

文章编号: 1000-7598-(2006) 01-0141-06

静力触探检测公路桥涵台背回填中粗砂的机理研究

刘仰韶, 田卿燕, 吕建兵

(广东交通集团检测中心, 广州 510800)

摘 要: 在模拟公路桥、涵台背回填中粗砂密实度检测的室内模型试验基础上, 进行了三维有限元数值模拟分析。分析过程中, 采用拉德(P.V.Lade)模型及刚—柔接触模型, 模拟了静力触探试验过程, 获得了探头周围砂的应力、应变和位移场, 验证了室内试验结果的正确性, 揭示了静力触探在回填中粗砂中的作用机理。研究表明: 静力触探可以用于桥、涵台背回填中粗砂密实度检测。

关 键 词: 模型试验; 静力触探; 本构关系; 拉德模型; 有限单元法

中图分类号: U 442

文献标识码: A

Study on static penetration mechanism to test bridge abutment back-sand fill

LIU Yang-shao, TIAN Qing-yan, LV Jian-bing

(Test Center, Guangdong Transportation Group Company, Guangzhou 510800, China)

Abstract: Based on the laboratory tests to test the relative density of medium-course sand in bridge and culvert backfill, a three-dimensional numerical calculation is made. During calculation, P.V. Lade model and rigid-flexible attachment model are applied to simulate the whole test process. After that, the stresses, strains and displacements around the test cone are disclosed; and the laboratory results are well proved; the mechanism of static penetration in backfill sand is well obtained. It shows that the static penetration can be applied to test the density of medium-coarse-grained sand in bridge-culvert backfill.

Key words: model tests; static penetrating test; constitutive relation; Lade model; finite element methods

1 前 言

静力触探(简称为静探)是土体原位测试中最常用的一种岩土工程勘察手段。它有单桥、双桥与孔压触探之分, 其测试精度高、功能齐全, 兼具勘探与测试双重作用。测试中不用取样, 其成果的可靠性与再现性均好, 且采用电测技术, 便于实现测试与成果处理的微机化和自动化。这些都是许多其他原位测试技术不具备的。其测试结果几乎与土的各种工程性质建立了关系, 因此应用越来越广泛^[1, 2]。工程实践表明, 静力触探可用于桥涵台背回填中粗砂的相对密实度的检测, 但在公路工程中应用仍然有限, 其原因是静力触探用于工程检测评价时, 有多种理论, 且这些理论的计算结果相差很大, 给应用带来了一定技术难度^[3, 4]。而高速公路技术要求高, 为了减少因检测而引起的不必要技术误差, 人们还是习惯采用传统的方法, 如灌砂法检测填砂的

相对密实度等。

为了使静力触探能真正用于公路桥涵台背检测回填中粗砂的相对密实度, 本文通过对 4 种颗粒组成不同密实度不同的砂, 在模型槽内进行了一系列静力触探试验, 并对其进行了三维有限元数值模拟, 应用土体本构特性的拉德(P. V. Lade)模型及刚-柔接触模型模拟了静力触探的贯入过程, 探讨了触探过程中土的应力、应变、位移等贯入机理, 验证了静力触探试验结果的正确性, 力求真正揭示静力触探检测公路桥涵台背回填中粗砂的机理, 为公路桥涵台背回填中粗砂的静力触探检测奠定技术基础。

2 试验工作

本研究共选用 4 种颗粒粗砾砂, 作为桥、涵台背常用的回填料, 在一个模型槽(2 m×2 m×2 m)完成了 23 个有效模型试验, 得到 72 组有效试验数

收稿日期: 2005-03-14

基金项目: 广东省交通厅项目(No.2002-013)。

作者简介: 刘仰韶, 男, 1957 年生, 高级工程师, 从事公路工程的检测和研究工作。E-mail: ljzbzh@126.com

据。试验用模型槽如图 1 所示。采用的静力触探设备参数如表 1 所示, 模型试验用双桥探头的外形规格如表 2 所示^[1]。试验砂的颗粒组成见表 3, 部分密实度状态下的砂的物性指标列于表 4。



