

整体式桥台桥梁台后土压力的季节性变化研究

Study on seasonal fluctuation of earth pressure behind the abutment

彭大文, 陈晓冬, 袁 燕
(福州大学 土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘 要: 建立了整体式桥台与土共同作用的有限元模型, 计算分析了季节性温度变化下台后土压力的分布曲线。以三跨连续混凝土板桥为工程实例, 提出并验证台后设置 EPS 压缩层和置换轻填土两种方案, 同时配合台后土体加筋, 为整体式桥台设计提供理论依据。

关键词: 季节性温度变化; 整体式桥台; 土压力; 有限元分析; EPS 材料

中图分类号: TU 432; U 443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000- 4548(2003) 02- 0135- 05

作者简介: 彭大文(1949-), 男, 上海人, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事桥梁工程方面的教学和科研工作。

PENG Da-wen, CHEN Xiao-dong, YUAN Yan

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In this paper, a FEM model for calculating earth pressures behind the abutment with considering the interaction of the earth and the abutment is established, the distribution curves of earth pressures behind the abutment under seasonal fluctuation of temperature are analyzed. With a practical example of a three span continuous concrete bays, two method are proposed and verified: a compressible inclusion of resilient EPS material is used or the EPS-block geofom is used as lightweight fill, with geosynthetic as reinforcement (geogrid, geotextile or metallic elements). It offers a theoretical basis for design of the abutments.

Key words: circular temperature loads; integral abutment bridge; earth pressure; FEM method; EPS(expanded polystyrene) material

0 引 言^①

桥梁上部结构在温度变化下将产生纵向位移, 为了处理上部结构与桥台间的相对位移, 传统做法是在桥梁两端设置伸缩装置。由于伸缩装置直接承受车轮荷载的反复冲击作用, 又长期暴露在大气中, 使用环境较恶劣, 成为桥梁结构最易遭到破坏的部位, 一种取消伸缩装置的整体式桥台桥梁应运而生。该类桥梁的桥台是由柔性桩基础和上部结构浇筑成一体而构成。与有伸缩装置的桥梁相比, 整体式桥台桥梁有其独特的许多优点, 因而在美国、欧洲、日本等国得到迅速普及发展^[1]。

随着国外整体式桥台的不断建造, 人们开始认识到整体式桥台在使用期间的问题: 伴随着桥梁上部的季节性温度变化, 桥台的往复位移使台背的土压力表现为冬季是主动土压力, 夏季是被动土压力。进一步研究发现冬季桥梁上部结构收缩时, 台后填土形成楔形的滑动块, 当来年夏季上部结构伸长时, 土体楔块由于土的固有非线性行为, 并没有恢复到原来位置, 因而对结构产生了附加压力。随着季节性温度循环次数的增加, 土压力一次次增大。长期的土压力逐年增大使桥梁结构受损。这种土楔块的出现以及土压力的不断增长现象国外称之为 Ratcheting^[2]。由于土压力的这种变化会影响到整体式桥台桥梁的土压力计算, 因此研究其变化规律以便在桥梁设计时采取相应措施是十分有意义的。

1 有限元模型建立和减小土压力措施

在采用结构分析程序 ANSYS 进行有限元建模时, 所建立的模型是关于桥梁纵断面的平面应变分析模型。土体、桥台及上部结构模拟采用块体单元(plane42), 它可以作为平面单元或轴对称单元; 土与桥台之间的界面采用接触单元模拟, 由于接触面单元必须和目标面单元配合使用, 文中采用三节点接触面单元(conta172)和二维目标面单元(conta169)配合; 桥台底部的边界则通过非线性弹簧来模拟。土体材料的非线性行为通过 Drucker-Prager 非线性准则来实现。

