

扩展基础与弹性地基间耦合作用下基底有效尺寸研究

江乐威

(中铁大桥局集团有限公司, 湖北 武汉 430053)

摘要 扩展基础与弹性地基间耦合作用效应受到基础抗弯刚度和地基土基床系数的影响, 目前有学者提出基于耦合作用下基底有效尺寸下限, 在工程实践中的应用较为复杂。本文将地基土简化为温克尔弹簧模型, 在理论上推导扩展基础与弹性地基间耦合作用下基底有效尺寸的计算公式, 并结合通用有限元软件对计算公式精度进行验证, 通过截面抗弯刚度等效原则给出路基箱有效尺寸, 以期相关人员提供借鉴。

关键词 扩展基础; 温克尔模型; 耦合作用; 计算公式; 路基箱

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.14.005

0 引言

地基基础的合理设计对于建筑物的安全使用和工程造价等方面有较大影响。浅基础的基底尺寸确定是基础工程设计中的重要问题之一。在实际工程中, 地基条件复杂多变, 地基基础的选型与设计直接影响到建筑物的稳定性和耐久性。扩展基础作为一种常见的浅基础形式, 其基底尺寸的确定需综合考虑地基土的力学性质、基础材料的力学性能以及上部结构的荷载特征。近年来, 随着建筑技术的不断发展, 对地基基础的设计要求也日益提高, 如何在保证建筑物安全的前提下, 合理确定扩展基础的基底尺寸, 成为工程界关注的热点问题。

1 研究现状

传统的分析方法是采用逐次渐进试算法^[1], 这种方法在工程上应用时间较早, 尤其是早期计算技术较落后的情况下, 试算法提供了一种切实可行的计算方案。在软土区域, 扩展基础与CFG桩复合使用时, 桩体承担约60%~70%竖向荷载, 而扩展基础通过基底反力调节差异沉降。现场监测数据显示, 该组合体系可减少工后沉降量达40%, 尤其适用于既有建筑加固工程^[2]。

杨峰等^[3]应用刚体平动运动单元上限有限元, 通过多次网格更新方式进行系统的分析研究, 重点揭示与黏聚力相关的地基极限承载力系数 N_c 的上限解曲线及其滑移线网破坏模式, 探讨地基土层厚度, 土体内摩擦角和基础与地基界面有限摩擦等关联因素的影响规律。

陈梁等^[4]针对特殊岩土地质问题, 对基坑不同季节涌水量进行估算, 提出相关涌水防范措施, 重新设计满足工程的基础锚碇扩大方案。

杜超凡等^[5]运用无网格径向基点插值法构建了大变形板动力学模型, 为动荷载作用下扩展基础的基底非线性应力响应提供了高精度的数值模拟方案。该技术通过无网格手段, 有效规避了传统网格法在模拟大变形时易出现的网格扭曲难题, 显著提升了模拟的精确度与稳定性。此外, 径向基点插值法展现出卓越的灵活性, 能够灵活应对复杂的几何形态和边界条件, 使模型更贴近实际工程场景。

唐辉^[6]基于有限元法建立双向偏心荷载作用下的基底脱空模型, 验证单元尺寸(1/20B)、板单元面外刚度系数(≥ 100)及基床系数(参考值0.1倍)对计算精度的敏感性, 为内力计算提供参数化依据。

然而, 试算法存在计算繁琐、耗时较长以及结果精度受限等问题。随着计算机技术的飞速发展, 有限元法等数值分析方法逐渐被引入地基基础设计中。这些方法能够更加准确地模拟地基与基础间的相互作用, 为基底尺寸的确定提供了更为科学和高效的手段。尽管如此, 在实际工程应用中, 如何合理选取计算模型、准确输入参数以及有效验证计算结果, 仍然是工程师们面临的挑战^[7]。因此, 本研究致力于在理论推导和数值验证的基础上, 提出一种更为简便且精度较高的基底有效尺寸计算方法, 以期对地基基础设计提供新的思路和参考。

2 研究条件及研究路径

在工程领域, 我们常常需要将传统的扩展基础进行简化设计, 以便于施工和计算。通过将扩展基础简化为中心有刚性支撑的弹性地基梁, 我们可以更有效

地控制和分析基础的受力情况^[8]。扩展基础的平面尺寸通常被设计为 $L \times a$ ，其中 L 代表长度， a 代表宽度，而基础的厚度则被设定为 h 。在这样的设计下，基底压应力会呈现出远离中心点逐渐降低，而靠近中心点则逐渐升高的趋势^[9]。

