

# 砂砾改良高液限土回弹模量提升机制研究

徐淑亮

(中铁十四局集团第三工程有限公司, 山东 济南 250300)

**摘要:**为了充分利用高液限土,减少弃方,研究砂砾改良高液限土模量的提升机制。对砂砾改良高液限土进行了动三轴试验、粗集料间隙率试验和工业 CT 扫描,从砂砾掺量和砂砾级配两个方面研究其模量的变化规律。试验结果表明:存在一个临界值,当砂砾掺量小于 43.8%,土体是悬浮—密实结构,模量增长缓慢,当砂砾掺量大于 43.8%,土体是骨架—密实结构,模量增长较快。砂砾级配趋向下限值,粗集料含量增加,模量随之增加。土体内部的粗集料通过接触形成骨架,随粗集料接触点的增加,骨架结构不断完善,模量不断提高且增长较快。该研究可为高液限土的合理利用提供参考依据。

**关键词:**高液限土;回弹模量;砂砾;砂砾掺量;级配

**中图分类号:** U416.1+2

**文献标志码:** A

中国南方地区分布着大量高液限土。高液限土作为公路施工常见的特殊土之一,常表现出天然含水率高、液限大、塑性指数大等特点。高液限土很难直接作为路基填料,若全部弃方处理显然不经济,需进行专门处治方可使用。为此,学者们对高液限土的工程特性展开了研究,提出多种改良方法。生石灰能较好地改善高液限土的多种物理力学性质,提高其强度<sup>[1-2]</sup>;硅酸盐水泥能显著提升高液限土的强度,但对最佳含水率等性质影响不大<sup>[3]</sup>;土壤稳定剂对强度提升效果较好,但对施工要求较高<sup>[4]</sup>。上述方法均是化学改良,且花费较高,对土壤和生态环境有一定的影响。

相对于化学改良方法,掺砂法这种物理改良法绿色环保,普遍用于对高液限土、膨胀土等细粒土的改良,其改良后工程特性效果较好,是一种较为经济合理的改良方案<sup>[5]</sup>。Bera<sup>[6]</sup>研究了掺砂量对细粒土的液塑限、加州承载比的影响,并建立了非线性模型预估砂土混合物的最大干密度与最佳含水率;程涛等<sup>[7]</sup>以高液限土掺砂改良后的加州承载比为标准确定最佳掺砂范围,通过试验发现细粒含量对加州承载比的影响最大;李方华<sup>[8]</sup>进行多组承载比试验,确定了不同液限的高液限土对应的最佳掺砂量范围。上述文献虽从不同角度研究了高液限土掺砂后的物理力学性质变化和掺砂范围,但缺少详细的掺砂改良机理研究。

评价高液限土改良效果的指标有多种,例如液塑

限、加州承载比、压缩系数等<sup>[9]</sup>。土的回弹模量能反映其抵抗变形的能力,常常作为评价路基承载能力的重要指标,用模量来评价高液限土改良效果,比其他指标更为贴切<sup>[10-11]</sup>。而掺砂相比其他改良方法,更为环保经济,有必要探究掺砂对高液限土模量的影响。

在高液限土中掺砂后,一部分砂砾悬浮在细小的土颗粒中,另一部分砂砾则相互紧密接触,形成骨架结构,这与沥青混合料结构组成相似。一些学者研究发现,在沥青混合料中,骨料的粒径、数量、接触点数量、倾角以及级配类型对其组成结构有重大影响,进而影响其物理力学性能和路面使用性能<sup>[12-15]</sup>。因此,可以参照沥青混合料的骨架结构分析理论,从掺砂量、颗粒粒径、接触分析以及级配类型等方面研究高液限土掺砂后模量的变化。

该文以海南国道 G360 公路为依托工程,通过室内动三轴试验、粗集料间隙率试验和工业 CT 扫描,对砂砾改良高液限土试件复杂的细观结构进行直观有效观测,从砂砾掺量和砂砾级配两个方面研究其模量提升机制,为高液限土砂砾改良设计提供参考。

