

深基坑双排桩支护结构设计计算方法研究

吴 刚¹, 白 冰¹, 聂庆科²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 河北省建设勘察研究院, 石家庄 050031;)

摘 要: 考虑了土压力的空间效应, 分析并计算了冠梁对双排桩支护结构的变形协调作用; 考虑了滑移面和排距对作用在前后排桩上的土压力的影响, 在弹性地基梁法的基础上, 提出了一种新的双排桩支护结构设计计算模型。将理论计算结果与工程实测资料进行了对比分析, 结果表明应用该计算模型进行计算, 能得到有效的计算结果。

关 键 词: 深基坑; 双排桩; 冠梁; 空间效应; 弹性地基梁法

中图分类号: TU 473.1⁺²

文献标识码: A

Research on calculation method of double-row piles retaining structure for deep excavation

WU Gang¹, BAI Bing¹, NIE Qing-ke²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co.Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: The spatial effect of earth pressure is considered; and the deformation compatibility of space that the cap beam applies to the double-row piles support structure is analyzed. Besides, the affection on the earth pressure of both the front and the back row piles due to sliding plane and array pitch is considered too. Based on the beam on elastic foundation method, a new calculation model for a double-row piles retaining structure is proposed. Comparing the calculation results of the theoretical model with the actual observation data, it is shown that the effective calculation result can be obtained by reasonable parameters applied to the model.

Key words: deep excavation; double-row plies; cap beam; spatial effect; beam on elastic foundation method

1 引 言

双排桩支护结构是指在地基土中设置两排平行桩, 前后两排桩桩体呈矩形或梅花形对应, 在桩顶用刚性冠梁将前后两排桩连接, 沿坑壁方向呈双排支护的空间结构。这种结构具有较大的侧向刚度, 可以有效地限制支护结构位移变形, 施工技术成熟, 不需要设置支撑挡土结构, 与拉锚结构相比, 又不需要太多的场地, 是近十几年发展起来的一种具有很多优点的支护结构, 在深基坑工程中已经获得较多的应用^[1]。

在计算双排桩支护结构时, 首先必须确定土压力在前后排桩的分布及桩端的嵌固情况, 由此可引出多种计算模型^[1, 2, 4, 6]。这些计算模型主要分为 3 类, 一类是基于经典土压力理论确定的计算模型^[1]; 一类是基于 winkle 假定的计算模型^[2, 4]; 另一类是基

于土拱理论和土抗力法建立的计算模型^[6]。这 3 类计算模型都在不同程度上讨论了土压力作用在前后排桩体上的分布规律, 但一般都不考虑由于滑移面的存在而引起的桩间土作用在前后排桩体上土压力的差异, 同时关于土压力的空间效应、冠梁的变形协调作用和排距对土压力分布的影响以及这些因素如何在计算模型中得到体现还有待进一步深入研究。本文在已有计算模型的基础上, 就上述问题展开分析并结合弹性地基梁法和工程实测资料, 提出了一种新的双排桩设计计算模型。

2 计算方法

2.1 土压力的空间效应

由于两侧坑壁对中间土体的约束作用, 作用在支护结构上的土压力随着距坑角的距离 x 的减小而减小, 其分布形式在距离坑角 B 范围内假定为抛物

线,如图 1 所示。土压力空间效应的影响范围 $B = H \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$ [5], 土压力空间效应影响系数为

$$K_{sp} = \sqrt{\frac{x}{B}}, \quad x < B$$

$$K_{sp} = 1, \quad x \geq B$$

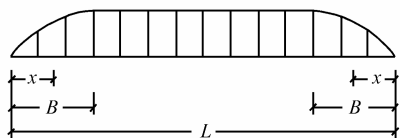


图 1 土压力空间分布形式
Fig.1 Spatial distribution of earth pressures

2.2 冠梁的变形协调作用

双排桩支护结构空间形状如图 2 所示。以冠梁为研究对象,双排桩对冠梁有水平作用力、垂直作用力和扭矩。前后排桩对冠梁的垂直作用力形成力偶,与作用在冠梁上的扭矩相平衡,总体上双排桩对冠梁的合扭矩是比较小的。在此假定下,冠梁只发生平移,不发生转动。针对双排桩不同的空间排列方式提出的冠梁简化计算图式如图 3。

