

软土基坑土压力测试及分布模式研究

韩 勤¹, 徐 立², 刘干斌³, 史世雍²

(1.宁波市交通工程质量安全监督站, 浙江 宁波 315040; 2.宁波大学 地基处理中心, 浙江 宁波 315020;
3.宁波大学 建筑工程与环境学院, 宁波 315211)

摘要: 选取宁波地区典型的软土基坑工程进行土压力现场实测研究, 探讨了主动、被动土压力随时间、深度的变化规律. 利用实测土压力值与围护结构位移曲线, 采用双曲线模拟主动土压力与位移之间的关系, 从而建立了土压力与位移关系的经验公式, 并利用实测数据对土压力公式的可靠性进行了验证. 最后, 根据实测数据初步绘制了宁波软土基坑土压力的包络图, 可为宁波地区软土基坑设计提供借鉴和参考.

关键词: 软土; 基坑; 土压力; 分布模式

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 04-0127-06

土压力是作用在基坑围护结构上的主要荷载, 土压力值的大小直接决定了围护结构的入土深度、桩(墙)身配筋率等基本参数, 从而影响围护结构的安全性及经济性. 土压力值不仅与土体本身性质有关, 而且与围护结构变形模式、变形大小、墙(桩)土界面模式、施工时间、降水固结等很多因素有关. 随着基坑施工工况的不同, 土压力值处于不断变化中^[1-2].

由于库伦-朗肯土压力理论的研究对象均为刚性挡土墙, 且同时假设土体处于极限状态, 20 世纪 40 年代, 太沙基首先提出对经典土压力的质疑. 太沙基通过大规模的模型试验, 研究挡土墙变位与土的极限状态关系, 认为只有当挡土墙达到一定位移, 土体发生剪切破坏时, 库伦-朗肯土压力理论才适用. 随后, 国内外学者围绕土压力值确定问题展开了大量的测试和理论研究工作^[3-4], 更加确定了土压力值与围护结构位移有关^[5-9], 并对此进行了深入分析.

为了解宁波地区软土基坑施工过程中作用在围护结构上的土压力变化情况, 在典型土质条件下, 笔者对软土深基坑工程进行土压力现场实测, 并在此基础上, 对宁波地区土压力值、分布模式、土压力与变形关系等内容方面进行了初步探索.

1 土压力现场监测

1.1 工程概况

工程位于宁波市海曙区, 东侧为环城西路, 南侧为通途路, 西侧为规划道路. 该工程下设一层大型地下车库, 地下室建筑面积 17 391 m², 计算开挖深度为 5.7~6.5 m, 采用“钻孔灌注桩+一道混凝土”支撑围护形式. 基坑围护范围内为典型宁波地区海相沉积软土, 除浅部硬壳层外, 各土层含水率高, 孔隙比大, 物理力学性质差. 软弱土层层厚很厚, 是影响围护结构主要土层, 好土层层顶标高埋深很深, 对围护结构影响很小. 各土层物理力学性质见表 1.

1.2 土压力监测方案

在胜丰商贸园工程一层地下室基坑工程中, 通过记录监测断面土压力值、施工工况等基本信息, 了解各施工工况下土压力变化规律. 以测斜管作为骨架, 将土压力盒绑扎在测斜管上. 现场埋设时, 在指定位置成孔到指定深度, 待成孔结束, 迅速将测斜管按顺序放入, 同时确保主动(被动)区土压力计压力膜所在面正对坑外(内)土体. 土压力监测共埋设 2 个断面, 1#断面位于北侧中段, 2#断面位于东北角, 具体平面布置如图 1 所示. 每个断面共 10

表1 各土层物理力学性质

层号	土层名称	层厚/m	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内聚力/kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	含水量/%	空隙比
Z	杂填土	0.36~1.74	18.00	10.0	15.0	—	—
1	粘土	0.3~1.4	18.34	21.4	12.1	37.6	1.073
2-1	淤泥质粘土	3.0~4.1	17.40	11.3	9.6	47.8	1.420
2-2	淤泥质粉质粘土夹淤泥	4.2~7.9	16.99	10.6	8.9	53.5	1.530
2-3	淤泥质粘土	9.3~13.3	17.31	13.0	9.6	48.1	1.380
4	粘土	5.8~22.3	17.59	17.6	11.4	44.9	1.001

个土压力计(主动区 8 个, 被动区 2 个). 主动区首个土压力计置于冠梁下 2 m, 即地面下 3.7 m 处, 其余主动区土压力计每个间隔 2 m 布置. 被动区首个土压力计放置于坑底以下 5 m 处, 其余被动区土压力计每个间隔 5 m 布置.



