

文章编号: 1000-4750(2014)03-0052-11

# 超前微桩复合土钉支护稳定及变形简化计算方法

宋二祥<sup>1,2</sup>, 宋 广<sup>1,2,3</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 3. 电力规划设计总院, 北京 100120)

**摘 要:** 超前微桩复合土钉支护是一种经济有效的基坑支护形式, 但对其设计分析方法的研究远落后于工程实践。该文在对此种复合土钉支护的构造及工作性能进行简要分析的基础上, 对其整体稳定验算方法和变形计算方法进行讨论, 借鉴已有的一些相关研究提出了相应的简化计算方法。针对其整体稳定验算, 提出考虑微桩-土相对刚度采用不大于 2.5 倍特征长度上土体被动抗力来考虑微桩作用的建议, 从而给出一种较为简便的整体稳定验算方法, 就一些实际工程的计算对比表明所建议的方法合理可行。针对其坑壁位移计算, 在仔细分析此种支护体系受力变形机理的基础上, 基于基坑支护计算的增量法及弹性地基梁求解的链杆法, 提出一种思路清晰的简化计算方法, 给出了具体的计算模型、参数确定方法及问题求解方法, 并通过与有限元计算及工程实测的对比对所提出的方法进行了检验。

**关键词:** 超前微桩; 复合土钉支护; 整体稳定; 变形; 基坑支护; 简化计算方法

**中图分类号:** TD350.1    **文献标志码:** A    **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.05.ST11

## SIMPLIFIED METHOD FOR STABILITY AND DEFORMATION ANALYSIS OF COMPOSITE SOIL NAILING WITH PRE-INSTALLED MICRO-PILES

SONG Er-xiang<sup>1,2</sup>, SONG Guang<sup>1,2,3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Beijing 100084, China;

3. Electric Power Planning &amp; Engineering Institute, Beijing 100120, China)

**Abstract:** Composite soil nailing with pre-installed micro-piles is a type of economical and effective support system for deep excavation. The study on its design analysis method is however far behind current engineering practice. In this paper, the constitution and working performance of this type of composite soil nailing is first discussed, then the calculation methods for its global stability and deformation are studied and simplified calculation methods have been proposed. For the global stability checking, it is suggested to use the passive resistance force on a maximum characteristic-length of 2.5 times for the pile, which reflects the pile stiffness relative to the soil, to consider the contribution of the micro-pile to the global stability. A formula for the calculation width of piles under lateral loading is also given. Thereafter, a relatively simple method has been put forward for the stability analysis, which is proved to be reasonable through comparison with finite element calculation and some analysis of practical engineering projects. For the calculation of displacements of the excavated pit wall, a relatively simple and clear method has been proposed based on the incremental calculation method and the theory of a beam on elastic foundation by the careful consideration for the deformation mechanism of this type of supporting system. The calculation model, together with the load and stiffness parameter determination method, is established, and the validity of the method is also proved by the comparison

收稿日期: 2013-05-19; 修改日期: 2013-08-24

基金项目: 国家支撑计划项目(2008BAJ06B01-5)

通讯作者: 宋二祥(1957-), 男, 河北人, 教授, 博士, 主要从事岩土力学及工程问题的计算分析研究(E-mail: songex@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 宋 广(1985-), 男, 重庆人, 工程师, 博士, 主要从事基坑支护问题的计算分析研究(E-mail: gsui1985@gmail.com).

with finite element analysis and field measurements.

**Key words:** pre-installed micro-pile; composite soil nailing; global stability; deformation; excavation support; simplified calculation method

土钉支护是一种经济、便捷而又较为可靠的基坑支护形式。但由于土钉是在土体发生一定变形之后靠钉-土之间的摩擦来发挥作用,在土质相对较差,或基坑深度较大,或对变形控制要求很严格的情况下,单纯的土钉支护往往难以满足要求。为此我国工程界发展了多种将其他支护手段与土钉联合的复合土钉支护<sup>[1]</sup>。目前较为常用的有预应力锚杆、超前微桩及水泥土桩(墙)与土钉联合的复合支护形式。

上述复合土钉支护在工程实践中已有较为广泛的应用,并有很多成功的实例<sup>[1-2]</sup>,但对其设计分析方法的研究还远落后于工程实践。尽管有限元法有着很强的适用性,对此类工程的稳定及变形分析也均可取得较为合理的结果<sup>[3]</sup>,但有限元计算需要较多的输入参数,对计算人员的要求也较高,人们还是希望采用一些相对简化的计算方法。

目前的工程设计分析中,在对复合土钉支护进行整体稳定验算时,如何考虑预应力锚杆、水泥土桩及超前微桩的作用还有不同的看法。《建筑基坑支护技术规程》<sup>[4]</sup>对预应力锚杆是将其伸过滑移面的锚固段所能提供的抗拉拔力施加到滑移土体,来计算体系的稳定性安全系数;对水泥土桩则是将其与土体一样处理,认为滑移面穿过水泥土桩,由于水泥土桩较高的抗剪强度而提高体系的整体稳定性。而《复合土钉墙支护技术规范》<sup>[5]</sup>中则主张对预应力锚杆和水泥土桩的作用乘以相应的组合折减系数,折减系数的值可以小到 0.5 甚至 0.3。对于超前微桩复合土钉支护的整体稳定验算,在过去的较长时间内一直没有较为认可的验算方法。一些有关基坑支护的规范规程对这种复合土钉支护的设计验算都予以回避,实际工程设计中则多将超前微桩作为安全储备而在计算中不予考虑。直到 2011 年颁布的《复合土钉墙基坑支护技术规范》<sup>[5]</sup>才建议了一种经验性的方法。该方法是采用组合折减系数的思路,也就是将超前微桩被剪断时的抗剪强度乘以由实际工程反算的折减系数来确定超前微桩对整体稳定的贡献。这一建议使超前微桩复合土钉支护的整体稳定验算有了一种可以遵循的方法,确是一进步,但所用折减系数的具体取值尚需较多的

