

有限土体主动土压力数值计算及参数分析*

黄娟, 王琪琪, 杨建军

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为研究填土宽度、粘聚力、内摩擦角和计算深度等对墙后有限宽度土体主动土压力分布的影响, 建立有限土体数值计算模型, 结合工程算例, 将有限元法与前人提出的几种有限土体主动土压力计算方法进行对比分析。结果表明, 在同一深度处, 有限土压力随土体粘聚力的增大而减小, 随摩擦角和计算宽度的增大而增大; 主动土压力随有限土体宽高比的变化呈上凸曲线, 在一定填土宽度范围内, 墙背和已有建筑物墙背越粗糙, 摩擦系数越大, 主动土压力越大; 有限元法的分析结果与基于极限平衡理论及平面滑裂面假定的有限土体主动土压力计算方法的结果最相近。

关键词: 公路; 挡土墙; 有限土体; 主动土压力; 粘聚力; 数值分析

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)05-0071-04

库伦和朗肯土压力理论在挡土墙主动土压力计算中应用广泛, 其假定条件之一是墙后土体是半无限体, 滑裂面延至地面形成滑动楔体。但在挡墙距离既有建筑物很近、墙后填土宽度有限的情况, 经典土压力理论则不适用。由于城市的高速发展, 建筑用地得到极大开发, 地下工程不断兴起, 一般在基坑附近都会有地下室或其他建筑物, 故在挡墙和建筑物有限的空间内存在填土; 在山区, 挡墙和岩质边坡中间有时也只有有限的空间存在填土。这类土体即为有限土体。

杨明辉等分析墙后有限土体的破坏模式和位移特征, 在考虑应力偏转的基础上, 利用水平薄层法推导了考虑位移非线性的有限土体主动土压力计算公式; 王洪亮等考虑墙—土间作用力计算有限土体主动土压力; 赵琦等应用土拱效应计算挡土墙主动土压力; 岳树桥等借鉴筒仓受力原理计算基坑开挖中有限宽度土条的主动土压力; 王闫超采用薄层单元法推导了极限破裂角解析公式; 陈建功推导了主动土压力泛函数极值的等周模型; 赵均海等考虑中间主应力效力, 建立了非饱和土库伦主动土压力统一解; 王仕传等推导了不同条件下土压力解析公式; 应宏伟、Fan C. C. 等采用有限元法计算有限土体土压力。有限土体土压力问题在实际工程设计和施工中越来越常见, 但其变化规律在不同环境条件下复杂多变。该文在已有研究的基础上, 建立二维有限元

模型进行计算, 并与前人理论研究作比较, 以找到合适的计算方法, 为实际工程设计及施工提供指导。

1 几种有限土体主动土压力解析方法

方法一: 高印立基于土的塑性上限理论, 提出如下有限土体主动土压力强度表达式:

$$P_a = (2 - m_a) m_a \gamma h K_a - 2c m_a \sqrt{K_a} \quad (1)$$

式中: P_a 为有限土体主动土压力的强度 (kPa); $m_a = b/Hc \tan(45^\circ - \varphi/2)$, $m_a > 1$ 时, 取 $m_a = 1$; $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ 。

方法二: 马平等基于极限平衡理论及平面滑裂面假定, 先求出土体剪切破坏角, 再采用差分法计算有限土体主动土压力 (见图 1), 计算公式如下:

$$\theta' = a \tan \left\{ \frac{1}{2(\gamma b \tan \varphi + 2c \tan \varphi)} [-2\gamma b - 4c + 2(\gamma^2 b^2 + 4\gamma b c + 4c^2 + 2\gamma^2 b z \tan^3 \varphi + 2\gamma^2 b z \tan \varphi + \gamma^2 b^2 \tan^2 \varphi + 4\gamma b c \tan^2 \varphi + 4\gamma z c \tan^3 \varphi + 4\gamma z c \tan \varphi + 4c^2 \tan^2 \varphi)^{1/2}] \right\} \quad (2)$$