在分析扩大基础端部的竖向位移时，我们发现这种位移是由两部分组成的：一部分是由于扩大基础自身变形引起的，另一部分则是由于地基的竖向变形所导致的。为了更精确地计算扩大基础自身变形，可以将基础视为一个跨度为 $L/2$ 的悬臂梁。通过这种模拟，可以利用悬臂梁的力学特性来预测和计算基础的变形情况，从而为工程设计提供更为可靠的数据支持^[10-11]。具体如图 1、图 2 所示。

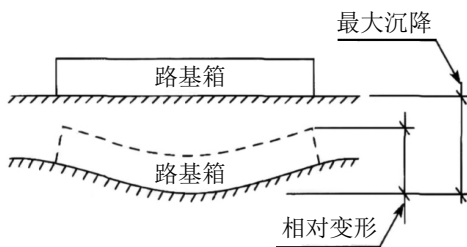


图 1 基础变形示意图

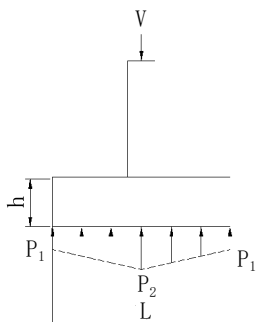


图 2 简化计算图示

3 公式推导

通过扩展基础悬臂端部的竖向位移与该位置处的地基变形相等，以及 P_1 、 P_2 与竖向荷载 V 间的关系，联立两个方程求得 P_1 与 P_2 间的关系。

3.1 基底在扩展基础端部的竖向压缩量

$$\delta_1 = \frac{P_1}{K_s} \quad (1)$$

式中： P_1 为基础边缘压应力； K_s 为地基的基床系数。

3.2 扩展基础端部位移

扩展基础在梯形荷载作用下的变形分为三部分：三角形荷载变形（ $P_2 - P_1$ ）、均布荷载（ P_1 ）变形、荷载区域基床下沉。

1. 三角荷载变形 + 均布荷载变形：

$$\delta_2 = \frac{P_1 a \left(\frac{L}{2}\right)^4}{8EI} + \frac{(P_2 - P_1) a \left(\frac{L}{2}\right)^4}{30EI} \quad (2)$$

$$= \frac{P_1 a L^4}{128EI} + \frac{(P_2 - P_1) a L^4}{480EI} = \frac{2.2 P_1 a L^4 + 0.8 P_2 a L^4}{384EI}$$

式中： a 为基础宽度，m； P_2 为基础中心压应力，kPa； E 为基础弹性模量，kPa； L 为基础长度，m； I 为基础绕水平中心轴惯性矩， m^4 。

2. 荷载区域基床下沉量：

$$\delta_3 = \frac{P_2}{K_s} \quad (3)$$

式中： P_2 为基础中心压应力，kPa。

3. 扩展基础端部位移：

$$\delta_3 - \delta_2 = \frac{P_2}{K_s} - \frac{2.2 P_1 a L^4 + 0.8 P_2 a L^4}{384EI} \quad (4)$$

3.3 有效长度计算公式

$$\text{令 } \delta_1 = \delta_3 - \delta_2, P_2 / P_1 = n$$

$$\frac{P_2}{K_s} - \frac{2.2 P_1 a L^4 + 0.8 P_2 a L^4}{384EI} = \frac{P_1}{K_s} \quad (5)$$

$$\Rightarrow L = \sqrt[4]{\frac{32 E h^3 (n-1)}{K_s (2.2 + 0.8n)}}$$

式中： h 为基础厚度，m； n 为基础中心与端部竖向压应力比值。

3.4 公式分析

经过对公式进行分析，获得以下结论：

1. 扩展基础的基底有效尺寸会随着基础厚度的增加而相应地增大，同时，它也会随着地基基床系数的增加而减少。这种关系具体表现为，扩展基础的基底有效尺寸与 h 的 $3/4$ 次方、 E 的 $1/4$ 次方成正比，与 K_s 的 $1/4$ 次方成反比。

2. 在工程实践中，将扩展基础上结构的容许转角作为扩展基础容许转角的参考值，可以进一步推导出 n 值，最后针对性地进行扩大基础有效长度的计算，以确保结构的稳定性和安全性。

4 公式验证

假定地基基床系数 $K_s = 60\,000 \text{ kN/m}^3$ ，扩展基础弹性模量 $E = 30 \text{ GPa}$ ，厚度 $h = 1.5 \text{ m}$ ，宽度为 1.0 m 。

4.1 公式计算结果

根据公式，当基底压应力比 $n = 1.1$ 时，计算获得的有效长度 $L = 6.47 \text{ m}$ 。

继而计算基底最大、最小压应力为：

$$[1/2 \times (P_1 + 1.1 P_1) \times 1.0 \times 6.47/2] \times 2 = 327 \rightarrow \text{最小压}$$