工程经验。

至于变形计算,则多采用有限元方法,目前所用模型有些并不合理,包括土体本构关系以及有限元整体模型的选取等方面。对简化计算方法也有不少研究,比如,针对土钉支护位移的计算,郭红仙<sup>[6-8]</sup>曾提出一种计算方法。按其方法,首先通过细致分析开挖对坑壁土体的影响,随开挖过程计算各排已施做土钉的轴力最大值<sup>[6-7]</sup>,随后按经验系数由土钉轴力最大值给出土钉对支护面层的拉力,进而给出面层所受荷载,之后将支护面层看作由土钉和被动土体支撑的连续梁来计算坑壁的水平位移<sup>[6,8]</sup>。此方法对土钉轴力的计算过程较复杂,也未给出土钉拉拔刚度的计算方法。魏焕卫等<sup>[9]</sup>则用经验分布侧压力直接给出各排土钉的最大拉力,进而假定土钉轴力沿其长度按抛物线分布,由此轴力分布来分析土钉的拉伸变形和侧摩阻力,进而由后者来分析钉-土界面的滑移,最终综合前述结果给出坑壁位移。这一方法完全不计支护面层的作用,认为土钉对支护面层的拉力为零。尹骥等<sup>[10]</sup>针对水泥土桩复合土钉支护,建议了一种根据每一施工步开挖卸载引起坑壁土体水平回弹来计算坑壁位移的方法,其中卸载影响范围的确定有较大的近似。魏焕卫等<sup>[11]</sup>针对超前微桩复合土钉支护位移的计算,建议根据经验分布侧压力来确定不同深度处的开挖荷载,进而将各部位荷载据同部位土钉和桩的刚度估计值按比例进行分配,之后将受有所分配荷载、支撑于土钉和被动土体的微桩视为连续梁来计算其变形。在这一计算方法中没有考虑施工的过程。综上所述,目前所提出的简化计算方法都有这样或那样的假定,有的过于复杂,有的过于简化,开展进一步的研究很有必要。

本文在已有工作的基础上对超前微桩复合土钉支护的设计分析方法展开进一步的研究。首先对此种复合土钉支护的构造及工作性能进行了简要的讨论,之后对其作用机理进行了一些分析,进而介绍了本文提出的整体稳定验算方法和坑壁位移的简化计算方法,并分别通过算例对所提出的验算方法进行了检验。期望这一工作对有关同行能提供一些参考,推动有关研究的深入。

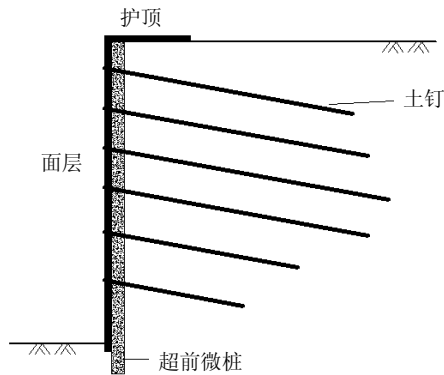


图1 超前微桩复合土钉支护结构示意图

Fig.1 Composite soil nailing with pre-installed micro-piles

## 1 支护构造及工作性能

图1为超前微桩复合土钉支护的典型支护断面示意图。其一般做法是在基坑开挖前在开挖线外侧按一定间距设置微型桩，可以是小直径混凝土桩、型钢等，也可打入钢管，并在管内外压力注浆来形成微型桩。微桩等效直径一般在100mm~300mm，间距1m左右。待所施做的微桩达到设计强度后，再分层开挖基坑、施做土钉，并将土钉与相应位置处的微型桩连接以形成一个整体。由于微型桩直径较小，其施工简便快捷，无需较大的施工机具和施工作业面。

大量工程实践证明，超前微桩复合土钉支护可以有效控制基坑变形、增强基坑边坡的稳定性。对于自立性较差的土层，微桩的设置还可以有效防止施工开挖过程中坑壁的局部坍塌。此外，当微桩具有一定嵌固深度时，还可起到阻止坑底隆起的作用。

目前，超前微桩复合土钉支护技术已被广泛应用于国内外的一些基坑支护工程中，取得了较好的支护效果，也使我们对此种复合土钉支护有了较深入的认识。比如，中国社会科学院中心图书馆基坑工程，坑深12m，基坑西南角的社科院主楼距坑边仅2.6m，基坑西北角的一栋办公楼距坑边仅5m。为保证基坑的稳定并控制变形，在此两部位采用超前微桩复合土钉支护，很好控制了变形<sup>[1]</sup>。山东临沂城建时代广场基坑深11.5m，基坑东侧紧临三栋建筑物，为控制基坑变形采用超前微桩复合土钉支护，施工完成后坑壁最大水平位移在20mm以内<sup>[12]</sup>。广州东山区某基坑深约9m，由于基坑东侧和北侧紧临既有建筑，且地质条件较差，场地又狭窄，采用了超前微桩、锚杆与土钉联合的复合土钉支护，开挖到坑底后的坑壁最大水平位移不到30mm，并

经受了雨季的考验<sup>[13]</sup>。美国宾夕法尼亚州的Titus电厂深基坑邻近三条运营中的铁路，需要严格控制基坑变形，且场地空间限制，场地地层又为喀斯特地层，不利于大直径桩施工，采用了微型桩、锚杆与土钉结合的复合土钉支护，获得了满意的支护效果<sup>[14]</sup>。

众多工程应用的成功，引起人们对此种支护型式的重视，推动了有关的研究。人们通过实测分析、模型试验以及有限元模拟对这种复合土钉支护的性能有了较为深入的认识。孙剑平等<sup>[12]</sup>对山东临沂城建时代广场基坑所采用的超前微桩复合土钉支护所进行的现场实测表明，这种复合土钉支护的坑壁最大水平位移出现在基坑开挖深度的中上部，当离开坑壁一定距离后土体沿深度方向的最大水平位移则出现在靠近地表处，这与纯土钉支护的坑壁最大位移一般出现在坑口是不同的。

本课题组通过有限元模拟分析研究了超前微桩复合土钉支护的工作性能<sup>[15-16]</sup>。有限元计算中，我们选用能够较好模拟土体开挖卸载条件下受力变形性能的硬化土模型<sup>[17]</sup>，采用三维有限元网格以考虑体系的局部三维特性<sup>[18]</sup>，较好模拟钉-土界面性质，还注意模拟施工开挖与建造的过程。对所采用的有限元模型进行实测对比检验之后，进行了大量模拟计算。计算分析主要得到以下几点认识<sup>[16]</sup>：  
1) 超前微桩能够有效减小基坑变形，特别是能够显著减小浅层的坑壁位移；2) 微桩的存在使坑壁水平位移最大点从坑口下移到坑深中部；3) 与没有超前微桩的情况相比，土钉轴力减小；4) 微桩嵌深大于2.5倍特征长度后，再增大嵌深其支护效果的改善有限，大于4倍~5倍特征长度后再增大嵌深其效果基本不变。此外，我们还对有微桩情况下的土钉布置进行了讨论。

## 2 整体稳定验算方法研究

### 2.1 本文建议的验算方法

如前所述，关于超前微桩复合土钉支护的整体稳定验算，《复合土钉墙基坑支护技术规范》目前所建议的方法是，将超前微桩的截面抗剪强度乘以由实际工程反算的折减系数来确定超前微桩对整体稳定的贡献。对此折减系数的取值文献<sup>[19]</sup>曾建议取0.5~1.0，文献<sup>[20]</sup>建议取0.3~1.0，规范中最终根据文献<sup>[21]</sup>的研究建议其取值范围为0.1~0.3。这里之所以采用折减系数，是因为实际的破坏模式一

