

DOI: 10.11779/CJGE201611006

水泥固化滨海风积砂力学特性试验及细观数值仿真

蔡燕燕^{1,2}, 江浩川¹, 俞 缙^{1,2}, 涂兵雄¹, 刘士雨¹

(1. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘 要: 滨海风积砂因结构松散、自稳能力差、级配不良不易压实, 被视为一种特殊土。水泥固化是常用的加固手段, 而水泥剂量对风积砂力学性能的影响规律及细观作用机制目前尚不清楚。利用 GDS 土工三轴试验仪, 对不同水泥剂量 (0%, 4%, 6%) 的水泥固化滨海风积砂进行不同有效围压 (50, 100, 150 kPa) 下的 CD 试验。结合室内试验数据和水泥砂样显微照片, 建立水泥固化滨海风积砂细观结构的颗粒流 PFC2D 模型, 进行三轴试验的细观数值仿真分析。研究表明, 水泥固化滨海风积砂应力-应变关系呈应变软化型, 水泥剂量对滨海风积砂强度贡献明显, 对体变影响相对较小。采用颗粒平行黏结方式的颗粒流数值仿真能有效反映水泥固化滨海风积砂的细观力学特性, 水泥剂量对水泥固化滨海风积砂的黏结破坏数、配位数、位移场均有显著影响。

关键词: 水泥固化; 滨海风积砂; 三轴试验; 细观数值仿真; 平行黏结

中图分类号: TU441.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)11-1973-08

作者简介: 蔡燕燕(1982-), 女, 福建晋江人, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学与室内实验等方面的研究工作。E-mail: yycail@hqu.edu.cn。

Experimental study on mechanical properties and mesoscopic numerical simulation of cement-solidified coastal aeolian sands

CAI Yan-yan^{1,2}, JIANG Hao-chuan¹, YU Jin^{1,2}, TU Bing-xiong¹, LIU Shi-yu¹

(1. Fujian Engineering Technology Research Center for Tunnel and Underground Space, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Coastal aeolian sand is treated as a kind of special soil for its loose structure, poor stability and poor gradation. Cement solidification is a common method for strengthening. However, the influence rule and microscopic mechanism of cement dosage on the mechanical properties of aeolian sand are still unclear. The CD tests under various effective confining pressures (50, 100 and 150 kPa) on aeolian sand solidified by different amounts (0%, 4% and 6%) of cement are carried out using GDS triaxial apparatus. Based on the micrograph of cemented sand and experimental data, the microstructural models for cemented coastal aeolian sand are established using PFC^{2D}. The mesoscopic numerical analysis of triaxial tests is presented. The results show that the cemented coastal aeolian sand is strain-softened. And the cement dosage makes great contribution to the strength of coastal aeolian sand, but less influence on the volumetric strain. The PFC model with parallel connection can effectively reflect the main mechanical behaviors of cemented coastal aeolian sand. The cement dosage has a significant impact on bond-breaking number, coordination number and displacement field for the cemented coastal aeolian sand.

Key words: cement solidification; coastal aeolian sand; triaxial test; mesomechanical simulation; parallel connection

0 引 言

风积砂具有结构松散、保水性和自稳能力差、颗粒均匀、级配不良且不宜压实等特性, 若直接使用风积砂作为地基土, 整体性差, 地基承载力较低。水泥固化可形成整体性较好的水泥胶结砂土, 常用于公路基层或底基层。已有的试验研究表明, 水泥剂量对水泥固化砂土的内摩擦角、黏聚力等宏观力学参数有显

著影响^[1-4]。近年来, 为了更深刻地阐释水泥胶结对砂土力学性能的作用机制, 人们开始运用细观数值仿真

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51679093, 51308234, 51408242); 2015 年福建省新世纪优秀人才支持计划项目; 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目 (SLK2014A02)

收稿日期: 2015-10-13

手段进行研究^[5-7]。Wang 等^[8-9]利用离散元法模拟水泥胶结砂土的三轴试验,讨论了水泥胶结作用对砂土强度和剪胀性影响的细观机理。蒋明镜等^[10]在 Wang 等^[8]水泥胶结砂试验结果的基础上,利用离散元计算分析了胶结砂的宏、微观力学特征。可见,目前的研究成果主要针对普通砂土的水泥固化性能,针对风积砂的研究还不多见。

中国滨海地区的滨海风积砂储量丰富,与普通风积砂相比,具有机械组成细,颗粒磨圆度高的特点。胡瞬娥等^[11]通过室内试验探讨了 100 kPa 围压下水泥剂量对细颗粒滨海风积砂宏观变形性质的影响,但水泥胶结对风积砂的细观作用机制尚不清楚。本文在文献^[11]的试验基础上,利用 GDS 三轴试验仪,补充了 50, 150 kPa 围压下水泥剂量固化滨海风积砂的三轴 CD 试验。基于室内试验数据,利用 PFC^{2D} 进行离散元细观数值仿真,研究水泥剂量对水泥固化滨海风积砂细观力学特性(黏结破坏数、配位数、位移场)的影响,分析其与宏观力学性能的相关性。

