

DOI: 10.11779/CJGE2021S2048

软土地区桩基横向抗力系数的精细化取值研究

张俊云, 张乐, 冯君

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: m 法是横向受荷桩桩身变形和内力分析的一种常用方法。在没有试桩的条件下, m 法中横向抗力系数的比例系数 m 值只能根据地基土的类型等从规范推荐的较大范围内取值, 对工程经验依赖性强, 具有较大的随机性。将沪通铁路沿线主要软土按压缩特性分为 11 亚类, 通过有限元模拟分析了水平力 H 、泥面(桩顶)水平位移和土体压缩指数 C_c 等对 m 值的影响作用; 经统计分析建立了 m 值与 Y_0 、 C_c 间的拟合关系式, 并以现场水平静载试验对其进行校核验证。结果表明: m 值随 H 、 Y_0 和 C_c 的增大而减小, 且衰减速度不断减小; 桩径 D 对 m 值有一定影响, 现有桩径水平中 $D=1.25$ m 最佳; 现场试验修正后的 m 值拟合关系计算可靠, 且能依据土体变形参数精细化取值。

关键词: 软土地区; 桩基; m 值; 精细化取值; 拟合关系式

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0202-06

作者简介: 张俊云(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土力学与基础工程方面的教学和科研。E-mail: zjy74@126.com。

Refined value of lateral resistance coefficient of pile foundation in soft soil areas

ZHANG Jun-yun, ZHANG Le, FENG Jun

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The m method is a common method to analyze the deformation and internal force of laterally loaded piles. In the absence of test piles, the ratio coefficient m value of lateral resistance coefficient in the m method can only be taken from a wide range recommended by the relevant code according to the type of foundation soil, etc., highly dependent on engineering experience and random. Main soft soils along Shanghai-Nantong Railway are classified into 11 subcategories according to the compression characteristics. The influences of horizontal force H , horizontal displacement Y_0 of mud surface (pile top), pile diameter D and soil compression index C_c on m value are analyzed through the numerical test method. The fitting relation between m and C_c and the relation between m and Y_0 are established through statistical analysis, and are verified by the field horizontal static load tests. The results show that the m value decreases with H , Y_0 and C_c , and the attenuation speed decreases continuously. D has a certain influence on the m value, corresponding to the best diameter of pile $D=1.25$ m. The fitting formula for m value corrected by the field tests is reliable and can be fine-tuned according to the deformation parameters of soils.

Key words: soft soil area; pile foundation; m value; refined value; fitting formula

0 引言

软土具有低强度、高压缩性等特征, 且广泛分布于中国沿海地区。修建于软土地区的桥梁桩基在水平荷载作用下具有非常复杂的桩土相互作用, 弹性地基反力 m 法因图示简单, 计算简便等优势成为分析该问题的常用方法之一^[1-3]。 m 法中横向抗力系数的比例系数 m 值直接决定了计算结果的正确与否, 其确定途径主要为水平静载试验测定或按规范推荐取值, 但现场试验耗时长, 成本高; 规范则均是根据地基土的类别给出较大取值范围^[4]。大量工程实践表明, 同一类土的 m 值并不固定, 荷载水平, 允许位移和桩型、桩径等对其均有影响^[5]。因此, 如何结合工程实际获取 m 值成为研究者们所关注的问题。

戴自航等^[6]证明数值模拟应用于多层地基中水平载荷桩的设计计算与分析, 结果可靠且效率更高。劳伟康等^[7]建立了 m 值与泥面位移 Y_0 的指数关系式, 统计分析了不同土质条件下相当于某一大位移时 m 值的取值范围。吴锋等^[8]认为 m 随 Y_0 增大而呈指数衰减的规律, 建立了 m 值的经验公式; 运用有限元模拟获取了结合桩身节点位移迭代确定 m 值的计算方法。推力桩的综合刚度原理和双参数法能解决单一参数不足以反映复杂工程性质的问题, 但其参数确定需以桩基水平载荷试验为基础^[9]。邓涛等^[10]将地基土体简化为理想弹塑性体, 提出水平受荷单桩的简明弹塑性计算