## 1 试验材料

选取海南国道 G360 公路沿线高液限土和当地砂砾作为试验材料。高液限土的基本物理性质如表 1 所示。

收稿日期:2021-04-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278432);海南省地方标准制修订项目(编号:2021-Z043)

作者简介:徐淑亮,男,高级工程师, E-mail:544220834@qq.com

表 1 高液限土基本物理性质

粗粒含 量/%	细粒含 量/%	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	最大干 密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	最佳 含水 率/%
28.1	61.9	55.2	29.3	25.9	1.72	18.5

表 2 砂砾级配类型

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	19.5	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.075
1#(上限)	100.0	95.6	86.3	73.2	52.7	26.0	10.8	5.6	2.1	0
2#(中间)	100.0	93.0	80.5	62.9	44.4	20.0	6.9	3.3	1.1	0
3#(原有)	100.0	92.1	78.7	60.5	42.0	19.7	5.2	2.0	1.3	0.2
4#(下限)	100.0	90.4	74.6	52.6	36.0	14.0	3.0	1.0	0	0

2 试验方法

为研究砂砾掺量与砂砾级配对砂砾改良高液限土模量的影响规律,对其分别进行室内动三轴、粗集料间隙率试验和工业 CT 扫描。

2.1 室内动三轴试验

选用不同掺量和级配类型的砂砾改良高液限土,进行室内动三轴试验,获取其动态回弹模量。制样前,先称取所需土样,制件采用两瓣模具,利用压力机分层静压制样,样品直径为 100 mm,高度为 200 mm。根据 JTG D30—2015《公路路基设计规范》中室内动三轴试验加载序列进行具体试验。采用半正弦波荷载加载,预载 1 000 次,正式加载每个序列 100 次,其中加载 0.1 s,间隔 0.9 s。

2.2 粗集料间隙率试验

将不同粒径砂砾分为粗集料和细集料,其临界粒径为 4.75 mm。粗集料起骨架作用,细集料填充粗集料空隙。利用粗集料间隙率试验,计算并比较粗集料干捣骨架间隙率( $VCA_{DRC}$ ,简记为  $R_{DRC}$ ,后文同)和混合料的骨架间隙率( $VCA_{mix}$ ,简记为  $R_{mix}$ ,后文同)来确定混合物的结构。若  $R_{DRC} < R_{mix}$ ,混合物是悬浮—密实结构;反之,混合物则为骨架—密实结构。具体计算公式如下。

$$R_{DRC} = \left(1 - \frac{\gamma_s}{\gamma_{ca}}\right) \times 100\%$$
(1)

$$R_{mix} = \left(1 - \frac{\gamma_f}{\gamma_{ca}} \times \frac{P_{ca}}{100}\right) \times 100\%$$
(2)

对选用砂砾进行颗粒分析,试验结果如表 2 所示。为了研究砂砾掺量(即砂砾与高液限土的质量比)和砂砾级配对高液限土改良后的回弹模量的影响,制备了 5 个不同砂砾掺量(30%、35%、40%、45%和 50%)的试样,其中,选用砂砾原有级配(3#)如表 2 所示。另一方面,在砂砾掺量 50%条件下选取 3 种级配(1#、2#和 4#)和砂砾原有级配(3#)制样,具体级配见表 2。

式中: $\gamma_s$  为松方毛体积相对密度; $\gamma_{ca}$  为毛体积密度; $\gamma_f$  为试件的毛体积相对密度; $P_{ca}$  为砂砾改良高液限土中粗集料的比例。

2.3 工业 CT 扫描

采用工业 CT 扫描仪观测砂砾改良高液限土的微观结构。在扫描过程中对试样进行密封,以确保其含水率不发生变化。

经过调试后,正式试验时,CT 扫描的电压为 220 kV,电流为 2.5 mA。

启动仪器前,通过将上限电压调整到 260 kV,进行 5 min 的培训。然后,重新设置 CT 扫描臂的位置,校正背景数据和增益数据,并由计算机输入。随后,将样品放置在试验架上,并沿纵向每隔 1 mm 扫描一次。每个样品共获得 200 张切片。

