

# 超细矿粉对水泥土力学性能的影响

丁向群<sup>1</sup>,周向荣<sup>1</sup>,罗超<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中铁九局集团工程检测试验有限公司,辽宁 沈阳 110025)

**摘要** 目的 研究水泥和超细矿粉复掺对水泥土力学性能的影响,比较不同掺量水泥和超细矿粉所引起水泥土无侧限抗压强度变化之间的差异. 方法 在固化剂掺量10%条件下,分别测试了不同超细矿粉和氢氧化钙掺量下水泥土的无侧限抗压强度,分析水泥掺量对大掺量超细矿粉水泥土的应力-应变曲线;利用扫描电子显微镜分析固化水泥土的微观结构. 结果 养护龄期7 d时,超细矿粉水泥土无侧限抗压强度随超细矿粉取代率增加呈下降的趋势,但下降幅度逐渐减小;养护龄期14 d和28 d时,随超细矿粉取代率增加,水泥土无侧限抗压强度呈先减小后增大的趋势. 当超细矿粉的取代率为80%时,养护7 d时的水泥土无侧限抗压强度下降了29%,而相同超细矿粉取代率的水泥土在14 d和28 d时的无侧限抗压强度分别提高了9.3%和15%. 超细矿粉掺入有利于改善水泥土结构的密实性,掺量为80%的水泥土结构表面有絮状胶凝物和针状钙矾石生成. 结论 水泥土的无侧限抗压强度随水泥掺量的增大和养护龄期的延长而提高;水泥的掺入可以改变水泥土的弹性模量;随水泥掺量增加,水泥土应力峰值增大;超细矿粉可细化水泥土的孔隙,使结构更加密实.

**关键词** 水泥土;超细矿粉;无侧限抗压强度;应力-应变

中图分类号 TU521

文献标志码 A

## The Influence of Superfine Mineral Powder on Mechanical Properties of Cement Soil

DING Xiangqun<sup>1</sup>, ZHOU Xiangrong<sup>1</sup>, LUO Chao<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Railway Express No. 9 Bureau Testing Co. Ltd., Shenyang, China, 110025)

**Abstract:** The effect of cement and ultrafine mineral powder on the mechanical properties of cement soil was studied. The difference between the strength changes of cement soil caused by different cements and ultrafine mineral powder was compared. Under the condition of 10% of curing agent, the unconfined compressive strength of cement soil with different ultrafine mineral powder

收稿日期:2018-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51678374);辽宁省自然科学基金项目(20180550092)

作者简介:丁向群(1970—),男,教授,博士,主要从事高性能混凝土方面研究.

and calcium hydroxide content was tested, and the stress-strain curve of cement content on high-volume superfine ore cement soil was analyzed. The microstructure of solidified cement was analyzed by scanning electron microscopy. At 7 days of curing age, the unconfined compressive strength of ultrafine slag cement soil decreased with the increase of superfine slag replacement rate, but the decline gradually decreased; the curing age was 14 d and 28 d, with the increase of substitution rate of superfine ore fines, the unconfined compressive strength of cemented soil decreases first and then increases. When the substitution rate of ultrafine ore fines is 80% and the curing age was 7 d, the ultimate compressive strength decreased by 29%, however, at the curing age 14 d and 28 d, the unconfined compressive strength of cemented soil with the same superfine ore replacement rate increased by 9.3% and 15% respectively. The incorporation of ultrafine ore fines is beneficial to improve the compactness of the cement-soil structure. When the dosage is 80%, the surface of the sample has the formation of flocculent gel and acicular ettringite. The unconfined strength of cemented soil increases with the increase of cement content and the extension of curing age; the incorporation of cement can change the elastic modulus of cement soil; As the cement content increases, the peak value of cement soil stress increases; ultrafine mineral powder can refine the pores of cement soil, making the structure more compact.

