

富水粉细砂层盾构同步注浆复合浆液配比试验*

Experimental Study on Composite Slurry Ratio for Synchronous Grouting of Shield Tunneling
in Rich Water Powder Fine Sand Layer

荆永波¹, 武敖杰², 孙星亮², 韩小冬²

(1. 中铁十四局集团隧道工程有限公司, 山东 济南, 250003; 2. 石家庄铁道大学, 河北 石家庄 050043)

摘要: 为提高富水粉细砂地层盾构同步注浆的效率和质量, 精准控制管片上浮位移, 进行配比试验以期得到对富水地层具有良好适应性的浆液。基于常规惰性浆液通过单因素试验, 确定出高分子材料羟乙基纤维素 (HEC) 和聚羧酸 (PC) 两种外加剂的掺量范围, 然后采用正交试验, 对水胶比、水玻璃、羟乙基纤维素和聚羧酸 4 因素 3 水平的试验结果进行极差分析, 得到流动性好、凝胶时间可控、结石率高的复合浆液配合比。结果表明, 针对富水粉细砂地层的复合浆液最佳配比为: 水胶比 0.8 (A2), 水玻璃掺量 30% (B2), PC 掺量 0.1% (C1), HEC 掺量 0.2% (D2), 这一配比在保证流动性 (稠度 10~12 cm)、凝胶时间 (90~150 s)、结石率 (97.53%) 和抗压强度 (2.63 MPa) 的同时, 优化了浆液的抗水分散性和经济性。采用推荐浆液配比进行同步注浆, 管片的上浮位移可以控制在 20 mm 以内, 满足规范要求。

关键词: 富水粉细砂地层; 盾构隧道; 浆液配比; 正交试验; 管片上浮控制

中图分类号: U454 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 04-0053-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.010

JING Yongbo¹, WU Aojie², SUN Xingliang², HAN Xiaodong²

(1. Tunnel Engineering Co., Ltd., China Railway 14th Bureau Group, Jinan 250003, China;

2. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and quality of synchronous grouting for shield tunneling in water rich fine sand formations, accurately control the upward displacement of pipe segments, and conduct proportioning tests in order to obtain a slurry with good adaptability to water rich formations. Based on the conventional inert slurry, the dosage range of two additives, hydroxyethyl cellulose (HEC) and polycarboxylic acid (PC), is determined by single factor test. Then, the range of test results of water binder ratio, water glass, hydroxyethyl cellulose and polycarboxylic acid in four factors and three levels is analyzed by orthogonal test, and the composite slurry mix ratio with good fluidity, controllable gel time and high stone rate is obtained. The results show that the optimal ratio of composite slurry for water rich silty fine sand formation is 0.8 (A2), 30% (B2), 0.1% (C1) and 0.2% (D2) of PC, PC, HEC. This ratio optimizes the water resistance dispersion and economy of the slurry while ensuring the fluidity (consistency 10~12 cm), gel time (90~150 s), stone rate (97.53%) and compressive strength (2.63 MPa). Adopting the recommended slurry ratio for synchronous grouting, the upward displacement

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51978424); 中铁十四局集团公司科技开发项目 (2021050288)。

作者简介: 荆永波 (1984—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地下工程施工与管理。

通信作者: 孙星亮 (1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 复杂条件隧道施工力学。

收稿日期: 2023-02-24

岩土力学

of the pipe segment can be controlled within 20 mm, meeting the regulatory requirements.

Keywords: rich water powder fine sand layer; shield tunnel; grout mix; orthogonal experiment; upward displacement of segment

0 引言

城市地铁区间隧道多采用安全度高、施工速度快的盾构法掘进。在盾构施工中,同步注浆可短时间内建立起土体与管片间的支撑体系,保证拼装管片环的稳定,减小地面沉降,控制对环境的影响^[1]。

