

文章编号: 1674—8247(2022)06—0057—06

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2022. 06. 011

软土地段地基系数的比例系数试验研究

李 雷¹ 钟昌卫² 徐伟宸³ 唐 冕³ 宋旭明³

(1. 中国铁路上海局集团有限公司, 南京 210024;

2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063;

3. 中南大学, 长沙 410075)

摘 要: 高速铁路对桥梁纵向刚度要求严格, 而地基系数的比例系数 m 是影响桥梁刚度的重要参数。为获得设计工点 m 的合理取值, 本文通过现场单桩水平静载试验测试单桩水平承载力、位移和弯矩分布情况, 得到深厚软土地段桩顶位移和桩身应变随水平力的变化规律, 根据理论公式计算出 m 值并用公式进行拟合, 从而给出了桥梁设计中单桩 m 值的建议值, 结果表明: (1) 桩基水平位移随水平力增加呈非线性变化, m 值随桩基地面处位移呈幂函数衰减; (2) 设计工点单桩 m 值为 10 263 ~ 11 554 kPa/m², 与规范取值 (3 000 ~ 5 000 kPa/m²) 相比偏大。本文研究可为类似工程提供参考。

关键词: 软土地区; 地基系数的比例系数; 水平静载; 试验研究

中图分类号: TU471⁺. 8

文献标识码: A

Experimental Study on Proportionality Coefficient of Foundation Coefficient in Soft Soil Section

LI Lei¹ ZHONG Changwei² XU Weichen³ TANG Mian³ SONG Xuming³

(1. China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

2. China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China;

3. Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: High-speed railways have strict requirements on the longitudinal and transverse stiffness of bridges, and the proportionality coefficient m of the foundation coefficient is an important parameter affecting the stiffness of bridges. In order to obtain a reasonable value of m at the design site, the horizontal bearing capacity, displacement, and bending moment distribution of a single pile are tested in the paper with an on-site single-pile horizontal static test, and the change rules of pile top displacement and pile body strain with horizontal force in deep and thick soft soil sections are obtained. The m value is calculated according to the theoretical formula and fitted with the formula, thus the recommended value of m for a single pile in bridge design. The results show that: (1) The horizontal displacement of the pile foundation changes nonlinearly with the increase of horizontal force, and the value of m attenuates with the displacement at the pile foundation surface as a power function. (2) The m value of a single pile at the design work site is 10 263 ~ 11 554 kPa /m², which is larger than the specification value (3 000 ~ 5 000 kPa /m²). This study can provide

收稿日期: 2021-10-08

作者简介: 李雷 (1985-), 男, 工程师。

引文格式: 李雷, 钟昌卫, 徐伟宸, 等. 软土地段地基系数的比例系数试验研究 [J]. 高速铁路技术, 2022, 13 (6): 57-62.

LI Lei, ZHONG Changwei, XU Weichen, et al. Experimental Study on Proportionality Coefficient of Foundation Coefficient in Soft Soil Section [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13 (6): 57-62.

a reference for the design site and subsequent similar projects.

Key words: soft soil area; proportionality coefficient of foundation coefficient; horizontal static load; experimental study

高速铁路桥梁对桥墩刚度要求较高, TB 10015-2012《铁路无缝线路设计规范》^[1]对不同结构形式下铁路桥梁墩台顶最小纵向水平线刚度给出了限值。目前,设计中采用文克尔弹性地基梁模型时多选用“m法”计算桩基内力和变形。作为影响桥墩刚度的重要参数,软土地层中桩侧土 m 值与土的性质、桩的弹性特征、直径、刚度及荷载大小等因素有关。开展对深厚软土地段地基系数的比例系数研究可为软土地段桥梁工程的设计施工提供有效指导^[2-3]。

