

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.032

黄土半填半挖地基破坏形式及机理研究

寇甄涛¹, 杨旭², 刘魁^{1,2}

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院 陕西 西安 710000;

2. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西 西安 710001)

摘 要: 黄土地区半填半挖场地内的建筑地基破坏主要由不均匀沉降导致, 不同填挖方的组合方式所造成的地基破坏形式也大相径庭, 主要体现为沉降趋势与建筑破坏特征的差异。为系统地分析黄土半填半挖地基破坏形式及破坏机理, 依据实际调查资料, 主要以场地内地基沉降特征及不均匀沉降所造成的楼体裂缝形态为分类原则, 将半填半挖区地基基础破坏型式分为三类, 并与调查结果做对比分析。在此基础上对地基破坏机理进行理论分析和数值分析, 得出该类型地基差异沉降主要由填方区压实黄土的自重固结变形导致的结论, 并以监测数据对理论计算结果与数值分析予以验证。

关键词: 黄土地区; 半填半挖地基; 变形破坏; 形成机理; FLAC^{3D}

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)03-0175-07

Analysis of Failure Modes and Mechanism of Building Foundations in Semi-filling and Semi-excavating Sites of Loess Area

KOU Zhentao¹, YANG Xu², LIU Kui^{1,2}

(1. College of Geology Engineering and Surveying, Changan University, Xi'an, Shaanxi 710000, China;

2. Research Institute of Electronic Comprehensive Survey of the Ministry of Information Industry, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

Abstract: The foundation failure of buildings in semi-filling and semi-excavating fields in loess areas is caused mainly by differential settlement, with widely divergent foundation failure forms caused by different compound modes of various excavating and filling methods, the failure is mainly embodied in the difference between the subsidence trend and the characteristics of the building destruction. In order to systematically analyze the failure modes and mechanism of building foundations in semi-filling and semi-excavating sites of loess area, by taking actual survey results as the basis, and the foundation settlement features in the fields and the building fracture shapes caused by differential settlement as the principles of classification, we classified the foundation failure types of semi-filling and semi-excavating fields into three classes; besides, the comparative analysis with the survey result is conducted. On this basis, the author conducts theoretical analysis and numerical analysis on the foundation failure mechanism, which conclude that differential settlement of this type of foundation mainly caused by dead-weight consolidation deformation in filling area. Finally, the monitoring data is adopted to verify the computation results and numerical simulation results.

Keywords: loess area; semi filling and semi excavating foundation; deformation and failure; formation mechanism; FLAC^{3D}

近年来,我国西北地区经济发展迅速,在人民生活水平稳步提升的同时也出现了建设用土地资源急剧紧缺的问题。为缓解这一矛盾,以延安为代表的许多城市制定了“上山建城”、“中疏外扩”的发展战

略^[1]。在填沟造地过程中,大量自然固结土体被机械翻刨、挖掘,然后重夯填至沟底,达到平衡场地高差,扩大用地面积的目的。

挖填后的场地看似平坦,但其力学性质和变形

收稿日期:2017-12-27

修稿日期:2018-02-07

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划项目(2014KTDZ03-01-02);2011年陕西省科技统筹创新工程计划项目(2011KTZB03-02-04)

作者简介:寇甄涛(1991—),男,陕西榆林人,硕士研究生,研究方向为地基处理。E-mail:kzt1214@163.com

通讯作者:杨旭(1985—),男,陕西咸阳人,硕士,工程师,主要从事岩土工程勘察设计的工作。E-mail:1405556928@qq.com

特性却很难用均质地基的研究方法去判断。关于黄土高填方的研究,前人已有了丰硕的成果。石博溢等^[2]针对黄土场地的变形问题,通过大量实验建立了不同厚度(荷载)条件下填方场地的沉降预测模型。朱才辉等^[3]研究了填土变形的时效实验,并估算出深厚黄土地基高填方沉降稳定需 3 a~4 a,建议填挖完成后 1.5 a~2 a 开展工程建设。

