

文章编号:1673-2049(2013)04-0022-10

岩土体水平孔内力学参数检测装置及检测理论

黄明利, 李 宁

(北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044)

摘要:为了能在隧道掌子面或基坑侧壁上直接进行岩土体力学参数的测量,提出了一种在岩土体内沿水平方向钻孔测量其力学参数的原位测试方法,研制了其配套装置,从而避免从地面打孔进行土体力学参数测量的繁琐工序,并对该装置的设计思想和使用方法做了明确具体的介绍。针对该装置的不等压扩孔问题,采用弹性力学的方法给出了该装置测量岩土体力学参数的解析理论依据,并利用数值方法对解析理论做了验证。采用数值模拟方法研究了弹性模型、摩尔-库仑模型下多组参数的检测结果。结果表明:该装置的弹性解析理论在较大粘聚力、内摩擦角的岩土体中的检测结果是准确的。该装置可以随理论研究的不断加深而得到广泛的应用。

关键词:岩土体;水平孔;原位测试;力学参数;不等压扩孔;解析理论

中图分类号:TU413

文献标志码:A

Measured Device and Theory of Mechanical Parameters in Horizontal Cavity of Rock and Soil

HUANG Ming-li, LI Ning

(Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to get the mechanical parameters of rock and soil just only on the surface of tunnels and foundation pits, a new in-situ test method for measuring its mechanical parameters along horizontal cavity direction which was used in rock and soil was put forward, and a device supporting this method was also researched and designed. So, this would avoid the inconvenient working procedure of punching from ground surface to tunnel's face. The design cogitation and the manipulation method of the device were also definitely and concretely introduced. The essence of this method was in-isotonic cavity expansion problem. For this problem, using the method of elasticity, analytic theory of testing the elastic parameters of rock and soil by this device was given, and there was also a numerical testify for this analytic theory. Finally, this test method was simulated by numerical method, which involved several groups of parameters of elastic model and Mohr-Coulomb model. The results show that the elastic analytic theory can be used in the rock and soil with high values of cohesive force and internal friction angle. This device can be used in a wider place along with the development of theoretical research.

Key words: rock and soil; horizontal cavity; in-situ test; mechanical parameter; in-isotonic cavity expansion; analytic theory

收稿日期:2013-09-08

基金项目:国家自然科学基金项目(50978016)

作者简介:黄明利(1969-),男,黑龙江双城人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:huang_mingli@126.com。

0 引言

在岩土工程中,岩土体的力学参数对工程结构的变形有重要影响,目前,获取岩土体力学参数的方法分为室内试验、原位测试 2 大类。由于室内试验不可避免地会对土样产生扰动,并且试样缺乏代表性^[1],因此,室内试验得到的参数难以准确反映实际工程中岩土体的性质^[2]。沈珠江等认为可靠的土质参数只能通过原位测试取得^[3-4]。原位测试又称现场试验,是岩土体保持或基本保持其所处位置与天然结构、湿度和应力状态情况下进行的各种测试^[5]。现在常用的原位测试方法主要包括荷载试验、触探试验、剪切试验、侧胀试验、岩体原位应力测试、动力参数测试^[6],其中前 3 种更为常见。

上述常用的原位测试方法的主要缺点就是测试机理不明确,取得参数的方法往往建立在经验和半经验公式基础上^[7-8],另外,测试工序繁琐,机器庞大,费用昂贵。在基坑工程、城市地铁、山岭隧道等岩土工程中,若工程开挖后出现了未知的新土层,则需要测得新土层的原位力学参数,或对注浆后的土体进行效果检验,此时,若使用上述的原位测试方法,则需要从地面打孔至待测土体的位置进行测量,费时,费力,破坏环境。若能直接利用隧道掌子面或基坑侧壁,就可避免从地面打孔的繁琐工序,因此,本文中笔者提出了一种在岩土体内沿水平方向钻孔测量其力学参数的方法,并且研制了其配套装置。

1 检测装置及其使用方法

1.1 检测装置各零部件连接关系

检测装置的立体结构示意如图 1 所示。

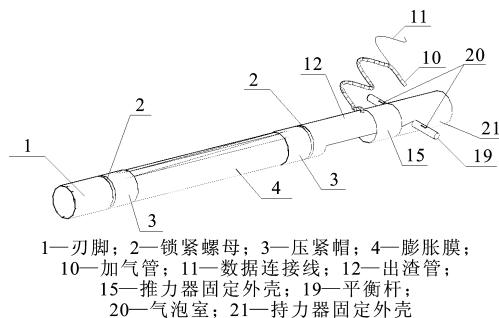


图 1 岩土体水平孔内力学参数检测装置

Fig. 1 Mechanical Parameter Measured Device in Horizontal Cavity of Rock and Soil