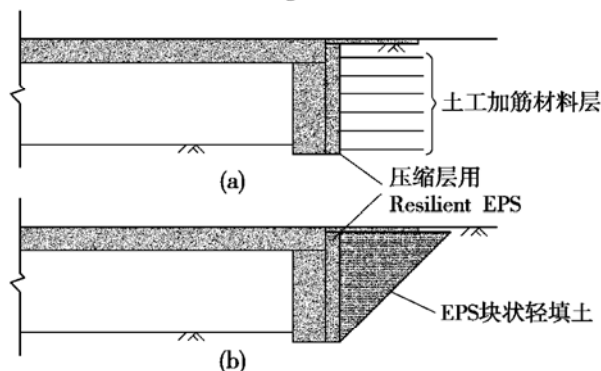


图1 设想的土体构造措施

Fig. 1 Details behind the abutment

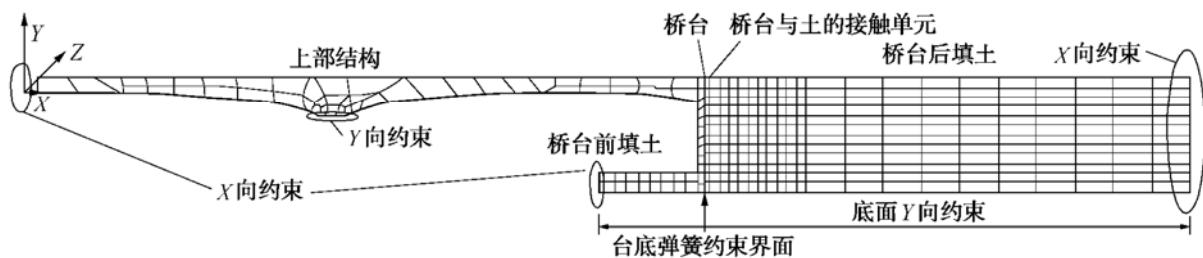


图2 ANSYS 建模基本图

Fig. 2 The basic ANSYS model of the bridge

整体式桥台桥梁在季节性温度变化下由于桥台位移反复作用, 台后土压力值有不断增大的趋势, 而且受压后土体的土压力趋向于被动土压力, 对桥台受力不利。设想的解决方法可分为两类: 一类是从结构尺寸的角度出发, 尽量减小桥台高度; 另一类是从土体本身的处理角度出发, 采用土体中加筋、设置台土之间的压缩层等局部构造手段, 如图1所示^[3]。

本文针对整体式桥台桥梁进行土体处理方面的研究。表1列出了分析过程中采用的3类12个分析模型的各种参量, 基准为 Case 1a。其中土体压缩材料为 EPS 泡沫材料 (expanded polystyrene, 泡沫聚苯乙烯), 这是目前在低应力 (小于 100 kPa) 下最有效的泡沫材料, 国外已有用在填土中来减小静止土压力的实例^[4]。文中共用到两种 EPS 材料: 分别是 Resilient EPS 和 Block EPS, 分别用于压缩层和轻填土材料, 其工程性质见表2。

表1 实桥计算采用的模型方案
Table 1 The selected cases for FEM

介于桥台背 和填土材料 间的材料层	模型方案					
	桥台后填土			桥台后填 EPS		
	无加筋	加筋材料		块状轻填土		
		聚合物	金属	主动楔	全楔	
无	Case 1a	Case 1bi	Case 1bii	Case 3ai	Case 3aii	
EPS 材料	100 mm	Case 2ai	—	—	—	—
	200 mm	Case 2aii	Case 2bi	Case 2bii	Case 3bi	Case 3bii
	400 mm	Case 2aiii	—	—	—	—

表2 EPS 材料参数
Table 2 Properties of selected EPS

EPS 材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
Resilient	14	0.25	0.25
Block	20	6	0.25

表1中内容简述如下。

(1) Case 1a 是最基本的填纯砂土方案, 作为判断的基准值。Case 1bi 和 Case 1bii 均加入了土体加筋材料, 分别为聚合物和金属类的材料。

(2) Case 2a 是假定在台与土之间加一层压缩层, 用于解决夏季土压力的增大问题的方案。Case 2b 工况的填土还经过了配筋加强, 是本文提出的一种处理整体式桥台土压力的设计方法。

(3) Case 3 的4个子工况采用块状 EPS 作为部分轻填土, 这是本文提出的另一种处理整体式桥台台背

土压力的设想方法, 其中泡沫材料与土体的界面与水平面的夹角 θ 考虑了两个值: ① $\theta = 45^\circ + \varphi/2$ (φ 为土体的摩尔库伦强度参数), 称为主动楔块; ② $\theta = \varphi$, 使台背后的土压力达到最小, 称为全楔块。

