纤维地聚物改良土配比设计与固化效果试验研究

谷雷雷[1]，王盛年[2]，陈泽玮[2]，苏 俊[2]

（1. 中交一公局集团有限公司，北京 100024；2. 南京工业大学 交通运输工程学院，南京 211816）

摘要：地聚物具有快硬早强、耐久性好等优点，是土体改良的理想固化剂，但纤维地聚物改良土可期工程性能却受控于其合理材料配比设计。以偏高岭土为前驱体、生石灰和硅酸钠为碱激发材料制备地聚物材料，开展不同材料配比下的地聚物改良土力学特性试验研究，探讨地聚物理想材料配比设计，分析地聚物改良土体的最优掺量，明确玄武岩纤维掺量与长度对地聚物改良土性能的影响规律，并综合评价地聚物、纤维对土体的固化效果。结果表明，纤维地聚物改良土力学性能随地聚物掺量、纤维掺量、纤维长度增加呈现先增后减变化，当偏高岭土与碱激发剂掺比为2∶1、碱激发剂中硅酸钠与生石灰掺比为1∶0.8、地聚物在土中总掺比为15%、玄武岩纤维掺量和长度分别为0.4%和12 mm时，纤维地聚物改良土力学改良效果最为理想；固化效果对比试验则表明，纤维地聚物改良土的抗压、抗拉、抗剪强度均优于普通水泥土、石灰土和纯黏土。研究成果可为纤维地聚物改良土应用推广提供参考依据。

关键词：地聚物改良土；玄武岩纤维；力学性能；固化效果

中图分类号：TU443 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2023)09－0167－10

水泥土作为一种砂砾料缺乏地区的建筑材料，具有可就地取材、减少运输、施工方便、价格低廉等优点，已广泛用于地基加固、深基坑支护以及路基基层等工程[1]。然而，普通水泥土强度可调节范围小、水稳性不足，且水泥用量过多可能导致水泥土干缩开裂等缺陷。另外，水泥属高能耗材料，其生产需高温煅烧并排放大量 CO_2，导致环境压力倍增[2]。因此，寻找性能理想且绿色环保的土体改良方法已成为学术界和工程界探讨的热点问题。

地聚物概念最早由法国科学家 J. Davidovits 在20世纪70年代提出，指硅铝酸盐矿物在碱性环境下会形成以 SiO_4、AlO_4 四面体为基本结构、在空间上具有三维网状键接结构的新型绿色胶凝材料，其大部分性能优于普通硅酸盐水泥，特别是快硬早强、耐高温、耐久性、固封金属离子的性能，备受人们关注[3-6]。当前，国内外针对地聚物的研究多集中于材料合成，内容涉及地聚物活性剂与激发剂的种类、材料配比等方面。其中，在地聚物活性剂与激发剂种类研究方面，Davidovits[7]利用氢氧化钠或氢氧化钾与硅酸钠或硅酸钾的组合物，以及氧化钠、氢氧化锂、碳酸钾和它们的组合，开发了单组分地聚物材料；Garcia-Lodeiro 等[8]从成本和可用性出发，发现使用氢氧化钠和硅酸钠可获得与 PC 混凝土相当的强度；Hu 等[9]探讨了 NaOH 溶液浓度和 CaO 含量对粉煤灰基地聚物强度的影响。在地聚物活性剂与激发剂配比方面，Wongkeo 等[10]指出，Na_2SiO_3/NaOH 摩尔比为2时，粉煤灰基地聚物抗压强度可达到 4.4 MPa；Chen 等[11]对碱活化偏高岭土基地聚物研究发现，偏高岭土、NaOH、Na_2SiO_3 和水的最佳摩尔比为 3.4∶1.1∶0.1∶1.0∶1.8；顾海荣等[12]指出，当偏高岭土与碱激发剂配比为2∶1时，地聚物改良土抗压性能最优，同等掺比下，地聚物改良土强度均优于普通硅酸盐水泥土和纯黏土，且随着地聚物掺量增加，破坏模式由塑性剪切破坏向脆性劈裂破坏发展；Guo 等[13]发现，当 SiO_2/Na_2O 摩尔比为1.5时，利用粉煤灰、氢氧化钠和硅酸钠溶液制备的地聚物可获得较高的抗压强度。在地聚物工程性能方面，Zannerni 等[14]用磨细高炉矿渣100%取代水泥所得地聚物混凝土28 d抗压强度达到了36 MPa，该值相比与普通混凝土提高了12%；Ghadir 和 Ranjbar[15]发现，当土中火山灰基地聚物掺

收稿日期：2022-11-21

基金项目：国家自然科学基金(41902282)；江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022605)；南京市科技计划发展项目(202211011)。

作者简介：谷雷雷(1988—)，男，河北保定人，中交一公局集团有限公司，项目总工程师，高级工程师，研究方向为路桥施工技术；王盛年(1987—)，男，甘肃武威人，南京工业大学交通运输工程学院，副教授，工学博士，研究方向为特殊土静动力特性与工程应用；陈泽玮(1998—)，男，江苏南通人，南京工业大学交通运输工程学院，硕士研究生，研究方向为岩土工程；苏俊(1997—)，女，安徽池州人，南京工业大学交通运输工程学院，硕士研究生，研究方向为特殊土资源化再利用。

量为 15 wt%时，试样干湿抗压强度分别达到 12 MPa 和 4 MPa；蔡光华等[16]采用生石灰-粒化高炉矿渣取代 PC 用于土壤改良，结果表明，当生石灰与矿渣之比为 0.15 时，所形成的地聚物改良土峰值强度是相同条件下 PC 稳定土的 1.4 倍；刘雨姗等[17]发现，玄武岩纤维橡胶混凝土相比普通混凝土拥有更好的性能，且当橡胶颗粒取代率为 5%，玄武岩纤维掺量为 4 kg/m^3，粉煤灰掺量为 15%时，混凝土各项性能最佳；Kinuthia 和 Oti[18]则指出，采用石灰活化粒化高炉矿渣可使地聚物改良土获得更为显著的强度提升。因此，采用地聚物改良土体应该能获得可期工程性能。然而，地聚物优良性能并不是地聚物原材料（偏高岭土、粉煤灰、矿渣等）所固有的，而是通过合理地设计原材料与碱激发剂之间的配比以及正确的加工工艺来获得。但相关研究却依旧有待深入[19]。

