

文章编号: 1002-0268 (2005) 09-0106-05

地下连续墙作为桥梁基础在软土地区的应用

吕嵩山¹, 吕敬之²

(1. 北京中汉威交通科技有限公司, 北京 100101; 2. 北京建达道桥咨询有限公司, 北京 100016)

摘要: 本文以上海浦东国际机场1号桥的设计为背景, 介绍了地下连续墙做为桥梁基础的计算模型的建立、计算参数的取值以及构造处理措施。结果表明: 当条件受限制时, 地下连续墙不失为一种较好的基础型式。

关键词: 地下连续墙; 竖向弹性地基梁; 水土分算; 基床系数

中图分类号: U443.1

文献标识码: A

Application of Underground Continuous Wall as Bridge Foundation in Soft Soil Region

LV Song-shan¹, LV Jing-zhi²

(1. Beijing Zhonghanwei Traffic Technology Ltd, Beijing 100101, China;

2. Beijing Jianda Road and Bridge Consultation Ltd, Beijing 100016, China)

Abstract: On the base of the design of the No.1 bridge of Shanghai Pudong International Airport, this paper introduces the building of the calculation model, the value of the calculation parameters, and the structure treatment measures of the underground continuous wall used as the bridge foundation. The project shows that underground continuous wall is a kind of good foundation when the area is limited with deep excavation.

Key words: Underground continuous wall; Vertical elastic foundation beam; Separate calculation of water and earth pressures; Foundation bed factors

0 概述

1号桥位于连接南、北飞行区的联络滑行道上, 上跨机场内3条内部规划道路。设计荷载为F类A380-800F型飞机荷载, 单架飞机荷载5920kN, 单个飞机轮载最大为282kN。该桥为3×18m预应力混凝土刚架桥。上部结构采用现浇预应力混凝土箱梁, 下部结构采用现浇钢筋混凝土地下连续墙和预应力混凝土管桩(PHC桩)。

采用逆作法施工。一期工程仅修建滑行道及1号桥, 二期工程修建下穿道路。地下连续墙不仅作为桥梁的主体结构, 同时还作为二期工程下穿道路基坑开挖的支护设施。该桥纵、横断面如图1和图2所示。

1 计算模型的建立及计算参数的确定

(1) 施工工序简述

工程实施的主要施工顺序如下:

①进行PHC桩的沉桩及地下连续墙的施工, 其中, 地下连续墙施工步骤为: 浇注钢筋混凝土导墙→抓斗机挖槽→插入接头及墙体钢筋笼→浇注水下混凝土→重复上述步骤, 开始下一个单元槽段的施工。

②PHC桩截桩头及浇注桩顶实心段混凝土。

③浇注箱梁混凝土, 张拉箱梁预应力钢束。

④施工桥面铺装。

⑤桥下基坑开挖, 施工下穿道路。

以上①~④为一期工程实施范围, ⑤为二期工程

收稿日期: 2005-05-13

作者简介: 吕嵩山(1971-), 男, 北京人, 工程师, 主要从事桥梁设计工作。(easy126@126.com)

