

水泥改良海南滨海砂早期强度参数研究

吴福宝

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 通过三轴剪切试验, 研究了水泥掺量 2%、6%、10% 的海南东南部滨海砂养护 1、3、5、7 d 早期强度参数的发展规律, 并对水泥掺量不同时砂的胶结状态进行了微观试验, 得到如下结论: 在水泥掺量一定时, 在养护龄期 3 d 内, 粘聚力快速增长, 养护 3 d 后, 粘聚力增长速度放缓, 养护龄期对水泥改良砂的内摩擦角影响很小; 在相同的养护龄期条件下, 随着水泥掺量的提高, 水泥改良砂的内摩擦角和粘聚力均有提高, 水泥掺量高于 6% 后, 砂颗粒处于悬浮状态, 随着水泥掺量的增加, 内摩擦角基本不再增长, 而粘聚力仍有较大增长, 采用双曲线函数建立了水泥掺量 10% 以下、养护龄期 7 d 内改良砂粘聚力、内摩擦角的经验公式。

关键词: 滨海砂; 水泥改良; 早期强度

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0808-06

Study on early strength parameters of Hainan's coastal sand modified by cement

WU Fubao

(China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., LTD, Wuhan 430063, China)

Abstract: Through triaxial shear test, the development rule of early strength parameters of sand modified with 2%, 6% and 10% cement in the coastal eastsouth area of HaiNan cured for 1, 3, 5 and 7 days was studied, and the microscopic experiments were carried out on the cemented state of sand with different cement content, the conclusions are as follows: When the cement content is constant, the cohesion increases rapidly within 3 days of curing, but after 3 days, cohesion's growth rate slows down, while curing time has little effect on the friction angle of the modified sand. When the curing age is same, with the increase of cement content, the internal friction angle and cohesion of cement improved sand are both improved, when the cement content is higher than 6 percent, the sand particles are in a suspended state, with an increase of cement content, the internal friction angle is almost constant, while cohesion still increases. The hyperbolic function is used to establish the empirical formula of cohesion and internal friction angle of sand modified with cement content less than 10% and curing time within 7 days.

Key words: coastal sand; cement improvement; early strength

我国地域辽阔, 不良土质和不良工程地质条件广泛存在^[1], 在滨海、沙漠等地区进行铁路、道路施工时将面临优质路基填料匮乏的问题, 若采用换填的方法不仅工期、成本难以控制, 还会对环境造成很大污染, 而化学改良的方法优势就十分明显。

在改良土中, 水泥改良土是一种性能较好的土工改良材料, 可以广泛地应用于水利、交通和建筑等各类土木工程中, 一般情况下, 只要能控制好水泥改良土的施工质量, 就可以获得比较满意的效果, 因而, 这种土工改良材料引起了人们兴趣和重视^[2]。

对于水泥改良土, 强度则是其设计和施工控制的核心^[3], 水泥土强度受到水泥掺量、水泥种类、土性、养护龄期、含水率、搅拌条件等的影响^[4]。

研究表明, 水泥掺量、养护龄期对水泥土强度有着显著影响。杨俊^[5]试验结果显示, 3%、5%、7%、9% 的水泥改良砂, 养护 7、14、21、28d, 发现在龄期相同时, 水泥掺量每增加 2%, 水泥改良土的无侧限抗压强度会增加 0.3 MPa 左右; 在水泥掺量一定时, 改良土的无侧限抗压强度随着龄期的增大而增大, 改良土龄期每增加 7 d, 水泥改良土强度增加 0.15~0.3 MPa, 在 28 d 后

强度基本稳定。

郦建俊^[6]用水泥改良黄土时发现改良土无侧限抗压强度在龄期超过一个月后仍有很大的增长,在水泥掺量 20% 时,改良土强度 6 个月龄期较 3 个月龄期增加 0.7~0.8 MPa。

还有一些学者则根据试验结果纷纷提出了水泥土强度与水泥掺量、养护龄期的经验公式,如 Rakesh^[7]提出水泥土强度与水泥掺量的线性关系, Nilo^[8]提出了水泥土强度随着水泥掺量的幂指数关系, Omer^[9]认为水泥土强度随养护龄期呈双曲线关系,且双曲线参数与水泥掺量有关。曹治国^[3]认为,水泥土强度随水泥掺量近似呈幂函数关系增大,养护 7~90 d 时与养护龄期的对数呈线性关系增长。

