

粉质黏土小应变硬化本构参数研究^{*}刘东¹, 赵运亚², 傅鹤林², 欧高军¹, 邓皇适², 袁磊²

(1.湖南化工地质工程勘察院有限责任公司, 湖南 长沙 410000; 2.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 粉质黏土是中国广泛分布的一种易胀缩、透水性差的软土, 其力学参数确定和本构模型修正一直是研究重点。文中以长沙轨道交通 6 号线典型粉质黏土为研究对象, 通过土工试验确定其物理力学参数; 借助 ABAQUS 软件和二次开发手段, 对小应变硬化模型、摩尔-库伦模型和修正剑桥模型等进行计算对比, 得出小应变硬化模型的三轴应力-应变曲线与土工试验所得三轴应力-应变曲线最接近, 明确了该模型对粉质黏土的适用性。

关键词: 公路; 粉质黏土; 小应变硬化; 力学参数; 数值模拟; 二次开发

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)04-0085-04

粉质黏土在中国分布较广, 尤其在中部平原及东部地区工程建设中, 经常因粉质黏土变形较大导致边坡滑踏、基坑严重变形、地表过度沉降等。粉质黏土作为工程中常见的土体类型之一, 其本构模型选取一直没有统一。赵园园等通过对基坑数值分析中本构模型的对比应用, 得出修正剑桥模型可较合理地模拟软土基坑工程的开挖工况; 谢晓锋借助数值模拟方法评价基坑开挖对周边环境的影响, 得到库伦模型应用于基坑开挖时会导致不合理回弹, 而修正剑桥模型的计算结果更趋合理; 周宇等基于小应变硬化本构模型, 通过对基坑的数值分析, 得到计算值与实测数据吻合较好; 梁发云等借助数值分析方法验证了小应变硬化本构模型在软土基坑开挖分析中的适用性。目前虽然对粉质黏土的参数确定及工程计算进行了较多研究, 但针对具体工程的本构模型比选研究还有很多不足, 各类模型在不同地区的适用性还不明确, 模型在常规有限元软件中的内嵌还很缺乏, 极大限制了小应变理论的发展和工程应用。

综合来看, 各类本构模型所需材料参数通常有 12 种, 其中部分参数如粘聚力、内摩擦角等与现有摩尔-库伦本构模型相同, 而其他参数如 50% 强度的参考割线刚度、卸载/重加载的参考刚度等均是一般本构模型没有涉及的, 通常需通过基础土工试验、侧限压缩试验、固结排水三轴压缩试验来确定。该文以长沙地铁 6 号线麓枫路站典型粉质黏土为背景, 通过土力学试验确定常规参数, 借助 ABAQUS

有限元分析软件, 在内嵌小应变硬化模型(HSS)的基础上, 比选摩尔-库伦模型(MC)、修正剑桥模型(MCC)和小应变硬化模型(HSS)的适用性。

1 试样制备

土样(见图 1)均取自长沙地铁六号线麓枫路站深基坑工程。取样土层为粉质黏土层, 埋深 5.20 m, 在天然状态下含水率不高, 土体处于可塑状态, 干强度、韧性中等。土体天然密度为 $1.911 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 天然含水率为 26.50%, 孔隙比为 0.779。



图 1 2 个原状土样

2 基础土工试验

采用环刀法测量土体的天然密度, 通过烘干法测定土体含水率, 采用比重瓶法测定土的相对密度, 计算得到土体孔隙比等。

2.1 土体天然密度试验

环刀法测土体天然密度的主要步骤: 1) 用电子天平称量空环刀质量 m_1 ; 2) 将现场原状土样及环刀(擦除环刀外壁的土)一起称量, 得环刀+土的质量 m_2 ; 3) 记录环刀体积 V 。按下式计算土体的天

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51578550; 51538009)

然密度:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (1)$$

进行2次平行试验,试验结果见表1。取2次试验结果的平均值,得土样天然密度为 $1.911 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

