

# 冻融循环作用下水泥改良膨胀土力学性能和胀缩特性研究

何艳春, 成岗

(湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**为获取冻融循环作用下水泥改良膨胀土的力学性能及胀缩特性,开展水泥改良膨胀土体积变化率、膨胀试验及无侧限抗压强度试验研究,分析不同养护龄期、不同冻融循环次数下改良膨胀土体积变化率、自有膨胀率及无侧限抗压强度的演化规律,并通过扫描电镜(SEM)试验分析改良前后及 15 次冻融循环后改良膨胀土微观结构的变化。结果表明,冻结温度越低,水泥改良膨胀土的体积变化率与自有膨胀率越大;养护龄期越长,水泥改良膨胀土的体积变化率、自有膨胀率越小,无侧限抗压强度越大;同一养护龄期下,随着冻融循环次数增加,水泥改良膨胀土的体积变化率、自有膨胀率及无侧限抗压强度均明显减小。水化作用与填充作用是水泥改善膨胀土膨胀性能及力学性能的主要原因,水泥改良膨胀土内部微观孔隙在冻融循环作用下贯通融合成微观裂隙并急剧发育,是冻融循环作用下改良膨胀土无侧限抗压强度减小的根本原因。

**关键词:**公路;膨胀土;胀缩特性;力学性能;冻融循环;微观结构;裂隙扩展

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)03-0061-05

膨胀土的黏土矿物含量高,是一类具有“吸水膨胀、失水收缩”特性的特殊土<sup>[1-3]</sup>。工程实践表明,膨胀土受环境的影响较大,尤其在中国西北高寒地区,受冻融循环影响,膨胀土路基常发生开裂、承载力下降、失稳等灾害,严重制约该地区高速公路的修建<sup>[4-5]</sup>。因此,需对膨胀土进行处理后再将其用于路基填筑。

工程中常采用化学改良方式对膨胀土路基进行处理<sup>[6]</sup>。朱自强等的研究表明石灰或水泥可有效提高膨胀土的黏结性能与稳定性<sup>[7]</sup>。边加敏研究湿化幅度、应力水平和应力历史对素膨胀土、石灰改良土和水泥改良土累积应变特性的影响,发现改良膨胀土累积应变基本表现为稳定型,水泥改良土的抗湿化变形能力比石灰改良土更强<sup>[8]</sup>。王佩等开展水泥改性膨胀土基本特性试验,分析了改性膨胀土无侧限抗压强度及收缩特性,并通过 X 线衍射、扫描电镜(SEM)等试验揭示了水泥改性膨胀土的作用机理<sup>[9]</sup>。上述研究未考虑外部环境对改良膨胀土的影响。膨胀土受环境影响大,在高寒地区应着重考虑冻融循环对改良膨胀土的影响<sup>[10-12]</sup>。吴燕开等开展冻融循环下钢渣粉水泥改良膨胀土室内试验,发现在冻融循环作用下,改良后膨胀土与未改良膨胀土相比,其力学性能和胀缩特性明显改善<sup>[13]</sup>。宗佳

敏等利用废旧轮胎颗粒改性膨胀土,分析了冻融循环对改性膨胀土无侧限抗压强度的影响<sup>[14]</sup>。王东星等分析了干湿-冻融循环作用下水泥改性膨胀土的强度特性与微观结构随初始含水率、水泥掺量、干湿循环和冻融循环次数的变化规律<sup>[15]</sup>。上述研究多分析冻融循环对改良膨胀土宏观力学特性和胀缩性能的影响,对冻融循环作用下改良膨胀土微观结构变化的分析不够深入。本文利用水泥改良膨胀土,开展不同冻融循环次数、养护龄期下水泥改良膨胀土无侧限抗压强度试验及膨胀率试验,分析不同养护龄期和冻融循环次数下改良膨胀土力学性能及胀缩特性的变化规律,并采用 SEM 分析冻融循环作用下水泥改良膨胀土微观结构的演变规律,揭示其损伤机理。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验土取自广西壮族自治区百色市南郊某高速公路边坡。将原状膨胀土自然风干,依据 JTG 3430—2020《公路工程土工试验规程》<sup>[16]</sup>测试其基本物理力学参数,结果见表 1。由表 1 可知:试验土的液限为 59%,塑限为 27.1%,塑性指数为 31.9%,自由膨胀率为 63.6%,为中等膨胀土。

