

DOI : 10.16285/j.rsm.2023.0779

# 离心机振动台模型试验验证的珊瑚礁砂 液化判别方法研究

梁小丛<sup>1,2</sup>, 陈平山<sup>1,2</sup>, 刘志军<sup>1,2</sup>, 王永志<sup>3</sup>, 朱明星<sup>1,2</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;  
3. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 工程现场珊瑚礁砂场地主要以珊瑚砂、砾组成的宽级配珊瑚礁砂, 其砾粒含量分布从 20%~90%, 其液化特性与普通石英砂有较大区别, 如仍采用现行液化判别方法评估珊瑚礁砂场地液化潜势, 则容易导致工程场地的抗液化处理设计不经济或无法满足要求。以中国南海岛礁和东帝汶珊瑚礁砂为研究对象开展了原级配大动三轴试验分析, 建立了基于抗液化强度 (cyclic resistance ratios, 简称 CRR) 与相对密实度  $D_r$  关系液化判别方法, 并通过离心机振动试验进行对比分析。结果表明, 当采取相同地震工况时, 由动三轴试验产生的超孔压比相比模型试验超孔压比大; 当持时增加到 30 周时 (对应震级 8 级), 土体液化深度达 20 m, 有效证明了珊瑚礁砂场地遭遇强地震动时具有液化潜在风险。此外, 通过液化判别计算, 验证了基于 CRR- $D_r$  关系的液化判别方法准确率达 82.5%, 且判别不一致工况的判别结果偏保守, 进一步验证了此方法可应用于工程抗液化设计。

**关键词:** 珊瑚礁砂; 液化判别方法; 离心机振动台模型试验; 强地震动

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 11-3173-10

## A liquefaction evaluation method for coral sand based on dynamical centrifuge model test verification

LIANG Xiao-cong<sup>1,2</sup>, CHEN Ping-shan<sup>1,2</sup>, LIU ZHI-jun<sup>1,2</sup>, WANG Yong-zhi<sup>3</sup>, ZHU Ming-xing<sup>1,2</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510230, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai, Guangdong 519082, China;

3. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract:** The coral sand in the project site is mainly composed of coral sand and gravel with wide gradation characteristics, and its coral gravel content is distributed from 20% to 90%. Its liquefaction characteristics are quite different from quartz sand. The application of the current liquefaction evaluation method to the coral reef sand site will lead to the design of liquefaction remediation being uneconomical or unacceptable. In this study, the sands from islands and reefs of the South China Sea and the coral reefs of East Timor were taken as the research objects to conduct the original gradation dynamic triaxial test. A liquefaction evaluation method was developed based on the relationship between the liquefaction resistance CRR and the relative density  $D_r$ , and a comparative analysis was carried out through the centrifuge vibration test. The results show that under the same ground motion conditions, the excess pore pressure ratio generated by the dynamic triaxial test is larger than that of the model test; when the duration increases to 30 weeks (corresponding to magnitude 8), the soil liquefaction depth is up to 20 m, which effectively proves that the coral reef sand site has the potential risk of liquefaction under the action of strong earthquakes. In addition, through the calculation of liquefaction discrimination, it is verified that the accuracy rate of the liquefaction evaluation method based on the "CRR- $D_r$ " relationship is 82.5%, and the inconsistent results are conservative for the working conditions, which can be applied to engineering liquefaction mitigation design.

**Keywords:** coral sand; liquefaction evaluation method; centrifuge vibration model test; strong earthquake motion

收稿日期: 2023-06-12

录用日期: 2023-09-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.42377150)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42377150).

第一作者简介: 梁小丛, 男, 1988 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事陆域形成与地基加固、地基液化风险评估与防治、地基原位测试技术等相关领域科研工作。E-mail: lxiacong@ccc4.com

## 1 引言

珊瑚礁砂,也称为钙质砂、珊瑚砂、珊瑚土等,由于其钙质含量高,土颗粒多棱角、富含孔隙、易破碎,导致其液化特性与普通石英砂有较大区别。目前国内外对于珊瑚礁砂动力学特性已开展较多研究<sup>[1-4]</sup>,其研究方法主要以室内动三轴试验为主,试验对象大部分是筛除大于 2 mm 粒径颗粒,根据试验对比,对于松散~中密状态,其抗液化强度相比石英砂高。而工程实践中,珊瑚礁砂场地主要以珊瑚砂、砾组成的宽级配珊瑚礁砂,其砾粒含量分布从 20%~90%。当砾粒含量占比超过砂粒含量时,如仍采用简化级配试验方法难于反应珊瑚礁砂工程场地液化特征。因此需开展与工程场地级配曲线相接近动三轴试验,以获取接近原场地动力的特性。对于宽级配珊瑚礁砂液化特征研究方面,高冉等<sup>[5]</sup>选取了原状场地级配平均值配置试样,保留了 2~5 mm 颗粒,研究结果表明不排水条件下,珊瑚礁砂可发生液化;袁晓铭等<sup>[6]</sup>结合珊瑚礁砂液化场地特征分析,发现其液化场地级配特征与液化陆相砾性土颗粒级配相似,且液化场地剪切波速值比石英砂场地高。

国内外工程实践对于砂土地基的液化判别主要是以原位测试标贯(standard penetration test,简称 SPT)、静力触探(cone penetration test,简称 CPT)和剪切波速法等现场测试为主,此类判别方法主要针对砂性土、粉土,自 60 年代开始研究,如 Seed<sup>[7]</sup>、谢君斐<sup>[8]</sup>、Youd<sup>[9]</sup>等,已积累了丰富的室内试验、地震现场液化调查等数据。目前国内外对于珊瑚礁砂场地液化判别方法研究较少,而工程实践中往往采用基于石英砂传统液化判别方法或研究建立珊瑚礁砂与石英砂原位测试指标相关性,进而对现行判别结果进行修正方式,如 Wehr<sup>[10]</sup>研究了珊瑚礁砂 CPT 与相对密实度关系的修正公式,如 Morioka 等<sup>[11]</sup>研究对比石英砂与珊瑚礁砂锥尖阻力相关性等。但此类方法未能直接与珊瑚礁砂液化特性建立联系,导致相关工程存在潜在液化风险,因此有必要建立基于珊瑚礁砂液化特性的判别方法,以提高珊瑚礁砂场地液化评估能力,进而为类似地基海洋岛礁工程基础设施防灾减灾提供技术支撑。