工程实践表明，尽管无机改良土可获得较为理想的抗压、抗剪强度，但其同样存在韧性不足、抗拉强度低的问题。为此，科研人员选择在改良土中掺入纤维以改善其韧性和抗拉性能。Their 和 Ozakca[20]制备了掺入 2%纳米二氧化硅和 1%钢纤维的地聚物混凝土，其 28 d 和 90 d 抗压强度分别高达 28.23 MPa 和 36.62 MPa；Al-mashhadani 等[21]对 3 种不同纤维（钢纤维、聚丙烯纤维和聚乙烯醇纤维）增强粉煤灰基地聚物砂浆力学性能和微观结构进行试验研究发现，纤维的加入有效改善了土-地聚物复合材料的强度特性，如钢纤维和聚乙烯醇纤维的存在使复合材料抗弯强度分别提高了 31.45%和 39.84%；Mohseni 等[22]研究了含 0.3、0.5 和 1.0%聚丙烯纤维的偏高岭土基地聚物改良土，结果表明，在地聚物中加入 1%聚丙烯纤维，可使地聚物抗折强度提高 28%。显然，纤维的掺入可有效改良材料抗弯、抗拉性能。然而，同样地，纤维加筋作用虽可起到提高材料整体性能的目的，但其性能却同样受纤维掺比、长度影响显著。若采用纤维进一步改善地聚物改良土工程性能，上述问题同样有待进一步探讨。

考虑到实际应用中，NaOH 运输与储存存在困难，因此，采用生石灰和硅酸钠营造碱激发环境（$Na_2SiO_3+CaO+H_2O=CaSiO_3\downarrow+2NaOH$），以干混方式制备偏高岭土基地聚物材料，开展不同材料配比下的地聚物改良土力学特性试验研究，探讨地聚物理想材料配比设计，分析地聚物改良土体的最优掺量，并进一步探讨玄武岩纤维掺量与长度对地聚物改良土性能的影响规律，综合评价地聚物、纤维对土体的固化效果。

1　试验材料

1.1　试验用土

试验所用土取自江苏省南京市南京工业大学江浦校区某地黄褐色黏土，其原状土基本物理力学指标见表 1。黏土的级配曲线如图 1 所示。

表 1　土的基本物理参数

密度比重/（g·cm^{-3}）	液限/%	塑限/%	塑性指数	最优含水率/%	最大干密度/（g·cm^{-3}）
2.69	34	18	16	12	1.7

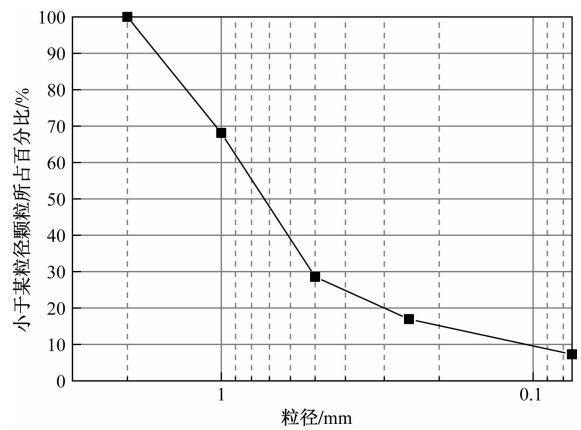


图 1　黏土级配曲线

1.2　偏高岭土

如图 2 所示，试验所用活性材料为河北省盛运矿业生产的白色粉末状偏高岭土，其型号为 AS2-1250 目，化学成分见表 2。

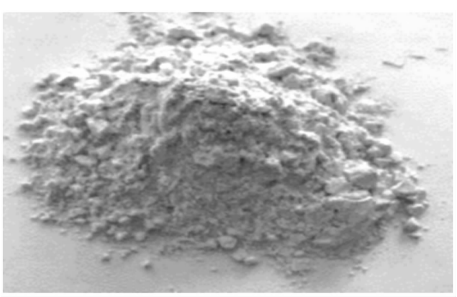


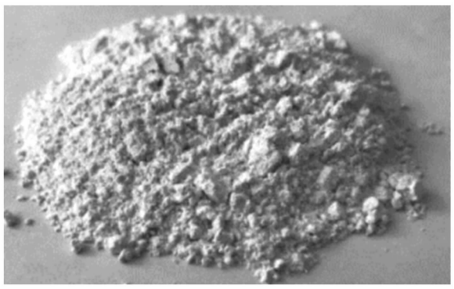
图 2　偏高岭土材料

表 2　偏高岭土化学成分

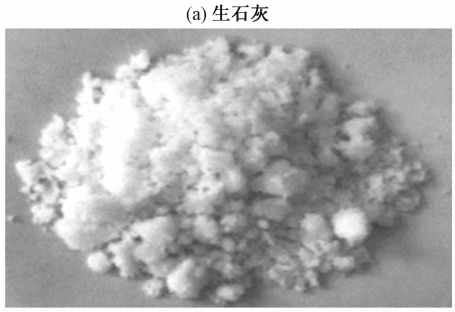
化学成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2
占比/%	57.16	37.7	1.28	0.13	0.09	0.55	0.01	0.01	3.06

1.3　碱激发剂

采用生石灰（CaO）和硅酸钠（Na_2SiO_3）作为碱激发材料，如图 3 所示，均来源于南京工业大学化工学院实验室，纯度均为化学纯。其中，硅酸钠为白色至灰白色粉末状细颗粒，生石灰为粉末状细颗粒，试验用水为普通自来水。



(a) 生石灰



(b) 硅酸钠

图 3　碱激发材料

1.4　玄武岩纤维

玄武岩纤维为上海臣启化工科技有限公司生产制造,呈褐色且有金属光泽,其规格分别为 3、12、18 mm,如图 4 所示,性能参数见表 3。

图 4　玄武岩纤维

表 3　玄武岩纤维的性能指标

指标	要求
纤维类型	束状单丝
单丝直径/μm	13
密度/(kg·m^{-3})	2 650
抗拉强度/MPa	≥2 000
弹性模量/GPa	90～110
极限延伸率/%	3.5
耐酸碱性	≥99%
熔点/℃	1 250

2　试验方案与试样制备

2.1　试验方案

本研究核心目的是在常温弱碱条件下实现地聚物活性材料的稳定激发,并研究玄武岩纤维对地聚物改良土力学性能的影响。试验分 4 部分开展。第一部分涉及活性材料(偏高岭土)与碱激发剂(生石灰和硅酸钠混合物)之间的配比关系研究;第二部分探讨偏高岭土基地聚物在土中的最优掺比;第三部分是在偏高岭土基地聚物改良土最优配比基础上,掺入不同长度、掺量玄武岩纤维,研究进一步提高改良土性能的方案;第四部分则是通过纤维地聚物改良土、纯黏土、水泥土和石灰土的无侧限抗压强度、抗劈裂强度、直剪强度进行平行对比试验,综合评价其固化效果。

