

粉煤灰回填双层结构地基建建筑极限承载力计算*

Calculation of Ultimate Bearing Capacity of Double-Layer Structure Foundation Building Backfilled with Fly Ash

胡庭婷

(重庆市轻工业学校, 重庆 400709)

摘要: 为了提高粉煤灰回填地基极限承载力计算精度, 提出一种粉煤灰回填双层结构地基建建筑极限承载力计算方法。采用强夯方法构建一个由上层硬壳层、下层软弱层组成的双层地基结构, 并对其受力情况进行分析; 计算不同埋深的基础地基承载力系数, 并根据承载力系数确定软弱下层整体剪切破坏承载力、上层地基硬壳层冲剪破坏承载力以及地基土与地基侧壁下沉摩擦力。结果表明: 地基埋深和宽度比值大于等于4时, 地基极限承载力曲线变化趋于平稳; 当地基埋深为1.2 m, 主应力系数为0.5时地基承载力为5.0 MPa, 主应力系数为1时地基承载力为5.5 MPa; 在相同主应力系数下会随着地基基础埋深的增长而增加。上述结果表明该评价结果能够为上层建筑物稳定性能提供数据支撑。

关键词: 粉煤灰回填地基; 地基承载力; 地基回填; 强夯处理; 应力系数; 极限承载力

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 06-0054-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.010

HU Tingting

(Chong Qing Light Industry School, Chongqing 400709, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of calculating the ultimate bearing capacity of fly ash backfilled foundation, this paper proposes a method for calculating the ultimate bearing capacity of double-layer structure foundation buildings with fly ash backfill. Construct a double-layer foundation structure consisting of an upper hard shell layer and a lower weak layer using dynamic compaction method, and analyze its stress situation; Calculate the bearing capacity coefficient of the foundation at different burial depths, and determine the overall shear failure bearing capacity of the weak lower layer, the impact shear failure bearing capacity of the hard shell layer of the upper foundation, and the settlement friction force between the foundation soil and the foundation sidewall based on the bearing capacity coefficient. The results show that when the ratio of foundation depth to width is greater than or equal to 4, the variation of the ultimate bearing capacity curve of the foundation tends to be stable; The local foundation has a burial depth of 1.2 meters. When the principal stress coefficient is 0.5, the bearing capacity of the foundation is 5.0 MPa, and when the principal stress coefficient is 1, the bearing capacity of the foundation is 5.5 MPa; Under the same principal stress coefficient, it will increase with the increase of the burial depth of the foundation. The above results indicate that the evaluation results can provide data support for the stability performance of upper level buildings.

Keywords: fly ash backfill foundation; foundation bearing capacity; foundation backfilling; dynamic compaction treatment; stress coefficient; ultimate bearing capacity

* 基金项目: 重庆市自然科学基金创新群体科学基金 (cstc2022jcyj-cxttX0004)。

作者简介: 胡庭婷 (1984—), 女, 硕士, 高级讲师, 研究方向: 建筑工程算法研究和教育教学综合研究。

收稿日期: 2023-03-14

0 引言

地基承载力是反映地基综合稳定性的主要因素之一, 不仅与土地的压缩性、基础的尺寸和埋深等因素有关, 同时与地基内土质以及土层也有一定关联。为此, 众多学者研究计算地基承载力。如, 周盛全等^[1]提出水泥-粉煤灰搅拌桩复合地基承载特性, 但该方法承载力计算误差高; 刁璇等^[2]提出钢筋结构建筑不同结构点的抗震与变形监测方法, 但该方法承载力计算耗时长; 杨继强等^[3]提出基于双剪统一强度理论的地基承载力计算方法研究, 但该方法投入过大; 蒋洋等^[4]提出基于双侧非对称破坏模式的临坡地基极限承载力分析, 但该方法计算效果不佳; 党昱敬等^[5]提出水泥粉煤灰复合地基承载力计算方法研究, 但该方法计算精度仍较差, 且投资成本较高; 赵百超等^[6]通过正交试验法计算膨润土与粉煤灰混合地基土承载力, 但该方法地基承载力计算误差高; 张炎飞等^[7]对高速铁路路基跨越坎儿井暗渠稳定性进行了分析, 该方法计算精度差; 王彭生等^[8]提出基于统计分析的吹填材料粒径分布对强夯地基处理效果影响, 该方法计算结果召回率低, 可靠性不佳; 刘香等^[9]提出炉渣粉煤灰回填地基的强夯设计参数研究, 该方法计算鲁棒性差; 李小丰^[10]提出基于修正Mohr-Coulomb准则的半无限空间浅埋隧道弹塑性解, 该方法计算收敛性差; 谭鑫等^[11]提出刚性基础下筋箍碎石桩复合地基桩土应力比计算模型, 该方法计算误差大; 官晓明等^[12]提出房渣土地基强夯加固三维数值模拟研究, 该方法计算数值与实际结果不符; 陈培帅等^[13]对预压荷载作用下砂桩复合地基承载力进行了研究, 该方法承载力计算结果准确性差; 逯登栋等^[14]研究了东昆仑北麓夏日哈木地区地基承载力特征值及湿陷性, 该方法针对强过强, 应用范围受限; 高江平等^[15]提出基于三剪应力统一强度理论的硬壳层软土地基承载力方法, 但该方法计算过程复杂, 计算效率低。

