

# 钢筋混凝土料仓顶升纠偏技术的分析和应用

喻 岩, 刘冬林, 张瑞云

(石家庄铁道大学 土木工程学院 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 当前,国内外在建筑物纠偏技术方面研究还十分匮乏,大都依靠工程经验。针对此种现状,以实际工程项目——某新建工厂料仓为背景,进行了现场监测和实验,且利用有限元软件 ANSYS 进行了较为系统的分析,模拟顶升过程中各工况对顶升效果影响,最终得到了上部结构、托换梁、基础以及地基协同工作情况,并指出了最不利的工况,并以此为依据有效地指导了该工程的纠偏工作,实践表明该方法达到了良好效果。这为今后进一步研究纠偏方法,合理确定纠偏方案以及合理设计的托换系统,提供有效方法和理论指导。

**关键词:** 顶升纠偏; 托换梁; 有限元; 极限状态

**中图分类号:** TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2014)04-0031-06

## 0 引言

20 世纪后半叶,建筑物的纠偏技术、托换技术、平移技术及增层改造时的地基基础加固技术逐渐兴起。一方面是由于土力学理论的发展、地基处理技术及相应施工机械与监测技术的进步而使这些技术的实现成为可能,另一方面与与日俱增的客观需求分不开<sup>[1]</sup>。一些古建筑的倾斜和相继倒塌,以及一些新建建筑物因地基处理不当或其它原因而发生倾斜,迫使人们开始重视建筑物的纠偏和基础托换加固技术,以减少经济损失。

目前,由于设计、施工的问题而引起建筑物倾斜的例子是非常多的,其造成社会影响和经济损失也是非常明显的。在对倾斜的建筑物进行倾斜分析和纠偏处理时,必须要注意的一点就是上部结构和基础、地基处于一个彼此协调、相互影响的整体之中,这种相互作用使建筑物处于某一特定形态,表现为倾斜或沉降过大,或构件出现裂缝等,这不仅与地基基础有关,还与上部结构的荷载、刚度及施工方式等因素有关<sup>[2-5]</sup>。但上部结构、基础和地基的协同作用分析十分复杂,特别是在纠偏这一复杂课题中,上部结构、基础和地基的正确分析与否将决定纠偏措施的顺利进行及整座建筑物的安全,因此将两者结合在一起研究十分必要。

分析某建筑物在纠偏过程中,各部分间的协同作用,为后续的断柱纠偏工作提供可靠依据。

## 1 建筑工程顶升纠偏方案确定

### 1.1 工程概况

山西某电解铝厂建成未投入使用的 3<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>料仓如图 1,为五层圆形钢筋混凝土框架结构,顶部为一钢结构大料斗,其料仓位于两车间之间。项目建成后,建筑场地出现不同程度的非均匀沉降,使得位于车间外侧电解铝料仓出现非均匀下沉和倾斜,料仓上部少量混凝土构件因变形而出现受力裂缝。经鉴定,3<sup>#</sup>最大倾斜量达 8.57‰,料仓顶、底中心轴线最大偏移量 212.5 mm,严重影响使用,其原因是场地内沿东南方向存在小煤矿采空区,致使电解铝料仓出现非均匀下沉和倾斜。为确保该项目顺利投产,需对料仓进行顶升纠偏加固。

DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2014.04.06

收稿日期: 2013-12-30

作者简介: 喻岩 女 1964 年出生 副教授

## 1.2 顶升纠偏

该两料仓为八根柱组成的混凝土框架结构,如图 2 柱底为条形基础,基础埋深 4 m。

鉴于该场地地质条件,建筑物整体性能好,整体沉降倾斜较大,以及甲方要求工期紧,纠偏方案最初采用的是在每根柱基础下设置反力桩,在其上设置千斤顶,顶升结构。

但当基础开挖后,发现混凝土基础与地下基岩整浇为一体,施工无法进行,后经综合考虑各种因素,决定在基础上加钢筋混凝土托换梁继而断柱,托换梁下部设置千斤顶,由原地基提供反力,通过千斤顶的顶升来调整水平位置,顶升后的空隙用铁块填塞连接,达到纠偏的目的。该方法优点在于,可以降低建筑物标高,对地基扰动少,纠偏速度相对较快。