表 1 试验所用膨胀土的基本物理性质

试验项目	试验结果
液限/%	59
塑限/%	27.1
塑性指数/%	31.9
自由膨胀率/%	63.6
最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.62
最优含水率/%	26.4
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.35

试验所用水泥为山东省淄博市山水牌普通硅酸盐水泥,其基本化学成分及其含量见表 2。

表 2 水泥的基本化学成分

化学成分	含量/%	化学成分	含量/%
CaO	65.14	FeO	0.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.13	SO <sub>3</sub>	2.70
SiO <sub>2</sub>	22.07	Na <sub>2</sub> O	0.15
MgO	4.30		

## 1.2 试验方案

为分析水泥改良膨胀土的改性效果,开展冻融循环作用下 4%、8% 水泥改良膨胀土与原状膨胀土胀缩特性及无侧限抗压强度试验,试验方案见表 3。

表 3 试验方案

试验条件	试验方案
冻结温度/℃	-2, -6, -10
水泥掺量/%	0, 4, 8
养护龄期/d	3, 7, 14, 28, 60
冻融循环次数/次	0, 1, 2, ..., 15

## 1.3 试验流程及测试方法

### 1.3.1 试验流程

(1) 试样制备。按表 3 中水泥掺量采用静压法制备尺寸为  $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ cm}$  的圆柱形试样,试样干密度为  $1.6\text{ g/cm}^3$ ,含水率为 26%。试样制备完成后,将其置于标准养护箱中分别养护 3 d、7 d、14 d、28 d、60 d<sup>[17]</sup>。

(2) 冻融循环。养护至相应龄期后,取出试样并用保鲜膜包裹以防水分流失。将包裹好的试样分别置于温度为 -2℃、-6℃、-10℃ 的低温试验箱中冷冻 12 h 后,将试样取出,置于室温(20℃)下融

化 12 h,此记为 1 次冻融循环。重复上述操作,直至试样冻融循环 15 次,每次冻融循环后进行体积变化率、自由膨胀率、无侧限抗压强度测试。

### 1.3.2 试验内容

(1) 体积变化率。在每次冷冻和融化结束后用游标卡尺测量试样的直径与高度。为减小试验误差,每个试样直径与高度分别取 7 处、5 处进行测量,取测量结果的平均值作为试样的最终直径与高度。按式(1)、式(2)计算每次冷冻和融化结束时试样的体积变化率。

$$\delta_{Fn} = \frac{V_{Fn} - V_0}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\delta_{Tn} = \frac{V_{Tn} - V_0}{V_0} \times 100 \quad (2)$$

式中: $\delta_{Fn}$ 、 $\delta_{Tn}$  分别为试样第  $n$  次冷冻和融化后的体积变化率; $V_{Fn}$ 、 $V_{Tn}$  分别为试样第  $n$  次冷冻和融化后的体积; $V_0$  为试样最初体积。

(2) 自由膨胀率。将改良膨胀土与原状膨胀土试样碾碎后过 0.5 mm 筛,按照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》<sup>[18]</sup>测定其自由膨胀率。计算公式如下:

$$F_s = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100 \quad (3)$$

式中: $F_s$  为自由膨胀率; $V_1$  为试样在 5% 浓度 NaCl 溶液中膨胀某一时间的体积(mL); $V_0$  为试样原体积(mL)。

(3) 无侧限抗压强度。利用 WAW-1000B 型电液伺服液压万能试验机对冻融循环作用下改良膨胀土及原状膨胀土试样进行无侧限抗压强度试验,加载应变速率为 1.25%。

(4) SEM 测试。利用 SEM 观察水泥改良膨胀土、原状膨胀土及 15 次冻融循环后改良膨胀土微观结构面的颗粒、孔隙等变化,电压为 10 kV。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 冻融循环次数与体积变化率之间的关系

图 1 为冻融循环作用下原状膨胀土与水泥改良膨胀土体积变化率的变化。由图 1 可知:

