文章编号:1001-5485(2009)04-0031-05

产生刺入的复合地基摩阻力计算方法

亓 乐[a,b], 施建勇[a,b]
(河海大学 a.岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室; b.岩土工程科学研究所, 南京 210098)

摘要:根据分析复合地基桩土荷载传递机理,指出了目前摩阻力计算公式的不足。以桩土极限相对位移为界限,将桩分为2部分:接触面塑性段和接触面弹性段,对2部分的摩阻力分别采用2种不同的方法计算。采用有效应力法计算塑性滑动段摩阻力,并考虑了侧向土压力变化的影响;在接触面弹性段,假定摩阻力与桩土相对位移为线弹性关系,利用荷载传递法进行计算。由此推导出了摩阻力的计算公式,并可计算得到中性点深度和桩顶、桩端处的桩土应力比。实例表明,该计算方法与现场实测结果吻合较好。

关 键 词:摩阻力;有效应力法;荷载传递法;刺入
中图分类号:TU433 **文献标识码**:A

1 概 述

作为复合地基的一种重要形式,桩体复合地基近年来在建筑工程中得到越来越多的应用。而当桩体的刚度较大时,为了充分发挥天然土的承载能力,会在基础与复合地基之间铺设垫层,通过其流动补偿使桩、土协调工作。垫层的存在使桩体会产生向上的刺入变形,因此在桩体的上端存在负摩擦区[1]。当下卧层土体强度不大时,桩体在荷载作用下可以产生向下的刺入。目前考虑桩体存在上下刺入时的沉降计算问题并没有得到较好的解决,而桩侧摩阻力的计算是其中的重点问题。

目前使用较多的摩阻力计算方法为有效应力法[2,3]和荷载传递法[4],大量国内外学者相继在此基础上有所发展[5~8]。有效应力法中单位摩阻力按 $q_n=\tan\varphi K_0\sigma'_z$ 确定,式中:φ 为桩侧土的有效内摩擦角;K_0 为静止土压力系数;σ'_z 为桩侧土深度 z 处的竖向有效应力。而有效应力的计算公式为 $\sigma'_z=P_s+\gamma' z$,P_s 为土体顶部荷载,γ' 为土体有效容重。很明显用该方法计算得到的摩阻力是随深度不断增大的,但事实上在负摩阻力的计算中,中性点深度的摩阻力为0,所以在中性点以上某一段桩长内摩阻力是随深度增加而减小的[9,10]。造成有效应力法与实际不符的原因主要有两个:一是有效应力的计算公式应为 $\sigma'_z=\sigma_s(z)+\gamma' z$,$\sigma_s(z)$ 为荷载引起的深度 z 处的竖向附加应力;二是计算得到的摩阻力为极限值,当桩土接触面剪应力使接触面达到破坏而进入塑性状态时,摩阻力取极限值是合适的。当桩土接触面未进入塑性状态时,有效应力法求得的摩阻力偏大。荷载传递法认为产生摩阻力的根本原因是桩土发生了相对位移,其基本概念就是把桩划分为许多弹性单元,每一单元与土之间用非线性弹簧联系,以模拟桩土间的荷载传递关系。研究表明[11],图1所示模型能基本反映桩土的荷载传递特性。在计算负摩阻力过程中,可以推断出桩土相对位移在桩顶处最大,随深度的增加桩土相对位移逐渐递减,因此摩阻力也应该随之逐渐减小。然而通过大量的试验研究发现,负摩阻力的分布并非单一的递减,大部分情况下随深度增加呈先增加后减小分布。究其原因,当桩土接触面产生破坏滑动,桩周土达到极限摩阻力之后,决定摩阻力的主要因素成为围压和接触面的滑动系数。综上所述,有效应力法和荷载传递法都不能很好地反映桩土的相互作用,都具有自己的适用范围。众所周知,桩的摩阻力实际上为桩土界面间的剪切力,桩土之间如有相对滑动的趋势,就会产生摩阻力。当桩土接触界面剪切力没有达到强度极限时,接触面处于弹性状态,桩土之间保持协调变形。如果接触界面上的剪切力超过剪切强度时,接触面会进入塑性状态而产生相对滑动,也就是桩土

