

粉煤灰水泥土变形特性研究*

Deformation Characteristics of Fly Ash Cement Soil

陈俊林¹, 谢金宏², 杨尚川²

- 四川公路桥梁建设集团有限公司公路三分公司, 四川 成都 610200;
- 西南交通大学 交通隧道教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 粉煤灰土层是隧道开挖中少见的一种软弱地层, 在开挖之前需要向地层加入水泥进行处理。选取四川宜宾盐坪坝隧道粉煤灰地层土作为基层材料, 采用三轴试验研究不同水泥掺比、不同围压及养护龄期下粉煤灰水泥土的应力-应变曲线特性、变形规律以及破坏模式。结果表明: 随着水泥掺比以及龄期的提升, 粉煤灰水泥土在同一围压下的应变软化愈发显著, 脆性增强且破坏后强度下降更迅速; 在水泥掺比相同的情况下, 随着围压的增加, 粉煤灰水泥土试件破坏时对应的应变、峰值强度以及残余强度增幅显著; 割线模量 E_{50} 均随水泥掺比、围压及养护龄期增加而增加。研究结果可为类似工程的水泥土旋喷桩或注浆方案设计提供参考。

关键词: 水泥土; 粉煤灰; 三轴试验; 变形

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0001-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.001

CHEN Junlin¹, XIE Jinhong², YANG Shangchuan²

- Sichuan Road & Bridge Co., Ltd., Highway Three Branch, Chengdu 610200, China;
- Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The Yanpingba Tunnel's fly ash stratum soil was selected as the base material for this study. The stress-strain properties, deformation behavior, and failure modes of fly ash cement soil were investigated using unconsolidated and undrained triaxial tests with varying cement mixing ratios, confining pressures, and curing ages. The results indicate that with an increase in cement mixing ratio and curing age, the strain softening of fly ash cement soil specimens under the same confining pressure becomes more pronounced, while the brittleness increases and strength decreases rapidly after failure. The confining pressure has a significant impact on the strain, peak strength, and residual strength of the fly ash cement soil specimen at failure, with an increase in confining pressure leading to a corresponding increase in these values. The secant modulus E_{50} was found to increase with increasing cement mixing ratio, confining pressure, and curing age. The results presented in this paper provide valuable insights for the design of cement-soil rotary jetting piles in engineering applications.

Keywords: cement soil; fly ash; triaxial compression test; deformation

* 基金项目: 国家自然科学基金 (52278371)。

作者简介: 陈俊林 (1996—), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 岩土与地下工程。

通信作者: 杨尚川 (1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 岩土与地下工程。

收稿日期: 2023-05-25

材料科学

0 引言

随着地下工程的迅速发展,水泥土凭借其坚硬性、低压缩性、低渗透性等优点^[1],同时又具有费用低、施工方便等优越性,被广泛运用于各类软土地层处理工程中^[2-4]。国内外学者对水泥土进行了大量研究,Kaniraj^[5]通过无侧限抗压试验建立了无侧限抗压强度与水泥土掺入比、养护龄期之间的关系。储诚富等^[6]研究了含水量、水泥用量和龄期对水泥土无侧限强度影响,并提出了似水灰比的概念用于水泥土强度预测。刘忠等^[7]通过对水泥砾质土的三轴试验,研究了不同水泥掺量下水泥砾质土应力-应变关系和强度参数规律,揭示了水泥土的割线模量随围压和水泥掺入比的增加而增加。阮波等^[8]通过不固结不排水三轴试验研究了水泥掺入比和龄期对抗剪强度的影响,结果表明随着水泥掺量和养护龄期的增加,水泥土的黏聚力和内摩擦角将大幅度提升。秦网根等^[9]展开了不同掺量、不同围压下的三轴试验,探究了水泥土的应力-应变特征、变形规律、强度特征和破坏形式,研究表明水泥土应力-应变关系曲线表现为硬化型、软化型、脆性特征趋势。此外,尹志祥^[10]针对荆州地区的淤泥质土展开了单轴及三轴试验,指出由于围压增大带来的侧向约束效果大于使水化产物胶结作用释放的效果,因此水泥土总体呈现出强度随围压增大而增大的趋势。