**Key words:** cement soil; superfine mineral powder; unconfined compressive strength; stress-strain

水泥石是由水泥、土和水按一定的比例掺和而成的混合体系,其在软土地基加固中被广泛应用<sup>[1-4]</sup>.影响水泥石无侧限抗压强度的因素主要有土质、龄期、水泥的掺入比、土的含水量、水泥品种和标号、外掺剂<sup>[5-7]</sup>.具有活性的矿物掺合料可替代一部分水泥掺入水泥石中,与水泥共同充当固化剂,达到提高水泥石性能的作用<sup>[8-9]</sup>.周世宗<sup>[10]</sup>等发现在一定换掺量下,矿渣对于南沙软土的固化能力优于水泥,换掺效果明显,且固化土后期强度增长速率较快.选用超细矿粉配置水泥基材料能显著促进水泥基材的早龄期水化<sup>[11]</sup>,适当的碱性环境可以促进矿粉与其他掺合料的水化反应<sup>[12]</sup>.由于各地土质以及环境因素对水泥石力学性能影响错综复杂<sup>[13-14]</sup>,且掺合料种类繁多<sup>[15]</sup>,对于将超细矿粉添加到黏土中作为固化剂的研究较少.因此,笔者采用大掺量超细矿粉取代一部分水泥用量,分析超细矿粉对水泥石的增强效果,水泥石微观结构变化规律以及抗压强度和变形之间的关系.

1 试 验

1.1 试验材料

水泥:冀东水泥有限公司生产的普通硅酸盐水泥(P. O42.5).

水:城市自来水.

氢氧化钙:天津市致远化学试剂有限公司生产,分析纯.

粉质黏土:取自施工现场,其物理参数如表 1 所示.

表 1 粉质黏土的物理参数

Table 1 Physical parameters of silty clay				
密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	含水 率/%
1.90	34.5	17.9	16.6	20.6

超细矿粉:比表面积为 520 m<sup>2</sup>/kg,其化学成分组成如表 2 所示.

表 2 超细矿粉的组成

Table 2 Composition of ultrafine mineral powder %				
w(SiO <sub>2</sub> )	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(CaO)	w(MgO)	w(SO <sub>3</sub> )
1.19	13.83	44.12	4.03	2.78

1.2 试验方法

(1)水泥土和超细矿粉水泥土试样制备.将现场所取的土风干碾碎,并过5 mm筛.水泥占黏土质量分数分别为5%、10%、15%、20%,用超细矿粉和水泥制成混合固化剂,超细矿粉占黏土的质量分数分别为20%、40%、60%、80%,而固化剂按黏土的10%掺入.根据《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T233—2011)确定试样配合比,试样长宽高为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,在湿度95%、温度(20±2)℃标准养护室中养护.

(2)无侧限抗压强度测试.根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2012),分别测试7d、14d、28d龄期水泥土和超细矿粉水泥土无侧限抗压强度,每组试验测6个试样,取有效数据的平均值.

(3)应力-应变测试.将制备好的水泥土试块在标准养护条件下养护28 d龄期,采用100kN微机控制电子万能试验机、DH3820静态应变采集系统、应变式应力传感器、电阻应变仪等仪器组合进行试验,根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T50152—2012)测定水泥土强度与变形之间的关系.

(4)微观分析.利用扫描电子显微镜(HitachiS-4800)观察不同试验条件下试样的断面形貌.

2 结果分析

2.1 水泥掺量对水泥土无侧限抗压强度的影响

水泥水化后产生的硅酸钙凝胶是水泥土强度的主要来源.在水泥掺量为粉质黏土的5%、10%、15%、20%条件下,分别测试7d、14d、28d养护龄期的水泥土无侧限抗压强度,在标准养护和水中养护条件下,水泥的掺量对水泥土无侧限抗压的强度的影响如图1所示.