图1 胜丰商贸园土压力测试典型剖面

1.3 土压力实测数据分析

1.3.1 主动土压力变化规律

1#断面实测主动土压力在各工况下随深度变化如图2所示. 由图2可知, 桩后主动区土压力沿深度在 16 m 以上呈近似三角形分布, 在 16 m 以下呈近似矩形分布, 这种分布形式随基坑开挖基本保持不变. 随着基坑开挖的进行, 各深度处土压力随着开挖工况的进行均呈逐渐减小趋势, 土压力减小基本发生在基坑开挖工与垫层浇筑工况之间, 垫层完成后, 土压力值基本保持不变. 实测土压力值均小于郎肯主动土压力值.

2#断面实测主动土压力在各工况下随深度变化如图3所示. 由图3可见, 桩后主动区土压力沿深度呈近似三角形分布, 这种分布形式随基坑开挖基本保持不变. 随着基坑开挖的进行, 各深度处土压力随着开挖工况的进行均呈逐渐减小趋势.

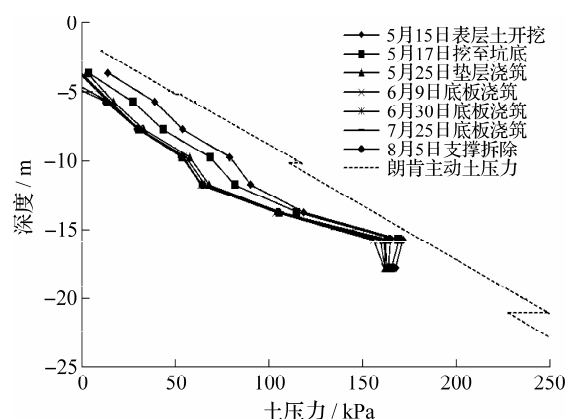


图2 1#断面主动区土压力随深度变化情况

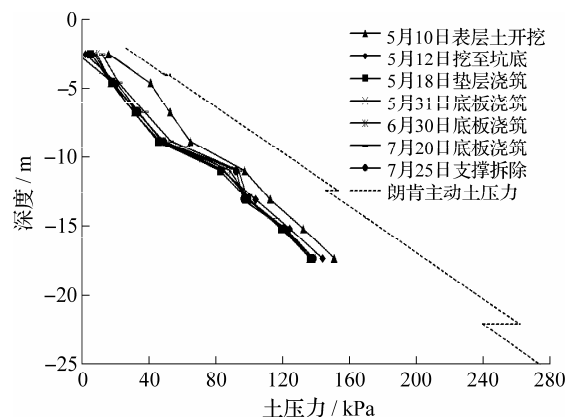


图3 2#断面主动区土压力随深度变化情况

与1#断面相类似, 2#断面土压力减小基本发生在基坑开挖工与垫层浇筑工况之间, 实测土压力值均小于郎肯主动土压力值.

对比图2与图3可发现, 2#断面在开挖到设计标高到垫层浇筑工况之间时, 土压力减小值明显小于1#断面, 这是由于2#断面处基坑暴露时间较长, 垫层浇筑不及时, 主动区土体变形发展, 导致主动土压力值进一步减小.

一般情况下由于支撑的存在, 限制了支护结构的水平位移, 使支护结构后的土体形成土拱, 导

致本工程深层土体位移曲线的曲率在 15 m 左右突变减小, 土压力在此位置开始按矩形分布(如 1#断面). 由于 2#断面主动区土体变形发展, 深层水平位移沿深度近似呈线性变化, 土压力在 15 m 上下均呈三角形分布. 由此可见, 土压力的分布与围护结构的水平位移具有相关性.

1.3.2 被动区土压力变化规律

图 4 和图 5 为 1#和 2#断面实测被动土压力沿深度的变化情况. 从 2 个图形中可见, 被动土压力沿深度呈三角形分布, 随着施工工况的进行逐渐减小, 土压力减小幅度随着埋设深度依次减小, 各深度处实测被动土压力值均小于挖到坑底工况时的朗肯被动土压力值.