其他学者则研究了含水率、压实度、土性对水泥改良土强度的影响。郦建俊^[6]发现水泥改良黄土时改良土强度在最优含水率附近达到最大值,含水率增加或减少改良土强度均会减小,赵程^[10]则建立了水泥土密实度与强度的关系,房立凤^[2]提出,增加土中粗粒土含量可以提高水泥改良土强度,而随着土中粘粒含量的增长水泥土的强度不断降低,这主要是由于粘粒妨碍了水泥水化的缘故。

综上所述,学者们对水泥改良土强度的影响因素开展了较为全面的研究,并提出了水泥土强度随水泥掺量、养护龄期的经验公式,得到了诸多成果。但对于路基工程而言,在实际施工中,层与层的碾压间隔一般在 7 d 以内,目前,对于 7 d 内水泥土早期强度特性的研究却鲜有报道。

本文以海南东南部陵水县广泛分布的粉红色细砂为研究对象,采用 GDS 三轴仪对经 P.C32.5 水泥改良后砂土养护 1、3、5、7 d 后进行了三轴试验,重点研究了水泥改良砂早期强度参数的增长规律,建立了水泥掺量 10% 以下、养护龄期 7 d 内改良砂强度参数粘聚力、内摩擦角的经验公式,并对不同水泥掺量砂进行了微观测试,对水泥改良砂强度的增长进行了微观解释,研究结果对于水泥改良砂作为路基填料合理确定碾压层养护时间有着重要的指导意义。

1 试验方案

1.1 海南滨海砂特征

试验用砂取自海南省东南部陵水县,该砂呈

粉红色,XRD 射线衍射结果显示主要成分为二氧化硅,不均匀系数 $C_u = 2.13$,曲率系数为 $C_v = 0.84$,级配不良,该砂总质量的 85% 左右颗粒均集中在 0.075~0.25 mm,按照《土工试验规程 JTG-E40》^[11]定名为细砂。

1.2 水泥砂试样制备

水泥选择 P.C32.5 水泥,结合相关工程经验^[1-2,5,12],水泥掺量一般控制在 10% 以下,为了使不同水泥掺量的改良砂间工程性质差异明显,并考虑工程的经济性,此次水泥掺量选用了 2%、6%、10%,按表 1 击实试验得到的水泥掺量不同的砂的最优含水率、最大干密度进行制样,试样底面直径 3.91 cm,高度 8.0 cm,在模具中分三层进行压实,脱模后先放在塑料箱中静置 1 d,待改良砂强度提高后放入水中浸泡养生,养护 1、3、5、7 d 后取出进行三轴试验。

表 1 不同水泥掺量砂最优含水率、最大干密度

Tab. 1 The optimum moisture content and maximum dry density of different cement admixture sand

水泥掺量/%	2	6	10
最优含水率/%	13.0	13.1	11.5
最大干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.71	1.74	1.80

1.3 试验方法

试验采用英国 GDS 三轴仪进行,将 2%、6%、10% 不同水泥掺量的砂分别养护 1、3、5、7 d 后施加 50、100、150 kPa 三级围压,采用不固结、不排水剪切,控制试样反压 80 kPa,围压 85 kPa,轴向压力 85 kPa 进行反压饱和,加载时间为 5 分钟,待试样的饱和度 $B \geq 0.95$ 后开始剪切,剪切速率按照《土工试验规程 JTG-E40》^[11]规定为每分钟应变 0.5%~1.0%,即 0.4~0.8 mm/min,由于试验进度需要,取 0.8 mm/min,当测力计出现峰值时,继续剪切至超过 5% 的轴向应变,当无峰值时剪切进行到轴向应变的 15%~20% 为止,在正应力-剪应力坐标系中可以得到三个应力摩尔圆,莫尔圆公切线斜率是土样内摩擦角的正切值,公切线截距则是土样的粘聚力。

2 试验结果分析

2.1 养护龄期、水泥掺量对强度参数的影响

试验得到不同水泥掺量、不同养护龄期条件下水泥改良砂粘聚力、内摩擦角值见表 2 所示。

表2 不同水泥掺量、不同养护龄期水泥改良砂粘聚力、内摩擦角值

Tab. 2 Cohesion and internal friction angle value of cement modified sand with different cement content and curing time

