



高强钢丝格栅在软弱地基上建设 重载堆场的应用

李瑞刚¹, 梅 轩², 吴 剑¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 200080)

摘要: 当前港口建设用地很多都是通过吹填造陆或泥沙沉积形成, 堆场建设中经常出现在此类软弱地基上建设重型堆场的情况, 由于此类地基承载力差且加载后沉降量大, 重载堆场建设前必须进行地基处理。针对软弱土基采用常规处理方式时存在的耗时、耗力、耗资问题, 研究采用高强度的钢丝格栅与垫层材料结合在软弱地基之上形成加筋垫层结构, 充分利用钢丝格栅与垫层填料的嵌锁作用, 形成类似于悬垂曲面的兜网情形, 将垂直应力快速向四周扩散, 使作用于软基上的竖向应力分布更广更均匀, 最终达到消除不均匀沉降的目的, 成功实现软弱地基只做简单处理的情况下建设重载堆场的目标。实践证明, 该方法可有效缩短施工周期和节约工程造价, 成效显著。

关键词: 高强钢丝格栅; 软弱地基; 重载堆场; 加筋垫层; 不均匀沉降

中图分类号: U655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0229-06

Application of high-strength steel wire grid in the construction of heavy-load storage yard on soft foundation

LI Ruigang¹, MEI Xuan², WU Jian¹

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Shanghai International Port (Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: Many of the port construction sites are formed through land reclamation or sediment deposition. In the construction of storage yards, it is common to build heavy storage yards on such soft foundation. Due to the poor bearing capacity of such foundation and the large settlement after loading, foundation treatment must be carried out before the construction of heavy storage yards. In response to the problems of time-consuming, labor-intensive, and costly conventional treatment methods for soft soil foundation, this study investigates the use of high-strength steel wire grids combined with cushion materials to form a reinforced cushion structure on soft foundation. The interlocking effect of the steel wire grid and cushion fillers is fully utilized to form a mesh like structure similar to a suspended surface, which rapidly spreads the vertical stress to the surrounding areas, making the vertical stress distribution on the soft foundation wider and more uniform. Ultimately, the goal of eliminating uneven settlement is achieved, and the goal of constructing a heavy-load storage yard on soft foundation with only simple treatment is successfully achieved. Practice has proven that it can effectively shorten the construction period and save project costs, with significant results.

Keywords: high-strength steel wire grid; soft foundation; heavy-load storage yard; reinforced cushion layer; uneven settlement

沿海地区码头堆场大都建在吹填形成的软弱地基上, 地基承载力很弱, 为了提高土地利用效

率, 单位堆载均较大且存在堆载不均匀的工况, 重载堆场建设时需要根据当地土质情况, 采用强

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 李瑞刚(1977—), 男, 高级工程师, 从事港口工程设计和研究工作。

夯、振冲、堆载预压、真空预压、桩基等处理方式进行处理^[1]，这些处理方式都存在处理周期长和处理成本高的问题。而通过使用高强度的钢丝格栅配合回填料，在软弱地基与堆场面层结构之间形成劲性过渡夹层，可有效控制软基的不均匀沉降及软弱土水平流变，减少软弱地基处理的工作量，缩短施工周期，节约工程造价，此方案已应用于上海罗泾港区和芦潮港的多个工程中，并取得良好成效。

1 高强钢丝格栅的特性

高强钢丝格栅将合金弹簧钢丝通过数控焊接成网状格栅后再外涂防腐料而成，与传统塑料格栅和涂塑格栅比，它具有变形延伸率小、双向强度高和节点强度大的特点^[2]。

高强钢丝格栅的性能和耐久性由钢丝材料、钢丝直径、网孔尺寸、节点强度、防腐涂层所决定，钢丝材料和钢丝直径决定了高强钢丝格栅双向抗拉强度，网孔尺寸与填料特性相匹配形成良好的嵌锁关系，节点强度对力的扩散起关键作用，防腐材料则决定了格栅与地基土的作用效果及耐久性。

在罗泾港区和芦潮港的应用中选用的高强钢丝格栅为采用 70# 以上、直径 $3.0\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 的合金弹簧钢丝焊接成格栅状，格栅网格间距 $5\text{ cm} \times$

5 cm ，纵横向有效抗拉强度 $\geq 180\text{ kN/m}$ ，节点抗剪力 $\geq 2\text{ kN}$ ，防腐采用水性漆与石英纤维丝涂料，格栅幅宽 $> 2\text{ m}$ 。

