

DOI: 10.11779/CJGE201910004

工业镍铁渣的路用特性及原位试验研究

贺 炜¹, 刘剑锋¹, 尹平保¹, 陈彦虎², 杨文斌¹, 陈宇林¹, 吴永昌³

(1. 长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 广东广青金属科技有限公司, 广东 阳江 529533;

3. 广州建设工程质量安全检测中心有限公司, 广东 广州 510000)

摘 要: 综合采用室内和原位试验研究了工业镍铁渣作为路基填料的适用性。首先实测并统计了不同地区工业镍铁渣的化学成分, 分析得到了其主要组分及变异性; 同时在室内开展了不同击实条件下的颗粒特性、抗剪强度指标、CBR、压蒸粉化率及回弹模量试验, 探讨了不同应用条件下工业镍铁渣的力学特性及路用指标。在此基础上, 设计并实施了镍铁渣路堤足尺原位试验, 实测了施工期及工后路堤沉降量、水平位移及孔隙水压力的发展规律, 并基于有害物检测试验结果评价了环境影响评价。研究表明: 镍铁渣主要由 SiO₂、MgO、和 CaO 3 种成分组成, 其中游离态 MgO 与 CaO 具有一定膨胀性, 用于填料前须确保浸水膨胀率不大于 2%; 镍铁渣为级配不良砾土, 标准击实功下其颗粒级配变化较小, 掺配 10%~20% 的黏土有利于改善其路用性能指标。原位试验结果表明, 采用土工加筋路堤方式应用镍铁渣效果较好, 监测获得的路基变形量在施工初期即可稳定, 施工后期及工后变形较小, 渗透性好, 孔隙水压力可即时消散。根据镍铁渣环境有害物质检出值, 其为一般工业固体废物, 可直接入场(非预处理)填埋, 符合路基填料的环保要求。综合力学及环境试验结果可知, 镍铁渣进行适当改良或处理后可直接作为路基填料使用。

关键词: 道路工程; 镍铁渣; 路用特性; 足尺原位试验

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)10 - 1809 - 08

作者简介: 贺 炜(1982—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程防灾减灾及深基础工程方面教学和科研工作。

E-mail: wadeho@csust.edu.cn.

Properties and field tests of industrial ferro-nickel slag for roads

HE Wei¹, LIU Jian-Feng¹, YIN Ping-bao¹, CHEN Yan-hu², YANG Wen-bin¹, CHEN Yu-lin¹, WU Yong-chang³

(1. Civil Engineering College, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Guangdong Guangqing Metal

Technology Co., Ltd., Yangjiang 529533, China; 3. Guangzhou Construction Engineering Quality Security Testing Center Ltd., Guangzhou

510000, China)

Abstract: The adaptability of industrial ferro-nickel slag as road fill is studied using the laboratory and field tests. Firstly, chemical compositions of industrial ferro-nickel slag from various districts are tested and statistically analyzed to examine the main components and the relevant variability. The slag is then tested in laboratory to obtain particle characteristics (under different compaction efforts), shear strength index, CBR, percentage of powered slag in autoclave and resilient modulus, thus the mechanical behavior and index as road fills are evaluated. Based on this, full-scale field tests on ferro-nickel slag embankment are designed and implemented. The embankment settlement, deflection and pore water pressure are monitored during and after construction, and harmful substances are detected to assess their environmental impact. The study indicates that the ferro-nickel slags is largely composed of three components: SiO₂, MgO, and CaO. The MgO and CaO at free stage are expansive to some extent, therefore the soaked expansion of the slag shall be tested before adopted in roads. The ferro-nickel slag is defined as poorly graded gravel, with minor change of grading under standard compaction effort. The behavior of the slag as road fill can be improved by being mixed with clay of 10%~20% by mass. The field tests indicate that the ferro-nickel slag can be successfully applied in reinforced embankment. The monitoring settlement becomes stable at the initial stage of construction, and minor settlement occurs thereafter. The slag is highly premeable, thus the excess pore water pressure can be dissipated immediately. According to the detected harmful substances, the ferro-nickel slag is a general industrial solid waste, which is conforming to the environmental requirements as road fills, and can be buried directly (no pre-processing required). According to the mechanical and environmental tests, the ferro-nickel slag is able to be adopted as road fills after appropriate improvement.

Key words: road engineering; ferro-nickel slag; index of road fill; full-scale field test

0 引言

中国镍铁渣年排放量超过 3000 万吨^[1], 将其用于路基填筑或一般性填料不仅能有效处置工业废渣, 而且可一定程度上解决建筑材料短缺的问题, 具有重要的经济和社会效益。现行的公路路基规范 JTD D30—2015 对工业废渣路堤做了相关规定^[2], 但目前仅适用于高炉矿渣、钢渣及煤矸石 3 种材料。为发展镍铁渣路用技术, 对其开展室内及现场试验研究十分必要。