2.1.1　激发配比试验

将活性剂偏高岭土(Mk)掺量固定不变,并假定活性剂与碱激发剂(Aa)掺量之比为 2∶1。通过改变激发剂中硅酸钠和生石灰的相对掺量寻求激发剂最优配比,试验方案见表 4。室内 7 d 抗压强度试验采用直径 100 mm×高度 200 mm 圆柱样。试样制备时,水灰比按 0.35 考虑,每组 3 个试样,共计 24 个试样。试验采用 YYW-Ⅱ型无侧限抗压仪,试验过程中应变速率控制在 1.0 mm/min,记录每个试样破坏时的最大压力。

将碱激发剂掺量固定不变,采用上述试验所得激发剂最优配比,通过活性剂与碱激发剂的相对掺量寻求活性剂与碱激发剂最优掺比,试验方案见表 5。同上,按水灰比 0.35 制备直径 100 mm×高度 200 mm 圆柱样,开展室内 7 d 抗压强度试验,每组 3 个试样,共计 18 个试样。试验步骤同上。

表 4　试验方案 1

试样编号	Mk∶Aa	Na_2SiO_3∶Cao
1	2∶1	1∶0.60
2	2∶1	1∶0.72
3	2∶1	1∶0.75
4	2∶1	1∶0.80
5	2∶1	1∶0.82
6	2∶1	1∶0.83
7	2∶1	1∶0.84
8	2∶1	1∶0.85

表 5　试验方案 2

试样编号	Mk∶Aa	Na_2SiO_3∶Cao
9	2∶0.6	1∶0.8
10	2∶0.8	1∶0.8
11	2∶1.0	1∶0.8
12	2∶1.2	1∶0.8
13	2∶1.4	1∶0.8
14	2∶1.6	1∶0.8

2.1.2　偏高岭土基地聚物改良土配比试验

根据激发配比试验所得活性材料与碱激发剂

掺比，以干混方式制备地聚物材料（即偏高岭土、生石灰、硅酸钠的粉状混合物）。参考 Zhang 等[23]试验成果，按《水泥土配合比设计规范》（JGJ/T 233—2011），制备不同的地聚物材料掺入比改良土试样，开展室内 7 d 无侧限抗压强度试验，试验方案见表 6，每组 3 个试样，共计 18 个试样。

表 6　试验方案 3

试样编号	15	16	17	18	19	20
地聚物掺量/%	10	12	14	15	16	18

2.1.3　纤维地聚物改良土配比试验

根据激发配比试验与偏高岭土基地聚物改良土配比试验所得出最优材料配比，首先制备玄武岩纤维长度规格不变、掺量变化下的纤维地聚物改良土试样，开展室内 7 d 无侧限抗压强度试验，以确定最佳纤维掺量，试验方案见表 7，每组 3 个试样，共计 15 个试样。在上述基础上，制备玄武岩纤维掺量不变、长度变化下的纤维地聚物改良土试样，开展室内 7 d 无侧限抗压强度试验，探求力学性能最佳纤维地聚物改良土配比，试验方案见表 8，每组 3 个试样，共计 15 个试样。

表 7　试验方案 4

试样编号	21	22	23	24	25
掺量/%	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
长度/mm	12				

表 8　试验方案 5

试样编号	26	27	28	29	30	31
长度/mm	3	6	9	12	15	18
掺量/%	0.4					

2.1.4　力学特性对比分析

分别对纤维地聚物改良土（偏高岭土 10%、碱激发剂 5%、纤维 0.4%、纤维长度为 12 mm）、普通硅酸盐水泥土（普通硅酸盐水泥掺量为 15%）、石灰土（生石灰掺量为 15%）以及纯黏土进行 7 d 无侧限抗压、直接剪切以及巴西劈裂试验，每组 3 个试样，对比评价 4 者在抗压、抗剪、抗劈裂强度方面的优劣，进而评价纤维地聚物对土体的固化效果。

2.2　试样制备

2.2.1　碱激发试验试样制备

按设计配比称取偏高岭土、生石灰、硅酸钠和水，称量误差为不超过设计重量值±1%。将生石灰、硅酸钠和偏高岭土加入搅拌设备盘中，充分搅拌均匀（图 5）。按计算所需水量，将水加入并迅速搅拌均匀，静置 2 min。在模具内部涂抹凡士林并用保鲜膜进行包裹（目的是为了方便拆样时保持试样完整性），将搅拌均匀碱激发胶凝材料装入 100 mm×200 mm 的标准模具中进行充分压实。制样结束后，将试样编号并放入恒温恒湿养护箱静置 24 h 后拆模，养护至龄期达到 7 d 取出。利用 YYW-Ⅱ型无侧限抗压仪进行无侧限抗压强度试验。

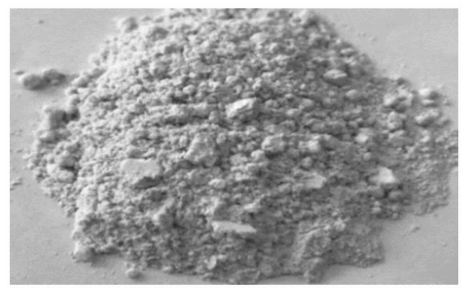


图 5　碱激发胶凝材料

2.2.2　地聚物改良土试样制备

将 105 ℃烘箱中持续烘干 24 h 的纯黏土，碾压磨碎，过 2 mm 筛。按已设计配比分别称取每组的偏高岭土、生石灰和硅酸钠，称量误差为不超过设计重量值±1%。将生石灰、硅酸钠和偏高岭土加入搅拌设备盘中，进行干拌混合至均匀。待使用时按照计算出的纯黏土和需水量，将黏土加入地聚物胶凝材料中搅拌均匀，随后加入水并迅速搅拌均匀，静置 2 min。在模具内部涂抹凡士林并用保鲜膜进行包裹，将搅拌均匀的地聚物混合物料装入 39.1 mm×80 mm 的标准模具中，分 4 层压实且每层均匀压实至指定高度。制样结束后，将试样编号并放入恒温恒湿养护箱静置 24 h 后拆模（图 6），养护至龄期达到 7 d 取出。利用 YYW-Ⅱ型无侧限抗压仪进行无侧限抗压强度试验。