表1 土样密度试验结果

试验 编号	环刀 质量/g	环刀 体积/cm ³	环刀+土体 质量/g	土体 质量/g	土样密度/ (g·cm ⁻³)
1	175.3	200	557.8	382.5	1.913
2	175.0	200	556.9	381.9	1.909

2.2 土体孔隙比试验

采用烘干法测定土体含水率,并用比重瓶法测定、换算得到土体孔隙比。主要步骤:1)用电子天平称量空铝盒的质量 m_3 ;2)从环刀中取土样10~20 g,放入铝盒中称量铝盒+土块的总质量 m_4 ;3)将铝盒放入烘箱中烘干10 h,密封后取出冷却至室温;4)称量铝盒+土块的总质量 m_5 ;5)取风干后土块约100 g碾散,筛取5 mm以下风干土;6)将筛取土体与比重瓶放入烘箱中烘干3 h后冷却至室温;7)称量干燥比重瓶质量 m_6 ;8)称取烘干土体10 g左右,用滤纸缓慢倒入比重瓶内,称量土体+比重瓶的质量 m_7 ;9)在比重瓶中加入半瓶纯水,煮

沸1 h后冷却,加入沸腾过的冷却水注满比重瓶,塞紧瓶塞并擦干表面水;10)称量比重瓶+水+土体的总质量 m_8 ,测量瓶内水温度;11)将比重瓶清洗干净,注满沸腾过的冷却水,塞紧瓶塞并擦干表面水,称量比重瓶+水的总质量 m_9 ;12)查询并记录相应温度对应的水的密度 ρ_t 。

土体含水率 ω 、土体相对密度 G_s 、土体孔隙比 e 按式(2)~(4)计算。土体含水率试验结果见表2,土体相对密度试验结果见表3。

$$\omega = \frac{m_5 - m_4}{m_4 - m_3} \times 100\% \quad (2)$$

$$G_s = \frac{m_7 - m_6}{m_9 + m_7 - m_6 - m_8} \rho_t \quad (3)$$

$$e = \frac{G_s \rho_w (1 + \omega)}{\rho} - 1 \quad (4)$$

表2 土体含水率试验结果

试验 编号	空铝盒的 质量/g	铝盒+土块 质量/g	烘干后铝盒+ 土块质量/g	土体含 水率/%
1	7.75	33.87	28.07	28.54
2	7.74	31.59	26.32	28.36

取2次试验结果的平均值,得土体含水率 ω 为28.45%,土体相对密度 G_s 为2.65 kg/m^3 ,根据式(4)得土体孔隙比 e 为0.779。

表3 土体相对密度试验结果

试验编号	比重瓶质量/g	比重瓶+土体 质量/g	比重瓶+土体 +水质量/g	比重瓶+ 水质量/g	水的密度/ (g·cm ⁻³)	土体的 相对密度
1	31.33	42.91	90.41	83.17	0.999	2.67
2	31.34	41.64	89.49	83.10	0.999	2.63

2.3 侧限压缩试验

土体侧限压缩试验是将标准试样置入固结仪内,得到竖向应变—竖向应力的关系,确定参考侧限刚度 $E_{\text{ref}}^{\text{ref}}$ 、刚度应力水平相关幂指数 m 和预固结应力 p_c 。试验步骤:1)用环刀将试验土样削平,在固结仪内依次放好钢护环、透水石、滤纸后将土样和环刀一起置入护环内,安装紧密无空隙,依次盖上传压盖、透水石、传压盖;2)将固结容器放置在加载杠杆横梁的中心,加载杆放在传压盖的正中凹槽内,之后安装加载设备,施加1 kPa预压力,以减小各部件间的间隙,调整百分表读数归零;3)施加各级压力12.5、25、50、100、200、400 kPa,每级压力施加24 h后测定并记录竖向位移值。按式(5)计算竖向应变 ϵ_{yy} 。竖向应变 ϵ_{yy} 与竖向应力 σ_{yy} 的关系见图2。

$$\epsilon_{yy} = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: Δh 为总沉降值; h_0 为初始土体高度。