图 1 模型试验槽

Fig.1 The testing model trough

表 1 静力触探设备参数

Table 1 Equipment parameters of the static penetrating test

静力触探参数	最大量程 / kN	探头重量 / g	探头长度 / cm	空心杆重量 / g
参数值	20	1 900.2	43	2 552

表 2 模型试验所采用的双桥探头的外形规格

Table 2 Double-bridge cone shape in model test

筒图	锥头载 面积 A / cm^2	探头直径 d / mm	锥角 α /($^\circ$)	摩擦筒 长度 / mm	摩擦筒侧 面积 / cm^2
	10	35.7±0.18	60±1	134	150±1.5

表 3 模型试验用砂的颗粒组成 (%)

Table3 The sand constituents used in the model test (%)

模型试验用砂	筛孔径/ mm						
	10	5	2	1	0.5	0.25	0.074
1 号砂	97.2	86.8	32.9	14.8	6.3	0.0	0.0
2 号砂	100.0	99.8	92.6	66.8	42.6	17.5	4.0
3 号砂	100.0	94.1	73.4	57.5	41.2	13.9	2.9
4 号砂	100	95.3	66.8	38.1	20.8	3.2	1.2

注: 表中第一行数据代表筛孔径大小, 表中数据表示小于某筛孔径的砂所占的百分比, 即砂的通过率。

表 4 模型试验用砂的物理性质指标

Table 4 Physical characters of sands used in the model test

编号	D_r	细度模数 M_x	G_s	$\gamma_{\max}$ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\gamma_{\min}$ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	γ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	φ /($^\circ$)
1 号砂	0.54	4.17	2.62	1.89	1.35	17.5	35.85
2 号砂	0.49	2.47	2.63	1.80	1.296	18.5	35.0
3 号砂	0.74	2.66	2.63	1.80	1.296	18.0	40.35
4 号砂	0.48	3.36	2.63	1.80	1.296	16.5	34.75

注: M_x 是按《建筑用砂》(GB/T 14684-2001) 规范规定的筛分方法筛分并计算而得。

3 三维有限元计算分析

要揭示静力触探机理, 就要求确定探头周围应力场、应变场和位移场^[5,6]。

3.1 本构模型^[4]

本文采用能很好反映砂性土变形特性的拉德 (Lade) 模型作为土的本构关系。对于弹塑性本构关系的拉德模型, 其基本点是假定总应变 ε_{ij} 由弹性应变 ε_{ij}^e 、塑性膨胀应变 ε_{ij}^p 、塑性压缩应变 ε_{ij}^c 组成:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^c \quad (1)$$

增量形式 $\delta \varepsilon_{ij} = \delta \varepsilon_{ij}^e + \delta \varepsilon_{ij}^p + \delta \varepsilon_{ij}^c$

式中 $\delta \varepsilon_{ij}^e$ 按广义虎克定律求得; 塑性应变增量 $\delta \varepsilon_{ij}^p$ 和 $\delta \varepsilon_{ij}^c$ 按塑性位移势理论 (Plastic potential Theory) 求

得。计算 $\delta \varepsilon_{ij}^c$ 时, 假定屈服函数为:

$$f_c = I_1^2 + 2I_2 \quad (2)$$

式中 I_1 , I_2 为应力第一、第二不变量。

采用相关流动法则, 则塑性势函数 $g_c = f_c$, 由正交定律得:

$$\delta \varepsilon_{ij}^c = d\lambda_c \frac{\partial g_c}{\partial \sigma_{ij}} = d\lambda_c \frac{\partial f_c}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

式中 $d\lambda_c$ 为塑性压缩应变增量函数。

计算 $\delta \varepsilon_{ij}^p$ 时, 假定屈服面与破坏面相似, 即: 屈服函数

$$f_p = \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \left(\frac{I_1}{P_a} \right)^m < \eta_1 \quad (4)$$

破坏函数

$$f_p = \eta_1 \quad (5)$$

其中 I_3 为应力第 3 不变量; η_1, m 为试验常数。
采用不相关流动法则, 假定塑性势函数为

$$g_p = I_1^3 - \left[27 + \eta_2 \left(\frac{P_\alpha}{I_1} \right)^m \right] I_3 \quad (6)$$