图 6　偏高岭土基地聚物改良土

2.2.3　纤维地聚物改良土试样制备

制备方法总体同 2.2.2 节所述，不同之处在于

将生石灰、硅酸钠、玄武岩纤维和活性材料偏高岭土进行干拌混合,使玄武岩纤维均匀分布于地聚物胶凝材料中,待使用时直接加入黏土与水搅拌均匀即可。将搅拌均匀的纤维地聚物混合物分别装入39.1 mm×80 mm的标准模具和61.8 mm×20 mm的环刀模具中进行充分压实,制样完成后,将试样编号并放入恒温恒湿养护箱静置24 h后拆模,养护至龄期达到7 d取出,开展试验测试。

3 试验结果与分析

3.1 地聚物材料配比试验

活性剂与激发剂配比试样7 d无侧限抗压强度试验结果见表9,可知,不同偏高岭土和碱激发剂掺量下的试样抗压强度值均呈现先增后减趋势,其中,最大抗压强度平均值可达630.8 kPa。

表9 无侧限抗压强度试验结果

试样编号	无侧限抗压强度/kPa			平均值/kPa
	第1次	第2次	第3次	
1	265.9	276.7	280.2	274.3
2	433.1	444.3	439.1	438.8
3	459.6	496.5	524.9	493.7
4	584.0	576.0	568.0	576.0
5	604.6	597.8	690.0	630.8
6	556.7	556.7	573.4	562.3
7	558.2	548.5	538.9	548.5
8	526.7	556.6	562.4	548.5
9	255.3	262.5	305.1	274.3
10	287.8	301.7	315.6	301.7
11	557.2	606.5	564.2	576.0
12	212.5	218.7	227.0	219.4
13	74.0	86.4	86.5	82.3
14	50.0	43.5	71.1	54.9

图7为不同偏高岭土和碱激发剂掺量下的试样单轴无侧限抗压强度曲线。由图7(a)可知,随硅酸钠和生石灰掺量比减小,试样单轴抗压强度先增后减。这是由于当硅酸钠含量越多,碱含量越高,硅铝酸盐解聚速度大于聚合速度,从而影响地聚物大分子的形成,导致试样强度不增反降;随着硅酸钠掺量降低,生石灰掺量增大,碱含量降低,原料中的硅铝酸盐解聚及聚合速度都随之降低,加之生石灰水化形成的氢氧化钙会导致干缩开裂问题,从而最终导致试样强度不高。尽管试样峰值强度在硅酸钠与生石灰掺量比为1∶0.82时取得了最大值,但硅酸钠与生石灰掺量比为1∶0.80时同样已靠近峰值,且更具经济性、便于计算,因此,综合考虑,认为硅酸钠与生石灰最优掺比为1∶0.80。由图7(b)可知,随偏高岭土与碱激发剂掺量之比减小,试样单轴抗压强度呈现抛物线型变化,当偏高岭土掺量恰为碱激发剂2倍时,偏高岭土激发地聚物改良土抗压强度达到峰值状态。这是由于当碱激发剂掺量过低时,土体碱性不足,导致偏高岭土解聚速度小,地聚物形成速度慢,大部分活性剂并没有参与反应,从而导致试样强度低;当碱激发剂掺量过高时,偏高岭土中硅铝酸盐解聚成$[SiO4]^{4-}$、$[AlO4]^{5-}$单体的速度与聚合反应速度不匹配,将导致地聚物大分子形成受阻,强度因此降低。综上,偏高岭土基地聚物改良土中活性材料与碱激发剂最佳配比为2∶1。

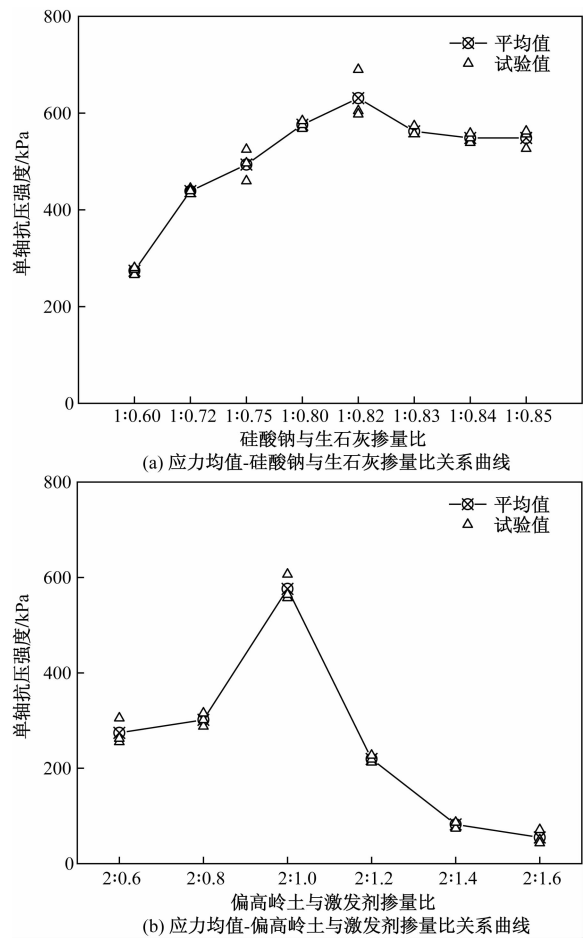


图7 不同偏高岭土和碱激发剂掺量下试样单轴无侧限抗压强度曲线

3.2 地聚物材料土中掺比

偏高岭土基地聚物改良土试样7 d无侧限抗压强度试验结果见表10。由表10可知,随着地聚物材料掺量增加,试样单轴无侧限抗压强度值呈现先增大后减小趋势,最大抗压强度平均值可达286.8 kPa。图8所示为活性材料(偏高岭土)与碱激发剂(生石灰和硅酸钠混合物)为2∶1时不同地聚物材料掺量下的改良土无侧限抗压强度曲线。

表 10　无侧限抗压强度试验结果

试样编号	无侧限抗压强度/kPa			平均值/kPa
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	
15	183.3	185.4	166.7	178.5
16	222.9	227.1	210.4	220.1
17	256.2	260.4	245.8	254.1
18	291.6	306.2	262.5	286.8
19	231.2	239.6	243.7	238.2
20	227.1	237.5	233.3	232.6