粉煤灰土层是隧道开挖中少见的一种软弱地层,在开挖之前需要向地层加入水泥以改善其围岩强度及变形能力^[11-13],但目前有关粉煤灰水泥土的研究较少。因此,针对四川宜宾盐坪坝隧道工程粉煤灰地层,通过不固结不排水三轴压缩试验,研究了粉煤灰水泥土的变形特性和破坏规律。

1 试验研究

1.1 试验材料

试验所用土样取自四川省宜宾市盐坪坝连拱隧道工程现场,隧址区大面积分布于场区电厂灰坝填筑场地,隧道穿越粉煤灰地层。场地中粉煤灰经过堆填碾压和上覆堆填灰层压力的共同作用下,完成了自然状态下的固结沉降。地层自稳能力差,受力即破碎成散颗粒,离散性高,具体物理指标见表1。

选取的水泥为普通的425#的硅酸盐水泥,其物理指标见表2。

表1 粉煤灰地层土基本物理性质指标
Table 1 Basic physical properties of fly ash formation soil

天然含水率 $\omega/\%$	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	比重 G_s	饱和度 $/\%$	液限 W_L	塑限 W_P
59.1	1.49	2.07	2.72	88.3	76.1	52.6

表2 普通硅酸盐水泥性能指标
Table 2 Properties of ordinary portland cement

细度 $/\%$	凝结时间/min		安定性	烧失量 $/\%$	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	初凝	终凝			3 d	28 d	3 d	28 d
1.2	135	295	合格	1.02	26.6	54.8	5.2	83

1.2 试验方案

试验仪器为西安康拓力仪器设备有限公司生产的KTL动三轴。采用应变控制的方式,三轴压缩试验的方法为不固结不排水试验,剪切控制的速率为0.075 mm/min,轴向应变控制为15%。参考盐坪坝隧道的实际埋深,试验中围压取为300、400和500 kPa,结合现场设计粉煤灰水泥土的水灰比取为1,其水泥掺比 a_c 为水泥质量:湿土质量。试验方案见表3。

表3 三轴试验方案
Table 3 Triaxial test plan

水泥掺比 $a_c/\%$	养护龄期 t/d	围压 p/kPa		
		p_1	p_2	p_3
0		300	400	500
6	3	300	400	500
9	3	300	400	500
12	3	300	400	500
	7	300	400	500
	14	300	400	500
15	28	300	400	500
	3	300	400	500
18	3	300	400	500

1.3 试样的制备与养护

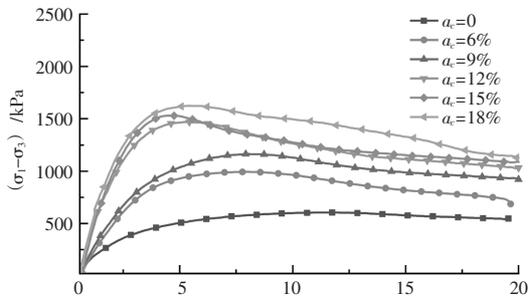
根据表1中粉煤灰地层物理力学指标重塑粉煤灰土。在此基础上,根据试样方案中的水泥掺比和水灰比等要求称取适量的水泥、水,参照JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》^[14]规定将重塑土样和水泥搅拌均匀,洒水并继续搅拌20 min,制备成粉煤灰水泥土。将粉煤灰水泥土分三次插捣、振实、刮平制成高为100 mm,直径为50 mm的标准试件,并在模具中成型24 h后,标号后放入恒温(20±2)℃,恒湿(湿度≥95%)的养护箱中,养护到相应龄期进行试验。

