

多层地基中超长桩荷载传递机理的非线性计算方法

李兴波

(江苏昆山大宏工程顾问有限公司, 昆山 200072)

[摘要] 目前超长桩的理论远远落后于实践, 分析超长桩的受力性能, 提出合理的承载力计算模式及相应的计算参数是目前急需解决的问题。论文基于超长桩试验资料, 提出与超长桩桩侧土工作性状相适应的弹性-软化-稳定三阶段荷载传递模型; 桩端采用双曲线荷载传递模型模拟土的非线性变形特性; 桩身引入混凝土的 Rusch 模型, 以考虑高荷载水平作用下超长桩桩身混凝土的弹塑性性状。通过桩身任意处微段竖向受力平衡, 建立考虑桩身混凝土弹塑性关系的桩土体系荷载传递基本方程, 在综合考虑桩侧土软化稳定和桩端土非线性形的基础上得到与超长桩工作性状相适应的层状地基中超长桩荷载传递分析方法, 并根据模型编制了相应的 C 语言程序进行实例分析。计算得到的荷载-沉降曲线与实测的曲线吻合较好。本文方法适用于计算多层地基中超长桩的沉降和极限承载力, 也可用于分析层状地基中超长桩的荷载传递规律。经过对工程实例的计算与实测对比分析, 证明该法简单、可靠, 且具有较好的适用性。

[关键词] 超长桩 三阶段荷载传递模型 多层地基 侧阻软化 Rusch 模型

[中图分类号] TV322 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2009)04-0474-06

Li Xing-bo. Nonlinear calculation method of load transfer mechanics for super-long pile in multi-layered soil [J]. *Geology and Exploration*, 2009, 45(4): 474-478.

由于高层建筑的迅速发展, 施工技术的进步, 工程实践中采用一柱(墩)的单桩结构日趋增多。但目前, 国内外对超长桩承载力的确定尚未取得统一的取值方法, 因此, 分析超长桩的荷载传递, 提出合理的承载力计算模式及相应的计算参数是目前急需解决的问题。

近年来, 应用传递函数法分析基桩承载力发展很快。荷载传递分析法根据求解桩身荷载传递微分方程的不同途径, 可再细分为荷载传递解析法和位移协调法两类。前者是由 Kezdi (1957) 和佐滕悟 (1965) 等先后提出。常用的具代表性的传递函数模型有: 佐滕悟的线弹性全塑性模型^[1]、陈龙珠等的双折线硬化模型^[2]、房卫民等^[3]的三折线模型、Kezdi 的指数曲线模型^[4], 还有 Gardner 的双曲线模型^[5]和 Kraft 提出的理想荷载传递曲线^[6]和 Holloway^[7]、Vijayvergiya^[8]的抛物线模型。而位移协调法是由 Seed 和 Reese (1957)^[9], Coyle 和 Reese (1966)^[10]等提出的。但这些模型均以普通桩的荷载传递机理为基础, 不能与超长桩与土共同作用工作性状完全吻合。实践中对桩侧土采用较为广泛的是双曲线荷载传递模型, 余闯^[11]针对考虑桩侧土的软化效应提出了一种新的荷载传递模型, 并与传统

的双曲线荷载传递模型计算比较指出该模型更符合实际和偏于安全。本文基于超长桩大量试验资料, 对上述软化荷载传递模型进行改进, 提出与超长桩侧土工作性状相适应的弹性-软化-稳定三阶段荷载传递模型, 桩端采用双曲线荷载传递模型模拟土的非线性变形特性, 并引入混凝土的 Rusch 模型来考虑高荷载水平作用下超长桩桩身混凝土的弹塑性性状, 从而建立了与超长桩工作性状相适应的层状地基中超长桩荷载传递分析方法。