3 试验结果及分析

通过对室内动三轴试验、粗集料间隙率试验及 CT 扫描的试验结果分析,研究砂砾掺量与砂砾级配对砂砾改良高液限土模量的影响机制。

3.1 室内动三轴试验结果分析

室内动三轴试验结果如表 3 所示。由表 3 可知,砂砾掺量和砂砾级配类型对砂砾改良高液限土试样的动态回弹模量有显著影响。对于同一砂砾级配,随着砂砾掺量的增加,动态回弹模量增加,增长速率也随之增加。当砂砾掺量相同时,随着砂砾级配类型从级配上限变化到级配下限,动态回弹模

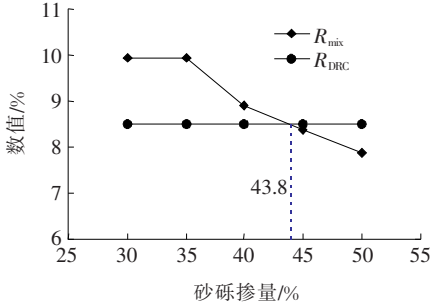
表 3 室内动三轴试验结果

砂砾掺量/ %	砂砾级配 类型	最佳含水率/ %	动态回弹 模量/MPa
30	3 <sup>#</sup>	21.2	60.2
35	3 <sup>#</sup>	21.3	65.3
40	3 <sup>#</sup>	19.2	79.8
45	3 <sup>#</sup>	19.4	92.3
50	1 <sup>#</sup>	19.7	89.2
50	2 <sup>#</sup>	19.5	97.8
50	3 <sup>#</sup>	18.4	98.6
50	4 <sup>#</sup>	18.2	108.9

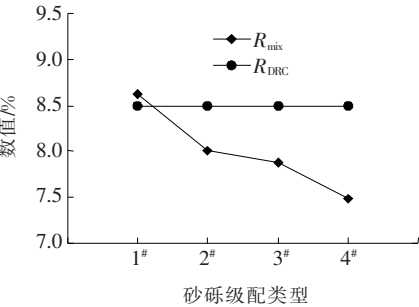
量随之增加。但是,砂砾掺量为 50% 时 1<sup>#</sup> (级配上限)砂砾级配试样的动态回弹模量却小于砂砾掺量为 45% 时 3<sup>#</sup> 砂砾级配试样的模量。因此,该文通过对粗集料间隙率和 CT 图像的分析,探讨其模量提升的具体机理。

3.2 粗集料间隙率分析

图 1 比较了各试样的粗集料干捣骨架间隙率 ( $R_{DRC}$ ) 和混合料的骨架间隙率 ( $R_{mix}$ )。



(a) 不同砂砾掺量



(b) 不同砂砾级配

图 1 粗集料间隙率试验结果

由图 1 可知:随着砂砾掺量的增加,砂砾改良高液限土的  $R_{mix}$  降低。当砂砾掺量小于 43.8% 时,  $R_{DRC} < R_{mix}$ , 大部分粗集料悬浮在高液限土中。在这种情况下,没有足够的粗集料相互接触来形成骨架结构。换

言之,混合料此时为悬浮—密实结构。因此,其回弹模量增长缓慢。当砂砾含量大于 43.8% 时,  $R_{DRC} \geq R_{mix}$ 。在这种情况下,有足够多的粗集料相互接触,可以形成致密的骨架。随着砂砾掺量的增加,这种骨架结构得到不断完善。因此,回弹模量呈现出较快的增长趋势。

