

水平基准基床系数试验方法与取值研究*

潘永坚,李高山,刘生财,欧阳涛坚,蔡国成

(浙江省工程勘察院,浙江 宁波 315012)

摘 要:岩土工程勘察中,考虑扁铲侧胀试验、室内固结试验在获得水平基床系数数值上存在的差异性,从测试原理、方法和尺寸效应分析,结合相关理论,提出了采用 K_0 固结仪和考虑高径比(H/R)的新的测试试验方法和修正公式。结合软土地区重大勘察项目实践,采用扁铲侧胀试验和改进的 K_0 仪固结试验,对流塑、可塑、软塑等3种稠度状态下的粘性土分别进行测试分析,对试验方法和修正公式进行验证。结果表明,两种测试试验方法下得到的水平基准基床系数基本一致,比值接近1,具有较好的可行性、合理性。

关键词:水平基床系数;扁铲侧胀试验; K_0 仪固结试验;尺寸效应;修正公式

中图分类号:TU411 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2018)03-0712-07

Study on the Test Method and Value of the Horizontal Subgrade Coefficient

Pan Yongjian, Li Gaoshan, Liu Shengcai, Ouyang Taojian, Cai Guocheng

(Zhe Jiang Engineering Investigation Institute, Ningbo, Zhejiang 315012, P.R. China)

Abstract: In the geotechnical engineering investigation, considering the difference of the dilatometer test, consolidation test which obtain the horizontal subgrade coefficient. Analysis of the principle, method and dimensional effect of the test, relating the correlation theory. Finally, a new test method and the modified formula are presented which includes K_0 consolidation instrument and the height to diameter ratio (H/R). Combined with the practice of major investigation projects in soft soil area, the test method and the modified formula of the cohesive soil under different conditions (flow plastic, plastic and soft plastic) were tested and verified by using the dilatometer test and the modified K_0 consolidation test. The results show that the numerical results obtained by the two methods are basically the same, the ratio is close to 1, and have good feasibility and rationality.

Keywords: horizontal subgrade coefficient; dilatometer test; K_0 consolidation test; dimensional effect; modified formula

0 引言

水平基床系数是水平受荷桩、基坑围护及隧道支护设计的一个重要参数,其值的准确性将直接影响到工程的安全及造价^[1-2]。现场 K_{30} 平板载荷试验是目前最可靠的方法,然而在软土地区由于受软土工程特性及地下水位限制, K_{30} 平板载荷试验主要适用于地表浅层地基土垂直基床系数的测

试^[3]。为此,在软土地区岩土工程勘察中常采用扁铲侧胀、旁压、室内固结及三轴试验等对土体基床系数进行相关试验测试,但受现场测试设备直径、室内试样尺寸等客观因素的影响,导致不同测试试验方法下同一土体的水平基床系数具有较大的差异性,同时对于不同试验测试方法和取值标准目前尚不能形成统一的认识,导致勘察单位提出的基床系数设计工程师无法把握和使用。

* 收稿日期:2017-12-07(修改稿)
作者简介:潘永坚(1963-),男,浙江新昌人,教授级高级工程师,注册土木工程师(岩土),主要从事岩土工程勘察、设计及试验研究等工作。E-mail:LGS1384235@163.com

为此,在对软土地区普遍采用的水平基床系数测试理论和方法分析的基础上,采用扁铲侧胀试验和改进的 K_0 仪固结试验对不同稠度状态(流塑、软塑、可塑)下的土体水平基床系数开展有针对性的试验。通过一系列的分析、测试、评价,最终用于指导该地区水平基准基床系数的试验测试与取值,同时推动工程勘察水平的提高。

