

【工程应用】

CFG桩地基处理在紧邻深基坑等环境中的应用

姚国鹏

(北京岩土工程勘察院有限公司, 北京 100086)

摘要: CFG桩可用于从多层建筑到30层左右的高层建筑的地基处理工程, 适用的基础型式、地基土质范围较广, 一般具有很好的综合经济效益, 随着CFG桩技术上越来越成熟, 目前已成为我国建筑领域比较常见的一种地基处理技术。本文以某紧邻深基坑的地基处理工程为对象, 分析工程地质及周边环境情况, 施工前经现场实际测试, 旋挖钻机成孔可以切割邻近基坑支护结构的锚杆, 结合旋挖钻机成孔情况, 工程采用桩径800 mm的CFG桩和将部分原支护桩代替该部位CFG桩的组合地基处理形式, 经复合地基静载荷试验检测及建筑物沉降观测, 该地基处理满足结构设计要求, 工程效果较好, 希望可作为邻近深基坑等周边环境复杂的地基处理工程实例借鉴。

关键词: CFG桩; 地基处理; 变形机理; 深基坑; 沉降观测; 载荷试验

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)06-0514-06

Application of CFG pile foundation treatment in the environment close to deep foundation pit

YAO Guo-peng

(Beijing Geotechnical Engineering Survey Institute Co., Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: CFG pile can be used in foundation treatment engineering from multi-storey buildings to 30 storey high-rise buildings. It is applicable to a wide range of foundation forms and foundation soil, and generally has good comprehensive economic benefits. With the increasing maturity of CFG pile technology, it has become a common foundation treatment technology in China's construction field. In this paper, a foundation treatment project adjacent to a deep foundation pit is taken as a case study, where the engineering geology and surrounding environment are analyzed. After the in situ test before construction, it is concluded that the anchor bolt of the adjacent foundation pit supporting structure can be cut by the rotary drilling rig. Combined with the hole formation of rotary drilling rig, the project adopts the combined foundation treatment form of CFG pile with pile diameter of 800 mm and some original supporting piles instead of CFG piles in this part. According to the static load test detection of composite foundation and building settlement observation, the foundation treatment meets the structural design requirements and the engineering effect is good. It is hoped that it can be used as an example of foundation treatment engineering with complex surrounding environment such as near deep foundation pit.

Key words: CFG pile; foundation treatment; deformation mechanism; deep foundation pit; settlement observation; load test

0 引言

建筑地基处理技术有很多种, 包括换填垫层、预压地基、压实地基和夯实地基、复合地基、注浆加固、微型桩加固等。复合地基又分为振冲碎石桩、沉管碎石桩、水泥土搅拌桩、灰土挤密桩、夯实水泥土桩、水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)、柱锤冲扩桩等多种形式^[1]。

CFG桩复合地基由桩、桩间土及褥垫层3部分

构成, 其加固机理为褥垫层受上部基础荷载作用产生变形后以一定的比例将荷载分摊给桩及桩间土, 使二者共同受力。同时土体受到桩的挤密而提高承载力, 而桩又由于周围土的侧应力的增加而改善了受力性能, 二者共同工作, 形成了一个复合地基的受力整体, 共同承担上部基础传来的荷载^[2]。

CFG桩复合地基处理技术具有以下的特点而应用广泛: 能发挥桩间土的承载作用, 地基承载力提高幅度大; 应用的土质类型和基础形式广; 可选

择成桩机械类型多；施工简单、技术成熟、成桩质量好、工期短、经济效果好。

1 CFG 桩地基处理在本工程中应用

1.1 工程概况

拟建工程分南北两部分，南区为地上 8 层，地下 3 层，高度 35.7 m；北区为地上 6 层，地下 1 层，高度 27.0 m。两者结构外墙净间距 325 mm。南区基坑开挖深度-14.80 m，与北区紧邻区域采取桩锚支护方案。支护桩桩径 600 mm，桩间距 1.20 m；钢筋笼主筋 12Φ25，架力筋 Φ16@2 000，箍筋 Φ8@200，桩体强度 C25；设置 3 道锚杆，长度分别为 22 m、24 m、27 m。北区地下 1 层，基础埋深-5.5m。据勘察报告，基底位于②粉质黏土层，地基承载力标准值 90 kPa（局部基底位于①粉质黏

