

桩顶预留沉降间隙提高桩-岩(土)复合地基岩(土)利用率技术

王立长, 邱旭光, 李志会, 左清林, 刘楠
(大连市建筑设计研究院有限公司, 大连 116021)

[摘要] 结合实际工程城市经纬超高层结构的桩-岩(土)复合地基基础设计,提出了利用桩顶预留沉降间隙来提高桩-岩(土)复合地基中岩(土)利用率的技术。采用有限元分析软件 ABAQUS 对此工程建立了上部结构-基础-地基整体三维有限元模型,通过选择合理参数及取值,并考虑上部结构刚度和施工模拟分层加载的影响对此工程进行了模拟分析。通过模拟分析,确定了最优桩顶预留沉降间隙量和桩-岩(土)分担荷载比例(约为 0.2:1),充分利用强风化板岩较高的承载力,减少了桩用量,缩短了施工工期。

[关键词] 超高层结构; 桩顶预留沉降间隙; 桩-岩(土)复合地基; 上部结构-基础-地基三维有限元模型; 桩-岩(土)分担荷载比例

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2016)02-0059-06

Pile-rock (soil) composite foundation technology of improving base rock (soil) utilization rate by reserving pile-top settlement clearance

Wang Lichang, Qiu Xuguang, Li Zhihui, Zuo Qinglin, Liu Nan
(Dalian Institute of Architectural Design Co., Ltd., Dalian 116021, China)

Abstract: Combining with the pile-rock (soil) composite foundation design of an actual Atlas of Cities super high-rise structure project, the pile-rock (soil) composite foundation technology of improving the rock (soil) utilization rate by reserving pile-top settlement clearance was proposed. The general finite element analysis software ABAQUS was used to set up the overall three-dimensional finite element model of superstructure-foundation-base. Simulation analysis was carried out on the project through reasonable parameter and corresponding value selection as well as considering superstructure stiffness and effect of layer-by-layer loading in construction simulation. Through simulation analysis, the optimal reserved pile-top settlement clearance and pile-rock (soil) bearing load ratio (about 0.2:1) were determined. And the high carrying capacity of highly weathered soil was taken advantage of to reduce the amount of foundation piles and shorten the construction period.

Keywords: super high-rise structure; reserved pile-top clearance; pile-rock (soil) composite foundation; three-dimensional finite element model of superstructure-foundation-base; pile-rock (soil) bearing load ratio

0 引言

对于超高层结构地基基础设计,当天然地基承载力不满足要求时,可采用桩基础方案或复合地基方案。常规复合地基处理方案是在承载力较小的地基土中设置桩体^[1],桩体与地基土同时受力,没有时效差,桩体承担较多荷载,桩间土承担较少荷载。然而,这种方案中天然地基土承载力利用率并不高^[2]。

城市经纬项目为位于大连某金融商务区的超高层结构,采用桩-筏基础,根据施工现场勘测和结构整体计算结果,该项目地基虽具有较高强度,但仍不能满足设计要求。强风化板岩地基承载力最高为 700kPa,而设计要求地基承载力需达到 1 000kPa。若采用常规的复合地基处理方案,桩间岩体的利用率并不高,约为 30%~40%,于是笔者提出利用桩顶预留沉降间隙技术来提高桩-岩(土)复合地基岩

(土)利用率,即在桩顶面与筏板底面之间设置预留沉降间隙量,使上部结构荷载先由地基岩体承担,当沉降量达到预留沉降间隙量时,桩开始提供承载力,使地基岩体与桩的受力存在一定时间差。通过设置不同的预留沉降间隙量,可以确定合理的桩-岩体荷载分担比例,使地基承载力和变形满足要求^[3,4]。

1 工程概况

1.1 上部结构概况

城市经纬项目(图 1)总建筑面积约 16 万 m²,主体建筑高度为 199.50m,主体结构地上共 41 层,地下部分共 3 层,结构形式为框架-核心筒结构,三个塔楼依靠连接构件连接为整体,底部典型外墙厚为 900mm,典型框架柱截面尺寸为 1 500mm ×