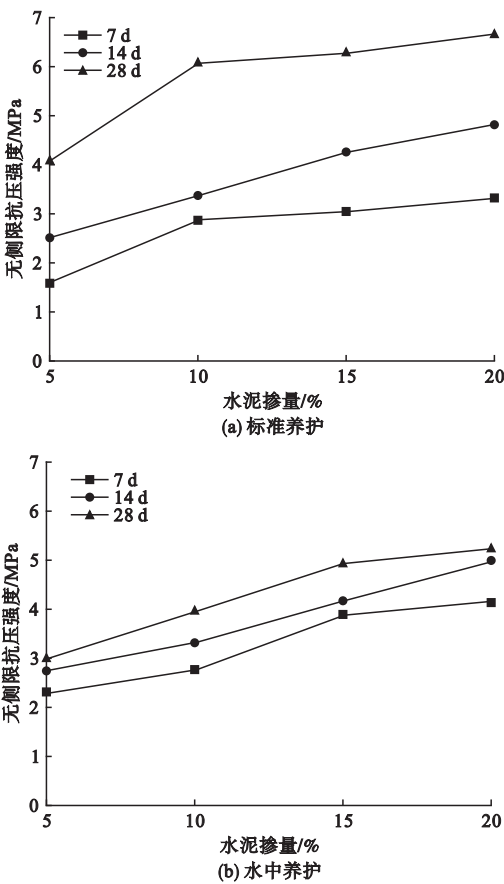


图1 水泥掺量对水泥土无侧限抗压强度的影响  
Fig.1 Effect of cement content on unconfined compressive strength of cement soil

由图1(a)可见,在标准养护条件下,随着水泥掺量增加,水泥土无侧限抗压强度呈线性增长.水泥掺量较低时,水泥土的无侧限抗压强度也相对较低,这是由于水泥掺量很低时,其水化产生的凝胶主要吸附于土体颗粒表面,对强度贡献较小<sup>[16]</sup>.当水泥含量增大时,水泥的水解水化反应、土颗粒与水泥水化物的碳化等作用也随之增强,因此水泥土无侧限抗压强度也相应地提高<sup>[17]</sup>.养护龄期增长,水泥土的无侧限抗压强度提高.

由图1(b)可见,水中养护条件下的水泥土无侧限抗压强度线性增长明显,当水泥掺量较低时,其早期强度高于在标准养护条件下的同龄期水泥土强度,但后期强度相较于标准养护时偏小.在水中养护条件下,14 d和28 d的水泥土无侧限抗压强度增长幅度

较小,说明水在早期时对水泥土无侧限抗压强度起促进作用,而在后期时,过多的水反而抑制水泥土无侧限抗压强度的增长.

2.2 超细矿粉对水泥土无侧限抗压强度的影响

图2为超细矿粉水泥土无侧限抗压强度关系.在固化剂掺量占粉质黏土质量10%的条件下,分别用超细矿粉取代20%、40%、60%、80%的水泥,制成超细矿粉水泥土,并在标准条件下养护7d、14d、28d龄期后,分别测试其无侧限抗压强度(见图2(a)),水泥掺量分别选取为粉质黏土的2%和4%,超细矿粉掺量选取为黏土质量的8%,Ca(OH)<sub>2</sub>的掺量为黏土质量的1.8%,其无侧限抗压强度如图2(b)所示.

