

南宁灰白膨胀土侧向膨胀力室内试验研究

韩涛¹, 谭明¹, 潘政安², 徐良²

(1.广西交投科技有限公司, 广西 南宁 530213; 2.桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 膨胀土是一种具有强胀缩性的特殊黏土, 掌握其侧向膨胀力规律对于合理分析支挡结构的稳定性具有重要意义。文中通过控制不同条件, 对南宁灰白重塑膨胀土进行膨胀力试验, 得到不同干密度、初始含水率和外部荷载与膨胀力之间的影响关系。结果表明, 两个水平方向的膨胀力基本一致, 竖向膨胀力大于水平向膨胀力; 相同干密度下, 三向膨胀力随初始含水率的增大而减小; 相同初始含水率下, 三向膨胀力随初始干密度的增大而增大; 所受上覆荷载越大, 侧向膨胀力越大, 允许土体膨胀后, 其侧向膨胀力逐渐衰减, 且侧向膨胀力与允许侧向膨胀率呈良好的指数关系。

关键词: 公路; 膨胀土; 侧向膨胀力; 侧向膨胀力试验; 允许侧向膨胀率

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)06-0060-04

膨胀土富含蒙脱石、伊利石及其混层等亲水性矿物, 吸水体积变化显著。当遇水膨胀受限时, 会对周围结构物或土体产生较大膨胀力。膨胀土的竖向膨胀力对膨胀土地基及其上部结构有显著影响, 膨胀土的侧向膨胀力与膨胀土边坡及其支挡结构的稳定性密切相关。膨胀土边坡支挡结构的稳定性不仅受到土压力作用的影响, 还受到侧向膨胀力的影响, 而侧向膨胀力一般会大于主动土压力, 因此合理分析侧向膨胀力对于膨胀土支挡结构稳定性有着决定性作用。前人大多在一维固结条件下开展试验研究膨胀土的胀缩特性, 得到的是一维侧限的竖向胀缩规律, 该规律仅适用于地基工程等特定条件的分析, 对于具有临空面的坡体变形分析无法获得侧向膨胀规律。对膨胀土进行三向测试有助于更全面地把握膨胀土胀缩规律。刘祖德等使用改装后的可以控制应力的三轴仪研究了典型膨胀土的三向关系。Avsar E.等研制一种三向膨胀仪用于测试柱形膨胀土试样, 但其加力过程易对土样造成破坏。张锐等在单轴固结仪的基础上研制可以测出侧向膨胀力的装置, 但没有获得侧向膨胀力随侧向变形的变化规律。以上试验研究采用非立方体试样, 仅局限于两向。张颖钧最早研制出针对立方体膨胀土试样的三向胀缩仪, 并利用该仪器研究了原状土和击实土水平膨胀力与竖向膨胀力之间的关系。之后, 谢云和秦冰等使用改进后的仪器, 研究了典型膨胀土在不同初始吸力和干密度下的三向膨胀力, 所测膨胀力

范围比原仪器大大提高, 但测试过程中土样的不断变形会导致仪器出现变化, 需人工不断调节。王海龙等使用自制三向膨胀力测量仪对典型膨胀土进行了试验研究, 但该装置无法对三向荷载大小进行控制。本文基于可用于测试立方体土样的三向胀缩仪, 对广西南宁灰白重塑膨胀土进行不同条件下三向膨胀力试验, 分析干密度、初始含水率和外部荷载对膨胀力的影响, 研究允许变形条件下侧向膨胀力随土体侧向膨胀率的变化规律。

