# 大面积场地回填地基处理技术探讨

## ——基于回填厚度分区的选型方法与区际差异沉降控制

郝猷猷　康义荣

中国中元国际工程有限公司 北京 100089

**【摘　要】**：丘陵沟谷地貌工业场区常需大面积回填，同场填厚差可达十余米，单一方法全场覆盖易致深层区加固不足或浅层区造价虚高。本文以回填厚度分区为前提，提出厚度—土层—目标—约束四维耦合选型：薄层区(h≤8 m)以浅部碾压配合中下部强夯为主，中层区(8 m<h≤15 m)以强夯置换或桩体复合地基为主，深层区(h>15 m)以桩基穿越或超长桩复合地基为主。沉降控制指出区际差异沉降常被忽略，回填区与原状土交界的刚度突变才是开裂主因。算例表明三分区工后沉降约 35、65、28 mm，最大差异沉降出现在刚度突变带；据此提出过渡段、后浇带与地梁加强等措施。造价分析表明分区配置优于全场统一方案。

**【关键词】**：回填地基；厚度分区；强夯置换；复合地基；差异沉降控制；沉降计算

**DOI:10.12417/2811-0528.26.21.068**

城镇产业升级与集约用地推进，使建设项目向地形起伏地块拓展。此类场地竖向荷载高，且常伴重型设备对沉降与倾斜严格要求，技术难点在三者协调：填厚分区与处理方法、分区间沉降协调、地基处理与上部结构荷载适配。现有文献多集中于单一工法，针对多分区协同讨论不足。梁永辉等[1]指出仅处理填筑体不足以控制总沉降；苏亮等[2]表明软土夹层与地下水位显著削弱强夯有效加固深度；顾晓强等[3]监测得原地基与填筑体贡献分别为 39.7%与 60.3%。

本文与已有研究差异在于：已有研究多针对单一断面沉降预测[4]、单一软弱下卧层处理[1,2]或特定工程填筑工艺[3,10]，对象多为单一填厚与方法。本文着眼同一场地多分区并存，给出分区—方法—参数—造价—控制措施完整对应。

## 1 工程条件分析与回填厚度分区

### 1.1 两个控制性条件

方案受两条件约束：填筑体厚度与均匀性决定能否在有效加固深度内完成；下卧原状土决定能否作持力层及是否穿越。

### 1.2 回填厚度分区原则

本文按回填厚度划三区段，分界值取 8 m 与 15 m：

——薄层区：填厚 h≤8 m；

——中层区：填厚 8 m<h≤15 m；

——深层区：填厚 h>15 m。

工程含义：薄层区可夯实或置换；中层区超强夯经济加固深度，须借置换体或桩分担荷载；深层区须穿越桩基传至深部持力层。

分区按逐桩、逐探井比对的回填底板与原状土面标高划分；分区与处理方法对应见表 1。

表 1 回填厚度分区与处理方法对应关系

| 分区 | 填厚 | 处理方法主线 | 主要控制因素 |
|---|---|---|---|
| 薄层区 | h≤8 m | 浅部碾压+中下部强夯，局部换填 | 填体密实度、下卧层局部软弱 |
| 中层区 | 8 m<h≤15 m | 强夯置换、桩体复合地基、排水固结 | 有效加固深度、置换率、桩长 |
| 深层区 | h>15 m | 桩基穿越、超长桩复合地基 | 桩端持力层、负摩阻力、桩长差异 |