由正交定律得:

$$\delta \varepsilon_{ij}^p = d\lambda_p \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \quad (7)$$

式中 $d\lambda_p$ 为塑性膨胀应变增量函数。

3.2 三维有限单元法计算

借助三维有限元进一步验证静力触探的试验结果, 同时计算在不同的相对密度 D_r 的砂中, 静力触探在作用过程中砂内的应力、应变和位移分布特征及分布曲线图。模拟过程中, 采用 10 结点空间四面体等参单元, 如图 2 所示。

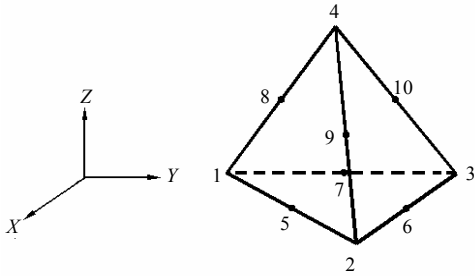


图 2 整体坐标系单元结点图

Fig.2 The unit cross-points in the whole coordinate system

对局部坐标, 利用节点位移分量进行函数插值, 可直接构造出单元位移函数:

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^m N_i(\xi, \eta, \zeta) u_i \\ v &= \sum_{i=1}^m N_i(\xi, \eta, \zeta) v_i \\ w &= \sum_{i=1}^m N_i(\xi, \eta, \zeta) w_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 u_i, v_i, w_i 为单元结点 i 的位移。

常用的四面体等参元的母元包括四结点的线性四面体单元和十结点的二次四面体单元等 (如图 2 所示), 形函数为:

对于角点 1, 2, 3, 4 有:

$$N_i = (2L_i - 1)L_i \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

对于边中结点有:

$$\left. \begin{aligned} N_5 &= 4L_1L_2 \\ N_6 &= 4L_2L_3 \\ N_7 &= 4L_1L_3 \\ N_8 &= 4L_4L_1 \\ N_9 &= 4L_2L_4 \\ N_{10} &= 4L_3L_4 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

经推导, 单元刚度表示为:

$$K^e = \int_{\Omega_e} B^T D B t dA = \int_0^1 \int_0^{1-\xi} \int_0^{1-\xi-\eta} B^T D B |J| t d\xi d\eta d\zeta \quad (11)$$

式中 B 为单元应变矩阵。

根据式 (11) 集成总刚度矩阵, 由边界条件及所加荷载 $\{R\}$ 可求解位移向量 $\{\delta\}$ 。

$$[K]\{\delta\} = \{R\} \quad (12)$$

并由 $\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}$ 和 $\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$ 求解单元应变和应力, 其中 $[D]$ 为弹性矩阵。

在非线性有限元分析中, 增量计算所需用到的弹性矩阵的组集是关键问题。

由于拉德模型有 2 个屈服面, 其弹塑性矩阵具有下列形式:

$$[D]_{ep} = [D] - \frac{G[X]}{B_1 B_2 - \Phi_{f_1 g_1} \Phi_{f_2 g_2}} \quad (13)$$

式中 D 为弹性矩阵。

$$\left\{ \begin{aligned} B_1 &= \frac{A_1}{G} + \Phi_{f_1 g_1} \\ B_2 &= \frac{A_2}{G} + \Phi_{f_2 g_2} \\ [X] &= B_2 [X_{f_1 g_1}] + B_1 [X_{f_2 g_2}] - \Phi_{f_1 g_1} [X_{f_2 g_1}] - \Phi_{f_2 g_2} [X_{f_1 g_2}] \end{aligned} \right. \quad (14)$$

3.3 计算模型及参数

整个模型计算范围为 $200 \text{ cm} \times 200 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$, 该计算范围以整个模型轴线为中心线。模拟过程中, 探头入土深度分别为 30, 60, 90, 120, 150 cm, 钢筋混凝土槽—砂—静力触探计算模型网格划分、静力触探探头计算模型网格划分分别如图 3 和图 4 所示, 计算模型各部位的尺寸均与实际情况相符。

