

文章编号: 1000-7598-(2008) 06-1466-05

桩承式路堤土拱效应有限元研究

贺 翀, 楼晓明, 熊巨华

(同济大学 地下建筑与工程系 200092,)

摘 要: 路堤下设置的带承台桩, 除了承担承台上方的填土重量外, 通过土拱效应还承担桩间土上方的部分重量。将填土重量的大部分传递到地基深部, 既增加了路基的稳定性, 又减小了路基的沉降。上海国际赛车场建造在软土地基上, 为了满足工程需要, 除使用了 EPS 轻质填筑材料外, 还在填筑高度较高的地段采用了桩承式路堤作为地基加固方式。为了深入研究土拱效应的工作机制, 对上海国际赛车场路堤桩的承台与承台间土压力分布进行了原位测试, 并结合实际工况进行有限元分析。结果表明: 除了承台上方的土压力相对承台间土有应力集中现象外, 承台边缘相对承台中部也有应力集中现象。对 EPS 的加入和桩体性质的各项参数对于土拱效应产生的影响进行了分析。

关 键 词: 桩承式路堤; 土拱效应; 有限元; EPS

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of soil arching in piled embankment with FEM

HE Chong, LOU Xiao-ming, XIONG Ju-hua

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A pile-cap foundation system is an effective way to support an embankment in order to minimize total settlement. Due to the higher stiffness of the piles in relation to the surrounding soft soil, the vertical stresses from the embankment are concentrated on the piles. Soil arching develops as a result of differential settlements between the stiff pile caps and the soft ground between them. The three-dimensional arches span the soft soil and the applied load is transferred onto the piles and then the firm-bearing stratum. This research was initiated from the Shanghai F1 speedway project. Shanghai F1 speedway has been built on the typical soft ground of Shanghai. The fill of Shanghai speedway includes not only the lime fly-ash which has been widely used but also EPS which aimed to alleviate the total load; piled embankments method is employed at the region where the height of fill is relatively high. The field test has been done in Shanghai F1 speedway to investigate the distribution of earth pressure on the cap and between the caps. In addition, numerical method is used to in comparison with the field test results. The results show that the earth pressure obtained in the soil right above the cap is relatively higher than in the soil surrounding the cap. And the earth pressure distribution shows the same way for the soil lies on the edge of cap and the centre of cap. The influence of EPS and piles character on soil arching is discussed.

Key words: piled embankment; soil arching; FEM; EPS

1 引 言

带承台桩在大面积填土荷载的作用下, 由于桩和承台的刚度远大于土的刚度, 承台顶面土体的沉降小于承台间土的沉降。土体之间的这种相互运动受到了承台顶面土体与承台间土体之间的抗剪强度的抵抗, 从而导致了承台间土的压力减少, 而承台上的土压力增大, 这种土之间由于相互位移而引起的传递作用通常叫做拱作用。在填土内部某一截面上同一水平面的填土位移均相等, 拱作用消失,

这一填土截面称为等沉面。

土拱效应是人们最早研究的土力学现象之一, 早在 1882 年 Engesser 就研究过砂土中的拱效应^[1]。太沙基 (1943 年)^[1]根据砂土的试验给出了土拱效应的计算式。此后诸多学者对土拱效应进行过研究, 其中 Hewlett 和 Randolph (1988 年)^[2]提出的半球形的土拱模型和基于 Marston 方程的英国规范 BS8006 (1995 年) 方法^[3]应用较广, 但这些方法都假设填土为均质的, 填土平面一般也假设与承台处于同一平面。

收稿日期: 2006-09-26

作者简介: 贺翀, 男, 1980 年生, 博士研究生, 主要从事地下工程方面的研究。E-mail: judeyatou@gmail.com

EPS 作为一种超轻质的合成材料,在很多国家的路堤填筑工程中得到了应用,然而我国 EPS 的使用尚处于起步阶段。白冰(1993 年)^[4]、张忠坤(1998 年)^[5]分别通过试验对 EPS 的物理和力学性状进行了研究。

2 上海国际赛车场工程简介

上海国际赛车场位于上海市安亭镇东面,占地 5.3 km²,其中主赛道总长为 5 451.24 m,宽度介于 13~20 m 之间,最大落差约 8 m。由于 F1 比赛对赛道的平整度要求极高,而赛道的平整度又与地基工后不均匀沉降有着密切的关系,因此,设计人员提出主赛道及缓冲区的地基工后沉降量应控制在 10~15 cm^[6]。