盾构同步注浆浆液在运输、工地临时存储及注浆填充过程中,要求其具备优良的流动性,以确保注浆填充性能、避免堵管等问题的发生。惰性浆液初凝时间一般都在 6 h 以上,终凝时间更是超过 30 h。同步浆液流动性过大,胶凝时间过长,会导致管片隆起或错台^[2-4],特别是在富水地层中,浆液遭到稀释^[5],导致同步注浆圈对管片支撑作用减小,加剧管片上浮,导致注浆 24 h 之内管片上浮量占最终上浮量的 80%~85%^[6-7]以上,因此同步浆液特性对管片上浮影响是比较显著的。

为控制施工中同步注浆引起的管片上浮,国内外学者针对同步注浆技术进行了大量研究。姚占虎等^[8]针对浆液抗压强度这一指标进行了详细研究,明确了不同胶砂比下浆液的注浆性能;万泽恩等^[9]提出采用充填剂来吸收浆液的水分,从而缩短浆液的胶凝时间;周少东等^[10]分析了羟乙基纤维素(HEC)对注浆抗水、稠度及析水等性能的影响,但浆液强度损失较大。多数研究成果主要是在单液中添加外加剂提高浆液的强度和稳定性^[11-13],浆液胶凝时间仍很长,在富水砂层中应用不能有效抑制管片上浮。

为了使同步浆液能够很好地填充盾尾脱出空隙并固定管片,相关技术人员研究出具有速凝效果的双浆液,并取得了一定成效^[14]。目前采用的双浆液一般均是在原有的水硬性浆液中直接加入稀释水玻璃实现速凝,其不足之处在于早期强度过低,抗水分散性较差。富水砂层需要开发能够速凝且胶凝时间可调、早期强度较高及抗水分散性好的同步注浆配方。

在富水粉细砂地层中,传统的单液浆或者双液浆在注浆过程中浆液充填度不易控制,结石率偏低,易造成管片错位,加剧地表沉降。基于此,通过室内试验基础上经过正交试验极差分析,得到合适的

复合浆液配合比,研究浆液结石体抗压强度及变形模量随龄期的变化特征,为后续盾构穿越汾河富水粉细砂层变形数值模拟研究奠定基础。

1 试验研究

1.1 试验材料

试验选取 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥、细砂(细度模数 2.1)、钠基膨润土、F-II 级粉煤灰、水玻璃(波美度 25°Be,模数 3.0)、羟乙基纤维素(HEC3 万黏度)和聚羧酸(HPEG-2400)作为试验材料。

1.2 试验仪器

砂浆稠度仪、维卡仪、YYW-2 应变控制式压力机、圆柱形 39.1×80 模具、卡尺、电子天平、量筒、试模(尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm)及其他量器若干。

1.3 试验思路

为了测试同步注浆材料在不同配比下的性能,试验设计如下:

(1) 单因素试验:分别确定高分子抗水分散剂羟乙基纤维素(HEC)和高效减水剂聚羧酸(PC)在不同掺量下对浆液流动性(稠度)、凝胶时间、结石率及结石体抗压强度等指标的影响特征,确定二者的合适掺量范围。

(2) 正交试验:改变水胶比、水玻璃、HEC 和 PC 的掺量,使其具备“均匀分散,齐整可比”的特点。设计 4 因素 3 水平的正交试验,采用 $L_9(3^4)$ 型试验表,共计 9 组试验。正交试验包括流动性指标(稠度)、凝胶时间、结石率和抗压强度等浆液特性指标试验。

(3) 对最佳配比浆液结石体进行试验,确定浆液结石体的参数性能。

1.4 同步注浆复合浆液的制备

根据太原地铁富水粉细砂层的特征、地质条件和施工需要,选择水泥、粉煤灰、砂、膨润土和水、PC 及 HEC 作为复合浆液的配制材料。确定注浆的水胶比掺量为 0.7、0.8 和 0.9,水玻璃掺量为 25%、30% 和 35%。保持浆液胶砂比为 1.15 及膨润土与胶凝材料质量比为 8.7%。将所选材料按照配比依次加入

