

一类特殊的泥水盾构掘进绿色泥浆实验研究

张子新^{1,2}, 胡欣雨^{1,2}, 黄 昕^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 采用普通水、增效土(天然黏土)、淀粉和微量固体碱, 利用淀粉的凝胶化特性, 发明了一类特殊的泥水盾构穿越砂质地层的绿色泥浆. 利用真三轴仪和研究级智能数字全自动立体显微镜, 研究了复杂应力状态下绿色泥浆土的力学特性, 并对泥膜的细观结构进行了观察, 发现该绿色泥浆具有形成泥膜时间短、结构致密、抗渗透能力强和有效泥浆支护压力范围广的特性. 对不同复杂应力水平下泥浆土的应力—应变关系实验研究表明: 在排水和不排水的条件下, 泥浆渗入对砂质地层土体的强度和变形均有较大影响, 且不同的泥浆均存在有效泥浆支护压力上、下限值.

关键词: 泥水盾构; 泥浆; 真三轴实验; 有效泥浆支护压力; 细观结构

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Experimental Study on Environment Friendly Slurry for Slurry Shield Tunnelling

ZHANG Zixin^{1,2}, HU Xinyu^{1,2}, HUANG Xin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on water, clay, starch and minor solid alkali, an environment friendly slurry for slurry shields driving in sandy soils was invented by using the gelatinization property of starch. The true triaxial test coupled SteREO Discovery (V12) were performed to explore the mechanical property of an environment friendly slurry under the complicated stress state. And the meso-structure of a tight membrane and filter cake even in sandy soils were also observed. Experimental results indicate that the environment friendly slurry is characterized by short formation time, compact structure, strong infiltration capacity and wide area with respect to effective support pressure of the slurry. Furthermore, under the drained or undrained condition, the permeability of slurries

has great effect on the strength and deformation of sandy soil, and the effective support pressure of slurries has an upper and lower limit value.

Key words: slurry-type shield; slurry; true triaxial test; effective slurry support pressure; meso-structure

伴随着我国城市地铁建设的飞速发展, 泥水盾构工法以其施工质量好、效率高、技术先进、安全可靠等优点, 逐步成为沿海城市地铁建设的主要工法之一. 但是, 泥水盾构工法的广泛采用也使开挖出的大量泥浆土处理困难, 目前多数泥浆由自然黏土、膨润土、水、增黏剂 CMC(钠羧甲基纤维素)所构成, 其突出表现为废弃泥浆(土)量大且降解难度大, 添加剂中多采用化合物和聚合物, 容易造成较严重的水土环境污染. 国内外曾进行了不同类型的泥浆研究^[1-7], 但研究针对泥水盾构大多从技术层面考虑泥浆的适用性, 而对于同时考虑环保因素的泥浆研究还很少见. 针对城市中泥水盾构每年都要开挖出大量泥土, 很有必要开展相对来源广泛、价格合理、降失水效果好、抗盐能力强、且对环境无污染的绿色泥浆的研究.

另一方面, 在泥水盾构工程领域的泥浆研制中, 不同的地层和应力水平对泥浆特性有较大影响, 同时影响泥浆的渗透性和保持开挖面稳定的泥膜特性. 国内外在不同埋深的泥水盾构施工推进中发现, 即使是在同一种泥浆作用下, 天然土体的强度也会发生不同程度的变化, 从而使开挖面的有效支护压力在一定的区间内上下波动. 然而已有研究对此现象存在不同解释^[8]: Muller Kirchenbauer 指出泥浆对原土体的渗入, 降低了土体的整体稳定性; Elson, Farkas, Winter 和 Gill 通过研究得出了相反的结论,

收稿日期: 2009-07-21

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划资助项目(2006AA11Z118)

作者简介: 张子新(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为隧道及地下建筑工程.

E-mail: zxzhang@tongji.edu.cn

即泥浆的渗入提高了原土体的整体强度;而 George M. Filz 通过粗颗粒砂土的室内压缩试验,表明泥浆渗透不会对原土体的强度有很大的影响.事实上,工程实际中的泥浆作用对开挖面土体强度的影响和复杂的应力水平有着密切关系.因此,本文设计了真三轴-细观耦合实验,通过对不同应力水平下的泥浆土对比实验,证明了在排水和不排水的条件下,泥浆渗入对砂性土体的强度和变形均有较大影响,且泥水盾构开挖中不同的泥浆均存在有效泥浆支护压力上、下限值,对国内外已有研究成果的争议通过实验给出了合理诠释,并探讨了这种特殊现象与泥水盾构开挖面稳定和土体强度之间的关系.

