

m法和有限元法对桥梁桩基的计算探讨

高能祥, 方健

[同济大学建筑设计院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要:通过简述桩基m法的计算过程,分别使用m法和有限元法计算了单桩算例和群桩算例,得到了两种算例下桩基位移、桩身弯矩、桩身剪力和桩周土应力的计算结果,发现m法和有限元法在计算的桩身各反应结果差距均较小,且除桩周土应力外,其他反应结果趋势基本一致。另外,还分析了两种方法在桩基入土深度 $z \geq 4.0/\alpha$ 时桩基位移和桩周土应力结果差异的原因。

关键词:桩基;Winkler地基模型;m法;有限元法

中图分类号:U442

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2021)07-0272-04

0 引言

桩基是指设置在地面以下一定深度的圆柱状或管状的基础构件,是桥梁等其他各种构筑物中最常用的基础形式。桩基对地质条件广泛适用,基础承载力高,不均匀沉降较小;且当地震发生时,桩基整体破坏的概率小,能够防止构筑物倒塌,减少人员伤亡和财产损失。随着施工机械化和检测技术的发展,桩基的施工速度和施工质量得到大幅提升,桩应用愈加广泛。

在承受水平荷载作用下,桩基的工作原理是桩-土的相互作用问题^[1]。此时,桩基依靠桩基周围土的抗力来承担其所受的水平荷载。桩基承受水平力作用下,导致桩基发生水平位移,此时桩基压迫桩周土产生相同方向的变形,迫使桩周土产生反向抵抗力,此反向抵抗力会阻止桩基位移的继续发展。

1 m法计算简介

桩基在水平力作用下,最常用的计算方法是地基反力系数法。地基反力系数指的是地基反应模量,即土对桩基产生的反向抗力与土的位移的比值。地基反力系数采用的是Winkler地基模型^[2]。它将桩侧土离散为一个个相互独立的弹簧,且弹簧所产生的抗力与其发生的位移成正比例关系。

$$p = C_z y_z \quad (1)$$

式中: p 为桩基所承受的单位压力; C_z 为地基反力系

数; y_z 为相应的土体位移。

根据式(1)建立Winkler弹性地基梁模型如下:

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + bp = EI \frac{d^4 y}{dz^4} + b C_z y_z = 0 \quad (2)$$

式中: EI 为桩基抗弯刚度; y 为桩基轴线挠曲位移; z 为桩基对应深度; b 为桩基计算宽度。

根据地基反力系数 C_z 沿桩基深度不同的分布图示,形成了 C_z 不同的几种求解方法。

$$C_z = k z^n \quad (3)$$

式中: k 比例系数; n 为指数。

如图1(b)所示, $n=0$ 时, $C_z=k$,此方法被称为张(有龄)氏法。该方法认为地基反力系数为常数,不随桩的深度变化。

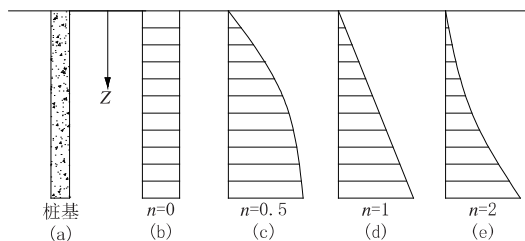


图1 地基反力系数沿桩基深度的分布图示

如图1(c)所示, $n=0.5$ 时, $C_z=kz^{0.5}$,此方法被称为C法。该方法认为地基反力系数沿桩的深度成凸形抛物线变化。

如图1(d)所示, $n=1.0$ 时, $C_z=kz$,此方法被称为m法。该方法认为地基反力系数沿桩的深度成线性变化,令 $k=m$,则 $C_z=mz$ 。

如图1(e)所示, $n=2.0$ 时, $C_z=kz^2$,此方法被称为k法。该方法认为地基反力系数沿桩的深度成凹形抛物线变化。此方法由于计算出的桩身弯矩结果比实际

收稿日期:2020-12-24

作者简介:高能祥(1986—),男,硕士,一级注册结构工程师,从事桥梁设计工作。

偏大较多,故较少采用。

上述中的m法是我国计算桩基在水平荷载作用下的常用方法,也是《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[3]中计算桩基的水平位移和作用效应的指导方法。根据 $C_z=mz$,重新建立Winkler弹性地基梁模型公式如下:

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + bmzy = 0 \quad (4)$$

式中: m 为地基反力系数的比例系数; z 为桩基对应深度。

上述公式可写为:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + \frac{bm}{EI} zy = \frac{d^4 y}{dz^4} + \alpha^5 zy = 0 \quad (5)$$

式中: α 为桩基的变形系数,其值为:

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb}{EI}} \quad (6)$$

当桩基桩头承受水平推力 H_0 和水平弯矩 M_0 的情况下,根据式(5)可推导出弹性桩的内力和位移公式,如下:

$$y_z = y_0 A_1 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_1 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_1 \quad (7)$$

$$\varphi_z = \alpha y_0 A_2 + \varphi_0 B_2 + \frac{M_0}{\alpha EI} C_2 + \frac{H_0}{\alpha^2 EI} D_2 \quad (8)$$

$$M_z = \alpha^2 EI (y_0 A_3 - \frac{\varphi_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_3) \quad (9)$$

$$Q_z = \alpha^3 EI (y_0 A_4 - \frac{\varphi_0}{\alpha} B_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_4) \quad (10)$$

$$\sigma_z = \frac{m}{\alpha} z (y_0 A_1 - \frac{\varphi_0}{\alpha} B_1 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_1) \quad (11)$$

式中: y_z 为桩的水平变形位移; φ_z 为桩的转角位移; M_z 为桩截面的弯矩; Q_z 为桩截面的剪力; σ_z 为桩周围的土压力; A 、 B 、 C 、 D 为无量纲系数,可通过查询《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[3]表L.0.8取用。

2 桩基有限元法模拟简介

有限元分析是目前结构设计计算的常用方法。它利用结构材料本身的本构关系和结构自身的边界条件建立结构受力与位移的变形协调方程^[4],求解结构的内力和位移。有限元分析同样适用于桩基计算分析,采用弹性地基梁理论建立桩基有限元模型,将桩基用梁单元模拟,采用土弹簧模拟土对桩基的约束作用。在桩基的有限元建模中,需遵循如下假设条件:

(1)将土体视为线弹性体,土弹簧刚度随深度线

性增加。

(2)同一深度的弹簧刚度为定值,不随桩基位移变化^[5]。

(3)忽略土体对桩基的摩擦力和黏结力等作用。

根据以上假设,土弹簧刚度计算公式如下:

$$K_z = bmzh_z \quad (12)$$

式中: K_z 为深度 z 处的土弹簧刚度; b 为桩基计算宽度; m 为地基反力比例系数; h_z 为深度 z 处的土层厚度。

3 算例简介

本文采用两个算例进行分析对比,分别为单桩模型和群桩模型。算例简介如下:

3.1 算例一

算例一为单桩模型,如图2所示。采用桩径为1.0 m的摩擦钻孔灌注桩基,桩长20 m。桩端处土性为可塑性黏土,取地基反力系数 $m=5\,000\text{ kN/m}^4$ 。桩基的计算宽度 b 按《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[3]L.0.1条计算。经计算, $b=1.8\text{ m}$ 。则由式(12)可计算出桩基各深度处的土弹簧刚度。

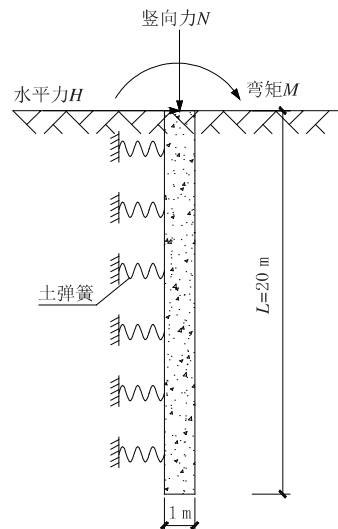


图2 算例一单桩模型图示

桩顶施加竖向力 N 、水平力 H 和弯矩 M ,分别为 $N=1\,000\text{ kN}$, $H=500\text{ kN}$, $M=1\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。其中,弯矩与水平力产生的位移效应同向。