在黄土填挖场地内,不均匀沉降是工程建设面临的一个巨大难题。根本原因在于人工填土虽然经机械或者人力瞬间压实,但其固结程度远不如自然条件下经年累月的沉积。人工填土具有孔隙比大、结构松散的特点,填土在固结时,孔隙水消散缓慢,因此固结稳定需要很长的时间,总沉降量较大^[4];而挖方土体原本就是自然沉积形成,人工开挖后露出地表的原状黄土实质上是超固结土,该区内土体性质好,压缩性低。填挖区域的沉降趋势差异很大程度上加剧了地基土的不均匀沉降,尤其是当建筑物坐落在填挖分界时,这种现象更加明显。

地基土的不均匀沉降破坏了建筑物与地基原本的共同作用,二者在形成新的平衡作用时必然会使楼体结构内力重新分布,变形规律有所变化。部分学者利用反分析法根据位移曲线反推上部建筑的应力变化^[5-6]。也有学者通过定性定量试验研究了建筑在不均匀沉降下的受力机理^[7]。贾强等^[8]依据模型试验分别探讨了框架结构在边柱沉降和中柱沉降工况下构件的变形破坏规律。综上,楼体对于不均匀沉降这一问题所表现出的“症状”主要为结构大变形、墙体开裂,甚至倒塌^[9]。根据相关文献^[10],墙体在中部沉降较大和两端沉降较大的工况下墙体裂缝的发展规律和延伸方向也有云泥之别。

本文在实际调查的基础上,以填挖方不同的空间组合形态为原则,将黄土地区半填半挖场地内的建筑地基破坏形式划分成三种类型,并通过实际调查资料对上述三种类型进行说明。在此基础上,对半填半挖区内的地基破坏形式进行理论分析,并使用 FLAC^{3D} 软件进行了数值分析校核。本文立足于实地调查,放眼于工程实际,希望对黄土半填半挖区内地基变形破坏分析提供理论参考。

1 黄土半填半挖地基类型与破坏形式

笔者主要对以延安为中心的陕北地区进行了实地调查,在延安某小区内发现了典型的半填半挖区地基破坏形式。该小区内均为 6 层砖混结构,基础形式为条形基础。场地原为环山梁及若干条支沟汇

集形成一个形似倒圆台式的地貌,梁、沟高差可达数十米。场地开发时,对坡顶土体进行了刨挖,将刨挖土体碾碎重新压实,回填至坡底及冲沟地段。典型的半填半挖场地主要集中在原山腰处,而位于此类场地内的楼房也成为了本文研究的重点对象。根据场地勘察资料及现场调查结果,将半填半挖区内地基破坏形式分为填土-黄土破坏、填土-黄土-填土破坏及黄土-填土-黄土破坏。

1.1 填土-黄土地基及其破坏形式

填土-黄土破坏型式是指楼房地基坐在原冲沟边缘,一侧地基位于原山梁处,另一侧位于原冲沟区域,见图 1。由于冲沟内由填土压实夯填,土体压缩性高,且部分填土自重固结尚未完成,因此填土区内沉降量较大,在楼房地基两端产生明显的差异沉降。此外,填土多具湿陷性,根据监测资料,部分冲沟段内地下水位呈逐年上升趋势,因此湿陷变形加剧了挖方区和填方区的差异沉降。该破坏类型的显著特征是地基发生明显的不均匀沉降。

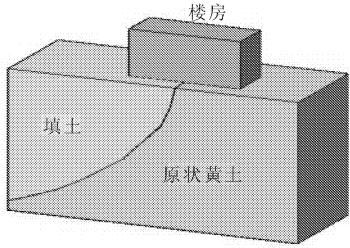


图 1 填土-黄土地基模型

建筑物的差异沉降超过限值时,上部建筑会产生附加应力,在构件薄弱处产生应力集中,使某些构件开裂甚至破坏。填土过大的位移导致建筑物发生倾斜,楼体应力重新分布,当重分布应力大于混凝土粘结强度时,会造成墙体拉裂,沿一定方向扩展成裂缝。该类型场地内墙体出现单斜裂缝,楼房裂缝见图 2。