1 计算模型

1.1 桩土荷载传递体系

荷载传递分析法也称传递函数法。它是 Seed 和 Reese 于 1957 年首先提出的。这种方法的基本概念是把桩划分为许多弹性单元, 各单元与土体之间用非线性弹簧联系, 以此模拟桩-土间的荷载传递关系。桩端处土也用非线性弹簧与桩端相联系。这些非线性弹簧的应力-应变关系, 即表示桩侧摩阻力 τ (或桩端阻力) 与剪切位移 s 间的关系, 就称作为传递函数^[12]。荷载传递法计算模型如图 1 所示。

在桩上任意深度 z 处取一单元体, 由静力平衡

[收稿日期] 2008-12-07; [修订日期] 2009-05-22; [责任编辑] 王 梅。

[第一作者简介] 李兴波 (1977 年—), 男, 毕业于武汉科技大学, 项目经理, 国家注册一级建造师, 主要从事特种结构施工技术及地下结构工程方面的研究。

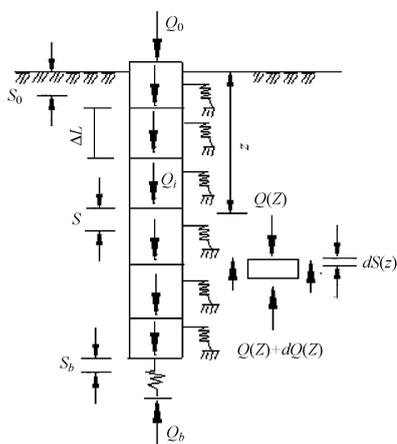


图 1 荷载传递法计算模型

Fig. 1 Calculating model of load transfer method

条件得到:

$$\tau(z) = -\frac{1}{U} \frac{dQ(z)}{dz} \quad (1)$$

微单元 dz 的压缩量 $dS(z)$ 为:

$$dS(z) = -\frac{Q(z)}{E_p A_p} dz \quad (2)$$

对上式求导并带入(1)得:

$$\frac{dS^2(z)}{dz^2} = \frac{U\tau(z)}{E_p A_p} \quad (3)$$

式中: E_p 为桩身混凝土弹性模量; A_p , U 分别为桩身截面面积与周长。

式(3)即为桩土体系荷载传递基本微分方程。桩身位移 $S(z)$ 的求解取决于桩—土荷载传递函数。

1.2 桩身混凝土的弹塑性模型

对于超长桩, 长径比 L/D 较大, 与高水平的轴向荷载相比, 桩侧土体的横向约束相对较小, 因此可将桩视为单轴受压^[13]。在高水平荷载单轴受压下的混凝土表现为较大的塑性变形^[14], 目前弹塑性 $\sigma - \varepsilon$ 关系应用较为广泛的有两种(舒士霖, 1996): Rusch 计算模式和 Hognested 计算模式, 如图 2 所示。

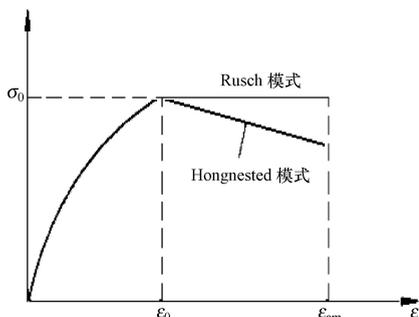


图 2 混凝土的弹塑性 $\sigma - \varepsilon$ 曲线

Fig. 2 Elastic-Plastic $\sigma - \varepsilon$ curve of concrete

对于桩基混凝土, 其设计荷载不会超过混凝土的抗压强度, 有实测结果表明, 即使在极限荷载下,

其应变 $\varepsilon < 0.001$ 。因此本文主要关注其破坏前的 $\sigma - \varepsilon$ 关系, 采用 Rusch 模型, 其表达式为:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0 \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ \sigma_0 & \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_0 为应力峰值, 均匀受压时, 为轴心抗压强度 f_c ; ε_0 为对应于应力峰值的应变, 为均匀受压时的极限应变值, $\varepsilon_0 = 0.002$; ε_{cu} 为非均匀受压时的极限应变值, $\varepsilon_0 = 0.0033$ 。