检测装置从前端至尾端依次为钻进段、膨胀测量段、出渣段、推力器以及持力器,各部件同轴连接构成。

钻进段包括刃脚、耙式螺旋钻头和螺旋钻杆,如图 2 所示。刃脚为管状,前端为锋利的圆形刃,刃脚的后端与膨胀内腔的前端固接。

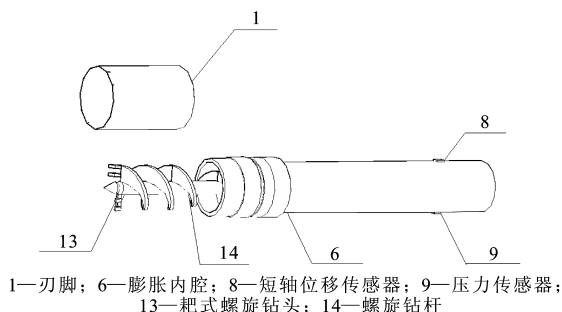


图 2 装置钻进段

Fig. 2 Drilling Part of Device

膨胀测量段中,膨胀内腔为管状,管壁中部外径小于两端的外径,管状的膨胀膜套在膨胀内腔外,两端用密封装置将膨胀膜与膨胀内腔密封,密封装置示意如图 3 所示。

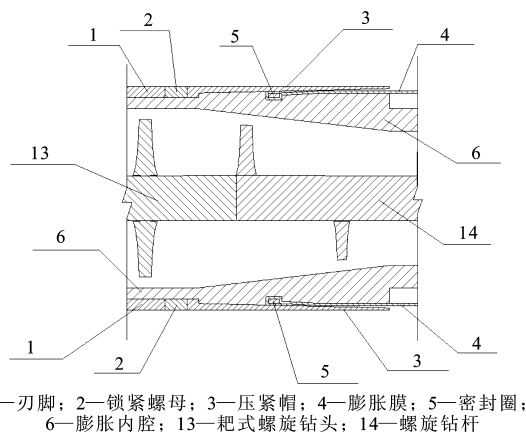


图 3 密封装置

Fig. 3 Airtight Device

膨胀膜为厚度 2~3 mm 的橡胶管,膨胀膜和膨胀内腔中部的间隙构成密封的测量气室。在测量气室中心位置,膨胀膜内膨胀内腔的正中间横断面上布置长轴位移传感器、短轴位移传感器以及压力传感器,短轴位移传感器在膨胀内腔外壁顶部位置垂直固接于膨胀内腔与膨胀膜的内壁之间,长轴位移传感器在与短轴位移传感器在膨胀膜内膨胀内腔的正中间横断面上顺时针或逆时针相差 90°的水平位置径向固接于膨胀内腔的外壁与膨胀膜的内壁之间,压力传感器固接在膨胀内腔的外壁底部,如图 4 所示。

长轴位移传感器和短轴位移传感器分别对应检测通气加压前后土层内椭圆导洞的长轴和短轴,顶部垂直安装的短轴位移传感器用于测量短轴径向位

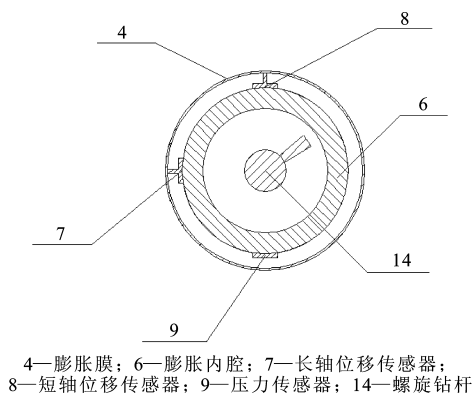


图 4 膨胀测量段断面

Fig. 4 Section of Inflation Measure Part

移,中间水平安装的长轴位移传感器用于测量长轴径向位移,底部的压力传感器用于测量气压,长轴位移传感器、短轴位移传感器和压力传感器分别通过数据传输线引出测量气室与记录仪连接。

出渣段为 1 个半圆形的钢管,如图 1 所示,其开口向下,形成一个出渣口,用于将钻头切削的土体排出装置外。另外,加气管从出渣管上部穿出,连接在加压充气装置上,加气管的另一端固接在膨胀内腔的内壁与测量气室连通。

一对平衡杆安装在持力器固定外壳的直径上且垂直于持力器固定外壳的轴线,其水平固接在持力器固定外壳的后部两侧,如图 1,5 所示。每个平衡杆中部有一个向上的气泡室,气泡室内含有带气泡的透明液体,气泡室内底部标有刻度,当气泡位于气泡室的正中间时,表明该装置处于完全水平状态。

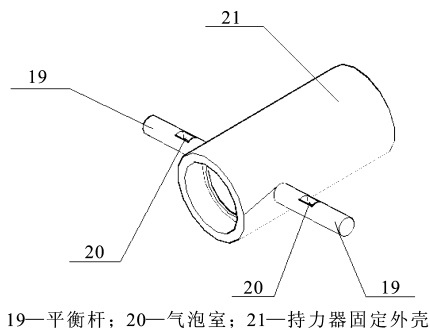


图 5 平衡杆安装位置

Fig. 5 Installing Position of Balance Bar

推力器由推力器固定外壳、推力器转动内杆、推力器滚柱和推力器转芯构成,如图 6 所示。推力器滚柱置于推力器转芯上,推力器滚柱可以绕其中心轴在推力器转芯上自转,推力器转芯固接套在推力器转动内杆上置于推力器固定外壳内,推力器转动内杆通过推力器转芯上的推力器滚柱和推力器固定外壳内的推力面构成滚动连接,推力器转芯可在推

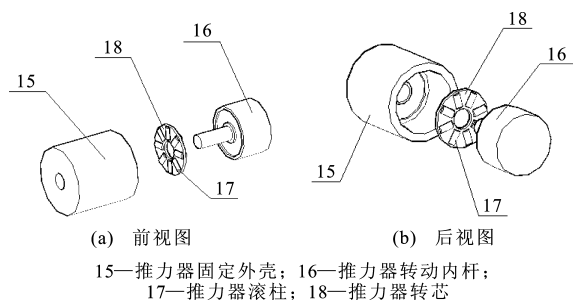


图 6 推力器

Fig. 6 Thrust Parts

力器固定外壳内的推力面上随推力器转动内杆转动,既传递了钻机的推力,又不使推力器固定外壳转动。推力器的作用是将钻机提供的推力传递给检测装置的外壳,而外壳不随钻机的钻臂旋转而旋转,只向前推进,这样可以减少对土体的扰动,保证土体尽量处于原位状态。

持力器由持力器固定外壳、持力器转动内杆、持力器滚柱和持力器转芯构成,如图 7 所示。持力器滚柱位于持力器转芯上,持力器滚柱可绕其自身的中心对称轴在持力器转芯上自转,2 个持力器转芯套在持力器转动内杆置于持力器固定外壳内,持力器转动内杆通过持力器转芯上的持力器滚柱与持力器固定外壳构成滚动连接。持力器的作用是将钻机的钻臂转动传递到检测装置上,使耙式螺旋钻头水平稳定地钻进。

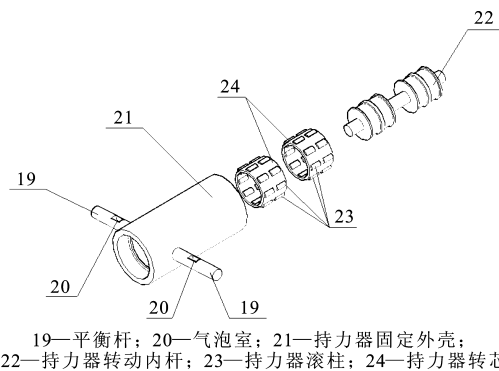


图 7 持力器

Fig. 7 Brace Parts

1.2 检测装置的使用方法

该装置在检测力学参数时,具体使用方法有以下几个步骤:

(1)在隧道掌子面或基坑侧壁上选定一个检测点,并根据隧道或基坑的设计资料计算出该点距地面的距离 H ,然后再计算出该点以上土体的加权平均重度 γ ,该值变化范围不大,可直接利用隧道或基坑勘察资料提供的数据进行计算,并由此计算出该

