

高速公路粉土路基填料结构特性三轴试验研究

黄克峰¹, 廉杨¹, 王景辉², 韩海洋², 谢郭静², 李永靖^{3*}, 张淑坤³

(1. 中建国际投资(安徽)有限公司, 安徽 合肥 230000; 2. 中建铁路投资建设集团有限公司;

3. 辽宁工程技术大学 土木工程学院)

摘要:为了研究高速公路粉土路基在交通荷载作用下的变形与破坏规律,以安徽省蚌埠至五里河高速公路的粉土路基为研究对象,利用 DDS-70 动三轴试验系统,开展以围压、压实度为变量的三轴压缩试验。结果表明:原状土 $\sigma-\epsilon$ 关系随围压增大依次应变曲线呈应变软化型、理想弹塑性型、应变硬化型变化,重塑土是理想弹塑性型、应变硬化型;在固结围压增大、应变增大、压实度降低过程中,应力比结构性参数 m_q 是递减的;在围压、压实度增大时,初始应力比结构性参数 m_{q0} 是递减的,且受压实度影响较大;在围压增大时,结构性损伤量 m_{pd} 呈先增后减变化,提高压实度可使 m_{pd} 减小; m_{q0} 、 m_{pd} 与围压之间呈三次多项式的关系,与压实度呈线性关系。

关键词:路基粉土;综合结构势;应力比结构性参数;结构性损伤量;压实度

沈珠江提出,21 世纪土力学研究的核心是结构性问题,土体的强度和变形很大程度上受到其结构性影响^[1]。研究土结构性的方法一般包括扰动状态理论、综合结构势理论、岩土破损力学理论和四维空间理论^[2-5]。其中,最常用的综合结构势理论将结构性参数分为应力结构性参数和应变结构性参数。该理论能够描述土体在球应力或剪应力单独影响下的结构性变化,而工程实际中土体表现出的结构性变化是受球应力和剪应力共同作用的^[6-8]。因此,采用刘家顺等^[3,9]提出的球应力和剪应力耦合影响结果的应力比结构性参数,描述路基填料的结构性特性。车辆荷载等作用下,高速公路的路基将产生不同程度变形与破坏,同时粉土作为路基填料,经历铺筑、压实过程使原状土变成了重塑土,结构性发生了变化。该文以安徽省蚌埠至五里河高速公路的粉土路基为研究对象,开展以围压、压实度为变量的三轴压缩试验,以便为粉土在路基填料中的应用提供结构性参数依据。

1 试验方法

1.1 试验材料

蚌埠至五里河高速公路 13[#] 土场,取地表下 5.2~

5.5 m 的土样。取出后,在现场立即严格按照 JTG E40—2007《公路土工试验规程》对土样颗粒级配、液塑限、最优含水率等相关物理力学参数进行测定^[10-11]。试验结果表明:大于 0.075 mm 粒径的颗粒占总质量的 45.22%,塑性指数 $I_p=8.4$,最优含水率为 14.4%,最大干密度为 1.70 g/cm³,经鉴别此土为粉土。

1.2 试样制备

原状土:土样坑是表层土体开挖 5.2~5.5 m 深度,并保证留设的土柱直径要远大于试样的直径。自制薄壁圆管取土器,直径为 39.1 mm,入土的端面斜切 45°,将内壁均匀涂抹一层润滑剂后,将取土器平缓地压进留设的土柱 5.5 m 处。到达指定深度后,静止 1 min,平缓取出并密封取土器,并以最短的时间运回试验室。

重塑土:将取回的土样碾碎,晒干至均匀,过 2 mm 细筛网,均匀搅拌。按照 JTG D30—2015《公路路基设计规范》^[12],分 5 层击实,并保证压实度各为 92%、94%、96%、98%,采用重力型静力法制作试件,试件尺寸为直径 39.1 mm、高 80 mm。

1.3 试验方案

在 DDS-70 动三轴试验系统上进行固结排水试验,加载速率为 0.012 mm/s,由现场勘测得出当地粉

收稿日期:2020-06-21(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51504125,51774173,51704143)

作者简介:黄克峰,男,高级工程师. E-mail:978077386@qq.com

* 通信作者:李永靖,男,教授,博士生导师. E-mail:Lyjsdyt@126.com

土围压为 70~150 kPa。因此,此次试验研究围压 σ_3 分别为 50、100、150、200、250 kPa,在轴向应变为 15% 或试件彻底破坏时终止试验,具体试验方案见表 1。

表 1 试验方案

编号	围压 σ_3 /kPa	试样
A	50	原状土与压实度分别为 92%、94%、96%、98% 的重塑土
B	100	
C	150	
D	200	
E	250	

2 试验结果与分析

2.1 应力—应变关系

图 1 为原状土和重塑土的轴向应力—应变曲线。由图 1 可知:

(1) 围压不大于 150 kPa 情况下,原状土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线呈应变软化现象。当围压大于 150 kPa 时,曲线走势逐渐向理想弹塑性和应变硬化转化;压实度不同的重塑土 $\sigma-\epsilon$ 曲线整体走势均呈理想弹塑性向应变硬化转化。

(2) 荷载作用初期,轴向应力增长的速度相对较快,但表现出的变形增长较慢。随着剪切作用的继续,应力增长速度逐渐变慢,但表现出的变形增长相对较大。在围压一定时,原状土抵抗变形的能力远远优于重塑土。这是由于原状土在沉积和地质作用过程中,形成了特有结构。重塑土的压实度越大,其极限强度越大,抵抗变形的能力越强;压实度一定时,围压增加,可使土体的极限强度增大。

2.2 应力比结构性参数

基于综合结构势理论,采用应力比结构性参数 m_η ,描述外部因素、球应力与剪应力耦合应力综合影响,具体表达式见式(1)^[3]:

$$m_\eta = \frac{(q/p)_i}{(q/p)_{rs}} = \frac{\eta_i}{\eta_{rs}} \quad (1)$$

式中: p 为球应力, $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$; q 为剪应力, $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$; η 为应力比, $\eta = q/p$; η_i 为原状土的应力比; η_{rs} 为饱和重塑土的应力比。

图 2 为压实度为 92%、94%、96%、98% 的重塑土,在围压 50、100、150、200、250 kPa 作用下的应力比结构性参数与应变的关系。

由图 2 可得:

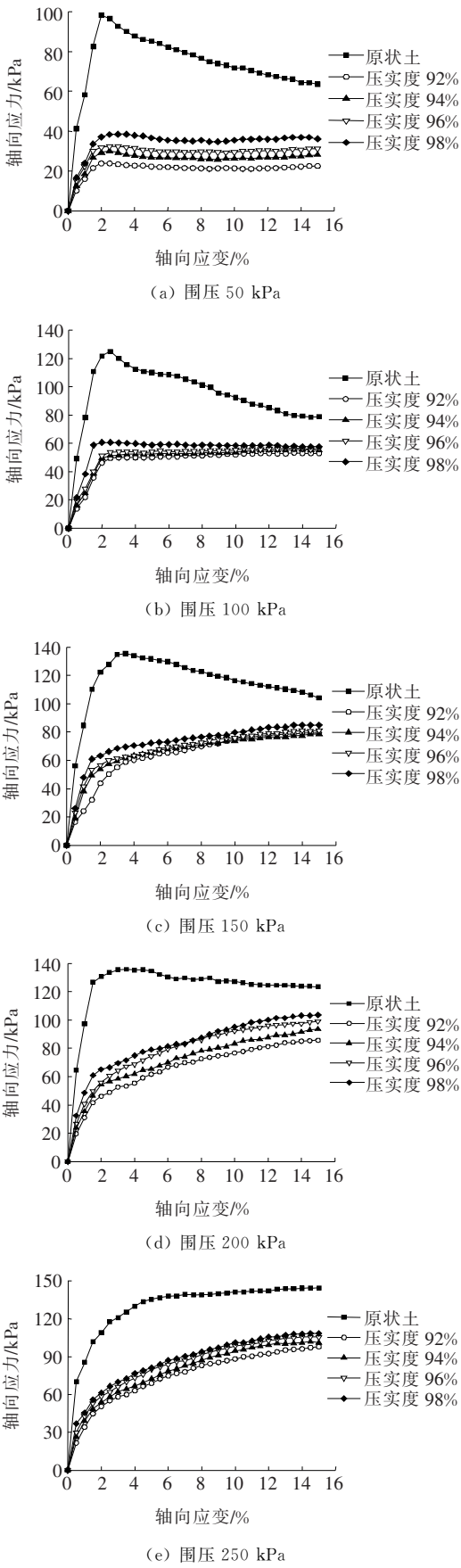


图 1 粉土的应力—应变曲线

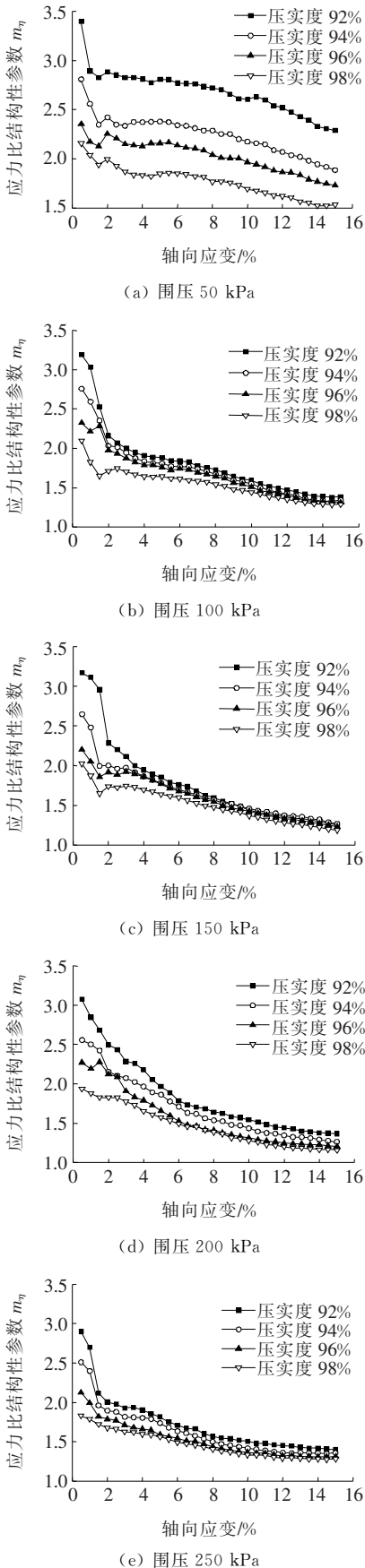


图 2 粉土应力比结构参数的变化规律

(1) 在剪切作用整个阶段, m_{η} 是在变形增大的过程中逐渐减小的, 后期趋于稳定。这是由于重塑土在压实过程中会产生平衡的次生结构, 在剪切作用下, 原有的次生结构被破坏, 后期持续的剪切作用使土体又形成新的次生结构, 因此抑制了土体结构的损伤, 但增加剪切作用。 m_{η} 逐渐趋近于 1, 将导致土体逐渐损失其结构性。当 $m_{\eta}=1$ 时, 则结构性彻底损失。

(2) 围压一定时, 增大重塑土体的压实度, 应力比结构参数减小。剪切作用初期, 压实度越小, 应力比结构性参数减小得越快。表明剪切作用初期, 降低重塑土的压实度, 其结构损伤情况越剧烈; 压实度和应变不变, 增加围压, 应力比结构性参数呈递减的趋势, 表明围压变大促进了结构损伤。

2.3 初始应力比结构性参数

重塑土的 $m_{\eta}-\epsilon$ 曲线延伸至与纵坐标轴相交的数值, 即初始应力比结构性参数 $m_{\eta 0}$ [8]。图 3 为 $m_{\eta 0}$ 分别以围压、压实度为变量的变化规律。由图 3 可得, 当土体压实度固定时, 随着围压增加 $m_{\eta 0}$ 呈缓慢的减小趋势, 重塑土初始结构受围压影响较小; 当围压一定时, 增加重塑土压实度, $m_{\eta 0}$ 减小的速度较快。可见, 压实度的改变, 对重塑土的 $m_{\eta 0}$ 影响较大。

运用 Origin9.1 对不同压实度状态下的初始应力比结构性参数与围压、压实度的数据进行拟合, 发现 $m_{\eta 0}$ 与围压呈三次多项式的关系, 与压实度呈良好的线性关系, 且相关系数均大于 0.88, 具体结果见表 2。

2.4 结构性损伤量

在整个固结试验过程中, 由于粉土在结构性方面的变化而导致抵抗变形能力降低, 进而表现出应力比结构性参数的减小, 减小量即为结构性损伤量 $m_{\eta d}$ [3,8], 其表达式见式(2)。其中, m_{η} 根据图 2 取 $\epsilon=15\%$ 对应的值。图 4 为结构损伤量与围压、压实度对应的关系曲线。

$$m_{\eta d}=m_{\eta 0}-m_{\eta} \quad (2)$$

由图 4 可知: 固定重塑土的压实度, 增大围压, 结构性损伤量是先增大后减小。围压为 50~150 kPa 时, 结构性损伤量呈递增趋势, 为 150~200 kPa 时, 结构性损伤量减小, 结构性损伤量波动的范围为 0.33~0.79; 围压一定时, 增大重塑土的压实度, 结构性损伤量逐渐减小, 波动范围为 0.5~1.02。可见, 压实度的改变对重塑土的结构损伤量的影响也较大。

运用 Origin9.1 对不同压实度状态下的结构性损伤量与围压、压实度的数据进行拟合, 发现结构性损伤量与围压之间满足三次多项式的关系, 与压实度间满足线性关系, 且相关系数均大于 0.88, 具体见表 3。