1 试验方法

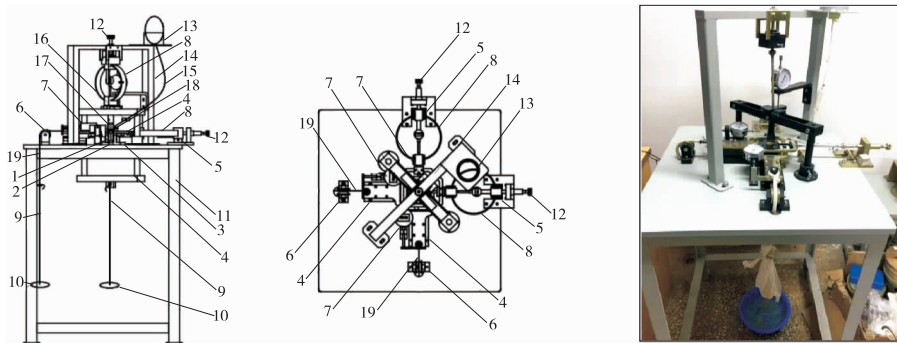
1.1 三向胀缩仪

在前人研究的基础上, 笔者与桂林长海发展有限责任公司联合研制膨胀土三向胀缩仪(见图1), 对尺寸为 2.5 cm × 2.5 cm × 2.5 cm 的正方体土样进行三向胀缩率和三向膨胀力测试。该仪器能在三个方向施加荷载。它通过竖向滴水对试样进行增湿, 3 个百分表和 3 个测力环分别测试三向膨胀变形和三向膨胀力, 通过在堆载盘上添加砝码来施加三向荷载。

1.2 土样选取及制样方法

试验所用南宁灰白膨胀土土样取自在建期间的南宁城市道路边坡, 属于中等膨胀土, 其基本物理指标见表 1。

制样前, 先把土样锤碎过 0.5 mm 筛进行筛分, 放置于 105 °C 烘箱中烘烤 8 h 后取出, 根据试验要



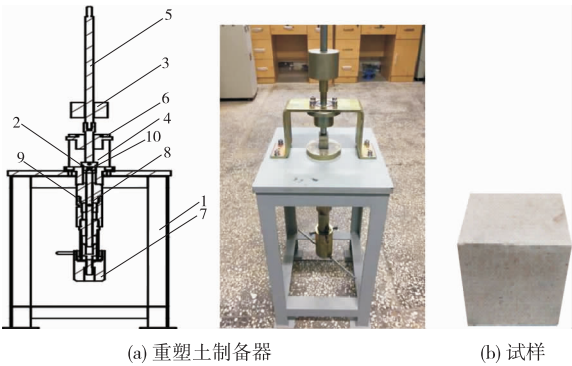
1 水平挡板;2 集水底座;3 施压板;4 传压框;5 水平导轨;6 滑轮;7 百分表;8 量力环;9 吊钩;10 堆载盘;11 工作平台;12 旋转螺栓;
13 储水容器;14 支撑架;15 输水管;16 阀门;17 滴水板;18 透水石;19 尼龙绳

图 1 三向胀缩仪结构图

表 1 南宁灰白膨胀土的主要物理指标

项目	指标值
天然含水率/%	23.1
液限/%	44.4
塑限/%	23.7
塑性指数	20.7
干密度/(g·cm ⁻³)	1.66
自由膨胀率/%	55
相对体积质量	2.72

求配制不同含水率的土样。将土样装袋闷足 24 h 后,从塑料袋 3 个不同位置取出土样进行含水率测试,3 个位置土样的含水率误差不超过 2%。采用自制重塑土制备器制样时,把土倒入成土框中,用 4 kg 重锤自由下落施力使土分 3 层压实,最后旋转螺栓使螺杆顶着推土板,取得土样。要求土样 6 个面表面均平整、光滑、无破损,长度误差不超过 0.2 mm (见图 2)。



(a) 重塑土制备器 (b) 试样

1 底座平台;2 成土框等装置;3 重锤;4 击实小锤;5 导杆;6 导杆固定框;7 旋转螺栓;8 螺杆;9 土样尺寸控制器;10 推土板

图 2 重塑土制备器及试样

1.3 试验方案

1.3.1 三向膨胀力试验

要求三向平衡加压,放入试样后,先安装量力环

对试样施加 1 kPa 初始压力,使试样与压力板充分接触,然后控制输水阀门控制水流速度,对试样进行滴水处理。试验过程中不断调整三向量力环后的旋钮,使试样受到反力压缩,使 3 个方向的膨胀量保持为零。量力环停止转动时,试样不再发生膨胀,记录量力环的读数,通过换算得到膨胀力。

