现场泥水劈裂试验及应用研究

刘学彦^{1,2},袁大军^{1,2*},郭小红³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院,北京 100044; 2. 北京交通大学隧道与地下工程教育部工程研究中心,北京 100044;

3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘 要:采用泥水平衡盾构进行过江越海隧道施工时,重要的技术难点就是特殊小覆土区间盾构掘进保证开挖面稳定 以及防止泥水劈裂的发生。对于泥水劈裂现象的室内试验研究,有一定的基础资料。但是,由于尺寸和边界条件限制, 使其研究成果不能直接应用到工程中去。在理论分析的基础上,研制了现场泥水劈裂仪,确定了劈裂试验的具体实施 步骤和劈裂压力的断定方法。并在南京某在建过江隧道工程中进行了现场劈裂试验。(1)试验结果表明:由于劈裂过 程为突变过程,采用总应力法时,地层劈裂模型能很好的预测地层劈裂压力,也更符合实际工况;由理论分析得出, 掘进模式模型的地层劈裂压力更小,几乎与地层静止侧向土压力相当;增加泥水黏度能够增加地层劈裂压力,但增加 量有限。(2)运用现场劈裂试验结果给出了防止泥水劈裂的泥水压力设定上限值,并运用盾构机在始发不远处进行了 原位泥水劈裂试验,在一定程度上验证了预测模型的准确性。

关键词:现场泥水劈裂仪;现场劈裂试验;地层劈裂模型;劈裂压力;总应力法

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2013)10 - 1901 - 07 作者简介: 刘学彦(1985 -), 男,河南汝南人,博士研究生,主要从事泥水盾构隧道和掘进土力学方面的研究工作。 E-mail: happyhome-liu@163.com。

Test and application of in-situ slurry fracturing

LIU Xue-yan^{1, 2}, YUAN Da-jun^{1, 2}, GUO Xiao-hong³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Tunnel and Underground Engineering Research

Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd.,

Wuhan 430056, China)

Abstract: For constructing slurry shield tunnels under rivers or seas, it's a difficult technical problem to maintain the stability of the excavation face while preventing slurry fracturing. There are some laboratory investigations of slurry fracturing. But, due to small sizes and different boundary conditions, the results cannot be directly applied to the projects. In-situ slurry fracturing instrument is developed on the basis of theoretical analysis, and the test procedures of fracturing and the relevant method of confirming fracturing pressure are introduced. The in-situ slurry fracturing test is carried out on the rive-crossing tunnel under construction in Nanjing. The results indicate that: (1) as the fracturing process is a mutation process, the stratum fracturing model can predict fracturing pressure by means of the total stress method, which agrees with actual working condition. The theoretical results show that the fracturing pressure of tunneling model, which is almost equal to the lateral earth pressure, is smaller than that of the in-situ slurry fracturing test. It's efficient to increase fracturing pressure by increasing the slurry viscosity, however, the effect is limited; and (2) the upper limit value of slurry pressure set for preventing slurry fracturing is given according to the results of the in-situ slurry fracturing test. The in-situ slurry fracturing test is performed by shield machine after originating, and it may verify the accuracy of the prediction model to some extent.

Key words: in-situ slurry fracturing instrument; in-situ slurry fracturing test; stratum fracturing model; fracturing pressure; total stress method