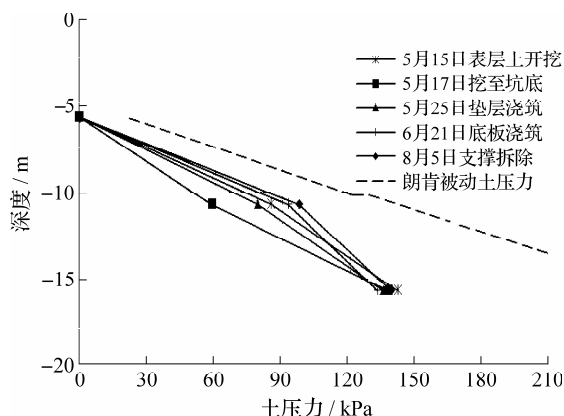


图 4 1#断面被动区土压力随深度变化情况

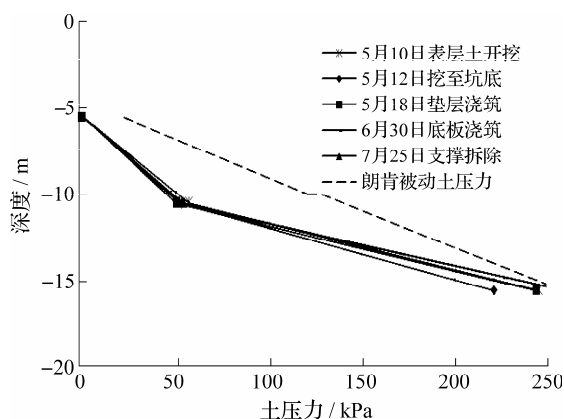


图 5 2#断面被动区土压力随深度变化情况

1.4 实测土压力与位移关系

1.4.1 主动区土压力与位移关系

深基坑主动土压力与挡墙侧向位移的关系如图 6 所示, 结合国内外学者的研究^[6-7], 采用双曲函数来模拟两者之间的关系:

$$\sigma_{\delta} = \bar{C} - \delta_y / (\bar{A} + \bar{B} \cdot \delta_y), \quad (1)$$

式中, σ_{δ} 为主动土压力; δ_y 为挡墙侧向位移; 待定系数 $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ 、 $\bar{C}$ 可以通过土体的卸荷应力路径试验确定. 因此从实测数据出发, 可以计算出系数 $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ 、 $\bar{C}$ 的值.

主动土压力表达式为:

$$\sigma_a = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_{acr}) \cdot \alpha \delta / (1 - \delta), \quad \delta \leq 0, \quad (2)$$

式中, σ_0 表示静止土压力; σ_{acr} 为极限主动土压力; α 为主土压力修正系数; δ 为围护结构侧移值, 主动区位移取负值, 被动区位移取正值.

从土压力值与位移曲线关系的图 6 可以看出, 曲线的一阶导数恒小于零, 表示土压力与墙体最大侧移关系为单调递减函数, 即随着侧向位移的增大, 土压力值随之减小.

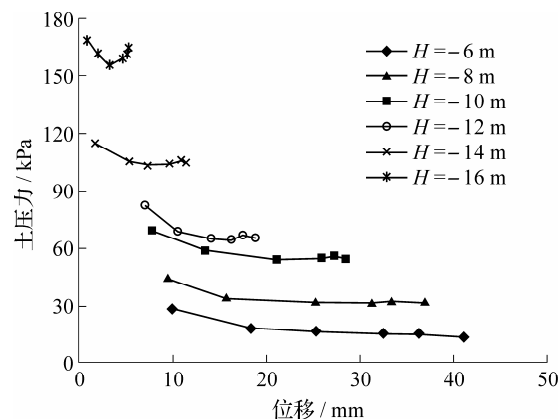


图 6 1#断面主动土压力与位移关系

当位移为零时, 作各深度处土压力位移曲线的切线, 即作土压力位移曲线的初始斜率. 从图 6 中还可以看出, 初始斜率绝对值随着所测土压力位置深度增大而增大. 由此可得出, 软土深基坑工程在基坑施工初始阶段, 主动区土体初始应变引起的土压力的减小值, 深度较深处土体土压力的减小幅度比较浅处土体土压力减小幅度大.

土压力对位移双曲线的二阶导数恒大于零, 这表明土压力位移曲线的切线斜率随位移的增大而逐步增大, 也就是土压力位移曲线随着位移的增大而逐步平缓.

