

基坑单支撑拱形围护结构性状分析

Behavior analysis of single strut arched retaining structure in foundation pits

张土乔, 张仪萍, 龚晓南
(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对单支撑拱形围护结构的性状作了较系统的分析, 考虑了拱脚桩变形、插入深度、坑底土质、拱形状、支撑位置、支撑刚度、拱壁刚度和土压力平面分布形式等因素对单支撑拱形围护结构性状的影响。详细地分析了各因素对单支撑拱形围护结构性状的影响规律, 这些规律对单支撑拱形围护结构的设计与应用具有重要的参考价值。

关键词: 基坑; 单支撑拱形围护结构; 性状分析; 影响因素

中图分类号: TU 46⁺ 3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)01-0099-05

作者简介: 张土乔, 男, 1963年生, 岩土工程专业博士, 浙江大学教授, 主要从事城市给排水、市政基础工程、管道与基础相互作用等方面的科研教学工作。

ZHANG Tu-qiao, ZHANG Yi-ping, GONG Xiao-nan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The behavior of single strut arched retaining structure is analyzed. The influence factors include the deformation of arch foot pile, the embedded depth, the characteristics of soil under the bottom of excavation, the shape of arch, the position and the stiffness of strut, the stiffness of buttress and the distribution of soil pressure. The influences of these factors, which are important to guide the design and application of single strut arched retaining structure, are described in detail in this paper.

Key words: foundation pits; single strut arched retaining structure; behavior analysis; influence factors

1 前言^{*}

拱形围护结构是近年来开始推广应用的一种围护结构形式^[1], 它具有挡土止水效果好, 受力合理, 结构变形小, 成本低等优点。但由于这种围护结构计算方法尚不成熟, 以至于在工程中应用并不多。文献[2]基于拱坝计算中的拱梁法, 通过把弹性抗力法和拱梁法有机地结合起来, 用于计算拱形围护结构, 通过工程实例计算表明, 该方法能有效地分析拱形围护结构。本文采用这种方法对单支撑拱形围护结构性状进行较系统的分析, 为其更好地应用于工程实际提供一些有参考价值的依据。

2 算例参数

计算用的单支撑拱形围护结构基本参数如下: 基坑宽 20 m, 长 50 m, 开挖深度 6.0 m。围护结构采用三排水泥土搅拌桩, 平面排列成圆弧形, 半径 3.0 m, 单拱跨度(弦长) 4.5 m, 搅拌桩桩径 500 mm, 桩长 12.0 m, 桩与桩搭接 150 mm。拱脚处设两根桩径 600 mm 的钻孔灌注桩。均质土层, 强度指标 $c_{cu} = 10 \text{ kPa}$, $\varphi_{cu} = 10^\circ$, 容重 $\gamma = 17.0 \text{ kN/m}^3$, 被动区加固, 地基抗力系数的比例系数 $m = 4000 \text{ kN/m}^4$ 。在拱脚桩上离桩顶 2.0 m 处设一道 400 mm × 500 mm 钢筋砼支撑。计算中, 支撑模量取

$2.55 \times 10^7 \text{ kPa}$, 拱壁厚度取 1.2 m, 拱壁模量取 120 MPa, 拱脚桩模量取 $2.55 \times 10^7 \text{ kPa}$, 墙后超载取 30 kPa。墙后土压力沿深度的分布假定在开挖面以上为朗肯主动土压力, 开挖面以下为定值, 等于开挖面的土压力值^[3]。

为了便于比较影响因素对围护结构性状的影响, 同时计算一单支撑单排桩围护结构。单排桩围护结构采用 $\phi 800$ 的钻孔灌注桩, 桩长 12.0 m, 桩中心间距 1.0 m。同样在离桩顶 2.0 m 处设一道 400 mm × 500 mm 钢筋混凝土支撑, 支撑计算长度取 10.0 m, 支撑水平间距 8.0 m。土质条件与拱形围护结构相同。计算方法采用弹性抗力法中“m”法。

