

高填方夯实地基处理技术研究及变形分析

Research on Treatment Technology and Deformation Analysis of High Fill Rammed Foundation

聂浩帆, 熊斌, 周俊, 刘简, 唐元旭, 黄小龙

(四川省建筑设计研究院有限公司, 四川 成都 610095)

摘要: 高填方地基受原始地基、填料、填筑施工工艺等影响, 容易出现地基承载力不足、地基变形不收敛等情况, 工后地基沉降计算亦缺乏完美的计算模型。通过实际工程案例, 对高填方地基原始地基处理、填料控制、填筑的施工工艺进行分析研究, 采用经验公式、数值模拟等手段对高填方工程沉降量进行计算, 并与工后沉降监测数据进行了对比, 对高填方地基的关键技术进行了总结分析, 为类似项目提供了解决问题的思路和方法。

关键词: 高填方地基; 原始地基处理; 填料控制; 填筑施工工艺; 沉降计算

中图分类号: TU472.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0097-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.019

NIE Haofan, XIONG Bin, ZHOU Jun, LIU Jian, TANG Yuanxu, HUANG Xiaolong

(Sichuan Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610095, China)

Abstract: Due to the influence of the original foundation, filler and fill construction technology, the high fill foundation is prone to insufficient bearing capacity and non-convergence of foundation deformation, and the settlement calculation of the foundation after construction lacks a perfect calculation model. Based on actual engineering cases, it analyzes and studies the treatment of the original foundation, the control of the fill and the construction technology of the filling of the high fill foundation, adopts the means of empirical formula and numerical simulation to calculate the settlement amount of the high fill project, and compares it with the post-construction settlement monitoring data, and summarizes and analyzes the key technologies of the high fill foundation. It provides the thought and method to solve the problem for similar projects.

Keywords: high fill foundation; original foundation treatment; packing control; fill construction technology; settlement calculation

0 引言

我国地形复杂多样, 山区面积广大, 约占全国面积的2/3。随着国民经济发展, 山区工程建设项目也越来越多, 对于“高挖深填”的填土地基, 由于

原始地形、地貌、地质条件复杂, 填筑体岩土结构松散、物理力学性质离散性大等不利的客观因素, 若处理不当易出现地基承载力不足或地基变形无法满足工程要求的情况。对于深厚填土的研究, 国内在民航高填方机场已有大量的工程案例及研究成果^[1-4], 如: 九寨黄龙机场、大理机场等均是在高填方上修建, 但在房屋建筑领域直接采用高填方地基作为建筑物持力层的案例较少。陈卓等^[5]以高填方地区多层房屋地基强夯法工程案例, 对强夯施工法的效果进行了总结; 顾大兴^[6]、谢俊平^[7]介绍了强夯法在高填方地基工程中的应用; 以某高填方地基为例, 对高填方关键技术环节进行总结与剖析, 旨

作者简介: 聂浩帆 (1979—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 研究方向: 岩土工程勘察、设计与施工管理。

通信作者: 唐元旭 (1968—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 研究方向: 结构设计。

收稿日期: 2023-11-10

岩土力学

在同类工程项目中起到借鉴、推广的作用。

1 工程概况

1.1 项目概况

拟建场地属侵蚀剥构造低山貌，原始地形整体西南高东北低，最高处标高 606 m，最低处标高 467 m，

最大高差 139 m。河道从场地中部穿过，河道两侧为陡坡山体，整体坡度较大，如图 1 所示。项目总占地面积 207397.19 m²，单体车间尺寸 120 m×33 m，横跨沟道，总填方量约为 4.0×10⁶ m³，最大回填厚度为 42 m。以回填填筑体作为基础持力层。