## 2 结构顶升有限元仿真分析

### 2.1 建立有限元模型

钢筋混凝土框架结构在纠偏时上部结构和下部地基、基础协同工作非常重要,ethof<sup>[6]</sup>在 1947 年提出此问题,当时他给出了估算框架结构等效刚度的公式以考虑共同作用,基于 J. S. Przemieniecki<sup>[7]</sup>给出的结构的分析方法和 O. C. Zeinkeiwicz et al<sup>[8]</sup>给出的有限元法研究地基基础共同作用方法,结合本案每个柱的不同位置的倾斜量不同,而需顶升量不同,又由于料仓上部结构为一框架整体,所以在纠偏工作进行前,采用仿真技术对纠偏工作进行了详细地模拟。纠偏有限元分析的几何模型包括上部结构、基础和地基,上部结构与基础几何模型按原尺寸取。根据地基基础规范和实际分析,上部荷载对地基土体应力和位移影响半径在 1~2 倍基坑深度,竖向影响范围为 2~3 倍基坑深度,据此,地基模型深度方向取 40 m,长、宽均取 60 m。

利用有限元软件进行分析。柱采用 BEAM4 单元模拟;楼板采用 SHELL63 单元模拟;基础是变截面的,采用 BEAM189 模拟;土体采用实体建模,采用 SOLID45 模拟;上部结构和基础间的千斤顶采用 LINK11 模拟;基础与土间采用线面接触,接触单元和目标单元分别是 CONTA177、TARGE170;千斤顶与柱底采用点点接触,采用 CONTA178 单元<sup>[9]</sup>。

顶升过程需要保证上部结构不发生破坏,混凝土的材料参数根据实测结果确定,经取芯检测,混凝土的强度为 38.7 MPa,设计强度为 C30,满足设计要求。模型中混凝土材料的弹性模量为  $3.0 \times 10^{10}$  Pa,泊松系数为 0.2,密度为  $2500 \text{ kg/m}^3$ 。

地基土是典型的非线性材料,其应力应变关系属于高度非线性范畴。有限元分析软件 ANSYS 采用 DP 模型来描述土的弹塑性本构关系。具体有限元模型见图 3。



图 1 料仓

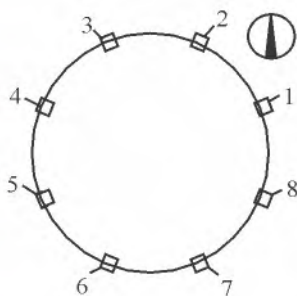


图 2 柱编号图

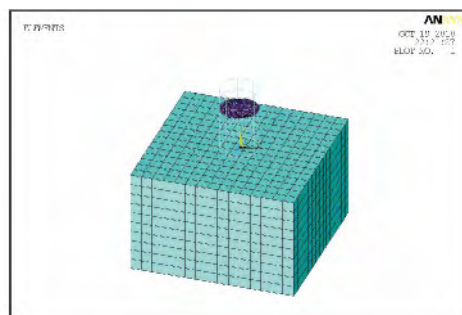


图 3 顶升纠偏有限元模型

生成有限元模型后,约束土体四周及底面  $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$  三个自由度;框架顶部的钢料斗,以节点荷载的形式施加在顶部的框架梁上;同时计入整个结构的重力荷载,重力加速度为  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;通过改变千斤顶的伸长量模拟顶升过程。

### 2.2 顶升纠偏过程四种工况仿真模拟分析

在实际顶升过程中,由于顶升过程中油压大小难以控制,继而难以保证上部结构发生整体转动,所以模拟以下四种工作状况(简称工况)。

工况 I 考虑仅某一个柱子不同步的情况。在模型中,采用仅顶升 7<sup>#</sup>柱,其余柱下不动,当结构任意构件接近承载力极限状态时,停止加载。

工况 II 考虑仅相邻两柱不能与其余六柱同步的情况。在模型中,采用仅顶升 6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>柱,其余柱下的千斤顶不伸长来考虑这种工况。

工况 III 考虑相邻三个柱不能与其余五个柱同步的情况。在模型中,采用仅顶升 5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>柱,其余柱下的千斤顶不伸长来考虑这种工况。