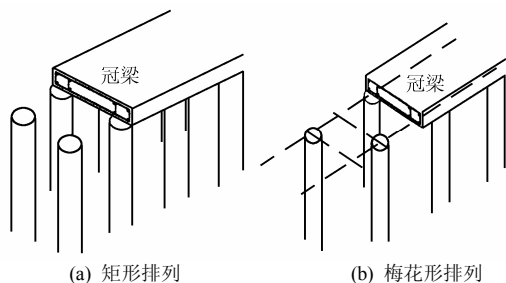


图 2 双排桩支护体系空间示意图
Fig.2 Spatial sketch of double-row piles retaining structures

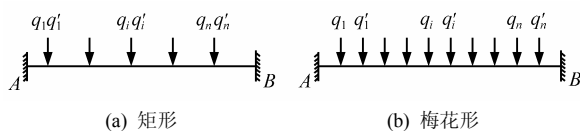


图 3 冠梁简化计算简图
Fig.3 Simplified calculation sketch of cap beam

(1) 矩形排列

文献[3]探讨了压顶梁对单排桩的空间约束作用,本文在其基础上分析冠梁对双排桩的约束作用。为了在计算模型中便于实现,在此将冠梁的作用分解为两个部分,一是协调前后排桩桩顶的位移,假定为联系前后排桩桩顶的刚性梁;二是空间变形协调作用假定为在双排桩刚架结构顶端的水平支撑弹

簧,弹簧的刚度系数为

$$K_s = \frac{(q_i + q'_i)}{d_i} \quad (1)$$

式中: q_i 为第 i 根前排桩在冠梁上的水平作用力; q'_i 为第 i 根后排桩在冠梁上的水平作用力。

现在主要分析冠梁的空间变形协调作用。假定冠梁两端固定如图 3(a)所示,受到双排桩的水平作用力为 $q_1, q'_1; q_2, q'_2; \dots q_n, q'_n$, 其中 $q_i = \sigma + p_i$, $q'_i = -\sigma + p'_i$, σ 为冠梁纵向之间的正应力, p_i 和 p'_i 均为表示空间协调功能的作用力。计算过程中不考虑冠梁的纵向变形。由材料力学中的叠加原理可得第 i 对桩桩顶处冠梁的变形为

$$d_i = \sum_{j=1}^{i-1} \delta_{ij}(q_j + q'_j) + \sum_{j=i+1}^n \delta_{ij}(q_j + q'_j) + \delta_{ii}(q_i + q'_i) \quad (2)$$

式中: δ_{ij} 为在 j 点处作用单位力时,冠梁在 i 点处产生的位移,并且有

$$\delta_{ij} = \frac{b_j^2 x_i^2}{6EI l^2} \left[3a_j - \left(1 + \frac{2a_j}{l} \right) x_i \right] \quad (i \leq j) \quad (3)$$

$$\delta_{ij} = \frac{b_j^2 x_i^2}{6EI l^2} \left[3a_j - \left(1 + \frac{2a_j}{l} \right) x_i \right] + \frac{(x_i - a_j)^3}{6EI} \quad (i > j) \quad (4)$$

第 i 对桩桩顶处冠梁的弯矩为

$$M_i = \sum_{j=1}^i \left[\frac{(q_j + q'_j) a_j^2 b_j}{l^2} - \frac{(q_j + q'_j) a_j^2 (l + 2b_j)}{l^3} (l - x_i) \right] + \sum_{j=i+1}^n \left[\frac{(q_j + q'_j) b_j^2 (l + 2a_j)}{l^3} x_i - \frac{(q_j + q'_j) a_j b_j^2}{l^2} \right] \quad (5)$$