(1) 原状膨胀土受冻融循环的影响较大,无论是冷冻和融化,其体积变化率的变化均明显增长。在冻融循环时,原状膨胀土试样的体积变化率随冻融循环次数的增加快速增长,之后趋于稳定。以原状膨胀土在冻结温度为 -10℃ 下冻融循环为例,前

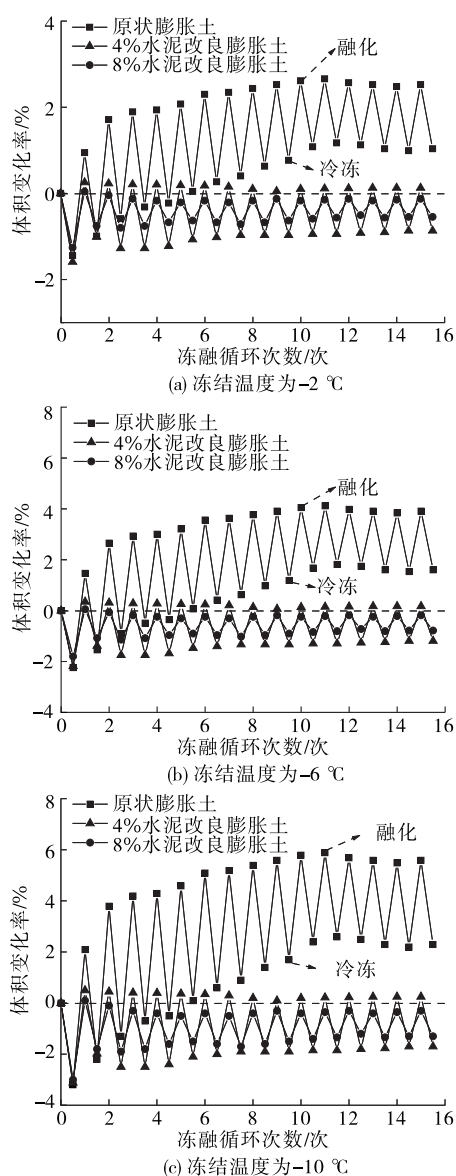


图1 冻融循环作用下原状膨胀土和水泥改良膨胀土的体积变化率

5次冻融循环原状膨胀土表现出明显的冻缩融胀现象;随着冻融循环的持续,原状膨胀土的体积变化率只出现膨胀;12次冻融循环后,原状膨胀土冷冻和融化体积变化率差值趋于稳定。究其原因,前5次冻融循环时,冻结过程中,膨胀土孔隙中的水冻结成冰,但由于黏粒表面失水,其体积收缩,黏粒失水体积收缩量大于水变成冰的体积增大量,故出现冻缩现象。融化过程时,膨胀土中的冰融化成水,体积减小,但由于膨胀土黏粒吸水膨胀,膨胀量大于收缩量,故出现融胀现象。融胀量大于冻缩量时,体积开始增大。第12次冻融循环后,原状膨胀土的冻缩量与融胀量均趋于稳定。在整个冻融循环过程中,原

状膨胀土的体积变化率差值在第2次冻融时达到最大,为6%左右,最终体积变化率差值稳定在3.6%左右。冻结温度为 $-10^{\circ}\text{C}$ 时其体积变化率最大,冻结温度为 $-2^{\circ}\text{C}$ 时其体积变化率最小。这主要是由于更低温时,试样的冻缩融胀更剧烈,给试样结构造成的损伤更大,更低温的冻融循环带来的体积变形更大。

(2) 冻结温度一定时,水泥改良膨胀土的体积变化率随水泥掺量的增加而减小。以冻结温度 $-10^{\circ}\text{C}$ 下冻融循环为例,水泥掺量为4%时,改良膨胀土的体积变化率为 $-3.12\%\sim 0.5\%$ ,远小于原状膨胀土,且在融化条件下呈现一定膨胀,在冷冻条件下产生收缩。水泥掺量为8%时,改良膨胀土的体积变化率为 $-3\%\sim 0.1\%$ ,且除第1次冻融循环时出现冻缩融胀现象外,其余冻融循环次数下试样均表现出明显的收缩现象。水泥发生水化反应产生水化胶凝物,使膨胀土颗粒变得致密,同时土颗粒间的吸附力增大,从而使土体在冻融循环后出现体积收缩现象。低掺量水泥改良膨胀土中水化胶凝物较少,水泥的体积变化率明显减小,但在融化条件下仍出现一定膨胀。