1 500mm,标准层平面布置图如图 2 所示。

1.2 基础方案

本工程基础方案采用桩-筏基础。桩主要布置在塔楼核心筒剪力墙及框架柱下。塔楼区域的筏板厚度为 3m,其他区域的筏板厚度为 1.5m,桩直径主要为 1 300mm 和 1 500mm,桩身混凝土强度等级为 C50,桩长分布由几米到十几米不等。采用桩顶预留沉降间隙技术来提高桩-岩(土)复合地基岩(土)利用率的地基处理方案。

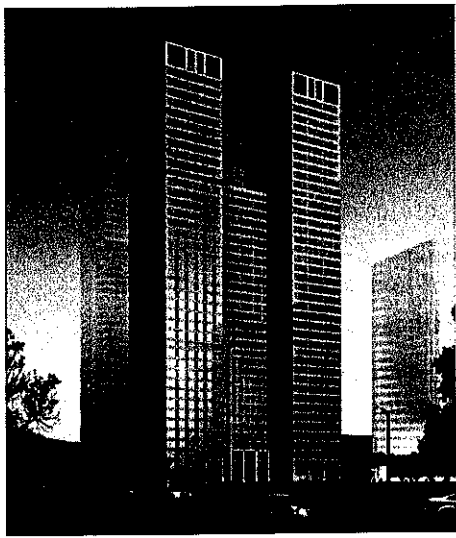


图 1 建筑效果图

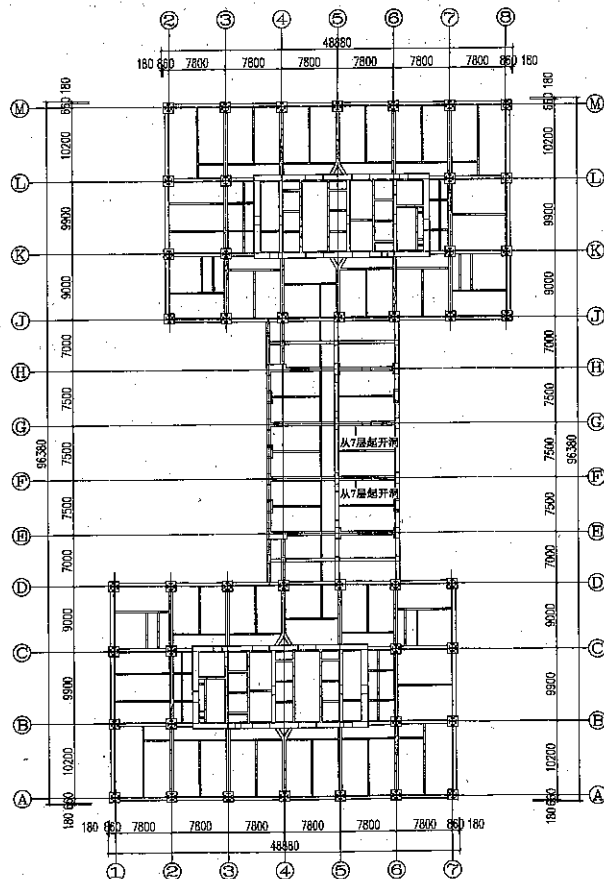


图 2 标准层结构平面图

1.3 工程地质概况

据地勘报告及现场实测数据,场地中存在分布不均匀的强风化板岩(局部为全风化板岩),强风化板岩下为中风化岩石,且局部区域中风化岩石埋藏较浅或露头,详勘资料给出的地基岩体物理性质见表 1。

详勘资料给出地基岩体承载力及变形模量 表 1

地基岩体类型	检测点号	承载力/kPa	变形模量/MPa
全风化板岩	8#	490	34.95
	9#	420	34.66
	17#	560	47.04
强风化板岩	7#	700	55.77
	10#	700	65.97
	32#	700	61.10
	补 2#	500	36.35

