

DOI: 10.11779/CJGE20220657

# 考虑级配影响的盾构泡沫改良粗粒土一维压缩理论计算模型

占永杰<sup>1,2</sup>, 王树英<sup>\*1,2</sup>, 杨秀竹<sup>1</sup>, 王海波<sup>3</sup>

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学隧地工程研究中心, 湖南 长沙 410075; 3. 中山大学土木工程学院, 广东 广州 510275)

**摘要:** 盾构渣土在带压情况下会产生孔隙压力, 能一定程度上平衡开挖面前方水压力, 降低地下水入渗水平, 因此盾构渣土一维压缩计算对指导盾构安全掘进具有重要意义。为此, 基于波义耳定律和不连续颗粒堆积理论, 建立考虑级配参数和渣土改良参数影响的泡沫改良粗粒土一维不排水压缩作用下孔隙压力计算模型。根据泡沫改良土的变形特征, 提出初始压缩模量  $E_s$  的计算方法, 建立泡沫改良土压缩计算模型。进一步地, 将泡沫改良土压缩计算模型引入孔压计算模型, 提出孔压简便计算模型。为验证一维不排水压缩作用下孔压与压缩计算模型的可靠性, 采用自主设计的大型压缩仪对不同级配的泡沫改良粗粒土进行不排水一维压缩试验, 获取孔压与压缩实测值。实测值与计算值的对比结果表明, 建立的孔压模型和压缩模型能较好的描述不同级配下泡沫改良土的孔压和压缩变化规律, 泡沫注入比和土体级配参数均会对泡沫改良土的孔隙压力产生明显影响。

**关键词:** 土压平衡盾构; 级配; 泡沫改良粗粒土; 孔隙压力; 压缩计算模型

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)08-1644-09

**作者简介:** 占永杰(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事盾构渣土改良方面的研究工作。E-mail: yjzhan@csu.edu.cn。

## One-dimensional compression theoretical model for shield foam-conditioned coarse-grained soil considering influences of gradation

ZHAN Yongjie<sup>1,2</sup>, WANG Shuying<sup>\*1,2</sup>, YANG Xiuzhu<sup>1</sup>, WANG Haibo<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Tunnel and Underground Engineering Research Center, Central South University, Changsha 410075, China; 3. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Under the state of chamber pressure, the pore pressure of conditioned soil will be generated, and it can balance the water pressure in front of the excavation to reduce the level of groundwater infiltration. Therefore, one-dimensional compression calculation of conditioned soil is of great significance for guiding the safe excavation of shield. Therefore, based on the Boyer's law and the discontinuous particle accumulation theory, the model for calculating the undrained pore pressure considering gradation parameters and soil-conditioning parameters is established. According to the deformation characteristics of foam-conditioned soil, the method for the initial compression modulus  $E_s$  is proposed, and the compression model for the foam-conditioned soil is established. Furthermore, the compression model is introduced into the pore pressure model, and a simple model for the pore pressure is proposed. In order to verify the reliability of the proposed model for the pore pressure and compression, the undrained one-dimensional compression tests on the foam-conditioned coarse-grained soil with different gradations are carried out by using the self-designed large-scale compression devices, and the measured values of pore pressure and compression are obtained. The comparison between the measured and calculated values shows that the pore pressure model and compression model can describe the variation of the pore pressure and compression of foam-conditioned soil under different gradations. The foam injection ratio and gradation have a significant impact on the pore pressure of the foam-conditioned soil.

**Key words:** earth pressure balance shield; gradation; foam-conditioned coarse-grained soil; pore pressure; compression calculation model

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52022112)

收稿日期: 2022-05-20

\*通信作者 (E-mail: sywang@csu.edu.cn)

## 0 引言

盾构法隧道施工中往往使用合适的改良剂对渣土进行改良以确保盾构机安全高效掘进。常用的渣土改良剂有水、泡沫剂、分散剂、膨润土和高分子聚合物,其中水和泡沫剂适用于各种地层,分散剂适用于黏性较大的地层<sup>[1]</sup>,膨润土适用于缺乏细粒的颗粒土地层,高分子聚合物适用于泡沫剂和膨润土无法改良的富水颗粒土地层<sup>[2]</sup>。相比于其他改良剂,泡沫剂成本较低、适用性广,由其产生的泡沫可对土中粗颗粒间的渗流通道进行封堵<sup>[3]</sup>,且能有效提高盾构渣土压缩性,因此被广泛应用于渣土改良<sup>[4]</sup>。盾构在富水粗颗粒地层中掘进时,开挖面的水压力可能会直接“击穿”土仓与螺旋机中的渣土,形成渗流通道,发生喷涌事故<sup>[5-6]</sup>。为防止地下水入渗,泡沫改良土的孔隙压力不应小于开挖面前方的水压力<sup>[7]</sup>,因此,有必要对改良土孔隙压力计算展开研究。

泡沫改良土中由于存在大量气泡,属于非饱和土<sup>[8]</sup>,已有学者对非饱和土受压过程中的孔隙压力计算进行了探究。Huarez等<sup>[9]</sup>针对非饱和粉黏土提出了考虑土体先期固结压力条件下孔隙压力计算模型,但该计算模型中的参数需要从三轴试验获取。林成功等<sup>[10]</sup>基于弹性理论推导出排水条件下非饱和黏土孔隙压力计算公式,并且对该公式进行了验证,结果表明理论值与实测值误差较小。然而,盾构渣土经过合理的改良后渗透性较低<sup>[11-12]</sup>,渣土由螺旋输送机排出速度远大于渣土中渗流速度<sup>[13]</sup>,显然,泡沫改良土不排水条件下可以更好地揭示盾构掘进过程中改良土在土仓内的孔压变化规律。Wang等<sup>[7]</sup>基于波义耳定律推导了不同泡沫注入比下泡沫改良土不排水孔压计算模型,但该计算模型未能充分考虑典型级配参数的影响。