国内外众多学者对地基系数的比例系数开展过大量研究,主要包括:王旭东等^[4]提出一种基于弹性抗力法的地基土水平抗力系数的比例系数 m 值的反分析方法,根据基坑施工监测资料,用非线性单纯形方法反演地基土的 m 值;李俊等^[5]根据动力触探击数得到土层的变形模量,进而计算地基系数的比例系数;Finno 将反分析软件 Ucode 与岩土工程有限元软件 Plaxis 结合,对支护开挖模拟中的硬化土(H-S)模型计算参数进行反分析^[6];楼晓明等^[7]在地表处相同的桩身容许位移条件下将“p-y 曲线法”与“m 法”对接,建立了地基不排水抗剪强度 c_u 沿深度线性增长和不随深度变化两种基本模式下饱和粘性土中地基比例系数 m 值与 c_u 、桩径 d 等指标的相关关系;张蕾等^[8]提出一种通过模型试验实测数据反算地基土 m 值的方法,即先假定 m 值计算出桩在地面处水平位移理论值,而后与试验实测值对比并进行调整,直至假定值计算结果与实测值误差在可接受范围内;郭海强等^[9](2019)对各行业标准及专著进行了系统性梳理,总结出 4 类地基比例系数 m 值,并以桩板墙结构为例对比了 4 类地基比例系数 m 值计算出的锚固段长度。

TB 10093-2017《铁路桥涵地基和基础设计规范》^[10]表 D.0.2-1 给出了流塑黏性土、淤泥的 m 值为 3 000~5 000 kPa/m²,取值范围较大。在目前的设计工作中,流塑黏性土、淤泥土层中 m 的取值多为 1 000~1 500 kPa/m²。规范给出的取值是否符合工点的实际情况,在单桩和群桩计算过程中适用性如何值得进行深入研究。本文以江苏南沿江城际铁路为依托,开展软土地区 m 值的试验研究,验证《铁路桥涵地基和基础设计规范》中 m 值的适用性,通过在依托工程中的应用,有效节约工程投资,提高工程质量。本文的研究成果可供今后类似场地桥梁借鉴参考,并促进相关设计及施工规范的形成。

1 单桩地基系数的比例系数 m 值计算方法

单桩的水平受荷计算方法可分为极限地基反力法、弹性理论法和复合地基反力法。作为弹性理论法中的重要组成部分,弹性地基反力法可分为线弹性地基反力法和非线弹性地基反力法。弹性地基反力法只适用于水平位移较小的桩的计算,不适用于本试验。

线弹性地基反力法是目前应用较为广泛的桩基础内力计算方法,该方法将桩周土离散为一系列独立的弹簧,然后根据弹性地基欧拉-伯努利梁的挠曲线微分方程来求解桩的变形和内力,其计算为:

$$\begin{aligned} EI \frac{d^4 x}{dz^4} + p(z, x) &= 0 \\ p(z, x) &= kbx^l \\ k &= m(z_0 + z)^n \end{aligned} \quad (1)$$

式中: p ——土作用于桩上的水平抗力;

b ——桩的宽度或桩径;

l ——指数。 l 的取值与桩身水平位移的大小有关,当 $l=1$ 时为线弹性地基反力法,当 $l \neq 1$ 时为非线弹性地基反力法。

k ——地基反力系数;

z_0 ——地面处的当量深度,反映地表处土抵抗侧向变形的能力;

z ——地面以下桩基的埋深;

m ——比例系数;

n ——指数;

x ——桩体的水平位移。

地基反力系数 k 值的大小与分布将直接影响挠曲线微分方程的求解和桩基截面内力计算。基于 k 的分布所作的假定不同可区分为不同的桩基内力计算方法,如张九龄法、 K 法、 c 法和 m 法。 m 法假定地基反力系数随深度按线性增加(即 $k = mz$),能较好地反映地基系数沿深度分布的情况,计算比较方便,是目前我国铁路设计规范所采用的方法。

通过水平静载试验计算桩基 m 值是获得工点土层 m 值的有效手段。该实验一般是对入土深度为 Z 的完全埋置桩桩头施加水平力 H_0 并测得相应的桩头水平位移 x_0 ,然后按式(2)反算求出基础的变形系数 α 值。

$$x_0 = \frac{H_0 A_0}{\alpha^3 EI} \quad (2)$$

式中: A_0 ——无量纲的位移参数。

变形系数 α 值与 m 值的关系为:

$$\alpha = \left(\frac{mb_0}{EI} \right)^{1/5} \quad (3)$$

式中: E_I ——桩基抗弯刚度;

b_0 ——桩基计算宽度。

当以静载试验中的临界荷载 H_{cr} 和其对应的水平位移 x_{cr} 为反算依据时,地基系数的比例系数 m 值为:

$$m = \frac{\left(v_x \times \frac{H_{cr}}{x_{cr}} \right)^{5/3}}{b_0 (EI)^{2/3}} \quad (4)$$