镍铁渣目前已受到国内外学者的广泛关注。Kokubu 等^[3-4]、Saha 等^[5]对不同镍铁渣掺量的混凝土进行了室内对比试验, 结果表明, 当掺量小于 50% 时, 镍铁渣能有效提高混凝土的强度和耐久性; Saha 等^[6]提出镍铁渣可替代路面结构中的天然集料; Wang^[7-8]将镍铁渣与沥青热拌混合料应用于在多米尔加共和国阿尔特高速公路建设, 认为镍铁渣适用于热拌沥青集料。除用于工程集料外, 镍铁渣也被用作工程填料。Tangahu 等^[9]、Demotica 等^[10]报道了镍铁渣在苏拉威西岛东南部 Pomalaa 和菲律宾 Illigan 海湾被用于填海填料; Huang 等^[11]将镍铁渣以不同比例与土(砂)混合, 加入少量普通硅酸盐水泥, 基于 CBR、UCS 及膨胀率等试验结果, 认为镍铁渣可在道路基层中部分取代砂和碎石。在环境影响方面, Kang 等^[12]对镍铁渣处理区域进行了现场取样研究, 结果表明镍铁渣未对周围环境造成污染, 是良好的工程材料。

总体来说, 目前对于镍铁渣的循环利用仍处于起步阶段, 用于路基填料尚缺乏系统的室内研究及现场验证。本文拟在分析镍铁渣的化学成分及力学特性的基础上, 探讨其路用特性, 并实施足尺原位路基试验, 其结果可有效评价镍铁渣用于路基填料的适用性, 为工程应用提供依据。

1 成分与力学特性试验

1.1 化学成分

本文研究对象为广东广青公司回转窑(RK)—矿热炉(EF)冶炼工艺残留的镍铁渣, 其外观为偏黑色砾状不规则颗粒(如图 1 所示)。在电子显微镜下镍铁渣可见镁橄榄石 Mg_2SiO_4 和顽火辉石 $MgSiO_3$, 如图 2 所示。采用了 X 射线荧光光谱分析对广青公司镍铁渣化学成分进行了分析, 并将结果与不同地区的镍铁渣成分进行对比可知, 镍铁渣的主要成分包括 SiO_2 、 MgO 、 CaO 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 , 具体质量百分数如表 1 所示。



图 1 镍铁渣样品照片

Fig. 1 Photo of ferro-nickel slag samples

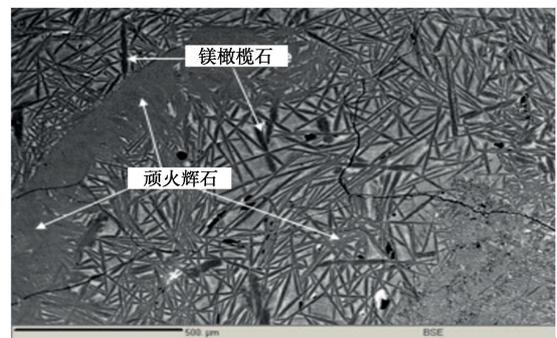


图 2 镍铁渣电子显微镜分析

Fig. 2 SEM analysis of ferro-nickel slag

表 1 镍铁渣化学成分对比表(质量百分数%)

Table 1 Comparison of chemical composition (in percentage by mass) of ferro-nickel slag (%)

文献及产地	SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3
本文, 中国	49.6	30.9	1.2	3.0	—
Wang ^[7] , 多米尔加共和国	50.20	26.7	1.8	—	5.8
Wang ^[7] , 多米尔加共和国	50.50	26	2.2	—	5.3
Demotica 等 ^[10] , 菲律宾	32.43	20.28	1.397	1.117	13.59
Fidancevska 等 ^[14]	19.8	9.7	4.5	12.3	17.6
Maragkos 等 ^[15] , 希腊	40.3	5.4	3.7	10.1	37.7
Sato 等 ^[16] , 日本	55.6	27.8	5.2	—	7.6
Sato 等 ^[16] , 日本	52.7	34.0	2.3	—	6.7
Komnitsas 等 ^[17] , 希腊	32.7	2.8	3.7	8.3	43.8
Lemonis 等 ^[18] , 希腊	41.2	7.8	4.1	6.0	40.0
Choi 等 ^[19] , 韩国	62.8	24.7	2.1	2.0	7.1
Choi 等 ^[19] , 韩国	58.1	26.5	0.3	2.3	11.1
Saha 等 ^[20] , 新喀里多尼亚	53.3	31.6	0.4	2.7	11.9

基于文献中样本数据对各化学成分质量百分数的变异系数进行统计分析, 由对比可知, SiO_2 质量百分数最大, 但变异系数最小 (约 0.23), 含量最为稳定, 其次分别为 MgO (约 0.56) 与 CaO (约 0.60)。除此以外的其他成分变异系数较大, 与原料及工艺直接相关。游离态的 CaO 或 MgO 具有一定的膨胀性, 因此镍铁渣用于路基填筑材料之前, 需通过膨胀性试验判断适用性。参照国家标准 GB/T 25824—2010《道路用钢渣》, 用于路基时浸水膨胀率应不超过 2%^[13]。此外, 由镍铁渣堆场可见有植物生长, 说明其可为植被提供养分, 有望用于道路绿化工程。

