01

利用原位标贯数据，按照我国《建筑抗震设计规范》所推荐的方法 (“中国建规法”) <sup>[24]</sup> 和美国 NCEER 推荐的基于标贯数据的液化判别方法 (“美国 NCEER 法”) <sup>[2]</sup> 进行液化判别。表 2 给出了本文建议方法、中国建规法和美国 NCEER 法对这 8 个钻孔砂土层的液化判别结果，发现：①对于部分钻孔，上述 3 种方法计算所得液化区深度完全相同，如 QFK04，QFK07 和 FZK312；②对于大部分钻孔，不同方法计算所得液化区深度存在差异，但对上述 8 个钻孔是否液化的判别结果是一致的，即这 3 种方法均给出了 “除钻孔

FZK312, 其余钻孔均存在液化可能性”的判别。

表 2 不同液化判别方法的地震液化判别结果

钻孔 编号	砂层埋 深/m	液化区深度/m		
		本研究 方法	中国 建规法	美国 NCEER 法
QFK01	10.5~20.0	10.5~18.4	10.5~19.0	10.5~18.1
QFK03	1.0~7.5	1.0~7.5	1.0~7.5	1.0~2.1
QFK04	2.7~8.4	2.7~8.4	2.7~8.4	2.7~8.4
QFK07	2.6~7.6	2.6~7.6	2.6~7.6	2.6~7.6
QFK17	5.3~11.8	6.2~11.8	5.3~11.8	7.5~11.8
QFK23	6.5~17.7	6.5~17.7	6.5~17.7	6.5~11.8
FZK312	14.5~17.5	无	无	无
FZK318	9.8~15.9	9.8~14.8	9.8~15.9	9.8~15.9

3 结 语

本文在基于初始液化标准的饱和砂土抗液化强度剪切波速表征模型(“周-陈模型”)的基础上,进一步考虑了沉积时间效应影响,为综合利用原位剪切波速和室内重塑土剪切波速评价原位砂土抗液化强度提供了依据。依托金沙江白鹤滩水电站库区某工程场地开展了原位剪切波速测试、取样和室内单元体试验,得到了修正“周-陈模型”的关键参数,据此建立了相应的原位场地砂土地震液化判别方法。采用本文方法对该工程场地内多个钻孔的易液化土层进行抗液化强度评价和地震液化判别,并与国内外其它液化判别方法进行比较,发现判别结果基本一致。

需要指出,本文研究结果仅能说明所建议的评价方法与中国规范以及美国 NCEER 推荐方法存在良好的一致性,但地震液化判别结果的正确性仍然有待于地震液化物理观测数据的验证。例如,可以开展离心机振动台模型试验重现并监测地震液化过程,或进行工程现场震害实例调查研究等进行验证。

参考文献:

[1] SEED H B, IDRIS I M, ARANGO I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, **109**(3): 458-482.

[2] YOUD T L, IDRIS I M. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(4): 297-313.

[3] 曹振中, 袁晓铭. 砂砾土液化的剪切波速判别方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(5): 943-951. (CAO Zhenzhong, YUAN Xiaoming. Shear wave velocity-based approach for evaluating gravel soils liquefaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2010, **29**(5): 943-951. (in

Chinese))

[4] 陈国兴, 孙苏豫, 吴 琪, 等. 基于剪切波速的砂砾土地震液化评价新方法[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(10): 1763-1771. (CHEN Guoxing, SUN Suyu, WU Qi, et al. Shear wave velocity-based new procedure for assessing seismic liquefaction triggering of sand-gravel soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(10): 1763-1771. (in Chinese))

[5] 孙 锐, 袁晓铭. 适于不同深度土层液化的剪切波速判别公式[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 439-447. (SUN Rui, YUAN Xiaoming. Depth-consistent vs-based approach for soil liquefaction evaluation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(3): 439-447. (in Chinese))

[6] 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.

[7] ZHOU Y G, CHEN Y M. Laboratory investigation on assessing liquefaction resistance of sandy soils by shear wave velocity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(8): 959-972.

