

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011048

云母影响水泥软黏土强度的试验研究

张亚玲, 赵晓彦, 严 群

(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 软黏土具有压缩性强、承载能力低的特点, 实际工程中多用水泥作为固化剂对软黏土进行加固。云母是软黏土中较为常见的一种片状矿物, 其含量和颗粒大小会影响水泥加固后的软黏土即水泥软黏土的强度。通过无侧限抗压强度试验和直接剪切试验研究云母含量及目数对水泥软黏土抗压强度及抗剪强度的影响, 提出了云母含量、目数与水泥软黏土抗压强度、抗剪强度指标值之间的关系。试验中云母目数设定为 10, 20, 40, 80 目共 4 个梯度, 云母含量设定为 0%、8%、16%、24%、32% 共 5 个梯度。试验结果表明, 云母含量的增加以及云母目数的减小会导致水泥软黏土无侧限抗压强度和抗剪强度的降低, 且其对无侧限抗压强度的不利影响更为显著。含 10 目 32% 云母的水泥软黏土的强度减少量最大, 此时无侧限抗压强度为 0.33 MPa, 是不含云母水泥软黏土的 25.5%; 黏聚力为 76.5 kPa, 比不含云母时减少了 12.24 kPa; 内摩擦角由不含云母时的 23.71°降低至 21.77°。云母自身的片状形态及其对水泥水解水化作用、离子交换作用的阻碍是造成水泥软黏土强度降低的主要原因。

关键词: 云母; 水泥软黏土; 抗压强度; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: P642.11⁺6; TU411.6; TU411.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0101-08

Experimental research on the influence of mica on strength of cement-reinforced soft clay

ZHANG Yaling, ZHAO Xiaoyan, YAN Qun

(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Soft clay is of the characteristics of strong compressibility and low bearing capacity. Cement is used as curing agent to strengthen soft clay in engineering. Mica is a kind of mineral widely distributed in soft clay, and its content and particle size will affect the strength of the cement-reinforced soft clay. The influence law among the mica content and mica mesh number on strength of the cement-reinforced soft clay is studied based on direct shear tests and unconfined compressive strength tests. Based on the experimental data, the mathematical relationship between the content and mesh number of mica and soil-cement strength is established. The number of mica meshes in the experiment is 10, 20, 40 and 80 mesh, and the mica content is set as 0%, 8%, 16% and 32%. The results show that as the content of mica increases or the number of mica meshes decreases, the unconfined compressive strength and shear strength of the cement-reinforced soft clay show a decreasing trend, and the effect of mica on the unconfined compressive strength is more significant. When the number of mica mesh in the cement soft clay is 10 mesh and the content is 32%, the strength of the cement soft clay decreases the most. In this case, the unconfined compressive strength of 0.33 MPa is 25.5% of that of the cement soft clay without mica, the cohesion is 76.5 kPa, which is 12.24 kPa less than that of the cement soft clay without mica, and the internal

收稿日期: 2020-11-28; 修订日期: 2021-01-25

第一作者: 张亚玲(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害防治工程。E-mail: zyaling@163.com

通讯作者: 赵晓彦(1977-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事地质灾害与防治工程研究。E-mail: xyzhao2@swjtu.edu.cn

friction angle decreases from 23.71° to 21.77° . It is speculated that the lamellar morphology of mica and adverse effect on cement hydration are the main reasons for the decrease of the cement soil strength.

Keywords: mica; cement-reinforced soft clay; compressive strength; cohesion; internal friction angle

用水泥作为固化剂进行软黏土地基处理的技术具有较高的经济性、环保性、高效性以及便捷性,在实际工程中被广泛应用。将水泥与地基土拌合会产生各种物理化学反应使得软黏土地基的承载力得到提高、沉降量减小。然而,水泥对软黏土的加固效果会受到各种因素的影响。赵春彦^[1]研究了不同的养护龄期、含水率以及水泥掺量下的水泥软黏土无侧限抗压强度的变化情况并建立了相关的强度预测公式。刘宝臣等^[2]进行水泥改良红黏土力学性质的研究,研究显示水泥对软弱红黏土强度的提高与水泥的掺入量、龄期之间存在较好的相关性,随着水泥掺量和龄期的增加,水泥红黏土的黏聚力持续增加,抗拉强度则呈现先增大后减小的趋势。可见,以往对水泥土强度的研究多集中于水泥掺量和龄期的影响,且成果颇丰^[3-8]。