1.2 物理性质

采用筛分法对所取镍铁渣试样进行分析, 可得其颗粒级配曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 镍铁渣的特征粒径 $D_{10}=1.3 \text{ mm}$, $D_{30}=2.5 \text{ mm}$, $D_{50}=3.2 \text{ mm}$, $D_{60}=3.7 \text{ mm}$ 。由此可知平均粒径 3.2 mm, 不均匀系数为 2.85, 曲率系数为 1.30。根据中国岩土工程勘察规范 GB50021—2001^[21], 镍铁渣为级配不良碎石土 (圆砾)。根据美国 ASTM D2487—2011 引用的统一分类系统^[22], 镍铁渣为级配不良砂。根据工程经验, 该类材料用于填料难以压实, 须进行改良或加筋处理。

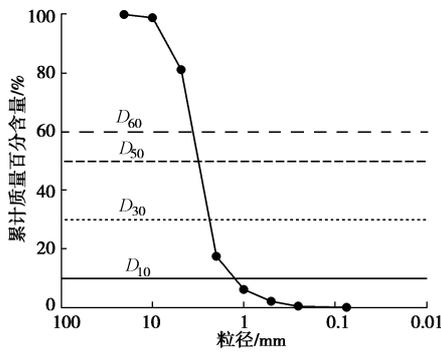


图 3 镍铁渣颗粒级配曲线

Fig. 3 PSD curve of ferro-nickel slag

1.3 力学性质

为测试镍铁渣的抗剪强度特性, 采用 TSZ 全自动应变控制式三轴仪进行固结排水 (CD) 试验。三轴试验设计方案如表 2 所示, 由于镍铁渣粒径较大, 故采用直径为 39.1 mm 的试样, 其高度为 8 cm。为满足最大粒径小于直径 1/10 的要求, 对镍铁渣过 3.5 mm 筛, 同时制作一组过 2.0 mm 筛的试样进行对比。镍铁渣试样压实度按 90% 进行控制, 考虑不掺黏土镍铁渣可能难以压实, 同时按压实度为 80% 制作一组试样进行对比试验。

试样根据《公路土工试验规程》JTG E40—2007^[23] 扰动砂类土的制备程序处理。根据试样体积和压实度要求, 按照公式 (1) 计算所需试样土的质量 m , 并用

电子秤称量 (精确至 0.01 g), 然后在压力室底座上分层击实。

$$m = K \rho_{d\max} (1 + w) \times V \quad (1)$$

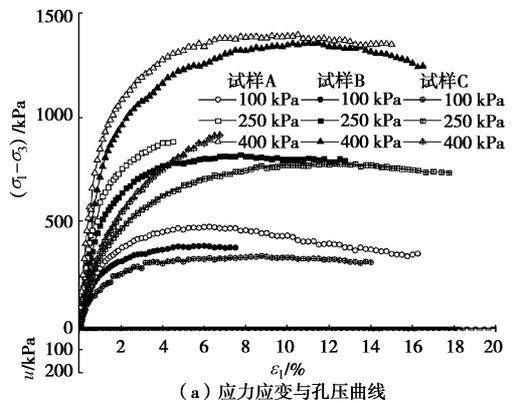
式中 K 为压实度 (%), $K = \rho_d / \rho_{d\max}$, ρ_d 为试样的设计干密度 (g/cm^3); $\rho_{d\max}$ 为土样的最大干密度 (g/cm^3); w 为最优含水率 (%); V 为试样的体积 (cm^3)。

表 2 固结排水三轴试验方案

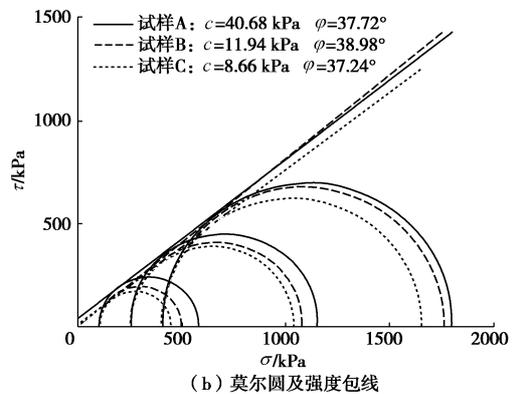
Table 2 Testing plan of tri-axial tests (CD)

编号	材料	过筛孔径 /mm	含水率 /%	压实度 /%
A	镍铁渣	2	2	90
B	镍铁渣	3.5	2	90
C	镍铁渣	3.5	2	80
D	镍铁渣掺 10%黏土	3.5	2	90
E	镍铁渣掺 20%黏土	3.5	6	90

三轴试验结果如图 4~6 所示。图 4 给出了纯镍铁渣三轴试验结果。由图 4 可知, 过筛直径与压实度对镍铁渣试样抗剪强度有一定影响, 其中压实度影响更为显著, 尤其当围压较高时。试验结果表明压实后镍铁渣表现出一定的黏聚力, 这说明其颗粒间具有一定的咬合力。试验剪切过程中, 其孔压几乎未发生变化, 体现材料具有良好的渗透性。