搅拌罐中，再加入适量清水进行搅拌，搅拌时间大约为 5~10 min，得到均匀的浆液。对于需要防水或减摩等特殊要求的现场，可以加入适量的润滑剂或防水剂。

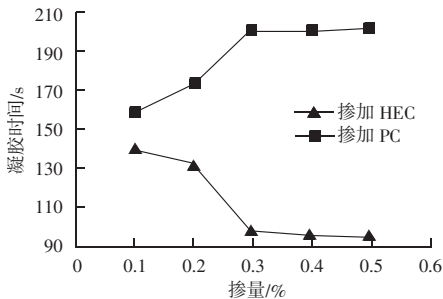
1.5 试验依据及浆液指标

(1) 浆液的流动性指标（稠度）、初凝时间、结石率和抗压强度试验参照 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》；(2) 凝胶时间试验采用倒杯法，即从浆液混合后开始计时，通过反复倒置容器，直至浆液出现挂杯现象，此时记录的时间即为凝胶时间；(3) 结石率试验参照 T-CECS 563—2018《盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程》中的规定进行；(4) 要求浆液结石体应具有较好的水稳特性，浆液对环境友好，材料价格不宜过高。

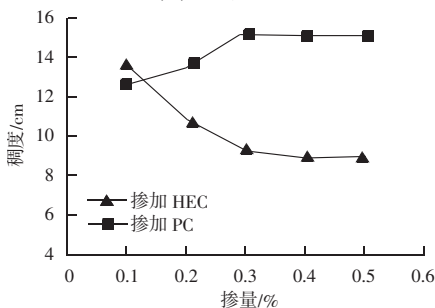
2 HEC 和 PC 掺量的确定

HEC 和 PC 掺量均取 0.1%、0.2%、0.3%、0.4% 和 0.5% 进行掺加，浆液的凝胶时间、流动性、结石率和结石体抗压强度如图 1 所示。从图 1 可知：

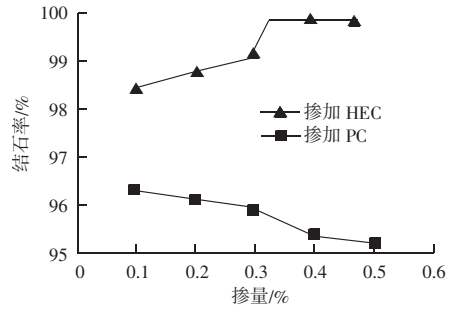
(1) 随着 HEC 掺量的增加，浆液的凝胶时间从 141 s 下降到 95 s，流动性降低，同时稠度随掺量增加从 13.5 cm 降至 7.4 cm，但结石率从 98.5% 增至 100%，结石体强度从 2.43 MPa 降至 1.53 MPa。说明浆液中掺加 HEC，对浆液有促凝效果，能够显著提高浆液结石率，但是降低了浆液的流动性，不利于结石强度的提升。根据上述分析和施工对浆液的要求，选取 HEC 掺量为 0.1%、0.2% 和 0.3%。



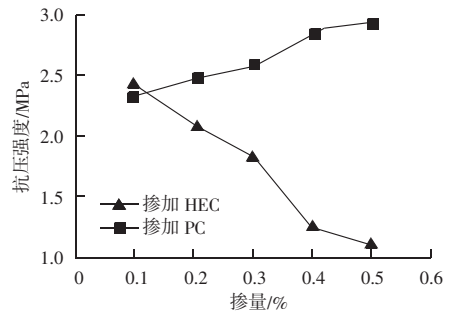
(a) 凝胶时间



(b) 稠度



(c) 结石率



(d) 结石强度

图 1 不同掺量下浆液的凝胶时间、流动性、结石率和结石体抗压强度结果

Fig. 1 Results of gel time, fluidity, stone rate and compressive strength of stone body of slurry with different dosage

(2) PC 掺量为 0.1%~0.3% 时，对浆液流动性、凝胶时间和抗压强度的影响较大，凝胶时间从 159 s 增至 202 s，流动性得到改善，抗压强度显著增大；PC 掺量为 0.4%~0.5% 时，对浆液凝胶时间、流动性和浆液结石率都影响不大。PC 掺量对浆液结石体强度的改善作用明显，且掺量在 0.1%~0.3% 时结石体强度增长较快；当 PC 掺量大于 0.3% 以后，结石体强度增长速度降低。根据 PC 对浆液的影响特性和施工对浆液的要求，选取 PC 掺量为 0.1%、0.2% 和 0.3%。