般很少是微桩被剪断。当微桩嵌深较小时,有可能是踢脚破坏;而当微桩嵌深较大时,由于桩径较小,桩体相对柔软,嵌深的下段实际上并无作用。这在前述的工作性能分析中也已看到这一点。图2是一实际微桩在横向荷载作用下由有限元方法计算的变形情况,由图也可以清楚地看出嵌固段的下部几乎不受荷载的影响。

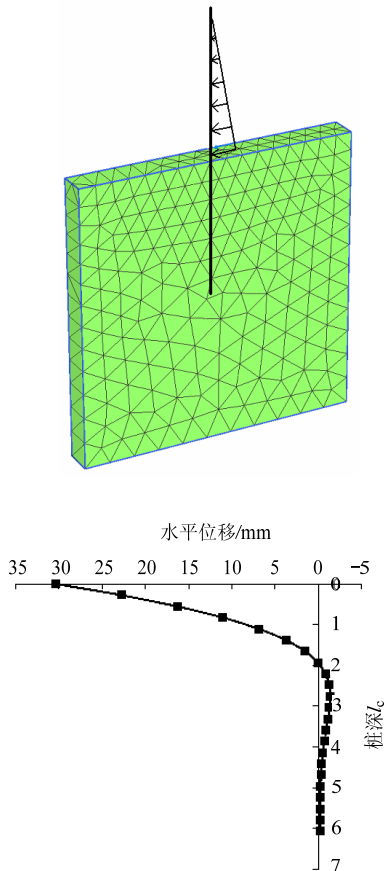


图2 微桩在横向荷载作用下的影响深度分析  
Fig.2 Influence depth of micro-pile under lateral loads

根据基础工程学中的相关理论<sup>[22]</sup>,横向荷载作用下桩的力学长度应采用能够反映桩土相对刚度的特征长度来衡量。桩的特征长度一般如下计算:

$$l_c = \sqrt[5]{EI / mb_0} \quad (1)$$

其中:  $EI$  为桩体截面的抗弯刚度;  $b_0$  为桩身截面计算宽度,主要决定于桩径,后文将介绍其计算方法;  $m$  为地基土层水平抗力系数的比例系数,可查《建筑桩基规范》<sup>[23]</sup>中的表 5.7.5,考虑土体塑性时可将  $m$  值取小一些。

理论分析表明,当桩长大于 4 倍特征长度时可以看出成无限长,也就是从荷载作用部位往下超过 4 倍特征长度的部分没有作用。而 4 倍特征长度范围内桩的横向位移显然并不均匀,粗略来说浅层位移

较大,深层较小,但深层能提供较大的抗力。经大量计算对比分析,对嵌深较大的情况取 2.5 倍特征长度上的抗力来考虑微桩的作用较为合适。基于此我们建议,当微桩的嵌深大于其特征长度的 2.5 倍时按 2.5 倍特征长度考虑,求出这一长度上桩的被动土压与对侧主动土压之差来考虑微桩对支护体系整体稳定的贡献。具体来说,在验算超前微桩复合土钉支护的整体稳定时,我们分别按桩周土体挤压破坏和微桩剪切破坏计算得到抗滑力  $Q_{pp}$  和  $Q_{pr}$  中,取其较小者作为微桩作用于滑移面的等效抗滑力,具体公式如下:

$$Q_p = \min(Q_{pp}, Q_{pr}) \quad (2)$$

$$Q_{pp} = (e_p - e_a)b_0l_e \quad (3)$$

$$Q_{pr} = 0.7\beta_h f_t A_c + f_{sv} A_s \quad (4)$$

$$l_e = \min(2.5l_c, l_0) \quad (5)$$

其中:  $Q_p$  为微桩在滑移面处的等效抗滑力;  $Q_{pp}$  为按土体挤压破坏计算得到的抗滑力;  $e_p$ 、 $e_a$  为滑移面下  $l_e$  深度范围内作用的被动、主动土压力的均值;  $l_e$  为滑移面下微桩的有效嵌固深度;  $b_0$  为微桩的计算宽度;  $Q_{pr}$  为微桩的界面抗剪强度;  $\beta_h$  为截面高度影响系数,由于微桩直径一般小于 150mm,取  $\beta_h=1$ ;  $f_t$  为混凝土的轴心抗拉强度值;  $A_c$  为注浆体截面面积,由于钢管外注浆体质量很难保证,可偏安全仅取钢管内注浆体面积;  $f_{sv}$  为钢管材料的抗剪强度值;  $A_s$  为微桩中钢的截面面积;  $l_c$  为微桩特征长度;  $l_0$  为滑移面下微桩实际嵌固深度。

现在再确定微桩的计算宽度,也就是微桩在承受横向荷载时的影响宽度。《建筑桩基规范》<sup>[23]</sup>中对桩径小于 1m 的横向承载桩建议其计算宽度取  $0.9(0.5m+1.5d)$ ,这计算宽度只与桩径有关。但已有一些研究表明横向受荷桩的计算宽度还与桩径之外的其他多个因素有关,包括嵌深、土体强度等<sup>[23]</sup>。为确定常见土层中超前微桩的计算宽度,我们分别采用图 3 所示的三维模型和平面模型进行了大量有限元计算对比,拟合确定了超前微桩的计算宽度公式如下:

$$b_0 = \frac{l}{1.5} k_s \cdot (0.4216h + 1.7990b + 0.8173 \tan \varphi + 0.1441) \quad (6)$$

其中:  $k_s$  为微型桩截面形状系数,对圆形桩取 0.85,对方形桩取 1;  $h$  为平行于荷载作用方向上桩的宽度;  $b$  为垂直于荷载作用方向上桩的宽度;  $\varphi$  为土的内摩擦角。这里的单位用 m。

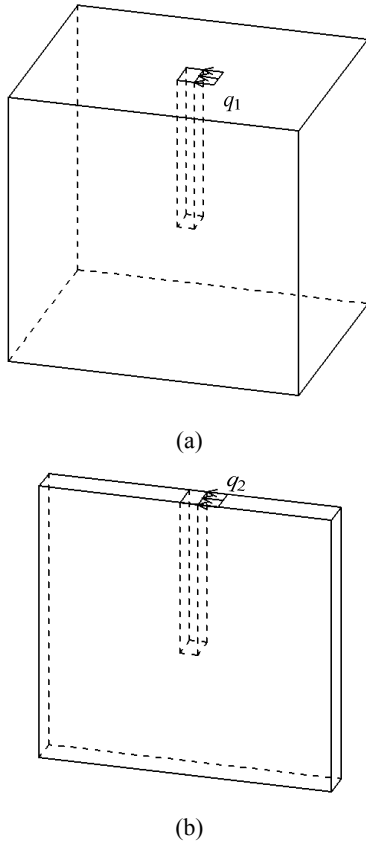


图3 确定微桩计算宽度的有限元模型

Fig.3 FE models used for determining micro-pile calculation width

在确定了微桩的计算宽度及等效抗滑力之后,我们即可计算超前微桩复合土钉支护的整体稳定安全系数  $K_S$ , 这里仍假定圆形滑移面并采用有关规范中常用的简单条分法, 其计算公式如下(参见图4):