1 试验方法、原理及适用性分析

1.1 K_{30} 载荷试验

基床系数最有效的测试方法是现场原位测试。但受设备尺寸、形状、稳定标准的影响,导致原位测试获得的基床系数数值也不一致。Terzaghi 建议采用 $0.305\text{ m} \times 0.305\text{ m}$ ($1\text{ ft} \times 1\text{ ft}$) 方形板作为标准,以得到的基床系数为基准基床系数。我国规范^[4]采用直径 $D=30\text{ cm}$ 的载荷板去测定地基土的水平、垂直基床系数 K_H 、 K_V ,该试验称为 K_{30} 载荷试验,得到基床系数为基准基床系数^[5-6]。计算公式为:

$$K = P/S \tag{1}$$

式中: K 为基床系数, MPa/m ; P 为地基土所受压力, MPa ; S 为地基的变形 ($S=1.25\text{ mm}$), m 。

但在软土地区,由于受到软土工程特性及地下水位的限制, K_{30} 载荷试验只适用于地下水位以上的浅层地基土进行垂直基床系数的测试,而对于下部土体无法进行有效的现场测试。

1.2 扁铲侧胀试验

作为一种新型的原位测试方法,扁铲侧胀在试验时将接在探杆上带有膜片的扁铲侧头压入土中预定的深度,通过充气试压,使圆形钢膜向孔壁土中侧向扩张,通过量测膜片膨胀至 A 、 B 、 C 3 个特殊位置的压力进行一系列计算,从而获得岩土的多参数^[7]。扁铲侧胀试验主要适用于软土、黏性土、粉土、黄土和松散~中密的砂土^[8]。在密实的砂土、杂填土和含砾土层中,因膜片容易损坏,故一般不宜采用^[9-10]。

扁铲侧胀试验时可将圆形钢膜向外扩张假定为在半无限弹性介质中的圆形面积上施加均布荷载 ΔP ,如弹性介质的弹性模量为 E ,泊松比为 μ ,膜上任一点的位移量 $S(r)$ 为:

$$S(r) = \frac{4R\Delta P(1 - \sigma^2)}{\pi E} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \tag{2}$$

式中: R 为圆形钢膜膜的半径 (30 mm); r 为膜上任一点到膜中心的距离。

膜片土体变形如图 1。

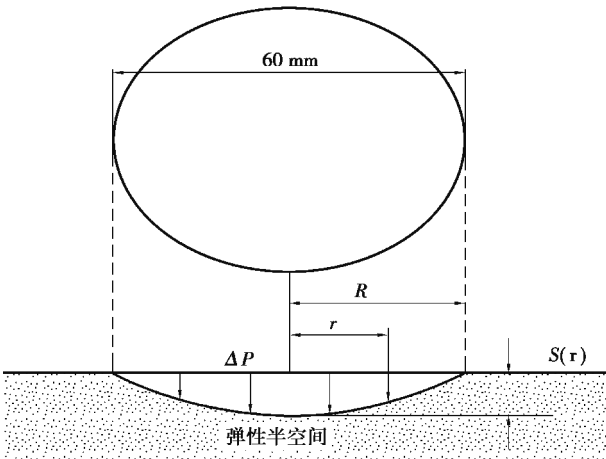


图 1 膜片、土体变形示意图

Fig. 1 Deformation diagram of diaphragm and soil

当 $r=0$ 时,由式(2)得膜中心点的位移量 $S(0)$:

$$S(0) = \frac{4R\Delta P(1 - \sigma^2)}{\pi E}, \tag{3}$$

扁铲侧胀试验测求地基土水平基床系数 K_H 可由公式:

$$K_H = \Delta P/\Delta s \tag{4}$$

式中: ΔP 为压力增量; Δs 为位移增量。

考虑到 Δs 为平面变形量时,其值为 $2/3$ 中心位移量。通过对应力应变关系的双曲线拟合,水平基床系数 K_H 最终拟合公式为^[4]:

$$K_H = 955\Delta P \tag{5}$$

1.3 K_0 仪固结试验

与标准固结试验相比, K_0 固结试验在试验尺寸和应力状态上都进行了改进,如侧翼采用的是柔性的水而不是刚性的环刀,试样厚度增加了一倍达到 40 mm ,试验条件更接近于土体初始原位状态, K_0 固结试验与 K_{30} 试验在 P - S 曲线的起始压力段(接近直线段)非常接近或重合。参考本地区 K_{30} 载荷试验经验(如图 2), $S=1.25\text{ mm}$ 对应的沉降值就在该直线段上,这样就可以参考 K_{30} 载荷试验的方法,利用室内 K_0 仪固结试验方法的获得土体水平基床系数 K ^[11]。