0 引 言

随着沿江沿海城市的迅速发展,江海对城市交通 往来的制约日益凸显。修建跨江越海隧道成为越来越 多城市的选择。在城市中修建的大直径软土隧道较多

使用泥水盾构法。受路线线型选择、地质条件、隧道

基金项目:国家自然科学基金项目(50878015,51178027) 收稿日期:2013-01-24 *通讯作者

里程、工程造价等因素影响,隧道覆土厚度往往较薄, 称之为小覆土区间隧道。采用泥水平衡盾构进行隧道 施工时,重要的技术难点就是特殊小覆土区间盾构掘 进保证开挖面稳定以及防止泥水劈裂的发生。在调查 的15条过江跨海隧道中^[1-2], 盾构直径在11~12m之 间,占调查总数的 47%,其最小埋深多为 0.65D (D 为盾构直径),埋深较小;而盾构直径为14m以上大 直径盾构隧道占调查总数的 40%, 其最小埋深也在 0.65D 至 1D 之间。可以看出这些越江跨海隧道均存在 小覆土区间。小覆土区间由于覆土浅,泥水压力和切 削面稳定很难控制,稍有不慎,就有可能发生泥水劈 裂,导致泥水喷发到江底,引发塌陷和江(海)水倒 灌等工程事故。泥水劈裂发生后,尚无补救措施,只 能采用快速通过等施工方法使损失降低,却仍存在着 泥水压力无从设定、掘进效果无从保证等施工风险。 因此,从根本上研究泥水劈裂的发生、发展,提出防 止劈裂发生的要素和指标。在盾构始发前,准备好这 些要素的控制指标具有重要工程意义。

因此,很多学者对土体劈裂问题展开了研究,如 Mori 等^[3-4]在室内实验的基础上,研究了劈裂压力和 土体强度、浆体黏性和土体所处应力状态的关系,并 在土体注浆方面进行了应用。Panah 等^[5]运用非固结不 排水室内实验研究了土体水力劈裂的机理。基于莫尔 -库仑强度准则,讨论了前人提出了几种不同的理论 解答并得到了很好的验证。Bezuijen 等^[6]和 Gafar 等^[7] 运用圆孔扩张理论和室内试验研究了砂性土的压裂注 浆作用机理。Murdoch^[8-10]在室内实验的基础上,从试 验方法和试验现象、劈裂伸展及理论分析 3 个方面对 水力劈裂进行了阐述。

这些研究为理论分析提供了一定的参考,但是, 室内实验的边界条件与现场有着显著的不同,并且泥 水与水也有一定的差别。为此,袁大军等^[11-12]运用自 制的盾构模型机进行了劈裂试验,对泥水盾构劈裂路 径及伸展时间进行了研究,并运用自制的劈裂仪在日 本东京湾隧道工程进行了劈裂试验。本文在以前研究 的基础上,进一步对泥水劈裂现场进行理论分析,并 在理论分析和原有工作的基础上,研制了现场泥水劈 裂仪,并在南京某在建过江隧道工程中进行了现场劈 裂试验。

1 模型建立

在浅覆土软土地层中,地层成层分布,地层的水 平各向异性表现较弱。因此,假设地层水平各向同性。 取一单元土体进行分析,并假定初始裂隙为一无限小 圆孔,圆孔的半径为 *a*。由于泥水劈裂的发生方向未 知,为简化模型,假定裂隙方向垂直于主应力方向, 建立模型如图 1。按照假定,只存在两种情况:劈裂 面垂直于 σ_1 方向,如图 1 (a)所示;或者劈裂面垂直 于 σ_3 方向如图 1 (b))所示。假设单元体为一弹性体, 则图 1 可以转化为平面应力问题,如图 2 所示。



Fig. 1 Three-dimensional model of stratum fracturing



图 4 田图「间化的十回候空

Fig. 2 Two-dimensional model simplified from Fig. 1
在土力学中常以压应力为正,由叠加原理得图 2
(b)的解答为

$$\sigma_{r} = \frac{\sigma_{1} + \sigma_{3}}{2} \cdot (1 - \frac{a^{2}}{r^{2}}) + \frac{\sigma_{3} - \sigma_{1}}{2} \cos 2\theta \cdot (1 - \frac{a^{2}}{r^{2}}) \cdot (1 - 3\frac{a^{2}}{r^{2}}) + \frac{a^{2}}{r^{2}} \cdot P_{f} , \qquad (1)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot (1 + \frac{a^2}{r^2}) - \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \cos 2\theta \cdot (1 + 3\frac{a^4}{r^4}) - \frac{a^2}{r^2} \cdot P_{\rm f},$$
(2)

$$\tau_{\theta r} = \tau_{r\theta} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \cdot (1 - \frac{a^2}{r^2})(1 + 3\frac{a^2}{r^2}) \quad , \quad (3)$$