(a) 应力应变与孔压曲线



(b) 莫尔圆及强度包线

图 4 镍铁渣三轴试验结果

Fig. 4 Triaxial test results of ferro-nickle slag

图5给出了掺配黏土镍铁渣的三轴试验结果。由对比可知,掺配更多的黏土可一定程度上提高黏聚力,减小加载初期的变形量。表3统计了不同试验条件下镍铁渣的抗剪强度参数,其均表现出一定的表观黏聚力,但内摩擦角基本一致。该三轴试验获得的镍铁渣抗剪强度指标与文献[12]较为接近。笔者认为,由于镍铁渣实际不具有黏性,未经改良时不宜计入黏聚力,其表观黏聚力可作为安全储备考虑。

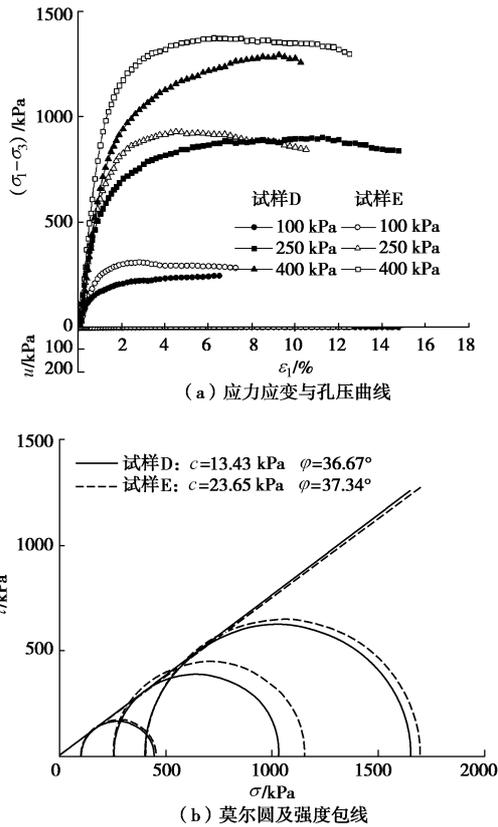


图5 掺配黏土镍铁渣三轴试验结果

Fig. 5 Triaxial test results of ferro-nickel slag mixed with clay

表3 实测镍铁渣抗剪强度参数

Table 3 Measured shear strength parameters of ferro-nickel slag

编号	材料	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
A	镍铁渣	40.68	37.72
B	镍铁渣	11.94	38.98
C	镍铁渣	8.66	37.24
D	镍铁渣掺10%黏土	13.43	36.67
E	镍铁渣掺20%黏土	23.65	37.34

2 路用指标

为分析镍铁渣的路用特性,根据规范对镍铁渣材料的浸水膨胀率、压蒸粉化率、CBR进行了实测。由试验结果可知,镍铁渣浸水膨胀率范围为0.7%~

1.2%,压蒸粉化率为0.28%,CBR为8。掺配10%与20%黏土的试样CBR为9及17,可见镍铁渣CBR值可满足路基填料要求,掺配20%黏土可显著提高CBR值。



(a) 制备试样 (b) 鼓胀破坏

图6 三轴试验试样照片

Fig. 6 Photos of samples during triaxial tests

中南大学对同批次镍铁渣在击实过程中的破碎规律进行了分析^[24],由试验结果进行分析可得各颗粒级配指标随击实次数的变化规律如图7所示。在不同击实次数下,镍铁渣的颗粒特征粒径有一定程度减小,但不均匀系数和曲率系数无明显变化,可见镍铁渣颗粒在击实过程中颗粒特性较稳定。

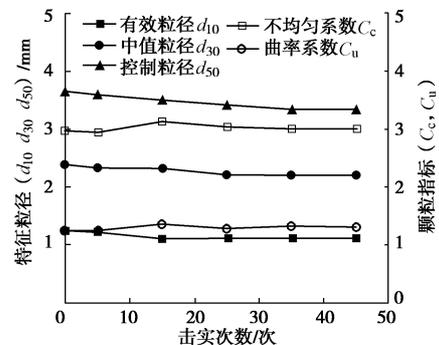


图7 不同击实次数下颗粒指标变化规律

Fig. 7 Variation of characteristic particle size with compaction counts

由试验得到不同黏土掺量(0, 10%, 20%)情况下镍铁渣击实曲线如图8所示。纯镍铁渣与掺配10%黏土镍铁渣无明显最大干密度与最优含水率,说明其压实性较差,而掺配20%黏土时最优含水率为6%,最大干密度约为2.2 g/cm³。总体来说,掺配黏土可有效提高压实后的填料干密度。

3 现场试验及原位监测

3.1 试验场地条件

为测试镍铁渣作为路基填料的原位特性,在广东

省阳江市广东广青公司自有园区内选址开展了足尺试验。试验路段连接金港大道及厂区道路, 长约为 100 m, 路段中部靠近三亚河。勘察资料^[25]表明, 上覆土层为填土、淤泥层及残积层, 基岩由全、强分化岩带组成。由于场地为平地, 为填筑高度为 5 m 的典型路堤, 采取场地下挖方案进行路堤填筑。试验场地地下水水位较高, 因此按浸水路堤设计。