为了满足比赛需要,对于填筑高度大于 2 m 的地段采用路堤桩加固方式。路堤桩采用混凝土预制方桩,长度分为 8.0~25 m 9 种规格。每根桩还设置有承台,边长分别为 1.25, 1.50, 1.75 m 3 种规格,按照不同桩长分别采用。工程共设置了 39 570 根带承台单桩^[7]。

3 填土顺序和 EPS 对土拱效应的影响

结合施工现场试验,通过有限元计算探讨了填土顺序和 EPS 块体的加入对土拱效应的影响。

3.1 试验概况

试验地段承台下方有约 1.2 m 的砾石砂新填土,承台上方的填土由二灰和 EPS 组成,其厚度约为 5 m。其中 EPS 块体厚度为 1.5 m, EPS 底面距承台顶面的距离约 1.5 m。具体的承台下卧土层分布见表 1。试验的承台宽度为 1.5 m,桩长为 17 m,桩边长为 0.25 m。桩体混凝土为 C30。

表 1 地基土层主要物理力学指标
Table 1 Mechanical properties of soil material

土层 编号	土层 名称	层厚 /m	含水率 /%	重度 /kN·m ⁻³	弹性模 量/MPa	泊松 比	内摩擦 角/(°)	黏聚力 /kPa
①	砾石砂	1.2	0.0	18.0	30.00	0.30	43	0.0
②	黄色素 填土	0.8	25.1	19.7	5.52	0.35	23.4	23.0
③	褐黄色粉 质黏土	2.0	29.5	19.2	5.27	0.35	26.1	20.0
④	灰色砂 质黏土	3.0	29.3	18.9	16.11	0.30	43.0	0.0
⑤	灰色淤泥 质黏土	2.0	43.8	19.3	3.41	0.40	15.6	15.0
⑥	灰色黏土	12.0	33.1	18.0	5.38	0.35	12.0	13.6
⑦	灰色粉 质黏土	29.0	31.7	18.4	6.47	0.35	28.4	19.0

为了研究承台和桩间土荷载分担的机制,分别在承台顶和桩间土的不同位置埋设了 6 个钢弦式土压力盒(图 1),在整个填土过程中对土压力进行了现场测试。

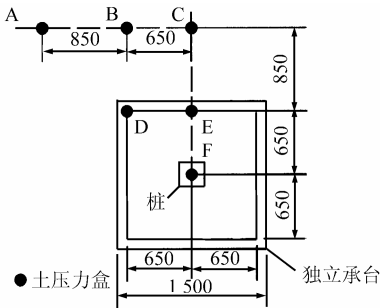


图 1 土压力盒埋置图 (单位:mm)
Fig.1 The placement of earth pressure cell (unit: mm)

图 2 是承台顶面和桩间土上 6 个土压力盒的测试结果。在 210 d 以后(填土厚度不再增加),桩-土应力比趋于稳定。在承台顶面,土压力的大小随着与承台中心距离的增加而增大;在同平面的桩间土中,土压力的大小则是随着与承台中心的距离的增大而减小。

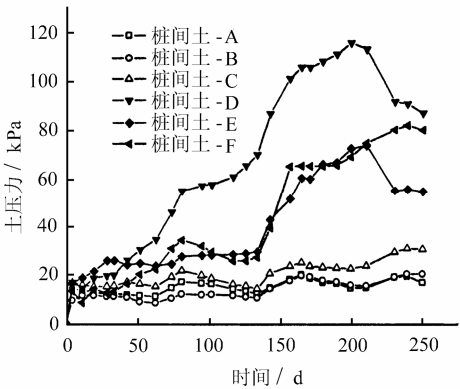
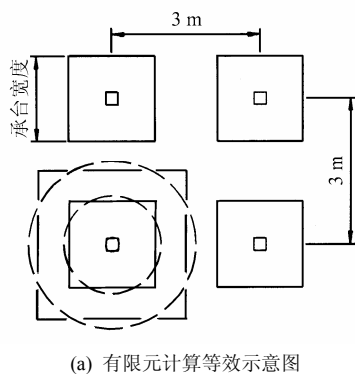