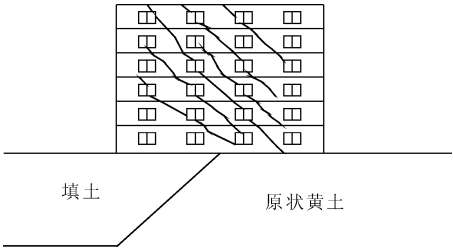


图 2 填土-黄土场地内楼房裂缝

该类型场地内楼房不均匀沉降主要体现在填挖交界附近,错动明显。墙面出现多条单斜裂缝。墙体裂缝倾角基本一致,窗户、檐口等应力集中点处裂

缝较发育,独栋楼房主裂缝一般为 1~3 条,由挖方中心向上延伸,贯通整个楼房。根据相关研究成果^[11],当楼体单侧发生不均匀过大沉降时,基础会沿填挖交界处错动,继而形成细小裂隙,与此同时,楼体上部由于不均匀沉降发生拉裂。根据格里菲斯破坏准则^[12],差异沉降继续扩大时,裂缝会沿着应力集中处继续贯通。因此基础裂缝与楼体上部裂缝在差异沉降不断增大的条件下相向贯通,最终形成等宽裂缝,见图 3。



图 3 楼房单斜裂缝

1.2 填土-黄土-填土地基及其破坏形式

填土-黄土-填土破坏型式是指建筑物中部坐在原山梁上,而两侧坐在原山梁两侧的冲沟区域内,见图 4、图 5。由于填方区域内填土压缩模量小,部分区域内填土自重固结尚未完成,因此沉降量较大,而挖方段为原状黄土,沉降量小,因此在建筑场地内产生明显的差异沉降。该破坏类型的显著特征是地基两侧明显沉降过大,楼体上出现反八字裂缝,楼房裂缝形态见图 6。

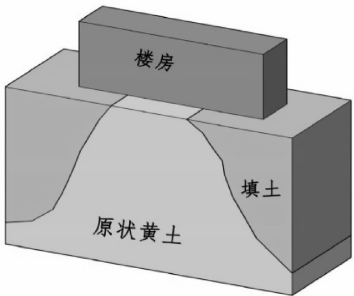


图 4 填土-黄土-填土地基模型

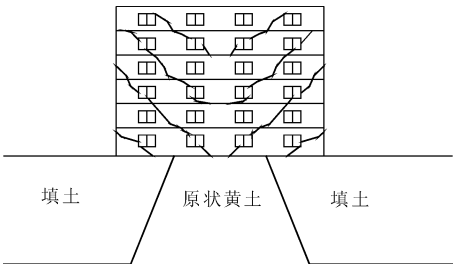


图 5 填土-黄土-填土场地内楼房裂缝

该类型场地内不均匀沉降主要趋势为两侧沉降过大,而中部沉降小。场地内的挡墙、公路等设施也可能受不均匀沉降影响,局部发生失稳破坏,见图 7。墙体裂缝关于挖方区中轴线对称,呈反八字形。单侧墙体裂缝延伸方向基本一致,楼体应力集中处裂缝发育。当地基两侧沉降过大时,楼体上部首先发生拉裂,薄弱处产生细小裂纹,随着差异沉降不断增大,裂纹继续向基础变形较小处发展。因此,该类型场地内的墙体裂缝整体呈上宽下窄状。



图 6 挡墙裂缝



图 7 楼房反八字裂缝

1.3 黄土-填土-黄土地基及其破坏形式

黄土-填土-黄土破坏型式是指楼基两端坐在挖方区,而基础中部坐在冲沟填方区上。地基模型见图 8。挖方段内为原状黄土,自重固结沉降早已完成,沉降量小。而中部挖方段内填土由于土质相对松散,因此压缩模量小,沉降量较大。此外,部分填土具湿陷性,若受地下水侵蚀,填挖段差异沉降更趋明显。该破坏类型的显著特征是楼基中部沉降量大,两端沉降量小,墙体由于不均匀沉降而出现明显的正八字裂缝,见图 9。