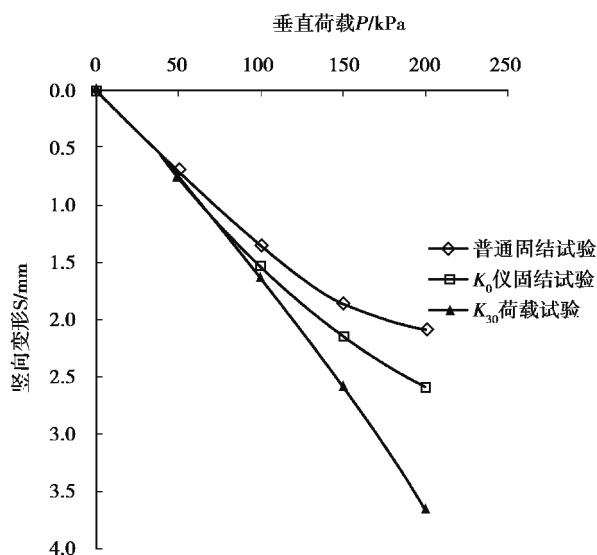


图2 P-S 曲线示意图

Fig. 2 Sketch map of P-S curve

2 基床系数取值分析

2.1 尺寸效应问题

Terzaghi 认为,载荷板尺寸的差异是导致不同测试方法下得到的基床系数存在差异的主要原因^[12-13]。因此,对于不同测试方法下得到的基床系数,应按式(6)、式(7)换算后,统一为基准基床系数 K_{30} 。对于砂砾、砂土,采用的公式为:

$$K'_{30} = \frac{(2B)^2}{(B + 0.3)^2} K \quad (6)$$

对于黏性土,采用公式为:

$$K'_{30} = \frac{B}{0.3} K \quad (7)$$

式中: K'_{30} 为基准基床系数, MPa/m; K 为其他试验方法 ($D \neq 30$ cm) 所得到的基床系数, MPa/m; B 为荷载板直径或宽度, m。

2.2 基床系数的直径修正

2.2.1 扁铲侧胀试验修正

扁铲侧胀试验是通过将圆形钢膜(直径 $D = 0.06$ m)的向外扩张,假定在半无限弹性介质中的圆形面积上施加均布荷载 ΔP ,依据水平向荷载-位移关系得到水平向基床系数,由此依据式(6)、式(7)计算得:

对于砾砂、砂土,采用换算公式为:

$$k_{30} = k \left(\frac{2 \times 0.06}{0.06 + 0.30} \right)^2 = 0.111k \quad (8)$$

对于黏性土,采用换算公式:

$$k_{30} = k \left(\frac{0.06}{0.30} \right) = 0.2k \quad (9)$$

2.2.2 K_0 仪固结法修正

固结试验土样直径即环刀内径为 61.8 mm,透水板直径取 61.5 mm,由此依据式(6)、式(7)计算得:

对于砾砂、砂土,采用换算公式为:

$$k_{30} = k \left(\frac{2 \times 0.0618}{0.0618 + 0.30} \right)^2 = 0.116k \quad (10)$$

对于黏性土,采用换算公式为:

$$k_{30} = k \left(\frac{0.0618}{0.30} \right) = 0.206k \quad (11)$$

2.3 考虑高径比 (H/R) 的基床系数修正

与原位测试相比,室内试验主要在试样尺寸,即半径 R 和厚度 H 上存在着差异^[14-15]。因此,应在对高径比 (H/R) 综合考虑的基础上,以 K_{30} 平板载荷试验为基准,将不同测试方法下得到的基床系数统一修正为基准基床系数^[16]。