式中: v_x ——桩顶水平位移系数;

H_{cr} ——作用于地面的水平力;

X_{cr} ——水平力作用点的水平位移。

2 单桩地基系数的比例系数 m 值试验方法

2.1 试验工点概况

依据工程实际情况, m 值测定的试验工点选择在江苏南沿江城际铁路常州至太仓段(白茆河特大桥) 31号~33号桥墩。单桩共两根(Z1、Z2), 分别设置在31号~32号墩以及32号~33号墩中间, 距离32号墩均为16 m。该区段铁路为32 m简支梁, 墩高12.35 m~13.85 m, 桩基础采用8根 $\phi 1.0$ m的钻孔灌注桩, 31号墩桩长64.0 m, 32号墩桩长66.5 m, 33号墩桩长66.0 m。桩基、承台采用C30混凝土, 墩身采用C35混凝土, 在31号~33号墩之间布置试验单桩及基准桩。

每个试验桩沿桩身设置7个应力测点截面, 应力测点截面如图1所示, 监测设备采用JMZX-215HAT应变计, 布置在桩基纵向钢筋上。

勘察报告揭示区内地层均为第四系松散堆积层, 总厚度大于90 m, 以第四系全新统及上更新统冲海积、海积黏性土、粉性土及砂类土为主。依据成因时代、岩土力学性质, 地基土自上而下分别为: 粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉质黏土、粉土、细砂、粉质黏土、粉和细砂。

2.2 试验过程

根据场地地质状况, 采用TB 10093-2017《铁路桥涵地基和基础设计规范》附录D的计算方法对单桩试验进行计算, 结果表明, 当桩顶施加336 kN水平荷载时, 桩顶位移达到40 mm, 因此, 将330 kN作为

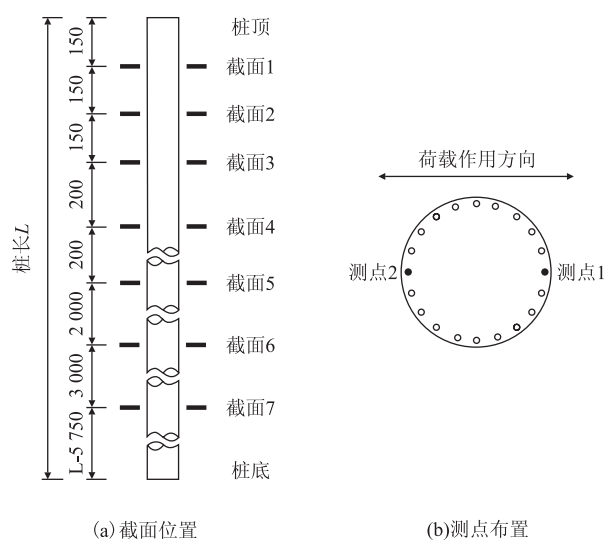


图1 桩身应力测点图(cm)

预估的水平极限承载力。试验时按Z2单桩、Z1单桩的顺序进行分级加载, 桩身折断或桩顶水平位移超过40 mm时终止试验。

试验前在32号桥墩下部标高为2.5 m和3.8 m位置预留 $\phi 10$ cm加载孔; 在31号~32号墩之间的试验单桩(Z1)在标高为2.5 m位置设置加载孔; 32号~33号墩之间的试验单桩(Z2)在标高为3.8 m位置设置加载孔。单桩与铁路桥墩之间布设1根7 $\phi 15.20$ 钢绞线进行加载, 并通过设置在基准梁上的大量程百分表测量桩的水平位移。固定百分表的基准桩布置在试桩侧面靠位移的反方向, 与试桩的净距在2.5 m以上。每根试桩在力的作用水平面上和在该平面以上左右侧各安装2只百分表。

试验设备与仪表装置如图2所示。

采用慢速维持荷载法, 具体分级为: Z1单桩: 60 kN、130 kN、230 kN、360 kN、500 kN、580 kN; Z2单桩: 50 kN、130 kN、220 kN、300 kN、330 kN。每级荷载施加后, 第5分钟、10分钟、15分钟时各测读1次, 以后每隔15 min读1次, 累计1 h后, 每隔0.5 h测读1次。每级荷载下, 桩基水平位移连续两次在每小时内小于0.1 mm时视为稳定。单桩试验终止时, Z1和Z2单桩均已折断。单桩破坏时试桩发出断裂声, 桩帽与桩身产生较大裂缝, 测力传感器读数不断下降。