应力为 $P_1=45.9\text{ kN}$ → 最大压应力为 $1.1\times 45.9=50.5\text{ kN}$

4.2 模型计算结果

利用通用有限元软件建立 $6.47\times 1\times 1.5\text{ m}$ 的扩展基础梁单元模型，划分为 32 个单元，每个单元的长度为 0.2 m ，土反力通过土弹簧模拟，标准弹簧系数为 $1\times 0.2\times 60\ 000=12\ 000\text{ kN/m}$ （见图 3）。

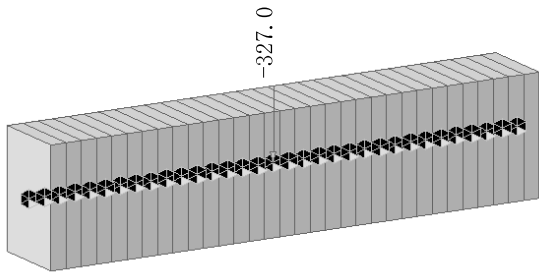


图 3 扩展基础土弹簧耦合模型

梁单元计算结果显示，在中心竖向压力荷载下，扩展基础中心的反力为 10.7 kN ，对应的基底压应力为 $10.7/1.0/0.202=53.0\text{ kN}$ ，如表 1 所示。

经软件计算验证，计算误差在 5% 之内，本公式具有较高精度。

5 扩展基础常用尺寸

依据 $n=1.1$ ，也即以 $P_2=1.1P_1$ 作为扩展基础临界长度的判据，计算获得表 2。

表 1 公式与模型计算结果对比表

Ks (kN/m ³)	E (kN/m ²)	H (m)	L (m)	公式 (kPa)	模型 (kPa)	误差
60 000	30 000 000	1.0	4.77	71.8	71.7	0.1%
		1.5	6.47	50.5	53.0	-4.7%
3 000	30 000 000	1.0	10.1	33.9	33.7	0.6%
		1.5	13.68	25.0	24.9	0.6%

表 2 常见土层对应的扩展基础临界长度

土层	基床系数 Ks (kN/m ³)	弹性模量 E (kN/m ²)	厚度 h (m)	临界长度 L (m)
粘性土	10 000	30 000 000	1.0	7.47
			1.5	10.13
	100 000	30 000 000	1.0	4.20
			1.5	5.70
砂类土	3 000	30 000 000	1.0	10.10
			1.5	13.68
	60 000	30 000 000	1.0	4.77
			1.5	6.47

6 公式推广

大吨位吊机吊装常采用路基箱作为分载基础。路基箱为钢板焊接而成的格栅形结构，厚度一般为 320 mm ，横向板间距为 375 mm ^[12]，如图 4 所示。根据路基箱高度 320 mm ，盖板和横向立板厚度 25 mm ，竖向及斜向立板厚度 20 mm 进行计算：

1. 路基箱断面与实心断面间抗弯参数的差异。根据计算，路基箱断面的抗弯能力（刚度和模量）均为实心截面的 0.44 倍。

2. 等效弹性模量。将截面特性转化为弹性模量后，拟合后的等效弹性模量 $E_e=0.44\times 206=90.6\text{ GPa}$ 。

3. 路基箱临界长度计算。根据分载能力计算路基箱临界长度，此长度未考虑路基箱自身的受力性能。具体如表 3 所示。

7 结论

本文深入探讨了扩展基础与弹性地基耦合作用时，扩展基础的端部与根部的竖向位移如何影响扩展基础基底有效尺寸的计算。通过严谨的理论分析和使用通用有限元软件进行验证，成功推导并验证了一个新的公式，该公式能够准确地计算出扩展基础基底的有效尺寸。基于这些研究，得出了以下几点结论：

1. 提出的基于弹性地基与扩展基础耦合作用的基底有效尺寸计算公式，不仅结构简单，而且计算结果

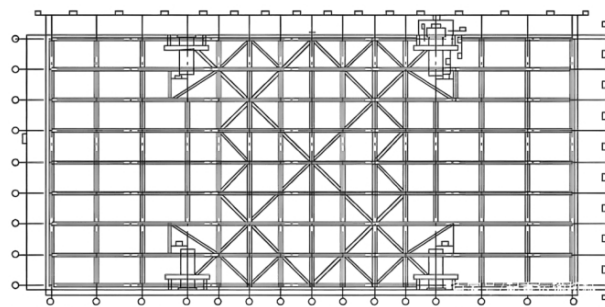
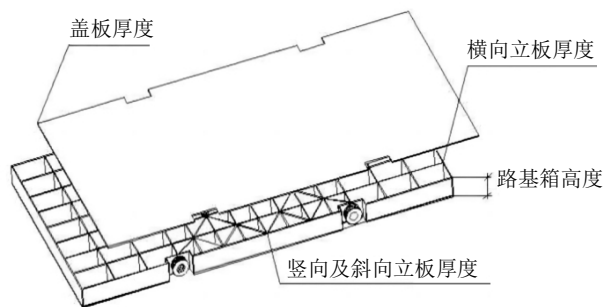