(4) Case 3a 和 Case 3b 的不同之处在于台与轻填土之间有无设压缩材料层。3bi 和 3bii 是在相应的 3ai 和 3aii 基础上, 在台与轻填土之间增设压缩材料层。

2 实桥有限元模型及计算结果分析

以一座典型的实桥为例, 通过计算分析, 了解季节性温度循环变化下台后土压力的变化规律, 以及土压力逐年增大和由此引发土体表面的沉降, 并比较各种减小土压力方法的优劣。

实桥为3跨连续变截面预应力混凝土板桥, 桥跨为70 m (19+ 32+ 19), 桥台高6 m。为了集中研究季节性温度荷载下的土压力变化规律, 车辆荷载和其他活载暂不计。利用对称性, 建模只建了一侧的桥台和一半的桥梁上部结构, 台后的土体选择足够的长度以适应应力扩散的实际情况, 如图2所示^[3]。

假定的桥梁外部温度环境如下: 计算所考虑的温度为季节性的整体温升温降, 即认为桥梁各构件断面温度均匀升降。计算一次温度的循环如图3所示, 按5次循环成为一个完整的计算过程。考虑的温差为 $\pm 30^\circ\text{C}$, 这对于我国大部分地区的桥梁而言, 设计时的年均温差已均在此范围之内。

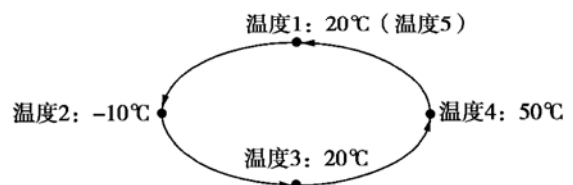


图3 计算温度循环示意图

Fig. 3 Cyclic fluctuation of temperature

加筋土体的模拟是沿深度每0.5 m 设一层加筋层, 用杆单元连结土块体单元的两个结点, 杆单元的面积取横桥向1 m 范围内所有加筋的总面积。加筋材料的刚度取值, 对于聚合物类土工织物, 每层加筋材料刚度为400 kN/m; 对于金属材料则为 2×10^4 kN/m。

桥台表面总的土压力值 $P_h = \int_0^H \bar{\sigma}_h dz$, 引入无量纲值 $\beta = P_h/P_0^*$, 其中 P_0^* 为静止土压力的理论值。通过该系数的变化可以看出总的土压力变化程度, 作为本文的重要数据。当 $\beta = 1$ 时, 表示计算值与静止土压力理论值相等。由此可算出主动状态和被动状态的理论 β 值分别 0.594 和 16.64。

2.1 Case 1: 纯砂土方案

主要关注整体式桥台后的 Ratcheting 现象和单独增设加筋材料的作用, 计算得出的 β 值汇总于表 3。

表 3 Case 1 温度循环下土压力 β 值汇总

Table 3 β value of case 1 under cyclic temperature

模型 方案	第 1 次循环 β 值				第 5 次循环 β 值	
	温度 1	温度 2	温度 4	温度 5	温度 4	温度 5
Case 1a	1.034	0.616	1.727	1.147	1.901	1.266
Case 1bi	1.033	0.593	1.690	1.114	1.862	1.237
Case 1bii	0.879	0.504	1.440	0.942	1.579	1.046

从表 3 及后续图 5 可以看出, 计算土压力是一种曲线形的复杂分布。土工织物的应用对土体静止状态下的自稳定作用不大, 这是因为桥台底部的轻微位移还不足以使加强材料发挥其抵抗作用。

当完成一次温度循环过程后, 土压力实际上略大于加载前的数值, 其增大部分主要集中于桥台的上部。分析原因是由于土楔块的形成以及上部土体被动屈服的残余塑性应力, 桥台顶部在回到初始位置时的土压力略大于它们在温度 1 时的值。

在经过第 5 次温度循环过程之后, 3 个模型的土压力增加情况如表 4 所示, 说明土体加筋对阻止土压力增大的效果并不明显。桥台在经过 5 次循环过程后仍回到初始位置, 顶部有约 1 mm 的残余位移, 土体表面沉降约为 4 mm。