1 水泥固化滨海风积砂室内三轴试验

1.1 滨海风积砂的物理指标

试验用滨海风积砂样与文献^[11]砂样相同,取自福建漳州沿海大通道(漳浦段),漳浦滨海风积砂不均匀系数 $C_u < 2$, 曲率系数 $C_c < 1$, 属不良级配砂,粒径大于 0.6 mm 的颗粒极少,基本物理指标见表 1。对比风积砂和现行国标建筑用砂颗粒级配如图 1 所示,可以看出两者存在显著区别。

表 1 风积砂基本物理指标

Table 1 Basic physical indices of coastal aeolian sand				
最大干密度	颗粒相对密度	e_{min}	e_{max}	颗粒直径
$/(g \cdot cm^{-3})$	G_s			d/mm
1.688	2.565	0.81	0.52	0.15~0.60

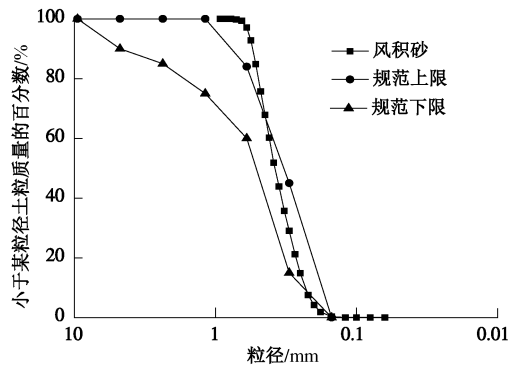


图 1 漳浦风积砂、标准建筑用砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of coastal aeolian sand and standard building sand

1.2 水泥固化风积砂试样制备及试验方案

对砂样除杂质后烘干冷却,按加水率(水质量占水泥和干砂总质量的百分率)15%、压实度约 90%、水泥剂量分别为 0%, 4%, 6% 的配比制备水泥固化风积砂试样(水泥剂量 0% 的试样,直接在三轴压力室内定型加载)。试样直径 50 mm,高 100 mm。成型过程拌合物分 5 层击实,每层按预定的干密度击实到要求的高度,用不透水膜覆盖表面。试件静置 24 h 后拆模,用塑料袋封装,置于标准养护箱养护,龄期 28 d 后,对砂样进行室内三轴 CD 试验,研究水泥固化滨海风积砂在初始反压 300 kPa、围压 350, 400, 450 kPa 下的力学特性。试验方案见表 2。

表 2 滨海风积砂三轴试验方案

Table 2 Triaxial test schemes of coastal aeolian sand			
固结与排水条件	初始有效围压/kPa	龄期/d	水泥剂量/%
CD	50	28	0, 4, 6
CD	100	28	0, 4, 6
CD	150	28	0, 4, 6

1.3 试验方法

采用英国 GDS 电机控制三轴仪(DYNTTS)进行 CD 试验。装样时,对于水泥剂量 0% 的纯砂样,需先用试样模把橡胶膜固定在加载探头上,然后将纯砂缓慢倒入橡胶膜内,其它定型试样直接装入三轴压力室内。采用 CO₂ 饱和、水头饱和及反压饱和相结合的方式提高饱和度。通 CO₂ 时保持孔压为 -10 kPa 左右,通气时间为 0.5 h,然后在 6 kPa 反压下通入无气水,通水时间为 8 h,最后逐级施加反压和围压。为了减小对试样的扰动,始终保持围压与反压同速率线性递增,达到设定值稳定 10 h 后测试 B 值,达到 0.96 以上则视为饱和。饱和试样在排水条件下固结 2 h 后加载,直至轴向应变值达到 14% 时停止试验,获得应力 - 应变曲线。

1.4 三轴试验结果分析

图 2 为不同水泥剂量固化滨海风积砂分别在有效围压为 50, 100, 150 kPa 时的应力 - 应变曲线。由图 2 可见,3 种围压下,随着水泥剂量的增大,应力 - 应变曲线的峰值强度增大,峰值应变减小。由加载过程的线性变形阶段计算得到砂样弹性模量,围压 50, 100, 150 kPa 下,水泥剂量从 0% 增大至 6%,对应的弹性模量增幅分别为 65%, 121%, 269%, 弹性模量明显增大。说明水泥剂量增加,显著地提高了砂样的承载和抗变形能力。图 3 为不同水泥剂量试样的峰值偏应力变化曲线。由图 3 可知,相同围压下,水泥剂量从 0% 增大到 4% 时和从 4% 增大到 6% 时的峰值强度增幅,后者明显大于前者。说明水泥剂量从 4% 增加至 6% 时,水泥固化对增大峰值的作用得到更明显发挥。围压为 50, 100 kPa 时,水泥剂量增大峰值强度

增加明显; 围压为 150 kPa 时, 曲线变缓, 增幅相对减小, 说明在较高围压时水泥固化作用对风积砂的峰值影响较小。这一现象可能是由于围压的增加在一定程度上破坏了部分胶结黏结, 从而降低了水泥胶结作用对强度增长的贡献。

