

钢渣-水泥注浆加固全强风化花岗岩试验研究

于金海

(成都农业科技职业学院 城乡建设学院, 四川 成都 611130)

摘要: 为研究钢渣-水泥浆液对全强风化花岗岩的注浆效果, 采用了不同水灰比、不同钢渣含量的浆液对全风化花岗岩进行注浆试验, 测定了浆液凝结时间、浆液扩散半径, 结石体单轴抗压强度, 渗透系数的变化曲线, 初步确定了注浆效果较好的水灰比与钢渣含量范围。后采用 PFC 离散元软件对实际隧道掌子面进行数值模拟, 进一步评价钢渣-水泥对全风化花岗岩的注浆加固效果, 分析最优水灰比与钢渣含量。结果表明: 浆液扩散半径随着钢渣含量上升而减小, 当浆液水灰比 ≥ 1 时, 浆液扩散半径减小幅度不超过 6%; 钢渣含量与水灰比, 共同影响全风化花岗岩结石体的抗压强度, 当水灰比 < 1 时, 钢渣含量上升, 结石体抗压强度先上升后减小, 当水灰比 ≥ 1 时, 钢渣含量上升, 结石体抗压强度不断升高但速率减慢; 结石体的渗透系数随着钢渣含量上升, 先增大而后减小, 且水灰比越小, 下降越明显; 全风化花岗岩地层隧道超前加固中, 采用水灰比 1:1, 钢渣含量为 6% 钢渣-水泥浆液进行注浆, 掌子面的稳定性可以得到有效保障, 研究成果可为类似全风化花岗岩地层的注浆加固工程提供指导。

关键词: 钢渣-水泥浆液; 注浆加固; 抗压强度; 扩散半径; 渗透系数

中图分类号: U451.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)04-0528-09

Study on strongly-fully weathered granite reinforced by steel slag cement grouting

YU Jinhai

(School of Urban and Rural Construction, Chengdu Vocational College of
Agricultural Science and Technology, Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to study the grouting effect of steel slag cement slurry on completely weathered granite, grouting tests were carried out on completely weathered granite with different water cement ratio and steel slag content. The variation curves of grout setting time, slurry diffusion radius, uniaxial compressive strength and permeability coefficient were measured. The range of water cement ratio and steel slag content with better grouting effect was preliminarily determined. After that, PFC discrete element software is used to simulate the actual tunnel face, further evaluate the grouting reinforcement effect of steel slag cement on completely weathered granite, and analyze the optimal water cement ratio and steel slag content. Results show that: the slurry diffusion radius decreases with the increase of steel slag content. When the water cement ratio of slurry is greater than or equal to 1, the decrease range of slurry diffusion radius is not more than 6%; the steel slag content and water cement ratio jointly affect the compressive strength of completely weathered granite stone body. When the water cement ratio is less than 1, the steel slag content increases, and the compressive strength of the stone body increases first and then decreases. With the increase of steel slag content, the permeability coefficient of stone body first increases and then decreases, and the smaller the water cement ratio, the more obvious the decrease; in the advanced reinforcement of tunnel in completely weathered granite stratum, the water cement ratio is 1:1, and the steel slag content is 6%. The stability of tunnel face can be effectively guaranteed by grouting with steel slag cement slurry. The research results can provide guidance for grouting reinforcement projects similar to completely weathered granite stratum.

Key words: Steel slag cement slurry; grouting reinforcement; compressive strength; diffusion radius; permeability coefficient

我国的风化花岗岩地层广泛分布在华南地区^[1], 特别是在云南、湖南、福建、广东和海南等省份最为集中。这些地区气候潮热、降雨丰富, 花岗岩风化程度高, 裂隙发育完全, 雨水可以沿

着节理面向岩体内部深入, 产生崩解, 其强度与稳定性与天然状态下的花岗岩相比大幅降低^[2-3]。因此, 在这些地区隧道开挖时渗水、突泥、塌方等灾害频发^[4-5], 甚至引发地表沉降导致房屋开裂

收稿日期: 2019-09-30

修改稿日期: 2020-07-10

基金项目: 重庆市应用开发计划重点基金资助项目(cstc2014yykfb30003)

第一作者: 于金海(1985—), 男, 讲师, 硕士, 主要从事土木工程施工与项目管理。E-mail: 1563927406@qq.com

等次生灾害^[6], 造成重大经济财产损失与人员伤亡事故。

为了避免上述灾害的产生, 在隧道建设施工中常常采用注浆加固技术对地层进行堵水和加固处理^[7-10]。其中水泥浆液因具有配制简便、操作简单、造价经济等优点, 成为应用最为广泛的一种浆液类型。然而, 研究表明^[11], 单液注浆的水泥浆液易沉降, 终凝时间过长, 结石体易收缩。在一定水压差动水作用下浆液容易流失, 跑浆、漏浆情况经常发生^[12], 不仅会造成水泥材料的浪费, 也达不到良好的注浆止水效果。

