

切线模量法确定强夯地基承载力的现场试验研究

李 刚

(华北有色工程勘察院有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘要:平板载荷试验是检验强夯加固填土地基承载力的重要手段,基于平板载荷试验的切线模量法以安全系数和允许沉降两个控制因素结合 Terzaghi 极限承载力理论可计算不同沉降要求的地基承载力。为了验证切线模量法计算强夯地基承载力的可行性和优越性,对现场填土地基进行强夯加固后进行平板载荷试验和超重型动力触探试验,以三组平板载荷试验 9 个试验点的测试结果为基础,反演该地基土性参数并通过切线模量法绘制 $p-s$ 曲线,发现切线模量法计算的 $p-s$ 曲线与现场 $p-s$ 曲线能够很好的吻合,故可用切线模量法计算基础中心不同沉降量所对应的地基承载力,且能够弥补平板载荷试验和动力触探测试方法的不足,故为浅基础的设计提供了一条新的途径。

关键词:切线模量法; 强夯; 填土地基; 地基承载力

中图分类号:TU472 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2016)01-0059-05

0 引言

强夯填土地基的加固效果在规范^[1]中明确规定了其处理效果应采用平板载荷试验进行检测。平板载荷试验测得 $p-s$ 沉降曲线反映了承压板下应力主要影响范围内地基的承载力和变形,当应力进入弹塑性后,沉降曲线表现出非线性,诸多工程实践也表明强夯加固填土地基所得到的 $p-s$ 沉降曲线是一条光滑曲线,按照《规范》^[1-2]对于此类没有明显拐点的 $p-s$ 沉降曲线,通过 s/b 的取值范围来确定地基承载力,但此方法确定的承载力存在人为性,即同一试验曲线, s/b 的取值不同,会出现同一曲线却得到不同承载力的情况;在土体没有明显破坏的情况下,地基极限承载力和安全系数也得不到。鉴于此,杨光华提出的切线模量法采用“双控原则”计算地基承载力,但应用该方法计算强夯填土地基在不同深度上的承载力,目前的文献还很少,本文根据切线模量法计算的地基承载力和依据相关规范计算的地基承载力进行比较分析,可为正确评价强夯加固填土地基效果和指导浅基础设计提供借鉴。

1 切线模量法

杨光华^[3-6]假设土体的平板载荷试验 $p-s$ 沉降曲线为一双曲线,其方程为

$$p = \frac{s}{a + bs} \quad (1)$$

通过平板载荷试验数据拟合双曲线中的参数 a 、 b 值,计算 p_u 、 k_0 值,

其中

$$p_u = \frac{1}{b}, \quad k_0 = \frac{1}{a} \quad (2)$$

曲线的初始切线模量 E_0 为

$$E_0 = k_0 \cdot D \cdot (1 - \mu^2) \cdot \omega \quad (3)$$

收稿日期:2015-03-26 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2016.01.11

作者简介:李刚(1973-),男,高级工程师。主要从事岩土工程研究。E-mail:1378242336zxl@163.com

李刚.切线模量法确定强夯地基承载力的现场试验研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(1):59-63.