## 2.2 不同养护龄期下改良膨胀土的自由膨胀率

水泥生成水化产物需要一定的反应时间。王佩等的研究表明,对于水泥改良膨胀土,养护龄期极大影响其改良效果<sup>[9,19]</sup>。因此,探讨不同养护龄期下水泥改良膨胀土的自由膨胀率十分必要。限于篇幅,仅以8%水泥掺量改良膨胀土的自由膨胀率(见图2)为例进行分析。由图2可知:

(1) 不同养护龄期下水泥改良膨胀土的最大自由膨胀率均小于10%,与原状膨胀土初始自由膨胀率63.6%相比,自由膨胀率显著降低。表明水泥对膨胀土的改良非常有效。

(2) 改良膨胀土的自由膨胀率随养护龄期的增加而减小。水泥水化产生的胶凝材料是造成水泥改良膨胀土自由膨胀率下降的主要原因。随着养护龄期的增加,水化产物不断增加,试样内部孔隙被填充,孔隙水含量降低,内部变密实,试样受冻融循环的影响减小。

(3) 改良膨胀土的自由膨胀率随冻融循环次数的增加而减小,表明冻融循环过程加速了水泥的水化进程,使改良膨胀土内部既发生水泥水化的增强作用,又发生冻融侵蚀破坏作用。但随着冻融循环次数的持续增加,试样中水泥水化完成,试样的自由

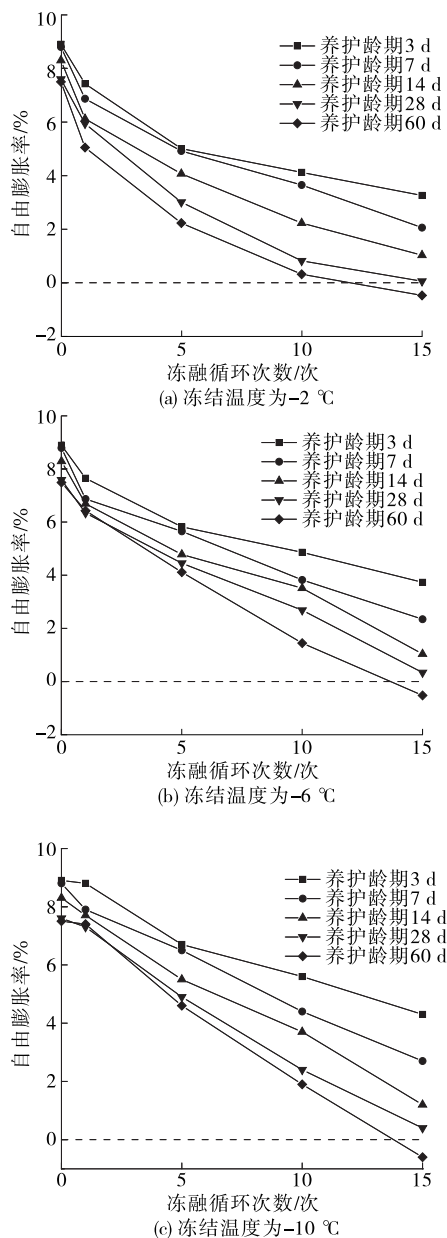


图2 不同养护龄期下8%水泥掺量改良膨胀土的自由膨胀率

膨胀率以冻缩膨胀为主,故养护60 d、试样经历15次冻融循环后其自由膨胀率小于零。

(4) 对比改良膨胀土在不同冻结温度下的自由膨胀率,冻结温度越低,自由膨胀率越大。这主要是由于更低温度冻结对改良膨胀土内部结构的冻融侵蚀破坏作用更大,改良膨胀土在低温冻结时自由膨胀率更大。

