

软土基床系数三轴试验法测定及分析

张春进, 陈 斌, 姚燕明, 叶荣华

(宁波市轨道交通工程建设指挥部, 浙江 宁波 315010)

摘要: 针对宁波轨道交通软土地层, 采用三轴试验法得到各土层的基床系数, 并对水平基床系数和垂直基床系数进行相关性分析, 最后对试验结果进行尺寸效应修正。结果表明: 各土层基床系数差异较大, 淤泥质土的水平基床系数 K_h 较小, 黏性土水平基床系数 K_h 较大; 水平与垂直基床系数较为接近, 且相关性较好; 土层基床系数的修正值与经验值吻合较好, 从而验证了适用于宁波软土基床系数试验值修正系数的合理性, 为轨道交通工程设计和施工提供了理论依据。

关键词: 软土; 基床系数; 相关性; 尺寸效应

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2016) 01-0108-05

基床系数是指地基土在外力作用下产生单位变位时所需的应力, 也称弹性抗力系数或地基反力系数, 是公路、机场、建筑地基基础及城市轨道交通等工程中的重要参数之一, 对结构的安全性、可靠性以及工程造价具有直接影响。但基床系数的测定却没有相关规范的明确指导, 许多测试方法仍处于摸索阶段。

目前, 已有有关学者对基床系数进行了一定的探索。彭友君^[1]基于土力学原理对地铁设计中的基床系数进行了必要的推定, 提出了地铁设计中基床系数的解决方案。吴云刚等^[2]对武汉地区基床系数的试验成果进行了修正, 并对比了不同试验的优缺点。黄昌乾等^[3]指出应采用确定地基承载力的载荷试验方法测试基准基床系数, 并给出了北京地区典型复合地基工程基础系数的实测值。夏雄波等^[4]提出了一种室内基床系数试验的新方法。张蕾等^[5]运用数值分析方法对基床系数计算方法进行了修正和完善。但上述研究基本都是结合地区性土体进行, 具有一定的局限性。刘俊飞^[6]通过理论分析, 提出 K_{30} 试验法与三轴、固结试验法对应的等效厚度, 以此为基础提出对 2 种室内试验方法的结果进行试件高度修正的方法。陈定安等^[7]通过设计制作与原位 K_{30} 载荷试验具有相同的应力路

径特征与排水边界条件的试验装置, 提出采用直径为 5 cm 压板, 模拟试样在原位受到的应力状态, 进行分级加载测定地基土基床系数是可行的。

近几年随着宁波轨道交通建设工程的大力推进, 各土层基床系数的取值已成为一个亟待解决的难题。为此, 本文以宁波轨道交通 2 号线为依托, 对各车站和区间地层试样进行三轴试验, 以测定其基床系数, 并对试验结果进行分析和修正, 以期对宁波轨道交通设计提供依据。

1 基床系数试验及结果分析

1.1 测试方法

基床系数是地基上任一点所受的压力强度与该点的地基沉降量的比例系数, 可表示为:

$$K = P / s,$$

式中: K 为基床系数, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$; P 为地基土所受的应力, MPa ; s 为地基土的变形, m 。

目前, 基床系数的测定方法主要有 3 种: (1) K_{30} 现场测试方法; (2) 室内三轴试验; (3) 室内固结试验。现场载荷试验测定的基床系数实用价值较大, 然而受诸多因素的制约, 现场试验可操作性很差。实际工程中, 多采用室内试验方法获得基床系数值。