2 计算模型

2.1 有限元模型

为真实反映上部结构刚度的影响,采用有限元分析软件 ABAQUS^[5]建立上部结构-基础-地基整体三维有限元模型(图 3)进行施工模拟分析。

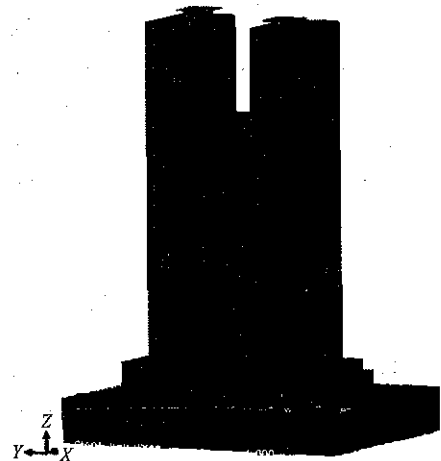


图 3 整体有限元模型

上部结构的梁、柱采用三维梁单元模拟,剪力墙及楼板采用壳单元模拟;岩体采用三维实体单元建模^[6-8],桩采用实体单元模拟,筏板采用壳单元模拟,预留间隙采用与间隙填充物物理力学性质相当的单元模拟。桩有限元模型建立到桩底标高以下一定深度,嵌固到中风化岩石中,地基模型的纵、横向尺寸根据地勘报告中提供的勘测范围确定,并向水平两个方向延伸一定尺寸以考虑地基岩体的边界约束。根据现场实际勘察结果可得到每个桩位地基岩层的分布情况,综合所有桩位的岩层分布情况,可以得到场地范围内地基岩体的整体分布。岩体建模时输入每个桩位岩层厚度及深度,桩位之间岩层厚度及深度假定随着桩间距线性变化,由于桩数量较多,

岩体的三维实体有限元模型(图 4)可以较准确地描述整个场地地基岩体分布情况。

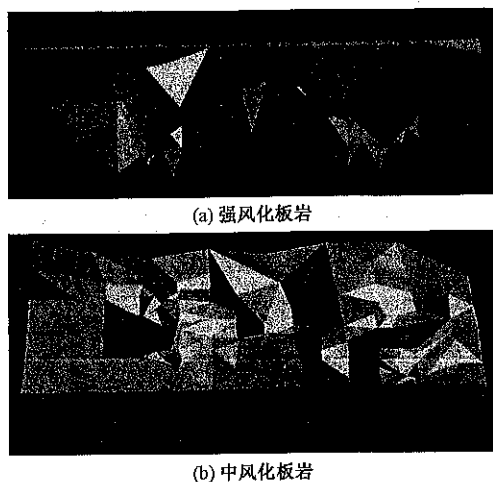


图 4 岩体三维实体有限元模型

2.2 计算分析假定

为提高数值计算效率,结合实际情况,计算中引入如下假定:1)不考虑桩与岩体之间的摩阻力;2)桩底部嵌固于中风化岩石;3)不考虑开挖后基坑回弹效应及自重应力的影响。

2.3 计算参数选取

上部结构和桩采用弹性模型,参数选取根据规范^[9-12]取值,桩混凝土弹性模量取 $3.45 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,泊松比 0.2。强风化板岩和微风化岩石采用 Mohr-Coulomb 本构模型^[13,14],换填土的变形模量取为 8MPa,地基岩体计算物理力学参数如表 2 所示。

计算采用的地基岩体物理力学参数 表 2

地基岩体类型	变形模量 E_0/MPa	摩擦角 $/\text{°}$	内聚力 $/\text{kPa}$	泊松比	密度 $/(\text{kg/m}^3)$
强风化板岩	70,100	30	30	0.39	2 245
中风化岩石	31 200	—	—	0.36	2 600