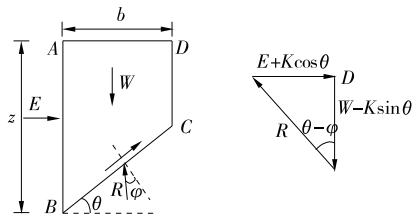


图 1 有限土体主动土压力计算简图 (方法二)

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51478053); 交通运输部道路结构与材料交通行业重点实验室 (长沙) 开放基金重点资助项目 (KFJ120201)

$$E = [\gamma b(z - \frac{b}{2} \tan \theta) - bc \tan \theta] \tan(\theta - \varphi) - bc \quad (3)$$

$$e_{a|z} = \frac{z_1 + z_2}{2} = \frac{\Delta E_a}{\Delta z} = \frac{E_{a|z=z_2} - E_{a|z=z_1}}{z_2 - z_1} \quad (4)$$

式中: e_a 为主动土压力的强度(kPa); E 为土压力的合力(kN); E_a 为主动土压力的合力(kN)。

方法三: 杨明辉等基于水平薄层法和变形区的土拱理论, 将有限土体变形区分为矩形区和三角形区(见图2), 建立有限土体侧向土压力基本微分方程, 分别推导了 a、b 两区域在极限状态下的主动土压力表达式。

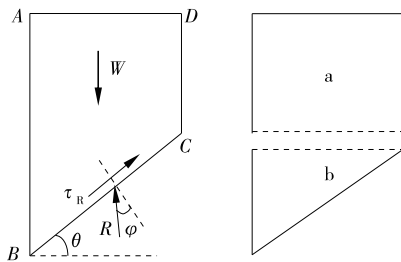


图2 有限土体主动土压力计算简图(方法三)

方法四: 王文杰等将主动土压力当作静止土压力, 在假设土体发生小变形、基坑支护结构都为刚性结构的条件(见图3)下, 提出如下计算公式:

$$\sigma_z = (\gamma/A) - [(\gamma/A) - (q + c \cot \varphi)] e^{-AZ} - c \cot \varphi \quad (5)$$

$$\sigma_x = k_0 \sigma_z = \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_z \quad (6)$$

式中: σ_z 为土体的竖向应力(kPa); γ 为土体的重度(kN/m³); $A = 2k_0 \tan \varphi / b$; k_0 为土压力系数; φ 为土体摩擦角(°); q 为土体表面荷载(kPa); c 为土体粘聚力(kPa); σ_x 为土体水平向应力(kPa); μ 为土体泊松比。

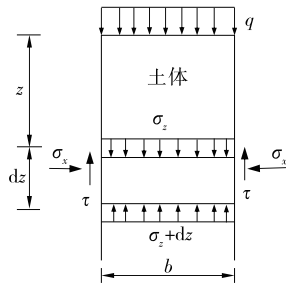


图3 有限土体主动土压力计算简图(方法四)

2 有限元法与解析法的比较计算

挡土墙、墙后土体及已有建筑物见图4。设墙

高为 H , 挡土墙与已有建筑物的距离为 b (见图5), 若 b 足够宽, 则:

$$b \geq \frac{h}{\tan(45^\circ + \varphi/2)} \quad (7)$$

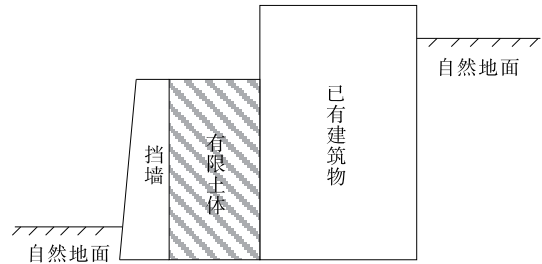


图4 有限土体示意图

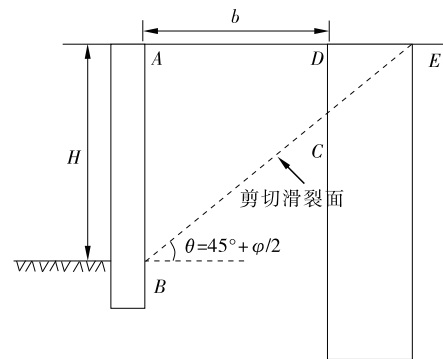


图5 有限土体破坏模式示意图

根据朗肯或库仑土压力理论, 过支护结构底部的直线 BCE 为其剪切滑裂面, 其与水平线夹角为 $45^\circ + \varphi/2$ 。因为存在已有建筑物地下墙, 剪切滑裂面 BCE 的发展受到阻碍, 只延伸到 BC 段, 故 b 不满足式(7)时就形成了 $ABCD$ 梯形滑动体, 构成有限土体状态, b 即为有限土体宽度。