3 性状分析

3.1 拱脚桩变形的影响

拱形围护结构拱座处一般设有钻孔灌注桩, 在以往的一些拱形围护结构计算方法中一般都未能考虑拱脚桩变形的影响, 而将拱壁和拱脚桩分开计算, 计算拱壁时假定拱座为铰支或固支而不计拱座变形的影响。实际上拱座处的拱脚桩是与拱壁一起变形的, 拱脚桩的变形必引起拱座的变形。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(59738160); 浙江省建设厅科研基金资助项目
收稿日期: 2000-05-23

图 1(a) 是拱冠处变形沿深度的变化曲线。从图中可以看出, 当计拱座变形时, 围护结构的最大变形远大于不计拱座变形时的值, 也就是说, 拱座的变形对整个围护结构的变形影响很大。同时也说明在计算拱壁时若假定拱座为铰支或固支, 而不计拱座变形影响是不合理的, 将引起较大的误差。

拱形围护结构所承担的外荷载分别由水平拱和垂直梁承担。图 1(b) 是拱冠梁处拱和梁的荷载分配关系, 图中的荷载是拱承担的荷载。从图中可知, 在围护结构上部外荷载主要由水平拱承担, 而在围护结构下部梁是荷载的主要承担者。在两种情况下, 围护结构上部荷载分配相差不大, 而在围护结构下部计拱座变形时水平拱承担的荷载小于不计拱座变形时水平拱承担的荷载。当假定拱座不变形时, 水平拱即使在围护结构下部仍承担较大的荷载, 外荷载主要从水平向传递到拱座, 说明当拱座刚性较好(拱座不变形或变形较小)时, 外荷载更容易通过水平拱向拱座传递, 而传递到拱座的荷载大部分左右相互抵消, 这部分荷载所引起的结构变形很小, 因此整个围护结构的变形较小, 这也是拱形围护结构变形一般较小的原因之一。

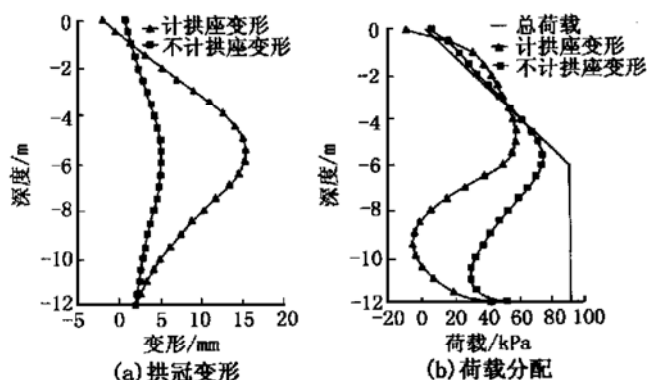


图 1 拱冠变形和荷载分配

Fig. 1 Deformation and distribution of load at arch crown

3.2 插入深度的影响

图 2(a), (b) 分别为不同插入深度下拱形围护结构拱冠处的变形和单排桩的变形。从图中可以看出, 插入深度对拱形围护结构变形影响不大, 而对单排桩的变形影响要大些, 特别是在插入深度较小时影响更大。与拱形围护结构相比, 单排桩在插入深度较小时, 易出现踢脚型变形曲线, 而拱形围护结构即使插入深度只有 4 m, 桩底变形仍然较小。

图 3(a) 为拱脚桩最大变形、拱冠最大变形和拱脚桩最大弯矩随相对插入深度 d/h (d 为插入深度, h 为开挖深度) 的变化规律。从图中可知, 最大变形值随插入深度增大略有增大, 在插入深度约为 0.9 倍开挖深度时达到最大, 随后趋于稳定。插入深度大变形反而

大的原因, 可能是插入深度越小, 在围护结构下部拱承担的荷载略大些, 荷载更易向拱座传递, 而拱座两边传递过来的荷载大部分在拱座处相抵消, 传递到拱座的这部分荷载对结构变形影响很小, 因此总的变形反而小些。最大弯矩随插入深度增大而有所减小, 减小幅度不大, 在插入深度约为 1 倍开挖深度以后基本保持不变。图 3(b) 为单排桩桩身最大变形和最大弯矩随相对插入深度的变化规律。与拱形围护结构不同, 最大变形值随插入深度增大总是减小的, 而且在插入深度较小时减小较快, 在插入深度约等于 1 倍开挖深度以后, 基本趋于稳定。最大弯矩值的变化规律也不同, 它随插入深度增大而增大, 在插入深度较小时增加较快, 在插入深度约等于 1 倍开挖深度以后基本趋于稳定。