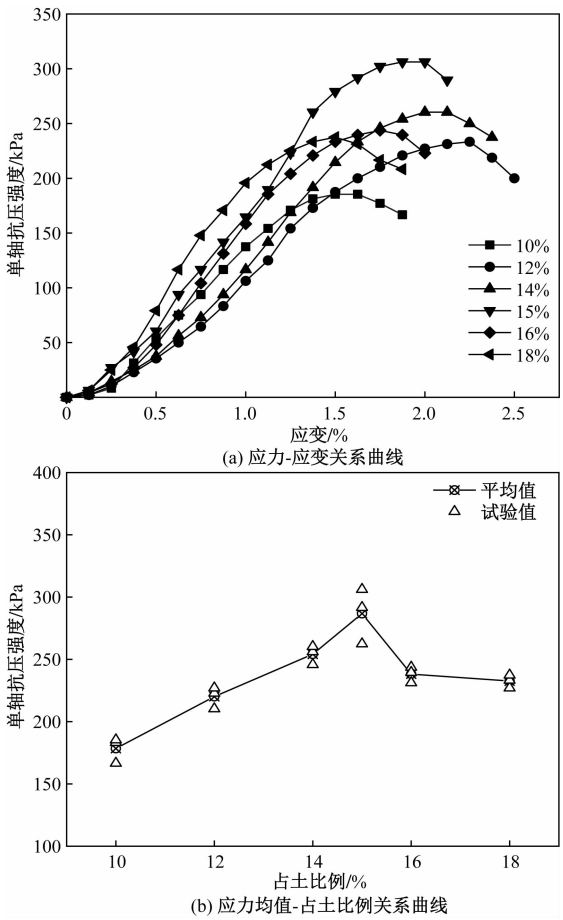


图 8　不同地聚物掺量下改良土无侧限抗压强度曲线

从图 8(a)可知，随着地聚物掺量增加，曲线切线弹性模量同样随之增长，亦即刚度越好。随着地聚物水泥掺量接近 15%，峰后曲线逐渐变陡，改良土峰后软化特征减弱、脆性增强。从图 8(b)可知，地聚物改良土抗压强度在地聚物掺量在 15%时取得最大值。当地聚物材料掺量小于 15%时，改良土无侧限抗压强度随地聚物掺量增加而增大。这可能是由于偏高岭土在碱激发剂作用下表面不断析出硅氧四面体和铝氧四面体，并发生聚合反应形成了空间网络结构。随着地聚物材料掺量进一步增加，形成的空间网络结构更加致密稳定，松散土体开始成为一个整体，地聚物不断填充原有颗粒之间孔隙，造成试样密实度不断提升、颗粒接触更强，从而逐渐提高了改良土强度。然而，当地聚物材料掺量大于 15%后，改良土无侧限抗压强度随地聚物掺量增加而减小[24]。这应该是当地聚物掺量过多后，改良土中硅酸钠与生石灰相对含量增大，这会导致水化硅酸钙出现早期沉积，阻碍地聚物解聚反应，而且增加的生石灰还会与空气中的 CO_2 生成碳酸盐，在试样内部形成气孔，颗粒间胶结接触减弱，阻碍结构的形成，导致试样抗压强度降低[25]。因此，本文改良土最优偏高岭土基地聚物掺量为 15%。

3.3　纤维地聚物改良土最优配比

纤维地聚物改良土试样 7 d 无侧限抗压强度试验结果见表 11。由表 11 可知，不同玄武岩纤维掺量、长度下的试样无侧限抗压强度值均呈现先增大后减小趋势，其最大抗压强度平均值可达 931.2 kPa。

表 11　无侧限抗压强度试验结果

试样编号	无侧限抗压强度/kPa			平均值/kPa
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	
21	808.3	829.1	814.5	817.3
22	914.5	939.5	918.7	924.2
23	927.0	943.7	922.8	931.2
24	810.3	843.7	812.4	822.1
25	783.3	812.4	841.6	812.4
26	672.9	658.3	674.9	668.7
27	687.4	708.3	693.7	696.5
28	716.6	749.9	789.5	752.0
29	927.0	943.7	922.8	931.2
30	904.1	895.8	902.0	900.6
31	770.8	829.1	749.9	783.3

图 9 所示为不同玄武岩纤维掺量和长度下的试样单轴无侧限抗压强度曲线。从图 9 可知，随着玄武岩纤维的掺量和长度增加，试样的单轴抗压强度先增大后减小。主要原因如下：

1)纤维地聚物改良土硬化后，改良土会将纤维牢牢包裹住，在两者相接触的界面上会产生摩擦力，纤维在土体中的随机分布，又会使土体整体性增强。同时，由于玄武岩纤维本身相较改良土是一种抗拉强度较高材料，改良土中掺入玄武岩纤维后，嵌固在土中的纤维将开始分担土体所承受的应力，有效抑制了土体中裂隙的发育并限制土样变形，土体韧性得到增强，由脆性破坏转变为塑性破坏，从而使得土体抗拉强度和抗压强度得到一定的提升。

2)当纤维长度和掺量过低时，纤维和土体颗粒搭接不紧密，难以发挥纤维的加筋作用。随着纤维长度和掺量增加，纤维比表面积提升给土体和纤维

间提供了更大的界面相互作用,力学性能因此得以改善。然而,当纤维长度和掺量过高时,纤维拌合过程易出现聚集和结团现象,不利于改良土拌合与成型,影响土体强度形成;同时,由于土体中均匀分散的纤维只是所掺加纤维中的很小一部分,大部分的纤维凝结成团,且土体中"大块"的凝结成团纤维占有较大体积,使土颗粒间距增大,土颗粒间连接力减弱,导致土样受荷变形过程中,凝结成团纤维与土颗粒间摩擦力小于土颗粒与土颗粒间的摩擦力和黏结力之和。因此,过多同向分布纤维束会阻碍基体间摩擦从而致使试样强度减小。

根据上述试验成果,当玄武岩纤维掺量为0.4%、纤维长度为12 mm时,纤维地聚物改良土单轴抗压强度增长明显且达到峰值状态,也即该值为纤维地聚物改良土的最佳工艺参数。

