

文章编号: 1005-0523(2024)04-0030-06



基于大型隧道围岩相似材料的配制方法研究

王渭萍¹, 刘俊², 孙洋³, 丁海滨², 戴红涛³, 童立红²

(1. 江西省交通投资集团项目建设管理公司, 江西 南昌 330000; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 3. 江西省交通科学研究院, 江西 南昌 330052)

摘要:【目的】通过分析国内研究成果调研公路隧道大型模型试验的相似材料配比, 针对大型隧道围岩相似材料的配制方法展开研究。研究出一种由重晶石粉、石英砂、白水泥、铁粉、硅油和水组成的液固耦合相似材料。【方法】通过室内实验探究不同配比对材料各种物理性质和水理性的影响, 并且确定了液固耦合相似材料的具体配比结果。【结果】实验结果表明, 在材料成分含量不变的情况下, 白水泥的含量增加会大幅度降低材料的渗透系数, 胶结剂会明显地影响材料的弹性模量和抗压强度。此外, 随着材料中重晶石粉与白水泥的比例逐渐增加, 试验材料的抗压强度会逐渐提高, 但是当材料中重晶石粉与白水泥的含量达到一定含量时, 材料的抗压强度可能略微降低。在一定范围内增加重晶石粉与白水泥的比例可以提高材料的弹性模量。抗剪强度受硅油影响明显。【结论】液固耦合相似材料能够模拟不同强度具有不同渗透性的岩体材料, 是一种理想的相似模拟材料。

关键词: 材料配比; 影响因素; 隧道围岩; 新型液固耦合; 力学性质

中图分类号: TU452; U458.3

文献标志码: A

本文引用格式: 王渭萍, 刘俊, 孙洋, 等. 基于大型隧道围岩相似材料的配制方法研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(4): 30-35.

Research on Preparation Method of Similar Materials for Large Tunnel Surrounding Rock

Wang Weiping¹, Liu Jun², Sun Yang³, Ding Haibin², Dai Hongtao³, Tong Lihong²

(1. Jiangxi Transportation Investment Group Project Construction Management Company, Nanchang 330000, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

3. Jiangxi Transportation Science Research Institute, Nanchang 330052, China)

Abstract: 【Objective】Based on the data of similar material proportions in large-scale model tests of highway tunnels, research on the preparation method of similar materials for large tunnel surrounding rock. Develop a liquid-solid coupling similar material composed of barite powder, quartz sand, white cement, iron powder, silicone oil, and water. 【Method】Exploring the influence of different ratios on various physical properties and water rationality of materials through indoor experiments, and the specific ratio results of liquid-solid coupling similar materials were determined. 【Result】The experimental results indicate that an increase in the content of white cement will significantly reduce the permeability coefficient of the material, while the binder will significantly affect the elastic modulus and compressive strength of the material, while the content of white cement remains un-

收稿日期: 2023-10-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52238009); 江西省交通运输厅重大研发专项(2022Z0001, 2022Z0002); 江西省重点研发揭榜挂帅项目(20223BBG71018)

changed. In addition, as the proportion of barite powder to white cement in the material gradually increases, the compressive strength of the test material will gradually increase. However, when the content of barite powder and white cement in the material reaches a certain level, the compressive strength of the material may slightly decrease. Increasing the ratio of barite powder to white cement within a certain range can improve the elastic modulus of the material. The shear strength is significantly affected by silicone oil. **【Conclusion】** Liquid solid coupling similar materials can simulate rock mass materials with different strengths and permeability, making them an ideal similar simulation material.

Key words: material ratio; influencing factors; tunnel surrounding rock; new type of fluid structure coupling; mechanical property

Citation format: WANG W P, LIU J, SUN Y, et al. Research on preparation method of similar materials for large tunnel surrounding rock[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 30–35.

【研究意义】该研究对于隧道围岩领域具有重要参考价值,通过研究确定了一种新型液固耦合相似材料的具体配比,能够更准确地模拟实际隧道围岩的物理和力学特性,从而提高大型模型试验的准确性和预测能力;在节约成本和资源方面,通过优化材料配比,不仅可以节约成本,还可以减少不必要的材料浪费和环境污染,符合可持续发展的理念;在技术创新领域,该研究推动了隧道工程技术的发展,为解决复杂地质条件下的隧道工程问题提供了新的思路和方法。总之,该研究对于提升隧道工程的安全性、经济性和环境友好性具有重要的理论和实践意义。

