

无粘性土中浅基础沉降的有限元分析

Hind Nadhum Raheem

伊拉克 纳杰夫 库法大学土木工程系工程实践

摘要: 在浅基础设计过程中, 极端沉降会导致使用性问题。由于沉降控制着与土壤承载力相关的主要设计标准, 因此估算松散砂土上的浅基础沉降是一个高度复杂的问题。对于桥梁、发电厂和土坝等重要结构, 必须减少沉降, 以确保工程结构的稳定性, 换言之, 任何额外的沉降都可能在超过允许值时导致连续的结构损坏。在本研究中, 使用 PLAXIS 3D 程序 (用于解决许多岩土工程问题), 使用 (10×10×10) m 的松散砂模型来研究浅层各种参数的影响。该程序已用于研究影响 (施加荷载强度 100、150、200 KN、形状 (圆形正方形)、基础宽度 (0.75、1、1.5) m、下伏土壤的内摩擦角 (24、33、37) 度和影响地下水位)。得出的结论是, 形状、摩擦角和弹性模量的估算基于一个关系, 该关系与 powell 和地下水位预测的其他可用关系很好地匹配, 它使沉降量加倍。根据测试结果, 讨论并推荐了临界值。

关键词: 数值模拟; Plaxis 3D; 弹性沉降; 基础形状; 施加荷载强度

Finite Element Analysis of Shallow Foundation Settlement in Cohesionless Soils

Hind Nadhum Raheem

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Kufa, Najaf, Iraq

Abstract: Extreme settlement can lead to serviceability complications during shallow foundations design. Since Settlement controls the principle design criterion when it is related to the bearing capacity of soils, the estimation of shallow foundation settlement above loose sandy soils is a highly complex problem. For important structures such as bridges, power plants and earth dams, etc. settlement has to be reduced to ensure the stability of engineering structure, with another word any additional settlement could lead to successive structural damage when it exceeds the allowable. In this a model of (10×10×10) m with loose sand was used to investigate the effect of shallow various parameters by using PLAXIS 3D program which was used to solve many geotechnical problems. The program has been used to investigate effect (applied load intensity 100, 150, 200 KN, shape (circular square), width of foundations (0.75, 1, 1.5) m, internal friction angle of underlying soil (24, 33, 37) degree and effect water tables existence beneath the foundation). It was concluded that the shape, friction angle, modules of elasticity with was estimated based on a relationship which showed a good match with other available relationships predicted by powells and Water table existence which it doubles the settlement as it exist. Based on test results critical values were discussed and recommended.

Keywords: Numerical modelling; Plaxis 3D; Elastic settlement; Foundation shape, Applied load intensity

1. 引言

基础设计中的主要问题是, 无论是使用深基础还是浅基础来支撑任何结构, 都会不断提高。众所周知, 浅基础 (如扩展基础) 通常比深基础结构成本低得多。已经提出了几种经验、半经验和数值方法, 并着重于预测浅层地基沉降。基于几个历史案例。折减通常取决于土壤条件以及基础支撑形状和尺寸上施加的荷载分布^[1]。在岩土工程中, 估算无粘性土壤上方的浅基础沉降是一个巨大的挑战。

通常情况下, 预计不均匀砂沉降高于粘土, 因此砂沉

积物更不均匀^[2]。砂土的高渗透性导致施加荷载后在较短时间内发生沉降^[3]。在浅基础的典型设计中, 承载力和基础沉降^[4]是两个主要问题。对于无粘性土壤, 承载力通常不是大问题。因此, 似乎容许沉降控制了设计^[5]。快速沉降是由于结构快速变形以及由此导致的无法限制破坏和避免进一步变形而导致的, 这种破坏可能是由极端沉降导致的^[6]。许多已进行的研究得出结论, 无粘性土壤上方浅基础的沉降取决于几个因素, 如下伏土壤的应力应变行为、基础上的压力分布^[7]、基础尺寸、基础几何结构、基础刚

度、下伏土层的厚度等。

一些因素对沉降有显著影响,如基础尺寸、基础形状、荷载水平以及下伏土层的应力应变特性。在估算地基时考虑了所有这些因素,如果不采用数值分析,沉降是不可能的。因此,目前的方法只考虑更重要的因素,而忽略了其他不太重要的因素;砂土的应力-应变特性取决于原位土的一些特性和特征,稍后将对此进行详细讨论。

2. 研究目标

本研究的目的是在考虑荷载强度和土壤内摩擦角、地基形状和地下水位影响的情况下,估算无粘性土壤上方浅基础的沉降。对于影响浅基础稳定性的许多参数,除非数值分析得到批准,否则不可能预测有限的沉降值,因此,已使用名为 PLAXIS 3D 程序的重要岩土工程工具来分析和预测浅基础沉降。研究了不同形状(正方形、圆形)和宽度(0.75、1、1.5)m的浅基础在一定松散砂土上的性能。

本研究中使用的土壤具有 15% 的相对密度 (R_e) 和总重量,最松散的单位重量为 1531 和 1889 g,内摩擦角 (ϕ) 为 (24、33、37) 度。使用岩土工程 PLAXIS 3D 程序中最重要工具之一对沉降进行了分析。很明显,由于基础移动,结构中会出现裂缝。因此,应减少沉降,以确保工程结构的稳定性。