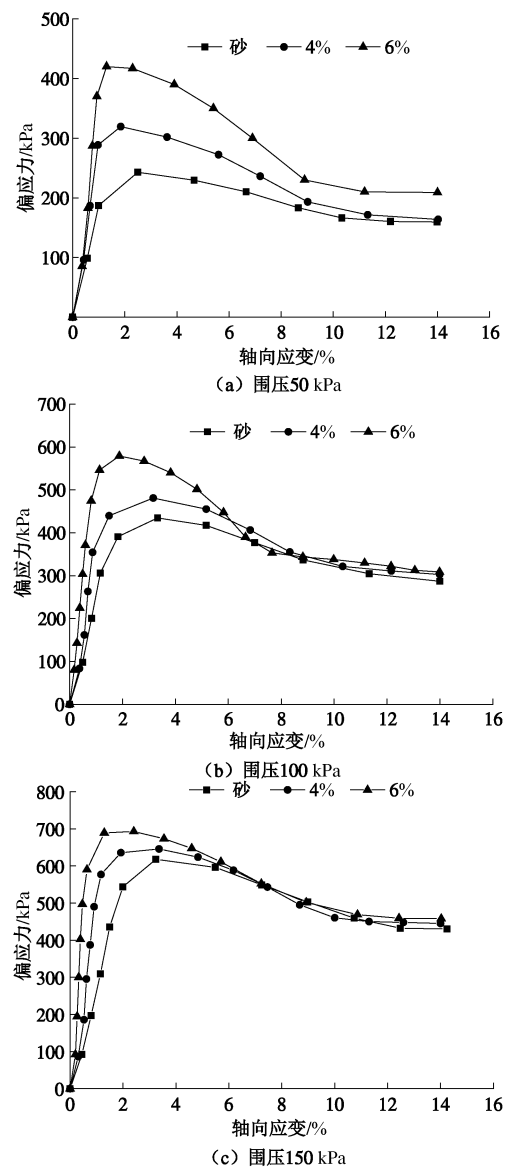


图 2 水泥剂量对滨海风积砂应力 - 应变曲线的影响

Fig. 2 Effects of cement amount on stress-strain relationship

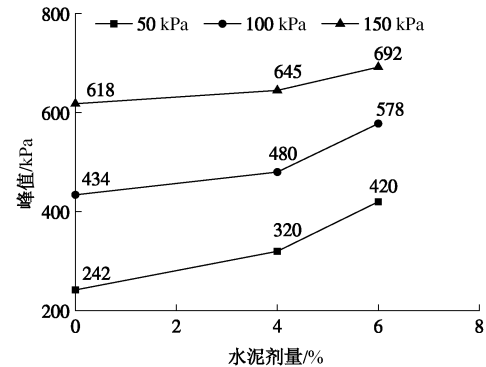


图 3 水泥剂量对峰值偏应力的影响

Fig. 3 Effects of cement amount on peak value

1.5 水泥固化风积砂试样细观显微镜照片

将 3 种剂量水泥固化风积砂颗粒分散至载玻片上, 用奥林巴斯偏光显微镜, 辨识 3 种试样相异的细观形貌特性, 见图 4。图中刻度标尺为 50 μm , 用箭头标示水泥结晶体。由图 4 可见, 随着水泥剂量的增加, 风积砂颗粒逐渐被水泥结晶体包裹, 水泥剂量为 4% 时, 颗粒表面的粗糙程度开始少量增加, 水泥剂量 6% 时, 可以较明显地看出颗粒间存在水泥胶结黏结, 近似形成团聚结构形态。可作出类似文献[12]的推测: 随着水泥水化反应进行, 水化物不断填充了砂颗粒间的空隙, 使砂颗粒间产生胶结。砂颗粒在其中起到类似混凝土骨料的作用。当水泥剂量达到一定比例时, 形成以砂颗粒为中心, 水泥水化物包裹在外的有较高强度的“团聚结构”, 此时水泥固化作用对强度增长具有显著贡献。水泥剂量对强度的具体贡献大小, 则由砂颗粒几何形状和表面粗糙程度、密实度、水泥结晶程度等因素共同决定。

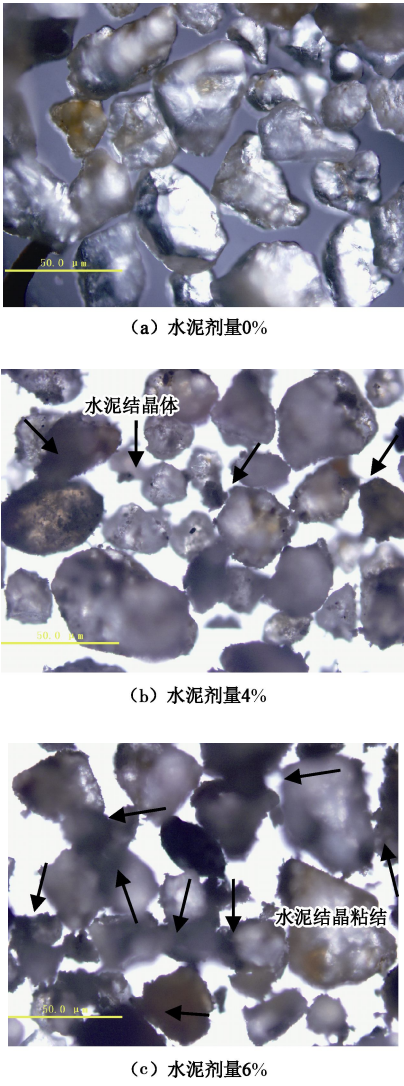


图 4 不同水泥剂量滨海风积砂细观显微镜照片

Fig. 4 Microscopic micrographs of coastal aeolian sand stabilized by different amounts of cement

