

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0023-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.005

半岩半土地基不均匀沉降的变刚度复合地基方案研究

赵阳¹, 刘魁², 聂永鹏¹, 曹艳妮¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710064; 2. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西西安 710054)

摘要: 以延安市安塞区拟建住宅楼为工程实例, 提出变刚度复合地基方案, 借助有限元分析软件 MIDAS GTS NX, 对半岩半土地质条件下变刚度复合地基进行数值模拟, 通过改变桩间土模量、桩体模量、桩距、桩长等设计参数对地基土沉降特性进行研究, 并分析地基差异沉降判断变刚度复合地基的适用性。研究结果表明: 变刚度复合地基可较好解决半岩半土地基的不均匀沉降问题, 通过调节变刚度复合地基设计参数, 可控制地基差异沉降在合理范围之内。

关键词: 半岩半土地基; 不均匀沉降; 差异沉降; 地基处理; 变刚度复合地基

中图分类号: TU472

文献标志码: A

Study on project of variable stiffness composite foundation based on uneven settlement of half-hard and half-soft rock foundation

ZHAO Yang¹, LIU Kui², NIE Yongpeng¹, CAO Yanni¹

(1.School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2.Research Institute of electronic comprehensive survey of the Ministry of information industry, Xi'an 710054, China)

Abstract: Taking a proposed residential building in Ansai District, Yanan as an example, a program of variable stiffness composite foundation is proposed. The variable stiffness composite foundation of half-hard and half-soft rock geological conditions is carried out by numerical simulation with the finite element analysis software MIDAS GTS NX. The settlement characteristics of foundation are studied by changing the design parameters of soil modulus, pile modulus, pile spacing, pile length and so on. The suitability of variable stiffness composite foundation is based on the study of differential settlement. The results show that differential settlement of half-hard and half-soft rock foundation can be solved by the variable stiffness composite foundation. The differential settlement can be controlled within a reasonable range by adjusting the design parameters of variable stiffness composite foundation.

Key words: half-hard and half-soft rock foundation; uneven settlement; differential settlement; foundation treatment; variation stiffness composite foundation

随着陕北大力开展工程建设, 延安地区实施大规模填沟造地、削山造地, 大规模的“削山填沟”必然会引起一系列地质与岩土工程问题, 尤其以建筑物半岩半土地基不均匀沉降问题较为突出。目前已有众多学者对半岩半土地基展开了研究, 提出了多种地基处理方案^[1-5]。多数研究人员通常采取常规单一的地基处理方式对地基土加固, 但对于此类地质情况下基岩陡坎附近出现的较大差异沉降, 并

没有某种地基处理方式可较好地解决这类问题。因此, 笔者结合大量刚性桩及多元桩复合地基文献^[6-11], 对延安市安塞区某半岩半土地基提出采用变刚度复合地基调节地基整体刚度, 拟减小地基整体差异沉降。通过结合安塞区某拟建住宅楼下的地质情况, 针对砂岩和黄土组成的半岩半土地基, 使用 CFG 桩和碎石桩共同对地基土加固, 从而使土岩界面产生的沉降突变优化为沉降渐变, 满足建筑物

收稿日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41440021); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102268209); 陕西省科技统筹创新工程计划(2014KTDZ03-01-02); 陕西省重点研发计划(2017ZD-SF-087)

作者简介: 赵阳(1995-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事地基基础方面的研究。

不均匀沉降要求。

1 变刚度复合地基机制分析

半岩半土地基若采用单一常规的处理方式，多数情况下建筑物的整体差异沉降均可满足要求，但常使得土岩界面附近出现较大差异沉降，可见单一常规的地基处理方式并不能很好的解决土岩界面附近的差异沉降问题。因此，笔者提出变刚度复合地基方案(也可称之为多桩型复合地基)，用以控制局部的不均匀沉降。参照《建筑地基处理技术规范》JGJ79-2012^[12]多桩型复合地基中正方形布桩方式，提出如图 1 所示的变刚度复合地基方案：二元桩桩复合地基+散体桩(柔性桩)复合地基。为了便于分析，对于二元性桩复合地基区域统称为“过渡区”。