【研究进展】随着相似理论及技术的发展,董金玉等^[1]学者通过选取不同的材料和配比模拟各种类型的岩石。杨昌艳等^[2]选取重晶石粉、石膏、细砂、水模拟软弱围岩材料。任松等^[3-4]采用盐和铁粉作为试验骨料,环氧树脂和乙二胺等作为黏合剂,制备了用于模拟盐岩蠕变的相似材料配比,分析了不同应力状态和温度对盐岩蠕变特性的影响。王汉鹏等^[5]学者研究了以水泥、石膏与碳酸钙作为胶结剂,以重晶石与石英砂作为骨料做成相似材料,得出快速配比方法。张强勇等^[6]学者通过一系列试验,最终得出了以石英砂、铁粉、重晶石粉、石膏粉为试验骨料,油树脂及乙醇为胶凝剂,此种实验方案具备高密度,材料抗压强度及弹性模量低等一系列特殊材料特性。

李术才等^[7]学者通过大量的配比试验,他们以砂、重晶石粉、滑石粉为骨料,水泥、凡士林为胶结

剂,硅油作为调节剂研制成流-固耦合相似材料,并成功地应用于青岛胶州湾海底隧道地质力学模型试验,为相似材料在实际工程中的应用提供了参考。尹相杰^[8]考虑高应力及高水压作用下的液固耦合准则,根据液固耦合相似准则,研制出了符合液固耦合相似材料。段少龙^[9]做了海底隧道断层围岩塌方失稳判据及灾变演化规律研究。相似材料模拟是一种常用的研究方法,它通过模拟真实围岩的物理和力学特性,给地下隧道工程提供了很多理论参考。

【创新特色】本文在前人研究的基础上,利用正交试验设计方法进一步对液固耦合相似材料进行研究,通过大量试验配置了一种价格合理、制作简便且满足隧道围岩力学和水理性质的新型液固耦合相似材料。**【关键问题】**研制出能够模拟大型模型试验的相似材料,并利用该相似材料开展模型试验,为隧道突水突泥等灾害方面提供参考。

1 相似材料试件的制作

1.1 原材料的选取

根据现阶段已有的研究,液固耦合材料可以按照功能划分为集料,胶凝材料和有机化材料三个部分。其中,集料和胶凝材料在材料的框架里起着主要的作用,而有机化材料在框架中起着次要的辅助作用^[10]。

在隧道模型试验中,常用的相似材料主要由以下组成成分、抗压强度和主要特点构成,如表1所示。在软弱围岩中的液固耦合材料一般由这些材料

表1 模拟材料

Tab.1 Simulated materials

| Simulation materials | Aggregate | Cementing agent | Compressive strength/MPa |
|----------------------|--|-----------------------------|--------------------------|
| Low intensity | Quartz, sand, iron powder, barite powder | Ceresin wax, gypsum, cement | 0.30~0.60 |
| Medial | Quartz sand, barite powder, iron powder | Rosin | 0.93~1.33 |
| High strength | Sand and gypsum | Cement, rosin, alcohol | 3.11~3.44 |

组成,骨料主要有铁粉、石英砂、重晶石粉等^[11];胶结材料主要有石灰、石膏、白水泥、甘油、树脂等^[12]。骨料按粒径通常分为粗骨料和细骨料,粗骨料通常是指粒径大于4.75 mm的岩石材料,一般为碎石、卵石;细骨料通常是指粒径小于4.75 mm的材料,比如河砂、矿砂、海砂等,选择石英砂、精铁粉和重晶石粉作为骨料。精铁粉具有较大的比重,这意味着在相似材料中使用精铁粉作为骨料可以模拟原材料的重量和密度,精铁粉的质地坚硬,使得相似材料具有一定的强度和稳定性,能够承受一定的应力和变形^[13]。

在深长隧道^[14-18]中石英砂的选取主要是考虑到它硬度比较大能够有效提高材料的抗压强度和耐久性,石英砂表面光滑且细小,能够减小材料内部的空隙,石英砂还具有良好的化学稳定性。选取重晶石粉主要考虑的是它能增强材料的强度和硬度改善耐久性。胶结材料选择白水泥和水,白水泥作为日常生活中比较常见的黏结材黏结具备一定的附着力和黏性。硅油是一种无毒且环保的材料,具备优良的剪切安定性,在低温下可长期稳定存在,本文选择硅油作为调节剂。

1.2 试样的制备

原材料有石英砂、重晶石粉、细铁粉、白水泥、硅油和水。本实验采用直径为0.15~0.21 mm的石英砂,重晶石粉的粒径为30~48 μm ,细铁粉的粒度为10~44 μm ,白水泥的型号是AL-88。原材料有石英砂、重晶石粉、细铁粉、白水泥、硅油和水。在实验设计中以骨料、凝结材料和硅油作为正交实验的3个因素,每个因素设置3个水平,具体相似材料配比方案见表2。