不同砂砾级配类型的砂砾改良高液限土,即使其砂砾掺量相同,其回弹模量也不同。当混合料的砂砾级配取级配上限时,  $R_{DRC} < R_{mix}$ , 粗集料含量较少,接触数量较少,悬浮于高液限土中。此时,混合料是悬浮—密实结构。因此,混合料的模量相对较低。这也解释了砂砾掺量为 50% 时 1<sup>#</sup> 砂砾级配试样模量低于砂砾掺量为 45% 时 3<sup>#</sup> 砂砾级配试样模量。

当砂砾级配类型由级配中值向级配下限变化时,粗集料含量逐渐增加,粗集料相互接触的数量增加,形成越来越密的骨架。此时,砂砾改良高液限土的结构由悬浮—密实结构逐渐变为骨架—密实结构,其模量也随之增大。

3.3 CT 扫描结果分析

粗集料间隙率试验评价了砂砾改良高液限土的结构,但不能直观地反映粗集料在混合料中的接触状态。可通过工业 CT 扫描结果来分析混合物中粗集料的接触状态。

图 2、3 分别为不同砂砾掺量和不同砂砾级配的砂砾改良高液限土的 CT 扫描代表图像。

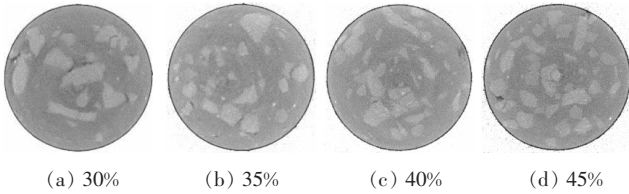


图 2 不同砂砾掺量(3<sup>#</sup> 砂砾级配)试样的 CT 图像

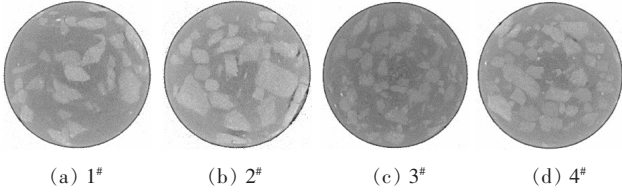


图 3 不同砂砾级配,50%砂砾掺量试样的 CT 图像

由图 2、3 可知:当砂砾掺量较少时,粗集料之间的接触次数较少,粗集料基本悬浮在混合料中。当砂砾掺量较多时,粗集料相互接触,“自由”颗粒的数量较少,粗集料间的接触点较多。这表明粗集料相互接触,通过嵌挤作用形成相对稳定的骨架结构。随着砂砾级

配由级配上限变化到级配下限,粗集料间相互靠近,距离减小,粗集料之间的接触机会随之增加。砂砾改良高液限土开始形成骨架结构,并且随着粗集料接触点的增加,这种骨架结构不断稳定完善。

为了进一步研究砂砾改良高液限土模量随粗集料接触点的变化规律,总结了各试样不同粒径的粗集料间的接触点数量,如表 4、5 所示。

表 4 不同砂砾掺量(3#砂砾级配)的粗集料接触点数目

粒径/mm	不同砂砾掺量的接触点数目/个			
	30%	35%	40%	45%
4.75~4.75	51	59	40	121
4.75~9.5	100	88	112	162
4.75~13.2	38	76	71	172
4.75~16	41	38	39	156
9.5~9.5	137	191	329	368
9.5~13.2	169	143	222	403
9.5~16	95	102	109	149
13.2~13.2	128	133	132	300
13.2~16	49	84	128	156
16~16	21	35	52	92

表 5 不同砂砾级配,50%砂砾掺量的粗集料接触点数目

粒径/mm	不同砂砾级配的接触点数目/个			
	1#	2#	3#	4#
4.75~4.75	178	221	225	257
4.75~9.5	197	288	297	316
4.75~13.2	166	259	268	277
4.75~16	144	215	246	247
9.5~9.5	303	396	401	417
9.5~13.2	291	405	406	422
9.5~16	135	236	245	284
13.2~13.2	244	335	337	385
13.2~16	171	185	200	222
16~16	95	144	152	139