基于高强钢丝格栅的特性，填料应该选用具有合适的粒径和强度或能够板结的材料，与格栅产生良好的嵌锁效应，以充分发挥格栅的高强度性能。通常可选用级配碎石、级配良好的再生石、钢渣、山皮石土等^[3]。

2 高强钢丝格栅的工作原理

2.1 普通堆场结构

通常的堆场结构，当集中荷载作用在堆场表面时，堆场结构产生竖向变形，同时将荷载向下传递，竖向荷载传递过程中受基础结构土体之间的相互作用会以一定的角度向四周扩散，随着深度的增加，单位面积上的作用力也逐渐减小，只要单位土体上的作用力小于土体承受能力且无明显差异沉降时，堆场结构是安全有效的^[4]。

2.2 高强钢丝格栅堆场结构

高强钢丝格栅在堆场结构中主要有 3 个作用：

- 1) 利用其材料刚度大和节点强度高的特性加快竖向荷载向四周扩散的速度，相当于加大了荷载的扩散角度^[5]，见图 1；
- 2) 减小面层结构的局部竖向变形和水平向蠕变^[6]；
- 3) 形成加筋垫层后增加堆场基础的抗剪强度。

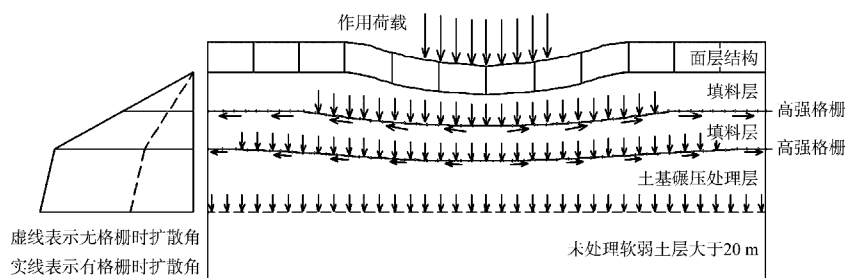


图 1 高强钢丝格栅工作机理

Fig. 1 Working mechanism of heavy-strength steel wire grid

高强钢丝格栅能加快竖向荷载向四周扩散的速度，需要从格栅与土的相互作用机理出发进行

分析。格栅与填料形成的加筋垫层在受竖向荷载作用时，由于土体的压缩和蠕动会产生一定程度

的变形, 高强钢丝格栅网格与填料嵌合在一起共同形变, 形成类似于悬垂曲面的兜网情形^[7], 由于高强钢丝格栅变形延伸率对嵌合体形变产生约束极小, 相互作用过程中高强钢丝格栅与土体间除了竖向的相互作用力, 还存在水平向的作用力; 而埋设在土中的高强钢丝格栅受到水平向力的作用时, 土对处于拉拔状态格栅的阻力由土与格栅的表面摩阻力以及土对横肋的阻力两部分组成, 摩阻力在格栅变形很小的情况下即会快速增长, 迅速达到峰值, 此后不随格栅变形增加而变化, 横肋拉力随格栅变形的进一步增加而逐渐占主导地位, 承担约 90% 的拉拔荷载, 土对格栅拉力的发挥程度与格栅变形的大小有关^[8]。由于高强钢丝格栅具有变形延伸率小、双向强度高和节点强度大的特点, 可保证格栅与土体之间作用力足够大, 而不发生水平向的相互位移且格栅不会解体破坏。在周围土体强大的水平力作用下, 高强钢丝格栅形成的类似悬垂曲面产生托盘效应, 限制了上部土体竖向变形和水平向蠕变, 同时也实现了将竖向荷载快速向四周扩散。

通过高强钢丝格栅将荷载向四周快速扩散后, 作用于面层的大型荷载穿透堆场上部结构, 到达深层软弱土基时其作用范围已非常大, 单位面积作用力已经很小且基本均匀分布, 对于堆载较大的堆场, 若辅以逐级增加堆货荷载使深层软基逐步固结的措施, 虽然未经处理深层软基工后沉降会较大, 但沉降是完全均匀可控的。在堆场设计

时根据分析计算结果预留适当的沉降量可以确保堆场的正常使用。

3 高强钢丝格栅的工程应用

3.1 高强钢丝格栅在罗泾集装箱堆场轨道基础的应用

3.1.1 建设条件

该项目为改建项目, 堆场所在区域在改造前大部分为散货堆场, 地基基础条件较好, 深层沉降已基本完成, 但改建过程中存在回填土方调整高程及开挖拆除原有结构扰动表层土体等工况, 表层土体的不均匀沉降依然存在。拟改建为全自动化集装箱堆场, 堆 6 过 7, 新堆场内的关键设施包括场桥轨道基础、箱角基础和道路, 对地基不均匀沉降比较敏感^[9]。