针对这一问题, 国内外有大量学者采用添加外加剂的方法来改善水泥砂浆的性能, 提高注浆效果。Jeyiosky^[13]在水泥中添加水玻璃, 发现水玻璃可以缩短水泥浆凝结时间, 扩大注浆半径。杨晓华等^[14]进行现场试验, 研究了水玻璃掺量对水泥-水玻璃的扩散半径的影响并选取合适的水玻璃掺量对饱和黄土进行加固, 起到了较好的加固效果。童立元^[15]等在水泥中添加大量粉煤灰, 研究了不同水灰比下浆液的流动性、凝结时间等, 结果表明随着粉煤灰掺量的增加, 结石体初期的抗压强度与流动性下降。宋雪飞^[16]研究发现浆液凝胶时间随着粉煤灰掺量增大而增长, 在一定程度上可缓解浆液凝胶过快。此外, 其他学者还用添加煤矸石^[17]、富镁矿渣^[18]、黄土^[19]、偏高岭土^[20]、膨润土^[21]对水泥浆液进行改性, 上述研究均取得了较好的结果。

但目前关于钢渣-水泥注浆加固效果影响的研究较为鲜见, 仅胡曙光^[22]制备了水玻璃-钢渣注浆材料, 对注浆材料进行了水溶蚀研究。张义顺等^[23]基于水玻璃碱激发工业废渣原理, 研究钢渣等工业废渣对注浆材料强度的影响。因此, 针对全风化花岗岩软弱地层, 钢渣-水泥注浆的加固效果亟待研究。

本文以云南高原西部临沧地区的大临铁路大平掌隧道为工程背景, 对该工程中具有代表性的全风化花岗岩进行注浆加固研究, 试验研究了不同水灰比、不同钢渣含量对浆液扩散半径、浆液凝结时间、结石体抗压强度与渗透率的影响, 分析了钢渣-水泥浆液黏度对风化花岗岩注浆加固效果的影响机制, 后采用 PFC 离散元软件对实际隧道掌子面进行数值模拟, 进一步评价钢渣-水泥对全风化花岗岩的注浆加固效果, 得到最优水灰比与钢渣含量。为类似全风化花岗岩地层的注浆加固工程提供指导。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验采用云南国资水泥红河有限公司的 P. O. 42.5 普通硅酸盐水泥。昆明钢铁厂的转炉钢渣: 密度为 3.55 g/cm^3 , 比表面积为 $400 \text{ m}^2/\text{kg}$, 颗粒形态如图 1, 化学成分如表 1, 钢渣含量较高的成分为 CaO 、 FeO 和 MgO , 同时含有一定的高铝材料 Al_2O_3 , 与水泥混合易呈现早强混凝土特征。水: 普通自来水。全强风化花岗岩: 根据现场筛分试验测定的颗粒级配进行配置, 颗粒形态如图 2, 级配曲线如图 3, 颗粒含量如表 2。

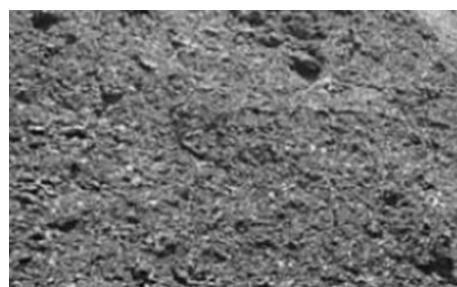


图 1 转炉钢渣

Fig. 1 The converter slag



图 2 全强风化花岗岩颗粒

Fig. 2 The strongly-completely weathered granite particles

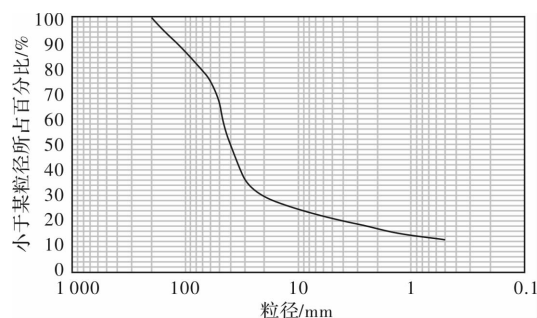


图 3 层理岩石力学效应示意图

Fig. 3 The grain size distribution of the strongly-completely weathered granite granite