实际上,除了水泥的掺入量和养护龄期之外,土质也是决定水泥对软黏土加固效果的重要因素,土质对水泥土的加固效果即水泥土强度的影响主要是源于不同的土质所具有的粒度成分、有机质含量、可溶盐类型以及酸碱度会有所差异。芮凯军等^[9]的实验研究表明当其它条件一致时,水泥加固以粉质黏土为主的土层时效果要好于以淤泥质粉质黏土为主的土层。陈慧娥等^[10]的试验显示土中的有机质对水泥水化物的产生具有不利影响,随着有机质含量的增加,水泥土试样的抗剪强度和无侧限抗压强度均减小。邢皓枫等^[11]着眼于被加固土中可溶盐离子对水泥软黏土强度的影响,研究结果表明 Mg^{2+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 离子的含量与水泥软黏土强度呈负相关,上述离子的存在除了会使得水泥软黏土在微观结构上发生变化,同时还会阻碍水泥的水化产物 C-S-H 以及 C-A-H 生成。傅小姝等^[12]的研究显示酸性环境下水泥土的渗透系数更大,无侧限抗压强度更低,在碱性环境下则相反。杨爱武^[13]在天津海相沉积软土为原料的水泥土中加入 $Na(OH)_2$,试验表明碱性环境有助于水泥土强度的提高。上述研究成果表明,软黏土的粒度成分、有机质含量、可溶盐类型及酸碱度均对水泥土的强度有显著影响,但是关于被加固软黏土中特定矿物成分对水泥土强度影响的研究目前来说还较少。

云母是软黏土特别是滨海相软黏土中常见的矿

物成分,表1为我国部分沿海地区软黏土中云母含量统计表。云母作为一种广泛存在于软黏土中的矿物,其含量和颗粒大小的不同会导致软黏土性质的差异。因此,研究云母影响下水泥软黏土的强度,探究以云母含量和云母目数为变量的水泥软黏土无侧限抗压强度、抗剪强度指标值变化规律,对此类土质的加固设计具有实际的工程意义。

表1 我国部分沿海地区软黏土中云母含量占比情况
Table 1 Percentage of mica content in soft clay in some areas

软黏土类型	取样地区	云母含量/%	数据来源
淤泥质粉质黏土	上海	8.6	文献[14]
淤泥质黏土	宁波	45.2	文献[15]
淤泥	南沙	49.4	文献[16]
淤泥质土	洞庭湖	28.9	文献[17]
淤泥质黏土	金沙洲	11.7	文献[18]
淤泥	番禺	8.3	文献[18]
淤泥质土	深圳	17.2	文献[18]
淤泥质亚黏土	顺德	20.6	文献[18]

1 试验方案

1.1 试验设计

本文研究云母对水泥软黏土强度影响的试验包括直接剪切试验和无侧限抗压强度试验。试验中云母目数和云母含量为2个变量,其中云母目数设定为10, 20, 40, 80目共4个梯度,对应粒径分别为1.70, 0.83, 0.38, 0.18 mm,图1所示是不同目数的云母。此外,云母含量设置5个梯度,分别是0%、8%、16%、24%、32%。参照《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)^[19],本次试验水泥软黏土配合比设计为:水灰比0.45,水泥掺量12%,含水量45%,养护龄期28 d。

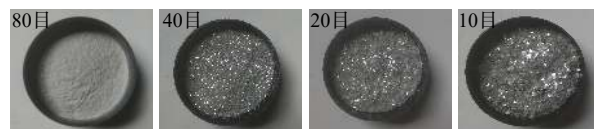


图1 不同目数的云母

Fig. 1 Mica of different particle sizes

1.2 试样制备

表2是试验用云母的化学成分及含量,水泥为M32.5普通硅酸盐水泥,试验用水为自来水。

表 2 云母的主要化学成分

Table 2 Chemical compositions of mica

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃
含量/%	44~50	20~33	9~11	1~2	1~2	2~6

试验用软黏土的物理力学性质如表 3 所示。为了更好的控制试样中云母的含量选择了不含云母的软黏土, 表 4 是利用 x 射线衍射分析确定的软黏土的矿物组分。将现场取回的土样放置在干燥通风处, 待风干后碾碎过 5 mm 筛, 过筛后的土进行含水率测试然后放置在密封的塑料桶中备用。无侧限抗压强度试验所用试模为内径 40 mm、内高 80 mm、壁厚 2 mm 的圆柱型试模; 剪切试验用的是 70 mm×70 mm×70 mm 的立方体试模以及 φ61.8×20 mm 的不锈钢环刀。按照设计配比将材料拌合均匀后置于试模中成型, 拆模后养护到要求龄期立刻进行强度试验。

表 3 软土的基本物理性质

Table 3 Physic-mechanical indices of soft soil

天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	含水率 $w/\%$	孔隙比 e
1.71	19	8.2	68	1.79