3 试验结果及数据分析

桩身在地面处的水平力-位移($H_0 - x_0$)、水平力-位移梯度($H_0 - \Delta x_0 / \Delta H_0$)曲线和弯矩沿桩身分布曲线如图3所示。

由图3可知, 桩基位移与荷载表现出明显的非线性

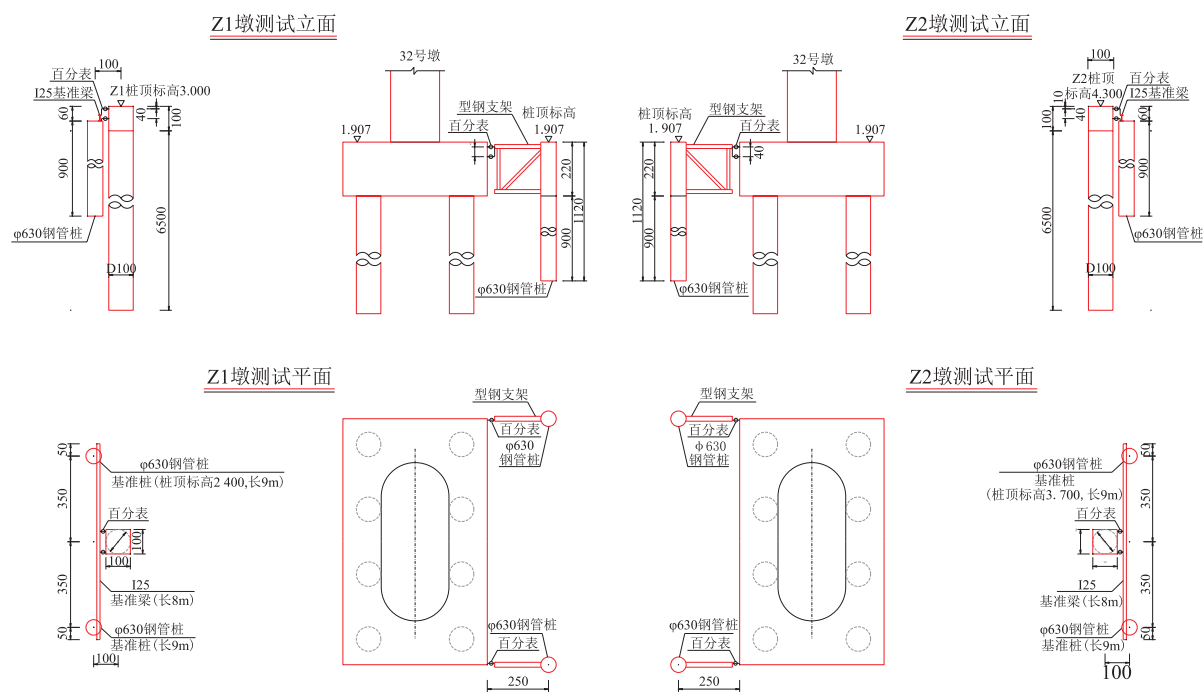


图2 试验测试装置图(cm)