1 真三轴-细观耦合实验

真三轴-细观耦合实验是在同济大学复杂应力状态的真三轴仪器和研究级智能数字全自动立体显微镜(SteREO Discovery. V12)上联合完成的.真三轴实验系统硬件(图 1)包括真三轴仪器、气压施加及控制台主应力加荷系统以及可用于数据采集与处理的计算机软硬件系统.

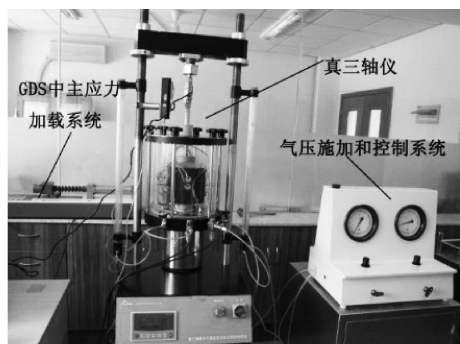


图 1 真三轴实验系统

Fig.1 True triaxial experimental system

图 2 为研究级智能数字全自动立体显微镜(SteREO Discovery. V12).在本实验中其最大特点是能够检验试样剪切断裂断面的形态,切取的试样不需经脱水、导电等处理,便可直接进行观察.

本实验采用的试样尺寸为 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$,实验加载方向如图 3 所示.竖直方向为大主应力 σ_1 ,可根据泥水盾构不同埋深确定;中主应力 σ_2 用于模拟泥水盾构水平支护压力;小主应力 σ_3 为围压,按照盾构周边土体的初始应力水平设定.实验采用的应力路径如图 4 所示,OA 段为等向固结过程,AB 段斜率 $\tan \alpha = b$,为剪切过程, b 为中主应力

比率, σ_1 和 σ_2 按一定比例逐渐增大直至发生剪切破坏.图中点 $O(0,0,0)$ 为初始状态,点 $A(\sigma_c, \sigma_c, \sigma_c)$ 为等向固结状态,点 $B(\sigma_{1f}, \sigma_{2f}, \sigma_c)$ 为剪切终止状态.在中主应力 σ_2 方向上的 2 个侧面可以实现泥浆的注入, σ_2 计算公式为

$$\sigma_2 = b\sigma_1 + (1 - b)\sigma_3 \quad (1)$$



图 2 SteREO Discovery V12 全自动立体显微镜

Fig.2 Set-up of the electric stereomicroscope apparatus

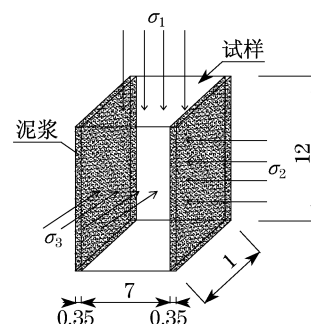


图 3 试样尺寸及加载方向(单位:cm)

Fig.3 Sample dimension and notation for principal stresses(unit:cm)