根据分层总和法单向压缩理论^[17]:

$$\Delta s_i = \frac{\Delta p_i}{E_{si}} H_i \quad (12)$$

由基床系数取值定义得:

$$k_0 = \frac{p}{S} = \frac{P}{\frac{\Delta P}{E} H} = \frac{PE}{\frac{P + 0}{2} H} = \frac{2E}{H} \quad (13)$$

根据应力传递原理^[18],当试样高径比 $H/R = 3.7$ 时,试样底部压力 $P_i = 0.1P$,则基床系数表达式为:

$$k_{0.1P} = \frac{p}{S} = \frac{P}{\frac{\Delta P}{E} H} = \frac{PE}{\frac{P + 0.1P}{2} H} = \frac{2E}{1.1H} \quad (14)$$

由式(13)、式(14)可得

$$k_0 = 1.1k_{0.1P} \quad (15)$$

根据基床系数定义: $K = P/S = P/1.25$,在试样直径不变的情况下,高径比越小,试样沉降变形量达到 1.25 mm 时所需的顶部压力 P 越大,导致计算出的基床系数数值偏大。因此,当试样处于弹性变形阶段时,基床系数的取值与高径比成反比例关系。由此,基床系数 K 与试样高径比为 3.7 时 ($H/R = 3.7$) 的 $K_{0.1P}$ 取值关系为^[11]:

$$\frac{K}{K_{0.1P}} = \frac{3.7}{H/R} \Rightarrow K = \frac{3.7}{H/R} K_{0.1P} \quad (16)$$

$$\Rightarrow K_{0.1P} = \frac{H/R}{3.7} K = \frac{H}{3.7R} K \quad (17)$$

式中:当 $H/R = 3.7$ 时, $K = K_{0.1P}$ 。

由此,考虑试样高径比($H/R\leq 3.7$)对基床系数取值影响的基准基床系数修正公式为:

$$K_{30} = 1.1K_{0.1P} = 1.1 \frac{H}{3.7R}K = 0.3 \frac{H}{R}K \quad (18)$$

式中: K 为直接测得的基床系数; K_{30} 为基准基床系数。

对于试样高径比 $H/R>3.7$ 以及采用不同直径的荷载板原位测试,由于试样或下部影响范围内压缩层厚度较大,可以忽略下部压缩层厚度的变化对测试结果的影响,因此,对于现场扁铲侧胀试验,可按式(8)、式(9)仅进行直径修正,进而得到土体的水平基准基床系数^[9]。

表 1 地基土分布及物理力学性质指标

Table 2 Distribution of foundation soil and physico-mechanical properties

层号	岩性名称	土层厚度/m	状态	土体物理力学性质指标					
				W/%	$\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	e_0	$I_p/\%$	I_L	$E_{s1.2}/$ MPa
① ₁	素填土	0.3~0.5	—	—	—	—	—	—	—
① ₂	黏土	0.8~2.4	可塑	33.3	18.9	0.94	20.5	0.39	4.29
① ₃	淤泥质粉质黏土	2.1~4.3	流塑	42.8	17.6	1.22	15.8	1.37	3.16
② ₂	淤泥质粉质黏土	3.0~8.5	流塑	44.6	17.5	1.26	15.9	1.45	2.95
② ₃	淤泥质黏土	6.6~11.1	流塑	43.5	17.4	1.26	17.6	1.19	2.47
③	黏土	5.6~10.2	软塑	45.4	17.0	1.33	22.3	0.95	2.85
④	粉质黏土	1.0~5.6	可塑	26.5	19.2	0.79	13.0	0.56	5.13
⑤	圆砾	>6.0	中密~密实	—	—	—	—	—	—

