

用扁铲侧胀试验求解侧向基床反力系数

Calculation of the horizontal coefficient of subgrade reaction with the flat dilatometer test

唐世栋, 林华国

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 侧向基床反力系数 K_h 是水平受荷桩、基坑围护和隧道支护设计的一个重要参数。从扁铲侧胀仪的工作机理出发, 推导出侧向基床反力系数的计算公式, 并考虑了基础宽度、加荷速率、基础形状及刚性等因素的影响。利用上海地区的扁铲侧胀试验资料, 按本文公式进行计算, 结果与规范推荐值相当接近。

关键词: 侧向基床反力系数; 扁铲侧胀试验; 材料指数

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)06-0692-05

作者简介: 唐世栋(1952-), 男, 博士, 副教授, 从事岩土工程教学和研究工作。

TANG Shi-dong, LIN Hua-guo

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

Abstract: The horizontal coefficient of subgrade reaction, K_h , plays a significant role in problems dealing with laterally or loaded piles, excavation and tunnel engineering. The calculation formula for the horizontal coefficient of subgrade reaction is derived from the principle of the flat dilatometer test. And the influence factors of K_h , such as the width and shape of foundation, the rigidity and plexibility of the foundation and the rate of loading are considered respectively. then, the values of K_h are obtained from the calculation formula according to the data of in situ DMT in Shanghai, and the calculated values of K_h are almost equal to those suggested in the code.

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

0 引言*

侧向基床反力系数是水平受荷桩、基坑围护和隧道支护设计的一个重要参数。但由于其影响因素较多, 水平受力的原位试验又较少, 至今仍没有满意的测试方法。在现行的方法中, 土工试验由于取土时会对土体产生扰动影响, 并且难以模拟现场的实际受力状态因而较少采用; 而规范法中表列的数值范围较大, 难以确定; 传统计算 K_h 值一般通过旁压试验来估算或利用水平静载受荷桩进行反算, 但这两种方法耗时较长且费用较高。因而, 如何有效地获得侧向基床反力系数一直是岩土工程界的难题之一。

扁铲侧胀试验正好是一种侧向受力试验, 扁平状测头对土的扰动性较小, 并且每 20 cm 进行一次试验, 可近似连续地反映出土性随深度的变化情况。这为通过现场试验有效获得侧向基床反力系数提供了可能。

1 机理分析

扁铲侧胀试验(DMT)是 20 世纪 70 年代末由意大利人 Marchetti 发明的一种原位测试方法。它是利用静力或动力把扁铲探头贯入土中, 达试验深度后, 利用气压使扁铲侧面的圆形钢膜向外扩张以测得压力与变形关系的一种试验。扁铲试验时, 膜向外扩张可假设为

在半无限弹性介质中在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 , 膜上任一点的外移量为 $s(r)$ (见图 1), 则有^[1]

$$s(r) = \frac{4R\Delta P(1-\mu^2)}{\pi E} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \quad (1)$$

式中 R 为圆膜的半径(30 mm), r 为膜上任一点到膜中心点的距离。

当 $r = 0$ 时, 由式(1)得膜中心点的位移量 $s(0)$:

$$s(0) = \frac{4R\Delta P(1-\mu^2)}{\pi E} \quad (2)$$

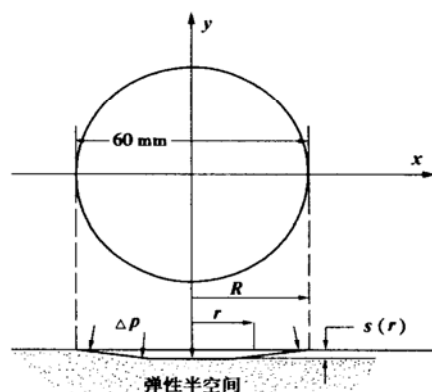


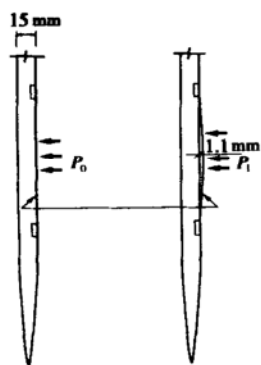
图 1 膜片土体变形示意图

Fig. 1 Deformation of the membrane and soil

表1 根据材料指数 I_D 划分土类Table 1 Use of material index I_D to classify soil types

材料指数 I_D	< 0.1	0.1~0.35	0.35~0.6	0.6~0.9	0.9~1.2	1.2~1.8	1.8~3.3	> 3.3
土类	泥炭及灵敏性黏土	黏土	粉质黏土	黏质粉土	粉土	砂质粉土	粉质砂土	砂土

扁铲试验时,可测得对应膜片中心点外移量为 0.05 mm 和 1.10 mm 时的气压值 A 和 B。由于土的变形量较小,可将整个过程作为弹性阶段来考虑。利用土的弹性性质,可推导出膜片中心点在基座(即位移为零)时的土压力 P_0 ,以及膜片中心点位移为 1.10 mm 时的土压力 P_1 (参见图 2)。由 P_0 和 P_1 及孔压 U_0 可获得 DMT 的材料指数 I_D , $I_D = \Delta P / (P_0 - U_0)$, 其中, $\Delta P = P_1 - P_0$ 。 I_D 可用于划分土类(参见表 1)^[1]。

图2 P_0 和 P_1 时膜片的位置Fig. 2 Positions of the membrane(P_0 and P_1)

2 侧向基床反力系数的理论解

利用扁铲侧胀试验求解基床反力系数,目前已有一些岩土工程师提出了不同的方法^[1~3]。但用这些公式求得的基床反力系数与实际工程情况相比尚存在较大的差距,还有待进一步修正。事实上,侧向基床反力系数除了与土体本身的性质(如土类、地下水条件、前期固结压力和密实度等)有关外,还与基础宽度、形状及刚度、加载速率等因素有关。本文将从理论上推导出侧向基床反力系数的求解关系式,并考虑多方面影响因素对其加以修正以符合实际工程情况。

扁铲试验时,土体的变形是受整个膜片各点共同作用而形成的,所以求解侧向基床反力系数时也应从土体受平均应力作用时引起的平均变形量考虑。扁铲压入土体后,膜片因受土体的压力而回缩到基座;随后在扁铲内加压,膜片中心点向外扩张至 1.10 mm。假设在整个过程中土体变形与膜片变形相一致(参见图 1),整个过程土体(即膜片)的平均变形量为 Δs_m ,则 Δs_m 可由下式求得

$$\Delta s_m = \frac{\iint_A (x, y) dx dy}{\pi R^2} \quad (3)$$

式中 积分区域 A 为整个圆膜面积。将式(1)代入式(3),并通过坐标转换得

$$\begin{aligned} \Delta s_m &= \frac{\frac{4R\Delta P(1-\mu^2)}{\pi E} \iint_A \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} dr d\theta}{\pi R^2} \\ &= \frac{8R\Delta P(1-\mu^2)}{3\pi E} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可求得侧向基床反力系数的试验值 K_{h0}

$$K_{h0} = \frac{\Delta P}{\Delta s_m} = \frac{3\pi E}{8R(1-\mu^2)} \quad (5)$$

若直接利用 DMT 试验结果求解 K_{h0} ,则由式(2)、(4)和(5)可得

$$K_{h0} = \frac{3\Delta P}{2s(0)} \quad (6)$$

式中 $s(0)$ 为膜片中心点的位移量,为 1.10 mm; ΔP 为相应的土压力增量。

3 侧向基床反力系数的修正

式(6)是在圆形柔性基础宽度为 0.06 m,土体处于理想弹性状态而导出的侧向基床反力系数试验值。由于基床反力系数受基础尺寸、基础形状及刚度和加载速率等因素影响,为了尽量与工程实际情况吻合,应尽可能把这些因素考虑在内。下面分别讨论各因素的影响。