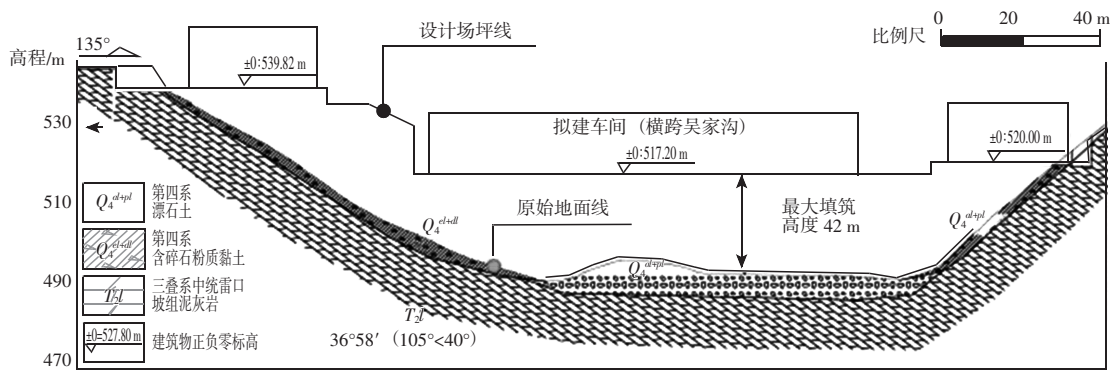


图 1 场地工程地质剖面图
Fig. 1 Engineering geology profile of the site

1.2 项目工程地质条件

场地内地层为第四系全新统残坡积层 (Q_4^{el+dl})，含碎石粉质黏土、冲洪积层 (Q_4^{al+pl}) 漂石土和三叠系中统雷口坡组泥灰岩地层 (T_2I)。场地地层主要物理力学参数见表 1。

表 1 场地地层物理力学指标统计表
Table 1 Statistical table of physical and mechanical indexes of site strata

岩土名称	容重 / (kN/m ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /°	压缩模量 /MPa	变形模量 /MPa	承载力特征值 /kPa
含碎石粉质黏土	19.5	37	16	6.5	—	140
漂石土	21.5	—	35	18	17	240
强风化泥灰岩	23.5	20	30	25	—	350
中风化泥灰岩	25.0	400	36	5000	—	1000

注：中风化泥灰岩压缩模量为弹性模量。

2 填筑地基工程技术指标

根据场地不同工程部位的使用特性，填筑地基达到以下岩土指标：填筑体承载力特征值不得低于 200 kPa；填筑体压缩模量不得低于 20 MPa；填筑体静置一年后，工后沉降小于 25 cm。

3 高填方变形控制的关键技术环节

对于高填方地基，其变形控制的关键技术主要从原始地基处理、填料的分析处理以及填筑施工工

艺三个方面进行控制。

3.1 原始地基处理

沟底植被发育，上覆有残坡积及冲洪积土层，需要对原始地基进行预处理。原始地基处理力求做到“化繁为简”，具体处理方式为：

(1) 对沟谷两侧清表至稳定中风化岩层，清表面平整，不存在凹陷、坑洞等对填筑体施工不利的情况。

(2) 清除沟谷底部全部素填土、松散漂卵石土层，并保证清表面平整。

(3) 沟谷底部清表完成后对原地面进行夯实，采用 3000 kN·m 能级进行点夯，之后采用 2000 kN·m 能级进行满夯，具体夯实指标见表 2。

表 2 原地基夯实处理指标统计表
Table 2 Statistical table of original foundation tamping treatment index

夯击遍数	单击夯能 / (kN·m)	每遍夯点间距 /m	夯点布置	单点击数 /击
点夯	3000	4m	正方形	≥10
满夯	2000	d/4 搭接	搭接形	≥3

3.2 填料的分析处理

项目填料主要为就近山体挖方，填料成分主要为残坡积土、强风化及中风化泥灰岩。对填料进行颗粒分析试验、重型击实试验、大型压缩试验及大型三轴剪切试验等，以确定填料的土石比例、最大

干密度 $\rho_{d,max}$ ，最优含水率 W_{opt} 及填料的内聚力 C 、 φ 内摩擦角及各级压力下的压缩模量 E_s 。

(1) 颗粒分析试验

现场施工开挖的中风化岩块粒径一般大于 500 mm，强风化岩体及残坡积土粒径多小于 20 mm，填料其曲率系数多大于 10，无法满足曲率系数 1~3 的要求。因此，现场对中风化灰岩块进行了二次机械破碎处理，确保岩块粒径控制在 200 mm 以内。

填料处理后，通过室内颗粒分析试验，填料分配曲线如图 2 所示。处理后填料不均匀系数为 $46.8 > 10$ ，曲率系数为 1.9，在 1~3 之间，满足现行规范要求^[8]。

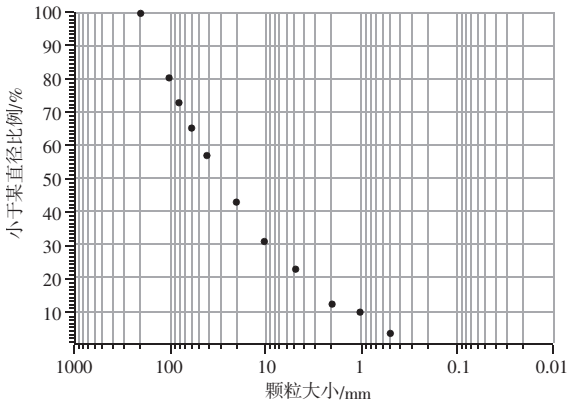


图2 现场填料颗粒分配曲线
Fig. 2 Field packing particle distribution curve

(2) 重型击实试验

填料重型击实试验得出填料最优含水率 $W_{opt} = 8\%$ ，最优土石比为 3:7，最大干密度 $\rho_{d,max} = 2.05 \text{ g/cm}^3$ 。

