

罗泾集装箱码头堆场结构-地基 一体化刚度增强技术研究

郑科¹, 梁超², 贾敏才³

(1. 上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 200080;
2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 3. 同济大学, 上海 200092)

摘要: 在软土地区重载堆场工程中, 差异沉降易导致堆场基础与轨道设施等失稳, 传统塑料格栅因刚度较小导致加固效果有限。以上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程为背景, 提出堆场基础-地基一体化刚度增强技术, 即通过钢格栅加筋碎石垫层提升基础-地基的整体刚度以调整场地的差异沉降; 通过 FLAC3D 数值模拟系统分析该技术的加固效果及影响因素, 重点探讨垫层材料与钢格栅铺设层数对差异沉降的影响机制。结果表明: 垫层材料弹性模量增大能略微降低总沉降, 但对差异沉降的控制作用有限; 钢格栅层数的增加能显著减小差异沉降, 其中铺设 2 层时降幅达 31%~45.4%, 继续增层的效果趋缓。结合经济性与工程效益, 推荐采用“2 层钢格栅+弹性模量 80 MPa 级配碎石”组合方案, 该方案有效提升地基整体刚度并抑制侧向变形, 可使条基与轨道差异沉降的降幅达到 15%~29.02%。

关键词: 钢格栅; 差异沉降; 加筋垫层; 地基加固; 数值模拟

中图分类号: U653.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0223-06

Technique of yard structure-foundation integrated stiffness enhancement for container terminal in Luojing

ZHENG Ke¹, LIANG Chao², JIA Mincai³

(1. Shanghai International Port (Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China;
2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China; 3. Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In heavy-duty storage yard projects located in soft soil regions, differential settlement frequently causes instability in yard foundation and rail facilities, while conventional plastic geogrid reinforcement demonstrates limited effectiveness. Focusing on the phase I container terminal renovation project in Luojing port area of Shanghai Port, we propose a technique of container yard structure-foundation integrated stiffness enhancement using steel geogrid-reinforced gravel cushion to improve integral rigidity of structure-foundation and reduce differential settlement. We systematically investigate its optimized design through FLAC3D numerical simulations and discuss the influence mechanisms of cushion material properties and steel geogrid layering configuration on differential settlement control. The results show that although increasing the elastic modulus of cushion materials reduces total settlement slightly, its effectiveness in mitigating differential settlement remains constrained. Conversely, additional steel geogrid layers significantly decrease differential settlement, achieving a 31%~45.4% reduction with two-layer installation. However, the improvement rate diminishes with further layer additions. Considering economic viability and project benefit, the solution of combining dual-layer steel geogrids with 80 MPa elastic modulus graded crushed stone is recommended. The solution reduces differential settlement between strip foundations and rail tracks by 15%~29.02%, simultaneously forming a rigid stiffened layer that enhances overall foundation stiffness and suppresses lateral deformation.

Keywords: steel geogrid; differential settlement; reinforced cushion; foundation improvement; numerical simulation

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 郑科(1980—), 男, 高级工程师, 从事港口工程管理工作。

在软土地区的工程建设中,建造于软土地基上的浅基础通常会产生较大的沉降甚至失稳破坏的现象,因此需要预先对软土地基进行加固处理^[1]。土工合成材料加筋地基能有效地提高地基承载力和变形协调能力,减小地基沉降和不均匀沉降^[2]。目前,加筋地基中的土工合成材料以土工格栅和土工织物为主^[3]。土工格栅在加固软弱地基、迅速提高地基承载力以及控制地基沉降量等方面具有一定作用,它能够使土中应力分布更加均匀,降低应力集中现象,从而减少沉降和破坏发生,目前已被广泛应用于提高路基、堤坝、边坡以及挡土墙的稳定性的^[4-6]。传统的土工格栅加固中,土工格栅往往布置在填土中,通过“加筋-土”的协同效应,土工格栅在软基处理中表现出良好的力学性能,从而使其与土体组成一个复合结构,共同承受各种荷载^[7]。土工格栅加筋碎石垫层作为一种新型的结构形式,既能通过碎石间的嵌挤作用增强其内部摩擦,又能与加筋土挡墙形成一种稳定的组合结构,进一步提升软弱土的承载能力^[8]。

在地层情况复杂的集装箱重箱堆场区,在轨道吊和箱角荷载作用下场地易出现明显的差异沉降,对道路、轨道吊和堆场的正常使用产生巨大风险^[9-10]。传统的塑料格栅加筋地基,因格栅刚度相对较低、延伸率较大而主要用于提高地基的强度和稳定性,在解决差异沉降方面效果尚有待于进一步验证。相比之下,钢格栅刚度大、延伸率低、格栅约束层网孔具有相同形状,依靠格栅的

