

大型超深基坑工程信息化施工研究

——上海外环隧道的浦西基坑工程

A study on IT construction for specially big & deep excavation engineering
—Deep excavation engineering of Outer Ring Tunnel Project in Puxi, Shanghai

杨国祥¹, 李侃¹, 赵锡宏², 李蓓²

(1. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200032; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 上海外环隧道的浦西基坑工程是一个开口型基坑, 深达 30 m 和不等深度, 宽 43 m。本文对墙后地面沉降和墙顶沉降以及墙体水平位移进行研究, 采用综合分析方法(包括系统的现场监测, 超明星非线性空间软件和多种预测方法的跟踪计算), 紧密结合现场的实际情况, 按实际施工工况, 有针对性地跟踪预测, 提前两周提供分析结果, 以期更好地指导施工。实践表明, 运用综合分析方法是十分有效的。对土压力进行了实测与分析, 结合变形分析对墙体工作性状的变化进行监视, 并建议了一个实用的计算主动区土压力图式。最后, 对信息化施工提出几点理性认识。

关键词: 基坑工程; 大型超深; 跟踪; 信息化施工; 土压力

中图分类号: TU 941

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)04-0483-05

作者简介: 杨国祥(1949-), 男, 高级工程师, 总工, 长期从事地下工程施工技术研究。

YANG Guo-xiang¹, LI Kan¹, ZHAO Xi-hong², LI Bei²

(1. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The deep excavation engineering of Outer Ring Tunnel Project in Puxi, Shanghai, is an open-type one in plane with depth of 30 m and width of 43 m. This paper deals with the field study of deformation behind retaining wall, on top of wall and inside the wall. A synthetic method, including the systematic field monitoring, the application of SUPER-Star software of space nonlinear design theory for deep excavation engineering and several prediction methods, is used to obtain the data of deformation in advance of two weeks for guiding construction at each stage. Engineering practice in this project has shown that the adoption of IT construction is successful and the rich data accumulated is valuable. The earth pressure is also studied to monitor the variation of behavior. A practical scheme for computation of active earth pressure is suggested. Finally, some important theoretic understandings for IT construction are proposed in this paper.

Key words: excavation engineering; especially big & deep; trace; IT construction; earth pressure

0 前言*

信息技术(Information Technology, IT)是一门新兴而发展极快的科学技术, 已深入到各个科技领域, 岩土工程也不例外。基坑工程的信息化施工, 不但能检验基坑设计理论和方法的正确性, 而且为发展基坑设计理论和方法创造有利条件, 它有效指导现场施工, 有利于保证整个围护结构在施工过程中的安全, 有利于控制结构的变形及其周围建筑和地下管线的安全, 有利于达到优化施工和避免事故发生的目的。工程实践已经证明: 信息化施工对基坑工程起着极其重要的作用。同时, 信息化施工所产生的社会效益也十分显著。

上海外环隧道浦西暗埋段的大型超深基坑工程, 宽 43 m, 靠近黄浦江处的最大深度超过 30 m。本工程的信息化施工要求的监测内容包括墙顶位移和墙后地面沉降的量测、墙体位移的量测、土压力的量测、墙体应力的量测、支撑轴力和立柱位移的量测、周围建筑和管线位移的量测以及地下水的量测。

监测和预测工作贯彻整个施工过程, 资料非常丰富

富和宝贵, 监测和预测内容很多, 文献[1]已对墙体变形和支撑轴力、立柱隆起引起的轴力计算、基坑底隆起与底板浇注标高的考虑、墙后地面的沉降、对墙后管线和建筑物的影响及土压力的量测等等作了阐述, 这里仅侧重阐述墙后、墙顶和墙体位移的实测和预测内容。同时, 对土压力实测进行研究, 监视施工的进展, 以期保证施工顺利进行。