图 4 路基箱结构

表 3 常见土层对应的路基箱临界长度

土层		K_s (kN/m^3)	E (kN/m^2)	h (m)	L (m)
粘性土	软塑	10 000	90 600 000	0.32	17.6
	坚硬	100 000	90 600 000	0.32	5.6
砂类土	松散	3 000	90 600 000	0.32	32.1
	密实	60 000	90 600 000	0.32	7.2

可靠。这一公式能够很好地满足工程实践中的应用要求，为工程设计提供了便利。

2. 通过进一步的研究发现，扩展基础基底的有效尺寸会随着基础厚度的增加而相应增加，同时，随着地基基床系数的增加，基底有效尺寸则会减少。具体来说，基底有效尺寸与 h 的 $3/4$ 次方、弹性模量 E 的 $1/4$ 次方成正比关系，与地基基床系数 K_s 的 $1/4$ 次方成反比关系。

3. 提出了一个联合扩展基础上部结构容许转角的计算方法，通过这种方法，我们可以推导出扩展基础中心压应力与端部压应力的比值限值，进而确定扩展基础的经济长度。

4. 需要指出的是，虽然通过上述公式计算出的有效长度是理论上的长度，但在实际应用中，我们应当考虑到截面配筋的影响，并综合考虑后进行取值，以确保结构的安全性和经济性。

参考文献:

- [1] 李元齐,焦听雷,罗金辉,等.大宽高比混凝土独立扩展基础基底反力分布室外试验研究[J].建筑结构,2018,48(15):92-97.
- [2] 罗柱.沿海盐碱化地区软土地基处理安全分层风险评估体系研究[J].广东土木与建筑,2021(04):51-53.
- [3] 杨峰,慈新航,高益康,等.底部刚性层限制条件下条形基础地基承载力系数 N_c 与破坏模式[J].岩石力学与工程学报,2023(04):1031-1040.
- [4] 陈梁.复杂地质条件下桥梁锚碇扩大基础方案研究[J].

科技创新与应用,2023,13(36):87-90.

[5] 杜超凡,郑燕龙,章定国,等.基于径向基点插值法的旋转Mindlin板高次刚柔耦合动力学模型[J].力学学报,2022(01):54.

[6] 唐辉.基于有限元法的双向偏心受压扩大基础受力分析[J].工程与建设,2020,34(05):900-902,907.

[7] 李凯,雷斌.基坑支护接头箱旋挖“软咬合”成桩施工技术[J/OI].施工技术(中英文),1-7[2025-05-22].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=fSCzX0TVvUjuvXptNfizH_EnSqCsoU8AzXmXcQv6eILARoxYRps2JfCEQJgN93jaHCVjlO9hEvw38GLMDLiQ-CN2uoG3l7A09qlZal1WVPnMH4AaSuZVUijPcSsiXwGxv3eipiMeRiq7-KZMK4NLz5lQwkZf1GI-cYVoEA33XteL6xeFktr7w==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

[8] 王洋,陈少波,王强,等.路基箱机器人智能焊接生产线研发及应用[J].机器人技术与应用,2025(01):41-44.

[9] 李亮,张太忠,单广灿,等.深厚富水软土地层深基坑水平封底与降水联合优化设计方法[J/OI].铁道科学与工程学报,1-15[2025-05-20].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=fSCzX0TVvUgqXCGTkPC1ijYwL-7LNp_SI-v03iDeX1HgWhedeNLkok1E3qJ5mIbWN_UqHGyKl8bnGpnJkSU8KypN7ovBjhrKMidD9TgLDiMnzBj5vlp_Xqr8-qDpkTolSHV0kMy1lJrkIT0bWdAIabrlLIAe9b9W6szF5KrfT_xRcT_KmQTRw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

[10] 危成昊.软土地质下深基坑变形规律分析及围护桩应用研究[J].建筑技术开发,2025,52(05):156-158.

[11] 许严.道路桥梁工程中软土地基水泥粉喷桩施工技术[J].中国水泥,2025(05):104-107.

[12] 李豪,徐金帅.自装卸路基箱及支座的分载性能对比研究[J].石油化工建设,2023,45(09):78-80.