然而,颗粒级配决定了土颗粒间的填充情况,由于气相体积的不同,在压力作用下不同级配土体孔隙压力的发展必然不同<sup>[7]</sup>。李一凡等<sup>[14]</sup>自制了监测非饱和土孔隙压力的试验装置,研究发现不同级配的土体对孔隙压力峰值有较大影响,其中粒径越大,孔压的峰值越小。陈正汉等<sup>[15]</sup>对非饱和土的孔隙压力形成机理、应力特性及影响因素等方面进行分析,研究发现非饱和土的力学性能与级配有关。刘兴荣等<sup>[16]</sup>通过室内水槽试验探究了不同级配的弃渣泥石流形成过程中的孔隙压力变化情况,当粒径大于2 mm的砾粒含量大于50%时,孔隙压力迅速增大。总体上,国内外学者在级配对孔隙压力的影响规律方面取得了一定成果,但尚未揭示颗粒级配对一维不排水压缩条件下泡沫改良土孔隙压力的影响规律。

Wang等<sup>[7]</sup>针对特定级配的泡沫改良土进行了研究,但是现场地层多变,所建立的孔压计算模型无法有效指导现场,需要构建考虑级配影响的孔压计算模型,为土压平衡盾构掌子面前方地下水渗流分析提供依据。为此,本文在Wang等<sup>[7]</sup>研究的基础上,提出考虑颗粒级配和改良参数的泡沫改良土一维不排水压缩作用下孔隙压力计算模型,并基于双曲线方程推导出泡沫改良土的压缩计算模型,将其引入孔压计算模型,简化计算步骤,进一步完善孔压计算模型。研究成果可为盾构土仓中渣土孔隙压力实时评价提供依据,有利于指导盾构安全高效掘进。

## 1 泡沫改良土孔隙压力及压缩计算模型

### 1.1 孔压计算模型建立

Wang等<sup>[7]</sup>对盾构泡沫改良土压缩试验提出了3点假设:①液相、气相、泡沫三相连通,在一维压缩过程中保持动态平衡状态,即不考虑空气和水之间的压差;②泡沫改良土不排水不排气;③外界温度恒定。然后,基于波义耳定律,Wang等<sup>[7]</sup>提出了考虑改良参数的泡沫改良土孔隙压力计算模型:

$$u = \frac{P_{\text{atm}} \Delta V (1 + F_{\text{IR}})}{\left[ n - \frac{(1-n)G_s w}{\rho_w} + F_{\text{IR}} \left( 1 - \frac{1}{F_{\text{ER}}} \right) \right] V_s - \Delta V (1 + F_{\text{IR}})} \quad (1)$$

式中:  $u$  为孔隙压力;  $P_{\text{atm}}$  为初始孔隙压力,即大气压;  $G_s$  为土体颗粒相对质量密度;  $n$  为试样孔隙率;  $w$  为试样含水率;  $\rho_w$  为水的密度;  $F_{\text{ER}}$  为发泡倍率;  $F_{\text{IR}}$  为泡沫注入比;  $\Delta V$  为泡沫改良土体积变形量;  $V_s$  为泡沫改良土初始体积。

Furnas<sup>[17]</sup>提出了经典的不连续颗粒堆积理论,认为较小的颗粒填充在由较大颗粒形成的孔隙中。基于不连续颗粒堆积理论,考虑多粒径颗粒孔隙比计算模型,假设多粒径颗粒体的孔隙比符合

$$e = e_j - f(m) \quad (2)$$

式中:  $e_j$  为理想状态下单一粒径土样的孔隙比,参考Cubrinovski等<sup>[18]</sup>采用的理想立方体排列均匀圆球模型取值;  $f(m)$  为“填隙颗粒”的固体物质体积含量分数,与颗粒的级配有关。

多数情况下,土颗粒的粒径符合双对数分布<sup>[19]</sup>:

$$\lg Q_d = s \lg d + \lg Q_{d0} \quad (3)$$

式中,  $Q_d$  为对应粒径  $d$  时的累积含量,  $s$  为土颗粒粒径双对数分布曲线斜率。

张程林<sup>[20]</sup>通过数值模拟得出“填隙颗粒”固体物质体积含量分数与粒度分布宽度  $m$  之间的关系:

$$f(m) = 0.34 \times \frac{m^{3.05}}{0.1 + m^{3.05}} \quad (4)$$

式中,  $m$  可由土颗粒粒径双对数分布曲线的斜率  $s$  计算获得:

$$m = \lg \sqrt[5]{19} \quad (5)$$

另外, 根据土力学知识, 土的不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  为

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (6)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad (7)$$

式中,  $d_{60}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{10}$  分别为粒径分布曲线的纵坐标等于 60%, 30%, 10% 时对应的粒径。

土颗粒的级配曲线符合双对数线性分布,  $s$  分别可用  $C_u$ 、 $C_c$  和  $d_{60}$  来计算。

采用  $C_u$  表征  $s$ :

$$s = \frac{\lg Q_{60} - \lg Q_{10}}{\lg d_{60} - \lg d_{10}} = \frac{\lg 60 - \lg 10}{\lg d_{60} - \lg d_{10}} = \frac{\lg 6}{\lg \frac{d_{60}}{d_{10}}} = \frac{\lg 6}{\lg C_u} \quad (8)$$

同理, 采用  $C_c$  表征  $s$ :

$$s = \frac{\lg 1.5}{\lg C_c} \quad (9)$$

采用  $d_{60}$  表征  $s$ :

$$s = \frac{\lg 60 - \lg Q_{d0}}{\lg d_{60}} \quad (10)$$

式 (8) ~ (10) 分别实现了用  $C_u$ 、 $C_c$ 、 $d_{60}$  表征  $s$ , 取式 (8) ~ (10) 计算结果的算术平均值, 以减少参数  $s$  计算误差<sup>[21]</sup>:

$$s = \frac{(\lg 60 - \lg Q_{d0}) \lg C_u \lg C_c + \lg 6 \lg d_{60} \lg C_c + \lg 1.5 \lg d_{60} \lg C_u}{3 \lg d_{60} \lg C_u \lg C_c} \quad (11)$$

令  $\theta = \lg C_u \lg C_c \lg d_{60}$ , 联立式 (4), (5), (11) 可得

$$f(m) = \frac{0.34(31 \lg 190)^{3.05}}{0.1(\theta(\lg 60 / Q_{d0}) / \lg d_{60} + \theta \lg 6 / \lg C_u + \theta \lg 1.5 / \lg C_c) + (31 \lg 190)^{3.05}} \quad (12)$$

