



港区桩基沉降应力影响系数的计算方法^{*}

钟维林¹, 于 洋¹, 岳 霖², 李 杰²

(1. 国能黄骅港务有限责任公司, 河北 黄骅 061100; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对港口工程软土地基中桩基沉降计算精度不足的问题, 通过对比分析 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》与上海市地方标准 DGJ 08-11—2018《地基基础设计标准》中明德林法(Mindlin)应力影响系数的差异, 提出一种适用于软土地基桩基沉降的精确计算方法。通过理论推导分析, 提出一种兼顾桩径与水平距离影响的明德林法改进模型, 解决了传统查表法参数单一、计算繁琐的问题。结果表明, 桩径对桩端附近区域(计算深度 $z \leq 3$ m)的应力影响系数误差为 3%~10%, 但计算深度超过 3 m 后误差降至 1% 以内; 当相邻桩至计算桩轴线的水平距离 $\rho \geq 2$ m 时, 上海市地方标准与国标数值积分法的计算误差小于 1%。该方法提高了桩基沉降计算的精度, 可为采用刚性桩方案处理港口工程陆域堆场软土地基提供有效支撑, 并为编写桩基沉降电算程序提供借鉴和参考。

关键词: 明德林法; 桩基沉降; 应力影响系数

中图分类号: U652.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0203-06

Calculation method for stress influence coefficient of pile foundation settlement in port areas

ZHONG Weilin¹, YU Yang¹, YUE Lin², LI Jie²

(1. China Energy Huanghua Port Co., Ltd., Huanghua 061100, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: To address the insufficient accuracy of pile foundation settlement calculations in soft soil foundations of port engineering, this study proposes a refined calculation method applicable to soft soil by comparative analysis of differences in Mindlin stress influence coefficients between the national standard JGJ 94-2008 *Technical Code for Building Pile Foundations* and the Shanghai local standard DGJ 08-11-2018 *Design Standard for Foundation Engineering*. An improved Mindlin-based model integrating pile diameter and horizontal distance effects is developed through theoretical derivation, overcoming the parameter oversimplification and computational complexity of traditional methods. The results show that pile diameter induces 3%–10% errors in stress influence coefficients near the pile tip (calculation depth $z \leq 3$ m), but errors reduce to within 1% when the calculation depth exceeds 3 m. For horizontal distance $\rho \geq 2$ m, the computational error between the Shanghai local standard and national numerical integration method is less than 1%. This method enhances settlement calculation accuracy, it can provide efficient support for rigid pile treatments in soft soil foundations of port yard areas, and offer reference and guidance for developing computational programs for pile foundation settlement analysis.

Keywords: Mindlin method; pile foundation settlement; stress influence coefficient

港口工程陆域堆场经常由淤泥吹填而成, 即使经过堆载、真空预压等方式进行地基处理, 仍然无法使土体完全固结, 建设期之后土体仍有较

大位移沉降。为避免场地沉降对设备运行、生产作业产生影响, 常采用刚性桩(灌注桩、预制管桩等)对地基进行加固处理。

收稿日期: 2025-01-20

*基金项目: 黄骅港务五期工程技术开发项目(GCZX[2024]7)

作者简介: 钟维林(1969—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程管理工作。

与传统的真空预压等方式相比,采用刚性桩进行地基处理效果更好,工后沉降得到极大改善,但是地基处理的成本明显增加。为保证刚性桩方案在经济上的可行性,需要对刚性桩长度、桩间距等进行详细的比选计算。尤其是软弱土层较厚、桩端所在土层强度较小时,桩基的沉降计算对方案的制定尤为重要。

JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》^[1](简称“规范”)第 5.5 节对桩基沉降计算进行了明确的规定。桩基沉降计算主要分为桩中心距不大于 6 倍桩径的桩基和单桩、单排桩、疏桩基础两大类,分别对应等效作用分层总和法(布辛奈斯克法, Boussinesq)和单项压缩分层总和法(明德林法, Mindlin)。港口工程陆域堆场的淤泥含量高且工后沉降明显,容易出现桩土分离的情况,承台底地基土通常不分担荷载,故港口工程陆域堆场的桩基沉降计算一般采用单桩、单排桩、疏桩基础的计算方法,即明德林法(Mindlin),更贴近实际情况。上海市地方标准 DGJ 08-11—2018《地基基础设计标准》^[2](简称“标准”)结合上海地区覆盖层厚、土层淤泥含量高、桩端承载力低的地方特色,仅给出以明德林法(Mindlin)应力计算公式为依据的单项压缩分层总和一种方法,用于地基沉降计算。