针对以上问题, 提出一种建筑物粉煤灰回填地基承载力计算方法, 为建筑稳定性提供数据支撑。

1 粉煤灰回填地基承载力

1.1 粉煤灰回填地基受力分析

建筑物粉煤灰回填地基可分为双层地基, 该地

基由上层硬壳层、下层软弱层组成。上层硬壳层厚度为 H , 地基基础埋深为 D , 粉煤灰回填过程中对地基基础面最下层产生垂直向下作用的荷载设为 p , 其受力如图1所示。

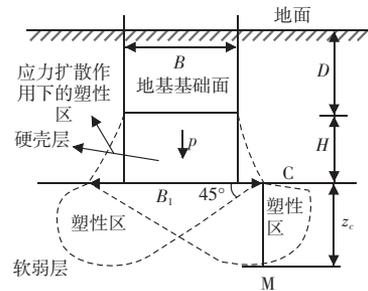


图1 粉煤灰回填地基受力图

Fig. 1 Force diagram of fly ash backfill foundation

若荷载 p 不断增加且大于临塑荷载, 地基基础角点 C 附近便会出现塑性区; 随着荷载 p 不断增加, 塑性区会继续向下延伸。当塑性区延伸深度到达边界时, 荷载 p 到达极限状态。设荷载 p 极限值为 p_{\max} , 地基角点 C 的塑性区延伸深度边界^[7]为 $z_c = \frac{\sqrt{2}B_1}{2}$, 其中, B_1 为地基应力扩散时地基的宽度。

设 M 点在角点 C 的塑性区延伸深度 z_c 内, 计算 M 点受到主应力公式为:

$$\tau_{zx} = \int_0^y \sigma_x \varepsilon_{ij}^* dx + \int_0^z (\tau - \sigma_z \tan \alpha) [\Delta v_i] dz \quad (1)$$

式中: τ_{zx} 为 M 点主应力; σ_x 、 σ_z 分别为 M 点受到的正应力和剪应力; ε_{ij}^* 为处于 i 时极限状态 j 下塑性区受力。 M 点水平方向与垂直方向的正应力需要考虑建筑物粉煤灰地基土的自身重量形成的水平方向、垂直方向应力。因此 M 点受到的正应力和剪应力为:

$$\sigma_x = a_x p_{\max} + \gamma(D + z_c) \quad (2)$$

$$\sigma_z = a_z p_{\max} + \gamma(D + z_c) \quad (3)$$

式中: γ 为 M 点内各层粉煤灰地基土的重度均值; a_x 为 $p_{\max} = 1$ 时 M 点处水平方向应力; a_z 为此时垂直方向应力; a_{zx} 为 M 点此时所受剪力。

综合公式(1)、(2)、(3), 得出 M 点针对粉煤灰回填产生的主应力。当 M 点主应力达到极限状态 j 时, 荷载 p 的极限值 p_{\max} 需要满足以下公式为:

$$p_{\max} = 2e / \sqrt{(a_x - a_z)^2 + 4\tau_{zx}^2} \quad (4)$$

式中: e 为粉煤灰回填地基时地基土层抗剪强度。

通过分析建筑物粉煤灰回填地基受力, 获取不

岩土力学

同形状、埋深基础的地基承载力系数，地基承载力系数计算公式为：

$$\zeta = \left[\left[(p - p_{\max}) / 2 \right]^2 + z_c^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中： ζ 为地基承载力系数。设 M 点受到的应力值为一个圆。该点应力圆面积随着荷载 p 不断增加而增大；当粉煤灰回填地基抗剪强度 e 等于应力圆的半径时，M 点应力圆到达极限状态，则该处荷载为 p_{\max} 。因此根据已知地基角点的塑性区延伸深度 z_c ，得出粉煤灰回填地基荷载极限值，并将此参数带入下层软弱层整体剪切破坏承载力计算中。

