

宁波地区典型土层地基承载力确定*

陈斌^{①②} 叶俊能^① 朱剑锋^② 刘干斌^② 贾波^②

(^①宁波市轨道交通工程建设指挥部 宁波 315012)

(^②宁波大学建筑工程与环境学院 宁波 315211)

摘要 基于宁波轨道交通1号线和2号线一期工程的静力触探、标准贯入、扁铲和十字板等原位试验数据,采用已有的经验公式预测了宁波地区各典型土层的地基承载力。然后,根据K-S检验法提出了各经验公式预测结果的分布概型及数字特征。在此基础上,通过与宁波地区地基承载力经验值对比,提出宁波地区典型土层地基承载力的建议值。研究结果可对宁波地区岩土工程勘察设计中地基承载力的确定提供参考。

关键词 静力触探试验 标准贯入试验 十字板剪切试验 扁铲试验 地基承载力

中图分类号:TU471 文献标识码:A

METHODS FOR BEARING CAPACITY DETERMINATION OF TYPICAL SOIL FOUNDATIONS IN NINGBO REGION

CHEN Bin^{①②} YE Junneng^① ZHU Jianfeng^② LIU Ganbin^② JIA Bo^②

(^①Ningbo Urban Rail Transit Project Construction Headquarters, Ningbo 315012)

(^②Faculty of Architectural Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211)

Abstract This paper is based on the first-stage in-situ test results of the Line 1 and Line 2 in Ningbo rail transit system. The tests include static cone penetration, standard penetration test, standard penetration test, and vane shear test. Accordingly, the foundation bearing capacities of the typical soils in Ningbo region are estimated and predicted with empirical formula. Then, the distributions and numerical characteristics of the predicted results are presented on basis of the K-S inspection method. Based on above analysis results, the recommended foundation bearing capacities of the typical soils are proposed after their comparisons with the empirical foundation bearing capacities of the typical soils in Ningbo area. The research findings can provide scientific references to determine the value of the bearing capacity of the geotechnical investigation and design in Ningbo area.

Key words Static cone penetration, Standard penetration test, Vane shear test, Flat dilatometer test, Foundation bearing capacity

* 收稿日期:2012-08-20;收到修改稿日期:2012-10-31.

基金项目:宁波市轨道交通工程建设指挥部科技攻关专题(2011001)和宁波市重点学科(XKLI1D2076)资助。

第一作者简介:陈斌,主要研究城市轨道交通研究与管理。Email: chenbin.nb@163.com

通讯作者简介:朱剑锋,主要从事岩土工程教学与设计。Email: zhujianfeng0811@163.com

1 工程概况

近年来,随着宁波都市经济区大规模建设发展,对岩土工程勘察所提供的各项物理力学指标准确度的要求也越来越高,尤其是地基土承载力的大小,对工程造价影响极大。因此,合理确定地基的承载力,使位于地基上的各种工程设施具有足够的安全储备,确保地基不至于因承载力不足而发生整体剪切破坏,保证工程在使用期内能正常、安全地发挥应有的功能,具有重要的经济和社会效益。

目前,确定地基承载力的试验方法主要包括静力载荷试验法、静力触探试验法、标准贯入试验法、十字板剪切试验法以及扁铲试验法等。其中,通过静力载荷试验获得的地基承载力特征值是最直接、最准确的方法^[1,2],但该法费时、费力,不易进行大面积推广。原位测试技术能够测定“原状土”的物理力学性质,反映岩土的宏观结构对岩土力学性质的影响。近年来,该项技术在岩土工程勘察工作中的应用范围越来越广,关于原位测试与地基承载力之间的相关分析研究,国内学者已开展了一定工作,提出了诸如静力触探、标准贯入试验击数、十字板剪切试验等与地基承载力之间的经验公式^[3~12],但上述经验公式均具有一定的区域性,能否应用于宁波地区仍须进一步验证。

宁波市轨道交通 1、2 号线一期工程分 4 个标段进行勘察,勘察共计 3875 个有效钻孔,其中原位参数有扁铲 88 个、十字板 183 个、静探 783 个、标贯 1269 个。本文根据宁波轨道交通 1、2 号线的原位试验数据,通过经验公式来推算宁波地区典型土层(①_{2.0}黏土~⑥_{2.0}粉质黏土层)的地基承载力,提出相应的分布概型,通过对比分析提出宁波地区各典型土层地基承载力的建议值。

2 地基承载力确定方法

由概率论有关知识可知:可采用 Kolmogorov-Smirnov 拟合检验法(K-S 检验)检验经验分布与总体分布是否吻合。如果 K-S 统计量的概率 K_s 值小于显著性水平 $\alpha(=0.05)$,则应拒绝零假设,认为样本来自的总体与指定的分布有显著差异;如果 K-S 统计量的概率 K_s 值大于显著性水平 $\alpha(=0.05)$,则不能拒绝零假设,认为样本来自的总体与指定的分布无差异^[13]。下文将根据不同的原位测试数据,拟

合本地区土层承载力经验公式,提出相应的分布模型,并通过 K-S 法检验它们是否与总体吻合。

2.1 静力触探试验

对于黏性土、砂土和粉土地基,利用静力触探确定其承载力的经验公式如下^[14]:

(1)黏性土:

$$f_{ak0} = 104p_s + 26.9 \quad (1)$$

(2)粉土:

$$f_{ak0} = 36p_s + 44.6 \quad (2)$$

(3)粉砂:

$$f_{ak0} = 20p_s + 59.5 \quad (3)$$

其中, p_s 为侧摩阻力(MPa); f_{ak0} 为地基承载力特征值(MPa)。

由表 1 可知:

(1)各土层的 K-S 统计量的概率 K_s 值大于显著性水平 $\alpha(=0.05)$,且①_{2.0}黏土和③_{1.0}粉土地基承载力呈对数正态分布,其余土层的地基承载力均呈正态分布;

(2)③_{1.0}粉土层地基承载力的变异系数最大($\delta_{\max}=0.534$),②_{2.1}淤泥层地基承载力的变异系数最小($\delta_{\min}=0.135$),其余土层地基承载力的变异系数多介于 0.1~0.5 之间;

(3)由于静力触探数据量大,且预测的地基承载力变异系数适中。因此,采用静力触探参数预测的宁波地区地基承载力可靠度较高。

2.2 标准贯入确定地基承载力

本节根据宁波轨道交通 1、2 号线的标贯原位试验数据,通过相应经验公式来推算地基承载力的情况。标贯试验共 1269 个孔、11690 条记录,经过数据筛选后,针对标贯试验数据量较多的黏性土、粉土、砂土进行计算。由表 2 可知,对于同一种土层可以有多种地基承载力经验预测公式^[14]。为检验各公式对宁波地区地基承载力的预测精度,现采用表 2 中的不同公式来预测相应土层的地基承载力(表 3~表 5)其中公式①、②、③、④均引自文献[14]。

根据表 3 可知:

(1)各土层的 K-S 统计量的概率 K_s 值大于显著性水平 $\alpha(=0.05)$,除②_{1.0}黏土层、②_{3.0}淤泥质粉质黏土层和④_{1.0}淤泥质粉质黏土层服从对数正态分布外,其余土层的地基承载力呈正态分布规律;

(2)②_{1.0}黏土层地基承载力的变异系数最大($\delta_{\max}=0.807$),③_{1.2}粉质黏土层地基承载力的变异

表1 静力触探经验公式确定的地基承载力 f_{ak0} 统计表Table 1 Statistic results of foundation bearing capacities f_{ak0} determined with empirical formula of the static cone penetration

| 土层 | 样本量 N | 均值 μ/kPa | 标准差 σ/kPa | 变异系数 δ | K_s | 分布概型 |
|--------------------------|---------|---------------------|-------------------------|---------------|-------|------|
| ① _{2,0} 黏土 | 4961 | 108.98 | 47.75 | 0.438 | 0.963 | 对数正态 |
| ① _{3,0} 淤泥质黏土 | 17757 | 58.310 | 11.570 | 0.198 | 0.312 | 正态 |
| ② _{1,0} 黏土 | 5382 | 82.64 | 15.32 | 0.185 | 0.921 | 正态 |
| ② _{1,1} 粉土 | 1304 | 109.86 | 43.84 | 0.399 | 0.382 | 正态 |
| ② _{2,1} 淤泥 | 12997 | 64.132 | 8.637 | 0.135 | 0.180 | 正态 |
| ② _{2,2} 淤泥质黏土 | 23809 | 71.689 | 13.282 | 0.185 | 0.715 | 正态 |
| ② _{3,0} 淤泥质粉质黏土 | 16652 | 93.436 | 25.524 | 0.273 | 0.945 | 正态 |
| ② _{4,0} 淤泥质黏土 | 4209 | 93.459 | 22.859 | 0.245 | 0.677 | 正态 |
| ③ _{1,0} 粉土 | 9037 | 150.46 | 80.37 | 0.534 | 0.538 | 对数正态 |
| ③ _{1,2} 粉质黏土 | 1748 | 157.23 | 50.46 | 0.321 | 0.311 | 正态 |
| ③ _{2,0} 粉质黏土 | 13472 | 124.67 | 40.44 | 0.324 | 0.273 | 正态 |
| ④ _{1,2} 粉质黏土 | 6209 | 126.18 | 25.69 | 0.204 | 0.802 | 正态 |
| ④ _{2,0} 黏土 | 26861 | 144.13 | 30.23 | 0.210 | 0.788 | 正态 |
| ④ _{3,0} 粉质黏土 | 4299 | 182.55 | 51.43 | 0.282 | 0.595 | 正态 |
| ⑤ _{1,0} 黏土 | 29441 | 336.87 | 86.35 | 0.256 | 0.259 | 正态 |
| ⑤ _{2,0} 粉质黏土 | 25745 | 326.08 | 100.95 | 0.310 | 0.262 | 正态 |
| ⑤ _{3,0} 黏质粉土 | 12604 | 278.46 | 116.96 | 0.420 | 0.407 | 正态 |
| ⑤ _{3,1} 粉砂 | 688 | 492.16 | 209.47 | 0.426 | 0.147 | 正态 |
| ⑤ _{4,0} 粉质黏土 | 16746 | 238.80 | 61.26 | 0.257 | 0.154 | 正态 |
| ⑤ _{5,0} 粉土 | 2602 | 376.15 | 155.28 | 0.413 | 0.238 | 正态 |
| ⑥ _{1,0} 黏土 | 12184 | 370.17 | 107.68 | 0.291 | 0.554 | 正态 |
| ⑥ _{2,0} 粉质黏土 | 19501 | 237.40 | 64.35 | 0.271 | 0.427 | 正态 |