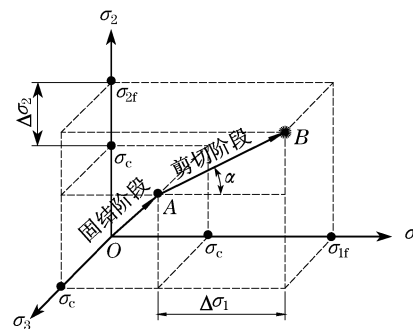


图 4 真三轴实验应力路径

Fig.4 Loading path for true triaxial experimental tests

工程实际中泥水盾构推进过程一般可分为泥水盾构正常开挖状态(不排水状态)和泥水盾构进行管片拼装或检修时的停止推进状态(排水状态)^[9].初

始围压根据排水和不排水 2 种情况,分别按有效应力和总应力计算.以上海长江隧道工程为背景,基于隧道的不同埋深(一般埋深 $C = 1.3D$,深埋 $C = 1.7D$,浅埋 $C = 0.7D$.其中, C 为隧道埋深, D 为隧道直径,大小为 15 m),实验进行了上述 3 种不同初始应力水平下的排水和不排水实验,基于地质勘察报告,其所对应的初始围压状态如表 1.此外,实验中分别研究不同应力水平下不同泥浆渗透规律及对土体强度和变形的影响,将试样分为 3 组:第一组为无任何泥浆作用的天然土样(S);第二组为添加一定浓度高分子聚合物、活化剂等的泥浆(M1)作用的土样(S1);第三组为由清水、天然黏土、淀粉和固体碱构成的绿色泥浆(M2)作用的土样(S2),其中清水和天然黏土的加入量与比例以现场对黏性土层适用的泥浆密度和黏度为标准,相对密度控制在 1.2~1.3,马氏黏度时间控制在 18.0~18.5 s;淀粉的加入质量为清水加入量的 30%~40%;固体碱的加入量为清水加入质量的 0.025%~0.035%.实验用的原状砂土为上海⑦₁₋₁层砂质粉土.具体实验方案如表 1.

表 1 2 种不同泥浆 M1, M2 作用下砂质粉土真三轴实验方案
Tab.1 Series of tests for sandy silt under the infiltration of the M1 and M2 in experimental program

实验编号	实验条件	初始围压/kPa	中主应力比率 b	泥浆注入累积量/mL	试样编号
1	排水	100	0.40	0	S-1
				60	S1-1, S2-1
2	排水	125	0.40	0	S-2
				60	S1-2, S2-2
3	排水	150	0.40	0	S-3
				60	S1-3, S2-3
4	不排水	250	0.40	0	S-4
				60	S1-4, S2-4
5	不排水	275	0.40	0	S-5
				60	S1-5, S2-5
6	不排水	300	0.40	0	S-6
				60	S1-6, S2-6

2 实验结果和分析

实验过程中,表 1 中的试样在真三轴仪上每组均实验 3 次,取 3 次实验的平均值作为测量结果.在排水条件下,当围压不同时,试样 S, S1 和 S2 的偏应力—大主应变关系如图 5 所示.

可以看出,在中小围压下,泥浆土 S1 的抗剪强度与天然土体差异不大,但当围压增至 $\sigma_3 = 150$ kPa 时,泥浆土 S1 对应的抗剪强度要远低于天然土体的抗剪强度,这主要是由于随着围压的逐渐增大,当水的渗透作用大于泥膜颗粒间有效联结力时,在薄弱部位出现了不同程度的破坏,甚至贯穿到土体内部,外在表现就是相对强度的逐步降低.而绿色泥浆土 S2 在中小围压下,其抗剪强度有较大提高,如对于强度峰值点 $\sigma_3 = 125$ kPa, $\epsilon_1 = 8.07\%$,其对应的偏应力与天然土体和泥浆土 S1 所对应的偏应力相比,分别提高了 13% 和 12%,这有利于形成质量相对优良的泥膜.随着围压增至 $\sigma_3 = 150$ kPa 时,绿色泥浆土的抗剪强度仍与天然土体相当,体现出较好的泥膜特性和抗渗性能.

在不排水条件下,当围压不同时,试样 S, S1 和 S2 的偏应力—大主应变关系如图 6 所示.

由图 6 可知,在不排水条件下,随着围压的增大,泥浆土 S1 抗剪强度明显下降;而绿色泥浆土 S2 在中小围压下,其抗剪强度变化不大,只有当围压增至 $\sigma_3 = 300$ kPa 时,其抗剪强度才有较明显的降低,这说明绿色泥浆土 S2 在不排水情况下也能形成质量良好的泥膜,有效阻止泥浆中水的渗透,保持泥水盾构推进过程中的开挖面稳定.