1.2 粉煤灰回填地基极限承载力计算

根据双层地基组织，将建筑物粉煤灰回填地基极限承载力分为下层软弱层整体剪切破坏承载力、上层地基硬壳层的冲剪破坏承载力以及回填土与地基侧壁的下沉摩擦力 3 个部分。

1.2.1 下层软弱层整体剪切破坏承载力

依据粉煤灰强夯回填地基整体的荷载传递特性与地基破坏形式因素，结合该地基上层硬壳层的应力扩散效应，采用太沙基公式得出该地基下层软弱层整体剪切承载力为：

$$q_1 = \frac{\zeta(a_x \lambda_q + c_1 \lambda_c + 0.5 \gamma_1 B \lambda_\gamma)}{\eta} \quad (6)$$

式中： η 为上层地基硬壳层的应力扩散系数； c_1 为软弱层土层的黏聚力； γ_1 为软弱层地基土层的重度； λ_q 、 λ_c 、 λ_γ 分别为地基硬壳层、地基土层黏聚力、重度的太沙基承载系数。

1.2.2 上层地基硬壳层的冲剪破坏承载力

由于粉煤灰强夯回填中的荷载造成地基土层发生破坏，因此在该过程中，需通过冲剪破坏的方式增加粉煤灰回填地基承载力，以降低荷载对地基土层所造成的破坏。

当粉煤灰回填到地基后，该地基土层具有整体性，但因为该地基土层内颗粒之间的咬合力与结构特性，该地基硬壳层剪切面无法产生平直面。因此，为便于上层地基硬壳层的冲剪破坏承载力计算，设该地基硬壳层冲剪破坏面为平直面。上层地基硬壳层的冲剪破坏承载力公式为：

$$q_2 = \frac{\gamma_2 k_s H^2 \tan \varphi_1}{\eta B} \quad (7)$$

式中： γ_2 为地基上层硬壳层的重度； B 为地基土层的基础宽度； φ_1 为地基上层硬壳层的内摩擦角； k_s 为上层硬壳层冲剪系数为； H 为上层硬壳层厚度。

1.2.3 回填土与地基结构侧壁的下沉摩擦力

地基结构一般为钢筋混凝土，因此地基侧壁为粗糙面，当地基基坑延伸至 3 m 之后，粉煤灰回填土自身压力与地基侧壁产生摩擦力，这些摩擦力可增加地基承载力。粉煤灰回填土与地基侧壁摩擦力的承载力公式为：

$$q_3 = \frac{\gamma_3 D^2 k_0 \tan \delta}{\eta} \quad (8)$$

式中： D 为地基基础埋深； k_0 为回填地基土的静止土压力系数； δ 为回填地基土与地基侧壁的摩擦角。

对以上回填地基承载力求和，得到粉煤灰回填地基极限承载力为：

$$q_i = q_1 + q_2 + q_3 \quad (9)$$

式中： q_i 为粉煤灰回填地基极限承载力。至此完成了粉煤灰回填地基极限承载力计算。

2 案例分析

建筑工程占地面积约 25 万 m^2 ，工程内部场地标高特点为北低南高，标高区间为 1043 ~ 1064 m，地质情况见表 1。

表 1 不同地基土层地质情况

Table 1 Geological conditions of different foundation soil layers				
序号	土层名称	状态	厚度范围/m	承载力/kPa
1	杂填土	松散	1.0~6.2	
2	粉土	中密	0.9~6.5	200
3	细砂	中密	0.7~9.1	181
4	粉质黏土	可塑	0.5~6.4	192
5	粉砂	中密	0.6~5.7	203

该地基表面杂填土土质偏软，厚度大约 6.2 m，且杂填土为建筑垃圾与生活垃圾，其承载力无法满足建筑工程要求，因此该地基杂填土需进行换填处理，换填处理采用粉煤灰代替杂填土作为地基回填土。

为获取精准的粉煤灰回填地基的夯击动力方程参数值，需要获取计算粉煤灰回填地基夯击参数，避免粉煤灰回填地基强夯过程中产生误差。粉煤灰回填地基物理参数见表 2。

表2 粉煤灰回填地基物理参数

Table 2 Physical parameters of building fly ash backfill foundation

重度 /MPa	剪切模 量/MPa	内摩 擦角/°	黏聚力 /kPa	变形模 量/MPa	泊松比
11.67	9.62	56.4	58.3	31	0.23

将通过荷载试验法检测获取的极限承载力 4 181.9 MPa 为对比值, 验证极限承载力计算精度。该回填地基的极限承载力计算结果分别为: 极限承载力 q_1 为 3 866.7 MPa, 极限承载力 q_2 为 147.3 MPa, 极限承载力 q_3 为 169.5 MPa, 极限承载力 q_i 为 4 183.5 MPa, 与极限承载力实测值相差仅为 1.6 MPa。表明地基承载力计算结果误差较小, 可满足地基稳定要求。