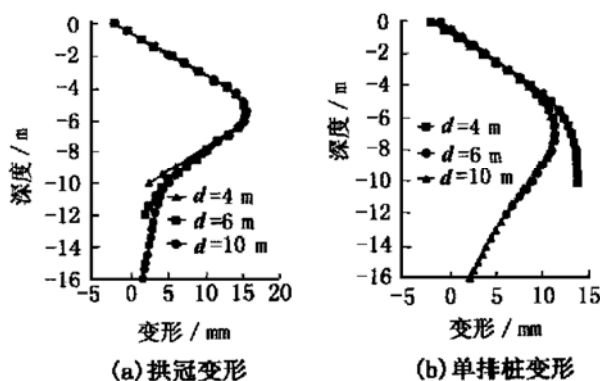


图 2 不同插入深度下的变形

Fig. 2 Deformation with different embedded depth

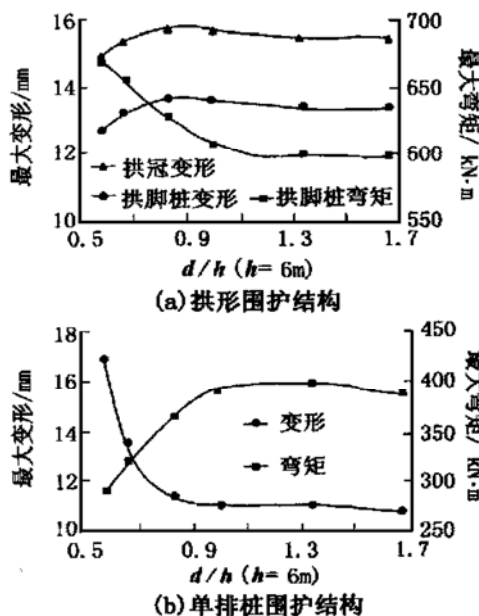


图 3 插入深度的影响

Fig. 3 Influence of embedded depth

3.3 坑底土质的影响

坑底土质的影响可通过地基抗力系数的比例系数 m 值来反映。图 4(a), (b) 分别为不同 m 值下拱冠和

单排桩的变形,从图中可以看出, m 值对两种围护结构变形的影响规律是类似的, m 值越大,变形越小, m 值较小时影响较大。不同的是当 m 值较小时,单排桩围护结构易出现踢脚型变形曲线。

图 5(a) 为拱脚桩弯矩图,图 5(b) 为单排桩桩身弯矩图。 m 值对这两种围护结构弯矩影响也是类似的, m 值越大,弯矩越小, m 值较小时影响较大。

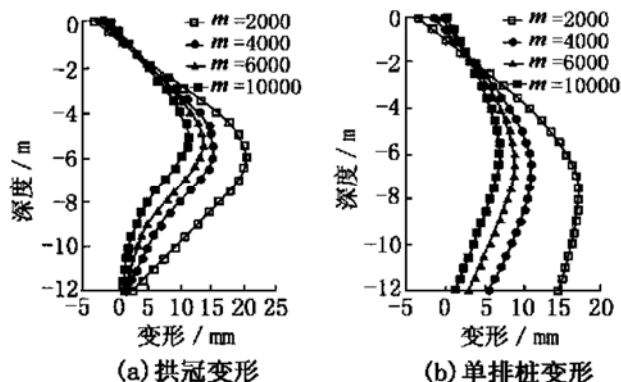
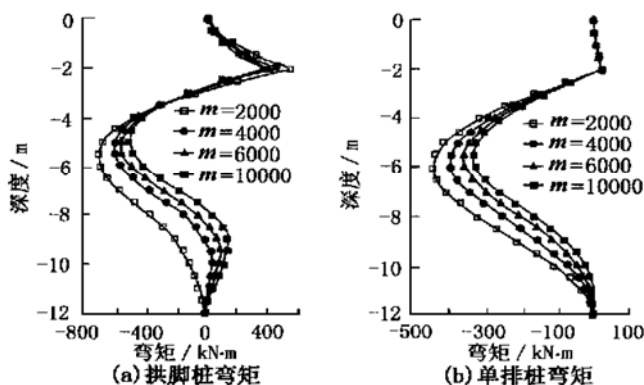
图 4 不同 m 值下的变形Fig. 4 Deformation with different m 图 5 不同 m 值下的弯矩Fig. 5 Moment with different m