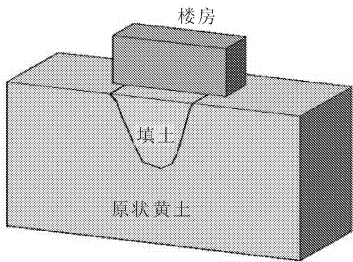


图 8 黄土-填土-黄土地基模型

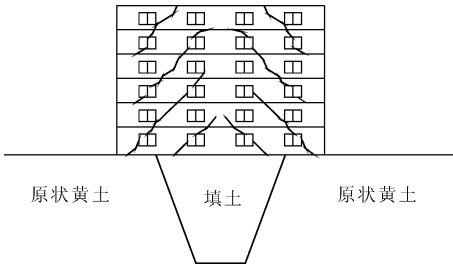


图 9 黄土-填土-黄土场地内楼房裂缝

该类型场地内,不均匀沉降趋势主要为中部沉降过大,而两侧沉降小,过大的差异沉降可导致楼体

横梁弯曲,见图 10。墙体裂缝沿挖方区中轴对称分布,呈正八字形分布,当基础中部沉降过大时,该段基础部位与两侧基础具横向拉裂作用,交界处基础出现横向小裂隙。随着差异沉降继续扩大,裂隙继续发展,延伸方向由横向变为竖向,直至沉降完成。因此,该类型场地内,墙体裂缝整体呈下宽上窄的发展趋势。墙体裂缝见图 11。



图 10 横梁弯曲

图 11 楼房正八字裂缝

2 破坏机理分析

2.1 计算模型监测数据分析

在对以上调查结果分类总结的基础上,本节中将进一步分析上述三种地基模型的破坏机理。由于填土-黄土地基模型可代表典型的半填半挖场地特征,因此本节内以此模型为例深入分析其破坏机理。

现以延安某小区内一楼房为实际工程算例。该楼房为 6 层砌体结构,位于典型的半填半挖区,根据调查资料,基础形式为条形基础,基础宽度 1.4 m,横跨于填挖交界处,在填方区内延伸长度为 15 m,基底压力 220 kPa。该楼由于不均匀沉降严重,楼体上出现图 3 所示的单斜裂缝。

