

# 砂-复合固化淤泥路用强度特性试验研究

柴芮祥<sup>1,3</sup>, 吴 恺<sup>1,3</sup>, 崔锦梅<sup>2</sup>, 王继成<sup>3\*</sup>, 宋春霞<sup>3</sup>

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 浙江 宁波 315000;  
3. 宁波工程学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 为提高传统水泥、石灰固化淤泥路用力学性能指标, 改善其工程特性, 探究砂-复合传统固化淤泥的可行性。本文通过单掺以及正交试验方法研究砂复合固化淤泥强度影响规律。试验结果表明: 无论河砂还是海砂复合后的固化淤泥7 d无侧限抗压强度都得到明显提升, 12%左右掺量时海砂复合固化淤泥早期强度可以达到1.39 MPa, 河砂复合固化淤泥可达到1.35 MPa。且正交试验显示海砂掺量、压实度、龄期与固化淤泥抗压以及劈裂强度都呈正相关变化, 主次顺序为: 龄期>压实度>海砂掺量, 三因素对固化淤泥抗压强度影响都十分显著。本文结论对实际工程应用具有重要参考价值。

**关键词:** 砂复合固化淤泥; 正交试验; 力学性能; 提高

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)06-0471-07

## Experimental study on road strength characteristics of sand composite solidified silt road

CHAI Rui-xiang<sup>1,3</sup>, WU Kai<sup>1,3</sup>, CUI Jin-mei<sup>2</sup>, WANG Ji-cheng<sup>3\*</sup>, SONG Chun-xia<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Shaoxing University of Arts and Science, Shaoxing 312000, China;

2. Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

3. Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** This paper aims to improve the mechanical performance indexes of traditional cement and lime solidified silt, improve their engineering characteristics, and explore the feasibility of sand composite traditional solidified silt. In this paper, the influence of sand composite on solidified silt strength is studied by single mixing and orthogonal test. The test results show that the 7 d unconfined compressive strength of the solidified silt after compounding of both river and sea sand was significantly improved. At the content of about 12%, the early strength of the compound sea sand silt can reach 1.39 MPa and the compound river sand silt can reach 1.35 MPa. In addition, the orthogonal test showed that the amount of sea sand, degree of compaction and age had positive effect on the compression strength and splitting strength of the solidified silt with the order age, compaction degree and sand content. The influence of three factors on the compressive strength of solidified silt is very significant. The conclusion of this paper has important reference value for practical engineering applications.

**Key words:** sand compound solidified sludge; orthogonal test; mechanical properties; improve

## 0 引 言

宁波市每年产生的建筑淤泥高达几百万吨, 为响应我国可持续发展观, 用固化淤泥替代日益稀缺的传统填料是很好的选择。目前以水泥、石灰、粉

煤灰为代表的传统固化剂研究日益成熟<sup>[1-3]</sup>, 国外学者在水泥固化淤泥的基础上添加新型外加剂也实现了不错的改善<sup>[4-5]</sup>。对于砂在固化淤泥中的研究非常少。相近的研究中喻国轩<sup>[6]</sup>通过单掺法对水泥、石灰吹填海砂的加固效果进行研究, 提出水泥加固

收稿日期: 2020-11-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51508283)。

作者简介: 柴芮祥 (1995—), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事土木工程方面的研究。E-mail: 394014797@qq.com。

\*通讯作者: 王继成 (1975—), 男, 安徽宣城人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土木工程方面的教学和研究。E-mail: wjc1818@zju.edu.cn

效果要优于石灰,并且加固土存在龄期效应;王天、翁兴中等<sup>[7]</sup>通过正交试验法对干湿循环下复合固化砂土的抗压强度研究表明对于砂土的固化水泥、石灰、4号固化剂以及纤维都能有效提高其强度;且砂在工程中的诸多应用证明其能够改善混合料的性能以及渗透系数<sup>[8-9]</sup>。鉴于此,笔者提出砂改良传统固化淤泥路用性能研究,相比河砂,海砂是我国沿海城市天然丰富的砂资源,价格低廉。将沿海地区自有的海砂应用到固化淤泥路用中,可以实现短距离运输和大规模应用,更具有实际工程应用价值。本文首先通过单掺试验研究海砂、河砂对传统固化淤泥早期抗压强度的影响,在此基础上着重对海砂复合固化淤泥进行正交试验研究,分析海砂掺量、压实度、龄期对砂复合固化淤泥抗压以及劈裂强度影响规律及水平。为砂复合型固化淤泥实际路用提供理论试验依据和指导。