表2 标准贯入试验确定的地基承载力经验公式

Table 2 Empirical formula of foundation bearing capacities determined with standard penetration test

| 序号 | 经验公式 | 适用范围 | 公式研究者 |
|----|--|-------------|---------------------|
| 1 | $f_{ak1} = 23.3N$ | 黏性土 | 公式① ^[14] |
| 2 | $f_{ak2} = 80 + 20.2N$ ($N = 3 \sim 18$) | 黏性土、粉土 | 公式② ^[14] |
| 3 | $f_{ak2} = 152.6 + 17.48N$ ($N = 18 \sim 22$) | 黏性土、粉土 | 公式③ ^[14] |
| | $f_{ak3} = 72 + 9.4N^{1.2}$ | 粉土 | |
| 4 | $f_{ak3} = -212 + 222N^{0.8}$ $f_{ak3} = -803 + 850N^{0.1}$ | 粉细砂 中、粗砂 | 公式④ ^[14] |

系数最小($\delta_{\min} = 0.269$),其余土层地基承载力变异系数多介于0.3~0.8之间,离散性比较大。因此,标贯经验公式①所预测的宁波地区地基承载力的可靠度不高。

由表4可知:

(1)各土层的K-S统计量的概率 K_s 值大于显著性水平 $\alpha(=0.05)$,除②_{1,0}黏土层服从对数正态分布外,其余土层的地基承载力呈正态分布规律;

(2)③_{2,0}粉质黏土层地基承载力的变异系数最大($\delta_{\max} = 0.308$),③_{1,2}粉质黏土层地基承载力的变异系数最小($\delta_{\min} = 0.155$),其余土层地基承载力的变异系数多介于0.1~0.3之间;

(3)与经验公式①相比,标贯经验公式②的预测结果的离散性显著降低,可靠度高。因此,经验公式②比较适用于预测宁波地区的地基承载力。

由表5知:

(1)各土层的K-S统计量的概率 K_s 值大于显著性水平 $\alpha(=0.05)$,除⑤_{5,0}粉土层服从对数正态分布外,其余土层的地基承载力呈正态分布规律;

(2)⑤_{3,0}黏质粉土层地基承载力的变异系数最大($\delta_{\max} = 0.484$),⑤_{3,1}粉砂土层地基承载力的变异系数最小($\delta_{\min} = 0.125$),其余土层地基承载力变异系数多均介于0.2~0.5之间,离散性比较大。因此,经验公式③所预测的宁波地区地基承载力的可靠度不高。

由表6可知:

(1)表6所列各土层的K-S统计量的概率 K_s 值均大于显著性水平 $\alpha(=0.05)$,且地基承载力均

表3 标贯经验公式①确定的 f_{ak1} 统计表Table 3 Statistic results of f_{ak1} determined with empirical formula ①

| 土层 | 样本量 N | 均值 μ/kPa | 标准差 σ/kPa | 变异系数 δ | K_S | 分布概型 |
|--------------------------|---------|--------------|------------------|---------------|-------|------|
| ① _{2.0} 黏土 | 26 | 93.65 | 48.03 | 0.513 | 0.646 | 正态 |
| ② _{1.0} 黏土 | 43 | 58.52 | 47.25 | 0.807 | 0.284 | 对数正态 |
| ② _{1.1} 粉土 | 51 | 156.70 | 54.96 | 0.351 | 0.655 | 正态 |
| ② _{3.0} 淤泥质粉质黏土 | 193 | 58.914 | 43.804 | 0.744 | 0.355 | 对数正态 |
| ③ _{1.0} 粉土 | 1238 | 228.93 | 97.63 | 0.426 | 0.350 | 正态 |
| ③ _{1.2} 粉质黏土 | 39 | 124.86 | 33.59 | 0.269 | 0.812 | 正态 |
| ③ _{2.0} 粉质黏土 | 473 | 121.72 | 65.83 | 0.541 | 0.194 | 正态 |
| ④ _{1.0} 淤泥质粉质黏土 | 100 | 68.502 | 48.199 | 0.704 | 0.252 | 对数正态 |
| ④ _{1.1} 淤泥质粉质黏土 | 117 | 75.675 | 35.004 | 0.463 | 0.710 | 正态 |
| ④ _{1.2} 粉质黏土 | 53 | 118.70 | 51.75 | 0.436 | 0.205 | 正态 |
| ④ _{2.0} 黏土 | 358 | 109.44 | 53.63 | 0.490 | 0.168 | 正态 |
| ④ _{3.0} 粉质黏土 | 37 | 129.09 | 43.10 | 0.334 | 0.783 | 正态 |
| ⑤ _{1.0} 黏土 | 436 | 359.60 | 120.90 | 0.336 | 0.951 | 正态 |
| ⑤ _{2.0} 粉质黏土 | 328 | 371.02 | 117.31 | 0.316 | 0.246 | 正态 |
| ⑤ _{3.0} 黏质粉土 | 563 | 469.89 | 167.14 | 0.356 | 0.612 | 正态 |
| ⑤ _{4.0} 粉质黏土 | 273 | 253.82 | 96.05 | 0.378 | 0.741 | 正态 |
| ⑥ _{1.0} 黏土 | 172 | 403.82 | 122.73 | 0.304 | 0.479 | 正态 |
| ⑥ _{2.0} 粉质黏土 | 243 | 276.44 | 123.71 | 0.448 | 0.037 | 正态 |