由 Rusch 计算模型, 在混凝土破坏前, 桩身模量 E_p 可表示为:

$$E_p = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{2\sigma_0}{\varepsilon_0} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \quad (5)$$

设混凝土初始弹性模为 E_0 , 则:

$$E_0 = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} = \frac{2\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

式中: E_0 为混凝土 $\sigma - \varepsilon$ 曲线过原点的切线。将 $\varepsilon = dS(z)/dz$ 和 Rusch 模型代入式(3)得到考虑桩身混凝土弹塑性关系的桩土体系荷载传递基本方程为:

$$A_p E_0 \frac{dS^2(z)}{dz^2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{dS(z)}{dz} \right) = U\tau(z) \quad (7)$$

1.3 考虑侧阻软化稳定的桩侧荷载传递函数

从式(7)中可以看出, 要求得其理论解很困难, 因此本文根据平衡条件和位移协调原则, 经过反复试算求得桩侧摩擦力和轴力。大量有关超长桩的试桩及数值模拟结果^[15-18]显示, 深厚软土地基中的超长桩, 在高荷载水平作用下桩侧摩擦力达到峰值; 随着沉降变形的继续增大, 桩土发生滑移, 桩侧摩擦力逐渐下降, 最后达到并维持在一个残余强度如图 3 所示。本文在大量超长桩试桩结果基础上, 采用弹性-软化-稳定三阶段荷载传递模型模拟超长桩的工作性状, 如图 4 所示。图中: τ_u 为侧摩擦力峰值; β 为最终残余强度的比例系数; u_{s1} 为侧摩擦力峰值相应的位移; u_{s2} 为进入残余阶段的位移。

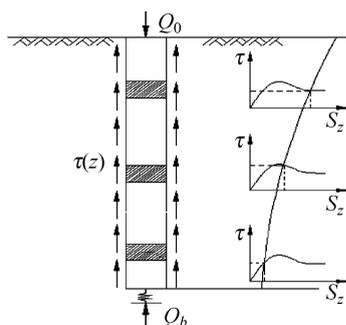


图 3 桩身侧阻软化模型

Fig. 3 Degradation model of lateral friction

上述模型能较好反映超长桩的工作性状, 模型的表达式为:

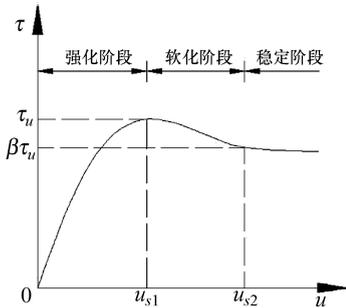


图4 广义双曲荷载传递模型

Fig.4 Generalized hyperbolic load transfer model

$$\tau(z) = a \cdot S(z) \cdot e^{-bS(z)} \cdot \psi(u_{s2} - S(z)) + c \cdot \psi(S(z) - u_{s2}) \quad (8)$$

$$\psi(x) = \text{sgn}[1 + \text{sgn}(x)] \quad (9)$$

$$a = \frac{\beta\tau_u}{u_{s2}} \exp\left(\frac{u_{s2}}{u_{s1}}\right) \quad (10)$$

$$b = \frac{1}{u_{s1}} \quad (11)$$

$$c = \beta\tau_u \quad (12)$$

式中: a, b, c 均为模型参数, 取值表达式分别为式(13), (14), (15); $S(z), \tau(z)$ 分别为桩身 z 截面处的沉降和侧摩阻力。

1.4 考虑桩端土的非线性变形

Boussinesq 公式在求解桩底土的位移时有较好的应用 Randolph^[19], 但由于其不能反映土的非线性影响, 因此本文在桩端采用 Coyle 等人提出的双曲线荷载传递模型, 如图 5 所示。