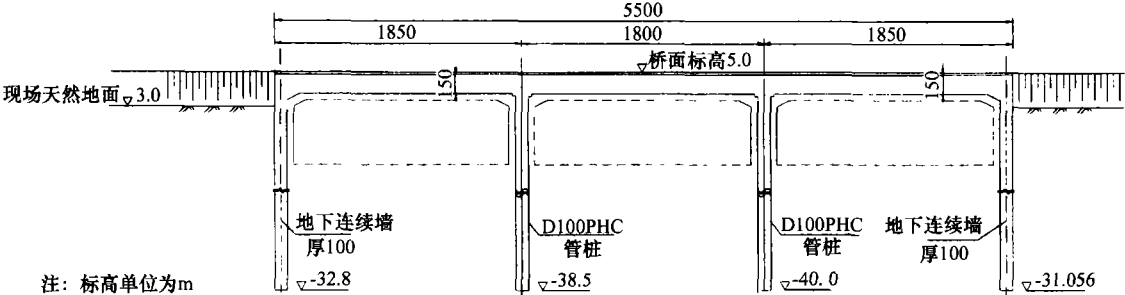


图1 桥型布置/cm

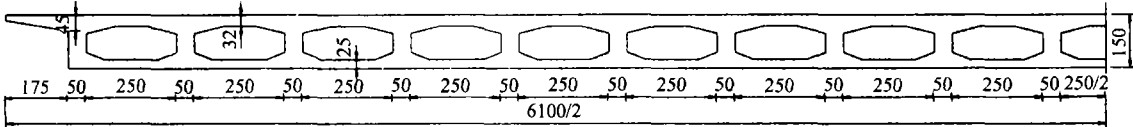


图2 箱梁跨中半横断面/cm

实施范围。

(2) 地层描述

浦东机场滑行道场地系围海造地形成的滩地。年平均地下水埋深为地表下 0.5 ~ 1.5m, 对混凝土不具腐蚀性。各地层描述见表 1。

表1 浦东机场地层描述

土层 层号	土层名称	层厚/m	状态	密实度	压缩性	液性 指数
①1	填土	1.00		松散		
②2	粉质粘土夹 粘质粉土	1.80	可塑~软塑		中等~高等	0.88
②3	砂质粉土	3.00		松散~稍密	中等	
③1	淤泥质粉 质粘土	2.00	流塑		高等	1.32
③2	砂质粉土	2.00		松散~稍密	中等	
④	淤泥质粘土	10.50	流塑		高等	1.18
⑤1-1	粘土	9.20	流塑~软塑		中等~高等	0.84
⑦1	砂质粉土	4.90		中密	中等	
⑦2	粉细砂	未钻穿		密实	低等~中等	

1号桥按照地震烈度Ⅶ度设防。在围海造地阶段对滑行道进行了强夯等地基加固处理措施。根据标准贯入和静力触探试验结果, 在地震烈度为Ⅶ度时, 土层没有液化现象。

(3) 计算模型

目前, 还未制定全国性的设计计算技术规范。综合考虑理论体系及解算手段可以将地下连续墙的静力计算划分为以下4类:

荷载结构法; 修正的荷载结构法; 连续介质的有限单元法; 弹性地基杆系有限元法。

所谓的荷载结构法, 即假定作用于地下连续墙上的水、土压力均为已知, 水、土压力一次施加于墙体。同时, 墙体和支承的变形, 不会引起墙上水、土压力的变化。属于此种方法有等值梁法、太沙基法

等。但是此种方法对荷载的计算和边界约束条件有很大的随意性, 因而与结构的实际受力情况可能会产生较大的差别。

修正的荷载结构法则考虑了基坑逐级开挖和支承的分次设置, 将作用于墙上的水、土压力逐步增加。属于此种方法有山肩邦男法和《日本建筑结构基础设计规范》中的弹性法和弹塑性法。

连续介质的有限单元法不再将支护体系和地层介质割裂成结构和荷载两部分, 而是将结构和地层看作是有机联系的整体。此种方法不必事先对水土压力的大小和分布作假定, 而是将土层介质采用单元替代。计算结果虽然和实际接近, 但计算的工作量太大, 在工程设计中较少采用。

弹性地基杆系有限元法是建立在土的线弹性本构关系上的一种方法。其计算原理是假设地面以上(基坑底以上)挡土结构为梁单元, 基底以下部分为弹性地基梁单元, 地层对地下连续墙的约束作用用一系列的弹簧来模拟, 荷载为主动侧的土压力和水压力。墙体侧面约束采用水平弹簧模拟, 墙底竖向约束采用竖向弹簧模拟, 弹簧压缩刚度分别用 K_H 、 K_V 表示。此种方法是目前实用性较强, 计算较准确的一种挡土结构有限单元计算方法。