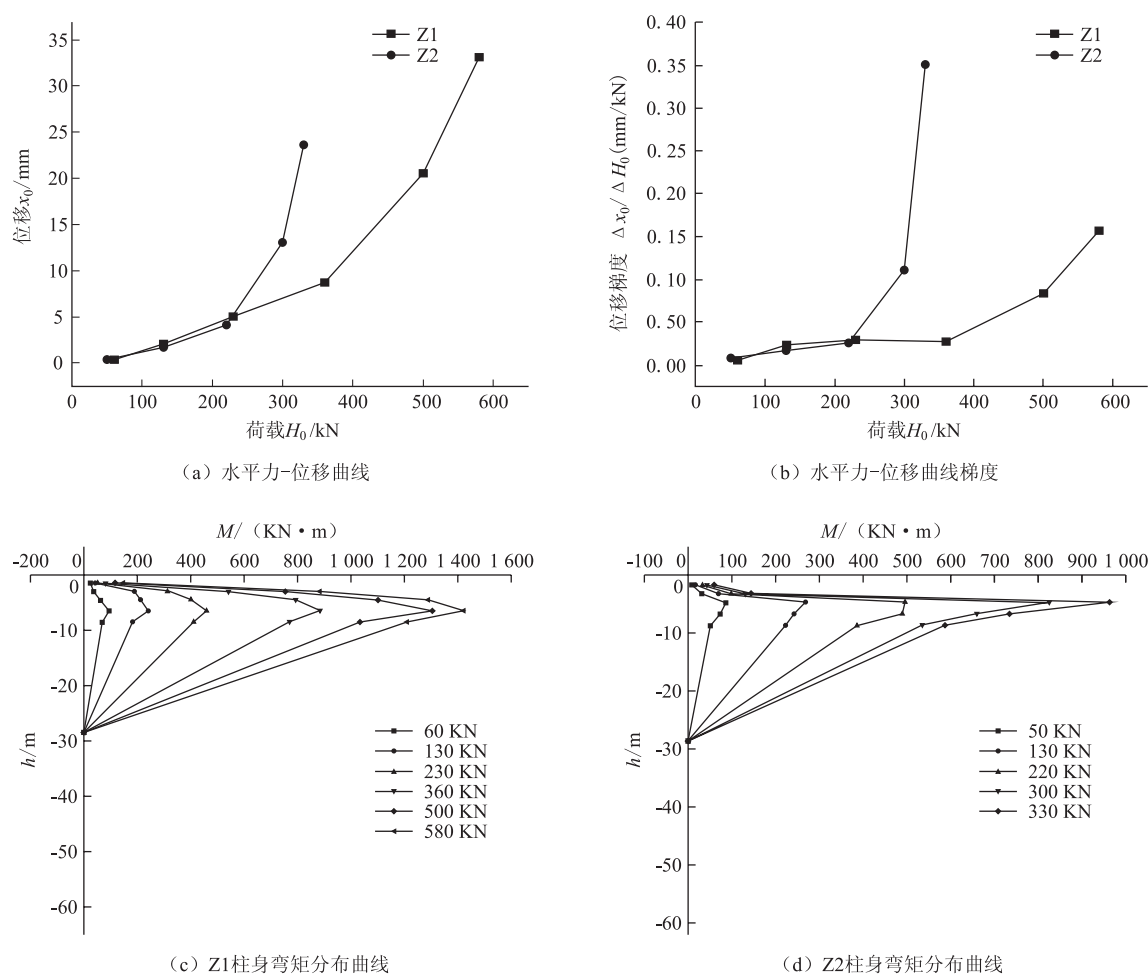


图3 桩顶位移及桩身弯矩分布图

性,桩身弯矩在桩顶以下6 m位置处达到最大值,随后迅速减小。桩基临界荷载可取水平力-位移曲线出现拐点的前一级荷载或水平力-位移梯度曲线第一拐点所对应的荷载;极限荷载可取水平力-位移曲线发生明显陡降的起始点所对应的荷载或水平力-位移梯度曲线第二拐点所对应的荷载。由此可知,Z1桩的临界荷载为360 kN,极限荷载为500 kN;Z2单桩的临界荷载为220 kN,极限荷载为300 kN。除施工质量、桩侧土体性质差异等原因外,Z2单桩试验时,桩顶区域有部分钢筋裸露、5根钢筋缺失,从而导致两个单桩承载力出现较大差别。

根据不同荷载作用下的桩基位移,按式(4)计算得到 m 值,两个单桩的位移- m 值曲线如图4所示。

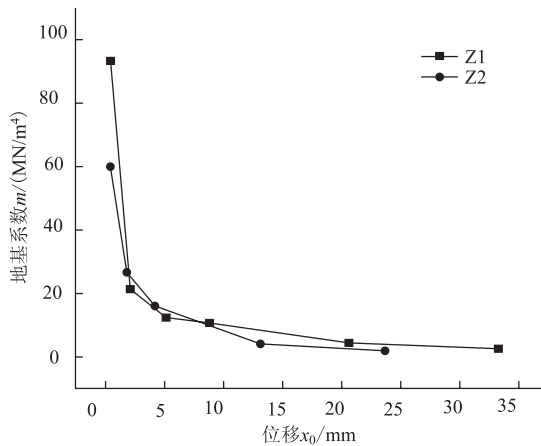


图4 单桩 m 值-位移曲线图

由图4可知, m 值与桩身水平位移呈非线性关系,低荷载下 m 值较大;随着荷载的增加,桩侧土的塑性区逐渐扩展, m 值随之降低。既有文献表明^[8-9],大位移下 m 值随桩基在地面处位移增大而呈幂函数衰减。采用式(5)所示幂函数将试验结果进行拟合,拟合相关参数如表3所示,得到的桩基水平位移- m 值曲线如图5所示。

$$m(x_0) = ax_0^b$$

(5)