根据工程地质条件及结合工程勘察需要,试验选取①、②、③、④层等不同状态的黏性土分别进行测试分析。

4 试验成果及分析

4.1 试验结果分析

4.1.1 K_0 仪固结法试验成果

从 P - S 曲线得出下沉基准值($S=1.25\text{ mm}$)对应的荷载强度 P ,按式(1)计算各土样基床系数,获得的室内土体基床系数见表 2。

表 2 水平基床系数测试成果

Table 2 Horizontal subgrade coefficient test results

层号	名称	状态	试验深度/m	范围/ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	均值/ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)
①	黏土 (硬壳层)	可塑	0.5~1.0	61.7~93.7	79.2
②	淤泥质粉 质黏土	流塑	14.3~21.0	32.0~57.0	43.7
③	黏土	软塑	21.0~22.8	52.2~77.8	65.0
④	粉质黏土	可塑	30.6~33.8	68.0~107.9	88.3

3 试验方案设计

3.1 试验概况

为研究适合宁波地区土体水平基床系数测试、试验方法和取值公式,根据宁波平原地区土层的岩土工程条件,采用扁铲侧胀原位测试和改进的 K_0 室内固结试验,对 流塑、可塑、软塑等 3 种稠度状态下的黏性土分别进行测试分析。

3.2 工程地质条件

场地地貌属于滨海冲湖积平原,以第四系海相软土层为主。依据地质年代,勘察深度内的地基土由上而下分为 8 个工程地质层^[18],见表 1。

从表 2 测试成果可以看出,由室内 K_0 仪固结法试验得到的上部硬壳层可塑状黏土水平基床系数在 61.7~93.7 MPa/m 之间,均值为 79.2 MPa/m;下部流塑状水平基床系数在 32.0~57.0 MPa/m 之间,均值为 43.7 MPa/m,软塑状水平基床系数在 52.2~77.8 MPa/m 之间,均值为 65.0 MPa/m;可塑状水平基床系数在 68.0~107.9 MPa/m 之间,均值为 88.3 MPa/m。

4.1.2 扁铲侧胀试验成果

依据现场试验结果,试验点 BC1、BC2 水平基床系数随深度变化曲线图如图 3。

图 3 分析显示,沿深度方向水平基床系数在 1.2 m 及 31.4 m 附近位置表现出显著变化,这主要与土体的状态相关。根据试验场地地层剖面图揭露,试验地段上部 0~1.2 m 为可塑状的①₂ 层黏土,1.2~21.2 m 为流塑状的淤泥质粉质黏土,21.2~31.4 m 为软塑状粉质黏土,31.4 m~35 m 为可塑状黏土。曲线表明,土体越坚硬,水平基床系数越大。