表 4 软黏土的矿物成分

Table 4 Mineral compositions of soft clay /%

石英	钾长石	斜长石	蒙脱石	伊蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石
32.4	1.7	15.4	1.0	3.8	26.7	9.5	9.5

1.3 试验方法及试验数据

水泥软黏土无侧限抗压强度试验使用 YYW-III 型无侧限压力仪。根据不同云母目数和含量共制作 17 组试样, 每组试件 6 个共 102 个试样, 取 6 个试件的平均值为该组试件无侧限抗压强度值。水泥软黏土剪切试验使用 DSJ-2 型电动四联等应变直剪仪, 根据不同云母目数和含量共制作 17 组试样, 每组试件为 12 个共 204 个试样。试验时垂向荷载分 100, 200, 300, 400 kPa 共 4 级加载, 各级荷载下进行 3 次重

复试验, 取 3 个试件的平均值为该组试件在给定竖向压力下的抗剪强度值。每组试验样品均需在密封透明袋中进行为期 28 d 的养护(图 2), 达到养护龄期后立即开始试验, 表 5 是水泥软黏土无侧限抗压强度(q_u)和抗剪强度(c 、 φ)试验结果。图 3 是试样被剪断后的断面图, 云母含量为零的试样断面光滑整齐(图 3a), 云母目数为 10 目、含量为 32% 的试样剪断后的断面, 可明显看到大量云母颗粒的存在, 且断面呈现非光滑的参差状(图 3b)。



图 2 试样密封养护
Fig. 2 Samples sealed for preservation

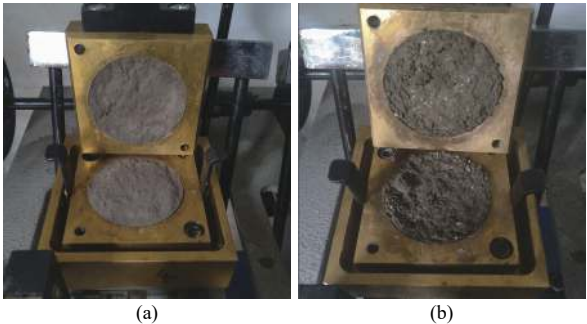


图 3 剪切面形态
Fig. 3 Morphology of shear surfaces

2 试验结果分析

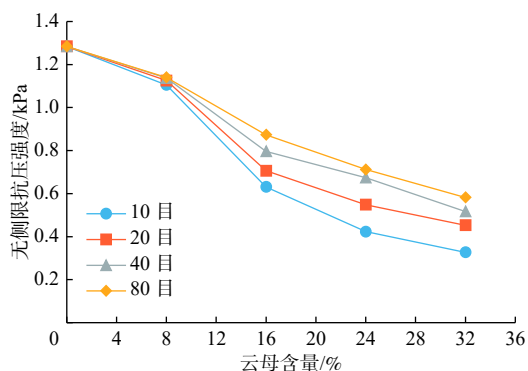
2.1 云母含量对水泥软黏土抗压强度的影响

图 4 是随着云母含量 w 的变化水泥软黏土无侧限抗压强度 q_u 的变化规律。如图 4 所示, 云母含量与水

表 5 水泥软黏土强度试验结果

Table 5 Results of the cement-reinforced soft clay strength

云母含量/%	云母目数											
	10目			20目			40目			80目		
	q_u/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	q_u/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	q_u/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	q_u/MPa	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
0	1.28	88.74	23.71	1.28	88.74	23.71	1.28	88.74	23.71	1.28	88.74	23.71
8	1.11	84.15	22.22	1.13	85.68	22.45	1.14	87.21	23.34	1.14	87.90	23.71
16	0.63	81.86	22.15	0.71	82.62	22.37	0.79	85.68	22.96	0.87	86.46	23.41
24	0.42	79.56	21.99	0.55	81.09	22.22	0.67	83.39	23.04	0.71	84.15	23.56
32	0.33	76.50	21.77	0.45	78.80	22.07	0.52	81.86	23.12	0.58	82.62	23.34

图 4 水泥软黏土 q_u - w 曲线Fig. 4 q_u - w curves of the cement-reinforced soft clay

泥软黏土无侧限抗压强度呈负相关,具体表现为:不添加云母时,龄期为 28 d 的水泥软黏土无侧限抗压强度为 1.28 MPa。当其余变量保持一定时,随着云母含量的增加,水泥软黏土的无侧限抗压强度明显降低,云母含量由 0% 增加至 8%,抗压强度减小得较为缓慢,而云母含量由 8% 增加至 16%,水泥软黏土抗压强度下降较快,云母含量大于 16% 以后抗压强度的减小速率略有减缓。