3. 文献综述与研究

据报道,还有 40 多种不同的方法可用于预测颗粒土下的地基沉降 (Douglas, 1986)。对于理论和进一步方法无法提供可接受结果的状态。岩土工程文献中的几种沉降预测方法(理论和实验),适用于几种类型土壤上的浅基础^[2, 8-9]。因此,所有这些提出的方法范围从经验到有限元,复杂的非线性无法实现可靠和准确的沉降预测^[10]。目前,可以通过有限元方法分析地基沉降和承载力,平衡极限^[11-14],有限差分技术^[15]在近年来被广泛用于预测地基的承载力和沉降。需要测量浅基础沉降的两个主要组成部分(弹性沉降和固结沉降)。如果地基位于无粘性土壤上,则必须仔细估计弹性沉降。

对于无粘性土壤,很难获得原状土样,这会给计算土体的压缩性带来更大的困难。这解释了为什么在砂土文献之上的地基可以获得大量沉降预测方法,而粘土的沉降预测方法要多得多。Douglas (1986) 指出,目前使用了 40 多种不同的沉降预测方法。最具挑战性的问题是如何估计不均匀类型,因为它可能会导致重要问题,如地基或梁、

板等的开裂。由于获取无粘性土壤的原状样本存在困难,沉降估计的几种方法都集中在所有现场调查之间的关系上。“基脚的沉降受各种参数的影响,包括基脚的形状和尺寸、嵌入深度、分层、土体非均匀性、荷载条件类型和饱和度”^[16]。

结构沉降可通过三种分类方法进行估算,如经验方法或半经验方法和数值方法。在本研究中,讨论了一种数值方法。如前所述,土壤沉降可分为三种类型^[9-10]:

1. 立即沉降 (S_i): 其定义为施加荷载后直接发生的沉降,其中在施加荷载后发生沉降。沉降量将受到结构基础的灵活性和结构所依赖的土壤材料的种类的影响。对于凝聚力而言,与固结沉降相比,立即沉降通常很小,因此这种沉降通常不会被注意到,但对于任何砂土,通常都要仔细测量。

2. 一次固结沉降 (S_c): 这种类型通常是由于外部施加荷载引起的孔隙水压力逐渐消散而发生的。这是一个时间依赖性的过程,可能会持续很长时间,可能几个月或几年。

3. 二次沉降(蠕变) (S_s): 由于土壤体积变化,在恒定的实际应力下发生。因此,沉降总数可通过公式 $S_t = S_i + S_c + S_s$ 进行估算。图 1 验证了本研究中建模和研究的问题陈述。图 3 和图 4 说明了沉降类型。任何土壤上方的浅基础沉降通常由两个组成部分组成,如等式 1 所示。

$$S = S_i + S_s \quad (1)$$

其中 S_i =立即沉降, S_s =二次压缩。

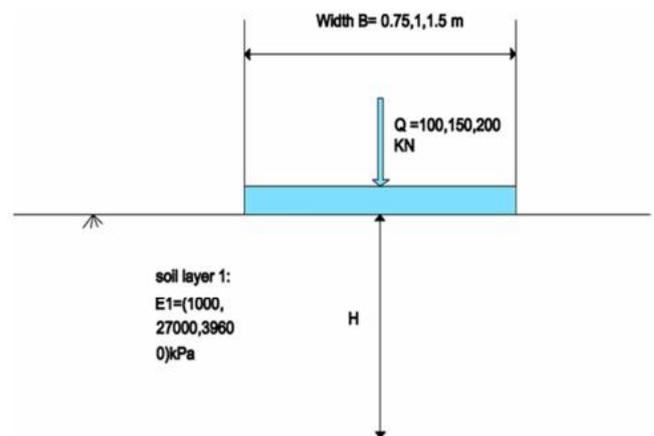


图 1. 调查的问题陈述。

Relevant to	Factors affecting settlement	Remarks
Foundation	Foundation size (width/diameter B)	Small footing to large raft.
	Foundation shape (L/B: length to width ratio)	Square, rectangular and circular.
	Foundation depth (D)	Shallow foundation (D/B<1)
	Foundation rigidity	
	Roughness of foundation base	
Load applied on foundation	Distribution of the load	Only vertical load is considered in this research.
	Magnitude of the load	
Underlying soil profile	Stress-strain behaviour	Linear elastic, non-linear elastic, elasto-plastic
	Bulk density (γ)	
	Depth of water table	
	Thickness of soil layer (h)	

图 2. 主要影响浅基础沉降的因素 (Huang, Yongqing, 2011)。

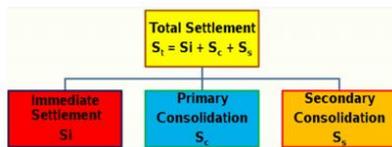


图 3. 沉降类型。

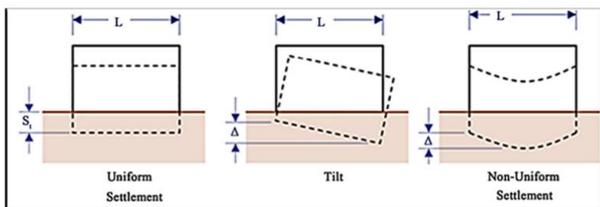


图 4. 浅基础沉降类型 (Talib, 2016)。

Terzaghi (1943) 认为, 饱和无粘性土壤的土壤韧性 (杨氏模量) 接近干燥土壤的 50%。无粘性土壤中的地下水位升高会导致额外沉降。这一进一步解决方案有许多细节。Peck 和 Bazaraa (1969 年) 记录了现场证据, 其中随着地下水位增加到基脚水平, 沉降量增加了一倍。含水量和地下水位的变化极大地干扰了土壤的强度和性质, 从而影响了整个结构。然而, 岩土工程师在大多数情况下都放弃了这一问题, 因为土壤环境将持续保持不变。这似乎对使用几种地基改良方法来增强和改良土壤、支撑和修复地基至关重要^[17-18]。