## 2 液化判别方法建立思路

针对常规的石英砂液化场地,国内外常见液化判别方法主要有 3 大类:①计算分析和试验相结合的判别方法,如 Seed 简化判别方法<sup>[12]</sup>、日本《港

口设施技术标准》<sup>[13]</sup>判别法;②以地震现场液化调查为主的判别方法,我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)<sup>[14]</sup>属于第 2 类;③计算分析和地震现场液化调查相结合的判别方法,美国 NCEER 判别法<sup>[9]</sup>、欧洲《结构抗震设计》的判别法<sup>[15]</sup>、日本《道路桥梁抗震设计规范》判别法<sup>[16]</sup>。

石英砂液化场地液化数据记录较多<sup>[15,17-18]</sup>,珊瑚礁砂场地液化数据较少,文献上有记载珊瑚礁砂液化场地数据记录案例仅有 3 个<sup>[6]</sup>,分别为 1993 年关岛地震、2006 年夏威夷地震以及 2010 年海地地震。难于提供丰富地震现场液化数据库。鉴于此,本论文主要通过第 1 类方法,即地震循环作用力(cyclic stress ratios,简称 CSR)通过计算分析,砂土抗液化强度 CRR 则通过室内动三轴试验手段获取,通过动三轴试验建立 CRR- $D_r$  关系。

目前国内外学者 CRR 与  $D_r$  关系研究已开展了部分研究,如 Salem 等<sup>[2]</sup>针对 Dabaa 珊瑚砂开展了一系列动三轴试验,并提出等效循环振次为 20 次时对应的经验关系:

$$CRR = 0.641 8 \left( \frac{D_r^{0.55}}{\sigma'_{3c}} \right)^{0.287} \quad (1)$$

式中:  $\sigma'_{3c}$  为有效固结应力。

马维嘉等<sup>[1]</sup>针对中国南海岛礁珊瑚砂开展一系列不排水循环动三轴试验,提出等效循环振次为 15 次和 20 次时对应的经验关系:

$$\left. \begin{aligned} N_{eq} = 15, CRR &= 0.056 5 \left[ (\sigma'_{3c} / 100)^{0.14} D_r^{0.36} \right] + 0.011 \\ N_{eq} = 20, CRR &= 0.053 4 \left[ (\sigma'_{3c} / 100)^{0.14} D_r^{0.36} \right] + 0.012 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $N_{eq}$  为等效循环振次。

但以上试样均为粒径小于 2 mm 的珊瑚砂,与实际工程场地宽级配珊瑚礁砂级配不同,因此并不适用于宽级配工程场地。通过开展宽级配珊瑚礁砂动三轴试验,建立基于 CRR- $D_r$  关系的液化判别方法,具体如下。

## 3 基于 CRR- $D_r$ 关系液化判别方法建立

### 3.1 试验对象

试验研究试样选东太平洋岛国东帝汶 T-Bar 港和中国南海岛礁工程场地珊瑚礁砂两个场地,最大粒径为 40 mm。设置 3 种不同试样:①C 组,采用东帝汶珊瑚礁砂,细粒含量选取场地平均细粒含量 20%;②对比组 N,在 C 组基础上剔除细粒含量后级配;③对比组 H,采用中国南海岛礁珊瑚礁砂配置,

级配曲线与 N 组一致。试验颗粒中细粒含量主要为黏性较低的粉土颗粒，试样级配曲线如图 1 所示。

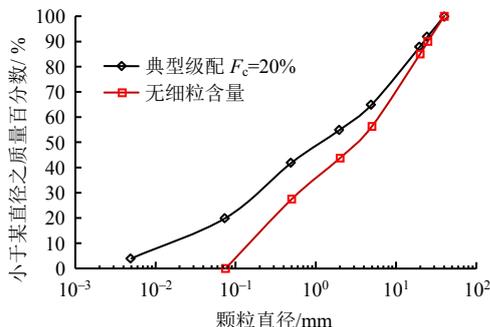


图 1 珊瑚礁砂颗粒级配曲线  
Fig.1 Particle size distribution curves of coral sand

图中灰色线为依托项目东帝汶 T-bar 港珊瑚礁砂场地级配分布。红色线为试验选取的典型级配。分别对上述试样采用 X 射线衍射法（半定量）和化学成分分析法（定量）进行矿物成分分析。X 射线衍射法依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019) [19]，衍射仪采用日本 Rigaku MiniFlex-600 型 X 射线衍射仪 Cu(单色)，工作电压为 40 kV，工作电流为 15 mA，扫描范围  $2\theta=3^\circ\sim 80^\circ$ ，狭缝宽为 1 mm，扫描速度为  $10^\circ/\text{min}$ 。化学成分分析试验，依据国标《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019) [19]，采用简易碱吸收容量法，分别测定了难溶盐二氧化硅、难溶盐碳酸钙的含量。

X 射线衍射结果见表 1，化学成分分析试验结果见表 2。可见两个区域的珊瑚礁砂的主要矿物成分均为方解石和文石（两种矿物成分主要为碳酸钙），两种矿物成分合计占据的比重最大，二氧化硅占据比重较少，均小于 10%。通过化学成分定量分析可得，东帝汶珊瑚礁砂钙质含量为 80.40%，中国南海岛礁珊瑚礁砂相对钙含量相对较高，为 89.38%。

表 1 X 射线衍射分析结果 (单位: %)  
Table 1 X-ray diffraction analysis results (unit: %)

砂料来源	石英	伊利石	绿泥石	方解石	文石	斜长石	文石+方解石
东帝汶 T-Bar 港珊瑚礁	7.8	11.1	6.6	41.3	33.2	0.0	74.5
中国南海岛礁	2.6	3.9	5.3	48.2	37.5	2.5	85.7

表 2 矿物成分分析试验结果表 (单位: %)

砂料来源	SiO <sub>2</sub> /%	CaCO <sub>3</sub> /%
东帝汶 T-Bar 港珊瑚礁	2.70	80.40
中国南海岛礁	0.36	89.38

### 3.2 动三轴试验方案

动三轴试验设备采用英国 GDS 公司 DYN-TTS-60 kN 型大动三轴仪，试样最大直径为 300 mm，适用最大粒径为 60 mm 的砂土。3 组试验分别配置了不同密实度，其中 C 组试验分别配置 40%、60%、80% 3 种相对密实度，N 组与 H 组则配置 40%、80% 相对密实度。有效固结应力采用 100 kPa，循环剪切应力每组相对密实度在 0.15~0.45 区间依次选取 4 个值，振动频率采用 0.5 Hz。试验饱和过程的孔压系数  $B$  值控制在 0.95 以上并维持稳定 >1 h。