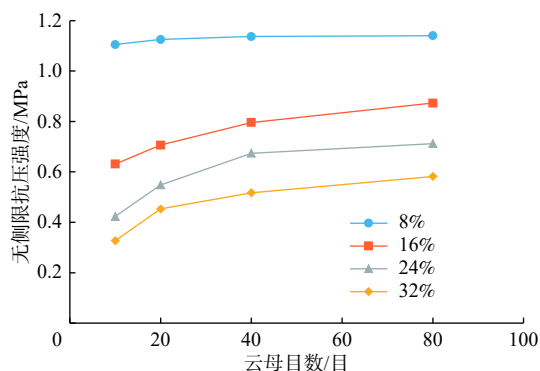
加入 10 目含量分别为 8%、16%、24% 和 32% 的云母时,水泥软黏土的强度由 1.28 MPa 降低至 1.11、0.63、0.42、0.33 MPa,强度分别为未加云母时的 86.7%、49.2%、32.8%、25.8%,云母含量为 32% 时的抗压强度比 8% 时多减少了 0.78 MPa。

2.2 云母目数对水泥软黏土抗压强度的影响

图 5 为云母目数 a 与水泥软黏土无侧限抗压强度 q_u 之间的关系,如图 5 所示,云母目数和水泥软黏土抗压强度呈正相关。含量为 32%、云母目数分别为 80、40、20、10 目时,水泥软黏土的抗压强度由 1.28 MPa 降低至 0.58、0.52、0.45、0.33 MPa,强度分别损失了 54.7%、59.4%、64.8%、74.2%,含有 10 目、32% 云母的试样,其抗压强度损失量比含 80 目、32% 的多 19.5%。

云母目数由 80 目降低至 40 目,抗压强度最大减小量为 0.08 MPa,强度下降幅度较小;当云母目数从 20 目降低到 10 目时,抗压强度的降低速率加快,最大减小量达到 0.12 MPa。

云母含量为 8% 时,云母目数对于水泥软黏土抗压强度的影响不显著。掺入 80 目云母与 10 目云母的水泥软黏土,两者抗压强度的差值很小,只有 0.03 MPa,推测可能是因为此时试样中云母含量较低,在搅拌较均匀的情况下,云母粒径的改变还不足以引起水泥软黏土强度大幅度的变化,结合图 4 所示云母含量由 0 至 8% 这个区段内抗压强度的变化规律,可以将含

图 5 水泥软黏土 q_u - a 曲线Fig. 5 q_u - a curves of the cement-reinforced soft clay

量 8% 作为云母目数影响水泥软黏土抗压强度的一个临界值,即当软黏土中云母含量小于 8% 时可不考虑云母粒径对抗压强度的影响。

2.3 云母含量对水泥软黏土抗剪强度的影响

图 6 是水泥软黏土黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随着云母含量 w 变化的规律。当云母目数一定时,随着云母含量的增加,水泥软黏土的黏聚力逐渐减小。当加入 10 目含量分别为 8%、16%、24%、32% 的云母时,水泥软黏土的黏聚力从 88.74 kPa 减少至 84.15、81.86、79.56、76.50 kPa,含量为 32% 时的黏聚力比未加云母时的减小了 12.21 kPa (图 6a)。此外,随着云母含量的增加,虽整体上内摩擦角呈下降趋势,但减少量相对较小,80 目、32% 云母含量水泥软黏土的内摩擦角为 23.34° 时,比未加云母时减小 0.37° ,10 目、32% 云母含量水泥软黏土的内摩擦角为 21.77° 时比未加云母时测得的小 1.94° (图 6b)。

2.4 云母目数对水泥软黏土抗剪强度的影响

图 7 是云母目数 a 与水泥软黏土黏聚力 c 、内摩擦角 φ 之间的关系。当仅有云母目数作为变量时,随着云母目数的减小,水泥软黏土的黏聚力降低 (图 7a)。例如,当含量均为 32% 时,所含云母的目数为 80 目的水泥软黏土其黏聚力比含云母目数为 10 目的大 6.10 kPa。此外,云母目数从 80 目变化至 10 目,水泥软黏土黏聚力的变化规律也符合云母粒径的变化趋势:云母含量从 80 目减小到 40 目黏聚力下降的速度较为缓慢,而云母含量由 40 目降低至 10 目的这个过程中,黏聚力的减小速度逐渐加快。当云母含量一定时改变云母的目数,内摩擦角随着云母目数的减小同样呈减小趋势,并且,当含量由 8% 变化至 32%,云母目数为 80 目水泥软黏土的内摩擦角变化范围最小,随着云母目数减小、云母粒径增大,云母含量对水泥软黏土内摩擦角的影响变得愈加显著 (图 7b)。