在进行桩基沉降计算时发现,不同的桩基沉降计算软件得出的沉降计算结果差别较大。当桩基数量较多时,对输入参数的处理往往不尽合理,很难得出可靠、合理、一致的结果。而按照规范要求,进行手算时,规范附录 F 中附加应力影响系数表格给出的数据过于简单、对应的土质参数单一,无法满足实际工程中土质参数多样性的要求,为桩基沉降计算带来诸多不便。当桩基数量较多、地基土泊松比与附录 F 不同时,非沉降计算点所在位置的桩基对沉降计算点的影响系数无法确定。

本文通过查阅资料、复盘规范中相关公式的推导过程等方式,探索明德林法(Mindlin)桩基沉降计算中应力影响系数^[3-10]的相对精确计算方法,并形成在工程中可行的计算公式,以期提高桩基沉降计算的结果精度,为港口工程陆域堆场软土

地基采用刚性桩方案进行处理提供有效支撑。

1 规范规定

1.1 规范公式

规范附录 F 中明德林解应力影响系数的计算公式为:

$$I_p = \frac{l^2}{\pi r^2} \times \frac{1}{4(1-\mu)} \left\{ 2(1-\mu) - \frac{(1-2\mu)(z-l)}{\sqrt{r^2+(z-l)^2}} - \frac{(1-2\mu)(z-l)}{z+l} + \frac{(1-2\mu)(z-l)}{\sqrt{r^2+(z+l)^2}} - \frac{(z-l)^3}{[r^2+(z-l)^2]^{3/2}} + \frac{(3-4\mu)z}{z+l} - \frac{(3-4\mu)z(z+l)^2}{[r^2+(z+l)^2]^{3/2}} - \frac{l(5z-l)}{(z+l)^2} + \frac{l(z+l)(5z-l)}{[r^2+(z+l)^2]^{3/2}} + \frac{6lz}{(z+l)^2} - \frac{6zl(z+l)^3}{[r^2+(z+l)^2]^{5/2}} \right\} \quad (1)$$

$$I_{sr} = \frac{l}{2\pi r} \times \frac{1}{4(1-\mu)} \left\{ \frac{2(2-\mu)r}{\sqrt{r^2+(z-l)^2}} - \frac{2(2-\mu)r^2+2z(1-2\mu)(z+l)}{r\sqrt{r^2+(z+l)^2}} + \frac{2(1-2\mu)z^2}{r\sqrt{r^2+z^2}} - \frac{4z^2[r^2-(1+\mu)z^2]}{r(r^2+z^2)^{3/2}} - \frac{4(1+\mu)z(z+l)^3-4z^2r^2-r^4}{r[r^2+(z+l)^2]^{3/2}} - \frac{r^3}{[r^2+(z-l)^2]^{3/2}} - \frac{6z^2[z^4-r^4]}{r(r^2+z^2)^{5/2}} - \frac{6z[zr^4-(z+l)^5]}{r[r^2+(z+l)^2]^{5/2}} \right\} \quad (2)$$

$$I_{st} = \frac{l}{\pi r} \times \frac{1}{4(1-\mu)} \left\{ \frac{2(2-\mu)r}{\sqrt{r^2+(z-l)^2}} + \frac{2(1-2\mu)z^2(z+l)-2(2-\mu)(4z+l)r^2}{lr\sqrt{r^2+(z+l)^2}} + \frac{8(2-\mu)zr^2-2(1-2\mu)z^3}{lr\sqrt{r^2+z^2}} + \frac{12z^7+6zr^4(r^2-z^2)}{lr(r^2+z^2)^{5/2}} + \frac{15zr^4+2(5+2\mu)z^2(z+l)^3-4\mu zr^4-4z^3r^2-r^2(z+l)^3}{lr[r^2+(z+l)^2]^{5/2}} - \frac{6zr^4(r^2-z^2)+12z^2(z+l)^5}{lr[r^2+(z+l)^2]^{5/2}} + \frac{6z^3r^2-2(5+2\mu)z^5-2(7-2\mu)zr^4}{lr[r^2+z^2]^{3/2}} - \frac{zr^3+r(z-l)^3}{l[r^2+(z-l)^2]^{3/2}} + 2(2-\mu)r/l \cdot \ln \frac{(\sqrt{r^2+(z-l)^2}+z-l)(\sqrt{r^2+(z+l)^2}+z+l)}{[\sqrt{r^2+z^2}+z]^2} \right\} \quad (3)$$