### 3.3 基本试验结果分析

#### (1) 抗液化强度特性

试验数据处理方面，由于 N 组及 H 组试样脱模后，试样表面存在显著的颗粒状起伏，动强度试验结果则需要对顺变性的校正，修正方法采用刘荟达等 [20] 提出的基于双尺寸法试验的计算补偿法。获取各试验组 CSR 与循环剪切次数  $N_f$  的试验曲线，不同工况表示方式采用试验简称+相对密实度方式，如 N80 表示为 N 组试验相对密实度为 80% 工况下的试验结果。

对比分析来源地相同、细粒含量不同的 C 组与 N 组，结果见图 2。由图可知，当循环剪切次数  $N_f > 7$ ，含有细粒 C 组的抗液化强度比不含细粒的 N 组低约 10%~20%，且随着循环剪切次数  $N_f$ ，其降低幅度越明显。对比分析级配曲线一致、来源地不同的 N 组与 H 组，结果见图 3。由图可知，当级配曲线一致时，来自中国和东帝汶珊瑚礁砂的抗液化强度差异不明显。

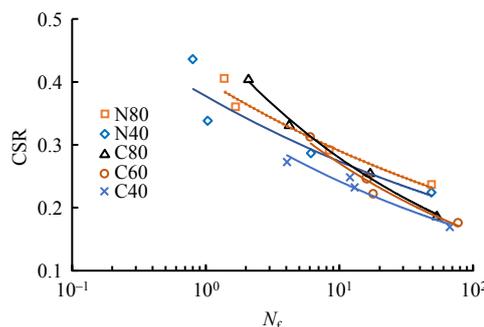


图 2 不同细粒含量组 CSR- $N_f$  关系曲线  
Fig.2 CSR- $N_f$  relation curves of specimens with different fines contents

不同试样组珊瑚礁砂的 CSR- $N_f$  曲线关系可由幂函数关系表达：

$$CSR = mN_f^n \quad (3)$$

式中： $m$ 、 $n$  为试验参数。根据图 2、3 获取了不同试验工况下的拟合参数，如表 3 所示。

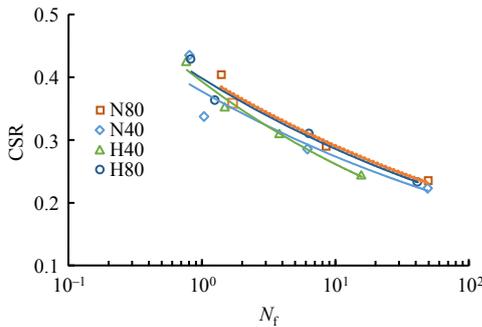


图3 不同试样来源区抗液化强度曲线  
Fig.3 CSR- $N_f$  relation curves of specimens from different regions

表3 不同试样组珊瑚礁砂的 CSR- $N_f$ 拟合曲线  
Table 3 CSR- $N_f$  fitting curves of coral sand for different sample groups

试样组	相对密度 / %	未修正		顺变性修正		拟合优度 $R^2$
		$m$	$n$	$m$	$n$	
C	40	0.352	-0.163	—	—	0.92
	60	0.469	-0.236	—	—	0.96
	80	0.474	-0.229	—	—	0.99
N	40	0.554	-0.187	0.382	-0.148	0.85
	80	0.623	-0.187	0.405	-0.146	0.87
H	40	0.507	-0.194	0.394	-0.182	0.97
	80	0.546	-0.175	0.399	-0.146	0.95

此外为了分析相对密度对珊瑚礁砂与石英砂抗液化强度的影响，分别选取来自马维嘉<sup>[1]</sup>、Salem<sup>[2]</sup>、Morioka<sup>[14]</sup>与 Sandoval<sup>[21]</sup>等的石英砂进行对比，见图4。可得，对于中密~松散状态砂土（相对密度约65%~25%），石英砂的抗液化强度值低于珊瑚礁砂；而对于密实的砂土（相对密度为80%），石英砂的抗液化强度则高于珊瑚礁砂。由此可见珊瑚礁砂抗液化强度对相对密度敏感性远低于石英砂。

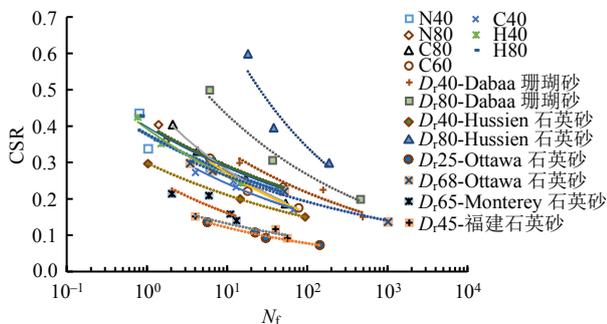


图4 不同相对密度抗液化强度曲线  
Fig.4 CSR- $N_f$  relation curves of specimens with different relative densities

(2) 孔压增长特征分析

孔压比与振次比关系是通过有效应力法进行

液化场地土层反应分析的基础模型，以 Seed<sup>[15]</sup>提出的单参数反正弦模型为主，见下式：

$$\frac{u}{\sigma'_c} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left( \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{2\theta}} \quad (4)$$

式中： $u$ 为残余超孔隙水压力，与 $\sigma'_c$ 之比称为孔压比； $N$ 为当前循环振动次数； $N_f$ 为液化循环振次，二者之比称为振次比； $\theta$ 为试验参数，由试验结果拟合得到。

王鸾等<sup>[22]</sup>根据珊瑚礁砂的试验研究结果提出的双参数修正模型，如下式所示：

$$\frac{u}{\sigma'_c} = \frac{a}{\pi} \arcsin \left( \frac{N}{N_f} \right)^b \quad (5)$$

式中： $a$ 、 $b$ 为试验参数，其他参数与Seed模型相同。该模型对含砾粒以上的较大粒组的珊瑚礁砂具有较好的适用性。

为了进一步分析不同工况下孔压比与振次比关系曲线特征，将不同工况的关系曲线绘制于图5。明显可看出，含细粒组C与无细粒组N和H的关系曲线特征分布的范围明显不同。因此需要根据含细粒组C组与无细粒组N和H组分别给出模型的代表性参数。