土-黏质粉土素填土层，地基承载力标准值按 50 kPa 考虑）。

北区结构设计要求为：条形基础，地基承载力不小于 360 kPa，沉降不大于 50 mm，建筑物最大倾斜不大于 0.002。基础平面图见图 1。

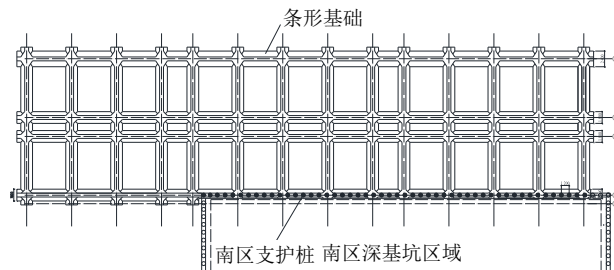


图 1 基础平面图

Fig. 1 Foundation plan

1.2 工程地质情况

据勘察报告，各土层参数如表 1。

表 1 各土层土质参数表

Table 1 Soil parameters of each layer

地层编号	地层名称	天然重度/ (kN/m ³)	压缩模量/ MPa	极限侧阻力标准值/ kPa	极限端阻力标准值/ kPa	承载力标准值/ kPa
①	粉质黏土、 黏质粉土素填土	17.5	2.34	10 (经验)	—	50
① ₁	房渣土	17.0	—	—	—	—
②	粉质黏土	18.9	4.20	30	—	90
② ₁	黏质粉土-砂质粉土	19.1	5.63	35	—	110
② ₂	粉砂	19.0	8.00	30	—	130
③	细砂	20.1	15.00	45	—	170
④	细砂、中砂	20.3	25.00	65	750	220
④ ₁	粉质黏土	19.3	7.95	55	—	160
⑤	细砂、中砂	20.5	30.00	70	1 300	260
⑤ ₁	粉质黏土	18.8	12.12	60	—	180
⑥	细砂、中砂	20.5	32.00	75	1 600	300
⑥ ₁	粉质黏土、重粉质黏土	19.2	9.93	60	—	210

1.3 地基处理的难点

据勘察报告，北区基底位于②粉质黏土层，地基承载力标准值 90 kPa（局部基底位于①粉质黏土-黏质粉土素填土层，地基承载力标准值按 50 kPa 考虑），天然地基承载力不满足结构设计的要求，需要进行地基处理。

本工程地基处理需考虑以下问题：

(1) 局部基底持力层为①粉质黏土-黏质粉土素填土层，需进行换填处理。

(2) 南北区结构外墙净间距 325 mm，南区基

坑紧邻北区的支护结构为混凝土灌注桩，该位置的桩处于北区基础下方，且相应部位肥槽也位于地基处理范围内。

(3) 南区基坑支护结构的锚杆（共 3 道）进入地基处理范围内，影响正常 CFG 桩施工。

2 CFG 桩地基处理设计

2.1 地基处理设计思路

综合考虑本项目场地情况，采取如下处理措施：

(1) 人工填土层地基承载力标准值按 50 kPa 考虑。在 CFG 桩施工前应将此部位基底的填土全部清除, 用 2:8 灰土夯实换填后再施工 CFG 桩, 根据现场实际填土深度和土质确定换填深度。灰土压实系数不小于 0.95, 地基承载力不小于 90 kPa。

(2) 南区基坑紧邻北区支护结构的支护桩桩径 600 mm, 桩间距 1.20 m, 钢筋笼主筋 12Φ25, 桩体强度 C25, 支护桩桩长 25.50 m。因南侧基坑支护的需要, 支护桩布置在地基处理段的基础结构之下, 若不破碎清除可能在地基处理后造成北区地基不均匀沉降, 但现阶段若全部破碎清除该段支护桩需要花费很大成本。经综合考虑, 决定对其进行有效利用, 北区地基处理拟全部采用 CFG 桩形式, 并将支护桩替代该部位 CFG 桩, 通过布桩间距进行置换率调整等使得两者的复合地基承载力一致, 能较好控制不同地基处理方式带来的不均匀沉降。