工况 IV 考虑相邻四柱不能与其余四柱同步的情况。在模型中,采用仅顶升 5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>柱,其余柱下的千斤顶不伸长来考虑这种工况。经对工况 I ~ 工况 IV 的有限元仿真分析、对比可知,工况 I 最不利。

对工况 I 具体结合料仓托换梁和上部结构有限元受力分析如图 4 ~ 图 6,分析可知,一、二层顶框架环梁是最先接近承载力极限状态的。3<sup>#</sup>柱底两侧托换梁的剪力较大,是因为 3<sup>#</sup>柱底作为铰支座,受到约束所致。

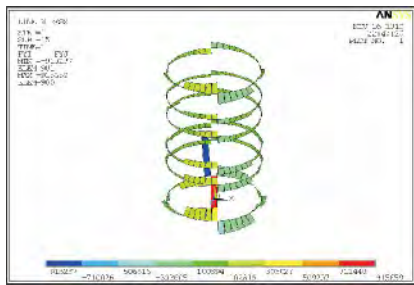


图4 工况 I 托换梁和框架梁的剪力图(单位: N)

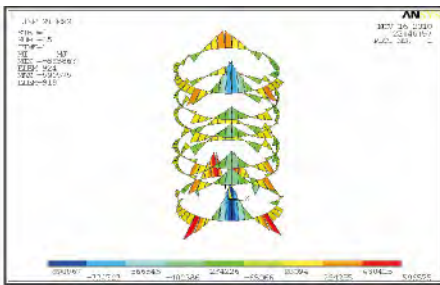


图5 工况 I 托换梁和框架梁的弯矩图(单位: N · m)

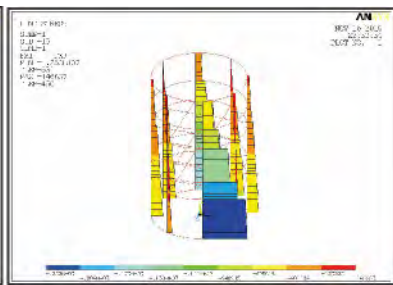


图6 工况 I 框架柱的轴力图(单位: N)

模拟试验数据显示顶升过程中有以 3<sup>#</sup>柱底为铰支座转动的趋势,因此 3<sup>#</sup>柱的轴力较大,顶升过程中,通过 7<sup>#</sup>柱两侧的梁抬升 6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>柱,减小其轴力。对轴力大的 3<sup>#</sup>柱进行承载力验算。经验算,所有的柱子均未到达承载力极限状态。

数据显示,除 7<sup>#</sup>外其余各柱的位移为负值,7<sup>#</sup>柱与 6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>柱的竖向位移差等于 5.1 mm,表明顶升过程中,7 柱带动相邻框架梁的局部竖向位移,而非整体刚性转动。原因是结构的刚度没有足够大。7<sup>#</sup>柱下土体的变形最大如图 7 所示,其值为 2.4 mm。主要原因是 7<sup>#</sup>柱下地基的附加应力最大。各柱在四种工况下土体竖向变位如图 8 所示。

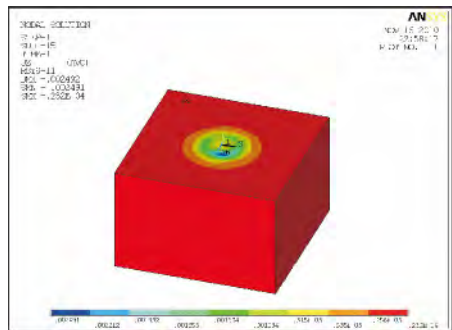


图7 工况 I 土体竖向变形图(单位: mm)

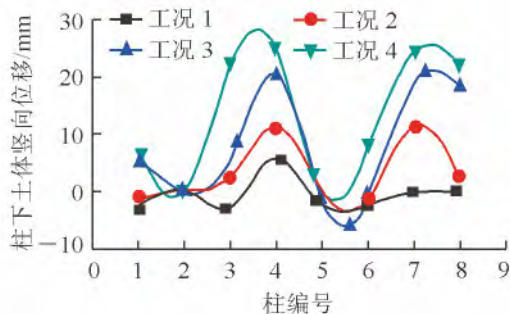


图8 各柱在四种工况下平均位移量

工况 II 情况,经分析得知,一、二层顶框架环梁最先接近承载力极限状态的。6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>柱底位移 11.1 mm,1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>柱底位移 2.5 mm,差异顶升量等于 8.6 mm,其余四柱柱底位移为负值。表明顶升过程中,非刚体转动,而是局部框架梁产生位移。