## 1 试验简介

砂复合固化淤泥是指在传统水泥、石灰固化土的基础上添加适宜掺量海砂或者河砂的固化淤泥混合料。砂本身无黏聚力,但其具有较好的压实性以及透水性等物理性能,与水泥石灰的水化产物黏接形成密实型混合料,外加淤泥属于黏性土本身具有一定的黏聚力都有利于混合料性能的提升。

### 1.1 试验方法

试样制备、以及试验部分参照《土工试验规范》(JTG-E40-2007)<sup>[11]</sup>进行。由于缺少小击实筒,击实试验选用土工试验规范中的乙法,并采用干土法备样。根据试验结果得出砂掺量对固化淤泥最优含水率以及最大干密度影响。试验配比(质量比)如表1所示:

表1 试验配比表  
Tab.1 Compound ratio

成分/%	石灰	水泥	砂	淤泥
配合比 A	5	3	0	92
配合比 B	5	3	5	87
配合比 C	5	3	10	82
配合比 D	5	3	20	72

根据7d无侧限抗压强度试验结果筛选出3个砂掺量用于正交试验研究,正交试验按照L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>)试验计划表进行制样,每组至少3个平行试样,留出空白列进行误差分析。试样尺寸都为50mm×50mm。正交试验因素水平表以及计划表如表2、表3所示。

表2 正交因素水平表  
Tab.2 Orthogonal factor level

因素	砂掺量/%	压实度/%	龄期/d
水平1	0	93	7
水平2	5	95	14
水平3	10	98	28

表3 正交试验表  
Tab.3 Orthogonal test

所在列	1	2	3
因素	砂掺量/%	压实度/%	龄期/d
试验1	0	93	7
试验2	0	95	14
试验3	0	98	28
试验4	5	93	14
试验5	5	95	28
试验6	5	98	7
试验7	10	93	28
试验8	10	95	7
试验9	10	98	14

### 1.2 试验材料

#### (1) 淤泥

试验淤泥土样取自浙江省宁波市江北区地铁站开挖基坑的淤泥,其物理性质指标如表4。

#### (2) 水泥、石灰

本试验使用的水泥为江西省湖泽镇水泥厂生产出的P.042.5普通硅酸盐水泥。石灰为江西新余生产的含钙95%生石灰粉。

#### (3) 砂

本文使用的砂分为:海砂、河砂。两者的主要成分都是石英,海砂成分更为复杂包含氯盐以及贝壳类物质,表5是宁波地区海砂性能成分表。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 击实试验及7d无侧限抗压强度

各配合比下的海砂、河砂复合固化淤泥最优含水、最大干密度以及7d无侧限抗压强度试验结果如表6所示:

(1) 根据图1、图2击实试验结果表明:海砂与河砂对固化淤泥的最优含水率以及最大干密度影响规律基本一致,砂复合固化淤泥土的最优含水率随着砂掺量的增加而减小,但变化范围很小。最大干密度与砂的掺量成正相关,究其原因主要是由于砂跟土颗粒间形成级配密实型结构,孔隙率大幅

表4 淤泥物理性质指标  
Tab. 4 Physical property index of silt

含水量 $\omega$ /%	土的重度 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	土的比重 $G_s$	孔隙比 $e$	液限 $\omega_l$ /%	塑限 $\omega_p$ /%	直剪固快	
						黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\phi$ /°
44.7	17.2	2.74	1.26	39.8	22.2	11.9	8.0

表5 海砂成分表  
Tab. 5 Sea sand physical parameters and components

粒径/mm <sup>3</sup>	堆积密度/(g/mm <sup>3</sup> )	表观密度/(g/mm <sup>3</sup> )	含水率/%	氯离子/%	贝壳含量/%
<5 mm	1.566	2.806	1.6	0.086	0.262

表6 击实试验及7 d无侧限抗压强度试验结果  
Tab. 6 Results of compaction tests and 7 d unconfined compressive strength tests

配合比	海砂固化淤	海砂固化淤	海砂固化淤泥 7 d 无	河砂固化淤	河砂固化淤	河砂固化淤泥 7 d 无
	泥含水率/%	泥干密度/%	侧限抗压强度/MPa	泥含水率/%	泥干密度/%	侧限抗压强度/MPa
A	16.1	1.71	1.146	16.1	1.71	1.146
B	15.8	1.72	1.205	15.9	1.71	1.171
C	15.7	1.76	1.375	15.5	1.77	1.324
D	15.3	1.81	1.222	15.5	1.8	1.220