式中, r 表示方板上一点距圆心的位置, θ 表示沿 x 轴 方向顺时针旋转的角度, σ_r 为径向正应力, σ_{θ} 为切 向应力, τ_{θ_r} 为切向正应力, P_f 为施加在圆孔内的压 应力。则圆孔边上 r = a 的应力即为

$$\sigma_r = P_f , \qquad (4)$$

$$\sigma_{\theta} = (\sigma_1 - \sigma_3) - 2(\sigma_3 - \sigma_1) \cdot \cos 2\theta - P_{\rm f} \quad , \tag{5}$$

$$\tau_{\theta r} = \tau_{r\theta} = 0 \quad . \tag{6}$$

假设圆孔破坏一点的破坏为剪切破坏,则由莫尔 - 库仑准则得

$$P_{\rm f} = 0.5(\sigma_3 + \sigma_1)(1 + \sin\varphi) -$$

 $P_{\rm f} = (1.5\sigma_3 - 0.5\sigma_1)(1 + \sin \varphi) + c \cdot \cos \varphi$ 。(8) 式中 $n = 1, 2, 3, 4, \dots$; φ 为摩擦角; c 为黏聚力。c, φ 均为总应力强度指标,应用这些指标进行土体稳定 性分析的方法称为总应力法,由固结不排水试验得到。

同理,对于图 2 (a)所示模型,其 $P_{\rm f}$ 为定值: $P_{\rm f} = \sigma_3 \cdot (1 + \sin \varphi) + c \cdot \cos \varphi$ 。 (9) 对比式 (8)和式 (9)可以得出,当初始裂隙垂 直于 σ_3 并指向 σ_1 时,劈裂压力最小,所以图 1 (b) 路径为劈裂发生时最可能路径。但是,实际钻孔得劈 裂模型为图 1 (a)模型。为了更加深入的分析地层应 力、土体性质和劈裂压力的关系,进行了现场劈裂仪 的研制和现场劈裂试验。

2 现场劈裂试验

2.1 仪器研制

为了进行现场原位劈裂试验,自主研制了现场劈 裂仪,如图3所示。现场劈裂仪由泥水箱、压气设备、 测量设备、托运设备和地下成孔装置组成。泥水箱用 来存储泥水,为了便于测量泥水液面的下降,泥水箱 侧壁选用有机玻璃材质并黏贴刻度。同时,上下盖板 为结合板+结构板的组合设计也保证了泥水箱的密封 性; 压气设备为空气压缩机, 用来给泥水箱加压进而 通过地下成孔设备对地层进行劈裂;为减少地层扰动 和保证钢管的刚度,地下成孔设备选用外径为50mm、 内径为40mm的钢管,并使得钢管底部保留约200mm 长的原状土孔壁,这样泥水就会沿钢管导向在原状土 中发生劈裂。同时,为了防止试验过程中,泥水沿钢 管外壁翻出,使用水泥砂浆将钢管外壁填充封堵。测 量设备分为地上部分和地下部分,地上部分由空气压 力表和地表液体压力表,地下部分为先端压力计,用 于测量劈裂端头的劈裂压力。



Fig. 3 Diagram for structure of test holes and apparatus

2.2 现场试验

南京某过江隧道始发处于淤泥质地层中,而且由 于场地限制在始发区段上方修建建筑物。已有研究表 明:浅覆土黏土地层中,地层的劈裂压力与维持掘进 面稳定所需泥水压力比较接近^[3-4],上方建筑物的存在 使得这一工况更加严峻。为此,需要确定该位置的劈 裂压力,从而为泥水压力设定上限提供参考。