工况 III 情况,3<sup>#</sup>柱弯矩和剪力最大,一、二层顶框架环梁是最先接近承载力极限状态的。3<sup>#</sup>柱柱底位移最大 17 mm,2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>柱柱底位移 15.6 mm,1<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>柱柱底位移 4.26 mm,其余各柱柱底位移为负值。表明顶升过程中,非刚体转动,而是局部框架梁产生位移。

工况 IV 考虑相邻四个柱子不同步的情况。结果表明,一层顶框架环梁最先达到承载力极限状态,此

时千斤顶伸长 27 mm。数据显示 6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>柱底位移 24.4 mm, 5<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>柱底位移 21.9 mm, 1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>柱底位移 7.16 mm, 表明顶升过程中料仓整体上升。

### 2.3 纠偏结果分析

目前, 我国建筑物纠偏技术规范<sup>[10]</sup>尚未明确给出顶升纠偏工程的极限状。若按照建筑的地基变形允许值控制<sup>[11]</sup>, 则纠偏工程的极限状态相邻的允许差异顶升量为 11 mm; 若按照受弯构件的挠度限制控制<sup>[12]</sup>, 则相邻的允许差异顶升量为 44 mm。由工况 I ~ 工况 IV 的分析可知, 各柱顶升量最大不应超过 8.6 mm, 所以若按上述两种条件控制施工, 则构件很可能会丧失承载力。

对顶升纠偏施工过程各工况进行了模拟, 通过分析, 工况 I 最不利。根据最不利工况 I 的模型, 在 7<sup>#</sup>柱下的千斤顶模拟顶升过程, 当任意构件裂缝宽度到达 0.2 mm 时, 达到钢筋混凝土裂缝允许宽度最大值, 停止加载。计算表明, 一层顶框架环梁裂缝宽度最先到达 0.2 mm, 此时千斤顶伸长量是 3 mm, 相邻两柱的差异顶升量为 5.1 mm, 为此, 此次纠偏工作顶升极限量按照钢筋混凝土结构的正常使用时最大裂缝宽度限值控制, 施工过程严格控制差异顶升量不超过 5 mm, 降低施工速度, 并随时观察结构开裂情况。通过施工前精细准备, 施工过程严格把关, 整个顶升过程平稳, 结构所有构件均未发现可见裂缝。

于此同时在施工前, 还分析了托换梁刚度变化对上部结构内力影响和托换梁刚度变化对土体压缩变形的影响。结果表明, 托换梁的刚度越大, 框架梁所受的弯矩和剪力越小; 刚度越大土体的压缩越大。主要原因是托换梁刚度越大, 结构整体运动的趋势越显著, 7<sup>#</sup>所承担的荷载越大, 柱下土体中的附加应力相应增大, 使得的 7<sup>#</sup>柱下的土体压缩量增大。所以托换梁设计要考虑其刚度。

## 3 料仓顶升纠偏加固

### 3.1 顶升纠偏前监测

在顶升前一层顶板、顶层平台、其他各层梁底处、对各柱的竖向倾斜度等进行了测量。在满足安全使用的条件下, 以生产工艺要求作为顶升依据, 因此以顶层平台沉降测量数据作为顶升依据。

### 3.2 柱荷载的托换

顶升时上升力作用于框架柱下, 但是要使框架上的荷载能够得到托换, 必须增设一个能支承上部结构荷重的托换体系。为此利用植筋技术增设钢筋混凝土托换结构, 将框架柱荷载安全有效地传递到基础承台上, 减少框架梁柱的变形。