方法。数值模拟中有限元法在分析 m 值时具有限制条件少、与解析解吻合度高等特点, 现场试验可对其结果进行校正, 以保证研究结论的可靠性^[11-12]。显然, m 值的取值问题虽已有较多研究, 但对现场试验仍存在明显依赖, 且难以通过简单计算获取精确值, 而有限元模拟与现场水平载荷试验相结合的方法在 m 值研究上具有一定优势。

以沪通铁路多座特大桥梁桩基础为背景, 将沿线主要软土按压缩系数的差异分为 11 亚类, 采用三维有限元方法分析了水平力 H 、泥面(桩顶)水平位移 Y_0 和土体压缩指数 C_c 等参数对 m 值的影响, 初步建立软土地区 m 值与横向受荷桩基主要参数间的拟合关系式; 通过单桩水平静载现场试验校正, 获得了能精细化确定 m 值的拟合关系式。该式计算简单且无需进行现场大型试验, 能为沪通铁路沿线软土地区桩基设计提供参照, 便于推广。

1 单桩水平静载试验数值模拟

沪通铁路沿线的主要软土为第四系全新统海积层(Q_4^m)中的淤泥质粉质黏土, 其特征为灰色, 含云母、有机质、夹薄层粉砂, 局部夹有贝壳碎屑。取七浦塘特大桥等 5 处桥址区软土进行室内土工试验。结果表明该层软土的天然含水率均超过 30%, 呈软塑一流塑状态; 压缩系数 a_v 在 $0.28\sim 2.03$ MPa⁻¹, 具有高压缩性; 土样完全扰动后强度大幅降低, 灵敏度高。综上, 该层软土工程性质差, 修建桥梁桩基具有较高难度, 桥址区地层概化如图 1。据此, 可建立相应模型对单桩水平静载试验进行数值模拟分析。

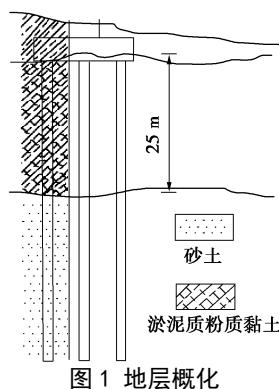


Fig. 1 Stratigraphic generalization

1.1 有限元模型

建模时考虑对称性, 取半结构进行计算, 桩长 37.5 m, 软土层厚 25 m, 下部砂土层厚 39 m, 以消除边界效应对桩的力学性状影响^[13-14]。采用 ABAQUS 中的 C3D8 实体单元离散地基土和桩基, 采用渐变网格划分模式以提高桩基附近应力集中区的计算精度。模型四周采用法向约束, 底部采用三向固定约束, 顶面自

由, 半结构网格模型如图 2。

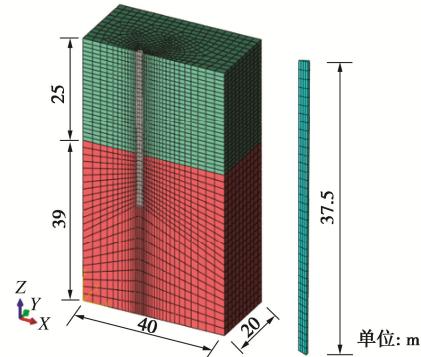


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

室内土工试验揭示出软土压缩系数 a_v 与压缩指数 C_c 之间近似存在的线性相关关系, 这为使用剑桥模型计算分析奠定了基础, 如图 3。修正剑桥模型 (Modified Cam-Clay) 能较好地描述黏性土在破坏前的非线性和依赖于应力水平或路径的变形行为, 能更好地反映实际情况。因此, 本文数值模拟中采用 MCC 模型对软土进行模拟, 合理有效且方便进行^[12]。