水平线处垂直应力 $\sigma_z = \gamma H$ 。

(2) 将装置连接在钻机的钻臂上, 然后再将装置的加气管和加压充气装置相接, 数据传输线与传感器记录仪连接, 保持钻臂沿隧道纵向水平, 隧道内注浆加固效果检测装置对准隧道掌子面或基坑侧壁上选定的检测点。

(3) 调节装置的平衡杆, 使平衡杆气泡室内气泡位于正中央, 即表明该装置处于水平状态。

(4) 利用钻机的推力和工作人员对平衡杆的推力以及装置上锋利的刃脚, 将装置推入隧道掌子面或基坑侧壁上选定的检测点一段距离。

(5) 开动钻机, 带动装置上的耙式螺旋钻头的旋转, 切削隧道掌子面土体, 并将切削后的土体经由螺旋钻杆的旋转带到装置的出渣口排出, 装置也随即插进隧道掌子面或基坑侧壁中, 并在隧道掌子面或基坑侧壁上形成一个圆形导洞。

(6) 待装置的出渣口开始进入隧道掌子面时, 关闭钻机, 停止钻进, 隧道掌子面内的圆形导洞在土体初始应力作用下开始发生变形, 在装置膨胀膜处的圆形导洞变形成椭圆形的导洞, 利用装置膨胀膜内的椭圆形导洞的长轴和短轴上的位移传感器, 测出隧道掌子面上该椭圆形导洞变形的长轴和短轴的位移量 $u|_{P=0, \theta=0}$ 和 $u|_{P=0, \theta=\frac{\pi}{2}}$, P 为压力, θ 为平面角。

(7) 启动加压充气装置, 对该装置的膨胀膜内进行加压充气, 利用膨胀膜内的压力传感器给出的压力数据记录每一级压力 P , 同时利用 2 个不同方位的位移传感器给出的位移数据, 记录该级压力下的位移量 $u|_{P, \theta=0}$ 和 $u|_{P, \theta=\frac{\pi}{2}}$ 。

(8) 加压充气至导洞出现大位移或其他明显的破坏症状, 将装置从导洞中取出, 整理所记录的数据, 分别绘制出 $P-u|_{P, \theta=0}$ 曲线和 $P-u|_{P, \theta=\frac{\pi}{2}}$ 曲线, 在 2 条曲线上挑选出最接近直线的一部分, 将这部分曲线上的压力差 ΔP 及位移差 Δu 分别记录。

(9) 计算岩土体的力学参数, 其中静止侧压力系数 K_0 、孔半径 r_0 、泊松比 μ 、弹性模量 E 根据弹性理论分别用下述公式计算

$$K_0 = -\frac{(u|_{P=0, \theta=0} + u|_{P=0, \theta=\frac{\pi}{2}}) \Delta P}{\Delta u \sigma_z} - 1 \quad (1)$$

$$\mu = \frac{1-2K_0}{2-2K_0} - \frac{\Delta P u|_{P=0, \theta=0}}{2 \Delta u (1-K_0) \sigma_z} \quad (2)$$

$$E = \frac{\Delta P (1+\mu) r_0}{\Delta u} \quad (3)$$

2 检测理论

从检测装置的使用方法上来看, 该方法类似于

旁压测试, 但钻孔方向的不同使其异于旁压测试方法, 故不能简单地套用旁压测试原理。该方法可简化为如图 8 所示的计算模型, 即不等压的扩孔问题。

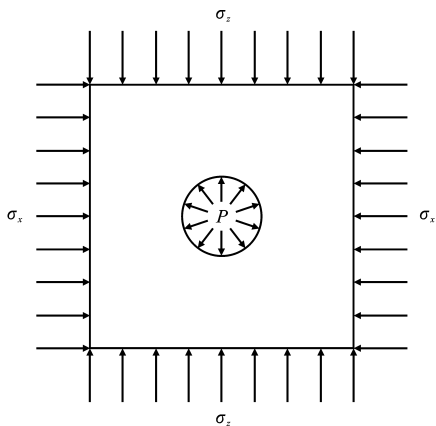


图 8 检测理论计算简图

Fig. 8 Calculation Sketch of Measured Theory

图 8 中检测孔中心处的垂直应力 $\sigma_z = \gamma H$ 为已知, 水平应力 $\sigma_x = K_0 \sigma_z$ 。将垂直应力和水平应力表示为图 8 中的无穷远处的竖向荷载和水平荷载。检测孔半径为 r_0 , 孔洞内受仪器膨胀膜的压力为 P , 检测孔周边土体的弹性模量为 E , 泊松比为 μ 。

该问题的弹性力学方法求解可先求出图 8 中边界条件下孔洞周边的位移, 再减去初始应力作用在无孔土体中的位移。将初始应力写为极坐标的形式, 即有^[9-10]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_x) + \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \cos(2\theta) \\ \sigma_\theta &= -\frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_x) - \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \cos(2\theta) \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \sin(2\theta) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ 分别为极坐标下初始径向正应力、切向正应力和剪切应力。

由于式(4)可分为 2 个部分, 一部分与 θ 无关, 另一部分与 θ 有关, 分别如式(5)、(6)所示, 所以该问题进而可以分 3 个部分进行求解, 如图 9 所示, 然后将各部分的位移解析式进行叠加即可。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r1} &= -\frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_x) \\ \sigma_{\theta1} &= -\frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_x) \\ \tau_{r\theta1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r2} &= \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \cos(2\theta) \\ \sigma_{\theta2} &= -\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \cos(2\theta) \\ \tau_{r\theta2} &= -\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \sin(2\theta) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

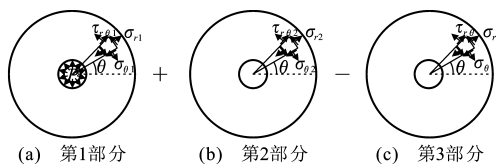


图 9 检测理论分步计算简图

Fig. 9 Step Calculation Sketch of Measured Theory

式中: $\sigma_{r1}, \sigma_{\theta1}, \tau_{r\theta1}$ 分别为极坐标下与 θ 无关的初始径向正应力、切向正应力和剪切应力; $\sigma_{r2}, \sigma_{\theta2}, \tau_{r\theta2}$ 分别为极坐标下与 θ 有关的初始径向正应力、切向正应力和剪切应力。