图 2 土压力测试结果
Fig.2 The result of soil pressure test

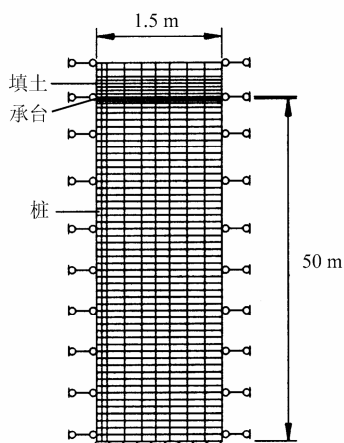
3.2 有限元计算模型

采用轴对称有限元模型计算,图 3(a)为轴对称有限元等效计算示意图。桩的影响深度取为 50 m。土体的本构模型采用莫尔-库仑模型,计算参数见表 1。带承台单桩的有限元网格划分图见图 3(b)。桩采用弹性模型,弹性模量取为 3.1 × 10⁴ MPa,泊松比 0.25,密度为 2.7 g/cm³。EPS 考虑为弹性材料,弹性模量取为 20 MPa,泊松比为 0.05,密度为 0.02 g/cm³。地下水面取砾石砂层的底面。

图 3(b)中的左右边界为侧向约束,底边界为固定边界,上边界为自由边界。在下文的计算中,桩间距保持为 3 m 不变,承台宽度和填土高度是变化的。



(a) 有限元计算等效示意图



(b) 有限元网格划分示意图

图3 有限元网格划分示意图

Fig.3 The finite element mesh used in numerical modeling

3.3 填土顺序的比较

在实际施工过程中, 承台平面以下的耕植土均被清除, 补充回填 1.2 m 的砾石砂, 新填土平面位于承台面以下。承台平面以下的新填土实际影响了对于带承台桩引起的土拱效应, 如图 4 所示。有限元计算比较了将砾石砂层是视为新填土(即实际工况)和天然土层这两种情况下承台上方土压力的分布情况。

由于土拱效应, 承台上方的土压力较天然地基条件下的土压力大, 而桩间土的土压力则小于天然地基条件下的土压力。有限元模拟得到的承台上方的土压力分布趋势与实测结果相符, 即在承台平面以上, 土压力随着与承台中心的距离变大而增大, 而桩间土的情况则相反。实测结果中, 210 d 后, 土压力盒 D 与 F 的土压力比值为 1.34; 实际工况的有限元模拟中, 承台边缘处土压力与承台中心处土压力的比值为 1.47, 略大于实测值。实测结果中, 土压力盒 D 与土压力盒 A 的土压力比值为 5.09, 有限元模拟结果中, 承台边缘处的土压力与桩间中心处土压力的比值约为 4.32, 略小于实测值。

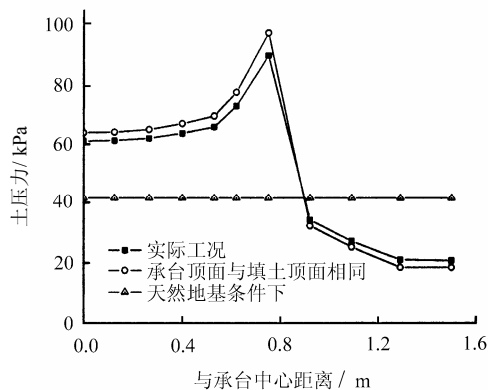


图4 不同填土方式土压力的比较

Fig.4 The contrast of soil pressure on different fill's mode

承台平面以下的新填砾石砂影响了承台上方的土拱效应, 使得承台上方的土压力变小, 而桩间土的土压力增大, 实际上是削弱了带承台桩引起的土拱效应。

3.4 EPS 对土拱效应的影响

由于 EPS 块体的加入, 也必然影响到土拱效应, 有限元计算比较了存在 EPS 的实际工况和假设填土全部为均质的二灰填筑工况。

图 5 中纵坐标为带承台桩加固后的土压力与相同填土条件下天然地基土压力的比值。从有限元计算的结果看, EPS 的存在增强了填土内的土拱效应, 使得承台上方的土压力比值增大, 桩间土的土压力比值减小。