多桩型复合地基沉降及承载力计算可参照 GB50783T-2012 复合地基技术规范^[13]。笔者通过野外调查及室内总结，陕北地区的半岩半土地基，多数地质条件下存在刚性下卧层，采用复合地基进行加固后，其沉降主要由加固区压缩产生，即由复合土体压缩模量控制。因此本文通过调节复合地基设计参数，改变过渡区及散体桩(柔性桩)复合地基中复合土体压缩模量，研究复合地基设计参数对地基不均匀沉降的影响，满足建筑物局部差异沉降要求。

2 工程概况及模型建立

下文以安塞城北某半岩半土地基为工程实例，进行数值模拟计算分析。该半岩半土地基原为一基岩沟谷地段，出露强风化侏罗纪砂岩，基岩陡坎深度约为 12 m，因后期工程建设需要，对其基岩陡坎地区人工回填，填土经压实后最终形成可建地基。

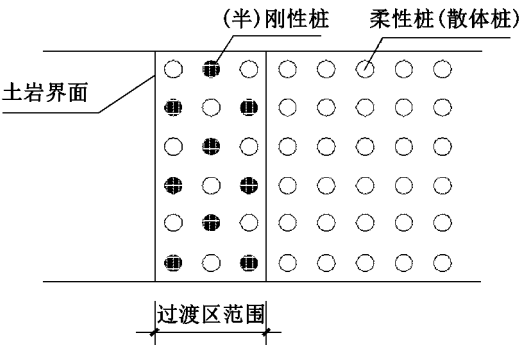


图 1 变刚度复合地基示意图

Fig.1 Schematic of variable stiffness composite foundation

现拟建 1 栋 6 层框架结构住宅楼，地上六层，标准层高 2.8 m，建筑面积约为 500 m²，基础形式为条形基础，设计等级为丙级。因拟建住宅楼地基为半岩半土地基，后期可能会因地基刚度差异较大，造成不均匀沉降而无法满足建筑物安全使用要求，因此笔者结合上文机质分析，提出变刚度复合地基方案，拟解决地基刚度突变问题。

为研究变刚度复合地基在半岩半土地基中的适用性，本文采用岩土专业有限元分析软件 MIDAS GTS NX 建立复合地基模型，模拟多层建筑物条形基础下复合地基沉降，比较不同桩间土模量、桩体模量、桩距、桩长等条件下复合地基沉降，探究变刚度复合地基控制半岩半土地基不均匀沉降的规律。

为便于分析模型各参数对沉降的影响，本文建立用于对比分析的基准有限元模型，通过改变基准模型中相应参数进行分析比较得出结论。基准模型中刚性桩和散体桩分别为 CFG 桩和碎石桩，模型大小为 100 m×10 m×17 m(其中，土层为 12 m，强风化砂岩为 3 m，褥垫层为 0.3 m)，CFG 桩桩长为 12 m，桩径 0.4 m，碎石桩桩长为 12 m，桩径 0.8 m。本文采用桩体布置方式为矩形布置，桩距 2 m。复合地基上部荷载模拟六层建筑物条形基础对地基荷载，采用均布荷载形式，数值为 190 kPa。土层与岩层本构采用弹塑性莫尔库伦模型，桩体采用线弹性模型，模型底部及四周约束条件均为对应法向的平移约束，模型网格划分如图 2 所示，土层及桩体相关参数如表 1 所示。

3 结果分析

提取 MIDAS GTS NX 模型相应点位沉降计算数值及桩土应力比，并计算点位差异沉降。根据数值绘制图表，并对所绘制的图表进行研究分析。其中，1、2 号点位位于基岩一侧，3~12 号点位从地表土岩界面开始，沿建筑物下地基土依次排列，每个点位之间距离为 2 m。