本研究采用三轴法测试土层基床系数, 试验

中先将试样置于三轴压力室内, 然后进行自重压力条件下的 K_0 固结, 最后进行不同应力路径下的排水慢剪三轴试验。

1.2 试验过程

试验过程采用 K_0 固结, 再进行固结排水剪三轴试验, 其中 K_0 固结参数设置为: (1)预压 σ_3 : 开始 K_0 固结试验时, 先施加 σ_3 进行预压, 一般设 20~30 kPa. (2) $\Delta\sigma_3$: 每次加围压增加量, 取 3.0 kPa. (3)增量 ΔV , 即试样垂向压缩体积变化量, 当 ΔV 小于设定的排水增量时, 系统自动加快试样座上升速率, 否则减低速率, 取 0.03 cm^3 . (4)排水增量: 判定加 $\Delta\sigma_3$ 后在 Δt 时间内试样的排水增加量, 取 0.1 mL. (5)孔压增量: 判定加 $\Delta\sigma_3$ 后在 Δt 时间内试样的孔压增加量, 取 1.0 kPa. (6)间隔: 判定是否应加 $\Delta\sigma_3$ 的时间间隔, 取 10 min.

K_0 固结完成后, 对下列参数进行设置, 以开展三轴试验法基床系数测定: (1)试验类型选择 $n=\Delta\sigma_3/\Delta\sigma_1$. (2) $\Delta\sigma_3$ 与 $\Delta\sigma_1$ 的比值 n , 取值范围 0~0.9, 本试验取 $n=0.1$. 为保证 $\Delta\sigma_3$ 的控制精度, 剪切速率不能大于 0.100, 一般按三轴试验速率要求设置。

试验完成后, 得到 $\Delta\sigma_1-\Delta h$ 试验曲线, 最后取曲线初始切线模量或某一割线模量即为对应应力状态下的基床系数。

1.3 各土层基床系数

宁波轨道交通 2 号线各主要土层的基床系数三轴试验结果见表 1 和表 2. 土层水平基床系数 K_h 与垂直基床系数 K_v 的对比结果见表 3.

表 1 土层水平基床系数 K_h 汇总 MPa							
层号	岩土名称	统计数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
① ₂	黏土	61	31.3	5.1	12.9	4.742	0.369
① ₃	淤泥粉质黏土	9	8.9	4.7	6.1	1.264	0.208
② ₁	粉质黏土	49	18.5	5.3	10.4	2.983	0.283
② ₂	淤泥质黏土	72	21.3	3.7	5.7	2.829	0.492
② ₃	淤泥粉质黏土	181	35.2	3.7	7.2	3.690	0.514
② ₄	淤泥质黏土	64	18.8	3.8	5.9	0.658	0.112
③ ₁	粉土夹粉砂	13	27.8	9.8	21.3	5.338	0.251
③ ₂	粉质黏土	17	42.8	5.9	15.7	10.090	0.645
④ ₁	淤泥粉质黏土	6	10.4	4.7	6.4	2.096	0.329
④ ₂	黏土	33	23.8	5.8	12.2	4.672	0.383

续表							
层号	岩土名称	统计数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
⑤ ₁	黏土	41	33.7	14.9	22.2	5.386	0.243
⑤ ₂	粉质黏土	19	20.9	8.1	16.6	3.935	0.238
⑥ ₂	粉质黏土	12	32.6	9.0	14.5	5.640	0.390
⑦ ₁	粉质黏土	6	32.6	20.8	26.5	3.879	0.146

表 2 土层垂直基床系数 K_v 汇总 MPa							
层号	岩土名称	统计数	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
① ₂	黏土	64	32.0	3.8	11.9	4.442	0.372
① ₃	淤泥粉质黏土	9	7.8	4.4	5.6	1.167	0.208
② ₁	粉质黏土	52	25.3	5.6	10.4	3.765	0.361
② ₂	淤泥质黏土	72	17.3	3.5	6.3	3.238	0.517
② ₃	淤泥粉质黏土	195	27.3	3.6	6.9	3.188	0.462
② ₄	淤泥质黏土	67	13.7	3.8	5.6	1.631	0.294
③ ₁	粉土夹粉砂	16	34.4	11.3	23.5	6.385	0.272
③ ₂	粉质黏土	17	25.7	7.7	14.1	5.840	0.415
④ ₁	淤泥粉质黏土	6	11.2	3.9	6.8	2.651	0.393
④ ₂	黏土	33	27.8	5.5	11.8	5.306	0.448
⑤ ₁	黏土	42	33.0	5.3	20.2	5.407	0.268
⑤ ₂	粉质黏土	20	20.9	6.8	14.6	3.644	0.250
⑥ ₂	粉质黏土	11	38.7	8.3	16.4	8.324	0.507
⑦ ₁	粉质黏土	6	38.7	20.8	27.1	6.495	0.240