2 试验结果及分析

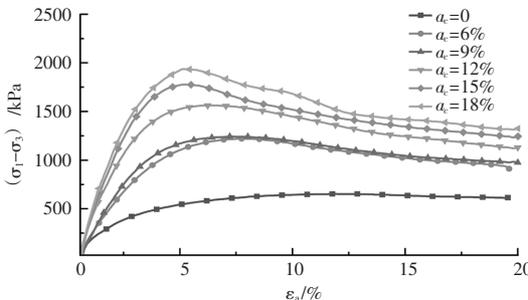
2.1 粉煤灰水泥土的应力-应变关系

2.1.1 水泥掺入比对粉煤灰水泥土的应力-应变关系影响

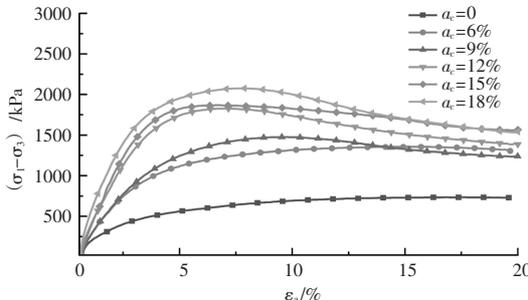
早龄期粉煤灰水泥土的应力-应变关系是强度-变形性能的重要表现。以 3 d 龄期试件进行分析。3 d 龄期下不同水泥掺比的粉煤灰水泥土试件在 3 种不同的围压下的应力-应变关系如图 1 所示。早龄期 (3 d) 粉煤灰水泥土试件的破坏过程大致经历了三个阶段, 即弹性阶段、塑性屈服阶段以及峰值软化阶段。



(a) 围压 $p = 300$ kPa



(b) 围压 $p = 400$ kPa



(c) 围压 $p = 500$ kPa

图 1 相同 p 、不同 a_c 下粉煤灰水泥土的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of fly ash soil-cement under the same p and different a_c

在弹性阶段, 试件所受轴力较小, 内部还不存在微裂缝, 应力-应变曲线呈近似直线, 应力随应

变呈线性增长; 在塑性屈服阶段, 当试件受力超过某一峰值时, 应力-应变曲线斜率逐渐减小并趋于 0, 即此阶段弹性模量随应变增大而减少; 进入峰值软化阶段, 应力达到峰值之后, 应力随应变增加而减小, 粉煤灰水泥土内部裂缝贯通, 使得试件承载能力减低。此外, 对于未掺加水泥的重塑土 ($a_c = 0$) 试件而言, 在试验采用的 3 种围压下其应力-应变曲线软化特征均不明显, 其中围压 $p = 500$ kPa 时试件呈现出应变硬化的特征。

以围压为 300 kPa 为例分析, 粉煤灰水泥土的应力-应变关系见图 1 (a)。粉煤灰水泥土的掺入比较低时 (6%、9%), 试件荷载到达屈服强度后, 随着应变的持续增加, 试件的软化特性越来越明显, 试件破坏时的应变大于 7.5%, 破坏模式为塑性破坏。当粉煤灰水泥土的掺入比较大时 (12%、15%、18%), 试件荷载达到峰值强度后, 偏应力迅速降低, 试件破坏模式呈现脆性破坏特征, 破坏时试件的应变均小于 5%。围压为 400、500 kPa 下的粉煤灰水泥土应力-应变关系特征与围压为 300 kPa 的特征总体较为相似。

2.1.2 围压对粉煤灰水泥土应力-应变关系影响

由图 2 可知, 在同一水泥掺入比下, 粉煤灰水泥土的破坏模式也存在差异, 且围压的变化会影响粉煤灰水泥土的变形特性。围压的增加使得试件峰值应变 (峰值强度时所对应的应变) 随之增加, 试件的软化特性逐渐减弱, 破坏形态趋向于塑性破坏。随着围压的增加, 粉煤灰水泥土破坏时的应变、峰值强度以及破坏后的残余强度逐渐提升。高围压对于试件变形特征可能存在两种相反的影响: 一是围压的增长约束了粉煤灰水泥土的侧向变形, 随着轴向应变的增大, 侧向应变约束使得土体更加密实, 破坏强度和残余强度增大; 二是由于围压的增长使得水化产物胶结作用有所释放, 土颗粒受压破碎后, 试件强度有所降低。