度减少,有利于压实。

(2) 图3中7 d无侧限抗压强度结果表明:小掺量砂对固化淤泥强度增加不明显,当砂掺量从5%增加到10%时增长最为明显。砂掺量超过大约12%后固化土强度开始有下降的趋势。说明适宜掺量的砂在混合料中起到了骨料的作用,提升了固化土颗粒间的黏聚力,当砂掺量过多时砂石骨料比表面积增大,不能够完全被水化合物包裹降低了混合料的保水能力以及黏聚力,使得早强下降。除此之外海砂比河砂早期强度要大,主要原因是海砂中的氯离子与混合料中的钙离子生成氯化钙加速早期强度的形成<sup>[6]</sup>,除此之外海砂中的贝壳类棱角分明也有助于混合料强度的提高。

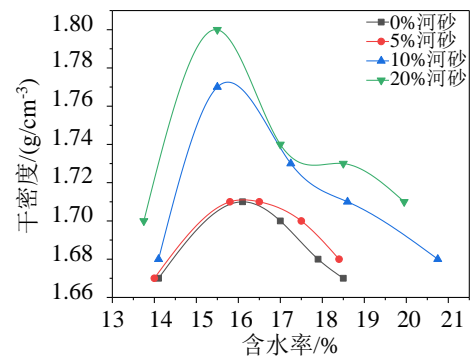


图2 不同河砂掺量固化淤泥击实试验曲线  
Fig. 2 Compaction tests of solidified silt with different content of river sand

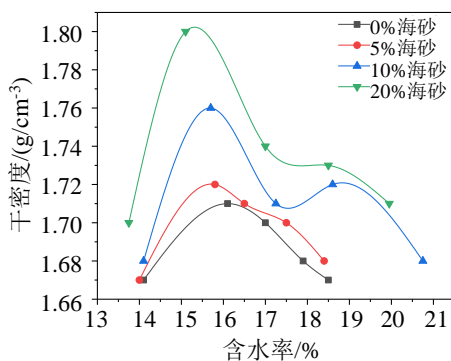


图1 不同海砂掺量固化淤泥击实试验曲线  
Fig. 1 Compaction tests of solidified silt with different sea sand content

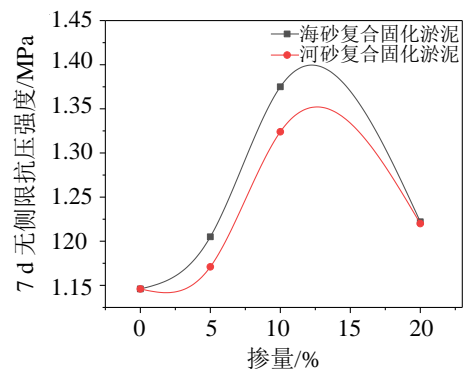


图3 固化淤泥7 d无侧限抗压强度与砂掺量变化规律  
Fig. 3 Effect of sand content on 7 d unconfined compressive strength of solidified silt

## 2.2 正交试验分析

### (1) 直观分析

对正交组试样进行无侧限抗压以及劈裂强度直观分析结果如表7、表8所示。通过直观分析表中极差值判断试验的主次因素，选择试验最优因素水平组。

直观分析表中极差值越大，表示该因素对试验结果的影响也越大。从表中可以看出海砂掺量、压实度、龄期对无侧限抗压强度以及劈裂强度影响的主次顺序都为： $3 > 2 > 1$ 。龄期对两者力学强度的影响最大。三因素中龄期对抗压强度贡献率为52.92%，压实度次之为32.85%，海砂掺量的贡献率

表7 无侧限抗压强度直观分析表  
Tab. 7 Visual analysis of unconfined compressive strength

所在列	1	2	3	4	
因素	海砂掺量/% (A)	压实度/% (B)	龄期/d (C)	空白列	无侧限抗压强度试验结果/MPa
1	1	1	1	1	0.94
2	1	2	2	2	1.30
3	1	3	3	3	2.09
4	2	1	2	3	1.25
5	2	2	3	1	1.73
6	2	3	1	2	1.40
7	3	1	3	2	1.83
8	3	2	1	3	1.245
9	3	3	2	1	1.81
均值1	1.443	1.340	1.195	1.493	-
均值2	1.460	1.425	1.453	1.510	-
均值3	1.628	1.767	1.883	1.528	-
极差	0.185	0.427	0.688	0.035	-
最优组合	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>				

