

上海地区软土层侧向基床反力系数规律性研究

Study on the horizontal coefficient of subgrade reaction for soft soil layers in Shanghai

林华国, 唐世栋

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 根据 38 个扁铲侧胀试验孔近 4000 份数据的实测资料求得上海地区软土层的侧向基床反力系数值 K_h , 分析和归纳出各土层 K_h 值的范围及其随深度的变化规律, 并将计算值与规范参考值作比较。这些结果可为上海地区水平受荷桩、基坑工程和隧道工程的设计提供依据。

关键词: 扁铲侧胀试验; 侧向基床反力系数; 侧向基床反力系数比例系数; 材料指数

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0495-05

作者简介: 林华国(1978-), 男, 硕士研究生, 主要从事土体工程及原位测试研究工作。

LIN Huaguo, TANG Shidong

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on 38 flat dilatometer tests(DMT) and nearly 4000 pieces of data from the tests in Shanghai, the ranges of the horizontal coefficient of subgrade reaction, K_h , in different soft soil layers and the relationships of K_h with depth are particularly analysed. And their variation are also summarised. In addition, the calculated K_h are compared with the corresponding values in the code. These conclusions can be used in the designs of excavation, tunnel and lateral load piles in Shanghai.

Key words: flat dilatometer test(DMT); horizontal coefficient of subgrade reaction; ratio coefficient of K_h ; material index

0 引言*

近年来,随着上海城市轨道交通和高层建筑的发展,侧向基床反力系数 K_h 在工程中的应用越来越普遍。但由于一直没有一种有效的方法来测试侧向基床反力系数,因而对各层土的 K_h 值范围及其随深度的变化规律缺乏研究。目前的研究表明^[1~3]:扁铲侧胀试验(Flat Dilatometer Test, DMT)能快速且较为准确地获得侧向基床反力系数,并能近似连续地反映出各土层 K_h 值随深度的变化规律,因而可利用扁铲侧胀试验结果对各土层侧向基床反力系数值的范围及其随深度的变化规律进行较为系统的研究。本文利用上海地区轨道建设所做的 DMT 试验资料,求得 K_h 值,分析和归纳出上海地区软土层的侧向基床反力系数值的范围及其随深度的变化规律,并与规范参考值进行了比较。这些结果可为上海地区水平受荷桩、基坑工程和隧道工程的设计提供依据。

1 侧向基床反力系数的计算方法

笔者曾详细推导了利用扁铲侧胀试验求解侧向基床反力系数的计算方法^[2],建议按下式求解:

$$K_h = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 K_{h0} \quad (1)$$

式中 K_{h0} 为侧向基床反力系数试验值; λ_1 为宽度修

正系数; λ_2 为形状及刚柔性修正系数; λ_3 为速率修正系数。

式(1)各参数可分别由以下关系式求得:

$$K_{h0} = \frac{3\Delta p}{2s(0)} \quad (2)$$

式中 $s(0)$ 为 DMT 中膜片中心点的位移量, $s(0) = 1.10 \text{ mm}$; 根据推导整个膜片的平均变形量 s_m 为膜片中心点变形量的 $2/3$,因而在式(2)中乘上了系数 $3/2$; Δp 为相应土压强增量。式(2)是假定地基土处于弹性变形条件而得的。

$$\lambda_1 = \begin{cases} \frac{3}{50D} & D \leq 0.6 \text{ m}, \\ 0.1 \left| \frac{0.6}{D} \right|^\beta & D > 0.6 \text{ m}. \end{cases} \quad (3)$$

式中 D 为基础实际直径或宽度,计算时单位为 m; β 为宽度变化因子,按下式取值:

$$\beta = \begin{cases} \frac{1}{I_D + 1} & I_D \leq 2, \\ \frac{1}{3} & I_D > 2, \end{cases} \quad (4)$$

其中 I_D 为材料指数,与土性有关,可由 DMT 试验结果直接求得。

λ_2 按不同的基础形状及刚性根据表 1 取值。

表 1 形状及刚性修正系数 λ_2

Table 1 Corrected coefficients for the shape, rigidity and flexibility of the foundation, λ_2

	圆形	方形	矩形(L/B)					
			1.5	2	3.0	4.0	5.0	10.0
λ_2 (柔性)	1.0	0.89	0.74	0.65	0.56	0.50	0.46	0.38
λ_2 (刚性)	1.08	0.97	0.79	0.70	0.59	0.53	0.49	0.40