通过载荷板试验, 确定了对应试验过程中 4 种不同的砂在不同密实度条件下的弹性模量和泊松比, 有关计算参数如表 5 和表 6 所示。

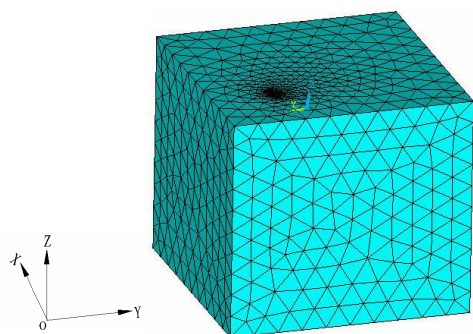


图3 钢筋混凝土槽-砂-静力触探探头网格划分

Fig.3 Model reseau division of the reinforcement concrete, the sand and the static penetrating



图4 静力触探探头网格划分图

Fig.4 The model reseau division of the static penetrating test cone

表5 力学参数

Table 5 Stress parameters

名称	E / MPa	μ	c / kPa	φ /(°)	γ / kN · m ⁻³
钢筋混凝土	2.8×10^4	0.15	600	40	25
轻便动力触探探头	2.1×10^5	0.15			78
1号砂($D_r=0.54$)	18.5	0.33	0	35.85	18.3
2号砂($D_r=0.49$)	13.5	0.33	0	35	18.5
3号砂($D_r=0.74$)	35	0.33	0	40.35	18.8
4号砂($D_r=0.48$)	13.2	0.33	0	34.75	18.0

表6 接触面参数

Table 6 Contact face parameters

砂标号	钢筋混凝土与砂土之间			探头与砂土之间		
	K_s	K_n	摩擦	K_s	K_n	摩擦
	/MN · m ⁻³	/MN · m ⁻³	系数 f	/MN · m ⁻³	/MN · m ⁻³	系数 f
1号砂($D_r=0.54$)	21	31	0.85	16	15	0.38
2号砂($D_r=0.49$)	20	30	0.80	10	15	0.35
3号砂($D_r=0.74$)	25	36	0.90	22	30	0.50
4号砂($D_r=0.48$)	20	30	0.80	10	15	0.35

3.4 接触面单元

本次计算采用面-面接触分析中的刚-柔接触模型进行分析。分析时,首先判断潜在的接触面,然后指定接触区域大小,将刚性面定义为目标面,

柔性面定义为接触面。计算模型考虑了钢筋混凝土与砂土及砂土与探头之间接触面的接触情况。

3.5 计算结果分析

3.5.1 砂土中应力、应变场的分布

(1) 通过计算可以得知,静力触探探头由砂土表面向下贯入过程中,开始时探头周边的塑性变形区扩展到表面,引起砂土的隆起,贯入一定深度后,塑性变形区封闭于砂土内部,这种因塑性变形状态改变的深度即临界深度。本文所确定的临界深度是通过塑性应变边界确定的,但在实际应用中,对于双桥探头,临界深度 h_{cr} 的确定方法为:随着贯入深度的增加, Q_c 逐步增加,当达到一定深度后,锥端阻力 Q_c 达到最大值,以下则略有增加,这个深度即为临界深度。然后采用静力触探试验方法对桥涵台背填砂相对密实度进行了检测,通过对大量的试验检测数据进行统计及回归分析,并根据有限元计算,得出了临界深度处及以下4种砂的锥端阻力 Q_{cl} (根据有限元计算, Q_{cl} 取值的深度范围为探头上、下各 $4 \sim 6d$ (d 为探头直径),并取对应深度范围内的静力触探锥端阻力的加权平均数)与相对密实度 D_r 的对数函数曲线关系:

对于细砂: $D_r = 0.4179 + 0.1640 \ln(Q_{cl})$

(相关系数 $\rho = 0.9910$, $h \geq h_{cr}$);

对于中砂: $D_r = 0.2714 + 0.1966 \ln(Q_{cl})$

(相关系数 $\rho = 0.9511$, $h \geq h_{cr}$);