2 水泥固化滨海风积砂数值模型试验

2.1 计算模型

颗粒几何形状是描述颗粒几何特征的重要参数之一,且与材料的内摩擦角、压缩性、填充性等力学性能有密切联系^[13]。图5为印度南部高韦里河砂显微镜照片^[14],对比图4,5可明显看出,漳浦滨海风积砂颗粒无明显长短差异,颗粒多成近似圆形,较少有棱角状,有较好的磨圆度,符合颗粒流模拟时的圆形颗粒假定。

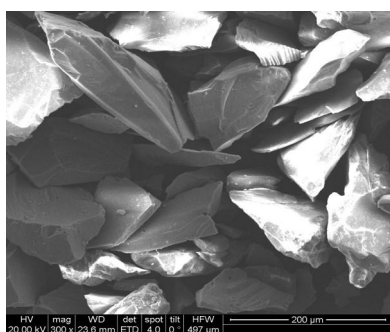


图5 印度南部高韦里河砂电子显微照片^[14]

Fig. 5 Scanning electron micrograph of angular shape of clean Cauvery sand^[14]

在颗粒流离散元软件 PFC^{2D} 环境下,利用其内嵌的 FISH 语句编程^[15-16],建立计算模型,模拟水泥固化滨海风积砂三轴试验的应力-应变曲线,并以此模型为基础分析水泥剂量对水泥固化滨海风积砂细观力学特性的影响。模型生成过程中,首先建立两道横墙和竖墙约束离散体,然后生成并压密初始颗粒集合体,并赋予颗粒微观特性参数形成最后模型。加载过程由竖向墙体给予围压,由横向墙体施加轴向荷载,采用圆形颗粒模型,颗粒间黏结采用平行黏结,模型与平行黏结分布情况见图6。

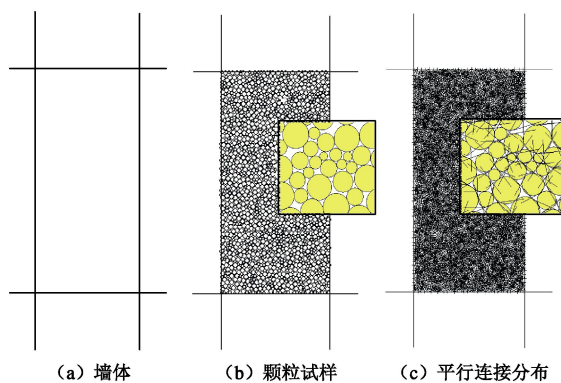


图6 三轴试验颗粒流模型

Fig. 6 Particle flow model of static triaxial tests

2.2 参数标定与应力-应变曲线数值模拟

为了使数值仿真和室内三轴试验相匹配,根据室内试验方案和漳浦滨海风积砂级配等基本物理力学指

标,确定离散元模拟试验模型宽 50 mm,高 100 mm,颗粒的最小半径取 0.15 mm,最大与最小半径比为 4,平均分布,密度取 1670 kg/m³,由 9506 个颗粒组成。分别在 50, 100, 150 kPa 三个围压下对模型试样加载轴向力,控制轴向应变速率为 0.1%/min。由于目前离散元细观力学参数与试验获得的宏观力学参量尚不能建立映射关联,需采用逆向模拟方式反复进行试算,不断调整模型中颗粒细观力学参数,直至模拟结果与物理试验的宏观数据基本吻合,则认为参数可靠^[17]。经过大量的参数试算和结果分析,细观模拟试验的应力-应变曲线和室内常规三轴试验的应力-应变曲线的变化规律相接近(见图7,2),最终确定颗粒细观力学参数见表3。

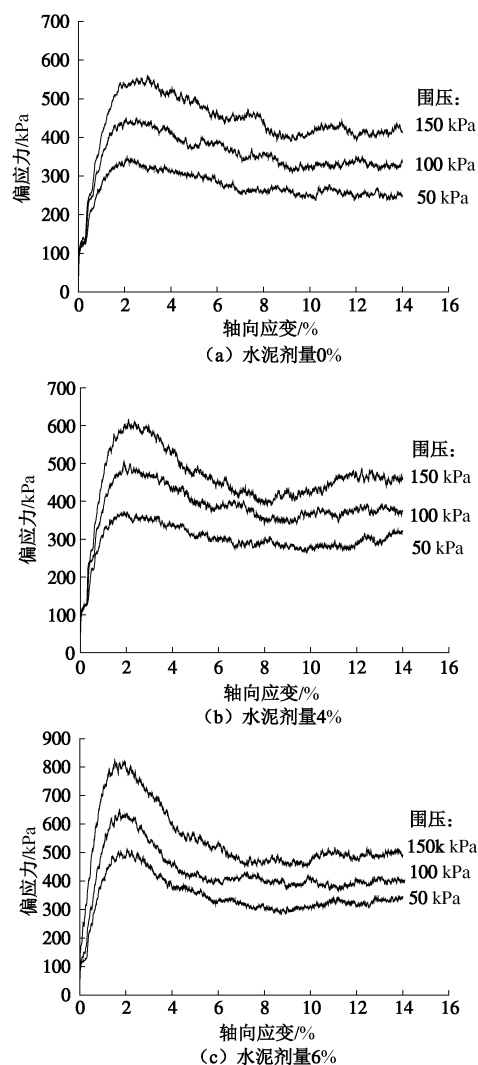


图7 PFC 数值试验模拟应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain relationship of PFC numerical simulation