3 正交试验优选分析

为了得出外加剂 HEC 和 PC 的最佳配比掺量，进行正交试验。正交试验中，取水胶比为 0.7、0.8 和 0.9，水玻璃（波美度 25' Be，模数 3.0）为 25%、30%、35%，PC 和 HEC 均为 0.1%、0.2% 和 0.3%。正交试验方案见表 1，正交试验结果与浆液性能参数试验数据见表 2、表 3。

表 1 各试验因素及其水平

Table 1 Various experimental factors and their levels

水平	因素			
	水胶比 (A)	水玻璃 (B) /%	PC (C) /%	HEC (D) /%
1	0.7	25	0.1	0.1
2	0.8	30	0.2	0.2
3	0.9	35	0.3	0.3

岩土力学

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal experiments

试验号	因素				流动性 (稠度) /cm	凝胶时间 /s	结石率 /%	抗压强度 /MPa
	A	B	C	D				
1	1	1	1	1	4.20	92	98.76	2.65
2	1	2	3	2	10.90	124	98.74	2.86
3	1	3	2	3	11.50	1150	97.71	2.48
4	2	1	3	3	7.30	101	98.54	2.05
5	2	2	2	1	12.15	161	97.53	2.63
6	2	3	1	2	14.52	136	96.48	2.47
7	3	1	2	2	10.34	105	97.91	1.94
8	3	2	1	3	11.87	167	96.87	1.54
9	3	3	3	1	13.42	152	94.58	2.36

表 3 浆液性能参数试验数据

Table 3 Test data of slurry performance parameters

指标	项目	A	B	C	D
流动性 (稠度) /cm	K1	8.87	7.28	10.20	9.92
	K2	11.32	11.64	11.33	11.92
	K3	11.88	13.15	10.54	10.22
	极差	3.01	5.87	1.13	2.00
凝胶时间/s	K1	122.00	102.67	131.67	135.00
	K2	132.67	150.67	138.67	121.67
	K3	144.67	146	125.67	139.33
	极差	22.67	48.00	13.00	17.66
结石率/%	K1	98.40	98.40	97.37	96.97
	K2	97.52	97.71	97.72	97.71
	K3	96.45	96.26	96.95	97.71
	极差	1.95	2.14	0.77	0.74
抗压强度/MPa	K1	2.66	2.21	2.22	2.55
	K2	2.38	2.34	2.35	2.42
	K3	1.95	2.44	2.42	2.02
	极差	0.71	0.23	0.20	0.43

由表 2、表 3 可知, 浆液水胶比 (A) 和水玻璃 (B) 掺量对浆液性质有较大影响, 但是在浆液流动性 (稠度)、凝胶时间、结石率等性质中, 外加剂的掺量起到重要作用。HEC (D) 对浆液结石抗压强度的极差为 0.43, 在水胶比一定的情况下 HEC 对浆液抗压强度影响较大, 即增大 HEC 掺量, 可有效改善浆液的抗水分散性, 但会降低浆液结石强度。由表 2 试验结果可知, 浆液的凝胶时间大多在 90~150 s 之间, 将流动性指标稠度限定在 10~12 cm, 抗压强度限定在 2 MPa 以上。

B 组在流动性 (稠度) 和凝胶时间方面表现出最大的极差, 这意味着 B 组在这两个指标上具有更广泛的调节潜力; A 组和 D 组在流动性 (稠度) 和凝胶时间上显示出较小的极差, 表明它们在这两个指标上较为稳定; C 组在流动性 (稠度) 和凝胶时间上的极差最小, 表明其变化最小。在结石率和抗