对于粗砂: $D_r = 0.2169 + 0.2255 \ln(Q_{cl})$

(相关系数 $\rho = 0.9827$, $h \geq h_{cr}$);

对于特粗砂: $D_r = 0.3220 + 0.1995 \ln(Q_{cl})$

(相关系数 $\rho = 0.9909$, $h \geq h_{cr}$);

上述关系式是通过多种曲线比较求得的,其相关系数最高,说明锥端阻力 Q_{cl} 与相对密实度 D_r 之间的关系用对数函数曲线回归分析较合理;

(2) 由静力触探检测桥涵台背中粗砂相对密实度的室内模型试验及有限元计算可知,静力触探检测中粗砂明显存在临界深度。通过对大量的试验检测数据进行统计及回归分析,得出了细砂的临界深度 h_{cr} 与相对密实度 D_r 的关系:

对于细砂: $D_r = -3.7052 + 1.0236 \ln(h_{cr})$

(相关系数 $\rho = 0.9632$, $h \geq h_{cr}$);

对于中砂、粗砂及砂砾:临界深度 h_{cr} 随相对密实度 D_r 的变化规律不太明显;

(3) 图5为探头周围主应力场矢量图,即最大主应力等值线图,计算结果表明,最大主应力发生在探头侧面转角处,而且随着 σ_z 的增加,在该处的应力增加很快,探头正下方的土中应力却没有多

大变化。这反映出在探头向下推移时, 首先是侧面转角附近土中应力集中, 使土体向外侧推移, 从而使探头下方土体侧向约束减小, 并呈现出一应力松弛区, 该区使得在此深度的探头有了进一步的贯入可能;

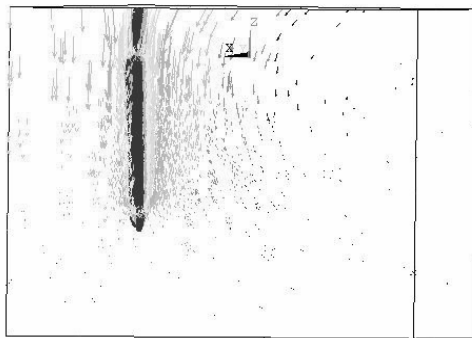


图 5 主应力矢量图(剖切图)

Fig.5 Vector diagram of principal stresses(cutaway view)

(4) 由图 6 可知, 随着离探头周边距离的增大, σ_z 递降的斜率变小, 应力扩散呈喇叭形。由表 7 可知, 附加应力的影响大小及范围随着相对密实度 D_r 的增大而增大, σ_z 等值线图形状由长椭圆形渐变为灯泡形且下端凸出。探头在锥端阻力 Q_{cl} 时, 土中附加应力的大小及范围亦有明显差别;

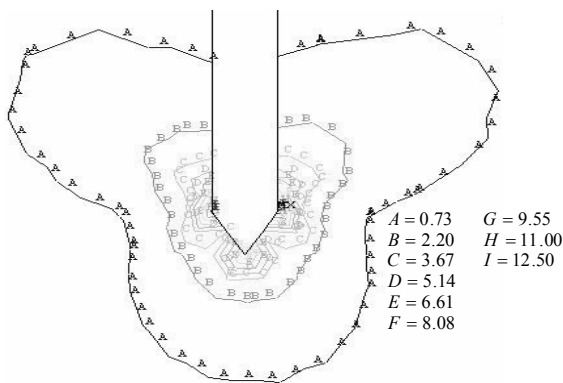


图 6 塑性区梯度线图(前视图)

Fig.6 Trapezium lines in plastic zone(front view)

表 7 探头贯入时附加应力的影响大小及范围
Table 7 Sizes and scopes of the subordinate stress influence when the test cone penetrates

D_r	Q_{cl} / MPa	σ_z 等值线图形状	σ_z 影响宽度(距探头中线) / cm					
			0.4	1.1	3.5	4.5	7.5	10.5
0.49	5.12	长椭圆形状	35	31	<31			
0.66	19.11	长椭圆形状	42	34	30	25		
0.73	26.22	灯泡形且下端凸出	50	44	37	33	29	24