刚度、抗拉强度及网孔嵌锁三者相互作用可使地基具有整体性^[11-12]。利用钢格栅与碎石填料颗粒之间存在的嵌锁效应和摩擦效应,通过设置钢格栅加筋碎石垫层,地基刚度得到明显增强并形成一个刚度较大的硬壳层,从而实现有效控制侧向变形和减小差异沉降的目的。然而,现有研究对钢格栅加筋碎石垫层的层数、碎石材料以及参数的影响机制尚未系统揭示,制约了工程设计的精细化与经济性。

本文以罗泾港区堆场改造工程为背景,提出堆场基础-地基一体化刚度增强技术,即通过钢格栅加筋碎石垫层提升基础-地基的整体刚度以调整场地的差异沉降,基于FLAC3D软件建立模型,系统研究钢格栅层数、碎石材料对差异沉降的影响机制。通过对比不同工况下的沉降分布规律,提出兼顾经济性与工程效果的优化方案,旨在为软土地区重载堆场地基设计提供理论依据与技术参考。

1 工程概况

1.1 现场地基条件

罗泾港区集装箱改造一期工程位于上海市宝山区罗泾港区内。根据勘察报告,工程所在区域土层由上到下依次为①₁₋₁ 杂填土、①₁₋₃ 砂质粉土、①₁₋₄ 砂质粉土夹粉质黏土、②₃ 砂质粉土、③淤泥质粉质黏土夹砂质粉土、④淤泥质黏土、⑤₁ 黏土、⑤₃ 粉质黏土、⑤_{3夹} 粉质黏土夹粉性土、⑤₃ 粉质黏土。土层厚度与物理力学参数见表1。工程所在区域现状场地主要为煤炭堆场和矿石堆场。

表 1 土层厚度及物理力学参数
Tab.1 Soil layer thickness and physical-mechanical parameters

土层	层厚/m	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	重力密度/(kN·m ⁻³)	压缩模量/MPa
① ₁₋₁ 杂填土	1.4	3	32.0	18.8	11.45
① ₁₋₃ 砂质粉土	4.2	5	30.5	17.6	8.83
① ₁₋₄ 砂质粉土夹粉质黏土	0.6	7	28.5	18.3	7.18
② ₃ 砂质粉土	1.9	5	31.0	18.8	9.48
③淤泥质粉质黏土夹砂质粉土	3.6	12	16.5	17.7	3.06
④淤泥质黏土	7.3	12	11.5	16.8	2.13
⑤ ₁ 黏土	4.3	16	12.5	17.6	2.91
⑤ ₃ 粉质黏土	8.2	4	32.5	18.3	4.49
⑤ _{3夹} 粉质黏土夹粉性土	10.1	15	21.5	18.3	5.41
⑤ ₃ 粉质黏土	6.8	18	18.5	18.3	4.49

1.2 使用荷载条件

罗泾港区集装箱改造一期工程集装箱堆场布置自动化单悬臂轨道吊和自动化双悬臂轨道吊, 其中自动化双悬臂轨道吊为控制工况, 轨距 37 m,

基距 16.4 m, 总轮数为 24, 轮距 1.05 m, 台车间距 1.4 m, 重载轮压 290 kN/轮。轮系布置见图 1。重箱堆场堆高 6 层, 箱角荷载为 1 097 kN。

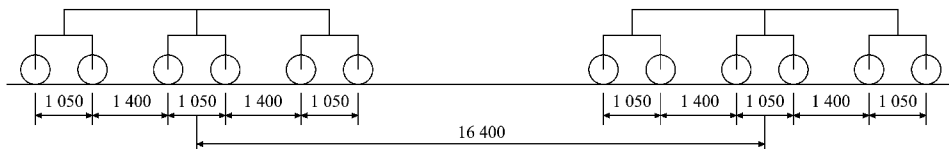


图 1 自动化双悬臂轨道吊轮系布置 (单位: mm)

Fig. 1 Layout of automated double cantilever rail-mounted crane wheel system (unit: mm)

1.3 钢格栅参数

钢格栅加筋土为一个高模量的整体, 可以大幅减少荷载作用下由于土体的离散性而产生的侧向水平位移。格栅约束层网孔具有相同形状, 使土颗粒夹紧在其网格内, 并且通过行车机械咬合作用产生相互有效应力传递, 可阻止荷载压实引起局部位移变形, 且依靠格栅的刚度、抗拉强度及网孔嵌锁三者相互作用可使地基具有整体性, 并使上下层之间土颗粒抗剪强度增强。在本文工程中采用的钢格栅由 70# 以上、直径 (3.0 ± 0.1) mm 的合金弹簧钢丝构成, 其纵横向有效抗拉强度不小于 180 kN/m, 节点抗剪力不小于 2 kN (节点不得脱焊), 表面采用水性漆与石英纤维丝涂料进行防腐, 格栅宽度大于 2 m, 整体长大于 200 m。