支护桩截去北区基底标高以上部分, 有效桩长 20.85 m。南区的基坑支护设计时考虑到后期北区可能要进行的地基处理, 减小了本段地下结构施工的工作面, 将支护桩布置在条形基础的下方, 本段基坑的肥槽采用级配砂石分层回填处理。

(3) 南区基坑完成回填后, 再进行北区 CFG 桩施工。南区 3 排支护锚杆深入北区地层内, 经现场实际测试, 旋挖钻机成孔可以切割锚杆, 结合旋挖钻机成孔情况, 本工程拟采取桩径 800 mm 的 CFG 桩、旋挖钻机成孔的施工工艺成桩。

2.2 CFG 桩设计参数取值

根据本项目地质情况, 南区基坑紧邻北区的支护结构的支护桩桩底位于⑤细砂、中砂层, 较为合适; 其余部位选取④细砂、中砂层作为桩端持力层, 设计桩长 19.5 m。CFG 桩设计参数见表 2。

2.3 单桩竖向承载力特征值的确定

(1) 桩径 800 mm 的 CFG 桩单桩竖向承载力选用桩径 Φ800, 取有效桩长 19.50 m, 单桩承载力由式 (1) 计算^[3]:

$$Q_{uk} = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_{pi} + \alpha_p q_p A_p \quad (1)$$

$$R_a = \frac{1}{K} Q_{uk} \quad (2)$$

式中: Q_{uk} 为单桩竖向极限承载力标准值, kN; R_a 为单桩竖向承载力特征值, kN; u_p 为桩的截面周长, $0.8 \times 3.14 = 2.512$ m; q_{si} 为第 i 层桩周土的极限侧阻力特征值, kPa; l_{pi} 为第 i 层土的厚度, m; α_p 为桩端端阻力发挥系数, 这里取 1; q_p 为桩端端阻力特征值, kPa; A_p 为桩的截面面积, 取 0.502655 m²; K 为安全系数, 取 $K=2$ 。

结合土质情况, 选取勘察孔 1 号孔、6 号孔和 7 号孔反映的土质参数计算单桩竖向承载力特征值, 见表 3。

(2) 桩径 600 mm 的支护桩单桩竖向承载力支护桩桩径 Φ600, 取有效桩长 12.00 m (南区开挖范围内承载力折算), 经计算单桩承载力为 571 kN (计算过程省略)。

2.4 地基处理设计成果

通过计算置换率确定桩间距, 确定桩身强度, 验算复合地基承载力 (计算过程省略)^[1], 本工程地基处理设计成果见表 4。

桩径 800 mm 的 CFG 桩桩端位入第④层细砂—中砂层, 有效桩长 19.50 m, 单桩承载力标准值 981 kN; 南区基坑支护桩代替相应位置 CFG 桩, 有效桩长 20.85 m, 单桩承载力标准值 571 kN, 桩体材料均为 C25 混凝土。

本工程深基坑段与地基处理段相对位置关系及 CFG 桩设计布置情况见图 2, 南区 3 排支护锚杆深入北区基底地层内。南区基坑回填后开挖北区地基处理段基坑, 支护桩清理后作为 CFG 桩, 施工照片见图 3。桩间土清理、桩头凿平施工照片见图 4, 邻近结构为南区地上结构。

褥垫层厚度 300 mm, 材料为粒径不大于 30 mm 的碎石, 褥垫层夯填度不大于 0.90。铺设范围为垫层顶面每边超出基础底边缘 300 mm。

2.5 沉降量验算及倾斜验算

采用“理正岩土工程计算分析软件”——地基处理计算模块——CFG 桩法 (水泥粉煤灰碎石桩法) 计算 (计算过程省略), 结果见表 5。

表 2 CFG 桩设计参数取值表

Table 2 Design parameters of CFG pile

条形基础宽度/m	设计桩顶标高/m	桩径/mm	有效桩长/m	桩底持力层土层	桩间土承载力特征值/kPa
2.20	16.05	800	19.50	④、④ ₁	90
1.80	16.05	800	19.50	④、④ ₁	90
1.40	16.05	600	20.85	⑤、⑤ ₁	90