要实现托换顶升前提条件是将柱子与基础断开, 为保证柱子断开后, 料仓整体结构的安全, 以及在顶升过程中结构的整体性。在断柱前, 所做第一项工作是设计环托梁。根据有限元分析, 考虑托换梁刚度变化对结构上部 and 下部内力和变形影响, 在托换梁刚度许可范围内截面尽可能大<sup>[12]</sup>, 以确保上部结构的安全, 使上部结构在顶升过程中处于整体运动状态。综合上述分析, 同时又结合现场的施工条件、工程造价、纠偏后的正常使用等方面的因素, 决定采用 1 000 mm × 800 mm 的截面, 环托梁形式如图 9 所示。

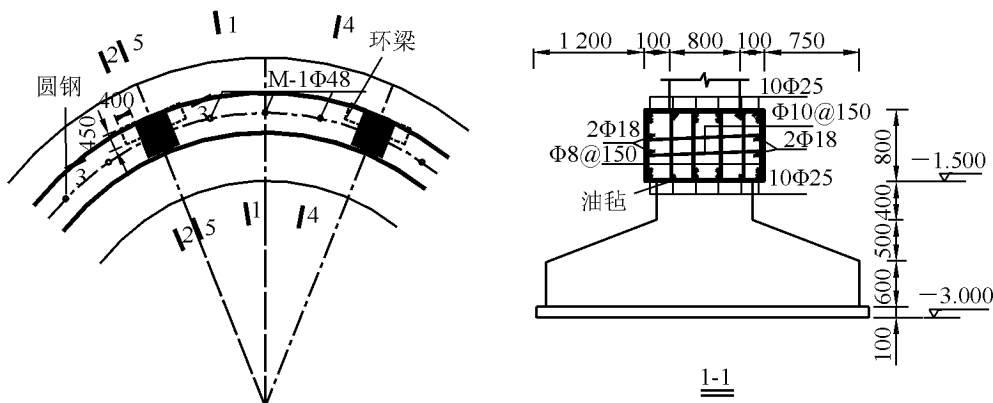


图 9 框架柱基剖面及环托梁的剖面(单位: mm)

环托梁将 8 根柱子包裹起来, 形成整体, 如图 10。环托梁采用 C50 混凝土, 受力主筋和柱子之间的连

接采用植筋技术。另外,在原地环梁上用植筋方式埋设圆钢,向上通过托换梁预埋钢管伸入托换梁中,防止顶升料仓时,结构产生扭转及水平位移。柱两侧的托换梁内预留空洞,将千斤顶放置在托换梁的预留空洞内,便于操作。

当环托梁混凝土强度达到设计强度的60%时,开始切断柱子,柱荷载通过托换系统传至基础承台。

### 3.3 顶升及顶升后框架柱、基础连接恢复工作

根据有限元分析结合施工易操作性,采用了任意构件达到承载力极限状态作为纠偏工程的极限状态。顶升过程千斤顶伸长量控制在3 mm以内,相邻两柱的差异顶升量控制在5 mm以内,并重点监测一层顶框架环梁和二层顶框架环梁的变形和裂缝的发展。

顶升到位后,应在柱两侧植筋,使柱子与基础连成整体,以保证长期使用的安全。柱钢筋采用等截面、等强钢筋植筋连接,锚固长度适当加大,柱箍筋加密,断柱区域用更高一级灌浆料浇筑。连接钢筋的数量不小于原柱纵向钢筋数量,托换环梁与原基础梁间的缝隙用强度是C35的灌浆料灌注。



图10 料仓纠偏后框架柱与基础连接

## 4 结论

通过40 d的施工,该建筑物的倾斜得到了纠正。纠偏前,3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>料仓倾斜率分别为8.57‰、5.64‰,纠偏后,房屋倾斜率分别恢复到1.14‰、0.64‰。满足国家有关设计标准要求<sup>[11-12]</sup>,托换系统设计施工、顶升顺序、顶升设备的选用是成功的,在整个顶升纠偏过程中,上部结构柱、梁、板未发现任何变形和开裂等异常情况,使该房屋转危为安,保证了房屋安全和正常使用,避免了对3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>仓拆除重建,为甲方按期投入生产争取了时间。综合效益十分显著。

纠偏工程实践表明,影响建筑物产生倾斜的因素是多方面的。在大多数情况下上部结构和地基存在协同工作情况,共同作用分析合理与否关系到纠偏工作的成败。为了取得比较理想的纠偏加固效果,针对不同的工程实际,应该在查明建筑物倾斜原因的基础上选择相应的纠偏加固技术,并做好事前理论分析工作,做到既节约投资又安全可靠。