### 2.3 无侧限抗压强度

冻融作用下膨胀土内部微观结构发生不可逆损伤,势必对其力学性能产生影响。根据前文的分析,水泥改良膨胀土在 $-10^{\circ}\text{C}$ 下冻结存在最大体积变

化率及自由膨胀率。限于篇幅,仅以8%水泥掺量改良膨胀土在 $-10^{\circ}\text{C}$ 冻融循环条件下不同养护龄期时的无侧限抗压强度(见图3)为例,分析冻融循环作用对水泥改良膨胀土无侧限抗压强度的损伤效应。由图3可知:

(1) 原状膨胀土的初始无侧限抗压强度仅为432 kPa,随着冻融循环次数的增加,其无侧限抗压强度显著减小,经历15次冻融循环后,其无侧限抗压强度稳定在107 kPa左右。其原因主要是冻融循环过程对原状膨胀土试样微观结构产生显著的损伤作用,孔隙率增大,黏粒间的胶结作用减小,其力学性能显著下降。

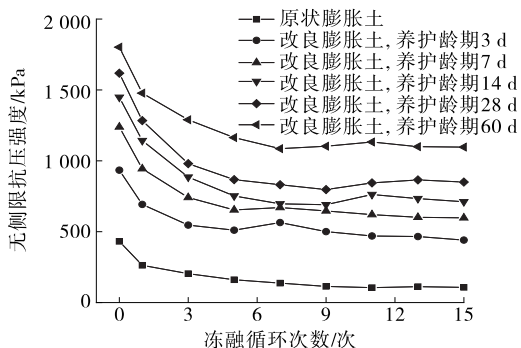


图3 不同养护龄期下8%水泥掺量改良膨胀土的无侧限抗压强度

(2) 与原状膨胀土相比,水泥改良膨胀土的无侧限抗压强度显著增长,且养护龄期越长,试样在经历相同冻融循环次数时的强度越大,表明试样养护时间越长,其抵抗冻融循环损伤的能力越强。这主要是由于水泥水化反应是一个缓慢的过程,养护龄期越长,产生的水化产物越多,试样内部越密实,力学性能越强。

(3) 随着冻融循环次数的增加,水泥改良膨胀土的无侧限抗压强度减小并最终趋于稳定,变化趋势与原状膨胀土相似,但改良膨胀土的无侧限抗压强度远大于原状膨胀土。表明水泥水化产生的水化产物可显著改善膨胀土的力学性能。

### 2.4 微观结构分析

图4为原状膨胀土与水泥改良膨胀土在1 000倍电镜下的SEM图像。

从图4(a)可以看出:原状膨胀土主要以片状颗粒为主,且片状颗粒主要为线面接触或面面接触,颗粒间胶结能力较弱,结构较松散,内部孔隙较多。

从图4(b)可以看出:水泥改良膨胀土颗粒团聚在一起形成大颗粒,且颗粒间胶结能力强,水泥水化



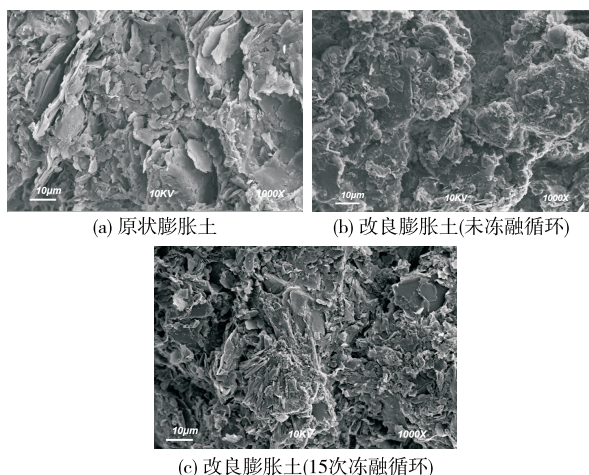


图4 原状膨胀土、改良膨胀土的SEM图像

产物明显。与原状膨胀土相比,水泥改良膨胀土内部孔隙明显减小,颗粒胶结明显。一方面,水泥水化产生胶结产物使膨胀土颗粒胶结在一起,增强颗粒间黏聚力,并约束膨胀土颗粒,使其力学性能增强,冻缩融胀性能减弱;另一方面,水泥生成的水化产物填充膨胀土中微观孔隙,增强膨胀土的密实度,其孔隙率减小、孔隙水减少,冻缩融胀性能进一步减弱。