综上所述, 1号桥地下连续墙采用弹性地基梁的理论计算。PHC 桩基在考虑了桩土作用后, 按照等刚度原则, 采用底端固端约束的梁单元模拟, 固结点在桩基所在地面下 4.0m。

二期工程完工时的计算模型见图 3。一期工程结束时的计算模型与二期工程结束时的计算模型基本类似, 只是二期工程由于基坑开挖后, 墙体水平弹簧约束范围减小, 同时在墙体背后增加了水、土压力。

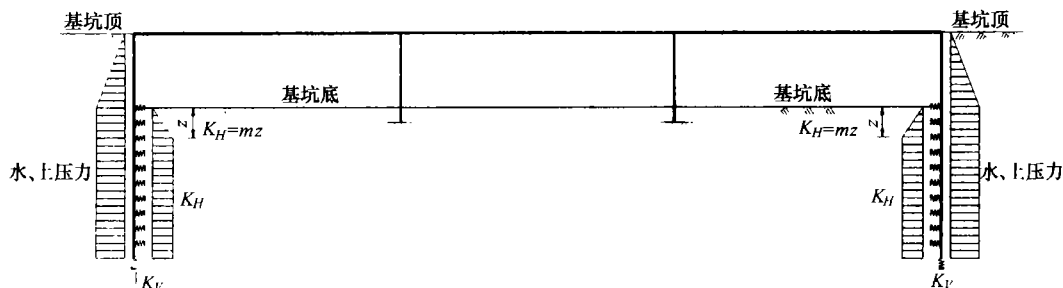


图3 计算模型

(4) 水土压力计算及计算参数选取

①水、土压力计算

采用朗金主动土压力公式计算墙背主动侧的侧向压力。对于上海地区的粘性土，究竟采用水土分算还是水土合算，则一直没有形成统一的结论。设计过程中考虑到以下因素，采用了水土分算的算法。

上海地区粘土具有层理明显，粉性土和粉层薄层呈交互状，水平方向渗透系数大于垂直方向的渗透系数的特点，土层并非完全不透水。

地下连续墙为厚度1m的钢筋混凝土结构，防水性好，不会造成水土流失，相邻土体中的孔隙水压力在经历一段时间后容易达到静水压力。

按照水土分算比水土合算所计算的侧压力大，更安全。

基坑深度仅在7m左右。同时，箱梁与地下连续墙为刚架结构，横向整体抗推刚度比灌注桩或悬臂板桩类结构的刚度大很多。侧向压力采用水土分算或水土合算都不会影响到结构型式和结构各部分的断面尺寸，只是对地下连续墙的配筋量有微小影响。

②基床系数

土层的软硬程度和计算点距离基坑底面的深度两个因素对基床系数的大小具有决定性影响。土层越硬，则其对地下连续墙的变形约束作用越强，即基床系数越大；按照朗金被动土压力理论，计算点越深，竖向土压力值(γ_H)越大，则土体提供的侧向被动土压力越大。

地下连续墙侧向基床系数 K_H 的大小及分布图示的确定，参考了横向荷载作用下桩基m法的设计理论。假设侧向基床系数从基坑底到某一特征深度 z 范围内由0逐渐增大，按照直线变化， $K_H = mz$ ， m 为比例系数，特征深度以下范围内侧向基床系数为常数，即 $K_H = \text{常数}$ 。上海市工程建设规范《地基基础设计规范》(DGJ08-11-1999)中特征深度为基底下3~5m。考虑到地下连续墙顶面开挖导墙对土层的扰动，深度在2.5m左右，则在一期工程计算时， z 取

5m，二期工程计算时， z 取3m。

根据以往桩基础按照m法计算经验，地面以下3~4倍桩径深度范围内的土的侧向基床系数对横向荷载作用下的桩基内力大小及分布影响最大。如何正确确定3~5m深度内侧向基床系数的大小成为关键问题。即必须合理确定表1中②2、②3层的侧向基床系数。②2、②3层土属于粉性土，在没有进行现场基床系数测定试验的情况下，可以参考表2中3种规范数值。