1 墙后、墙顶和墙体位移的实测和预测

本部分的内容既有实测研究, 以期能够提供可靠数据, 又有预测研究, 以期有效指导下一步施工。根据以往的实测研究获得的多种理论或经验公式, 以实测数据加以检验和修正, 选择和发展预测的方法, 随后, 根据工程的实际进展, 按各种施工工况进行预测, 提供两周前的数据, 以期起到指导施工的作用。工程实践表明, 提出的分段时效抛物线方法(简称分段抛物线法)和相应发展的软件十分有效。

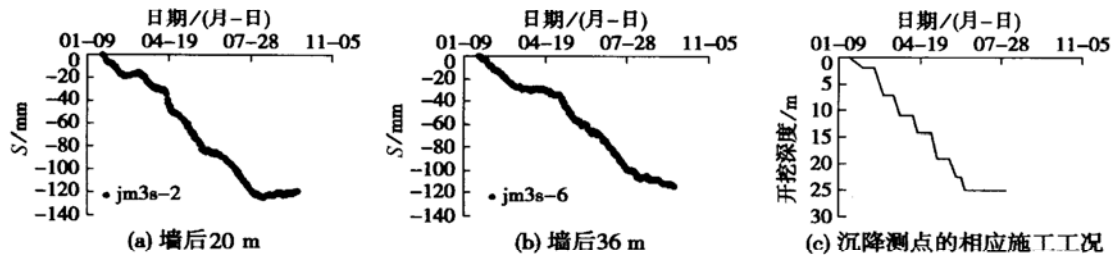


图1 墙后地表沉降实测曲线

Fig. 1 Measured curves of settlement for ground surface behind wall

1.1 墙后地面沉降的实测与预测

(1) 墙后地面沉降的实测曲线

从2001年1月到11月,历时将近一年对基坑两侧的墙后地面沉降的实测资料进行分析,绘制沉降时间关系曲线,典型曲线见图1。从沉降时间曲线可以明显看出,地表沉降的变化为抛物线型,有两种形式:一种在地下墙后20 m内的地表沉降为多级抛物线型,每一级抛物线都对应一个施工工况;另一种在墙后超过20 m距离的地表沉降为两级抛物线型,一级抛物线从开始动土到开挖至四层和四道支撑,二级抛物线从开挖五层及其以后一段时间。墙后地面沉降的抛物线都具有两个特点,即前期沉降速率大,变形快,后期沉降速率小,变形缓,并逐渐趋于稳定。

(2) 墙后地面沉降的预测

目前墙后地面沉降的预测方法有多种,例如,时效抛物线法、动态施工黏弹性反演法、智能预测控制法、时空效应法和定点跟踪法等。根据对本工程的墙后地面沉降实测和预测分析研究,我们提出的时效抛物线法以及相应发展的预测软件超明星软件三——基坑预测系统是有效的。

a) 时效抛物线法

墙后地面沉降的整个过程为抛物线型,即沉降和时间的关系为

$$S = at^2 + bt + c, \quad (1)$$

其中, t 为时间, a , b 和 c 为待定的正参数,采用最小二乘法来拟合曲线。

a , b 和 c 参数可以根据从开挖开始到开挖至某层的监测数据进行拟合求得,再去预测下一工况的沉降值,可以根据观测过程的数据点不断地进行预测和调整预测,直至全过程。预测结果见图2。图2中的预测曲线①用从开挖开始到第三道支撑的监测数据预测第四层开挖的沉降,预测曲线②用从开挖开始到第七层开挖的监测值预测浇筑底板及其以后的40 d的沉降值,预测曲线③用从开挖开始到底板浇筑结束后一个月的监测值预测后30 d的值。

b) 分段时效抛物线法

墙后地面沉降采用分段抛物线法进行预测更为有

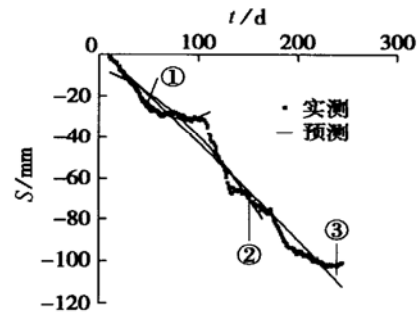
图2 时效抛物线法预测墙后地面沉降
(测点 Jm3n-6, 北墙后36 m)