表 1 钢渣化学成分

Tab. 1 Chemical composition of steel slag

成分	Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂
含量/%	4.72	21.74	4.80	0.88	55.25	7.12	2.02	2.91	0.56

表 2 全强风化花岗岩颗粒含量

Tab. 2 Chemical composition of steel slag content of fully weathered granite particles

各级颗粒占比							粗颗粒比例/%	
颗粒直径/mm	60~200	40~60	20~40	2~20	0.5~2	<0.5		
含量/%	25.2	24.2	20.7	12.7	4.4	12.8	70	

1.2 试验设备

1.2.1 注浆模型装置

本注浆加固扩散装置的研发主要针对全强风化花岗岩注浆加固的模拟。根据现有的全强风化花岗岩注浆模拟装置存在的问题,对整套试验装置进行设计和结构优化。该注浆模型试验装置的设计方案见图 4,由空气压缩机、土体模拟试验箱、浆液存储装置等部分组成(如图 5),其基本测试原理为:土样模拟装置主要用于模拟全强风化花岗岩的物理力学参数,实现对原状土的性质的恢复,在装置中可以完成不同种类、密度、含水率的土体的模拟,此外还可以实现对注浆孔和注浆段分布的模拟;与其相连的压力浆液供给装置,用于实现浆液的供给和浆液的存贮,实现压力浆液的传输。其中,土箱尺寸为 800 mm(长)×590 mm(宽)×500 mm(高)。

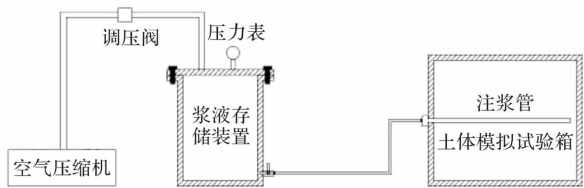


图 4 注浆扩散装置设计图

Fig. 4 Design of grouting diffusion device



图 5 注浆扩散装置现场图

Fig. 5 Field of grouting diffusion device

1.2.2 单轴抗压试验仪器

单轴抗压试验采用 YAS-300 型微机液压伺服压力试验机,如图 6 所示,采用固结不排水方案,加载方式为应变控制,加载速率为 0.15%/s。直至结石体破坏。



图 6 YAS-300 型微机液压伺服压力试验机

Fig. 6 The Yas-300 microcomputer hydraulic servo pressure testing machine

1.2.3 凝结时间试验仪器

使用维卡仪测试钢渣-水泥浆液凝结时间,如图 7。该仪器符合 GB/T1346、ASTMC187、ISO9597、GB/T1346-2001 等标准要求。



图 7 维卡仪测定水泥凝结时间

Fig. 7 Determination of setting time of cement by Vicat apparatus

1.2.4 渗透系数试验仪器

使用常水头 TST-70 型渗透仪测定结石体的渗

透系数, 如图 8.



图 8 TST-70 型渗透仪

Fig. 8 Tst-70 permeameter

1.2.5 直剪试验仪

使用常水头 TST-70 型渗透仪测定结石体的渗透系数, 如图 9.

采用直剪试验对全强风化花岗岩在垂向压力分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 时土体抗剪强度进行测定.

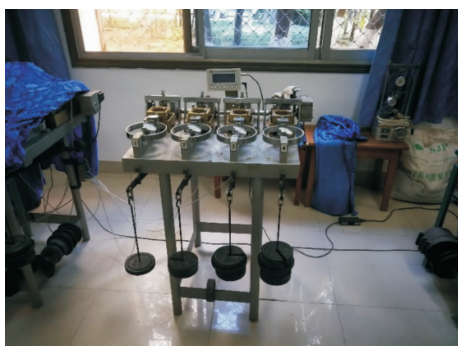


图 9 直剪试验仪

Fig. 9 Direct shear tester

1.3 试验方案

1.3.1 结石体制备

常用的注浆加固水灰比范围为 0.6~1.4, 因此配置水灰比分别为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 的水泥浆液, 在每种水灰比的水泥浆液下添加 0%、3%、6%、9%、12% 的钢渣, 制备共计 25 组水泥浆液试样. 将制备好的全强风化花岗岩每 3~4 cm 分层击实, 把搅拌好的浆液倒入注浆罐内, 迅速密封注浆罐, 打开空压机, 调制到设定压力 0.15 MPa 并观察注浆罐上压力表的读数进行控压, 压力稳定后打开注浆阀门进行注浆, 当达到设定注浆量 20 L 后关闭注浆阀门, 拆除模具, 完成结石体的制备, 如图 9.