## 参 考 文 献

- [1] 高大钊. 岩土工程的回顾与前瞻[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 解家华. 带桩多高层建筑共同作用分析方法及其在纠偏中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [3] 张国霞, 张乃端, 张风林. 非线性差异沉降分析[J]. 岩土工程学报, 1981(3): 41-48.
- [4] 何颐华, 方寿生, 钱力航, 等. 高层建筑箱形基础反力确定方法[J]. 建筑结构学报, 1980(1): 72-76.
- [5] 叶于政, 孙家乐. 高层建筑箱形基础与地基和上部结构共同工作机理的初步探讨和采用弹性杆的简化算法[J]. 北京工业大学学报, 1980, 6(3): 19-36.
- [6] MEYETHOF G G. Some recent foundation research and its application to design[J]. Struct. Engr., 1953(31): 151-167.
- [7] PRZEMIENICKI J S. Theory of matrix structural analysis[J]. Struct. Engr., 1968(28): 162-167.
- [8] ZEINKEIWICZ O C, CHEUNG Y K. Plates and tanks on elastic foundation all application of finite element method[J]. J. Solids and struct., 1965(1): 451-461.
- [9] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [10] 中国工程建筑标准化协会标准. CECS: 2007 建筑物移位纠偏增层改造技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [11] 中华人民共和国建设部. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

## Analysis and Application of Uprising and Rectification Techniques of Reinforced Concrete Silo

Yu Yan , Liu Donglin , Zhang Ruiyun

( School of Civil Engineering , Shijiazhuang Tiedao University , Shijiazhuang 050043 , China)

**Abstract:** At present , domestic and foreign studies on building rectification technology are very scarce , and mostly depend on engineering experience. In view of this situation , based on the actual project—a new plant silo as background , the field monitoring and experiments are made , and through a systematic analysis by using the finite element software ANSYS , the simulation of lifting process and lifting effect is realized , and finally the collaborative work conditions for the upper structure , foundation and foundation underpinning beam are obtained and the most adverse conditions are pointed out so as to effectively guide the rectification work. The engineering practice shows that this method achieves good results and provides effective method and theory guidance for further research on correcting method , choice of a reasonable correction scheme and reasonable design of underpinning system.

**Key words:** uprising and rectification; underpinning beam; the finite element; limit state

( 责任编辑 车轩玉)

~~~~~  
( 上接第 23 页)

- [7] Naughton P J. The significance of critical height in the design of piled embankments [C] // Proceedings of Geo-Denver. United States: American Society of Civil Engineers , 2007: 453-460.
- [8] Jenner C G , Austin R A , Buckland D. Embankment support over piles using geogrids [C] // Proceedings 6th International Conference on Geosynthetics. United States: Industrial Fabrics Association International , 1998: 763-766.
- [9] British standards institution. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills [M]. London: British Standards Institution , 1995.

## Research on Soil Arching Discrete Element of Pile Supported Geosynthetic-reinforced Embankment

Han Gaoxiao , Gong Quanmei , Zhou Shunhua

( Key Lab on Road and Transportation Engineering of Ministry of Education at Tongji University , Shanghai 201804 , China)

**Abstract:** Soil arching in pile supported geosynthetic-reinforced embankment is studied from granular and microcosmic viewpoint by using discrete element program. It indicates that soil arching develops with the settlements of soil between piles and it needs large settlement for soil arching to get ultimate state. Soil arching has an influence on soil density degree above pile within 1.67 times of clear pile spacing and the variation of porosity brings into correspondence with development of soil arching. The vertical displacements of soil are largely greater than horizontal displacements and vertical displacements of soil above piles are greater than that above soil between piles. The height of plane which settlements of soil are equal is 2.7 times of clear pile spacing and the height of soil arching is upper limit of scope which soil density degree and vertical stress are affected. The soil pressure coefficient , below the height of soil arching , varies with development of soil arching but the variation of them is inconsistent and soil pressure coefficients above pile and soil between piles are not equal.

**Key words:** pile supported geosynthetic-reinforced embankment; soil arching; discrete element; microcosmic viewpoint

( 责任编辑 车轩玉)