令 $p_u = P_u$, 通过 Terzaghi 极限承载力反演地基土性参 c, φ 值, 其中

$$p_u = \frac{1}{2}b\gamma N_r + \gamma d N_q + c N_c \quad (4)$$

地基土的变形模量并不是一个常量, 随着加载和深度在变化, 当某一荷载 P 处增加一增量荷载 ΔP 时, 此时变形模量

$$E_t = (1 - \frac{p}{p_u})^2 E_0 \quad (5)$$

根据分层总和法计算承压板中点下的土层压缩量 s_i

$$s_i = \sum_{j=1}^n \Delta s_{ij} \quad (6)$$

当 $\Delta s_{ij} \leq 0.025 \sum_{i=1}^n s_i$ 时, 达到计算深度。

绘制切线模量法的 $p-s$ 沉降曲线, 取基础设计要求的变形量所对应的承载力即为 f_a 。

2 现场试验概况

试验场地是丘陵坡地, 厚填土为大面积的强~中等风化的片麻岩碎石, 粒径多在 20~300 mm 之间, 回填土平均厚度 5 m。采用强夯法加固回填土地基, 隔行分两遍点夯, 梅花形布置, 夯点间距为 6 m×6 m, 所用单击夯击能为 4 000 kN·m, 单点夯击数 7~11 击, 当最后两击平均夯沉量不大于 150 mm 时停夯, 第三遍满夯且夯点间搭接 1/4, 单击夯击能为 2 000 kN·m, 每点 2 击。地基经强夯加固后, 要求回填土层地基承载力特征值不小于 200 kPa。

3 试验目的及方法

根据规范^[2], 回填土地基经强夯加固后, 现场选取 A、B、C 3 个试验位置, 每个位置分别在地表下深度 d 为 1 m、3 m、5 m 处进行密度试验、2 m² 平板载荷试验以及大于 5 m 的超重型动力触探试验。其中, A 试验位置在深度 d 为 1 m、3 m、5 m 处试验点的编号是 a_1, a_2, a_3 。相类似, B 位置和 C 位置的试验点编号是 b_1, b_2, b_3 和 c_1, c_2, c_3 。

试验的目的: 验证切线模量法计算强夯填土地基承载力的可行性和优越性。

(1) 通过现场密度试验计算土体的重度, 为反演土性参数提供依据。

(2) 通过平板载荷试验的 $p-s$ 沉降曲线拟合双曲线参数 a, b , 为验证切线模量法是否正确和计算地基承载力提供依据。

(3) 按照切线模量法绘制 $p-s$ 沉降曲线, 通过其“双控原则”分别计算 3 个深度的基础的极限承载力和控制沉降为 25 mm 时的承载力。

(4) 通过 3 组试验数据比较分析, 平板载荷试验、切线模量法和超重型动力触探试验计算承载力的差异, 体现切线模量法确定强夯加固填土地基的承载力的优越性。

试验的方法: 填土地基经强夯加固后, 严格按照规范^[2], 密度试验采用灌砂法, 平板载荷试验采用 2 m² 载荷板的慢速维持荷载法, 密实度检测采用 N₁₂₀ 超重型动力触探试验。

4 加固效果检测及承载力确定

4.1 夯后大容重试验

在现场 A、B、C 的位置进行 9 个大容重试验, 大容重试验采用灌砂法, 由于土石颗粒粒径较大, 故试坑体积确定尺寸为 50 cm×50 cm×50 cm, 试验时除去表面松散的土层, 试坑地面整平, 试验结果如表 1。

表 1 大容重检测成果表

检测点位置	天然容重/(kN·m ³)	含水量/%	干容重/(kN·m ³)
A	23.4	11.4	21.0
B	23.3	11.2	21.0
C	23.1	9.7	21.1

4.2 超重型动力触探试验

在现场 A、B、C 的位置,因回填土经强夯处理后强度较高,采用 N120 超重型圆锥动力触探测试,在统计过程中,将实测击数的异常值剔除,对经杆长修正后击数超过 20 击的数值按 20 击计算,计算结果如表 2。

表 2 超重型动力触探成果表

检测点位置	检测深度			
	0~1.0 m	1.0~3.0 m	3.0~5.0 m	5.0 m 以上
A	11.2	14.8	11.4	9.6
B	11.1	14.3	12.5	9.9
C	11.6	15.0	12.9	9.3

从表 2 中可以看出,强夯后填土地基密实度为密实~很密。尤其 1.0~3.0 m 时击数大于 14 击,地基土属于很密状态。根据相关规范,填土地基 0~5 m 地基极限承载力标准值取 $f_{uk}=1\ 640\sim1\ 800$ kPa,变形模量取 $E_0=42\sim47$ MPa。