式中: a 、 b ——拟合参数。

表3 单桩静载试验 m 值拟合参数表

参数	a	b	R^2	6 mm位移时对应的 m 值/(MN/m ²)
Z1桩	44.124	- 0.814	0.997	10.263
Z2桩	35.853	- 0.632	0.988	11.554

由表3和图5可知,拟合曲线的相关系数均在0.98以上。《铁路桥涵地基和基础设计规范》中 m 值适用于地面水平位移不大于6 mm的

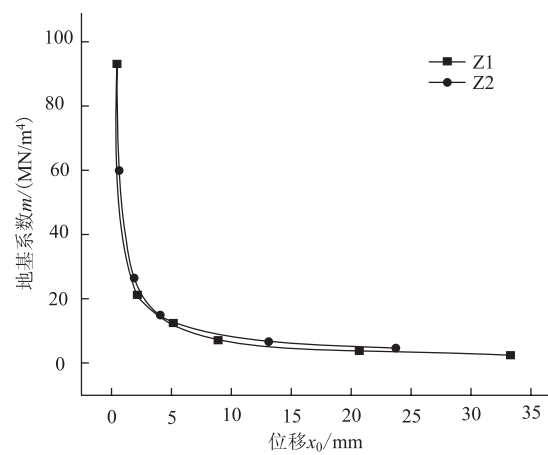


图5 单桩 m 值-位移拟合曲线表

情况,将地面水平位移6 mm代入式(5),得 m 值为10 263~11 554 kPa/m²,与规范取值(3 000~5 000 kPa/m²)相比偏大。研究结果表明,由于群桩基础中的各桩基通过桩间土相互作用产生群桩效应,使得在相同水平荷载作用下(群桩基础的单桩水平荷载为群桩水平荷载与桩数之比),群桩基础的位移大于单桩位移,因此,求得的群桩基础 m 值将小于单桩。设计规范的 m 值需兼顾群桩和单桩,其取值应偏于保守。

4 结论

本文根据试验场地的实际情况,通过对单桩进行试验和计算分析,得到了软土地段桩基位移与地基系数的比例系数之间的关系,得出主要结论如下:

- (1) 桩基位移与荷载表现出明显的非线性,桩身弯矩在桩顶以下6 m位置处达到最大值,随后迅速减小。Z1桩的临界荷载为360 kN,极限荷载为500 kN;Z2单桩的临界荷载为220 kN,极限荷载为300 kN。
- (2) 地基系数的比例系数 m 值与桩身水平位移呈非线性关系,低荷载下 m 值较大;随荷载增加,桩侧土的塑性区逐渐扩展, m 值随之降低。 m 值与地面处位移的关系可采用幂函数进行拟合。

(3) 地面位移6 mm时试验工点的单桩 m 值为10 263~11 554 kPa/m²,与规范取值(3 000~5 000 kPa/m²)相比偏大。本文的桩基 m 值计算和试验方法可为类似桥梁工点的试验及设计计算提供参考。

参考文献:

[1] TB 10015-2012 铁路无缝线路设计规范[S].

TB 10015-2012 Code for Design of Railway Continuous Welded Rail [S].