采用有限元法对邻近既有地下室挡土墙的主动土压力进行分析, 在文献[10]有限土体刚性挡墙土压力数值模型的基础上, 建立图6所示数值分析模型, 其中模型假定、接触面设置及荷载设定与文献[10]基本相同, 在填土右侧增加建筑外墙以模拟邻

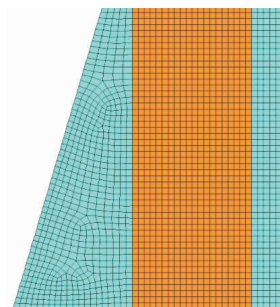


图6 数值分析模型

近既有建筑物,模型中挡土墙及建筑外墙作刚性假定,挡土墙及建筑外墙采用 Plane82 单元,土体采用 Plane82 平面应变单元,满足莫尔-库仑塑性准则;考虑墙土接触,采用接触单元 Conta172 和 Targe169,接触单元摩擦系数 $\mu=0.25$ 。模型的边界条件:底部采用竖向约束,底部节点竖向位移为零;土体右侧采用水平向约束,右侧节点水平位移为零。只施加重力荷载。将 4 m 宽土体划分为 $20 \times 50=1\,000$ 个单元,将 1 m 宽建筑物外墙划分为 $5 \times 50=250$ 个单元,将挡土墙划分为 625 个单元。模型尺寸:有限土体宽 4 m,高 10 m;刚性挡墙高 10 m,上底宽 1 m,下底宽 4 m;模型右侧建筑外墙高 10 m,宽 1 m。表 1 为土体、挡土墙和已有建筑物的物理力学参数。

表 1 模型采用的物理力学参数

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
土体	2 000	0.26	0.32
挡土墙	2 500	30.00	0.17
已有建筑物	2 500	30.00	0.17

假设两种情况,分别为 $c=0 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=30^\circ$ 的砂土和 $c=15 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=20^\circ$ 的黏性土,分别采用上述 4 种方法和有限元法进行计算,结果见图 7、图 8。

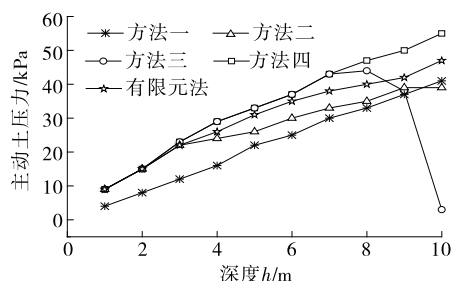


图 7 有限砂土主动土压力计算结果对比

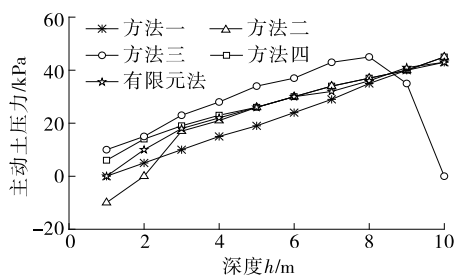


图 8 有限黏土主动土压力计算结果对比

由图 7、图 8 可知:4 种方法的计算结果的变化趋势与有限元法一致,大小也相近,其中方法二和方法四与有限元法最相近,方法一的结果最小。方法一和方法二基于极限平衡理论,方法三和方法四基