图 6(a) 为拱脚桩最大变形、拱冠最大变形和拱脚桩最大弯矩随 m 值的变化规律,最大变形和最大弯矩均随 m 值增大而减小。图 6(b) 为单排桩桩身最大变形和最大弯矩随 m 值的变化规律,同样最大变形和最大弯矩均随 m 值增大而减小。 m 值较小时,最大变形和最大弯矩减小较快, m 值影响较大。

3.4 拱形状的影响

拱形状的影响包括两个方面,一是矢跨比相同时,拱型的影响;另一是拱型相同时,矢跨比的影响。计算时采用圆弧、抛物线、悬链线、椭圆、双曲线和对数螺线等拱型,计算结果表明在矢跨比相同时,拱型的影响很小,而当拱型相同时,矢跨比影响很大。

图 7(a), (b) 为不同矢跨比下拱冠变形曲线和拱脚桩弯矩图,图 8 为拱脚桩和拱冠处最大变形、拱脚桩最大弯矩与矢跨比的关系曲线。从图中可知,对同种

拱型,矢跨比越大,变形越小,而弯矩随着矢跨比增大,首先减小,约在 $f/l = 0.3 \sim 0.35$ 之间最大弯矩达到最小值,此后最大弯矩发生在支撑处,并随矢跨比增大而增大,但增长较慢。

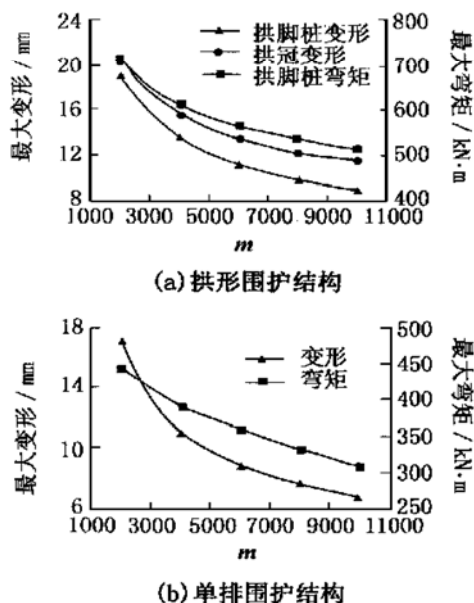
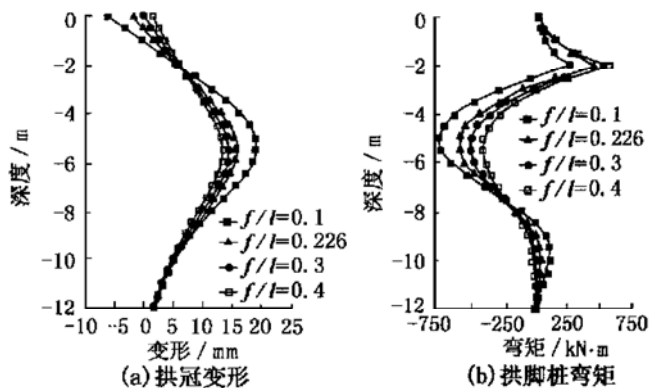
图 6 m 值的影响Fig. 6 Influence of m 