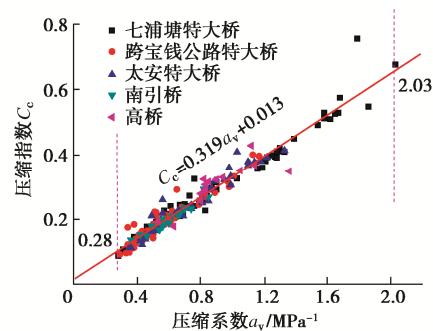


图 3 土样压缩系数 C_c 与压缩指数 a_v 关系

Fig. 3 Relationship between compression coefficient C_c of soil samples and compression index a_v

砂土采用莫尔库仑弹塑性模型模拟。考虑桩土间的张开及滑移力学行为, 桩土界面采用接触面单元模拟, 其法向力学行为服从硬接触模型, 剪切力学行为采用库仑摩擦模型, 即罚函数, 摩擦系数 $\mu=0.27$ 。MCC 模型所需的原始压缩曲线斜率 λ 、回弹曲线斜率 k 和临界状态线的斜率 M 可通过常规三轴试验测定。

1.2 材料参数及 m 值计算

数值模拟中, 软土压缩参数 λ 和回弹参数 k 的比值可取为 $\lambda/k=10^{[15]}$ 。将沿线不同位置处淤泥质粉质黏土按标准压缩系数 a_v 的大小排序后可分为 11 亚类, 依次编号 Mat1~Mat11 见表 1。

根据室内土工试验结果, 确定有限元模型中各材料的物理力学参数如表 2, 3 所示。

取桩基设置前地基土体的应力平衡状态为初始状态, 采用有效重度进行计算。初始地应力场侧压力系数 K_0 取为 0.7, 土体视作正常固结土。桩基浇筑产

表1 沿线主要软土亚类划分

Table 1 Classification of main soft soil subclasses along line

材料编号	压缩系数 a_v /MPa ⁻¹	压缩指数 C_c	压缩参数 λ	回弹参数 k
Mat1	0.280	0.102	0.044	0.0044
Mat2	0.455	0.158	0.069	0.0069
Mat3	0.630	0.214	0.093	0.0093
Mat4	0.805	0.270	0.117	0.0117
Mat5	0.980	0.326	0.142	0.0142
Mat6	1.155	0.381	0.166	0.0166
Mat7	1.330	0.437	0.190	0.0190
Mat8	1.505	0.493	0.214	0.0214
Mat9	1.680	0.549	0.239	0.0239
Mat10	1.855	0.605	0.263	0.0263
Mat11	2.030	0.661	0.287	0.0287

表2 修正剑桥模型参数(软土)

Table 2 Material parameters for MCC (soft soil)

材料	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	初始孔隙比 e_0	CSL 斜率 M	压缩参数 λ
黏土	18.5	1.07	0.566	0.044~0.287

表3 中砂与桩基物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical parameters of medium sand and pile foundation

材料	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	模量 E/MPa	泊松比 ν	摩擦角 φ /($^\circ$)
中砂	20.5	36	0.25	35
桩基	24.0	30000	0.20	—

生的荷载按初始应力状态考虑, 水平力 H 施加于桩顶, 由小到大逐级加载。可求 Mat1~Mat11 亚类软土中桩径分别为 1.00, 1.25, 1.50 m 时的泥面水平位移 Y_0 。绘制水平 H 和 Y_0 与地基土横向抗力系数的比例系数 m 之间的关系曲线后, m 值可按下式计算:

$$m = \frac{(v_y \cdot H)^{5/3}}{b_0 Y_0^{5/3} (EI)^{2/3}} \quad (1)$$

式中 桩身抗弯刚度 EI 取决于桩身材料及截面特性; 桩身计算宽度 b_0 取决于桩径及截面形式, 对于 $D \geq 1.00$ m 的圆形桩, $b_0 = 0.9D + 1$; 桩顶水平位移系数 v_y 需先对桩的换算埋深 αh (h 为桩的入土深度) 按下式进行试算,