式中: I_p 、 I_{sr} 、 I_{st} 为考虑桩径影响的明德林解应力

影响系数; μ 为地基土的泊松比; r 为桩身半径; l 为桩长; z 为计算应力点距桩顶的竖向距离。

1.2 存在问题

因 I_p 、 I_{sr} 、 I_{st} 的计算过程非常复杂, 为方便计算, 规范给出了速查表格。查表时存在以下问题, 对计算产生较大影响。1) 表格使用时要大量使用内插法求值, 不仅计算工作量大, 且精度受限; 2) 仅当相邻桩至计算桩轴线的水平距离 $\rho=0$ 时, 表格中数值才可用式 (1) ~ (3) 进行计算得出; 3) 规范仅给出 $\mu=0.35$ 时的计算结果, 而实际工程的地基土泊松比往往不是定值, 故采用规范的表格数据会对桩基沉降结果有一定影响; 4) 规范第 5.5.14 条明确指出, 桩基沉降计算要考虑“以沉降计算点为圆心, 0.6 倍桩长为半径的水平面影响范围内的桩基”。当 $\rho \neq 0$ 时, 规范中提到按数值积分法计算, 但并未给出计算公式。 μ 的取值与表格中取值不一致时, 计算误差进一步加大。

1.3 研究目标

通过公式表达式求解任意工况下的桩基影响系数, 为编写桩基沉降的电算程序提供有力支撑。

2 研究过程

2.1 地基土泊松比对计算结果的影响

通过 I_p 、 I_{sr} 、 I_{st} 的计算公式, 精确计算 $\rho=0$ 时且 μ 取值不同时的计算结果, 与规范表格中的数值进行对比, 见表 1~3。经统计, 当 $\mu=0.3$ 时, 计算误差为 -3.628 3%; 当 $\mu=0.4$ 时, 计算误差为 4.283 1%。

表 1 不同泊松比对应的 I_p 计算值
Tab. 1 Calculated values of I_p corresponding to different Poisson ratio

l/d	z/l	I_p			规范值
		$\mu=0.3$	$\mu=0.4$	$\mu=0.35$	
10	1.004	62.290	62.898	62.571	62.563
	1.020	54.678	57.111	55.801	55.793
	1.100	14.949	16.310	15.577	15.575
	1.200	4.581	5.019	4.783	4.782
	1.400	1.257	1.377	1.313	1.312
	1.600	0.593	0.649	0.619	0.619

续表 1

l/d	z/l	I_p			规范值
		$\mu=0.3$	$\mu=0.4$	$\mu=0.35$	
100	1.004	4 121.481	4 410.173	4 254.724	4 254.172
	1.020	449.680	492.937	469.645	469.584
	1.100	19.362	21.256	20.236	20.233
	1.200	4.913	5.392	5.134	5.133
	1.400	1.279	1.402	1.336	1.336
	1.600	0.598	0.653	0.623	0.623

表 2 不同泊松比对应的 I_{sr} 计算值
Tab. 2 Calculated values of I_{sr} corresponding to different Poisson ratio

l/d	z/l	I_{sr}			规范值
		$\mu=0.3$	$\mu=0.4$	$\mu=0.35$	
10	1.004	2.720	2.896	2.802	2.801
	1.020	2.671	2.857	2.757	2.756
	1.100	1.613	1.752	1.677	1.676
	1.200	0.901	0.977	0.936	0.936
	1.400	0.449	0.483	0.465	0.465
	1.600	0.287	0.308	0.297	0.297
100	1.004	24.763	26.806	25.706	25.703
	1.020	9.205	10.083	9.610	9.609
	1.100	1.915	2.090	1.996	1.995
	1.200	0.946	1.027	0.983	0.983
	1.400	0.455	0.490	0.471	0.471
	1.600	0.289	0.310	0.298	0.298

表 3 不同泊松比对应的 I_{st} 计算值
Tab. 3 Calculated values of I_{st} corresponding to different Poisson ratio

l/d	z/l	I_{st}			规范值
		$\mu=0.3$	$\mu=0.4$	$\mu=0.35$	
10	1.004	4.314	4.582	4.438	4.437
	1.020	4.296	4.589	4.431	4.431
	1.100	2.496	2.720	2.600	2.599
	1.200	1.279	1.395	1.333	1.332
	1.400	0.568	0.618	0.591	0.591
	1.600	0.341	0.369	0.354	0.354
100	1.004	47.700	51.629	49.514	49.507
	1.020	17.064	18.708	17.823	17.820
	1.100	3.067	3.360	3.202	3.202
	1.200	1.359	1.486	1.418	1.417
	1.400	0.578	0.629	0.601	0.601
	1.600	0.343	0.372	0.357	0.356