试验孔布置在盾构始发井周边,为测定不同深度 和不同泥水性能下,地层的泥水劈裂性能,一共布置 6 孔,分为 A, B 两组。每组中设置不同孔深,分为 5, 10 和 15 m;两组使用不同泥水配比,如表 1 所示。 其中,A 组使用泥水黏性较小、重度较低,适合盾构 机在黏性地层中使用;而 B 组使用泥水黏性较大、重 度较高,适合盾构机在砂性地层中使用。

试验场地地层分布如图 4 所示。在试验深度范围 内,其地层为单一淤泥质粉质黏土,其物理力学参数 如表 2 所示。现场试验时,为保证各试验点不相互影 响,按照 45°最大破坏线(水平地应力等于竖向地应 力的情况)确定试验点的布置和其影响范围,如图 5 所示。



图 4 试验场地地层分布 Fig. 4 Layers of test field





Fig. 5 Relative positions and influence ranges of holes

Table 1 Properties of slurries selected for in-situ tests								
		庙田收迹		浆液性能				
组别		使用永祝 配臣	L.	重度	黏度			
				$\gamma / (kN \cdot m^{-3})$) v /s			
A组	膨润土:CMC:水=8: 0 075:91 925			10.2	20			
B 组	组 黏土:膨润土:CMC:水 =20:8:0.075:71.925			11.4	35			
表 2 地层物理力学性能参数								
Tabl	Table 2 Parameters of mechanical properties for soil strata							
重度		含水率	孔隙比	塑性指	液性指数			
ho /(kg·m ⁻³)		w/%	n	数 IP	$I_{\rm L}$			
18.0		38.9	1.097	14.0	1.34			
三轴固结排水试验								
$\varphi_{\rm cu}$		C _{cu}	$arphi_{ m cu}'$	$c'_{\rm cu}$	侧压刀余数 V			
/(°)		/kPa	/(°)	/kPa	\mathbf{v}^0			
15.6		12.1	25.4	8.8	0.6			

表1 试验使用浆液性能

试验共分为钻孔、下管、封堵、洗孔、拌浆、压 浆劈裂和开挖验证等7个步骤。试验时,其先后顺序 如图6所示。在试验场地中,地层的表面普遍存在一 层硬壳。为了测定淤泥质粉质黏土地层的劈裂压力, 对地层表面的硬壳进行了挖除。试验时,其地面的劈 裂冒浆现象如图7所示。试验后,对于5m孔A3孔的 劈裂路径进行了开挖,开挖时测量劈裂面的宽度和劈 裂面两端至注浆孔之间的距离,运用余弦定理可以计 算出劈裂面各点的方位和距离注浆孔的距离,然后, 绘制劈裂面的三维视图如图8,9所示。值得注意的是, 图8和9所示的劈裂面并不是唯一的劈裂面。一般情 况下,试验孔越深,冒浆处越多。如5m深孔为1至 2处,10m深孔为2至3处,而15m孔为5至6处。 冒浆范围一般为试验孔外2~3m。