由表3可见,砂样平行黏结法向和切向强度均值为 5 Pa,相当于几乎不存在黏结,与实际相符。随着水泥剂量增加,颗粒摩擦系数、颗粒接触模量、平行黏结弹性模量、平行黏结法向和切向强度均值均增大。其中,与室内试验 4%、6%水泥剂量试样对应的数值

模型的法向和切向强度取值相比纯砂样增加了 5 个数量级, 体现了水泥水化物在砂样颗粒中的黏结作用。

表 3 PFC2D 模型细观力学参数

Table 3 Micromechanical parameters of PFC ^{2D} model				
材料	变量参数	不同水泥剂量试样取值		
		0%	4%	6%
颗粒	接触模量/MPa	87	88	90
	刚度比	2	2	2
	摩擦系数	0.63	0.70	0.90
平行黏结	法向强度均值/Pa	5	2×10^5	3.2×10^5
	法向强度标准差/Pa	1	190	200
	刚度比	2	2	2
	切向强度均值/Pa	5	2×10^5	3.2×10^5
	切向强度标准差/Pa	1	190	200
	弹性模量/MPa	87	88	90

不同水泥剂量的峰值强度包线及体应变 - 轴向应变关系曲线如图 8, 9 所示, 图 8 (a)、9 (a) 为室内三轴试验结果, 图 8 (b)、9 (b) 为数值仿真试验结果。对比可知, 颗粒流数值仿真能够有效地捕捉中水泥固化滨海风积砂的主要力学特性。

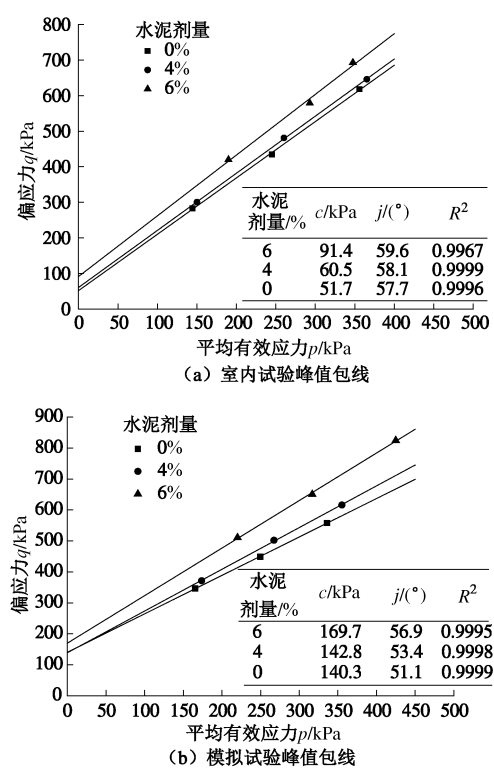


图 8 不同水泥剂量的峰值包线

Fig. 8 Peak strength envelopes of different amounts of cement

由图 8 可见, 峰值内摩擦角及黏聚力都随水泥剂量的增加而增加。但水泥剂量从 0% 增大到 4% 时, 黏聚力值增大微小, 相比之下, 水泥剂量从 4% 增大到 6% 时, 黏聚力显著增加。这主要是因为当水泥剂量增大到 4% 时, 风积砂试样内部所形成的颗粒之间胶结量很少。当水泥剂量增大到 6% 时, 风积砂试样内部已经形成大量的颗粒间胶结黏结, 从而导致在水泥剂

量增大到 6% 时黏聚力显著增加。这一结论在某种程度上可以与图 4 (c) 的水泥剂量 6% 时砂样显微照片中出现“团聚体结构”相互印证。由图 9 可见, 风积砂试样都先发生体缩后发生体胀, 随着水泥剂量的增加, 体缩轻微增多, 但达到轴向应变 3.5% 后 3 种试样的体胀值相接近。总体上看, 水泥剂量对风积砂体变过程影响相对较小。

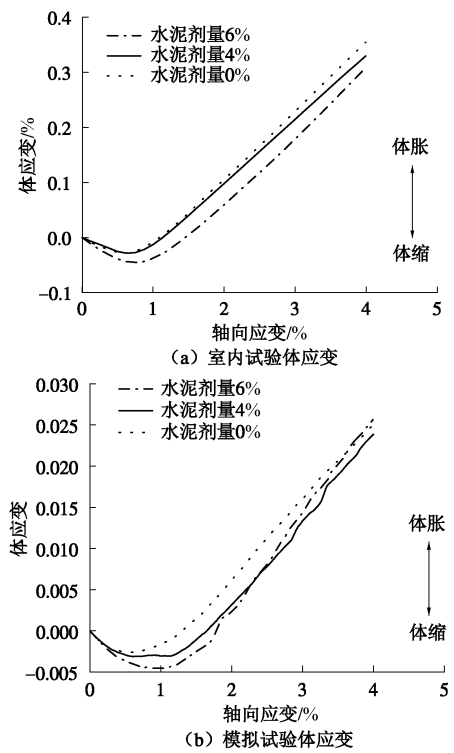


图 9 水泥剂量对体应变的影响 (围压 100 kPa)