压强度方面, B 组和 A 组同样表现出较大的极差, 具有较好的调节性, 而 D 组和 C 组则相对稳定。优水平选择分别为: 流动性为 A3B3C2D2, 凝胶时间为 A1B1C3D2, 结石率为 A1B1C2D2, 抗压强度为 A1B3C3D1, 表明在特定条件下, 各组在不同指标上均能达到最佳性能。总体而言, B 组在多个指标上显示出较好的调节性, 而 A 组和 D 组在稳定性方面表现突出。从结石率的角度出发, 因素 A (水胶比) 优选 A1、A2, 考虑浆液流动性和材料经济性, 优先选取 A2。同理对因素 B (水玻璃), 从结石率来讲 B1、B2 皆可, 但是抗压强度 B2 比 B1 大 5.56%, 且流动性 (稠度) B1 仅 7.28 cm, 流动性较差, 因此选择 B2。增加因素 D (HEC) 的掺量会使浆液结石率升高, 但升高幅度不大, 但浆液结石强度降低幅度明显, 考虑到掺加 HEC 有利于改善浆液的抗水分散性, 因此选择 D2; 若注重结石体抗压强度, 则可选 D1。因素 C (PC) 从结石率角度取较大值, 选择 C1。

由试验数据分析得出针对富水粉细砂地层的复合浆液最佳配合比为 A2B2C1D2, 即确定浆液水胶比为 0.8, 水玻璃用量为 30%, PC 掺量为 0.1%, HEC 掺量为 0.2%。

根据所确定的复合浆液配比进行室内试验, 测得复合浆液流动性 (稠度) 为 10.0 cm, 胶凝时间为 121 s, 初凝时间为 6.1 h, 结石率为 99.40%, 结石体抗压强度为 2.47 MPa。

4 浆液结石体的力学指标

管片周边注浆层强度及变形模量是影响管片变形及地表沉降的重要因素, 因此又进行了浆液配方结石体抗压强度及变形模量测试。抗压强度试件为边长 7.07 mm 的立方体, 将浆液结石体养护至所需龄期进行强度试验。变形模量则通过直径 39.1 mm、高 80 mm 的圆柱体试件的无侧限压缩应力-应变曲线确定。结石体变形模量取 50% 峰值应力与对应的应变之比 E_{50} 。

通过立方体压缩试验得到浆液结石体不同龄期的抗压强度特征和变形模量随龄期的变化曲线如图 2 所示。由图 2 (a) 可以看出, 浆液结石体的早期 (7 d 前) 强度随龄期增长迅速, 随后增速变缓。由此可以推断, 随着时间的延长, 浆液结石体的强度

仍将持续增长，这是因为胶凝材料会继续进行水化反应。在 28 d 时，浆液结石体的抗压强度达到了 2.38 MPa。对试验数据进行拟合，浆液结石体强度随龄期近似呈对数规律增长，相关系数为 0.9884。图 2 (b) 中浆液结石体变形模量随龄期变化规律与其强度的变化规律类似，变形模量与龄期呈对数规律变化，相关系数为 0.955。

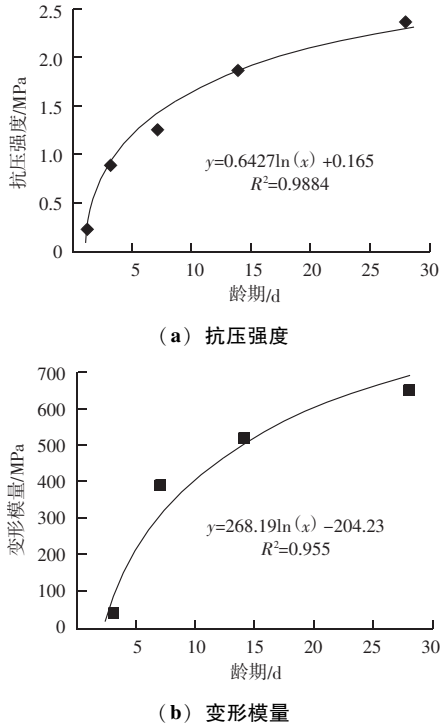


图 2 不同龄期下的抗压强度与变形模量结果

Fig. 2 Results of compressive strength and deformation modulus at different age groups