3.2 算例二

算例二为群桩模型,如图3所示。承台为2 m高,承台下设置12根桩径为1.2 m的摩擦钻孔灌注桩基,桩间距均取3.0 m,桩长20 m。桩端处土性为可塑性黏土,取地基反力系数 $m=5\,000\text{ kN/m}^4$ 。桩基的计算宽度 b 按《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[3]L.0.1条计算。经计算, $b=1.386\text{ m}$ 。则由式(12)可计算出桩基各深度处的土弹簧刚度。

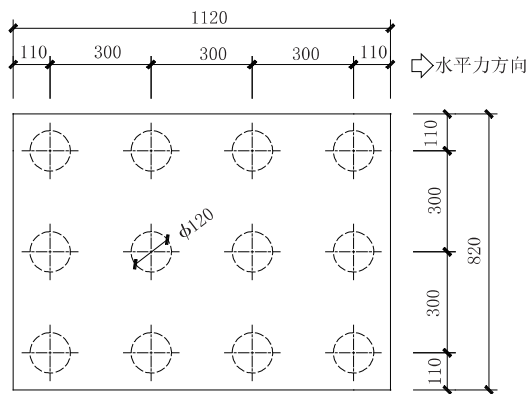


图3 算例二群桩模型桩基平面(单位:cm)

在承台中心施加竖向力 N 、水平力 H 和弯矩 M ,分别为 $N=20\,000\text{ kN}$, $H=1\,000\text{ kN}$, $M=10\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。其中,弯矩与水平力产生的位移效应同向。

4 算例结果对比

采用上节的两个算例进行分析对比,分别采用m法和Midas Civil有限元模型计算桩身的各反应结果,包括桩基水平位移、桩身弯矩、桩身剪力和桩周土应力。

4.1 算例一

单桩模型采用m法计算的桩身各反应结果见表1。

表1 单桩模型m法计算结果

入土深度/m	位移/mm	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	土应力/kPa
0	29.0	1000.0	500.0	0.0
-2	13.7	1748.4	170.4	136.8
-4	4.0	1640.2	-248.7	80.0
-6	-0.3	964.8	-367.8	-7.6
-8	-1.3	323.8	-248.1	-50.2
-10	-1.0	37.1	-57.5	-52.5
-12	-0.9	0.0	0.0	-56.7
-14	-0.9	0.0	0.0	-66.2
-16	-0.9	0.0	0.0	-75.6
-18	-0.9	0.0	0.0	-85.1
-20	-0.9	0.0	0.0	-94.5

单桩模型采用有限元法计算的桩身各反应结果见表2。

单桩模型采用m法和有限元法计算的桩身各反应结果对比如图4~图7所示,最大值差距见表3。

根据以上计算结果,单桩模型中两种方法计算出的桩身各反应结果最大值差距均小于5.0%,且除桩周土应力结果外,其他反应结果趋势较一致。

4.2 算例二

群桩模型采用m法计算的桩身各反应结果见表4。

表2 单桩模型有限元法计算结果

入土深度/m	位移/mm	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	土应力/kPa
0	29.9	1 000.0	500.0	0.0
-2	14.0	1 808.0	55.7	140.2
-4	4.1	1 696.6	-313.3	81.2
-6	-0.3	1 011.1	-358.2	-7.9
-8	-1.1	356.3	-214.5	-45.6
-10	-0.7	8.2	-67.3	-36.9
-12	-0.3	-79.8	6.5	-15.1
-14	0.0	-55.0	20.1	-1.0
-16	0.0	-18.4	10.9	3.1
-18	0.0	-1.8	1.9	2.1
-20	0.0	0.0	0.0	-0.1

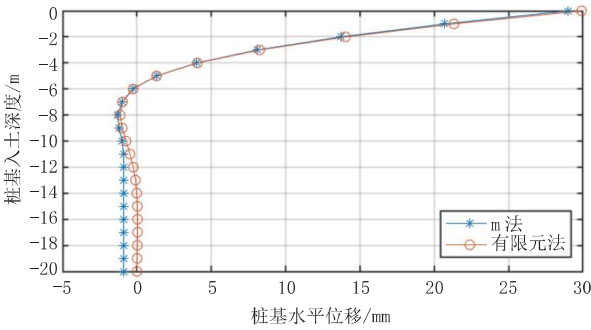


图4 单桩模型桩基位移结果对比(单位:mm)