注:70,100 表示将强风化板岩人为地分两层,上层采用 $E_0 = 70\text{MPa}$,下层采用 $E_0 = 100\text{MPa}$ 。

2.4 桩顶预留沉降量模拟方法

设计中考虑在预留的间隙中填充苯板材料,数

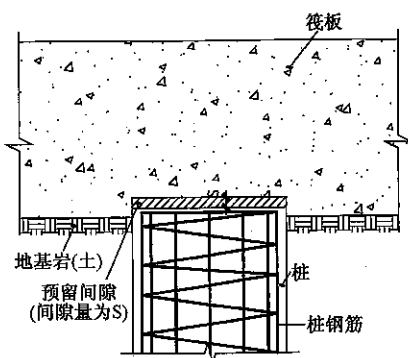


图 5 桩顶预留沉降量构造图

值计算时采用试验测得的苯板材料应力-应变数据。预留沉降量构造如图 5 所示,苯板材料的预留沉降量随施工加载步的变化曲线如图 6 所示,施工加载时每 5 层为一个施工加载步,最后一步有所调整,图中加载步 0~10 分别表示初始状态(未加载)、各个施工加载步及最终状态(结构封顶,施加完所有活荷载,施工完成)。可见,随着施工进程的进展,预留沉降量减小,苯板材料的压缩量增加至预留沉降量后趋于稳定,由此说明采用苯板材料可以准确模拟桩顶的预留沉降量。

3 模型验证

为验证模型准确性,也采用 SATWE 软件对工程进行计算分析,两种软件计算的结构竖向总荷载分别为 $4.3 \times 10^5 \text{ kN}$ (ABAQUS), $4.1 \times 10^5 \text{ kN}$ (SATWE)。两种软件计算的底层墙、柱在竖向荷载作用下的轴力对比如表 3 所示。

竖向荷载作用下底层墙、柱轴力对比/kN 表 3

柱号	ABAQUS	SATWE	墙号	ABAQUS	SATWE
Z2	37 780	40 804	Q2	39 290	36 101
Z12	33 850	37 250	Q17	26 630	22 061
Z16	41 980	42 045	Q21	17 370	19 881
Z17	42 780	43 628	Q22	17 500	19 976
Z18	32 190	34 902	Q23	18 600	22 574
Z19	35 790	38 521	Q28	27 790	21 326
Z21	34 370	38 310	Q31	31 510	36 008
Z25	17 910	23 060	Q38	42 280	36 470

可见,二者竖向总荷载相差不到 5%;构件竖向轴力值基本一致;SATWE 计算的筏板最大沉降量为 68mm,ABAQUS 计算的最大沉降量为 72mm,二者计算的主塔楼下沉降分布大致相同。

4 计算参数变形模量选取的依据

4.1 地基岩体变形模量选取的依据

地基岩体变形模量的大小对复合地基基础的分析结果有重要的影响,因该场地地基岩体分布较不均匀,有必要对选取合理的岩体变形模量进行分析。分别取强风化板岩的变形模量为 45,60,

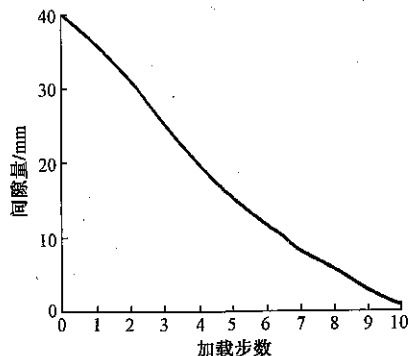


图 6 间隙量随施工加载步的变化曲线

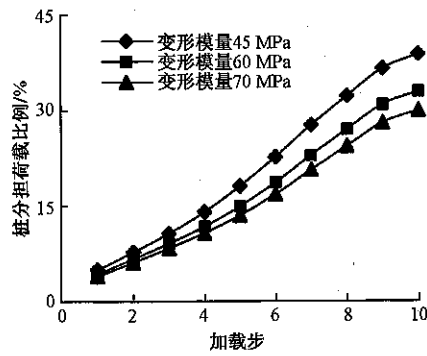


图 7 不同土变形模量桩分担荷载比例

70MPa,桩分担荷载比例如图7所示。由图7可见,随着岩体层变形模量的增加,桩分担荷载比例减小,岩体承受的荷载增大。根据地基岩层分布的实际特点,将强风化板岩分为两层分别采用不同的变形模量,上层变形模量为70MPa,下层的变形模量为100MPa。