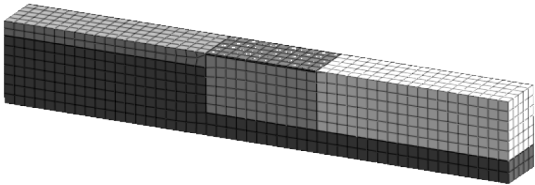


图 2 模型网格划分

Fig.2 Meshing of finite element model of foundation

表 1 土层及桩体材料参数表
Tab.1 Physical parameters of soil and pile

土层名称	厚度 (直径)/m	压缩模量 /MPa	重度 /(kN·m ⁻³)	泊松比	内聚力 /kPa	摩擦角 /°
中风化砂岩		260	25	0.26		
黄土	8	5.82	17.6	0.3	25	22.3
挤密土	8	10	18	0.28	28	22.3
强风化砂岩	3	40	24	0.26		
碎石垫层	0.3	22	20			
CFG 桩	D=0.4	2 800	20	0.25		
碎石桩	D=0.8	70	20	0.19		

3.1 桩间土模量对变刚度复合地基沉降的影响

本文基准模型中桩间土模量为 10 MPa。为了研究桩间土模量对多元桩复合地基沉降的影响，以基准模型为基础，分别建立桩间土模量为 6~16 MPa (以 2 MPa 为增量) 的有限元分析模型，将计算结果进行比较分析。

如图 3 所示，过渡区沉降量介于基岩与碎石桩复合地基沉降量之间，且模型总体沉降呈缓慢增加的趋势，在某一点位的沉降量达到峰值后逐渐趋于稳定。从图 3 还可看出，在过渡区部分，随着桩间土模量增加，模型总体沉降量变化较小；在碎石桩复合地基部分，随桩间土模量增加，模型总体沉降量变化明显。如图 4 所示，在过渡区范围内刚性桩的桩土应力比较大，而在碎石桩复合地基中桩土应力比较小，且两种桩体对应的桩土应力比都随着桩间土模量的增减而逐渐减小，因此过渡区沉降较碎石桩复合地基沉降受影响较小，地基土模量对散体桩复合地基沉降影响较大。

3.2 桩体模量对变刚度复合地基沉降的影响

本文基准模型中 CFG 桩体弹性模量 2 800 MPa，碎石桩桩体弹性模量为 70 MPa。为研究两种桩体弹性模量分别对沉降的影响，建立碎石桩桩体模量为 70 MPa 时 CFG 桩桩体模量分别为 1 400、2 100、2 800、3 500、4 200 MPa 的有限元分析模型和 CFG 桩桩体为 2 800 MPa 时碎石桩分别为 30、50、70、90、110、130 MPa 的有限元分析模型，并将计算结果比较分析。

由图 5 可知，在均布荷载作用下碎石桩桩体模量不变时，随着 CFG 桩桩体模量逐渐增加，模型最大沉降量不发生变化，最大沉降都分布在碎石桩复合地基部分，但过渡区沉降逐渐减小。当桩体模量较大时，过渡区沉降量与基岩部分沉降量几乎相同，

但其与碎石桩复合地基之间发生了较大沉降突变，桩体模量较小时，过渡区起到了很好的过渡作用，其沉降量介于基岩与碎石桩复合地基之间，使得模型整体沉降呈渐变趋势。这是因为刚性桩桩体强度高，对过渡区复合模量的影响较大，随着 CFG 桩桩体模量的增加，过渡区复合模量增加较快。