洪水、极端降雨、周期性变化会显著影响地基沉降行为, 可能超过沉降极限^[19-21]。对于近地表土壤在结构设计寿命内未完全饱和的位置, 根据水文事件的变化, 当前的设计方法可以是传统的或非保守的。该程序超过了可能危及结构稳定性的容许沉降极限。因此, 至关重要是估计由于水变化条件可能发生的额外沉降, 以提供足够的安全裕度^[20-21]。

4.有限元程序

随着计算机知识的发展,数值技术在当今时代得到了

广泛的应用。在数值方法中, FEM 可能是最常用的技术。典型软件包括 (ABAQUS、ANASYS 和 PLAXIS)。此外, 研究人员和工程师也采用 FDM。然而, 数值方法也有局限性。最基本的限制是建模岩土问题的分析精度, 这取决于所采用的本构模型和这些参数的输入值确定。为了考虑地基的沉降, 考虑线性弹性和完全塑性的 MC 模型可能是一个不错的选择。然而, 所采用的模型的选择是关键。

PLAXIS 是一个广泛的程序, 旨在分析处理复杂岩土结构的许多特征。它还用于求解本研究中使用的有限元模型的平衡方程, 以分析松散砂土上浅基础的性能, 它为不擅长有限元分析的工程师提供了一种有价值的分析工具。该程序实现了岩土工程变形和稳定性的三维分析。非线性有限元计算应在不需要长时间进行常规分析的情况下完成。土壤是一种多相材料, 其性质会随着环境的变化而变化。我们的大多数岩土工程问题本质上都是 3D 的, 因此, PLAXIS 3D 程序是工程师的合适工具, 使用户能够估计任何结构元素之间的相互作用, 例如土壤、液体和其他土壤-结构相互作用。

PLAXIS 3D 计划用于岩土工程问题中的变形和稳定性三维分析, 这些问题可能对任何结构的稳定性造成威胁。它是一种合适的岩土工程仪器, 用于处理土壤的非线性和复杂力学行为, 并对复合岩土结构进行建模^[22]。对于许多项目来说, 土壤建模是一个非常重要的问题, 它可能涉及建筑的建模, 此外, 还应创建土壤与建筑之间的交互作用。岩土工程应用需要基本的渐进模型来模拟土壤的非线性、时间依赖性以及各向异性行为。

PLAXIS 的平均目标是为岩土工程师提供功能分析, 这些工程师不可避免地没有数字专家。表 1 显示了有限元分析中使用的土壤性质。

Properties	Values
Cohesion (kPa)	0
Modulus of Elasticity, E (kPa)	10000, 27100, 39600
Poisson's Ratio, ν	0.25
The angle of internal friction	24, 33, 37
Density (kN/m^3)	15.5, 21, 23
Model name	Mohr-Coulomb Failure
Material	Cohesion-less Soil
Condition	Drained
Model size	$10 \times 10 \times 10 \text{ m}$

表 1. 有限元分析中使用的土壤性质。

5.数据

本研究中使用的土壤物理和化学性质数据由 E.Hassan Abdula 等人进行^[23]。通过一致的现场测量, 土壤样本从伊拉克 al-NAJAF 市采样, 采样地点正好位于东

经 44°25'0" 和东经 31°56'0" 的区域。

图 5 显示了所用土壤的粒度分布。表 2 总结了用于调查松散砂土上浅基础性能的所用数据库和基本统计信息的参考资料。所用砂土的物理性质如图 6 所示, 代表了所有试验中所用沙土的化学性质。

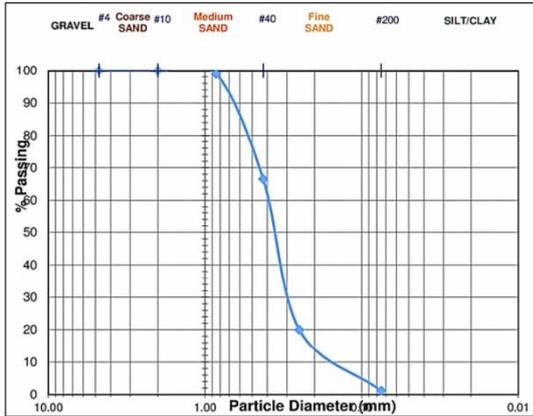


图 5. 所用土壤的粒度分布(Albakaa 和 Fakhraldin, 2022)。

Chemical composition	Values%
SO ₂	0.82
Gypsum content	1.76
T.D.S	0.54
Organic content	0.67

表 2. 分析中使用的沙土的化学性质(Albakaa 和 Fakhraldin, 2022)。

Index property	Value	Specification
D ₁₀ (mm)	0.15	ASTM D422
D ₃₀ (mm)	0.3	
D ₅₀ (mm)	0.35	
D ₆₀ (mm)	0.39	
Coefficient of uniformity (C _u)	2.6	
Coefficient of curvature (C _c)	1.54	
Soil classification (USCS)	SP	
Specific gravity (G _s)		ASTM D845
Maximum dry unit weight, γ _{d max} (kN/m ³)	18.89	ASTM D7382-08
Minimum dry unit weight, γ _{d min} (kN/m ³)	15.31	ASTM D4254-14
Maximum void ratio, e _{max}	0.775	
Minimum void ratio, e _{min}	0.403	
Relative density, Dr (%)	15% (loose)	
Void ratio, e	0.72	
Dry unit weight, γ _d (kN/m ³)		
Optimum water content		ASTM D698