注: 表中 L, B 分别为基础的长度和宽度。

DMT 试验的加荷速率比实际工程中的要快, 加荷速率影响的大小与试验土层的性质有关。在软黏土中, 快速加荷条件下的基床反力系数比慢速加荷条件下大得多。因而根据不同的土性, 应乘上相应的速率修正系数 λ_3 。 λ_3 可按下式取值:

$$\lambda_3 = \begin{cases} \frac{3I_D + 3}{2I_D + 6} & I_D \leq 3, \\ 1 & I_D > 3. \end{cases} \quad (5)$$

2 试验概况

试验数据源于上海市轨道建设 M8 线、地铁一号线北延伸段、明珠线二期、莘闵线及复兴路隧道的勘察资料, 共计 38 个扁铲侧胀试验孔, 近 4000 份数据。试验孔最大深度为 30.4 m。试验深度范围内的主要土层自上而下分别为: ①层填土; ②层褐黄色黏性土; ②₁层灰黄色黏性土; ②₂层灰色粉性土; ③层灰色淤泥质粉质黏土; ③₁层灰色粉性土夹层; ④层灰色淤泥质黏土; ⑤层灰色黏土; ⑤₁层灰色粉性土、粉砂; ⑤₂层灰色黏性土; ⑥₁层暗绿色粉质黏土。各试验孔都有附近的静探孔和取土钻孔的资料以及土样的土工试验资料以供对比。

3 各土层侧向基床反力系数规律性分析

3.1 各土层侧向基床反力系数的范围

利用扁铲侧胀试验求解侧向基床反力系数时, 先根据各试验点实测的 Δp 值, 由式(2)求得侧向基床反

力系数计算值 K_{h0} , 再根据实际基础宽度、刚柔性和各试验点不同的 I_D 求得 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 , 最后由式(1)求得各试验点的 K_h 值。本文所求得的 K_h 值, 均是假定基础为方形刚性基础、其宽度为 1 m 条件下求得的。但在实际工程中应用时, K_h 值应根据具体基础宽度、形状等因素再由式(1)加以修正。

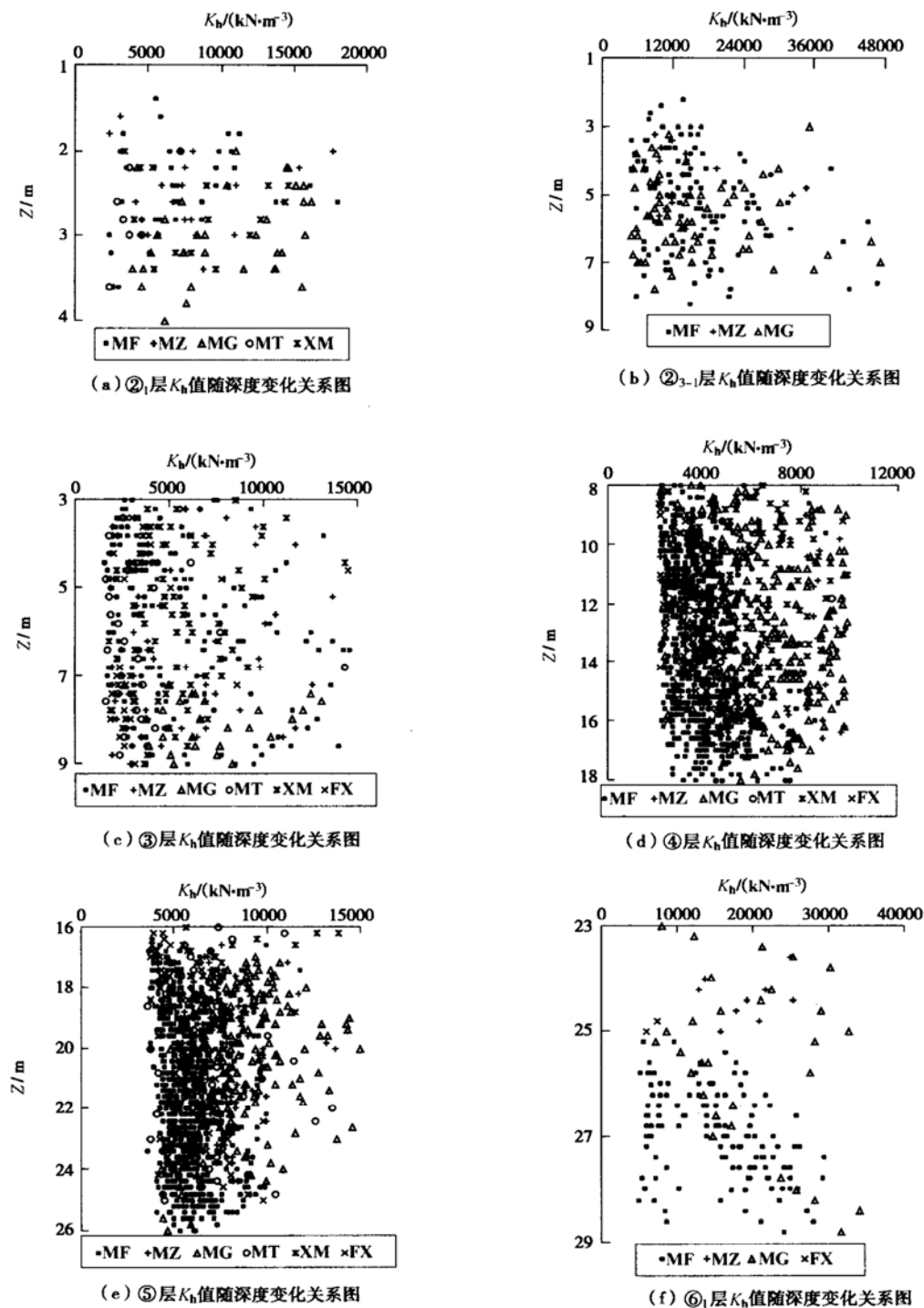
不同土性侧向基床反力系数值的范围是不同的, 为研究各土层侧向基床反力系数的规律, 将求得各试验点的 K_h 值分层分析。各土层中, 由于 ①层为填土层, 土性离散性很大, 因而未作分析, 而 ②层、③层和 ⑤层土在试验区段仅局部出现, 试验数据较少, 试验结果不能完全反映这些土层的真实情况, 因而也未作分析。考虑到试验一些不可避免的误差和地基土的不均匀等因素, 所计算 K_h 值的异常值应予以剔除。资料整理时, 各土层均剔除了 10% 的数据(最大值和最小值各占 5%), 最后将各层剔除后的 K_h 值按深度用图 1 表示。图中: MF 为 M8 线; MZ 为明珠线二期; MG 为地铁一号线北延伸段; MT 为地铁二号线西延伸段; XM 为莘闵线; FX 为复兴路隧道。从图 1 的散点分布中, 可看出各土层侧向基床反力系数值的范围, 将其归纳于表 2, 同时列出了规范参考值的范围^[4]。