分界值 8 m 与 15 m 综合强夯有效加固深度[5]、高填方要求[6]、桩型施工深度及造价确定。

### 1.3 土源判识与预处理

土源性质直接影响夯实检测：开山碎石透水易夯；工程弃土预分拣剔大块石。

土源判识须完成两项：各类土源取样测级配、含水率、液塑限、压缩模量与渗透系数；形成土源分区图。

含水率明显偏高的黏性土直接碾压易形成橡皮土，可翻晒、掺碎石或固化剂改良。

资助项目：中国机械工业集团有限公司科研专项“工业上楼工程设计关键技术研究”（ZDZX2025-07）

## 2 地基处理方案比选

### 2.1 选型逻辑与适用性矩阵

方法选择建立于厚度—土层—目标—约束四维交叉，形成依据方案(表 2)。

表 2 地基处理方法在大面积回填场地的适用性比较

| 方法 | 适用填厚/m | 适用土层 | 承载力提升 | 工后沉降 | 工期 | 综合单价/(元/m³) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 分层碾压 | ≤3 | 各类均质土 | 低～中 | 中 | 短 | 15～30 |
| 冲击压实 | ≤4 | 碎石土、砂土 | 中 | 中 | 短 | 18～35 |
| 强夯 | 3～10 | 碎石土、填土、砂土 | 高 | 低～中 | 中 | 30～60 |
| 强夯置换 | 6～12 | 含大块石填土、软弱土 | 高 | 低～中 | 中 | 50～90 |
| 堆载/真空预压 | ≥8（下卧软土） | 软土、淤泥质土 | 中 | 低 | 长 | 40～90 |
| 水泥土搅拌桩 | ≤20 | 黏性土、淤泥质土 | 高 | 低 | 中 | 120～200 |
| 碎石桩/振冲桩 | 4～15 | 液化砂土、粉土、松散填土 | 高 | 低 | 中 | 80～150 |
| 桩基穿越 | 不限 | 极不均匀、深厚软弱土 | 最高 | 极低 | 中～长 | 视桩型与桩长 |

注：表中为工程经验区间，综合单价按处理土体体积折算，未含硬化、清障与监测费，差异可达数倍，仅供比选参考。

表 2 显示造价区间跨度远大于承载力区，造价主导是方法与填厚而非承载力。

### 2.2 薄层区（h≤8 m）：碾压为主，强夯补强

薄层区虽最浅不可略：0～8 m 内土性、施工条件变化大，单纯碾压不经济，宜按厚度与土性细分。

浅部(0～2 m)宜分层碾压：虚铺 300～400 mm、含水率控最优±2%、碾压 6～8 遍；表层 0.5～1.0 m 直接承荷须提高标准。

中下部(2～8 m)宜采用强夯，单击夯击能按厚度土性取 3000～8000 kN·m；缺经验按文献[5]预估有效加固深度。

3000～4000 kN·m 在碎石类填土有效加固深度约 6～8 m，与 8 m 分界吻合；填厚近 8 m 时强夯优于碾压。

薄层区内原状土面起伏、坑槽、旧基础或地下水出露等薄弱区，应单独换填垫层处理。

### 2.3 中层区（8 m<h≤15 m）：强夯置换与桩体复合

强夯置换适用于含大块石填土与表层软土，墩、间土构成复合地基兼排水通道[7]。

强夯置换深度受限：除厚层饱和粉土外墩应穿透软土层至较硬层且宜≤10 m[5]；用于 8～15 m 填厚时墩处中下部，墩长与夯击能初选见式(1)(2)[5]：

$$E = 940(H_1 - 2.1) \quad (1)$$

$$E_w = 940(H_1 - 3.3) \quad (2)$$

桩体复合地基适用于软弱下卧层或填厚近上界，沉降受桩土相互作用影响[8]；搅拌桩适于淤泥与软弱黏性土，碎石桩、振冲桩适于液化砂土粉土，桩顶设 150～300 mm 褥垫层[9]。