(1) 初始含水率不变、初始干密度变化的膨胀力试验。采用不同击实功把初始含水率为 15.40% 的土样分别制成干密度为 1.65 g/cm³、1.70 g/cm³、1.75 g/cm³、1.80 g/cm³ 的立方体土样,通过三向胀缩仪探究相同含水率下试样干密度与三向膨胀力及侧、竖向膨胀力之比的关系。

(2) 干密度不变、初始含水率变化的膨胀力试验。把干密度为 1.70 g/cm³ 的土样分别制成 4 个不同含水率的土样,探究相同干密度下初始含水率与膨胀率及侧、竖向膨胀力之比的关系。

1.3.2 控制上覆荷载的侧向膨胀力试验

制作一组试样,初始含水率为 10.6%,初始干密度为 1.75 g/cm³,通过施加不同上覆荷载控制竖向变形,探究不同竖向变形条件下侧向膨胀力的变化规律。将试样置于三向胀缩仪中,在竖直方向施加 1 kPa 荷载,两个水平方向分别放置一个量力环,膨胀土遇水后竖向产生膨胀时测定水平方向膨胀力。之后每次试验在竖直方向逐次施加 25 kPa 荷载,直至竖直方向不再产生膨胀,得到侧向膨胀力与竖向变形的关系。

1.3.3 允许侧向变形的侧向膨胀力试验

制作一组试样,初始含水率为 10.6%,初始干密度为 1.75 g/cm³,所加竖向荷载为竖向传压框的压力 20 kPa,探究在控制侧向变形的条件下侧向膨胀力的变化规律。将试样置于三向胀缩仪中,两水平

方向分别放置一个量力环,但量力环与传压框不接触。打开滴水阀门,当水平方向产生0.2%线应变时关闭滴水阀门,同时将量力环与传压框接触。然后将百分表与量力环调零,再次打开滴水阀门测定释放0.2%线应变后的侧向膨胀力。依次释放0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.5%、2.0%、...线应变,直至水平方向不再膨胀,得到允许侧向变形时侧向膨胀力的变化规律。

2 膨胀力试验结果与分析

2.1 初始干密度对三向膨胀力的影响

初始含水率为15.40%时,不同初始干密度下三向膨胀力见表2、图3。由表2、图3可知:1) 相同干密度条件下,膨胀土的竖向膨胀力始终大于侧向,且两个水平方向的膨胀力相差不大。这是因为竖向受到的是重锤击实压力,而侧向受到的是挤压力,重锤击实压力远大于挤压力,竖向颗粒挤密程度越大,膨胀潜势越大。2) 侧、竖向膨胀力之比随干密度的增大而增大(见图4),变化规律与三向膨胀率相同,与池泽成等对合肥膨胀土的分析结论基本一致。

2.2 初始含水率对三向膨胀力的影响

初始干密度为1.70 g/cm³时,不同初始含水率下三向膨胀力见表3、图5。由表3、图5可知:初始含水率与三向膨胀力之间具有良好的线性关系,拟

表2 不同初始干密度下三向膨胀力

干密度/ (g · cm ⁻³)	三向膨胀力 p_i /kPa			侧向膨 胀力 p	侧、竖向膨 胀力之比
	p_z	p_x	p_y		
1.65	286.63	180.38	182.38	181.38	0.63
1.70	316.15	221.70	215.64	218.67	0.69
1.75	410.59	298.44	294.55	286.50	0.72
1.80	469.62	404.69	401.20	402.95	0.86