图 6. 所用沙子的物理性质(Albakaa 和 Fakhraldin, 2022)。

1.1.1.16. 弹性模量

通过^[24], 在土壤的弹性模量 (E) 和该土壤的几个工程性质之间建立了广义的相关性。该关系式简单, 可用于工程应用中模量弹性的有用估算。通过使用该关系发现的土壤弹性模量与 powell^[25]预测的其他可用关系非常吻合, 如图 7 所示。

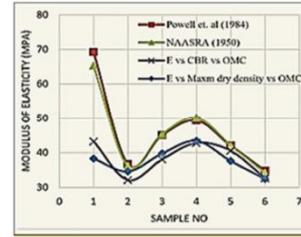


图 7. 比较分析结果 (Ghosh, Datta, Chattapadhyay, 2017 年)。

$$E = 7000 N^{0.5} \text{ kPa} \quad (2)$$

这里:

E: 弹性模量 (KN/m²) 和 N: 锤击次数。

通过使用 Bowels (1982) 给出的标准关系方程, 通过使用 SPT N 值 I 和实施的方程 2, 估算土壤弹性模量。通过 N 值和Φ值之间的标准关系, 得出 N 值。来自 (IS 6403-1981), 如下图 8 所示。

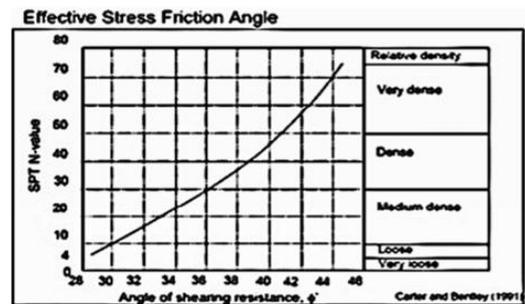


图 8. 数值与内摩擦角之间的规定关系。

7. 结果

7.1. 基础几何结构的影响

基础几何形状是影响浅基础位移的重要因素之一^[26]。图 9 展示了三种不同的基础几何建模情况的变化, 并进行了分析。图 10 (a 和 b) 显示了刚性方形基础的应力-应变图, 其宽度为 0.75、1 和 1.5 m (b), 土壤厚度为 10 m。结果表明, 随着方形斜坡地基宽度从 0.75m 增加到 1m 和 1.5m, 施加在方形浅基础上的 100KN 荷载的沉降量分别减少了 96%和 99%, 而在 150KN 荷载的情况下, 沉降量分别降低了 62%和 95%, 如图 10 (a 和 b) 所示。这种减少可能是由于施加负载强度的降低而发生的。

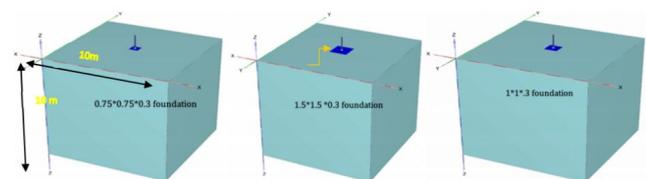


图 9. 各种调查案例的数值分析模型。

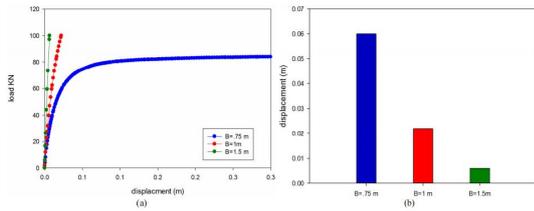


图 10(a 和 b). 100KN 荷载下浅基础尺寸的影响。

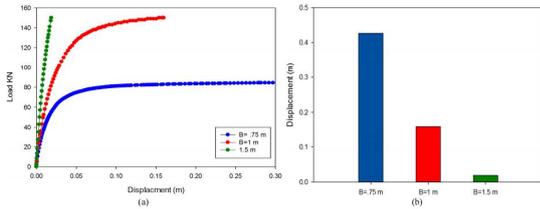


图 11(a 和 b). 150KN 荷载下浅基础尺寸的影响。

7.2. 摩擦角的影响

摩擦角表征了土壤的颗粒互锁, 另一方面, 颗粒之间的互锁越大, 预计摩擦角越大, 反之亦然。在较高的法向应力下, 预期会有更好的连锁。表 2 显示了用于研究土壤内摩擦角影响的数据。

7.2.1. 方形基础

研究了 .75 m、1 m 和 1.5 m 浅基础在 150 KN 外加荷载作用下的内摩擦角的影响。在所有土壤输入参数中, 摩擦角对捕捉地基位移具有最重要的影响。表 3 显示了用于研究土壤内摩擦角影响的数据。基础情况下 0.75 m 总垂直位移的有限元分析和变形网格结果如图 12 所示。

荷载-位移曲线的结果如图 13 和图 14 所示, 很明显, 通过将内摩擦角从 24°增加到 33°和 37°, 0.75 m 浅基础的沉降分别减少了 92%和 95%, 而随着宽度增加到 1m, 沉降分别减少 89%和 94%。图 13 显示了 1m 基础情况下总垂直位移的变形网格。如图 15 和图 16 所示, 将基础宽度增加到 1 米的效果使沉降分别减少了 85%和 89%。