1.3.2 浆液凝结时间测定

取不同配比的钢渣-水泥浆液, 根据 GB/T1346-2001《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安



图 10 结石体制备

Fig. 10 Stone preparation

定性检验方法》中的方法, 使用维卡仪测试水泥浆液凝结时间.

1.3.3 浆液扩散半径测定

注浆完成后, 待浆液固结硬化后拆除模具, 观察浆液扩散情况, 测量浆液扩散半径, 取最长半径记录.

1.3.4 单轴抗压试验

将制备后的结石体切割成 5 块直径 5 cm, 高 10 cm 的圆柱体, 放入 YAS-300 型微机液压伺服压力测试极限抗压强度, 取 5 组试验的平均值作为结石体的抗压强度.

1.3.5 渗透试验

采用渗透试验仪, 对 25 组结石体进行渗透系数的测定, 根据达西定律得出全风化花岗岩的渗透速度与水力梯度的关系, 进而计算出相应的渗透系数.

1.3.6 直剪试验

将制备后的结石体切割成 5 块直径 60 mm, 高 20 mm 的圆柱体, 采用直剪试验仪器, 对 5 组结石体进行直剪试验, 根据式 1 得出全风化花岗岩的抗剪强度与钢渣含量及水灰比的关系, 取 5 组试验的平均值作为结石体的抗剪强度.

2 试验结果与分析

2.1 浆液凝结时间测定

钢渣含量与水灰比对浆液终凝时间的影响如图 11 所示, 当水灰比 ≤ 1 时, 随着钢渣含量的增加, 浆液终凝时间不断减小, 但当钢渣含量为 6% 之后, 终凝时间减小不明显. 当水灰比 > 1 时, 浆液终凝凝结时间有较大增加, 且随着钢渣含量增加, 终凝时间变化不明显. 因此钢渣对浆液终凝时间的缩减效果, 在低水灰比、低钢渣掺量时最好.

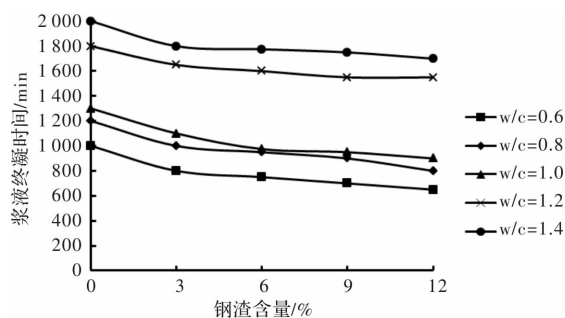


图 11 钢渣含量与水灰比对浆液终凝时间的影响

Fig. 11 Effect of steel slag content and water cement ratio on the final setting time of slurry

2.2 浆液扩散半径

钢渣含量与水灰比对浆液扩散半径的影响如图 12 所示, 当水灰比小于 1 时, 随着钢渣含量的上升, 浆液扩散半径有显著降低, 特别是当钢渣含量 $> 6\%$ 时, 扩散半径下降更为明显. 这可能是由于, 钢渣表面粗糙且多棱角, 当含量较少时与水泥结团现象不明显, 随着含量上升达到某一阈值时, 钢渣与水泥胶结力上升, 产生结团, 从而降低的浆液流动性.

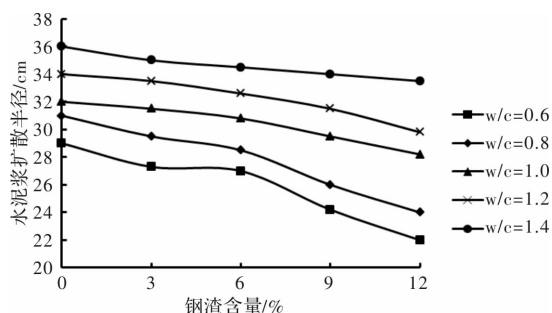


图 12 钢渣含量与水灰比对浆液扩散半径的影响

Fig. 12 Influence of steel slag content and water cement ratio on the final setting time of slurry

当水灰比 > 1 时, 随着水灰比上升, 钢渣含量对于浆液扩散半径的影响逐渐减小, 浆液扩散半径虽然随着钢渣含量上升而减小, 但减小的幅度不超过 6% , 因此在选用钢渣-水泥注浆全风化花岗岩时, 水灰比不应过小.