于土体小变形假设。方法一基于塑性上限理论分析,对于砂性土,有限土体的主动土压力小于朗肯主动土压力;对于黏性土,在一定开挖深度及土参数条件下,有限主动土压力可能会大于朗肯主动土压力。方法二基于平面滑裂面假定分析,滑裂面的剪切破坏角随土体深度增大而增大,但随内摩擦角增大,剪切破坏角先减小后增大。方法三基于水平薄层单元法,分别采用微分原理分析,结果与已有试验研究所得挡墙土压力分布规律吻合,墙后土压力先随深度增加而逐渐增大,但增大到一定值后逐渐减小。方法四建立力平衡微分方程,把主动土压力作静止土压力分析,随填土深度的增加,有限土体主动土压力逐渐趋于一定值。对于有限砂土,有限元法与方法四最接近;在浅部(0~6 m 处)方法三与有限元法较接近,之后越来越偏离;方法一计算结果最小。对于有限黏土,在 0~8 m 处方法三计算结果最大,之后逐渐减小;方法二和方法四与有限元法最接近,方法二在浅部(0~3 m 处)计算结果最小。

3 有限土体土压力影响参数分析

影响有限土体主动土压力大小的参数主要包括有限土体宽度、土体内摩擦角和粘聚力,采用有限元数值计算方法分析各参数的影响。

设粘聚力 $c=15 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi=15^\circ$,分别取 b 为 $1.5H$ 、 $3H$ 、 $4.5H$,其他参数与图 6 相同。不同宽度下有限土体主动土压力随土体深度的变化见图 9。由图 9 可知:不同宽度有限土体主动土压力变化趋势一致,都随着土体深度的增加而增大,初始时趋近于朗肯主动土压力,达到一定深度后主动土压力逐渐减小,并与朗肯主动土压力相差越来越大;随宽度 b 的增加,有限土体主动土压力逐渐增大,且增幅随着深度增加而加大,在土体较浅处更接近朗肯土压力。在相同条件下,有限土体宽度 b 越大,则作用于墙背的水平土压力越大,土体更易发生变形,稳定

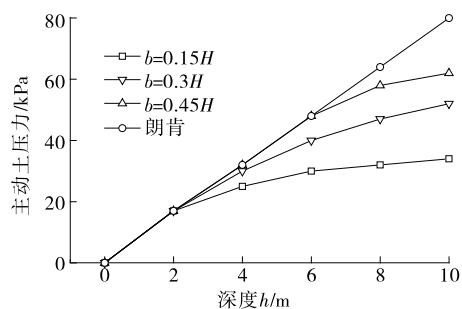


图 9 不同宽度时有限土体主动土压力

性越差,土体更易产生竖直沉降和水平位移,达到极限平衡状态。结合图6,越靠近墙踵位置,土压力越大,产生相对位移的土体越大,相对较危险。而当宽度达到一个限度时,相当于半无限体,土压力与朗肯计算结果近似。

设内摩擦角 $\varphi = 15^\circ$, 土体有限宽度 $b = 2$ m, 分别取 c 为 10、13、16 kPa, 其他参数与图6相同。不同粘聚力 c 下有限土体主动土压力随土体深度的变化见图10。由图10可知:随土体深度增加,有限土体主动土压力先快速增大,到一定深度后逐渐减小;相同深度时,有限土体主动土压力随着粘聚力的增大而逐渐减小。

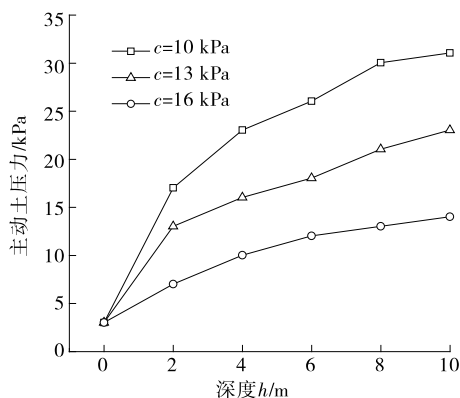


图10 不同粘聚力时有限土体主动土压力

设粘聚力 $c = 15$ kPa, 土体有限宽度 $b = 2$ m, 分别取 φ 为 15° 、 18° 、 21° , 其他参数与图6相同。不同内摩擦角 φ 下有限土体主动土压力随土体深度的变化见图11。由图11可知:随土体深度增加,有限土体主动土压力先快速增大,到一定深度后逐渐减小;在同一深度处,有限土体主动土压力随着内摩擦角的增大而增大。