由图 6 可知，CFG 桩桩体模量不变，碎石桩桩

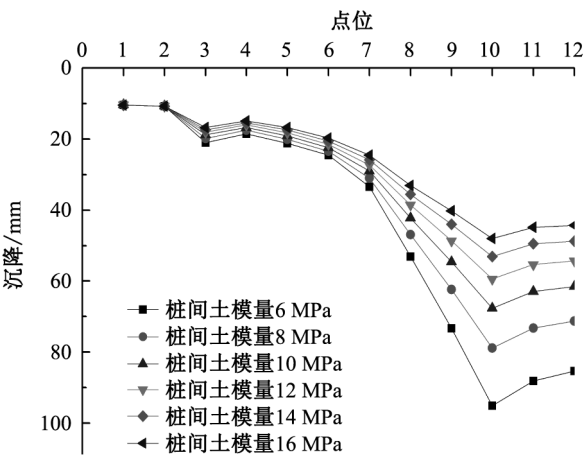


图 3 变桩间土模量模型沉降折线图
Fig.3 Subsidence line chart of variable soil between the piles

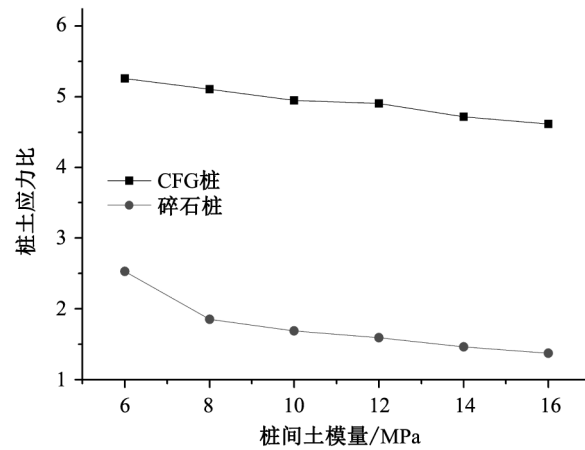


图 4 桩土应力比折线图
Fig.4 Line chart of pile - soil stress ratio

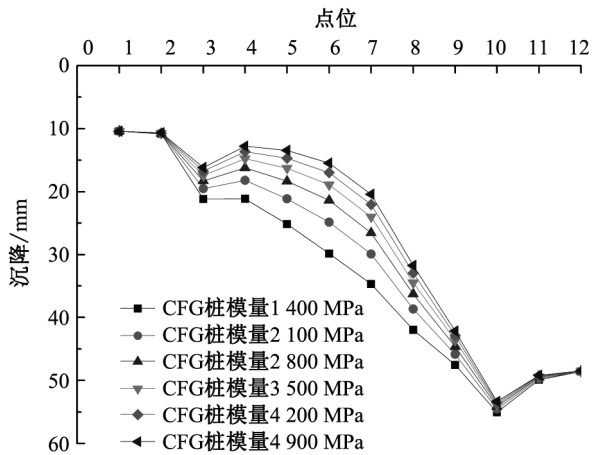


图5 变CFG桩桩体模量模型沉降折线图

Fig.5 Subsidence line chart of variable CFG pile modulus

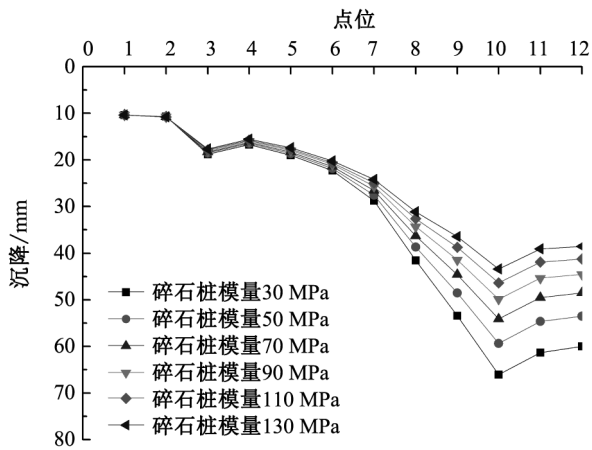


图6 变碎石桩桩体模量模型沉降折线图

Fig.6 Subsidence line chart of variable gravel pile modulus

体模量逐渐增大时,碎石桩复合地基部分沉降逐渐减小,且模型最大沉降也逐渐减小,对于过渡区,由于碎石桩桩体本身强度较低,对过渡区复合模量影响较小,因此过渡区部分受碎石桩桩体模量变化不明显。当碎石桩桩体模量较小时,碎石桩复合地基沉降较大,其与过渡区之间产生了较大沉降突变;当碎石桩桩体模量较大时,两种复合地基之间的差异沉降较小,从而实现了整体沉降渐变。