4.3 切线模量法确定地基承载力

在 5 m 厚的填土地基上现场选取 A、B、C 3 个试验位置,每个试验位置在深度 1 m、3 m、5 m 处试验点的编号是 $a_1,a_2,a_3;b_1,b_2,b_3;c_1,c_2,c_3$ 。进行慢速维持法载荷试验,初始加载量 80 kPa,分 9 级加载,加载总量 400 kPa,试验过程如图 1。



图 1 现场平板载荷试验

平板载荷试验各测点沉降的数据整理如图 2 和表 3。

表 3 平板载荷试验累计沉降成果表

测试位置	检测深度	累计沉降量
A	$a_1=1$	31.3
	$a_2=3$	17.3
	$a_3=5$	37.5
B	$b_1=1$	28.4
	$b_2=3$	20.3
	$b_3=5$	35.3
C	$c_1=1$	29.8
	$c_2=3$	15.6
	$c_3=5$	39.0

从图 2 和表 3 可以看出:同一深度,A、B、C 测试位置的各级荷载对应的沉降接近;同一测点不同深度,同一荷载对应的沉降不同,在深度为 3 m 时,沉降是最小的,平均在 17.7 mm 左右。究其原因,由于强夯不断的夯击作用下在 3 m 左右形成一个硬壳层,故此处的沉降量最小,从超重型动力触探试验结果也

可以得到验证。

根据土性参数唯一性, 2 m² 载荷板的载荷试验数据经 Terzaghi 极限承载力计算公式反演地基土性参数如表 4。

表 4 2 m² 载荷板反演地基土性参数表

测点位置	d/m	p_u/kPa	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E_o/MPa
1	1	776.5	0	34.9	56.2
2	3	884.9	0	35.3	61.2
3	5	735.2	0	34.7	54.1

3 组现场不同深度的平板载荷试验绘制的 p - s 沉降曲线和按照切线模量法公式(1)~(6) 计算各级荷载下的 p - s 沉降曲线如图 2。式中各参数取值为 $D=1.41\text{ m}$, $\mu=0.27$, $\omega=0.886$, 分层总和法中 $\Delta h=0.5\text{ m}$, 首级加载 $\Delta P=80\text{ kPa}$, 后 8 级加载分别 $\Delta P=40\text{ kPa}$ 。

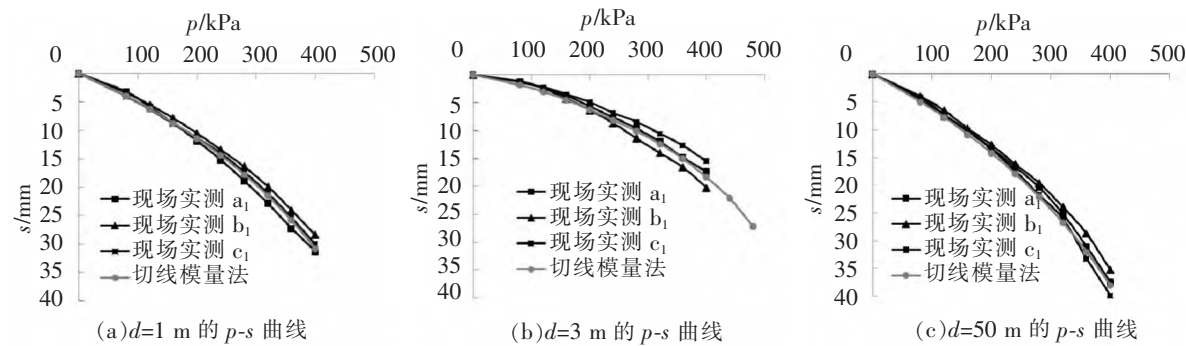


图 2 三组试验的 p - s 曲线图

切线模量法计算的 p - s 曲线和平板载荷试验得到的 p - s 曲线比较, 拟合效果很好, 故可以切线模量法计算的 p - s 曲线计算地基承载力是可行的。规范中对于 p - s 曲线为光滑曲线, 取 $s/b=0.01\sim0.015$ 所对应的荷载和 200 kPa(此时安全系数取 2) 相比较, 取二者的较小值作为地基承载力特征值。对于切线模量法, 根据工程地质手册(第四版), 建筑物地基允许变形值最大为 250 mm^[8], 故切线模量法取 $s=250\text{ mm}$ 对应的荷载作为地基承载力, 计算结果如表 5。