表8 劈裂强度直观分析表  
Tab. 8 Visual analysis of splitting strength

所在列	1	2	3	4	
因素	海砂掺量/% (A)	压实度/% (B)	龄期/d (C)	空白列	劈裂试验结果/MPa
1	1	1	1	1	0.066
2	1	2	2	2	0.090
3	1	3	3	3	0.172
4	2	1	2	3	0.090
5	2	2	3	1	0.140
6	2	3	1	2	0.097
7	3	1	3	2	0.153
8	3	2	1	3	0.092
9	3	3	2	1	0.153
均值1	0.109	0.103	0.085	0.120	-
均值2	0.109	0.107	0.111	0.113	-
均值3	0.133	0.141	0.155	0.118	-
极差	0.024	0.038	0.070	0.007	-
最优组合	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>				

为14.23%。对劈裂强度贡献率依次为53.03%、28.79%、18.18%。故最优组合A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>。

(2) 方差分析

方差分析可以通过F比找出某种因素对其影响的显著性大小以及跟因素的交互作用等。两种强度试验方差分析结果如表9、表10所示。

由表9可知,海砂掺量、压实度、龄期对固化淤泥无侧限抗压强度影响的F比分别为31.500、153.000、362.500,主次顺序为龄期>压实度>海砂掺量。虽然F比值差距较大,但显著性水平都表现为十分显著。

表10表明,各因素对劈裂强度F比的影响规律与对无侧限抗压强度的规律基本相同,龄期最大,压实度次之,海砂掺量最小。三因素F比差值不是很大。

表9 无侧限抗压强度方差分析

因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
掺量	0.063	2	31.500	19.000	※(显著)
压实度	0.306	2	153.000	19.000	※(显著)
龄期	0.725	2	362.500	19.000	※(显著)
误差	0.00	2	-	-	-

表10 劈裂强度方差分析

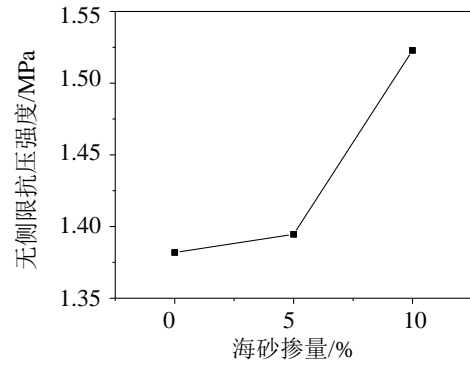
因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
掺量	0.001	2	2.000	6.940	不明显
压实度	0.003	2	6.000	6.940	不明显
龄期	0.008	2	16.000	6.940	不明显
误差	0.00	4	-	-	-

(3) 因素水平影响分析图

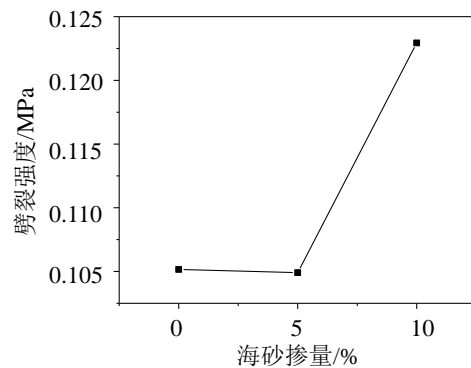
图4为海砂掺量对固化淤泥无侧限抗压强度与劈裂强度影响趋势图。

由图可知,无侧限抗压强度跟劈裂强度随着海砂掺量的增大而增大,当海砂掺量为0%时,抗压强度大约为1.38 MPa,海砂掺量增加到5%和10%时,抗压强度分别约为1.40 MPa、1.53 MPa左右,分别增加1.5%和10.9%左右;海砂掺量为0%时,劈裂强度为0.105 MPa,当海砂掺量增加到5%和10%时,劈裂强度分别为0.105 MPa、0.124 MPa,分别增加0%和18.1%左右。