比较可以看出: 在流塑黏性土中(如上海地区第 ③、④层土), K_h 计算值与参考值基本吻合; 在松散粉性土中(如上海地区 ②₁层土), K_h 计算值的总体范围较大, 但主要集中在 5000~30000 kN/m³ 之间, 与参考值范围也较吻合; 而在软塑黏性土和可塑黏性土中(如上海地区第 ②、⑤、⑥层土), 由 DMT 试验结果求得的侧向基床反力系数值比规范参考值小。其中属可塑黏性土的 ⑥₁层土中 K_h 值偏小的原因是由于各试验孔的深度都仅达到该土层上部很浅的一部分, 未进入该层土深部, 所得资料受上覆软土层的影响, 因而 K_h 计算值较小。而 ②层为软土地区表层的“硬壳层”, 其土性有其特殊性。⑤层计算值比参考值小的原因还有待进一步分析。

表 2 各层土侧向基床反力系数与规范参考值之比较

Table 2 Comparison between the calculated values of K_h and those in the code

地基土分类	相应土层号	相应土层名	试验计算值 $K_h / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	规范参考值 $K_h / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	斜率值 $C / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-4})$	比例系数值 $m / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
流塑黏性土	③	灰色淤泥质粉质黏土	1500~15000	3000~15000	—	1000~2000
	④	灰色淤泥质黏土	2200~10000		200~800	
软塑黏性土	②	褐黄色黏性土	2000~20000	15000~30000	—	2000~4000
	⑤	灰色黏土	3500~15000		200~2000	
可塑黏性土	⑥ ₁	暗绿色粉质黏土	5000~35000	30000~150000	3000~6000	4000~6000
松散粉性土	② ₁	灰色粉土	4000~48000	15000~30000	2000~5000	2000~4000

图1 不同土层侧面基床反力系数 K_h 值随深度 Z 变化关系Fig. 1 Variation of K_h (horizontal coefficient of subgrade reaction) with Z (depth) for different soil layers