2.3 结石体单轴抗压

结石体的抗压强度由浆液硬化强度、花岗岩碎石强度以及浆液与碎石之间的胶结强度所构成, 因此随着钢渣含量与水灰比的变化, 结石体抗压强度变化较为复杂, 如图 13 所示. 当水灰比小于 1 时, 结石体的抗压强度随着钢渣含量先增加而后减小, 与图 11 对比可以发现, 当钢渣含量超过 6% 时, 注浆扩散半径急剧减小, 导致注浆加固效果减弱, 浆液与碎石之间的胶结程度降低, 进而降低了结实体的抗压强度.

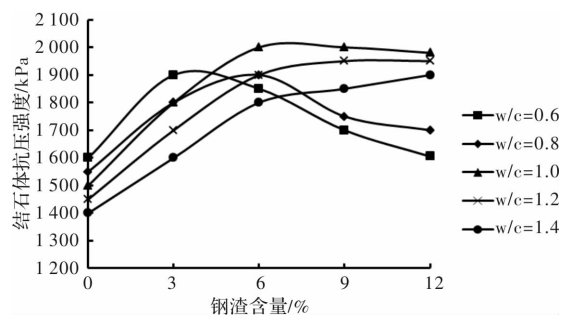


图 13 钢渣含量与水灰比对结石体抗压强度的影响

Fig. 13 Influence of steel slag content and water cement ratio on the compressive strength of stone body

当水灰比 ≥ 1 时, 随着钢渣含量的上升, 结石体抗压强度一直上升, 但上升速率减慢. 此时注浆半径有所减小, 削弱了部分胶结力, 但钢渣含量上升又提高了胶结作用, 两者共同控制结石体的抗压强度.

总体而言, 随着水灰比上升, 结石体的抗压强度峰值右移, 但当水灰比超过 1 时, 抗压强度峰值逐渐减小, 这是由于水灰比上升导致浆液硬化强度降低, 虽然胶结力随着钢渣含量增大而上升, 但在两者共同控制下, 结石体抗压强度总体下降. 所以钢渣含量与水灰比存在阈值, 当达到该阈值时, 结石体抗压强度最大, 本文试验的结石体中该阈值为钢渣含量 6% , 水灰比为 1.

2.4 结石体渗透系数

结石体的渗透系数越小, 越不容易渗水, 越容易避免浆液流失, 跑浆、漏浆等情况, 钢渣含量与水灰比对结石体的渗透系数影响如图 14 所示, 无论哪种水灰比下, 结石体的渗透系数随着钢渣含量上升, 先增大而后减小, 且水灰比越小, 下降越明显. 当钢渣含量超过 6% 时, 无论哪种水灰比的结石体渗透系数均开始下降, 这说明当钢渣超过一定量后, 钢渣-水泥浆液能更好的与全风化花岗岩碎石结合降低了结石体的孔隙率. 随着水灰比增加, 结石体渗透系数峰值不断增加, 这是由于浆液在硬化过程中体积收缩, 含水量越大, 固结过程中水分蒸发越多, 留下更多孔洞. 因此钢渣增加能降低结石体的渗透系数, 水灰比增加会导致渗透系数增大, 两者共同控制结石体的渗透系数.

2.5 结石体抗剪强度

通过试验测得全强风化花岗岩试样在不同垂直压力下的 τ_f 值, 按照式 1 通过散点图拟合得出试样的抗剪强度指标, 取垂直压力为 200 kPa 时结石体抗剪强度为例, 如图 15 所示.

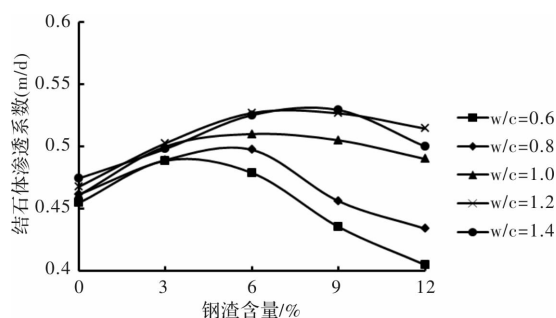


图 14 钢渣含量与水灰比对结石体渗透系数的影响

Fig. 14 Influence of steel slag content and water cement ratio on permeability coefficient of stone body

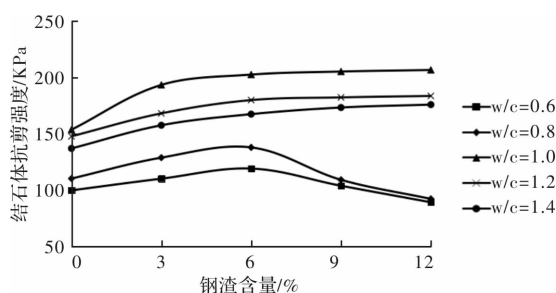


图 15 钢渣含量与水灰比对结石体渗透系数的影响

Fig. 15 Influence of steel slag content and water cement ratio on permeability coefficient of stone body

