

# 地下连续墙在桥梁工程中的应用分析

应伟强

(北京市市政工程设计研究总院, 北京 100045)

**摘 要:**通过分析北京展览馆立交地下连续墙工程的设计过程, 阐述连续墙作为桥梁基础及兼桥台功能在展览馆立交工程中的可行性; 地下连续墙设计在《桥规》中无相应规范, 通过大量计算数据所列图表, 在套用《建筑基坑支护技术规程》设计时, 根据桥梁专业特点对其计算模式及参数进行详细分析及合理修正来指导具体设计, 并强调施工中的精度及质量问题。

**关键词:**地下连续墙; 展览馆立交; 弹性地基梁; 设计

**中图分类号:** U443.164 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2005)02-0037-05

## 0 前言

地下连续墙已发展 50 多年; 随新材料, 新机械, 新技术的发展, 已广泛应用于各种地下构筑物工程, 水利工程, 市政工程等。其功能也越来越多样性: 支护, 挡土, 防水防渗, 桩基, 承受永久荷载作为永久构筑物的一部分等。本文主要通过分析北京西外大街展览馆立交工程设计及施工过程来阐述地下连续墙在桥梁工程的应用特点。

## 1 工程概况

西外大街改扩建工程途经北京展览馆, 动物园, 中关村, 紫竹院等重要位置; 地处交通繁忙及流动人口密集区; 展览馆立交西外大街主路下穿展览馆前广场, 桥梁部分由连接广场的主路桥及东西匝道桥三座桥组成; 其中主路桥宽 78 m, 两跨约各为 26.5 m 及 29.5 m, 桥下净空  $>4.5$  m, 平面图见图 1; 路堑外现况为新建管线多, 规划地铁 4 号线沿西外大街中线两侧; 现况地面标高为 48.70 m 左右, 西外大街设计高为 41.3 m 左右, 规划地铁四号线结构顶标高为 34.00 m 左右; 两侧建筑物距路堑较近。地质情况表层为人工堆积层 0.30 ~ 4.80 m, 为中亚粘土, 新近沉积层标高 45.52 ~ 47.08 m, 为中轻亚粘土, 第四沉积层 40.43 ~ 46.27 m 为中亚粘土及细砂, 标高 40 m 以下基本为圆砾, 卵石层, 之间夹杂 3 ~ 5 m 中细亚粘土, 地下水位经勘察单位综合评估, 长期最高设防水位为 39.80 m。