由表 4 可知:当砂砾掺量为 30%~40%时,各粒径粗集料之间的接触点数量较少,且并不都是全部随砂砾掺量的增加而增加。当粗集料悬浮在砂砾改良高液限土中时,它们相互接触的机会较小,因此动态回弹模量随着砂砾掺量的增加而缓慢增加;当砂砾含量为 45%~50%时,粗集料之间易发生嵌挤,形成粗集料骨架。不同粒径粗集料之间的接触点明显增多。随着砂

砾掺量的增加,各粒径粗集料的接触点数量增加,其相互接触的机会也随之增加。因此,粗集料的接触数目较多,动态回弹模量的增长趋势也较快。

由表 5 可知:当砂砾级配接近级配下限时,粗集料逐渐形成骨架。随着粗集料含量的增加,不同粒径粗集料之间接触点的数量普遍增加,动态回弹模量也相应增大。但是砂砾掺量为 50%时,1#砂砾级配试样中不同粒径粗集料之间的接触点数量大部分小于砂砾掺量为 45%时 3#砂砾级配试样。这就是前者的模量小于后者的主要原因。

4 砂砾改良高液限土模量提升机制

根据上述试验结果,主要考虑砂砾掺量与砂砾级配的影响,结合混合物的结构类型与粗集料接触点数量的变化,研究砂砾改良高液限土模量提升机制<sup>[16]</sup>。

从表 3 和图 1 可知:砂砾掺量和砂砾级配类型对砂砾改良高液限土结构均有显著影响。混合料的结构取决于粗集料和细集料的含量。具体表现为:当细集料含量较大时,细集料将粗集料相互分离,使粗集料不能相互接触而形成骨架,粗集料悬浮在高液限土中,混合料呈现悬浮—密实结构。随着粗集料含量的增加,粗集料逐渐相互接触,形成骨架结构,并不断完善这种结构,细集料将粗集料中的空隙填满。砂砾改良高液限土的结构逐渐由悬浮—密实结构向骨架—密实结构转变。砂砾掺量和砂砾级配类型改变了砂砾改良高液限土的结构类型。因此,适当增加粗集料含量,有助于混合料形成骨架—密实结构,从而提高其回弹模量。

同理,结合图 2、3 和表 3~5 可知:砂砾掺量和砂砾级配类型的差异会改变砂砾改良高液限土的粗集料含量,进而导致粗集料间接触点数量的变化。当砂砾掺量较少时,粗集料之间的接触次数较少,粗集料基本上悬浮在混合料中。当砂砾掺量较多时,粗集料相互接触,“自由”颗粒的数量较少,粗集料间的接触点较多,这表明粗集料相互接触,通过嵌挤作用形成相对稳定的骨架结构。随着砂砾级配由级配上限变化到级配下限,粗集料间相互靠近,距离减小,粗集料之间的接触机会随之增加。砂砾改良高液限土开始形成骨架结构,并且随粗集料接触点的增加,这种骨架结构不断稳定完善。因此,增加砂砾掺量或改变砂砾级配来增加粗集料接触点数目,可以有效提高砂砾改良高液限土的模量。

综上所述,当粗集料含量较大(如砂砾掺量较大或



砂砾级配接近级配下限)时,粗集料相互嵌挤形成骨架结构,并随粗集料含量的增加,不断完善这种结构。在这种情况下,砂砾改良高液限土具有较大的回弹模量。

## 5 结 论

(1) 砂砾掺量和砂砾级配是影响砂砾改良高液限土模量变化的主要因素。随着砂砾掺量的增加或砂砾级配趋于下限时,砂砾改良高液限土模量随之提高。

(2) 当砂砾掺量小于 43.8% 时,  $R_{DRC} < R_{mix}$ , 砂砾改良高液限土为悬浮—密实结构,其模量随砂砾含量的增加而缓慢增加;当砂砾掺量大于 43.8% 时,  $R_{DRC} \geq R_{mix}$ , 砂砾改良高液限土为骨架—密实结构,其模量随砂砾含量的增加而迅速增加。这表明存在一个临界点,当砂砾含量超过该点时,模量随砂砾掺量的增长率加快。