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

从试验结果可以看出,当水灰比小于1时,结石体的抗剪强度随着钢渣含量先增加而后减小趋于稳定或略有减小,当钢渣含量超过6%时,注浆扩散半径急剧减小,导致注浆加固效果减弱,浆液与碎石之间的胶结程度降低,进而结石体的抗剪强度趋于稳定。

当水灰比 ≥ 1 时,随着钢渣含量的上升,结石体抗剪强度先逐渐上升,当钢渣含量超过6%时,注浆扩散半径急剧减小,削弱了部分胶结力,结石体的抗剪强度又逐渐下降。

3 钢渣-水泥注浆效果评价

在工程实际中,应选取合适的钢渣含量与水灰比增加浆液扩散半径,缩短终凝时间,增加结石体的抗压性,降低渗透性,以便取得较好的注浆加固效果。根据室内试验的研究结果可知,当浆液水灰比为1:1,钢渣含量为5%~8%时,注浆效果较好。为了进一步验证钢渣-水泥对全风化花岗岩的注浆加固效果,采用PFC离散元软件对大临铁路大平掌隧道掌子面进行数值模拟。固定水灰比为1:1,钢渣含量为5%、6%、7%、8%。

3.1 模型建立

考虑到建立足尺的离散元模型进行计算时,颗粒数高达60万颗,计算速度非常低,根据重力相似准则,将隧道开挖的尺寸变为原来的1/10,通过在PFC软件中建立的数值试验模型对不同钢渣含量下的隧道掌子面稳定性进行计算分析。计算以大平掌隧道DK203+753处掌子面为例,隧道为浅埋隧道,最大埋深为32m,最小埋深仅11m,围岩状态从上到下依次为回填土、黏土层、全风化花岗岩、强风化花岗岩、中风化花岗岩、微风化花岗岩。为方便计算,此处岩土层按均布考虑。数值计算模型如图16。

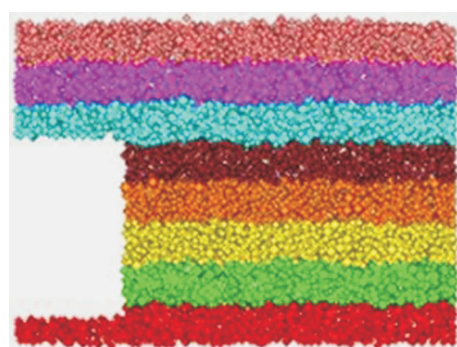


图 16 数值计算模型

Fig. 16 Influence of steel slag content and water cement ratio on permeability coefficient of stone body

3.2 细观参数标定

全强风化花岗岩细观参数通过在PFC中试验进行标定。当试验所得应力应变与实际值误差不超过5%时,即认为标定合理,最终标定结果如表3所示。

表 3 全强风化花岗岩细观参数标定

Tab. 3 Calibration of mesoscopic parameters of fully strongly weathered granite

钢渣含量 / %	颗粒有效弹性模量 / MPa	墙体有效弹性模量 / MPa	刚度比	摩擦系数	抗拉强度 / kPa	抗剪强度 / kPa
5	100	100	1.66	0.98	160	160
6	30	30	1.66	0.85	100	183
7	30	30	1.66	0.85	80	210
8	100	100	1.66	0.85	100	228