3.1 基础尺寸的影响

从式(4)可看出,在应力水平相同的条件下,土体变形量随膜直径的大小呈线性增长,也就是侧向基床反力系数 K_h 与膜直径大小成反比例关系(见式(5))。但有关试验研究表明,因土的复杂性,土体的变形量与基础尺寸并不完全是呈线性关系变化。Terzaghi 和 Peck 曾在砂土和超固结土中用不同宽度的载荷板进行试验,得出了砂土的变形与基础宽度的关系呈下式变化^[4]:

$$\frac{s}{s'} = \left| \frac{2B}{B + 0.305} \right|^2 \quad (7)$$

式中 B 为基础直径或边长(m); s 为土体的变形量(cm); s' 为基础宽度为 0.305 m 时土体的变形量。而对超固结黏性土,变形量与基础宽度基本上呈线性变化。Barata 和 Malyshev 等人的试验结果表明,土体的

变形量与基础宽度的关系也呈非线性变化^[5]。Menard 和 Rousseau 根据前人的经验指出^[5]: 土体总变形量由固结变形和剪切变形两部分组成, 在压缩土层厚度大于基础宽度的地基土中, 剪切变形量占大部份; 两部分变形中, 固结变形量与基础宽度成正比, 而剪切变形量与基础宽度的关系则为

$$\frac{s_d}{s_{d0}} = \begin{cases} \frac{B}{B_0}, & B \leq 0.6 \text{ m} \\ \left| \frac{B}{B_0} \right|^\alpha, & B > 0.6 \text{ m} \end{cases} \quad (8)$$

式中 B 为基础直径或宽度(m); B_0 为参考直径或宽度(0.6 m); s_d 为剪切变形量; s_{d0} 为基础宽度为 0.6 m 时的剪切变形量; α 为流变因素, 其值随土类变化(见表 2)。

表 2 正常固结土的流变因素 α

Table 2 Creep factors α for the normally consolidated soil				
土类	泥炭土	黏土	粉土	砂土
α	1	2/3	1/2	1/3

从式(8)可看出, 基础宽度小于 0.6 m 时土体的总变形量与基础的宽度基本上成正比; 而对于基础宽度大于 0.6 m 时, 土体的剪切变形量随着土体的粒状性质的增加偏离线性的性质将更加明显(α 值从泥炭土的 1 变化到砂土的 1/3)。对侧向受压的土体一般可视其压缩层的厚度为无穷大, 因而剪切变形量将占总变形量的绝大部分, 所以总变形量也将随土体粒状性质的增加而偏离线性。表 2 所列的流变因素 α 是按不同土类选取不同的值, 使用前必须先确定土性, 倘若能以某种直接反映土类变化的参数代之, 将会更加合理和方便。扁铲侧胀试验的结果能提供划分土类的材料指数 I_D (见表 1)。笔者研究了材料指数 I_D 与土性的关系后建议, 利用扁铲试验的结果, 变形量随基础尺寸的变化按下式修正

$$\frac{s}{s_0} = \begin{cases} \frac{D}{D_0}, & D \leq 0.6 \text{ m} \\ \left| \frac{D}{D_0} \right|^\beta, & D > 0.6 \text{ m} \end{cases} \quad (9)$$

式中 D 为基础直径或宽度(m); D_0 为参考直径(0.6 m); s 为基础总变形量(m); s_0 为基础直径为 0.6 m 时的总变形量(m); β 为尺寸变化因子, 可按式取值:

$$\beta = \begin{cases} \frac{1}{I_D + 1}, & I_D \leq 2 \\ \frac{1}{3}, & I_D > 2 \end{cases} \quad (10)$$

