

整体式桥台位移相关的设计土压力计算方法

杨 春^{1,2}, 梁井泉³

(1. 上海顶新工程规划设计有限公司, 上海市 201315; 2. 中土大地国际建筑设计有限公司上海分公司, 上海市 201315;

3. 中交公路规划设计院有限公司, 四川 成都 610299)

摘 要: 研究了升温工况下整体式桥台的设计土压力计算方法, 给出了温度与土压力耦合作用的4种荷载组合方式, 并与3种经典的土压力荷载效应作对比分析。研究表明: 整体式桥台设计宜采用结构-土相互作用的土压力计算方法; 中小跨径的整体式桥梁, 升温工况下的桥台土压力远未达到被动土压力, 明显大于静止土压力; 大跨径的整体式桥梁, 土压力会成为桥台设计的控制荷载。

关键词: 整体式桥梁; 无伸缩缝桥梁; 整体式桥台; 土压力; 结构-土相互作用

中图分类号: U442.5; TU432

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0206-04

Calculation Method of Design Earth Pressure Related to Displacement of Integral Abutment

YANG Chun^{1,2}, LIANG Jingquan³

(1. Shanghai Dingxin Project Planning and Design Co., Ltd., Shanghai 201315, China; 2. Zhongtu Dadi International Architectural

Design Co., Ltd., Shanghai Branch, Shanghai 201315, China; 3. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Chengdu 610299, China)

Abstract: The calculation method of design earth pressure for integral abutment under temperature rise condition is studied. Four kinds of load combinations considering the coupled effects of temperature and earth pressure are proposed. And a comparative analysis is conducted with three classic earth pressure load effects. The results indicate that the calculation method of earth pressure with soil-structure interaction should be adopted in the design of integral abutment. For medium-span and small-span integral bridges, the earth pressure of abutment under temperature rise condition is far less than the passive earth pressure, and is significantly greater than the static earth pressure. For long-span integral bridges, earth pressure will become the control load of abutment design.

Keywords: integral bridge; jointless bridge; integral abutment; earth pressure; soil-structure interaction

0 引 言

整体式桥梁是一种将主梁与桥台连接, 且不设置伸缩缝的桥梁结构型式, 在国内常被称作无伸缩缝桥梁^[1], 为了与常规独立结构形式的桥台区分, 其桥台被称作整体式桥台。整体式桥梁中, 主梁与桥台刚接称为全整体式桥, 主梁与桥台铰接称为半整体式桥^[2]。本文研究的全整体式桥有2个优点: 一是没有伸缩缝, 避免了运营期频繁出现的伸缩缝损坏及维修, 具有良好的全寿命周期经济性, 因而在欧美国家得到广泛建造使用^[3-4]; 二是桥台与主梁形成框架结构体系, 主梁可以更小的高跨比实现跨越。尽管如此, 这种桥型在设计方面也面临诸多技术挑战:

一是周期性升降温情况下的台后土压力特征及其计算, 二是大位移情况下的结构-土相互作用模拟。

在周期性的环境温度作用下, 整体式桥台伴随着上部结构梁体的伸缩而反复挤压台后土体。Kim等^[5]、Salman等^[6]和Alqarawi等^[7]分别在现场和实验室对桥台往复位移情况下的台后土压力进行了测试, 发现桥台结构的温度效应是周期性、非线性和不可逆的, 并且土压力的峰值存在随循环次数增加而逐渐增大的棘轮效应现象。林上顺等^[8]、李岚等^[9]分别开展了整体式桥台小位移和大位移拟静力试验研究, 测试了台后砂土的被动土压力特征, 拟合了被动土压力系数与桥台位移的关系曲线。由于台后回填材料的离散性以及土压力产生机理的复杂性, 目前国外的设计规范对整体式桥台的设计土压力没有统一规定, 德国和美国采用全被动土压力, 英国和瑞典采用部分被动土压力^[2]。由于我国很少建造整体

收稿日期: 2025-07-02

作者简介: 杨春(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

式桥梁,因此现行规范中没有关于整体式桥台设计土压力的规定。

结构-土体相互作用(SSI)是桥台结构典型的受力分析方法,包括台身-土体相互作用和桩-土体相互作用。目前国内外尚无公认的用于台身-土体相互作用的力学模型。Civjan 等^[10]和 Salman 等^[6]所提的模拟方法均是由 Duncan 提出的挡土墙土压力系数-位移关系曲线^[11]演变而来,但该关系曲线仅适用于砂土。谢涛等^[12]基于库仑土压力模型,通过构建土体单位长度剪切位移和墙体侧向位移的几何关系,提出了从涵盖主动至被动状态全过程的墙体位移-土压力系数计算方法。桩-土体相互作用公认较好的模拟方法有小位移线弹性的 m 法和大位移非线性的 p - y 曲线法^[13],目前已发展出适用于软黏土、硬黏土、砂土的 p - y 曲线。