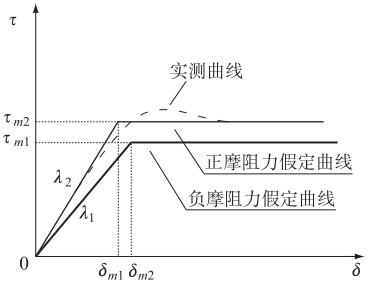


图1 双折线模型
Fig.1 Double-broken-line model

收稿日期:2008-07-08
作者简介:亓 乐(1981-),男,山东淄博人,博士研究生,主要从事地基处理方面的科研工作,(电话)15053120967(电子信箱)qile81@hhu.edu.cn。

间会有相对位移,此时的摩擦力等于极限值。因此,本文将桩土接触面分为弹性段和塑性段 2 部分分别计算。这样的计算方法应能更符合摩阻力的实际分布情况。

2 理论假设

在荷载作用下,由于垫层的调节作用桩体会发生上下刺入。此时桩顶与桩端附近的侧摩阻力虽未达到最大值,但往往会首先由弹性阶段进入塑性阶段。此时桩侧摩阻力可分为 4 段(图 2),在 $x\in(0,l_1)$ 和 $z\in(l_2,L)$处摩阻力达到极限值;在 $z\in(l_1,l_0)$ 和 $z\in(l_0,l_2)$ 桩土界面处于弹性阶段,本文就针对这种较为复杂的状态进行分析。

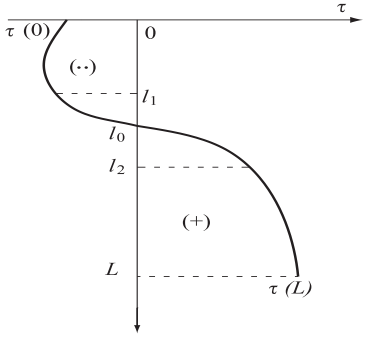


图 2 桩侧摩阻力分布示意图

Fig. 2 Distribution of pile friction

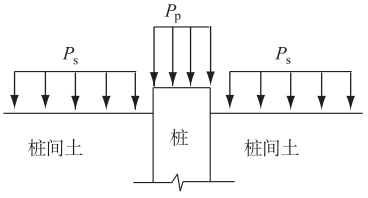


图 3 桩、土受力假定图

Fig. 3 Assumption of pile-soil exerted by stresses

取桩土等效单元体作为分析对象(图 3),并有如下假设:

(1) 桩和土体为均质弹性体,垫层符合 Winkler 地基模型。

(2) 桩体应力和桩间土应力取该水平面上的平均值,桩土间滑动为桩体沉降与土体沉降平均值之差。

(3) 在弹性阶段,桩体和土体有不同的沉降,将它们平均沉降之差作为桩土相对位移,假定桩侧摩阻力与桩土相对位移为线性关系(图 1),表达式为

$$\tau(z)=\frac{\tau_u}{\delta_u}\delta(z)=\lambda\delta(z), \tag{1}$$

式中:$\delta(z)$为桩土相对位移;δ_u 为极限相对位移值;$\tau(z)$为桩侧摩阻力;τ_u 为摩阻力极限值;λ 为系数(负摩阻力取 λ_1,正摩阻力取 λ_2)。

3 公式推导

如图 4,桩的弹性模量为 E_p,桩长为 L,周长为 U,面积为 A_p;桩间土的压缩模量为 E_s,面积为 A_s。垫层弹性模量为 E_c,厚度为 h;基础受均布荷载 P,作用在桩顶的均布荷载为 P_p,作用在桩间土表面的均布荷载为 P_s。当 $z\in(0,l_1),(l_1,l_0),(l_0,l_2),(l_2,L)$时,符号分别用下标 1,2,3,4 表示。