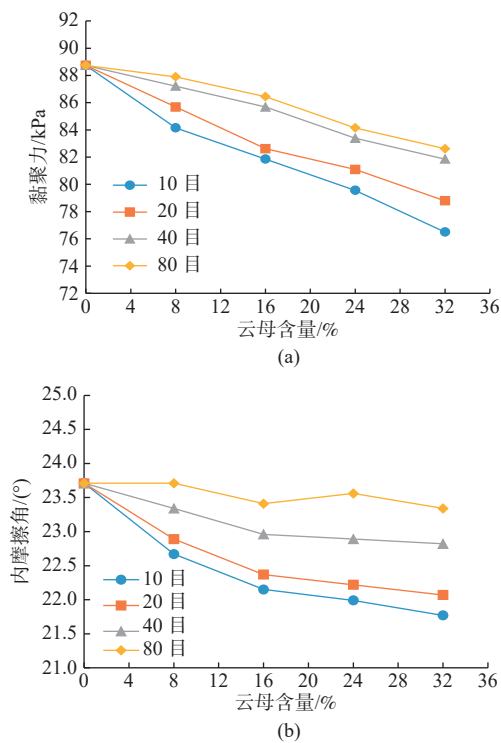


图 6 水泥软黏土 c 、 φ 随云母含量 w 变化的规律

Fig. 6 Variation of cohesion and internal friction angle of the cement soft clay with mica content

2.5 讨论

综上所述,随着云母含量的增加和云母目数的降低,水泥软黏土无侧限抗压强度与抗剪强度指标值均减小,但三者所受到的影响程度不尽相同。试验测得抗压强度和抗剪强度指标的最大值都是在未加云母时,分别为 1.28 MPa、88.74 kPa 以及 23.71°,最小值是出现在加入 10 目含量为 32% 的云母时,测得的最小抗压强度为 0.33 MPa,相比最大值强度损失了 74.5%;测得的最小黏聚力为 76.5 kPa,相比最大值强度损失 13.8%;测得的最小内摩擦角为 21.77°,强度损失量为 8.2%。由此可见,云母对水泥软黏土无侧限抗压强度的不利影响更为显著(表 6)。

表 6 水泥软黏土强度试验统计值

Table 6 Test statistics of strength of the cement soft clay

	抗压强度 q_u /MPa	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ (°)
云母目数0, 含量0%	1.28	88.74	23.71
云母目数10, 含量32%	0.33	76.50	21.77
差值	0.95	12.24	1.94
强度损失比	74.2%	13.8%	8.2%

考虑双因素作用时云母对水泥软黏土强度的影响,以云母含量 w 和云母目数 a 为 2 个自变量,分别以无侧限抗压强度 q_u 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 为因变量

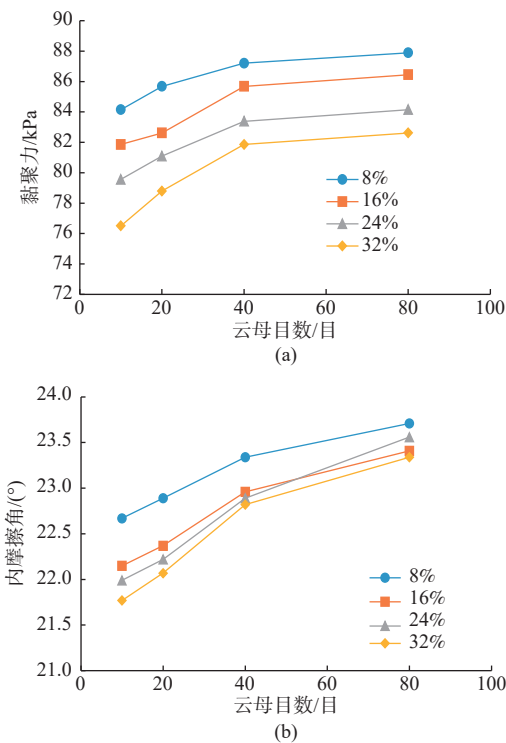


图 7 水泥软黏土 c 、 φ 随云母目数 a 的变化规律

Fig. 7 Variation of cohesion and internal friction angle of the cement soft clay with mica mesh number