$$\alpha = \left(\frac{mb_0}{EI} \right)^{1/5} \quad (2)$$

取值如表 4^[16], 当 $\alpha h < 2.5$ 时, 式 (1) 不再适用。

表4 桩顶水平位移系数 v_y 取值

Table 4 Values of coefficient of horizontal displacement of pile top

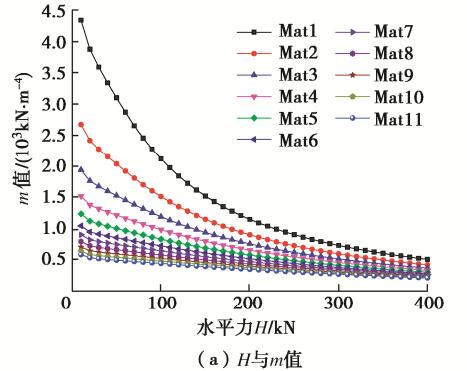
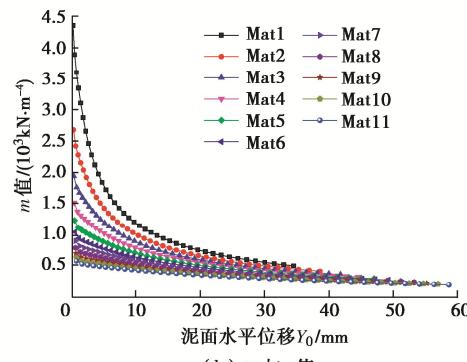
v_y	≥ 4.0	3.5	3.0	2.8	2.6	2.4
v_y	2.441	2.502	2.727	2.905	3.163	3.526

1.3 m 值计算分析

(1) 水平力 H 、泥面水平位移 Y_0 与 m 值的关系

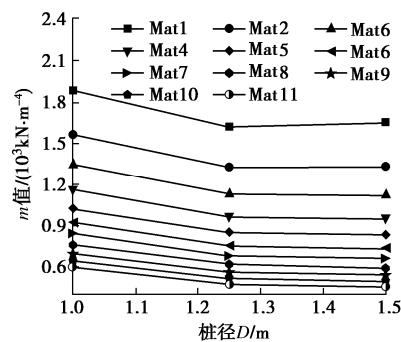
Mat1~Mat11 在不同桩径下 H , Y_0 与 m 值间关系的规律一致, 以桩径 1.25 m 为例, 绘制如图 4。显然,

随 H 及 Y_0 的增大, m 值均减小, 且衰减速度不断减小。与已有研究所得规律一致^[7]。

(a) H 与 m 值(b) Y_0 与 m 值图4 数值模拟结果($D=1.25$ m)

(2) 桩径 D 与 m 值的关系

沪通铁路桥梁桩基的桩径 D 主要为 1.00, 1.25, 1.50 m。以 $Y_0=6$ mm 为例, 绘制 Mat1~Mat11 在 Y_0 一定时 D 与 m 之间的关系如图 5。可知, Mat1~Mat11 的 m 值差异较大, 即土体性质的差异对 m 值有较大影响。结合表 1 可知, D 相同时, 压缩系数 a_v 越大, m 值越小。已有 3 个桩径水平下, 各亚类黏土中 m 值随 D 的增大均呈现先减小后趋稳的规律。

图5 桩径 D 与 m 值关系Fig. 5 Relationship between pile diameter D and m value

(3) 土体性质与 m 值的关系

MCC 模型中, 压缩指数 C_c 为直接相关参数。故以 C_c 为指标分析土体性质与 m 值的关系, 仍以 $Y_0=6$ mm 为例, 如图 6。易知, m 值随 C_c 的增大呈非线性衰减, 且 C_c 较小时, m 值衰减更快。图 6 中 $D=1.25$ m 和 $D=1.50$ m 所对应的曲线几乎重合。根据图 5, 6,