(3) 对于砂砾改良高液限土,当砂砾级配向级配下限变化时,粗集料含量增加,其接触点增加,模量相应增大;当砂砾级配靠近级配上限时,粗集料含量减少,并悬浮于高液限土中,其模量减小。

(4) 粗集料含量较大时,粗集料能够相互接触形成骨架,并随着粗集料接触点数量的增加,不断完善这种结构。此时,砂砾改良高液限土模量较高。无论是增加砂砾掺量还是改变砂砾级配,都是增加粗集料含量,从而加大粗集料间相互接触的机会。因此,粗集料接触点数量的增加,是砂砾改良高液限土模量提升的根本原因。

## 参考文献:

- [1] 伍贤熙,孔增增,严为光. 改良花岗岩残积土的路用性能试验研究[J]. 中外公路,2020,40(6):257—261.
- [2] 杨和平,李宏泉. 石灰改良处治高液限土的路用特性试验研究[J]. 公路工程,2013,38(4):227—229,268.
- [3] WU Q H, XU Q, LI W Y. Comparative Study on Improving High Liquid Limit Clay as Roadbed Fillings in Chengdu Area[J]. Materials Research Innovations,2015,19:S8—241—S8—244.
- [4] ZHANG X G, CHEN Z X, YI N P. Improvement of High-Liquid Limit Soil in the Subgrade of Mine Roadway[J]. Annales de Chimie Science des Matériaux,2017,41(1/2):

61—74.

- [5] ZHANG W H, ZHENG H W, QI J W, et al. Experimental Study on the Feasibility of Using Water Glass and Aluminum Sulfate to Treat Complications in High Liquid Limit Soil Subgrade[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2015(1):457—978.
- [6] BERA A K. Effect of Sand Content on Engineering Properties of Fine-Grained Soil Mixed with Sand[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering,2011,16:1 275—1 286.
- [7] 程涛,洪宝宁,刘鑫,等. 高液限土最佳掺砂比的确定[J]. 西南交通大学学报,2012,47(4):580—585,596.
- [8] 李方华. 高液限土填料改良的最佳掺砂砾石比试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(3):785—788.
- [9] CHOO Hyunwook, LEE Woojin, LEE Changho. Compressibility and Small Strain Stiffness of Kaolin Clay Mixed with Varying Amounts of Sand[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2017,21(6):2 152—2 161.
- [10] LIU X L, ZHANG X M, WANG H. Laboratory Testing and Analysis of Dynamic and Static Resilient Modulus of Subgrade Soil under Various Influencing Factors [J]. Construction and Building Materials,2019,195:178—186.
- [11] ZHANG J H, PENG J H, ZENG L, et al. Rapid Estimation of Resilient Modulus of Subgrade Soils Using Performance-Related Soil Properties [J]. International Journal of Pavement Engineering,2019,2 019(1):1—8.
- [12] 石立万,王端宜,蔡旭,等. 基于数字图像处理的粗集料接触分布特性[J]. 中国公路学报,2014,27(8):23—31.
- [13] 吴文亮,卢家志,涂志先. 基于 X-ray CT 和离散元法级配离析对沥青混合料骨架结构力学性能的影响[J]. 公路工程,2020,45(1):55—61,97.
- [14] 牛冬瑜,谢希望,牛艳辉,等. 粗集料接触参数对沥青混合料损伤演化的影响[J]. 中国公路学报,2020,33(10):201—209.
- [15] CAI X, WU K H, HUANG W K, et al. Study on the Correlation between Aggregate Skeleton Characteristics and Rutting Performance of Asphalt Mixture[J]. Construction and Building Materials,2018,179:294—301.
- [16] 唐凛,杨晓松,查旭东,等. 基于含水率的重塑低液限黏土抗剪强度关系模型试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(2):26—32.