进行二元拟合,得到 3 组拟合式。式 (1) 和式 (2) 为云母含量、目数与水泥软黏土无侧限抗压强度、黏聚力的拟合模型,相关系数分别为 0.938 和 0.911,该相关系数表明模型与实际情况拟合较好,用此模型可以反映云母含量、云母目数这 2 个变量对水泥软黏土无侧限抗压强度和黏聚力的影响规律。同样地,式 (3) 为云母含量、目数与水泥软黏土内摩擦角的拟合模型,相关系数为 0.806,对比式 (1) 以及式 (2),拟合模型表现出的相关性弱一些,这一点通过图 7(a) 所呈现的抗压强度 (图 8a)、黏聚力 (图 8b) 以及内摩擦角 (图 8c) 的试验实测值与数据拟合值的对比图也可以反映出来,但是依然可以在一定程度上反映云母含量和目数这 2 组变量与水泥软黏土内摩擦角之间的关系,这 3 组模型可以运用于处理类似土质的工程实践当中。

$$q_u = 1.198 + 0.002\ 117a - 2.708w, R^2 = 0.938 \quad (1)$$

$$c = 86.72 + 0.051\ 67a - 27.70w, R^2 = 0.911 \quad (2)$$

$$\varphi = 22.95 + 0.015\ 5a - 3.364w, R^2 = 0.806 \quad (3)$$

3 云母影响水泥软黏土强度的原因

3.1 云母影响水泥的水解水化作用

水泥的水化水解作用是水泥软黏土强度得到提

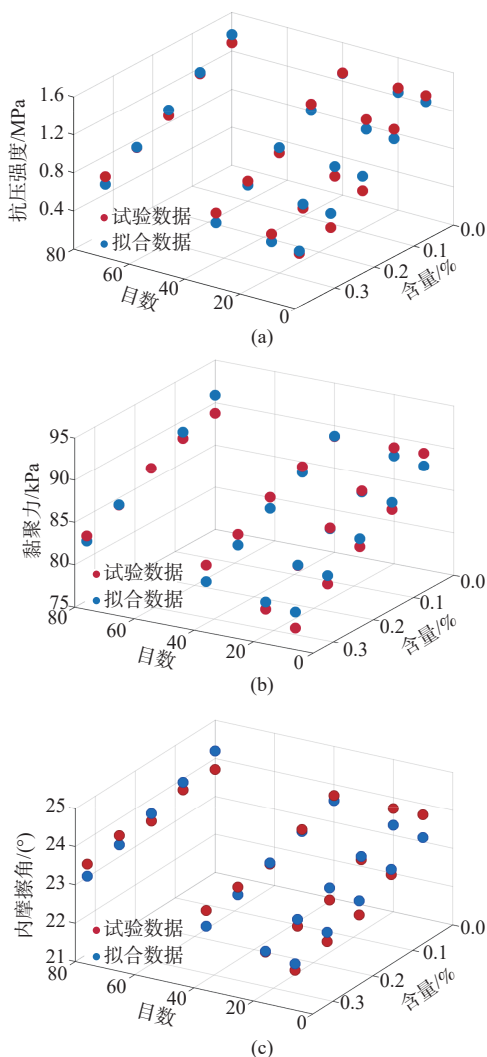


图8 水泥土强度的试验值与拟合值对比

Fig. 8 Comparison between the test values and the fitted values of the soil-cement strength

高的一个重要原因,水泥中的主要熟料矿物 C_2S 、 C_3S 、 C_3A 、 C_4AF 遇水以后会生成 $Ca(OH)_2$ 、介稳状态的水化铝酸钙以及无定形的 $C-S-H$ 凝胶等。随着反应的不进行,生成的水化物逐渐积累,待溶液达到饱和后再生成的水化物无法继续溶解,先是以胶体的形式存在,然后逐渐凝聚成坚硬的块状体,这些块状体充填在土颗粒间孔隙中,形成互相连接的坚硬骨架,这样水泥软黏土的强度便得到了增强^[20]。但是,当含有云母时,云母会抢夺水泥进行水化水解反应所需要的水分,硅酸三钙的水化水解作用提前进入稳定期,水化产物减少,不仅直接影响胶结作用,还不利于后续一系列反应的进行。

3.2 云母影响水泥水化物与黏粒相作用

水泥中的熟料矿物与水发生反应后的部分产物

还会与软黏土中的黏粒相作用。软黏土中存在着大量黏土颗粒,这些颗粒极其细小,具有较大的比表面积和带电性,当与水相遇时将产生复杂的物理化学变化,从而获得胶体分散系的一些特征,其表面带有的 Na^+ 、 K^+ 等离子会与 $Ca(OH)_2$ 中的 Ca^{2+} 发生离子交换作用,形成更大的团粒结构,由此增强水泥软黏土的强度^[21]。但当含有大量云母时,不仅水泥水化水解作用的产物 $Ca(OH)_2$ 会减少,而且软黏土中的黏粒也会更难和水充分接触形成胶体,从而影响到离子交换作用形成更大团粒结构的这个过程,因此水泥软黏土强度的提高就变得十分有限。