Fig. 2 Predicted settlement of ground surface behind wall using Time-dependent parabolic method

效。本方法是紧密结合施工工况进行的预测方法,能及时、有效地指导下一步施工。对于不同施工工况,利用开挖前段的数据来预测开挖后段及支撑时的变形。分两种情况:一是对在墙后20 m内的地表沉降,每一个工况确定一个曲线;二是对在墙后超过20 m距离的地表沉降,确定两个抛物线,一级抛物线从开始动土到开挖至第四层和第四道支撑,二级抛物线从开挖第五层及其以后一段时间,见图3。图中的预测曲线①用从开挖开始到第三道支撑的监测数据预测第四层开挖的沉降,预测曲线②用第五层开挖到第七层开挖的监测值预测浇筑底板及其以后的40 d的沉降值,预测曲线③用从第五层开挖到底板浇筑结束后一个月的监测值预测后30 d的值。

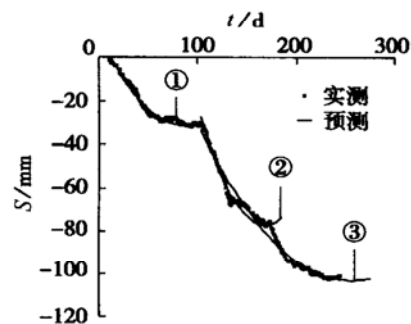
图3 分段时效抛物线法预测墙后地面沉降
(测点 Jm3n-6, 北墙后36 m)

Fig. 3 Predicted settlement of ground surface behind wall using Time-dependent parabolic method by stages

1.2 墙顶沉降的实测与预测

墙顶沉降与时间的曲线也可是分段曲线,一段从开始动土到开挖至第四层和第四道支撑,二段从开挖第五层及其以后一段时间。每段都有两个特点,即前期沉降速率大,变形快,后期沉降速率小,变形缓,并逐渐趋于稳定。预测也可以采用分段时效抛物线法进行,见图4。

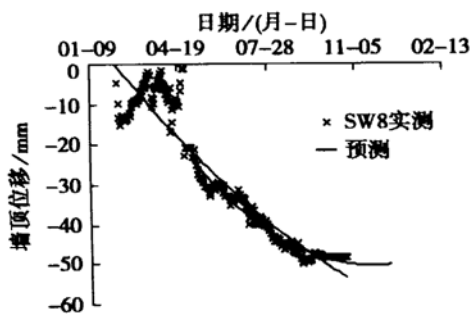


图4 墙顶沉降的实测与预测曲线

Fig. 4 Measured and predicted settlement on top of wall

1.3 墙体水平位移的实测和预测

墙体水平位移曲线特征为两端头小,中间大,最大水平位移位置随开挖深度逐渐增大,向下移动,最终在开挖面处达到最大,见图5。预测采用时效曲线法进行^[2],见图6。

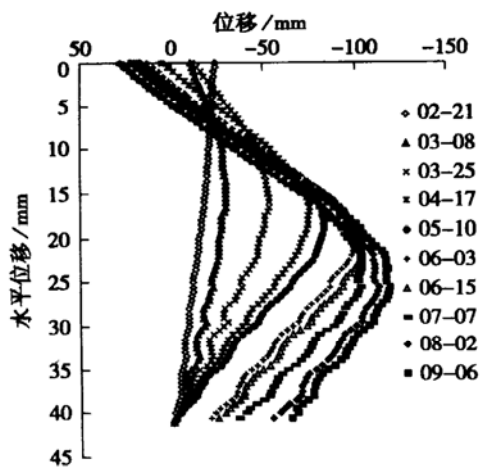


图5 墙体水平位移实测曲线(测点 CX18)