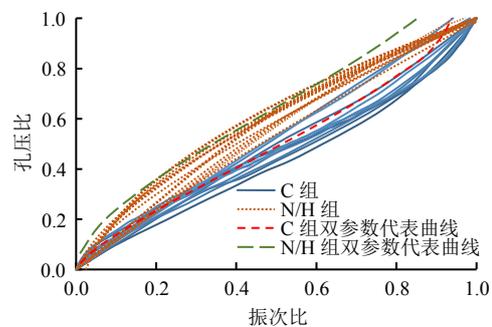


图5 各试验工况下孔压比与振次比关系

Fig.5 Relationships between pore pressure ratio and vibration frequency ratio for every specimen groups

根据上述不同工况拟合参数分析，对于同一级配试样，不同相对密度以及CSR工况下规律性不强，分别采用试验分组不同工况模型参数均值作为代表值，见表4，并将代表参数曲线绘制于图5。

表4 不同试验组孔压增长模型的参数代表值  
Table4 Representative values of parameters of pore pressure growth model in different specimen groups

试验组	双参数模型	
	$a$	$b$
C	2.395	1.345
N/H	2.741	1.756

### 3.4 珊瑚礁砂 CRR-D<sub>r</sub> 表征关系建立

根据珊瑚礁砂细粒组 C 与无细粒组 N、H 的抗液化强度关系曲线, 分别建立典型振次为 20 次作用下 CRR 与 D<sub>r</sub> 的关系曲线, 见图 6。

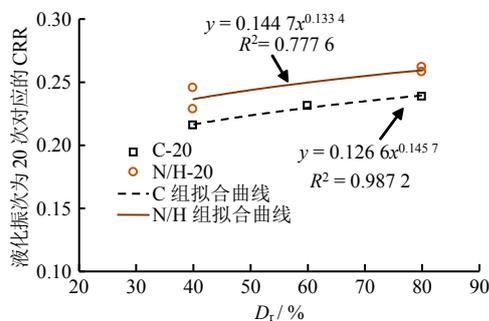


图 6 CRR 与 D<sub>r</sub> 关系曲线  
Fig.6 Relation curves between CRR and D<sub>r</sub>

根据图 6 曲线拟合, 对于侧限压力为 100 kPa 的场地, 可得经验公式:

对于含细粒宽级配珊瑚礁砂, 有

$$CRR_{20} = 0.1266 D_r^{0.1457} \quad (6)$$

对于干净宽级配珊瑚礁砂, 有

$$CRR_{20} = 0.1447 D_r^{0.1334} \quad (7)$$

式中: CRR<sub>20</sub> 为等效振次为 20 次时对应抗液化强度。

当场地地震震级对应的等效振次非 20 次时, 可根据 CSR- $\lg N_f$  关系计算任意液化振次  $N$  时对应抗液化强度 CRR <sub>$N$</sub> , 具体如下: 由 CSR- $\lg N_f$  为乘幂关系可知, 当 CSR 与  $N_f$  均取对数时, 两者拟合曲线为线性关系, 见图 7。对于含细粒宽级配珊瑚礁砂 CFT 试样, 拟合的双对数直线斜率为-0.234, 对于干净宽级配珊瑚礁砂 N 与 H 组, 拟合的双对数直线斜率为-0.135。

由液化振次  $N$  次时所对应抗液化强度 CRR <sub>$N$</sub>  计算:

对于含细粒宽级配珊瑚礁砂

$$CRR_N = CRR_{20} \cdot (N_f/20)^{-0.234} \quad (8)$$

对于干净宽级配珊瑚礁砂

$$CRR_N = CRR_{20} \cdot (N_f/20)^{-0.135} \quad (9)$$

## 4 基于离心机振动台模型试验验证

### 4.1 模型方案

对于珊瑚礁砂液化判别方法验证, 主要采取现场地震液化数据或者室内模型试验进行验证。由于目前收集到珊瑚礁砂场地地震液化数据较少, 无法满

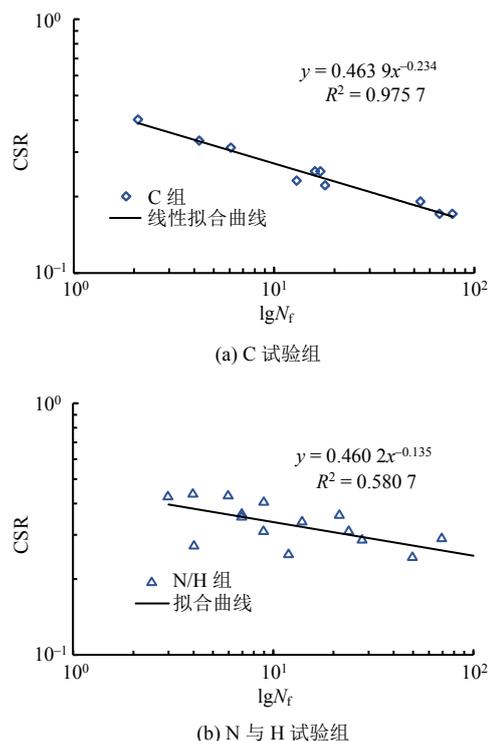


图 7 CSR- $\lg N_f$  关系曲线  
Fig.7 Relation curves between CSR- $\lg N_f$

足验证需求, 因此采用基于室内模型试验方法进行验证。国内外有关珊瑚礁砂场地模型试验主要以振动台模型试验为主, 采用离心机振动台开展试验较少, 由于模型试验是缩尺试验, 大部分模型试验采取小于 2 mm 粒径配置场地进行试验, 导致与原场地级配曲线相差甚远。

根据《土工离心模型试验技术规程》(DL/T 5102—2013) [23] 规定, “对于粗粒土, 允许最大粒径应不超过 1/20~1/10 模型宽度, 其平均粒径不超过 1/250~1/60 模型宽度, 结构与土体主要接触面较小尺寸与土体平均粒径之比应大于 30”。由土骨架理论得知,  $d_{60}$  (筛分曲线中质量百分比为 60% 对应的孔径) 以上颗粒剔除不会影响土体力学性能, 为保留原状土的基本试验特点, 试验材料采用保留 2~5 mm 颗粒, 剔除 >5 mm 颗粒, 即保留了土试样宽级配特征。