将配比好的所有材料倒入搅拌机中进行搅拌

表2 相似材料配比方案

Tab.2 Similar material proportioning scheme

| Group | Quartz sand | Barite | Iron powder | White cement | Water | Oil |
|-------|-------------|--------|-------------|--------------|-------|------|
| 1 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.50 | 0.20 | 0.10 |
| 2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.72 | 0.29 | 0.10 |
| 3 | 1.33 | 1.33 | 1.33 | 0.93 | 0.37 | 0.10 |
| 4 | 1.33 | 1.33 | 1.33 | 0.72 | 0.28 | 0.20 |
| 5 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.5 | 0.20 | 0.20 |
| 6 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.93 | 0.37 | 0.20 |
| 7 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | 0.72 | 0.72 | 0.30 |
| 8 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.93 | 0.37 | 0.30 |
| 9 | 1.33 | 1.33 | 1.33 | 0.5 | 0.20 | 0.30 |

混合,增强拌合料的流动性,便于试块的浇筑,搅拌15 min即可装模,模具是直径50 mm,高100 mm的圆柱形,在装模之前,圆柱形模具里面涂一层凡士林方便后续脱模,然后将拌料装入模具用击实锤进行分层压实。养护阶段试将圆柱形试块放在室内14 d,用布盖住浇水养护即可得到试样。最终通过室内试验选取组别1、组别5、组别9作为最优相似材料配比方案(方案1、方案5、方案9)。

2 影响相似材料性质的分析

2.1 渗透系数影响因素分析

相似材料的水理性质中,渗透系数是一个重要的特征指标。渗透系数描述了材料的渗透性能,即水分通过材料的能力。在液固耦合相似材料的试验中,假设实验材料的渗透性较小,水的流量也会较小,导致水位难以控制。为了解决这个问题,采用GDS空心圆柱扭剪仪进行渗透系数的测试。相似材料的渗透性主要与胶结剂的含量有关。图1为白水泥对渗透系数影响的关系曲线,3条曲线分别代表方案1、方案5、方案9。其中方案1白水泥的含量越大,渗透系数越小,当水泥含量为14%时,相似材料的渗透系数为 4.8×10^{-6} ,白水泥含量继续增大,直至达到32%时,相似材料的渗透系数下降为 3.7×10^{-7} 。从图1可以看出方案1的渗透系数小于方案5小于方案9,随着水泥的含量越大,渗透系数越小,但当水泥含量达到28%时,方案1、方案5、方案9的渗透系数大小几乎相等。根据以上结果可以看出,材料的渗透性受水泥控制比较明显,符合材料的水理特性。

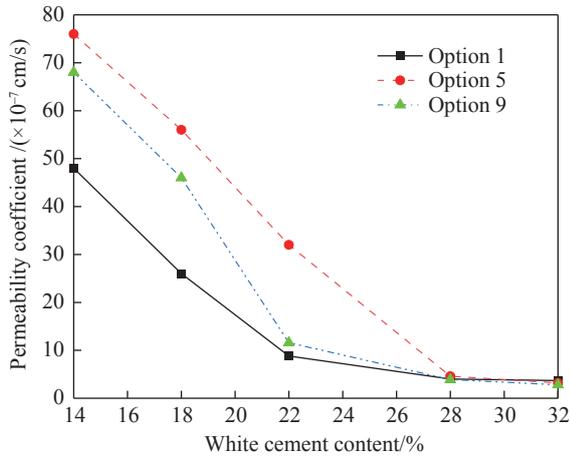


图1 渗透系数随水泥含量变化曲线

Fig. 1 Curve of permeability coefficient changing with cement content

2.2 抗压强度影响因素分析

相似材料的物理性质中,强度性能是一个重要的特征指标。在试验里液固耦合相似材料的组成中,胶结材料对试验的强度性能有一定程度转换,通过调节液固耦合材料中白水泥的比例,会直接影响材料的抗压强度。如图2所示,3条曲线分别代表了方案1、方案5、方案9。进行室内试验时,在液固耦合材料中,随着白水泥在液固耦合材料中的比例增大,液固耦合相似材料的抗压强度会呈现一个先增大后减小趋势,在白水泥含量为36%时出现拐点。由此可以得出,在一定比例的情况下,液固耦合相似材料抗压强度与白水泥含量呈正相关关系。