Fig. 9 Variation of volumetric strain vs. axial strain with cement amount

2.3 水泥固化滨海风积砂细观力学响应分析

(1) 黏结破坏数

黏结破坏数为模型中粒间平行黏结的破坏个数, 反应砂粒间水泥胶结在整个加载过程中的破坏规律及发挥的作用^[10]。图 10 为不同剂量水泥固化滨海风积砂试样黏结破坏数与轴向应变的关系曲线。相对于水泥剂量由 0% 增至 4% 时的累积黏结破坏数差值 (水泥剂量为 0% 时, 黏结破坏数视为零), 水泥剂量从 4% 增至 6% 的累积黏结破坏数显著增加, 且水泥剂量越大, 围压对破坏黏结数影响越大。这主要是由于水泥剂量增大到 4% 时, 风积砂试样内部形成的颗粒之间胶结量很少, 而水泥剂量达到 6% 时, 风积砂试样内部已生成大量砂颗粒间胶结, 这与峰值包线图中, 黏聚力的增加结果相符。此外, 图 10 中 A 点对应应力 - 应变曲线中, 由应变软化阶段过渡到残余强度阶段时的临界点。在到达 A 点状态后, 风积砂试样破坏黏结数增长速率 (破坏黏结数随轴向应变的增长速率)

保持在较小且稳定的水平。这主要是因为，在 A 点状态前黏结破坏累积导致风积砂试样产生贯通的破坏区域形成剪切带，而在 A 点状态后风积砂试样内部颗粒间的摩擦力代替颗粒间的黏结力发挥主要作用^[18]。

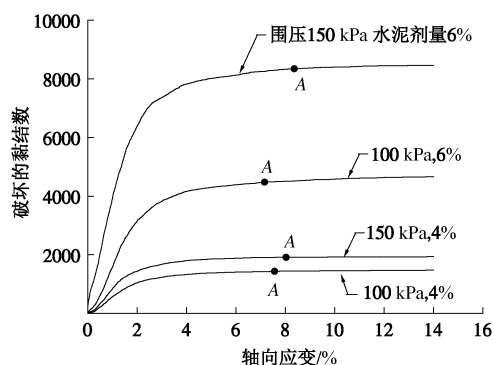


图 10 水泥剂量对破坏黏结数的影响

Fig. 10 Variation of bond breakage number vs. axial strain with cement amount

(2) 配位数

图 11 分别为围压 100 kPa 的水泥固化风积砂试样配位数 - 轴向应变曲线 (B 点对应初始屈服状态)。配位数为模型中颗粒的平均接触点个数，是衡量颗粒接触数的重要标志，从图 10 中可以看出，随着水泥剂量的增加，风积砂试样配位数初值和最大值也相应增大，且在达到 B 点即初始屈服状态时达到最大值。在水泥剂量为 0% 时，配位数达到最大值后平缓减小。与之不同的是，水泥固化试样配位数达到最大值后迅速减小，且随着水泥剂量增加减小越明显。加载结束时三种试样的配位数大小相接近。可以这样理解，随着水泥剂量的增加，风积砂试样中颗粒间生成的黏结量和黏结强度增大，黏结量增大配位数初值相应增加，在初始屈服状态时，试样内部黏结开始大量破坏，配位数开始减小，黏结强度越大，黏结大量破坏前试样体缩越明显，导致配位数最大值增大。

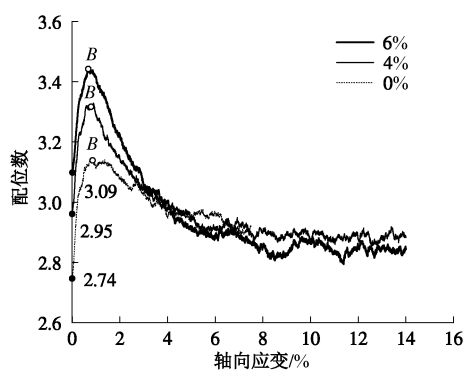


图 11 水泥剂量对配位数的影响 (围压 100 kPa)

Fig. 11 Variation of coordination number vs. axial strain with cement amount

(3) 位移场

图 12 为围压 150 kPa，水泥剂量为 0%，6% 水泥固化风积砂试样在轴向应变 0.9%，2.3%，7% 下的颗粒位移场。位移场中箭头的方向表示颗粒位移的方向，箭头的长短表示颗粒位移的大小。图中箭头为附近区域位移方向的趋势。图 13 为围压 150 kPa，水泥剂量为 0%，6% 水泥固化风积砂试样室内试验破坏结果。由图 12 可见，整个加载过程中，纯砂即 0% 水泥剂量试样内部颗粒的位移特征主要表现为上下端颗粒向试样中分线移动，左右端颗粒背离试样的竖向中分线，宏观上表现为最终的鼓胀破坏，这与图 13 (a) 相对应。当水泥剂量 6%，轴向应变 0.9% (初始屈服状态) 时，相比水泥剂量 0% 的试样，其内部位移场的趋势和纯砂相同，当轴向位移为 2.3% (峰值状态) 时，试样内部表现出颗粒结构排位变化，试样中部颗粒出现倾斜位移的趋势；当轴向应变为 7% 时，水泥固化风积砂试样内部形成一条剪切带，这与如图 13 (b) 的情况较一致。水泥剂量 4% 的情况介于上述两种剂量之间，限于篇幅不作赘述。与纯砂对比，水泥固化作用使风积砂试样颗粒的运动趋势在初始屈服状态后发生改变，在峰值状态出现剪切位移场的定向局部分布，进而发展形成剪切带。