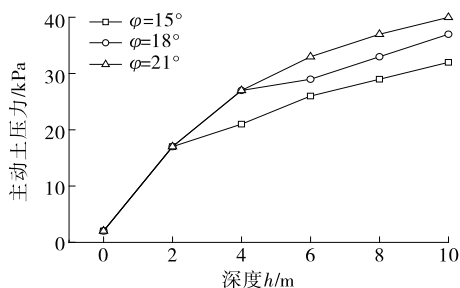


图11 不同内摩擦角时有限土体主动土压力

设粘聚力 $c = 10$ kPa, 内摩擦角 $\varphi = 15^\circ$, 挡墙高 10 m, 取挡土墙、已有建筑物与填土间的接触单元摩擦系数 μ 分别为 0.6、0.3、0, 其他参数与图6相同, 计算不同填土宽高比时的最大主动土压力, 结果见图

12。由图12可知:主动土压力随有限土体宽高比的变化曲线都是上凸的, 当填土宽度较小时, 主动土压力随填土宽度增大而增大, 达到最大值后随填土宽度增大而减小, 直到达到一定值, 该值与库伦理论计算值大小相近。在一定填土宽度范围内, 墙背和已有建筑物墙背越粗糙, 摩擦系数越大, 主动土压力越大。

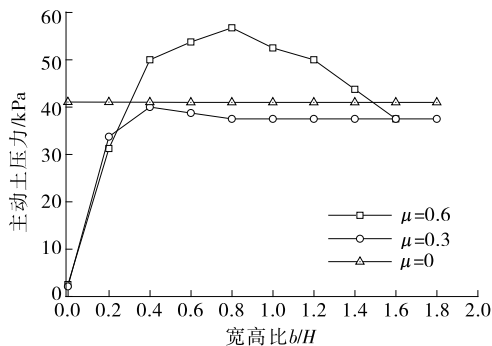


图12 主动土压力与填土宽度的关系

4 结论

(1) 有限土压力沿深度的分布规律没有因为墙后不同土体计算宽度、土体粘聚力及土体内摩擦角取值而改变, 在同一深度处, 有限土压力随土体粘聚力的增大而减小, 随土体内摩擦角和计算宽度的增大而增大; 主动土压力随有限土体宽高比的变化呈上凸曲线, 在一定填土宽度范围内, 墙背和已有建筑物墙背越粗糙, 摩擦系数越大, 主动土压力越大。

(2) 有限元计算结果与前人方法的计算结果增长趋势一致, 与基于平面滑裂面假定及极限平衡理论的有限土体主动土压力计算方法的结果最相近。该文只是在理论上借助有限元法比较几种有限土体土压力计算方法的差异, 在实际工程应用中, 如何计算有限土压力还需通过试验和工程实践不断完善。

参考文献:

- [1] 张健, 王新征, 胡瑞林. 地震作用下挡土墙主动土压力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4).
- [2] 杨明辉, 汪罗成, 赵明华. 考虑变形非线性影响的有限土体土压力计算模型[J]. 水利学报, 2012, 43(9).
- [3] 王洪亮, 宋二祥, 宋福渊. 紧邻既有建筑基坑有限土体主动土压力计算方法[J]. 工程力学, 2014, 31(4).
- [4] 赵琦, 朱建明. 临近地下室外墙影响下的考虑土拱效应的挡土墙主动土压力研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3).
- [5] 岳树桥, 左人宇, 陆钊. 相邻基坑有限宽度土条主动土压力的计算[J]. 岩土力学, 2016, 37(7).

