

沈阳浅层粉质黏土承载力与浅基础地基承载力

孙 峰

(沈阳市勘察测绘研究院, 辽宁沈阳 110004)

【摘 要】 以沈阳地区 28 个工程场地的工程地质资料和地基基础承载力资料为依据, 采用统计回归的方法, 对研究区域内浅层粉质黏土物理力学参数和承载力进行研究。并基于统一强度理论对太沙基理论进行改进, 在其基础上建立了沈阳地区浅基础地基承载力经验公式。结果表明: 研究区域内浅层粉质黏土物理参数的变异性小、相关性显著, 力学参数的变异性较大、相关性不显著; 浅层粉质黏土地层承载力与标准贯入实验值、旁压实验值以及土工试验参数和塑性指数与静止侧压力系数呈近似线性关系, 地层承载力地域性经验公式和改进的太沙基理论基础上建立的沈阳地区浅基础地基承载力经验公式与实际承载力具有较高的符合性。研究成果可为区域性地基基础可靠性设计和承载力的确定提供必要的参考价值。

【关键词】 粉质黏土; 相关性; 承载力

【中图分类号】 TU 431

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2016.06.007

Research on Bearing Capacity of Shallow Silty Clay and Shallow Foundation in Shenyang

Sun Feng

(Shenyang Geotechnical Investigation & Surveying Research Institute, Shenyang 110004, Liaoning, China)

【Abstract】 Using statistical regression analysis, mechanical parameters and bearing capacity of the regional silty clay were studied based on engineering geology and bearing capacity data from 28 sites in Shenyang. Based on the unified strength theory to improve Terzaghi theory, the empirical formula of bearing capacity of shallow foundation in Shenyang area is established. The research show that: within the study area of shallow silty clay, the variation of the physical parameters is small, the correlation of the physical parameters is conspicuous, the variation of the mechanical parameters is large, and the correlation of the mechanical parameters is not conspicuous. There is a linear relationship among the standard penetration test values, lateral pressure test values, and soil test parameters values with the bearing capacity of the shallow silty clay, plastic index and static side pressure coefficient. The regional empirical formulas of bearing capacity and the bearing capacity formula of Shenyang area of shallow foundation to establish improved Terzaghi theory, and the actual bearing capacity have higher uniformity. The research results can provide necessary references for the reliable design of regional foundation and determination of bearing capacity.

【Key words】 silty clay; correlation; bearing capacity

0 引言

沈阳市地处辽东山区与辽河平原之间, 浑河由山区流向平原出口, 坐落在浑河新老冲洪积扇上, 现代辽河在扇的北部边缘流过, 坐落在辽河冲洪积扇上。沈阳大部分地区为山前倾斜平原, 只有东部分布着构造剥蚀低山丘陵。沈阳地区地层经勘探大部分为第四纪冲洪积物, 而且其中大部分地区又为第四系全新统新近沉积粉质黏土和粉质黏土地层覆盖, 在沈阳地区进行工程建设时, 对场地的岩土工程勘察不可避免地涉及到粉质黏土地层, 且浅基础持力层常选取于粉质黏土地层中。由此可见, 研究沈阳地区的粉质黏土承载力和浅基础承载力研究有着

现实的意义。

为了进行统计分析研究, 共收集了 28 个工程场地的工程地质资料和地基承载力资料。所收集的工程地质资料涵盖了沈阳地区堆积地形、剥蚀丘陵地形, 剥蚀堆积地形三类典型的地貌单元, 分别是堆积地形 8 个场地、剥蚀丘陵地形 6 个场地、剥蚀堆积地形 14 个场地。这些资料基本上反映了沈阳地区的地基承载力特性。