图 7 不同矢跨比下的变形和弯矩

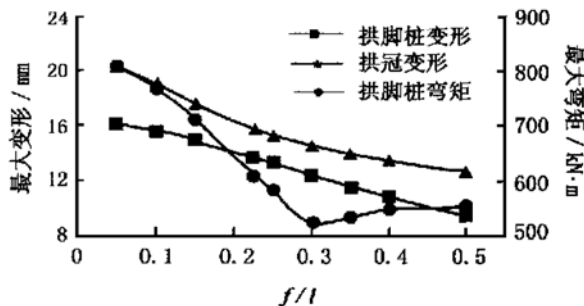
Fig. 7 Deformation and moment with different f/l 

图 8 矢跨比的影响

Fig. 8 Influence of f/l

3.5 支撑位置的影响

在围护结构设计中,支撑位置的确定相当重要。图 9(a), (b) 分别为不同支撑位置下拱冠和单排桩变

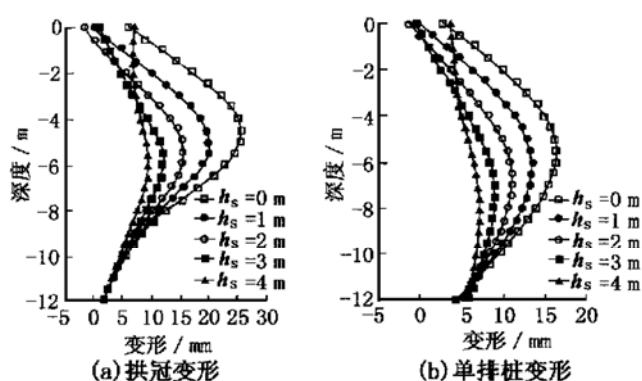


图9 不同支撑位置下的变形

Fig. 9 Deformation with different position of strut

形曲线。从图中可知,随着支撑位置下移,变形减小,且减小的幅度较大,最大变形发生的位置也逐渐下移。

图10(a)为拱脚桩桩身弯矩图,随着支撑位置下移,最大弯矩逐渐减小,支撑位置低于3 m后,最大弯矩发生在支撑处,并呈增大趋势。图10(b)为单排桩桩身弯矩图,弯矩随支撑位置下移而减小。

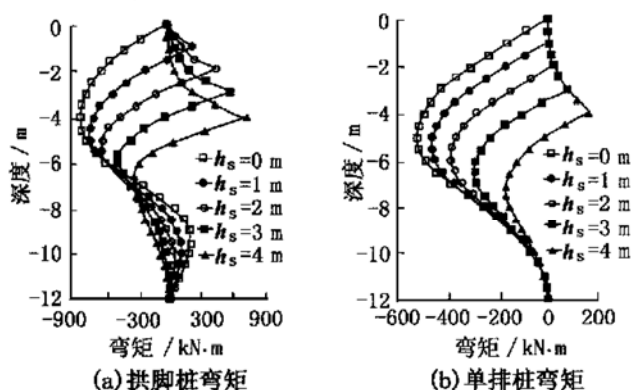


图10 不同支撑位置下的弯矩

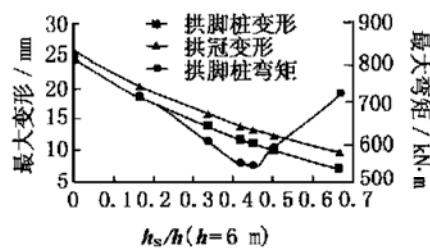
Fig. 10 Moment with different position of strut

图11(a)为拱脚桩、拱冠最大变形和拱脚桩最大弯矩(绝对值)随支撑相对位置 h_s/h (h_s 为支撑位置深度, h 为开挖深度) 变化的关系曲线。最大变形随支撑相对位置增大而减小,而最大弯矩随支撑相对位置增大首先减小,当支撑相对位置大于0.4~0.5以后,最大弯矩反向增大,发生在支撑处。因此若现场条件允许,支撑的合理位置应在开挖深度的0.4~0.5倍处。图11(b)为单排桩围护结构桩身最大变形和最大弯矩随支撑相对位置变化的关系曲线,最大变形和最大弯矩均随支撑相对位置增大而减小,但并不是说支撑越低越好,因为当支撑位置低于开挖深度一半时易出现围护桩整体平移,而且支撑轴力太大,因此支撑位置也不宜太低,在0.4~0.5倍的开挖深度处比较合适。