- [2] 高欣梅. 对规范中铁路桥梁桩基计算方法的补充[J]. 高速铁路技术, 2013, 4(3): 58–61.
GAO Xinmei. Supplement to Calculation Method for Bridge Pile Foundation in Railway Code [J]. High Speed Railway Technology, 2013, 4(3): 58–61.
- [3] 孟繁增. 临近地面荷载对桩基础竖向位移影响的简化计算[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(1): 29–33.
MENG Fanzeng. A Simplified Calculation to Analyze Effect of Short-Distance Ground Loading on Vertical Deformation of Pile Foundation [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(1): 29–33.
- [4] 王旭东, 黄力平, 阮永平, 徐建龙. 基坑工程中地基土水平抗力比例系数 m 值的反分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 1998(2): 48–54.
WANG Xudong, HUANG Liping, RUAN Yongping, et al. Back Analysing m Value of Subgrade Reaction in Excavation [J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1998(2): 48–54.
- [5] 李俊, 强士中, 李小珍. 地基系数的比例系数 m 的确定[J]. 铁道标准设计, 2004, 48(11): 83–85.
LI Jun, QIANG Shizhong, LI Xiaozhen. Determination of Proportion Coefficient m of Foundation Coefficient [J]. Railway Standard Design, 2004, 48(11): 83–85.
- [6] Finnó Richard J. Supported Excavations. Observational Method and Inverse Modeling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(7): 826–836.
- [7] 楼晓明, 吴昊, 黄江枫. 基于 $p-y$ 曲线确定饱和黏性土地基比例系数[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2206–2212.
LOU Xiaoming, WU Hao, HUANG Jiangfeng. Determination of Slope Coefficient of Subgrade Reaction of Saturated Clay Based on $P-y$ Curve [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2206–2212.
- [8] 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]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 202–208.
ZHANG Lei, LI Fengli, ZHANG Rui, et al. A Method for Calculating Proportional Coefficient of Horizontal Resistance Coefficient of Foundation Soil [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(4): 202–208.
- [9] 郭海强, 罗一农, 邱永平, 等. 地基比例系数 m 值对比研究[J]. 路基工程, 2019(4): 1–6.
GUO Haiqiang, LUO Yinong, QIU Yongping, et al. Contrastive Study on m Value of Proportional Coefficient of Foundation Coefficient [J]. Subgrade Engineering, 2019(4): 1–6.
- [10] TB 10093–2017 铁路桥涵地基和基础设计规范[S].
TB 10093–2017 Code for Design on Subsoil and Foundation of Railway Bridge and Culvert [S].

(上接第16页)

- Engineering, 2021, 17(2): 511–519.
- [9] 张广泽, 邓建辉, 王栋, 等. 隧道围岩构造软岩大变形发生机理及分级方法[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 1–12.
ZHANG Guangze, DENG Jianhui, WANG Dong, et al. Mechanism and Classification of Tectonic-Induced Large Deformation of Soft Rock Tunnels [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1): 1–12.
- [10] 于景飞, 周文朋, 许有俊. 软弱围岩大变形治理措施有效性分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(33): 307–312.
YU Jingfei, ZHOU Wenpeng, XU Youjun. Analysis on Effectiveness of Treatment Measures of Large Deformation of Weak Surrounding Rock [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(33): 307–312.
- [11] 廖俊. 毛羽山隧道软岩大变形特征及原因分析[J]. 铁道建筑, 2013, 53(8): 79–81.
LIAO Jun. Characteristics of Large Deformation of Soft Rock and Causes Analysis on the Maoyushan Tunnel [J]. Railway Engineering, 2013, 53(8): 79–81.
- [12] 杨星智. 大梁隧道大变形发生机理及特性分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 813–819.
YANG Xingzhi. Analysis on Mechanism and Characteristics of Large Deformation in Daliang Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 813–819.
- [13] 李国良, 李宁. 挤压性围岩隧道若干基本问题探讨[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1): 1–6.
LI Guoliang, LI Ning. Discussion of Tunnelling in Squeezed Surrounding Rock [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(1): 1–6.
- [14] 吕显福, 赵占群, 魏星星. 高地应力软岩隧道大变形机理及控制措施探讨: 以木寨岭隧道为例[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 227–231.
LV Xianfu, ZHAO Zhanqun, WEI Xingxing. Discussion of the Large Deformation Mechanism and Control Measures for a Soft Rock Tunnel under High Ground Stress: a Case Study of the Muzhailing Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 227–231.
- [15] 陈建勋, 陈丽俊, 罗彦斌, 等. 大跨度绿泥石片岩隧道大变形机理与控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 93–106.
CHEN Jianxun, CHEN Lijun, LUO Yanbin, et al. Mechanism and Control Method of Large Deformation for Large-Span Chlorite Schist Tunnel [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 93–106.