2.1.3 养护龄期对粉煤灰水泥土应力-应变关系影响

以水泥掺比 12% 为例, 说明养护龄期对粉煤灰水泥土应力-应变的影响。由图 3 可知, 随着试件养护龄期的增加, 粉煤灰水泥土的峰值强度显著增长, 其中围压为 300 kPa 时, 养护龄期 3 d 的破坏强度为 1.47 MPa, 而养护 27 d 的破坏强度则为 2.06 MPa, 增长了近 40%。

材料科学

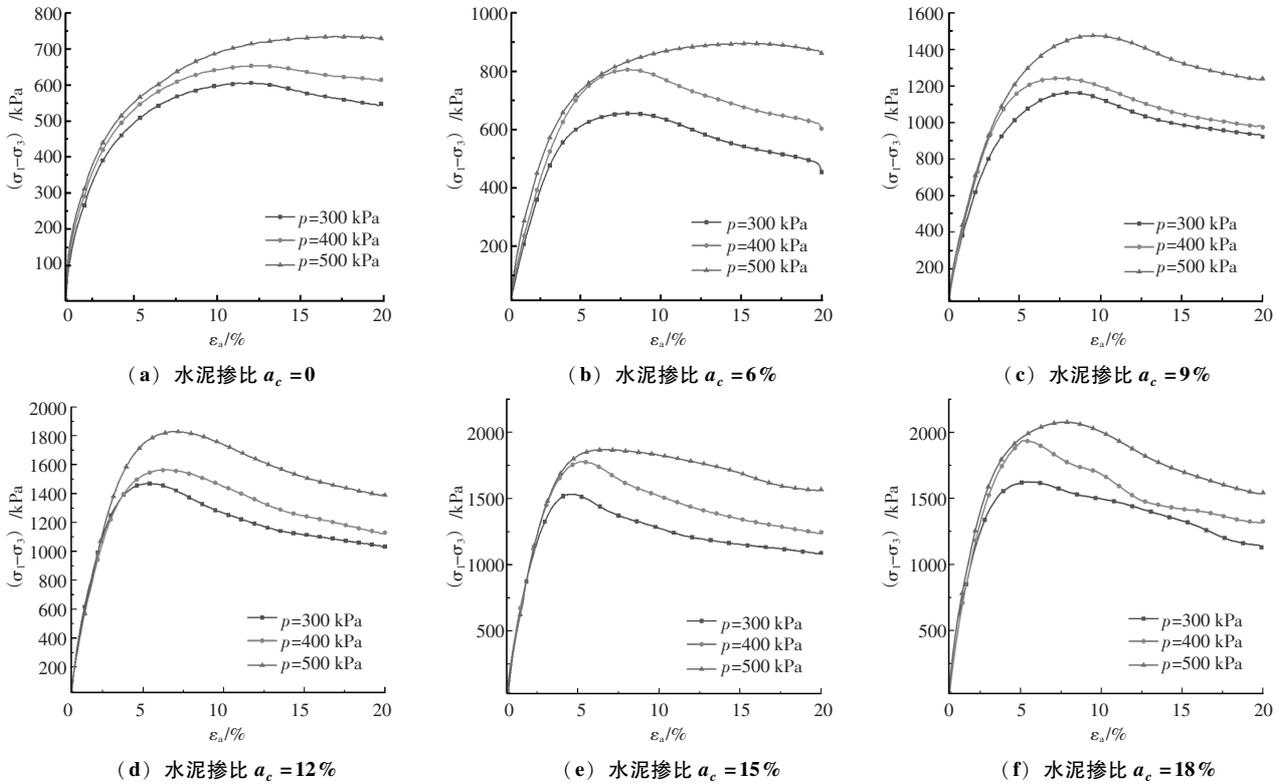


图2 相同 a_c 、不同 p 应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves with the same a_c and different p