根据该区域勘察资料,该建筑场地内地层结构与参数如图 12 中所示。

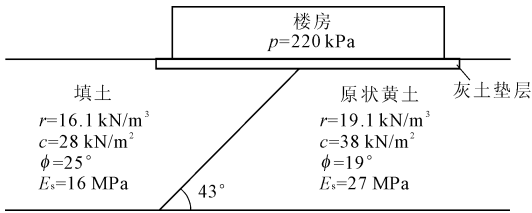


图 12 某楼房地层结构示意图

监测从楼房施工开始,至完工后 4 a。共在楼房周围埋设了 8 个沉降观测标,具体布设位置见图 13。将各点最终沉降汇总至图 14、表 1 中。

表 1 各监测点最终位移统计表

点号	1	2	3	4	5	6	7	8
位移/cm	-4.63	-5.47	-1.75	-1.59	-1.61	-1.73	-5.72	-4.75

根据图 14,各观测点沉降已趋于稳定。现将 1~4 号点线上各点沉降及 5~8 号点线上各点沉降统计见图 15、图 16。

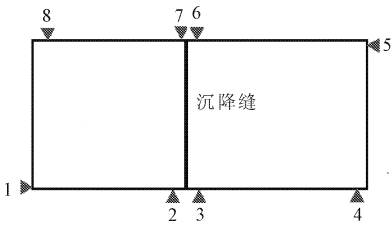


图 13 楼房各监测点平面位置图

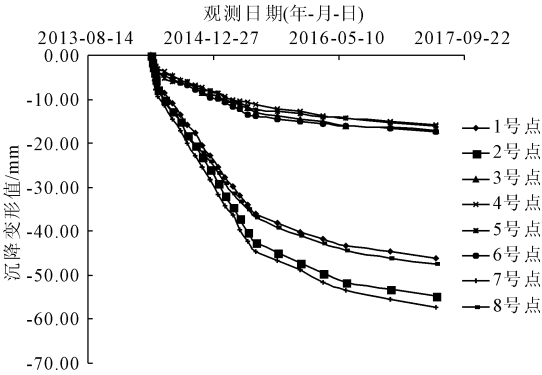


图 14 各监测点沉降统计图

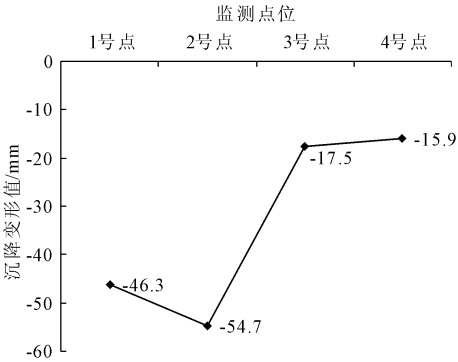


图 15 1~4 号点沉降量

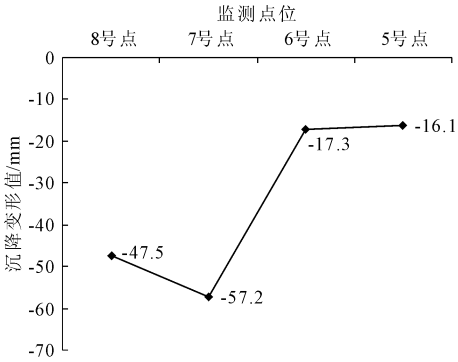


图 16 5~8 号点沉降量

根据上述监测结果,填方区域沉降量明显大于挖方区,且荷载中心处沉降大于荷载边缘处沉降量。

填方中心与挖方中心差异沉降最大可达 4 cm。

2.2 破坏机理理论分析

填挖方不均匀沉降的主要影响因素有:(1) 二者模量差异;(2) 填土的自重固结;(3) 局部原沟谷地区内填土的湿陷变形。其中,前两个因素占主导地位。本节将针对前两个因素对半填半挖区的沉降进行计算。

填土与原状黄土模量的差异将直接影响上覆荷载作用下二者的层内压缩量,层内压缩量的计算采用规范^[13]中给出的分层总和法。仍以上节中 6 层建筑场地模型为例,分别计算填土区和原状黄土区内荷载中心下的最大沉降。参数选取见表 2,计算结果见表 3,各计算点沉降趋势见图 17。

表 2 参数选取

土类型	重度 /(kN·m ⁻³)	压缩模量 /MPa	泊松比	荷载 /kPa
填土	16.1	16	0.30	220
原状黄土	19.1	27	0.32	
灰土垫层	19.8	35	0.30	

表 3 最终沉降量

沉降计算位置	填方中心	挖方中心
沉降/cm	2.9	2.0

荷载范围内各计算点处沉降取值如图。

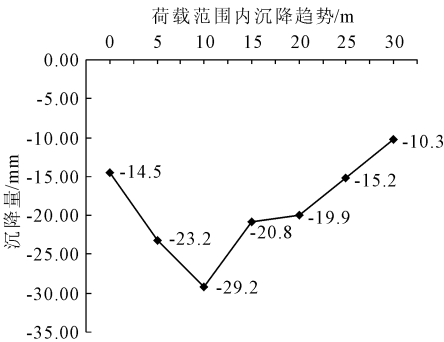


图 17 荷载范围内沉降趋势线(分层总和法)

由上表可知,上覆荷载作用下,一维固结计算理论得到的差异沉降仅为 0.9 cm,此差异沉降完全符合规范中给定的差异限值。因此,单纯的土体压缩并不能产生上节中所述的地基破坏,除压缩变形外,欠固结土体可在自重作用下继续固结,有效应力增大。若按正常固结土层计算,计算结果将远小于实测沉降量^[14]。进一步说明了计算填土自重固结的必要性。