本次试验采用中国地震局工程力学研究所 DCIEM-40-300 大型动力离心机, 模型箱采用层状柔性剪切箱, 尺寸为 1.20 m (长) × 0.50 m (宽) × 0.65 m (高)。试验加速度计采用美国 PCB 公司 ICP 传感器, 量程为 100g, 频宽为 0.2~20.0 kHz。孔压计采用分体式 DSP-II 传感器, 量程为 -100~600 kPa / -100~1.0 MPa, 频响 ≥ 300 kHz、响应时间 ≤ 0.1 ms。共布置 9 层加速度计及孔压计, 采用离心加速度 50g, 即模型比例尺取 50 进行试验, 布置图如图 8

所示。

### 4.2 试验过程

模型制作采用砂雨法+夯实法，分层配置。模型相对密实度均按照  $50\% \pm 3\%$  进行控制。饱和液体选取无色透明的甲基纤维素，饱和过程是将制备好的干砂模型放入真空饱和箱，抽真空后再将甲基纤维素溶液缓慢地从试样底部进入试样直至试样饱和，整个过程持续 10 d 左右。试验开展过程选取的是正弦波以及地震安评报告推荐的基岩波作为输入荷载，依次按照地震加速度从小到达两种波形交替间隔输入，各工况间间隔适当时间以保证孔隙水压力充分消散。本次试验仅选取与本文相关的工况，即正弦波作为分析。地震动工况分别为：0.05g（持时 20 s）、0.10g（持时 20 s）、0.2 g（持时 20 s）、0.3g 正弦波（持时 20 s）、0.3g 正弦波（持时 30 s），振动台的振动频率为 1 Hz。施振前、施振后及输入大震前，加载扫频波扫描场地频率，用以评估模型动力特性的改变情况。输入波形时程与频谱曲线如图 9 所示。

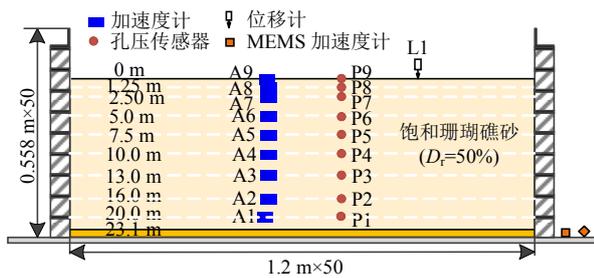


图 8 离心机振动台模型布置图

Fig.8 Dynamic centrifuge model layout

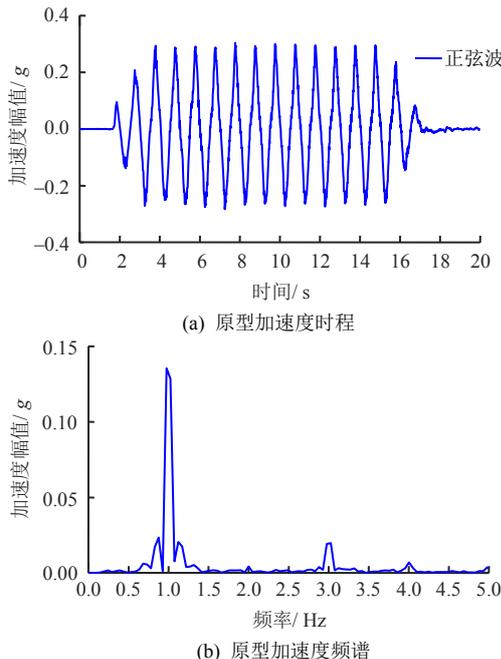


图 9 正弦波时程与傅里叶谱

Fig.9 Sine wave time history and Fourier spectrum

### 4.3 试验基本结果分析

定义模型底部输入荷载的加速度峰值为 PBA（peak base acceleration，简称 PBA），模型表面记录的加速度峰值为 PGA（peak ground acceleration，简称 PGA），PGA/PBA 对应为场地土层放大系数  $a_d$ 。图 10 给出了珊瑚礁砂天然场地模型在不同正弦波输入下，土层的加速度时程放大系数  $a_d$  随深度的变化。可以发现，不同正弦波对应的地表放大系数  $a_d$  的范围约为 2.38~1.45 倍，且同一正弦波作用下放大系数自下而上呈现先缓慢增大到地表处急剧增大的特征，且随着输入荷载 PBA 增大，地表放大系数  $a_d$ （地表加速度/输入加速度）呈现减小趋势，这主要是由于随着地震动强度增加，土体变形增大导致剪切模量下降。

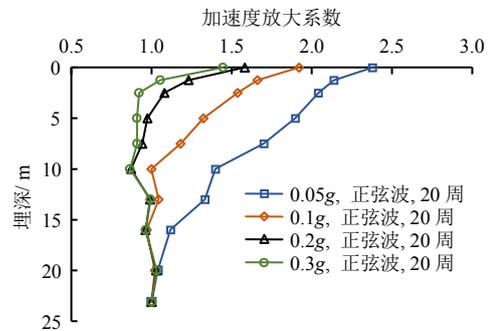


图 10 不同正弦波作用下模型试验峰值加速度放大系数随深度分布曲线图

Fig.10 Variation of peak acceleration amplification coefficient of model test at different sine waves with depth

图 11 给出了珊瑚礁砂天然场地模型在不同正弦波输入下，最大超静孔隙水压力以及最大超孔压比的土层空间分布（其中 16 m 深度处 P2 孔压传感器试验过程异常未能采集数据）。可以发现：各层超静孔压的水力梯度随深度变化，基本呈线性分布，表面各层的渗透系数基本一致，水力梯度与埋深线性相关；安评地震波需要 0.2g 条件下触发未加固场地液化，相同加速度条件下正弦波由于能量较大，其触发液化加速度在 0.1g~0.2g 之间；对于振动持时为 20 周且加速度为 0.3g 的正弦波，其触发液化深度为 2.5 m，如基于设计考虑，采用孔压比 0.8 作为阈值判别，设计液化深度可按 6.0 m 考虑；而当持时增加到 30 周时（对应震级 8 级），土体液化深度则达 20 m。