4.2 换填土变形模量选取的依据

局部中风化岩石埋藏较浅,岩层应力集中现象明显,对该区域加褥垫换填。数值计算中根据现场载荷试验选取换填土的变形模量为8MPa,褥垫厚度为300mm,换填土采用具有一定颗粒级配的砂土。载荷试验与数值分析的应力-沉降(P-S)曲线对比如图8所示,图中A,B,B1,F,G,H点分布在中风化岩体埋藏较浅或露头区域。

数值计算结果表明,各点最终沉降量平均值为13.26mm,最大应力平均值为718kPa,载荷试验测得的沉降量平均值为10mm,最大应力平均值为700kPa,二者基本吻合。表明所选取的换填土的变形模量为8MPa是合理的。

5 桩顶预留间隙量数值分析

预留间隙量的选取直接影响到地基基础的受力变形性能。间隙量过小,桩间岩(土)承载力利用率不高,无法满足设计要求;间隙量过大,桩间岩(土)

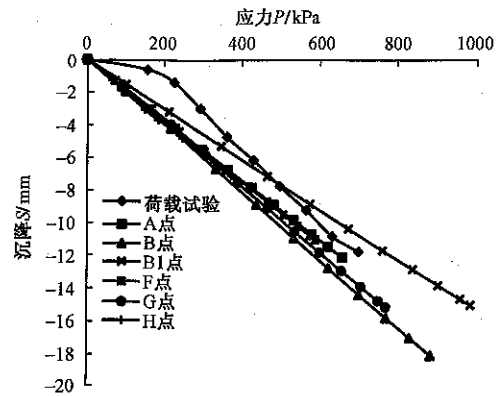


图8 载荷试验与数值计算 P-S 曲线对比

受力较大,桩受力较小。通过大量试算,最终确定最优预留间隙量。

5.1 预留统一间隙量分析

为初步考察预留间隙量对地基基础受力性能的影响,计算中在桩-筏基础全区域分别设置了0,10,20,30,40mm的预留间隙量,其中0mm工况指桩顶与筏板底直接相连。以下仅给出桩顶预留间隙量为20,40mm两种工况下筏板沉降(图9)、地基岩体应力的对比分析结果(图10)。不同预留间隙量时桩分担荷载比例变化如图11所示。