## 2 设计过程

此次设计最大焦点问题是两侧桥台采用何种形式, 通常做法是先开挖至设计高程下, 基础采用桩基或扩大基础, 桥台采用现浇重力式桥台(见图 2)。

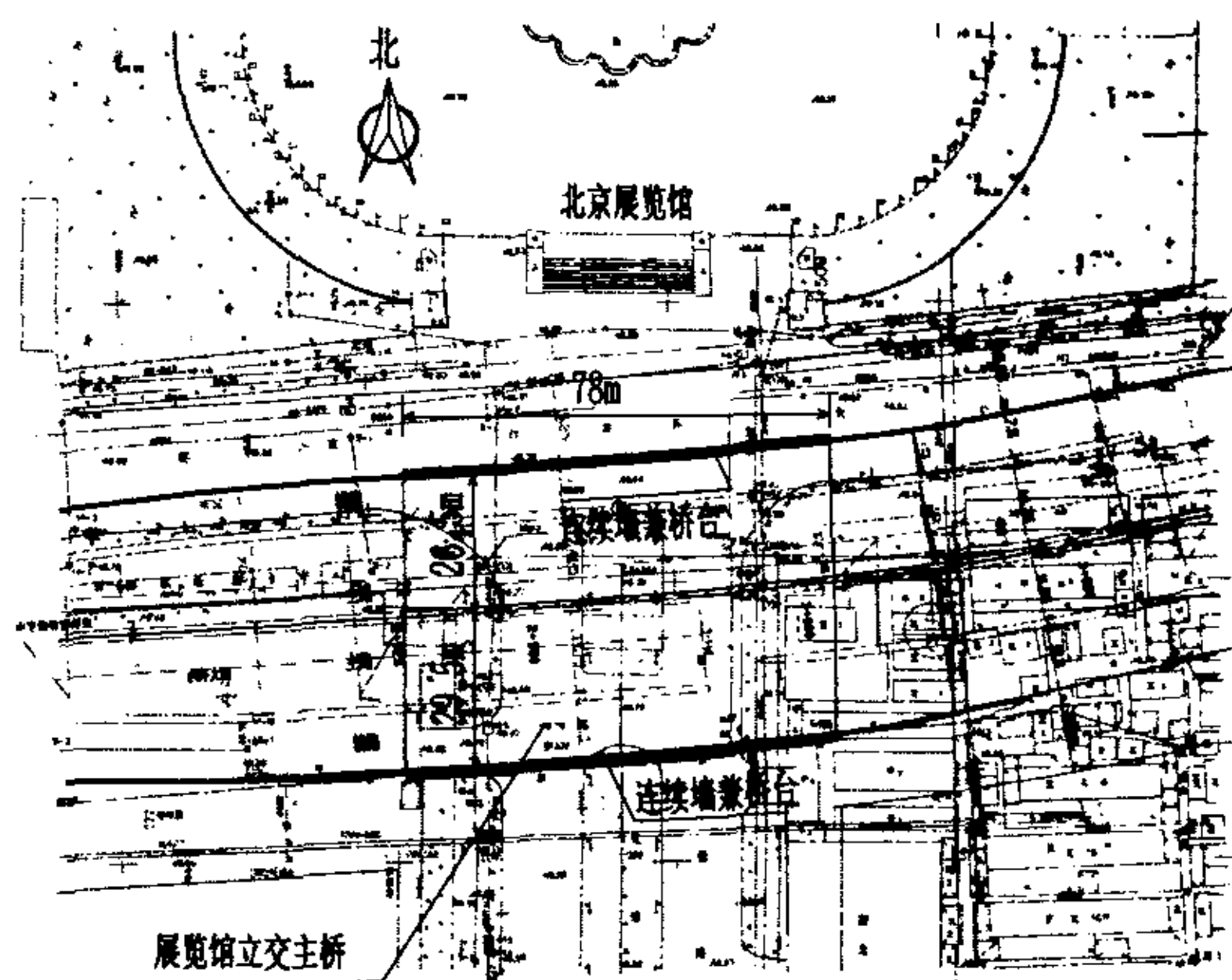


图 1 工程位置平面图

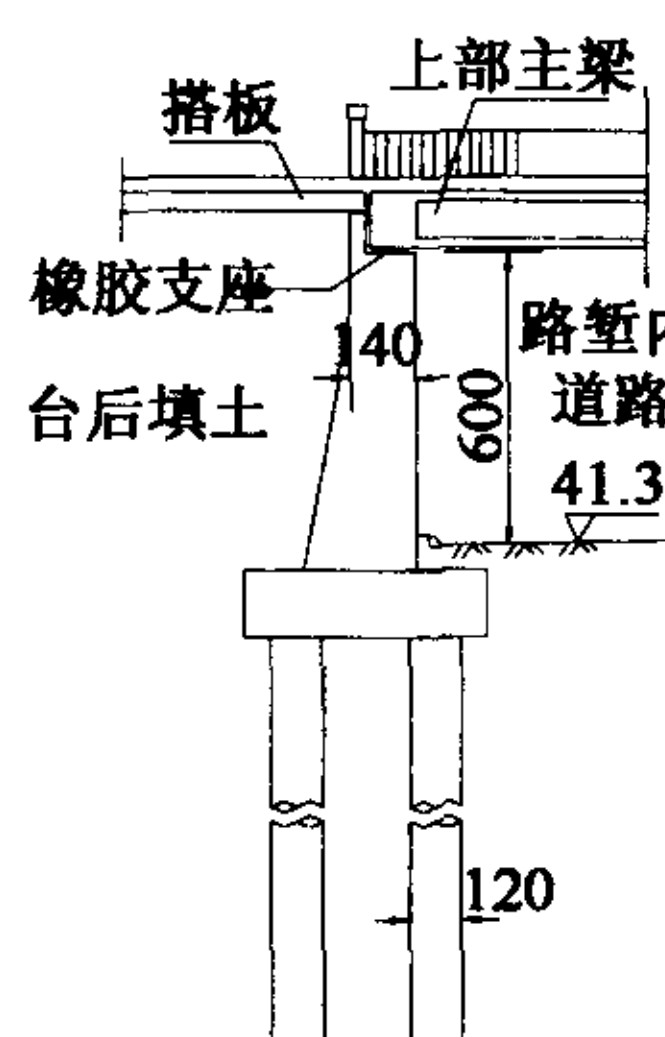


图 2 重力式桥台方案

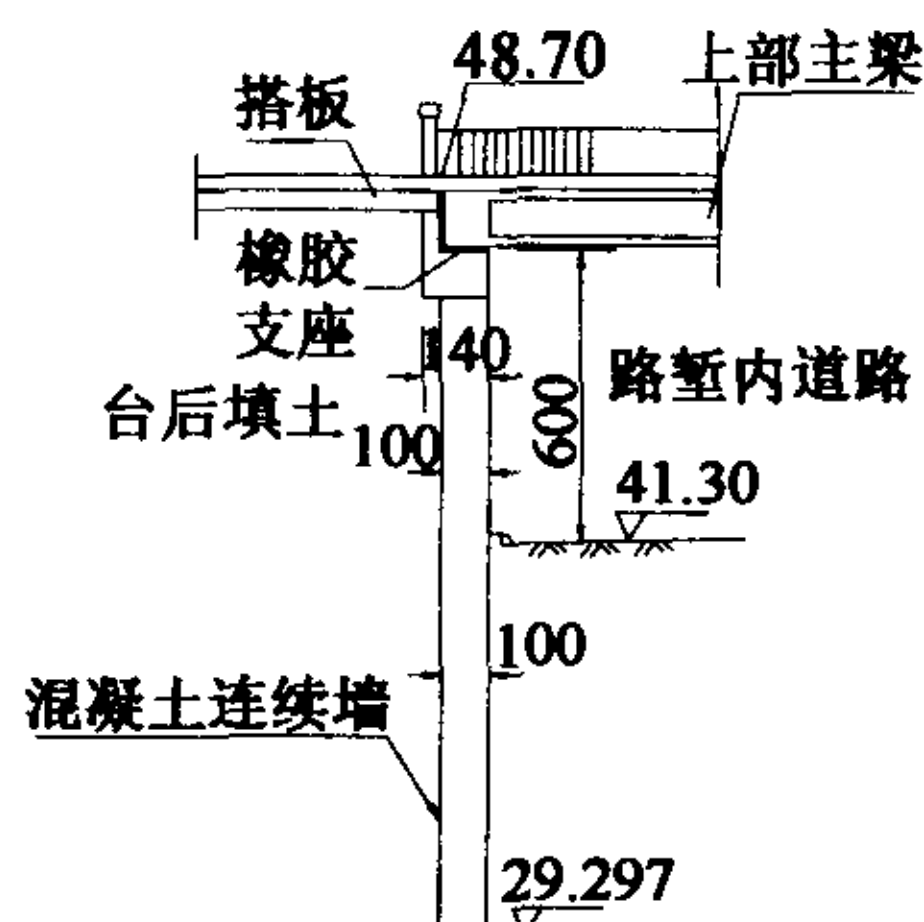


图 3 连续墙兼桥台方案

此方案主要缺点为:

- (1) 开挖深度大, 开挖面较大, 施工中对周边交通影响大。
- (2) 墙后离建筑较近, 对墙后土支护较困难。
- (3) 主桥桥台一侧长近 80 m, 结构圬工量过大。

收稿日期: 2004-10-30

作者简介: 应伟强(1972-), 男, 浙江宁波人, 高级工程师, 从事道桥工程设计工作。



(4) 施工占地大, 对周边环境的噪音污染均大。

(5) 考虑规划地铁四号线的暗挖施工对四周地基沉降的影响, 两侧桥台基础采用桩基, 增加造价。

两侧桥台采用连续墙兼桥台构造(见图 3)。

此方案主要优点为:

(1) 连续墙施工时无需大面积开挖, 对交通影响小。

(2) 可贴近施工, 对墙后建筑及管线几乎没有影响。

(3) 墙厚 100 cm, 为统一截面, 相对圬工量小, 有利墙后管线布置。

(4) 此处地基条件适合连续墙作为永久构筑物的条件。

(5) 施工时振动小, 噪音低, 非常适于在城市施工。

主要缺点有:

(1) 连续墙的成墙质量要求较高, 施工中质量较难控制, 需要有经验的施工队伍。

(2) 作为道路挡墙的一部分, 在成墙后需进行外墙面装饰, 增加了工程量。

综合考虑以上分析, 两侧采用连续墙兼桥梁桥台是最佳方案。

### 3 计算模式

连续墙设计在《公路桥涵设计规范》(以下简称《桥规》)中无相应规范, 在相关设计时可借鉴建规的《建筑基坑支护技术规程》(以下简称《建规》); 对此可分析如下。

#### 3.1 嵌固深度的确定

悬臂式连续墙设计的首要问题是嵌固深度的确定, 《建规》中相关连续墙嵌固深度计算如下:

$$h_p \sum E_{pj} - 1.2 \gamma_0 h_a \sum E_{aj} \geq 0 \quad (1)$$

式中:  $E_{pj}$ ——基坑内侧各土层水平抗力标准值  $e_{pj}$  的合力之和

$h_p$ ——合力  $\sum E_{pj}$  作用点至墙底距离

$\sum E_{aj}$ ——基坑外侧各土层水平荷载标准值  $e_{aj}$  的合力之和

$h_a$ ——合力  $\sum E_{aj}$  作用点至墙底距离

$\gamma_0$ ——基坑侧壁安全等级及重要性系数

《建规》在计算连续墙时采用静力平衡法以被动土压力为极限条件来确定嵌固深度, 在计算时不考虑墙体的变形; 所以用这种计算模式求悬臂式连续墙嵌固深度最主要的因素是确定墙前后的被动土压

力与主动土压力; 根据《建规》公式(1)及图 4 中计算图示采取不同悬臂墙高  $H$  以及不同的土体边界条件, 计算出最小嵌固深度连成曲线, 见图 5 ( $h_w$  为地下水位至地面高度)。