式 (12) 实现了将粒径级配曲线典型参数  $C_u$ 、 $C_c$  和  $d_{60}$  引入“填隙颗粒”的固体物质体积含量分数方程中。联立式 (1), (2), (12) 可得

$$u = \frac{P_{\text{atm}}(1 + F_{\text{IR}})}{\left[ \frac{e_j - f(m) - wG_s}{1 + e_j - f(m)} + F_{\text{IR}} \left( 1 - \frac{1}{F_{\text{ER}}} \right) \right] \frac{V_s}{\Delta V} - (1 + F_{\text{IR}})} \quad (13)$$

式 (13) 为泡沫改良土孔隙压力计算模型, 其建立了泡沫改良土在一维压缩时孔隙压力与颗粒级配参数  $C_u$ 、 $C_c$ 、 $d_{60}$ 、 $F_{\text{IR}}$ 、 $F_{\text{ER}}$  和  $w$  之间的关系。

## 1.2 压缩计算模型建立

式 (13) 建立的孔隙压力计算模型仍然需要进行压缩试验来获取不同竖向压力下泡沫改良土的体积变

形量, 不利于将其进行现场推广应用, 与此同时, 泡沫改良土在不同土仓压力下的孔隙比也是判断盾构渣土改良情况的重要指标, 因此有必要建立泡沫改良土不排水一维压缩计算模型。

在一维压缩条件下, 双曲线方程可以用作表征土的轴向应力-轴向应变关系<sup>[22]</sup>, 彭长学等<sup>[23]</sup>基于双曲线方程建立了  $e-p$  曲线分析模型:

$$e_i = e_0 - \frac{(1 + e_0)P_i}{A + BP_i} \quad (14)$$

式中,  $P_i$  为竖向压力;  $e_i$  为  $P_i$  下土的孔隙比;  $e_0$  为土的初始孔隙比;  $A$ 、 $B$  为经验参数, 采用数据拟合方式确定。

曹文贵等<sup>[24]</sup>提出新的模型参数确定方法, 赋予参数  $A$  和  $B$  明确的物理意义:

$$A = E_s \quad (15)$$

$$B = E_s \left[ \sqrt{1 + 8(1 + e_0)/(E_s a_{1-2})} - 3 \right] / 400 \quad (16)$$

式中,  $E_s$  为初始压缩模量,  $a_{1-2}$  为压缩系数。

泡沫改良土与常规土不同的是其内部含有大量气泡, 并且为了实现良好的流动性, Bezuijen 等<sup>[25]</sup>提出改良土初始孔隙比远大于未改良土的最大孔隙比。泡沫改良土初始压缩变形主要由气体控制<sup>[26]</sup>, 由理想气体方程可知

$$PV = nRT \quad (17)$$

式中:  $P$  为气体压力;  $V$  为气体体积;  $n$  为气体的物质的量;  $R$  为气体常量;  $T$  为体系温度。

在  $T$  不变的前提下有

$$P_{\text{atm}}V_0 = (P_{\text{atm}} + P_i)(V_0 - V_i) \quad (18)$$

式中,  $V_0$  为初始气相体积,  $V_i$  为加压后减少的气相体积, 由于泡沫改良土初始压缩主要受气体控制, 即泡沫改良土体积变形量。

将式 (18) 转化为

$$V_i = V_0 - \frac{P_{\text{atm}}V_0}{(P_{\text{atm}} + P_i)} \quad (19)$$

其中,

$$V_0 = nV(1 - S_r) \quad (20)$$

式中,  $n$  为孔隙率,  $S_r$  为添加泡沫后的试样饱和度,  $V$  为试样体积。

将式 (20) 代入式 (19) 可得

$$V_i = nV(1 - S_r) - \frac{P_{\text{atm}}Vn(1 - S_r)}{P_{\text{atm}} + P_i} \quad (21)$$

针对横截面积为  $S$  的压缩仪,  $V_i = Sh_i$ ,  $V = Sh$ , 式 (21) 可转化为

$$\frac{h_i}{h} = n(1 - S_r) - \frac{P_{\text{atm}}n(1 - S_r)}{P_{\text{atm}} + P_i} \quad (22)$$

式中:  $h_i$  为试样压缩变形的高度;  $h$  为试样初始高度。

根据土力学基本知识可得

$$e_i = \frac{(h - h_i)(1 + e_0)}{h} - 1, \quad (23)$$

$$a = -\frac{\Delta e}{\Delta p}, \quad (24)$$

$$n = \frac{e_0}{1 + e_0}, \quad (25)$$

$$E_s = \frac{1 + e_0}{a}. \quad (26)$$

式中:  $a$  为土的压缩系数;  $\Delta e$  为孔隙比的差值;  $\Delta p$  为竖向压力的差值。

联立式 (22) ~ (26) 可得

$$E_s = \frac{\alpha(1 + e_0)P_i}{\left[1 - e_0 S_r + \frac{P_{atm} e_0 (1 - S_r)}{P_{atm} + P_i}\right] - (1 + e_0)}. \quad (27)$$

联立式 (14) ~ (16), (27) 可得不同压力下泡沫改良土的孔隙比:

$$e_i = e_0 - \frac{(1 + e_0)P_i}{E_s + (E_s \left[ \sqrt{1 + 8(1 + e_0)/(E_s a_{1-2}) - 3} \right] / 400) P_i}. \quad (28)$$

式 (27) 引入了泡沫改良土初始压缩模量修正系数  $\alpha$ , 由 Mori 等<sup>[26]</sup> 的试验结果可得,  $F_{IR}=70\%$  以上的泡沫改良土在压缩初始阶段完全受气体控制, 严格遵循理想气体方程。然而, 实际工程中考虑到建设成本等因素,  $F_{IR}$  往往低于 70%。因此, 理想状态下的泡沫改良土在式 (27) 中  $\alpha$  取 1, 而实际的泡沫改良土的初始压缩模量较理想状态更大, 所以  $\alpha > 1$ 。 $F_{IR}$  是影响泡沫改良土初始压缩是否满足理想气体方程的主要因素<sup>[26]</sup>, 确定  $F_{IR}$  后可唯一确定  $\alpha$ 。