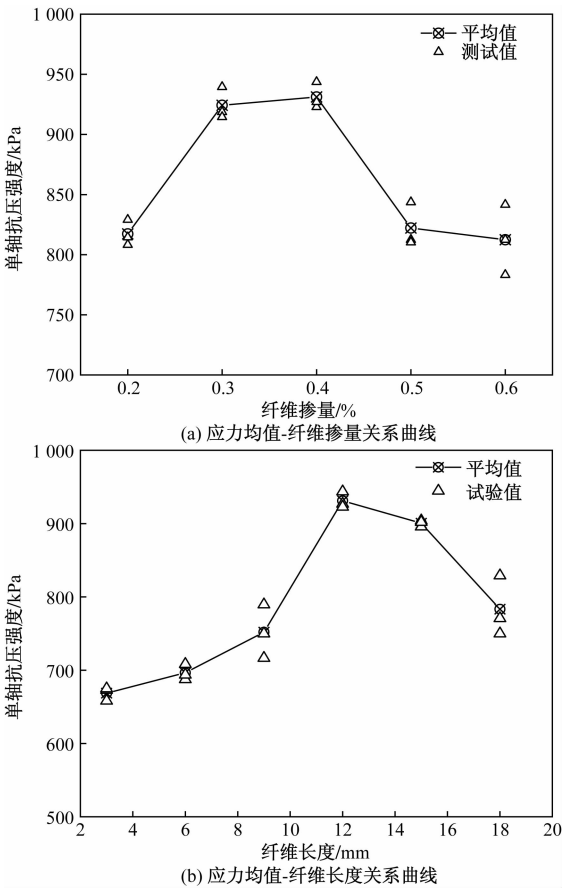


图9　纤维地聚物改良土无侧限抗压强度曲线

4　固化效果评价

4.1　抗压性能

分别对纤维地聚物改良土(地聚物胶凝材料15%、玄武岩纤维掺量0.4%、长度12 mm)、普通水泥土(硅酸盐水泥15%)、石灰土(石灰掺量15%)和纯黏土进行无侧限抗压强度测试,所得应力-应变曲线关系如图10所示。由图10可知,纤维地聚物改良土、普通水泥土、纯黏土和石灰土峰值强度依此减小,且均存在应变软化现象。纤维地聚物改良土强度分别约为普通硅酸盐水泥土的1.16倍、石灰土的34.84倍,以及黏土的5.45倍(表12)。由于纤维改良土在无侧限加载过程中,土样的变形使得纤维与土体接触面相互作用,纤维体中产生拉应力,纤维对土颗粒的反作用力与土体变形或土颗粒移动方向相反,从而有效抑制土颗粒的移动和土体变形,因而,使得土体抗压强度得到了提高。

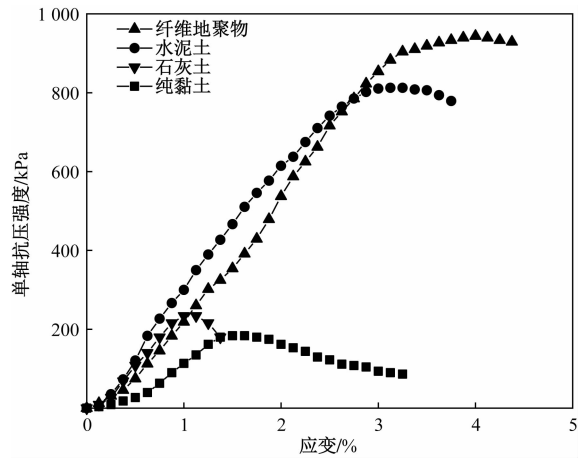


图10　不同类型土应力-应变关系曲线

表12　不同类型土无侧限强度

土的类型	无侧限抗压强度/kPa			平均值/kPa
	第1次	第2次	第3次	
黏土	172.9	183.6	180.0	178.8
石灰土	198.0	234.0	207.0	213.0
普通水泥土	783.3	810.3	812.4	802.0
纤维地聚物改良土	927.0	943.7	922.8	931.2

4.2　抗拉性能

分别对纤维地聚物改良土(地聚物胶凝材料15%、玄武岩纤维掺量0.4%、长度12 mm)、普通水泥土(硅酸盐水泥15%)、石灰土(石灰掺量15%)和纯黏土进行巴西劈裂测试,所得应力-应变曲线关系如图11所示。可知,纤维地聚物改良土、普通水泥土、石灰土和纯黏土的抗拉强度均随应变发展呈先增后减变化。其中,纤维地聚物水泥土抗拉强度达到579.1 kPa,高于普通硅酸盐水泥土抗拉强度,更远高于纯黏土和石灰土抗拉强度。另外,由于石灰土本身干缩开裂显著,加之试验养护龄期较短,土颗粒间胶结结构形成有限,因此其抗拉强度反而远低于纯黏土。