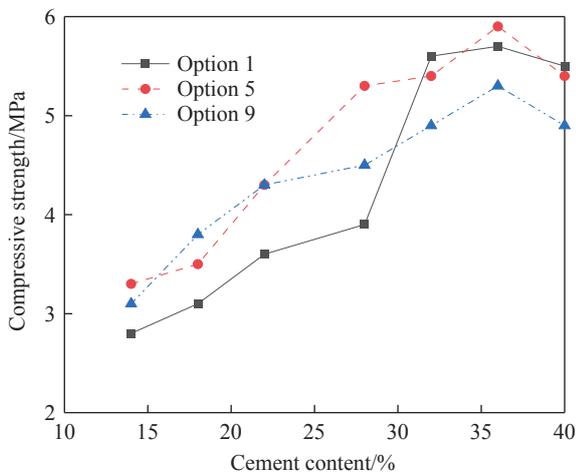


图2 抗压强度随水泥含量变化曲线

Fig. 2 Curve of compressive strength changing with cement content

2.3 弹性模量影响因素分析

相似材料的物理性质中,弹性模量对材料的影响是直接的。在相似材料组分中,骨料对弹性模量的影响非常明显,调节骨料的含量,对相似材料的弹性模量有显著影响。首先能增加相似材料试件强度,进而增加了相似材料的弹性模量。其中相似材料的基本力学试验是通过SANS电液伺服万能试验机进行的。图3为重晶石粉与白水泥的比例对材料抗压强度和弹性模量的影响曲线。从图3中可以看出:随着重晶石粉与白水泥的比例增大,相似材料的弹性模量一直增大;抗压强度先增大后减小,在比例为2.0时出现拐点。由此可以得出,在一定比例的情况下,液固耦合相似材料弹性模量和抗压强度都与重晶石粉与白水泥比例呈正相关关系。

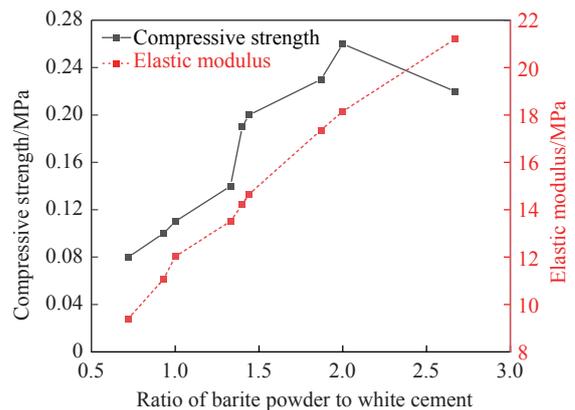


图3 抗压强度随重晶石粉与白水泥比例变化曲线

Fig. 3 Compressive strength changes with the ratio of barite powder to white cement

2.4 抗剪强度影响因素分析

相似材料的物理性质中,抗剪强度是一个重要的调整指标。在相似材料组成中,硅油的占比对相似材料的抗剪强度有着一定的影响。根据如图4所示中的含量变化曲线,相似材料的抗剪强度随着硅油含量的增加呈现先增后减再增加的趋势,在硅油含量为5%出现拐点,超过5%时抗剪强度急剧下降,在8%到达最小值,超过8%时又急剧上升。由此可以看出硅油含量对液固耦合相似材料的抗剪强度有着显著性影响。由图4可以看出,在压力为100 kPa条件下的液固耦合相似材料的抗剪强度是要大于压力在50 kPa时的抗剪强度。