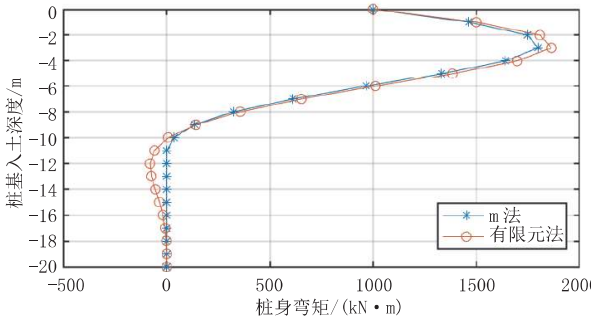


图5 单桩模型桩身弯矩结果对比(单位:kN·m)

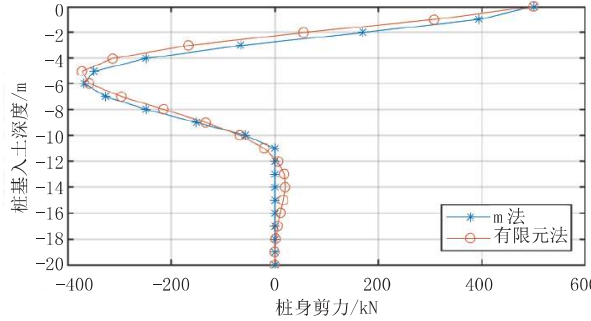


图6 单桩模型桩身剪力结果对比(单位:kN)

群桩模型采用有限元法计算的桩身各反应结果见表5。

群桩模型采用m法和有限元法计算的桩身各反应结果对比如图8~图11所示,最大值差距见表6。

根据以上计算结果,群桩模型中两种方法计算

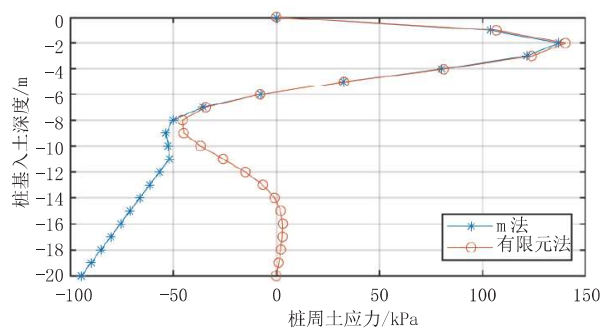


图 7 单桩模型桩周土应力结果对比(单位:kPa)

表 3 单桩模型桩身结果差距分析

方法	位移 max/mm	弯矩 max /(kN·m)	剪力 max/kN	土应力 max/kPa
m 法	29.0	1 748.4	500.0	136.8
有限元法	29.9	1 808.0	500.0	140.2
差距	3.12%	3.41%	-0.00%	2.49%

注:本表结果为桩身各反应结果最大值对比。

表 4 群桩模型 m 法计算结果

入土深度/m	位移/mm	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	土应力/kPa
0	16.9	1 633.4	833.3	0.0
-2	12.0	-101.6	644.4	119.7
-4	6.8	820.7	271.5	136.4
-6	2.9	1 024.6	-44.5	87.5
-8	0.6	752.8	-195.9	25.4
-10	-0.4	346.2	-191.4	-21.6
-12	-0.9	67.3	-77.6	-57.0
-14	-1.1	0.0	0.0	-79.9
-16	-1.1	0.0	0.0	-91.3
-18	-1.1	0.0	0.0	-102.7
-20	-1.1	0.0	0.0	-114.1

表 5 群桩模型有限元法计算结果

入土深度/m	位移/mm	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	土应力/kPa
0	17.3	1 619.6	833.3	0.0
-2	12.1	-55.9	562.8	120.9
-4	6.7	876.3	182.5	134.8
-6	2.8	1 084.2	-89.8	83.1
-8	0.5	834.3	-190.1	21.6
-10	-0.3	455.7	-165.6	-16.5
-12	-0.4	158.6	-94.3	-26.8
-14	-0.3	4.5	-31.2	-20.6
-16	-0.1	-36.7	3.9	-10.0
-18	0.0	-21.7	12.7	-1.1
-20	0.1	0.0	0.0	6.5