表 4 Case1 多次循环后土压力 β 值比较

Table 4 Comparison of lateral pressure in case 1

模型方案	施工结束时 β	第 5 次循环末 β	增大百分比
Case 1a	1.034	1.266	22.40%
Case 1bi	1.033	1.237	19.75%
Case 1bii	0.879	1.046	19.00%

整体式桥台桥梁由于季节温度循环所产生的土压力增加现象, 从 20 世纪 60 年代开始为人所识, 至今已根据实验和实桥观测数据得出了一些经验公式。一种理论是由 Broms and Ingleson (1971) 提出的, 认为土体在 $H/3$ (H 为桥台高度) 达到了最大库伦被动土压力, 此后土压力沿桥台深度降至主动土压力。另一个是美国缅因州交通局 1986 年采用对上述方法的改进, 认为土压力在达到 $H/3$ 的峰值后不是降至主动土压力而是降至静止土压力。本文与这些公式结果进行了比较, 表 5 列出了 Case 1a 情况的对比结果。

表 5 Case 1a 的各种 β 值比较

Table 5 Comparison of lateral pressure in case 1a

计算方法	β 值	
	本文 70m 实桥	文献[4] 50m 实桥
本文方法	1 a: 1.727	1 a: 1.5
	5 a: 1.901	4 a: 1.8
	10 a: 2.053	
简化方法 Broms and Ingleson 美国缅因州交通局	5.943	4.1
	6.213	4.8
库伦被动土压力理论	16.64	24

本文的循环过程计算了 10 a, 尚无法与简化公式考虑 100 a 使用期的方法进行直接比较。但从表中数据可以看出, 土压力逐年增大的趋势是明显的。

2.2 Case2a: 增设 EPS 泡沫材料压缩层

Case 2a 分析的重点是评价采用 EPS 作为压缩材料的有效性, 这部分包括 3 个子工况 Case 2ai、2aii 和 2aiii, 对应的 EPS 压缩层厚度分别为 100, 200, 400 mm, 厚度和台高比 $t_{ci}/H = 0.017, 0.033$ 和 0.067 。

Case 2a 三个模型及相应作为对比的 Case 1a 的计算土压力 β 值如表 6 所示。可以看出, 加入 EPS 压缩层后, 温度循环各阶段的土压力值均比作为参照的 Case 1a 值显著减小。以未考虑温度荷载时(温度 1 状态)为例, 三个模型(2ai、2aii 和 2aiii)的 β 值与基准的 Case 1a 的 $\beta = 1.034$ 相比, 有了显著的降低, 降幅分别达 33.6%、45.3% 和 57.7%。本文算例中, 如静止状态要达到主动土压力状态($\beta = 0.594$), 可通过内插得到 EPS 厚度 $t_{ci} = 123$ mm。

表 6 Case 2a 温度循环下土压力 β 值汇总

Table 6 β value of case 2a under cyclic temperature

模型 方案	第 1 次循环 β 值				第 5 次循环 β 值	
	温度 1	温度 2	温度 4	温度 5	温度 4	温度 5
Case 2a	1.034	0.616	1.727	1.147	1.901	1.266
Case 2ai	0.687	0.389	1.227	1.828	1.351	0.912
Case 2aii	0.566	0.345	1.033	0.705	1.137	0.776
Case 2aiii	0.437	0.286	0.805	0.563	0.885	0.620

压缩用 EPS 的厚度与土压力 β 值的关系见图 4。可以看出随着 EPS 厚度的增大, 土压力是递减的, 但趋势变缓, 土压力逐年增大的现象并没有因为 EPS 层的存在而得到改善。即 EPS 层在控制土体的 Ratcheting 现象方面效果并不明显。