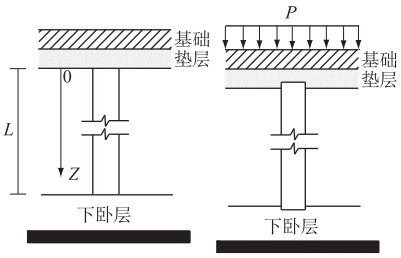


图 4 桩土单元变形示意图

Fig. 4 Deformation of pile-soil unit

3.1 $0\leqslant z\leqslant l_1$ 时公式推导

由平衡条件及摩尔-库仑准则可知:

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{s1}(z)&=P_s-U\int_0^z\tau(\zeta)\mathrm{d}\zeta/A_s\\ \sigma_{p1}(z)&=P_p+U\int_0^z\tau(\zeta)\mathrm{d}\zeta/A_p\end{aligned}\right\}, \tag{2}$$

$$\tau(z)=c+(\sigma_s(z)+\gamma_s z)k_0\mathrm{tg}\varphi\ , \tag{3}$$

将(3)代入(2),

$$\sigma_{s1}(z)=P_s-U\int_0^z[c+(\sigma_{s1}(\zeta)+\gamma_s\zeta)k_0\mathrm{tg}\varphi]\mathrm{d}\zeta/A_s。 \tag{4}$$

求解得

$$\sigma_{s1}(z)=(P_s+\frac{Uc-\gamma_sA_s}{Uk_0\mathrm{tg}\varphi})\mathrm{e}^{\frac{Uk_0\mathrm{tg}\varphi}{A_s}z}-\gamma_sz-\frac{Uc-\gamma_sA_s}{Uk_0\mathrm{tg}\varphi}。 \tag{5}$$

由(2)、(3)可得

$$\tau_1(z)=(P_sk_0\mathrm{tg}\varphi+c-\gamma_sA_s/U)\mathrm{e}^{\frac{Uk_0\mathrm{tg}\varphi}{A_s}z}+\gamma_sA_s/U; \tag{6}$$

$$\sigma_{p1}(z)=\frac{A_s}{A_p}(P_s+\frac{Uc-\gamma_sA_s}{Uk_0\mathrm{tg}\varphi})(1-\mathrm{e}^{\frac{Uk_0\mathrm{tg}\varphi}{A_s}z}+\frac{A_s}{A_p}\gamma_sz+P_p。 \tag{7}$$

式中:c 为桩土接触面的粘聚力;φ 为接触面的有效摩擦角;k_0 为静止土压力系数;γ_s 为桩周土重度。

3.2 $l_2\leqslant z\leqslant L$ 时公式推导

同理,根据 3.1 方法可以计算出当 $l_2\leqslant z\leqslant L$ 时的摩阻力、桩轴力和桩间土竖向应力。

$$\sigma_{s4}(z)=(\sigma_s(L)+\gamma_sL+\frac{\gamma_sA_s+Uc}{Uk_0\mathrm{tg}\varphi})\mathrm{e}^{\frac{Uk_0\mathrm{tg}\varphi}{A_s}(z-L)}-\gamma_sz-\frac{\gamma_sA_s+Uc}{Uk_0\mathrm{tg}\varphi}; \tag{8}$$

$$\tau_4(z)=(\sigma_s(L)k_0\mathrm{tg}\varphi+\gamma_sLk_0\mathrm{tg}\varphi+C+$$

$$\gamma_s A_s/U)e^{\frac{Uk_0 tg\varphi}{A_s}} - \gamma_s A_s/U \ ; \tag{9}$$

$$\sigma_{p4}(z) = \sigma_p(L) + \frac{A_s}{A_p}(\gamma_s z + \frac{\gamma_s A_s + Uc}{Uk_0 tg\varphi} + \sigma_s(L)) - \frac{A_s}{A_p}(\sigma_s(L) + \gamma_s L + \frac{\gamma_s A_s + Uc}{Uk_0 tg\varphi})e^{\frac{Uk_0 tg\varphi}{A_s}(z-L)} \ 。 \tag{10}$$