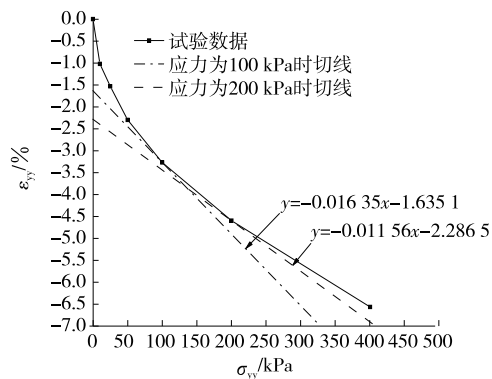


图2 侧限压缩竖向应变 ϵ_{yy} 与竖向应力 σ_{yy} 关系曲线

试验中参考应力 p^{ref} 为100 kPa,参考侧限刚度

$E_{\text{ref}}^{\text{ref}}$ 为 6 042.20 kPa, 幂指数 m 按式(6)确定。计算得: $\sigma_{yy} = 200$ kPa, $E_{\text{ref}}^{200} = 8 617.69$ kPa, $m = 0.51$ 。

$$m = \log \frac{\sigma_{yy}}{p_{\text{ref}}} \left(\frac{E_{\text{ref}}^{200}}{E_{\text{ref}}^{\text{ref}}} \right) \quad (6)$$

按式(7)计算 e , 得到 $e - \log p$ 关系曲线(见图 3)。

$$e = e_0 - \epsilon_{yy} (1 + e_0) \quad (7)$$

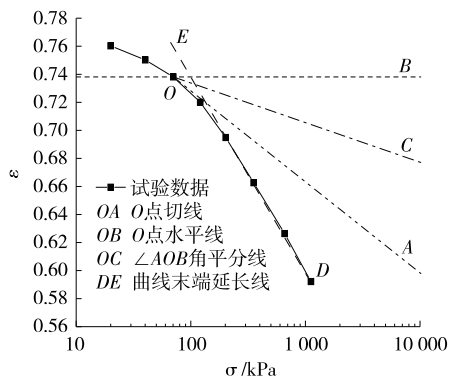


图3 $e - \log p$ 关系曲线

预固结应力 p_c 按以下方法确定: 在 $e - \log p$ 曲线中找出曲率半径的最小值点 O , 过 O 作切线 OA 、水平线 OB 及 $\angle AOB$ 的平分线 OC , 延长曲线末端直线为 DE , DE 与 OC 的交点 F 对应的压力值即为预固结应力 p_c 。根据图 3, 预固结应力 p_c 为 112.20 kPa。该土样埋深为 5.20 m, 天然密度 ρ 为 1.911×10^3 kg/m³, 为超固结土, 超固结比 OCR 为 1.13。

2.4 固结排水三轴压缩试验

固结排水三轴压缩试验是在允许排水的条件下先加围压固结, 后加载压缩直至压坏。试验步骤: 1) 制备 2 个标准三轴试样(分别用于围压 100 和 200 kPa 三轴压缩试验), 分 5 层在击实器内击实, 试样干密度、含水率与原状土相同; 2) 采用抽气饱和法抽气后完全浸泡 3 h; 3) 依次将湿滤纸、试样、湿滤纸、透水板放在压力室底座上, 安装橡皮膜, 打开排气阀; 4) 安装压力室罩, 充水并调整测力计; 5) 调节排水管及孔隙水压力阀至所需围压, 打开排水阀固结 1 h; 6) 调整活塞与试样接触, 打开三轴试验数据采集界面, 设置剪切应变速率为 0.1%/min 即 0.08 mm/min, 将测力计、位移计指数归零; 7) 启动电动机开始剪切, 加载至测力计读数约 300 N 时关闭电动机; 8) 调整剪切应变速率为 -0.1%/min 即三轴拉伸 0.08 mm/min, 启动电动机开始卸载, 卸载至测力计读数约 10 N 时关闭电动机; 9) 调整剪切应变速率为 0.1%/min 即压缩 0.08 mm/min, 启动电动机开始重加载, 出现峰值后进行 15%~25% 竖向