(5) 图 7, 图 8 是 4 号砂静力触探实测应力、应变与有限元计算应力、应变比较图, 由图可知, 在探头贯入过程中, 砂土中的最大应力、应变发生在距土压力盒略上方的位置, 形状近似为长椭圆形。有限元计算得出的应力、应变曲线图与土压力盒实测的应力、应变曲线对比情况如图 7, 图 8 所示, 从对比曲线图可以看出计算值与实测值很接近。

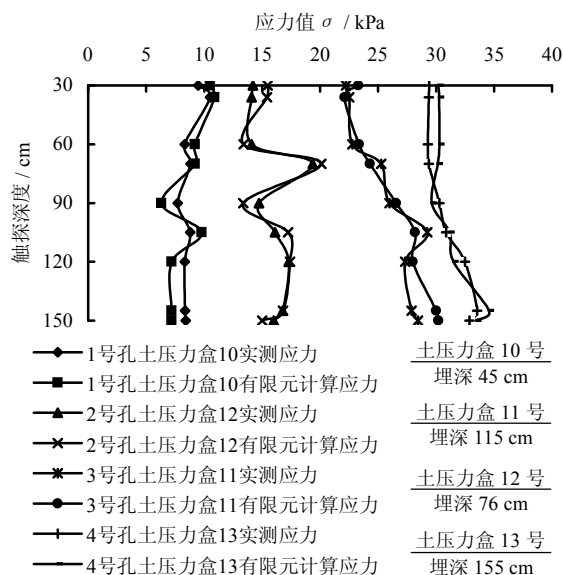


图 7 4 号砂实测应力与计算应力比较

Fig.7 Comparison between computation and test stresses of sand No.4

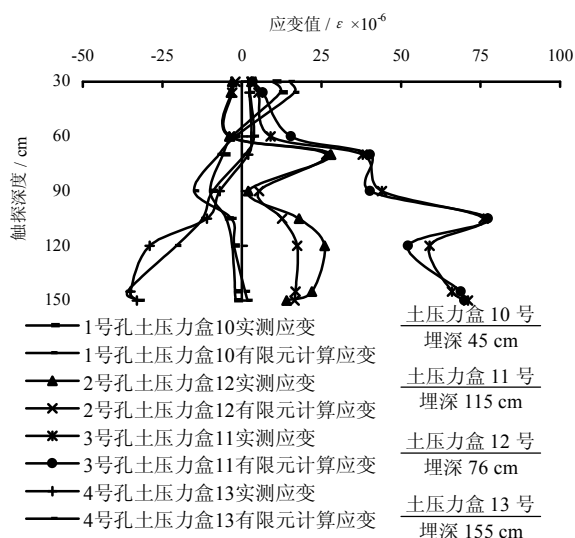


图 8 4 号砂实测应变与计算应变比较

Fig.8 Comparison between computational and test strains of sand No.4

3.5.2 砂土中位移场的分布

图 9 为探头贯入时周围的位移场。可见贯入产生的位移场, 土体的变形形态呈均匀的“V”字型, 探孔周围土体以径向位移为主, 位移线与水平向夹

角约为 35° 左右;稍远处以垂向位移为主,径向位移较小;探头下方土体以垂向位移为主,而离探头侧面稍远的颗粒则产生向上移动。把颗粒移动矢量连接起来将形成弧线,由探头底侧斜面向下转弯向上移动,形成局部剪切区。随着探头入土深度的加大,这种位移分布特征没有多大变化。

由表 8 与图 6 可知,在探头下部有较小范围内的塑性区,塑性区的范围随相对密实度 D_r 的不同而不同,且随相对密实度 D_r 增大而扩大。

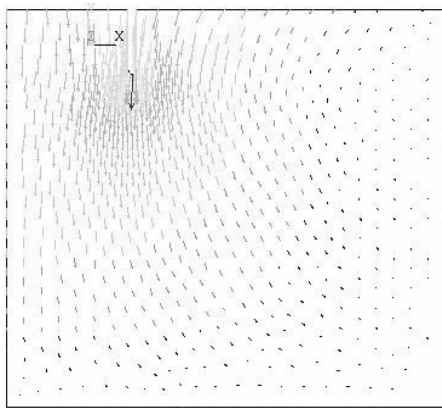


图 9 主位移矢量图(前视图)