5 工程应用

太原地铁 1-2 号线联络线富水砂层盾构掘进过程中，在控制好盾构机姿态的条件下，选择 150 个管片进行位移控制测试，前 50 个管片注入优化前的浆液，后 100 个管片注入最佳配比的浆液，分析管片的上浮，结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，浆液材料优化前，管片上浮情况较为明显，最大上浮接近 90 mm，平均上浮也在 70 mm 左右。而对浆液材料配比进行优化后，管片上浮最大值为 20 mm，相较于优化前的浆液，管片上浮明显降低。因此，说明所研究的同步注浆复合浆液配比能够有效控制管片的上浮。

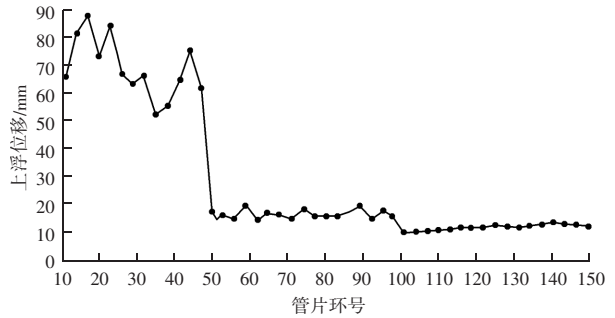


图 3 管片上浮位移

Fig. 3 Floating displacement of pipe segments

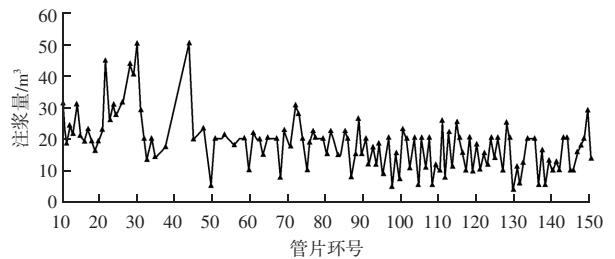


图 4 管片注浆量

Fig. 4 Injection volume of pipe segments

不同管片环号下的注浆量结果如图 4 所示。前 50 个管片的注浆量在 40 m³ 左右，最高超过 50 m³；后 100 个管片的注浆量在 20 m³ 左右，最高注浆量未超过 35 m³。这是因为注浆材料配比优化前，管片单位涌水量较大，浆液遭到稀释，导致实际注浆量较大。而注浆材料优化后，浆液稠度与结石率提升，使浆液材料不容易被稀释，能够有效控制管片的上浮。

6 结论

为了控制富水粉细砂地层中盾构管片上浮，除了控制好盾构机姿态，还须采用抗水分散性好的速凝浆液进行同步注浆。为此，进行正交试验确定合理的同步浆液配比试验，得到如下主要结论：

(1) 通过单因素试验确定了高分子材料羟乙基纤维素 (HEC) 和高效减水剂聚羧酸 (PC) 对浆液特性的影响规律及掺量。

(2) 选定以水胶比、水玻璃、羟乙基纤维素 (HEC) 和聚羧酸 (PC) 为影响因素，通过正交试验和极差分析得到了各因素对浆液特性的影响规律，确定了适合富水粉细砂地层的浆液配比。

(3) 通过压缩试验，确定配比浆液结石体抗压强度及压缩模量随时间的变化规律。二者随龄期均呈对数规律变化，为后续浆液性质对地表建筑物不

岩土力学

均匀沉降影响研究提供计算依据。

(4) 通过正交试验所确定的浆液配比,可以较好地控制管片上浮,管片最大上浮可控制在 20 mm 以内。

参 考 文 献

- [1] 杨星,张荣辉,房宽达,等.盾构同步注浆浆液性能影响分析及其配比优化研究[J].岩土工程技术,2021,35(5):336-340.
- [2] 李元凯,杨志勇,杨星,等.盾构法施工注浆新型填充双浆液配比试验及应用[J].铁道标准设计,2022,66(4):149-154.
- [3] 季昌,周顺华,许恺,等.盾构隧道管片施工期上浮影响因素的现场试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):3619-3626.
- [4] 郭东明,李妍妍,左志昊,等.低黏度超细水泥浆液配比试验研究[J].煤矿安全,2019,50(5):72-77.
- [5] 耿大新,胡宇琛,廖煜祺,等.基于响应面法的泥水盾构同步注浆材料性能[J].科学技术与工程,2021,21(15):6479-6486.
- [6] 张龙,黄明利,张思源.富水砂层盾构隧道双液浆属性与施工进度关系研究[J].隧道建设(中英文),2021,41(增刊1):407-413.