表4 标贯经验公式②确定的 f_{ak2} 统计表Table 4 Statistic results of f_{ak2} determined with empirical formula ②

| 土层 | 样本量 N | 均值 μ/kPa | 标准差 σ/kPa | 变异系数 δ | K_S | 分布概型 |
|-----------------------|---------|--------------|------------------|---------------|-------|------|
| ① _{2.0} 黏土 | 22 | 171.36 | 34.68 | 0.202 | 0.102 | 正态 |
| ② _{1.0} 黏土 | 16 | 172.16 | 40.38 | 0.235 | 0.711 | 对数正态 |
| ② _{1.1} 粉土 | 50 | 218.17 | 45.14 | 0.207 | 0.332 | 正态 |
| ③ _{1.0} 粉土 | 1227 | 276.33 | 81.65 | 0.295 | 0.268 | 正态 |
| ③ _{1.2} 粉质黏土 | 39 | 188.25 | 29.12 | 0.155 | 0.278 | 正态 |
| ③ _{2.0} 粉质黏土 | 473 | 185.53 | 57.08 | 0.308 | 0.798 | 正态 |
| ④ _{2.0} 黏土 | 358 | 174.88 | 46.49 | 0.266 | 0.655 | 正态 |
| ④ _{3.0} 粉质黏土 | 35 | 196.01 | 34.06 | 0.174 | 0.644 | 正态 |
| ⑤ _{1.0} 黏土 | 394 | 371.40 | 83.65 | 0.225 | 0.389 | 正态 |
| ⑤ _{2.0} 粉质黏土 | 286 | 375.48 | 74.86 | 0.199 | 0.613 | 正态 |
| ⑤ _{3.0} 黏质粉土 | 373 | 407.28 | 80.35 | 0.197 | 0.700 | 正态 |
| ⑤ _{4.0} 粉质黏土 | 266 | 293.24 | 72.01 | 0.246 | 0.338 | 正态 |
| ⑥ _{1.0} 黏土 | 144 | 401.66 | 84.88 | 0.211 | 0.964 | 正态 |
| ⑥ _{2.0} 粉质黏土 | 228 | 300.71 | 78.53 | 0.261 | 0.208 | 正态 |

表5 标贯经验公式③确定的 f_{ak3} 统计表Table 5 Statistic results of f_{ak3} determined with empirical formula ③

| 土层 | 样本量 N | 均值 μ/kPa | 标准差 σ/kPa | 变异系数 δ | K_S | 分布概型 |
|-----------------------|---------|--------------|------------------|---------------|-------|------|
| ③ _{1.0} 粉土 | 1238 | 219.87 | 75.17 | 0.342 | 0.642 | 正态 |
| ③ _{1.1} 粉砂 | 31 | 245.11 | 47.36 | 0.193 | 0.564 | 正态 |
| ④ _{1.2} 粉质黏土 | 53 | 182.91 | 44.87 | 0.245 | 0.467 | 正态 |
| ⑤ _{3.0} 黏质粉土 | 543 | 399.85 | 193.42 | 0.484 | 0.451 | 正态 |
| ⑤ _{3.1} 粉砂 | 84 | 425.12 | 52.97 | 0.125 | 0.215 | 正态 |
| ⑤ _{5.0} 粉土 | 206 | 472.90 | 213.35 | 0.451 | 0.248 | 对数正态 |

表6 标贯经验公式④确定的 f_{ak4} 统计表Table 6 Statistic results of f_{ak4} determined with empirical formula ④

| 土层 | 样本量 N | 均值 μ/kPa | 标准差 σ/kPa | 变异系数 δ | K_S | 分布概型 |
|-----------------------|---------|--------------|------------------|---------------|-------|------|
| ③ _{1.0} 粉土 | 1255 | 209.96 | 32.29 | 0.154 | 0.060 | 正态 |
| ⑤ _{3.0} 黏质粉土 | 563 | 256.02 | 20.09 | 0.078 | 0.454 | 正态 |
| ⑤ _{5.0} 粉土 | 206 | 258.31 | 24.16 | 0.094 | 0.921 | 正态 |

呈正态分布规律;

(2) 标贯经验公式④所预测的宁波地区地基承载力的离散性小($\delta_{\max} = 0.154$), 可靠度高, 比较适用于预测宁波地区的地基承载力。

综上, 在采用标准贯入试验参数预测宁波地区地基承载力时, 标贯经验公式①和③预测结果的离散性大、可靠度不高; 而标贯经验公式②和④预测

表 7 十字板经验公式确定的 f_{ak5} 统计表Table 7 Statistic results of f_{ak5} determined with empirical formula of the vane shear test

| 土层 | 样本量 N | 均值 μ/kPa | 标准差 σ/kPa | 变异系 数 δ | K_S | 分布 概型 |
|--------------------------|------------|------------------------|----------------------------|-------------------|-------|----------|
| ① _{2.0} 黏土 | 139 | 135.04 | 38.26 | 0.283 | 0.924 | 正态 |
| ① _{3.0} 淤泥质黏土 | 734 | 127.568 | 43.133 | 0.338 | 0.422 | 正态 |
| ② _{1.0} 黏土 | 225 | 153.91 | 27.49 | 0.179 | 0.839 | 正态 |
| ② _{2.1} 淤泥 | 364 | 198.383 | 39.746 | 0.200 | 0.892 | 正态 |
| ② _{2.2} 淤泥质黏土 | 458 | 243.784 | 61.084 | 0.251 | 0.125 | 正态 |
| ② _{3.0} 淤泥质粉质黏土 | 612 | 193.261 | 65.217 | 0.337 | 0.336 | 正态 |
| ② _{4.0} 淤泥质黏土 | 205 | 255.020 | 64.686 | 0.254 | 0.875 | 正态 |
| ③ _{1.0} 粉土 | 103 | 424.43 | 61.56 | 0.145 | 0.647 | 正态 |
| ③ _{2.0} 粉质黏土 | 138 | 374.85 | 60.62 | 0.162 | 0.926 | 正态 |
| ④ _{1.0} 淤泥质粉质黏土 | 219 | 323.042 | 77.365 | 0.239 | 0.106 | 正态 |
| ④ _{1.1} 淤泥质粉质黏土 | 38 | 376.651 | 31.339 | 0.083 | 0.620 | 正态 |
| ④ _{1.2} 粉质黏土 | 27 | 445.13 | 47.86 | 0.108 | 0.841 | 正态 |
| ④ _{2.0} 黏土 | 89 | 496.39 | 51.78 | 0.104 | 0.997 | 正态 |
| ⑤ _{1.0} 黏土 | 114 | 582.71 | 109.05 | 0.187 | 0.938 | 正态 |
| ⑤ _{2.0} 粉质黏土 | 7 | 620.21 | 84.84 | 0.137 | 0.930 | 正态 |