一些学者通过大量实验拟合出填土自重固结的

经验流变方程^[15]:

$$s = \int_0^{\gamma H} \frac{1}{\gamma} \alpha t^\beta p^{\frac{1}{e+f}} dp = \frac{\alpha t^\beta (et + t)}{\gamma [(e + 1)t + t]} (\gamma H)^{\frac{t}{et+f+1}} \quad (1)$$

式中: γ 为上覆填土的重度; H 为填土厚度; t 为固结时间; α 、 β 、 e 、 f 为与压实度和含水率有关的参数。

仍以该小区场地为例,该场地内填土含水率为 13.5%,平均压实度为 0.8,则对应的参数选取见表 4。

表 4 流变方程参数取值

α	β	e	f
0.05265	0.04552	1.52485	-0.01744

根据相关调查资料,该小区场地内填土平均厚度为 20 m,工后自重固结时间区间 1.2 a~4.3 a,将以上参数代入式(1)中,计算得工后填土自重固结量为 3.3 cm。如前所述,楼体总差异沉降为自重固结量与填挖方压缩量差异值之和,总差异沉降为 4.2 cm,沉降趋势见图 18。此差异沉降远大于规范限值,足可产生上节所述的地基破坏。

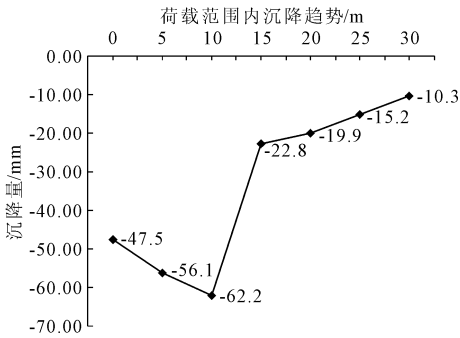


图 18 荷载范围内沉降趋势线(考虑填土自重变形)

理论分析中所得的沉降曲线与各计算点的监测曲线趋势基本一致。理论计算得沉降量较监测结果而言整体偏大,但差异沉降一致,均为 4 cm 左右。因此,可认为产生填挖方差异沉降的主要原因在于填方区域沉降量包括了自重固结的变形值。

2.3 破坏机理数值分析

FLAC^{3D}是一款显示的有限差分程序,采用命令流输入方式,可较准确的模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形,是现在国内外岩土领域的通用软件^[16]。为了更深入的探讨半填半挖区地基破坏机理,本节将采用该软件对半填半挖地基破坏形式进行数值模拟。

为与实际情况吻合,破坏模型拟采用二维模型,模型尺寸长 100 m,宽 40 m。基础形式为条形,荷载范围内设计了 1.5 m 厚的灰土垫层。具体参数选取

见表 1。由于填土 - 黄土型场地可代表典型填挖场地特征,因此对另外两种破坏形式不予过多分析。场地模型见图 19。

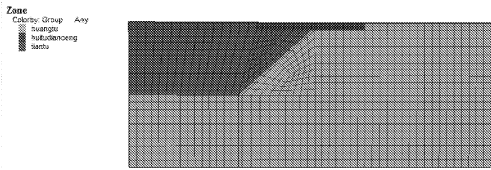


图 19 填土 - 黄土型场地模型

基本参数选取同上节理论分析,需要说明,在加荷计算阶段,考虑了时间效应影响下填土的自重固结变形。沉降位移云图见图 20。

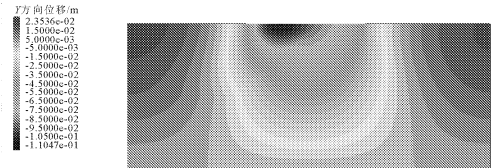


图 20 填土 - 黄土型破坏模型 Y 方向位移云图

根据上述数值分析结果,填方区平均沉降在 9 cm ~ 11 cm 之间,而挖方区沉降集中在 5 cm ~ 7 cm 之间,差异沉降为 6 cm ~ 8 cm。填方区与挖方区在各自区域内的沉降趋势符合一般均质土层中的正锅底状,由于两个区域内荷载影响半径不同,因此在填挖交界处出现了位移突变。为更直观的分析场地内沉降趋势,现于荷载范围内每隔 5 m 采取一次地表位移值,得到图 21 的沉降趋势线。