图 6 现场泥水劈裂试验实施步骤

Fig. 6 Procedures of in-situ slurry fracturing tests



图 7 现场劈裂试验冒浆现象





图 8 A₃ 孔裂隙面正视图、侧视图和立体图

Fig. 8 Front view, side view and perspective view of fracture surface of hole A₃



Fig. 9 Top view of fracture surface of hole A₃

3 试验结果分析及应用

劈裂试验进行时,分别使用压力表、孔压计、流 量计和刻度尺测量并记录加压空气气压、先端劈裂处 孔隙水压、流量和流速及泥水箱液面高度。如图 10 所示,在A1孔试验过程中,随着空气压力的增加,液 面高度缓慢降低(10 mm/h),当空气压力达到 100 kPa 时,液面骤然下降,当压力增大到104 kPa时,其压 力降低幅值较大,不宜再增加压力。而图 11 也显示, 此时流量和流速突然出现,意味着劈裂的发生。事实 上,此刻以前也有微弱的流量,但是,不在流量表显 示精度范围内,所以流量表显示为0(虽然流量表经 过专门定制,显示精度为 0.0001 m³/h)。如图 10 所示, 劈裂发生后,空气压力维持稳定,而液面下降速度也 基本稳定,当空气压力下降时,液面下降速度放缓, 当空气压力增加时,液面下降速度也增加。这说明劈 裂发生后,其液面流速跟劈裂伸展压力有一定的关系, 液面流速会随着伸展压力的增加而增加。如图 12 所 示,在流速和端头压力的关系中,可以看出,A₁孔的 劈裂压力为 250 kPa。由此可见, 劈裂压力是在数据分 析、起劈点确定、劈裂压力反推等基础上确定的。

同理,可以确定其他5孔的劈裂压力如表3所示。 由于南京江滩附近的地下水位较浅,基本上在地下0.5 m以内。由于不考虑地表硬壳的影响,在试验过程中 挖除了地表硬壳,并且出现了地下水位面,现假定覆 水深度等同于覆土厚度。表3给出了上覆水土压力和 水平侧压力的计算值及劈裂压力的实测值,可以看出, 对于淤泥质粉质黏土地层,劈裂压力介于上覆水土压 力和水平侧压力之间。增加泥水的黏度可以提高劈裂 压力,但提高量有限。



图 10 A₁ 孔液面高度和空气压力随时间的关系





图 11 A₁ 孔流量和流速随时间的关系

Fig. 11 Flow rate and velocity against time for hole A1





Fig. 12 Velocity versus pore pressure at end of hole A₁

由于地层中孔隙水的存在,现将式(8)、(9)改 为有效应力表达,对于模型1(a)为

 $P_{\rm f} = (\sigma_3 - u_0)(1 + \sin \varphi') + c' \cdot \cos \varphi' + u_0$, (10) 其中, φ' 为摩擦角, c'为黏聚力, c', φ' 均为有效应 力强度指标,应用这些指标进行土体稳定性分析的方法 称为有效应力法, u_0 为孔隙水压力。

对于模型 l(b)为	
$P_{\rm fmin} = (1.5\sigma_3 - 0.5\sigma_1 - u_0)(1 + \sin\varphi') + c' \cdot \cos\varphi' - 0.5\sigma_1 - u_0(1 + \sin\varphi') + c' \cdot \cos\varphi' - 0.5\sigma_1 - 0.5\sigma_1$	$+u_{0^{\circ}}$
	(11)

表 3 劈裂试验结果 Table 3 Results of in-situ slurry fracturing tests

	试验孔编号					
参数	A组			B 组		
	A_1	A_2	A ₃	B_1	B_2	B ₃
覆土厚度/m	15	10	5	5	10	15
覆水深度/m	15	10	5	5	10	15
上覆水土压力/kPa	270	180	90	90	180	270
水平侧压力/kPa	162	108	54	54	108	162
劈裂压力/kPa	250	155	80	82	162	255
	膨润	±:cn	AC:	黏	土:膨润	±:
使用浆液类型	水=8:0.075:			CMC:水=20:		
	91.925			8:0.075:71.925		

将表 2 中参数代入式 (8) ~ (10) 中, 计算上覆 水土压力、水平侧压力和劈裂压力的结果如表 4 所示。 为了更加清晰的表述劈裂压力理论计算值与实测值之 间的关系, 绘制图形如图 13 所示。对于模型 1 (a), 由于其较准确的描述了劈裂孔的形状, 总应力法计算 值与实测值相差较小, 而采用有效应力法的计算值与 实测值有一定的差距。同时, 模型 1 (a) 的估计值位 于实测值的下方, 因此, 可以较保守的估计劈裂压力。 模型 1 (b) 的总应力法计算值偏小, 与静止侧压力 σ_3 计算值相差不大。但是, 由于在实际盾构掘进过程中, 成孔情况与模型 1 (b) 相同, 而且在盾构开挖时的劈裂压 力要比实测值小。