可知 3 个桩径水平中, 取 $D=1.25 \text{ m}$ 来探讨 m 值受各因素的影响最为合理。

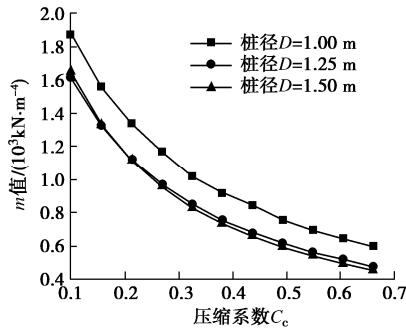


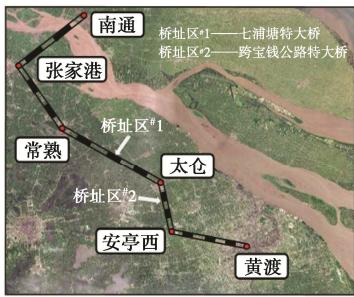
图 6 压缩指数 C_c 与 m 值关系

Fig. 6 Relationship between compression index of soil C_c and m value

综上, m 值的各影响因素中, 水平力 H 、泥面水平位移 Y_0 和压缩指数 C_c 的影响更为显著, 桩径 $D=1.25 \text{ m}$ 时可最大限度地消除桩径影响, H 与 Y_0 间又存在直接关联。因此, m 值的重要影响参数可归为 Y_0 和 C_c 两个, 若能建立这两个因素与 m 值间的定量关系, 则可根据工程实际进行 m 值的精细化取值。

2 单桩水平静载现场试验

为便于后续对 m 值数值分析结果进行修正, 选取七浦塘特大桥#301 和#460 测桩, 跨宝钱公路特大桥#192 和#193 测桩共 4 处桥墩桩基进行单桩水平静载现场试验, 桥址区如图 7。



(a) 桥址区

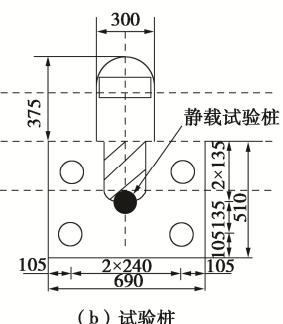


图 7 单桩水平静载现场试验

Fig. 7 Horizontal static load field tests on single pile

现场试验可得 4 根测试桩的 m 值与 H 及 Y_0 之间关系如图 8。可知, 各桩 m 值均随 H 及 Y_0 的增大而减小, 且衰减速率不断减弱, 最终趋于某一临界 m 值,

与数值模拟所得规律相同, 且符合常规认知。

此外, 2 处桥址区地层中的主要特殊土均为第四系全新统海积层 (Q_4^m) 中的淤泥质粉质黏土, 但#2 桥址区测桩的 m 值显著高于 1# 桥址区测桩, 即某片区同类土的实测 m 值存在较大差异, 符合本文研究需求。各测桩曲线吻合度较高, 现场测试数据能够相互印证, 具有一定可靠性和设计参考价值。

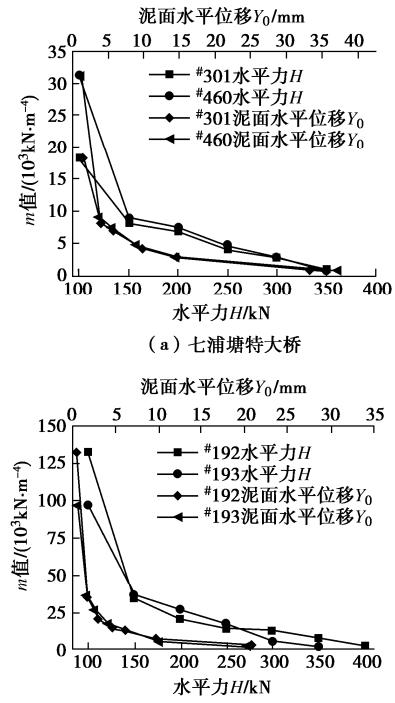


图 8 现场试验结果

Fig. 8 Results of field tests

3 m 值拟合关系式

3.1 m 值关系式拟合

基于数值模拟结果, 取 $Y_0=6 \text{ mm}$, $D=1.25 \text{ m}$ 对应的 m 值在全对数坐标系中进行拟合, 可知 $\lg m$ 与 $\lg C_c$ 间存在线性关系, 如图 9。拟合关系式为