1.4.2 被动区土压力与位移关系

随着基坑开挖的进行, 各深度处的被动区土压力均呈减小趋势; 开挖面以上被动区土压力与挡墙位移曲线呈近似线性关系, 与传统朗肯理论计算结果类似, 未表现出双曲线关系. 在开挖面以下的被动区土压力与挡墙位移曲线逐渐呈现双曲

线关系,这与基坑开挖侧土体的降水、固结、加固、扰动等一系列影响因素有关.总而言之,与主动土压力类似,被动区土压力的计算也是一个极为复杂的问题,既是时间的函数,也是基坑开挖施工工况及位移的函数.

2 土压力分布模式

2.1 土压力计算公式修正

由于影响被动区土压力的因素较为复杂,除基坑变形导致被动土压力的变化以外,还存在覆土卸除、坑底加固等一系列因素会对被动土压力产生影响.鉴于实验条件有限,仅仅通过被动土压力值实测并不能将众多因素对被动土压力的影响研究清楚,只能在变化趋势上得出一定的结论.同时,被动区土压力计位于基坑内,施工单位夜间土方开挖施工对实验仪器破坏比较严重,导致被动区实验数据不充足.

土的自重应力公式如下:

$$E = \sum \gamma_i H_i,$$

式中, γ_i 为计算点以上第 i 层土的重度, $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$, 地

下水位以上取天然重度, 地下水位以下取饱和重度; H_i 为计算点以上第 i 层土的厚度, m . 实测主动土压力值为基坑开挖到坑底工况, 主动土压力达到稳定状态时的实测值. 定义实测主动土压力值与 E 的比值为实测主动土压力系数. 所有 5 个主动区土压力监测断面实测土压力值、 E 值以及静止、最终主动土压力系数见表 2 和表 3.

根据表 2 和表 3 中的数据, 作静止土压力系数与相应深度的关系图(图 7). 图中数据点较为离散,

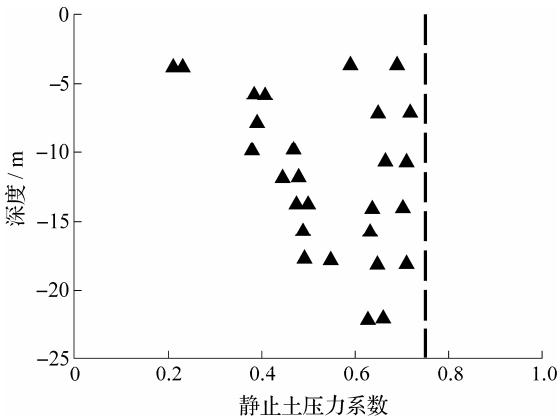


图 7 静止土压力系数与深度关系

表 2 胜丰商贸园 1#断面土压力值

深度/m	土的自重 应力/ kPa	朗肯主动 土压力/kPa	实测静止 土压力/kPa	实测主动 土压力/kPa	静止土压 力系数	主动土压 力系数
-3.70	65.52	31.26	14.00	-13.75	0.21	-0.21
-5.70	100.10	59.39	38.57	13.98	0.39	0.14
-7.70	134.10	85.08	53.77	30.85	0.40	0.23
-9.70	168.10	110.75	78.66	55.26	0.47	0.33
-11.70	202.10	129.89	89.89	65.76	0.44	0.33
-13.70	236.43	155.45	117.95	105.44	0.50	0.45
-15.70	271.43	181.01	171.26	161.80	0.63	0.60
-17.70	306.43	206.57	167.38	162.82	0.55	0.53

表 3 胜丰商贸园 2#断面土压力值

深度/m	土的自重 应力/ kPa	朗肯主动 土压力/kPa	实测静止 土压力/kPa	实测主动 土压力/kPa	静止土压 力系数	主动土压 力系数
-3.70	65.69	31.06	15.32	11.41	0.23	0.17
-5.70	100.19	59.17	40.71	21.76	0.41	0.22
-7.70	134.19	84.86	52.55	37.70	0.39	0.28
-9.70	168.19	110.54	64.50	52.94	0.38	0.31
-11.70	202.42	136.22	97.38	93.92	0.48	0.46
-13.70	237.42	154.60	112.79	99.44	0.48	0.42
-15.70	272.42	180.16	132.66	121.74	0.49	0.45
-17.70	307.42	205.72	151.42	138.88	0.49	0.45

并无明显规律, 这是由于埋设仪器时需打设 20 cm 钻孔, 孔壁附近土体在基坑开挖前固结状态难以估计, 导致静止土压力值规律性较差. 但从图中可以看出, 全深度静止土压力系数最大值均不超过 0.75, 因此, 建议以 0.75 系数作为静止土压力系数参考值.