### 4.4 珊瑚礁砂液化判别方法验证

(1) 安全系数  $F_s$  与孔压比  $R_g$  关系

为了验证新建立的珊瑚砂液化判别方法可靠性，需建立抗液化安全系数  $F_s$  和孔压比  $R_g$  之间关

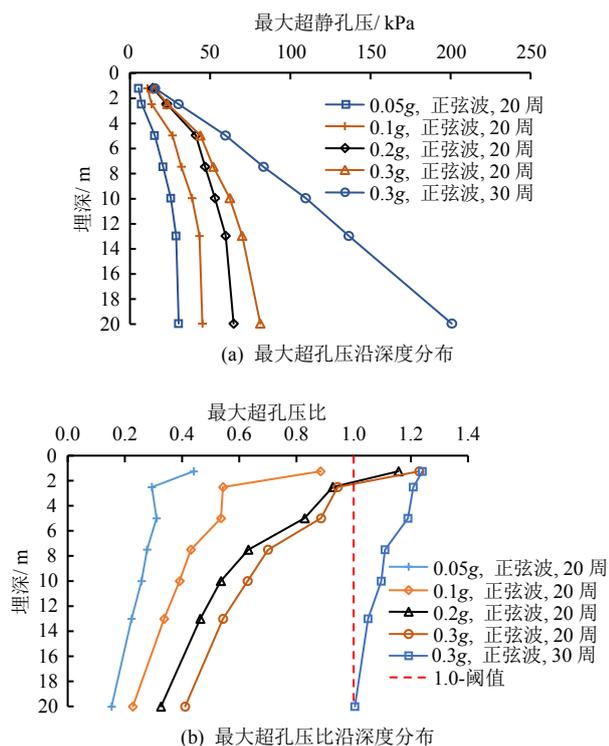


图 11 不同正弦波作用下最大超静孔压、最大超孔压比随土层深度分布曲线图

Fig.11 Variations of maximum excess static pore pressure and maximum excess pore pressure ratio with depth at different sine waves

系，将计算的抗液化安全系数转化为孔压比，并与模型实测值进行对比。由于不同室内试验方法，其试验边界条件不同，导致获取经验关系也有差异性。

由动三轴试验建立的剪切作用力 CSR 与液化作用次数  $N_f$  的关系见式 (3)。此关系是在孔压比  $R_g = 1$  判别准则基础上建立，其建立判别曲线对应  $CRR = CSR$ 。而当液化发生在土体抗剪强度 CRR 时，其对应等效作用次数  $N_R$  为

$$CRR = mN_R^n \quad (10)$$

而当液化发生在土体动剪切作用力 CSR 时，其对应等效作用次数为  $N_f$ 。

式 (10) 和式 (3) 相除得

$$F_s = CRR / CSR = (N_R / N_f)^n \quad (11)$$

根据前述珊瑚砂孔压增长模型建立的孔压比  $R_g$  与液化振次比  $N / N_f$  关系可知，取  $N$  等于  $N_R$ ，则可建立孔压比  $R_g$  与安全系数  $F_s$  关系为

$$R_g \sim (N / N_f) = (N_R / N_f) = (F_s)^{1/n} \quad (12)$$

基于前述珊瑚礁砂动三轴试验获取孔压增长模型计算不同工况孔压比  $R_g$  与安全系数  $F_s$  关系，并与 Iwasaki 等<sup>[24]</sup>基于振动台模型试验建立关系曲线

进行对比，见图 12。此外，Iwasaki 等<sup>[24]</sup>还提供了两者之间关系表，见表 5。

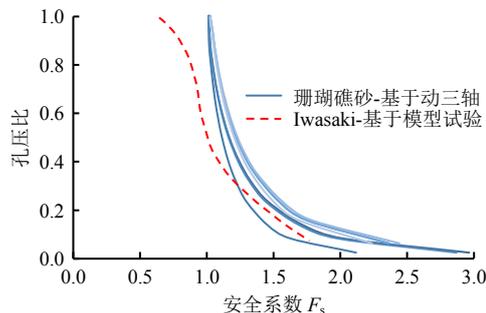


图 12 孔压比与抗液化安全系数关系曲线图

Fig.12 Relationship curves between pore pressure ratio and anti-liquefaction safety factor

表 5 超孔压比与抗液化安全系数的关系表

Table5 Relationship table between excess pore pressure ratio and anti-liquefaction safety factor

安全系数	孔压比
$F_s \leq 0.6$	$R_g = 1.0$
$0.6 < F_s \leq 0.8$	$0.9 \leq R_g < 1.0$
$0.8 < F_s \leq 1.0$	$0.5 \leq R_g < 0.9$
$1.0 < F_s$	$R_g < 0.5$

由上述经验关系对比分析可知，当孔压比 0.5~1.0 之间时，动三轴试验计算的抗液化安全系数在 1.17~1.00 之间，而模型试验计算安全系数在 1.0~0.6 之间。可见，输入相同地震工况时，当取相同抗液化安全系数时，由动三轴试验产生超孔压比相比模型试验获取超孔压比大。即采用动三轴试验建立的液化判别方法会相对更加保守。这主要由于两种试验排水边界条件不一致，动三轴试验试样是在不排水条件下输入动荷载，而模型试验则模拟现场自由排水界面，其获取关系更倾向接近工程实际场地。

(2) 基于离心机振动台的 CRR- $D_r$  表征关系验证选取正弦波施振测试数据进行计算对比。采用 Seed 等<sup>[7]</sup>提供的 CSR 计算式计算模型地基不同深度的 CSR 值：

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \quad (13)$$

式中： $\tau_{av}$  为等效水平地震剪应力； $\sigma'_{vo}$  为有效上覆应力； $\sigma_{vo}$  为总的上覆应力； $a_{max}$  为水平峰值加速度； $r_d$  为剪应力折减系数，参照 NCEER<sup>[9]</sup>取值。峰值加速度  $a_{max}$  取值需结合每次振动不同深度的放大系数  $a_d$ ，由此计算获得每次振动工况场地不同深度的 CSR。

其次采用含细粒宽级配式(8)计算地基抗液化强度 CRR。由于每次地震动试验后密实度均不同程度提高,计算的  $D_r$  值可根据每次地震动前沉降值进行反算,以获得每次地震动对应的真实 CRR 值。

再次根据  $F_s = CRR/CSR$  获取不同深度的抗液化安全系数。接着基于抗液化安全系数  $F_s$  与孔压比  $R_g$  关系,转换为不同深度的孔压比,同时与实测值进行比较。详细结果见表 6。