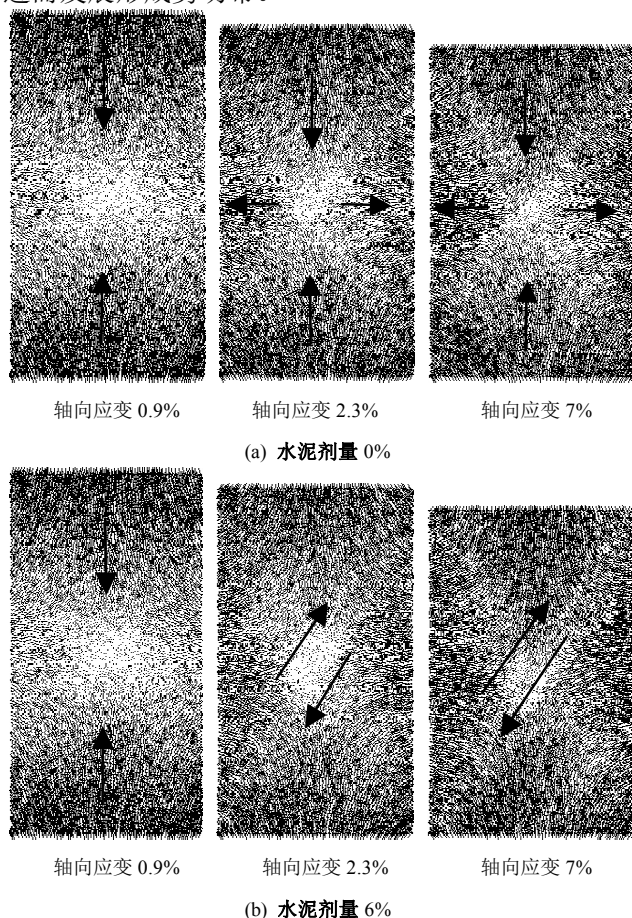


图 12 水泥剂量对位移场的影响 (围压 150 kPa)

Fig. 12 Variation of shear band with cement amount

坏曲线及位移场分布情况综合分析可知: 水泥固化滨海风积砂由于其内部“团聚结构”作用, 使峰值强度得到显著提高。加载过程中试样内部水泥胶结发生累积破坏, 达到峰值强度时, 胶结破裂逐渐贯通, 出现剪切位移场的定向分布, 试样承载力降低, 应力-应变曲线体现出应变软化现象, 如图 2 (b)、(c)。随着胶结破裂不断贯通发展, 出现明显的剪切带, 如图 12 (b)、13 (b), 即风积砂水泥固化后的剪切破坏模式。

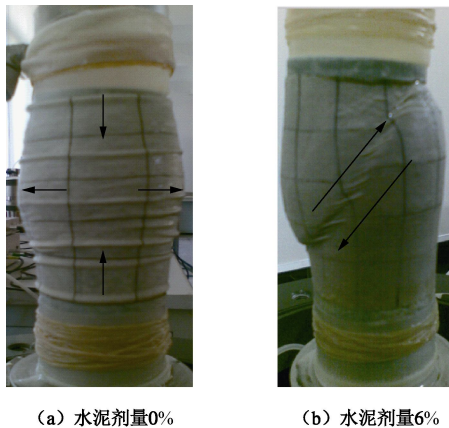


图 13 水泥剂量对试样破坏结果的影响 (围压 150 kPa)

Fig. 13 Effect of cement amount on destruction of sample

3 结 论

(1) 水泥固化滨海风积砂室内试验表明, 水泥剂量增加时, 水泥固化风积砂试样峰值强度与初始模量均增大, 峰值应变减小; 细观显微照片显示, 水泥剂量为 6% 时, 水泥固化滨海风积砂形成具有较高强度的团聚结构, 水化物胶结作用明显。

(2) 通过颗粒流数值仿真, 基本再现了水泥固化风积砂室内试验的应力-应变关系曲线特征。峰值内摩擦角及黏聚力均随水泥剂量的增加而增加。相比水泥剂量从 0% 增大到 4%, 水泥剂量从 4% 增大到 6% 时, 风积砂试样内部开始形成大量的颗粒间胶结, 使其黏聚力显著增加。

(3) 随着水泥剂量的增加, 水泥固化风积砂试样配位数初值与最大值相应增加, 在残余强度阶段配位数大小相近。水泥剂量对水泥固化风积砂试样体应变的影响较小。

(4) 与纯砂相比, 水泥胶结作用使砂颗粒的运动趋势在初始屈服状态后发生改变, 在峰值状态出现剪切位移场的定向分布, 形成剪切带。

参考文献:

[1] BELL F G. Lime stabilization of clay minerals and soils[J]. *Engineering Geology*, 1996, **42**(6): 223 - 237.

[2] ISMAIL M A, JOER H A, SIM W H, et al. Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2002, **128**(6): 520 - 529.