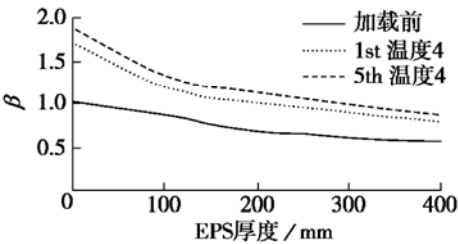


图 4 土压力 β 值与压缩层厚度关系曲线

Fig. 4 Relation between β and t_{ci}

土体在各阶段的沉降,当温度上升和下降时,土体表面有微量起拱(5 mm)和沉降(6 mm)。第5次循环结束时,土体有残余沉降约2 mm。

压缩层的变形量大小和分布与土压力(在本例中处于屈服值之下)基本是线性关系。温度上升时,随桥台上部位移量的增大,压缩层变形量也增大;反之,亦然。

2.3 Case 2b: EPS 泡沫材料与加筋共同使用

Case 2b 的两个模型在加入了土体加筋材料的同时还应用 EPS 压缩层,考虑两者的协同工作效果。两个模型仅是加筋用的材料不同,一种为聚合物,另一种为金属材料。压缩材料厚度均为 200 mm,加筋长度为 4 m。Case 2b 以及相应作为对比的 Case 2aii 的计算土压力 β 值如表 7 所示。

表 7 Case 2b 温度循环下土压力 β 值汇总

Table 7 β value of case 2b under cyclic temperature

模型 方案	第 1 次循环 β 值				第 5 次循环 β 值	
	温度 1	温度 2	温度 4	温度 5	温度 4	温度 5
Case 2bi	0.453	0.263	0.821	0.558	0.909	0.621
Case 2bii	0.255	0.158	0.494	0.336	0.569	0.388
Case 2aii	0.566	0.345	1.033	0.705	1.137	0.776

由表中可以看出,土体加筋后,温度循环各阶段的土压力值均比作为参照的 Case 2aii 值进一步减小,反映压缩层后土体加筋使土体刚度加大,自稳定性增大。以未加载时(温度 1 状态)为例,Case 2bi 2bii 的 β 值与基准的 Case 2aii 施工末的 $\beta = 0.566$ 相比,降幅分别达 20.0% 和 54.9%。

比较循环前后的 β 值,可以发现土压力的 β 值分别增大了 0.168 和 0.133,和 Case 2aii 的增大 0.210 相比,有较显著减小。反映加筋层在控制土体的 Ratcheting 现象方面有一定效果。各阶段压缩层的变形量均比不设加筋材料的情况小,但压缩层变形的分布及变化规律与 Case 2a 的分析基本相同。

土体在各阶段的沉降,当温度上升和下降时,土体表面仍有微量起拱(5 mm)和沉降(6 mm)现象。第 5 次循环结束时,土体没有残余沉降。

2.4 Case 3a: EPS 作为轻填土

这部分用于分析考虑土体的自稳定,用 EPS 轻填料来作为楔形填土的情况。根据楔形填土与水平面成角 θ 的不同,建了两个模型,分别为 $\theta = 45^\circ + \varphi/2 = 66.5^\circ$ 的主动楔块 Case 3ai 和 $\theta = \varphi = 43^\circ$ 的完全楔块情况 Case 3aii。

选用 EPS 块体材料是因为其力学性能(主要是应力应变关系方面)与中等刚度的黏土接近,而自重仅为后者的 1% 左右。Case 3a 的两个模型以及相应作为对比的 Case 1a 的计算土压力 β 值列于表 8。

表 8 Case 3a 温度循环下土压力 β 值汇总

Table 8 β value of case 3a under cyclic temperature

模型方案	第 1 次循环 β 值				第 5 次循环 β 值	
	温度 1	温度 2	温度 4	温度 5	温度 4	温度 5
Case 3ai	0.651	0.365	1.040	0.669	1.250	0.825
Case 3aii	0.353	0.140	0.643	0.377	0.735	0.378
Case 1a	1.034	0.616	1.727	1.147	1.901	1.266

表 8 中的数据均显著小于作为参照的 Case 1a 值,且土压力减小的幅度随轻填土角度的减小而增大。以未加载时(温度 1 状态)为例,Case 3ai 3aii 的 β 值与基准 Case 1a 的 $\beta = 1.034$ 相比,降幅分别达 37.0% 和 65.9%。当温度收缩时桥台上部大部分区域土压力降至为零,同时桥台与 EPS 块体之间有少量脱离现象。