表 6 离心机振动与 CRR- $D_r$  液化判别方法对比分析结果  
Table 6 Comparative analysis results of centrifuge vibration and CRR- $D_r$  liquefaction evaluation method

加速度 /g	深度 /m	$D_r$ /%	计算 $F_s$	计算 $R_g$	液化	实测 $R_g$	判别结果
0.05 正弦波	1.25	50.00	1.72	$\leq 0.5$	否	0.44	符合
	2.50	50.00	1.80	$\leq 0.5$	否	0.29	符合
	5.00	50.00	1.93	$\leq 0.5$	否	0.31	符合
	7.50	50.00	2.16	$\leq 0.5$	否	0.28	符合
	10.00	50.00	2.62	$\leq 0.5$	否	0.26	符合
	13.00	50.00	2.75	$\leq 0.5$	否	0.22	符合
	16.00	50.00	3.28	$\leq 0.5$	否	0.18	符合
20.00	50.00	3.53	$\leq 0.5$	否	0.15	符合	
0.10 正弦波	1.25	52.20	1.04	$\leq 0.5$	否	0.88	符合
	2.50	52.20	1.13	$\leq 0.5$	否	0.54	符合
	5.00	52.20	1.31	$\leq 0.5$	否	0.54	符合
	7.50	52.20	1.47	$\leq 0.5$	否	0.43	符合
	10.00	52.20	1.64	$\leq 0.5$	否	0.39	符合
	13.00	52.20	1.66	$\leq 0.5$	否	0.34	符合
	16.00	52.20	1.68	$\leq 0.5$	否	0.28	符合
20.00	52.20	1.70	$\leq 0.5$	否	0.23	符合	
0.20 正弦波	1.25	55.90	0.60	1.00	是	1.16	符合
	2.50	55.90	0.81	0.88	否	0.93	符合
	5.00	55.90	0.83	0.85	否	0.83	符合
	7.50	55.90	0.83	0.83	否	0.63	符合
	10.00	55.90	0.85	0.80	否	0.54	符合
	13.00	55.90	0.86	0.78	否	0.46	符合
	16.00	55.90	0.86	0.78	否	0.39	符合
20.00	55.90	0.87	0.77	否	0.33	符合	
0.30 正弦波 (30周)	1.25	64.20	0.56	1.00	是	1.23	符合
	2.50	64.20	0.56	1.00	是	0.94	不符合
	5.00	64.20	0.57	1.00	是	0.89	不符合
	7.50	64.20	0.57	1.00	是	0.70	不符合
	10.00	64.20	0.58	1.00	是	0.63	不符合
	13.00	64.20	0.58	1.00	是	0.54	不符合
	16.00	64.20	0.58	1.00	是	0.48	不符合
20.00	64.20	0.59	1.00	是	0.41	不符合	
0.30 正弦波 (30周)	1.25	79.60	0.58	1.00	是	1.24	符合
	2.50	79.60	0.58	1.00	是	1.21	符合
	5.00	79.60	0.58	1.00	是	1.19	符合
	7.50	79.60	0.58	1.00	是	1.11	符合
	10.00	79.60	0.59	1.00	是	1.10	符合
	13.00	79.60	0.60	1.00	是	1.05	符合
	16.00	79.60	0.60	1.00	是	1.02	符合
20.00	79.60	0.61	1.00	是	1.00	符合	

由上述对比分析结果表可知,当采用建立 CRR- $D_r$  关系进行液化判别时,在地震加速度  $0.05g \sim 0.20g$  (振次 20 周) 范围时,其液化判别结果与实测值吻合,除了  $0.2g$  作用时浅层  $1.25\text{ m}$  产生液化,其他施震工况均为发生液化。而当地震加速度达到  $0.3g$  时,液化判别计算结果为全深度范围液化,而模型实测结果并未发生液化,仅当振次增加至 30 周次时,模型才发生全深度液化。40 工况中仅 7 个工况判断错误,准确率为 82.5%。由此可见,采用新建立的珊瑚礁砂 CRR- $D_r$  关系进行场地液化判别,其判别结果准确率高对于判别不一致的工况,计算结果偏保守,可用于工程抗液化设计应用。

## 5 结 论

通过室内动三轴建立了珊瑚礁砂抗液化强度与相对密实度关系,并通过离心振动台模型试验进行了验证,主要结论如下:

(1) 对于中密~松散状态砂土(相对密实度小于  $65\% \sim 25\%$ ),石英砂的抗液化强度值低于珊瑚礁砂;对于密实砂土(相对密实度为  $80\%$ ),石英砂的抗液化强度则高于珊瑚礁砂,可见珊瑚礁砂的抗液化强度对相对密实度的敏感性远低于石英砂。

(2) 当计算的安全系数相同时,由动三轴试验获取的超孔压比相比模型试验实测值高。即当采取相同地震动工况时,由动三轴试验产生超孔压比相比模型试验超孔压比大。因此,采用动三轴试验建立的液化判别方法会相对更加保守。

(3) 在长持时 20 周、 $0.3g$  幅值的正弦波激励下,珊瑚礁砂未加固地基液化深度为  $2.5\text{ m}$ ;当持时增加到 30 周时(对应震级 8 级),土体液化深度达  $20\text{ m}$ ,其有效证明了罕遇强震、近场地震动作用下珊瑚礁砂具有液化潜在危险性。

(4) 当采用建立的珊瑚礁砂 CRR- $D_r$  关系进行场地液化判别,经超孔压比与安全系数关系转换后,与模型实测值相比,液化判别的准确率达 82.5%。且对于判别不一致的工况,计算结果偏保守,可应用于工程抗液化设计。

## 参 考 文 献

- [1] 马维嘉,陈国兴,李磊,等. 循环荷载下饱和南沙珊瑚砂的液化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 981-988.  
MA Wei-jia, CHEN Guo-xing, LI Lei, et al. Experimental study on liquefaction characteristics of saturated coral