实测主动土压力系数与深度关系如图 8 所示, 图中数据呈现出较好规律性. 在 15 m 深度以上, 主动土压力系数随着深度的增加而增加, 基本上呈线性增长. 在 15 m 深度以下, 主动土压力系数随着深度的增加基本上保持不变.

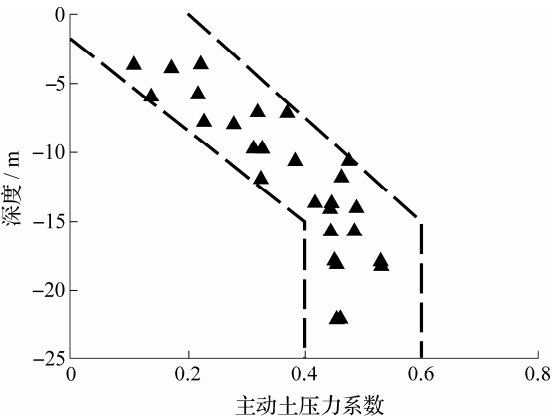


图 8 实测主动土压力系数与深度关系

考虑到基坑安全性, 建议以右侧虚线作为主动土压力计算值的控制线, 可得出主动土压力计算公式:

$$\sigma_a = R \cdot E = R \cdot \sum \gamma_i H_i, \tag{3}$$

式中: $R = h / 37.5 + 0.2 (h \leq 15)$, $R = 0.6 (h > 15)$.

(2)式是根据实测土压力值的包络线求得, 带有较多的实践性与经验意义. 该公式简单, 使用方便, 可以在基坑围护设计初步计算时使用, 其计算结果与经典朗肯理论有一定的差异, 其正确性还需要更多的工程实践进行验证.

2.2 土压力公式验证

由于被动区土压力实测受到众多因素影响, 因此根据工程中的 2 个断面实测围护结构位移与主动土压力对土压力公式(2)进行验证.

根据工程的断面土压力实测值及测斜值(图 9 和图 10), 选取垫层浇筑完毕工况, 代入主动土压力公式(2), 推算 α 值, 计算结果见表 4. 取 α 值取平均值计算, 可得 $\alpha = 4.00$, 继而(2)式变为:

$$\sigma_a = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_{acr}) \cdot 4\delta / (1 - \delta), \delta \leq 0. \tag{4}$$

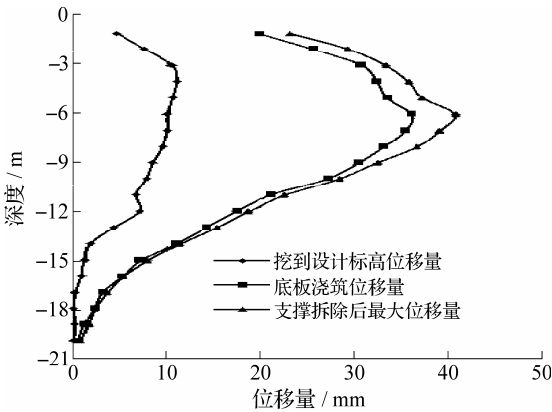


图 9 胜丰商贸园 1#断面测斜

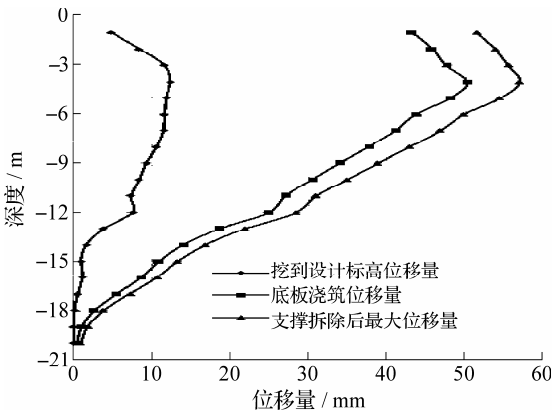


图 10 胜丰商贸园 2#断面测斜

表 4 1#断面各深度处主动土压力与侧移汇总表

深度/ m	位移值/ mm	主动土压 力/kPa	主动土压力 修正系数
-3.70	32.46	0.25	2.82
-5.70	36.18	13.98	4.00
-7.70	33.20	30.85	4.64
-9.70	27.22	55.26	4.79
-11.70	17.54	65.76	4.18
-13.70	10.92	105.44	3.59
-15.70	5.14	131.80	3.80