从图4(c)可以看出:与未冻融循环改良膨胀土相比,15次冻融循环后改良膨胀土中水泥水化产物明显增多,但内部出现裂隙。这是由于在冻融循环过程中,膨胀土颗粒冻缩融胀造成其内部孔隙率逐渐增大,当相邻两个微观孔隙出现贯通融合时即产生微观裂隙;在融化过程中,自由水在微观裂隙中聚集,并发生渗流,减小了颗粒间的胶结作用;在冻结过程中,微观裂隙中水凝固成冰,体积增大,向裂隙周边施加一个膨胀力,而膨胀土颗粒收缩形成一个收缩力,两种力共同作用下裂隙急剧发育,导致其力学性能减弱。

### 3 结论

本文开展不同冻融循环次数、不同养护龄期下水泥改良膨胀土无侧限抗压强度试验及膨胀率试验,分析改良膨胀土力学性能及胀缩特性的变化规律,并通过改良前后改良膨胀土的SEM图像揭示水泥改良膨胀土微观结构的变化。主要结论如下:

(1) 与原状膨胀土相比,水泥改良膨胀土由于水泥水化产生胶凝物质,减小了土体的微观孔隙,增强了其密实度,融化与冻结过程中其体积变化率差值明显减小。

(2) 更低温时,膨胀土的冻缩融胀更剧烈,对膨

胀土结构造成的损伤更大,故冻结温度越低,水泥改良膨胀土的体积变化率与自有膨胀率越大。

(3) 水泥可有效改良膨胀土的自由膨胀率,养护龄期越长,水泥改良膨胀土的自由膨胀率越小;冻融循环次数越大,自由膨胀率越小。

(4) 水泥改良膨胀土的无侧限抗压强度远大于原状膨胀土,养护龄期越长,其无侧限抗压强度越大,受冻融循环的影响越小,抵抗冻融循环的能力越强。

(5) 水泥主要是通过水化作用与填充作用改良膨胀土的膨胀性能及力学性能。水泥改良膨胀土内部微观孔隙贯通融合进而产生微观裂隙,且微观裂隙在冻融循环作用下急剧发育,从而导致其无侧限抗压强度减小。

### 参考文献:

- [1] 徐丽丽,刘丽佳,徐昭巍,等.季节冻土区膨胀土边坡冻害防护综合技术[J].岩土工程学报,2016,38(增刊1):216—220.
- [2] 范峥,李金明,何李.降雨条件下膨胀变形对膨胀土边坡暂态饱和区的影响研究[J].公路与汽运,2021(6):69—73.
- [3] 邓鹏,王桂尧,梅智鹏,等.根系分布对膨胀土干缩开裂影响试验研究[J].交通科学与工程,2021,37(1):19—25.
- [4] 王也,王建磊,鲁洋,等.南阳膨胀土冻融循环后的土水特征试验研究[J].长江科学院院报,2019,36(2):91—96.
- [5] 陈永,黄英豪,朱洵,等.冻融循环对膨胀土变形和力学特性的影响研究[J].水利水电工程学报,2021(5):112—119.
- [6] 余梦,张家铭,周杨,等.MICP技术改性膨胀土试验研究[J].长江科学院院报,2021,38(5):103—108+122.
- [7] 朱自强,刘雨,陈俊桦.干湿循环作用对水泥改良泥质板岩土路基动力响应影响的模型试验[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(10):2510—2519.
- [8] 边加敏.石灰改良膨胀土重塑后抗剪强度特性及应用[J].长江科学院院报,2020,37(10):103—109.
- [9] 王佩,宋新江,徐海波,等.水泥改性膨胀土基本特性试验[J].水利水电科技进展,2021,41(3):56—60.
- [10] 许雷,鲁洋,薛洋,等.冻融循环下水泥改性膨胀土物理力学特性研究[J].长江科学院院报,2017,34(4):87—91+103.
- [11] 王亮亮,丁志平.不同湿度膨胀土无侧限抗压强度随冻融循环的演化规律[J].公路交通科技,2021,38(5):18—22+30.