$$K_S = \frac{M_R + M_N + M_P}{M_S} \quad (7)$$

$$M_S = \sum_{i=1}^n (Q_i + W_i) \sin \theta_i \cdot R \quad (8)$$

$$M_R = \sum_{i=1}^n [c_i l_i + (Q_i + W_i) \cos \theta_i \tan \varphi_i] \cdot R \quad (9)$$

$$M_N = \sum_{j=1}^m N_{Rj} [\cos \alpha_j + \sin \alpha_j \cdot \tan \varphi_j] \cdot R / S_j \quad (10)$$

$$M_P = R \frac{Q_p}{S_p} \quad (11)$$

上列式中:  $n$  为滑动土体所划分的土条数;  $m$  为穿过滑移面的土钉排数;  $c_i$  为土条  $i$  在滑移面处的内聚力标准值;  $\varphi_i$  为土条  $i$  在滑移面处的内摩擦角标准值;  $Q_i$  为土条  $i$  上地面荷载标准值;  $l_i$  为土条  $i$  沿滑弧面的弧长,  $l_i = b_i / \cos \theta_i$ ;  $\theta_i$  是土条  $i$  在滑

弧中点的切线倾角;  $W_i$  为土条  $i$  自重标准值;  $N_{Rj}$  为第  $j$  层土钉极限抗拔力;  $\alpha_j$  为第  $j$  层土钉与滑移面切线的夹角;  $S_j$  为土钉水平间距;  $Q_p$  为单根微型桩在滑移面处的极限抗滑力;  $S_p$  为微型桩间距;  $\beta$  为滑弧在与微桩相交处的切线与水平线的夹角。

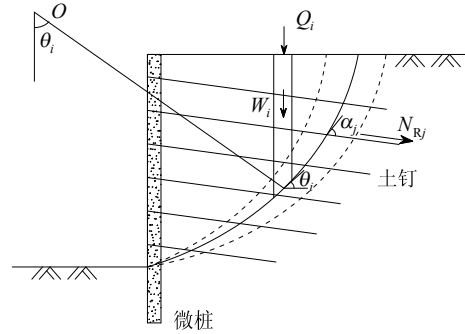


图4 整体稳定验算示意图

Fig.4 Diagram for global stability checking

## 2.2 对建议方法的计算检验

为了对上面所提出计算方法进行检验,我们将上述计算方法的结果与有限元计算结果进行了对比,这里给出一对比算例<sup>[25]</sup>。此算例中基坑深5.5m,支护断面如图5,共设3排土钉,土钉长度从上到下依次为5m、4m、4m,土钉水平与竖向间距均为1.5m,倾角10°,土钉孔径100mm,钢筋直径 $\Phi=18$ mm,土钉抗拉刚度 $EA=1.88 \times 10^5$  kN。微型桩长7.5m,桩径130mm,间距0.75m,内置壁厚3mm直径50mm的钢管,用梁单元模拟,输入的截面抗弯刚度 $EI=442.2$  kN·m<sup>2</sup>。喷射混凝土面层厚80mm,混凝土强度等级C20,用板单元模拟,取模量 $E=2.55 \times 10^4$  MPa。

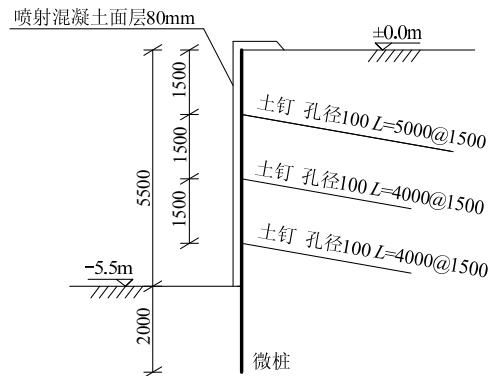


图5 基坑支护结构断面图

Fig.5 Cross section of the support system

地基分层厚度及各土层物理力学参数见表1,其中也给出了采用硬化土模型计算时需要的参数,但与安全系数计算有关的主要是强度参数。有限元

计算采用岩土有限元软件 PLAXIS3D-2012, 通过强度参数折减法计算给出该支护体系的整体稳定安全系数为 1.97, 达到极限状态时的增量位移场云图见图 6。而采用本文建议方法计算的安全系数为 1.87, 相应的滑移面示于图 7。两者计算的安全系数相差仅约 5%。

表 1 各土层主要物理力学参数  
Table 1 Physical property of soil layers

土层	$h/$ m	$\gamma/$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c/$ kPa	$\varphi/$ (°)	$\tau/$ kPa	$E_{50}^{ref}/$ MPa	$E_{oed}^{ref}/$ MPa	$E_{ur}^{ref}/$ MPa	$m$
杂填土	1.5	18	10	15	30	5	5	20	0.8
粉质粘土	0.75	19	25	20	50	15	15	60	0.7
砂质粘土	3.5	20	5	30	60	20	20	80	0.6
粉质粘土	2.5	19	25	20	50	15	15	60	0.7
砂质粘土	1.0	20	5	30	70	20	20	80	0.6
粉砂	5.75	20	5	35	80	25	25	100	0.55

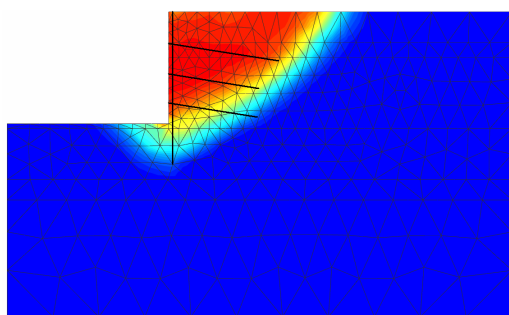


图 6 有限元计算的体系破坏时的增量位移场云图  
Fig.6 Contour image of incremental displacement at failure calculated by finite elements

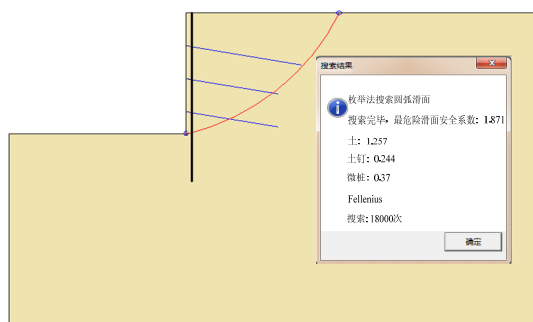


图 7 本文方法计算的圆形滑移面及相应安全系数  
Fig.7 Sliding surface and safety factor calculated by the proposed method