3.3　$l_1 \leqslant z \leqslant l_2$ 时公式推导

当 $l_1 \leqslant z \leqslant l_0$，取一单元体如图 5，设桩土位移分别为 W_p，W_s 由单元体的静力平衡可得，

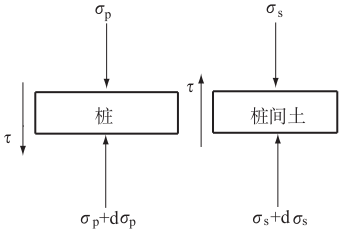


图 5　桩、土单元竖向受力图

Fig. 5　Forces exerted on a pile unit and a soil unit

$$W''_p = \frac{d^2 W_p}{dz^2} = -\frac{U}{A_p E_p}\tau \ , \tag{11}$$

$$W''_s = \frac{d^2 W_s}{dz^2} = -\frac{U}{A_s E_s}\tau \ 。 \tag{12}$$

由(12)－(11)，得

$$W''_s - W''_p = (\frac{U}{A_s E_s} + \frac{U}{A_p E_p})\tau \ 。 \tag{13}$$

由(1)可知

$$\tau(z) = \lambda(W_s - W_p) \ , \tag{14}$$

将(14)代入(13)，得

$$(W_s - W_p)'' = (\frac{\lambda U}{A_s E_s} + \frac{\lambda U}{A_p E_p})(W_s - W_p) \ 。 \tag{15}$$

同理当 $l_0 \leqslant z \leqslant l_2$ 时，取一单元体分析，也可得到式(15)。

求解式(15)，得

$$W_s - W_p = C_1 e^{\sqrt{\lambda U(\frac{1}{A_p E_p} + \frac{1}{A_s E_s})}z} + C_2 e^{-\sqrt{\lambda U(\frac{1}{A_p E_p} + \frac{1}{A_s E_s})}z} \ 。 \tag{16}$$

令 $H = \sqrt{\lambda U(\frac{1}{A_p E_p} + \frac{1}{A_s E_s})}$，当 $\lambda = \lambda_1$ 时，$H = H_1$；当 $\lambda = \lambda_2$ 时，$H = H_2$。式(16)可写为

$$W_s - W_p = C_1 e^{Hz} + C_2 e^{-Hz} \ 。 \tag{17}$$

由边界条件 $\begin{cases} (W_s - W_p)|_{z=l_1} = \delta_u \\ (W_s - W_p)|_{z=l_2} = -\delta_u \end{cases}$ ，　(18)

求得 $\begin{cases} C_1 = \dfrac{\delta_u}{e^{H_1 l_1} - e^{H_2 l_2}}, \\ C_2 = \dfrac{\delta_u}{e^{-H_1 l_1} - e^{-H_2 l_2}} \end{cases}$ ，　(19)

令 $W_s - W_p = 0$，得

$$l_0 = \frac{H_2 l_2 + H_1 l_1}{H_2 + H_1} \ 。 \tag{20}$$

由(14)可得

$$\tau_2(z) = \lambda_1(W_s - W_p) = \lambda_1 \delta_u(\alpha e^{H_1 z} + \beta e^{-H_1 z}) = \tau_1(l_1)(\alpha e^{H_1 z} + \beta e^{-H_1 z}) \ , \tag{21}$$

$$\tau_3(z) = \lambda_2(W_p - W_s) = -\lambda_2 \delta_u(\alpha e^{H_2 z} + \beta e^{-H_2 z} = -\tau_4(l_2)(\alpha e^{H_2 z} + \beta e^{-H_2 z}) \ 。 \tag{22}$$