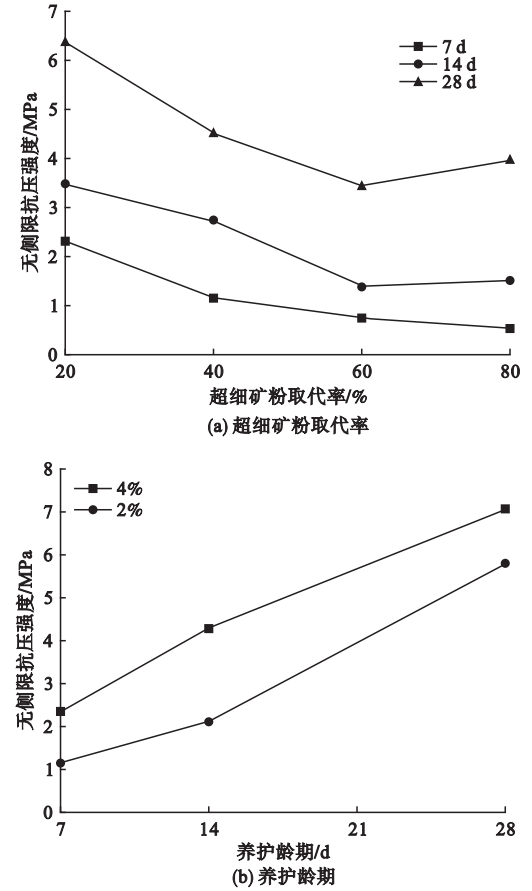


图2 超细矿粉水泥土无侧限抗压强度关系

Fig.2 Unconstrained compressive strength of ultrafine slag cement soil

超细矿粉取代率增加,超细矿粉水泥土无侧限抗压强度呈下降的趋势,但下降幅度逐渐减小.而养护14d和28d龄期时,随超细矿粉取代率增加,水泥土无侧限抗压强度呈先减小后增大的趋势.在超细矿粉取代率为40%时,养护龄期7d的水泥土试样无侧限抗压强度减少了50%,当超细矿粉取代率从40%增加到80%时,水泥土无侧限抗压强度降低率从50%减少至29%.养护28d龄期后,当超细矿粉取代率从40%增加到60%时,水泥土无侧限抗压强度降低率从29%减少至24%,随着超细矿粉取代率继续增加至80%时,试样无侧限抗压强度提高了15%.这说明超细矿粉对水泥土强度的增强作用没有水泥明显,可能原因是当水泥掺量减少时,超细矿粉用于“二次反应”所需的Ca(OH)<sub>2</sub>也相应减少,因此无法产生更多的硅酸钙凝胶<sup>[18]</sup>.在超细矿粉取代率为60%时,其不同龄期的抗压强度都达到最小值,之后随着超细矿粉取代率的提高,抗压强度继续增加.对于同一种掺量来看,超细矿粉水泥土强度随着龄期的增长而增长,尤其是从14d到28d,增长尤为明显,说明超细矿粉对于水泥土强度增长的作用主要体现在后期.当超细矿粉的取代率为80%时,水泥土后期强度增长明显,28d强度达到了4MPa左右.

由图2(b)可见,随着养护龄期的延长,超细矿粉水泥土的无侧限抗压强度呈线性增长.4%水泥掺量的超细矿粉水泥土28d强度可达到7.08MPa,比同龄期下2%水泥掺量的超细矿粉水泥土无侧限抗压强度提高了22%,与未掺加Ca(OH)<sub>2</sub>相比,掺加1.8%Ca(OH)<sub>2</sub>的超细矿粉水泥土7d和28d无侧限抗压强度分别提高了112%和46%,可能原因是超细矿粉在氢氧化钙的激发作用下,可激发其固有活性,进一步提高水泥土的强度<sup>[19]</sup>.在养护龄期14d前,水泥掺量2%相对于水泥掺量4%曲线增长较缓,而在养护龄期14d之后,曲线上升较快.

由图2(a)可见,养护龄期7d时,随着

2.3 超细矿粉水泥土应力 - 应变关系

图3为水泥土应力 - 应变曲线. 不同水泥掺量水泥土的应力 - 应变曲线如图3(a)所示,水泥掺量分别选取为黏土质量的2%和4%,超细矿粉掺量选取为黏土质量的8%,Ca(OH)<sub>2</sub>掺量为黏土质量的1.8%,其应力 - 应变曲线如图3(b)所示.