应变, 关闭电动机, 试验结束。围压 100 kPa 时土体加载—卸载—重加载的应力—应变曲线见图 4。

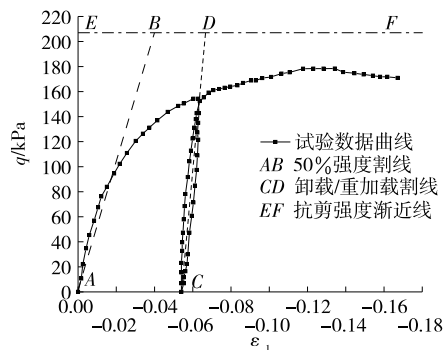


图4 土体应力—应变曲线

由图 4 可知: 50% 强度时的参考割线刚度 E_{50}^{ref} 即为割线 AB 斜率, 为 5 274.93 kPa; 卸载/重加载的参考刚度 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 即为线 CD 斜率, 为 17 683.13 kPa; 刚度参考应力 p^{ref} 设为 100 kPa; 抗剪强度的渐进值 q_a 为线 EF 对应的应力值, 为 207.15 kPa。围压为 100 kPa 时土体应变—轴应变曲线见图 5。

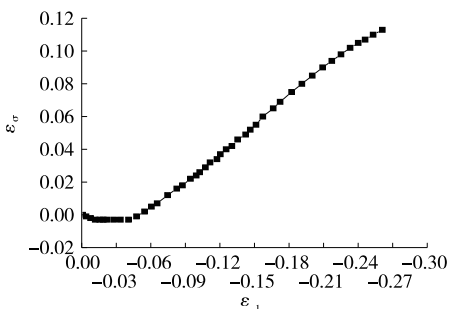


图5 土体应变—轴应变曲线

分别按式(8)、式(9)计算卸载—重加载泊松比 ν_{ur} 和剪胀角 ψ , 得 $\nu_{\text{ur}} = 0.198$ 、 $\psi = 2.56^\circ$ 。2 次试验结果的应力圆及摩尔包络图见图 6。

$$\nu_{\text{ur}} = \frac{1}{2} + \frac{\epsilon_v}{2\epsilon_1} \quad (8)$$

$$\psi = \arcsin \frac{\epsilon_v - (1 - 2\nu)\epsilon_1^e}{\epsilon_v - 2\epsilon_1 + (1 + 2\nu)\epsilon_1^e} \quad (9)$$

式中: ν 约等于 ν_{ur} ; 竖向弹性应变 ϵ 按 q/E_{ur} 计算。

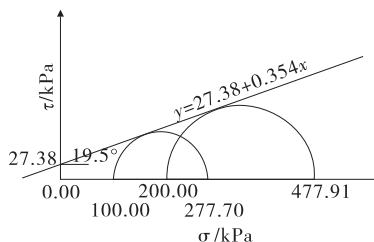


图6 试验结果摩尔应力圆

根据图 6, 土体粘聚力 $c=27.38$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=19.50^\circ$ 。由式(10)得极限偏应力 q_f 为 177.70 kPa, 由式(11)得破坏比 R_f 为 0.858。

$$q_f = \frac{2c \cos \varphi - 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (10)$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = \frac{q_f}{q_n} \quad (11)$$