此外, 我们还针对 10 多个实际工程按本文建议方法计算了微桩等效抗力与微桩截面抗剪强度的比值<sup>[16]</sup>, 该比值在理论上对应于《复合土钉墙基坑支护技术规范》建议的组合折减系数 0.1~0.3。实际计算结果列于表 2 (其中“规范方法”计算值是指考虑折减系数前的值), 可见计算给出的比值多介于 0.1~0.3, 从而与规范建议得到了相互验证。但也有

一些工程计算的比值大于 0.3, 而这些工程的坑底地层明显较好, 得到较大的比值也是合理的。由此可见, 采用本文方法可以更好考虑各种不同的情况。

表 2 本文方法与《规范》方法的对比

Table 2 Comparison of the method proposed with that in the code

工程名称	微桩参数			抗滑力		
	坑深/m	嵌深/外径/m	坑底土	规范方法/ (kN/m)	本文方法/ (kN/m)	规范方法与本文方法之比
社科院基坑	12.0	0.5	80 粉质粘土	107.7	11.8	0.11
广州东山区 基坑	9.0	3.0	100 风化泥质 砂岩	263.5	164.9	0.63
远洋天地基坑	16.0	2.0	100 砂卵石	197.6	78.9	0.40
珠江新城基坑	8.0	4.0	73 粉质粘土	149.7	65.3	0.44
广州凯华城 基坑	12.2	3.2	114 风化 粗砂岩	121.8	93.3	0.77
北京西城区基坑	13.7	2.1	90 细中砂	187.7	48.7	0.26
郑东新区某基坑	9.0	3.0	48 粉土	117.3	27.1	0.23
某电信楼基坑	5.2	2.3	50 粉质粘土	85.5	38.0	0.44
秀水街基坑东侧	15.0	1.0	70 粉细砂	71.2	17.8	0.25
秀水街基坑西侧	15.0	1.0	108 粉细砂	123.5	22.5	0.21

### 3 变形计算方法研究

#### 3.1 本文提出的简化计算方法

这里讨论超前微桩复合土钉支护坑壁水平位移的简化计算方法, 作为阶段性研究首先考虑坑壁竖直的情况, 这也是采用此种支护时的常见情形。

设初始场地水平, 开挖前首先沿坑边外围施作微型桩, 此时微桩内外两侧所受土压力设为静止土压且处于平衡状态。随后进行第一步开挖至拟设第一排土钉稍下的深度, 此时微桩两侧土压力不再平衡, 此不平衡力即为开挖荷载, 此荷载需由微桩及其两侧土体共同承受。之后施作第一排土钉及相应部位的支护面层, 待其达到设计强度, 进行第二步开挖至拟设第二排土钉稍下的深度, 从而又产生开挖荷载增量, 此荷载增量由微桩、已施作的第一排土钉、支护面层以及微桩前后土体共同承受。如此进行, 直至开挖到设计坑底的深度。

一般来说开挖到坑底时体系的变形最大, 这也是我们要计算的。但从上述施工过程不难理解思路较为清晰的计算方法应是随施工过程逐步进行计算, 每一步得到体系各部位内力和变形的增量, 实际结果是各增量的累加, 针对桩-撑支护体系计算的增量法正是这样做的<sup>[26]</sup>。不难理解, 对于桩-撑支护体系, 上述开挖荷载可以认为就是由桩、撑及被

动区土体组成的体系承受的,或者说施加到桩上的荷载就是上述不平衡力。但对于超前微桩复合土钉支护则有所不同,上述荷载并未全部直接作用于微桩和面层(这是文献[8]和文献[11]之所以要特意求出面层或微桩所受荷载的原因),而是有一部分以摩擦力的形式作用于坑壁后方主动区的土钉侧面。正如纯土钉支护设计中所用分布侧压力大体与各排土钉最大轴力对应<sup>[27]</sup>一样,这里的开挖荷载大体对应于微桩和支护面层上所受土压力以及土钉位于主动区部分的侧摩阻力之和。在所建议的计算方法中,我们近似将各土钉在主动区部分的侧摩擦移到微桩和面层,这应仅影响微桩和面层的局部弯曲以及土钉在主动区一段的变形。对于前一影响,由于土钉间距较小,显然可以忽略。而对于后一影响,由于实际工程中土钉在主动区一段的刚度,远大于土钉在稳定区一段由土体提供的拉拔刚度,所以对这一段的变形都可以忽略,更不用考虑上述荷载移动的影响。当然,如欲更细致地进行计算,对此段的刚度不难予以计算,并可近似考虑上述荷载移动的影响。

根据上述分析,我们提出超前微桩复合土钉支护坑壁水平位移的简化计算方法。在此方法中,微桩及支护面层一起作为挡土构件,而被动侧土体以及嵌于稳定区的土钉起支撑作用,荷载则随开挖过程用增量法进行计算。如此计算的荷载反映了主动侧有滑移趋势土体的作用,它是由支护面层、微桩和已施做并嵌入稳定区的土钉以及与微桩嵌固段相邻的土体共同承受。

这样每一开挖步我们面对的问题是由被动侧连续土体和主动侧已施做土钉支撑、受有分布荷载的弯曲构件的计算。这里对被动侧土体可以用连续体来模拟,也可以用温克尔地基模型来模拟,后者一般是用  $m$  法。但采用  $m$  法时由于温克尔地基之类模型的固有缺陷,其参数的确定有较大的随意性,因此这里采用理论上较为完善的连续体模型。进一步我们参照弹性地基梁分析的链杆法<sup>[22]</sup>,将嵌固段的无穷多个支撑点用有限个支撑链杆来代替,如此我们给出图 8 所示的计算简图。

在计算简图确定后,我们需要确定体系的有关参数,这里需要着重讨论的一是被动侧链杆支撑刚度的确定,二是主动侧伸入稳定区土钉的抗拉拔刚度。

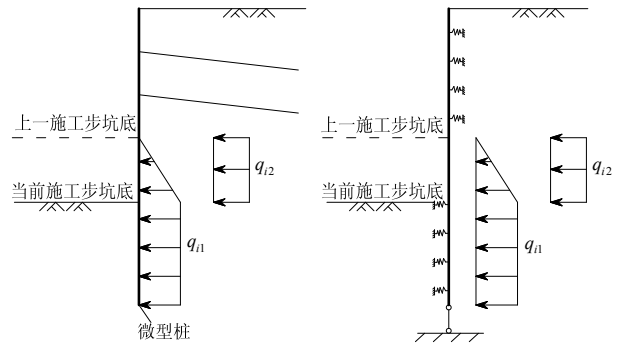


图 8 超前微桩复合土钉支护变形计算简图

Fig.8 Calculation diagram for the deformation of composite soil nailing

对被动侧链杆支撑刚度的确定我们需要计算图 9 所示四分之一无限体受局部分布荷载时的位移,对此问题的计算没有现成公式可用。为利用半无限体的布氏解,我们在图示坑底上方补充虚拟土体,使其成为半无限体,同时在关于坑底水平线对称的位置施加与链杆荷载对称的虚拟荷载。由对称性可知该虚拟半无限体在图示实际荷载和虚拟荷载作用下发生在坑底对应面上的剪应力为零,如忽略坑底对应面上正应力的影响,可以认为此虚拟体系的在坑底以下部分的变形与实际四分之一无限体在实际荷载下的变形近似相等。这样我们可以利用半无限体受力变形的计算公式来计算这里链杆的支撑刚度。