3.3 计算结果分析

不同钢渣含量浆液的计算结果如图17~图20所示。



图 17 钢渣含量 5% 注浆效果

Fig. 17 Grouting effect of 5% steel slag content



图 18 钢渣含量 6% 注浆效果

Fig. 18 Grouting effect of 6% steel slag content



图 19 钢渣含量 7% 注浆效果

Fig. 19 Grouting effect of 7% steel slag content



图 20 钢渣含量 8% 注浆效果

Fig. 20 Grouting effect of 8% steel slag content

提取隧道掌子面中心处围岩挤出变形计隧道顶部围岩沉降,对注浆效果差异分析,隧道围岩掌子面变形如图 21。

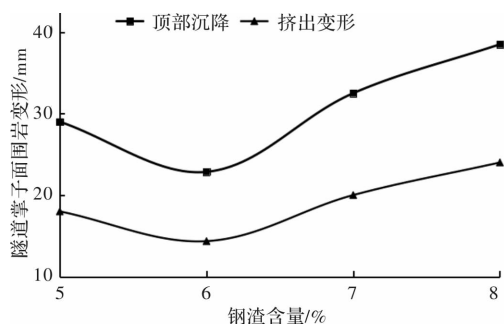


图 21 隧道掌子面围岩变形

Fig. 21 Surrounding rock deformation of tunnel face

由计算结果可看出,钢渣含量为 6% 的浆液注浆加固效果最好,掌子面稳定性较好,掌子面挤出变形约为 18.7 mm,顶部沉降约为 16.6 mm,且滑塌范围较小,掌子面前方围岩在一定程度上出现了应力松弛现象,但松弛范围较小,而钢渣含量为 8% 浆液注浆后掌子面应力松弛现象较为明显,掌子面仍存在一定程度上的滑塌,稳定性较差。

数值模拟结果显示钢渣含量 6% 的钢渣-水泥浆注浆效果最优,室内试验结果显示结石体抗剪强度及抗压强度峰值对应的钢渣含量均为 6%,两者较为吻合。

因此,在全强风化花岗岩地层隧道超前加固中,采用水灰比 1:1,钢渣含量为 6% 钢渣-水泥浆液进行注浆,掌子面的稳定性可以得到有效保障,可以在一定程度上有效避免发生掌子面严重滑塌和挤出变形等塑性破坏的发生。

4 结论

(1) 钢渣-水泥注浆材料注浆全风化花岗岩时,其浆液扩散半径随着钢渣含量上升而减小,但当浆液水灰比 ≥ 1 时,浆液扩散半径减小幅度不超过 6%。

(2) 钢渣-水泥注浆材料的钢渣含量与水灰比,共同影响全风化花岗岩结石体的抗压强度及抗剪强度,当水灰比 < 1 时,钢渣含量上升,结石体抗压强度及抗剪强度先上升后减小,当水灰比 ≥ 1 时,钢渣含量上升,结石体抗压强度及抗剪强度不断升高但速率减慢,且抗剪强度及抗压强度的峰值对应的钢渣含量均为 6%。

(3) 全风化花岗岩结石体的渗透系数随着钢渣含量上升,先增大而后减小,且水灰比越小,下降越明显。

(4) 全风化花岗岩地层隧道超前加固中,采用水灰比 1:1,钢渣含量为 6% 钢渣-水泥浆液进行

注浆,掌子面的稳定性可以得到有效保障。

参考文献 References

- [1] 李炳元,潘保田,程维明,等. 中国地貌区划新论[J]. 地理学报, 2013, 68(3):5-10.
LI Bingyuan, PAN Baotian, CHENG Weiming, et al. A new theory of geomorphological zoning in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(3): 5-10.
- [2] 尚彦军,史永跃,金维俊,等. 花岗岩风化壳分带与岩体基本质量分级关系探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9):1858-1858.
SHANG Yanjun, SHI Yongyue, JIN Weijun, et al. Discussion on relationship between zoning of granite weathering crust and basic quality classification of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9):1858-1858.
- [3] 陈卫忠,于洪丹,郭小红,等. 厦门海底隧道海域风化槽段围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5):873-884.
CHEN Weizhong, YU Hongdan, GUO Xiaohong, et al. Study on the surrounding rock stability of the weathering trough section of the Xiamen subsea tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5):873-884.
- [4] 张素敏,朱永全,高炎,等. 全风化花岗岩流变特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4):904-911.
ZHANG Sumin, ZHU Yongquan, GAO Yan, et al. Experimental study on the rheological properties of fully weathered granite[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 904-911.
- [5] 于洪丹,陈卫忠,郭小红,等. 厦门海底隧道强风化花岗岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2):381-387.
YU Hongdan, CHEN Weizhong, GUO Xiaohong, et al. Study on the mechanical properties of the highly weathered granite in Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2):381-387.
- [6] 袁敬强,陈卫忠,黄世武,等. 全强风化花岗岩隧道突水灾害机制与协同治理技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(A2):4164-4171.
YUAN Jingqiang, CHEN Weizhong, HUANG Shiwu, et al. Research on the mechanism of water inrush disaster of fully weathered granite tunnel and collaborative treatment technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016(A2):4164-4171.
- [7] 李术才,张伟杰,张庆松,等. 富水断裂带优势劈裂注浆机制及注浆控制方法研究[J]. 岩土力学, 2014 (3):744-752.
LI Shucai, ZHANG Weijie, ZHANG Qingsong, et al. Research on dominant splitting grouting mechanism