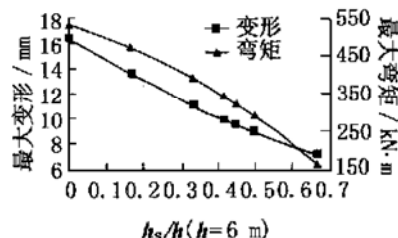
3.6 支撑刚度的影响

支撑刚度的变化通过支撑截面面积的变化来反映。图12(a)为拱脚桩、拱冠最大变形和最大弯矩与

支撑截面积的关系曲线,图12(b)为单排桩围护结构桩身最大变形和最大弯矩与支撑截面积的关系曲线。这两种围护结构最大变形、最大弯矩随支撑面积的变化规律是类似的,随着支撑截面积增大,最大变形值减小,最大弯矩增大,但很快都趋于稳定。总之,无论是拱形围护结构还是单排桩围护结构,支撑刚度只在较小时才有所影响。



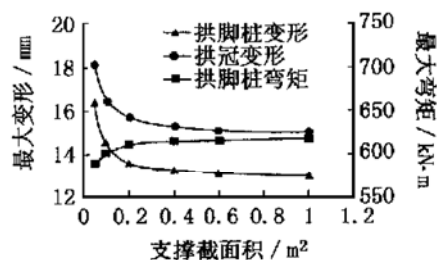
(a) 拱形围护结构



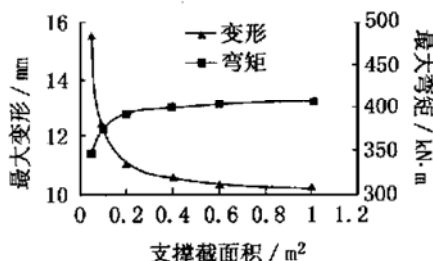
(b) 单排桩围护结构

图11 支撑位置的影响

Fig. 11 Influence of position of strut



(a) 拱形围护结构



(b) 单排桩围护结构

图12 支撑刚度的影响

Fig. 12 Influence of strut stiffness

3.7 拱壁刚度的影响

拱壁刚度的变化可通过拱壁弹性模量或拱壁厚度的变化来反映。图13为拱脚桩最大变形、拱冠处最大变形、拱脚桩弯矩三者随拱壁刚度变化的关系,其中(a)

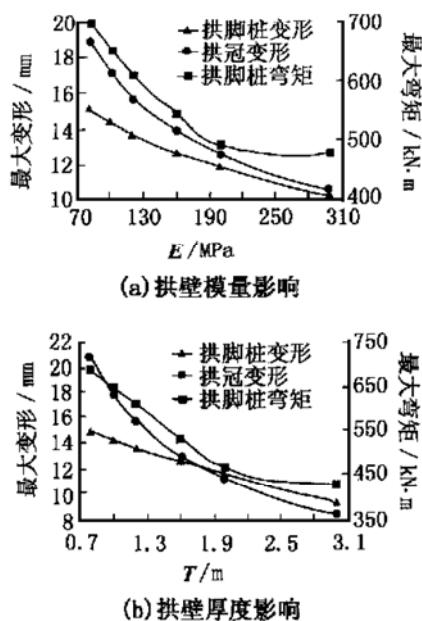


图13 拱壁刚度的影响

Fig. 13 Influence of buttress stiffness

图(a)为三者与拱壁弹性模量的关系, (b) 图(a)为与拱壁厚度的关系。从图中可以看出: ①拱壁刚度越大, 变形和弯矩越小, 这无论是通过增大拱壁模量还是通过增大拱壁厚度都是一样的。②拱壁刚度对拱冠处变形的影响要大于对拱脚桩变形的影响, 拱冠处的变形随拱壁刚度增大减小得更快。在刚度较小时拱冠处的变形大于拱脚桩的变形, 当刚度大到一定程度时, 拱冠处的变形反而小于拱脚桩的变形。③拱脚桩最大弯矩随拱壁刚度增大首先减小较快, 当刚度大到一定程度时已减小很慢。