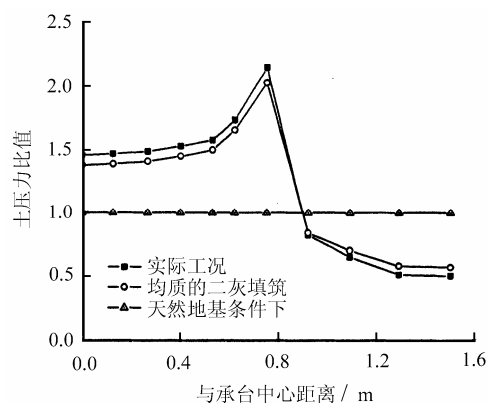


图5 EPS 对土压力的影响

Fig.5 The influence of EPS on the soil pressure

必须指出的是, EPS 对土拱效应的影响与 EPS 块体在土体中的位置、承台的宽度是相联系的。图 6 显示了不同的承台宽度条件下, 随着 EPS 位置的改变承台荷载分担比的变化。

在同一承台宽度条件下, 存在着一高度, 在这一高度以上, EPS 的位置对土拱效应不再有影响,

这一高度即为等沉面所在。在等沉面以下,随着 EPS 与承台顶面距离的减小,土拱效应得到增强,承台的荷载分担比增大。随着承台宽度的增加,等沉面的高度亦升高,表明土拱效应的影响范围增大。

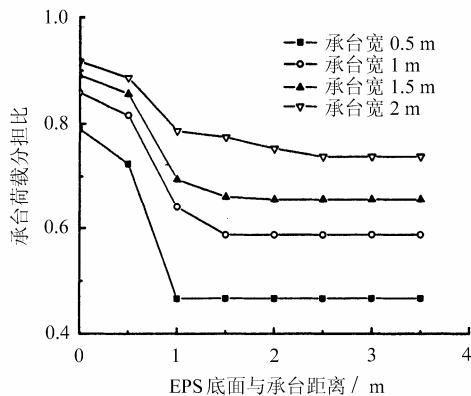


图6 EPS设置高度对土拱效应的影响

Fig.6 The influence of the distance between EPS and the the top of cap

4 土拱效应随桩身参数的变化

影响桩-土相对刚度的因素均对土拱效应产生影响。这里对3个主要的参数:承台宽度、桩长、桩体模量对土拱效应的影响进行分析。为了使计算结果更适于讨论,假设填土为均质的,即均为二灰填筑,填土底面设为承台顶面。

4.1 承台宽度对土拱效应的影响

图7为不同的承台宽度条件下,随着填土高度的增加,承台荷载分担比变化的趋势。计算中除承台宽度条件变化外,承台间距保持为3m,桩长保持为17m。

在等沉面高度以下,随着填土的增高,土拱效应得到增强,承台的荷载分担比增大;而在等沉面高度以上,随着填土的增高,承台荷载分担比略有下降。承台宽度对于等沉面高度的影响相当显著。

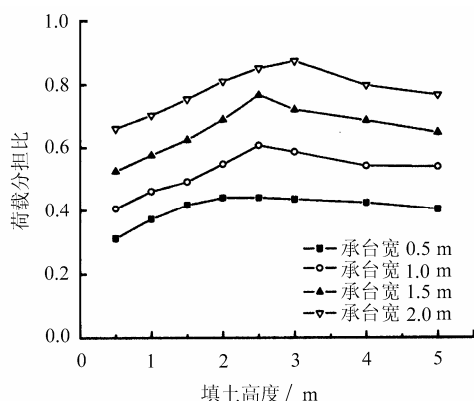


图7 承台宽度对土拱效应的影响

Fig.7 The influence of cap's width on arching effect

4.2 桩长对土拱效应的影响

图8为在相同的其他条件下,不同桩长条件下填土高度增高时承台荷载分担比的变化趋势。

从有限元的计算可见,桩长对于等沉面高度影响不大。虽然随着桩长的增加,承台的荷载分担比逐渐增大,但增大的幅度迅速减小。表明在大面积填土条件下,桩长增加到一定长度后的作用是有限的。

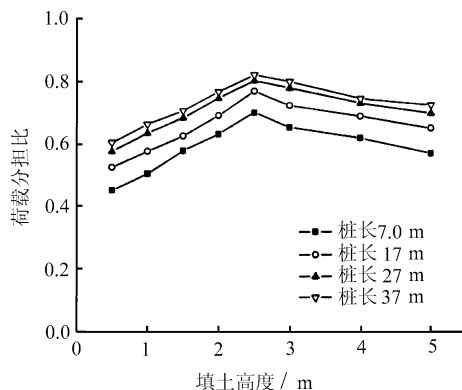


图8 桩长对土拱效应的影响

Fig.8 The influence of pile's length on arching effect

4.3 桩体模量对土拱效应的影响

图9中的 k 为桩体模量与实际工况所采用的桩体模量(即 3.1×10^4 MPa)的比值。在计算中承台的弹性模量保持不变。

在填土高度较低时,不同桩体模量的荷载分担比的差距并不大,但随着填土高度的增加,不同荷载条件下桩体模量的荷载分担比之间的差距逐渐增大。桩体模量对等沉面的高度也影响甚小。