3.2 各土层侧向基床反力系数随深度变化规律

扁铲侧胀试验每 20 cm 进行一次试验,因而可近似连续地反映出侧向基床反力系数随深度的变化关系。图 1 为 38 个 DMT 试验孔各层 K_h 值随深度的变化关系,由于各试验孔分布于上海不同地区,相同土层的土性也存在差异,并且各土层的埋深不一,因而在图 1 中各土层 K_h 值随深度的变化规律并不明显。但若将某一试验孔 K_h 值与深度之间的关系单独画出,则可明显地看出 K_h 值随深度的变化关系。图 2 是根据第

④层地基土在复兴路隧道和地铁一号线北延伸段中的两个 DMT 试验孔的实测资料计算的侧向基床反力系数值随深度的变化关系图。图中可看出 K_h 值随深度近似呈线性关系变化,即 $K_h = K_{Z0} + C\Delta Z$, 式中 K_{Z0} 为地基土某层面处的侧向基床反力系数值,单位为 kN/m^3 ; C 为 K_h 随深度变化的斜率,单位为 kN/m^4 ; ΔZ 为从地基土各相应土层层面算起的深度变化值,单位为 m。用最小二乘法可求得图中的线性关系,按同样方法,可得其它孔各土层侧向基床反力系数随深度的

变化关系,并将 C 值列于表 2。

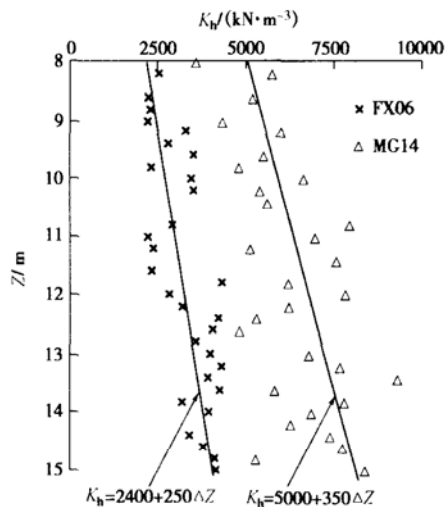


图 2 K_h 斜率 C 值的确定

Fig. 2 Calculation of C representing the slope of K_h

对 C 值进行研究可看出:

(1) 在均匀土层中,侧向基床反力系数随深度变化关系可近似用线性表示,斜率 C 值与土性的关系非常大:土质越硬,则 K_h 值越大,并且 K_h 值随着土层深度的增加增长越快,即 C 值越大;反之则越小。

(2) 在不均匀土层中,侧向基床反力系数随深度变化的规律不明显。属软塑黏性土的②层褐黄色黏性土,不仅 K_h 值离散性较大,并且 K_h 随深度有减小趋势,这与正常固结的土层不同,因为该层土是软土地区表层的“硬壳层”,具有上硬下软的特性,故侧向基床反力系数随深度的增加呈减小变化。而在③层灰色淤泥质粉质黏土中,由于该土层存在多处夹层,受夹层不同土性的影响, K_h 值离散性较大,并且随深度变化无明显规律。

(3) 扁铲侧胀试验计算所得的侧向基床反力系数斜率值 C 与基坑设计中的侧向基床反力系数比例系数 m 值是不同的。基坑设计时,一般假设在基坑开挖影响范围内侧向基床反力系数随深度的变化关系为 $K_h = mZ$,其中 Z 为从基坑开挖底面算起的地基土埋深,即认为侧向基床反力系数值随深度呈正比例关系,在地表处或基坑开挖面处的侧向基床反力系数值为 0,在开挖影响范围以下则认为侧向基床反力系数为一常数值。而扁铲侧胀试验所反应的则是地基土开挖前侧向基床反力系数随深度的变化规律,对处于一定埋深的地基土处因受上覆土层的影响,层面处的侧向基床反力系数值不可能为 0,因而所求的 C 值一般要比规范推荐的 m 值小(从表 2 可看出)。对上覆土层为软土层的较硬土层(如上海地区的⑥和②₁层地基

土), C 值与 m 值较为相近,这是因为上覆软土层对硬土层层面处的侧向基床反力系数值的影响相对较小,有时甚至可以忽略不计,因而 C 值与 m 值相近。但对于上下土层土性相差不大或是上覆为较硬土层的软土层(如上海地区的④和⑤层),因上覆土层对层面处的 K_h 值影响很大,因而 C 值与 m 值相差也较大。

3.3 侧向基床反力系数地区性规律分析

从图 1 可看出,同一土层的侧向基床反力系数值在上海各地区相差不是很大。但在地铁一号线北延伸段附近,④层和⑤层的 K_h 值比其它地区稍大。经查各 DMT 试验孔附近的静探孔资料发现,同土层中,地铁一号线北延伸段的比贯入阻力 p_s 值比其它地区稍大,土质较好,因而该地区的 K_h 值也相应较大。