龄期/d	强度参数	2% 掺量	6% 水掺量	10% 掺量
1	c/kPa	75	110	150
	$\varphi/^\circ$	31	36	40
3	c/kPa	87	120	250
	$\varphi/^\circ$	33	41	41
5	c/kPa	100	150	300
	$\varphi/^\circ$	31	41	41
7	c/kPa	110	160	310
	$\varphi/^\circ$	30	38	41

在试验中发现,试样在制作完成后,放入水中吸水饱和消除非饱和基质吸力后快速破坏,故认为水泥改良砂未养护时粘聚力为零,水泥掺量不同的改良砂粘聚力随养护时间的关系见图1至图3所示。

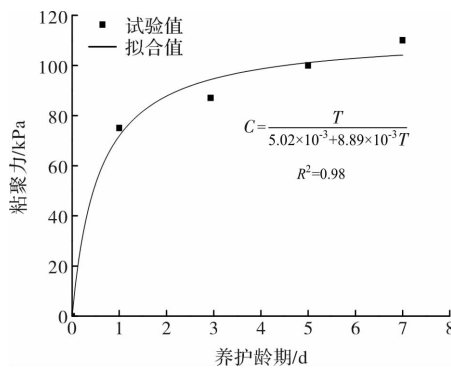


图1 水泥掺量2%改良砂粘聚力随养护龄期关系

Fig. 1 The relationship between cohesion and curing time of modified sand with 2 percent cement

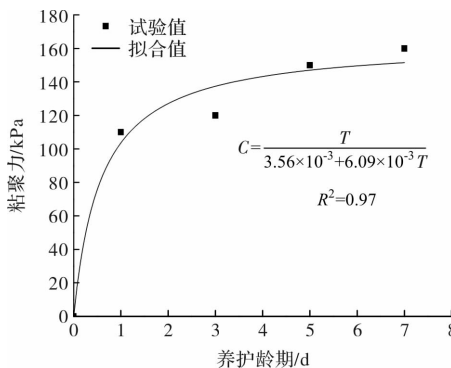


图2 水泥掺量6%改良砂粘聚力随养护龄期关系

Fig. 2 The relationship between cohesion and curing time of modified sand with 6 percent cement

从图1至图3可以看出,在水泥掺量一定时,在养护龄期3 d内,粘聚力快速增长,养护3 d后,粘聚力增长速度放缓,水泥掺量2%、6%、10%

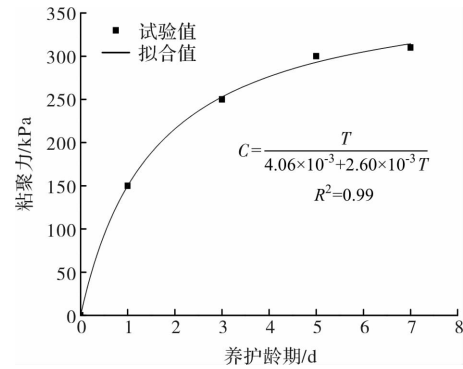


图3 水泥掺量10%改良砂粘聚力随养护龄期关系

Fig. 3 The relationship between cohesion of modified sand and curing age time with 2 percent cement

改良砂养护7 d后粘聚力较1 d增长46.67%、45.45%、106.67%,粘聚力 C 随养护龄期 T 的增长具有如下数学性质:

$$\frac{dC}{dT} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d^2C}{dT^2} < 0 \quad (2)$$

当养护时间 $T \rightarrow \infty$ 时:

$$\frac{dC}{dT} = 0 \quad (3)$$

满足上述性质的曲线可以用双参数的双曲线来表示:

$$C = \frac{T}{a + b \times T} \quad (4)$$

式(4)中, T 为养护时间(d), C 为粘聚力(kPa), a 、 b 为拟合参数,采用双曲线函数对不同水泥掺量砂粘聚力随时间的增长曲线拟合后的拟合参数见表3所示,从表3中的计算结果可以看出,拟合参数 a 、 b 整体上均随着水泥掺量的增加而减小,根据双曲线函数的性质可知,在养护时间一定时,参数 a 、 b 越小,水泥砂粘聚力越大,即参数 a 、 b 的大小能够反映水泥砂随着养护时间变化的胶结程度,进一步分析后发现参数 a 、 b 与水泥掺量存在图4、5中的关系:

$$a = \frac{a_w}{-0.17 + 0.28 \times a_w} \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$b = (10.57 - 0.79 \times a_w) \times 10^{-3} \quad (6)$$