(3) 大型压缩试验

填筑施工时拟按照每回填 4.5 m 进行分层强夯的工艺，为模拟填筑体压力随着填筑深度增加，试验的压力分级也以 4.5 m 土重作为分级标准，回填深度 42 m，施加压力共分为十级。压缩试验得到各级压力下的压缩模量，见表 3。

(4) 大型三轴剪切试验

采用 YS30A 型大三轴剪切试验机进行试验，试验结果见图 3。以法向应力 σ 为横坐标，剪应力 τ 为纵坐标，在横坐标上以 $(\sigma_{1f} + \sigma_{3f})/2$ 为圆心， $(\sigma_{1f} - \sigma_{3f})/2$ 为半径绘制摩尔圆（注角 f 表示破坏值），作诸圆包线。得出填料抗剪参数 $C = 12.08 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 30^\circ$ 。

表3 填料在各级压力下压缩模量、次压缩系数统计表
Table 3 Statistical table of compression modulus and secondary compression coefficient of packing at all levels of pressure

荷载/kPa	压缩模量 E_s /MPa	次压缩系数 C_a
92.25 (第一级)	10.163	0.000 1403
184.50 (第二级)	16.009	0.000 154
276.75 (第三级)	22.357	0.000 273
369.00 (第四级)	25.821	0.000 288
461.25 (第五级)	26.501	0.000 406
553.50 (第六级)	26.659	0.000 586
645.75 (第七级)	27.408	0.000 544
738.00 (第八级)	26.694	0.000 783
830.25 (第九级)	29.189	0.000 16
922.50 (第十级)	31.535	0.000 18

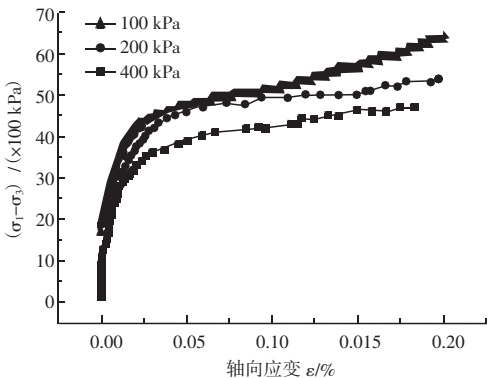


图3 填料应力、应变图
Fig. 3 Packing stress and strain diagram

3.3 填筑施工工艺

结合地基变形的要求，采用分层碾压 + 分层强夯处理的施工工艺。

(1) 分层碾压：填料粗细料分布均匀，分层摊铺填筑，填筑厚度 30 cm，松铺系数 1.2~1.3；分层振动碾压，碾压遍数不小于 10 遍，碾压后的压实系数 $\lambda \geq 95\%$ 。

(2) 分层强夯：每层厚度 4.5 m，采用 3000 kN·m 夯击能进行两次点夯处理，采用 2000 kN·m 夯击能进行满夯处理。

4 高填方沉降量的计算与观测

4.1 工后沉降量预测

(1) 原始地基沉降。对原始地基的沉降计算，比较成熟的方法有分层总和法及规范方法等。本工程已经对原始地基进行了处理，故认为本工程原始地基沉降量较小，不考虑原始地基沉降。

(2) 填筑地基沉降。考虑到本工程对填料的控制，以及大量的试验数据和施工过程中的检测数据，结合项目特殊的回填背景（两侧山体侧限，单面临

岩土力学

空)。本次工程采用了经验公式法以及数值模拟法进行了工后沉降预测。

①经验公式法^[2]计算沉降 采用数值积分法,暂不考虑时间对填筑体的影响,假设瞬时沉降在施工中完成,则填筑体顶面下深度 z 处 A 点沉降(图4)为:

$$S_{瞬} = \int_z^h m_v \gamma d\xi = \frac{m_v \gamma (h^2 - z^2)}{2} \tag{1}$$

式中: m_v 为体积压缩系数, $m_v = 1/E_s$, E_s 为填料压缩模量; γ 为填料重度。

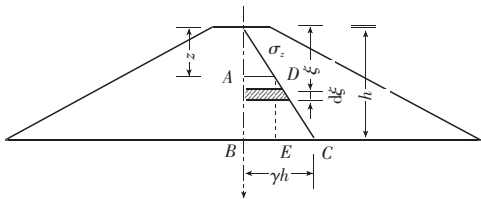


图4 填方加荷计算简图
Fig. 4 Fill loading calculation diagram

如图4所示, A 点沉降是 A 点以上填土重量引起的 A 点以下的填土层压缩, 当最后填到顶面时, 引起 A 点沉降的应力在压缩层 ($h - z$) 内呈矩形分部。此时 A 点的沉降为:

$$S_{瞬} = \int_z^h m_v \gamma \xi d\xi = m_v \gamma z (h - z) \tag{2}$$

上述分析 $S_{工后} = (10\% \sim 15\%) S_{总}$, 迭代计算可以得出 $S_{总} = S_{瞬}/0.85$ 。经计算, 最大填方 42 m 部位, 填筑体总沉降 $S_{总}$ 为 586.7 mm; $S_{瞬}$ 为 498.7 mm; 工后沉降 $S_{工后}$ 为 88.0 mm。

②数值模拟法计算沉降 采用 FLAC 3D 进行数值模拟, 假设填料在每层填筑时瞬时沉降瞬间完成、沉降变形由填筑体自身重力产生, 不考虑其他荷载。对于总沉降和工后沉降模拟所选边界条件均依据实际设置, 模型底部选用固定端约束, 四周设置法向约束, 表面为自由界面, 模拟如图5、图6所示。数值模拟采用的填料及基岩物理力学参数见表4。

计算得到最大沉降量为 $S_{总}$ 为 428 mm; $S_{瞬}$ 为 299 mm; 工后沉降 $S_{工后}$ 为 129 mm。

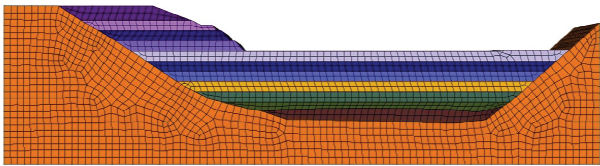


图5 数值模拟计算模型图
Fig. 5 Numerical simulation model diagram

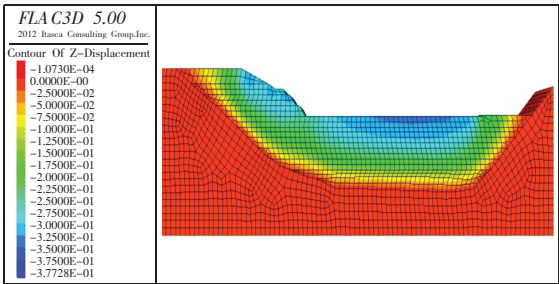


图6 数值模拟 Z 方向计算云图
Fig. 6 Numerical simulation of Z direction computing cloud image

表4 填料土及基岩物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of filled sail and bedrock

土体	密度 / (kg/m^3)	泊松比	弹性模量 / MPa	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / $^\circ$
填料	2050	0.25	33	12.08	30
基岩	2550	0.32	5000	400.00	36

采用经验公式计算沉降数值大于模拟数值, 其原因一是因经验公式计算因子相对简单, 仅单纯从荷载角度考虑, 属于二维变形; 而数值模拟变形属于三维变形, 其沉降数值除在竖向上变形以外, 还有水平向位移未在结果中显示; 二是工程所处位置比较特殊, 工程回填部位为冲沟, 填筑体两侧山体侧限, 仅单面临空, 采用经验公式计算时无法考虑特殊的地形条件, 而数值模拟时考虑了侧限及约束。

4.2 沉降观测

监测填方体施工沉降 ($S_{瞬}$) 及工后沉降 ($S_{工后}$), 是验证设计方案及理论计算的有效手段, 更是回填地基是否满足使用需求的重要数据之一。如图7所示, 施工期分层沉降采用分层预埋沉降环的方式, 在每一层强夯完成后, 填筑前预先将沉降板埋设在

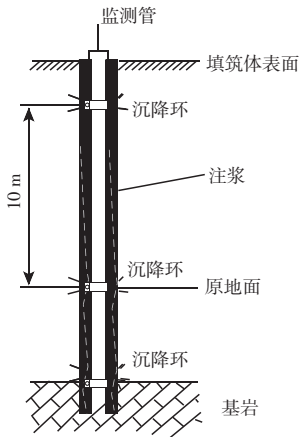


图7 分层沉降埋设示意图
Fig. 7 Stratified settlement buried schematic diagram

(下转第 105 页)