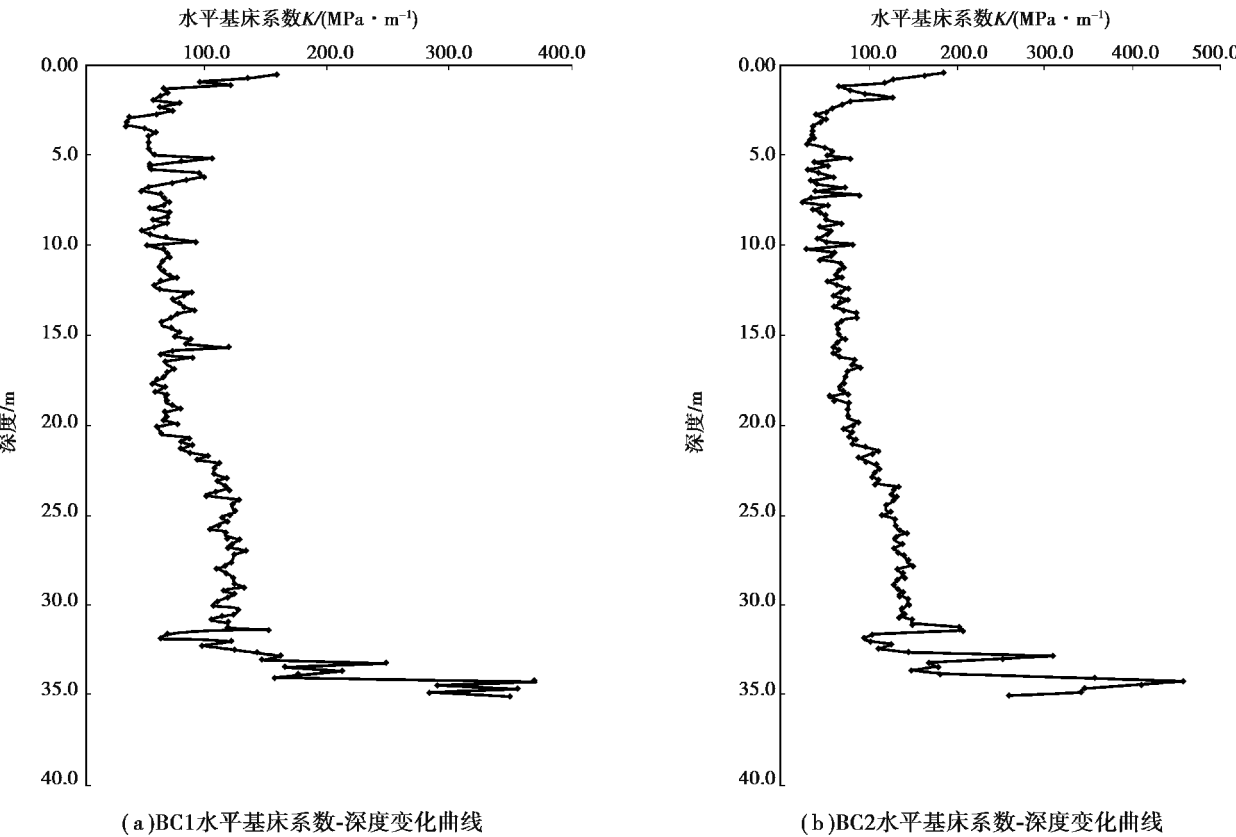


图 3 水平基床系数-深度变化曲线

Fig. 3 Horizontal subgrade coefficient vs. soil depth

对于同一种状态的土体,由试验数据可以看出,沿深度方向水平基床系数上部①₂层可塑状黏土表现出沿深度的增加而较小的变化趋势;②层淤泥质粉质黏土下部土体水平基床系数随深度的增加而增加,但上部土体的水平基床系数随深度的增加变化不明显;而对⑤层可塑状黏土,虽表现出随深度增加而增大的趋势,但其为螺旋式增长,即为不同步增长。分析其原因,对于①₂层可塑状黏土,由于试验场地稳定地下水位 0.7 m 左右,其上部土体含水量低,下部地下水位以下部分含水量高,同时由于毛细水上升的影响,使地下水位附近的土体含水量位于二者之间,进而表现出水平基床系数呈现随深度增加而同步稳定下降的变化趋势;②、③层淤泥质粉质黏土、黏土从钻探岩芯来看,土体性质均一好,变化较小,由此水平基床系数沿深度方向变化幅度不大,在两层界面处,由于其下部土体物理状态明显好于上部,呈软塑状,层面变化处土体水平基床系数表现出随深度增大的变化趋势。④层粉质黏土结合钻孔岩芯及试验数据表明,其下部状态好于上部,但由于该层土体均匀性较差,局

部夹有砾、砂颗粒,进而导致水平基床离散型较大。综合分析知,水平基床系数的取值与土体稠度状态密切相关,与土体的深度无显著的线性关系。各土层水平基床系数见表 3。

表 3 水平基床系数

Table 2 Horizontal subgrade coefficient						
名称	状态	试验深度/ m	数值/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)		均值/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	
			BC1	BC2		
耕植土	可塑	0.0~0.4	—	—	—	
粘土	可塑	0.4~1.2	127.6	147.6	137.6	
淤泥质粉质粘土	流塑	1.2~21.2	67.9	61.5	64.7	
粉质粘土	软塑	21.2~31.4	115.5	130.3	122.9	
粘土	可塑	31.4~34.0	165.8	160.6	163.2	
圆砾	中密	35.0~	—	—	—	