[3] 黄 新, 周国钧. 水泥加固土硬化机理初探[J]. *岩土工程学报*, 1994, **16**(1): 62 - 68. (HUANG Xin, ZHOU Guo-jun. Hardening mechanism of cement-stabilized soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **16**(1): 62 - 68. (in Chinese))

[4] CUCCOVILLO T, COOP MR. On the mechanics of structured sandss[J]. *Géotechnique*, 1999, **49**(6): 741 - 760.

[5] CUNDALL P A, STRACK O D L. The discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, **29**(1): 47 - 65.

[6] IANG M J, YU H S, LEROUEIL S. A simple and efficient approach to capturing bonding effect in natural sands by discrete element method[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2007, **69**(6): 1158 - 1193.

[7] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Bonds rolling resistance and its effect on yielding of bonded granulates by DEM analyses[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, **30**(8): 723 - 761.

[8] WANG Y H, LEUNG S C. A particulate scale investigation of cemented sands behavior[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, **45**(1): 29 - 44.

[9] WANG Y H, LEUNG S C. Characterization of cemented sands by experimental and numerical investigations[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2008, **134**(7): 992 - 1004.

[10] 蒋明镜, 孙渝刚. 人工胶结砂土力学特性的离散元模拟[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(6): 1849 - 1856. (JIANG Ming-jing, SUN Yu-gang. A DEM modelling of mechanical behaviour of artificially cemented sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(6): 1849 - 1856. (in Chinese))

[11] 胡舜娥, 蔡燕燕, 俞 缙, 等. 水泥固化滨海风积砂三轴试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, **10**(3): 573 - 579. (HU Shu-ne, CAI Yan-yan, YU Jin, et al. Experimental study of triaxial test of cement solidified coastal aeolian sands[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, **10**(3): 573 - 579. (in Chinese))

[12] 王树娟. 掺风积沙水泥复合土力学性能的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009. (WANG Shu-juan. The wind

- deposited sands mixed cement composite soil mechanics performance of research[D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese))
- [13] SHINOHARA K, OIDA M, GOLMAN B. Effect of particle shape on angle of internal friction by triaxial compression test[J]. Powder Technology, 2000, **107**(3): 131 - 136.
- [14] KANDASAMI R K, MURTHY T G. Effect of intermediate principal stress on the mechanical behavior of angular sand[J]. Geotechnical Special Publication, 2014(236): 406 - 415.
- [15] 周 健, 贾敏才. 土工细观模型试验与数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (ZHOU Jian, JIA Min-cai. Soil fine view model test and numerical simulation[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [16] 周 健, 池 永, 池毓蔚, 等. 颗粒流方法及 PFC^{2D} 程序[J]. 岩土力学, 2000, **21**(3): 271 - 274. (ZHOU Jian, CHI Yong, CHI Yu-wei, et al. The method of particle flow and PFC^{2D} code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(3): 271 - 274. (in Chinese))
- [17] 徐金明, 谢芝蕾, 贾海涛. 石灰岩细观力学特性的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2010, **31**(2): 390 - 395. (XU Jin-ming, XIE Zhi-lei, JIA Hai-tao. Simulation of mesomechanical properties of limestone using particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(2): 390 - 395. (in Chinese))
- [18] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(1): 2610 - 2615. (YIN Xiao-tao, GE Xiu-run, LI Chun-guang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(1): 2610 - 2615. (in Chinese))

2nd International Symposium on Asia Urban GeoEngineering

24(Fri.)-27(Mon.) November 2017

Hunan University

Changsha, China

Host: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering ATC6.

Organizers: Hunan University, Tianjin University, Chinese Institution of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Website: <http://www.isaug2017.org/>

Invitation: You are warmly invited to attend the 2nd International Symposium on Asia Urban GeoEngineering on November 24-27, 2017 in Changsha, a historical and modern city in Hunan, China. The aim of this symposium is to share ideas and experiences about urban geoenvironment in Asian countries among engineers, researchers and academia professors.

Symposium theme: Environmental friendliness, sustainability and diversity in urban geoenvironment.

Topics: ①Fundamental behavior and constitutive model of geomaterials; ②Excavation engineering; ③Tunnelling; ④Urban environmental geotechnical problems and disaster effects; ⑤Risk and safety assessment, management and control in urban geoenvironment; ⑥Design standards of deep excavation among asian countries.

Conference Language: The official language of the conference will be English.

Important dates: Abstract submission deadline: Dec. 31, 2016; Abstract submission notice: Feb. 28, 2017; Full paper

submission deadline: Apr. 30, 2017; Full paper submission notice: Jun. 30, 2017; Early bird registration open: Mar. 31, 2017; Symposium: Nov. 24-27, 2017.

Abstracts and paper submission: The abstract should be written in English and should clearly explain the contents of the studies discussed. The abstract (no more than 800 words) must include the title of the paper, authors, affiliation of authors, e-mail address of corresponding author, 4-5 keywords and the text in English. The content of the full papers submitted should be scientific, advanced, innovative, and must not have been published in any academic journals or reported in any academic meetings. Please send it to our official mailbox: urban.geoeng@163.com, with your telephone number.

The author of the selected paper will be invited to make an oral presentation on the 2nd-ISAUG. Accepted papers will be published in <<Proceeding of 2nd International Symposium on Asia Urban GeoEngineering>>, and the selected papers after peer-review will be recommended to be published in Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering).

Correspondence: Dr. Xin Tan, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China, Tel: +86-731-88821342; Email: urban_geoeng@163.com.