Fig. 5 Measured curves for deflection of wall

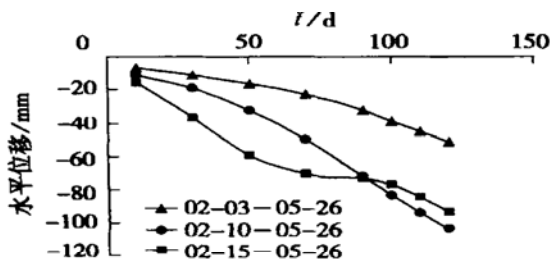


图6 墙体水平位移的预测曲线(CX6, CX8, CX18 测点)

Fig. 6 Predicted curves for deflection of wall

1.4 墙体水平位移的定点跟踪法

定点跟踪法是整理分析墙体水平位移的简便而有效的方法,该方法已用于上海三角地广场深基坑工程

的测试研究^[3]。

本工程首先根据各个施工工况墙体计算位移的变化,结合已有的测斜数据,选定在 PX26-6 段测斜管 CX18 的深度为 15.5 m 处的测点作为跟踪分析、预测及判断的对象(见图7)。以后,再根据分析结果,依次确定增加某一深度作为研究对象,深度分别为 16.5, 17, 18.5, 19, 22, 25.5 m。这样,随着开挖深度的加深,跟踪点也逐步加深,以跟踪点位移的大小和位移速率作为控制标准,指导施工。

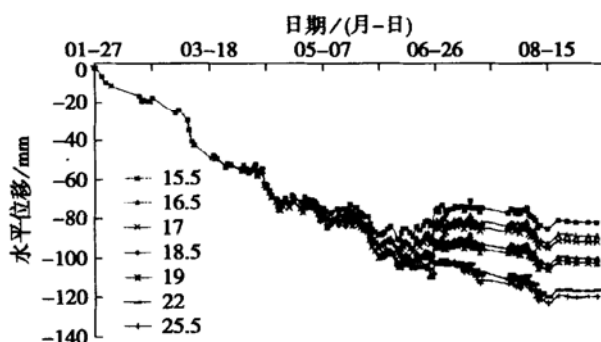


图7 墙体水平位移在跟踪点随时间的变化(测点 CX18)

Fig. 7 Deflection of wall vs time at traced point

由图7可以看出:从2001年1月27日开始挖土到4月18日开挖到第三层土的两个多月内,CX18处的墙体位移随工况呈台阶形增大,尤其是从4月11日到4月18日一周的时间内,16.5 m深度处的测点位移量及位移速率变化最大,一周内位移增加13.4 mm,周平均位移速率为2.85 mm/d,累积位移达75.8 mm,当时基坑开挖深度为12.0 m,最大水平位移与基坑深度之比为6.32%。因此,为避免事故的发生,及时调整施工方案,改变基坑开挖和浇筑支撑的施工顺序,在进行第四层土方开挖时,先对墙体变形最大的PX26-6段对应区域的第四道直支撑的土方以“盆式”方式进行开挖,并尽量减少该处的无支撑暴露时间,在该道支撑浇筑完毕并达到设计强度后,再开挖其余部位。经采取以上措施,CX18处的墙体位移得到明显改善,相应测点的平均位移速率明显减缓,仅为0.5 mm/d。最后,CX18处基坑开挖到底(-26.3 m)后,墙体的最大水平位移为122.99 mm,位置在最终开挖面附近(-25.5 m处),最大水平位移与基坑深度之比为4.68%。