3.4 各土层侧向基床反力系数的平均值

求土层侧向基床反力系数的平均值时,有两种计算方法:一是先求得各土层 DMT 试验的 Δp 和 I_D 的平均值,再由式(1)求得该土层的侧向基床反力系数值;另一种是直接由各试验点资料由式(1)求得侧向基床反力系数值后,再按土层进行平均而得。

将两种方法求得的各土层侧向基床反力系数的平均值列于表 3 中,可以发现二者是有区别的。表中右起第三列 K_h' 是按上述第一种方法计算得出的土层 K_h 平均值,右起第二列的 K_h'' 则是按上述第二种方法计算得出的该土层的 K_h 平均值。表 3 还列出了按第一种方法计算时所需的各参数值,右起第一列的 p_s 为各层土比贯入阻力的平均值。

从表 3 的数据和计算过程可知:

(1) 同一土层中,各试验点 I_D 值相差越大,即土层均匀性越差,平均值 K_h' 与 K_h'' 值则相差得越大,两者之间的误差约为 1%~15%。考虑到同一土层中不同的 I_D 对 K_h 值的影响,在求解土层 K_h 平均值时,建议先求得各试验点的 K_h 值,再统计求得该层土的 K_h 平均值。

(2) 同一深度的土层中,如 p_s 值越大,即土层越硬,侧向基床反力系数值也越大;但对 p_s 值相同的情况,在深层土时的 K_h 值比浅层土的 K_h 值小。

4 结论与建议

(1) 侧向基床反力系数是一个重要的土性参数,因其影响因素较多,原有的测试方法均难以准确获得。利用扁铲侧胀试验(DMT)结果不仅能较为准确地获得土层的侧向基床反力系数 K_h 值,还能近似连续地反映 K_h 值随深度的变化关系。

表3 各层土侧向基床反力系数的平均值

Table 3 Average values of the coefficient of horizontal subgrade reaction for different soil layers

层号	p_0 /kPa	p_1 /kPa	Δp /kPa	I_D	K_{h0} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	β	λ_1	λ_2	λ_3	K_h' /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	K_h'' /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	p_s /MPa
② ₁	187	310	123	0.73	167727	0.58	0.074	0.97	0.70	8425	8608	0.95
② ₂₋₁	195	425	230	1.67	313999	0.37	0.083	0.97	0.86	21572	18607	1.73
③	236	332	96	0.6	130909	0.63	0.073	0.97	0.67	6152	5194	0.67
④ ₁	399	492	93	0.37	126818	0.73	0.069	0.97	0.61	5167	4715	0.62
⑤	549	676	127	0.43	173182	0.70	0.070	0.97	0.63	7350	6697	0.92
⑥ ₁	702	963	261	0.65	355909	0.61	0.073	0.97	0.68	17177	17236	2.63

(2) 利用扁铲侧胀试验结果,由公式(1)求得的上海地区各软土层的侧向基床反力系数 K_h 值与规范参考值相比较(如表2所列)可得:流塑黏性土中计算值与参考值基本相近,而对软塑黏性土计算值比参考值小,其具体原因还有待进一步分析。

(3) 在均匀土层中,侧向基床反力系数一般随深度的增加而增加,土层越硬,侧向基床反力系数值越大,且随深度的增长增加越快,即 C 值越大。但上海地区第②层属软土地区表层的“硬壳层”,具上硬下软的特性, K_h 值随深度的增加反而减小。

(4) 各软土层的侧向基床反力系数在上海各地区差异性不明显,但在地铁一号线北延伸段处第④和第⑤层中的 K_h 值比别的地方稍大,这与它的土性稍

硬有关。

(5) 在计算土层 K_h 平均值时,建议先求得该层各试验点的 K_h 值,再统计求得该层的平均值。

参考文献:

- [1] Marchetti S. The flat dilatometer(DMT) and its applications to geotechnical design[EBOL]. <http://www.marchetti-dmt.it>, 1999.
- [2] 唐世栋,林华国. 用扁铲侧胀试验求解侧向基床反力系数[J]. 岩土工程学报,2003,25(6):692-696.
- [3] 陈国民,钟建东,汤智青. 采用扁铲侧胀试验估算土的侧向基床反力系数的探讨[J]. 上海地质,2002,(2):40-42.
- [4] DGJ08-11-1999,地基基础设计规范(上海市工程建设规范)[S].