3.1.2 轨道基础建设方案

场桥轨道基础采用弹性地基梁结构, 从使用要求和经济性角度考虑, 决定采用振动碾压地基处理+高强钢丝格栅加筋垫层的方案, 以解决弹性地基梁基础表层土体不均匀沉降问题。

轨道弹性地基梁的基础结构实施方案为: 1) 地基振动碾压; 2) 铺设第 1 层高强钢丝格栅; 3) 铺设 250 mm 厚级配碎石碾压密实; 4) 铺设第 2 层高强钢丝格栅; 5) 铺设 250 mm 厚级配碎石碾压密实; 6) 铺设第 3 层高强钢丝格栅; 7) 铺设 300 mm 厚水泥稳定碎石碾压密实。轨道基础结构见图 2。

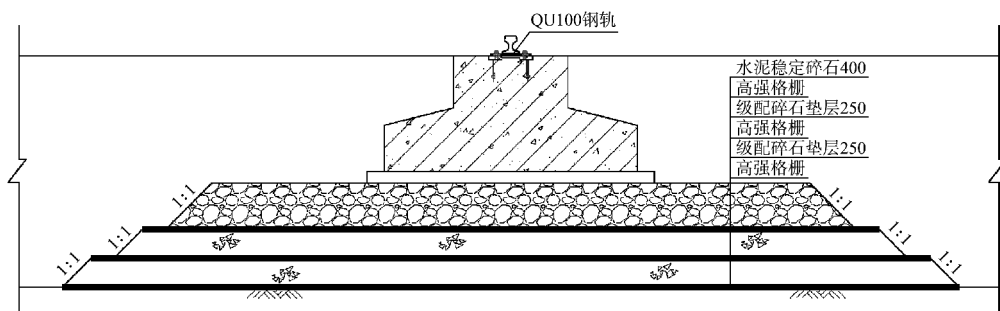


图 2 罗泾集装箱堆场 ARMG 轨道基础结构 (单位: mm)

Fig. 2 ARMG track foundation structure of Luojing container yard (unit: mm)

3.1.3 使用效果

与桩基轨道梁结构相比，弹性地基梁+振动碾压地基处理+高强钢丝格栅加筋垫层的结构方案节省建设费用约 38%，且不会与堆场之间产生差异沉降。目前堆场已建成投入使用近 1 a，轨道未出现明显不均匀沉降，轨道结构的使用期调整较少，符合设计预期。

3.2 高强钢丝格栅在集疏运中心集装箱堆场的应用

3.2.1 建设条件

该项目是在原连锁块铺面堆场上改造全自动化集装箱堆场。原堆场面层结构下的土基，上层为素填土，以粉性土为主，夹黏性土，局部土质较软或较松散；原有河浜局部区域存在浜填土，以黏性土为主，混少量粉性土，厚度一般为 0.40~1.50 m；埋深约 15 m 位置广泛存在厚度 3.00~6.50 m 的淤泥质黏土，均为高压缩性软弱土层，强度偏低，透水性差，影响工程的整体稳定和变形控制。尽管原场地曾做过地基处理，但其使用过程中堆载较小且极不均匀^[10]。

该项目建设自动化集装箱堆场，堆 6 过 7，

新建堆场内的场桥轨道基础、箱角基础、条基间和道路荷载差异较大，同时对沉降尤其是不均匀沉降较为敏感，且新建堆场设计荷载也远大于过往。

3.2.2 建设方案

考虑此次建设自动化堆场轨道基础对不均匀沉降极为敏感，轨道基础的工后沉降量与箱角基础工后沉降需要协调，原堆场有大量的拆除料可原地再生利用，需最大限度节约成本等多个因素，确定采用高强钢丝格栅加筋垫层法来处理场桥轨道基础和箱脚基础。

场桥轨道基础采用的轨枕道砟基础结构，两侧设钢筋混凝土挡墙，下部基础结构的实施方案为：1) 地基振动碾压；2) 铺设第 1 层高强钢丝格栅；3) 铺设 200 mm 厚再生石碾压密实；4) 铺设第 2 层高强钢丝格栅；5) 铺设 200 mm 厚再生石碾压密实；6) 铺设第 3 层高强钢丝格栅；7) 铺设 200 mm 厚道砟石碾压密实(仅轨道基础区)；8) 铺设第 4 层高强钢丝格栅。第 3 层和第 4 层高强钢丝格栅的铺设时，两层格栅的长边方向应呈 90°相交，见图 3。