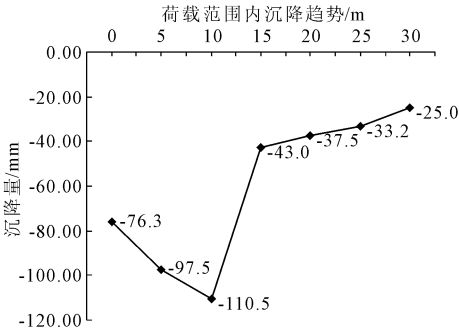


图 21 数值分析结果沉降趋势线

根据图 17,数值模拟结果与监测数据相比各区域沉降计算值偏大,但沉降规律明显。根据数值模拟结果,场地内沉降趋势于填挖交界处发生突变,且荷载中心沉降大于荷载边缘沉降。且根据沉降趋势线,数值模拟结果中的最终沉降量与差异沉降量为监测结果的 1.8 倍 ~ 2.2 倍。可进一步佐证理论计算中对填挖区差异沉降原因的分析结论。

FLAC^{3D}软件在计算时考虑的荷载影响范围达

35 m,而在理论计算中,规范给出的计算深度远达不到此数值。因此,数值计算中的最终沉降结果虽然较保守,但填方区与挖方区的差异规律却可以借鉴。

此外,于该场地计算结果中提取出地基土内 XY 方向剪应力的分布云图,见图 22。

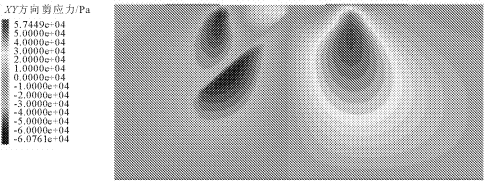


图 22 填土 - 黄土型破坏模型 XY 方向剪应力云图

XY 方向剪应力云图在填挖交界区域与荷载边缘存在较大的应力集中,最大剪应力达 60 kPa ~ 73 kPa,灰土垫层处应力集中虽得到一定程度缓解,但由于处理厚度不足,附加应力未得到最大限度的扩散,因此导致应力集中现象严重,差异沉降较大。

此外,在半填半挖区进行工程建设时应特别注意地基处理,处理深度不足或者处理方案选取不当将直接影响最终的加固效果。以本次调查为例,该小区内的六层砌体结构采用了浅层换填垫层处理,加固深度不足直接弱化加固效果,因此不能有效地减弱差异沉降。此外,在沟谷填筑及地基处理施工时,应尤其注意荷载边缘及填挖交界处的加固。具体进行岩土设计时以本文提出的三种地基破坏形式为基础,选择合理的地基处理方案。

3 结 论

(1) 本文以实际调查资料为依托,对黄土半填半挖地区内建筑地基破坏形式进行了归类。根据填挖方不同的空间组合形态及破坏特征,将半填半挖区内地基破坏型式分为:填土 - 黄土型破坏、填土 - 黄土 - 填土型破坏、黄土 - 填土 - 黄土型破坏。

(2) 以调查区内某小区为模型,采用理论计算分析结论(1)中各破坏类型的破坏机理。填土区沉降除了自身压缩变形外,还应考虑时间效应影响下的自重固结变形。经计算,填挖方差异沉降达 4.2 cm,此差异沉降足可引起基础变形过大,墙体出现裂缝,与调查结果一致,沉降趋势与监测结果基本一致。因此可认为半填半挖场地差异沉降过大的原因在于填土发生了自重固结。