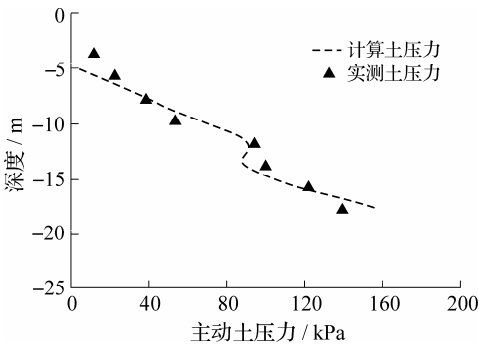


图 11 2#断面主动土压力实测值与计算比较结果

利用 2#断面实测数据对(4)式进行验证, 将各深度处垫层浇筑完毕工况测斜值代入(4)式, 计算得到主动土压力分布曲线, 将 2#断面实测值与该曲线进行比较(图 11). 图中实测值点基本上与计算曲线比较接近, 说明(4)式较好地模拟了主动土压力的分布.

3 结论

选取宁波地区有代表性的基坑进行土压力现场实测研究, 并探索宁波地区软土基坑土压力分布模式, 主要结论如下:

(1) 本工程主动区土压力在 15 m 深度以上呈三角形分布, 15 m 以下呈矩形, 与规范计算结果近似. 由于主动区土体变形发展, 实测 15 m 以下土压力分布发生变化, 呈三角形分布, 可见土压力与围护结构位移具有相关性.

(2) 引入实测主动土压力系数概念, 利用实测主动土压力数据, 作土压力包络曲线, 通过对曲线的函数简化, 给出计算主动土压力的经验公式.

(3) 主动土压力与位移可以利用双曲线模拟, 给出了土压力与位移关系公式的主动土压力修正系数 $\alpha = 4.0$, 并通过实测工程对主动土压力公式

进行验证, 计算精度较好.

参考文献:

- [1] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997:16-78.
- [2] Silvestri V, Ashok k, Chugh D R P. Lateral earth pressure problem of cohesive backfill with inclined surface[J]. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1996, 122(6):863-873.
- [3] 陈富云, 李川, 陈尔阔, 等. 双膜式光纤 Bragg 光栅土压力传感器的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(11):3340-3344.
- [4] 彭社琴, 赵其华. 超深基坑土压力监测成果分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(4):658-661.
- [5] 胡敏云, 夏永承, 高渠清. 桩排式支护壁桩侧土压力计算原理[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3):376-379.
- [6] 徐日庆. 考虑位移和时间的土压力计算方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2000, 34(4):370-375.
- [7] 梅国雄, 宰金珉. 考虑位移影响的土压力近似计算方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(4):83-85.
- [8] 郭竞宇, 赵其华, 张建刚. 围护结构上土压力实例分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2):246-248.
- [9] 魏焕卫, 杨敏, 贾强, 等. 基于 Mindlin 解的土压力位移计算模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(2):495-502.

Earth Pressure Measurement and Distribution for Soft Soil Foundation Pit

HAN Qin¹, XU Li², LIU Gan-bin³, SHI Shi-yong²

(1.Ningbo Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Station, Ningbo 315040, China;

2.Soil Improvement Center, Ningbo University, Ningbo 315020, China;

3.Faculty of Architectural Engineering, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: A typical engineering project on soft soil foundation pit in Ningbo is selected for implementing the measurement of earth pressure, studying the law of active and passive earth pressure changing with time and depth. Using the measured earth pressure curve and the displacement of retaining structure, the hyperbolic model describing the relation between the active earth pressure and displacement is constructed on which the empirical equation governing the relationship between earth pressure and displacement is obtained. The reliability of earth pressure formula is validated using the on-site data from which the primary envelope map of soft soil earth pressure in Ningbo area is drawn.

Key words: soft soil; foundation pit; soil pressure; distribution model

(责任编辑 章踐立)