图5压实度对固化淤泥的抗压强度与劈裂强度影响规律表明:当压实度为93%时,抗压强度为1.30 MPa,压实度增加到95%和98%时,抗压强度分别为1.38 MPa、1.65 MPa左右,分别增加了6.2%、



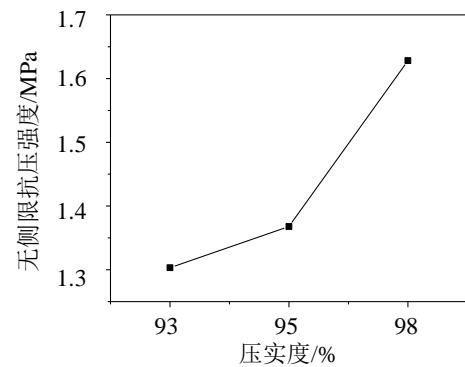
(a) 无侧限抗压强度



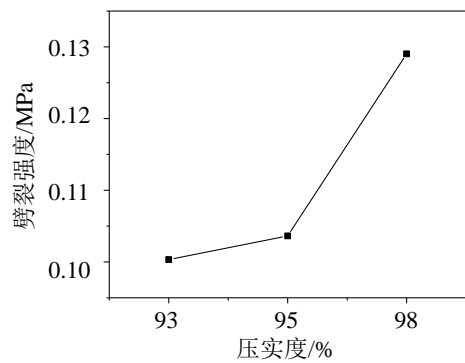
(b) 劈裂强度

图4 海砂掺量与固化淤泥强度性能关系

Fig. 4 Relationship between sea sand content and strength of solidified silt



(a) 无侧限抗压强度



(b) 劈裂强度

图5 压实度与固化淤泥强度性能关系

Fig. 5 Relationship between compaction degree and strength of solidified silt

26.9%左右；劈裂强度在相同的压实度变化下分别增加了5.0%和30.0%左右。

图6为龄期对固化淤泥的抗压强度与抗折强度的影响规律。由图可知随着龄期的加长，抗压强度与劈裂强度也逐渐增大。当龄期为7 d时，抗压强度为1.2 MPa，龄期增加到14 d和28 d时，抗压强度分别为1.40 MPa和1.78 MPa左右，分别增加了16.7%和48.3%；劈裂强度在相同的龄期变化下分别增加了23.5%和64.7%左右。可以看出各因素水平的不同产生了试验结果的差异。

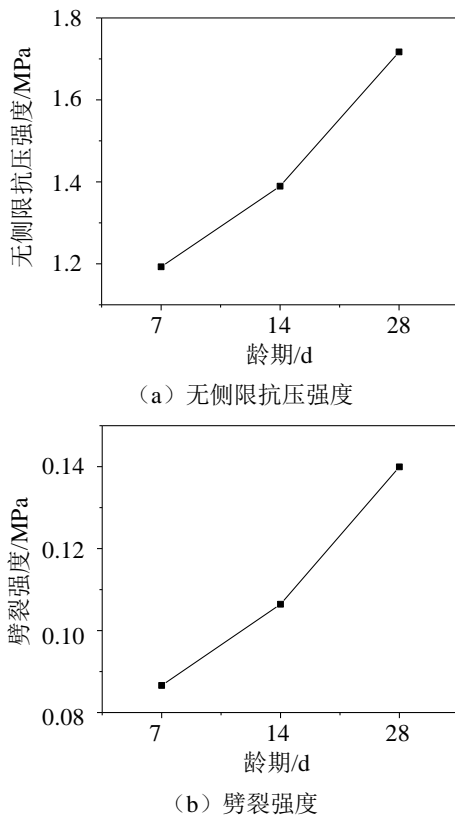


图6 龄期与固化淤泥强度性能关系

Fig. 6 Relationship between age and strength of solidified silt

### 3 结 论

(1) 击实试验结果表明：在5%石灰+3%水泥传统固化剂的基础上，随着砂掺量的增加（0%~20%）固化淤泥的最优含水率减小最大干密度增大，便于施工压实。

(2) 7 d无侧限抗压强度试验表明：海砂相较于河砂早期强度更易形成。在传统固化剂的基础上，加入12%左右的砂对固化淤泥早期强度提高最大，海砂复合传统固化淤泥达到1.4 MPa，河砂复合固化淤泥达到1.35 MPa，在较低的成本下实现明显的提升。当掺量超过12%后固化淤泥早期抗压强度有下