表2 基床系数取值范围

土名	比例系数 $m/\text{kN}\cdot\text{m}^4$	规范名称
软塑粘性土 $1 > I_L \geq 0.5$, 粉砂	5000 ~ 10000	《公路桥涵地基与基础设计规范》 (JTJ 024-85), 简称《公规》
粘性土 $1 > I_L \geq 0.5$ 的粘性土, 粉砂	2000 ~ 4000	《港口工程地下连续墙 结构设计与施工规程》 (JTJ 303-2003), 简称《港规》
软塑的粘性土、松散 的粉砂性土和砂土	2000 ~ 4000	上海市地方标准《地基基础设计 规范》(DGJ08-11-1999), 简称《上规》

相同的土，《港规》与《上规》的 m 值是一致的，而《公规》中的数值为上述两种规范中 m 值的2.5倍。《港规》中的基床系数仅应用于地下连续墙，《上规》中的基床系数可以应用于钢板桩、钻孔灌注桩及地下连续墙等不同支护结构，《公规》中的基床系数仅应用于桩基。笔者认为，桩基和地下连续墙的 m 值出现如此大差异主要原因如下：

见图4，以在水平荷载作用下的单排方桩为例，桩基边宽 b 。根据《公规》可知，桩基的间距一般在 $2.5b$ 左右。桩基在受到水平推力 Q 后，通过变形压缩另一侧的土体，首先将水平荷载传递给与桩基另一侧紧密接触土体，然后通过土体间的相互摩擦，以某一扩散角 ϕ 将水平荷载传递到更远处土体。则提供给单根桩基的土的有效抵抗宽度应该为 B ， $B/b \approx 2.5$ 。图5将地下连续墙假想划分为宽度为 b 的多根桩基，显而易见，对应宽度为 b 的地下连续墙的土体抵抗宽度为 b 。

另外，日本新日铁工程修建时，曾做过1~20根

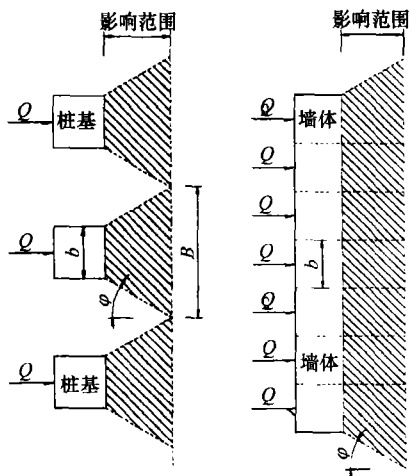


图4 单排桩侧向土 图5 地下连续墙侧向土
抗力分布 抗力分布

排列的桩基的水平基床系数 K 的实测,随着桩基根数的增多, K 值逐渐减小。当桩基根数达到 20 根时, K 值接近于 1 根桩地基反力系数的 1/5。所以,不能采用《公规》中的数值,而宜采用《港规》或《上规》中的基床系数。《上规》为上海地区的强制性条文,应采用《上规》中的基床系数。但是,《上规》中对同一种土的 m 值的最大值与最小值之比,也在 2 倍以上。根据竖向弹性地基梁的计算理论,水平基床系数的大小与被动土压力的大小有直接关系,而被动土压力的大小与地下连续墙侧向变形有直接关系。所以,水平基床系数的大小可根据对被动土压力的分析确定。

1 号桥基坑最大深度 7m 左右,开挖深度并不大,同时地下连续墙的刚度很大,地下连续墙在受到水平推力后的变形非常小。根据被动土压力产生的理论及布林奇-汉森的研究成果,土体产生被动土压力时的墙体位移在 $0.01H$ 左右, H 为基坑深度。因此,不应选取《上规》中基床系数的最大值。对处于一定埋深的地基土,因受上覆土层的影响,侧向基床系数比《上规》中的推荐值小^[1]的试验结论。设计时采用规范中比例系数的平均值,即 $m = 3\ 000\text{kN/m}^4$ 。