通过图 17 所示的数值分析, 获得了 1m 基础总垂直位移的变形网格。

图 18 显示, 随着基础宽度增加至 1.5m, 沉降分别减少了 85%和 89%。图 19 显示了 150 KN 荷载下不同摩擦角影响的沉降值之间的比较。

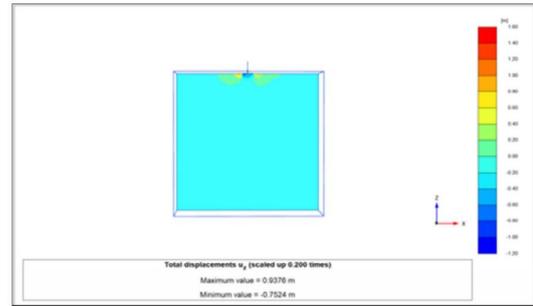


图 12. 0.75 m 基础情况下总垂直位移的变形网格。

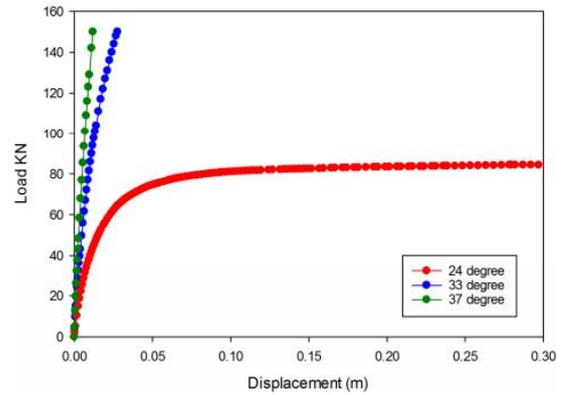


图 13. 位移和荷载之间的关系。

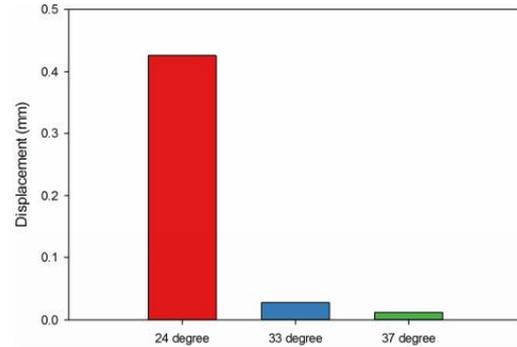


图 14. 0.75m 宽情况下不同摩擦角影响的沉降值之间的比较。

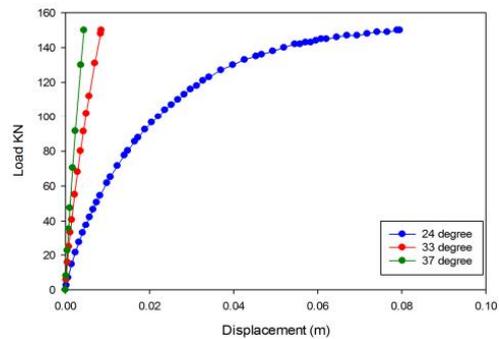


图 15. 1m 基础宽度情况下的荷载-位移曲线。

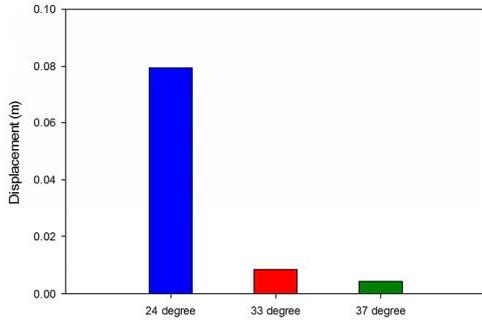


图 16. 1m 宽情况下不同摩擦角影响的沉降值之间的比较。

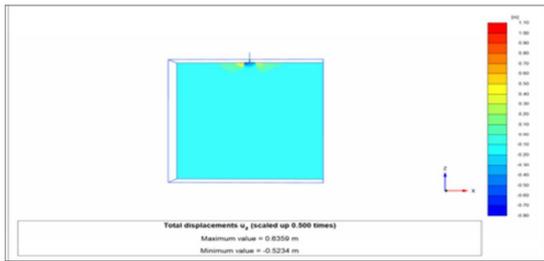


图 17. 1m 基础情况下总垂直位移的变形网格。

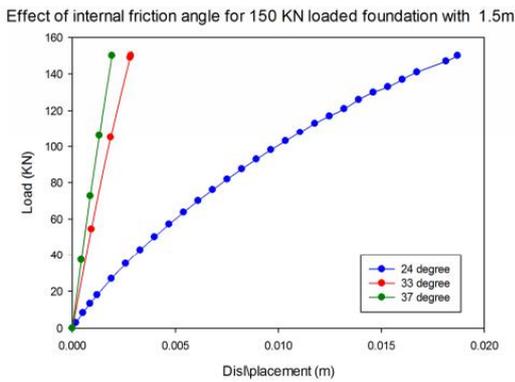


图 18. 1.5m 基础宽度情况下的荷载-位移曲线。

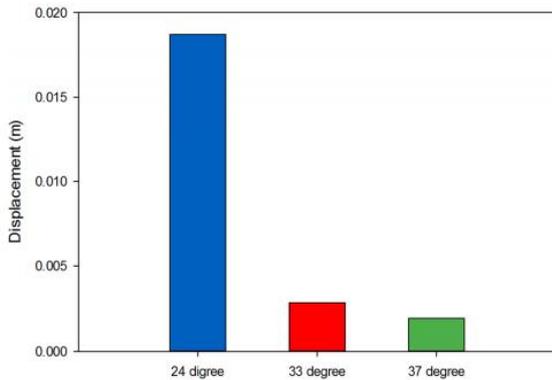


图 19. 1.5 m 宽情况下不同摩擦角影响的沉降值之间的比较。

Friction angle (degree)	Modules of elasticity (MPa)
24	10000
33	27100
37	39600

表 3. 所用土壤摩擦角数据。

7.2.2.圆基础

如图 20 所示, 通过 PLAXIS 3D 对圆形浅基础上施加 150 kN 荷载的内摩擦角的影响进行了建模。通过图 21 所示的数值分析, 获得了 1m 圆形基础情况下总垂直位移的变形网格。结果表明, 通过将摩擦角从 24°增加到 33°, 37°沉降减少了 95%和 98%。图 22 显示了 150 kN 施加荷载情况下内摩擦角对浅基础沉降的影响。