降的趋势，说明适宜的砂量才可以使固化淤泥混合料保水能力以及黏聚力达到最优状态。

(3) 海砂复合固化淤泥正交试验结果表明：海砂掺量、压实度、龄期对固化淤泥无侧限抗压强度影响主次顺序为：龄期>压实度>海砂掺量，但显著度都很高，说明三因素对砂复合固化淤泥强度的影响都十分显著。在实际工程中可以综合考虑三因素来提高固化淤泥路用抗压以及劈裂性能指标。

### 参考文献

- [1] 王东星, 徐卫亚. 大掺量粉煤灰淤泥固化土的强度与耐久性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3659-3664.  
WANG Dong-xing, XU Wei-ya. Study on the strength and durability of solidified soil with a large amount of fly ash and silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3659-3664.
- [2] NA W. Utilization of portland cement and municipal solid waste incineration fly ash for solidification/stabilization of sewage sludge[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2015, 14(1): 141-144.
- [3] ROY A, STEGEMANN J A. Nickel speciation in cement-stabilized/solidified metal treatment filtercakes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 321: 353-361.
- [4] XIN D, CHAI X, ZHAO W. Hybrid cement-assisted dewatering, solidification and stabilization of sewage sludge with high organic content[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2016, 18(2): 356-365.
- [5] CORREIA A A S, OLIVEIRA P J V, CUSTÓDIO D G. Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilised with binders[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(2): 97-106.
- [6] 喻国轩. 滨海地区吹填海砂路用性能及其应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.  
YU Guo-xuan. Research on the performance and application of hydraulic reclamation sand in the coastal area[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [7] 王天, 翁兴中, 张俊, 等. 干湿循环条件下复合固化砂土抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(4): 721-729.  
WANG Tian, WENG Xing-zhong, ZHANG Jun, et al. Experimental study on the compressive strength of composite solidified sand under dry-wet cycles[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(4): 721-729.

- [8] 张福海, 陈庆, 张晓阳, 等. 海砂-海泥混合料作为海堤填料的可行性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 182-186.  
ZHANG Fu-hai, CHEN Qing, ZHANG Xiao-yang, et al. Feasibility test study of sea sand-sea mud mixture as seawall filler[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 182-186.
- [9] 王启叶楠, 丰土根, 宋健, 等. 淤泥海砂混合料动力特性试验研究[J]. 水运工程, 2017(10): 96-100, 129.  
WANG Qi-ye-nan, FENG Tu-gen, SONG Jian, et al. Experimental study on dynamic characteristics of silt sea sand mixture[J]. Water Transportation Engineering, 2017(10): 96-100, 129.
- [10] 阮波, 邓林飞, 马超, 等. 纤维水泥土抗折强度的正交试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(10): 2524-2528.  
RUAN Bo, DENG Lin-fei, MA Chao, et al. Orthogonal test research on the flexural strength of fiber cement soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(10): 2524-2528.
- [11] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程: JTG E40-2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

## 【简 讯】

### 第 20 届国际土力学及岩土工程学术会议（悉尼 2021）论文摘要征集通知

第 20 届国际土力学及岩土工程学术会议将于 2021 年 9 月 12—17 日在澳大利亚悉尼举行, 会议网址为 <http://icsmge2021.org>。国际土力学及岩土工程学会（简称 ISSMGE）根据各国会员数决定论文数量。中国有 472 名会员, 获得 22 篇文章的分配。学会向 ISSMGE 主席吴宏伟教授申请了更多的论文分配。欢迎会员们提交论文, 论文摘要具体要求如下:

(1) 2020 年 2 月 26 日前提交 250 字英文摘要至邮箱 [cismge@tsinghua.edu.cn](mailto:cismge@tsinghua.edu.cn), 重点阐述研究目标、方法和结论。鼓励反映工程实践、教育和重大

科技问题的论文。摘要包括所有作者姓名、单位、地址和通讯作者的邮箱及手机号码。

(2) 论文第一作者必须是国际土力学及岩土工程学会会员, 35 岁以下的第二作者请注明年龄。提交摘要时可同时提交加入 ISSMGE 申请（附会员登记表）。欢迎从事勘察、设计、施工、研究与教育的岩土工程工作者积极申请加入 ISSMGE。

(3) 论文摘要按照格式提交（Abstract format.doc）, 同时填写摘要信息表（List of abstracts for 20th ICSMGE.excel）。论文摘要将提交常务理事会投票遴选。