(5) 地基承载力

地下连续墙的施工过程与钻孔灌注桩方法相同。浦东机场的覆盖层在百米以上,所以地下连续墙的地基承载力与应按照与摩擦桩类似的方法计算。地下连续墙竖向承载力按照《上规》公式 9.6.6-3 计算,即

$$R_k = U_p \sum f_{si} l_i + f_p A_p$$

式中, R_k 为单桩桩极限承载力标准值, kPa; U_p 为

桩身截面周长, m; f_{si} 为桩周第 i 层土的极限摩阻力标准值, kPa; f_p 为桩端土的极限端阻力标准值, kPa; l_i 为第 i 层土的厚度, m; A_p 为桩端横截面积, m^2 。

地基提供承载力也分为墙侧摩阻力和墙底的竖向端承力两部分。计算墙侧摩阻力应该按照墙两侧与土的接触面积计算,不应按照墙体横断面周长计算。计算墙底的竖向承载力时 A_p 可取墙底的底面积计算,但是考虑到施工工艺,由于槽段在一个方向较长,有 6~8m,槽底的沉淀土处理起来相对于桩基较难,所以 f_p 取值应较钻孔灌注桩取低值,设计时 f_p 按照钻孔灌注桩的 80% 计算。

2 结构整体静力计算分析

(1) 荷载及荷载组合

桥梁承受的荷载主要包括结构自重、预应力、水土压力、混凝土收缩及徐变影响力、温度力、基础变位影响力。其中,温度力按照箱梁整体升、降温 20°C ,顶、底板温差 5°C 计算;基础不均匀沉降按照相邻墩 5mm 计算。荷载组合按照《公规》中规定组合。

(2) 结构计算分析

① 预应力混凝土箱梁

图 6 按照一期、二期分别绘出了使用阶段箱梁的上、下缘的正应力包络图。

对于中跨箱梁使用阶段的正应力,两种计算模型的差异并不大。然而,对于边跨箱梁,越靠近地下连续墙一侧,正应力的差值就越大,正应力差值最大约 5MPa,这主要是由于地下连续墙的刚度发生了较大变化造成的。

地下连续墙是与其周围土体共同参与结构受力的。一期工程地下连续墙全部位于土体中,几乎没有出露长度,二期工程开挖基坑深度约 7m,解除了 7m 范围内土体对地下连续墙的约束。一期工程中墙土的刚度比二期工程中墙土的刚度要大很多倍。墙土刚度越大,则墙体对箱梁的约束作用越大,墙体所分担的预加力的比例越高;从箱梁的角度讲,则箱梁所分担的预加力的比例越低。这就是造成一期工程边跨箱梁下缘正应力低的原因。