注: $p = (p_x + p_y)/2$;侧向、竖向膨胀力之比 = p/p_z 。
下同。

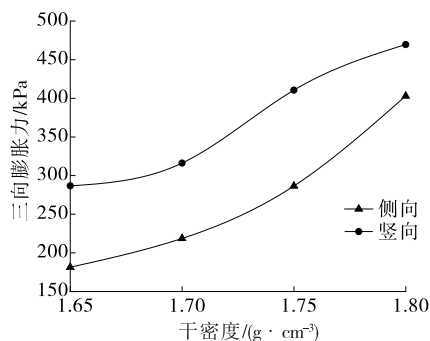


图3 三向膨胀力与初始干密度关系曲线

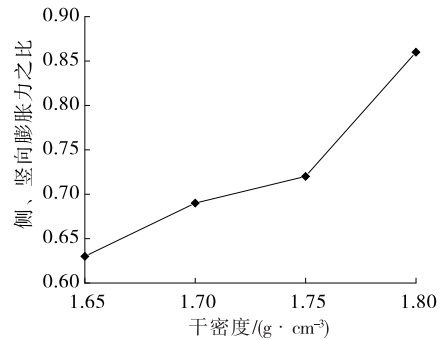


图4 侧、竖向膨胀力之比与初始干密度关系曲线

合公式见式(1);相同含水率下,竖向膨胀力始终大于侧向,与三向膨胀率的变化规律相同,且三向膨胀力随着初始含水率的增大而减小。

表3 不同初始含水率下三向膨胀力

含水 率/%	三向膨胀力 p_i /kPa			侧向膨 胀力 p	侧、竖向膨 胀力之比
	p_z	p_x	p_y		
10.5	381.08	268.92	265.33	267.13	0.70
13.2	345.66	239.41	233.74	236.58	0.68
15.4	316.15	221.70	215.64	218.67	0.69
18.7	280.73	192.19	190.10	191.15	0.68

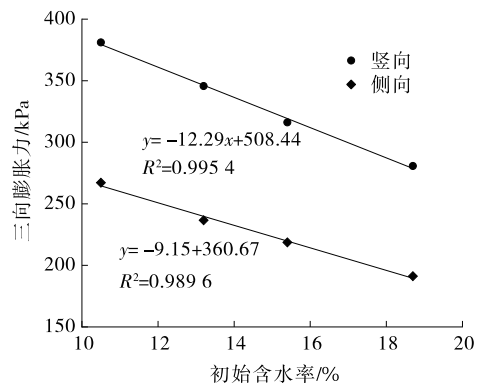


图5 三向膨胀力与初始含水率关系曲线

$$p_i = gW + h \quad (1)$$

式中: g 、 h 为参数; W 为初始含水率。

2.3 上覆荷载对侧向膨胀力的影响

初始含水率为10.6%、初始干密度为1.75 g/cm³时,不同上覆荷载下侧向膨胀力见表4、图6。由表4、图6可知:上覆荷载的存在使土体更多向侧向释放膨胀压力,膨胀土边坡的坡面或挡墙埋深越大,其侧向膨胀力越大。

2.4 允许侧向变形对侧向膨胀力的影响

初始含水率为10.6%、初始干密度为1.75 g/cm³时,不同允许侧向变形下侧向膨胀力见表5、图7。由表5、图7可知:侧向膨胀力与控制侧向膨

表 4 不同上覆荷载下侧向膨胀力

上覆荷载/kPa	侧向膨胀力 p /kPa	上覆荷载/kPa	侧向膨胀力 p /kPa
1	78.76	126	138.07
26	104.86	151	145.44
51	117.41	176	151.35
76	124.78	201	155.77
101	129.21	226	172.01

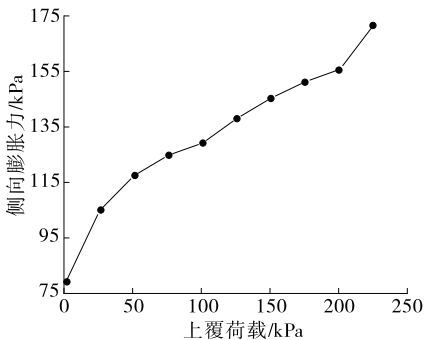


图 6 侧向膨胀力与上覆荷载关系曲线

胀率之间呈现良好的指数关系,拟合公式见式(2);膨胀土侧向膨胀力随着控制侧向膨胀率的增大而减小,且减小趋势明显,最小膨胀力仅为原来的1/5,

表 5 不同允许侧向变形下侧向膨胀力

允许侧向膨胀率/%	侧向膨胀应力 p /kPa		允许侧向膨胀率/%	侧向膨胀应力 p /kPa	
	p_x	p_y		p_x	p_y
0.0	102.65	102.59	2.0	52.48	52.48
0.2	92.32	92.21	2.5	42.15	42.15
0.4	81.99	81.78	3.0	36.24	36.24
0.6	76.09	77.47	3.5	28.86	28.86
0.8	71.66	71.20	4.0	25.91	25.91
1.0	65.76	65.36	5.0	24.44	24.44
1.5	58.38	58.16	6.0	20.01	20.01