这说明在进行复合地基设计时,建议遵循二元桩复合地基为“过渡区”的原则。通过本小节分析,实现沉降渐变的方式有两种,减小刚性桩桩体模量或提高散体桩桩体模量。

3.3 桩距对变刚度复合地基沉降的影响

本文基准模型中桩距为2 m,为研究桩距对多元桩复合地基沉降的影响,以基准模型为原始模型,分别建立桩距分别为1、1.5、2、2.5、3 m的有限元

分析模型,并将计算结果比较分析。

由图7可知,在上部均布荷载一定的情况下,随着桩距增加,模型整体沉降逐渐增大。通过比较过渡区沉降与碎石桩复合地基沉降可知,碎石桩复合地基沉降受桩距影响较大。以图4为例,折线图为模型在桩距2 m时的桩土应力比,过渡区中刚性桩的桩土应力比较大,刚性桩承担较大荷载,因此增加桩距相当于减小过渡区刚性桩数量,从而变相的增加了部分刚性桩所承受的荷载,当荷载没有使桩体达到极限承载力而发生破坏时,沉降不会发生较大变化。同理,在碎石桩复合地基中,随着桩距增加,沉降量变化明显,使得其受桩间距影响较大。因此在设计时,可适当增加过渡区桩距,减小散体桩复合地基桩距,实现沉降渐变。

3.4 桩长对变刚度复合地基沉降的影响

为研究桩长对多元复合地基沉降的影响,分别建立两种模型,通过分别改变碎石桩桩长和CFG桩桩长来研究两种桩体分别对沉降的影响。本文基准模型中桩长均为12 m,建立碎石桩桩长分别为12、11、10、9、8 m和CFG桩长分别为12、11、10、9、8 m的有限元分析模型。计算结果见图8、图9。

由图8可知,碎石桩桩长只对碎石桩复合地基部分造成较大影响,对过渡区沉降几乎没有影响;同时对比图8和图6可知,对于碎石桩复合地基而言,桩体模量较桩长对沉降的影响较大。这是因为在过渡区CFG桩承担大部分荷载,碎石桩在过渡区主要起到挤密桩间土的作用;同时因刚性下卧层埋深不厚,造成的沉降较少,而桩体模量是影响复合模量的重要因素,故桩体模量对沉降影响较大。对比图9、

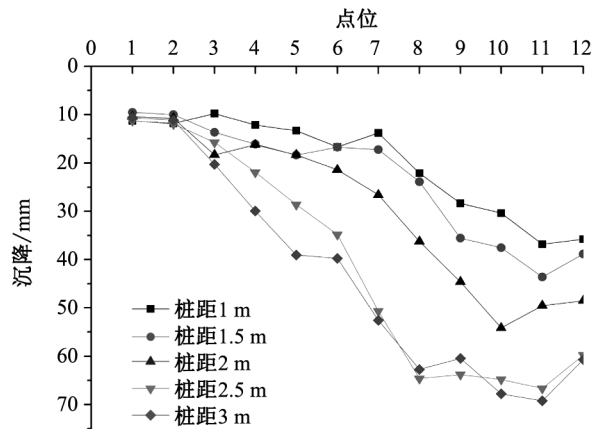


图7 变桩距模型沉降折线图

Fig.7 Subsidence line chart of variable piles spacing

图5可知,无论是CFG桩的桩长与桩体模量,均对过渡区沉降造成较大影响,但桩长的影响较小。这是因为一方面模型存在刚性下卧层,单纯改变桩长后使得加固区下存在一定厚度的软弱下卧层,但下卧层厚度不大,故而沉降量仍然较小。在进行复合地基设计时,可适当减小CFG桩桩长,避免过渡区与复合地基部分产生较大差异沉降;同时也可适当增加碎石桩桩长,减小总体沉降。

3.5 差异沉降控制分析与评价

桩间土模量与桩体模量对半岩半土地基沉降的影响较大,桩距对沉降的影响存在一定的不可控性,桩长对半岩半土地基沉降影响较小。因此本小节选择两种模型:改变碎石桩桩长模型与改变CFG桩桩体模量模型研究其对差异沉降的影响。选择两种模型的原因是碎石桩桩长对沉降的影响最小,而CFG桩的桩体模量在工程应用中通过改变配合比容易实现。