表3 养护不同龄期水泥砂粘聚力拟合参数

单位: 10^{-3}

Tab. 3 Cohesion fitting parameters of cement modified

sand cured for different time		unit: 10^{-3}	
系数	2% 水泥含量	6% 水泥含量	10% 水泥含量
a	5.02	3.56	4.06
b	8.89	6.09	2.60

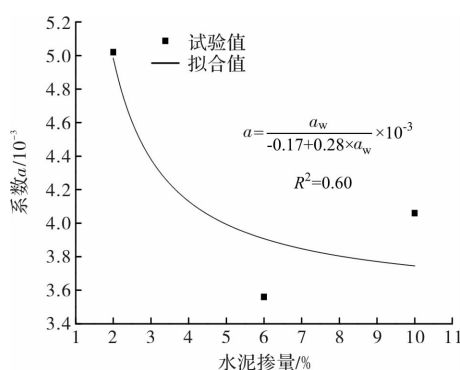


图4 养护不同龄期时水泥砂粘聚力拟合参数 a 与水泥掺量关系

Fig. 4 Relationship between cohesion fitting parameter a and cement content of cement modified sand cured for different time

式(5)与(6)中, a_w 为水泥掺量(%). 至此, 便能建立水泥掺量 2%、6%、10% 改良砂养护 7 d 内粘

$$C = \frac{T}{\frac{a_w}{-0.17 + 0.28 \times a_w} \times 10^{-3} + (10.57 - 0.79 \times a_w) \times 10^{-3} \times T} \quad (7)$$

水泥改良砂内摩擦角随养护时间的变化规律见图 6 所示, 从图 6 可以看出, 随着养护时间的增长, 水泥改良砂的内摩擦角变化并不明显, 故认为水泥改良砂的内摩擦角仅为水泥掺量的单值函数, 不同水泥掺量后内摩擦角见图 7 所示, 拟合后得到:

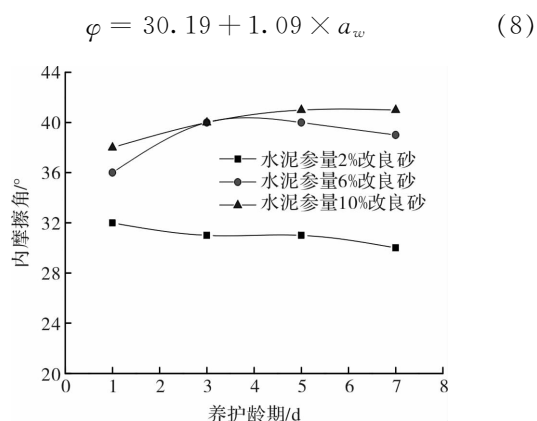


图6 水泥改良砂内摩擦角与养护龄期关系

Fig. 6 Relationship between friction angle and curing age of modified sand

通过式(7)、(8)可以确定水泥掺量 10% 以下、养护 7 d 内水泥改良砂的粘聚力和内摩擦角值, 进而求得上述条件下水泥改良砂的强度, 根据施工荷载便可以确定水泥掺量、养护龄期等参数, 从而指导施工。

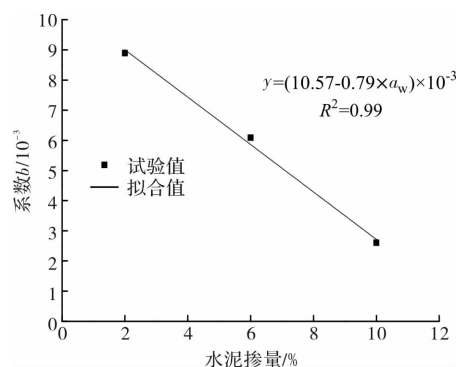


图5 养护不同龄期时水泥砂粘聚力拟合参数 b 与水泥掺量关系

Fig. 5 Relationship between cohesion fitting parameter b and cement content of cement modified sand cured for different time

聚力随养护龄期、水泥掺量的经验公式:

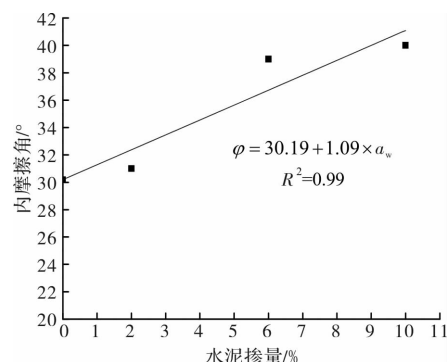


图7 水泥改良砂内摩擦角与水泥掺量关系

Fig. 7 Relationship between friction angle and cement content of modified sand

2.2 水泥改良砂强度参数增长的微观解释

采用 LIOO SZ850 显微镜对水泥掺量不同的改良砂进行了微观试验, 试验结果见图 8 所示. 从图 8 可以看出, 素砂中砂颗粒呈松散堆积, 没有任何粘结, 不能形成整体, 工程性质差, 而添加水泥后, 则能有效地增强颗粒间的粘结。

将表 2 不同水泥掺量、不同养护龄期水泥改良砂粘聚力、内摩擦角值对比后可以发现, 随着水泥掺量的增加, 改良砂粘聚力有很大增加, 内摩擦角也有提升, 但水泥掺量超过 6% 后, 内摩擦角则变化很小. 之所以出现该现象, 是由于水泥掺量的增加导致了土颗粒间接触状态的变化所导致。

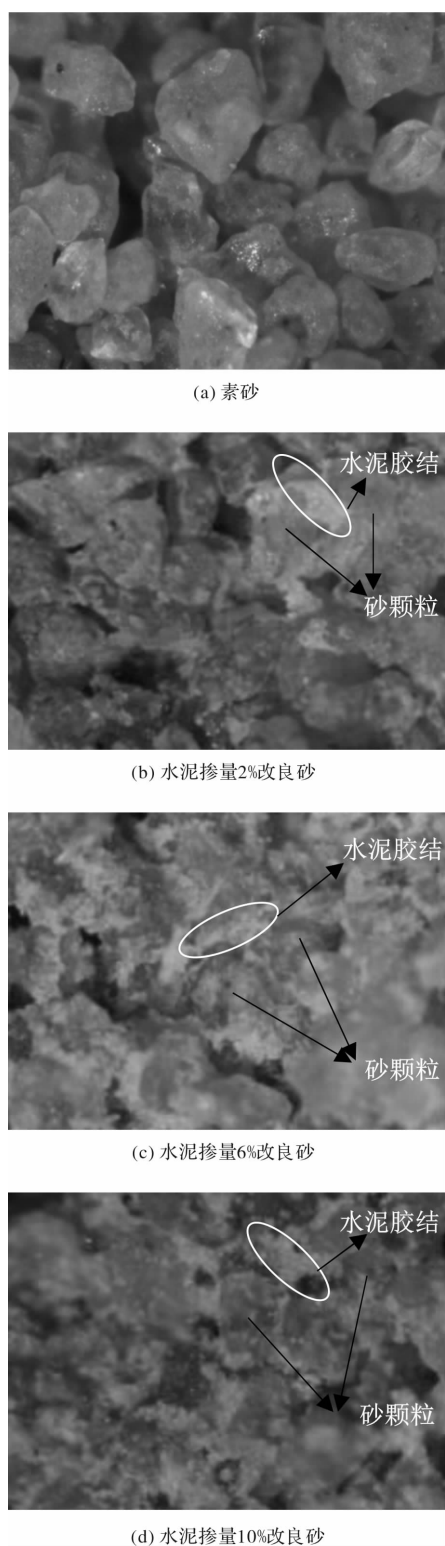


图8 LIOO SZ850 显微镜放大 205 倍后水泥改良砂颗粒间接触状态

Fig. 8 Contacting state of cement modified sand enlarged 205 times by LIOO SZ850 magnifier

当水泥掺量较低时,水泥填充了土颗粒间的孔隙,水泥水化后与孔隙中其他较小的土颗粒形成了胶结体,增大了土颗粒间的粘结力,也改善了砂颗粒间的摩擦性能,见图 8(b)所示;而一旦水泥掺

量超过 6% 后,试样击实后土颗粒将处于图 8 中(c)和(d)所示的悬浮状态,土颗粒已被水泥水化物充分包裹,再继续增大水泥掺量已经不能有效改变砂颗粒与水泥水化物间的摩擦性能,故内摩擦角变化很小,但水泥掺量的增多会进一步使所填充的水泥水化物相互连通,形成链状、网状结构^[12],故水泥改良砂的粘聚力仍然能够持续增长,江浩川^[13]用偏光显微镜观察了不同水泥掺量砂的微观结构,也发现水泥掺量达到 6% 时形成了明显的近似团聚的结构形态。