此外,在排水和不排水情况下,不同围压下的泥浆土 S1 和 S2 也表现出上述类似的侧向变形特征.为了进一步研究不同泥浆的渗透特性和泥膜的形成

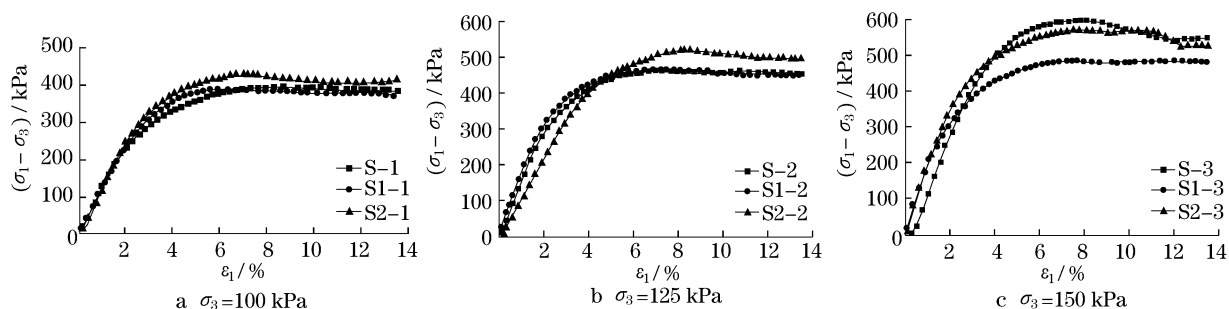


图 5 排水条件不同围压下试样 S, S1 和 S2 偏应力—应变关系

Fig.5 Relation of deviatoric stress-strain curves in various confining pressures for samples S, S1 and S2 under drained condition

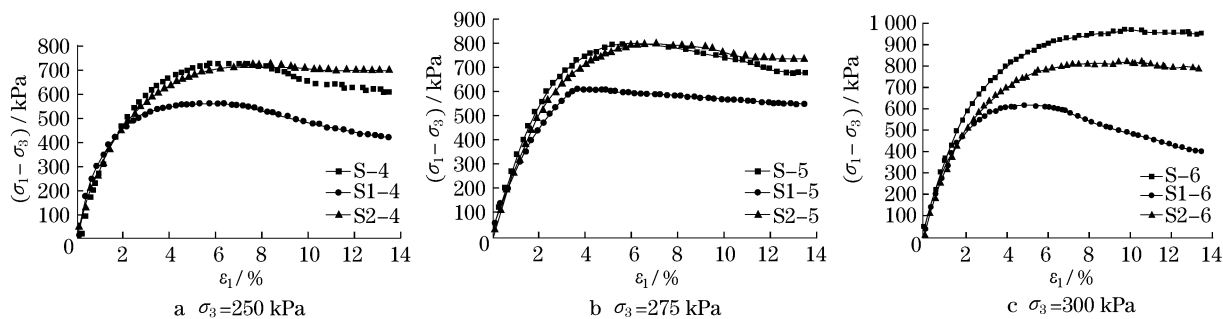
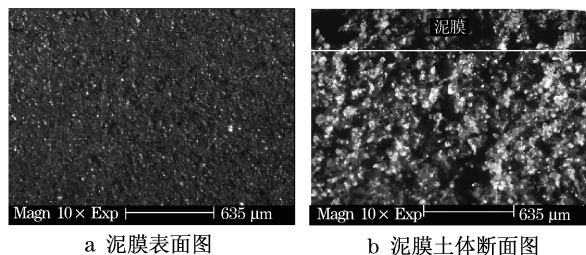
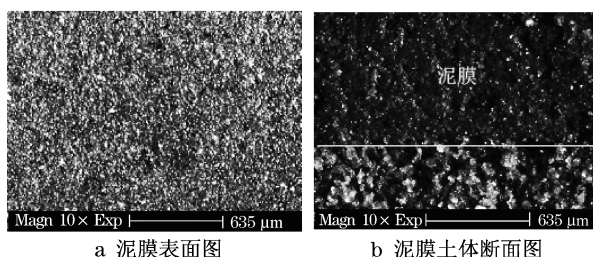


图 6 不排水条件不同围压下试样 S, S1 和 S2 偏应力—应变关系

Fig. 6 Relation of deviatoric stress-strain curves in various confining pressures for samples S, S1 and S2 under undrained condition

机理,在真三轴实验的基础上,进行了试样破坏断面的细观观察.图 7 和图 8 为排水条件下围压 $\sigma_3 = 150$ kPa 时的泥膜表面和断面图.由图中可以看出,高围压下泥浆 M1 作用生成的泥膜较薄,且泥膜表面出现了一条断裂带,一直延伸到土体内部;而泥浆 M2 作用下,生成的泥膜致密且厚实,且泥浆中细粒成分对土体孔隙的填补使得土体孔隙明显变小.由此可知,绿色泥浆 M2 能有效保持土体强度且抑制变形的发展,对于开挖面的稳定起着重要的作用.