表 3 土层 K_h 与 K_v 对比 MPa				
层号	岩土名称	K_h 平均值	K_v 平均值	K_h/K_v
① ₂	黏土	12.9	11.9	1.08
① ₃	淤泥质粉质黏土	6.1	5.6	1.09
② ₁	粉质黏土	10.4	10.4	1.00
② ₂	淤泥质黏土	5.7	6.3	0.90
② ₃	淤泥质粉质黏土	7.2	6.9	1.04
② ₄	淤泥质黏土	5.9	5.6	1.05
③ ₁	粉土夹粉砂	21.3	23.5	0.91
③ ₂	粉质黏土	15.7	14.1	1.11
④ ₁	淤泥质粉质黏土	6.4	6.8	0.94
④ ₂	黏土	12.2	11.8	1.03
⑤ ₁	黏土	12.9	11.9	1.08
⑤ ₂	粉质黏土	6.1	5.6	1.09
⑥ ₂	粉质黏土	10.4	10.4	1.00
⑦ ₁	粉质黏土	22.2	22.4	0.99

由表 1~3 可知, 宁波轨道交通各土层基床系数差异较大, 淤泥质土的水平基床系数 K_h 较小, 在 5.5~7.5 MPa 之间. 黏性土的水平基床系数 K_h 相对较大, 其值大于 10.0 MPa. 对于同一土层而言, 水平向和竖向基床系数值较为接近, K_h/K_v 比值介于 0.9~1.2 之间.

(1) K_h 与 K_v 相关性分析. 选取①₂层黏土、②₁层黏土、②₃层淤泥质粉质黏土和④₂层黏土进行水平和垂直基床系数相关性分析, 结果如图 1~4 所示. 各主要土层的相关方程及相关系数见表 4.

由图 1~4 及表 4 可知, 土层水平基床系数 K_h 与垂直基床系数 K_v 表现出较好的线性相关性, 相关系数基本在 0.6 以上.