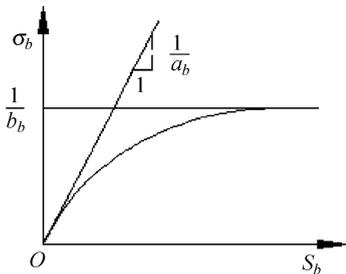


图5 桩端荷载传递模型

Fig.5 Load transfer model of pile-tip

模型表达式为:

$$\sigma_b = \frac{S_b}{a_b + b_b S_b} \quad (13)$$

$$Q_b = \frac{A_b S_b}{a_b + b_b S_b} \quad (14)$$

式中: σ_b 为桩端端应力; Q_b 为桩端阻力; S_b 为桩端位移; A_b 为桩端面积; a_b, b_b 均为桩端土的荷载传递函数参数, 可通过土工试验资料反分析和工程地质野外勘察的原位测试获取(如静力触探等)。

对于大直径超长桩, 根据文献^[20]考虑桩端直径 D 的尺寸效应, 对桩端承载力进行修正。修正系数

$$\xi = \frac{0.8}{D}, \text{ 故 } Q_b = \frac{\xi A_b S_b}{(a_b + b_b S_b)}。$$

2 荷载-沉降关系的计算方法

根据平衡条件和位移协调原则, 荷载-沉降关系的计算方法如下: 在考虑场地工程地质条件的情况下, 可把桩分为 N 段。令各段分界点的编号为 $n = 1, 2, \dots, N$ 。在 $n = 1$ 处即为桩顶, Q_0 即为桩顶荷载, S_0 即为桩顶沉降; 在 $n = N$ 处即为桩端, 为桩端阻力, S_N 为桩端位移。计算时从桩端开始, 具体计算步骤如下:

Step1 假定一个小的桩端位移 S_N , 然后用式(13)计算桩端应力, 再用式(14)计算桩端阻力。

Step2 对桩最底下一段, 即 N 段进行计算。从传递函数中求得该段桩身单元的摩阻力 $\tau_N(S_N)$, 则该段桩单元总的摩阻力为:

$$\Delta Q = \Delta L U \tau_N(S_N) \quad (15)$$

式中: ΔL 为最底下一段的桩长。

Step3 第 N 段桩单元的桩身压缩量 ΔS 为:

$$\Delta S = \Delta L (Q_b + \Delta Q / 2) / E_p A_p \quad (16)$$

ΔS 先根据桩身混凝土的初始模量 E_0 计算, 求得 $\varepsilon = \Delta S / \Delta L$, 再根据混凝土的应力应变关系求混凝土的模量 E_p 。将求得的代入上式计算 $\Delta S'$, 直至 $|\Delta S - \Delta S'| < \varepsilon$, ε 为一个很小的值, 则可以同时得到 ΔS 和 E_p 。

Step4 再计算 $\Delta Q'$, 此时位移值取 S_N 和 S_{N-1} 的平均值, 于是

$$\Delta Q' = \Delta L U \tau_N(S_N + \Delta S' / 2) \quad (17)$$

Step5 根据 $\Delta Q'$ 计算 $\Delta S''$, 即:

$$\Delta S'' = (Q_b + \Delta Q' / 2) \Delta L / E_p A_p \quad (16)$$

Step6 重复步骤 4 ~ 步骤 5, 直至 $|\Delta S'' - \Delta S'| < \varepsilon$, 然后计算轴力 Q_{N-1} 和位移 S_{N-1} , 即

$$\left. \begin{aligned} Q_{N-1} &= Q_N + \Delta Q' \\ S_{N-1} &= S_N + \Delta S'' \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Step7 第 N 段计算结束后, 计算第 $N-1$ 段, 并以 Q_{N-1} 和 S_{N-1} 作为第 $N-1$ 段的起始轴力和桩身位移, 重复步骤 2 ~ 步骤 6 计算, 这样一直计算到桩顶为止。由此可以得到桩顶荷载和沉降。