可见,随着预留间隙量的加大,地基岩体应力增大,桩分担荷载比例减小。表明,预留间隙量的加大

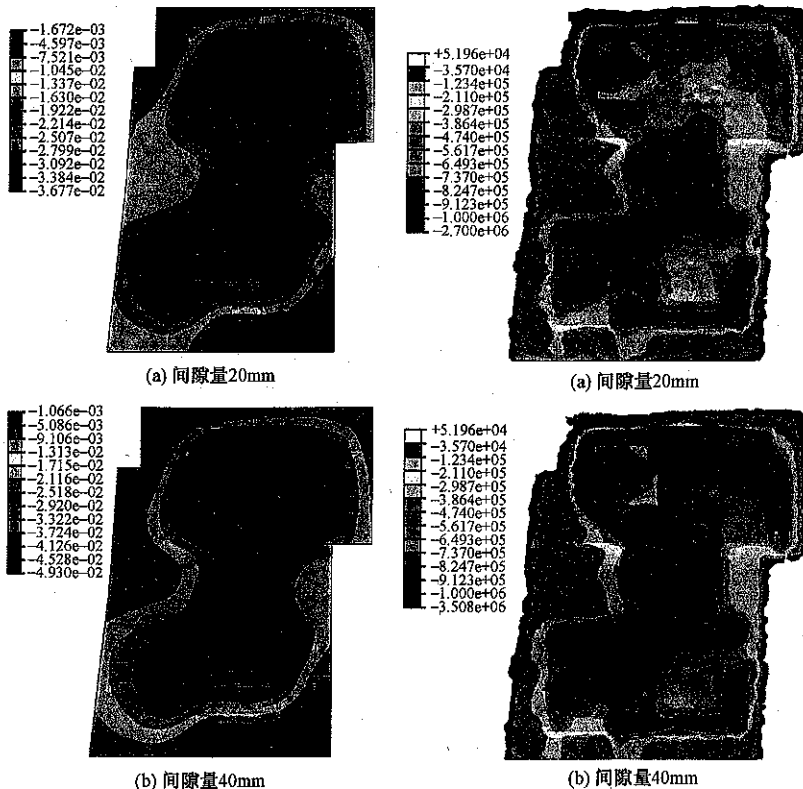


图9 不同预留间隙量筏板沉降变形/mm

图10 不同预留间隙量下地基岩体应力分布/(N/m²)

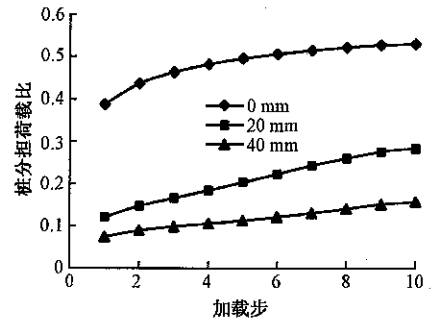


图11 不同预留间隙量下桩分担荷载比例随加载步变化曲线

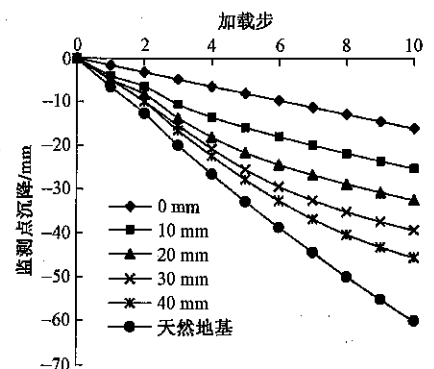


图12 监测点沉降变形随加载步的变化曲线

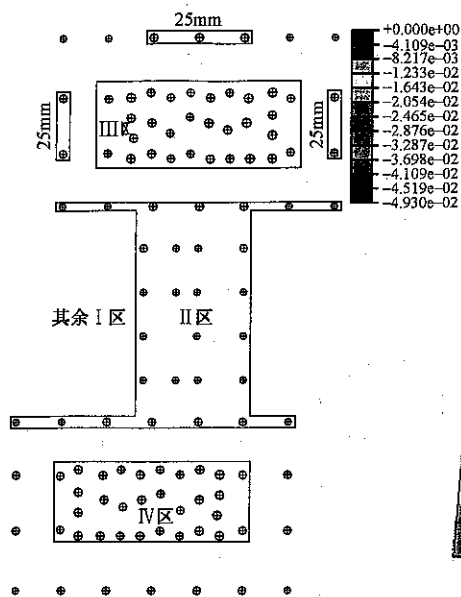


图 13 预留间隙分区示意图

有利于提高地基岩体承载力的利用率。在筏板沉降变形较大区域(主塔楼核心筒位置处)设置沉降变形监测点,监测点沉降变形量随加载步的变化曲线如图 12 所示。由图 12 可见,随着预留间隙量的增大,筏板沉降变形增加,其中天然地基(未设置桩体)沉降最大,桩顶面与筏板底直接接触情况沉降最小。