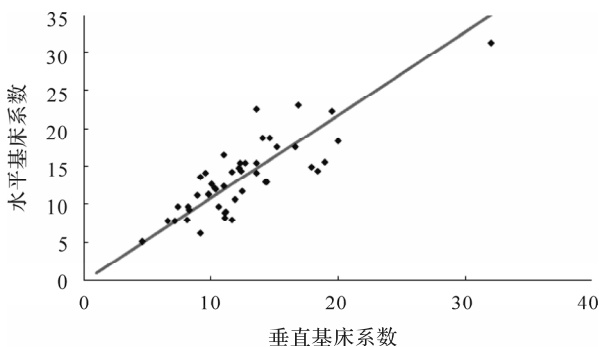


图 1 ①₂层黏土 K_h ~ K_v 相关性

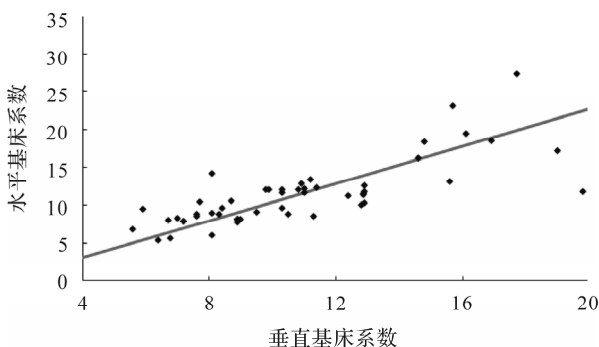


图 2 ②₁层黏土 K_h ~ K_v 相关性

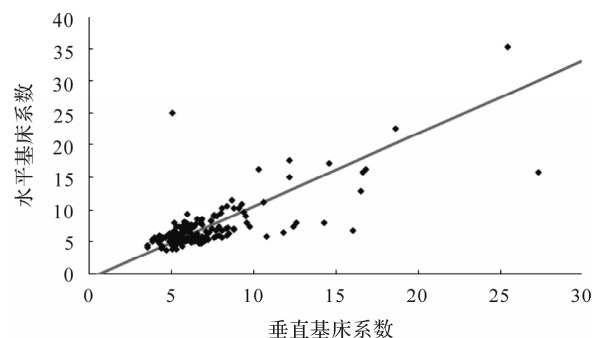


图 3 ②₃层淤泥质粉质黏土 K_h ~ K_v 相关性

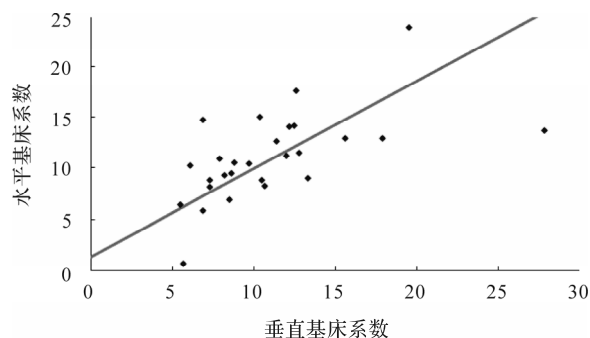


图 4 ④₂层黏土 K_h ~ K_v 相关性

表 4 K_h 与 K_v 相关关系

层号	岩土名	相关方程	相关系数	样本量
① ₂	黏土	$K_h=1.091K_v-0.118$	0.832	47
② ₁	黏土	$K_h=1.228K_v-1.846$	0.767	51
② ₂	淤泥质黏土	$K_h=0.513K_v+2.626$	0.565	67
② ₃	淤泥质粉质黏土	$K_h=1.132K_v-0.821$	0.726	166
② ₄	淤泥质黏土	$K_h=0.735K_v+1.790$	0.635	61
④ ₂	黏土	$K_h=0.882K_v+1.337$	0.588	27
⑤ ₁	黏土	$K_h=0.712K_v+7.089$	0.690	37
⑤ ₂	粉质黏土	$K_h=0.970K_v+1.753$	0.747	17
⑥ ₂	粉质黏土	$K_h=0.697K_v+3.495$	0.914	11

(2) 基床系数影响因素. 由各土层基床系数试验结果可知, 基床系数的大小与土性相关, 而土的物理力学性质, 例如土体液性指数、天然含水量以及重力密度对基床系数影响较大. 不同液性指数、天然含水量及重力密度下的基床系数结果如图 5~7 所示. 从图 5~7 可看出, 各土层液性指数分布在 0.25~2.0 之间, 液性指数越大, 基床系数越小, 液性指数对水平向和竖向基床系数的影响规律类似.

各土层天然含水量主要分布在 20%~57% 之间, 基床系数随含水量的增大而减小(图 6), 随重力密度的大而增大(图 7), 天然含水量、重力密度对水平向和竖向基床系数的影响规律一致.