以图3(a)为例分析, 低龄期粉煤灰水泥土试件在破坏之前, 压缩模量较小, 随着试件轴向应变的增大, 压缩模量逐渐减小。早龄期试件弹性变形

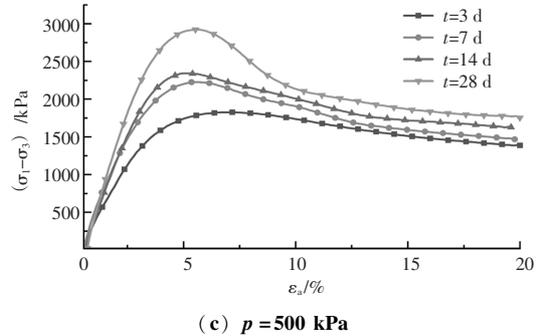
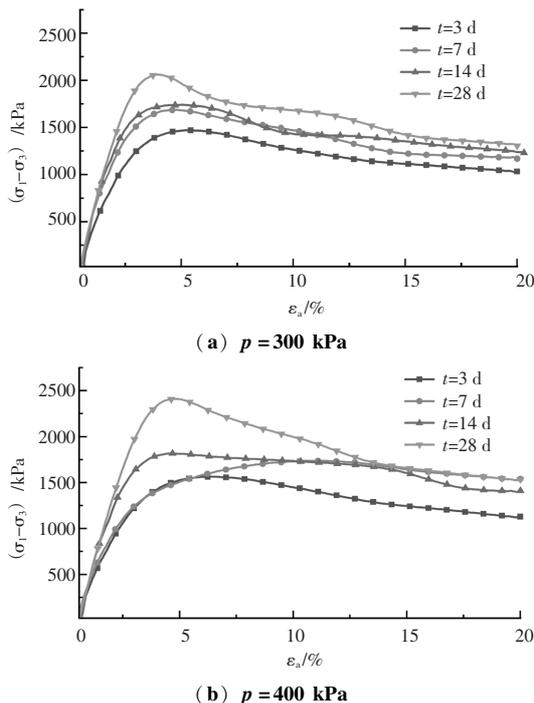


图3 相同 a_c 、 p 、不同养护龄期 t 应力-应变图
Fig. 3 Stress-strain diagram of the same a_c , p and different curing ages t

较小, 残余变形较大, 塑性破坏特性显著; 对于高龄期的试件, 在峰值应变之前试件的压缩模量更大, 破坏后的残余变形较小, 脆性破坏特征表现相对突出。因此, 粉煤灰水泥土养护龄期能够减弱水泥土试件的塑性特性。

2.2 粉煤灰水泥土的变形特性

2.2.1 粉煤灰水泥土的割线模量

水泥土的变形参数用割线模量 E_{50} 来度量^[15]。整理了各试验不同围压下的割线模量 E_{50} 随水泥掺

比 a_c 以及养护龄期 ($a_c = 12\%$) 的变化关系, 以研究水泥掺量和养护龄期对粉煤灰水泥土变形特性的影响, 结果如图 4 和表 4 所示。

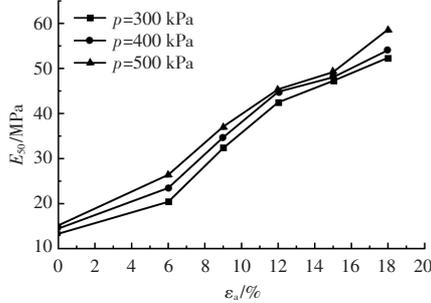


图 4 割线模量 - 水泥掺比关系

Fig. 4 Relation between secant modulus and cement incorporation ratio

表 4 不同龄期下粉煤灰水泥土割线模量

Table 4 Secant modulus of fly ash soil - cement at different ages

围压 p/kPa	割线模量/MPa			
	3 d	7 d	14 d	28 d
300	42.48	46.70	57.85	63.75
400	44.80	48.24	59.60	66.93
500	45.37	52.37	63.12	70.33