出的桩身各反应结果最大值差距均小于 3.0%,且除桩周土应力结果外,其他反应结果趋势较一致。

5 结 论

(1)m 法和有限元法在计算的桩身各反应结果

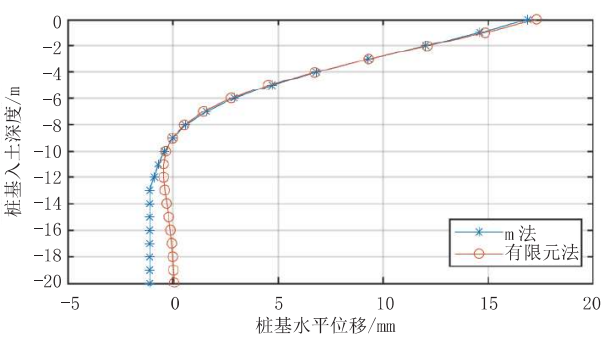


图 8 群桩模型桩基位移结果对比(单位:mm)

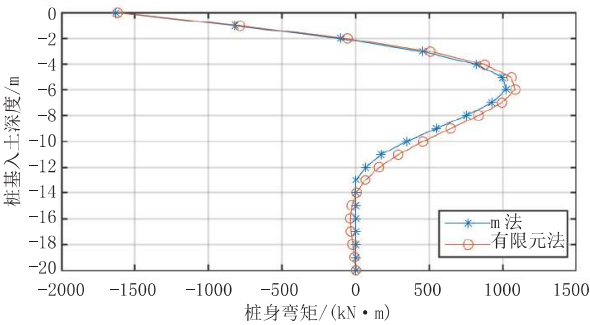


图 9 群桩模型桩身弯矩结果对比(单位:kN·m)

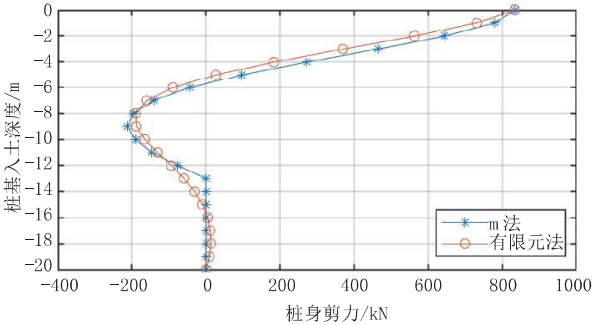


图 10 群桩模型桩身剪力结果对比(单位:kN)

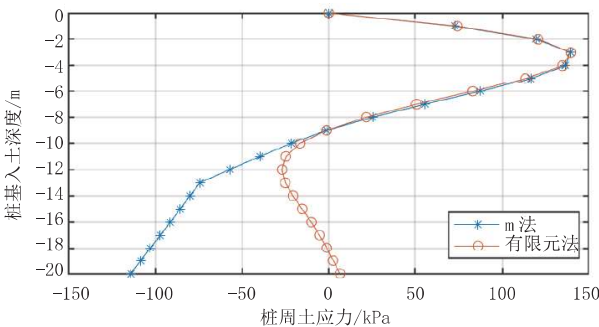


图 11 群桩模型桩周土应力结果对比(单位:kPa)

表 6 群桩模型桩身结果差距分析

方法	位移/mm	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	土应力/kPa
m 法	16.9	-1 633.4	833.3	136.4
有限元法	17.3	-1 619.6	833.3	134.8
误差	2.36%	-0.84%	0.00%	-1.19%

注:本表结果为桩身各反应结果最大值对比。

差距均较小,且除桩周土应力外,其他反应结果趋势基本一致,说明两种方法计算桩身效应均较准确、可靠。

(2)对于桩基水平位移和桩周土应力两项反应结

(下转第 299 页)