图 9 中第 1 部分为普通扩孔问题,即旁压理论;第 2 部分为式(6)单独作用下的孔洞塌缩问题;第 3 部分为岩土体初始位移问题。求解过程都为普通的弹性力学理论推导,过于繁杂,笔者只将 3 个部分的推导结果分别列出,如式(7)~(9)所示

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{1}{E} [P(1+\mu)r_0 - (\sigma_z + \sigma_x)r_0] \\ \nu_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= \frac{2r_0}{E} (\sigma_z - \sigma_x) \cos(2\theta) \\ \nu_2 &= -\frac{2r_0}{E} (\sigma_z - \sigma_x) \sin(2\theta) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} u_3 &= \frac{r_0}{E} \left[\frac{\mu-1}{2} (\sigma_z + \sigma_x) + \frac{1+\mu}{2} (\sigma_x - \sigma_z) \cos(2\theta) \right] \\ \nu_3 &= -\frac{(1+\mu)r_0}{2E} (\sigma_z - \sigma_x) \sin(2\theta) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: u_1, ν_1 分别为土体中间有孔且有径向压力情况[图 9(a)]下的径向位移和环向位移; u_2, ν_2 分别为土体中间有孔且无径向压力情况[图 9(b)]下的径向位移和环向位移; u_3, ν_3 分别为土体初始的径向位移和环向位移[图 9(c)]。

将式(7)加式(8)再减式(9),即得到该问题的位移解析式,如式(10)所示

$$\left. \begin{aligned} u &= u_1 + u_2 - u_3 = \frac{r_0}{E} \left[(1+\mu)P - \frac{1+\mu}{2} (\sigma_z + \sigma_x) + \frac{3-\mu}{2} (\sigma_z - \sigma_x) \cos(2\theta) \right] \\ \nu &= \nu_1 + \nu_2 - \nu_3 = -\frac{(3-\mu)r_0}{2E} (\sigma_z - \sigma_x) \sin(2\theta) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由于该问题为平面应变问题,而求解过程是以平面应力的方式求解的,故将式(10)中的 E 换为 $\frac{E}{1-\mu^2}$, μ 换为 $\frac{\mu}{1-\mu^2}$, 即可得到平面应变问题时的检测孔周边土体的位移分量

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{(1+\mu)r_0}{E} \left[P - \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} + \frac{3-4\mu}{2} (\sigma_z - \sigma_x) \cos(2\theta) \right] \\ \nu &= -\frac{(1+\mu)(3-4\mu)r_0}{2E} (\sigma_z - \sigma_x) \sin(2\theta) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

为检验式(11)是否准确,采用数值方法求解该问题,在检测孔周边布置 3 个监测点,即图 10 中 A, B, C 三点。其中, A 点为检测孔圆心正上方的点,即 $\theta = \frac{\pi}{2}$; B 点为 $\theta = \frac{\pi}{4}$ 时检测孔周边上的点; C 点为 $\theta = 0$ 时检测孔周边上的点。

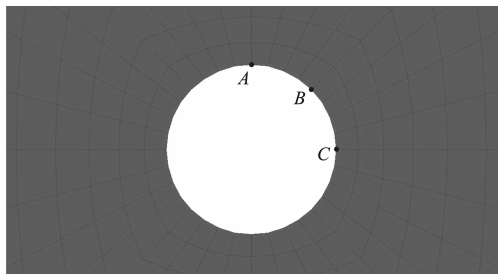


图 10 测点位置

Fig. 10 Positions of Measuring Points

数值模型采用表 1 所示的 2 组参数分别进行计算。将表 1 中 2 组参数分别代入式(11)即可求得 A, B, C 三个测点位移的解析解,将位移解析解和 FLAC3D 模拟的数值解列在表 2 中,经对比分析可知,解析解与数值解非常接近,故可认为式(11)是正确的。

表 1 数值模型参数

Tab. 1 Parameters of Numerical Model

组号	E/MPa	μ	σ_z /MPa	σ_x /MPa	P/MPa	r_0 /m
1	50	0.30	0.20	0.18	1.0	0.05
2	30	0.33	0.16	0.08	1.2	

表 2 位移解析解和数值解的对比

Tab. 2 Comparisons of Displacement Analytic

Solution and Numerical Solution						mm
组号	测点编号	u 数值解	ν 数值解	u 解析解	ν 解析解	
1	A	1.017 9	0.000 0	1.029 6	0.000 0	
	B	1.047 6	-0.023 2	1.053 0	-0.023 4	
	C	1.065 8	0.000 0	1.076 4	0.000 0	
2	A	2.215 0	0.000 0	2.245 0	0.000 0	
	B	2.377 6	-0.144 1	2.394 0	-0.149 0	
	C	2.516 2	0.000 0	2.542 7	0.000 0	

因此,可以利用式(11)来求解力学参数。当 $P=0, \theta=0$ 时,代入式(11)得

$$u|_{P=0, \theta=0} = \frac{(1+\mu)r_0}{E} \left[-\frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} + \right]$$

$$\frac{3-4\mu}{2}(\sigma_z - \sigma_x)] \quad (12)$$

当 $P=0, \theta=\frac{\pi}{2}$ 时, 代入式(11)得

$$u|_{P=0, \theta=\frac{\pi}{2}} = \frac{(1+\mu)r_0}{E} \left[-\frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} - \frac{3-4\mu}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \right] \quad (13)$$

当 P 的改变量为 ΔP 时, u 的改变量为 Δu , 而 σ_z, σ_x 均为定值, 故有

$$\Delta u = \frac{(1-\mu^2)r_0}{E} \frac{\Delta P}{1-\mu} = \frac{(1+\mu)r_0 \Delta P}{E} \quad (14)$$

即有

$$\frac{(1+\mu)r_0}{E} = \frac{\Delta u}{\Delta P} \quad (15)$$

(1) 求解静止侧压力系数 K_0

设 $\sigma_x = K_0 \sigma_z$, 将式(12)与式(13)相加, 并将式(15)代入, 再将 $\sigma_x = K_0 \sigma_z$ 代入, 整理后即得

$$K_0 = -\frac{(u|_{P=0, \theta=0} + u|_{P=0, \theta=\frac{\pi}{2}}) \Delta P}{\Delta u \sigma_z} - 1$$

(2) 求解泊松比 μ

将式(15)代入式(12), 再将 $\sigma_x = K_0 \sigma_z$ 代入, 整理后即得

$$\mu = \frac{1-2K_0}{2-2K_0} - \frac{\Delta P u|_{P=0, \theta=0}}{2\Delta u(1-K_0)\sigma_z}$$