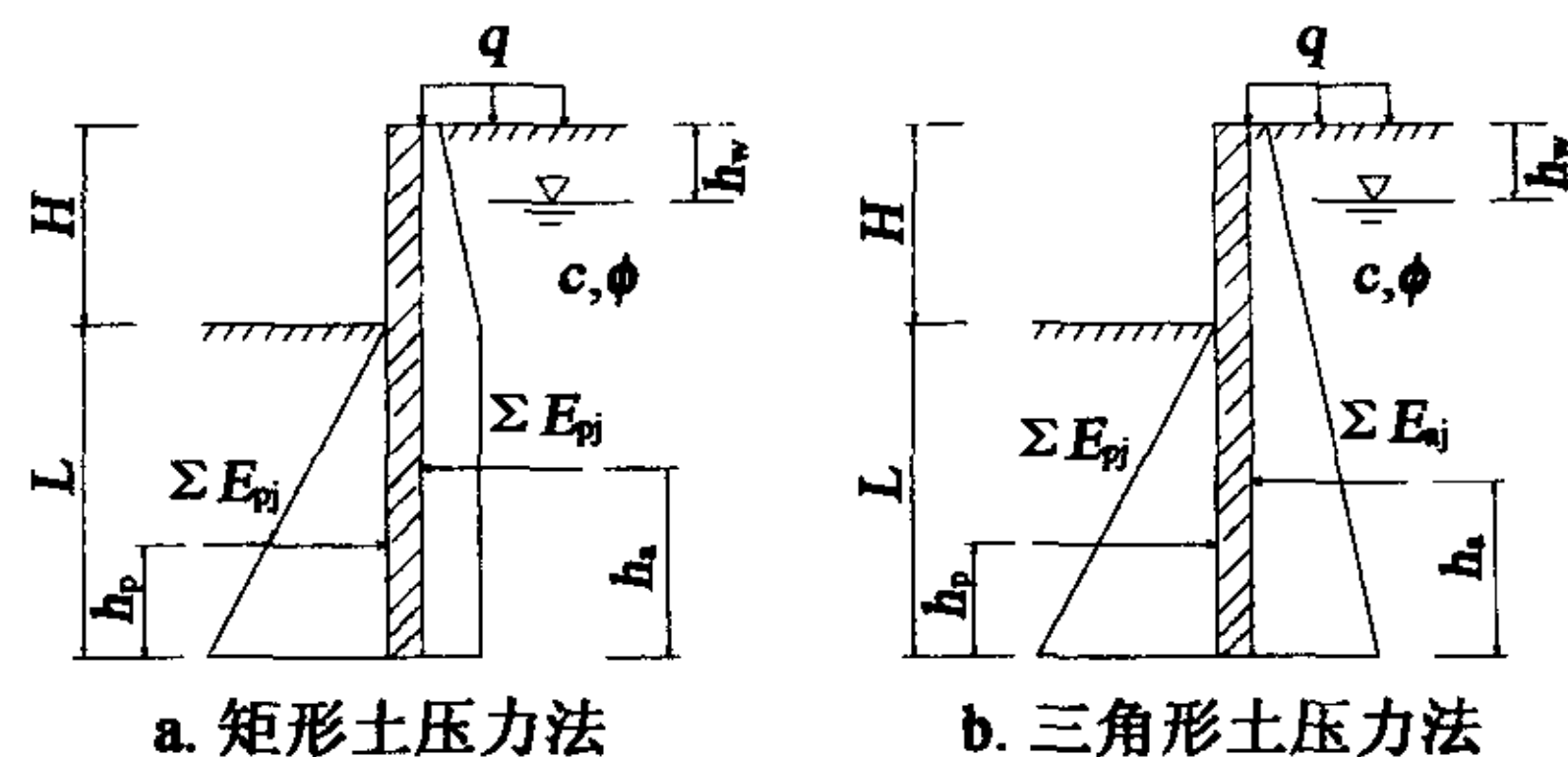


图 4 连续墙计算图示

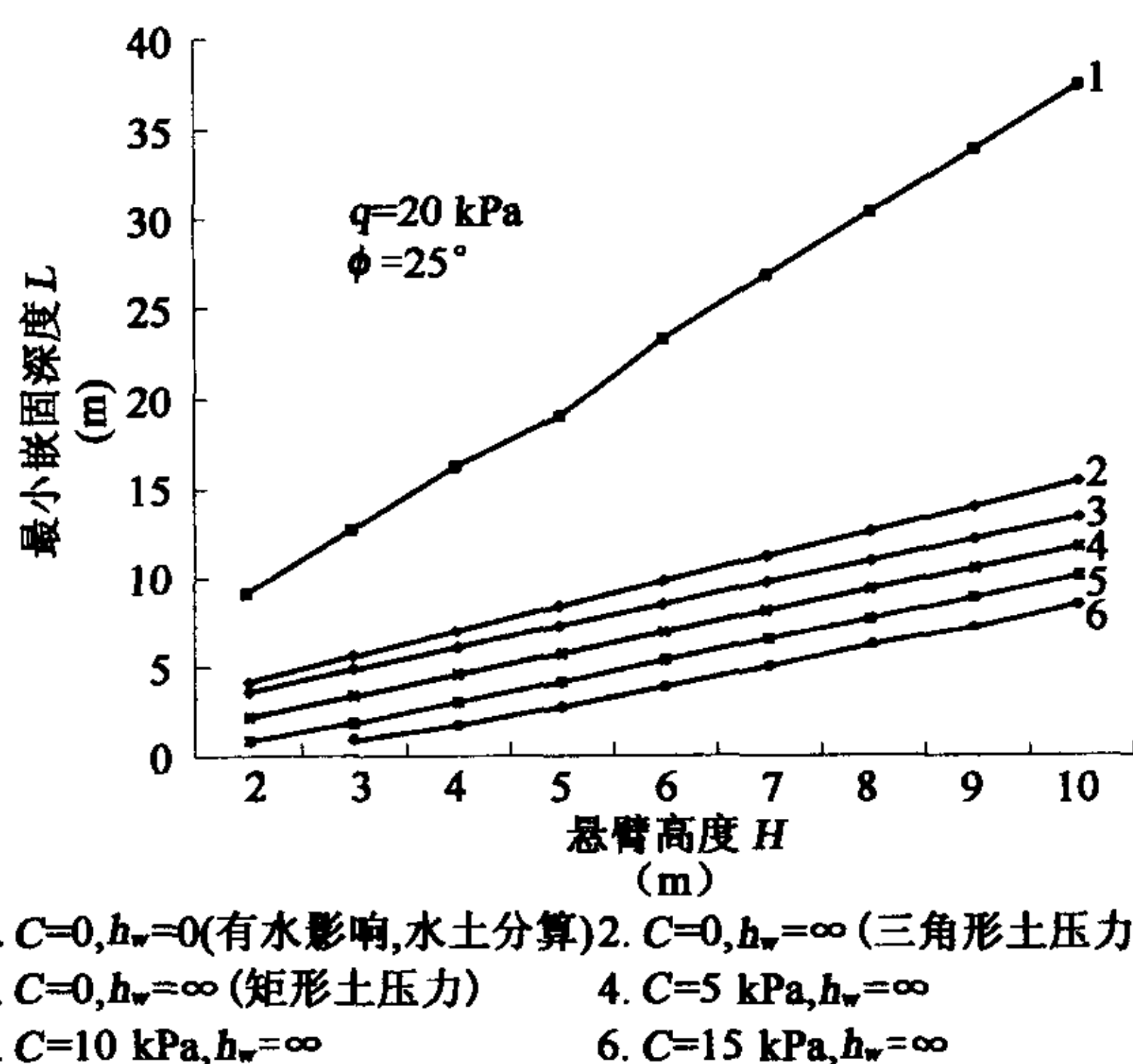


图 5 不同边界条件下最小嵌固深度曲线

通过图 5, 结合桥梁专业特点, 在套用《建规》计算嵌固深度时应注意以下几个问题:

(1) 《建规》中关于水平荷载即主动土压力的取用规定在嵌固深度点以下均按矩形分布, 不再随深度增加; 图 4 分别示出了矩形土压力法与常规的三角形土压力法的示意图, 图 5 中 2 与 3 线分别求出了不同悬臂高度  $H$  在相同边界条件下三角形土压力法与矩形土压力法所求出的最小嵌固深度曲线; 三角形土压力法所求嵌固深度大, 在《桥规》中关于土压力均取用三角形法, 《建规》使用的是经验值, 考虑了墙后主动土压力的折减, 在缺乏可靠试验经验时取用三角形土压力法是安全的。

(2) 在图 5 中 1 和 3 线分别是在有无地下水时不同墙高  $H$  所求最小嵌固深度曲线, 图中两者相差很大, 同样条件下嵌固深度有地下水时比无地下水时甚至大几倍; 可见地下水对工程的影响是很大的, 在设计时应充分考虑其影响; 土力学中水土压力基本公式为:



$$e_a = \gamma_{sat} HK_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (2)$$

$$e_p = \gamma_{sat} HK_p - 2c\sqrt{K_p} \quad (3)$$

$$e_a = \gamma' HK_a - 2c\sqrt{K_a} + \gamma_w H \quad (4)$$

$$e_p = \gamma' HK_p - 2c\sqrt{K_p} + \gamma_w H \quad (5)$$

式中:  $\gamma_{sat}$ ——土的饱和容重

$\gamma_w$ ——水容重

$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$  为土浮容重

$K_a = \tan^2(45^\circ - \Phi/2)$  为主动土压力系数

$K_p = \tan^2(45^\circ + \Phi/2)$  为被动土压力系数

$\Phi$ ——土内摩擦角

$c$ ——土的粘聚力

(2)、(3)式为水土合算的主被动土压力计算方法,适合粘性土。(4)、(5)式为水土分算的主被动土压力计算方法,适合砂性土。

在公式(2)~(4)中土的容重均采用饱和容重或浮容重(饱和容重减水容重);在《建规》中相关公式均采用以上基本公式的展开式,关于水土分算或合算时均采用土的天然容重,一般在土体非饱和状态时天然容重小于饱和容重,只有在土体饱和状态时天然容重与饱和容重相同,通常情况下土体达不到饱和状态;显然《建规》在土体非饱和状态下将主被动土压力都折减了,表1中列出了对不同悬臂高度  $H$  的连续墙在不同容重,其它边界条件相同的情况下所求得的最小嵌固深度,由表1可知:各个墙高的最小嵌固深度均随土的容重减小而增大;可见随容重减小被动土压力对墙底产生的弯矩折减较主动土压力大,《建规》取用天然容重计算比采用饱和容重计算增大了最小嵌固深度,在悬臂式连续墙最小嵌固深度计算时采用天然容重代替饱和容重是偏安全的。