(下转第72页)

## 5 结论

(1) 溶洞顶板的矢高与形态对顶板安全厚度的影响显著。顶板形态为抛物线拱时,不同矢高对应的顶板最小安全厚度最大相差 500%;顶板形态为圆拱时相差 114%。在矢高相同的情况下,两种形态溶洞顶板的最小安全厚度差别巨大,圆拱所需最小安全厚度为抛物拱的 2.8 倍左右。

(2) 溶洞顶板所需最小安全厚度随溶洞跨度与上覆土层厚度的增大而增大,实际工程中要尽量查明溶洞的空间形态与岩土体的土层参数,使评价结果更切合实际。

(3) 顶板厚度一定时,随着溶洞跨度、上覆土层厚度的增大,溶洞顶板极限承载力不同程度降低;石灰岩抗剪强度参数较低时,矢高的变化对顶板极限承载力的影响较明显。

### 参考文献:

- [1] 陈明晓.岩溶覆盖层塌陷的原因分析及其半定量预测[J].岩石力学与工程学报,2002,21(2):285—289.
- [2] 赵明华,陈昌富,曹文贵,等.嵌岩桩桩端岩层抗冲切安全厚度研究[J].湘潭矿业学院学报,2003,118(4):41—45.
- [3] 柏华军.考虑溶洞顶板自重时桩端持力岩层安全厚度计算方法[J].岩土力学,2016,37(10):2945—2952.

- [4] 刘之葵,梁金城,朱寿增,等.岩溶区含溶洞岩石地基稳定性分析[J].岩土工程学报,2003,25(5):629—633.
- [5] 张永杰,邓俊强,杨兴山,等.考虑溶洞空间形态的岩溶桩基稳定性分析方法[J].中国公路学报,2019,32(1):37—45.
- [6] 黎斌,范秋雁,秦凤荣.岩溶地区溶洞顶板稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4):532—536.
- [7] 阳军生,张军,张起森,等.溶洞上方圆形基础地基极限承载力有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):296—301.
- [8] 何忠明,刘森峙,胡庆国,等.基于尖点突变理论的路堤填筑下伏溶洞顶板稳定性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(7):2456—2462.
- [9] 程晔,赵明华,曹文贵.基桩下溶洞顶板稳定性评价的强度折减有限元法[J].岩土工程学报,2005,27(1):38—41.
- [10] 赵明华,唐威力,肖尧,等.考虑厚跨比的基桩下伏溶洞顶板冲切特性试验研究[J].岩土力学,2018,39(4):1159—1167.
- [11] 张慧乐,张智浩,王述红,等.岩溶区嵌岩桩的试验研究与分析[J].土木工程学报,2013,46(1):92—103.
- [12] 黄明,付俊杰,陈福全,等.桩端溶洞顶板的破坏特征试验与理论计算模型研究[J].工程力学,2018,35(10):172—182.

收稿日期:2022-05-09

\*\*\*\*\*

(上接第 65 页)

- [12] 黄英豪,陈永,朱洵,等.相变材料改良膨胀土冻融性能试验研究及微观机理分析[J].岩土工程学报,2021,43(11):1994—2002.
- [13] 吴燕开,苗盛瑶,李鑫,等.冻融循环下钢渣粉水泥改良膨胀土室内试验研究[J].工程地质学报,2021,29(3):851—861.
- [14] 宗佳敏,宋迎俊,鲁洋,等.冻融循环下废旧轮胎颗粒改性膨胀土无侧限抗压强度试验[J].长江科学院院报,2017,34(9):110—114.
- [15] 王东星,张子伟,王协群,等.干湿—冻融循环作用下水泥改性膨胀土的路用性能与微观机制[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):306—316.

- [16] 交通运输部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [17] 朱云长,璩继立,孙飞.氯化钙溶液浸泡下压实水泥改性膨胀土的膨胀特性[J].建筑科学,2019,35(1):51—56.
- [18] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [19] 曾平江.冻融作用下水泥改良盐渍土物理力学性质研究[J].公路与汽运,2020(4):75—78+84.

收稿日期:2022-01-19