表 3 单桩承载力特征值计算参数表

Table 3 Parameters for the calculation of characteristic value of single pile bearing capacity

土层编号	极限侧阻力特征值 q_{si}/kPa	极限端阻力特征值 q_p/kPa	1 号钻孔土层 厚度 l_{pi}/m	6 号钻孔土层 厚度 l_{pi}/m	7 号钻孔土层 厚度 l_{pi}/m
① ₁	—	—	—	—	—
①	10	—	0.49	—	—
②	30	—	3.00	—	1.45
② ₁	35	—	2.80	4.41	4.80
③	45	—	5.00	7.00	5.00
④	65	—	2.00	—	—
④ ₁	55	—	2.00	1.00	1.20
④	65	750	4.21	7.09	7.05
合计	—	—	19.50	19.50	19.50
承载力计算值/kN	—	—	1 358	1 425	1 395
承载力折减	—	—	0.723	0.688	0.704
承载力取值/kN	—	—	—	981	—

表 4 地基处理设计成果表

Table 4 Design results of foundation treatment

条形基础宽度/m	实际置换率下复合地基承载力/kPa (修正前)	间距/m	置换率	有效桩长/m	实际单桩承载力/kN	布桩形式
2.20(800)	360.11	1.20×2.40	0.175	19.50	981	双排桩
1.80(800)	360.11	1.60	0.175	19.50	981	单排桩
1.40(600)	360.01	1.20	0.168	20.85	571	单排桩

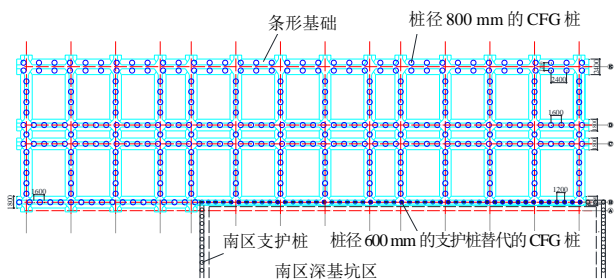


图 2 深基坑段与地基处理段相对位置及 CFG 桩布置图

Fig. 2 Relative position of deep foundation pit section and foundation treatment section and layout of CFG pile



图 3 支护桩清理后作为 CFG 桩的位置图

Fig. 3 Position drawing of CFG pile after support pile cleaning



图 4 桩间土清理、桩头凿平

Fig. 4 Clearance of soil between piles and chiseling of pile head

基础宽度 21.95 m, 倾斜计算 $(6.53-2.14)/21.95=0.0002 \leq 0.002$, 倾斜满足设计要求。

本工程因南侧基坑支护的需要, 支护桩布置在本次地基处理段的基础下, 而 CFG 桩复合地基中的桩视为天然土体的增强体, 桩与土体共同承受上部荷载, 支护桩替换的 CFG 桩与一般区域的 CFG 桩的单桩承载力不同, 通过布桩间距进行置换率调整等, 使得两者的复合地基承载力一致, 且因铺设褥垫层的作用, 能有效调整桩土荷载的分担, 减少基础底面的应力集中, 能较好控制不同地基处理方式带来的不均匀沉降。

表5 沉降验算结果表
Table 5 Settlement checking results

位置	条形基础宽度/m	桩间距/m	实际单桩承载力/kN	沉降量/mm	备注
北侧	2.20(800)	1.20×2.40	981	6.53	—
中间	1.80(800)	1.60	981	7.73	—
南侧	1.40(600)	1.20	571	2.14	支护桩

3 桩检测和建筑物沉降观测

3.1 桩检测

CFG 桩施工完成 28 d 后,本工程进行了复合地基静载荷试验和单桩静载荷试验,并用低应变动力测试桩身完整性。

(1) 静载荷试验

本工程两种桩型各完成 3 个点的复合地基载荷试验和单桩载荷试验,分别在基础的北段、中段和南段随机选取桩位为测点。

复合地基试验点最大加载压力为 720 kPa,其 $p-s$ 曲线均为平缓的光滑曲线(见图 5)。在最大加载压力作用下,累计沉降量为 11.8 mm。试验组中 1 号点进行卸载试验,回弹量为 3.0 mm,残余量为 8.8 mm,回弹率为 25.4%,以上情况说明在最大加载压力作用下未达到极限状态。