② 地下连续墙

单位宽度 (1m) 地下连续墙在一期、二期工程使用阶段的最大、最小弯矩包络图见图 7。

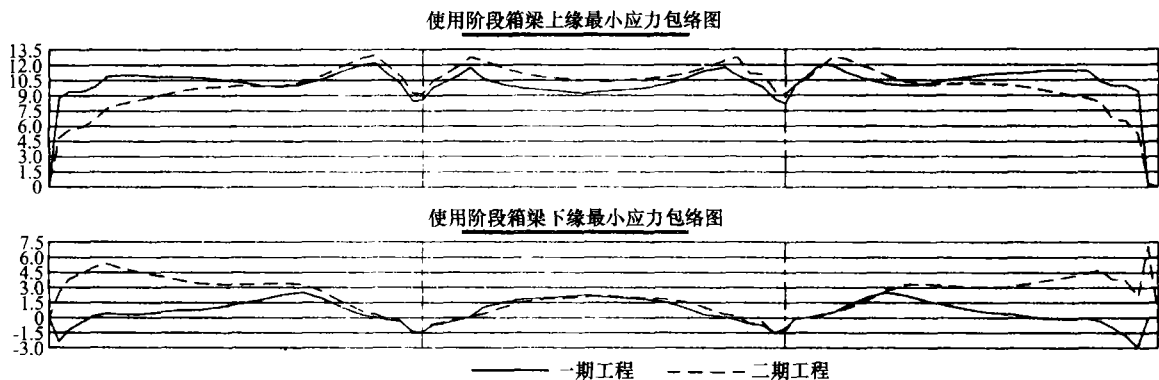


图6 箱梁使用阶段正应力包络图/MPa

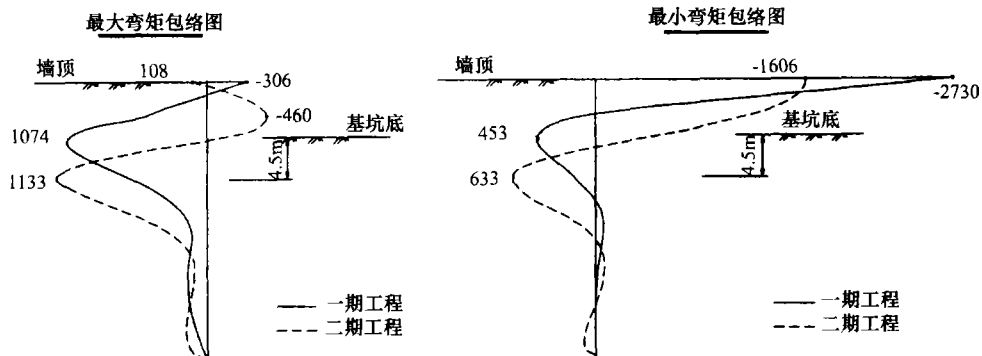


图7 地下连续墙使用阶段弯矩/kN·m

地下连续墙的弯矩图与桩顶固结的桩基弯矩图是相似的。即弯矩沿着深度,其大小和方向是不断变化的。地下连续墙在不考虑墙顶弯矩时,墙身最大弯矩在基坑底以下约4.5m。墙体与箱梁固结,墙体要承受来自箱梁的各种荷载,箱梁传递给墙体的内力要比墙身由于水、土压力作用产生的内力大得多。内力包络图中墙体弯矩绝对值最大的位置在墙顶而不在墙身,恰好证明了这点。

桥梁结构的计算模型在一期、二期工程发生了变化,造成了墙体内力也相应发生了变化。由于结构承受荷载的多样性及荷载组合的多样性,即使是在同一期工程中,在同一个计算模型下,墙体内力的大小及方向也发生了明显的变化。

所以在进行计算时,必须注意到基坑开挖引起计算模型边界条件的改变对计算结果的影响,密切注意墙体与土体的结合刚度的变化对结构内力的变化。墙顶弯矩二期时为-1606kN·m,在一期时为-2730kN·m,二期弯矩仅是一期弯矩的59%,可见土体的约

束作用对结构受力的影响有多么明显。

3 结束语

随着交通的反展、城市规模的不断扩大,实现城市立体交通成为解决交通压力的重要手段。地下连续墙因其不需要基坑支护、对周围建筑影响小的优点,从而成为众多地下工程的首选结构型式。在开挖场地受限制开挖深度较大的城市地下桥梁建设中,地下连续墙作为基础,将来一定会有更广泛的应用。

参考文献:

- [1] 林华国,唐世栋.上海地区软土层侧向基床反力系数规律性研究[J].岩土工程学报,2004,26(4).
- [2] 唐世栋,林华国.用扁铲侧胀试验求解侧向基床反力系数[J].岩土工程学报,2003,25(6).
- [3] JTJ 024-85,公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [4] JTJ 303-2003,港口工程地下连续墙结构与施工规程[S].
- [5] DGJ08-11-1999,地基基础设计规范[S].