图 7 浆液 M1 作用下所生成泥膜的细观结构(围压 150 kPa)
Fig. 7 Meso-structure of the generated filter cake by M1 in sandy silt($\sigma_3 = 150$ kPa)图 8 浆液 M2 作用下所生成泥膜的细观结构(围压 150 kPa)
Fig. 8 Meso-structure of the generated filter cake by M2 in sandy silt($\sigma_3 = 150$ kPa)

3 讨论

泥水盾构通过在密封的泥水舱中,注入适当压

力的泥浆,使其在开挖面形成泥膜支撑正面土体,随着时间的推移,泥膜的厚度不断增加,抗渗透能力逐渐增强,施加一定压力的泥水即可更有效地作用在泥膜上,可达到平衡前方水土压力的泥水平衡效果.所以泥水盾构开挖面无论是在推进阶段还是管片的拼装阶段都应该始终保持着一定厚度的泥膜,可防止开挖面的变形和崩塌,保证开挖面的稳定,避免地面隆起和沉降.

由图 9 可知,一定压力的泥浆作用在开挖面上,泥浆中的水与细粒成分将通过地层间隙渗入掘削地层.泥浆中的水会向具有孔隙的地层渗透,这对于土体和土粒骨架的稳定性将产生破坏作用.此外,渗透造成了泥浆失水,使得作用于开挖面的有效支护压力减小;另一方面,在泥浆中水分渗入地层的同时,泥浆中的一部分细颗粒也会填补部分地层孔隙,使地层的渗透系数变小,且使土的黏聚力增大,对于透水性差的过滤地层,由于过滤解质间水流产生解质摩擦力,引起过滤解质的压缩,透水性进一步降低,这都使得开挖面前方土体的孔隙比发生改变,过滤量减少,同时引起土样各种力学特性(如抗剪强度)的变化.

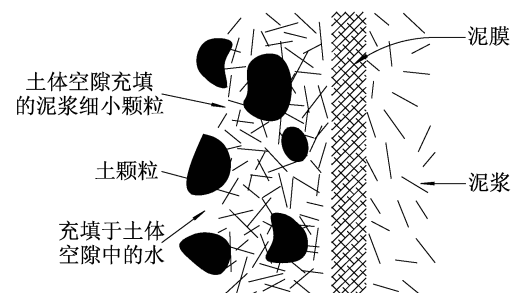


图 9 泥膜形成示意图

Fig. 9 Diagrammatic sketch for filter cake formation

此外,在不同的应力水平下,泥浆对开挖面前方土体的渗入、土体孔隙大小的变化以及有效支护压力的大小对开挖面土体的力学特性均起着至关重要

的作用,这也是国内外学者研究成果存在差异的主要原因.实验表明:在排水和不排水的条件下,泥浆渗入对砂质地层土体的强度和变形均有较大影响,且泥水盾构开挖中的泥浆在不同的应力水平下存在有效泥浆支护压力上、下限值.当有效泥浆支护压力小于下限值时,泥水盾构开挖面的土体强度受泥浆渗透影响较小,与天然土体几无差异;当有效泥浆支护压力介于上、下限值之间时,由于泥浆的渗透产生泥膜,并逐渐发挥泥膜效应,使得泥水盾构开挖面的土体强度有不同程度提高;而当有效泥浆支护压力大于上限值时,渗透压力超过了泥膜颗粒间的交联和胶结效应,使泥膜薄弱部位出现了不同程度的破坏,此时泥水盾构开挖面的土体强度由于泥浆渗透影响而迅速降低,如图 10 所示.图中, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{Mi} / (\sigma_1 - \sigma_3)_s$ 表示泥浆 Mi 作用下泥浆土最大、最小应力差值与天然土体应力差值的比值, P_{ui} 和 P_{li} ($i = 1, 2$, 代表泥浆编号: M1, M2) 分别为有效泥浆支护压力的上、下限值.在排水情况下,泥浆 M1 在复杂应力水平下的有效泥浆支护压力上、下限值极限波动范围为 121 kPa;而泥浆 M2 在复杂应力水平下的有效泥浆支护压力上、下限值极限波动范围为 190 kPa,变化幅度相比 M1 提高 57%,这有利于开挖面的稳定和泥膜的形成.在不排水情况下,泥浆 M1 在复杂应力水平下的有效泥浆支护压力不存在上、下限值;而泥浆 M2 在复杂应力水平下的有效泥浆支护压力上、下限值极限波动范围为 222 kPa,即在较大的泥浆支护压力变化区间内,该泥浆都能形成优质的泥