- sand in Nansha Islands under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(5): 981-988.
- [2] SALEM M, ELMAMLOUK H, AGAIBY S. Static and cyclic behavior of North Coast calcareous sand in Egypt[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2013, 55: 83-91.
- [3] SHARMA S S, ISMAIL M A. Monotonic and cyclic behavior of two calcareous soils of different origins[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(12): 1581-1591.
- [4] 刘抗, 陈国兴, 吴琪, 等. 循环加载方向对饱和珊瑚砂液化特性的影响[J]. **岩土力学**, 2021, 42(7): 1951-1960.  
LIU Kang, CHEN Guo-xing, WU Qi, et al. Effects of cyclic loading directions on liquefaction characteristics of saturated coral sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(7): 1951-1960.
- [5] 高冉, 叶剑红. 中国南海吹填岛礁钙质砂动力特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2019, 40(10): 10-14.  
GAO Ran, YE Jian-hong. Experimental investigation on the dynamic characteristics of calcareous sand from the reclaimed coral reef islands in the South China Sea[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(10): 10-14.
- [6] 袁晓铭, 张文彬, 段志刚, 等. 珊瑚土工程场地地震液化特征解析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2019, 38(10): 3799-3811.  
YUAN Xiao-ming, ZHANG Wen-bin, DUAN Zhi-gang, et al. Analysis for characteristic of seismic liquefaction in engineering sites of coralline soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(10): 3799-3811.
- [7] SEED H B, IDRIS I M. Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1967, 93(3): 83-108.
- [8] 谢君斐. 关于修改抗震规范砂土液化判别式的几点意见[J]. **地震工程与工程振动**, 1984, 4(2): 95-126.  
XIE Jun-pei. Some opinions on modifying the discriminant formula of sand liquefaction in seismic code[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1984, 4(2): 95-126.
- [9] 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 & Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(4): 297-313.
- [10] WEHR W. Influence of the carbonate content of sand on vibrocompaction[C]//6th International Conference on Ground Improvement Techniques. Coimbra, Portugal: [s. n.], 2005.
- [11] MORIOKA B T, NICHOLSON P G. Evaluation of the liquefaction potential of calcareous sand[C]//International Offshore and Polar Engineering Conference. [S. l.]: [s. n.], 2000.
- [12] SEED H B I I M. A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. **ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal**, 1971, 97(9): 1249-1273.
- [13] Ports and Harbours Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, National Institute for Land and Infrastructure Management, Port and Airport Research Institute. 2009 Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan[S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [15] IDRIS I M, BOULANGER R W. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures[R]. Davis: Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 2014.
- [16] 刘健新, 葛胜锦. 日本公路桥梁抗震设计规范释义[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.  
LIU Jian-xin, GE Sheng-jin. Interpretation of Japanese highway bridge seismic design code[M]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [17] IDRIS I M, BOULANGER R W. SPT-based liquefaction triggering procedures[R]. Davis: Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 2010.
- [18] 魏琰, 谢君斐. 中国工程抗震四十年(1949-1989)[M]. 北京: 地震出版社, 1989.  
WEI Lian, XIE Jun-fei. Forty years of research on earthquake resistance engineer (1949-1989) [M]. Beijing: Earthquake Press, 1989.

- [18] WANG Y, QUE J M, WANG C, et al. Three-dimensional observations of meso-structural changes in bimsoil using X-ray computed tomography (CT) under triaxial compression[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 190: 773-786.
- [19] HILD F, BOUTERF A, ROUX S. Damage measurements via DIC[J]. **International Journal of Fracture**, 2015, 191: 77-105.
- [20] 李英杰, 张亮, 王炳乾, 等. 基于 CT 扫描和数字体相关法的页岩各向异性三维变形场特征研究[J]. **岩土力学**, 2023, 44(增刊): 134-144.  
LI Ying-jie, ZHANG Liang, WANG Bing-qian, et al. Study on anisotropic three-dimensional deformation field characteristics of shale based on CT scanning and digital volume correlation method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(Suppl.): 134-144.
- [21] YANG Z, REN W, SHARMA R, et al. In-situ X-ray computed tomography characterization of 3D fracture evolution and image-based numerical homogenization of concrete[J]. **Cement and Concrete Composites**, 2017, 75: 74-83.
- [22] LI C, KONG L, GUO A, et al. X-ray microscopic study on disintegration of granite residual soil[Z]. E3S Web of Conferences. Glasgow, United kingdom. 2019: 09006.
- [23] ALIKARAMI R, ANDÒ E, GKIOUSAS-KAPNISIS M, et al. Strain localisation and grain breakage in sand under shearing at high mean stress: insights from in situ X-ray tomography[J]. **Acta Geotechnica**, 2014, 10(1): 15-30.
- [24] CHENG Z, WANG J. Quantification of the strain field of sands based on X-ray micro-tomography: a comparison between a grid-based method and a mesh-based method[J]. **Powder Technology**, 2019, 344: 314-334.
- [25] WANG Y, LIU D, HU Y. Monitoring of internal failure evolution in cemented paste backfill under uniaxial deformation using in-situ X-ray computed tomography[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2019, 12(5): 138.
- [26] LI C, KONG L W, SHU R, et al. Dynamic three-dimensional imaging and digital volume correlation analysis to quantify shear bands in grus[J]. **Mechanics of Materials**, 2020, 151: 103646.
- [27] LI C, KONG L W, AN R. Evolution of cracks in the shear bands of granite residual soil[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2022, 14(6): 1956-1966.

---

上接第 3181 页

- [19] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GBT 50123—2019 Standards for geotechnical test methods[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [20] 刘荟达, 袁晓铭, 王鸾, 等. 宽级配砾性土试样橡皮膜嵌入量研究与新计算公式[J]. **岩石力学与工程学报**, 2020, 39(4): 804-815.  
LIU Hui-da, YUAN Xiao-ming, WANG Luan, et al. Research and new calculation formula of membrane penetration in wide graded gravel soils sample[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(4): 804-815.
- [21] SANDOVAL E A, PANDO M A. Experimental assessment of the liquefaction resistance of calcareous biogenous sands[J]. **Earth Sciences Research Journal**, 2012, 16(1): 55-63.
- [22] 王鸾, 孙锐, 刘荟达, 等. 砾性土动三轴液化试验橡皮膜顺变性补偿新方法[J]. **岩土工程学报**, 2020, 42(12): 2281-2290.  
WANG Luan, SUN Rui, LIU Hui-da, et al. New method to compensate for membrane compliance in dynamic triaxial liquefaction tests on gravelly soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(12): 2281-2290.
- [23] 中国电力企业联合会. DL/T 5102—2013 土工离心模型试验技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.  
China Electricity Council. DL/T 5102—2013 Specification for geotechnical centrifuge model test techniques[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [24] IWASAKI T, ARAKAWA T, TOKIDA K I. Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes[J]. **International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1984, 3(1): 49-58.