定点跟踪法可结合其它的预测方法(如时效曲线法)进行分析、预测和判断,在出现事故苗头时,可及时采取措施,调整施工方案,保证施工的顺利进行。

2 土压力的实测与分析

土压力的研究已有悠久的历史,是一个非常复杂的问题,涉及的影响因素很多。要真正解决土压力问

题,有待研究工作者的长期艰苦努力与探讨。

在上海外环隧道的大型超深基坑工程中,进行了比较系统而长期的土压力监测工作。浦西的测孔设在 PX26-6 处,该测孔深达 46 m(墙前 4 个测点: -29, -34, -43, -46 m; 墙后 10 个测点: -5.2, -9.8, -14.4, -18.6, -22.8, -26.3, -29.0, -34, -38, -43 m),埋设位置见示意图 8。该处地下连续墙深 44 m,开挖深度 26.3 m,共设置 6 道支撑,标高依次为: -2.0, -6.6, -11.2, -15.6, -19.5 和 -23.2 m,前四道为钢筋混凝土支撑,最后两道为钢支撑。土压力的监测从 2000 年 10 月到 2001 年 7 月,跟踪基坑开挖的整个过程,是极为难得的宝贵资料。

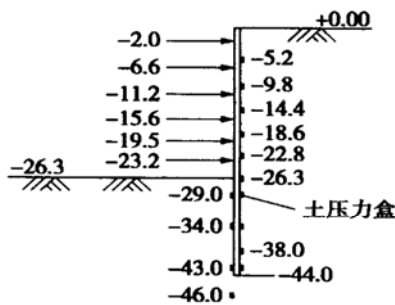


图 8 土压力盒布置示意图

Fig. 8 Layout of earth pressure cell

本研究以浦西段的实测土压力资料为基础,配合第一部分——墙后、墙顶和墙体的位移实测和预测,监视基坑施工的进展,同时,以期得到规律性认识,为上海等软土地区的大型超深基坑工程的土压力研究积累经验。

2.1 实测主动和被动土压力沿深度的分布

(1) 主动区土压力

根据实测主动土压力沿深度分布的资料、朗肯主动土压力和静止土压力的计算值,绘制图 9。从图可见,墙后实测主动区土压力沿深度成中间大、两头小的近似梯形分布形式,而且,这种近似梯形分布形式随开挖深度的增加基本保持不变。从图 9 又可知,除基坑上部及墙底外,实测土压力基本均大于朗肯主动土压力,甚至大于静止土压力。在基坑上部 20 m 深度范围内,实测值与朗肯主动土压力较接近;在最终开挖面以下,实测土压力则较朗肯主动土压力大得多;而在墙底附近,二者又较为接近。这可形象地说明一个重要问题:达到主动土压力极限状态的土体位移,随深度而变化。对于类似本工程的大型超深基坑工程,在基坑底面上采用主动土压力计算是不合理,这样偏于危险;在基坑底面下,按主动土压力计算也是不合理,这样偏于安全。

(2) 被动区土压力

被动区 4 个测点的实测土压力沿深度的分布形式不很明确,远远小于朗肯被动土压力,说明墙体向着土

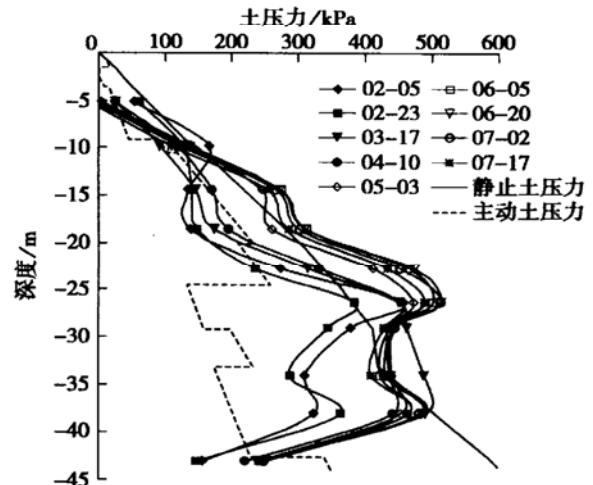


图 9 墙后主动区土压力实测曲线与朗肯主动土压力、静止土压力图的总貌

Fig. 9 Measured earth pressure, Rankine active earth pressure and earth pressure at rest in active zone behind wall