图 13 不同模型对劈裂值的预测与实测值关系

Fig. 13 Relationship between measured and calculated values by different prediction models

通常泥水压力设定以盾构中心为基点进行设定,称为泥水压力设定值 *p*₀。掘进面顶部的泥水压力称为切口压力 *p*_c,它与泥水压力设定值 *p*₀之间的关系为

$$p_0 = p_c + \gamma_s \cdot D/2 \quad , \tag{12}$$

表4 劈裂压力计算值与实测值比较

Table 4 Comparison between measured and calculated values by different prediction models

参数								
		A 组			B 组			
			\mathbf{A}_{1}	A_2	A_3	\mathbf{B}_1	B_2	B_3
覆土厚度/m			15	10	5	5	10	15
上覆水土压力/kPa			270	180	90	90	180	270
	水平侧压力/kPa		162	108	54	54	108	162
日立 万山	总应力法计算值	模型 1(a)	217.2	148.7	80.2	80.2	148.7	217.2
労役		模型 1(b)	148.7	103.0	57.3	57.3	103.0	148.7
压力 /kPa	有效应力法计算值	模型 1(a)	175.1	119.4	63.7	63.7	119.4	175.1
		模型 1(b)	—	—	—	—	—	—
实测劈裂压力/kPa		250	155	80	82	162	255	
使用浆液类型		膨润土:CMC:水=8:0.075:91.925		黏土:膨润土:CMC:水=20:8:				

式中, γ ,为泥水重度,D为盾构机直径。

当切口压力 *p*c达到劈裂压力 *p*f时, 泥水将劈裂地 层。因此, 泥水压力设定最大值为

 $p_{0\max} = p_{\rm f} + \gamma_{\rm s} \cdot D/2 \quad . \tag{13}$

南京某过江隧道南北线隧道始发处上方为淤泥质 粉质黏土地层,与试验场地一致,如图 14 所示。其力 学性能如表 2 所示。其中,南线隧道埋深 8.32 m,隧 道轴线埋深 15.57 m;北线隧道埋深为 7.77 m,隧道 轴线埋深 15.04 m。根据图 13 的理论模型和现场试验 实测数据对隧道南北线始发时泥水压力上限分别给出 参考值为 0.220 MPa 和 0.210 MPa。并运用盾构机在 北线隧道始发不远处进行了劈裂试验,当泥水压力设 定为 0.22 MPa 时,地表出现了冒浆现象,在一定程度 上验证了劈裂试验预测模型的准确性。当然,由于施 工现场条件的复杂性,冒浆现象的产生还与其他因素 有关,如土体扰动、建筑物的局部附加荷载和地表硬 壳等。



4 结 论

为了确定南京某过江隧道始发段淤泥质粉质黏土

的泥水压力设定上限,在自主研制现场劈裂仪的基础 上,确定了劈裂试验实施步骤和劈裂压力断定方法。 通过现场劈裂试验并结合理论分析,得出以下结论:

(1)通过现场劈裂试验给出了 5~15 m 不同地 层深度下淤泥质粉质黏土的劈裂压力,增加泥水黏度 能够增加地层劈裂压力,但增加量有限。

(2)采用总应力法计算时,模型 1(a)计算值 与实测值偏差不大,能够很好的预测地层劈裂压力, 而采用有效应力法,模型 1(a)计算值与实测值有一 定的差距。

(3)由于实际泥水盾构开挖时,其力学条件与模型1(b)相近,而模型1(b)计算值较小,且盾构开 挖过程中存在扰动。所以,实际泥水盾构开挖时的劈 裂压力会小于现场试验实测值,与水平侧压力值相当。 由于劈裂是突变过程,采用总应力法更能符合实际工 况。

(4)运用劈裂试验预测模型给出了盾构机始发后 的压力设定上限值,并运用盾构机进行了原位劈裂试 验,在一定程度上验证了预测模型的准确性。为运用 该模型进行以后的泥水压力上限设定打下基础。