2.2 数值积分法推导

由于规范式 (1) ~ (3) 中的计算变量中无参数 ρ , 因此无法精确计算 $\rho \neq 0$ 的应力影响系数。为得出

桩基沉降在 $\rho \neq 0$ 情况下应力影响系数的精确计算方法,对规范中提到的数值积分法进行推导。

数值积分是计算定积分数值的方法和理论,用于求定积分的近似值。数值积分法包含诸多不同的计算方法和公式,如矩形法、插值法、高斯型法等,规范中并未给出对应的计算方法及公式。标准中对于 $\rho \neq 0$ 的工况考虑了相邻桩至计算桩轴线的水平距离的影响,但忽略了桩径对沉降计算

的影响,这与规范有较大区别。

复核规范和标准沉降计算的异同,在精度允许的范围整合他们的优势,以便编写能够精确计算桩基沉降的电算程序。

2.3 计算结果验证

2.3.1 分析误差原因

标准的附录 H 给出了应力影响系数的计算公式:

$$I_p = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left[\frac{-(1-2\mu)(m-1)}{A^3} + \frac{(1-2\mu)(m-1)}{B^3} - \frac{3(m-1)^3}{A^5} - \frac{3(3-4\mu)m(m+1)^2 - 3(m+1)(5m-1)}{B^5} - \frac{30m(m+1)^3}{B^7} \right] \quad (4)$$

$$I_{sr} = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \left\{ \frac{-2(2-\mu)}{A} + \frac{2(2-\mu) + 2(1-2\mu)(m^2/n^2 + m/n^2)}{B} - \frac{2(1-2\mu)(m/n)^2}{F} + \frac{n^2}{A^3} + \frac{4m^2 - 4(1+\mu)(m/n)^2 m^2}{F^3} + \frac{4m(1+\mu)(m+1)(m/n+1/n)^2 - (4m^2 + n^2)}{B^3} + \frac{6m^2(m^4 - n^4)/n^2}{F^5} + \frac{6m[mn^2 - (m+1)^5/n^2]}{B^5} \right\} \quad (5)$$

$$I_{st} = \frac{1}{4\pi(1-\mu)} \left[\frac{-2(2-\mu)}{A} + \frac{2(2-\mu)(4m+1) - 2(1-2\mu)(1+m)m^2/n^2}{B} + \frac{2(1-2\mu)m^3/n^2 - 8(2-\mu)m}{F} + \frac{mn^2 + (m-1)^3}{A^3} + \frac{4\mu n^2 m + 4m^3 - 15n^2 m - 2(5+2\mu)(m/n)^2(m+1)^3 + (m+1)^3}{B^3} + \frac{2(7-2\mu)mn^2 - 6m^3 + 2(5+2\mu)(m/n)^2 m^3}{F^3} + \frac{6mn^2(n^2 - m^2) + 12(m/n)^2(m+1)^5}{B^5} - \frac{12(m/n)^2 m^5 + 6mn^2(n^2 - m^2)}{F^5} - 2(2-\mu) \ln \left(\frac{A+m-1}{F+m} \times \frac{B+m+1}{F+m} \right) \right] \quad (6)$$

式中: $A^2 = [n^2 + (m-1)^2]$; $B^2 = [n^2 + (m+1)^2]$; $F^2 = n^2 + m^2$; $n = R/l$; $m = z/l$; R 为计算点离桩身轴线的水平距离。

虽然两者的参数字母和符号有差异,但可以总结出异同,见表4。由表可知,标准虽然没有考虑桩身半径的影响,但是考虑了 $\rho \neq 0$ 的情况。

表4 规范和标准的差异对比

Tab. 4 Difference comparison between specification and standard

类别	计算方法	泊松比	桩身半径	桩长	计算点离桩顶竖向距离	计算点离桩身轴线的水平距离
规范	明德林	0.35	考虑	考虑	考虑	公式中无此参数,通过数值积分法考虑其影响
标准	明德林	0.40	不考虑	考虑	考虑	公式中有此参数,可根据公式精确计算