表1 土不同容重时连续墙的最小嵌固深度(m)

土容重 $\gamma(\text{kg/m}^3)$	悬壁高度 $H(\text{m})$					
	5	6	7	8	9	10
18	13.85	16.40	18.9	21.45	24.00	26.55
20	11.95	14.15	16.35	18.55	20.75	22.95
22	10.70	12.70	14.65	16.65	18.60	20.60
24	9.80	11.65	13.45	15.25	17.10	18.90
26	9.15	10.85	12.55	14.25	15.95	17.65

注:  $\gamma$  分别为: 18, 20, 22, 24, 26  $\text{kg/m}^3$

$H$  分别为: 5, 6, 7, 8, 9, 10 m

表内为所求最小嵌固深度(m)

$q = 20 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 35^\circ$ ,  $c = 0$  (基本图示见图4)

由图5中1与3线的曲线趋势可见采用水土分算的砂性土有地下水影响时连续墙最小嵌固深度比无地下水影响大几倍,从公式(4)、(5)可知由于主动土压力系数  $K_a$  一般都小于1,水压力展开式  $\gamma_w H - \gamma_w HK_a > 0$ ,主动土压力增加了;而被动土压力系数

$K_p$  一般都大于1,水压力展开式  $\gamma_w H - \gamma_w HK_p < 0$ ,被动土压力折减了,不同  $\varphi$  所求得的  $K_a, K_p$  见表2。一般  $K_p$  都较大,对被动土压力的折减明显,两项的效应均增大了连续墙的嵌固深度;在一般情况下,现况水位都较设防最高水位低,在桥梁结构中作为永久构筑物的连续墙在设计中应将长期最高设防水位作为其控制设计水位高。

表2 不同内摩擦角的  $K_a, K_p$  表

$\varphi$ (内摩擦角)	10°	20°	30°	40°
$K_a$	0.704	0.49	0.333	0.217
$K_p$	1.42	2.04	3.0	4.60

(3)土的内摩擦角  $\varphi$ ,内聚力  $c$  是土体的两个抗剪强度重要参数;图5中3~6线是随内聚力  $c$  不同所求得的最小嵌固深度的曲线,可见最小嵌固深度随内聚力  $c$  增加而减小;由土压力基本公式可知,加大  $c$  值,减小了主动土压力,增大了被动土压力,两者效应均减小嵌固深度,对结构是有利的;在桥梁工程中一般墙后都埋置各种管线,土体被扰动或是回填土,在取  $\varphi, c$  时如还取用原状土体参数,就可能将  $c$  值取大,将主动土压力算小,因此应按实际回填土取值。

在应用公式(2)~(5)求水土压力时,对土的容重  $\gamma$ ,内摩擦角  $\varphi$ ,内聚力  $c$  的取值应充分理解应用,对砂性土进行水土分算时土容重取浮容重,  $\varphi, c$  取有效值,对水土合算的粘性土容重  $\gamma$  取饱和容重,  $\varphi, c$  取用按固结不排水法确定的值。

(4)在桥梁工程中连续墙受力特点与《建规》中作为基坑支护的连续墙结构有一定的区别,除承受水平荷载外还承受桥梁上部自重荷载及桥上车辆引起的荷载,水平荷载除墙后车辆等荷载引起的超载外还有由桥梁上部结构引起的温度力,汽车制动力,上部结构引起的水平地震力等。在进行连续墙计算前应先先将桥梁各项荷载引起的力的效应按《桥规》进行组合,见图6,图中  $P$  与  $N$  分别为竖向荷载与水平荷载的两组工况组合,(a)图工况水平力效应与墙后引起主动土压力效应相同,可按悬臂式结构计算,在计算主动土压力产生弯矩时还应计入水平力  $N$  对墙底引起的弯矩;(b)图工况水平力效应相当于给连续墙在顶部加横撑,可对应单层支点连续墙结构;在计算嵌固深度时受(a)图工况控制。

另外桥梁工程中上部传递的竖向荷载都较大,极限平衡法求最小嵌固深度与竖向荷载无关,在用极限平衡法求得嵌固深度后还应取单位长度连续墙按摩擦桩或嵌岩桩进行入土深度验算。