本文对差异沉降的评价准则参照《建筑地基基

础设计规范》GB50007-2011^[14]中的表5.3.4建筑物的地基变形允许值,通过结合本文数值模拟计算及延安地区多层建筑物结构形式,采用局部倾斜控制上部结构的差异沉降,因此,本文选择8 m范围内的差异沉降进行分析,如图10、图11所示,横坐标轴的1~4区间分由于别代表1号点至4号点8 m范围内的差异沉降,以此类推,数值模拟的局部倾斜使用0.004,控制线如图中的横线所示。通过图10、图11可知,控制差异沉降宜增加碎石桩桩长、减小CFG桩桩体模量,这与上文得出的结论相符。

通过对差异沉降折线图的分析可知,可通过改变复合地基设计参数等方案对差异沉降进行控制,避免因地基发生较大沉降突变导致建筑物破坏。但上文参数在设计复合地基时是相互作用的,如改变桩间土模量其本质是改变桩距、施工方案等,同时桩间土模

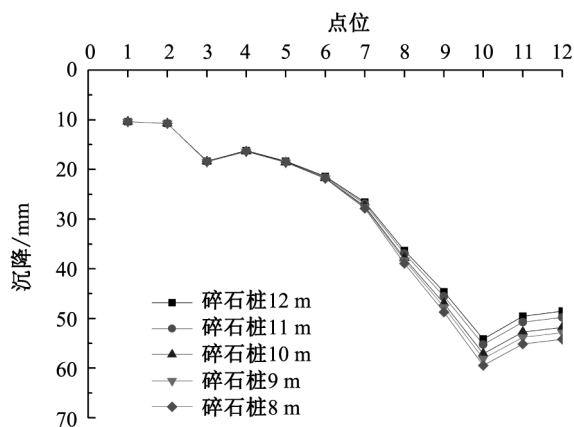


图8 变碎石桩桩长模型沉降折线图

Fig.8 Subsidence line chart of variable gravel piles length

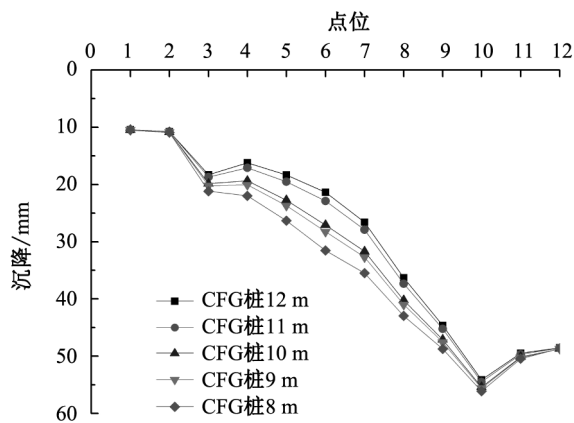


图9 变CFG桩桩长模型沉降折线图

Fig.9 Subsidence line chart of variable CFG pile modulus

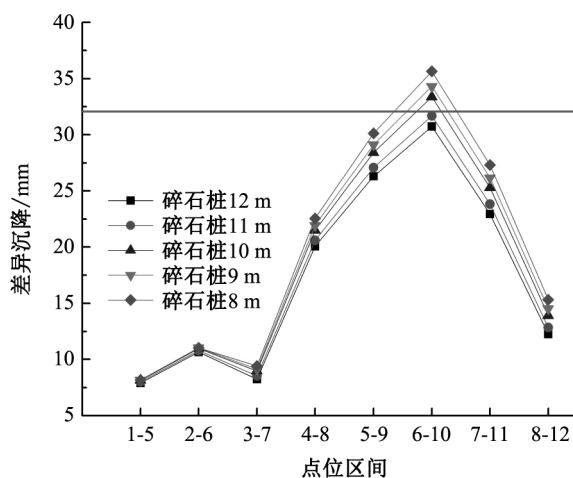


图10 变碎石桩桩长模型差异沉降折线图

Fig.10 Differential settlement line chart of variable gravel piles length

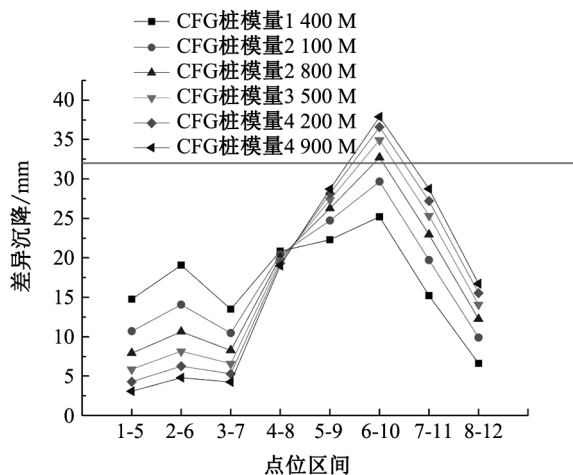


图11 变CFG桩模量模型差异沉降折线图

Fig.11 Differential settlement line chart of variable

量、桩体模量也是影响复合模量的重要因素。

4 结论

1) 桩间土模量对变刚度复合地基中的过渡区沉降影响较小,对散体桩复合地基沉降影响较大。

2) 桩体模量是影响变刚度复合地基沉降最主要的条件,也是控制沉降渐变的主要因素,可通过减小刚性桩桩体模量或提高散体桩桩体模量改善不均匀沉降。