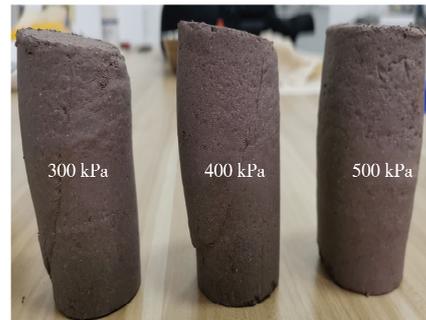
由图 4 可知, 不同围压下, 割线模量 E_{50} 随围压的增大而增大; 在相同的围压下, 割线模量 E_{50} 随着水泥掺比的增加而增加。水泥掺比为 6% 时, 围压为 300 kPa 和 400 kPa 下的割线模量 E_{50} 分别为 20.41 MPa 和 23.47 MPa, 围压的增加带来了 15% 的变形模量提升。在 400 kPa 围压下, 未参加水泥的试件割线模量 E_{50} 为 14.46 MPa, 而水泥掺量为 18% 的粉煤灰水泥土试件的割线模量 E_{50} 为 54.06 MPa, 水泥的增强作用使得割线模量显著提升了 2.73 倍。随着水泥掺量的增加, 围压对粉煤灰水泥土试件的割线模量 E_{50} 的影响呈现减弱的趋势。

由表 4 可知, 随着养护龄期的增加, 粉煤灰水泥土试件的割线模量 E_{50} 也随之增大。围压为 500 kPa, 养护龄期为 3 d 和 28 d 的试件割线模量 E_{50} 分别为 45.37、70.33 MPa, 龄期的延长使得变形模量增长了 55%。综上, 水泥掺量、围压以及养护龄期的增大均会使粉煤灰水泥土的割线模量增大。

2.3 粉煤灰水泥土的破坏特性

通过对三轴压缩试验结果分析, 粉煤灰水泥土的破坏特性受到水泥掺比 a_c 、围压 p 以及养护龄期的影响。在高围压、低水泥掺比以及低龄期条件下, 如图 5 (a) 中水泥掺比为 6%、养护龄期 3 d 的试

件, 在围压为 500 kPa 时破坏形态表现为侧向膨胀, 且整体无显著裂痕。随着水泥掺量的增加、围压的降低以及养护龄期的延长, 粉煤灰水泥土的破坏趋于更加剧烈, 见图 5 (b) 中水泥掺比为 18%、养护龄期 28 d 的试件, 在围压为 300 kPa 时表面出现明显的斜向剪切破坏裂痕。



(a) 塑性破坏



(b) 脆性破坏

图 5 粉煤灰水泥土的破坏类别

Fig. 5 Damage categories of fly ash soil - cement

3 结论

针对水泥加固后的粉煤灰特殊地层进行研究, 通过室内三轴压缩试验, 探究了粉煤灰水泥土的水泥掺量、围压、养护龄期的变化对其应力 - 应变特性、变形破坏规律的影响, 得到结论如下:

(1) 当水泥掺比逐渐增加时, 水化产物的胶结作用使得粉煤灰水泥土具有一定结构性, 粉煤灰水泥土应力 - 应变曲线的应变软化愈来愈明显, 水泥土的脆性也更加显著, 破坏之后强度下降更迅速。

(2) 随着围压的增加, 粉煤灰水泥土破坏时的应变、抗剪强度以及破坏后的残余强度显著增大, 破坏形式也由脆性向延性转变, 但应力 - 应变曲线的趋势基本不变。

(3) 随着龄期的增长, 粉煤灰 (下转第 72 页)