表 8 扁铲经验公式确定的 f_{ak6} 统计表Table 8 Statistic results of f_{ak6} determined with empirical formula of the flat dilatometer test

| 土层 | 样本量 N | 均值 μ/kPa | 标准差 σ/kPa | 变异系 数 δ | K_S | 分布 概型 |
|--------------------------|------------|------------------------|----------------------------|-------------------|-------|----------|
| ① _{2.0} 黏土 | 215 | 126.79 | 85.16 | 0.672 | 0.461 | 对数正态 |
| ① _{3.0} 淤泥质黏土 | 954 | 51.160 | 26.199 | 0.512 | 0.887 | 正态 |
| ② _{1.0} 黏土 | 285 | 106.66 | 55.85 | 0.524 | 0.103 | 正态 |
| ③ _{1.1} 粉质黏土 | 111 | 170.44 | 126.37 | 0.741 | 0.107 | 对数正态 |
| ② _{2.1} 淤泥 | 417 | 60.667 | 18.639 | 0.307 | 0.847 | 正态 |
| ② _{2.2} 淤泥质黏土 | 1045 | 88.598 | 39.069 | 0.441 | 0.196 | 正态 |
| ② _{3.0} 淤泥质粉质黏土 | 579 | 105.150 | 67.989 | 0.647 | 0.435 | 正态 |
| ② _{4.0} 淤泥质黏土 | 264 | 107.568 | 70.546 | 0.656 | 0.085 | 正态 |
| ③ _{2.0} 粉质黏土 | 824 | 88.82 | 50.24 | 0.566 | 0.420 | 对数正态 |
| ④ _{1.2} 粉质黏土 | 264 | 101.74 | 31.53 | 0.310 | 0.529 | 对数正态 |
| ④ _{2.0} 黏土 | 993 | 210.69 | 69.86 | 0.332 | 0.324 | 对数正态 |
| ⑤ _{1.0} 黏土 | 1318 | 473.32 | 185.54 | 0.392 | 0.056 | 正态 |
| ⑤ _{2.0} 粉质黏土 | 369 | 402.82 | 182.60 | 0.453 | 0.165 | 正态 |
| ⑤ _{4.0} 粉质黏土 | 206 | 223.52 | 63.74 | 0.285 | 0.111 | 正态 |

结果的离散性小、可靠度高,可在宁波地区推广使用。

2.3 十字板剪切试验确定地基承载力

十字板剪切试验可用于预测淤泥土、淤泥质土、

湿陷性黄土等的地基承载力,相关经验公式如下^[14]:

$$f_{ak5} = 2C_u + \gamma h \quad (4)$$

式中, f_{ak5} 为十字板剪切试验确定的地基承载力特征值(kPa); γ 为土的重度($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$); C_u 为修正后的十字板抗剪强度(kPa); h 为基础埋置深度(m)。

收集宁波轨道交通 1、2 号线的十字板原位试验数据,根据经验公式(4)推算地基承载力的情况。其中,十字板试验共 88 个孔,3701 条记录,经过数据筛选后,针对十字板试验的主要及数据量较多的黏性土和粉质黏土层进行计算(表 7)。

根据表 7 所示十字板剪切试验确定的地基承载力统计结果可以发现:

(1) 表 7 所列各土层的 K-S 统计量的概率 K_S 值均大于显著性水平 $\alpha (=0.05)$,且地基承载力均符合正态分布规律;

(2) ②_{3.0} 淤泥质粉质黏土层地基承载力的变异系数最大(但 δ_{\max} 仅有 0.337),④_{2.0} 黏土层地基承载力的变异系数最小($\delta_{\min} = 0.104$),其余土层地基承载力变异系数多均介于 0.1~0.2;

(3) 与其他原位试验预测地基承载力相比,十字板剪切试验预测结果离散性小,可靠度高。但由于十字板剪切试验数据量偏小,因此,可以结合静力触探试验共同确定地基承载力。

2.4 扁铲试验确定地基承载力

扁铲试验主要可以预测黏性土和粉质黏土层的地基承载力,经验公式为^[14]:

$$f_{ak6} = n\Delta p \quad (5)$$

式中, f_{ak6} 为扁铲试验确定的地基承载力特征值(kPa); n 为经验修正系数,对于黏性土 $n = 1.14$,粉质黏土 $n = 0.86$; Δp 为钢膜中心外移 1.10mm 与中心无外移时修正压力的差值。