$$\lg m = 2.853 - 0.669 \lg C_c \quad (3)$$

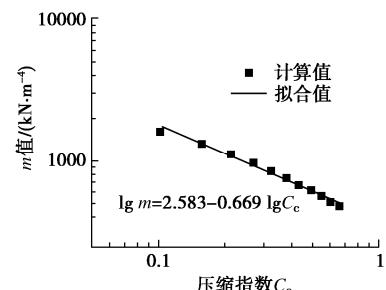


图 9 土体压缩指数 C_c 与 m 值关系

Fig. 9 Relationship between compression index of soil C_c and m value

通过线性内插可得泥面水平位移 Y_0 在特定条件下 Mat1~Mat11 对应的 m 值, 类比 $Y_0=6 \text{ mm}$ 可获取全

对数坐标下 m 值与 C_c 间的拟合关系式。 $Y_0=1 \text{ mm}$ 时, $\lg m = 2.585 - 0.966 \lg C_c$; $Y_0=2 \text{ mm}$ 时, $\lg m = 2.571 - 0.906 \lg C_c$; $Y_0=3 \text{ mm}$ 时, $\lg m = 2.578 - 0.831 \lg C_c$; $Y_0=4 \text{ mm}$ 时, $\lg m = 2.582 - 0.767 \lg C_c$; $Y_0=5 \text{ mm}$ 时, $\lg m = 2.584 - 0.714 \lg C_c$; $Y_0=6 \text{ mm}$ 时, $\lg m = 2.583 - 0.669 \lg C_c$; $Y_0=7 \text{ mm}$ 时, $\lg m = 2.580 - 0.623 \lg C_c$; $Y_0=8 \text{ mm}$ 时, $\lg m = 2.577 - 0.599 \lg C_c$; $Y_0=9 \text{ mm}$ 时, $\lg m = 2.572 - 0.571 \lg C_c$; $Y_0=10 \text{ mm}$ 时, $\lg m = 2.567 - 0.546 \lg C_c$ 。

易知, 特定 Y_0 条件下 m 值与 C_c 间的拟合关系式可统一表达为 $y=a-b\cdot x$ 的形式,

$$\lg m = a - b \cdot \lg C_c \quad (4)$$

为便于应用, 可将 Y_0 置于式 (4) 中, 即建立 m 值与 C_c 和 Y_0 间的统一表达式。分别绘制式 (4) 中系数 a 、 b 与 Y_0 间的关系曲线如图 10。显然, a 的取值较为固定, 受 Y_0 影响可忽略, 拟合关系式中可将 a 值取为平均值, 即 $\bar{a}=2.578$ 。系数 b 随 Y_0 的增大而减小, 采用指数形式拟合可得 b 与 Y_0 间的关系为

$$b = 0.371 + 0.692 e^{-0.138 Y_0} \quad (5)$$

综上, 可得 m 值与 C_c 、 Y_0 间的统一关系为

$$\lg m = 2.578 - (0.371 + 0.692 e^{-0.138 Y_0}) \lg C_c \quad (6)$$

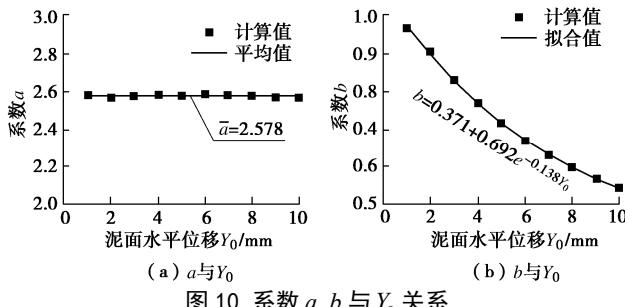


Fig. 10 Relationship among coefficient a , b and Y_0

3.2 m 值拟合关系式修正

对比现场试验结果发现, 式 (6) 计算所得 m 值明显小于规范推荐值, 如 $Y_0=6 \text{ mm}$ 时, 规范^[17]推荐 m 值取值范围为 $3000 \sim 5000 \text{ kN/m}^4$, 式 (6) 计算结果约 $500 \sim 1500 \text{ kN/m}^4$ 。前文可知, 本文数值建模方法合理有效, 故应为模型采用的扰动土体参数与现场原状土体参数之间存在差异导致的拟合关系式计算值偏小。根据单桩水平静载现场试验对式 (6) 修正, 可解决这一问题。修正后的 m 值拟合关系式为