3 结论

(1)在水泥掺量一定时,在养护龄期 3 d 内,粘聚力快速增长,养护 3 d 后,粘聚力增长速度放缓,而水泥改良砂内摩擦角基本不随养护龄期变化。

(2)在相同的养护龄期条件下,随着水泥掺量的提高,水泥改良砂的内摩擦角和粘聚力均有较大提高,但水泥掺量对粘聚力提高的影响要较对内摩擦角的影响显著。水泥掺量高于 6% 后,砂颗粒处于悬浮状态,随着水泥掺量的增加,内摩擦角基本不再增长,而粘聚力仍有较大增长。

(3)采用双曲线函数能够很好的描述水泥改良砂粘聚力随养护时间的增长规律,且参数与水泥掺量有关,建立了水泥掺量 10% 以下、养护 7 d 内改良砂粘聚力、内摩擦角随水泥掺量和养护龄期的经验公式。

参考文献 References

- [1] 何小亮. 大(同)-西(安)客运专线水泥改良黄土填料试验及路基振陷研究[D]. 西安:西北大学,2011.
HE Xiaoliang. Study on Engineering properties of cement loess filling materials and dynamic settlement of subgrade of Datong-Xi'an passenger dedicated line[D]. Xi'an: Northwest university, 2011.
- [2] 房立凤. 郑西客运专线水泥改良黄土路基填料试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
FANG Lifeng. Experimental study on improved loess using cement for subgrade of Zhengzhou-xi'an Dedicated Passenger special Line[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong university, 2009.

- [3] 曹智国,章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(s1): 3446-3454.
- CAO Zhiguo, ZHANG Dingwen. Key parameters controlling unconfined compressive strength of soil-cement mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(s1): 3446-3454.
- [4] 刘松玉,钱固超,章定文. 粉喷桩复合地基理论与工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006:1-274.
- LIU songyu, QIAN Guchao, ZHANG dingwen. The principle and application of dry jet mixing composite foundation [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2006:1-274.
- [5] 杨俊,许威,张国栋,等. 水泥稳定废弃风化砂无侧限抗压强度试验研究[J]. 环球科学与技术, 2014, 37(5):52-56.
- YANG Jun, XU Wei, ZHANG Guodong, et al. Study on unconfined compressive strength of cement stabilized waste weathered sand[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(5): 52-56.
- [6] 酆建俊. 水泥土的强度特性、固结机理与本构关系的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.
- LI Jianjun. Research on the characters in strength, concretion Mechanism and the Constitutive Relationship of the cement-loess[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech. , 2005.
- [7] RAKESH Kumar Dutta. Effect of cement on the engineering properties of sand[J]. Road Materials and Pavement Design, 2011, 9(2): 323-332.
- [8] NILO Cesar Consoli, RODRIGO Caberlon Cruz, MARCIO Felipe Floss, et al. Parameters controlling tensile and compressive strength of artically cemented sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(5): 759-763.
- [9] OMER F. USLUOGULLARI, VIPULANANDAN C. Stress-Strain Behavior and California Bearing Ratio of Artificially Cemented Sand[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2011, 39(4): 1-9.
- [10] 赵程,申向东,贾尚华,等. 密实度对压实水泥土强度的影响[J]. 岩土工程学报,2013,35(s1):360-365.
- ZHAO Chen, SHEN Xiangdong, JIA Shanghua, et al. Influence of density on strength of cemented soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(s1):360-365.
- [11] 交通部公路科学研究院. 公路土工试验规程:JTGE-40-2007[S]. 北京:人民交通出版社,2007.
- Ministry of Communications Highway Science Research Institute. Highway Geotechnical Test Procedure:JTGE-40-2007 [S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [12] 胡舜娥. 水泥固化滨海风积砂动三轴试验与理论模型研究[D]. 泉州:华侨大学,2014.
- HU Shune. Dynamic triaxial experiment and theoretical model of cement stabilized coastal Aeolian sand [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2014.
- [13] 江浩川. 水泥固化滨海风积砂静动力学特性及数值模拟分析[D]. 泉州:华侨大学,2016.
- JIANG Haochuan. An analysis of on static, dynamic mechanical characteristic and mesoscopic numerical simulation of cement solidified coastal aeolian sands [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2016.

(编辑 吴海西)