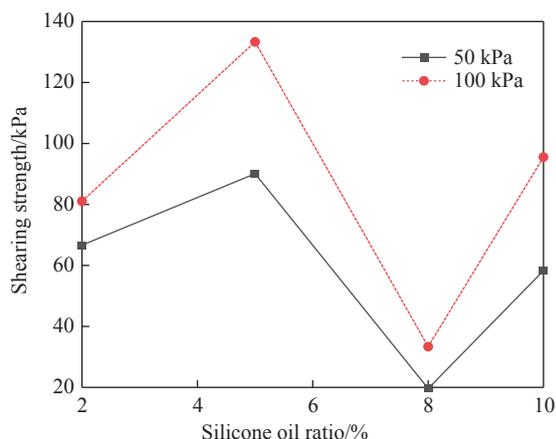


图4 抗剪强度随硅油比例变化曲线

Fig. 4 Curve of shear strength variation with silicone oil ratio

3 结论

本文通过相似材料配比实验,通过实验取得的结果,得出以下结论。

1) 通过配比试验研制出一种能满足模型试验强度、渗透系数等相似要求的新型液固耦合相似材料,该材料由铁粉、石英砂、重晶石粉、白水泥和硅油组成。

2) 白水泥含量对新型液固耦合材料的抗压强度和渗透系数有显著性影响,硅油含量对材料的抗剪强度有显著性影响。

3) 在试验方案1中重晶石粉与白水泥比例的增加,试块的抗压强度和弹性模量都会增加,但当重晶石粉过多时试块材料的抗压强度会减小,试块的弹性模量还是保持增加。

参考文献

- [1] 董金玉, 杨继红, 杨国香, 等. 基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 44-49.
DONG J Y, YANG J H, YANG G X, et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 44-49.
- [2] 杨昌艳, 韦忠跟. 软弱围岩相似材料力学特性实验研究[J]. 露天采矿技术, 2021, 36(4): 14-17.
YANG C Y, WEI Z G. Experimental study on mechanical properties of similar materials in weak surrounding
- [3] 任松, 郭松涛, 姜德义, 等. 盐岩蠕变相似模型及相似材料研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 106-110.
REN S, GUO S T, JIANG D Y, et al. Study of creep similar model and creep equivalent material of salt rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 106-110.
- [4] 史小萌, 刘保国, 肖杰. 水泥和石膏胶结相似材料配比的确定方法, [J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1357-1362.
SHI X M, LIU B G, XIAO J. A method for determining the ratio of similar materials with cement and plaster as bonding agents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1357-1362.
- [5] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(9): 1842-1847.
WANG H P, LI S C, ZHANG Q Y, et al. Development of a new geomechanical similar material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006(9): 1842-1847.
- [6] 张强勇, 李术才, 郭小红, 等. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2008(8): 2126-2130.
ZHANG Q Y, LI S C, GUO X H, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(8): 2126-2130.
- [7] 李术才, 周毅, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1128-1137.
LI S C, ZHOU Y, LI L P, et al. Development and application of a new similar material for underground engineering fluid-solid coupling model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1128-1137.
- [8] 尹相杰. 复杂环境条件下新型流固耦合模型相似材料的研制及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2020.
YI X J. Development and application of new Fluid-solid coupling model similar materials in complex[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [9] 段少龙. 海底隧道断层围岩塌方失稳判据及灾变演化规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
DUAN S L. Study on criterion of collapse and catastrophe evolution of fault surrounding rock of submarine tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [10] 李元海, 杜建明, 刘毅. 隧道工程物理模拟试验技术现状

rock[J]. Open Pit Mining Technology, 2021, 36(4): 14-17.

- 与趋势分析[J]. 隧道建设 2018, 38(1): 10-21.
- LI Y H, DU J M, LIU Y. State-of-art and development trend of physical simulation experiment technology for tunnel engineering[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(1): 10-21.
- [11] 易谊. 近断层脉冲型地震动下隧道动力响应规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- YI Y. Study on dynamic response rules of tunnels under near-fault pulse-type ground motions[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [12] 裴丽. 立交隧道近接施工对既有隧道力学特性的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- PEI L. Study on mechanical properties of existing tunnel caused by adjacent construction of interchange tunnel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [13] 朱冠宇. 超大跨隧道近接增建作用下既有隧道变形特性与控制措施[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- ZHU G Y. Deformation characteristics and control measures of existing tunnels under the action of close-up construction of super-span tunnels[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [14] 石少帅. 深长隧道充填型致灾构造渗透失稳突涌水机理与风险控制及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- SHI S S. Study on seepage failure mechanism and risk control of water inrush induced by filled disaster structure in deep-long tunnel and engineering applications[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [15] 胡南燕, 黄建彬, 罗斌玉, 等. 透明岩石相似材料配比试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 52-61.
- HU N Y, HUANG J B, LUO B Y, et al. Experimental study on mix proportion of transparent similar materials for rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 52-61.
- [16] 崔宁坤, 王军祥, 陈四利, 等. 泥灰岩相似材料配比试验研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(11): 81-88.
- CUI N K, WANG J X, CHEN S L, et al. Experimental study on mix proportion of similar materials of marl[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(11): 81-88.
- [17] 赵祖炜. 基于响应面法的页岩相似材料配比试验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
- ZHAO Z W. Research on proportioning test of shale similar materials based on response surface methodology [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.
- [18] 肖杰. 相似材料模型试验原料选择及配比试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- XIAO J. Selection of similar materials for model test & research on similar material proportioning test[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.



第一作者:王渭萍(1983—),女,高级工程师,研究方向为公路与桥梁。E-mail:270368753@qq.com。



通信作者:孙洋(1988—),男,正高级工程师,博士,研究方向为岩土与地下工程。E-mail:530351828@qq.com。

(责任编辑:姜红贵)