(5)在《建规》中以  $\gamma_0$  即基坑侧壁安全系数及重



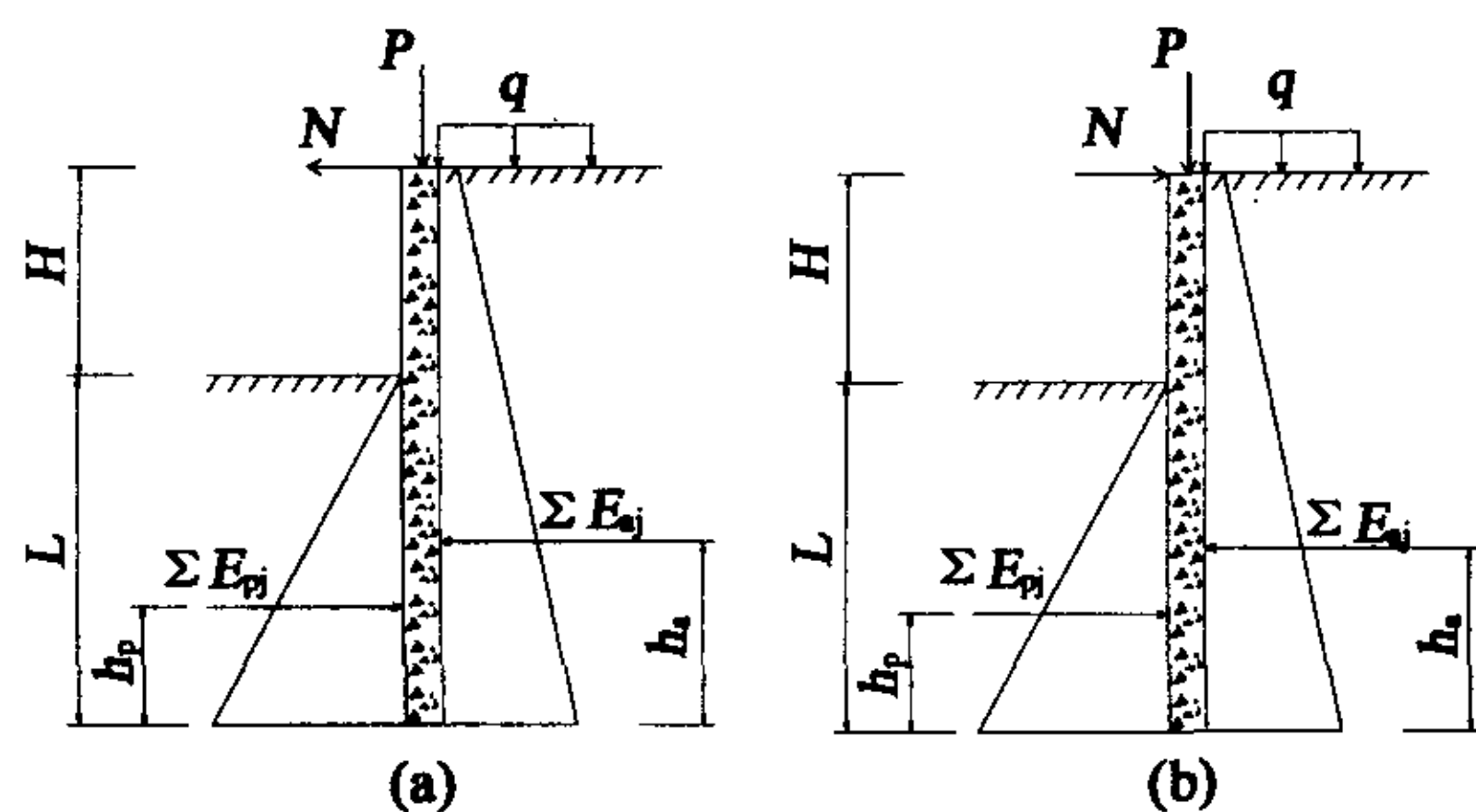


图 6 《桥规》连续墙计算工况图示

要性系数来控制基坑安全等级。分 1~3 级。系数分别为 1.1, 1.0, 0.9; 并将主动土压力所引起弯矩乘以 1.2 系数,  $1.2\gamma_0$  系数可以理解为连续墙的抗倾覆安全系数, 悬臂式连续墙满足抗倾覆要求确定的嵌固深度基本上可满足抗滑、抗隆起等要求;《桥规》中在验算墩台及挡土墙规定抗倾覆稳定系数荷载组合 I 时取 1.5, 荷载组合 II~IV 时取 1.3, 荷载组合 V 时取 1.2, 所以在套用《建规》设计连续墙应用于桥梁工程时建议将  $\gamma_0$  取为 1.1 或更高。

### 3.2 内力、变形的计算

连续墙嵌固深度的确定是以被动土压力达到极限状态条件来确定的, 采用的是静力平衡法, 在计算时不考虑墙体的变形, 与墙体的刚度无关, 这显然与实际情况不符, 在计算内力及变形时《建规》建议采用弹性地基梁法, 即将土视作弹性变形介质, 它具有随深度成比例增长的地基系数(m 法), 其基本挠曲微分方程为:

$$EI \frac{d^4 x}{dz^4} + mb_0 ZY_z - e_{aik} B_s = 0 \quad (6)$$

式中:  $EI$ ——墙体计算宽度的抗弯刚度

$m$ ——地基土水平抗力系数的比例系数

$b_0$ ——抗力计算宽度, 连续墙取单位宽度

$Z$ ——计算点深度

$Y_z$ ——计算点水平位移

$B_s$ ——荷载计算宽度, 连续墙取单位宽度

《建规》采用图 7(a) 图示, 即开挖面以下土主动土压力按矩形分布; 这和弹性桩理论稍有区别, 在用“m”法计算弹性桩时开挖面以下不计土压力, 即图 7(b) 图, 只取开挖面以上部分产生的弯矩及水平力; 表 3 为在相同入土深度  $L=15$  m, 不同悬臂高度  $H$ , 其余边界条件相同时, 用图 7 两种计算方法图示所求连续墙最大弯矩及最大位移列表 3。