$$\lg m = 10.311 - (1.483 + 2.769 e^{-0.138 Y_0}) \lg C_c \quad (7)$$

式中, 泥面水平位移 Y_0 可按设计要求的水平允许位移拟定, 压缩指数 C_c 由土样的无侧限压缩试验测定。

修正后 4 测试桩现场试验实测值与式 (7) 计算值对比如图 11。显然, 式 (7) 计算值与实测值吻合度较高。

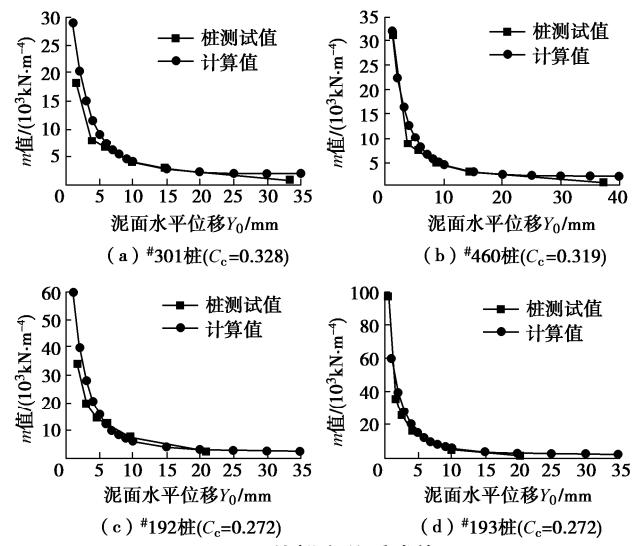


Fig. 11 Correction of modified formula for m value

4 拟合关系式的验证

式 (7) 具有可根据土体变形参数精细化确定 m 值的优势, 且各参数可通过较简单方法获取, 无需进行大规模的现场试验。为进一步验证式 (7) 在实际工程应用中的适用性, 以沪通铁路沿线软土 Mat4~Mat11 为例, 按式 (7) 计算其在 $Y_0 \subseteq [1, 10] \text{ (mm)}$ 时相应的 m 值, 如图 12。可知, 式 (7) 计算值较好地包含于规范推荐区间内, 即修正后的 m 值拟合关系式合理有效。

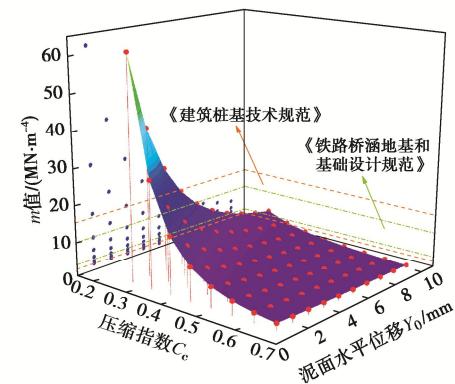


Fig. 12 Verification of modified formula for m value

Fig. 12 Verification of modified formula for m value

5 结 论

(1) 随着水平力 H 以及水平位移 Y_0 的增大, m 值呈非线性规律衰减, H 或 Y_0 越小, m 值越敏感; 桩径 D 的变化对 m 值有一定影响; 土体性质对 m 值影响显著, 土体压缩指数 C_c 越大, m 值越小。

(2) m 值与土体压缩指数 C_c 以及泥面水平位移 Y_0 之间存在拟合关系式, 根据现场单桩水平静载试验结果对拟合式进行校正, 最终得到可根据土体变形参

数精细化确定 m 值的拟合关系式。式中参数易于获得, 所得计算值基本分布于规范推荐范围, 可为沿线地区软土基础工程的 m 值精细化提供途径, 其他软土区亦可按此方法建立相应的拟合关系式。

参考文献:

- [1] 姚文娟, 吴怀睿, 程泽坤, 等. 基于 $p-y$ 曲线法的超长桩非线性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1683–1690. (YAO Wen-juan, WU Huai-rui, CHENG Ze-kun, et al. Nonlinear numerical analysis of super-long piles based on $p-y$ curves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1683–1690. (in Chinese))
- [2] RAO S N, RAMAKRISHNA V G S T, RAO M B. Influence of rigidity on laterally loaded pile groups in marine clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(6): 542–549.
- [3] LI Wei, CHEN Fa-bo, XU Xue-yong, et al. Comparative study of pile-soil interaction analysis methods[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 170/171/172/173: 246–251.
- [4] WANG J P, SU J B, WU F, et al. Lateral dynamic load tests of offshore piles based using the m -method[J]. Ocean Engineering, 2021, 220: 108413.
- [5] 刘陕南, 侯胜男, 蔡忠祥. m 法计算单桩水平承载力在上海地区的适用性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 721–724. (LIU Shan-nan, HOU Sheng-nan, CAI Zhong-xiang. Applicability of m -method for horizontal bearing capacity of single pile in Shanghai area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 721–724. (in Chinese))
- [6] 戴自航, 陈林靖. 多层地基中水平荷载桩计算 m 法的两种数值解[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 690–696. (DAI Zi-hang, CHEN Lin-jing. Two numerical solutions of laterally loaded piles installed in multi-layered soils by m method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 690–696. (in Chinese))
- [7] 劳伟康, 周治国, 周立运. 水平推力桩在大位移情况下 m 值的确定[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 192–196. (LAO Wei-kang, ZHOU Zhi-guo, ZHOU Li-yun. Analysis of m value for lateral loaded pile under large deflection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 192–196. (in Chinese))
- [8] 吴 钢, 时蓓玲, 卓 杨. 水平受荷桩非线性 m 法研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1398–1401. (WU Feng, SHI Bei-ling, ZHUO Yang. Nonlinear m method for piles under lateral load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1398–1401. (in Chinese))
- [9] 戴自航, 王云凤, 卢才金. 水平荷载单桩计算的综合刚度和双参数法杆系有限元数值解[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2115–2123. (DAI Zi-hang, WANG Yun-feng, LU Cai-jin. Numerical solution of link finite element based on composite stiffness and bi-parameter method for computation of laterally loaded single pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2115–2123. (in Chinese))
- [10] 邓 涛, 林聪煜, 柳志鹏, 等. 大位移条件下水平受荷单桩的简明弹塑性计算方法[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 95–102. (DENG Tao, LIN Cong-yu, LIU Zhi-peng, et al. A simplified elastoplastic method for laterally loaded single pile with large displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 95–102. (in Chinese))
- [11] YU G M, GONG W M, LIU Y C, et al. Lateral capacity of pile with grouted upper soil: field test and numerical simulation[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2017, 3(1): 1–9.
- [12] 冯 君, 张俊云, 朱 明, 等. 软土地层高承台桥梁群桩基础横向承载特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 94–104. (FENG Jun, ZHANG Jun-yun, ZHU Ming, et al. Characteristic study of horizontal bearing capacity and pile group effect coefficient of laterally loaded high pile group foundation for bridge in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 94–104. (in Chinese))
- [13] KARTHIGEYAN S, RAMAKRISHNA V V G S T, RAJAGOPAL K. Influence of vertical load on the lateral response of piles in sand[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(2): 121–131.
- [14] KIM Y, JEONG S. Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(2): 248–257.
- [15] 陈建峰, 孙 红, 石振明, 等. 修正剑桥渗流耦合模型参数的估计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 544–548. (CHEN Jian-feng, SUN Hong, SHI Zhen-ming, et al. Estimation of parameters of modified cam-clay model coupling Biot theory[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(5): 544–548. (in Chinese))
- [16] 铁路工程基桩检测技术规程: TB 10218—2008[S]. 2008. (Technical Specification for Testing of Railway Piles: TB 10218—2008[S]. 2008. (in Chinese))
- [17] 铁路桥涵地基和基础设计规范: TB 10093—2017[S]. 2017. (Code for Design on Subsoil and Foundation of Railway Bridge and Culvert: TB 10093—2017[S]. 2017. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)