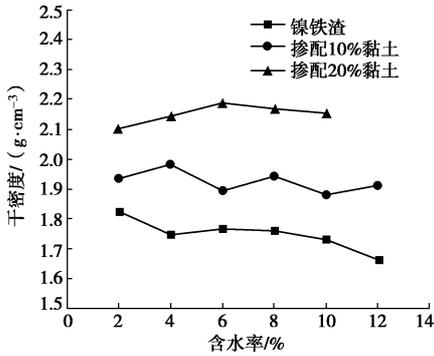


图 8 镍铁渣击实曲线

Fig. 8 Compaction curves of ferro-nickel slag

3.2 路基横截面设计

由于试验段所连接的两段路面基本无高差, 施工场地较为平坦, 考虑试验段的典型性, 在场地下挖 5 m 填筑路基。路基设计为封闭式路堤结构, 由主体部分、护坡和封顶层(黏性土或其他材料)以及隔离层、排水系统等部分组成。主体部分分下路堤(路面以下 1.5~5.0 m)、上路堤(路面以下 0.8~1.5 m)、路床(路面以下 0~0.8 m) 3 部分, 其中下路堤采用纯镍铁渣, 上路堤采用镍铁渣+20%黏土, 路床采用 70%镍铁渣+20%黏土+10%水泥。路堤施工需要拌合时均采用路拌法。监测期先不做护坡及路面, 以验证路堤变形和稳定性。路堤主体部分采用分层加筋处理, 加筋材料采用玻璃纤维双向土工格栅, 在上路堤断面上每隔 1 m 通长加筋, 中间 0.5 m 处采用两端 6 m 长加筋; 上路堤两端采用 3 m 长加筋, 间距 0.5 m。路基两侧根据实际地形施工边沟作为排水系统。由于本试验路基采用了分层加筋结构, 考虑到场地条件限制及已有经验, 路基边坡坡率采用 1:1。路基横断面示意图如图 9 所示。

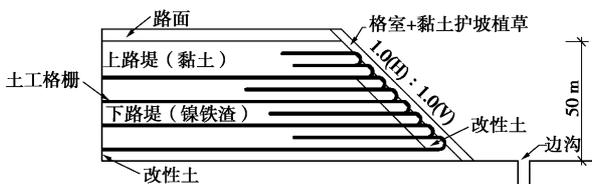


图 9 试验段路基断面示意图

Fig. 9 Profile of embankment trial

该设计路堤截面在正常状态及快速降水条件下安全系数分别为 1.35 与 1.30, 满足规范整体安全系数要求。采用有限元法进行路基沉降计算, 计算分三阶段进行: 第一阶段为初始应力场生成; 第二阶段为路基施工阶段, 按短期工况考虑; 第三阶段为工后沉降阶段, 按固结工况考虑, 路基顶面作用 10 kPa 行车荷载。计算结果列于表 4, 计算得到的位移量供后续现场变形监测参考。

表 4 有限元法计算结果

Table 4 FEM calculating results

工况	水平位移量 /mm	竖向沉降量 /mm	总变形量 /mm
施工期	44	41	46
工后期	11	35	35

3.3 测试方案

为检验镍铁渣路基的填筑效果, 本次路基原位试验采用智能型柔性位移传感器 (SZDG-L050B) 监测填筑层各层水平位移和沉降, 利用弦式渗压计 (SZZX-F04) 对底层孔隙水压力进行了量测。监测方案布置如图 10 所示。在 YJ1 与 YJ6 监测点, 镍铁渣填筑层自下往上每 0.5 m (即每层厚度) 埋设一个柔性位移计, 总共埋设两个断面, 以监测其水平位移。在对称的 4 个监测孔 YJ1、YJ3、YJ4 与 YJ6, 分别布置 5 个柔性位移计, 监测填筑层各层沉降量。在填筑层底, 布置 4 个弦式渗压计, 监测填筑层的孔隙水压力变化。

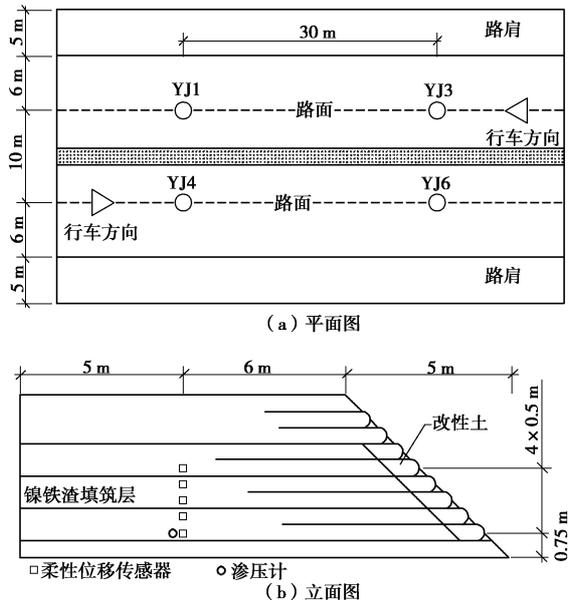


图 10 监测方案布置示意图

Fig. 10 Illustration of monitoring plan

试验段路堤填筑期间监测频率为每天 1 次。路堤填筑施工完成后监测频率为每 2 天 1 次。

3.4 路基运营条件

根据相关资料得知, 阳江市位于回归线以南, 属

亚热带气候，雨量充沛、气候温和。年平均气温 23 摄氏度左右，年平均降雨量一般为 2345 mm 左右，雨水分布不均匀，夏秋季多台风雨水，全年无霜期约 350 天，偶有低温霜冻。在 2018 年 5 月 17 日至 2018 年 9 月 10 日的监测期间内，总计 117 d。期间气温在 24℃ 至 33℃ 之间，而下雨天数达 78 d，最大日降雨量达 216 mm，期间多次遭遇台风以及暴雨的袭击，给施工和监测工作造成了一定的影响，同时也验证了镍铁渣路堤在极端条件下的稳定性。