(3) 求解弹性模量 E

因 K_0, μ 均已求出, 由式(14)可得

$$E = \frac{\Delta P(1+\mu)r_0}{\Delta u}$$

3 数值模拟的实际应用

为了验证该检测理论的实用性, 采用数值软件来模拟实际的应用情况, 然后根据测得的测点位移来推算所用计算模型的力学参数。

3.1 数值模型及计算参数

计算模型见图 11, 模型尺寸为 $2 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 共 18 240 个单元, 采用应力边界条件模拟初始应力。中间检测孔半径为 0.05 m , 长度为 1.6 m , 沿检测孔轴向剖开模型, 如图 12 所示。

图 12 中, 监测点 L 为长轴位移监测点, 监测点 S 为短轴位移监测点。模型的膨胀加压段以每步 $\Delta P = 0.05 \text{ MPa}$ 逐步加压 18 步至 $\Delta P = 0.9 \text{ MPa}$, 岩土体以弹性模型和摩尔-库仑模型这 2 种本构模型、12 组力学参数分别进行模拟, 以验证该检测原理及其装置的实用性。岩土体的力学参数及其分组如表 3 所示, 其中, c 为粘聚力, φ 为内摩擦角。

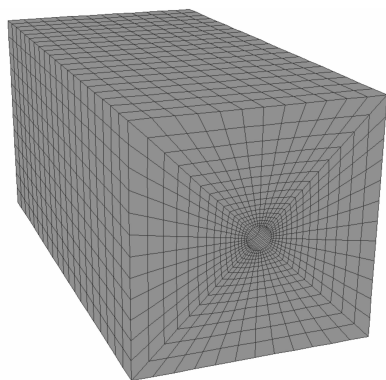


图 11 计算模型

Fig. 11 Calculation Model

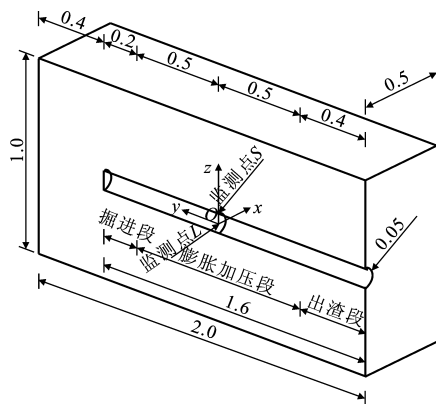


图 12 计算模型剖视图(单位:m)

Fig. 12 Sectional Elevation of Calculation Model (Unit:m)

3.2 模拟结果及分析

将计算得到的各组参数下监测点 L, S 的径向位移 u_i , 如表 4 所示, 其中, u_i 为膨胀压力 $P = 0.05i \text{ MPa}$ ($i=1, 2, \dots, 18$) 时监测点的径向位移。

表 4 中仅给出了每个测点的前 12 组数据, 实际计算中每个点都测得了 19 组数据, 图 13 为各组参数下监测点的位移变化趋势。

第 1, 7 组参数为弹性本构模型, 此 2 组参数下的计算结果呈直线变化, 而其他组参数为弹塑性本构模型, 故监测曲线呈曲线变化。若要通过监测数据计算各组模型的力学参数, 第 1, 7 组参数可以利用全部的监测数据, 而其他组只能应用线性变化段的数据。从表 4、图 13 中可以明显看出, 弹塑性模型下监测点径向位移的线性变化段, 为此, 将表 4 中相邻数据做位移差, 即 $\Delta u_i = u_i - u_{i-1}, i=1, 2, \dots, 18$, 然后将 Δu_i 列在表 5 中。从表 5 可以看出, 当相邻的位移差数据近似相等时, 即 $\Delta u_i \approx \Delta u_{i\pm 1}$, 可以看作监测点径向位移呈线性变化, 这些数据也就可以用作计算模型的力学参数。

力学参数的计算式(1)~(3)中, $u|_{P=0, \theta=0}$ 为监

表 3 岩土体的力学参数及其分组

Tab. 3 Mechanical Parameters of Rock and Soil and Their Groups

组号	本构模型	E/MPa	μ	K_0	σ_z/MPa	σ_x/MPa	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
1	弹性模型	50	0.3	0.65	0.16	0.104		
2	摩尔-库仑模型						280	40
3	摩尔-库仑模型						120	35
4	摩尔-库仑模型						80	32
5	摩尔-库仑模型						60	28
6	摩尔-库仑模型						42	25
7	弹性模型	36	0.4	1.30	0.10	0.130		
8	摩尔-库仑模型						280	40
9	摩尔-库仑模型						120	35
10	摩尔-库仑模型						80	32
11	摩尔-库仑模型						60	28
12	摩尔-库仑模型						42	25