式中: l 为冠梁的长度; EI 为冠梁的抗弯模量; x 为作用点 i 与固定端 A 的距离。 a_j 为单位力作用点 j 与固定端 A 的距离, b_j 为单位力作用点 j 与另一固定端 B 的距离。

计算水平支撑弹簧刚度系数的方法有两种:

方法 1 当不考虑冠梁的空间作用时,双排桩刚架结构只在土压力作用下顶端的水平位移为 d_{0pi} , 其值可由图 4(a)的计算图式得到;在冠梁的空间作用和土压力的联合作用下,刚架结构的双排桩在 i 点处桩顶的位移为 d_{pi} , 可表达为

$$d_{pi} = d_{0pi} - \delta_{pi}(q_i + q'_i) \quad (6)$$

式中: δ_{pi} 为刚架结构顶端作用有单位水平力时顶端的水平位移,由结构力学知识即可求得。

实际上, 双排桩刚架结构顶端与冠梁的水平位移是相等的, 即:

$$d_{pi} = d_i \quad (7)$$

$$d_{0pi} - \delta_{pi}(q_i + q'_i) = \sum_{j=1}^{i-1} \delta_{ij}(q_j + q'_j) + \sum_{j=i+1}^n \delta_{ij}(q_j + q'_j) + \delta_{ii}(q_i + q'_i) \quad (8)$$

由式 (8) 可以计算 $q_i + q'_i$, 根据式 (6) 和 (7) 可以求得 d_i , 再由式 (1) 即可求得 K_s 。

方法 2 根据各点的实测弯矩由式 (5) 计算出双排桩作用在冠梁上的 $q_i + q'_i$, 再由实测得到的冠梁变形 d_i , 可以计算出 K_s 。该方法主要是用来进行反分析计算。

(2) 梅花形排列

对于冠梁来说, 双排桩梅花形和矩形排列的主要区别在于冠梁受力的分布形式有差异, 梅花形排列时, 前后排桩的桩顶存在位移差, 第 i 根前排桩顶和第 i 根后排桩桩顶的位移差为

$$\Delta_i = d_i - d'_i \quad (9)$$

式中: d_i 为第 i 根前排桩桩顶的位移; d'_i 为第 i 根后排桩桩顶的位移。由图 2(b) 按材料力学知识即可求得。

从工程实用的角度出发, 前后排桩都取单位宽度内等效刚度的挡土墙来进行分析计算, 梅花形排列的前后排桩桩顶的位移差相对于桩顶的位移来说是很小的, 因此在工程设计计算时可将梅花型简化为矩形来考虑, 用同一种计算模型进行分析。

2.3 计算模型

弹性地基梁法是现行规范推荐的, 其最大优点是能够考虑土与结构的相互作用。本文考虑到滑移面的存在使得桩间土作用在前后排桩体上的土压力存在差异, 针对双排桩通常的工作状态提出一种双排桩弹性地基梁法计算模型, 如图 4(b) 所示。

基本假设: (1) 冠梁只发生平动, 不发生转动, 冠梁的空间作用部分转化为水平支撑弹簧。(2) 冠梁对前后排桩的联系作用假定为刚性梁, 与前后排桩桩顶刚性连接。(3) 桩底嵌固。

土压力分布情况: 前排桩土压力在坑底以上呈三角形分布, 最大值为 p_A , 可由式 (10) 求得, 坑底以下桩间土作用与前排桩上的土压力呈矩形分布; 后排桩桩后侧主动区土压力在 Z_0 以上呈三角形分布, 最大值为 p_B , 可由式 (11) 求得, 在 Z_0 以下至桩底呈矩形分布, Z_0 为按库仑土压力理论确定的滑移面与后排桩相交处的深度。基坑内侧土体对