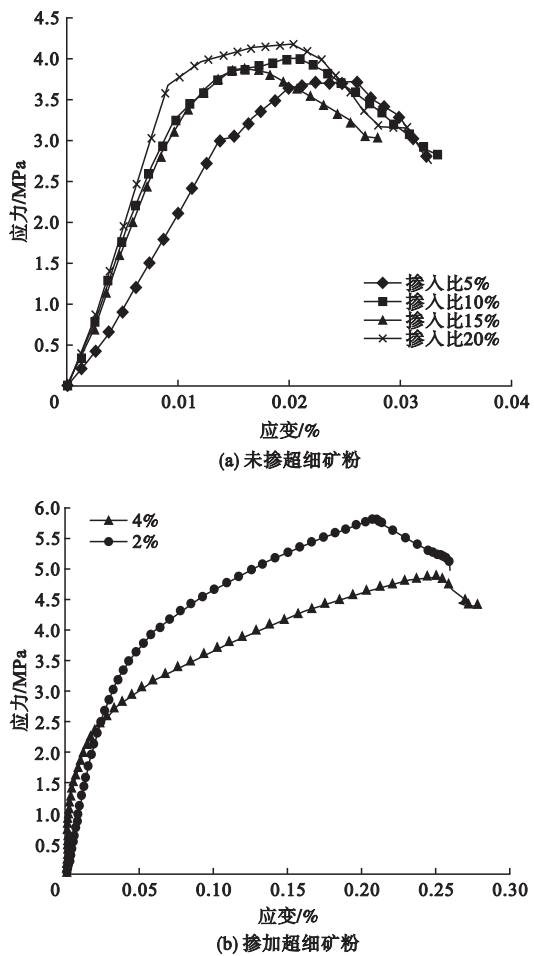


图3 水泥土应力 - 应变曲线

Fig. 3 Stress - strain curve of cement soil with different cement content

由图3(a)可见,在应力上升段,10%掺入比的水泥土曲线斜率皆小于5%、15%、20%掺入比的水泥土曲线斜率,较早地进入了屈服阶段.说明10%水泥掺量的水泥土弹性模量略小.随着荷载的增加,不同配比的水泥土达到破坏时的应力和应变逐渐增加,20%水泥掺量的水泥土应力峰值达到

4 MPa,15%水泥掺量水泥土的应力峰值为3.5 MPa左右,略大于10%水泥掺量的试件.在破坏应变上,10%水泥掺量的水泥土破坏应变为2.5%左右,比20%水泥掺量的试件高2%左右.

由图3(b)可见,在应力上升段,4%水泥掺量的超细矿粉水泥土斜率小于2%水泥掺量的超细矿粉水泥土斜率,说明水泥的掺入改变了水泥土在加载初期时的弹性模量,其曲线大致呈直线增长.2%水泥掺量的超细矿粉水泥土试件线性变形相对于4%水泥掺量的超细矿粉水泥土试件略短,较早得进入了屈服阶段.当应力达到峰值之前的一段曲线内,曲线偏离直线增长,应变迅速增加,而应力增长缓慢,随后达到峰值.当出现峰值之后,曲线开始下降,直至试件破坏.超细矿粉水泥土应力应变曲线表明水泥掺量4%的超细矿粉水泥土应力峰值为5.9 MPa左右,大于2%水泥掺量超细矿粉水泥土的应力峰值4.5 MPa,发生的应变变形量相对于2%水泥掺量的超细矿粉水泥土缩短了约0.16%,这说明随着水泥掺量的增加,试件发生破坏所需的应力也相应增大.

3 微观分析

利用扫描电镜(SEM)分析不同水泥掺量和超细矿粉取代率下水泥土的微观结构(见图4).由图4(a)可知,7 d龄期时,10%水泥掺量的水泥土试样表面虽然有絮状凝胶生成.图4(b)中的水泥土试样结构与图4(a)相比,试样表面稀疏,无法形成整体结构,因为水泥水化产生的胶凝性物质主要起胶结土颗粒的作用,对于松散多孔的软土,填充孔隙效率不高<sup>[20]</sup>.在掺加超细矿粉后,图4(c)中试样片状结构明显,排列稀疏,水泥水化产物没有形成对土颗粒空隙的填充,养护28 d龄期后,图4(d)中颗粒表面有絮状凝胶物和针状钙矾石生成,且结构更加密实.