钢丝格栅各横幅之间采用搭接, 横幅搭接宽度不应小于 0.3 m。格栅长幅方向原则上应根据堆场尺度, 整幅铺设, 如果格栅长幅方向确实需要搭接, 搭接宽度不小于 2.0 m。

2 数值模型建立

根据工程的勘察报告及相关资料, 基于罗泾港区堆场中心区地段典型剖面的三维模型, 建立数值模型。

在三维地质模型基础上, 进行网格剖分。为了计算模拟的准确性与真实性, 在浅层土层等显著影响区域进行网格加密, 选取单元长度为 0.5 m。而在次要影响区域, 随深度单元长度变大。堆场中心区有限元模型见图 2。条基 1~5 采用相同参数,

按照工程实际情况建立, 以探究场地不同位置处差异沉降情况。

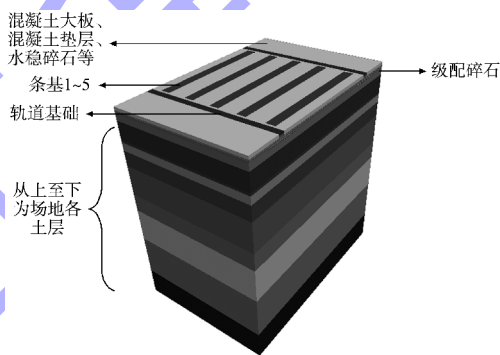


图 2 堆场中心区有限元数值模型

Fig. 2 Finite element numerical model of storage yard central area

对土层及构筑物进行分组并赋予不同的材料参数, 土的参数按表 1 进行赋值, 其中土层模量采用变形模量。堆场区域其余各结构部分的材料参数见表 2。

表 2 堆场结构材料参数

Tab. 2 Structural material parameters of storage yard

结构	重力密度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
条基	25	32.0	0.2
轨道	25	32.0	0.2
混凝土大板	24	25.5	0.2
混凝土垫层	22	1.0	0.2

将轨道吊轮压荷载等效为车轮区域内均布荷载 200 kPa, 将箱角荷载等效为条基上均布荷载 175.8 kPa。荷载分布见图 3。

模型底部边界设置为固定边界, 约束各个方向的位移, 在左右与前后边界均约束其法向位移。

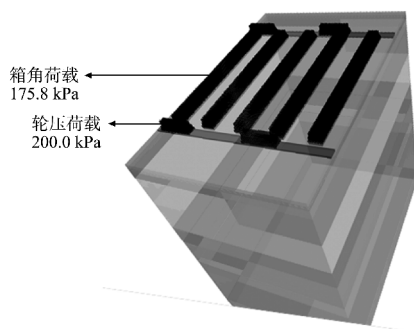


图3 堆场中心区荷载分布

Fig. 3 Load distribution of storage yard central area

3 结果分析与讨论

3.1 垫层材料对差异沉降的影响

由于钢格栅与碎石填料颗粒之间存在显著的嵌锁效应和摩擦效应,通过设置钢格栅加筋碎石垫层,地基刚度得到明显增强并形成一个刚度较大的硬壳层,从而实现有效控制侧向变形和减小差异沉降的目的。碎石垫层材料可采用再生石、级配碎石或道砟,不同材料单价不同,影响工程费用,因此有必要研究不同垫层材料对堆场差异沉降的影响,为选取经济合理的材料提供依据。本文通过数值模拟研究不同垫层材料对差异沉降的影响,模型中场地内布置4层格栅见图4,垫层材料及其参数取值见表3。

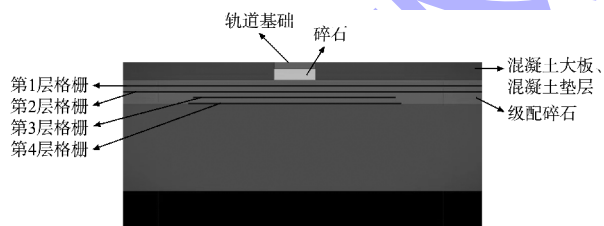


图4 四层钢丝格栅布置方式

Fig. 4 Four-layer steel wire geogrid layout form

表3 垫层材料参数

Tab. 3 Cushion material parameters

垫层材料种类	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
再生石	50	0.25	0	40
级配碎石1	80	0.25	0	40
级配碎石2	110	0.25	0	40
道砟	140	0.25	0	40

垫层材料及其参数对场地总沉降的影响见图5。可以看出,随着材料弹性模量增大,在无格栅以及有4层格栅条件下场地总沉降整体呈下降趋势,但对总沉降数值大小的影响并不明显,对场地总沉降值起决定性作用的还是在下方的主要压缩土层。