前排桩的抗力用土弹簧来模拟, 桩间土 Z_0 深度以下土体对后排桩的抗力也用土弹簧来模拟, 前后排桩桩体视为竖直放置的弹性地基梁, 地基基床系数按“m”法来确定:

$$K = mz$$

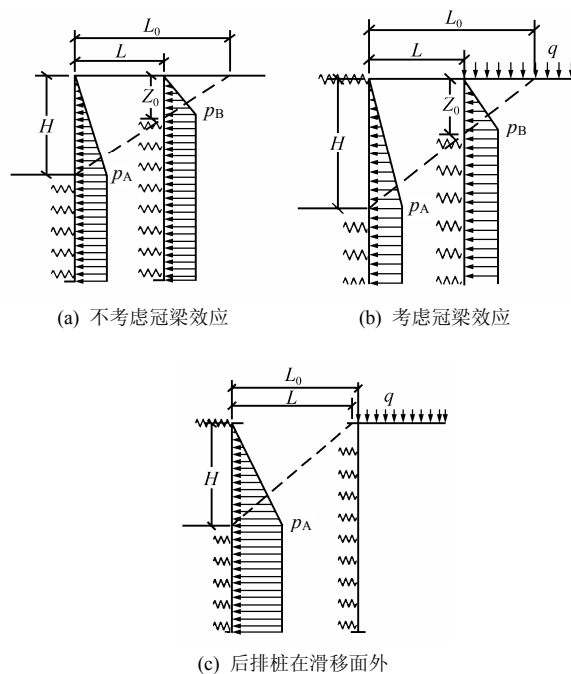


图 4 双排桩弹性地基梁法计算模型

Fig.4 Calculation model for the beam on elastic foundation method of double-row piles

前排土压力:

$$p_A = K_{sp} \alpha (\gamma H K_a - 2c \sqrt{K_a}) \quad (10)$$

后排土压力:

$$p_B = K_{sp} \left\{ (1 - \alpha) (\gamma H K_a - 2c \sqrt{K_a}) + K_a q \right\} \quad (11)$$

$$Z_0 = H - L \cot \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (12)$$

$$L_0 = H \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{2L}{L_0} - \left(\frac{L}{L_0} \right)^2 \quad (14)$$

式中: K_a 为主动土压力系数; K_{sp} 为土压力空间效应影响系数; H 为基坑深度; q 为作用后排桩桩外土体表面的附加荷载; α 为比例系数, 按后排桩靠基坑侧滑动土体占整个滑动土体的重量比例确定^[1]。需要说明的是对于黏性土, 在计算 Z_0 和 L_0 时, 内摩擦角 φ 应该用等效摩擦角 φ_D 来代替。

双排桩排距 L 的大小直接影响到作用在前后排桩上的土压力的分配关系。当双排桩的排距大于

$H \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ 时, 双排桩支护结构类似于拉锚结构, 如图 4(c) 所示, 此时 $\alpha=1$ 。这也就意味着在排距 L 已经确定的基坑开挖过程中, 当开挖深度小于 $L \cot\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ 时, 滑移面在前后桩体之间, 此时主要是前排桩起到挡土作用; 当开挖深度大于 $L \cot\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ 时, 此时的前后桩体才共同承担挡土作用。

笔者借助于 MATLAB 软件, 针对上述计算模型, 采用了梁单元和 winkle 地基梁单元, 编制了适合于工程设计计算的双排桩弹性地基梁有限元计算程序。

3 理论计算与实测资料比较分析

3.1 工程概况

某高层住宅楼建筑基坑地面以上 19 层, 地下 2 层。基坑开挖深度为 8.3 m, 局部深度为 10.2 m, 工程地质状况如表 1 所示。基坑支护结构采用梅花形排列的双排钻孔灌注桩, 桩顶设置冠梁, 桩顶位于自然地面下 2 m。

基坑围护结构主要设计参数是: (a) 双排桩, 桩径 600 mm, 桩长 16.65 m, 排间距 1 200 mm, 混凝土标号为 C25, 钢筋笼主筋为 $12\phi 25$, 设计桩根数 146 根; (b) 冠梁, 宽 2 m, 厚 620 mm, 混凝土标号 C30。