表 5 切线模量法地基承载力计算

S/m^2	d/m	k_0	E_o/MPa	p_u/kPa	P_u/kPa	P_{25}/kPa	f_a/kPa	K
2	1	48.5	56.2	776.5	1793	358.2	358.2	5.0
2	3	52.8	61.2	884.9	1942	421.5	421.5	4.6
2	5	46.6	54.1	735.2	1637	304.8	304.8	5.3

从表 5 中可以看出, 通过切线模量法可直接计算出地基容许变形值为 250 mm 时的地基承载力, 而不用再进行深宽修正, 并且安全系数也可以获得。如果地基容许变形值要求更严格, 则通过切线模量法计算的 p - s 曲线找到与变形值相对应的承载力即为此变形值时的承载力。此外, 假设基础埋深为 3 m, 通过与平板载荷试验以及超重动力触探法相比较, 切线模量法计算地基承载力的优越性也很明显(如表 6), 静载荷试验在地基土体没有破坏时并没有得到确切的极限承载力的数值, 只能取值 $P_u\geq 400\text{ kPa}$, 地基承载力特征值取 $f_{ak}=200\text{ kPa}$ 偏保守, 超重型动力触探只能凭借经验公式得到极限承载力, 并不能知道地基土处于某一变形状态的承载力。

表 6 各种方法地基承载力计算比较表

承载力计算	d/m	P_u/kPa	P_{25}/kPa	f_{ak}/kPa	E_o/MPa	K
静力载荷试验	3	≥ 400	—	200	37.7	≥ 2
切线模量法	3	1 942	421	421	61.2	4.6
超重型动力触探	3	1 720	—	—	50.0	—

5 结论

通过三组不同深度的强夯填土地基平板载荷试验的测试结果,计算切线模量法的 $p-s$ 沉降曲线,其与平板载荷试验的 $p-s$ 沉降曲线很吻合,证明了切线模量法计算强夯填土地基承载力的可行性,并且计算结果与平板载荷试验、超重型动力触探所得结果对比分析,体现了切线模量法计算强夯填土地基承载力的优越性,它能够计算出该地基在不同变形要求下的极限承载力、承载力、土性参数以及安全系数,故能够为下一步浅基础在强夯填土地基上的设计提供新的途径。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50007—2011 建筑地基处理规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [3] 杨光华. 地基沉降计算的新方法及其应用[M]. 北京:科学出版社,2013. [4]
- [4] 杨光华. 地基沉降计算的新方法[J]. 岩石力学与工程学报,2008, 27(4):679-686.
- [5] 杨光华,王俊辉. 地基非线性沉降计算原状土切线模量法的推广和应用[J]. 岩土力学, 2011, 32 增(1):33-37.
- [6] 杨光华,姜燕,张玉成,王恩麒. 确定地基承载力的新方法研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4):597-603.
- [7] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

A Field Study by Tangent Modulus Method on Bearing Capacity of Consolidated Foundation

Li Gang

(North China Nonferrous Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Plate load test is an important means to test the bearing capacity of consolidated foundation, the tangent modulus method, based on the plate load test, can calculate the requirements of different settlement with two control factors by safety coefficient and allowed settlement combining the theory of Terzaghi ultimate bearing capacity of foundation bearing capacity. In order to verify the tangent modulus method to calculate the feasibility of the foundation bearing capacity by dynamic compaction, three groups of plate loading test of nine sites have been done. On the basis of the test results, the foundation parameters are obtained and $p-s$ curve is drawn by the tangent modulus method. It is found that the $p-s$ curve calculated through the tangent modulus method matches well with the $p-s$ curve on the site, therefore, it is available for tangent modulus method to calculate the foundation bearing capacity for different settlement at foundation center, which will provides a new way for shallow foundation design.

Key words: tangent modulus method; dynamic compaction; filled up ground; bearing capacity