由式(5)、(9)和(10)可导出圆形柔性基础直径为 D 时的侧向基床反力系数 K_{h1} 与侧向基床反力系数试验值

K_{h0} 的关系:

$$K_{h1} = \lambda_1 K_{h0}, \quad (11)$$

式中 λ_1 为尺寸修正系数, 可用下式表示:

$$\lambda_1 = \begin{cases} \frac{3}{50D}, & D \leq 0.6 \text{ m} \\ 0.1 \left| \frac{0.6}{D} \right|^\beta, & D > 0.6 \text{ m} \end{cases} \quad (12)$$

3.2 基础形状及刚柔性的影响

扁铲侧胀仪的膜片可看作柔性的圆形基础, 对实际工程中不同形状(方形、矩形、条形)及刚柔性的基础, 基床反力系数应作相应的修正。设形状及刚性修正系数为 λ_2 , 则 λ_2 可通过地基变形影响系数换算而得^[6], 即

$$\lambda_2 = 0.85/\omega. \quad (13)$$

笔者已按不同的基础长宽比将 λ_2 值算出, 如基础的长度为 L , 宽度为 B , 则可由表 3 直接查得 λ_2 值。

表 3 形状及刚性修正系数 λ_2

Table 3 Correction coefficients for the shape, rigidity and flexibility of the foundation, λ_2

项目	λ_2 柔性	λ_2 刚性
圆形	1.0	1.08
方形	0.89	0.97
矩形 L/B	1.5	0.74
	2.0	0.65
	3.0	0.56
	4.0	0.50
	5.0	0.46
	10.0	0.38

3.3 加载速率的影响

扁铲侧胀试验是一种快速加荷试验, 而实际工程的加荷速率则要慢得多, 因此在利用扁铲侧胀试验结果计算侧向基床反力系数时还应乘上相应的速率修正系数 λ_3 。有资料表明, 土体(尤其是软黏土)在快速加荷条件下的基床反力系数与慢速加荷条件下是不一样的, 而这种影响的大小在不同土性中也是不一样的。加荷速率的影响主要与土性有关。陈国民曾指出^[3], 速率修正指数在淤泥质土中取 0.5。而在砂土中, 扁铲试验过程可视为完全排水过程^[1], 所以 λ_3 值可取为 1。同样考虑了材料指数 I_D 与土性的关系后建议, λ_3 按下式取值:

$$\lambda_3 = \begin{cases} \frac{3I_D + 3}{2I_D + 6}, & I_D \leq 3 \\ 1, & I_D > 3 \end{cases} \quad (14)$$

综上所述, 考虑了多种因素影响后的侧向基床反力系数 K_h 可由下式求得

$$K_h = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 K_{h0}. \quad (15)$$

4 实例计算与分析

4.1 侧向基床反力系数的计算

表 4 是根据上海地铁 M8 线陆家浜路站附近试验孔 MF03 MF06 MF07 的实测资料求得的各土层侧向基床反力系数的平均值。计算时, 根据 3 个孔各土层 ΔP 的平均值, 先由式(6)求得各土层侧向基床反力系数试验值 K_{h0} ; 再根据各土层 I_D 的平均值求得 λ_1 和 λ_2 ; 假定基础为方形刚性基础, 其宽度为 1 m, 利用表 3 查得 λ_2 ; 最后通过式(15)求得 K_h 值。在应用过程中应根据实际基础宽度、形状等因素利用式(15)再加以修正。

表 4 各层侧向基床反力系数平均值

Table 4 Average values of the horizontal coefficient of subgrade reaction for different soil layers

孔号	层号	ΔP /kPa	I_D	K_{h0} /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	λ_1	λ_2	λ_3	K_h /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
MF03	③	124	0.81	169091	0.075	0.97	0.71	8782
	④	78	0.28	106042	0.067	0.97	0.58	4003
	⑤	123	0.33	167216	0.068	0.97	0.60	6628
MF06	③	116	0.74	158182	0.075	0.97	0.70	8008
	④	67	0.24	91636	0.066	0.97	0.57	3356
	⑤	114	0.29	155782	0.067	0.97	0.59	6000
MF07	③	93	0.67	126818	0.074	0.97	0.68	6161
	④	61	0.23	83182	0.066	0.97	0.57	3036
	⑤	106	0.27	144859	0.067	0.97	0.58	5451