其中：$\tau_1(l_1)$，$\tau_4(l_2)$ 分别由式(6)、(9)求得；α，β 为系数，由下式表示。

$$\begin{cases} \alpha = \dfrac{1}{e^{H_1 l_1} - e^{H_2 l_2}} \ ; \\ \beta = \dfrac{e^{H_1 l_1 + H_2 l_2}}{e^{H_2 l_2} - e^{H_1 l_1}} \ 。 \end{cases} \tag{23}$$

由式(21)、(22)，进而可以求得 $l_1 \leqslant z \leqslant l_2$ 时的桩轴力和土体竖向应力：

$$\sigma_{s2}(z) = \sigma_{s1}(l_1) + \frac{U\tau_1(l_1)}{A_s H_1}(\alpha e^{H_1 z} - \beta e^{-H_1 z} - \alpha e^{H_1 l_1} - \beta e^{-H_1 l_1}) \ ; \tag{24}$$

$$\sigma_{p2}(z) = \sigma_{p1}(l_1) - \frac{U\tau_1(l_1)}{A_p H_1}(\alpha e^{H_1 z} - \beta e^{-H_1 z} - \alpha e^{H_1 l_1} + \beta e^{-H_1 l_1}) \ ; \tag{25}$$

$$\sigma_{s3}(z) = \sigma_{s4}(l_2) + \frac{U\tau_4(l_2)}{A_s H_2}(\alpha e^{H_2 z} - \beta e^{-H_2 l_2} - \alpha e^{H_2 z} + \beta e^{-H_2 z}) \ ; \tag{26}$$

$$\sigma_{p3}(z) = \sigma_{p4}(l_2) - \frac{U\tau_4(l_2)}{A_p H_2}(\alpha e^{H_2 l_2} - \beta e^{-H_2 l_2} - \alpha e^{H_2 z} + \beta e^{-H_2 z}) \ 。 \tag{27}$$

以上推导可将整个加固区范围内的摩阻力、桩轴力和桩间土竖向应力表示出来。假定桩顶处桩土应力比为 n，桩端处桩土应力比为 n'，则 P_p，P_s，$\sigma_p(L)$，$\sigma_s(L)$ 可分别表示

$$P_p = \frac{n(A_p + A_s)}{nA_p + A_s}P \ ; \tag{28}$$

$$P_s = \frac{A_p + A_s}{nA_p + A_s}P \ ; \tag{29}$$

$$\sigma_p(L) = \frac{n'(A_p + A_s)}{n'A_p + A_s}P \ ; \tag{30}$$

$$\sigma_s(L) = \frac{A_p + A_s}{n'A_p + A_s}P \ 。 \tag{31}$$

在桩顶处由边界条件知：

$$\int_0^{l_1}\frac{\sigma_{s1}(z)}{E_s}\mathrm{d}z-\int_0^{l_1}\frac{\sigma_{p1}(z)}{E_p}\mathrm{d}z+\delta_u=\frac{(P_p-P_s)h}{E_c} \tag{32}$$

在桩端处由边界条件知:

$$\int_{l_2}^{L}\frac{\sigma_{s4}(z)}{E_s}\mathrm{d}z-\int_{l_2}^{L}\frac{\sigma_{p4}(z)}{E_p}\mathrm{d}z+\delta_u=\frac{\sigma_p(L)}{K_p}-\frac{\sigma_s(L)}{K_s}\ , \tag{33}$$