2.3.2 推导规范与标准的计算误差

现行规范桩基沉降计算方法与土层参数密切相关,而土层参数本身存在一定的经验取值以及范围取值的情况,造成桩基沉降计算本身就存在一定的误差。在相同条件下对比规范和标准所得影响系数的误差值,以便推导是否可采用标准与规范相结合来提高桩基沉降计算的精确度。

港口工程陆域堆场采用刚性桩作为地基处理

方案时,桩基长度一般会穿透软弱土层,以达到有效减小地基沉降的作用。根据土层分布的不同,桩长一般在 10~40 m。桩长越短,桩基沉降的影响就越明显。选用 10、20、30 m 3 种桩长,及陆上施工较为常见的 400、500、600 mm 3 种桩径进行分析对比,泊松比取值为 0.35。因规范附录 F 的公式仅能计算 $\rho = 0$ 的工况,以下计算均为该工况下的计算结果,见图 1。

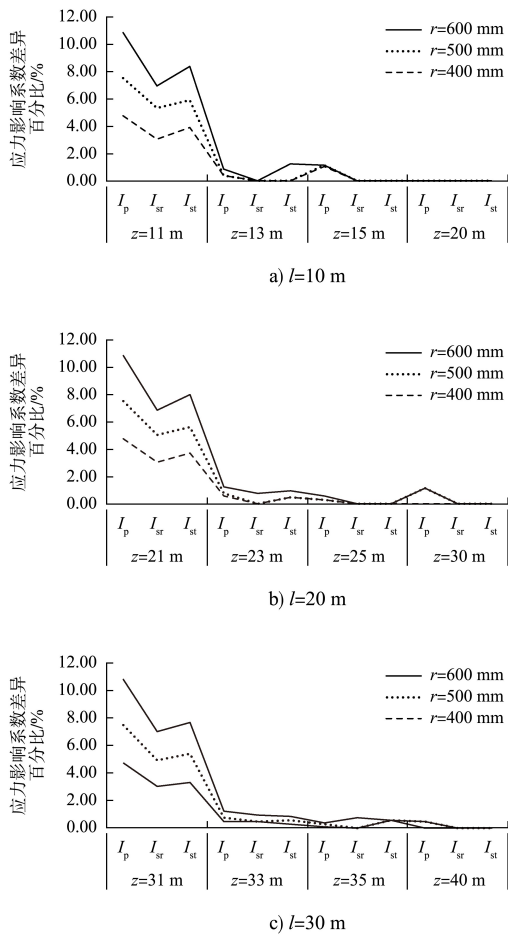


图 1 规范和标准应力影响系数差异对比

Fig. 1 Difference comparison of stress influence coefficient between specification and standard

由计算可知, 规范附录 F 中明德林解应力影响系数的计算公式考虑了桩径的影响, 与标准附录 H 中明德林解应力影响系数的计算公式比较, 主要计算误差出现在桩端以下 1 m 左右的位置, 当计算深度在 3 m 时, 计算误差在 1% 左右, 而计算深度在 10 m 时, 误差几乎消失。

当桩基位置距离计算点轴线的水平距离超过 3 m 或以上时, 理论上讲, 桩端荷载通过桩端以下土体扩散后, 到达计算点轴线位置的附加沉降值会小很多, 即使扩散角为 45° , 应力影响系数比计算深度 3 m 及以上的影响系数相关性更大, 计算误差在 1% 左右。

2.3.3 $\rho \neq 0$ 时的计算对比

为了进一步比较标准计算值与规范数值积分法的误差, 比较了 $\mu=0.35$ 、 $\rho \neq 0$ 时两者的计算误

差, 考虑成桩可能性以及桩间距的构造要求, 实际布置桩基的桩间距通常至少在 2 m 及以上, 经试算可知, m 的值越小, 相对误差越大, 所以对比计算取 $m=1.004$, 即规范附录 F 表格中桩端以下最高点的数值做对比, 桩间距为 2 m ($l=10, 20$ m)、3 m ($l=30$ m), 见表 5。经比较, 当 $r=2$ 或 3 m 时, 标准与规范的数值积分法的查表值误差不超过 1%, 桩基沉降计算的精度得到保证。

表 5 标准计算值与规范值的误差

Tab. 5 Errors between calculated values by the standard and values in the specification