### 1.3 孔压简便计算模型

将式 (23) 转化为

$$h_i = h - \frac{(e_i + 1)h}{(e_0 + 1)}, \quad (29)$$

并与式 (28) 联立即可获取泡沫改良土在不同压力下的  $h_i$ 。

另外, 针对横截面积为  $S$  的压缩仪, 可将式 (13) 转化为

$$u = \frac{P_{atm}(1 + F_{IR})}{\left[ \frac{e_j - f(m) - wG_s}{1 + e_j - f(m)} + F_{IR} \left( 1 - \frac{1}{F_{ER}} \right) \right] \frac{h}{h_i} - (1 + F_{IR})}. \quad (30)$$

联立式 (29), (30) 可得

$$u = \frac{P_{atm}(1 + F_{IR})}{\left[ \frac{e_j - f(m) - wG_s}{1 + e_j - f(m)} + F_{IR} \left( 1 - \frac{1}{F_{ER}} \right) \right] \left[ \left( 1 - \frac{e_i + 1}{e_0 + 1} \right) - (1 + F_{IR}) \right]}. \quad (31)$$

式 (31) 引入了压缩计算模型, 建立了孔压简便计算模型, 该模型无需进行压缩试验获取渣土在各级压力下的体积变形量, 简化了孔隙压力计算步骤, 有

利于孔压计算模型的推广应用, 进一步完善了盾构泡沫改良渣土孔压计算模型。

## 2 孔隙压力及压缩计算模型验证

### 2.1 试验方案

本文设计了 13 组不同级配工况, 通过不同粒径的标准筛将试验土分成若干单粒径粒组, 再根据设计的级配工况配置成不同的级配曲线, 按级配参数  $d_{60}$ ,  $C_u$ ,  $C_c$  将试样分成 3 类, 不同组合的试样级配分布曲线如图 1 所示。表 1 给出了各级配土的基本物性指标, 并根据《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》<sup>[27]</sup> 给出了各级配土的工程分类。可以看出, 试验土类别包含了级配良好砾 (GW)、级配不良砾 (GP)、含细粒土砂 (SF)、级配良好砂 (SW), 因此粒径分布的设计能够较好地反映颗粒级配变化对泡沫改良土的压缩特性影响。

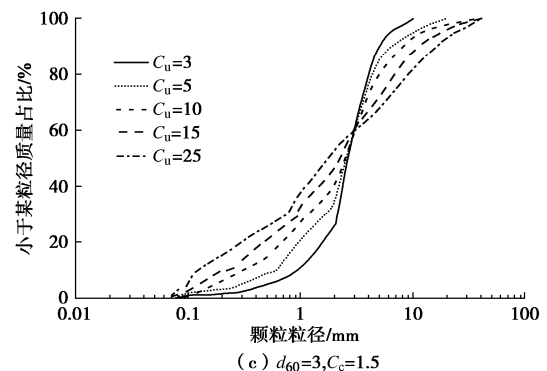
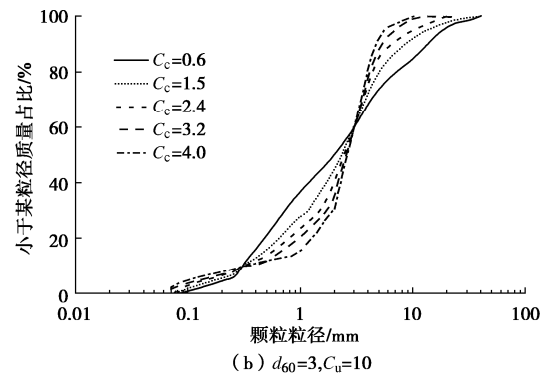
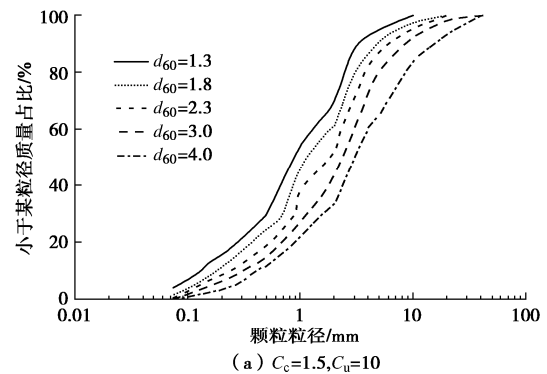


图 1 试验土样级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of various soil specimens

为了研究泡沫改良土一维压缩特性, 学者们研制

了诸多适用于泡沫改良土压缩试验的设备<sup>[26, 28-29]</sup>。现有的测试设备尺寸较小, 为研究级配对改良土压缩性的影响, 需采用更大尺度压缩仪。根据《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件: GB/T15406—2007》<sup>[30]</sup>和《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》<sup>[27]</sup>, 固结试验试样的高度取最大粒径的 4~6 倍为宜, 较大尺寸的仪器可以测试不同级配的粗颗粒土, 以便获取级配对一维压缩特性的影响, 减小试验腔的边界效应<sup>[28]</sup>。因此, 本研究采用自主设计的大型一维压缩仪<sup>[7]</sup>, 直径为 400 mm, 高度为 380 mm, 如图 2 所示。压缩试验加载系统采用电机驱动, 属于恒应变式加载, 加载速率为 1.0 mm/min。根据 Wu 等<sup>[31]</sup>的研究, 泡沫改良土的压缩性等工程性能在 60 min 以内保持稳定, 所以试验中未考虑泡沫消散的影响。

表 1 土样基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of various soil specimens						
工况	$d_{60}/\text{mm}$	$C_c$	$C_u$	干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	最大孔 隙比	分类
1	1.3	1.5	10	1.632	0.809	SF
2	1.8	1.5	10	1.648	0.820	SW
3	2.3	1.5	10	1.621	0.877	SW
4	3.0	1.5	10	1.593	0.858	GW
5	4.0	1.5	10	1.623	0.854	GW
6	3.0	0.6	10	1.679	0.784	GP
7	3.0	2.4	10	1.489	0.908	GW
8	3.0	3.2	10	1.456	0.952	GP
9	3.0	4.0	10	1.402	0.990	GP
10	3.0	1.5	3	1.365	1.033	GP
11	3.0	1.5	5	1.493	0.917	GW
12	3.0	1.5	15	1.630	0.761	GW
13	3.0	1.5	25	1.695	0.737	SW