3.3 云母的定向排列形成软弱面

云母属层状硅酸盐矿物,表面光滑,可沿节理面发生错裂,常具片状形态(图9)。由于片状形态的云母比表面积很大,所以极易吸附结合水形成较厚的结合水膜,使得颗粒与颗粒之间的接触面积减小,从而造成土颗粒的粒间粘结力变弱。除此之外,高含量大颗粒的云母还很容易定向排列形成软弱面。当云母颗粒和含量较小时,在拌合充分的条件下,云母均匀地分布在水泥软黏土中,这时云母对水泥软黏土强度的影响并不明显。但是随着云母含量和云母粒径的增加,在竖向压力的作用下云母颗粒可能会形成定向排列,出现明显的滑动面(图10),而结合水膜又能起到润滑作用,如此在外力作用时,就很容易沿着软弱面发生破坏,从而导致水泥软黏土的强度降低。

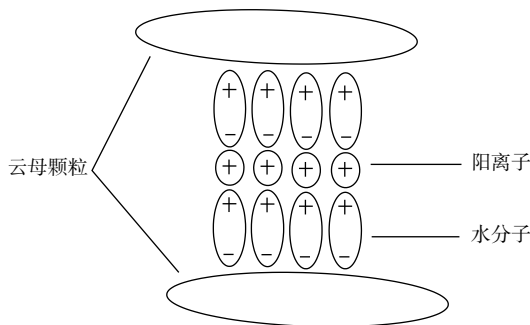


图9 片状云母颗粒间水分子赋存示意图

Fig. 9 Occurrence diagram of water molecules among flake mica particles

4 结论

(1) 云母目数一定,随着云母含量的增大,水泥软黏土的抗剪强度和无侧限抗压强度均降低。云母含量为 32% 的水泥软黏土,其 28 d 龄期的无侧限抗压强度可低至不含云母时的 25.8%,黏聚力可减小 12.24 kPa,内摩擦角影响相对较小,约降低 2° 。

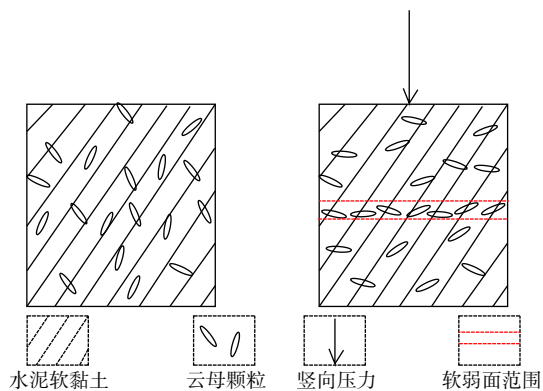


图 10 水泥软黏土中的云母竖向压力作用下的定向排列

Fig. 10 Directional arrangement of mica in cement soil under the vertical force

(2) 云母含量一定, 随着云母目数的减小, 水泥软黏土的抗剪强度和无侧限抗压强度均降低。当云母含量小于 8% 时, 云母目数对无侧限抗压强度的影响非常小。在本文所设定的 2 组自变量变化范围内, 可以将云母含量为 8% 作为云母目数影响水泥软黏土抗压强度的一个临界值。

(3) 云母对水泥软黏土无侧限抗压强度的影响更为显著, 加入 10 目 32% 云母水泥软黏土的无侧限抗压强度降低了 74.2%。

(4) 云母影响水泥软黏土强度的主要原因是云母的存在不利于水泥水解水化反应和离子交换作用的进行, 并且云母自身为片状形态, 大量存在于软黏土中会使得颗粒间的连接力降低, 若定向排列还会形成软弱面从而降低水泥软黏土的强度。

参考文献 (References):

- [1] 赵春彦, 黄启友, 郎锋, 等. 单因素和多因素作用下的水泥土强度评估模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2788 - 2795. [ZHAO Chunyan, HUANG Qiyu, LANG Feng, et al. Experimental study on strength evaluation model of cement soil under single factor and multi factors[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11): 2788 - 2795. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 刘宝臣, 李翠娟, 潘宗源, 等. 水泥搅拌法改良桂林红黏土力学性质试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 633 - 638. [LIU Baochen, LI Cuijuan, PAN Zongyuan, et al. Laboratory test for mechanical properties of Guilin red clay mixed with cement[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 633 - 638. (in Chinese with English abstract)]