表13为不同类型土的抗劈裂强度。由表13可

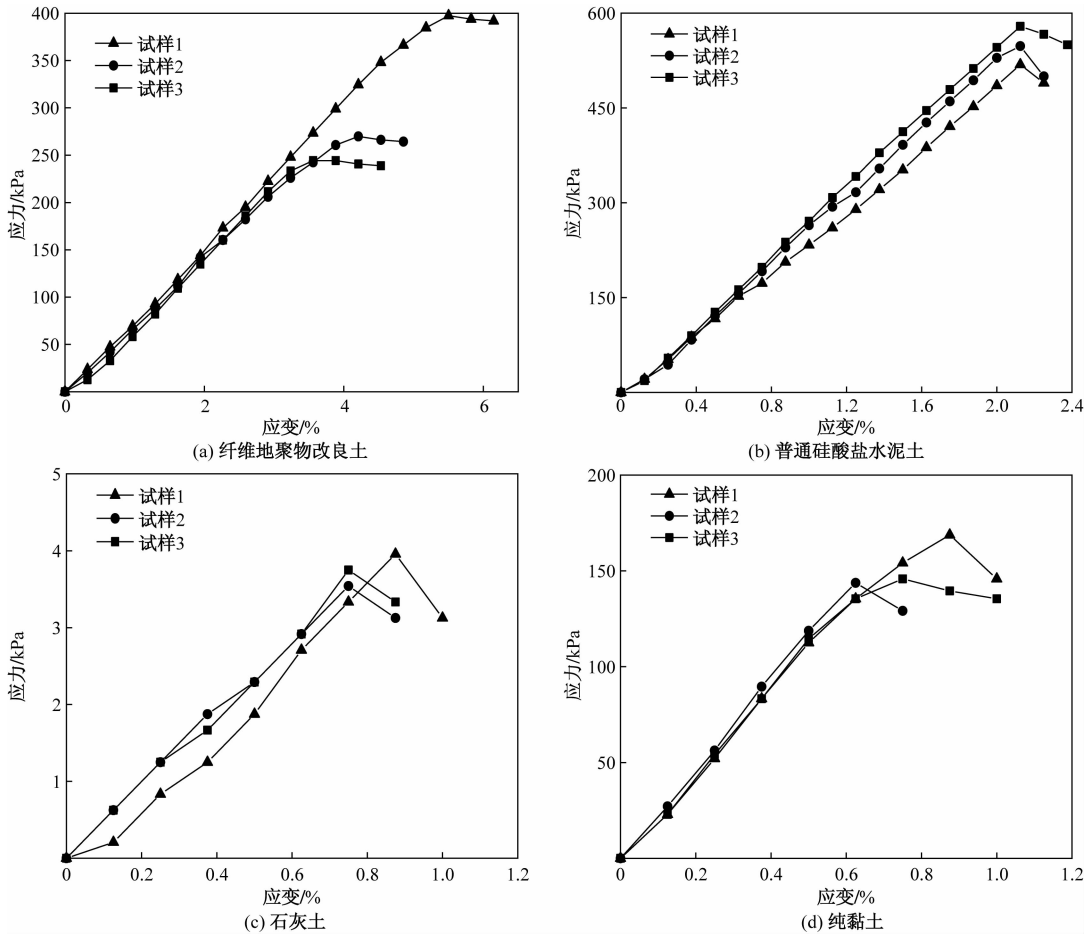


图 11　不同类型土应力-应变关系曲线

知，纤维地聚物改良土抗劈裂强度约为普通硅酸盐水泥土（硅酸盐水泥 15%）的 1.24 倍、石灰土（石灰掺量 15%）的 148.27 倍、黏土的 3.59 倍。这是因为玄武岩纤维本身具有较高抗拉能力，当改良土中掺入玄武岩纤维后，嵌固在土中的纤维开始承担土体所承受的拉应力，从而抑制了土体裂隙的发育并限制了土样变形，土体延性得到增强，改良土抗干缩、抗变形和破坏的能力因此得以改善，弥补了改良土脆性大、延续差的缺点。纤维地聚物改良土在坚固性、稳定性及耐久性方面，因此具有更优势。

表 13　不同类型土抗劈裂强度

土的类型	抗劈裂强度/kPa			平均值/kPa
黏土	168.7	143.7	145.8	152.8
石灰土	4.0	3.5	3.7	3.7
普通水泥土	454.1	439.5	433.3	442.3
纤维地聚物改良土	518.7	547.9	579.1	548.6

4.3　抗剪性能

分别对纤维地聚物改良土（偏高岭土 10%、碱激发剂 5%、纤维 0.4%、纤维长度 12 mm）、普通硅酸盐水泥土（水泥掺量为 15%）、石灰土（生石灰掺量为 15%）及纯黏土进行直接剪切试验，图 12 显示了 50、100、200 kPa 正应力下的应力-应变曲线。表 14 所示为不同类型土的抗剪切强度值。由表可知，纯黏土具有最低的内摩擦角，石灰土具有最小的黏聚力，而普通水泥土具有最大的黏聚力，纤维地聚物改良土则具有最高的内摩擦角。这是因为地聚物胶凝材料的掺入，会形成致密稳定的三维网络结构，土体中原有的松散体系形成一个整体，胶结物质填充了原有颗粒之间的孔隙，造成试样的孔隙面积比减小，土体的黏聚力与内摩擦角均得到较大提升；玄武岩纤维本身是一种弹塑性材料，剪切面上纤维密度越大，对剪应力的分担能力就越强，整体抗剪强度得到提升。

表 14　50、100、200 kPa 正应力下不同类型土抗剪切强度

土的类型	峰值剪应力/kPa			抗剪强度	
	50	100	200	c/kPa	φ/(°)
黏土	127.6	136.7	200.5	95.7	26.9
石灰土	51.0	82.0	136.7	23.7	29.6
普通水泥土	262.5	280.7	408.4	198.7	45.4
纤维地聚物改良土	244.3	269.8	397.4	180.5	46.6

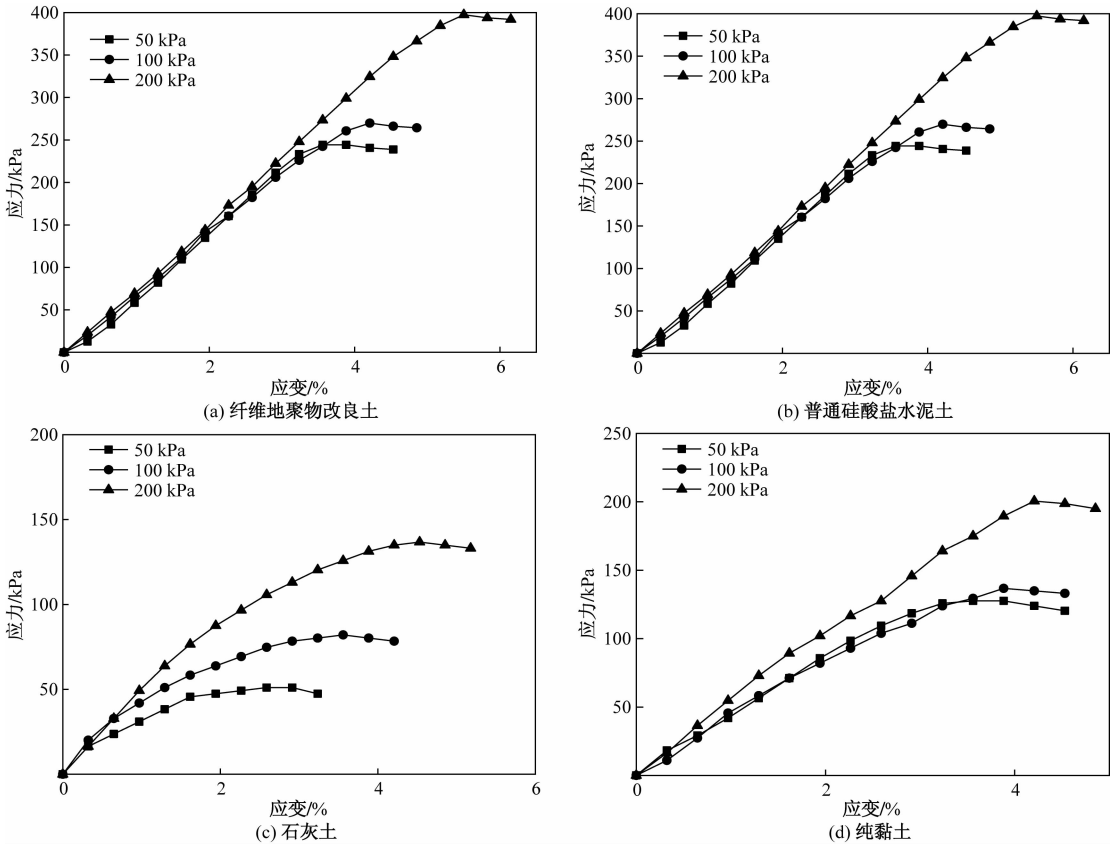


图 12　不同类型土在 50、100、200 kPa 正应力下的应力-应变关系曲线

5　结论

通过对不同材料配比纤维地聚物改良土开展无侧限抗压强度试验,研究了其最优材料配比设计,探讨了地聚物、纤维对土体力学特性的影响,同时,通过抗压、抗拉、抗剪强度试验对比评价了纤维地聚物改良土的固化效果,得到以下主要结论:

1)地聚物材料中偏高岭土和碱激发剂的最优配比为 2∶1,激发剂中硅酸钠与生石灰最优掺比为 1∶0.8,地聚物在土体改良中的最优掺入比为 15%。

2)玄武岩纤维掺量和长度增加使纤维地聚物改良土无侧限强度呈先升高后降低变化,其最优玄武岩纤维掺量和长度分别为 0.4%和 12 mm。

3)纤维地聚物改良土抗压、抗拉、抗剪强度均优于普通水泥土、石灰土和纯黏土。

4)研究成果可为纤维地聚物改良土的应用推广提供参考依据。

参考文献

[1] KARIYAWASAM K K G K, JAYASINGHE C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material[J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 519-527.