体方向运动的位移远远未达到极限状态,在工程实践中,研究大型超深基坑的被动极限土压力可能没有多大重要意义。因此,下面侧重分析主动土压力问题。

2.2 实测主动土压力合力随时间(工况)的变化

为了分析与评价朗肯主动土压力的水土合算和水土分算两种情况,与实测土压力和静止土压力进行比较,绘制主动区土压力合力随时间的变化图,见图 10。

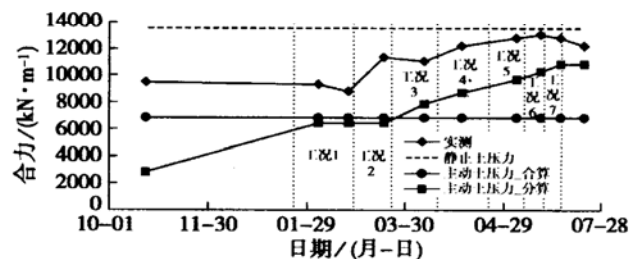


图 10 主动区土压力合力实测值随时间的变化

Fig. 10 Resultant force of earth pressure behind wall vs time

由图 10 可知,实测主动区土压力合力在基坑开挖的初始阶段(第 1 工况)先有小幅度的降低,然后随时间增加到接近静止土压力合力,最后出现下降的趋势。实测的主动区土压力合力始终界于朗肯主动土压力合力和静止土压力合力之间。另外,从图 10 中可见,采用水土分算的朗肯主动土压力合力的变化趋势与实测结果取得良好的一致性。