本文将介绍一种适用于整体式桥台周期性升温挤压台后填土的土压力计算方法,并与经典的土压力荷载效应作对比分析,以期以后的整体式桥梁工程项目提供设计参考。

1 位移相关的土压力计算方法

1.1 土压力系数设计值

根据土压力理论,进入被动土压力极限状态需要挡土结构的水平位移达到 1%~5%。对于中小跨径整体式桥的桥台来说,主梁升温伸长是很难达到这个位移量的,因此使用被动土压力做设计会过高地估计台后土压力,而且使用被动土压力也不意味着安全保守。桥台周期性反复挤压台后填土会出现土压力峰值逐渐增大的棘轮效应,这是由于主梁降温缩短、桥台反向位移、填土松散滑落逐渐填充台后缝隙导致的。英国标准协会(BSI)为整体式桥台设计推荐了一种考虑这种棘轮效应,并且与桥台位移有关的土压力计算方法^[14],这实际上是一种间接的结构-土体相互作用计算方法。

升温工况下整体式桥台主梁伸长时的设计土压力分布示意图见图 1。

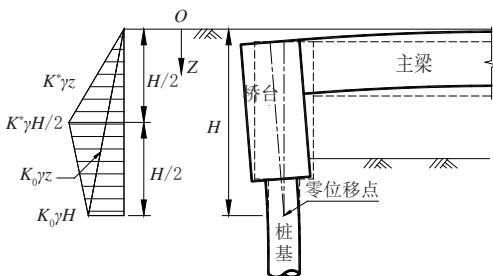


图 1 整体式桥台升温工况下主梁伸长时的设计土压力分布示意图

图 1 中: K_0 为静止土压力系数, $K_0=1-\sin\phi'$, ϕ' 为台后填土的有效内摩擦角,根据三轴固结排水试验取值; H 为从路面到桥台结构水平向零位移点的竖向距离; γ 为土的重度; K^* 为桥台挤压填土的土压力系数设计值,按式(1)计算,若计算值大于 $K_{p,i}$,则按 $K_{p,i}$ 取值。

$$K^* = K_0 + \left(\frac{Cd'_d}{H} \right)^{0.6} \cdot K_{p,i} \tag{1}$$

式中: $K_{p,i}$ 为被动土压力系数的水平分量; C 为由桥台底天然路基弹性模量 E 确定的计算参数, $C=0.051E+14.9$, E 按三轴固结排水试验 0.5 倍峰值对应的割线模量计算,且 E 值范围 $[100, 1\ 000]$, E 值单位 MPa; d'_d 为升温工况下距路面 $H/2$ 处桥台结构的水平位移设计值, $d'_d=(0.5\sim0.7)d_d$,而 $d_d=0.5d_k(1+\gamma_q)$, d_k 为路面处桥台结构由降温到升温过程的水平位移标准值, γ_q 为荷载分项系数。

这个土压力为双折线分布,从地面 0 开始往下线性增大,在 $H/2$ 处达到峰值,之后线性减小,在 H 处与静止土压力线相交。

1.2 土压力系数的计算流程

在设计之初,桥台结构的位移变形和零位移点都是未知的,因此土压力系数 K^* 需要迭代才能确定。迭代计算流程如下。

(1)步骤 1:建立全桥结构的有限元计算模型,桩侧土体约束刚度用 m 法计算,暂不输入桥台的土压力,计算升降温工况下的桥台变形。

(2)步骤 2:提取桥台结构的水平位移 d_k ,根据桥台变形确定零位移点到路面的距离 H ,计算土压力系数 K^* 。

(3)步骤 3:修正桥梁计算模型,输入桥台土压力,如果桩基水平位移超出了 m 法的适用范围,则用 p - y 曲线法模拟桩侧土体约束。

(4)重复步骤 2 和步骤 3,直至升温工况下桥台位移变形收敛。

1.3 土压力系数的包络曲线

用式(1)计算得到的土压力系数对主梁端部负弯矩来说是最不利的,但对桥梁其他构件来说未必是最不利的,而且这个土压力系数也是桥台反复挤压台后填土、土压力逐渐增大的结果,在桥梁建成初期的土压力系数并没这么大。因此,对于整体式桥台设计,需要考虑多种情况下的台后土压力。图 2 是在升降温工况下,台后土压力系数的 4 种取值情况。