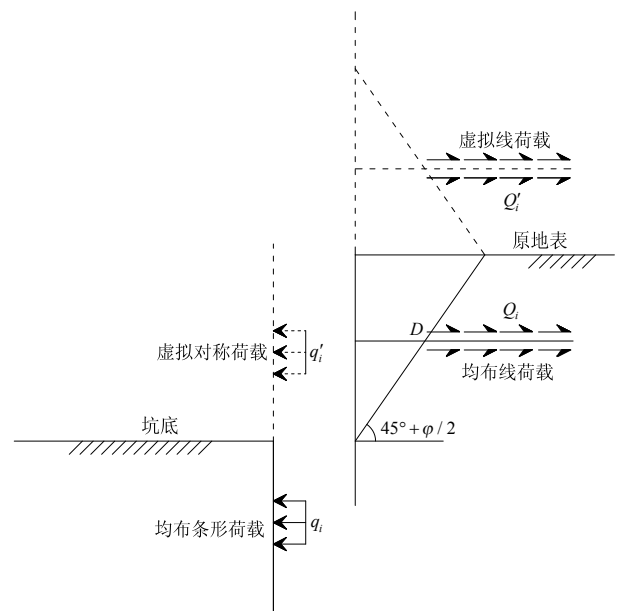


图 9 被动侧土体和主动侧土钉刚度计算图示

Fig.9 Calculation diagram for the nail and passive soil stiffness

显然,当上下两荷载相距较远时我们可以忽略两者的相互影响,从而可直接采用布氏解;而当荷载靠近坑底位置时,我们不难看出计算的刚度将接近直接用布氏解所计算刚度的一半,也就是折减系数近似为 0.5,且这 0.5 在理论上还是略偏大的。陆培炎曾建议对此种情况可采用折减系数  $2/3$ <sup>[28]</sup>,由上述分析可见这  $2/3$  是偏大的。

对于土钉的拉拔刚度,如前所述,这里建议忽略其在主动区一段的变形,而仅计算其伸入稳定区一段由土体的拉拔刚度。这样我们遇到的问题近似是四分之一无限体内的受力变形问题。为利用半无限体的相关解,我们同样在地表以上添加虚拟土体和虚拟土钉(见图 9),这样我们就可以利用桩基沉降计算中 Mindlin 解的 Geddes 积分(见文献[22]第 178 页)来计算土钉的拉拔刚度。

在确定了计算简图和所需参数后,即可讨论问题的求解方法。这里建议采用文献[22]中分析弹性地基梁时所用链杆法来求解。此求解方法是力法和位移法的联合,所采用的基本体系如图 10 所示。在此基本体系中我们截断所有土钉和模拟被动土体作用的链杆,代之以集中力  $R_i$ ,同时将模拟微桩和支护面层的竖向梁的下端固定。这样需求解的基本未知量是所有的集中力  $R_i$  和所假定固定端的位移  $\Delta_0$  及转角  $\varphi_0$ ,而对应的方程有,所有集中力作用点处由梁计算的位移和由土体计算的位移相等,以及按梁上所有作用力计算的固端力和力矩为零。前一组方程为:

$$\begin{bmatrix} \delta_{11}^b & \delta_{12}^b & \cdots & \delta_{1n}^b \\ \delta_{21}^b & \delta_{22}^b & \cdots & \delta_{2n}^b \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1}^b & \delta_{n2}^b & \cdots & \delta_{nn}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta_{1q} \\ \Delta_{2q} \\ \vdots \\ \Delta_{nq} \end{bmatrix} + \Delta_0 - \tan\varphi_0 \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \delta_{11}^s & \delta_{12}^s & \cdots & \delta_{1n}^s \\ \delta_{21}^s & \delta_{22}^s & \cdots & \delta_{2n}^s \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1}^s & \delta_{n2}^s & \cdots & \delta_{nn}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $\delta_{ij}^b$  是梁上  $j$  点单位力引起梁上  $i$  点的位移;  $\Delta_{iq}$  为由增量荷载引起的梁上  $i$  点的位移;  $y$  为竖向坐标,其原点设于梁的下端,而转角  $\varphi_0$  以逆时针为正;  $\delta_{ij}^s$  是土体  $j$  点受单位集中力作用时所引起  $i$  点

的位移。需要指出的是这里不考虑被动土体与伸入稳定区土钉间的相互影响。实际上,对于土钉之间可仅考虑上下相邻土钉的影响,对被动区的链杆同样可仅考虑直接相邻链杆间的影响。显然上式左端是由梁计算的各集中力作用点处的位移,而右侧则是由土体计算的各集中力作用点处的位移,因正向规定不同故左端有一负号。

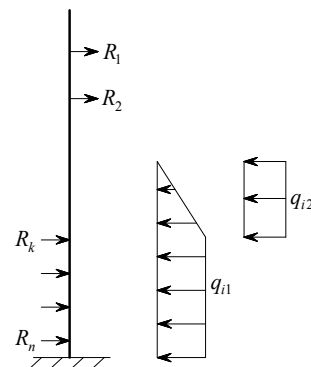


图 10 对问题求解的基本体系简图  
Fig.10 Basic system for the solution

而假定固定端的固端力和力矩为零的条件可表示为:

$$\sum R_i = X_q, \quad \sum R_i y_i = M_q \quad (13)$$

式中,  $X_q$ 、 $M_q$  分别是当前全部增量荷载的合力及对梁下端的力矩。

显然,上述方程数与基本未知量数相等,可以求解。在解出所有基本未知量后,可用式(12)的左端计算得到坑壁位移。如此随开挖过程逐步计算,任一施工步的总位移为此前各增量步计算值的和。同时可以看出,这里所提出的方法不但可以计算坑壁位移,还可同时计算土钉轴力。

### 3.2 对计算方法的对比验证

对于上述计算方法,我们编制了相应的简易计算程序,通过一些计算对比进行了检验,包括与有限元方法的计算对比,也包括与工程实测的对比。我们认为对此类问题,如有较为完善的有限元计算模型,与有限元法的计算对比应是更严格的检验。因为与工程实测的对比,将不仅包含两计算模型的差异,还将包含地勘报告所提供参数误差的影响,而实测数据本身有时也可能有较大误差。这里给出两个算例,一个与有限元计算对比,一个与工程实测对比。

算例一坑深 9m,采取超前微桩复合土钉支护,微桩桩径 0.15m,长 10m,嵌固深度 1m,间距 0.75m,截面抗弯刚度取  $EI = 994\text{kN} \cdot \text{m}$ 。设置 5 排土钉,