Step8 重复步骤 1 ~ 步骤 7 计算, 得到桩身荷载与位移的对应关系。

由以上步骤可知, 给定不同的 S_b 可计算出不同的桩顶荷载 Q_0 和桩顶沉降 S_0 , 从而可绘出桩顶荷载与沉降的关系曲线。根据上述方法还可得到给定的桩顶荷载作用下的桩身沉降、轴力沿桩身分布曲线; 根据式(1)可以得到桩侧摩阻力沿桩身分布曲线。笔者根据上述方法, 运用 C 语言编制出了相应的计算程序。

3 实例验证

实例 1 为验证本文方法的正确性,下面采用某试桩原始资料,运用本文方法对其进行荷载-沉降关系的计算与分析,并与实测结果进行对比。岩土分布特征为:上部为淤泥质粘土、粘土及细砂层,其力学性质差,承载力较低。下部的粘土、砂砾石、砂卵石等土层及泥质粉砂岩,承载力较高但埋深较大。强风化泥质粉砂岩及成岩较差的细砂岩与泥质胶结的泥质粉砂岩,其力学性质较差,承载力较低,分布不稳定。试桩直径 1.0m,桩长 61.5m,埋深 60m。桩身混凝土设计强度为 C30,取 $E_0=3.47 \times 10^7$ kPa。桩身内埋设了钢筋应力计和混凝土传感器。实测桩侧各主要土层的 $\tau \sim S$ 关系曲线如图 6 所示。根据该关系曲线可得桩侧各土层计算参数如表 1 所示。桩端荷载传递函数参数为: $1/a_b = 34.1$ MPa/m, $1/b_b = 157.4$ kPa。按照本文方法与表 1 参数所获得的计算荷载-沉降关系与实测对比如图 7 所示,较为吻合。

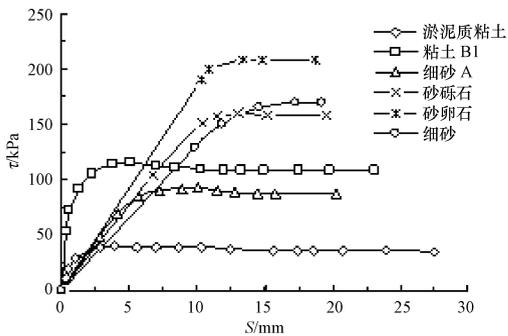


图 6 桩侧摩阻力与桩土相对位移曲线

Fig. 6 Curves between side friction resistance and pile-soil displacement

表 1 岩土力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the soil and rock

| 土层编号 | 土层名称 | τ_u /kPa | u_{s1} /mm | u_{s2} /mm | β |
|------|----------|---------------|--------------|--------------|---------|
| 1 | 淤泥质粘土 | 37 | 2.8 | 2.8 | 1.00 |
| 2 | 粘土 B1 | 116 | 5.1 | 10.3 | 0.96 |
| 3 | 细砂 A | 91 | 10.0 | 15.6 | 0.94 |
| 4 | 砂砾石 | 165 | 12.2 | 15.0 | 0.90 |
| 5 | 砂卵石 | 218 | 13.4 | 13.4 | 1.00 |
| 6 | 细砂及泥质粉砂岩 | 164 | 16.3 | 16.3 | 1.00 |

实例 2 为进一步验证本文理论,现以文献[2]中某世贸中心一桩(S1)荷载试验结果进行比较分析。桩身混凝土强度 C40,桩长 119.85m,桩径 1100mm,各土层参数详见文献,计算结果如图 8 所示。可以看出,在加载的全过程,本文结果和实测结果非常吻合。