1 粉质黏土参数分析

1.1 粉质黏土参数的统计分析方法

选取平均值 φ_m 、标准差 σ_s 、变异系数 δ 、相关系数 R 和一元线性回归方程 y 作为评价指标, 对研究

区域内粉质黏土参数进行统计分析^[1]。

$$\varphi_m = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i}{n}$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n \varphi_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \varphi_i)^2}{n} \right]}$$

$$\delta = \frac{\sigma_f}{\varphi_m}$$

$$\dot{y} = a + b \dot{x}$$

$$r = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx} l_{yy}}}$$

式中:

$$b = \frac{l_{xy}}{l_{xx}}; a = \bar{y} - b\bar{x}; l_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2; l_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}); l_{yy} = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

研究区域内粉质黏土物理参数的变异性相对较小。在所有研究的物理参数中,重度 γ 的变异系数最小为 0.02,天然孔隙比 e 的变异系数最大为 0.10。力学参数的变异性相对物理参数较大,其中黏聚力的变异系数 $\delta_c = 0.20$,内摩擦角的变异系数

$\delta_\varphi = 0.29$ 、压缩模量的变异系数 $\delta_E = 0.15$ 。因此,在该研究区域内进行岩土工程可靠性设计中,可将土的物理参数视为常量,将土的力学参数作为随机变量并考虑其变异系数影响,利用了 28 组试验数据进行分析研究,结果能够满足工程精度的需要。

表 1 沈阳地区浅层粉质黏土物理力学参数分析结果

参数	含水量 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	天然孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
最小值	17.8	19.3	0.557	10.6	0.25	0.25	4.0	28.2	9.7
最大值	28.8	20.7	0.815	14.6	0.64	0.42	6.9	37.2	16.7
平均值	24.5	19.9	0.718	13.0	0.44	0.32	5.5	32.7	13.2
标准差	3.49	0.04	0.07		0.13	0.06	0.82	3.28	2.45
变异系数	0.04	0.02	0.10		0.09	0.18	0.15	0.20	0.29
标准值	26.4	19.7	0.756		0.52	0.35	5.0	30.9	11.8

表 2 沈阳地区粉质黏土物理力学参数相关性分析

参数	线性回归方程	相关系数 R	
物理参数相关性	$w-w_L$	$w = 0.2674w_L + 27.85$	0.26
	$w-I_L$	$w = -7.4616I_L + 37.998$	0.97
	w_p-w_L	$w_p = -0.2673I_L + 27.855$	0.82
	$w-e$	$w = 32.341e + 1.8019$	0.76
	w_L-e	$w_L = -21.695e + 51.349$	0.99
力学参数相关性	I_L-e	$I_L = 3.3596e - 2.1362$	0.95
	$c-e$	$c = -26.156e + 52.352$	0.29
	$c-w$	$c = -0.7905w + 53.324$	0.38
	$c-w_L$	$c = 1.0766w_L - 5.0795$	0.45
	$c-\varphi$	$c = 3.7074\varphi - 21.996$	0.23
	$c-E_s$	$c = 2.1450E_s + 19.667$	0.46
	$\varphi-w_L$	$\varphi = 0.2584w_L + 5.6737$	0.44
	$\varphi-e$	$\varphi = -7.7125e + 20.559$	0.45
	$\varphi-w$	$\varphi = -0.2175w + 20.431$	0.42
	$\varphi-E_s$	$\varphi = 0.6491E_s + 10.824$	0.48
$e-E_s$	$e = -0.0585E_s + 1.1115$	0.45	

研究区域内粉质黏土物理参数中,天然含水量与孔隙比的相关系数 R_{w-e} ,液性指数与孔隙比的相

关系数 R_{I_L-e} ,天然含水量与液性指数的相关系数 R_{w-I_L} ,塑限与液限的相关系数 $R_{w_p-w_L}$,液限与孔隙比的相关系数 R_{w_L-e} 分别为 0.76、0.95、0.97、0.82、0.99,相关性显著;天然含水量与液限的相关系数 $R_{w-w_L} = 0.26$,在应用其线性回归方程时需考虑相关系数影响。