钉孔直径 0.1m, 水平布置, 长度均为 8m, 竖向间距 1.8m, 水平间距 1.5m,  $EA = 2.356 \times 10^5 \text{kN}$ 。设地基为单一土层, 土体容重  $\gamma = 20 \text{kN/m}^3$ , 内聚力  $c = 30 \text{kPa}$ , 内摩擦角  $\varphi = 20^\circ$ , 模量  $E_{50}^{\text{ref}} = 20 \text{MPa}$ , 模量正应力影响指数  $m = 0.7$ , 泊松比  $\nu = 0.3$ 。

采用本文方法的计算结果与采用 PLAXIS3D-2012 计算结果的对比见图 11, 可见二者的分布及大小都足够接近。

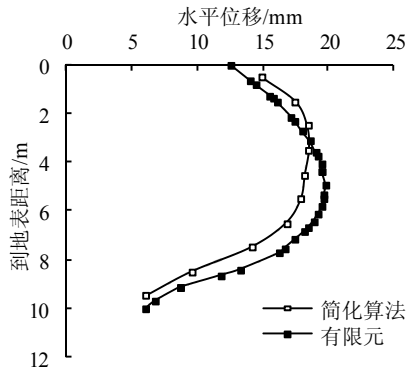


图 11 坑壁水平位移比较

Fig.11 Comparison of the calculated displacements

算例二考虑一实际基坑工程, 坑深 9m, 基坑东侧和北侧因紧临已有建筑, 采用超前微桩复合土钉支护, 微桩直径 150mm, 长 12m, 间距 600m。共设五层土钉, 两层锚杆, 支护断面及有关参数见图 12<sup>[13]</sup>。该处土层从上往下依次为杂填土、淤泥质粉质粘土、细砂、粉质粘土和强风化泥质粉砂岩, 各土层物理力学参数如表 3 所示。超前微桩及支护面层的等效抗弯刚度为  $EI = 1.495 \times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}^2/\text{m}$ 。计算时, 土弹簧的竖向间距取 1m。

在此算例中有预应力锚杆, 对锚杆预应力的考虑方法是在随施工过程的分步计算中, 当设置锚杆后即施加预应力进行一步计算。如此计算的坑壁水

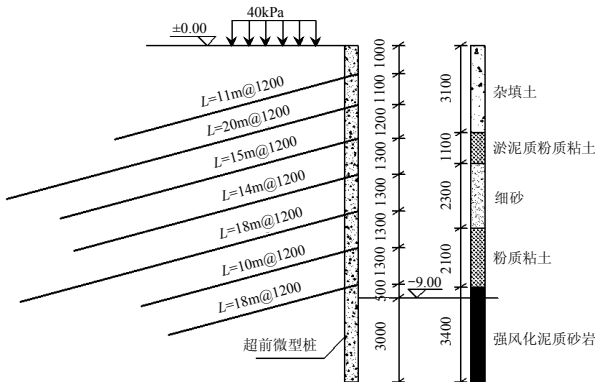


图 12 基坑支护断面图

Fig.12 Cross section of the support system

表 3 土层主要物理力学指标

Table 3 Physical properties of the soil layers

土层名称	H/m	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	E/MPa	$\nu$
杂填土	3.1	19.0	10.0	15.0	4.0	0.35
淤泥质粉质粘土	1.1	19.0	10.0	8.0	3.0	0.40
细砂	2.3	19.0	0.0	24.0	30.0	0.25
粉质粘土	2.1	19.0	25.0	22.0	25.0	0.30
强风化泥质砂岩	3.4	20.0	60.0	28.0	120.0	0.20

平位移与现场实测的对比见图 13, 二者同样很接近。但是, 岩土工程问题与实测的对比含有更多的复杂影响因素, 有较多的随意性。所以有些情况下并不能作为方法检验的重要依据, 而与有限元计算的对比相对来说可能更说明问题。

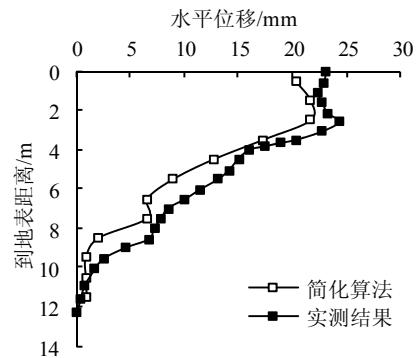


图 13 坑壁水平位移的计算值与实测值对比

Fig.13 Comparison of the calculated displacements with field measurements

### 4 结论

本文在综述超前微桩复合土钉支护的工作性能、工程应用以及已有一些计算分析方法研究的基础上, 对这种复合土钉支护的整体稳定验算和坑壁位移计算方法进行了讨论, 并提出相应的简化计算方法。

所提出的整体稳定计算方法, 采用能够考虑桩土相对刚度的特征长度来确定微桩嵌固段的抗力, 还给出了确定微桩受横向荷载作用时的计算宽度公式, 进而用现行规范常用的条分法来计算支护体系的整体稳定安全系数。与有限元法计算结果的对比表明本文方法的可靠性, 与现行规范方法的对比使二者得到了相互验证, 但避免了规范法中折减系数取值较强的经验性, 且在坑底存在较硬土层时能给出相对更为准确的结果。

所提出的位移计算方法, 通过深入思考该种支护体系的受力变形机理, 仔细论证了所应采用的计算模型, 以及荷载及支护参数的确定方法。与有限

元及现场实测的对比检验了所建议方法的合理可靠性。此外,所建议的计算方法不但可以计算坑壁位移,在理论上也可以同时计算给出支护体系的内力,包括土钉轴力,微桩的剪力和弯矩等。

尽管目前的一些算例表明所提出的方法合理可行,但限于问题的复杂性,尚需更多的计算对比,以对所提出的计算方法进一步检验完善,特别是对变形的计算方法。进一步的发展还应考虑土体分层、坑壁倾斜等情况下的计算分析等。这些研究正在进行,有关成果容后报告。