3.5 试验结果分析

(1) 路堤施工期变形量

图 11 给出了镍铁渣路基各层施工变形与时间的关系曲线，其以路堤临空面方向为位移正方向。由图 11 (a) 可知，施工期路基水平变形总体较小，所测变形量一般小于 10 mm，仅第 5 层监测点 YJ1W-5 (H) 在第 19~22 d 连续暴雨条件下产生约 30 mm 的水平位移。该层在施工过程中包边质量劣于其他层，其可能为位移变化异常的原因。由图 11 (b) 可知，路堤沉降量主要发生在施工初期，施工完成后路基沉降量约为 60 mm，略大于预测沉降量 41 mm。综合工后沉降量预测值，可认为镍铁渣渗透性良好，施工期可基本完成固结沉降。施工后期路基变形增量时程曲线均趋于平缓，可认为路基变形已基本趋于稳定。由图 11 (c) 可见各监测点路堤总沉降量的发展具有相同的趋势，且监测值小于预测值。

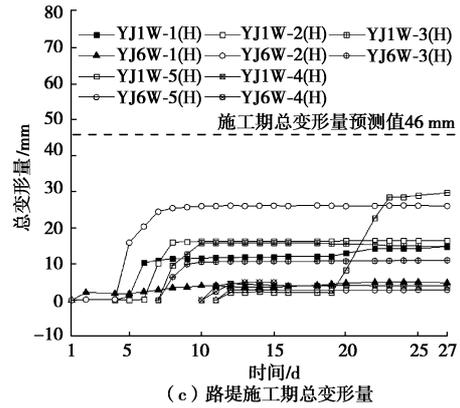
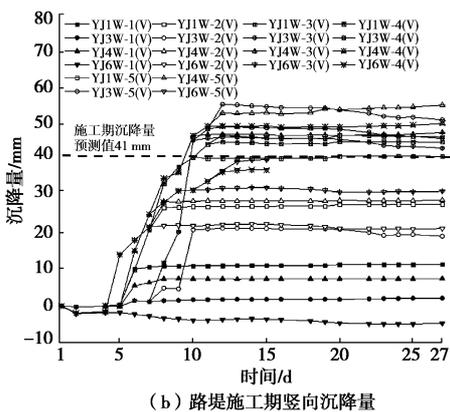
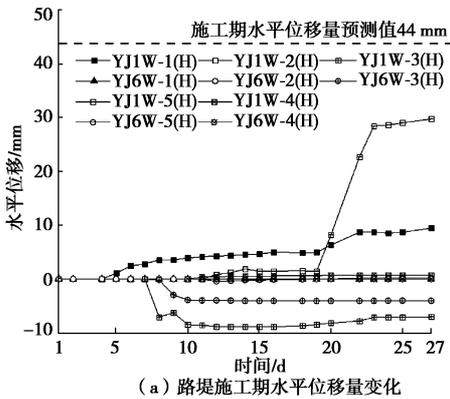
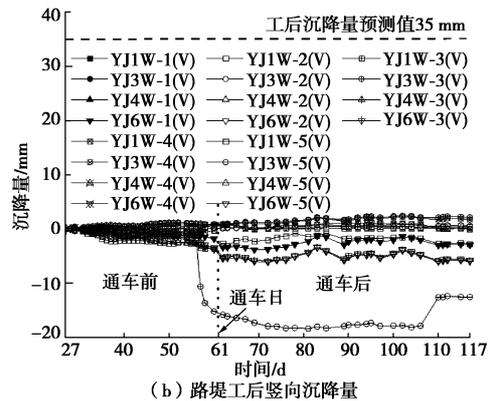
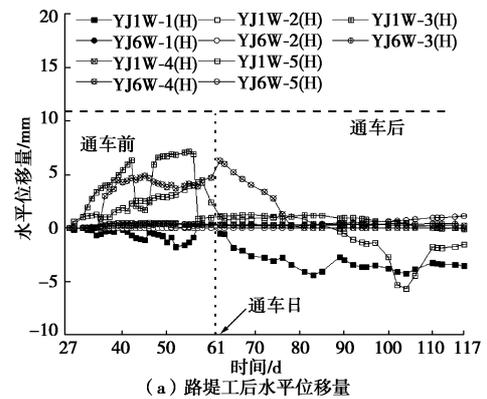


图 11 路堤施工期监测变形量

Fig. 11 Measured displacements of embankment during construction

(2) 路堤工后变形量

图 12 给出了镍铁渣路堤各监测点工后变形 - 时间关系曲线，图中以施工期最后一次监测值（第 27 天）为基准值，以道路开放行车时间（第 28 天）为初始时间点。镍铁渣路堤（未铺设路面）于 2018 年 7 月 17 日开始试运行通车，其距监测开始日 62 d。在开放行车之前，路基产生了小于 10 mm 的变形量，仅 YJ3W-5 (V) 在暴雨条件下产生了约 15 mm 沉降量，但总变形量变化不大。总体来说，工后行车对路堤变形量影响不大，路堤变形已基本稳定。其中，部分监测点隆起和较大的水平位移是由于管道附属结构的施工引起。