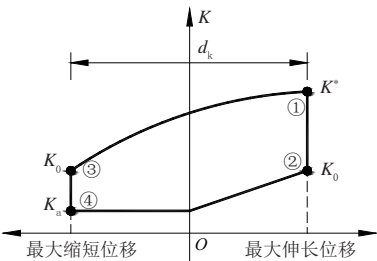


图2 整体式桥台土压力系数包络曲线

在升温工况下,①号点取考虑棘轮效应的土压力系数 K^* ,该情况下主梁端部负弯矩最不利;②号点取静止土压力系数 K_0 ,该情况下桥台弯矩和桩基正向弯矩最不利。在降温工况下,③号点取静止土压力系数 K_0 ,该情况下桩基反向弯矩最不利;④号点取主动土压力系数 K_a ,该情况下主梁跨中正弯矩最不利。

因此,整体式桥梁设计的温度和土压力耦合作用要考虑以下4种荷载组合:

- (1)整体升温+ K^* 土压力;
- (2)整体升温+ K_0 静止土压力;
- (3)整体降温+ K_0 静止土压力;
- (4)整体降温+ K_a 主动土压力。

2 桥台设计土压力的对比分析

为了考察上述考虑棘轮效应的土压力与经典的主动土压力、静止土压力、被动土压力在整体式桥梁结构中产生的荷载效应的差别,下面以1座跨径30 m的整体式桥梁作为算例。该桥台采用单排桩形式,高度4 m、厚度1.3 m,桩基采用 $\phi 0.8$ m钻孔灌注桩;主梁采用等截面钢板组合梁,梁高1.2 m、横桥向间距2.5 m,如图3所示。台后填土内摩擦角 35° ,主梁升降温按 $\pm 30^\circ\text{C}$ 计算。算例的有限元分析模型如图4所示,桩侧土体约束刚度先按m法计算。

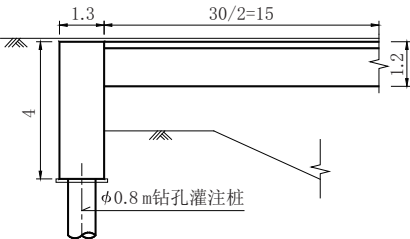


图3 整体式桥梁总体结构尺寸(单位:m)

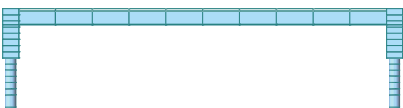


图4 整体式桥梁的有限元计算模型

按照我国现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),桥台台后的设计土压力采用库伦主动土压力,因此本算例中的被动土压力也按照库伦理

论计算。上述规范中的设计土压力与桥台的位移无关,因此本算例中的经典主动土压力、静止土压力、被动土压力均分别与温度伸缩效应组合。算例中桥台施加的4种设计土压力如图5所示。

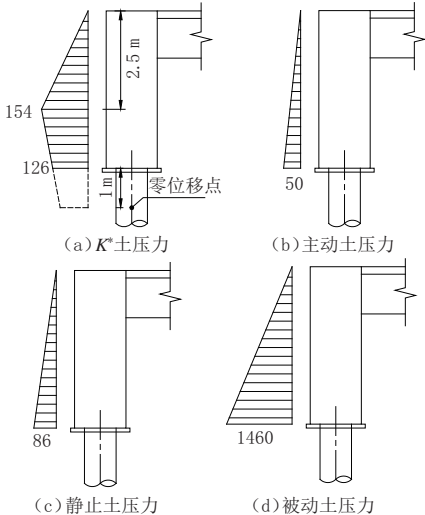


图5 桥台施加的4种设计土压力(单位:kN/m)

图5(a)的 K^* 土压力是经迭代计算确定的,相关计算参数见表1。桩顶水平位移未超过6 mm,桩侧土体可视为处于弹性状态,不必再用 p - y 曲线计算桩侧刚度。

表1 桥台设计土压力系数 K' 及其计算参数					
K_0	$K_{p,d}$	C	d'_d/mm	H/m	K^*
0.43	5.88	30	6	5	1.23

图6为 K^* 土压力、主动土压力、静止土压力和被动土压力单独作用下,桥台、桩基和主梁的弯矩图。由图6可见,最大弯矩出现在桥台和桩基连接区域, K^* 土压力引起的最大弯矩是主动土压力的3.8倍,是静止土压力的2.2倍,是被动土压力的13%。因此,对于中等跨径的整体式桥梁,若采用被动土压力会过高地估计土压力的水平,若按我国规范采用主动土压力又会出现低估,这显然不合理。

图7为以上4种土压力与温度伸缩联合作用下,桥台、桩基和主梁的弯矩包络图,其中图7(a)是图2所示的4种组合的包络图。除被动土压力作用情况,其余3种情况的最大弯矩均出现在桥台和主梁连接区域。说明跨径30 m左右的整体式桥梁,土压力并非桥台设计的主导荷载。但随着跨径增大,主梁温度伸缩变形增大, K^* 土压力随之增大,土压力会成为桥台设计的主导荷载。