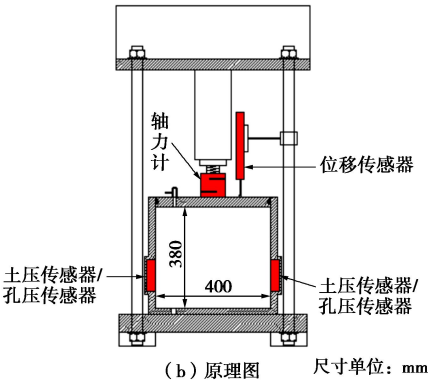


图 2 大型压缩仪

Fig. 2 Large-scale compression devices

发泡及泡沫性能参数如表 2 所示, 盾构机在粗颗粒地层中掘进时, 泡沫剂溶液质量浓度和发泡压力为 3%和 0.3 MPa 是合适的<sup>[6-7]</sup>。为控制  $F_{IR}$  和  $w$  变化对泡沫改良土压缩特性的影响, 所有土样改良工况均取  $F_{IR} = 20\%$ ,  $w = 10\%$ 。压缩试验主要步骤如下: ①配置不同级配试样, 加水至设计的含水率进行搅拌, 覆盖保鲜膜封闭, 静置 24 h 使试样充分吸水湿润; ②利用发泡系统产生泡沫, 将湿润的土样与泡沫在搅拌机中正反搅拌各 60 s; ③将试样逐层加入试验腔, 使试样呈自然堆积状态, 记录试件初始高度, 打开试样室顶板排水阀, 盖上顶板, 确保此过程中试样顶部空气排出, 然后关闭排水阀; ④以 25 kPa 为间隔逐级加压至 200 kPa, 随后同样以 25 kPa 为间隔卸载, 加卸载过程中自动采集轴力、竖向位移、侧向土压及孔压。Wang 等<sup>[7]</sup>认为大多数盾构隧道工程中, 土仓压力小于 200 kPa, 故取最大竖向压力为 200 kPa。

表 2 发泡及泡沫性能参数

Table 2 Foaming and performance parameters of foam				
泡沫剂质 量浓度/%	泡沫剂 密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	发泡压力/ MPa	发泡 倍率	半衰期/ min
3	1.08	0.3	11	16

2.2 压缩计算模型验证

试验前将试样置于量筒中进行称重, 以获得试样密度, 由式 (32) 可计算出试样初始孔隙比  $e_0$ , 通过式 (25) 即可转化为孔隙率  $n$ 。进一步地, 由式 (33) 可得到试样的饱和度  $S_r$ , 表 3 给出了各试样初始孔隙比与饱和度。

$$e_0 = \frac{G_s(1 + 0.01w)}{\rho} - 1 \quad (32)$$

式中,  $\rho$  为泡沫改良土的密度。

$$S_r = \frac{G_s w}{e_0} \quad (33)$$

由试验可知, 在  $F_{IR}=20\%$ 的条件下不同级配泡沫改良土的  $a_{1-2}$ 约等于 0.05 ( $10^{-2} \text{ kPa}^{-1}$ ),  $P_1$ 取泡沫改良土所受的第一级荷载为 25 kPa, 根据压缩试验可得  $F_{IR}=20\%$ 条件下的泡沫改良土初始压缩模量与理想情况下的泡沫改良土初始压缩模量的比值介于 3~4, 故压缩模量修正系数  $\alpha$  取 3.5。将所需参数代入式 (28) 压缩计算模型中, 孔隙比计算值与实测值如图 3 所示, 可以看出竖向总压力较小时, 孔隙比计算值与实测值相差较小, 随着竖向总压力增大, 两者差异略有增大。Pearson 相关系数可用于考察两个变量的相关程度, 将各工况的孔隙比计算值和实测值导入 SPSS 软件分析, 结果显示不同级配试样的实测值与计算值相关系数达到 0.978, 说明总体上两者相差较小, 证明了该泡沫改良土压缩计算模型的合理性与可行性。

表 3 不同级配泡沫改良土的初始孔隙比与饱和度  
Table 3 Initial void ratios and saturations of foam-conditioned soils with different gradations

$C_c=1.5, C_u=10$			$d_{60}=3\text{ mm}, C_u=10$			$d_{60}=3\text{ mm}, C_c=1.5$		
$d_{60}/\text{mm}$	$e_0$	$S_r$	$C_c$	$e_0$	$S_r$	$C_u$	$e_0$	$S_r$
1.3	0.935	0.2853	0.6	0.985	0.2683	3	1.488	0.1785
1.8	1.027	0.2589	1.5	1.136	0.2340	5	1.251	0.2123
2.3	1.095	0.2429	2.4	1.219	0.2182	10	1.136	0.2340
3.0	1.136	0.2340	3.2	1.282	0.2074	15	1.006	0.2644
4.0	1.289	0.2061	4.0	1.383	0.1923	25	0.905	0.2938