参考文献:

- 袁大军,刘学彦.南京纬三路过江通道工程合理覆土厚度 研究[R].北京:北京交通大学,2013. (YUAN Da-jun, LIU Xue-yan. Research on rational buried depth of shield tunnel at Weisan Road under Yangtze River in Nanjing of China[R]. Beijing: Beijing Jiaotong University; 2013. (in Chinese))
- [2] 蒋树屏, 刘元雪, 谢 锋, 等. 重庆市朝天门两江隧道越江 段盾构法合理覆盖层厚度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1188 1193. (JIANG Shu-ping, LIU Yuan-xue,

XIE Feng, et al. Study on reasonable cover thickness for submarine tunnel of Chaotianmen in Chongqing by shield construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(6): 1188 – 1193. (in Chinese))

- [3] MORI A, TAMURA M. Hydrofracturing pressure of cohesive soils[J]. Soils and Foundations, 1987, 27(1): 14 - 22.
- [4] MORI A, TAMURA M, FUKUI Y. Fracturing pressure of soil ground by viscous materials[J]. Soils and Foundations, 1990, 30(3): 129 - 136.
- [5] PANAH A K, YANAGISAWA E. Laboratory studies on hydraulic fracturing criteria in soil[J]. Soils and Foundations, 1989, 29(4): 14 - 22.
- [6] BEZUIJEN A, SANDERS MPM, HAMER D D, et al. Laboratory tests on compensation grouting, the influence of grout bleeding[C]// Underground Space-the 4th Dimension of Metropolises. Taylor & Francis, London, Britain, 2007: 395 - 401.
- [7] GAFAR K, SOGA K, BEZUIJEN A, et al. Fracturing of sand in compensation grouting[C]// Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proceedings of the 6th International Symposium (Is-Shanghai), Shanghai, China, 2008. CRC Press Ltd, 2009: 281 – 286.

- [8] MURDOCH L C. Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments, Part 1. Methods and observations[J]. Géotechnique, 1992 43(2): 255 - 265.
- [9] MURDOCH L C. Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments, Part 2. Propagation[J]. Géotechnique, 1993, 43(2): 267 – 276.
- [10] MURDOCH L C. Hydraulic fracturing of soil during laboratory experiments, Part 3. Theoretion[J]. Géotechnique, 1993, 43(2): 277 - 287.
- [11] 袁大军,黄清飞,李兴高,等. 盾构掘进黏土地层泥水劈裂伸展现象研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 712 716.
 (YUAN Da-jun, HUANG Qing-fei, LI Xing-gao, et al. Hydraulic fracture extending during slurry shield tunneling in cohesive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 712 - 716. (in Chinese))
- [12] 袁大军,黄清飞,小泉淳,等.水底盾构掘进泥水喷发现 象研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2296 2301. (YUAN Da-jun, HUANG Qing-fei, KOIZUMI Atsushi, et al. Study on slurry water gushing during underwater shield[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2296 - 2301. (in Chinese))

《勘察科学技术》2014 年征订启事

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计研究院有限责任 公司(原冶金勘察研究总院)主办的学术—技术类双月刊,是 中国科技论文统计源期刊,中国地质文摘引用期刊,中国学术 期刊(光盘版)、中国期刊网万方数据科技期刊群全文收录期 刊,多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地 质、环境地质、水文地质及地下水资源评价、工程测量及地理 信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等 专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、 新方法。

《勘察科学技术》内容丰富,理论结合实际,适于从事岩

土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技 术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行,双月刊,大16开本, 双月20日出版。每期定价10.0元,全年60元。邮发代号18-153。 全国各地邮局均可订阅,也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告,价格适中,印制精良,注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址:河北省保定市东风中路 1285 号《勘察科学技术》 编辑部:邮编:071069; Tel:0312-3020887, 3094054; Fax: 0312-3034561; E-mail: kckxjs@163.com, kckxjs@126.com。

(《勘察科学技术》编辑部 供稿)