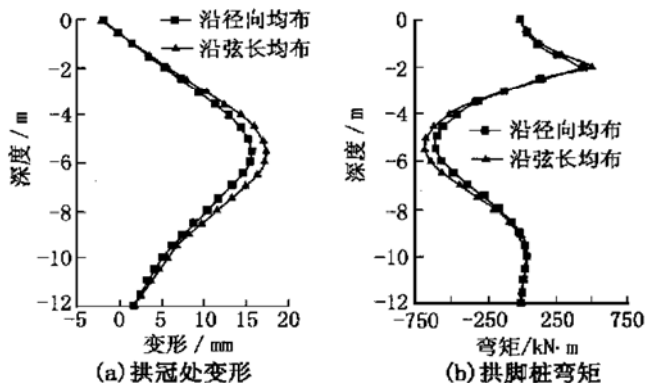


图14 不同土压力分布下的变形和弯矩

Fig. 14 Deformation and moment with different distribution of earth pressure

3.8 土压力平面分布形式的影响

拱形围护结构墙后土压力平面分布形式可假定是沿水平拱径向均匀分布, 或是沿水平拱弦长均匀分布。图14(a)是两种土压力分布形式下拱冠处的变形曲线, 图14(b)是拱脚桩的弯矩分布图。从图中可以看出, 假定土压力沿弦长均布的变形和弯矩大于假定土压力沿径向均布的变形和弯矩。拱形围护结构墙后土

压力分布形式目前尚未能准确确定。众所周知, 当拱形成一闭合曲线(如图)时, 其后土压力分布应是沿径向均布的; 而当拱退化成一直线时, 其后土压力分布又相当于沿弦长均布。因此, 实际拱形围护结构墙后土压力分布形式可能介于两种分布形式之间。

4 结 语

(1) 拱形围护结构受力机理与一般直线型围护结构不同, 结构外荷载(土压力)分别由水平拱和垂直梁承担, 荷载向水平和垂直两个方向传递。

(2) 拱座变形对整个围护结构的性状影响很大, 在计算中应予以考虑; 插入深度对围护结构的性状影响很小, 一般只需满足结构稳定性要求; 坑底土质的 m 值较大时, 其影响小些, 而 m 值较小时影响较大; 在矢跨比相同的情况下, 拱型的影响非常有限, 但矢跨比的影响很大, 围护结构的矢跨比在 0.3~0.35 之间比较合适; 适当降低支撑位置可大幅度减小结构变形和拱脚桩弯矩, 开挖深度在 6 m 左右时, 若现场条件允许, 支撑设在 0.4~0.5 倍开挖深度处较为合适; 支撑刚度较小时, 才对围护结构有所影响; 增大拱壁刚度可较大幅度地减小结构的变形和拱脚桩的弯矩; 拱形围护结构墙后土压力的平面分布形式可能介于沿拱径向均布和沿弦长均布之间, 一般假定沿弦长均布所计算的围护结构变形和弯矩更大些。

(3) 拱形围护结构是一种受力合理的围护结构形式, 部分荷载通过水平拱传向拱座, 而传到拱座的荷载又大部分左右相互抵消, 因此结构变形一般较小。拱壁也主要处于受压状态, 充分发挥了水泥材料受压性能好的特点。

(4) 拱形围护结构是一种自立能力较强的围护结构, 即使在插入深度较小坑底土质较差的情况下, 只要在保证围护结构不发生整体失稳和隆起破坏, 单支撑拱形围护结构一般是不会出现踢脚的情况。

参考文献:

- [1] 蔡伟铭, 李有成. 拱形水泥土槽壁支护[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(2): 21~27.
- [2] 张仪萍. 深基坑拱形围护结构拱梁法分析及优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [3] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 建筑工业出版社, 1998.
- [4] Bowles J E. Foundation Analysis and Design[M]. 3rd ed. McGraw Hill, 1982.
- [5] Bowles J E. Analytical and Computer Methods in Foundation Engineering[M]. McGraw Hill, 1974.