为进一步验证方法的有效性, 计算埋深与宽度比值、地基内摩擦角、主应力系数、地基硬壳层厚度不同参数下的地基极限承载力, 并分析埋深与宽度比值、地基内摩擦角、主应力系数、地基硬壳层厚度对回填地基极限承载力的影响是否与实际情况相符合。

分析在地基不同埋深与宽度比值、不同内摩擦角作用下, 地基极限承载力变化情况。通常情况下, 设地基基础宽度为 5 m, 地基基础面土层深度为 1 m, 粉煤灰地基土重度为 19 kN/m³, 选取地基内摩擦角分别为 10°、20°、30°时。地基极限承载力变化结果如图 2 所示。

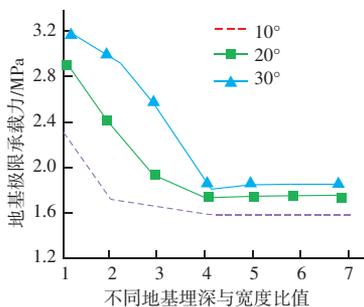


图2 地基极限承载力变化情况

Fig. 2 Changes in ultimate bearing capacity of foundation

当地基埋深与宽度比值为 2 时, 内摩擦角为 10° 的地基极限承载力为 1.7 MPa, 内摩擦角为 20° 的地基极限承载力为 2.4 MPa, 内摩擦角为 30° 的地基极限承载力为 3.0 MPa; 当地基埋深与宽度比值为 5 时, 内摩擦角为 10° 的地基极限承载力为 1.5 MPa, 内摩擦角为 20° 的地基极限承载力为 1.8 MPa, 内摩擦角为 30° 的地基极限承载力为 1.9 MPa。由此可知, 地基极限承载力随着地基埋深和宽度比值的增大而

逐渐减少, 且在地基埋深和宽度比值大于等于 4 时, 地基极限承载力曲线变化趋于平稳; 当地基埋深与宽度比值不变时, 地基极限承载力随摩擦角增大而增加, 计算结果与实测值相符合。

分析地基在不同主应力系数情况下, 地基极限承载力变化情况。计算主应力系数分别为 0.5、1 时, 地基极限承载力结果如图 3 所示。

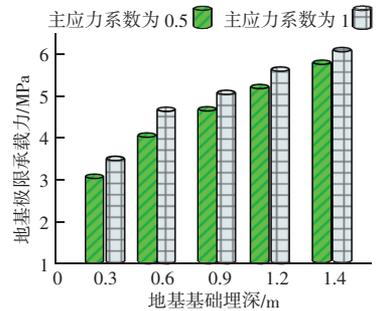


图3 不同主应力系数下的地基极限承载力

Fig. 3 Ultimate bearing capacity of foundation under different principal stress coefficients

当地基埋深为 0.6 m, 主应力系数为 0.5 时地基承载力为 4 MPa, 主应力系数为 1 时地基承载力为 4.5 MPa; 当地基埋深为 1.2 m, 主应力系数为 0.5 时地基承载力为 5 MPa, 主应力系数为 1 时地基承载力为 5.5 MPa; 由此可得出, 计算得到的地基极限承载力, 在相同主应力系数下会随着地基基础埋深的增长而增加, 且当地基基础埋深不变时, 会随着主应力系数的增加而增加, 计算结果与实测相符合。