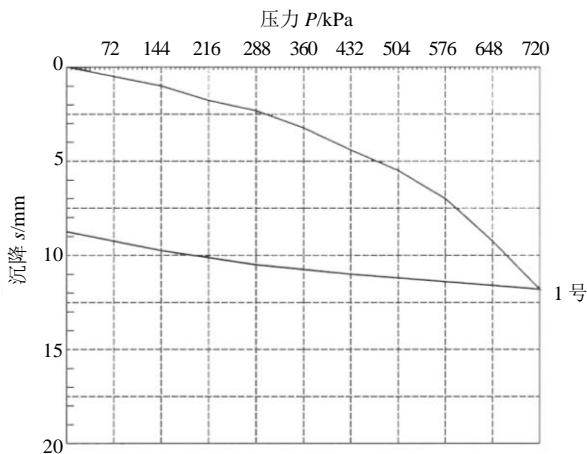


图5 复合地基静载荷试验 $p-s$ 曲线图

Fig. 5 $p-s$ curve of static load test of composite base

(2) 低应变动力测试

经低应变动力测试试验,检测 76 根桩,均桩身完整,其中 I 类桩 63 根,II 类桩 13 根,为轻微缩径和扩径情况,没有 III 类和 IV 类桩。检测时域曲线图如图 6。

通过静载荷试验和桩身完整性检测数据分析,本工程 CFG 桩布置满足本工程的承载力要求,施工方的现场管理效果较好,没有出现 III、IV 类桩,

从而进一步缩短工期,提高经济效益。

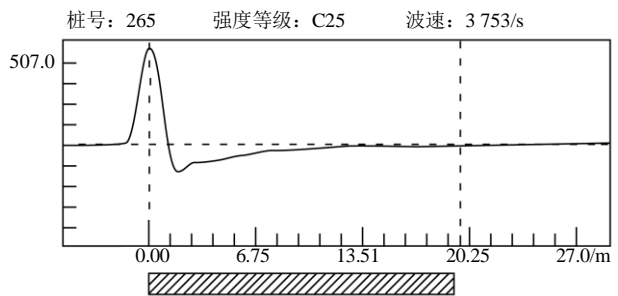


图6 低应变动力测试时域曲线图

Fig. 6 Time domain curve of low strain dynamic test

3.2 沉降观测

在主体施工过程中,结构封顶前每层测 1 次,结构封顶后每 3 个月测 1 次,沉降量和差异沉降满足要求。竣工后每半年观测 1 次,观测数据累计汇总,最大沉降点沉降量为 8.7 mm,满足设计的最大沉降要求,平均沉降量为 6.5 mm,满足要求。

4 CFG 桩等复合地基在荷载作用下的变形机理分析

复合地基处理可采用多种方法,形成的复合地基在荷载作用下的变形机理也有较大差异,一般刚、柔性桩作为增强体区别主要是桩体刚度不同,除了桩体的材料模量外,桩的长径比 L/d 及桩土模量比都会影响增强体承受荷载的性状^[4-5]。

对于复合地基,一般柔性桩桩体材料为散粒(如砂桩、碎石桩等)时,桩身黏聚力很小,依靠周围土体的约束力形成桩体,一般情况下,碎石桩在桩顶 2~3 d 区域为高应力区,会产生较大侧向变形,即使增加桩长,荷载也很难通过桩身传递到深层土体,故柔性桩对地基承载力提高幅度不大^[6]。当复合地基桩身为水泥土桩等时,桩体模量变化对承载力影响较大,随着水泥掺量的提高,桩身黏结强度的增大,桩身承担的荷载逐渐增大,桩间土承担的荷载比例逐渐减小,当桩为半刚性桩或刚性桩时,桩体模量的增大对桩间土所承担应力的影响变得很小。刚性桩桩身承担的荷载通过桩表面的摩擦