- [3] 黄英豪, 朱伟, 张春雷, 等. 固化淤泥重塑土力学性质及其强度来源[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1352 - 1356. [HUANG Yinghao, ZHU Wei, ZHANG Chunlei, et al. Mechanical characteristics and strength source of remolded solidified dredged material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1352 - 1356. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 车东日. 水泥混合上海软弱黏性土性状的试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012. [CHE Dongri. Laboratory investigation on the behavior of cement mixed soft clayey soil of Shanghai[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 袁建议, 潘拥军, 汪春峰, 等. 水泥土搅拌桩力学参数的试验分析[J]. 湖北理工学院学报, 2013, 29(6): 42 - 45. [YUAN Jianyi, PAN Yongjun, WANG Chunfeng, et al. Experimental analysis of mechanical parameters of cement-soil mixing pile[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2013, 29(6): 42 - 45. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李振龙, 潘殿琦, 杨书红, 等. 海相淤泥特性水泥土搅拌桩强度影响因素及其变化规律的试验研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2015, 16(3): 16 - 19. [LI Zhenlong, PAN Dianqi, YANG Shuhong, et al. The test study on influencing factors and changing rules to cement-soil mixing pile strength in marine silt characteristics[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2015, 16(3): 16 - 19. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 陈中学, 李文广, 任涛, 等. 水泥土无侧限抗压强度试验分析[J]. 公路交通技术, 2016, 32(5): 4 - 8. [CHEN Zhongxue, LI Wenguang, REN Tao, et al. Unconfined compressive strength test analysis for cement soil[J]. Technology of Highway and Transport, 2016, 32(5): 4 - 8. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 吴家琦, 侯蕊, 李幻, 等. 水泥改良海相沉积淤泥质软黏土无侧限抗压强度试验研究[J]. 路基工程, 2019(6): 73 - 77. [WU Jiaqi, HOU Rui, LI Huan, et al. Study on cement modified marine sediment silty soft clay by unconfined compressive strength test[J]. Subgrade Engineering, 2019(6): 73 - 77. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 芮凯军, 李俊才, 杨宇, 等. 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, et al. Laboratory tests on properties of cement soil with

- different soils[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2019, 41(2): 173 – 178. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈慧娥, 王清. 有机质对水泥加固软土效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5816 – 5821. [CHEN Hui'e, WANG Qing. Influences of organic matter on the effects of consolidating soft soil with cement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup2): 5816 – 5821. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 邢皓枫, 徐超, 叶观宝, 等. 可溶盐离子对高含盐水泥土强度影响的机理分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 26 – 30. [XING Haofeng, XU Chao, YE Guanbao, et al. Mechanism analysis of influence of soluble salt ions on strength of salt-rich cement-soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 26 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 傅小姝, 王江营, 张贵金, 等. 不同pH值下水泥土力学与渗透特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(8): 1639 – 1646. [FU Xiaoshu, WANG Jiangying, ZHANG Guijin, et al. Experimental study about mechanic and permeability of soil-cement in different pH value[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(8): 1639 – 1646. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 杨爱武, 闫澍旺, 杜东菊, 等. 碱性环境对固化天津海积软土强度影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2930 – 2934. [YANG Aiwu, YAN Shuwang, DU Dongju, et al. Experimental study of alkaline environment effects on the strength of cement soil of Tianjin marine soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2930 – 2934. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 徐金明, 黄亮, 涂齐亮, 等. 使用微观试验确定软土中晶质矿物的类型与含量[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 103 – 110. [XU Jinming, HUANG Liang, TU Qiliang, et al. Determination of types and contents of minerals included in soft soil using microscopic experiments[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1): 103 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 赵云. 宁波软土的热物性和热固结特性研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018. [ZHAO Yun. An investigation on the thermal and thermo-consolidation behaviour of Ningbo soft soil[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李晋骅. 真空预压加固南沙软土过程中排水板淤堵行为试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. [LI Jinhua. Experimental study on clogging behavior of PVD in Nansha soft clay improved by vacuum preloading[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张可能, 王彦之, 胡惠华, 等. 洞庭湖砂纹淤泥质土固结过程微观结构变化[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 96 – 102. [ZHANG Keneng, WANG Yanzhi, HU Huihua, et al. An analysis of microstructure changes in sand grain mucky soil of Dongting Lake during consolidation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1): 96 – 102. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 周晖. 矿物成分对软土强度性质的影响分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(7): 61 – 64. [ZHOU Hui. Analysis of mineral composition impact on soft soil's strength properties[J]. Industrial Construction, 2013, 43(7): 61 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥土配合比设计规程: JGJ/T 233—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for mix proportion design of cement soil: JGJ/T 233—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)]
- [20] 张跃, 袁代国. 水泥土加固机理及不同成因类型软土配合比试验[J]. 化工矿物与加工, 2003, 32(5): 28 – 29. [ZHANG Yue, YUAN Daiguo. Reinforcement mechanism of cemented soil and test of mixture ratio of different types of soft clay[J]. Industrial Minerals and Processing, 2003, 32(5): 28 – 29. (in Chinese)]
- [21] 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 Guojun. Hardening mechanism of cement-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(1): 62 – 68. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