[2] MA C, AWANG A Z, OMAR W. Structural and material performance of geopolymer concrete: a review[J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 90-102.

[3] SINGH B, ISHWARYA G, GUPTA M, et al. Geopolymer concrete: a review of some recent developments[J]. Construction and Building Materials, 2015, 85: 78-90.

[4] SAMARAKOON M H, RANJITH P G, RATHNAWEERA T D, et al. Recent advances in alkaline cement binders: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 227: 70-87.

[5] 赵燕茹,张建新,白建文,等. 偏高岭土混凝土抗冻性能及寿命预测[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1160-1165.

[6] 王林浩. 偏高岭土对水泥土应力-应变特性影响分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(13): 244-247.

[7] DAVIDOVITS J. Geopolymers and geopolymeric materials[J]. Journal of Thermal Analysis, 1989, 35(2): 429-441.

[8] GARCIA-LODEIRO I, PALOMO A, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A. Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes[M]. Oxford: Woodhead Publishing, 2015: 19-47.

[9] HU M, ZHU X, LONG F. Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(10): 762-768.

[10] WONGKEO W, SEEKAEW S, KAEWRAHAN O. Prop-

erties of high calcium fly ash geopolymer lightweight concrete[J]. Materials Today,2019,17:1423-1430.

[11] CHEN L,WANG Z,WANG Y,et al. Preparation and properties of alkali activated metakaolin-based geopolymer[J]. Materials,2016,9(9):767.

[12] 顾海荣,张鹏,王盛年,等. 偏高岭土基地聚物改良土最优配比及固化效果分析[J]. 科学技术与工程,2022,22(17):7089-7098.

[13] GUO X,SHI H,CHEN L,et al. Alkali-activated complex binders from class C fly ash and Ca-containing admixtures[J]. Journal of Hazardous Materials,2010,173(1-3):480-486.

[14] ZANNERNI G M,FATTAH K P,AL-TAMIMI A K. Ambient-cured geopolymer concrete with single alkali activator[J]. Sustainable Materials and Technologies,2020,23:e00131.

[15] GHADIR P,RANJBAR N. Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement[J]. Construction and Building Materials,2018,188:361-371.

[16] 蔡光华,周伊帆,潘智生,等. 生石灰激发 GGBS 固化高含水率香港海相沉积物的物理力学性质研究[J]. 岩土力学,2022,43(2):327-336.

[17] 刘雨姗,庞建勇,王婷雅. 玄武岩纤维粉煤灰橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. 科学技术与工程,2019,19(14):315-319.

[18] KINUTHIA J M,OTI J E. Designed non-fired clay mixes for sustainable and low carbon use[J]. Applied Clay Science,2012,59-60:131-139.

[19] DUXSON P,FERNANDEZ-JIMENEZ A,PROVIS J L,et al. Geopolymer technology:the current state of the art[J]. Journal of Materials Science,2007,42(9):2917-2933.

[20] THEIR J M,OZAKCA M. Developing geopolymer concrete by using cold-bonded fly ash aggregate,nano-silica,and steel fiber[J]. Construction and Building Materials,2018,180:12-22.

[21] AL-MASHHADANI M M,CANPOLAT O,AYGORMEZ Y,et al. Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites[J]. Construction and Building Materials,2018,167:505-513.

[22] MOHSENI E,KHOTBEHSARA M M,NASERI F,et al. Polypropylene fiber reinforced cement mortars containing rice husk ash and nano-alumina[J]. Construction and Building Materials,2016,111:429-439.

[23] ZHANG M,GUO H,EL-KORCHI T,et al. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer[J]. Construction and Building Materials,2013,47:1468-1478.

[24] 王盛年,高新群,吴志坚,等. 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透特性试验研究[J]. 岩土力学,2022,43(11):3003-3014.

[25] WANG S,XUE Q,ZHU Y,et al. Experimental study on material ratio and strength performance of geopolymer-improved soil[J]. Construction and Building Materials,2021,267:120469.

Experimental Study on Material Proportioning Design and Stabilization Effect of Fiber-reinforced and Geopolymer-stabilized Soils

GU Leilei[1], WANG Shengnian[2], CHEN Zewei[2], SU Jun[2]

(1. CCCC First Highway Engineering Bureau Co.,Ltd.,Beijing 100024,China;
2. College of Transportation Science & Engineering,Nanjing Tech University,Nanjing 211816,China)

Abstract: Geopolymer has the advantages of fast hardening, early strength, and good durability, and it is an ideal agent for soil improvement. However, their reasonable material ratio design significantly controls the expected engineering performance of geopolymer improved soil. Taking metakaolin as the precursor for preparing geopolymer materials, in which the quicklime and sodium silicate was selected as the alkali excitation materials. A series of mechanical tests of geopolymer improved soils with different material ratios was carried out to investigate the ideal material ratio design of the geopolymer, analyze the optimal content of geopolymer for soil improvement, discuss the influence of basalt fiber content and length on the performance of geopolymer improved soil, and comprehensively evaluate the solidification effect of geopolymer and fiber on the soil. The results showed that the mechanical properties of geopolymer and fiber stabilized soils were improved first and then weakened with the increase of geopolymer content, fiber content, and fiber length. When the mixing ratio of metakaolin and alkali activator was 2∶1, the mixing ratio of sodium silicate and quicklime in alkali activator was 1∶0.8, the total mixing ratio of geopolymer in soil was 15%, and the mixing amount and length of basalt fiber were 0.4% and 12 mm, the mechanical improvement of geopolymer and fiber improved soil was the best. The solidification comparison test shows that the geopolymer and fiber improved soil was superior to ordinary cement soil, lime soil, and pure clay in compressive, tensile, and shear strength. The research results can provide a reference for soil improvement using geopolymer and fiber.

Keywords: geopolymer improved soil; basalt fiber; mechanical performance; stabilization effect