5.2 预留不同间隙量分析

因地基岩体分布较不均匀,最终计算分析采取分区域预留不同间隙量。通过大量试算,确定合理桩-岩体荷载分担比例。以下仅就其中三种工况给出对比结果。分区域示意图如图 13 所示,不同区域预留间隙量工况如表 4 所示。

工况	I 区	II 区	III	IV 区
JX1	10	20	40	30
JX2	15	20	40	30
JX3	20(25)	30	35	30

注:括号内数值表示局部区域设置 25mm 的预留间隙量。

不同工况下筏板沉降变形如图 14 所示,工况 JX2 下的筏板沉降变形大小在 JX1 和 JX3 之间,分布趋势与工况 JX1, JX3 大致相同,这里不再给出其分布图。由图可见,预留间隙量不同,筏板沉降变形分布差异较大,间隙量越大,筏板沉降变形较大的区域越大。

5.3 预留不同间隙量桩、岩体荷载分担比分析

不同工况下桩分担荷载比例随加载步变化曲线如图 15 所示,由此可见,随着桩顶预留间隙量的增加,桩分担荷载比例下降,岩体分担荷载比上升。通

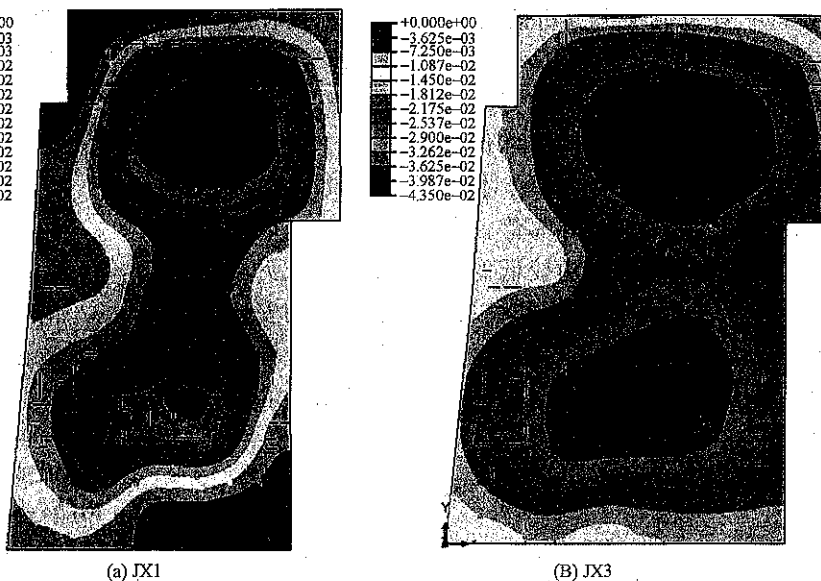


图 14 不同工况下筏板沉降变形/m

过反复试算可得到合理预留间隙量(工况 JX2 下的预留间隙量),使筏板沉降变形及桩、岩体受力合理,此时桩、岩体分担荷载比例为 0.2:1。可见,预留间隙量在调节桩、岩体荷载分担比例方面起着重要作用。

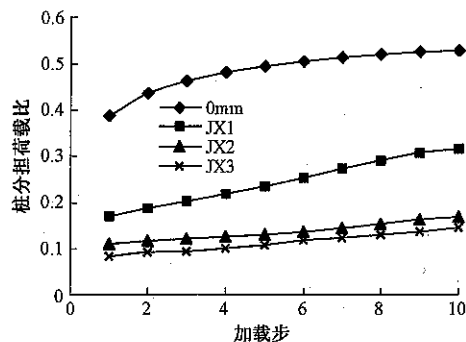


图 15 不同工况下桩分担荷载比例随加载步变化曲线

6 结论

(1) 结合实际工程特点,提出了“桩顶预留沉降间隙提高桩-岩(土)复合地基岩(土)利用率技术”,并成功应用于工程实践,目前该结构已封顶。该技术适用于天然地基岩(土)虽具有较高承载力但仍不能满足结构对地基承载力要求的情况。