将表 4 算得的各层土侧向基床反力系数值与相应土层规范推荐值相比较(见表 5)^[7], 可以看出两者相当吻合。

表 5 K_h 计算值与规范推荐值之比较

Table 5 Comparison between the calculated values of K_h and those in the code

层号	计算范围 K_h / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	推荐范围 K_h / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
③	6161~ 8782	5000~ 10000
④	3036~ 4003	3000~ 5000
⑤	5451~ 6628	

4.2 各土层侧向基床反力系数随深度的变化规律

按相同条件, 将 3 个孔不同深度各试验点的实测资料按式(15) 分别进行计算, 可得到第 ③、④ 和 ⑤ 层地基土侧向基床反力系数随深度变化的关系图(见图 3)。图中可看出:

(1) 各孔 ③ 层土的侧向基床反力系数值相差较大, 并且同一个孔 K_h 值随深度的变化规律不明显。经查对附近的静探及钻孔资料发现该层土含有多处夹砂层, 因受夹层影响, 试验计算结果离散性较大。

(2) 各孔 ④ 层土的侧向基床反力系数值相差较

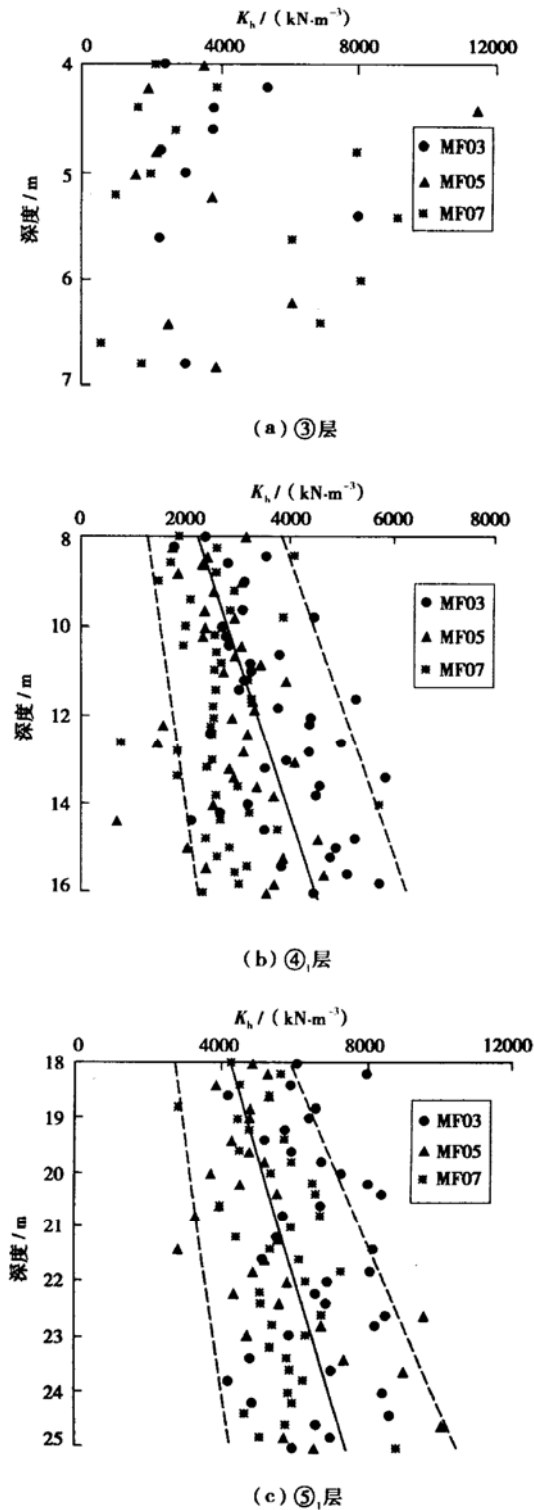


图 3 各层土侧向基床反力系数随深度变化关系图

Fig. 3 Relation between K_h (horizontal coefficient of subgrade reaction) and Z (depth) for different soil layers