本文根据宁波轨道交通 1、2 号线的扁铲试验数据(扁铲试验共 88 个孔,11080 条记录),通过相应参数来推算地基承载力的情况。经过数据筛选后,针对扁铲试验主要数据量较多的黏性土和粉质黏土层采用公式(5)进行计算(表 8)。

根据表 8 所示扁铲试验确定的地基承载力统计结果可以发现:

(1) 表 8 所列各土层的 K-S 统计量的概率 K_S 值均大于显著性水平 $\alpha (=0.05)$,且②_{1.0} 黏土、⑤_{1.0} 黏土、⑤_{2.0} 粉质黏土和⑤_{4.0} 粉质黏土层的地基承载力呈正态分布,而①_{2.0} 黏土、③_{1.1} 粉质黏土、③_{2.0} 粉

表9 原位试验确定地基承载力汇总

Table 9 Summary of foundation bearing capacities determined with in-situ tests

| 土层 | 静力触探 | | | 扁铲 | | | 标贯 | | | | | | 十字板 | | | 经验值 | | 推荐值 | | | | | | | |
|--------------------------|-------|----------|-------------------|------|----------|-------------------|------|----------|-------------------|------|----------|-------------------|------|----------|-------------------|------|----------|-------------------|-----|----------|-------------------|-------------------|------------------|---------|---------|
| | N | δ | f_{ad0} /kPa | N | δ | f_{ad6} /kPa | N | δ | f_{ad1} /kPa | N | δ | f_{ad2} /kPa | N | δ | f_{ad3} /kPa | N | δ | f_{ad4} /kPa | N | δ | f_{ad5} /kPa | f_{ad7} /kPa | f_{ak} /kPa | | |
| ① ₂₋₀ 黏土 | 4961 | 0.438 | 109 | 215 | 0.672 | 127 | 26 | 0.513 | 94 | 22 | 0.202 | 171 | — | — | — | — | — | — | 139 | 0.283 | 135 | 65 | 109 | 139 | |
| ① ₃₋₀ 淤泥质黏土 | 17757 | 0.198 | 58 | 954 | 0.512 | 51 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 734 | 0.338 | 128 | — | — | 51~58 | |
| ② ₁₋₀ 黏土 | 5382 | 0.185 | 83 | 285 | 0.524 | 107 | 43 | 0.807 | 59 | 16 | 0.235 | 172 | — | — | — | — | — | — | 225 | 0.179 | 154 | 60~65 | 83~109 | | |
| ② ₁₋₁ 粉土 | 1304 | 0.399 | 110 | — | — | — | 51 | 0.351 | 158 | 50 | 0.207 | 218 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 110~158 | |
| ② ₂₋₁ 淤泥 | 12997 | 0.135 | 64 | 417 | 0.307 | 61 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 364 | 0.200 | 198 | — | — | 64 | |
| ② ₂₋₂ 淤泥质黏土 | 23809 | 0.185 | 72 | 1045 | 0.441 | 89 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 458 | 0.251 | 244 | — | — | 72~89 | |
| ② ₃₋₀ 淤泥质粉质黏土 | 16652 | 0.273 | 93 | 579 | 0.647 | 105 | 193 | 0.744 | 59 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 612 | 0.337 | 193 | — | — | 93~105 | |
| ② ₄₋₀ 淤泥质黏土 | 4209 | 0.245 | 93 | 264 | 0.656 | 108 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 205 | 0.254 | 255 | — | — | 93~108 | |
| ③ ₁₋₀ 粉土 | 9037 | 0.534 | 150 | — | — | — | 1238 | 0.426 | 229 | 1227 | 0.295 | 276 | 1238 | 0.342 | 220 | 1255 | 0.154 | 210 | 103 | 0.145 | 424 | 90~100 | 150~210 | | |
| ③ ₁₋₂ 粉质黏土 | 1748 | 0.321 | 157 | — | — | — | 39 | 0.269 | 125 | 39 | 0.155 | 188 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 157~188 | |
| ③ ₂₋₀ 粉质黏土 | 13472 | 0.324 | 125 | 824 | 0.566 | 89 | 473 | 0.541 | 122 | 473 | 0.308 | 186 | — | — | — | — | — | — | 138 | 0.162 | 375 | 70~90 | 89~125 | | |
| ④ ₁₋₀ 淤泥质粉质黏土 | 8648 | 0.187 | 99 | 352 | 0.440 | 76 | 100 | 0.704 | 69 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 219 | 0.239 | 323 | — | — | 76~99 | |
| ④ ₁₋₁ 淤泥质粉质黏土 | 6206 | 0.202 | 126 | 337 | 0.451 | 92 | 117 | 0.463 | 76 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 38 | 0.083 | 377 | — | — | 92~126 | |
| ④ ₁₋₂ 粉质黏土 | 6209 | 0.204 | 126 | 264 | 0.310 | 102 | 53 | 0.436 | 119 | — | — | — | 53 | 0.245 | 183 | — | — | — | 27 | 0.108 | 445 | 75 | 102~126 | | |
| ④ ₂₋₀ 黏土 | 26861 | 0.210 | 144 | 993 | 0.332 | 211 | 358 | 0.490 | 109 | 358 | 0.266 | 175 | — | — | — | — | — | — | 89 | 0.104 | 496 | 75~80 | 144~175 | | |
| ④ ₃₋₀ 粉质黏土 | 4299 | 0.282 | 183 | — | — | — | 37 | 0.334 | 129 | 35 | 0.174 | 196 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 80 | 183~196 | | |
| ⑤ ₁₋₀ 黏土 | 29441 | 0.256 | 337 | 1318 | 0.392 | 473 | 436 | 0.336 | 360 | 394 | 0.225 | 371 | — | — | — | — | — | — | 114 | 0.187 | 583 | 180~200 | 337~371 | | |
| ⑤ ₂₋₀ 粉质黏土 | 25745 | 0.310 | 326 | 369 | 0.453 | 403 | 328 | 0.316 | 371 | 286 | 0.199 | 375 | — | — | — | — | — | — | 7 | 0.137 | 620 | 160~170 | 326~375 | | |
| ⑤ ₃₋₀ 黏土 | 12604 | 0.420 | 278 | — | — | — | 563 | 0.356 | 470 | 373 | 0.197 | 407 | 543 | 0.484 | 400 | 563 | 0.078 | 256 | — | — | — | 160~180 | 256~278 | | |
| ⑤ ₄₋₀ 粉质黏土 | 16746 | 0.257 | 239 | 206 | 0.285 | 224 | 473 | 0.541 | 122 | 266 | 0.246 | 293 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 110 | 224~239 | | |
| ⑤ ₅₋₀ 粉土 | 2602 | 0.413 | 376 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 206 | 0.451 | 473 | 206 | 0.094 | 258 | — | — | — | 170 | 258~376 | | |
| ⑥ ₁₋₀ 黏土 | 12184 | 0.291 | 370 | — | — | — | 172 | 0.304 | 404 | 144 | 0.211 | 402 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 170 | 370~402 | | |
| ⑥ ₂₋₀ 粉质黏土 | 19501 | 0.271 | 237 | — | — | — | 243 | 0.448 | 276 | 228 | 0.261 | 301 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 120~140 | 237~301 |