3 结 语

- (1)本文介绍的整体式桥台设计土压力与桥台

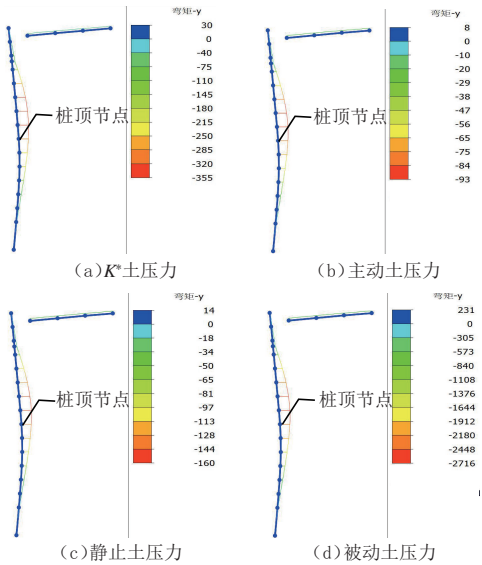


图6 土压力作用的结构弯矩(单位:kN·m)

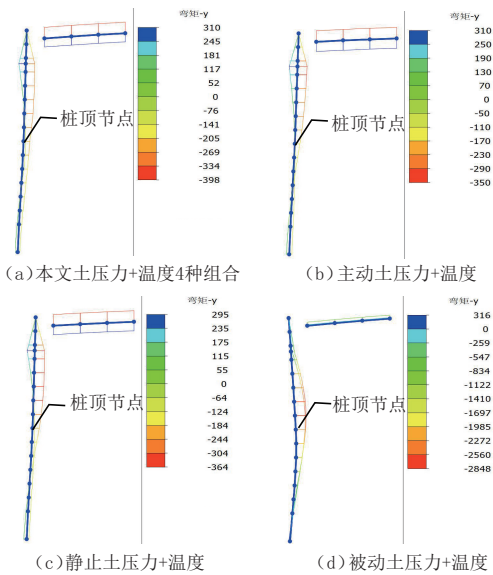


图7 土压力和温度联合作用的结构弯矩包络图(单位:kN·m)

的位移相关,相当于考虑了结构-土体相互作用,准确度相对更高;土压力呈双折线分布,符合台后实际土压力的分布特征,比经典土压力理论的三角形分布更为合理。

(2)对于中小跨径的整体式桥梁,升温工况下的台后土压力远未达到被动土压力极限状态,但明显大

于主动土压力和静止土压力,建议采用本文方法计算。

(3)对于跨径 30 m 左右的整体式桥梁,土压力不是控制荷载,但对于跨径更大的整体式桥梁,土压力将成为控制荷载。

参考文献:

[1] 陈宝春,黄福云,薛俊青,等.无伸缩缝桥梁研究综述[J/OL]. 交通运输工程学报, 2022(5): 1-40.

[2] WHITE H. Integral abutment bridges: Comparison of current practice between European countries and the United States of America[R]. New York: New York State Department of Transportation, 2007.

[3] KUNIN J, ALAMPALLI S. Integral Abutment Bridges: Current practice in United States and Canada[J]. Journal of Performance and Constructed Facilities, 2000, 14(3): 104-111.

[4] WHITE H. Integral abutment bridges: The European way[J]. Practice Periodical on structural design and construction[J]. 2010, 15: 201-208.

[5] KIM W, LAMAN J A. Seven-year field monitoring of four integral abutment bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(1): 54-64.

[6] SALMAN N N, ISSA M A. Calibration and parametric investigation of integral abutment bridges[J]. Engineering Structures, 2021, 227: 111381.

[7] ALQARAWI A S, LEO C J, LIYANAPATHIRANA D.S.. Soil-structure interaction issues in integral abutment bridges[J]. Transportation Geotechnics, 2024, 48: 101296.

[8] 林上顺,林友炜,黄福云,等.往复位移作用下整体桥台后土压力计算方法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 116-125.

[9] 李岚,黄福云,张峰,等.水平往复大位移作用下整体桥台后土压力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(5): 173-183.

[10] CIVJAN S A, BONCZAR C, BREÑA S F, et al. Integral abutment bridge behavior: parametric analysis of a Massachusetts bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(1): 64-71.

[11] BARKER R. M., DUNCAN J. M., ROJIANI K. B. et al. Manuals for the design of bridge foundations, NCHRP Report. 343[R]. Washington, D.C: Transportation Research Board, 1991.

[12] 谢涛,罗强,张良,等.Coulomb模型下考虑墙体侧向位移的土压力计算[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 194-200.

[13] API-RP-2GEO Geotechnical and foundation design considerations [S]. American Petroleum Institute, 2011.

[14] British Standard International. PD 6694-1: 2011+A1: 2020 Recommendations for the design of structures subject to traffic loading to BS EN 1997-1: 2004+A1: 2013[S].