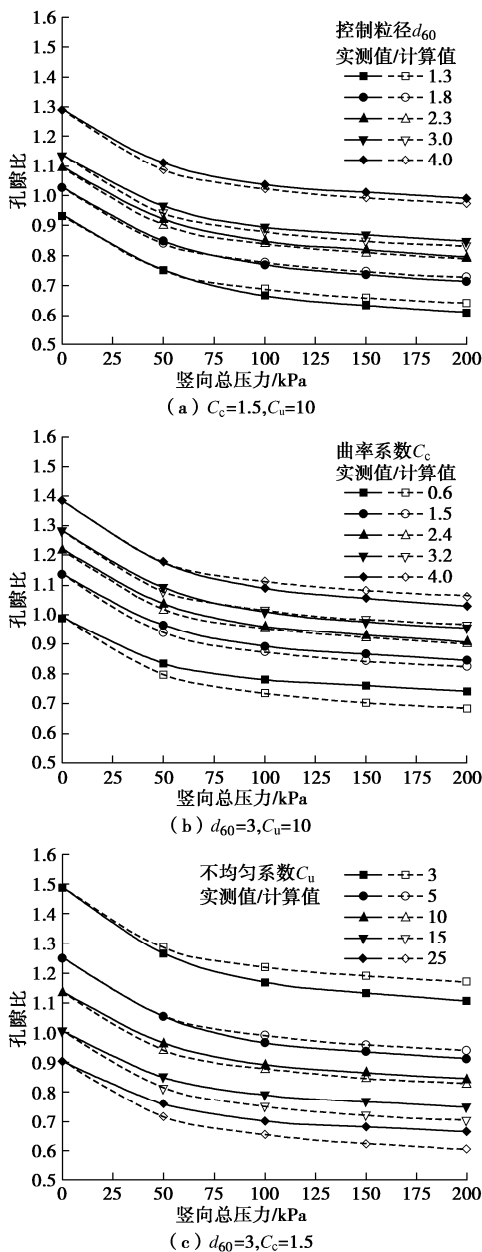


图 3 压缩曲线计算值与实测值对比图

Fig. 3 Comparison between calculated and measured values of compression curves

2.3 孔压计算模型验证

对比实测值与计算值, 以验证式 (13) 孔压计算模型的合理性。试验中  $P_{atm}=101\text{ kPa}$ ,  $G_s=2.65$ ,  $w=10\%$ ,

$F_{ER}=11$ ,  $F_{IR}=20\%$ , 级配参数如表 1 所示, 表 4 为计算出的不同级配试样粒度分布宽度  $m$ , 表 5 为不同级配泡沫改良土在不同竖向压力作用下的体积变形量  $\Delta V$ , 将以上参数代入式 (13) 孔压计算模型。与此同时, 将 Wang 等<sup>[7]</sup>的试验工况一并对比分析, Wang 等<sup>[7]</sup>采用泡沫注入比为 10%, 20%, 30%, 40% 的相同级配砂土进行不排水压缩试验, 根据砂土级配曲线可求得  $f(m)=0.288$ , 其余参数为  $P_{atm}=101\text{ kPa}$ ,  $G_s=2.65$ ,  $w=10\%$ ,  $F_{ER}=11$ , 计算值与实测值如图 4 所示。将孔压计算值与实测值导入 SPSS 软件分析, 结果显示相关系数达到 0.824, 已达到极显著相关<sup>[32]</sup>, 说明计算模型所作假设是合理的, 所提出的孔压计算模型的精度可以接受。图 4 中蓝色数据为 Wang 等<sup>[7]</sup>不同  $F_{IR}$  的试验数据, 经过与计算值对比, 说明该计算模型对不同  $F_{IR}$  的工况仍然适用。计算结果显示, 除  $F_{IR}$  会对泡沫改良土的孔隙压力值产生影响<sup>[7]</sup>, 级配参数也是影响泡沫改良土孔隙压力值的重要因素。

表 4 不同级配试样粒度分布宽度

gradations					
$C_c=1.5, C_u=10$		$d_{60}=3\text{ mm}, C_u=10$		$d_{60}=3\text{ mm}, C_c=1.5$	
$d_{60}/\text{mm}$	$m$	$C_c$	$m$	$C_u$	$m$
1.3	1.139	0.6	1.328	3	1.036
1.8	1.188	1.5	1.244	5	1.153
2.3	1.218	2.4	1.492	10	1.244
3.0	1.244	3.2	1.579	15	1.291
4.0	1.296	4.0	1.594	25	1.297

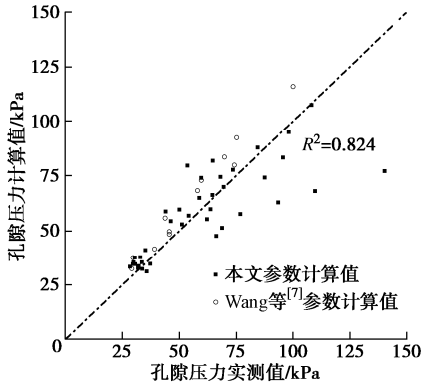


图 4 孔隙压力计算值与实测值对比图

Fig. 4 Comparison between calculated and measured values of pore pressure

表 5 不同竖向压力作用下泡沫改良土体积变形量 $\Delta V$   
Table 5 Volume deformations of foam-conditioned soils under different vertical pressures

轴压/ kPa	$C_c=1.5, C_u=10$					$d_{60}=3\text{ mm}, C_u=10$					$d_{60}=3\text{ mm}, C_c=1.5$				
	$d_{60}/\text{mm}$					$C_c$					$C_u$				
	1.3	1.8	2.3	3	4	0.6	1.5	2.4	3.2	4	3	5	10	15	25
50	32.6	30.7	28.4	25.6	32.6	25.2	25.6	29.1	28.1	29.1	31.6	31.9	25.6	25.5	24.6
100	47.9	44.5	40.5	36.2	47.9	34.2	36.2	41.1	40.0	41.0	45.4	46.0	36.2	35.5	34.8
200	58.2	54.5	49.3	43.4	58.2	41.0	43.4	49.7	48.2	49.6	54.4	57.7	43.4	42.4	41.5

进一步地，为验证式（31）建立的孔压简便计算模型的可行性，图 5 给出了孔隙压力计算值与实测值对比结果，其中孔隙压力计算值随着竖向压力增大，增长速率逐渐降低，在相同的竖向压力下， $d_{60}$ ， $C_c$  越小， $C_u$  越大的试样孔隙压力计算值越大，与试验结果规律一致。将计算值与实测值导入 SPSS 软件分析，结果显示相关系数达到 0.924，表明该模型的合理性。