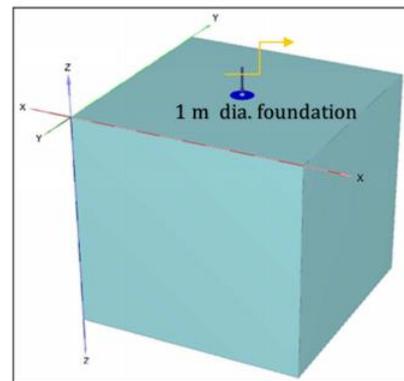


图 20. 直径为 1m 的圆形基础的数值分析模型。

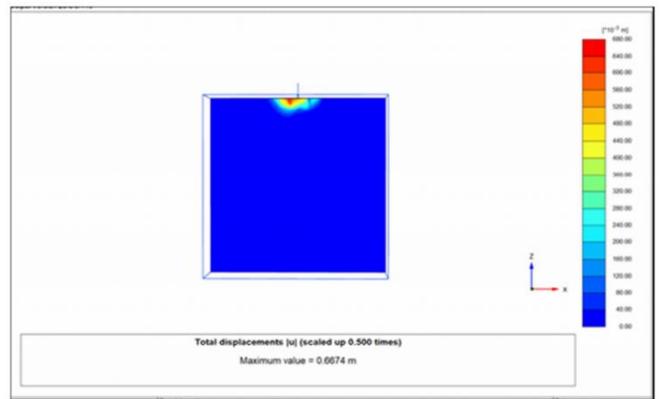


图 21. 1m 圆形基础总垂直位移的变形网格。

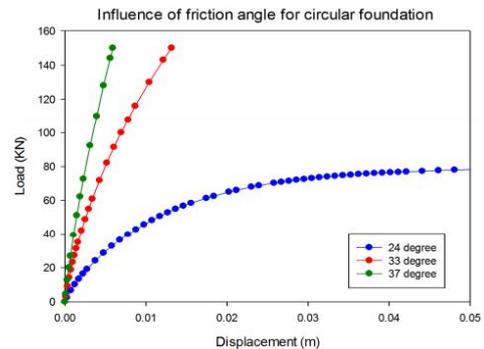


图 22. 浅层上内摩擦角的荷载-位移曲线。

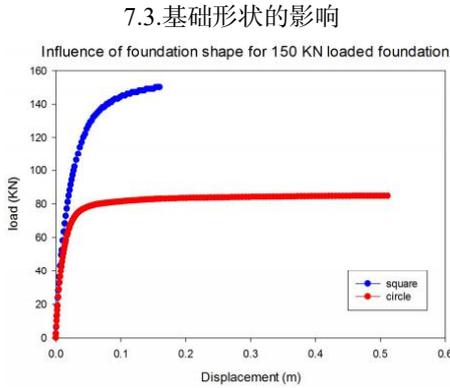


图 23. 形状对基础性能影响的荷载-位移曲线。

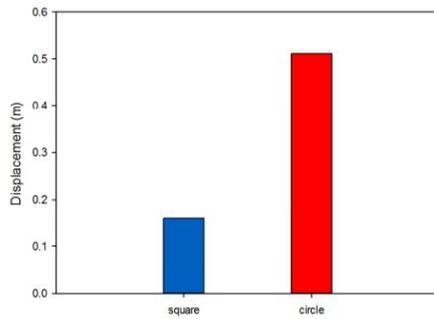


图 24. 不同形状基脚影响的沉降值之间的比较。

通过数值分析研究了 150 kN 施加荷载情况下 1m 浅基础形状的影响, 发现方形基础沉降比圆形基础沉降小 96%。图 23 和 24 显示了基础形状对立即沉降的影响。从所获得的结果可以得出结论, 基础形状影响浅基础沉降。

7.4. 地下水位存在的影响

地下水位的存在会影响支撑土的结构。在许多情况下, 地下水位会对结构造成严重破坏^[27]。从附近建筑物抽水会导致水位降低, 导致附近建筑物严重损坏和开裂。开挖也会影响基脚的稳定性, 从而对施工造成严重破坏。

结构基础下方水位的未来增长可能会导致额外沉降, 这可能会威胁已建结构的稳定性。可容许的浅基础沉降通常很小 (25) mm, 因此任何此类进一步沉降都必须小心。Terzaghi (1943) 提出, 当地下水位上升到基础下方时, 浅基础的沉降会使沉降加倍^[28]。

当地下水位上升到基础下方时, 浅基础的沉降量会增加一倍。

7.4.1.1m 浅基础宽度

图 25 和 26 反映了浅基础宽度下地下水位上升的影响。结果表明, 浅基础下的水上升会使沉降增加 96%。这一结果与 Terzaghi 的建议非常吻合, 因为随着地下水位的升

高, 沉降几乎增加了一倍。

7.4.2.1.5 m 浅基础宽度情况

图 27 反映了 1.5 米浅基础下地下水位上升的结果。结果表明, 浅基础下的水上升使沉降增加了 18%。该结果表明, 当基础宽度 $\geq 1.5\text{m}$, 地下水的影响减小。图 28 验证了地下水位上升引起的垂直沉降之间的比较。