膜,保持并提高了天然土体的强度,有利于开挖面的稳定.在上海长江隧道的初步应用中(S1)也体现出了同样的特征.

4 结论

(1) 复杂应力状态下绿色泥浆具有形成泥膜时间短、泥膜结构致密、抗渗透能力强和有效泥浆支护压力范围广的特性,且能在较大的有效泥浆支护压力波动范围内保持和提高土体的强度,这将有利于泥水盾构开挖面的稳定.

(2) 不同复杂应力水平下泥浆土的应力—应变关系和细观结构表明:在排水和不排水的条件下,泥浆渗入对砂质土体的强度和变形均有较大影响;泥水盾构推进过程中不同的泥浆均存在有效泥浆支护压力上、下限值,且变化范围与应力水平密切相关,这种特殊现象是由于泥浆渗透的主导作用,直接决定着复杂应力水平下泥水盾构开挖面的稳定和土体强度的大小,在泥水盾构施工中具有重要指导意义.

参考文献:

- [1] Amanullah Md. Shale-drilling mud interactions [D]. London: University of London, 1993.
- [2] Amanullah Md. A novel method to evaluate the formation damage potential of drilling fluids[J]. J Pet Technol, 2003, 55(11): 51.
- [3] Hearst J R, Nelson P H. Well logging for physical properties [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1985.
- [4] Fritz P, Hermanns R, Stengele A H. Modified bentonite slurry for slurry shields in highly permeable soils [C] // The 4th International Symposium Geotechnical Aspect of Underground Construction in Soft Ground. Toulouse: [s. n], 2002: 35 - 40.
- [5] Fritz P. Slurry shield tunneling in highly permeable ground [C] // The 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geo-technical Engineering, 39th U. S. Rock Mechanics Symposium, Cambridge MA: [s. n], 2003: 81 - 95.
- [6] Nandurdikar N S, Takach N E, Miska S Z. Chemically improved filter cakes for drilling wells[J]. Journal of Energy Resources Technology December, 2002, 124(4): 223.
- [7] 马素德, 郭焱, 蒲春生, 等. 马铃薯变性淀粉用作钻井液降失水剂的研究[J]. 西安石油大学学报, 2004, 19(6): 44. MA Sude, GUO Yan, PU Chunsheng, et al. Modified potato starch used as filtration reducing agent of drilling fluid[J]. Journal of Xi'an Shiyou University, 2004, 19(6): 44.
- [8] George M F, Tiffany A, Richard R D. Stability of long trenches in sand supported by bentonite-water slurry [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(9): 915.
- [9] Marco Barla. Numerical simulation of the swelling behaviour around tunnels based on special triaxial tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(5): 508.

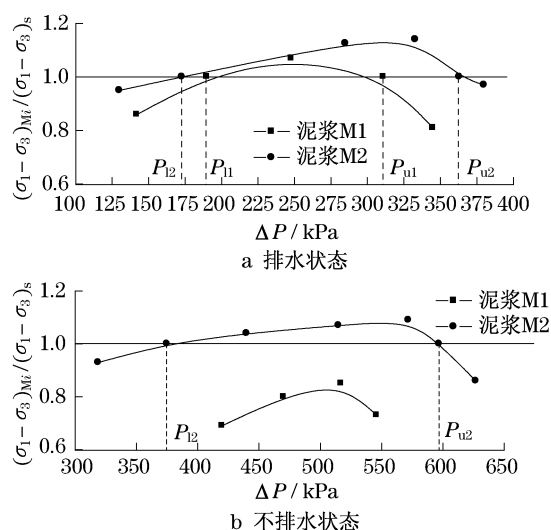


图 10 有效泥浆支护压力对土体强度的影响

Fig. 10 Influence of the effective slurry support pressures on the strength variation of the sample soil