研究区域内粉质黏土力学参数之间的相关性不显著,其中黏聚力 c 与压缩模量 E_s 的相关系数最大,为 0.46;黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的相关系数最小,为 0.23。力学物理参数间相关性不显著,压缩模量 E_s 与孔隙比 e 的相关系数最大,为 0.48;黏聚力 c 与孔隙比 e 的相关系数最小为 0.29。综上,在该研究区域内进行地基基础可靠性设计和计算地基极限承载力中,将土的力学参数 c 、 φ 视为彼此相互独立的变量,结果不仅能使计算过程得以简化而且能够满足工程精度的需要。

2 粉质黏土承载力的地域性经验公式

结合沈阳地区典型岩土工程勘察及旁压试验资料,分别采用以孔隙比 e 和液性指数 I_L 为参数的土工试验参数法、以标准贯入次数为参数的标贯测试参数法、以压力增量为 Δp 为参数的扁铲侧胀实验

参数法 3 种方法,确定研究区域内浅层粉质黏土承载力的地域性经验公式。

2.1 粉质黏土的土工试验承载力经验公式

本文利用了 6 组试验数据进行分析研究,其中,地基承载力是旁压试验得到的。采用统计回归方法建立黏性土地基承载力与地基土孔隙比 e 和液性指

$$\lg f_{ak} = 8.2763 - 0.8549 \lg(e \times 100) - 1.78311(I_L + 1) \times 100 \quad (1)$$

回归方程的相关系数 R 为 0.95,即高度相关。

2.2 粉质黏土的标准贯入试验承载力经验公式

标准贯入试验实测值显示出研究地层的密实度,而地层密实度与地层承载力又有着非常密切的正相关关系^[3]。本文利用了 35 组试验数据进行分析研究。图 1 为沈阳地区浅层粉质黏土地层承载力与修正后的标准贯入值的散点图。承载力 f_{ak} 与标准贯入试验的修正值近似呈线性关系。通过采用最小二乘法,拟合出如下标贯确定承载力的经验公式:

$$f_{ak} = 15.092N + 46.962 \quad (2)$$

式中: N 为标准贯入值的修正击数, $N = \mu - 1.645$

$\frac{\sigma}{\sqrt{n-1}}$,回归方程的相关系数 R 为 0.98,即高度相关。

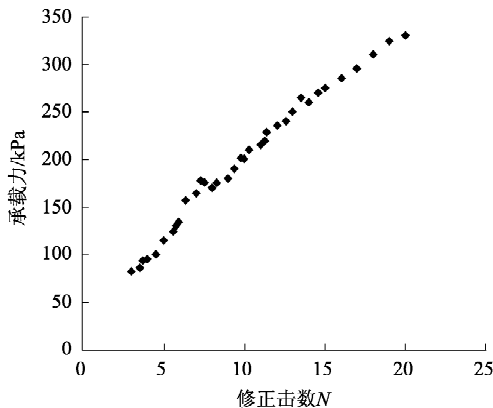


图 1 粉质黏土地基承载力特征值与标准贯入试验锤击数关系图

2.3 粉质黏土的扁铲侧胀试验承载力经验公式

扁铲侧胀试验是将接在探杆上的扁铲贯入土中预定深度,然后施加气压,使位于扁铲测头一侧面的圆形钢膜向土内膨胀,量测钢膜膨胀三个特殊位置(A、B、C)的压力,从而获得多种岩土参数^[4]。

在扁铲侧胀试验中,扁铲铲头钢膜在初始压力增量为 Δp 时,变形量是固定值 1.05 mm 时,其相对变形为 $1.05/60 = 0.0175$,与通常的载荷试验的承载力特征值取值标准 $0.015B$ 接近。因此,本文采用公式 $f_{ak} = A\Delta p + B$ 作为地基土承载力的地区经验公式,利用了 17 组试验数据进行分析研究。

数 I_L 的统计关系。为了消除 e 和 I_L 与 f_{ak} 之间在数值误差上的不匹配,先将 e 放大 100 倍并取常用对数,而将 $(I_L + 1) \times 100$ 取常用对数。以 $\lg(e \times 100)$ 和 $\lg[(I_L + 1) \times 100]$ 为自变量、 $\lg f_{ak}$ 为因变量,进行二元线性回归分析^[2],确定 e 、 I_L 与 f_{ak} 的关系。经过回归分析,得到如下公式:

图 2 为沈阳地区浅层粉质黏土地层承载力与初始压力增量 Δp 的散点图。承载力 f_{ak} 与压力增量为 Δp 近似呈线性关系。通过采用最小二乘法,拟合出如下扁铲侧胀试验确定承载力的经验公式:

$$f_{ak} = 0.1066\Delta p - 4.4228 \quad (3)$$

式中: Δp 为初始压力增量。回归方程的相关系数 R 为 0.93,即高度相关。

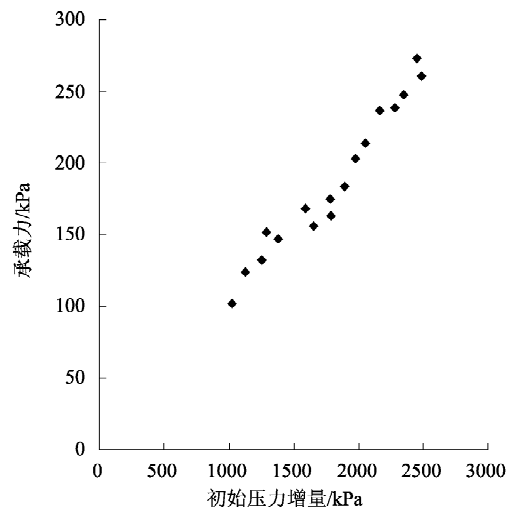


图 2 粉质黏土地基承载力特征值与扁铲侧胀试验压力增量值关系图

2.4 对比分析

通过大量的研究表明,利用临塑荷载法即用临塑压力减去初始压力的结果确定地基承载力,旁压试验结果与浅层载荷试验结果非常接近^[5]。所以,本文利用旁压试验测定的粉质黏土地基承载力取代载荷试验对经验公式进行验证。

根据式(1)~式(3)对研究区域内 5 个工程项目浅层粉质黏土地层承载力进行计算,承载力特征值与旁压实验地基承载力特征值见表 3。土工试验由于取样、运送、试验方法和土体受到较大扰动等原因,由式(1)计算的地基承载力特征值相对误差范围为 $-9\% \sim 10\%$ 。标准贯入试验和扁铲侧胀试验是两种现场原位测试方法相对稳定性较高,由式(2)和式(3)计算的地基承载力特征值相对误差范围分别为 $-3.9\% \sim -2.9\%$ 、 $-3.4\% \sim 3.9\%$,具有较高的应用价值。

表3 地基承载力特征值

试验 点号	地基承载力特征值/kPa			
	土工试验	标准贯入试验	扁铲侧胀试验	旁压试验
1	198	167	181	174
2	221	197	199	202
3	218	231	247	235
4	251	269	280	276
5	330	299	320	308

3 粉质黏土中浅基础地基承载力理论研究

浅基础一般指基础埋深 3~5 m,或者基础埋深小于基础宽度的基础,其基础竖向尺寸与其平面尺寸相当,侧面摩擦力对基础承载力的影响可忽略不计。所以,对于浅基础承载力的计算,世界各国通常采用太沙基公式,它适用于基础底面粗糙的条形基础,并推广应用于方形基础与圆形基础。一般土力学教材和资料中的临界荷载计算公式都是在条形均

布荷载、均质地基等假定条件下推得的,且在公式推导简化过程中假定了土的静止侧压力系数 $k_0 = 1$,即将自重应力场视为静水应力状态。显然,这种假定与大多数土的实际 k_0 值($k_0 = 0.25 \sim 0.80$)都会相差较大,只有在饱和软黏土(如淤泥)中才会接近正确,误差不大。此外,假设 $k_0 = 1$ 会使地基土处于一种人为的侧向加密状态,从而过高地估计了地基承载力。而且,太沙基理论没有考虑中间主应力的影响。实验证明中间主应力对土体的屈服和破坏有影响。所以,研究土的静止侧压力系数地区经验公式和三向应力状态下地基极限承载力问题,对于浅基础在粉质黏土中的承载力应用具有重要的理论和实际意义。