7.4.3.对于.75 m 浅基础宽度情况

图 29 反映了浅基础宽度下地下水位上升的影响。结果表明, 浅基础下的水上升使沉降增加了 95%。此外, 这一结果与 Terzaghi 的建议非常吻合, 因为地基下的地下水位升高, 沉降量增加了一倍。

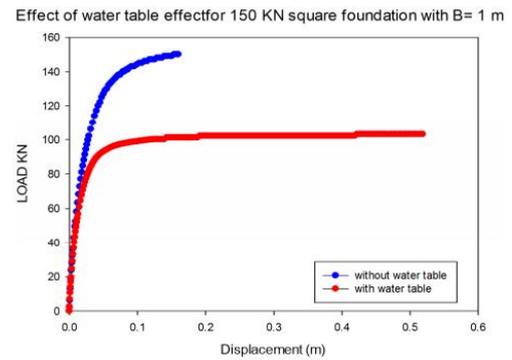


图 25. 1m 宽度情况下的荷载-位移曲线-地下水位效应。

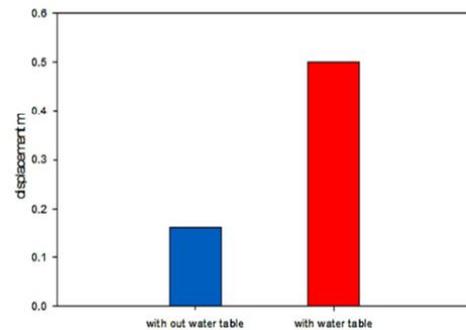


图 26. 受地下水位影响的沉降值比较。

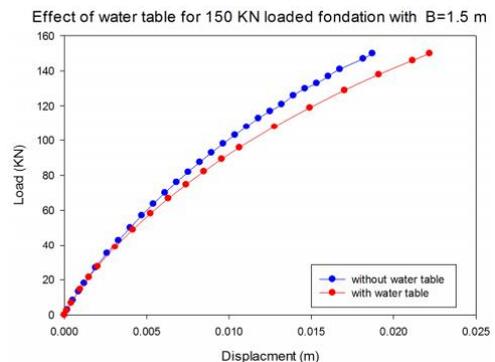


图 27. 1.5 m 宽情况下的荷载-位移曲线-地下水位效应。

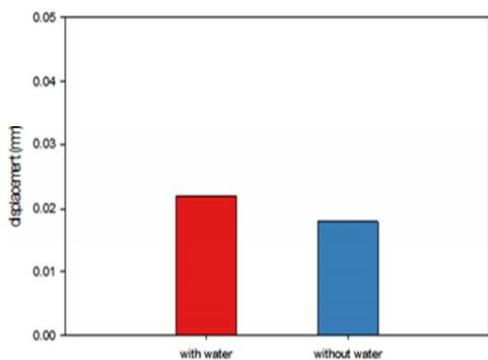


图 28. 地下水位上升引起的垂直沉降之间的比较。

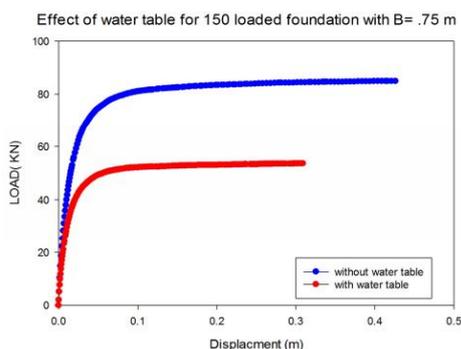


图 29. 地下水位效应的荷载-位移曲线 (0.75 m 宽)。

8. 结论

浅基础沉降的有限元分析。在各种土壤条件、荷载强度、形状和饱和度 (饱和、非饱和) 下, 通过应用莫尔-哥伦布模型进行了分析。基于这项研究的结果, 随后的结论可能会受到限制:

1. 不同荷载强度下的基脚沉降随基脚宽度的增加而减小, 其中宽度为 0.75m 的基础沉降最大。

2. 随着浅基础荷载强度的增加, 不同形状基脚下的基脚沉降量增加。因此, 圆形显示出最大沉降。

3. 与相同宽度的方形基础的沉降相比, 施加 150 kPa 荷载的 1m 圆形基脚中心的沉降增加了 96%。

4. 基础沉降受内摩擦角变化的影响。随着摩擦角和弹性模量的增加, 沉降在所有情况下都会减少。

5. 所有模型都表明, 随着浅基础下的地下水位上升, 观察到了额外的沉降, 但宽度为 0.75m 的浅基础显示了更高的沉降。

6. 当基础宽度为 $\geq 1.5\text{m}$, 地下水位的影响减小。

7. 0.75 米和 1 米基础宽度的沉降增加了一倍, 而 1.5 米基础宽度情况下, 沉降仅增加了 18%。

参考文献

[1] B. M. Das, Principles of Foundation Engineering,

Cengage Learning, Boston, MA, USA, 9th edition, 2016.

[2] M. Maugeri, F. Castelli, M. R. Massimino, and G. Verona, "Observed and computed settlements of two shallow foundations on sand," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, no. 7, p. 595, 1998. View at: Publisher Site | Google Scholar.

[3] D. P. Coduto, *Foundation Design Principles and Practices*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1994.

[4] Ouabel, H.; Zadjoui, A.; Bendouis-Benchouk, A. Numerical Estimation of Settlement under a Shallow Foundation by the Pressuremeter Method. *Civ. Eng. J.* 2020, 6, 156–163. [Google Scholar] [CrossRef].