需要说明的是，由图 5 可以看出，孔隙压力较低时计算值与实测值误差较小，孔隙压力较高时部分计算值误差较大，原因在于，高的孔隙压力对应着高的竖向总压力，该计算模型忽略了土颗粒形状与颗粒间的摩擦力对孔隙压力的影响，随着竖向压力增加，泡沫改良土的压缩主要由土颗粒间的有效应力控制<sup>[26]</sup>，相比于气体控制的压缩阶段，竖向压力较大时土颗粒形状与颗粒间的摩擦力对孔隙压力的影响更大，导致计算值误差较大。另外，泡沫注入不同级配粗粒土中的消散情况差异性未知，可能也是计算模型出现误差的原因之一。此外， $C_u$  较大时，泡沫改良土孔隙压力理论计算值与实测值误差较大，原因在于， $C_u$  越大的试样土颗粒间的填充效果越好，颗粒间发生相对滑动的难度较大，宏观上表现为土颗粒间摩擦力增大，而摩擦的影响在计算模型中尚未考虑，导致不同  $C_u$  下泡沫改良土孔隙压力理论计算值误差较大。诚然，由于土颗粒粒组分布的复杂性以及对孔压影响的细观机理尚未揭示，导致该模型精确性尚存在一定不足，但模型计算值随级配参数变化在规律上与试验值保持一致，后续将对计算模型进行修正与改进。

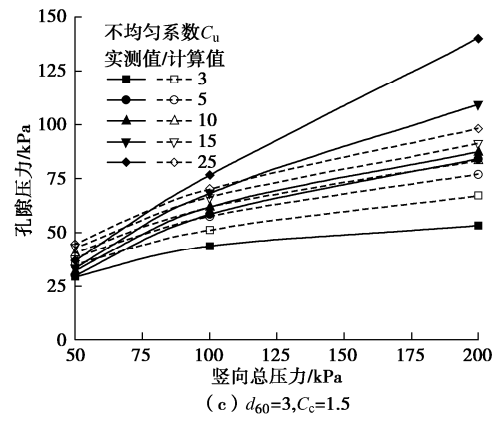
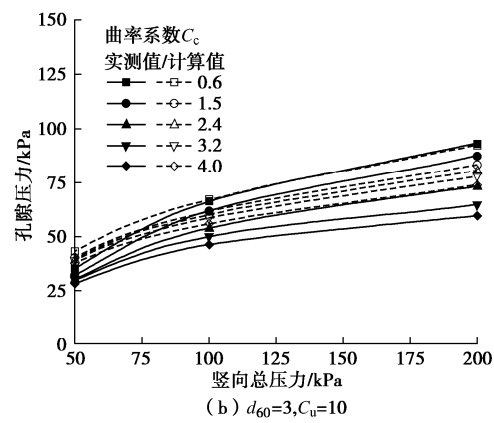
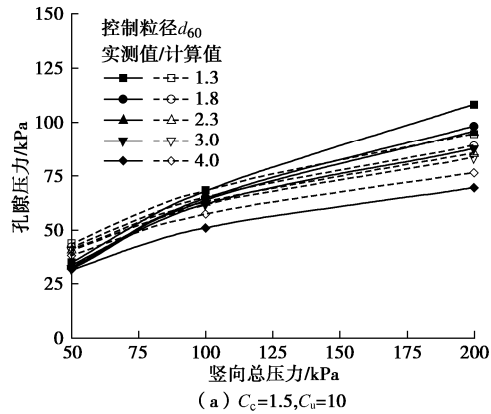


图 5 孔隙压力计算值与实测值对比图

Fig. 5 Comparison between calculated and measured values of pore pressure

3 结 论

在 Wang 等<sup>[7]</sup>给出一维不排水压缩作用下孔隙压力计算模型的基础上，提出了变级配泡沫改良土一维压缩及孔隙压力计算模型，并对其进行了验证，得出以下 3 点结论。

（1）基于波义耳定律和不连续颗粒堆积理论，建立了考虑级配参数和渣土改良参数的泡沫改良土不排水孔隙压力计算模型。

（2）针对泡沫改良土的变形特点，提出了初始压缩模量  $E_s$  的计算方法，建立了泡沫改良土压缩计算模型，计算结果表明，当竖向压力小于 50 kPa 时孔隙比减小较快，随着竖向压力进一步增大，压缩曲线趋近平缓，与试验结果规律一致，不同级配试样的实测值

与计算值相关系数为 0.978。

(3)将泡沫改良土压缩计算模型引入孔压计算模型, 提出了孔压简便计算模型, 计算结果表明, 在相同的竖向压力下,  $d_{60}$ ,  $C_c$  越小,  $C_u$  越大的试样孔隙压力越大, 与试验结果规律一致, 不同级配试样的实测值与计算值相关系数为 0.924。该模型证明了  $F_{IR}$  和土体级配参数均会对泡沫改良土的孔隙压力产生明显影响。

值得一提的是, 本文提出的计算模型忽略了土颗粒形状与颗粒间的摩擦力对孔隙压力的影响, 并且泡沫注入不同级配粗粒土中的消散情况差异性未知, 需要利用细观力学和离散元进一步研究上述影响, 可作为后续的研究方向。