### 参考文献:

- [1] 陈肇元,崔京浩.土钉支护在基坑工程中的应用[M].第2版.北京:中国建筑工业出版社,2000:64-66,83-107.  
Chen Zhaoyuan, Cui Jinghao. Application of soil nailing in excavation support [M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2000: 64-66, 83-107. (in Chinese)
- [2] 龚晓南,宋二祥,郭红仙,徐明.基坑支护实例集3[C].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Gong Xiaonan, Song Erxiang, Guo Hongxian, Xu Ming. Collection of deep excavation support projects [C]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [3] 宋二祥,邱玥.基坑复合土钉支护的有限元分析[J].岩土力学,2001,22(3):241-244.  
Song Erxiang, Qiu Yue. Finite element analysis of composite soil nailing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001(3): 241-244. (in Chinese)
- [4] JGJ120-2012,建筑基坑支护技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.  
JGJ120-2012, Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [5] GB50739-2011,复合土钉墙基坑支护技术规范[S].北京:中国计划出版社,2011,  
GB50739-2011, Technical code for composite soil nailing in retaining and protection of excavation [S]. Beijing: China Planning Press, 2011. (in Chinese)
- [6] 郭红仙.考虑施工过程的土钉支护分析方法研究[D].北京:清华大学,2006.  
Guo Hongxian. Analysis of soil nailing with consideration of its construction process [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese)
- [7] 郭红仙,宋二祥,陈肇元.土钉支护开挖影响面及其在土钉力计算中的应用[J].工程力学,2007,24(11):82-87.  
Guo Hongxian, Song Erxiang, Chen Zhaoyuan. Influence surface of soil nailing and its application in nail force calculation [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11): 82-87. (in Chinese)
- [8] 郭红仙,宋二祥,陈肇元.考虑施工过程的土钉支护坑壁水平位移计算[J].岩土工程学报,2010(增刊1):69-73.  
Guo Hongxian, Song Erxiang, Chen Zhaoyuan. Calculation of soil nailing displacement considering its construction process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(suppl 1): 69-73. (in Chinese)
- [9] 魏焕卫,杨敏,孙剑平,贾强.土钉墙变形的实用计算方法[J].土木工程学报,2009,42(1):81-90.  
Wei Huanwei, Yang Min, Sun Jianping, Jia Qiang. Practical calculation methods for soil nailing [J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2009, 42(1): 81-90. (in Chinese)
- [10] 尹骥,魏建华,李象范.计算复合土钉支护变形的增量方法[J].岩土工程学报,2007,29(5):755-759.  
Yin Ji, Wei Jianhua, Li Xiangfan. Incremental method for deformation calculation of soil nailing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 755-759. (in Chinese)
- [11] 魏焕卫,宋丰波,杨敏,孙剑平.复合土钉墙变形的简化计算方法[J].工程力学,2011,28(S1):156-166.  
Wei Huanwei, Song Fengbo, Yang Min, Sun Jianping. Simplified calculation method for soil nailing deformation [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S1): 156-166. (in Chinese)
- [12] 孙剑平,魏焕卫,刘绪峰.复合土钉墙变形规律的实测分析[J].岩土工程学报,2008,30(增刊1):479-483.  
Sun Jianpin, Wei Huanwei, Liu Xufeng. Analysis of deformation behavior of soil nailing by field measurements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(Suppl 1): 479-483. (in Chinese)
- [13] 杨光华.深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[M].北京:地质出版社,2004:193-197.  
Yang Guanghua. Practical calculation methods for deep excavation support and their application [M]. Beijing: Geologic Press, 2004: 193-197. (in Chinese)
- [14] Kartofilis D, O'Gara B, Tarquinio F Titus. Power plant micro-pile retaining wall [J]. Foundation Drilling, 2006, 32(32): 10-13.
- [15] 宋广,黄建华,宋二祥.超前微桩复合土钉支护三维非线性数值分析[J].岩土工程学报,2010,32(增刊1):151-155.  
Song Guang, Huang Jianhua, Song Erxiang. Three dimensional non-linear analysis of composite soil nailing with pre-installed micro-piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Suppl 1): 151-155. (in Chinese)
- [16] 宋广.超前微桩复合土钉支护分析[D].北京:清华大学,2012.  
Song Guang. Analysis of composite soil nailing with

- pre-installed micro piles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [17] Schanz T, Vermeer P A, Bonnier P G. The hardening soil model - formulation and verification [C]. Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 Years of Plaxis, 1999: 281-296.
- [18] 宋二祥, 高翔, 邱月. 土钉支护安全系数的强度参数折减有限元法[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 258-263.  
Song Erxiang, Gao Xiang, Qiu Yue. Finite element method for safety factor calculation of soil nailing by strength reduction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 258-263. (in Chinese)
- [19] 杨志银, 张俊, 王凯旭. 复合土钉墙技术的研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 153-156.  
Yang Zhiyin, Zhang Jun, Wang Kaixu. Research and application of composite soil nailing technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 153-156. (in Chinese)
- [20] 魏屏, 杨敏, 刘斌. 复合土钉墙整体稳定性计算中折减系数 $\xi$ 和 $\eta$ 的研究[J]. 结构工程师, 2010, 26(4): 74-79.  
Wei Ping, Yang Min, Liu Bin. Study on the reduction factor  $\xi$  and  $\eta$  in global stability analysis of composite soil nailing [J]. Structural Engineer, 2010, 26(4): 74-79. (in Chinese)
- [21] 付文光, 杨志银. 复合土钉墙整体稳定性验算公式研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 742-747.  
Fu Wenguang, Yang Zhiyin. Study on the formula for the global stability calculation of composite soil nailing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 742-747. (in Chinese)
- [22] 周景星, 李广信, 虞石民, 王洪瑾. 基础工程[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2007: 119-129, 171-175.  
Zhou Jingxing, Li Guangxin, Yu Shimin, Wang Hongjin. Foundation engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 119-129, 171-175. (in Chinese)
- [23] JGJ94-2008, 建筑桩基规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
JGJ94-2008, Technical code for building pile foundations [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [24] 李维树, 黄志鹏, 丁秀丽, 等. 基于抗滑桩计算宽度的水平推力试验研究[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(5): 40-43.  
Li Weishu, Huang Zhipeng, Ding Xiuli, et al. Experimental study of horizontal push force for the calculation width of anti-sliding pile [J]. Journal of the Academy of Yangtze River Science, 2005, 22(5): 40-43. (in Chinese)
- [25] 林忠伟, 王新宇, 张振铎. 微型护坡桩和土钉墙复合支护结构设计及实践[J]. 岩土工程技术, 2008, 22(5): 263-266.  
Lin Zhongwei, Wang Xinyu, Zhang Zhenduo. Design and construction of composite soil nailing with micro-piles [J]. Technology of Geotechnical Engineering, 2008, 22(5): 263-266. (in Chinese)
- [26] 杨光华, 陆培炎. 深基坑开挖中多撑或多锚式地下连续墙的增量计算法[J]. 建筑结构, 1994, 24(8): 28-31.  
Yang Guanghua, Lu Peiyan. Incremental calculation method for diaphragm wall with multi-struts or anchors for deep excavation support [J]. Building Structures, 1994, 24(8): 28-31. (in Chinese)
- [27] CECS96:97, 基坑土钉支护技术规程[S]. 北京: 1997.  
CECS96:97, Specification for soil nailing in foundation excavations [S]. Beijing: 1997. (in Chinese)
- [28] 陆培炎. 横向荷载下土、桩共同作用的简化法[J]. 广东水电科技, 1991, 11(1): 1-10.  
Lu Peiyan. Simplified analysis method for soil-pile interaction under lateral loads [J]. Science and Technology of Hydropower in Guangdong Province, 1991, 11(1): 1-10. (in Chinese)

注: 该文在第22届结构工程学术会议(2013 新疆)应邀作特邀报告