式中 K_p,K_s 分别为桩端及桩间土处下卧层的抗力系数。

在 $z=l_0$ 处,由连续条件知:

$$\sigma_{s2}(l_0)=\sigma_{s3}(l_0)\ , \tag{34}$$

$$\tau_2(l_0)=\tau_3(l_0)\ 。 \tag{35}$$

在式(20)、(32)至(35)5 个方程中,有 n,n',l_1,l_2,l_0 共 5 个未知量,由这 5 个方程可以确定,求解过程可编制一程序利用迭代的方法求解。具体步骤如下:①将未知量 n,n' 分别给定一初始值 n_{min},n'_{min},分别设定迭代范围为 $n\in(n_{min},n_{max})$ 和 $n'\in(n'_{min},n'_{max})$,步长分别为 Δn,$\Delta n'$。②已知 n,n' 可由公式(32),(33)求得 l_1,l_2,并由公式(20)求得 l_0。③由公式(21)、(22)、(24)、(25)分别计算得到 $\tau_2(l_0)$,$\tau_3(l_0)$,$\sigma_{s2}(l_0)$,$\sigma_{s3}(l_0)$。④若满足条件 $|\sigma_{s2}(l_0)-\sigma_{s3}(l_0)|<\varepsilon_1$,$|\tau_2(l_0)-\tau_3(l_0)|<\varepsilon_2$($\varepsilon_1$ 和 ε_2 分别为设定的微小值),迭代结束。⑤若不满足条件,利用双层循环 $n^{(i+1)}=n^{(i)}+\Delta n$ 和 $n'^{(i+1)}=n'^{(i)}+\Delta n'$ 重复步骤①至④。⑥循环计算至满足条件,迭代结束。

4 算例验证

根据文献[12]的试验对本文解答进行验证。试验的各种参数为

$c=30$ kPa,$\gamma_s=20$ kN/m^3,$E_c=16.1$ MPa,$E_s=15$ MPa,$E_p=2\times10^4$ MPa,$A_s=0.258$ m^2,$A_p=0.017\,6$ m^2,$d=0.15$ m,$L=2.5$ m,$h=0.15$ m,$\varphi=17.4°$,$\delta_u=2\times10^{-3}$ m,$K_p=93\ 764$ kN/m^3,$K_s=26\ 790$ kN/m^3,$k_0=0.6$。

计算得到的摩阻力分布形式如图 6,试验与计算结果对比见表 1。由结果对比来看,本文推导的公式解答可以满足工程要求。

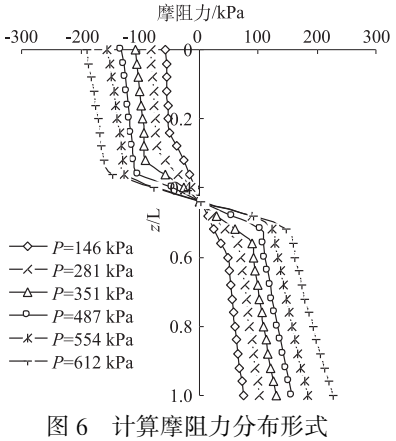


图 6 计算摩阻力分布形式

Fig.6 Calculated distribution of pile friction

表 1 结果对比

Table 1 Comparison of results

荷载	P=146 kPa		P=281 kPa		P=351 kPa		P=487 kPa		P=554 kPa		P=612 kPa	
	P_p	P_s	P_p	P_s	P_p	P_s	P_p	P_s	P_p	P_s	P_p	P_s
试验值/kPa	552	118	1 463	200	2 062	234	3 448	284	4 154	307	4 782	326
计算值/kPa	800	101	1 980	165	2 621	196	3 816	260	4 387	293	4 806	326
误差/%	45	−14	35	−18	27	−16	11	−8	6	−5	1	0

5 结 论

在桩体复合地基的设计中,桩、土和垫层的相互作用是承载力及沉降计算的重要研究内容。目前桩土间摩阻力的计算方法各有优缺点,都不能很好地体现桩土的相互作用。本文将桩土接触面分为 2 部分:接触面破坏滑动段和接触面弹性滑动段,对 2 部分的摩阻力采用不同的方法分别计算。推导出了整个加固区摩阻力、桩轴力和桩周土竖向应力的计算公式。

本文方法计算参数简便易得,且能求得中性点深度以及桩顶处和桩端处的桩土应力比。通过对工程实例的验证,计算结果比较合理,可以满足工程需要,证明本文方法可以比较合理地表达桩土之间的相互作用。

参考文献:

[1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[2] JGJ94-94,建筑桩基技术规范[S].