- and grouting control method in water-rich fracture zone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014(3):744-752.
- [8] 黄群伟. 全强风化花岗岩地层深埋隧道围岩分级方法及施工关键技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
HUANG Qunwei. Research on the classification method and construction key technology of deep tunnel surrounding rock in fully weathered granite stratum[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2019.
- [9] 高健, 张义同. 实施超前注浆管棚支护的隧道开挖面稳定分析[J]. *天津大学学报*, 2009, 42(8):666-672.
GAO Jian, ZHANG Yitong. Stability analysis of tunnel excavation surface with advanced grouting pipe roof support [J]. *Journal of Tianjin University*, 2009, 42(8):666-672.
- [10] 李术才, 张霄, 张庆松, 等. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(12):2377-2396.
LI Shucai, ZHANG Xiao, ZHANG Qingsong, et al. Research on grout diffusion mechanism and plugging method of water inrush grouting and water stop in underground engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(12): 2377-2396.
- [11] 张民庆, 彭峰. 地下工程注浆技术[M]. 北京:地质出版社, 2008.
ZHANG Mingqing, PENG Feng. Grouting technology for underground engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [12] 卢申明, 黄建生, 余东华, 等. 双液注浆技术在强风化花岗岩地层中的应用[J]. *中国港湾建设*, 2017(8): 89-91.
LU Shuming, HUANG Jiansheng, YU Donghua, et al. Application of two-fluid grouting technology in strongly weathered granite formations[J]. *China Harbor Construction*, 2017(8):89-91.
- [13] 梁炯堃. 锚固与注浆技术手册[M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
LIANG Jiongjun. Anchorage and grouting technology manual[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [14] 杨晓华, 俞永华. 水泥-水玻璃双液注浆在黄土隧道施工中的应用[J]. *中国公路学报*, 2004, 17(2): 68-72.
YANG Xiaohua, YU Yonghua. Application of cement-water glass double-liquid grouting in loess tunnel construction[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2004, 17(2):68-72.
- [15] 童立元, 潘石, 邱钰, 等. 大掺量粉煤灰注浆充填材料试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2002, 32(4):643-647.
TONG Liyuan, PAN Shi, QIU Yu, et al. Experimental research on grouting filling material with large amount of fly ash[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2002, 32(4):643-647.
- [16] 宋雪飞. 粉煤灰改性水泥-水玻璃双液注浆性能试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(1):143-145.
SONG Xuefei. Experimental study on the performance of fly ash modified cement-water glass double-liquid grouting[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(1):143-145.
- [17] 曹忠, 江宁, 江兴元, 等. 研石膏体充填材料物化特性与配比试验研究[J]. *煤矿安全*, 2013, 44(4): 68-71.
CAO Zhong, JIANG Ning, JIANG Xingyuan, et al. Experimental study on physicochemical properties and ratio of gangue gypsum body filling materials[J]. *Coal Mine Safety*, 2013, 44(4): 68-71.
- [18] 黄磊, 姚晓, 孟佳佳, 等. 富镁矿渣-水泥复合注浆材料的制备及性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(3): 482-486.
HUANG Lei, YAO Xiao, MENG Jiajia, et al. Preparation and performance of magnesium-rich slag-cement composite grouting material[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 33(3):482-486.
- [19] 谷天峰, 孙忠弟, 骆凤涛, 等. 水泥-黄土注浆充填材料的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(1):98-105.
GU Tianfeng, SUN Zhongdi, LUO Fengtao, et al. Experimental study on cement-loess grouting filling materials[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(1): 98-105.
- [20] SHEKARCHI M, BONAKDAR A, BAKHSHI M, et al. Transport properties in metakaolin blended concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2010, 24(11):2217-2223.
- [21] 刘祥友, 翟国林, 方云, 等. 龙门石窟岩体裂隙防渗注浆机制及参数分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(s2):3941-3947.
LIU Xiangyou, ZHAI Guolin, FANG Yun, et al. The mechanism and parameter analysis of anti-seepage grouting for rock mass fractures in Longmen Grottoes [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(s2):3941-3947.
- [22] 胡曙光, 王红喜, 张高展, 等. 工业废渣注浆材料的抗溶蚀性能[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(4):472-477.
HU Shuguang, WANG Hongxi, ZHANG Gaozhan, et al. The corrosion resistance of industrial waste slag grouting materials[J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2007, 35(4):472-477.
- [23] 张义顺, 吴杰, 郭乾坤, 等. 钢渣双液注浆材料的研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 30(3): 346-349.
ZHANG Yishun, WU Jie, GUO Qiankun, et al. Research on two-liquid grouting material for steel slag [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition)*, 2011, 30(3): 346-349.