3.2 预制立柱

立柱采用预制钢筋混凝土结构,墩柱为矩形断面,横桥向宽 2.0 m,顺桥向宽 2.0 m,高度小于 13 m 整根预制,高度大于 13 m 分两节段预制。

预制立柱和承台之间同样采用灌浆套筒连接,套筒设置在立柱内部,连接构造和要求与盖梁连接部位一致。

两节预制立柱之间采用环氧粘结剂连接。考虑连接部位压应力不小于 0.2 MPa,上节段立柱高度不应小于 8 m,可保证连接段压应力要求。

4 防撞墙预制方案

目前预制防撞墙主要有两种实现方案:边梁带防撞墙一同预制安装和防撞墙分段单独预制现场连接。

两种方式各有利弊。边梁带防撞墙一同预制安装方案无现场连接工作,简单快捷;同时防撞墙和小箱梁一同预制,可以保证防撞墙的线形平顺,外观效果好。但由于边梁带防撞墙预制,不管是制造、存储、运输和安装期间,梁体都存在偏心,需采用有效的固定措施防止梁体倾覆失稳;单片梁重量相比正常增加 40 t 左右,对运输吊装机械设备的要求也会增加。

防撞墙分段单独预制现场连接方案最大的优势在于运输吊装过程灵活简单方便,梁体稳定性好。但现场连接部位需要采用 UHPC 或高强度混凝土,现场

工作量大,线形保持平顺难度大,整体造价也偏高。

综合各方面考虑,本工程选择采用边梁带防撞墙一同预制安装方案,并采取措施保证梁体整个过程中的稳定性。在运输过程中,在靠近中梁一侧采用花篮螺丝拉住,靠近防撞墙一侧则采用支托加以支撑。在吊装过程中设置横吊梁,保证吊装中心与小箱梁质心重合。在小箱梁架设在盖梁之后采用花篮螺丝将边梁内侧端部的预留钢筋与盖梁上的钢绞线吊耳拉紧,同时在盖梁挡块顶部与小箱梁底设置临时加固措施。

5 结 语

预制拼装技术目前已经逐渐大规模地应用在城市高架桥梁中,而且结构型式也丰富多样。设计的关键点在于应该结合现场施工实际,从结构型式、分段位置、连接件选择等各个维度进行比较,选择最合理的设计方案,以达到设计和施工的密切结合,充分发挥装配式桥梁的优势。

参考文献:

- [1] 黄国斌,查义强.上海公路桥梁桥墩预制拼装建造技术[J].上海公路,2014(4):1-5.
- [2] 姜海西,查义强,周良,等.城市桥梁墩柱预制拼装关键技术研究[J].上海建设科技,2016(1):5-7,13.
- [3] 王磊.市政高架桥梁预制盖梁拼接方式对比分析[J].城市道桥与防洪,2020(5):170-171,182.

(上接第 275 页)

果,在桩基入土深度较大时,m法和有限元法计算出的差距较大,且趋势不太一致。这主要是因为m法在计算过程中未准确计算深度 $z \geq 4.0/\alpha$ (对于单桩模型 $z \geq 10.61$ m,群桩模型 $z \geq 12.94$ m)的桩基位移,导致桩基位移计算结果失真;由于桩周土应力 $\sigma_z = mzy_z$,进而m法桩周土应力计算结果失真。所以,在桩基深度 $z \geq 4.0/\alpha$ 的桩基位移和桩周土应力计算结果应以有限元法计算为准。

(3)在桩基计算有限元建模过程中,应注意需将桩基梁单元划分较细,一般桩基梁单元长度应小于

等于 1.0 m 为宜;否则会因为桩头弹簧刚度的模拟不准确导致计算结果与m法相差较大,导致有限元计算结果失真。

参考文献:

- [1] 雷建伟,王盛.按m法计算弹性桩水平位移及作用效应[J].工程建设与设计,2019(12):32-33.
- [2] 史佩栋.桩基工程手册[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [3] JTG 3363—2019,公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [4] 张蕾,李凤丽,张瑞,等.一种地基土水平抗力系数的比例系数m的计算方法[J].自然灾害报,2019(4):202-208.
- [5] 宣有金,魏庆辉.利用m法线性有限元模拟桩基刚度的应用探讨[J].交通建设,2020(7):258-259.