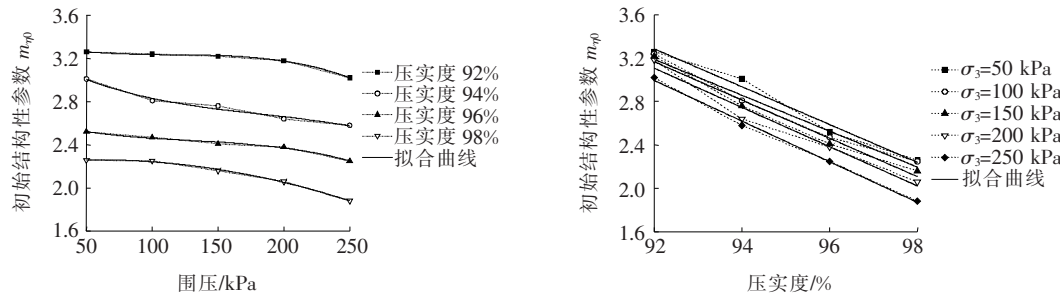


图3 初始结构性参数与围压、压实度的关系

表2 初始结构性参数与围压、压实度的关系表达式

压实度/%	表达式	相关系数	围压 σ_3 /kPa	表达式	相关系数
92	$y=3.36-3.23\times10^{-3}x+2.74\times10^{-5}x^2-8\times10^{-8}x^3$	0.990 1	50	$y=19.34-0.17x$	0.973 2
94	$y=3.3-7.4\times10^{-3}x+3.3\times10^{-5}x^2-6\times10^{-8}x^3$	0.937 4	100	$y=18.42-0.17x$	0.972 1
96	$y=2.66-3.69\times10^{-3}x+2.33\times10^{-5}x^2-6\times10^{-8}x^3$	0.960 8	150	$y=19.41-0.18x$	0.973 9
98	$y=2.32+1.1\times10^{-3}x-1\times10^{-5}x^2-3.95\times10^{-22}x^3$	0.988 7	200	$y=19.76-0.18x$	0.960 2
			250	$y=20.25-0.19x$	0.995 0

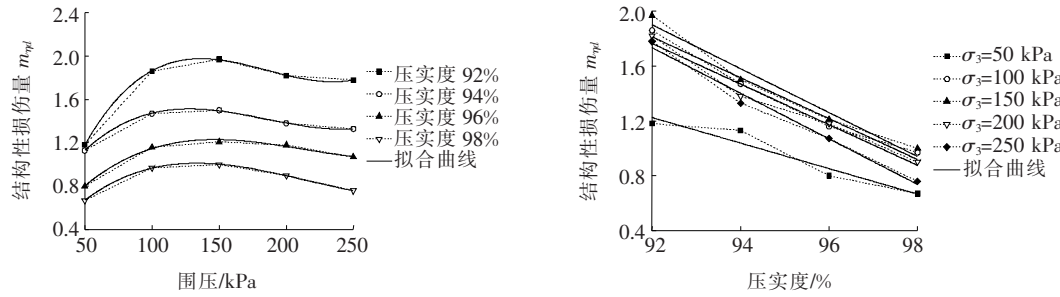


图4 结构性损伤量与围压、压实度的关系

表3 结构性损伤量与围压、压实度的关系

压实度/%	表达式	相关系数	围压 σ_3 /kPa	表达式	相关系数
92	$y=-4.28\times10^{-1}+4.36\times10^{-2}x-2.53\times10^{-4}x^2+4.53\times10^{-7}x^3$	0.999 4	50	$y=9.78-0.093x$	0.894 2
94	$y=2.72\times10^{-1}+2.35\times10^{-2}x-1.41\times10^{-4}x^2+2.53\times10^{-7}x^3$	0.997 6	100	$y=15.52-0.149x$	0.966 7
96	$y=8.4\times10^{-2}+1.89\times10^{-2}x-9.81\times10^{-5}x^2+1.53\times10^{-7}x^3$	0.972 9	150	$y=16.62-0.160x$	0.950 7
98	$y=-7.94\times10^{-16}+1.79\times10^{-2}x-9.79\times10^{-5}x^2+1.53\times10^{-7}x^3$	0.998 2	200	$y=15.38-0.148x$	0.961 5
			250	$y=17.01-0.166x$	0.979 1

3 结论

(1) 从应力—应变曲线看,原状土的极限强度显著高于重塑土,且随围压的增大,极限强度递增。原状土表现为3种状态:应变软化型、理想弹塑性型、应变硬化型,重塑土则表现为理想弹塑性型和应变硬化型。提高重塑土压实度,极限强度增强。

(2) 应力比结构性参数在剪切作用的整个过程中

逐渐减小,且前期减小的速度较快,后期较为缓慢,并逐渐趋于1。围压增大、压实度提高应力比结构性参数递减,表明围压和压实度可破坏土体结构。

(3) 初始应力比结构性参数随围压、压实度的增大而减小。其中,围压对其的影响较小,而受压实度的影响较大。 m_{q0} 与围压的关系呈三次多项式, m_{q0} 与压实度呈良好的线性关系,相关性好。

(4) 结构性损伤量 m_{qd} 与围压的关系式为三次多项式,具体表现为:随着围压的增大, m_{qd} 先递增,再趋