质黏土、④_{1,2}粉质黏土层的地基承载力符合对数正态分布规律;

(2)③_{1,3}粉质黏土层地基承载力的变异系数最大($\delta_{\max}=0.741$),⑤_{4,0}粉质黏土层地基承载力的变异系数最小($\delta_{\min}=0.285$),其余土层地基承载力变异系数多均介于0.3~0.7;

(3)与采用静力触探试验预测地基承载力相比,扁铲试验数据量小,且预测的地基承载力离散性大,因此,扁铲试验参数所预测的地基承载力的可靠度低于静力触探参数预测结果。

3 原位参数确定地基承载力对比分析

在采用原位试验数据估算宁波地区土层承载力时可选用不同的经验公式。由前述分析可知,对于同一土层,不同经验公式预测结果的离散程度存在差异,可靠度有高低。因此,有必要将上述统计结果进行对比分析,进而提出宁波地区各典型土层的地基承载力。汇总表1~表8的地基承载力统计结果,根据样本量、变异系数、安全性等指标与经验值 f_{ak7} 进行对比分析,可得如表9所示的宁波地区地基承载力推荐值 f_{ak} 。其中, f_{ak} 的取值主要依据样本量大、可靠性高的静力触探的统计结果,并参考扁铲试验、标贯经验公式②和④。

由表9可知:

(1)由于静力触探试验样本量大且对应的地基承载力变异系数适中,预测的地基承载力比较可靠;

(2)十字板剪切试验样本量偏小,虽然变异系数最小,但预测值明显高于其他经验公式预测的地基承载力(如:④_{2,0}黏土层的 f_{ak5} 为496kPa远高于推荐值109kPa和经验值75~80kPa),因此不建议采用此法预测宁波地区地基承载力;

(3)扁铲试验样本量及对应的地基承载力变异系数适中,但部分土层的预测值偏高(如:⑤_{1,0}黏土的 f_{ak6} 为473kPa,高于推荐值337kPa和经验值180~200kPa);

(4)标贯经验公式①和③预测结果的离散性大、可靠性不高;而标贯经验公式②和④预测结果的离散性小、可靠性高;

(5)与原位试验相比,经验值所预测的地基承载力过于保守,明显低于基于原位试验数据的经验公式所预测的宁波地区的地基承载力,建议采用表9所推荐的宁波地区各典型土层的地基承载力。

4 结 论

根据宁波轨道交通1、2号线的静力触探、十字板、扁铲和标贯原位试验数据,拟合了不同的经验公式来推算宁波地区各土层的地基承载力。在此基础上,对不同试验数据的统计结果进行了对比分析,结果发现:

(1)十字板剪切试验经验公式预测值偏高,标贯经验公式①和③预测结果的离散性大、可靠度不高;因此不推荐使用上述3种经验公式预测宁波地区各典型土层的地基承载力。

(2)静力触探试验、扁铲试验以及标贯经验公式②和④所预测的地基承载力变异系数适中,因此推荐选用上述3种经验公式预测宁波地区各典型土层的地基承载力。

(3)结合地区经验并综合对比分析各经验公式的预测结果,提出了宁波地区各典型土层的地基承载力的推荐值,所得结果可为宁波轨道交通后续工程勘察、设计及施工提供参考。

参 考 文 献

- [1] 郭莹,董秀竹,栾茂田.“建筑地基基础设计规范”承载力的确定方法研究[J].岩土力学,2002,23(4):474~477.
Guo Ying, Dong Xiuzhu, Luan Maotian. Study on the method for determining the bearing capacity in “Code for Soil Foundation of Building”. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 474~477.
- [2] 王生力,袁平一,刘九功.利用原位测试数据确定石家庄市天然地基土承载力[J].北京地质,2001,(1):21~25.
Wang Shengli, Xi Pingyi, Liu Jiugong. The method of obtaining foundation bearing capacity by the date of in-situ testing in Shijiazhuang area. Beijing Geology, 2001, (1): 21~25.
- [3] 魏杰.静力触探确定桩承载力的理论方法[J].岩土工程学报,1994,16(3):103~110.
Wei Jie. Theoretical method for determining the bearing capacity of pile from static cone penetration. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 103~110.
- [4] 王国强,吴道祥,岳涛,等.安徽亳州市新近沉积粉土性质及其承载力的确定[J].地质与勘探,2000,36(6):73~75.
Wang Guoqiang, Wu Daoxiang, Yue Tao, et al. The newly sedimentary silt's characters in Bozhou city, Anhui and it's bear capacities. Geology and Prospecting, 2000, 36(6): 73~75.
- [5] 杨迎晓,吾独龙,朱向荣.衢州安居工程四期地基承载力试验研究[J].土木工程学报,2004,37(10):68~72.
Yang Yingxiao, Wu Dulong, Zhu Xiangrong. An experimental study on the bearing capacity of the foundation soil for the 4th Quzhou's Anju project. China Civil Engineering Journal, 2004, 37

- (10): 68 ~ 72.
- [6] 梁勇然. 螺旋板载荷试验在测定粉土承载力中的应用[J]. 工程勘察, 1996, (1): 10 ~ 12.
Liang Yongran. The application of spiral plate loading test to the determination of bearing capacity. Journal of Geotechnical Investigation and Surveying, 1996, (1): 10 ~ 12.
- [7] 刘树庆. 标贯试验确定黏性土地基承载力方法探讨[J]. 北方交通, 2008, (3): 75 ~ 76.
Liu Shuqing. An approach to determination of bearing capacity of clay foundation by standard penetration test(SPT). Beijing Geology, 2008, (3): 75 ~ 76.
- [8] 陈国民. 扁铲侧胀仪试验及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 177 ~ 183.
Chen Guomin. Flat dilatometer test and its application. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(3): 177 ~ 183.
- [9] 单红仙, 陈勇, 刘正银, 等. 现代黄河三角洲粉质类土承载力确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 4089 ~ 4096.
Shan Hongxian, Chen Yong, Liu Zhengyin, et al. Determination of slity soil bearing capacity on modern Yellow river delta in China. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S 2): 4089 ~ 4096.
- [10] 樊向阳, 莫群欢, 张继红, 等. 扁铲侧胀试验计算地基承载力[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 94 ~ 99.
Fan Xiangyang, Mo Qunhuan, Zhang Jihong, et al. Foundation soil's bearing capacity calculation using DMT. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(1): 94 ~ 99.
- [11] 史玉金, 曾正强, 严学新, 等. 上海市崇明岛浅层砂土、粉土分布探讨[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 34 ~ 39.
Shi Yujin, Zeng Zhengqiang, Yan Xuexin, et al. Distribution of the shallow sandy soil and silty soil of Chongmin island, Shanghai. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(1): 34 ~ 39.
- [12] 邓永锋, 吴燕开, 刘松玉, 等. 连云港浅层海相软土沉积环境及物理力学性质研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 29 ~ 33.
Deng Yongfeng, Wu Yankai, Liu Songyu, et al. Sediment environment of shallow marine clays deposited in Lianyungang area and their physical and mechanical properties. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(1): 29 ~ 33.
- [13] 邓远北, 周润兰. 应用概率统计[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 131 ~ 135.
Deng Yuanbei, Zhou Runlan. Applied Probability and Statistics. Beijing: Science Press, 2002, 131 ~ 135.
- [14] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第四版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007, 134 ~ 136.
Editorial of Engineering Geology Handbook. Handbook of Engineering Geology (Fourth Edition). Beijing: China Architecture & Building Press, 2007, 134 ~ 136.

新书简介

《汶川地震工程地质与地质灾害》一书出版

由殷跃平、张永双教授等著的《汶川地震工程地质与地质灾害》,在“5·12”汶川 M_s 8.0 级地震 5 周年之际,由科学出版社出版发行。本书对汶川 M_s 8.0 级地震区的地震工程地质和地质灾害进行了系统研究,涉及汶川地震区域地质构造、地震工程地质、斜坡地震动监测与试验方法、地震地质灾害等关键科学问题。

全书共 4 篇 18 章。第 1 篇介绍了龙门山活动构造带现场调查、深部大地电磁测深、地震前后 GPS 长期观测和构造应力场演化研究成果。第 2 篇介绍了汶川地震的同震地表破裂分布、地震工程地质特征和地震滑坡的地震断裂控制效应。第 3 篇介绍了汶川地震后建立的斜坡地震动和斜坡地脉动原位观测最新成果,以及地震滑坡大型振动台试验和斜坡岩体地震稳定性评价新方法。第 4 篇介绍了汶川地震触发滑坡机理、高速远程滑坡—碎屑流运动学和动力学效应、以及已有滑坡抗滑桩防治工程的动力响应特征,并介绍了对地震触发的体积最大滑坡—大光包巨型滑坡、震后高位泥石流和地震地质灾害快速评估与编图等研究成果。

本书是研究汶川地震工程地质与地质灾害较为系统的一本专著,图文并茂,理论与实践相结合,可供从事地质灾害防治、地震地质、工程地质、岩土工程、城镇建设等领域的科研和工程技术人员参考,也可供有关院校教师和研究生参考使用。

全书约 80 万字。定价: 260 元。