表 4 径向位移计算结果

Tab. 4 Calculation Results of Radial Displacements

组号	测点编号	u_0	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}
1	L	-0.104 4	-0.039 4	0.025 3	0.089 9	0.154 7	0.219 5	0.284 3	0.349 0	0.413 6	0.478 5	0.543 2
	S	-0.238 5	-0.174 4	-0.109 6	-0.044 8	0.020 2	0.084 9	0.149 5	0.214 5	0.278 8	0.343 9	0.408 4
2	L	-0.106 4	-0.041 6	0.023 0	0.087 8	0.154 1	0.227 0	0.308 8	0.401 5	0.503 7	0.612 8	0.728 6
	S	-0.242 6	-0.178 7	-0.113 9	-0.049 0	0.012 6	0.070 8	0.127 5	0.185 6	0.250 3	0.318 0	0.390 7
3	L	-0.106 4	-0.041 6	0.023 0	0.087 8	0.154 1	0.227 0	0.308 8	0.401 5	0.503 7	0.612 8	0.728 5
	S	-0.242 6	-0.178 7	-0.113 9	-0.049 0	0.012 6	0.070 8	0.127 5	0.185 6	0.250 3	0.318 0	0.389 2
4	L	-0.106 5	-0.041 5	0.023 3	0.087 9	0.154 3	0.226 9	0.308 8	0.404 1	0.514 6	0.613 2	0.791 8
	S	-0.242 6	-0.178 6	-0.114 0	-0.049 1	0.012 8	0.071 1	0.128 1	0.218 4	0.350 3	0.515 4	0.710 8
5	L	-0.118 9	-0.054 3	0.010 2	0.075 2	0.141 8	0.216 6	0.309 2	0.425 6	0.559 9	0.715 9	0.903 4
	S	-0.251 1	-0.187 1	-0.122 4	-0.057 6	0.004 1	0.085 2	0.201 9	0.363 4	0.568 0	0.821 6	1.129 8
6	L	-0.165 8	-0.101 1	-0.036 3	0.028 4	0.103 1	0.203 7	0.322 5	0.469 8	0.647 5	0.858 5	1.141 6
	S	-0.282 0	-0.217 9	-0.153 0	-0.088 2	-0.007 7	0.116 2	0.284 0	0.508 0	0.803 0	1.178 0	1.650 2
7	L	-0.264 9	-0.168 4	-0.071 5	0.025 6	0.122 2	0.219 1	0.316 1	0.413 1	0.509 6	0.606 8	0.703 6
	S	-0.181 0	-0.084 8	0.012 5	0.109 0	0.206 5	0.303 6	0.400 5	0.497 5	0.594 3	0.691 1	0.788 3
8	L	-0.268 6	-0.171 9	-0.075 0	0.021 5	0.117 0	0.208 4	0.303 0	0.406 4	0.515 7	0.638 3	0.764 8
	S	-0.183 4	-0.086 5	0.010 5	0.107 6	0.205 4	0.312 7	0.435 6	0.571 3	0.714 8	0.868 7	1.029 1
9	L	-0.268 6	-0.171 9	-0.075 0	0.021 5	0.117 0	0.208 4	0.303 0	0.406 4	0.515 7	0.638 3	0.764 0
	S	-0.183 4	-0.086 5	0.010 5	0.107 6	0.205 4	0.312 7	0.435 6	0.571 3	0.714 8	0.868 7	1.028 9
10	L	-0.268 6	-0.171 9	-0.075 0	0.021 5	0.117 0	0.208 4	0.303 0	0.438 5	0.625 4	0.853 1	1.122 2
	S	-0.183 4	-0.086 5	0.010 5	0.107 6	0.205 4	0.312 7	0.435 5	0.582 0	0.756 4	0.960 0	1.195 3
11	L	-0.269 5	-0.173 3	-0.076 3	0.020 7	0.115 9	0.231 4	0.392 6	0.616 4	0.903 7	1.260 0	1.695 5
	S	-0.184 5	-0.087 9	0.009 2	0.105 8	0.203 9	0.313 6	0.451 7	0.624 9	0.838 3	1.104 7	1.427 1
12	L	-0.292 9	-0.194 5	-0.097 6	-0.000 5	0.110 3	0.274 6	0.502 4	0.814 0	1.223 8	1.754 7	2.411 1
	S	-0.211 1	-0.114 2	-0.017 2	0.079 6	0.187 4	0.329 4	0.500 7	0.717 0	1.007 0	1.380 1	1.881 1

测点 L 在膨胀压力为 0 时的径向位移, $u|_{P=0, \theta=\frac{\pi}{2}}$ 为监测点 S 在膨胀压力为 0 时的径向位移, $u|_{P=0, \theta=0}$, $u|_{P=0, \theta=\frac{\pi}{2}}$ 可以从表 4 中的 u_0 列查询, $\Delta P=0.05$ MPa, $r_0=0.05$ m, 在前 6 组参数中 $\sigma_z=0.16$ MPa, 在后 6 组参数中 $\sigma_z=0.1$ MPa. Δu 为表 5 中每一

组参数下 2 行数据中近似相等的 Δu_i 的平均值, 即 $\Delta u = \sum \Delta u_i / j$, j 为各组参数下 2 行数据中近似相等的 Δu_i 的个数. 另外, 若在实际应用中已知 K_0 , 则将其值直接代入式(2)计算泊松比 μ' , 再将该泊松比 μ' 代入式(3), 求得此时的弹性模量 E' . 于