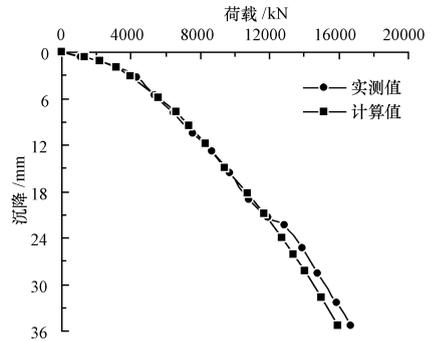


图 7 试桩 Q-S 曲线实测与计算比较

Fig. 7 Comparison between calculated and measured load-settlement curve

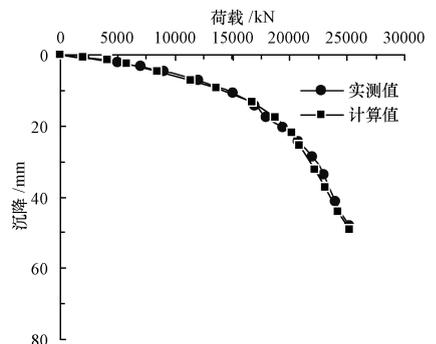


图 8 试桩 Q-S 曲线实测与计算比较

Fig. 8 Comparison between calculated and measured Q-S curve

4 结语

(1) 桩侧采用考虑侧阻软化的广义双曲荷载传递模型,以双曲线荷载传递模型模拟桩端土的非线性变形特性,并引入混凝土的 Rusch 模型来考虑高荷载水平作用下超长桩桩身混凝土的弹塑性性状,从而建立了与超长桩工作性状相适应的层状地基中超长桩荷载传递分析理论。

(2) 采用本文所提出的解析-迭代方法得到的荷载-沉降曲线与实测曲线较为吻合,具有方法简单、适用性强、精度高等优点。该理论可用于计算多层地基中超长桩的沉降和极限承载力,亦可用于分析层状地基中超长桩的荷载传递规律。

(3) 大直径超长桩 ($D \geq 3$ m) 具有较高的承载力,要达到其极限承载力,桩顶要产生较大的沉降变形,而目前荷载试验荷载一般加到设计荷载的两倍即停,试桩沉降远小于规范允许变形量。此时,荷载试验变成了对设计结果和施工工艺的验证,而不是用来确定极限承载力。采用本文所建立的理论来计算大直径超长桩的荷载-沉降关系,达到减少或者部分代替现场试桩工作的目的是具有实际意义的。

[参考文献]