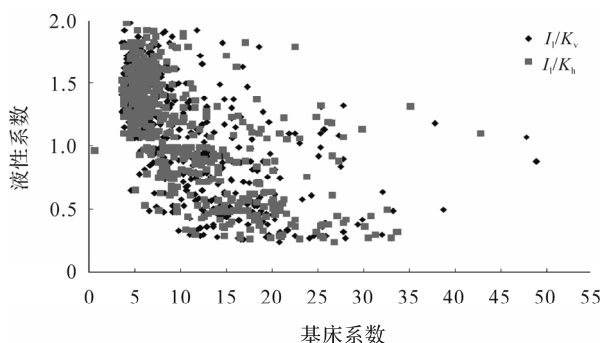


图 5 液性指数与基床系数相关关系

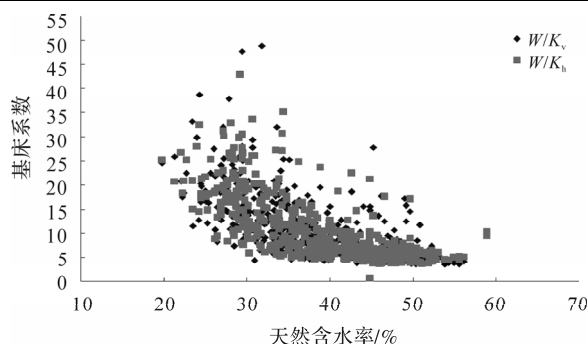


图 6 天然含水量与基床系数相关关系

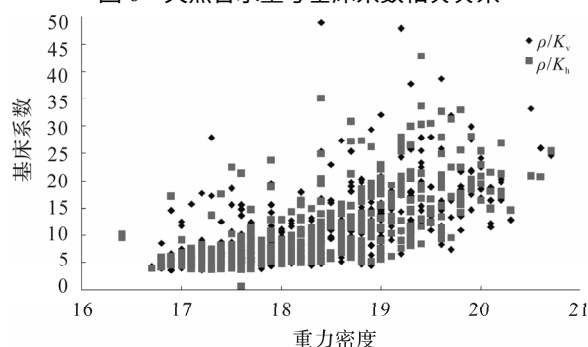


图 7 重力密度与基床系数相关关系

2 基床系数的修正

由于基床系数的大小与土体的类别、物理力学性质、土体的结构、土体的构造以及由于采样、运输、制样等造成土样扰动程度和天然应力状态的改变有着密切关系, 其关系表现为^[4-5]:

(1) 土体的类别. 相同液性指数, 颗粒越粗, 基床系数越大; 颗粒越细, 基床系数越小.

(2) 基床系数与土的状态有关. 相同的土性, 随着液性指数增大, 基床系数呈递减趋势.

(3) 基床系数大小与土的物理性质有关. 当含水率越大, 液性指数越大, 基床系数呈偏小趋势.

(4) 基床系数与土的结构有关. 物性相同的情况下, 结构越好, 基床系数偏大, 反之相反.

(5) 基床系数与土的天然密度有关. 随着天然密度的增大, 基床系数呈增大趋势.

为了便于工程应用, 需要综合考虑上述因素, 对试验结果进行修正.

2.1 试验值修正公式

目前三轴试验法测定的基床系数结果要远大于工程采用的结果, 不便于工程应用, 为此需要对各地层基床系数进行修正. 由于工程实践中地基土基床系数可由原位荷载板试验(或 K_{30} 试验)结果

计算确定. 考虑到荷载板尺寸的影响, 基础系数随着基础宽度 B 的增加而有所减小.

对于砾状土、砂土上的条形基础有:

$$K_1 = K \left(\frac{2B}{B + 0.305} \right)^2, \quad (1)$$

对于黏性土上的条形基础

$$K_1 = K \frac{B}{0.305}, \quad (2)$$

式中: K_1 是 0.305 m 宽标准荷载板的标准基床系数或 K_{30} 值, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$; K 为试验求得的基床系数, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$; B 为荷载板直径或宽度, m.

由于三轴试样高度与半径的比值约为 4, 基本考虑了压缩层的影响, 因此只需对基床系数的尺寸效应进行修正, 此时 B 取三轴样直径(0.039 1 m), 由(1)式和(2)式可得:

砾状土、砂土

$$K_1 = 0.0516K. \quad (3)$$

黏性土

$$K_1 = 0.128K. \quad (4)$$

2.2 修正值与经验值对比

利用(4)式对黏性土的试验结果进行修正计算, 并将理论计算值与基床系数经验值进行对比, 将①~⑥层土按液性指数划分为流塑、软塑和可塑状 3 大类, 则其基床系数修正值与设计经验值对比结果见表 5.