小, 且 K_h 值随着深度的增加有逐渐变大的趋势, 可近似用线性关系表示: $K_h \approx 2000 + 250 \Delta Z$, K_h 为侧向基床反力系数, 单位 kN/m^3 , 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 。

(3) 各孔 ⑤ 层的侧向基床反力系数值比较接近,

且 K_h 值随着深度的增加有逐渐变大的趋势,可近似用线性关系表示: $K_h \approx 4500 + 400 \Delta Z$, 各单位符号意义同上。

(4) 侧向基床反力系数与土性关系很大,均匀土层的 K_h 值随深度变化可近似用线性关系表示,这与实际工程应用的假设相符。

5 结 论

(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,现有的测试方法均难以准确获得。扁铲侧胀试验(DMT)为快速、准确获得侧向基床反力系数提供了有效的原位试验手段。本文从 DMT 的机理出发,引入了基础宽度修正系数、形状修正系数、加荷速率修正系数,提出了一种直接利用 DMT 试验结果计算侧向基床反力系数的方法。

(2) 根据上海地区扁铲侧胀试验实测资料,利用式(15)求得的侧向基床反力系数值与规范推荐值相当吻合。对其它地区不同土性,式(15)的准确性还有待进一步验证。

(3) 扁铲侧胀试验能真实反映侧向基床反力系数随深度的变化关系;如果地基土不均,则所得结果较为离散,而若地基土较为均匀,侧向基床反力系数随深度的变化关系可近似用线性表示。

参考文献:

- [1] Marchetti S. The flat dilatometer(DMT) and its applications to geotechnical design[OL]. <http://www.marchetti-dmt.it>, 1999.
- [2] Mohammeda Gabr. Analysis of load deflection response of laterally loaded piers using DMT[A]. Penetration Testing[C]. 1988. 513-520.
- [3] 陈国民,钟建东,等. 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] 岩土工程手册编写委员会. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [5] 卢世深,等译. 旁压仪和基础工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1984.
- [6] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [7] DGJ 08-11-1999, 上海市地基基础设计规范[S].

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年,是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的核心期刊。由南京水利科学研究院承办,国内外公开发行人。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿,倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿,并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、展望 21 世纪岩土力学、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊 1999 年、2001 年两次获“自然科学基础性、高科技学术期刊经费”资助;本刊于 1992 年、1996 年、2000 年 3 次被确认为我国核心期刊;本刊被《中国学术期刊文摘》、《中国科学引文数据库》、《中国科技论文统计与分析数据库》收录;本刊被美国《工程索引》(Ei)确认为 Ei Page One 数据库收录期刊;本刊被 Geotechnical Engineering International Resources Center(GE-IRC)确认为岩土工程核心期刊。

凡本刊刊登的文稿均收入相应光盘版及 Internet 网。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为双月刊,大 16 开本,双栏排版,120 页左右,单月 30 日出版。每期定价 10 元,全年 60 元。漏订或缺者请向编辑部邮购。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000-4548,国内统一刊号 CN32-1124/TU,国内发行代号 28-62,国外发行代号 BM520。

本刊还承办广告业务,欢迎惠顾。

编辑部地址: (210024) 南京虎踞关 34 号

(南京水利科学研究院土工所内)

电话: (025) 5829553, 5829556 传真: (025) 5829555

E-mail: ge@njhri.edu.cn

网址: <http://www.cgejournal.com> 或 <http://ytgc.chinajournal.net.cn>

(本刊编辑部)