### 参考文献:

- [1] 方 勇, 王 凯, 陶力铭, 等. 黏性地层面板式土压平衡盾构刀盘泥饼堵塞试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1651-1658. (FANG Yong, WANG Kai, TAO Liming, et al. Experimental study on clogging of cutterhead for panel earth-pressure-balance shield tunneling in cohesive strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1651-1658. (in Chinese))
- [2] 徐征杰, 郭晓阳. 基于响应面法的盾构施工膨润土改良参数优化[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 194-200. (XU Zhengjie, GUO Xiaoyang. Optimization of bentonite parameters for shield tunneling based on response surface method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(1): 194-200. (in Chinese))
- [3] 黄 硕. 盾构泡沫改良粗颗粒渣土渗流时变性及其理论预测方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2020: 34-36. (HUANG Shuo. Research on Time Variation and Theoretical Prediction Method of Permeation Characteristics for Foam-conditioned Coarse-grained Soil in EPB Shield Tunneling[D]. Changsha: Central South University, 2020: 34-36. (in Chinese))
- [4] 王树英, 刘朋飞, 胡钦鑫, 等. 盾构隧道渣土改良理论与技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 8-34. (WANG Shuying, LIU Pengfei, HU Qinxin, et al. State-of-the-art on theories and technologies of soil conditioning for shield tunneling[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 8-34. (in Chinese))
- [5] 贺少辉, 张淑朝, 李承辉, 等. 砂卵石地层高水压条件下盾构掘进喷涌控制研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1583-1590. (HE Shaohui, ZHANG Shuchao, LI Chenghui, et al. Blowout control during EPB shield tunnelling in sandy pebble stratum with high groundwater pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1583-1590. (in Chinese))
- [6] HUANG S, WANG S Y, XU C J, et al. Effect of grain gradation on the permeability characteristics of coarse-grained soil conditioned with foam for EPB shield tunneling[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(11): 4662-4674.
- [7] WANG H B, WANG S Y, ZHONG J Z, et al, 2021. Undrained compressibility characteristics and pore pressure calculation model of foam-conditioned sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 118: 104161.
- [8] SILLS G C, WHEELER S J, THOMAS S D, et al. Behaviour of offshore soils containing gas bubbles[J]. Géotechnique, 1991, 41(2): 227-241.
- [9] HUARES B, RICO R. Mecanica de Suelos[M]. 3rded. Mexico: LIMUSA, 1980: 456-466. (HUARES B, RICO R. Soil Mechanics[M]. 3rded. Mexico: LIMUSA, 1980: 456-466. (in Spanish))
- [10] 林成功, 吴德伦. 非饱和黏土孔隙压力计算与实验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 605-607. (LIN Chenggong, WU Delun. Pore-pressure theory and experimental research for non-saturated clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 605-607. (in Chinese))
- [11] HU Q X, WANG S Y, QU T M, et al. Effect of hydraulic gradient on the permeability characteristics of foam-conditioned sand for mechanized tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99: 103377.
- [12] LING F L, WANG S Y, HU Q X, et al. Effect of bentonite slurry on the function of foam for changing the permeability characteristics of sand under high hydraulic gradients[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022, 59(7): 1061-1070.
- [13] DANG T S, MESCHKE G. Influence of muck properties and chamber design on pressure distribution in EPB pressure chambers—Insights from computational flow simulations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99: 103333.
- [14] 李一凡, 王俊刚, 徐仁宇, 等. 砂土孔隙压力影响因素的试验研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 50-55. (LI Yifan, WANG Jungang, XU Renyu, et al. Experimental study on factors affecting pore pressure of sand[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 35(4): 50-55. (in Chinese))
- [15] 陈正汉, 郭 楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究

- 的新进展[J]. 岩土力学, 2019, **40**(1): 1-54. (CHEN Zhenghan, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(1): 1-54. (in Chinese))
- [16] 刘兴荣, 崔鹏, 王飞, 等. 不同粒径级配条件下工程弃渣泥石流启动机理研究[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(6): 1593-1599. (LIU Xingrong, CUI Peng, WANG Fei, et al. Study on the threshold motion mechanism of engineering slag debris flow with different particle size grading conditions[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(6): 1593-1599. (in Chinese))
- [17] FURNAS C C. Stock distribution and gas-solid contact in the blast furnace[J]. Bureau of Mines Reports of Investigation, 1928: 8-18.
- [18] CUBRINOVSKI M, ISHIHARA K. Maximum and minimum void ratio characteristics of sands[J]. Soils and Foundations, 2002, **42**(6): 65-78.
- [19] 张世文, 张立平, 袁君, 等. 基于分形理论和地质统计学的表层土壤颗粒大小分布变化特征[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(13): 2591-2601. (ZHANG Shiwen, ZHANG Liping, YUAN Jun, et al. Characterizing variation of topsoil particle size distribution based on fractal theory and geostatistics[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, **47**(13): 2591-2601. (in Chinese))
- [20] 张程林. 级配颗粒堆积体密度估算方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013. (ZHANG Chenglin. Study on the Calculation Method of Graded Granular Particle Packing Density[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [21] 白雪梅, 赵松山. 浅谈算术平均数的作用[J]. 浙江统计, 2000(11): 12-13. (BAI Xuemei, ZHAO Songshan. On the function of arithmetic average[J]. Zhe Jiang Statistics, 2000(11): 12-13. (in Chinese))
- [22] 杨光华. 现代地基设计理论的创新与发展[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(1): 1-18. (YANG Guanghua. Innovation and development of modern theories for foundation design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(1): 1-18. (in Chinese))
- [23] 彭长学, 杨光华. 软土  $e-p$  曲线确定的简化方法及在非线形沉降计算中的应用[J]. 岩土力学, 2008, **29**(6): 1706-1710. (PENG Changxue, YANG Guanghua. A simplified method for determining  $e-p$  curve of soft soil and its application to analyzing nonlinear settlement of foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(6): 1706-1710. (in Chinese))
- [24] 曹文贵, 李鹏, 张超, 等. 土的初始和再压缩曲线分析模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(1): 166-173. (CAO Wengui, LI Peng, ZHANG Chao, et al. Analysis models of initial compression and recompression curves of soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(1): 166-173. (in Chinese))
- [25] BEZUIJEN A, SCHAMINEE P, KLEINJAN J A. Additive testing for earth pressure balance shields[C]// Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure: Theory and Practice, Planning and Design, Construction and Maintenance Vol.3. Delft Geotechnics, Delft, Netherlands, 1999: 1-12.
- [26] MORI L S, MOONEY M, CHA M S. Characterizing the influence of stress on foam conditioned sand for EPB tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **71**: 454-465.
- [27] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [28] PSOMAS S. Properties of Foam/Sand Mixtures for Tunnelling Applications[D]. Oxford: University of Oxford, 2001.
- [29] PEÑA D M Á. Foam as a Soil Conditioner in Tunnelling: Physical and Mechanical Properties of Conditioned Sands[D]. Oxford: University of Oxford, 2007.
- [30] 岩土工程仪器基本参数及通用技术条件: GB/T 15406—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. (Primary Parameter and General Specification for Geotechnical Engineering Instrument: GB/T 15406—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese))
- [31] WU Y L, NAZEM A, MENG F Y, et al. Experimental study on the stability of foam-conditioned sand under pressure in the EPBM chamber[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **106**: 103590.
- [32] 宗睿, 徐飞鹏, 贾瑞卿, 等. 一种土壤水分传感器性能测试的方法及应用[J]. 灌溉排水学报, 2013, **32**(1): 74-76. (ZONG Rui, XU Feipeng, JIA Ruiqing, et al. A test method of soil moisture sensor[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, **32**(1): 74-76. (in Chinese))