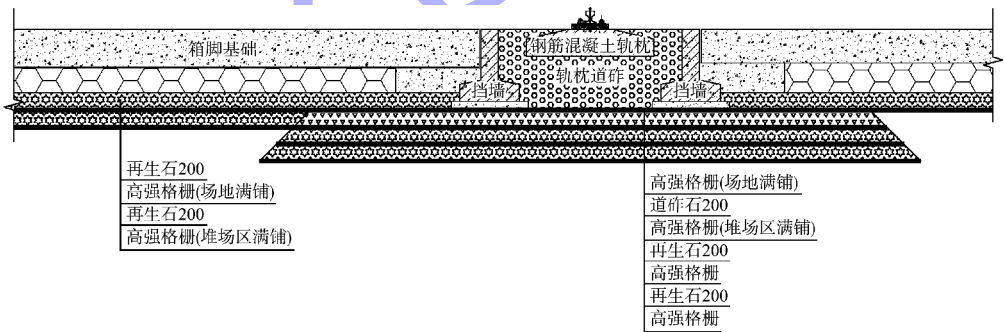


图 3 集疏运中心集装箱堆场 ARMG 轨道基础及箱脚基础结构 (单位: mm)

Fig. 3 ARMG track foundation and container foot foundation of container yard in collection and distribution center (unit: mm)

箱角基础方案采用钢筋混凝土箱角基础 350 mm+素混凝土垫层 100 mm+6%水泥稳定碎石 300 mm 的设计方案，下部基础结构的实施方案为：1) 地基振动碾压；2) 铺设 1 层高强钢丝格栅(与轨道基础第 3 层土工格栅为整体统一铺设)；3) 铺设 200 mm 厚再生石碾压密实；4) 铺设第 2 层高

强钢丝格栅(与轨道基础第 4 层土工格栅为整体统一铺设)；5) 铺设 200 mm 厚再生石碾压密实。

3.2.3 使用效果

此方案与桩基轨道梁结构相比节省建设费用约 31%；堆场建成已投入使用 3 a，总体沉降约 20 mm，轨道基础及箱脚基础未出现明显不均匀沉

降; 轨道结构的使用期调整情况是第 1 年调整工作量相对较大, 后期呈逐渐减少的态势; 总体运营情况良好, 符合预期。

3.3 高强钢丝格栅在灰库重型堆场中的应用

3.3.1 建设条件

灰库位于江边滩地上, 粉煤灰堆存厚度 4~6 m, 粉煤灰下有 0.5~1.0 m 厚淤泥及 20 多米深厚淤泥质软土, 地基未做任何的处理, 灰库内地下水位极高, 粉煤灰处于饱和流塑的松散状态。堆场设计荷载考虑堆货荷载 12 t/m^2 和叉车、轮胎式起重机、平板车等流动机械荷载 (其中轮胎式起重机打支腿时最大集中力达 450 kN, 接地压强 $2\ 250 \text{ kN/m}^2$)^[11]。

3.3.2 建设方案

设计方案采用了高强钢丝格栅结合山皮石土形成加筋垫层结合强排水振动碾压的地基处理方案, 地基处理结合堆场面层结构共同进行施工, 设计目标是控制差异沉降。由于堆场实施过程并未对深层地基进行处理, 深层土体的固结沉降主要在工后完成, 经计算堆场工后最大沉降量 950 mm, 堆货按逐级加载设计 (初期 4 t/m^2 , 1 a 后过渡到 8 t/m^2 , 后逐级加载至 12 t/m^2)。

堆场最终实施方案为: 1) 山皮土回填至高程并振动碾压密实; 2) 铺第 1 层高强钢丝格栅; 3) 铺 250 mm 山皮石土碾压密实; 4) 铺第 2 层高强钢丝格栅; 5) 铺 200 mm 山泥结碎山石碾压密实; 6) 铺设 50 mm 砂垫层 (含适量水泥) 同时铺设 120 mm 花岗岩面层。

3.3.3 使用效果

与采用强夯地基处理方案相比, 堆场使用高强钢丝格栅方案的每平米造价略低, 工期明显缩短, 仅用时 4 个月; 目前堆场已投入使用 10 a, 在运行 3 a 后堆载达到设计目标 12 t/m^2 , 运行状况良好, 根据定期观测结果, 堆场累计工后沉降 535 mm, 且无不均匀沉降, 堆场每年的沉降量也逐年减小。