4.2 测试成果对比分析

通过扁铲侧胀试验及 K_0 仪固结试验,按场地

地基土状态确定的水平基床系数测试结果见表4。

表4 水平基床系数对比 MPa·m⁻¹

Table 4 Comparison of horizontal

测试方法	subgrade coefficient MPa·m ⁻¹			
	状态			
	可塑 (硬壳层)	流塑	软塑	可塑
扁铲侧胀法	137.6	64.7	122.9	163.2
K ₀ 仪固结法	79.2	43.7	65.0	88.3
经验值	12~30	1~12	10~25	20~45

分析表4,对于同一土体,现场扁铲侧胀试验得到的水平基床系数普遍大于室内K₀仪固结法得到的数值,其比值范围为1.5~1.8;与经验值相比,两种测试试验方法得到的数值均明显大于经验值数倍。数据分析表明,必须采用统一的换算取值标准,才能使得到的水平基床系数满足工程设计要求。

4.3 修正后水平基准基床系数成果对比分析

按式(9)、式(18)分别对扁铲侧胀法和K₀仪固结法试验成果进行载荷板直径和室内试样高径比修正后,所得到的不同状态下土体水平基准基床系数见表5。

表5 修正后的水平基准基床系数对比 MPa·m⁻¹

Table 5 Comparison of the horizontal

测试方法	subgrade coefficient MPa·m ⁻¹			
	状态			
	可塑 (硬壳层)	流塑	软塑	可塑
扁铲侧胀法	27.5	12.9	24.6	32.6
K ₀ 仪固结法	30.0	16.9	25.1	33.4
经验值	12~30	1~12	10~25	20~45

表5数据显示:修正后扁铲侧胀测试与室内K₀仪固结试验所得到的同种状态在土体水平基准基床系数数值基本一致,且与经验值相吻合,接近于经验值的上限。分析数据表明,扁铲侧胀试验和K₀仪固结法可以较好地对宁波软土地区的水平基准基床系数进行试验测试,并得到较准确的参数

取值。

5 结论

(1)同一地质年代及成因条件下,土体水平基床系数取值与其自身的状态有关,而与其埋藏深度呈非相关性,即土样的深度对土体的基床系数大小影响不明显。

(2)根据现场扁铲侧胀试验及室内K₀固结试验测试成果分析,宁波软土的水平基准基床系数接近于规范经验值上限。

(3)工程勘察中,关于水平基准基床系数的取值,对现场原位测试,只需考虑载荷板直径对测试结果的影响;而对于室内试验,需综合考虑试样直径及厚度的影响,即高径比(H/R)对其产生的影响。

(4)对于扁铲试验,通过原理分析,总结出水平基准基床系数的换算公式 $k_{30}=k\left(\frac{0.06}{0.30}\right)=0.2k$ 。改造后的K₀固结仪,可以较好地对水平基床系数进行测试,并推导出考虑高径比的(H/R)的室内水平基准基床系数换算公式 $K_{30}=0.3\frac{H}{R}K$ 。经试验验证,在两种方法下,结合取值换算公式可以较好地测试水平基准基床系数。

参考文献(References)

[1] 彭友君.地铁工程勘察现状与技术研究课题[J].岩土工程技术,2007,21(4):179-183.(Peng Youjun. Present situation of subway engineering exploration and technology research topics[J].Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(4):179-183.(in Chinese))

[2] 宗军良,刘涛.软土地区提速路基病害段试验及加固方法研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(5):826-831.(Zong Junliang, Liu Tao. Study on field test and treatment of soft soil subgrade of speed-raising at the railway[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2007,3(5):826-831.(in Chinese))

[3] 工程地质手册编委会.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.(The Editorial Board of Engineering Geology. Handbook of engineering geology [M]. Beijing: china Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通土