排水固结适用于工期宽松、下卧软土厚区段；堆载或真空预压分级加载使土体固结。

中层区选型：工期紧、沉降敏感用桩体复合地基；工期宽松、下卧软土用排水固结；碎石填土且能级有保证用强夯置换。

### 2.4 深层区（h>15 m）：以穿越为主

深层回填常伴深厚软土；下卧软土时仅靠压实置换难解荷载超限，须穿越桩基传至深层持力层。

桩基穿越适用于沉降极敏感部位：钻灌桩或预制桩穿透回填与软弱下卧层至稳定持力层。

超长桩复合地基适用于承载力中等、开挖受限部位：水泥土搅拌桩最大加固深度约 20 m，更深宜改灌注或钢管桩。

深层区排水固结仅当下卧深厚软土且工期宽松时采用，须先回填预压、待稳定后再加载。

## 3 施工工艺与过程控制

### 3.1 填筑与碾压控制

含水率控制是压实关键：黏性土最佳效果在最优含水率±2%内，过湿土料翻晾掺料后压实。

碎石类回填中大块石应预破碎至与虚铺厚度匹配粒径。

回填应分层摊铺、分层压实，虚铺厚振动碾控 300～400 mm、黏性土取小值，分层过厚是压实度不达标主因。

### 3.2 强夯施工控制

夯击参数须试夯确定：规范[5]要求强夯前选≥20 m×20 m 代表性区试夯。

收锤标准依夯沉量曲线定，并满足[5]：最后两击平均夯沉量不超限值(E<4000 时不大于 50 mm，4000≤E<6000 时不大于 100 mm，E≥6000 时不大于 200 mm)。

两遍夯击间歇不可压：渗透差黏土间歇≥2～3 周利孔压消散；砂土可连续夯击。

夯点布置须保证连续：第一遍间距取锤径 2.5～3.5 倍，第二遍位于其间；文献[11]表明山前碎石填土间距超 5 m×5 m 搭接变差易成软弱夹层。

强夯振动影响须评估：高能级影响达数十米，施工前按文献[5]试夯实测；减振参照文献[12]。

### 3.3 桩体复合地基施工控制

水泥土搅拌桩应控水泥掺量、搅拌提升速度；有机质高时配比与试桩，不满足改长螺旋压灌桩。

施工过程应监测：强夯监孔压、隆起与振动；排水固结监沉降、孔压与水位。

## 4 地基处理效果的检测

检测项目应匹配方法：碾压与换填以载荷试验、压实度为主；强夯置换用载荷试验、动探与标贯；桩基穿越用单、群桩载荷试验。

### 4.1 压实度检测的代表性

大面积压实度抽检若按面积比例随机布点，易漏边角搭接，薄弱部位加密。

压实度判定两前提：标准值按部位定，回填、基础底、垫层要求不同不可套用。

压实度是最基本也最易出问题指标，可靠性取决于布点代表性，不足转后期沉降[3]。

### 4.2 承载力检测的注意事项及沉降观测

平板载荷试验是承载力主要验证手段，点布各分区代表位置而非最有利处。沉降观测须覆盖各分区与交界带而非仅测全区平均；回填前建初始点，观测至收敛，数据及时对比计算值。

## 5 沉降控制与区际差异沉降

常误以为各分区验算合格即整体可行。GB 55003[13]对变形验算与沉降控制提强制性要求。

回填沉降具分区特征：薄层区密实度高沉降小，中层区与下卧层沉降仍可观，深层区桩基穿越时工后沉降可很小。

### 5.1 算例分析

算例：某产业场地约 12 万 m²，回填分三区——薄层区约 4.2 万 m²(4 m)、中层区约 4.8 万 m²(9 m)、深层区约 3.0 万 m²(18 m)。

处理方案：薄层区浅部冲击碾压配中下部强夯(3000～6000 kN·m)；中层区强夯置换(8000 kN·m 级，墩深 8～10 m)；深层区钻孔灌注桩穿越至持力层。