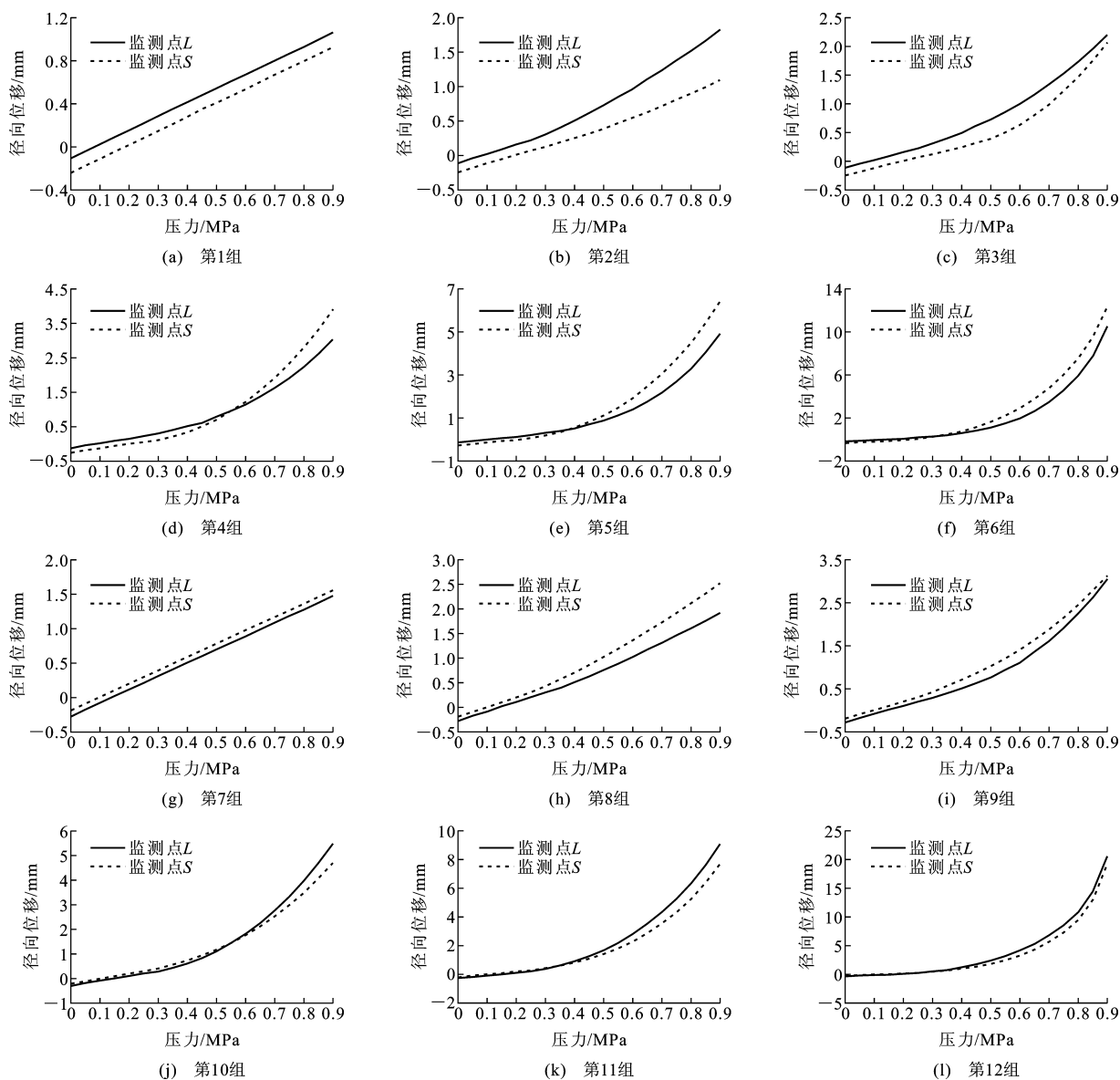


图 13 各组参数下监测点的位移变化趋势

Fig. 13 Displacement Trend of Measuring Points Under Different Groups of Parameters

是,结合表 4、图 13 和式(1)~(3)可计算数值模型中的力学参数,计算结果见表 6。

从表 6 可以看出,在弹性模型(第 1,7 组)和较大 c, φ 值的塑性模型中,都取得了较为理想的力学参数检测值,但第 5,6,12 组计算得出的力学参数与真实值存在较大的误差,因为这 3 组参数中的强度参数较小,即 c, φ 值较小,致使模型表现出很强的塑性行为,在未加压时,检测孔已经出现了明显的塑性塌缩,第 5,6 组参数在未加压时孔洞周边的塑性区分布见图 14,15,故此时的 $u|_{P=0, \theta=0}$ 和 $u|_{P=0, \theta=\frac{\pi}{2}}$ 相比弹性模型下的值有明显的增加,因此,将这些有明显塑性位移的数据应用到弹性理论计算公式中,计算出的力学参数必定会有很大的误差。

4 结 语

该岩土体水平孔内力学参数检测装置的实质是一个岩土体力学参数反分析仪器,可以随理论研究的不断加深而反算出各种常用的参数。本文中对该装置的设计思想和使用方法做了简要的介绍,给出了其测量力学参数的理论依据,并采用数值方法模拟了该装置的实际应用情况,可以得到以下几点结论:

(1)该装置的弹性检测原理是正确的。

(2)如果在表现出较高塑性行为的岩土体中应用弹性理论来计算力学参数,将会出现较大误差,而出现误差的本质原因是检测孔一经开挖即出现塑性

表 5 位移差
Tab.5 Displacement Differences

mm											
组号	测点编号	Δu_1	Δu_2	Δu_3	Δu_4	Δu_5	Δu_6	Δu_7	Δu_8	Δu_9	Δu_{10}
1	L	0.064 99	0.064 67	0.064 66	0.064 76	0.064 75	0.064 88	0.064 68	0.064 57	0.064 96	0.064 70
	S	0.064 08	0.064 76	0.064 79	0.064 99	0.064 76	0.064 62	0.064 93	0.064 31	0.065 13	0.064 50
2	L	0.064 82	0.064 62	0.064 85	0.066 29	0.072 90	0.081 80	0.092 70	0.102 13	0.109 12	0.115 84
	S	0.063 83	0.064 83	0.064 87	0.061 63	0.058 16	0.056 70	0.058 12	0.064 69	0.067 74	0.072 64
3	L	0.064 82	0.064 62	0.064 85	0.066 29	0.072 90	0.081 80	0.092 70	0.102 13	0.109 12	0.115 72
	S	0.063 83	0.064 83	0.064 87	0.061 63	0.058 16	0.056 70	0.058 12	0.064 69	0.067 74	0.071 18
4	L	0.065 05	0.064 72	0.064 67	0.066 35	0.072 64	0.081 83	0.095 36	0.110 48	0.098 57	0.178 63
	S	0.064 04	0.064 61	0.064 86	0.061 88	0.058 35	0.056 98	0.090 34	0.131 88	0.165 04	0.195 46
5	L	0.064 63	0.064 52	0.064 95	0.066 59	0.074 80	0.092 63	0.116 43	0.134 28	0.155 96	0.187 52
	S	0.064 06	0.064 64	0.064 78	0.061 74	0.081 08	0.116 76	0.161 48	0.204 57	0.253 63	0.308 16
6	L	0.064 75	0.064 81	0.064 68	0.074 62	0.100 61	0.118 85	0.147 32	0.177 70	0.210 92	0.283 14
	S	0.064 07	0.064 99	0.064 73	0.080 52	0.123 94	0.167 74	0.224 01	0.295 02	0.374 99	0.472 20
7	L	0.096 49	0.096 85	0.097 08	0.096 63	0.096 92	0.096 97	0.096 98	0.096 70	0.097 06	0.096 76
	S	0.096 28	0.097 20	0.096 55	0.097 48	0.097 08	0.096 96	0.097 02	0.096 76	0.096 81	0.097 16
8	L	0.096 71	0.096 86	0.096 51	0.095 49	0.091 40	0.094 65	0.103 39	0.109 30	0.122 57	0.126 48
	S	0.096 90	0.097 01	0.097 06	0.097 83	1.073 30	0.122 86	0.135 72	0.143 50	0.153 86	0.160 45
9	L	0.096 71	0.096 86	0.096 51	0.095 49	0.091 40	0.094 65	0.103 39	0.109 30	0.122 57	0.125 66
	S	0.096 90	0.097 01	0.097 06	0.097 83	0.107 33	0.122 86	0.135 72	0.143 50	0.153 86	0.160 25
10	L	0.096 71	0.096 86	0.096 51	0.095 49	0.091 40	0.094 65	0.135 46	0.186 86	0.227 70	0.269 15
	S	0.096 90	0.097 01	0.097 06	0.097 83	0.107 33	0.122 86	0.146 50	0.174 38	0.203 61	0.235 30
11	L	0.096 24	0.096 98	0.097 02	0.095 21	0.115 47	0.161 19	0.223 77	0.287 31	0.356 34	0.435 50
	S	0.096 66	0.097 04	0.096 65	0.098 08	0.109 66	0.138 16	0.173 20	0.213 43	0.266 36	0.322 40
12	L	0.098 45	0.096 92	0.097 01	0.110 80	0.164 29	0.227 83	0.311 61	0.409 81	0.530 90	0.656 40
	S	0.096 87	0.097 06	0.096 74	0.107 80	0.142 05	0.171 30	0.216 27	0.290 02	0.373 10	0.501 00