(3) 仍以上述建筑为模型,采用 FLAC^{3D}软件对结论(1)中各破坏模型的破坏机理进行数值分析。填方区与挖方区内沉降均呈正锅底状,但由于荷载

影响半径不同导致在填挖交界处出现位移突变与应力集中,两区域内差异沉降在 6 cm ~ 8 cm 之间。数值分析结果趋势与监测数据一致,且与监测数据呈 1.8 倍 ~ 2.2 倍关系,进一步佐证结论(2)。

(4) 在半填半挖区内进行工程建设时,应重视地基处理方案的选取。可根据不同的地基破坏形式采用不同的地基处理方案,以达到最优加固效果。此外在施工时应注意对荷载边缘及填挖交界处的加固。

参考文献:

[1] 崔亚军.延安新区建设的资源环境效益研究[D].西安:长安大学,2015.

[2] 石博溢,倪万魁,王衍汇,等.重塑黄土压缩变形的预测模型研究[J].岩土力学,2016,37(7):1963-1968.

[3] 朱才辉,李 宁,刘明振,等.吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析[J].岩土工程学报,2013,35(2):293-301.

[4] 倪 晴.欠固结土自重固结沉降特性模拟分析[D].南京:南京理工大学,2013.

[5] 姜忻良,于 洁,张云富,等.地基不均匀沉降对剪力墙结构简化模型的反分析研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(5):10-13.

[6] 孟伟波,郑钰涛,陈有亮.不同开挖方式对软土区深基坑连续墙变形的影响分析[J].水资源与水工程学报,

2017,18(3):216-220.

[7] 张卫东,徐学燕,张有闻.变荷载下多层地基一维固结沉降计算[J].低温建筑技术,2001(4):46-48.

[8] 贾 强,程林林,张 鑫.地基不均匀沉降对框架结构影响的试验研究[J].土木工程学报,2011,44(11):79-86.

[9] 张昊为.地基不均匀沉降对生土建筑影响的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011.

[10] Weng X L, Wang W. Influence of differential settlement on pavement structure of widened roads based on large-scale model test[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011,3(1):90-96.

[11] 由 健.砌体结构不均匀沉降裂缝的有限元分析[D].青岛:中国海洋大学,2014.

[12] 刘佑荣,唐辉明.岩体力学[M].北京:北京工业出版社,2008:155-162.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范:GB 5007—2011 [S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[14] 徐长节,耿玉雪,蔡袁强.任意荷载下欠固结地基的非线性一维固结[J].岩土力学,2006,27(3):389-394.

[15] 石博溢.黄土填方地基的沉降预测方法研究[D].西安:长安大学,2016.

[16] 蔡文霄,梁 华,朱彦鹏,等.基于 FLAC^{3D}的高填方路基沉降变形因素分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):199-205.



(上接第 131 页)

[7] Roberts A W, Wensrich C M. Flow dynamics or ‘quaking’ in gravity discharge from silos[J]. Chemical Engineering Science, 2002,57(2):295-305.

[8] 张 华.立筒群仓结构模型模拟地震振动台试验研究[D].郑州:河南工业大学,2008.

[9] 张大英,许启铿,王树明,等.筒仓动态卸料过程侧压力模拟与验证[J].农业工程学报,2017,33(5):272-278.

[10] 林 皋,朱 彤,林 蓓.结构动力模型试验的相似技巧[J].大连理工大学学报,2000,40(1):1-8.

[11] 迟世春,林少书.结构动力模型试验相似理论及其验

证[J].世界地震工程,2004,20(4):11-20.

[12] 朱 彤.结构动力模型相似问题及结构动力试验技术研究[D].大连:大连理工大学,2004.

[13] 沈朝勇.动力试验模型用微粒混凝土的初步试验研究[J].广州大学学报(自然科学版),2005,4(3):249-253.

[14] 周 颖,卢文胜,吕西林.模拟地震振动台模型实用设计方法[J].结构工程师,2003(3):30-38.

[15] 王录民,张 华,卢文胜.柱承式群仓结构模型模拟地震振动台试验研究[J].建筑结构,2010,40(10):41-43.