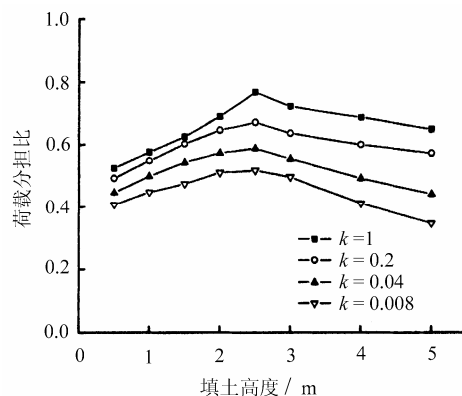


图9 桩体模量对土拱效应的影响

Fig.9 The influence of pile's modulus on arching effect

5 结 论

通过对实际工程的有限元模拟计算和实测结果的比较以及各种工况下的有限元计算,可以得出以

下结论:

(1) 由于土拱效应的作用,减小了承台间土的土压力,而使承台顶面的土压力增大,其中承台顶面的土压力随着与承台中心距离的增加而增大,承台间土的情况则相反。

(2) 在使用带承台桩进行地基处理时,应尽量保证承台顶面位于砾石砂填土的下方,这有利于土拱效应的发挥。

(3) EPS 的加入增强了填土内的土拱效应,EPS 对土拱效应的影响是与承台宽度以及 EPS 在填土中的位置有关。

(4) 承台宽度对于等沉面高度影响较大,而桩长、桩体模量对于等沉面高度的影响较小。

参考文献

- [1] K 太沙基. 理论土力学[M]. 徐志英译. 北京: 地质出版社, 1960.
- [2] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. **Ground Engineering**, 1988,21(3):12—18.
- [3] British Standrds Institutions. BS8006, Code of Practice

for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills, British Standards[S]. London: British Standards Institutions, 1995.

- [4] 白冰, 陆士强. 聚苯乙烯泡沫塑料的测试及其在土工中的应用[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 104—108.
BAI Bing, LU Shi-qiang. The test of EPS and its use in geotechnical engineering [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1993, 15(3): 104—108.
- [5] 张忠坤, 殷宗泽, 曹正康, 等. EPS 的力学特性及其块体载荷试验有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 106—108.
ZHANG Zhong-kun. YIN Zong-Ze, CAO Zheng-kang, et al. Mechanical properties of EPS and finite element analysis of its block bearing test. [J] **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(3): 106—108.
- [6] 楼晓明, 熊巨华. 柔性荷载下减少沉降桩的现场测试与分析[R]. 上海: 同济大学地下建筑与工程系, 2004.
- [7] 贺翀. 集中或路堤荷载下带承台桩工作机理分析[硕士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2005.

上接第 1465 页

- [10] BISHOP A W. Progressive failure—with special reference to mechanism causing it[C]// Proceedings of the Geotechnical Conference, Norway: Oslo, 1967, 2: 142—150.
- [11] PITMAN T D, ROBERTSON P K, SEGO D C. Influence of fines on the collapse of loose sands[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31: 728—739.
- [12] YAMAMURO J A, LADE P V. Static liquefaction of very loose sands[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1997, 34: 905—917.
- [13] LADE P V, YAMAMURO J A. Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1997, 34: 918—928.
- [14] YAMAMURO J A, COVERT K M. Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(4):314—324.

- [15] TERZAGHI K, PECK R B. Soil Mechanics in engineering practice(3rd edition)[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [16] 谢定义. 饱和砂土体液化的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 90—98.
XIE Ding-yi. Some problems of liquefaction of the saturated sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(3): 90—98.
- [17] ZHANG Hui-ming, GARGA V K, ZENG Qiao-ling. Steady state strength of sand: concepts and experiment[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(2): 230—235.
张惠明, GARGA V K, 曾巧玲. Steady state strength of sand: concepts and experiment[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 230—235.