(3) 结构模态灵敏度于整体结构内外部三分之一区域 (I、III、V) 范围转接件失效后的频率比内部中心区域 (II、IV、VI) 范围转接件失效后的频率小, 即结构整体刚度削弱更严重, 说明该区域对整体刚度贡献更大, 影响更大。分析结果与区域重要性系数分布一致。

参 考 文 献

- [1] 李晓渊, 高未未, 刘伟斌. 外墙干挂石材幕墙安全检测鉴定与评级建议 [J]. 建筑结构, 2018, 48 (22): 116-118, 115.
- [2] 王作虎, 姚渊, 高占广. CFRP 加固背栓式石材幕墙面板的抗弯性能 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57 (1): 229-234.
- [3] YEUN K W, HONG K N, KIM J. Development of a retrofit anchor system for remodeling of building exteriors [J]. Structural engineering and mechanics: An international journal, 2012, 44 (6): 839-856.
- [4] STEVENS D, CROWDER B, SUNSHINE D. DoD research and criteria for the design of buildings to resist progressive collapse [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137 (9): 870-880.
- [5] PANDEY P, BARAI S. Structural sensitivity as a measure of redundancy [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123

(3): 360-364.

- [6] 蔡建国, 王峰岚, 韩运龙. 大跨空间结构重要构件评估实用方法 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2011, 38 (3): 7-11.
- [7] ENGLAND J, AGARWAL J, BLOCKLEY D. The vulnerability of structures to unforeseen events [J]. Computers & Structures, 2008, 86 (10): 1042-1051.
- [8] 江晓峰, 陈以一. 大跨桁架体系的连续性倒塌分析与机理研究 [J]. 工程力学, 2010, 27 (1): 76-83.
- [9] 日本钢结构协会. 《高冗余度钢结构倒塌控制设计指南》[M]. 陈以一等译. 上海: 同济大学出版社, 2007.
- [10] 韩庆华, 傅本钊, 徐颖. 桁架结构敏感性分析及抗连续倒塌性能 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2017, 48 (12): 3293-3300.
- [11] 高英棋, 左辉, 董凯杰. 高温下钢框架敏感构件评估方法 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12 (3): 134-138.
- [12] 徐颖, 韩庆华, 练继建. 层球面网壳抗连续倒塌性能研究 [J]. 工程力学, 2016, 33 (11): 105-112.
- [13] 朱宏平, 何波. 基于敏感性分析的周期结构损伤检测 [J]. 工程力学, 2003 (3): 108-114.
- [14] 万成, 朱奕锋, 汪敏吉. 灵敏度分析在空间钢结构抗连续倒塌控制中的应用 [J]. 钢结构 (中英文), 2019, 34 (8): 32-36.

(上接第 100 页)

填筑体上, 随着填筑高度逐层加钢管的方式进行观测。

最高填方部位经沉降监测, 施工期间累计最大位移沉降 $S_{\text{瞬}}$ 为 234 mm, 工后一年的沉降量 $S_{\text{工后}}$ 为 24.3 mm, 且工后沉降总体呈逐渐收敛的趋势, 地基变形满足使用要求。

5 结 论

(1) 对于高填方地基, 通过对原地基、填料、施工工艺等进行控制, 可以有效改善深厚填土地基的质量, 满足上部建筑荷载及变形要求。

(2) 对高填方沉降的计算, 暂无成熟的理论计算公式, 可以采用传统经验公式及数值模拟对沉降进行预测、分析, 并通过实际的沉降监测数据对计算的准确性进行修正。

参 考 文 献

- [1] 姚仰平, 盛岱超, 李强, 等. 机场高填方工程基础理论与应力 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 刘宏, 张倬元. 四川九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性系统研究 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- [3] 谢春庆. 山区机场高填方夯实地基处理方法的研究 [J]. 勘察科学技术, 2001 (5): 11-15.
- [4] 王程亮. 山区机场已填筑高填方地基在处理方法研究 [D], 北京: 清华大学, 2015.
- [5] 陈卓, 段小雨, 李立仁. 高填方区多层房屋地基强夯法的应用分析 [J]. 建筑技术, 2008 (5): 345-348.
- [6] 顾大兴. 强夯法在重庆高填方地基工程中的应用 [J]. 工程技术, 2016, 11: 80-81.
- [7] 谢俊平. 浅析强夯法在高填方地基处理中的应用 [J]. 工程技术, 2017 (7): 267.
- [8] 高填方地基技术规范: GB51254-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.