综上, 该项目粉质黏土的小应变本构计算参数见表 4。

表 4 长沙轨道交通 6 号线典型粉质黏土的小应变本构参数

参数	数值	参数	数值
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.911×10^3	ν_{ur}	0.198
$E_{50}^{\text{ref}}/\text{Pa}$	5 274 934	$\varphi/(\circ)$	19.50
$E_{ur}^{\text{ref}}/\text{Pa}$	17 683 134	$\psi/(\circ)$	2.56
$E_{oed}^{\text{ref}}/\text{Pa}$	6 042 197	m	0.512
p^{ref}/Pa	100 000	e	0.779
p_c/Pa	112 200	R_f	0.858
c/Pa	27 380		

3 三轴压缩试验模拟验证

借助 ABAQUS 有限元分析软件, 对土体的三轴加载—卸载—重加载过程进行模拟。通过编写子程序嵌套 HSS 本构模型, 并与软件自带的摩尔—库伦模型(MC)和修正剑桥模型(MCC)进行对比, 确定适用于该粉质黏土的本构模型。

3.1 分析模型

在 ABAQUS 中建立土力学标准圆柱体模型, 底部 y 方向位移为零(见图 7)。各本构模型参数设置见表 5~7。

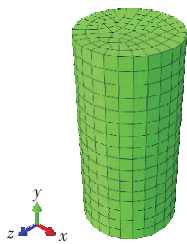


图 7 计算模型

表 5 HSS 本构模型的参数

参数	数值	参数	数值
$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	5.270	c/MPa	0.027
$E_{ur}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	17.680	$\varphi/(\circ)$	19.500
$E_{oed}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	6.040	$\psi/(\circ)$	2.560
$p^{\text{ref}}/\text{MPa}$	0.100	m	0.512
p_c/MPa	0.112	e	0.779
ν_{ur}	0.198	R_f	0.858

表 6 摩尔—库伦模型的参数

参数	数值	参数	数值
E/MPa	7.920	$\varphi/(\circ)$	19.5
ν	0.198	$\psi/(\circ)$	2.56
c/MPa	0.027	σ_t/MPa	0

表 7 修正剑桥模型的参数

参数	数值	参数	数值
M	1.116	β	1.0
k	0.052 5	K	0.8
λ	0.225 8		

3.2 分析步设置

共设置 5 个分析步:

(1) 围压加载。主要模拟三轴试验围压施加压力的过程, 分析步类型为 Geostatic 地应力分析, 分析步时长为单位长度 1, 围压加载方式为在模型顶面及侧面施加 100 kPa 均布压力。

(2) 初次加载。分析步类型为 Dynamic Implicit 隐式动态分析, 分析步时长为单位长度 1, 加载方式为在模型顶面施加方位为 y 轴负方向、大小为 4.8 的速度, 模拟初次加载至轴向应变为 -6% 的加载过程。

(3) 卸载。分析步类型为 Dynamic Implicit 隐式动态分析, 分析步时长为单位长度 1, 卸载方式为在模型顶面施加方位为 y 轴正方向速度, 摩尔—库伦模型、修正剑桥模型、HSS 本构模型重加载时速度分别为 1.8、0.488、0.688, 模拟卸载至最终竖向应力接近于零的卸载过程。

(4) 重新加载。分析步类型为 Dynamic Implicit 隐式动态分析, 分析步时长为单位长度 1, 加载方式为在模型顶面施加方位为 y 轴负方向, 摩尔—库伦模型、修正剑桥模型、HSS 本构模型重新加载时速度分别为 5、3.688、3.888, 模拟重新加载至轴向应变为 -10% 的加载过程。

(4) 内力平衡。分析步类型为 Dynamic Implicit 隐式动态分析, 分析步时长为单位长度 1, 模拟方式为限制模型顶面 y 轴方向的位移为零。

3.3 应力—应变曲线分析

加载—卸载—重加载过程中各本构模型的应力—应变曲线与试验结果对比见图 8。

由图 8 可知: 在初次加载阶段, 摩尔—库伦模型表现出典型线性弹塑性模型的特点, 且卸载刚度与加载刚度一致; 采用修正剑桥模型拟合时, 初期与土

(下转第 93 页)