3.1 基于统一强度理论下的太沙基理论的改进

文献[6]纠正了已有同类文献在公式推导中存在的不妥之处,给出了当 $k_0 \neq 1$ 时第几种任一点 M 处的大、小主应力分别为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{p_0}{\pi} [\partial + \sin \partial \sin(\partial + 2\delta) + 0.38 \sin \partial \cos(\partial + 2\delta)] + (0.69 + 0.31K_0)(\gamma_0 D + \gamma z) \\ \sigma_3 &= \frac{p_0}{\pi} [\partial - \sin \partial \sin(\partial + 2\delta) - 0.38 \sin \partial \cos(\partial + 2\delta)] + (0.31 + 0.69K_0)(\gamma_0 D + \gamma z) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据统一强度理论^[7],当 M 点达到极限平衡状态时,该点的大、小主应力应满足极限平衡条件:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi_t + c_t \cos \varphi_t \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi_t &= \frac{2(1+b) \sin \varphi_0}{2(1+b) + mb(\sin \varphi_0 - 1)} \\ c_t &= \frac{2(1+b)c_0 \cos \varphi_0}{2(1+b) + mb(\sin \varphi_0 - 1) \cos \varphi_t} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: c_t 和 φ_t 为统一黏聚力和内摩擦角,为反映中

$$Z_{\max} = \frac{2(p_0 - \gamma_0 D)}{\pi Q \gamma} \left[\left(\cos \partial_t - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_t \right) \sin \varphi_t \right) - \frac{2c_t}{Q \gamma} \cos \varphi_t - \frac{\gamma_0 D}{\gamma} \right] \quad (9)$$

令式(9)中令 $Z_{\max} = \frac{B}{4}$,则可得临界荷载 p_u 的表达式为:

$$p_u = \frac{\frac{1}{4} \pi Q \gamma B + 2 \pi \cos \varphi_t c_t + \pi Q \gamma_0 D}{2 \left[\cos \varphi_t - \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_t \right) \sin \varphi_t \right]} + \gamma_0 D \quad (10)$$

3.2 在改进的太沙基理论基础上建立的沈阳地区浅基础地基承载力经验公式

通过大量实验发现,在双面排水条件下,经过一段时间后,孔隙压力基本消散, K_0 值与 I_p 有关,且随 I_p 值的增大而增大,具有较好的线性关系。相关关系式如下:

$$K_0 = 0.01394 I_p + 0.30652 \quad (11)$$

间主剪应力以及相应面上的正应力对材料破坏影响程度的系数。当材料屈服时, $m \rightarrow 1$ ^[8]。将式(4)代入到式(5)中,可得塑性区的边界方程表达式为:

$$Z = \frac{2p_0}{\pi Q \gamma} (\sin \partial - \partial \sin \varphi_t) - \frac{2c_t}{Q \gamma} \cos \varphi_t - \frac{\gamma_0 D}{\gamma} \quad (7)$$

式中: $Q = (1 + K_0) \sin \varphi_t - 0.38(1 - K_0)$ (8)

根据 $\frac{dZ}{d\partial} = 0$,求得 $\partial = \frac{\pi}{2} - \varphi_t$,将 ∂ 代入式(7),可得塑性区发展最大深度 Z_{\max} 的表达式为:

回归方程的相关系数 R 为 0.81,即高度相关。

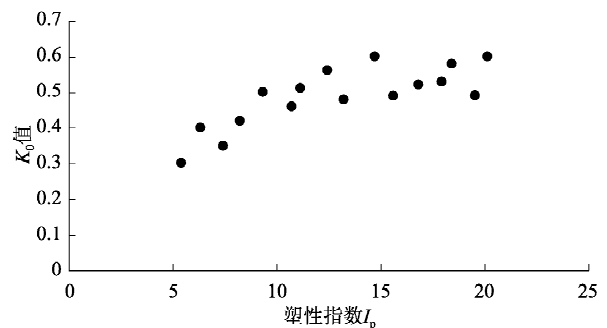


图3 塑性指数 I_p 与 K_0 的关系

对于粉质黏土的中间主应力 σ_2 根据 Jack 理论^[8], $\sigma_2 = \frac{m}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + (m-1)\sigma_0$