力和桩端阻力传递到地基土中去,也使得上部荷载能传到更深广的土层中,能更好提高复合地基承载力并控制地基变形。

王飞等^[7] 试验研究,在保持荷载不变的情况下,桩体竖向位移随桩体模量的增大而减小。桩体模量较小时,桩顶位移大,桩端位移小,也就是桩体变形较大,随着桩体模量的增大,桩顶位移逐渐减小,而桩端位移逐渐增大,桩体变形越来越小,当桩体模量较小时,随着桩体模量的增加,桩土应力比增加的幅度比较大,当桩体模量较大时,随着桩体模量的增加,桩土应力比的增长趋势减缓,最后趋向于一个定值。研究表明,桩体模量在 $5 \times 10^9 \sim 2.2 \times 10^{10}$ Pa 时,桩土应力比随着桩体模量的增加而增加,当桩体模量超出上述范围时,继续增加桩体模量对 CFG 桩复合地基受力和变形的影响已不明显。本工程 CFG 桩桩身材料为 C25 混凝土,弹性模量为 2.8×10^{10} Pa,可以判定为刚性桩,与支护桩替代的 CFG 桩在复合地基中的作用机理会较为一致。

另外,复合地基由于存在褥垫层的作用,上部荷载由桩土共同承担,当上部荷载较小时,桩土应力比较小,桩顶的上刺入量大于桩端的下刺入量,表明桩周土体承担了较多的荷载发生了沉降,而桩承担荷载较小。当上部荷载持续增大时,刚性桩承担的荷载会快速增大,桩体会出现明显的应力集中,桩端的下刺入量的发展速度明显大于桩顶的上刺入量的发展速度。接近桩的最大承载力时,桩的沉降快速增大,桩的下刺入量会远大于桩顶的上刺入量,下刺入量占加固层压缩的主导地位。当超过极限荷载时,桩身的侧阻和端阻已完全发挥,达到极限承载力后,桩身发生急剧沉降,桩间土承担荷载达到土体的极限承载力,从而发生复合地基破坏^[8-9]。

一般来说,荷载作用下,复合地基的承载力和变形与其本身的结构形式和增强体材料性质有较大关系。CFG 桩桩长较长、桩体刚度大,有利于调动和发挥桩侧土体的承载性能,能提高地基承载力,减小变形,但如果过大就不能充分发挥桩间土的承载作用^[10],从经济的角度考虑,一般根据设计要求和地层性质选择合适的桩长、桩径和桩间距。

5 结论和展望

通过静载荷试验确定,本项目复合地基和单桩承载力均满足要求,CFG 桩的成桩质量也较好。结

合施工方法的选择及质量动态控制,CFG 复合地基处理技术在本工程应用是合适的。本工程采用桩径 800 mm 的 CFG 桩和将部分原支护桩代替该部位 CFG 桩的组合地基处理形式,工程效果较好,希望可作为邻近深基坑等周边环境复杂的地基处理工程实例借鉴。

复合地基在荷载作用下的变形机理随条件不同而改变。如刚性桩的长度及模量和桩间距的变化、褥垫层的厚度及模量的改变、加固层及下卧层的土体性质的不同、基础的宽度和刚度的不同等,它们对复合地基承载力的影响程度也不同。

现阶段,随着 CFG 桩应用越来越多,采用变径 CFG 桩、多种处理方法组合使用等工程也逐渐出现,另外,研究桩、土、承台相互作用,改进复合地基承载力和变形计算理论与方法,也是地基处理优化设计新的发展和研究方向,希望随着相关研究和工程实践的展开,CFG 桩地基处理的应用前景越来越广阔。

参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Industry standard compilation group of the People's Republic of China. JGJ 79—2012 Technical Code for Ground Treatment of Buildings[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.
- [2] 阎明礼, 刘国安. 复合地基中桩型的合理选用[C]//海峡两岸土力学及基础工程地工技术学术研究会论文集. 西安, 1994: 10.
YAN Ming-li, LIU Guo-an. Rational Selection of Pile Type in Composite Foundation[C]//Proceedings of the Cross Strait Symposium on Geotechnical Technology of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Xi'an, 1994: 10.
- [3] 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 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Code for Design of Building Foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [4] 刘金砺, 迟铃泉. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2):11-17.
LIU Jin-li, CHI Ling-quan. The modified model of pile-soil deformation calculation and variable rigidity