(下转第114页)

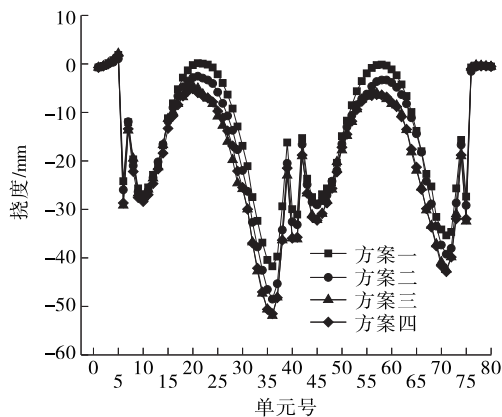


图8 不同模拟方案下成桥10年后主梁挠度对比

案三、方案四其变形较小,差值最大9 mm;方案三、方案四的位移结果很接近,差值最大仅3 mm。

6 结论

模拟方案一、方案二未考虑桥墩的作用,将临时固结和桥墩的刚度视为无穷大,不能很好地模拟实际结构的受力与变形情况。方案三对于临时固结的模拟较简单,适用于临时固结刚度相对较大的结构。方案四在模拟工程实际临时固结的基础上考虑桥墩的影响,主梁的弯矩可有效传递给桥墩,有利于施工中桥梁结构的稳定性控制;桥墩在其自身和上部结构自重及收缩徐变作用下会产生一定位移,体系转换后,主梁挠度更符合实际,可为施工预拱度提供更准确的数值。建议在对连续梁进行建模时,建立桥墩单元及与工程实际相符的临时支撑单元,将其与

相应位置的主梁节点刚性连接,以此模拟临时固结;体系转换后,将临时支撑单元与刚性连接钝化,根据设计资料建立支座上、下节点,通过刚性连接将墩顶和主梁节点分别与支座上、下节点连接,支座上、下节点使用一般弹性连接,设置各方向的刚度模拟支座各方向的刚度,以此模拟连续梁的体系转换。

参考文献:

- [1] 魏胜勇,王根会.结构体系转换对PC连续梁桥变形的影响研究[J].兰州交通大学学报,2004,36(1).
- [2] 范立础.预应力混凝土连续梁桥[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 向中富.桥梁施工控制技术[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [4] 徐君兰.大跨度桥梁施工控制[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [5] 尤振华.连续梁桥悬臂施工临时固结措施及其影响研究[D].南京:东南大学,2015.
- [6] 高翔,李广平.南丫大桥上部施工0#块临时固结施工技术[J].中国水运,下半月,2012,12(4).
- [7] 靳敏超,管昌生,冯仲仁,等.多跨连续梁桥临时固结及挠度影响研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(10).
- [8] 郝海峰.多跨预应力混凝土连续梁桥合理合龙方案研究[D].西安:长安大学,2011.
- [9] 陈麟.超静定多跨连续梁体系转换中应注意的问题[J].铁道标准设计,1999(增刊2).

收稿日期:2018-11-27

(上接第74页)

- [6] 王闫超,晏鄂川,陆文博,等.无黏性有限土体主动土压力解析解[J].岩土力学,2016,37(9).
- [7] 陈建功,徐晓核,张海权.一般条件下主动土压力的变分求解[J].岩土力学,2015,36(增刊2).
- [8] 赵均海,梁文彪,张常光,等.非饱和土库仑主动土压力统一解[J].岩土力学,2013,34(3).
- [9] 王仕传,孙本杰,邵艳.改进的主动土压力计算方法[J].岩土力学,2015,36(5).
- [10] 应宏伟,黄东,谢新宇.考虑邻近地下室外墙侧压力影响的平动模式挡土墙主动土压力研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增刊1).
- [11] Fan C C, Fang Y S. Numerical solution of active earth pressures on rigid retaining walls built near rock faces [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(7/8).

- [12] 高印立.极限分析法计算有限范围土体土压力[J].建筑结构,2001,31(8).
- [13] 马平,秦四清,钱海涛.有限土体主动土压力计算[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1).
- [14] 王文杰,曾进群,陈小丹.深基坑开挖中有限土体土压力计算方法探讨[J].岩土工程界,2004,8(3).
- [15] 黄旺,杨建军,黄娟.几种挡土墙主动土压力理论对比及墙体应力分析[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2017,14(3).
- [16] 周子舟.有限土体主动土压力计算方法的比较[J].工程勘察,2015(1).
- [17] 刘忠玉.有限无黏性填土刚性挡土墙主动土压力计算[J].中国公路学报,2018,31(2).

收稿日期:2019-02-25