[8] ZHOU Y G, CHEN Y M, SHAMOTO Y. Verification of the soil-type specific correlation between liquefaction resistance and shear-wave velocity of sand by dynamic centrifuge test[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(1): 165-177.

[9] 赵倩玉, 孙 锐. 适用于新疆场地的剪切波速液化判别公式[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 383-388. (ZHAO Qianyu, SUN Rui. A shear-wave velocity discrimination formula for liquefaction applicable to Xinjiang region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 383-388. (in Chinese))

[10] CHEN G X, KONG M Y, KHOSHNEVISAN S, et al. Calibration of Vs-based empirical models for assessing soil liquefaction potential using expanded database[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**(2): 945-957.

[11] 周燕国, 丁海军, 陈云敏, 等. 基于原位测试指标的砂土时间效应定量表征初步研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(11): 2000-2006. (ZHOU Yanguo, DING Haijun, CHEN Yunmin, et al. Characterization of ageing effect of sands based on field testing indices[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(11): 2000-2006. (in

- Chinese))
- [12] 陈光仔, 蔡袁强, 王 军, 等. 时间效应对砂土小应变动力特性影响及其微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 4215-4223. (CHEN Guangzai, CAI Yuanqiang, WANG Jun, et al. Research of dynamic properties changes and microscopic mechnism of aging sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 4215-4223. (in Chinese))
- [13] 丁海军. 砂土液化时间效应的剪切波速表征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. (DING Haijun. Shear Wave Velocity-Based Characterization of Aging Effect on Soil Liquefaction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))
- [14] 周燕国, 沈 涛, 王 越, 等. 基督城易液化场地震后小应变剪切刚度演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(8): 1411-1417. (ZHOU Yanguo, SHEN Tao, WANG Yue, et al. Post-earthquake evolution of small-strain shear stiffness at liquefiable deposit in Christchurch[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(8): 1411-1417. (in Chinese))
- [15] LEON E, GASSMAN S L, TALWANI P. Accounting for soil aging when assessing liquefaction potential[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(3): 363-377.
- [16] ANDRUS R D, HAYATI H, MOHANAN N P. Correcting liquefaction resistance for aged sands using measured to estimated velocity ratio[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(6): 735-744.
- [17] BWAMBALE B, ANDRUS R D. State of the art in the assessment of aging effects on soil liquefaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, **125**: 105658.
- [18] ANDRUS R D, STOKOE K H. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(11): 1015-1025.
- [19] 袁晓铭, 卢坤玉, 林 颖, 等. 哈尔滨地区砂土层 N-V 关系特征曲线及对比研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, **40**(6): 1-15. (YUAN Xiaoming, LU Kunyu, LIN Ying, et al. The N-V relationship curve of sand layers in Harbin region and its comparison with those in other regions of China[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, **40**(6): 1-15.(in Chinese))
- [20] BRADLEY K, MALLICK R, ANDIKAGUMI H, et al. Earthquake-triggered 2018 Palu Valley landslides enabled by wet rice cultivation[J]. Nature Geoscience, 2019, **12**(11): 935-939.
- [21] 董菲蕃, 陈国兴, 金丹丹. 福建沿海 3 个盆地的土层剪切波速与深度的统计关系[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 145-151. (DONG Feifan, CHEN Guoxing, JIN Dandan. Statistical relation between shear wave velocity and depth of soils in three basins in coastal area of Fujian province[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 145-151. (in Chinese))
- [22] 王 琦, 刘红帅, 郑 桐, 等. 天津地区覆盖土层剪切波速与埋深的相关性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, **38**(6): 190-201. (WANG Qi, LIU Hongshuai, ZHENG Tong, et al. Correlation analysis between shear wave velocity and depth of covering soils in Tianjin[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, **38**(6): 190-201. (in Chinese))
- [23] LIAO S S C, WHITMAN R V. Overburden correction factors for SPT in sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, **112**(3): 373-377.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Investigation of Geotechnical Engineering: GB 50021—22001[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016. (in Chinese))

(编校: 明经平)