分析地基硬壳层不同厚度下, 地基极限承载力变化情况。通常情况下, 设置地基硬壳层厚度为 4、8、12、16 m 时, 地基极限承载力结果如图 4 所示。

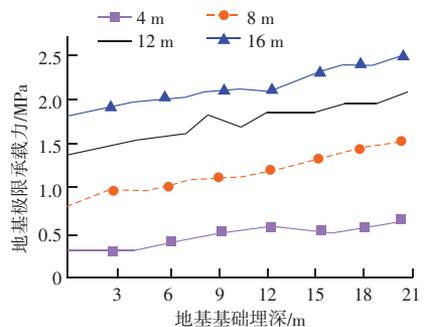


图4 硬壳层不同厚度情况下的地基承载力

Fig. 4 Ground bearing capacity under different thicknesses of hard shell layer

当地基埋深为 3 m, 硬壳层厚度 4 m 时地基承载力为 0.3 MPa, 硬壳层厚度 8 m 下地基承载力为 1.0 MPa,

岩土力学

硬壳层厚度 12 m 时地基承载力为 1.5 MPa, 硬壳层厚度 16 m 时地基承载力为 1.9 MPa; 由此可得出, 计算得到的地基极限承载力, 当地基基础埋深不变时, 随硬壳层厚度而增加; 且当地基硬壳层厚度为 16 m 时, 地基承载力数值最大。地基承载力与地基硬壳层厚度为正向函数关系, 与实际情况相符。

3 结论

为了提高粉煤灰回填地基极限承载力计算精度, 提出了一种针对粉煤灰回填双层结构地基的极限承载力计算方法, 采用强夯技术构建上层硬壳层和下层软弱层的双层地基结构。得到以下主要结论:

(1) 引入了不同埋深条件下的基础地基承载力系数, 通过计算软弱下层的整体剪切破坏承载力、硬壳层和软弱层的承载力, 以及地基土与地基侧壁的下沉摩擦力, 全面评估了回填地基的综合承载力。

(2) 地基的埋深和宽度比值对极限承载力有显著影响, 当比值大于等于 4 时, 承载力曲线趋于平稳。此外, 主应力系数的变化对承载力也有重要影响, 具体表现为在相同埋深下, 主应力系数为 0.5 时地基承载力为 5.0 MPa, 而主应力系数为 1 时则提高至 5.5 MPa。这些发现为工程设计提供了重要的参数指导。

(3) 随着地基基础埋深的增加, 地基的承载力也随之增大, 为上层建筑的稳定性提供了可靠的数据支持。

参 考 文 献

[1] 周盛全, 章昊琰, 王瑞, 等. 水泥-粉煤灰搅拌桩复合地基承载特性 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2022, 56 (9): 1724-1731, 1779.
[2] 刁璇, 盛娟, 倪小磊. 钢筋结构建筑不同结构点的抗震与变形

监测 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (3): 490-494.
[3] 杨继强, 孙昕, 崔向东. 基于双剪统一强度理论的地基承载力计算方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (9): 1923-1932.
[4] 蒋洋, 郭建坤, 王晓谋, 等. 基于双侧非对称破坏模式的临坡地基极限承载力分析 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2019, 40 (3): 85-91.
[5] 党昱敬. 水泥粉煤灰碎石桩复合地基抗震承载力调整系数取值的探讨 [J]. 工业建筑, 2020, 50 (11): 97-101.
[6] 赵百超, 陈四利, 董凯赫. 基于膨润土、粉煤灰的水泥复合土抗剪强度研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (9): 2882-2889.
[7] 张炎飞, 刘先峰, 袁胜洋, 等. 高速铁路路基跨越坎儿井暗渠的稳定性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (增刊 1): 202-208.
[8] 王彭生, 熊建波, 陈明杰, 等. 基于统计分析的吹填材料粒径分布对强夯地基处理效果影响 [J]. 建筑科学, 2020, 36 (增刊 1): 204-210.
[9] 刘香, 史海中, 周鑫. 炉渣粉煤灰回填地基的强夯设计参数研究 [J]. 水利水电技术, 2019, 50 (4): 179-189.
[10] 李小丰. 基于修正 Mohr-Coulomb 准则的半无限空间浅埋隧道弹塑性解 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17 (6): 1491-1500.
[11] 谭鑫, 冯龙健, 赵明华, 等. 刚性基础下筋箍碎石桩复合地基桩土应力比计算模型 [J]. 中国公路学报, 2019, 32 (9): 42-50.
[12] 宫晓明, 袁鸿鹄, 蒋少熠, 等. 房渣土地基强夯加固三维数值模拟研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51 (2): 177-183.
[13] 陈培帅, 夏崑濠, 谭贤君, 等. 预压荷载作用下砂桩复合地基承载力模型试验研究 [J]. 水利水电技术, 2019, 50 (4): 16-22.
[14] 逯登栋, 乔玉财, 万世斌, 等. 东昆仑北麓夏日哈木地区地基承载力特征值及湿陷性研究 [J]. 世界有色金属, 2021, 46 (20): 116-119.
[15] 高江平, 刘雯支, 杨继强. 基于三剪应力统一强度理论的硬壳层软土地基承载力公式 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (12): 2331-2337.