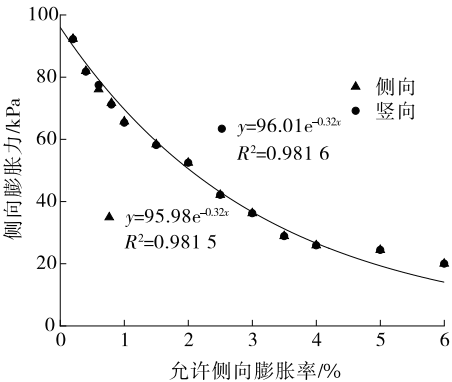


图 7 侧向膨胀力与允许侧向膨胀率关系曲线

与文献[12]中广西百色膨胀土侧向膨胀力随上覆荷载的变化规律一致。在膨胀土地区修建隧道、涵洞、挡墙等结构物时,可以在膨胀土与支挡结构之间设置可压缩的回填料作为缓冲层,允许膨胀土吸水后发生一定变形,从而降低侧向膨胀力,对结构物起到保护作用。

$$p = ce^{d\delta} \tag{2}$$

式中: c 、 d 为参数; δ 为膨胀率。

3 结论

(1) 相同初始含水率条件下,两个水平方向的膨胀力基本一致,竖向膨胀力始终大于水平方向膨胀力。三向膨胀力随初始干密度的增大而增大,且侧、竖向膨胀力之比随干密度的增大越趋近于 1,说明击实功越大,土体侧、竖向差异越小。

(2) 相同初始含水率和初始干密度条件下,竖向膨胀力始终大于侧向膨胀力,且两个水平方向膨胀力基本相同。相同初始干密度下,三向膨胀力随初始含水率的增大而减小,且呈良好的线性关系。

(3) 所受上覆荷载越大,侧向膨胀力越大。膨胀土边坡的坡面或挡墙埋深越大,其侧向膨胀应力越大,可在膨胀土与支挡结构之间设置缓冲层。

参考文献:

[1] 郑健龙.公路膨胀土工程理论与技术[M].北京:人民交通出版社,2013.

[2] 周葆春,张彦钧,汤致松,等.不同压实度荆门弱膨胀土的一维膨胀—压缩特性[J].岩土力学,2014,35(5):1275—1283.

[3] 叶云霄,邹维列,韩仲,等.考虑初始状态影响的膨胀土一维膨胀特性研究[J].岩土工程学报,2021,43(8):1518—1525.

[4] 缪林昌,仲晓晨,殷宗泽.非饱和膨胀土变形规律的试验研究[J].大坝观测与土工测试,1999,23(3):36—39.

[5] 刘特洪.工程建设中的膨胀土问题[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.

[6] 杨长青,董东,谭波,等.重塑膨胀土三向膨胀变形试验研究[J].工程地质学报,2014,22(2):188—195.

[7] 谭波,徐良,李亚奇.南宁灰白重塑膨胀土三向膨胀室内试验研究[J].科学技术与工程,2020,20(35):14612—14618.

[8] 王海龙,朱宝龙,赵什光,等.膨胀土膨胀特性的试验研究[J].四川建筑科学研究,2017,43(3):59—61.

[9] 谭波,郑健龙,张锐.宁明膨胀土三向胀缩规律室内试

列式为零,矩阵 J_x 行列式不为零,并联机构的自由度增多,驱动机构没有输入,但动平台仍能运动,导致运动失控,此类奇异称为逆解奇异。

求解矩阵 J_ϵ 行列式为零需满足的条件为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 的乘积为零,即矩阵对角线上的 5 个元素中至少需满足其中一个为零。当 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 中任一为零时, J_ϵ 行列式为零。

对于杆长 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 ,考虑并联机构的运动特性,由于伸缩杆的长度不可能为零,矩阵 J_ϵ 和 J_x 行列式均不为零,不存在逆解奇异。