沉降计算采用分层总和法，按文献[14]定计算层厚，经验系数ψs=0.8；薄层区约 35 mm、中层区约 65 mm、深层区约 28 mm。

相邻分区工后沉降之差：薄—中界约 30 mm，中—深界约 37 mm。

算例两点：其一，最大差异沉降在中—深界(37>30 mm)而非中层区内部；其二，桩基穿越深层区工后沉降(28 mm)。

### 5.2 控制措施

沉降计算应考虑压缩模量与黏滞系数空间变异性，忽略增误差[4]。

差异沉降控制应着眼过渡带而非压低各区，沉降差大处留后浇带或沉降缝。

## 6 地基处理与上部结构的协同

多层厂房、重型设备与堆载平台竖向荷载远高于民用建筑，部分楼面活荷载达 10～15 kN/m²。

合理做法为结构专业前置参与，明确荷载特征、沉降与倾斜限值及敏感部位(设备基础、大跨、节点)。

基础选型与方法联动：薄层区用柱下独立基础；中层强夯置换区宜条形或筏板基础跨墩间土；深层桩复合地基区宜筏板协调桩土，防穿越区脱空。

## 7 技术经济分析

### 7.1 分区比选的经济性

技术经济比选不应只比单价；以算例为例，分区与全场统一方案比较见表 4。

表 4 分区配置与全场统一方案的技术经济比较

| 方案 | 处理方法 | 综合单价/(元/m³) | 工期 | 主要特点与问题 |
|---|---|---|---|---|
| 分区配置 | 各区按表 1 的方法主线分别配置 | 70～95 | 中 | 各区处理方法与处理目标相匹配 |
| 全场统一（以强夯为主） | 强夯+局部补强 | 45～70 | 中 | 深层区加固不足，需二次处理 |
| 全场统一（桩基穿越） | 全场满堂桩基穿越 | 180～260 | 长 | 承载力最高，造价与工期均最高 |

分区配置综合单价约 70～95 元/m³，介于全场强夯(45～70)与全场桩基穿越(180～260)之间。

按填厚分区配置能级已有工程报道[15]；本文给出分区—方法—参数—造价—控制措施完整对应。

### 7.2 方案比选应纳入的约束

方案比选不应简化为单价比较，还应纳入工期、风险、运维与场地等约束。

## 8 结论

（1）大面积回填地基处理应以填厚分区为前提：填土以开山碎石与工程弃土为主、下卧无深厚流塑软土时，划薄层、中层、深层三区(h≤8、8<h≤15、h>15 m)，分区与方法、参数、造价对应。（2）土源判识应与厚度分区叠加。含水偏高黏性土、含大块石与高有机质土均须方案阶段明确处置。强夯有效加固深度应经试验段定，软弱夹层、水位与夯点间距均显著影响。（3）差异沉降是控制核心，不能以各区达标替代整体校核。（4）地基处理与上部结构应协同设计。结构专业宜方案阶段前置参与，明确荷载特征与变形限值，岩土据此定目标。（5）本文方法依工程经验、算例与文献实测建立，工程验证待积累；文中数值为演示典型参数，实际工程应经勘察、试验段与实测沉降确定并按现行规范复核。

## 参考文献：

[1] 梁永辉,王卫东,冯世进,等.高填方机场湿陷性粉土地基处理现场试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(6):1027-1035.

[2] 苏亮,时伟,水伟厚,等.高能级强夯法处理深厚吹填砂土地基现场试验[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(5):1560-1569.

[3] 顾晓强,梁玉珍,周奇辉,等.白鹤滩水电站移民区高填方工程现场监测与分析[J].同济大学学报(自然科学版),2024,52(10):1517-1526.

[4] 樊朱益,王启贵,卞夏,等.高填方地基粘弹性参数反演及工后沉降分布规律预测[J].岩土工程技术,2023,37(2):147-153.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.高填方地基技术规范:GB 51254—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[7] 周宗勇,叶为民.强夯置换墩地基处理试验研究[J].工程地质学报,2008,16(S1):350-353.

[8] 朱瑞钧,高谦,袁爱平,等.淤泥质土地区 CFG 桩复合地基沉降[J].北京科技大学学报,2007,29(4):363-366.

[9] 龚晓南.复合地基理论及工程应用[M].3 版.北京:中国建筑工业出版社,2018.

[10] 聂浩帆,熊斌,周俊,等.高填方夯实地基处理技术研究及变形分析[J].粉煤灰综合利用,2024,38(3):97-101.

[11] 王勇,盛志战,刘青松,等.碎石填土及台阶状场地强夯法加固效果分析[J].岩土工程技术,2025,39(5):731-736.

[12] 王铁宏,水伟厚,王亚凌.高能级强夯技术发展研究与工程应用(2006—2015)[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑与市政地基基础通用规范:GB 55003—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

[15] 徐君.强夯联合素混凝土桩在软基处理中的应用[J].地基处理,2023,5(4):339-345.