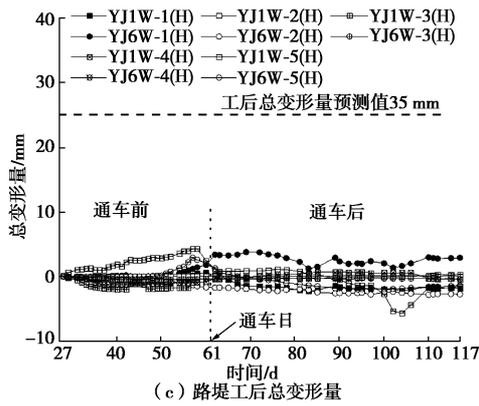


图 12 路堤工后监测变形量

Fig. 12 Measured displacements of embankment after construction

(3) 路基孔压分析

监测期路堤底部实测孔隙水压力如图 13 所示, 路基地底部孔隙水压力在整个监测过程中与水位同步变化。监测初期施工场地采用土围堰及排水措施, 故水位较低, 后随路基施工而升高, 最终水位随天气变化在基底以上 3.0 m 至 4.2 m 间变化。由路基孔压监测可见, 镍铁渣材料排水性能好, 孔压可瞬时消散。

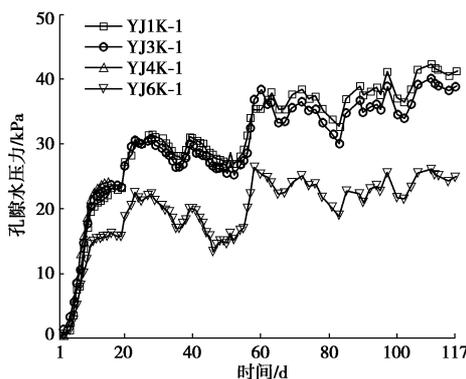


图 13 路堤底部实测孔隙水压力

Fig. 13 Measured pore water pressures under embankment

3.6 镍铁渣环境影响分析

镍铁渣应用于路基填料具有良好的经济和社会效益, 但其来源于工业副产品, 必须考虑其环境影响。统计镍铁渣堆放区周边环境有害物质检测报告^[26-27]中的最大检出值, 与《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(CB 5085.3—2007)^[28]中浸出毒性标准值对比可知, 镍铁渣各项有害物质最大检出值符合标准, 即镍铁渣不属于具有浸出毒性特征的危险废物, 为一般工业固体废物。根据相关规范^[2, 29]对危险废物允许进入填埋区的控制限值要求, 镍铁渣各项有害物质检出值均低于控制限值, 可直接入场 (非预处理) 填埋, 符合路基填料的环保要求。

4 结论与建议

(1) 镍铁渣三大主要成分为 SiO₂、MgO、CaO, 其中游离态 MgO、CaO 具有一定膨胀性, 路用前须进

行膨胀性试验, 确定其浸水膨胀率小于 2%。

(2) 镍铁渣为级配不良圆砾, 路用时可采用土工加筋路堤设计, 或掺配一定比例的黏土。

(3) 土工三轴试验表明, 镍铁渣内摩擦角在 36° ~ 38° 间, 其压实度达到 80% 时即可表现出一定的表观黏聚力, 随压实度增加, 其表观黏聚力增大, 表现出较好的力学特性。纯镍铁渣 CBR 值为 8, 掺配 20% 黏土后可达到 17, 可作为路基填料使用。

(4) 原位试验结果表明, 镍铁渣加筋路堤结构稳定性好, 变形小, 其变形在施工初期即可基本稳定。材料渗透性好, 且具有良好的水稳定性。

(5) 镍铁渣浸出物有害物质检测结果表明, 镍铁渣材料为一般工业固体废物, 可直接入场 (非预处理) 填埋, 符合路基填料的环保要求。

参考文献:

[1] BEIDOU X, RENFEI L, XINYU Z, et al. Constraints and opportunities for the recycling of growing ferronickel slag in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, **139**: 15 - 16.

[2] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S]. 2015. (JTG D30—2015 Specifications for design of highway subgrades[S]. 2015. (in Chinese))

[3] KOKUBU K, KAWASE K. Utilization of ferro-nickel slag as fine aggregates for concrete[J]. Concrete Journal, 1994, **32**(2): 15 - 22.

[4] KOKUBU K, KAWASE K. Guidelines for construction using ferronickel slag fine aggregate congregate[R]. Concrete Library of JSCE, 1994.

[5] SAHA A K, SARKER P K. Compressive strength of mortar containing ferronickel slag as replacement of natural sand[J]. Procedia Engineering, 2017(171): 689 - 694.

[6] SAHA A K, KHAN M N N, SARKER P K. Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as construction materials: a review[J]. Resources Conservation & Recycling, 2018(134): 10 - 24.