4 结语

1) 通过工程实践证明, 充分利用高强格栅变

形延伸率小、双向强度高和节点强度大的特点, 形成高强钢丝格栅与填料组成的加筋垫层结构使堆场荷载快速向四周扩散, 可以实现在软弱地基上只做简单处理建设重载堆场及重型轨道基础。证明该工程的方法有效, 设计理论合理。

2) 通过高强钢丝格栅与填料组成加筋垫层部分替代地基处理, 可有效缩短施工周期, 节约工程造价, 工程效益显著。

3) 受条件限制, 高强钢丝格栅对竖向荷载扩散的效果研究只能通过计算机软件简单模拟计算, 尚无现场实测数据, 建议有条件时开展现场的实测研究工作。

参考文献:

- [1] 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
Code for foundation design on port and waterway engineering: JTS 147-2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司. 高强钢丝格栅设计应用总结[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2012.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Summary of heavy-strength steel wire grid design and applications[R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2012.
- [3] 吴剑, 李瑞刚. 罗泾港区二期工程矿石堆场堆取料机基础设计[J]. 水运工程, 2011(5): 124-126, 150.
WU J, LI R G. Stacker-reclaimer foundation design for Luoqing port phase II project [J]. Port & waterway engineering, 2011, (5): 124-126, 150.
- [4] 港口道路与堆场设计规范: JTS 168—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
Design code of road and storage yard for portarea: JTS 168-2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.
- [5] 刘毓毓, 左广洲, 陈福全. 加筋垫层应力扩散特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 903-908.
LIU Y C, ZUO G Z, CHEN F Q. Numerical research on

- stress distribution of geosynthetic reinforcement layer[J]. Rock and soil mechanics, 2007, 28(5): 903-908.
- [6] 程培峰,慕万奎,姜海洋,等. 土工格栅加固浅层软土地基的有限元分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(2): 6-11. CHENG P F, MU W K, JIANG H Y, et al. Finite element analysis of shallow soft soil foundation reinforced by geogrids [J]. China journal of highway and transport, 2008, 21(2): 6-11.
- [7] 何东坡,彭银辉,姜利,等. 双向土工格栅处理桥头跳车的有限元分析[J]. 中外公路, 2010, 30(4): 53-56. HE D P, PENG Y H, JIANG L, et al. Finite element analysis of bidirectional geogrid treatment for bridge head jumping[J]. Journal of China & foreign highway, 2010, 30(4): 53-56.
- [8] 闫澍旺, Ben Barr. 土工格栅与土相互作用的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 56-61. YAN S W, BARR B. Finite-element modelling of soil-geogrid interaction with application to interpret the pullout behaviour of geogrids[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1997, 19(6): 56-61.
- [9] 中交水运规划设计院有限公司. 上海港罗泾港区集装箱改造一期工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2022. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Preliminary design for phase I container terminal renovation project in Luoqing port area of Shanghai Port [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2022.
- [10] 中交水运规划设计院有限公司. 集疏运中心初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2021. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Preliminary design for collection and distribution center [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2021.
- [11] 中交水运规划设计院有限公司. 灰场Ⅱ库区试验工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2011. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Preliminary design for ash field II warehouse area test project [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2011.
- (本文编辑 赵娟)

· 消 息 ·

水规院设计的罗东公司(罗泾改造一期) 昼夜集装箱吞吐量突破 8 000 TEU

2025 年 11 月 6 日, 由水规院主导设计的上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程(罗东公司)昼夜集装箱吞吐量再攀新高, 达到 8021TEU, 刷新正式开港运营以来的生产记录。工程通过自动化集装箱码头技术的迭代升级, 基于自主研发的智能营运管控系统, 打造以“新一代智能水平运输装备(AIV)+自动化单小车岸桥+单双悬臂轨道吊”为装备方案的智能绿色集装箱码头, 在传统码头升级焕新的过程中, 同步引入最新智慧码头技术, 以新质生产力助力超大型码头功能转型升级的有效实践。自 2024 年 8 月开港以来, 码头吞吐量一直稳步提升, 成功实现了“6 000 TEU→7 000 TEU→8 000 TEU”三级跳跃, 全面实现设计能力和效率目标, 充分体现了水规院在老码头转型升级改造以及自动化集装箱码头领域前瞻性的创新设计与集成能力。

[https://xt.portal.ccccltd.cn/docs/docs/DocDsp.jsp?id=4215429\(2025-11-14\)](https://xt.portal.ccccltd.cn/docs/docs/DocDsp.jsp?id=4215429(2025-11-14))