工况	系数	标准 计算值	规范值	差值/ %
$d=0.5$ m, $l=10$ m, $z=10.04$ m, $r=2$ m ($l/d=20, m=1.004$, $n=0.2$)	I_p	0.111	0.111	0.00
	I_{sr}	0.685	0.687	0.29
	I_{st}	0.746	0.751	0.67
$d=0.5$ m, $l=20$ m, $z=20.08$ m, $r=2$ m ($l/d=40, m=1.004$, $n=0.1$)	I_p	0.179	0.180	0.56
	I_{sr}	1.393	1.399	0.43
	I_{st}	1.890	1.901	0.58
$d=0.5$ m, $l=30$ m, $z=30.12$ m, $r=3$ m ($l/d=60, m=1.004$, $n=0.1$)	I_p	0.179	0.179	0.00
	I_{sr}	1.393	1.396	0.21
	I_{st}	1.890	1.895	0.26

3 结语

1) 国标 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》附录 F 明德林解应力影响系数的计算公式考虑了桩径的影响, 桩径对计算结果的影响主要在计算点位置桩端附近区域, 影响误差在 3%~10%。

2) 在桩端下超过 3 m 位置, 桩径对计算结果的影响很小, 在 1% 左右。

3) 当计算点离桩身轴线的水平距离超过 2 m 时, 上海市地方标准 DGJ 08-11—2018《地基基础设计标准》附录 H 的计算值与 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》的数值积分法的查表值误差不超过 1%。

4) 港口工程陆域堆场在采用刚性桩方案时需要计算桩基沉降。采用明德林法 (Mindlin) 计算应力影响系数时, 计算点轴线位置桩基采用 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》附录 F 的计算公式, 计算点轴线以外位置采用上海市地方标准 DGJ 08-11—2018《地基基础设计标准》附录 H 的计算公式, 计

算精度能够得到保证。

5) 研究成果可为编写桩基沉降的电算程序提供参考。

参考文献:

- [1] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [2] 地基基础设计标准: DGJ 08-11—2018[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- Foundation Design Code: DGJ 08-11-2018[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [3] 马琛, 王洪良. 桩基沉降计算方法探讨及设计处理[J]. 山东冶金, 2024, 46(2): 75-78.
- MA C, WANG H L. Discussion on calculation method of pile foundation settlement and design treatment [J]. Shandong metallurgy, 2024, 46(2): 75-78.
- [4] 王涛, 赵志鹏, 褚卓, 等. 桩基沉降计算的改进方法及工程案例验证[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2227-2237.
- WANG T, ZHAO Z P, CHU Z, et al. Improved method for calculating settlement of pile foundations and case studies[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45(11): 2227-2237.
- [5] 王士革, 张宗领, 袁一力. 联合明德林解和布辛奈斯克解计算复合地基沉降方法的推导[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(6): 820-825.
- WANG S G, ZHANG Z L, YUAN Y L. The calculation method combined with Mindlin's solution and Boussinesq's analytical solutions to calculate composite foundation settlement[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (natural science edition), 2018, 50(6): 820-825.
- [6] 邱明兵, 刘金砺, 秋仁东, 等. 基于 Mindlin 解的单桩竖向附加应力系数[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 130-137.
- QIU M B, LIU J L, QIU R D, et al. Study on vertical additional stress coefficient for the single piles based on Mindlin's stress solution theory[J]. China civil engineering journal, 2014, 47(3): 130-137.
- [7] 刘金砺, 邱明兵, 秋仁东, 等. Mindlin 解均化应力分层总和法计算群桩基础沉降[J]. 土木工程学报, 2014, 47(5): 118-127.
- LIU J L, QIU M B, QIU R D, et al. A layerwise summation method for settlement calculation of pile group based on the homogenized Mindlin stress [J]. China civil engineering journal, 2014, 47(5): 118-127.
- [8] 吕亚茹, 刘汉龙, 王新泉, 等. 地基附加应力和桩基沉降计算的修正 Geddes 应力解[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(2): 68-74.
- LYU Y R, LIU H L, WANG X Q, et al. A modified Geddes solution for estimating induced stress coefficient of subsoil and settlement of pile foundation [J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2013, 45(2): 68-74.
- [9] 刘立时, 彭兵田. 桩基沉降的机理和计算[J]. 水运工程, 2002(6): 41-42.
- LIU L S, PENG B T. Mechanism and calculation of pile foundation settlement [J]. Port & waterway engineering, 2002(6): 41-42.
- [10] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, 7(5): 195-202.

(本文编辑 王传瑜)

征订通知

2026 年《水运工程》杂志征订工作已经开始, 请登录《水运工程》杂志官方网站 www.sygc.com.cn 首页下载中心下载“2026 年《水运工程》征订通知单”, 有关要求和反馈信息一应俱全。

《水运工程》编辑部