表 1 各土层物理力学参数指标
Table 1 Physico-mechanical parameters of soils

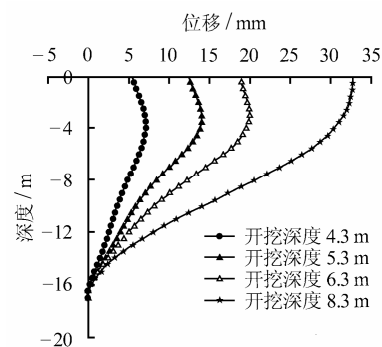
土层名称	γ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	c / kPa	φ / $(^\circ)$	E / MPa	土层厚度 / m
杂填土	17.2	10.0	10.0	4.31	0.86
粉质黏土	19.6	20.5	23.4	6.11	3.62
砂质粉土	19.3	17.1	29.6	6.49	3.62
粉质黏土	18.2	20.3	8.6	5.43	4.18
黏土	19.2	65	14.6	6.45	2.04
粉土	20.3	22	20	13	8

为了对双排桩支护结构进行研究, 在工程进行过程中, 采用了信息化施工技术, 对主要部位的双排桩桩体的深层位移和冠梁的钢筋应力进行监测, 取得了有价值的实测资料。

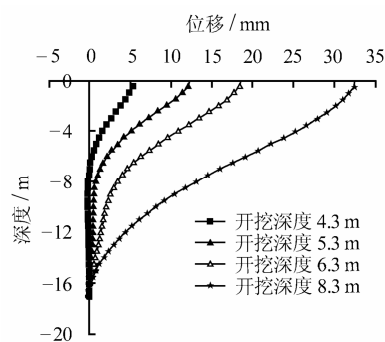
3.2 计算结果

计算参数的选取: m 值取 $2\,500\text{ kN/m}^3$, 冠梁支

撑弹簧约为 $8\,000\text{ kN/m}^2$, 计算宽度为 1 m, 前后排桩换算为等代刚度的挡土墙。桩顶距离地面 2 m, 为了表示出开挖过程中桩体变形的变化状况, 分别计算了基坑开挖到 4.3 m, 5.3 m, 6.3 m, 8.3 m 时的前后排桩的变形情况, 计算时 H 分别为 2.3 m, 3.3 m, 4.3 m, 6.3 m。 H 为 2.3 m 时的计算模式如图 4(c) 所示; H 大于 2.3 m 时, 计算模式如图 4(b) 所示。计算结果见图 5。



(a) 前排桩变形曲线



(b) 后排桩变形曲线

图 5 开挖到不同深度的计算结果

Fig.5 Calculation results with different depths

3.3 实测结果

基坑的北侧坑壁最长, 坑壁中部作用在支护结构上的主动土压力比其他监测处更接近极限土压力。从图 6 中可以看出随着开挖过程的进展, 北侧坑壁中部冠梁内侧受拉外侧受压, 应力值在不断增大, 弯矩也在相应增大, 在基坑开挖到坑底时弯矩达到开挖过程中的最大值 $241.23\text{ kN} \cdot \text{m}$, 可以看出冠梁空间协调作用在整个支护体系中的作用是很大的, 这说明在设计计算时, 将冠梁效应体现在计算模型中是十分必要的。