岩土力学

应力增加时, 支护桩的最大水平位移呈现先减少后增加的趋势。确定预应力的应该综合考虑土层、支护桩本身等多种因素, 因此, 该工程预应力不宜超过 200 kN。

参 考 文 献

- [1] 李淑, 张顶立, 房倩, 等. 北京地区深基坑墙体变形特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (11): 2344-2353.
- [2] 高盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究 [J]. 岩土工程学报, 2008 (6): 818-823.
- [3] BORJA R I. Analysis of incremental excavation based on critical state theory [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1990, 116 (6): 964-985.
- [4] 顾亮. 盘锦地区某基坑工程变形特性三维数值分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9 (5): 1092-1096.
- [5] 王明龙, 王景梅. 深基坑桩锚支护中桩内力变化规律数值模拟研究. 地下空间与工程学报, 2013, 9 (3): 576-584.
- [6] 李佳宇, 张子新. 圆砾层地铁车站深基坑变形特性三维数值分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8 (1): 71-76.
- [7] 秦夏强. 软土地基大型复杂基坑工程设计与施工 [J]. 岩土工程学报, 2006 (增刊1): 1628-1632.
- [8] 袁钊, 郑明新, 吴刚. 某深基坑工程坑中坑支护施工问题综合分析 [J]. 施工技术, 2016, 45 (17): 25-28.
- [9] 魏鹏飞, 刘杰. 软土地基深基础组合结构支护技术研究 [J]. 公路, 2019, 64 (1): 136-140.
- [10] 李广, 杨泽平, 张敏思, 等. 复杂环境下深大基坑逆作法拉森钢板桩支护设计 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (22): 141-146, 108.
- [11] 王渭明, 严纪兴, 赵增辉. 黄河冲积地层深基坑支护优化及应用研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12 (1): 176-180.
- [12] 吴意谦, 朱彦鹏. 兰州市湿陷性黄土地区地铁车站深基坑变形规律监测与数值模拟研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (增刊2): 404-411.

(上接第 5 页)

水泥土峰值强度在不断的变大, 同时峰值强度对应的应变大致呈减小的趋势, 水泥土试件向脆性发展。

(4) 粉煤灰的变形模量与水泥掺量、围压以及养护龄期存在正向增强关系。试件破坏模式主要包括塑性破坏和脆性破坏两种, 水泥掺量的提升、围压的增大以及养护龄期的延长促进了试件的破坏模式向脆性破坏转变。

参 考 文 献

- [1] 周丽萍, 申向东. 水泥土力学性能的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2009, 28 (2): 359-365.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [3] 高亚成, 郑建青. 水泥土的室内试验研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 1999 (5): 103-106.
- [4] MOSES G G, RAO S N, RAO P N. Undrained strength behaviour of a cemented marine clay under monotonic and cyclic loading [J]. Ocean Engineering, 2003, 30 (14): 1765-1789.
- [5] KANIRAJ S R, HAVANAGI V G. Compressive strength of cement stabilized fly ash - soil mixtures [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29 (5): 673-677.
- [6] 储诚富, 洪振舜, 刘松玉, 等. 用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (4): 645-649.
- [7] 刘忠, 朱俊高, 刘汉龙. 水泥砾质土三轴试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (7): 2013-2020.
- [8] 阮波, 彭学先, 邓林飞. 水泥土抗剪强度参数试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13 (4): 662-668.
- [9] 秦网根, 蔡正银, 关云飞, 等. 典型区域软弱土室内水泥固化三轴 CD 试验 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2020, 39 (1): 103-108, 114.
- [10] 尹志祥. 荆州城区水泥土力学特性研究及其应用 [D]. 荆州: 长江大学, 2021.
- [11] 宋新江, 徐海波. 平面应变条件下水泥土强度特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (8): 2325-2330.
- [12] 周海龙, 申向东, 薛慧君. 小龄期水泥土无侧限抗压强度试验研究 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2014, 44 (1): 75-79.
- [13] YANG L, WOODS R D. Shear stiffness modeling of cemented clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52 (2): 156-166.
- [14] 水泥土配合比设计规程: JGJ/T233—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [15] 李建军, 梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (2): 473-477.