2.3 实测土压力与朗肯极限土压力的比较

现将实测土压力与按朗肯理论(水土分算)计算土压力按工况进行比较,可分为两种情况进行分析,见图 11。

情况一:从工况 1 到工况 4,即开挖深度小于等于 16 m 时,基坑上部 20 m 范围内的实测土压力基本符合朗肯主动土压力(水土分算)。

情况二:从工况 5 开始,即开挖深度大于 20 m 以后,实测土压力在浅层(基坑上部 10 m 范围内)出现实

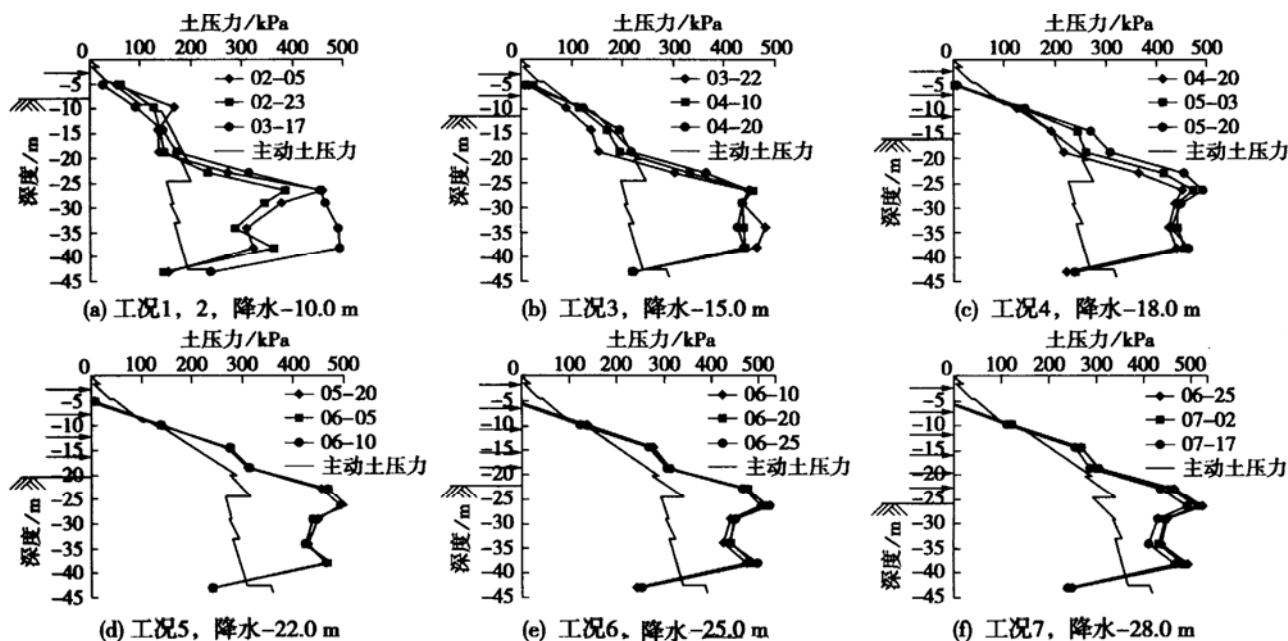


图 11 不同工况下墙后主动区土压力实测曲线及其与朗肯主动土压力的比较

Fig. 11 Comparison between measured and Rankine active earth pressure behind wall at different stages of construction

测值明显小于计算值的现象, 实测土压力甚至出现负数。究其原因, 可能是由于上部墙体变形较大, 基坑浅层范围内的土体已基本形成可保持自身稳定的土拱结构, 使得土体与墙体有脱离的趋势, 故实测土压力变为负数。另外, 与情况一相比, 此时实测土压力大于主动土压力计算值的范围出现向上扩展的现象, 但实测值与计算值之差逐步减小, 说明随开挖深度的增加, 基坑下部的土体变形逐渐接近朗肯主动状态。

2.4 主动区土压力的经验分布图式

根据对本工程的实测数据的分析, 可提出类似本工程条件下, 上海软土地区大型超深基坑工程水土分算时的主动区土压力的经验分布图式, 见图 12。本工程中经验系数 $\beta = 1.2$, $\alpha = 0.7$ 。

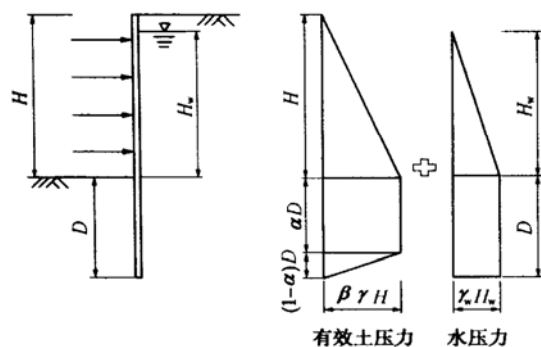


图 12 主动区土压力分布图式(水土分算)

Fig. 12 Experimental distribution of earth pressure behind wall (water and earth pressure computed separately)

3 结 论

(1) 结合工程实践研究, 对大型超深基坑工程施工

引起的地面沉降和墙顶沉降采用分段时效抛物线法进行预测, 对墙体的水平位移采用定点跟踪的时效曲线法进行预测, 能得到比较满意的结果。

(2) 不同开挖深度范围的实测土压力与朗肯主动土压力(水土分算)的比较, 提出对于上海地区的深大基坑, 采取分层降水时, 按水土分算计算主动区土压力更为合理。提出在水土分算时的主动区土压力的经验分布图式可为软土地区的大型超深基坑工程的设计计算提供借鉴。

(3) 对于大型超深基坑工程的信息化施工提出三点理性认识: ①监测是信息化施工的依据; ②预测是信息化施工的指导; ③经验判断是信息化施工的决策。在信息化施工过程中, 以实测资料为依据, 以理论分析为指导, 加上技术人员的经验, 才能发挥信息化施工的作用。同时, 信息化施工过程所获得的丰富数据能为检验和发展理论提供有力的帮助。

参加本工程的研究工作还有宰金珉教授, 孙红、张启辉和马忠政三位博士。

参考文献:

- [1] 赵锡宏, 李 蓓, 李 侃, 杨国祥. 大型超深基坑工程理论与实践——上海外环隧道浦西基坑工程[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 258-263.
- [2] 宰金珉, 梅国雄. 全过程的沉降量预测方法研究[J]. 岩土力学, 2000, (4): 322-325.
- [3] 赵锡宏, 陈志明, 胡中雄. 高层建筑深基坑围护工程实践与分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.