- [1] 佐藤·悟. 基础桩の支持の力学机构[J]. 土工技术, 1965, 20(1):1~5.
Shingo Sato. Mechanism of bearing capacity of the pile [J]. Civil Engineering Technology, 1965, 20(1):1~5.
- [2] 陈龙珠, 梁国钱, 牛金颖. 桩轴向荷载-沉降曲线的一种解析算法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6):30~38.
Chen Long-zhu, Liang Guo-qian, Niu Jin-ying. Analytical Calculation of Axial Load-settlement Curves of Piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 16(6):30~38.
- [3] 房卫民, 赵明华, 苏检来. 由沉降量控制桩竖向极限承载力的分析[J]. 中南公路工程, 1999, 24(2):23~25.
Fang Wei-min, Zhao Ming-hua, Su Jian-lai. Analysis of predicting vertical limit bearing capacity by the pile settlement[J]. Central South Highway Engineering, 1999, 24:23~25.
- [4] Kezdi A. The bearing capacity of pile and pile groups[C]. Proc., 4th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering, London, 1957:46~51.
- [5] Gardner. W S. Consideration in the Design of Drilled Piles[M]. Design Construction and Performance of Deep Foundation, 1975.
- [6] Kraft L M, Ray R P, Kagawa T. Theoretical t-z Curves[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, 107(11):1543~1561.
- [7] Holloway, D. Michael; Clough, G. Vesic; Vesic, Aleksander S. Mechanics of Pile-soil Interaction in Cohesionless Soils[J]. Contract Report US Army Engineer Waterways Experiment Station, Dec, 1975:280~286.
- [8] Vijayvergiya V N. Load-movement Characteristics of Piles[C]. Proc., 4th Symposium of Waterway, port, Coastal and Ocean division, ASCE, Long Beach, Calif., 1977:2~6.
- [9] Seed H B, Reese L C. The Action of Soft Clay along Friction Piles[J]. Trans., ASCE, 1957, 122:731~754.
- [10] Coyle H M, Reese L C. Load Transfer for axially Loaded Piles in Clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 1966, 92(2):122~126.
- [11] 余闯, 刘松玉. 考虑桩侧土软化的单桩性状计算分析[J]. 岩土力学, 2005, 26:133~136.
Yu Chuang, Liu Song-yu. Research on behaviors of single pile considering softening of pile-side soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26:133~136.
- [12] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1990:78~85.
Zhu Bai-li, Shen Zhu-jiang. Computational for Soil Mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Science Technology Press, 1990:78~85.
- [13] 张忠苗. 软土地基超长嵌岩桩的受力性状[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5):552~556.
Zhang Zhong-miao. The Endurance of Super-long Piles in Soft Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5):552~556.
- [14] 辛公峰, 张忠苗, 夏唐代. 高荷载水平下超长桩承载性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13):2397~2402.
Xin Gong-feng, Zhang Zhong-miao, Xia Tang-dai. Experimental Study on the Bearing Behaviors of Overlength Piles under Heavy Load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13):2397~2402.
- [15] 朱向荣, 方鹏飞, 黄洪勉. 深厚软土超长桩工程性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1):76~79.
Zhu Xiang-rong, Fang Peng-fei, Huang Hong-mian. Research on Super-long Pile in Soft Clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 25(1):76~79.
- [16] 张忠苗, 辛公峰, 夏唐代. 深厚软土非嵌岩超长桩受力性状试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4):64~69.
Zhang Zhong-miao, Xin Gong-feng, Xia Tang-dai. Test and Research on Unrock-socketed Super-long Pile in Deep Soft Soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4):64~69.
- [17] 钟闻华, 石名磊, 刘松玉. 超长桩荷载传递性状研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(2):307~318.
Zhong Wen-hua, Shi Ming-lei, Liu Song-yu. Load Transfer Performance of Overlength Piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2):307~318.
- [18] Yao Wenjuan, Chen Shangping. Three-dimensional Nonlinear Finite Analysis of Super-long Pile and Soil Interaction[C]. Proc., Int. Conf on Constitutive Modelling Development, Implement, Evaluation, and Application, Hong Kong, 2007:608~613.
- [19] Randolph M F, Worth C P. Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles[J]. Geotechnical Engineering Division. ASCE, 1978, 104(12):1465~1488.
- [20] Wei D G, Randolph M F. Rationality of Load Transfer Approach for Pile Analysis[J]. Computers and Geotechnics, 1998, 34(2, 3):85~112.

Nonlinear Calculation Method of Load Transfer Mechanics for Super-long Pile in Multi-layered Soil

Li Xing-bo

(DAHONG Engineering Consultanting Co., Ltd, Kunshan, 215300, China)

Abstract: Theory research on super-long pile working properties falls far behind its engineering practice, the most urgent problem we have to work out presently is to build up a reasonable model for super-long pile working properties. A load transfer model, based on the experimental data of super-long piles, is proposed in this paper while considering the elastic, degenerating and stabilizing processes which is in accord with working properties of the pile-side soil; a hyperbola load transfer model is adopted to simulate the nonlinear deformation of pile-toe soil; a Rush concrete elastic-plastic model is introduced, giving consideration to the super-long pile shaft deformation under huge loads. A basic pile-soil load transfer equation is built when taking the elastic-plastic concrete model of pile shaft into account. Thus a load transfer method in calculating the layered soil is established and it could not only be used to calculate settlement and ultimate bearing capacity, but to show load transfer rules of the super-long piles in layered soil. The calculating load-settlement curve is generally in consistent with the experimental one. By comparison with many engineering instances, it is shown that the method proposed in this paper is simple and reliable in engineering practice.

Key words: super-long pile, generalized hyperbolic load transfer model, layered soil, degradation of lateral friction, Rusch model