图 7 给出了随着开挖过程的进展, 前后排桩桩体实测的位移变化情况, 可以看出开挖过程中前排桩的位移要大于后排桩桩体的位移。

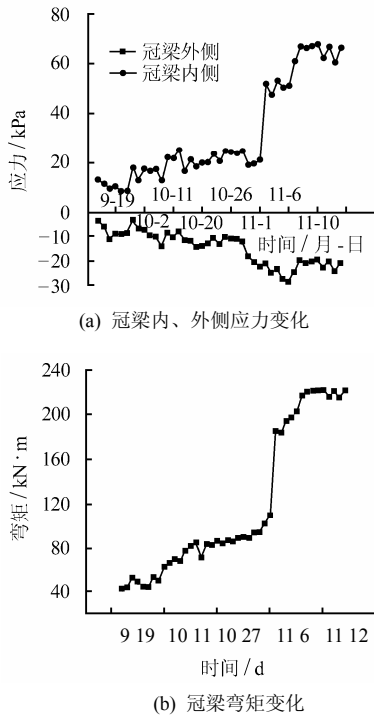


图 6 冠梁应力及弯矩变化示意图

Fig.6 Stress and bending moment diagram of cap beam

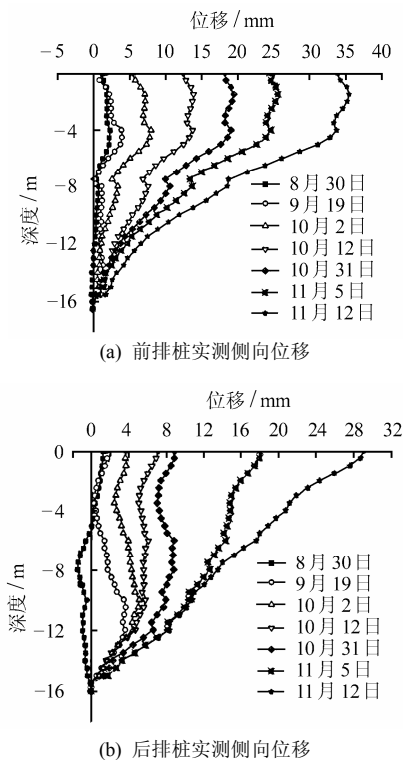


图 7 基坑北侧实测侧向位移

Fig.7 Measured lateral displacements of the north side of excavation

3.4 比较分析

基坑北侧在 11 月 12 日开挖到设计深度 8.3 m, 图 8 给出了此时的实测前、后排桩的位移和计算得到的前、后排桩位移曲线。

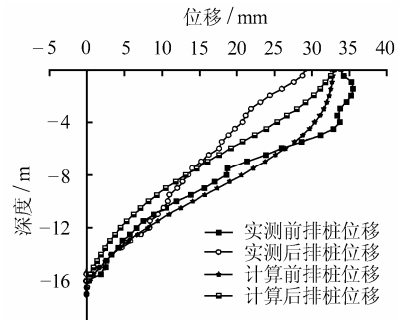


图 8 前、后排桩位移计算值和实测值

Fig.8 Measured and predicted displacements of the front and the back piles

可以看出, 计算得到的前排桩的位移与实测吻合的比较好, 差值在 10 % 以内, 趋势基本一致; 后排桩的计算结果略有偏差, 其原因可能是计算过程中将前后桩体简化为刚性连接, 并认为有相同的位移而忽略了梅花形排列的前后桩桩顶的位移差所引起的。

4 结 论

(1) 冠梁的空间协调作用在双排桩支护结构中的作用是明显的, 对于整个双排桩支护结构的稳定性起到重要的作用, 计算模型中考虑冠梁的空间协调作用是必要的。

(2) 前后排桩之间的桩间土由于滑移面的存在, 作用在前后桩体上的土压力存在差异。

(3) 排距的变化直接影响到作用在前后排桩上的土压力, 从而也影响了前后排桩的侧向位移; 随着排距的增大, 后排桩的挡土作用减弱。当排距超出滑移面影响范围以外, 冠梁纵向起到拉杆作用, 也就意味着此时的后排桩为桩顶受力的水平承载桩。

(4) 本文提出的计算模型考虑了土压力的空间效应、冠梁的空间协调作用、桩土之间的相互作用以及滑移面对桩间土作用在前后排桩上的土压力的影响, 计算结果与实测结果基本一致, 是一种有工程实用价值的计算模型。

参 考 文 献

- [1] 何颐华, 杨斌, 金宝森, 等. 双排护坡桩试验与计算的研究[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(2): 58—56.
HE Yi-hua, YANG Bin, JIN Bao-sen, et al. A study on the test and calculation of double-row fender piles[J]. Journal of Building Structures, 1996, 17(2): 58—56.
- [2] 郑刚, 李欣, 刘畅, 等. 考虑桩土相互作用的双排桩分

析[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 99—106.