当材料屈服时^[8], $m \rightarrow 1$ 。得出粉质黏土 $b \rightarrow 0.5$ 。最后得出沈阳地区浅基础地基承载力经验公式:

$$p_u = \frac{(\sin \varphi_0 + 7) \left(\frac{1}{4} \pi Q B \gamma + \pi Q \gamma_0 D + \gamma_0 D \right) + 2\pi \cos \varphi_0 c_0}{2(\sin \varphi_0 + 7) \cos \arcsin \frac{6 \sin \varphi_0}{\sin \varphi_0 + 7} - 6\pi \sin \varphi_0 + 6 \sin \varphi_0 \arcsin \frac{6 \sin \varphi_0}{\sin \varphi_0 + 7}} \quad (12)$$

式中:

$$Q = \frac{(1.30652 + 0.01394 I_p) 6 \sin \varphi_0 - 0.38(0.69348 + 0.01394 I_p)(\sin \varphi_0 + 7)}{\sin \varphi_0 + 7} \quad (13)$$

3.3 对比分析

根据太沙基公式和式(12)对研究区域内3个工程项目浅层粉质黏土浅基础地基承载力进行计算,承载力特征值与载荷实验浅基础地基承载力特征值见表4。

表4 浅基础地基承载力值

试验 点号	浅基础地基承载力值/kPa		
	太沙基 公式	改进的承载力 经验公式	载荷试验 实测值
1	162	182	189
2	205	226	231
3	311	332	348

由沈阳地区浅基础地基承载力经验公式(12)计算的地基承载力特征值相对误差范围为2.1%~4.6%。太沙基公式计算的地基承载力特征值相对误差范围分别为10.6%~14.3%,本文在改进的太沙基理论上得出的沈阳地区浅基础地基承载力经验公式,其得到的承载力值比太沙基公式按 $K_0=1, b=0$ 得到的承载力值要大,而且更接近载荷试验实测值,这说明传统的确定地基承载力的公式存在一些问题,而改进的太沙基理论上建立的沈阳地区浅基础地基承载力经验公式具有较高的应用价值。

4 结 论

1) 研究区域内浅层粉质黏土物理参数的变异性小,相关性显著。力学参数的变异性相对较大,相关性不显著。

2) 研究区域内浅层粉质黏土地层承载力与标准贯入试验值、扁铲侧胀试验值参数呈近似线性关系,

地层承载力地域性经验公式与实际承载力具有较高的符合性。

3) 传统的确定地基承载力的公式存在一些问题,其得到的承载力值比太沙基公式按 $K_0=1, b=0$ 得到的承载力值要大,而改进的太沙基理论上建立的沈阳地区浅基础地基承载力经验公式具有较高的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 蒋建平, 李晓照, 高广运, 等. 南京地铁地基粘土物理力学参数相关性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2007, 9(4): 81-84.
- [2] 高大钊, 姜安龙, 张少钦. 确定地基承载力方法若干问题的讨论[J]. 工程勘察, 2004(3): 3-8.
- [3] 王钟琦. 我国的静力触探及动静触探的发展前景[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 517-522.
- [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.
- [5] Fayou A, Kong J M, Ni Z Q. Modeltest on deformation and failure of excavated anti-dip slope under seismic loading[J]. Disaster advances, 2012, 5(2): 41-47.
- [6] 许东俊, 耿乃光. 岩石强度随中间主应力变化规律[J]. 固体力学学报, 1985, 1(1): 72-80.
- [7] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 1-9.
- [8] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

收稿日期: 2016-06-01