显然采用(a)图矩形土压力法所求最大弯矩及位移都较(b)图大; 在桩基设计时由于桩被包围在土中, 一般可忽略主动土压力影响, 土压力零分布法

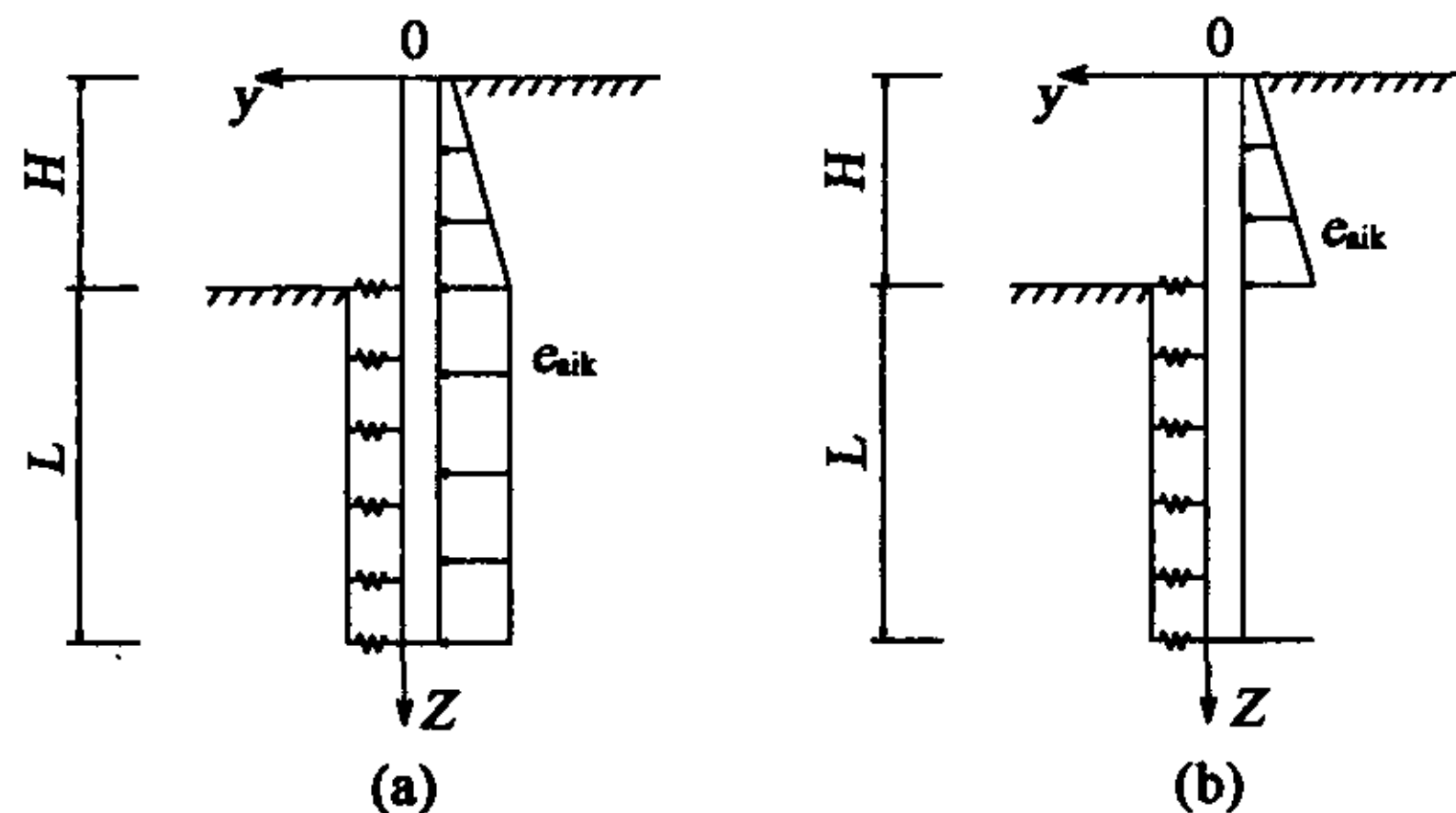


图 7 《建规》连续墙计算方法图示

在用“m”法计算弹性桩是可行的; 连续墙为墙面连

表 3 不同悬臂高度两种模式的最大内力比较表

	$H=4$ m		$H=5$ m		$H=6$ m		$H=7$ m	
	$M_{max}$	$S_{max}$	$M_{max}$	$S_{max}$	$M_{max}$	$S_{max}$	$M_{max}$	$S_{max}$
	(kN·m)	(mm)	(kN·m)	(mm)	(kN·m)	(mm)	(kN·m)	(mm)
矩形分布模式	308	7	460	12	654	20	897	30
零分布模式	234	4	374	9	558	15	790	24

注:  $\gamma: 18 \text{ kg/m}^3$ ,  $q=20 \text{ kPa}$ ,  $\varphi=30^\circ$ ,  $c=0$ ;  $H$  分别为 4, 5, 6, 7 m,  $L=15$  m, 墙厚 1 m, C 30 混凝土, 墙宽取 1 m。

续结构, 在计算内力位移时不可忽略主动土压力影响, 宜采用矩形土压力法。

在用以上弹性地基梁法求出墙内最大弯矩及最大位移后, 需采用最大弯矩来进行连续墙的配筋, 并控制最大位移量在规定范围内, 如不满足要求可增加连续墙厚度以增大刚度。

西外展览馆连续墙结构功能较为特殊, 桥台兼桩基, 既是桥梁基础又承重, 还兼道路挡墙功能, 悬臂  $H$  高 6 m 左右。综合以上对求嵌固深度的分析并考虑墙底合适持力层及土体扰动情况计算后, 采用嵌固深度 12 m, 墙厚 1 m, C 30 混凝土, 墙顶连续现浇厚 1 m, 宽 1.4 m 混凝土台帽来均匀传递上部荷载力, 连续墙接头采用接头管型式。

## 4 施工过程

连续墙的施工过程主要可分为: 导墙的形成, 槽段的划分与形成, 钢筋笼子的形成与入位, 接头形式的选用, 浇筑混凝土, 开挖后墙面凿平做装饰等; 各个环节都很重要, 在施工中应严格控制质量; 结合展览馆立交连续墙施工过程中一些情况主要应注意以下两点。

### 5.1 精度的问题

连续墙作为桥梁的基础工程以及作为桥梁永久的承重结构, 对其施工精度要求更高; 在施工放线, 槽段的形成过程中对施工工艺及质量都应严格控制, 特别是导墙作为施工的操作平台以及检测成槽时测量准确度的操作平台更应定位准确, 结构稳定;



# 拉索对斜拉桥体系面内弯曲频率的影响分析

蔺鹏臻, 刘凤奎

(兰州交通大学土木学院, 甘肃兰州 730070)

**摘 要:**在推导斜拉桥体系面内弯曲频率的基础上, 引入斜拉桥体系拉索影响系数, 反映斜拉桥体系的拉索对面内弯曲频率的影响, 通过斜拉索影响度的概念定量分析拉索对斜拉桥体系弯曲频率影响的相对量值。通过对四座斜拉桥体系的对比分析, 证明用斜拉索影响系数及斜拉索影响度的概念可以更直观反映矮塔斜拉桥与常规斜拉桥动力性能的差异。这个结论对认识矮塔斜拉桥与常规斜拉桥二者的受力特性有一定的参考意义。

**关键词:**斜拉桥; 矮塔; 动力特性; 弯曲频率; 自振

**中图分类号:**U448.27 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2005)02-0041-03

## 0 前言

斜拉桥体系的上部结构由梁、索、塔三类构件组成, 它是一种桥面系以加劲梁受压(密索)或受弯(稀索)为主, 支撑体系以斜索受拉及索塔受压为主的桥梁。随着计算技术及建造技术的发展, 斜拉桥的体系也逐步在发展, 其中两种趋势最为明显, 第一为大跨度斜拉桥, 这种体系以纤细、柔美的主梁, 配以高