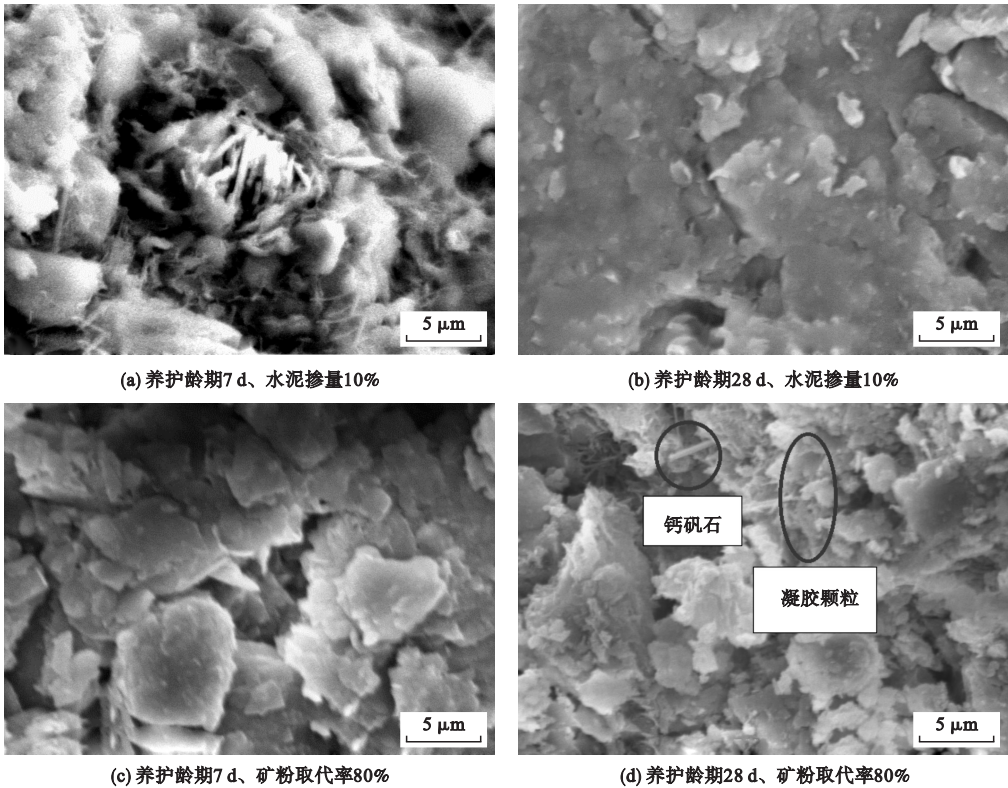


图 4 不同龄期水泥土 SEM 图谱

Fig. 4 SEM images of cement soil at different ages

4 结 论

(1)水泥土的无侧限抗压强度随水泥掺量的增加和养护龄期的延长而提高,尤其在 14 d 之后强度提高更加明显,水中养护条件下水泥土抗压强度后期增长幅度较小.

(2)采用超细矿粉取代水泥,养护龄期 7 d 时,水泥土的无侧限抗压强度随超细矿粉取代率的增加呈下降趋势,但下降幅度逐渐减小,养护龄期 14 d 和 28 d 时,随超细矿粉取代率增加,水泥土无侧限抗压强度呈先减小后增大的趋势,养护龄期 7 d 的水泥土无侧限抗压强度降低率从 50% 减少至 29%,当超细矿粉的取代率为 80% 时,养护龄期 14 d 和 28 d 的水泥土无侧限抗压强度分别提高了 9.3% 和 15% .

(3)水泥的掺入可以改变水泥土的弹性模量,随水泥掺量增加,水泥土应力峰值增

大,其 20% 水泥掺量可达 4 MPa,比 5% 水泥掺量的水泥土试件高了 17% 左右. 4% 水泥掺量的超细矿粉水泥土相比于 2% 水泥掺量水泥土试件应力峰值增长了 30% ,而应变变形量却缩短约 0.16% . 超细矿粉可细化水泥土的孔隙,使结构更加密实. 在掺加超细矿粉后,28 d 龄期水泥土试样表面有絮状胶凝物和针状钙矾石生成.

参考文献

[ 1 ] 朱艳薇. 水泥土搅拌桩在河道边坡稳定中的应用[J]. 工程建设,2017,49(5) :49 – 51.  
( ZHU Yanwei. Application of cement soil mixing pile in stability of river slope[J]. Engineering construction,2017,49(5) :49 – 51. )

[ 2 ] 陈富,李海涛. 黄骅港地区深层水泥土搅拌桩施工工艺研究[J]. 岩土工程学报,2015,37 (增刊 1) :150 – 160.  
( CHEN Fu, LI Haitao. Research on construction technology of deep cement – soil mixing pile in huanghua port area[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015, 37 ( S1 ) : 150 – 160. )