[5] P. W. Mayne and H. G. Poulos, "Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations," *Journal of GeoTechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 37, no. 12, pp. 3229–3235, 1999. View at: Publisher Site | Google Scholar.

[6] B. Das and N. Sivakugan, "Settlements of shallow foundations on granular soil—an overview," *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 1, no. 1, 2007. View at: Publisher Site | Google Scholar.

[7] Z. Zhang, F.-R. Rao, and G.-B. Ye, "Design method for calculating settlement of stiffened deep mixed column supported embankment over soft clay," *Acta Geotechnica*, pp. 1–20, 2019. View at: Publisher Site | Google Scholar.

[8] Das, B. M. *Principles of Foundation Engineering*; Cengage Learning: Boston, MA, USA, 2015. [Google Scholar].

[9] M. Y. Fattah, K. T. Shlash, and N. M. Salim, "Prediction of settlement trough induced by tunneling in cohesive ground," *Acta Geotechnica*, vol. 8, no. 2, pp. 167–179, 2013. View at: Publisher Site | Google Scholar.

[10] Mohammed, M.; Sharafati, A.; Al-Ansari, N.; Yaseen, Z. M. *Shallow Foundation*

Settlement Quantification: Application of Hybridized Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Model. *Adv. Civ. Eng.* 2020, 2020, 7381617. [Google Scholar] [CrossRef].

[11] Schneider-Muntau, B.; Bathaeian, I. Simulation of

settlement and bearing capacity of shallow foundations with soft particle code (SPARC) and FE. *GEM-Int. J. Geomath.* 2018, 9, 359–375. [Google Scholar] [CrossRef].

[12] Kristić, I. L.; Prskalo, M.; Szavits-Nossan, V. Calibration of Numerical Modeling and a New Direct Method for Calculation of Shallow Foundation Settlements in Sand. 2019. Available online: <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/45/06-technicalcommittee-03-tc103-21.pdf> (accessed on 24 April 2019).

[13] Griffiths, D. Computation of collapse loads in geomechanics by finite elements. *Ingenieur-Archiv* 1989, 59, 237–244. [Google Scholar] [CrossRef].

[14] Sloan, S.; Randolph, M. F. Numerical prediction of collapse loads using finite element methods. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 1982, 6, 47–76. [Google Scholar] [CrossRef].

[15] Frydman, S.; Burd, H. J. Numerical studies of bearing capacity factor N_γ . *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 1997, 123, 20–29. [Google Scholar] [CrossRef].

[16] Dodagoudar, G. R.; Shyamala, B. Finite element reliability analysis of shallow foundation settlements. *Int. J. Geotech. Eng.* 2015, 9, 316–326. [Google Scholar] [CrossRef].

[17] Sabri, M. M.; Shashkin, K. G. The Mechanical Properties of the Expandable Polyurethane Resin Based on Its Volumetric Expansion Nature. *Mag. Civ. Eng.* 2020, 98, 11. [Google Scholar] [CrossRef].

[18] Sabri, M. M.; Shashkin, K. G. Improvement of the Soil Deformation Modulus Using an Expandable Polyurethane Resin. *Mag. Civ. Eng.* 2018, 83, 222–234. [Google Scholar] [CrossRef].

[19] Ahmad, H.; Asghar, M. U.; Asghar, M. Z.; Khan, A.; Mosavi, A. H. A Hybrid Deep Learning Technique for Personality Trait Classification From Text. *IEEE Access* 2021, 9, 146214–146232. [Google Scholar] [CrossRef].

[20] Janizadeh, S.; Pal, S. C.; Saha, A.; Chowdhuri, I.; Ahmadi, K.; Mirzaei, S.; Mosavi, A. H.; Tiefenbacher, J. P. Mapping the spatial and temporal variability of flood hazard affected by climate and land-use changes in the future. *J.*

Environ. Manag. 2021, 298, 113551. [Google Scholar] [CrossRef].

[21] Bazaraa, A. R. 1967. Use of the standard penetration test for estimating settlements of shallow foundations on sand, PhD dissertation, University of Illinois, Department of Civil Engineering, Champaign-Urbana.

[22] E. Hassan Abdula. M. KadumFakhraldin, (2022) [properties mesurment and applications of some geopolymers in dry wet sand IOP conference series earth and Environmental Science 96 (1): 012008.

[23] Setu Ghosh Tufan Datta Bikash Chandra Chattapadhyay Prediction of Elastic Modulus of Soil Subgrade from Its Various Engineering Properties Geotechnical engg. Meghnad Saha Institute of Technology, Kolkata-700150.

[24] Boweles, J. E. “Foundation Analysis and Design” 22MaGrawHill Book Company, New York, 1982, pp ...66-22189.

[25] study on the influence of ground water level on foundation settlement in cohesion less soil”. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: challenges and innovations in geotechnics, Paris, 953-956.

[26] Das, B. M. and Sivakugan, N. 2007. Settlements of shallow foundations on Granular soil – an overview, *Int. J. Geotech. Eng.*, 1, (1), 19–29. SHAHRIAR, M. A. - SIVAKUGAN, N. - URQUHART, A. - TAPIOLAS, M. - DAS, B. M.: A study on the influence of ground water level on foundation settlement in cohesionless soil. In The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, pp. 216-229.

[27] SHAHRIAR, M. A. - SIVAKUGAN, N. - URQUHART, A. - TAPIOLAS, M. - DAS, B. M.: A study on the influence of ground water level on foundation settlement in cohesionless soil. In The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, pp. 216-229.

[28] TERZAGHI, K. - PECK, R. B. - MESRI, G.: Soil mechanics in engineering practice, 3rd Edition, John Wiley & SonsInc., New York.