3) 桩距对整个复合地基影响范围最大,可通过增加过渡区桩距,减小散体桩复合地基桩距,实现总体沉降的缓变。

4) 桩长对半岩半土地基沉降影响较小,但仍可适当减小CFG桩桩长增加碎石桩桩长控制差异沉降。

5) 可通过改变复合地基设计参数来控制地基不均匀沉降,使其由沉降突变为沉降渐变,满足建筑物使用要求。

参考文献:

- [1] 李仰贤,朱 锋,侯庆瑜.某墙体裂缝的分析与处理[J].山西建筑,2010,36(22):124-125.
- [2] 王晓琳,王棣生.北京某山区高层住宅工程地基基础设计[C]//第18届全国结构工程学术会议.中国广东广州,2009:4.
- [3] 罗庆英.软土和岩石组合地基基础处理方法与实例[J].

中外建筑,2008(6):146-148.

- [4] 张凤文,陈广刚,赵国忠.振冲碎石桩法在土岩组合地基中的应用[J].岩石力学与工程学报,2000,19(2):242-245.
- [5] 王 栋,周 峰.土岩组合地基变刚度调平设计新方法[J].浙江建筑,2012(6):23-25.
- [6] 郑俊杰,王仙芝,韩 超,等.钢管桩与砂桩多元复合地基室内模型试验[J].华中科技大学学报:自然科学版,2008(9):121-124.
- [7] 袁 超,张 涛.刚性桩复合地基性能数值模拟研究[J].公路工程,2014(5):83-87.
- [8] 朱 奎,徐日庆,吴冬虎,等.刚-柔性桩复合地基处理桩基质量事故的应用研究[J].建筑结构,2007(6):102-104.
- [9] 韩 煊,李 宁.多元复合地基的概念及其基本设计思路[J].工业建筑,2005(Z1):475-478.
- [10] 周茗如,王晋伟,樊乐涛,等.二元桩复合地基在湿陷性黄土中的应用研究[J].施工技术,2017(11):119-123.
- [11] 彭典华,白秀琴,黄 涛,等.CFG桩和砂石桩加固吹填河漫滩地基的试验研究[J].土工基础,2012,26(6):101-105.
- [12] JGJ79-2012,建筑地基处理技术规范[S].
- [13] GB50783T-2012,复合地基技术规范[S].
- [14] GB50007-2011,建筑地基基础设计规范[S].

(责任编辑 王利君)