塔、密索, 充分体现出与现代高速度、高节奏相适应的时代感, 因此成为现代最为流行的桥型之一。另一种趋势则是以塔矮、梁刚、索集中为外部特征的矮塔斜拉桥(亦称部分斜拉桥), 它以亦刚亦柔的独特受力特性, 填充了连续梁(刚构)和大跨度斜拉桥之间的空间。在某些情况下, 如设计预应力混凝土连续梁则梁体截面过大有些勉强, 如设计常规斜拉桥则不太经济, 此时可以考虑采用混凝土连续梁与预应力混凝土斜拉桥之间的过渡形式, 即混凝土矮塔斜拉桥。

斜拉桥体系的动力特性直接影响斜拉桥的抗

收稿日期: 2004-07-29

作者简介: 蔺鹏臻(1977-), 男, 甘肃甘谷人, 硕士, 助教, 主要从事大跨度桥梁的理论研究工作。

图 8 为导墙的一般形式。展览馆立交连续墙作为桥梁的基础部分外, 还兼桥台及道路挡土墙功能, 在施工中要求有更高的垂直精度, 在施工中如果超过设计规定的范围, 不仅会给主体结构的施工带来困难, 还会增大混凝土的浇灌量, 因此在施工中发现异常时应及时控制并修正, 随时的监控是必要的。

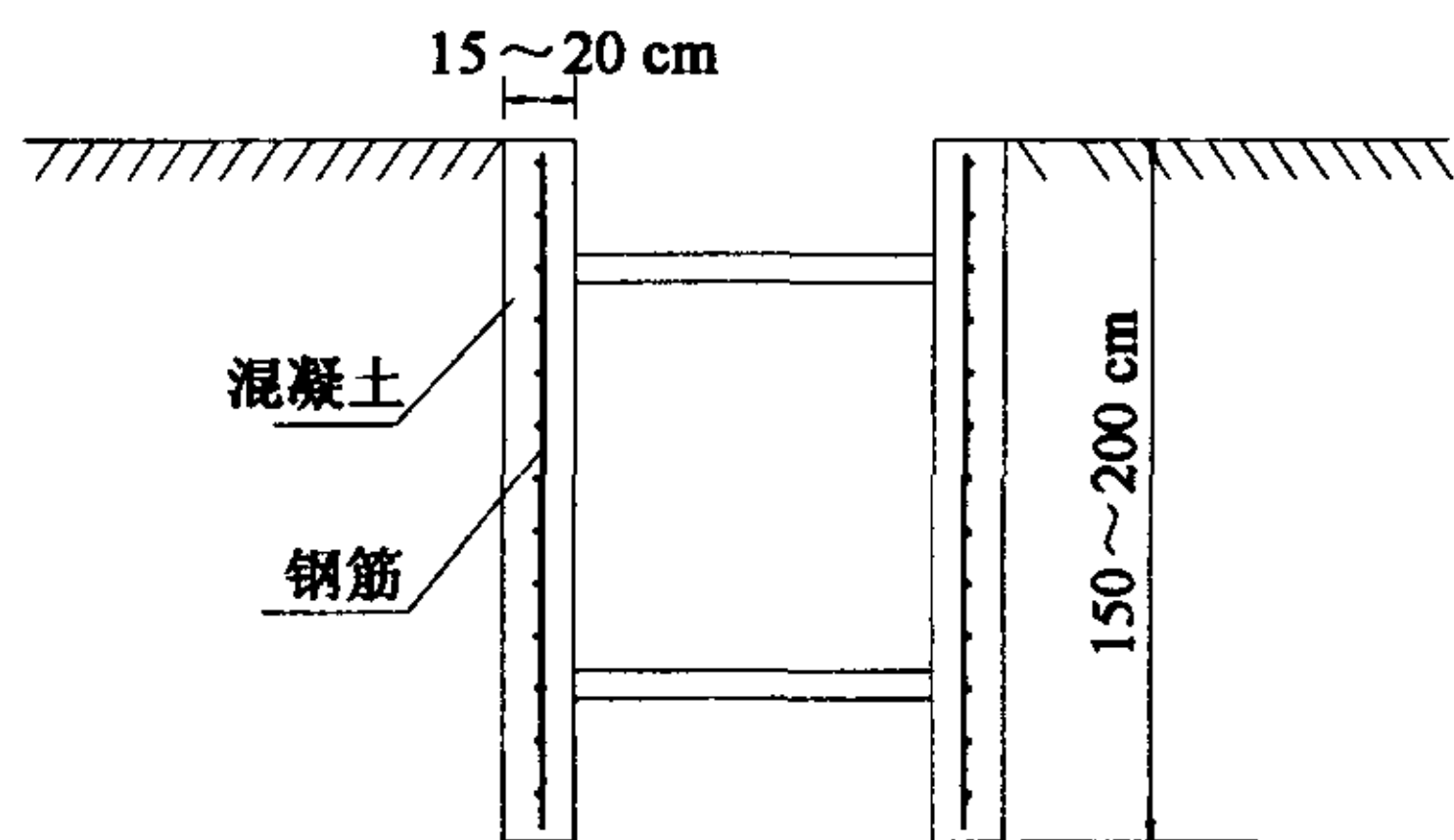


图 8 一般混凝土导墙示意图

## 5.2 成墙质量问题

由于连续墙的施工过程中质量较难控制, 地质情况也会有变化, 一般都在墙面开挖暴露后才发现问题, 主要有墙体几何尺寸偏差过大, 墙体内部窝泥

导致墙体不连续, 混凝土离析、骨料架空等; 当这些缺陷足以影响连续墙的安全运行时必须进行补强措施, 一般可采用局部凿除, 立模补浇处理或局部注浆处理; 展览馆连续墙在成槽开挖后局部也有槽孔坍塌、混凝土突出以及局部露筋现象, 采取了凿除多余部分混凝土及局部补修措施。

## 5 小结

通过以上分析并结合具体工程, 连续墙在桥梁工程中的应用与建筑基坑支护功能有些不同, 桥梁作为永久结构, 在设计应用连续墙时应具体分析其使用功能, 在应用《建规》相关规范进行计算时应结合《桥规》对其修正以满足桥梁工程的使用要求; 结合展览馆立交连续墙的设计施工, 应特别注意回填土的扰动, 地下水位的确定, 各参数的选用以及施工监控问题等。

随新材料、新技术的发展, 连续墙的发展很快, 应用越来越广泛, 计算手段也更丰富精确, 更精确的计算可采用有限元法。