Fig.9 Vector diagram of main displacements(front view)

表 8 探头贯入时附近土体变形的影响范围及大小
(单位: mm)

Table 8 Sizes and scopes of the nearby soil distortion influence when the test cone penetrates (unit: mm)

D_r	探头底部下的影响深度	探头周边外的影响平距
	/ mm	/ mm
0.49	202.4	366.6
0.66	227.9	428.3
0.73	254.5	498.9
0.93	303.7	605.5

4 结 论

(1) 由静力触探检测桥涵台背中粗砂相对密实度的室内模型试验值并根据有限元计算可知,无论是细砂、中砂还是粗砂,临界深度处及以下,锥端阻力 Q_{cl} 与相对密实度 D_r 之间的关系满足对数函数曲线:

对于细砂: $D_r = 0.4179 + 0.1640 \ln(Q_{cl})$

(相关系数 $\rho = 0.9910$, $h \geq h_{cr}$);

对于中砂: $D_r = 0.2714 + 0.1966 \ln(Q_{cl})$

(相关系数 $\rho = 0.9511$, $h \geq h_{cr}$);

对于粗砂: $D_r = 0.2169 + 0.2255 \ln(Q_{cl})$

(相关系数 $\rho = 0.9827$, $h \geq h_{cr}$);

对于特粗砂: $D_r = 0.3220 + 0.1995 \ln(Q_{cl})$

(相关系数 $\rho = 0.9909$, $h \geq h_{cr}$);

(2) 由静力触探检测桥涵台背中粗砂相对密实度的室内模型试验及有限元计算得出了细砂的临界深度 h_{cr} 与相对密实度 D_r 的关系:

对于细砂: $D_r = -3.7052 + 1.0236 \ln(h_{cr})$

(相关系数 $\rho = 0.9632$);

对于中砂、粗砂及砂砾: 临界深度 h_{cr} 随相对密实度 D_r 的变化规律不太明显;

(3) 在有限元计算过程中,采用的面一面接触分析中的刚—柔接触模型能够较好地模拟各种不同介质接触的情况,适用于静力触探计算分析,计算结果验证了静力触探试验结果的正确性;

(4) 在探头下部有较小范围内的塑性区,塑性区的范围随相对密实度 D_r 的不同而不同,且随相对密实度 D_r 增大而扩大;

(5) 通过有限元计算可知,静力触探对于检测公路桥涵台背回填中粗砂的相对密实度是可行的。

本研究为今后相应规范的制定和工程现场检测提供了技术基础。

参 考 文 献

- [1] 唐贤强. 地基工程原位测试技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996: 197—244.
TANG Xian-qiang. In-situ Testing Technology in Foundation Project. Beijing: China Railway Press, 1996: 197—244.
- [2] GB50021-2001, 岩土工程勘察规范[S].
- [3] Ruiter J D. The static penetration test. SOA-Report, ESOPT-II, 1982: (1): 389—405.
- [4] 邱延峻. 静力触探机理研究[J]. 西南交通大学学报, 1993, 91(2): 46—52.
QIU Yan-jun. Study on static penetrating mechanism[J]. Journal of Southwest Transportation University, 1993, 91(2): 46—52.
- [5] 陈维家. 砂类土中静力触探机理研究[D]. 长沙: 土木建筑学院, 长沙铁道学院, 1987.
- [6] 夏增明, 蒋崇伦, 孙渝文. 静力触探模型试验及机理分析[J]. 长沙铁道学院学报, 1990, 8(2): 1—10.
XIA Zeng-ming, JIANG Chong-lun, SUN Yu-wen. Model test and mechanism study of static penetration[J]. Journal of Changsha Railway University, 1990, 8(2): 1—10.