[3] 折学森. 软土地基沉降计算[M]. 北京:人民交通出版社,1998.

[4] SEED H B, REESE L G. The Action of Soft Clay Along Friction pile[J]. Trans. ASCE, 1957,122: 731-754.

[5] 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.
[6] 袁灯平,黄宏伟,程泽坤. 软土地基桩侧负摩阻力研究进展初探[J].土木工程学报,2006,39(2):53－60.
[7] 赵明华,贺　炜,曹文贵. 基桩负摩阻力计算方法初探[J]. 岩土力学,2004,25(9):1442－1446.
[8] 赵明华,邹　丹,邹新军. 群桩沉降计算的荷载传递法[J]. 工程力学,2006,23(7):119－123.
[9] 池跃君,沈　伟,宋二祥. 桩体复合地基桩、土相互作用的解析法[J]. 岩土力学,2002,23(5):546－550.
[10] 马时冬. 桩身负摩阻力的现场测试与研究[J]. 岩土力学,1997,18(1):8－15.
[11] 朱百里,沈珠江. 计算土力学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1990.
[12] 池跃君,宋二祥,金　淮,等. 北苑、回龙观刚性桩复合地基试验报告[R]. 北京:清华大学土木系,2001.

(编辑:刘运飞)

Method for Calculating Skin Friction of Composite Ground with Penetration

QI Le[a,b], SHI Jian-yong[a,b]
(a. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering;
b. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing　210098, China)

Abstract: The limitation of the current calculating formula is pointed out based on the analysis of the loading mechanism of composite ground. The pile is divided into two situations based on the pile-soil limiting relative displacement, namely plastic stage and elastic stage. The two parts are calculated by different methods. The friction of plastic part is calculated by effective stress method which considers the confining pressure, and the friction of elastic part is calculated by load transfer method. A formula for calculating the skin friction is obtained, and accordingly the depth of neutral point and the pile-soil stress ratio should be found. Lastly, an engineering example is analyzed by this method, and the calculated results agree well with the field measured data.

Key words: pile friction; effective stress method; load transfer method; penetration

·简 讯·

南水北调中线一期三大主体工程

按照国务院批复的《南水北调工程总体规划》,南水北调中线一期工程由水源工程、总干渠工程和汉江中下游治理三大主体工程组成。

水源工程:将丹江口水库坝顶高程由 162 m 增加到176.6 m;正常蓄水位由 157 m 提高到 170 m;相应库容由174.5亿 m^3 增加到290.5亿 m^3,增加 116 亿 m^3。

总干渠工程:从汉江丹江口水库引水,开挖明渠,经唐白河流域西部过长江、淮河分水岭方城垭口,沿黄淮海平原西侧,在郑州附近穿过黄河,沿京广铁路西侧北上,基本自流到北京、天津。输水干线全长 1 432 km,水头差约 100 m;设计流量 350 m^3/s,加大流量 420 m^3/s;受益人口 3 468 万;年均调水规模 95 亿 m^3。

汉江中下游治理工程:为缓解调水对汉江中下游的不利影响,规划建设兴隆水利枢纽、引江济汉、部分闸站改造、局部航道整治工程。其中兴隆水利枢纽任务是枯水期雍高库区水位,改善库区沿岸灌溉和航运条件;引江济汉工程从长江荆州段龙洲垸引水至汉江潜江段高石碑,全长67.1 km,任务是满足汉江兴隆以下生态环境用水、河道外灌溉、供水及航运需水要求,可基本解决中线一期工程调水对汉江下游"水华"的影响,解决东荆河的灌溉水源问题,并从一定程度上恢复汉江下游河道水位和航运保证率,缩短从长江到汉江的通航里程 637 km。汉江中下游治理工程总投资 82 亿元,由国家全额投资,湖北省负责建设。

(摘自《长江科学院网》)