表 5 黏性土基床系数理论计算值与经验值比较

状态	基床系数理论计算值	基床系数经验值
流塑	3~11	5~10
软塑	7~20	10~20
可塑	15~35	20~40

由表 5 可以看出, 基床系数理论计算值与轨道勘察规范给出的经验值基本一致, 修正后的基床系数可应用于轨道交通建设工程设计. 设计过程中对于同一类土中相对偏硬、结构强度好、土质均匀的土可取大值; 相对偏软、结构强度差、土质不均匀的土可取小值.

3 结论

基于宁波轨道交通 2 号线, 采用三轴试验法对各土层基床系数进行了试验和分析, 并对基床系数试验值进行修正, 主要结论如下:

(1)宁波地区各土层的基床系数差异较大, 淤泥质土的水平基床系数 K_h 较小(5.5~7.5 MPa), 黏性土的水平基床系数 K_h 相对较大(12.0 MPa). 另外, 两个方向的基床系数值较为接近, 水平基床系数 K_h 与垂直基床系数 K_v 的比值约为 0.9~1.2.

(2)土层水平基床系数 K_h 与垂直基床系数 K_v 之间表现出一定的相关性, 在一定程度上可以实现用垂直基床系数 K_v 来换算水平基床系数 K_h .

(3)试验修正值与经验值对比结果吻合较好, 可应用于轨道交通建设工程设计.

参考文献:

[1] 彭友君. 地铁设计中基床系数的解决方案[J]. 都市快

轨交通, 2007, 20(2):40-43.

[2] 吴云刚, 黄斌, 张婷, 等. 基床系数室内成果修正及评价[J]. 水运工程, 2010(7):27-30.

[3] 黄昌乾, 李国强, 潘启辉. 基床系数取值方法相关问题分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(增刊):298-302.

[4] 夏熊波, 陈定安, 王小章, 等. 关于室内基床系数试验的新方法[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(4):486-487.

[5] 张蕾, 高广运, 高盟. 基床系数确定方法的讨论[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4):812-818.

[6] 刘俊飞. 基床系数测试的室内试验法与 K_{30} 法的差异性分析及修正[J]. 铁道标准设计, 2013(8):63-67.

[7] 陈定安, 茅加峰. 室内基床系数测试方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2):281-284.

Experiment and Analysis on Subgrade Coefficient of Soft Soil Using Triaxial Test Method

ZHANG Chun-jin, CHEN Bin, YAO Yan-ming, YE Rong-hua

(Ningbo Urban Rail Transit Project Construction Headquarters, Ningbo 315010, China)

Abstract: Coefficient of subgrade reaction is an important parameter in rail transportation design. Experiment to determine the coefficient of subgrade reaction of soft soil stratum in Ningbo urban rail transit is carried out using triaxial method (CD), then the correlation analysis is conducted on the horizontal and vertical directions of coefficient of subgrade reaction. Finally, the size effect of the test result is corrected. The results show that coefficient of subgrade reaction on Ningbo soft soil varies significantly. The horizontal direction of coefficient of subgrade reaction of silty clay is small, while it is relatively large for the cohesive soil. The horizontal direction of coefficient of subgrade reaction is close to the vertical direction, and they have a certain correlation, that is, to a certain extent, the vertical direction can be converted to the horizontal direction of coefficient of subgrade reaction. The correction value of coefficient of subgrade reaction of soil is in good agreement with the empirical value, verifying the correction coefficient of test value. The coefficient of subgrade reaction proves to be reasonable in Ningbo area. The analysis provides a theoretical basis for engineering design and construction of rail transit.

Key words: soft clay; coefficient of subgrade reaction; correlation; size effect

(责任编辑 史小丽)