表 6 力学参数计算结果
Tab.6 Calculation Results of Mechanical Parameters

组号	$u _{p=0,\theta=0}/\text{mm}$	$u _{p=0,\theta=\frac{\pi}{2}}/\text{mm}$	$\Delta u/\text{mm}$	K_0	μ	E/MPa	μ'	E'/MPa	参数真实值
1	−0.104 38	−0.238 47	0.064 767	0.654	0.282	49.5	0.291	49.8	$K_0=0.65,$ $\mu=0.3,$ $E=50\text{ MPa}$
2	−0.106 44	−0.242 55	0.064 796	0.683	0.232	47.5	0.305	50.3	
3	−0.106 44	−0.242 55	0.064 796	0.683	0.232	47.5	0.305	50.3	
4	−0.106 51	−0.242 63	0.064 782	0.684	0.231	47.5	0.305	50.4	
5	−0.118 92	−0.251 12	0.064 705	0.787	0.000	38.6	0.392	53.6	
6	−0.165 81	−0.282 01	0.064 794	1.160	1.627	101.3	0.714	66.1	
7	−0.264 86	−0.181 03	0.096 929	1.300	0.390	35.8	0.390	35.8	
8	−0.268 60	−0.183 42	0.096 909	1.330	0.419	36.6	0.357	35.0	$K_0=1.3,$ $\mu=0.4,$ $E=36\text{ MPa}$
9	−0.268 60	−0.183 42	0.096 909	1.330	0.419	36.6	0.357	35.0	
10	−0.268 60	−0.183 42	0.096 909	1.330	0.419	36.6	0.357	35.0	
11	−0.269 54	−0.184 54	0.096 871	1.340	0.431	36.9	0.348	34.8	
12	−0.292 92	−0.211 11	0.097 176	1.590	0.573	40.5	0.155	29.7	

变形。

(3)当检测孔未加压即出现塑性变形时,可将测得的位移乘以一个小于 1 的修正系数,再代入弹性理论计算公式中进行计算,因为从表 4 中可见,即便是在此情况下,在加压的初始阶段都会表现出弹性行为,即 $\frac{(1+\mu)r_0}{E}=\frac{\Delta u}{\Delta P}$ 在弹性情况下是正确的。

(4)该装置可以利用数值反分析的方法测得岩土体的各种力学参数,并可用于土体分类或注浆效果检验中。

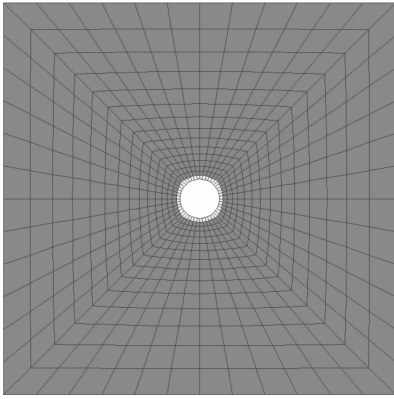


图 14 第 5 组参数下未加压时的塑性区分布

Fig. 14 Plastic Zone Distribution Without Pressure for the Fifth Group of Parameters

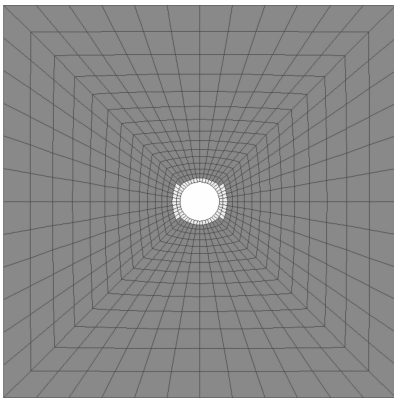


图 15 第 6 组参数下未加压时的塑性区分布

Fig. 15 Plastic Zone Distribution Without Pressure for the Sixth Group of Parameters

参考文献:

References:

- [1] 徐超,石振明,高彦斌,等. 岩土工程原位测试[M]. 上海:同济大学出版社,2005.
XU Chao,SHI Zhen-ming,GAO Yan-bin,et al. In Situ Test of Geotechnical Engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press,2005.
- [2] 李鹏,王娜,蒋应军. 浅谈原位测试方法在公路建设中的应用[J]. 山西建筑,2005,31(8):51-52.
LI Peng,WANG Na,JIANG Ying-jun. Application of Original Place Test Method in Road Construction[J]. Shanxi Architecture,2005,31(8):51-52.

- [3] 沈珠江. 原状取土还是原位测试——土质参数测试技术发展方向刍议[J]. 岩土工程学报,1996,18(5):90-91.
SHEN Zhu-jiang. Sampling in Original State or in Situ Test; Discuss on Development Direction of Soil Parameter Technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1996,18(5):90-91.
- [4] 孟高头. 土体原位测试机理、方法及其工程应用[M]. 北京:地质出版社,1997.
MENG Gao-tou. Theory, Method and Application in Engineering of Soil in Situ Test[M]. Beijing: Geological Publishing House,1997.
- [5] 徐金明,刘绍峰,朱耀耀. 岩土工程实用原位测试技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
XU Jin-ming,LIU Shao-feng,ZHU Yao-yao. Practical in Situ Test in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press,2007.
- [6] 郭桂仁. 标准贯入原位测试方法的分析与讨论[J]. 华北石油设计,2005(2):30-32,36.
GUO Gui-ren. Analysis and Discuss of Standard Penetration Test[J]. Huabei Petroleum Design,2005(2):30-32,36.
- [7] 刘松玉,吴燕开. 论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J]. 岩土工程学报,2004,26(4):553-556.
LIU Song-yu,WU Yan-kai. On the State-of-art and Development of CPT in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2004,26(4):553-556.
- [8] 陈新默. 软土地基勘察技术研究现状及若干问题的探讨[J]. 土工基础,2006,20(4):75-78.
CHEN Xin-mo. The Probe of an Existing Situation and Several Problems of the Soft Subgrade Exploration Technique[J]. Soil Engineering and Foundation,2006,20(4):75-78.
- [9] 顿志林,高家美. 弹性力学及其在岩土工程中的应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,2003.
DUN Zhi-lin,GAO Jia-mei. Elastic Mechanics and Its Application in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,2003.
- [10] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
XU Zhi-guan. Elastic Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press,2006.