- [7] 王旋东.砂性土层盾构隧道管片上浮因素分析及控制技术[J].上海建设科技,2020(2):36-38.
- [8] 姚占虎,张伯阳,陈郁,等.超大直径盾构始发段同步注浆技术研究与应用[J].现代隧道技术,2015,52(4):101-104,120.
- [9] 万泽恩,李树忱,赵一民,等.富水地层盾构隧道同步注浆惰性充填材料配比与试验研究[J].土木工程学报,2021,54(7):123-132.
- [10] 周少东,林文书,王红喜,等.高性能同步注浆材料专用外加剂的研制[J].隧道建设,2014,34(3):205-211.
- [11] 黄旭民,黄林冲,梁禹.施工期同步注浆影响下盾构隧道管片纵向上浮特征分析与应用[J].岩土工程学报,2021,43(9):1700-1707.
- [12] 陈金平,王娇,甄聪,等.盾构法同步注浆材料的试验研究综述[J].粉煤灰综合利用,2018(1):75-80.
- [13] 王茹,刘科,万芹,李建,等.含羧甲基纤维素醚对 CSA 水泥早期水化的影响[J].建筑材料学报,2022,25(8):836-842.
- [14] 孙星亮,张岳峰.富水隧洞注浆用水泥-水玻璃浆液室内配比试验研究[J].铁道建筑,2019,59(4):83-86.

(上接第 46 页)

的参考依据。

(4) 爆炸破坏对岩体性质的影响显著,直接关系到其稳定性。在边坡稳定性评估中,将岩体视为扰动或未扰动状态会导致截然不同的预测结果。因此,在缺乏关于岩体破坏区域及其扰动因子 D 值的确切信息时,建议采用更为保守的设计方法。

参 考 文 献

- [1] 赵明华,刘菁钰,赵衡,等.基于 MSDP 准则的岩质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):10-18.
- [2] 苏阳,覃晓雨,刘之葵,等.基于 FLAC-3D 公路风化岩边坡稳定性分析[J].土工基础,2021,35(3):347-351.
- [3] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses [J]. Geotech Engng Div, ASCE, 1980, 106(9): 1013-35.
- [4] MARINOS V, MARINOS P, HOEK E. The geological strength index: applications and limitations [J]. Bull Eng Geol Environ, 2005, 64: 55-65.
- [5] 邓雄武,余洋,李绍波.动载下岩石边坡稳定性研究[J].矿冶工程,2018,38(5):29-32,35.
- [6] BIENIASKI Z T. Rock mass classification in rock engineering. In:

Exploration for rock engineering, proceedings of the symposium [J]. Cape Town: Balkema, 1976, 97-106.

- [7] COLLINS I F, GUNN C M, PENDER M J, et al. Slope stability analyses for materials with a non-linear failure envelope [J]. Int J Numer Anal Methods Geomech, 1988, 12: 533-550.
- [8] LYAMIN A V, SLOAN S W. Lower bound limit analysis using non-linear programming [J]. Int J Numer Methods Eng, 2002, 55: 573-611.
- [9] LI A J, MERIFIELD R S, LYAMIN A V. Stability charts for rock slopes based on the Hoek-Brown failure criterion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 689-700.
- [10] 陈晓磊.双滑面岩质边坡稳定性极限平衡计算方法[J].地下空间与工程学报,2016,12(5):1403-1409.
- [11] TSIAMBAOS G, SAROGLU H. Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index [J]. Bull Eng Geol Environ, 2010, 69: 13-27.
- [12] HOEK E, KARZULOVIC A. Rock mass properties for surface mines in slope stability in surface mining [J]. Littleton, 2000, 55-70.