(2) 通过 ABAQUS 软件对整体模型进行的数值分析,确定了最优预留间隙量(工况 JX2 下预留间隙量)和最终设计的桩-岩体分担荷载比例(约为 0.2:1),从而充分利用了强风化板岩的较高承载力。

(3) 随着岩层变形模量的增加,桩分担荷载比例减小,岩体承受的荷载增大。分析中合理选取天然地基岩体的变形模量,人为地将强风化板岩分层,而采用不同的变形模量。

(4)在数值模拟分析的过程中,通过在复合地基上不铺设垫层、只在中风化岩石埋藏较浅区域加褥垫和合理确定褥垫层的变形模量及厚度,有效地消除了岩层应力集中现象的不利影响。

(5)最终计算的桩、岩体分担荷载比例约为0.2:1,该比例为理论计算值。实际设计中,选取地基承载力及变形模量的较低值,控制设计桩应力小于计算桩应力,地基岩体和桩均考虑了一定的安全储备。相比于常规桩土地基,桩工程中混凝土和钢筋用量分别节省约46%,具有较好的经济效益和社会效益。

参 考 文 献

- [1] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [3] 周峰,林树枝. 实现桩土共同工作的机理及若干方法[J]. 建筑结构,2012,42(3):140-143.
- [4] 郑刚,高喜峰,任彦华,等. 承台(基础)-桩-土不同构造形式下的相互作用研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(3):307-312.
- [5] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [6] 朱以文,蔡元奇,徐晗. ABAQUS 与岩土工程分析[M]. 北京:中国图书出版社,2005.
- [7] 王金昌,陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006.
- [8] 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [9] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [10] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [11] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [12] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [13] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [14] 邓楚建,何国杰,郑颖人. 基于 M-C 准则的 D-P 系列准则在岩土工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(6):735-739.

《减震技术通讯》征稿启事

2014年2月,住房和城乡建设部在全国范围内发布了《关于房屋建筑工程推广应用减隔震技术的若干意见(暂行)》,旨在有序推进房屋建筑工程应用减隔震技术,并确保工程质量。在这一政策背景下,2014年5月,中国土木工程学会防震减灾技术推广委员会联合《建筑结构》期刊共同创立了《减震技术通讯》,且在2015年改为季刊,目前已刊出6期,此刊伴随《建筑结构》正刊随刊赠阅,虽暂时没有刊号,但却为防震减灾技术的发展提供了一个广泛交流的平台。周福霖院士担任编辑委员会主任,周云教授担任副主任委员。

2015年12月,为了及时推送分享减隔震技术最新资讯,《建筑结构》杂志社特开通减震技术官方微信平台,争取为广大读者及粉丝提供前沿的动态及更周到的服务。《减震技术通讯》主要面向于防震减灾的技术发展趋势、设计分析问题、工程案例、软件应用、会议通知、产品咨询、行业规范等,历次防震减灾的发展历程,剖析减震技术的发展现状,分享专业领域的前沿动态,进一步推动我国减震技术的研究与应用,促进我国防震减灾事业科学、规范和有序发展。现征集《减震技术通讯》稿件,具体事项如下:投稿邮箱:wudy@

cadg.cn(唯一接收稿件的方式)。投稿要求:投稿论文必须具有原创性,有独到见解和学术价值,经评审后择优录用,提交论文时请注明“减震技术通讯”,收到投稿稿件后我们会在七个工作日内通过邮件回复,如未收到回复请及时联系我们。论文请使用 word2003 严格按照格式排版,详细要求可登录《建筑结构》官方网站(www.buildingstructure.cn) (点击“投稿”>“稿件版式”,下载即可),务必在稿件中注明联系人的姓名、手机号、单位名称和 Email(缺一不可)。

投稿查询电话:010-57368782/9042。网址:www.buildingstructure.cn。



欢迎关注《减震技术》官方微信