比较循环前后的 β 值,可以发现土压力的 β 值分别增大了 0.174 和 0.025,和 Case 1a 的增大 0.232 相比,减小相当明显。特别是轻填土为 φ 的 Case 3aii,土压力增长非常小。反映了轻填土的方案在控制土体的 Ratcheting 现象方面有很好的效果,并同时能显著降低土压力,是一种较好的方案。

土体在各阶段的沉降,当温度上升和下降时,土体表面有微量起拱(5 mm)和沉降(7 mm)现象。第 5 次循环结束时,土体的残余沉降为 2 mm。

2.5 Case 3b: 在 Case 3a 基础上桥台后增设压缩层

Case 3b 与 Case 3a 的区别仅在于轻填土是否与桥台直接接触。在这部分中, EPS 轻填土是不与桥台直接接触的,它们之间设有一层压缩层来进一步减小土压力,这里采用压缩层是考虑到在上部结构产生较大位移下, EPS 材料可能达到或超过弹性极限,产生塑性变形,因而采取的一种预防措施。为了便于比较及减少分析变量,所考虑的压缩层厚度仅选取 $t = 200$ mm 的一种情况进行分析。

从表 9 可以看出,增设 EPS 压缩层后,土压力在原有的基础上继续大幅减小,显著小于作为参照的 Case 1a 值,而且土压力减小的幅度随轻填土角度的减小而更加明显。以未加载时(温度 1 状态)为例,两个模型(3ai 3aii)的 β 值与基准的 Case 1a 施工末的 $\beta = 1.034$ 相比,降幅高达 64.1% 和 81.7%。

表 9 Case 3b 温度循环下土压力 β 值汇总

Table 9 β value of case 3b under cyclic temperature

模型 方案	第 1 次循环 β 值				第 5 次循环 β 值	
	温度 1	温度 2	温度 4	温度 5	温度 4	温度 5
Case 3bi	0.371	0.236	0.538	0.381	0.538	0.381
(减小率)	43%	20.3%	48.3%	43%	56.9%	53.8%
Case 3bii	0.189	0.0648	0.349	0.202	0.349	0.202
(减小率)	46.5%	53.7%	45.7%	46.4%	52.2%	46.6%

比较循环前后的 β 值,可以发现土压力 β 值的逐年增大已很小,仅分别为 0.01 和 0.013,反映了该方案在控制土体的 Ratcheting 现象方面有很好的效果,并同

时能显著降低土压力,是一种较好的方法。土体在各阶段的沉降,当温度上升和下降时,土体表面仍有微量起拱(5 mm)和沉降(7 mm)现象。第5次循环结束时,土体没有发现残余沉降。

图5显示了典型的几种工况在温度荷载循环下的 β 值变化趋势。从图5可以看出,本文提出的几种方法除了土体后直接加筋的工况(1bi、1bii)效果不显著外,其余各种方法均取得了一定的效果。

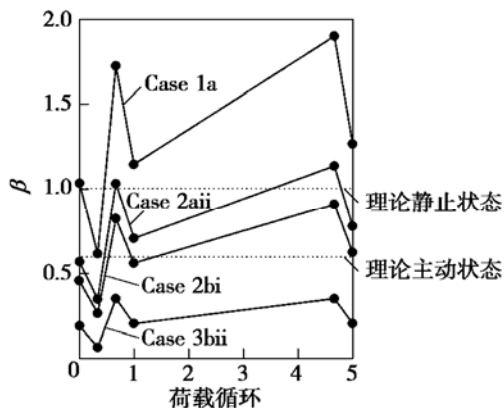


图5 各种设计方法的土压力值比较

Fig. 5 Comparison of different designs

因此可以视具体情况及费用方面的要求选用不同的方法减小土压力,本文推荐的方法是 Case 2bi 和 Case 3bii 的方法,即桥台后均加设 EPS 压缩层,然后对土体本身进行处理。采用加入加筋材料或置换成 EPS 全楔形填土。

这两种处理方法的费用是不同的,对于一般工程可以采用 2bi 的方法;而对于特殊性的填土及压缩量大、强度低的软弱填土,有必要采用 3bii 的方法来限制总体沉降及防止路堤的深层地基破坏。