ZHENG Gang, LI Xin, LIU Chang, et al. Analysis of double-row piles in consideration of the pile-soil interaction[J]. **Journal of Building Structures**, 2004, 25(1): 99—106.

- [3] 陈页开, 徐日庆, 任超, 等. 基坑开挖的空间效应[J]. 建筑结构, 2001, 31(10): 42—44.

- [4] 曹俊坚, 平扬, 朱长歧, 等. 考虑圈梁空间作用的深基坑双排桩支护计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 709—712.

CAO Jun-jian, PING Yang, ZHU Chang-qi, et al. Study on the calculation method of bracing structure with

double-row piles of deep foundation pit with consideration of the spatial influence of ring beam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(6): 709—712.

- [5] 黄强. 护坡桩空间受力简化计算方法[J]. 建筑结构, 1995, 1(8): 43—45.

- [6] 戴智敏, 阳凯凯. 深基坑双排桩支护结构体系受力分析与计算[J]. 信阳师范学院学报, 2002, 15(3): 348—352.

DAI Zhi-min, YANG Kai-kai. Analysis and Calculation of retaining structure with double-row piles[J]. **Journal of Xinyang Normal University**, 2002, 15(3): 348—352.

上接第2752页

SHEN Yu-sheng, GAO Bo. Site monitoring and analytical research on mechanical characteristics under construction partial press in double-arch tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 2 061—2 065.

- [4] 邓少军, 阳军生, 张学民, 等. 浅埋偏压连拱隧道施工数值模拟及方案比选[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 940—943.

DENG Shao-jun, YANG Jun-sheng, ZHANG Xue-min, et al. Numerical simulation of construction and excavating scheme for shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(6): 940—943.

- [5] 胡庆安, 夏永旭, 王文正. 双连拱隧道施工过程的三维数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(1): 48—50.

HU Qing-an, XIA Yong-xu, WANG Wen-zheng. 3D numerical simulation on double-arch tunnel's construction process[J]. **Journal of Chang'an University** (Natural Science Edition), 2005, 25(1): 48—50.

- [6] 王胜辉, 杜小平, 袁勇, 等. 不同开挖工序对连拱隧道中墙的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1 102—1 106.

WANG Sheng-hui, DU Xiao-ping, YUAN Yong, et al. Effects of different excavating sequences on mid-partition of double-arched tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(7): 1 102—1 106.

- [7] 张鹏勇, 徐林生, 王新平. 阳宗隧道试验段动态开挖过程的数值模拟研究[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(4): 7—10.

ZHANG Peng-yong, XU Lin-sheng, WANG Xin-ping. Numerical simulation of dynamic emulation on construction process in Yangzong expressway tunnel[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University**, 2003, 22(4): 7—10.

- [8] 何川, 李永林, 林刚. 连拱隧道施工引起的地层位移分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 612—616.

HE Chuan, LI Yong-lin, LIN Gang. Analysis of stratum displacements by multiple arch tunnel construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 612—616.

- [9] 赵阳, 王伟笔, 杨昌能. 偏压浅埋连拱隧道施工过程的三维数值模拟[J]. 中南公路工程, 2005, 30(2): 181—184, 187.

ZHAO Yang, WANG Wei-bi, YANG Chang-neng. 3D numerical simulation for construction of shallow double arched tunnel under bias pressure[J]. **Central South Highway Engineering**, 2005, 30(2): 181—184, 187.

- [10] 申玉生, 赵玉光. 偏压连拱隧道围岩变形的现场监测与分析研究[J]. 公路, 2005, (4): 194—198.

SHEN Yun-sheng, ZHAO Yu-guang. Site monitoring and analysis research on surrounding rock deformation of a biased double-arch tunnel[J]. **Highway**, 2005, (4): 194—198.

- [11] 贾永刚, 王明年. 连拱隧道两种工法的施工力学分析[J]. 地下空间, 2004, 24(2): 156—160.

JIA Yong-gang, WANG Ming-nian. Research on construction mechanics of two kinds of construction method of double-arch tunnel[J]. **Underground Space**, 2004, 24(2): 156—160.