- 工程勘察规范(GB50307-2012)[S].北京:中国计划出版社,2012. (The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for geotechnical investigations of urban rail transit (GB50307-2012) [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese))
- [5] 屈峰玉. 基床系数测试方法的研究及应用[D]. 西安:长安大学, 2008. (Qu Fengyu. Research and application of test method of basebed coefficient [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese))
- [6] 周亮.基床系数测试方法及结果分析[D].西安:长安大学,2009. (Zhou Liang, Method and result analysis of base bed coefficient test [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese))
- [7] 朱定华,顾永远,刘智飞,等.孔压扁铲侧胀试验及其应用[J].地下空间与工程学报,2015,11(4):946-951.(Zhu Dinghua,Gu Yonguan,Liu Zhifei, et al.Pore pressure flat dilatometer test and its application [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015,11(4):946-951.(in Chinese))
- [8] 赵家明. 扁铲侧胀试验在武汉市轨道交通三号线工程勘察中的应用[J].中国水运,2013,13(4):285-286. (Zhao Jiaming. The application of lateral distension test in engineering survey of No. 3 line of CRC in Wuhan [J]. China Water Transport, 2013, 24(13): 285-286. (in Chinese))
- [9] 杨超,汪稔,傅志斌,等.扁铲侧胀试验在滨海沉积软土中的应用[J].水文地质工程地质,2010,37(2):79-82. (Yang Chao ,Wang Ren,Fu Zhibin. Application of flat dilatometer test in littoral deposit soft soil [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(2): 79-82. (in Chinese))
- [10] 唐世栋,林华国,傅纵.用扁铲侧胀试验求解侧向基床反力系数的方法[J].地下空间,2004,24(3):322-326. (Tang Shidong, Lin Huaguo, Fu Zong. Simplified method for calculation of the horizontal coefficient of sub-grade reaction with the flat dilatometer test [J]. Underground Space, 2004, 24(3): 322-326. (in Chinese))
- [11] 潘永坚,李高山,欧阳涛坚,等.软土地区基床系数室内试验成果影响因素分析[J].工程勘察,2016,44(7):16-21. (Pan Yongjian, Li Gaoshan, Ouyang Taojian, et al. Analysis on the influencing factor of soft soil subgrade reaction coefficient obtained by laboratory test [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2016, 44(7): 16-21. (in Chinese))
- [12] 姜彤,田明磊,曹继辉,等.基床系数室内试验方法[J].华北水利水电学报,2010,31(2):28-32. (Jiang Tong, Tian Minglei, Cao Jihui, et al. Indoor test for coefficient of subgrade reaction [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2010,31(2): 28-32. (in Chinese))
- [13] 仲锁庆,张西平,潘海利.地基土基床系数研究[J].地下空间与工程学报,2005,1(增):1109-1112. (Zhong Suoqing , Zhang Xiping, Pan Haili. Study on foundation soil coefficient of subgrade reaction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005,1(Supp.): 1109-1112. (in Chinese))
- [14] 周宏磊,张在明.基床系数的试验方法与取值[J].工程勘察,2004(2):11-15. (Zhou Honglei, Zhang Zaiming. Test method and value of the coefficient of subgrade Reaction [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2004(2): 11-15. (in Chinese))
- [15] 张蕾,高广运,高盟.基床系数确定方法的探讨[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):812-818. (Zhang Lei, Gao Guangyun, Gao Meng. Discussion on the calculation method of coefficient of subgrade reaction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 812-818.(in Chinese))
- [16] 潘永坚,李高山,欧阳涛坚,等.宁波软土地区基准基床系数试验方法与取值标准研究[J].水文地质工程地质,2016,43(4):103-107. (Pan Yongjian, Li Gaoshan, Ouyang Taojian, et al. A study of the test method and value standard of the modulus of reference subgrade reaction in the Ningbo soft soil area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(4): 103-107. (in Chinese))
- [17] 张克恭,刘松玉.土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2010. (Zhang Kegong, Liu Songyu. Soil mechanics [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese))
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范(GB50007-2011)[S].北京:中国建筑工业出版社,2011. (The State Standards of People's Republic of china. Code for design of building foundation (GB 50307-2011) [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))