在沉降方面,有两种情况达到了无沉降的要求,它们是 Case2b 系列和 Case3b 系列,与上面的推荐一致。其他的方案均不同程度上存在着循环末的土体残余沉降。图6列出了未加处理的 case1a 和推荐的两种方法的各温度阶段土压力分布图^[3],以供比较。

3 结 论

(1) 在未考虑季节性温度变化及位移的情况下,计算结果与理论结果比较吻合;考虑温度变化后,实际桥梁结构的水平位移量达不到产生土体主、被动状态所需的位移条件,计算数值小于理论值。本文的计算给出了实际土压力的大小和分布状况,为整体式桥台桥梁设计提供理论参考。

(2) 在季节性温度变化下,台后土压力存在着逐年增大的趋势。如 $\varphi = 43^\circ$ 的砂土常年受 $\pm 30^\circ\text{C}$ 温差荷载下,经过 5 年后,台后土压力将增大约 23%。

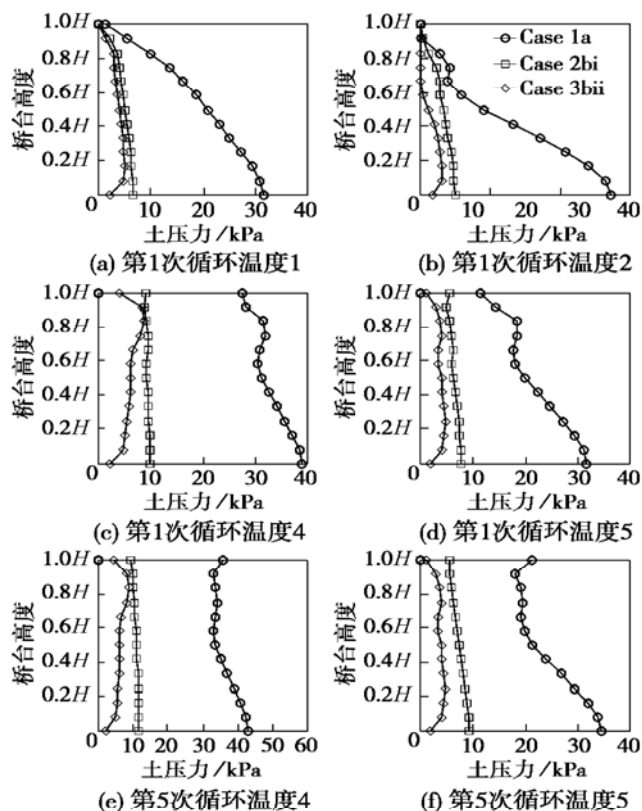


图6 算例的典型土压力分布曲线

Fig. 6 Typical distribution of soil pressure of the model

(3) 设置 EPS 压缩层于桥台与填土之间,可以显著降低土压力值,对于本文的计算实桥,当压缩层厚度选用 $t = 123\text{ mm}$ 时,桥台后土压力就从静止土压力降至主动土压力。

(4) 自稳定的轻填土设计方案(Case 3bii)与设置 EPS 压缩层并同时加筋的方案(Case 2b),能同时减小土压力并控制土压力逐年增长的趋势问题。相比而言,轻填土的方案费用较高,但效果更好,比较适用于易膨胀的土体。

(5) 有关各类参数(如台与土间的摩擦系数、桥台高度、填土类型、上部结构位移量以及土体上的荷载)对台后土压力的影响,将在另文讨论。

参考文献:

- [1] 彭大文.无伸缩装置桥梁发展[J].福州大学学报,2001,29(2):70-75.
- [2] England G L, Dunstan T, Tsang C M, et al. Ratcheting flow of granular materials[A]. Static and Dynamic Properties of Gravelly Soils[C]. ASCE, 1995. 64-76.
- [3] 陈晓冬.季节性温度荷载下的整体式桥台桥梁台后土压力研究[D].福州:福州大学,2002.
- [4] Horvath J S. Using geosynthetics to reduce earth loads on rigid retaining structures[A]. Proceedings Geosynthetics' 91 Industrial Fabrics Association International[C]. 1991. 409-424.