3.2 正解奇异

矩阵 J_x 奇异而矩阵 J_ϵ 非奇异,此时矩阵 J_ϵ 行列式不为零,矩阵 J_x 行列式为零,并联机构的自由度减少,机构丧失某种功能,此类奇异称为正解奇异。在 MATLAB 中编程,得出矩阵 J_x 的行列式分布(见图 8)。

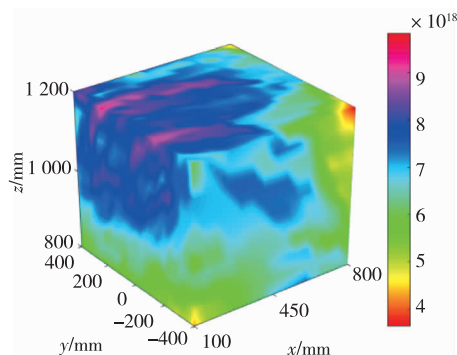


图 8 J_x 行列式分布

从图 8 可以看出: J_x 的行列式分布并没有一个从零过渡的区间,不存在行列式为零的情况, J_x 各行各列都不线性相关,矩阵 J_x 行列式不为零,并联机构不存在正解奇异。

3.3 混合奇异

矩阵 J_ϵ 、 J_x 奇异,此时矩阵 J_ϵ 和 J_x 行列式均

为零,此为混合奇异。综合以上分析,该并联机构不存在混合奇异。

4 结论

本文利用空间位置矢量法构建 5-SPS 并联机构的运动学逆解模型,通过 ADAMS 仿真验证,所设计的理论模型与仿真模型正确、合理,该并联机构动平台加速度变化较平稳,具有较好的运动学性能。求解该并联机构的速度雅可比矩阵,并利用该矩阵对机构奇异性进行分析,结果表明该机构不存在正解奇异、逆解奇异与混合奇异。

参考文献:

- [1] 王鹏.双巷掘进工作面快速支护锚杆钻车的研制与应用[J].煤矿机械,2021,42(7):170—171.
- [2] 王威.十臂锚杆钻车的研制与应用[J].煤矿机电,2021,42(2):21—23.
- [3] ZHAO G H, WANG D, LIU L B, et al. Positioning error compensation for parallel mechanism with two kinematic calibration methods[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(9): 2472—2489.
- [4] LI Y B, ZHENG H, CHEN B, et al. Dynamic modeling and analysis of 5-PSS/UPU parallel mechanism with elastically active branched chains[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1): 44—55.
- [5] 柳纪琛,吴孟丽,王明曦,等.一种 2T1R 并联机构的运动学分析及尺度优化[J].机械设计,2020,37(12):71—81.
- [6] 沈惠平,朱忠顺,孟庆梅,等.零耦合度空间 2T1R 并联机构运动学与刚度建模分析[J].农业机械学报,2020,51(10):411—420.
- [7] 叶伟,谢镇涛,李秦川.一种可用于微创手术的并联机构运动学分析与性能优化[J].机械工程学报,2020,56(19):103—112.

收稿日期:2022—01—13

(上接第 63 页)

- 验研究[J].公路交通科技,2014,31(4):1—6+15.
- [10] 刘祖德,王园.膨胀土浸水三向变形研究[J].武汉水利电力大学学报,1994,1(6):616—621.
 - [11] AVSAR E, ULUSAY R, SONMEZ H. Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay[J]. Engineering Geology, 2009, 105(1—2): 24—31.
 - [12] 张锐,刘正楠,郑健龙,等.膨胀土侧向膨胀力及其对重力式挡墙的作用[J].中国公路学报,2018,31(2): 171—180.

- [13] 张颖钧.三向胀缩特性仪的研制[J].路基工程,1990(5):53—58.
- [14] 谢云,陈正汉,孙树国,等.重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究[J].岩土力学,2007,28(8):1636—1642.
- [15] 秦冰,陈正汉,刘月妙,等.高庙子膨润土 GMZ001 三向膨胀力特性研究[J].岩土工程学报,2009,31(5):756—763.
- [16] 池泽成,陈善雄,周哲,等.合肥重塑膨胀土三向膨胀力试验研究[J].岩土力学,2017,38(增刊 1):381—386.

收稿日期:2021—11—19