- [3] 王卫东. 超深等厚度水泥土搅拌墙技术与工程应用实例[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊1): 373.  
(WANG Weidong. Ultra - deep thickness cement soil mixing wall technology and engineering application examples[J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38(S1): 373.)
- [4] 陶铸, 范钦建, 宋德鑫. 旋喷加筋水泥土桩锚支护技术在深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程技术, 2015, 29(3): 158 - 162.  
(TAO Zhu, FAN Qinjian, SONG Dexin. Application of rotary spray reinforced cement soil Pile anchor support technology in deep foundation pit engineering[J]. Geotechnical engineering technique, 2015, 29(3): 158 - 162.)
- [5] 赵光鹏, 马楠. 水泥土性能及其影响因素的分析[J]. 山西建筑, 2008, 34(13): 179 - 180.  
(ZHAO Guangpeng, MA Nan. Analysis of cement soil properties and its influencing factors[J]. Shanxi architecture, 2008, 34(13): 179 - 180.)
- [6] KARPISZ I, PYDA J, CICHY L. Study of the effect of cement amount on the soil-cement sample strength[J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2018, 365(4): 2063 - 2067.
- [7] 王达爽, 杨俊杰, 董猛荣. 水泥土强度预测室内试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(7): 96 - 102.  
(WANG Dashuang, YANG Junjie, DONG Mengrong. Laboratory test study on cement soil strength prediction[J]. Periodical of ocean university of china(natural science edition), 2018, 48(7): 96 - 102)
- [8] KARPISZ I, PYDA J, CICH Y. Study of compressive strength evolution in soil cement samples with fly - ash admixtures[J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2018, 365(3): 2049 - 2051.
- [9] AMU A B, FAJOBI S O, AFEKHUA I. Stabilizing potential of cement and fly ssh mixture on expansive clay soil[J]. Journal of applied sciences, 2005, 5(9): 1669 - 1673.
- [10] 周世宗, 梁仕华, 戴君. 矿渣和粉煤灰固化南沙软土试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(4): 76 - 79.  
(ZHOU Shizong, LIANG Shihua, DAI Jun. Experimental study on solidification of nansha-soft soil by slag and fly ash[J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2015, 13(4): 76 - 79.)
- [11] 张亚梅, 余保英. 掺超细矿粉水泥基材料早期水化产物及孔结构特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011(4): 815 - 819.  
(ZHANG Yamei, YU Baoying. Early stage hydration products and pore structure characteristics of cement - based materials with superfine ore fines[J]. Journal of southeast university(natural science edition), 2011(4): 815 - 819.)
- [12] GURRIER M, SANJAYAN J, Collins F. Residual strength properties of sodium silicate alkali activated slag paste exposed to elevated temperatures[J]. Materials and structures, 2010, 33(1): 51 - 62.
- [13] HUANG Yun, LIN Zongshou. Investigation on phosphogypsum steel slag - granulated blast - furnace slag - lime - stone cement[J]. Construction and building materials, 2010, 24(7): 1296 - 1301.
- [14] 芮凯军, 李俊才, 杨宇. 不同土质水泥土性质的室内试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, 41(2): 173 - 178.  
(RUI Kaijun, LI Juncai, YANG Yu. Laboratory test of different soil cement soil properties[J]. Journal of Nanjing university of technology(natural science edition), 2019, 41(2): 173 - 178.)
- [15] RAHMAN A S A, JAIS I B M, SIDEK N. Bamboo leaf ash as the stabilizer for soft soil treatment[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2018, 140(1): 180 - 188.
- [16] 王海龙, 申向东. 水泥掺量对固化土早期结构形成的影响[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(2): 469 - 473.  
(WANG Hailong SHEN Xiangdong. Effect of cement content on early structure formation of solidified soil[J]. Bulletin of the chinese ceramic society, 2011, 30(2): 469 - 473.)
- [17] 涂帆, 常方强. 水泥土无侧限抗压强度影响因素的室内试验研究[J]. 工程勘察, 2005, 3: 8 - 10.  
(TU Fan, CHANG Fangqiang. Laboratory experimental study on influencing factors of unconfined compressive strength of cement soil[J]. Geotechnical investigation & surveying, 2005, 3: 8 - 10.)
- [18] 尹峻. 大掺量超细矿粉在混凝土中的应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2004, 5: 20 - 21.  
(YIN Jun. Application of high volume ultrafine mineral powder in concrete[J]. China concrete and cement products, 2004, 5: 20 - 21.)
- [19] 牛全林, 冯乃谦, 杨静. 矿渣超细粉作用机理的探讨[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(1): 84 - 89.  
(NIU Quanlin, FENG Naiqian, YANG Jing. Discussion on the action mechanism of slag ultrafine powder[J]. Journal of building materials, 2002, 5(1): 84 - 89.)
- [20] 黄新, 胡同安. 水泥 - 废石膏加固软土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 72 - 76.  
(HUANG Xin, HU Tongan. Experimental study on cement-waste gypsum reinforced soft soil[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1998, 20(5): 72 - 76.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)