[7] WANG G. Hot-mix asphalt that contains nickel slag aggregate - laboratory evaluation of use in highway construction[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2011(2208): 1 - 8.

[8] WANG G. Slag use in highway construction-the philosophy and technology of its utilization[J]. International Journal of Pavement Research & Technology, 2011, **4**(2): 97 - 103.

[9] TANGAHU B V, WARMADEWANTHI I, SAPTARINI D, et al. Ferronickel slag performance from reclamation area in

- Pomalaa, Southeast Sulawesi, Indonesia[J]. *Advances in Chemical Engineering & Science*, 2015, **5**(3): 408 - 412.
- [10] DEMOTICA J S, JR R F A, MALALUAN R M, et al. Characterization and leaching assessment of ferronickel slag from a smelting plant in Iligan City, Philippines[J]. *Physics of Fluids*, 2012, **24**(7): 470 - 474.
- [11] HUANG D, CHEN S H, MON H H. The preliminary study on re-utilization of ferrous-nickel slag to replace conventional construction material for road construction (sub-grade layer improvement)[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **723**: 694 - 702.
- [12] KANG S S, PARK K, KIM D. Potential soil contamination in areas where ferronickel slag is used for reclamation work[J]. *Materials*, 2014, **7**(10): 7157 - 7172.
- [13] GB/T 25824—2010 道路用钢渣[S]. 2010. (GB/T 25824—2010 Steel slag for road[S]. 2010. (in Chinese))
- [14] FIDANCEVSKA E, MANGUTOVA B, MILOSEVSKI D, et al. Obtaining of dense and highly porous ceramic materials from metallurgical slag[J]. *Science of Sintering*, 2003, **35**(2): 85 - 91.
- [15] MARAGKOS I, GIANNOPOULOU I P, PANIAS D. Synthesis of ferronickel slag-based geopolymers[J]. *Minerals Engineering*, 2009, **22**(2): 196 - 203.
- [16] SATO T, WATANABA K, OTA A, et al. Influence of excessive bleeding on frost susceptibility of concrete incorporating ferronickel slag as aggregates[C]// 36th Conference on Our World in Concrete & Structures. Singapore, 2011.
- [17] KOMNITSAS K, ZAHARAKI D, BARTZAS G. Effect of sulphate and nitrate anions on heavy metal immobilisation in ferronickel slag geopolymers[J]. *Applied Clay Science*, 2013, **73**(1): 103 - 109.
- [18] LEMONIS N, TSAKIRIDIS P E, KATSIOTIS N S, et al. Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan[J]. *Construction & Building Materials*, 2015, **81**(11): 130 - 139.
- [19] CHOI Y C, CHOI S. Alkali-silica reactivity of cementitious materials using ferro-nickel slag fine aggregates produced in different cooling conditions[J]. *Construction & Building Materials*, 2015, **99**: 279 - 287.
- [20] SAHA A K, SARKER P K. Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, **123**: 135 - 142.
- [21] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2009. (GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2009. (in Chinese))
- [22] ASTM D2487—11 Unified soil classification system[S]. 2011.
- [23] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 2007. (JTG E40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. 2007. (in Chinese))
- [24] 聂志红. 镍铁渣作为地基回填材料与路基填料的可行性试验报告 TM20180028—0002[R]. 长沙: 湖南铁院土木工程检测有限公司, 2018. (NIE Zhi-hong. Feasibility research report of nickel ferro slag utilized as foundation backfill material and subgrade-TM20180028—0002[R]. Changsha: Hunan Railway College-Civil Engineering Testing Co, Ltd, 2018. (in Chinese))
- [25] 段庄, 但秋君, 李智文. 珠海(阳江)合作共建园区生活配套区填土工程施工设计说明(岩01)[R]. 珠海: 珠海市规划设计研究院, 2017. (DUAN Zhuang, DAN QIU Jun, LI Zhi-wen. Zhuhai (Yangjiang) co-construction park construction supporting area construction design description (Ran 01) [R]. Zhuhai: Zhuhai Planning and Design Institute, 2017. (in Chinese))
- [26] 张旭. 粤环境监测 LB 字(2016)第 39 号之 1[R]. 广州: 广东省环境保护厅, 2016. (ZHANG Xu. Guangdong environmental monitoring LB (2016) No. 39-1[R]. Guangzhou: Guangdong Provincial Department of Environmental Protection, 2016. (in Chinese))
- [27] 环境保护部华南环境科学研究所. 华环监测字 S2017 第 096 号[R]. 广州: 环境保护部华南环境科学研究所, 2017. (Ministry of Environmental Protection-South China Institute of Environmental Sciences. Huahuan monitoring report S2017 No. 096 [R]. Guangzhou: Ministry of Environmental Protection-South China Institute of Environmental Sciences, 2017. (in Chinese))
- [28] GB 5085.3—2007 危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别[S]. 2007. (GB 5085.3—2007 Identification criteria for hazardous wastes identification of leaching toxicity[S]. 2007. (in Chinese))
- [29] 环发[2004] 75 号危险废物安全填埋处置工程建设技术要求[S]. 2004. (Huanfa [2004] No. 75 technical requirements for safe landfill disposal construction of hazardous waste[S]. 2004. (in Chinese))