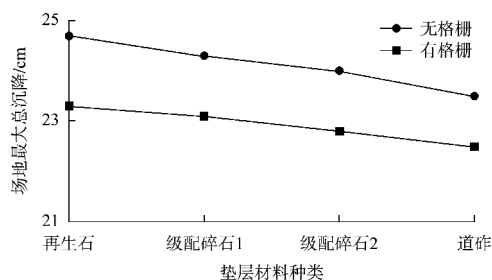
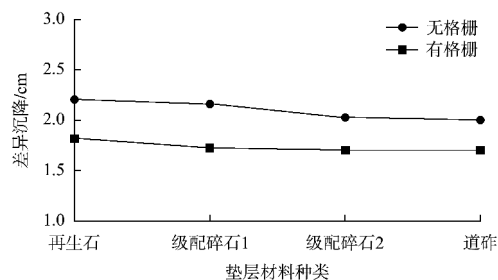


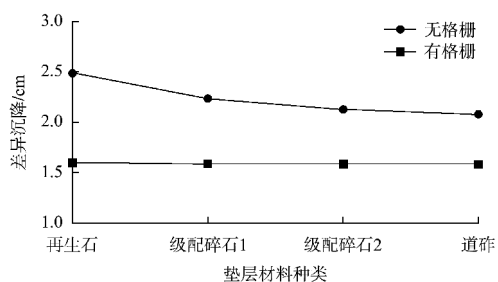
图5 不同垫层材料下场地最大沉降值变化

Fig. 5 Variation of maximum settlement values of site under different cushion materials

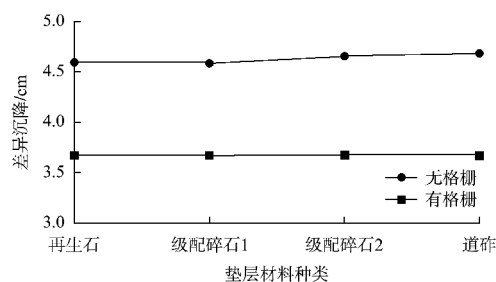
垫层材料对条基与轨道差异沉降的影响见图6、7,与无格栅情况相比,各垫层材料下钢格栅加固后差异沉降的降幅见表4。可以看出,无钢格栅加固条件下,条基差异沉降随着垫层材料弹性模量的增加而增加;在有钢格栅加固条件下,垫层材料弹性模量的变化对条基的差异沉降数值影响不大。无钢格栅加固下,轨道差异沉降随着垫层材料弹性模量的增加而减小;在有钢格栅加固情况下,轨道的差异沉降数值受垫层材料弹性模量的变化影响同样不大。因此综合考虑经济效益与钢格栅加固效果,推荐选取弹性模量80 MPa的级配碎石。



a) 上侧轨道差异沉降变化



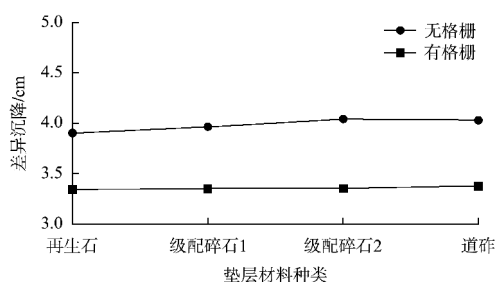
b) 下侧轨道差异沉降变化



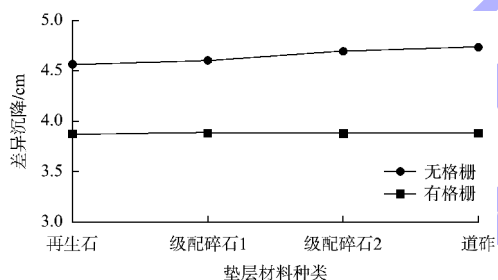
c) 条基3

图 6 轨道在不同垫层材料下差异沉降变化

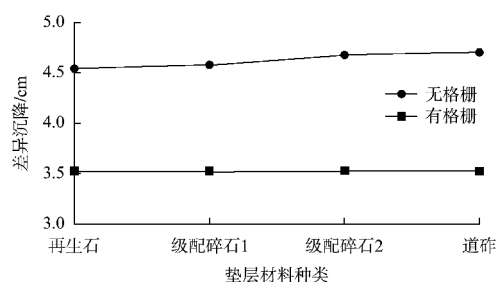
Fig. 6 Differential settlement variation of rail tracks under different cushion materials



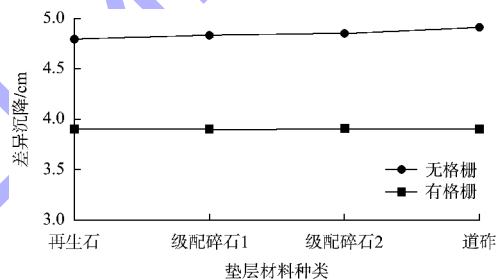
a) 条基1



b) 条基2



d) 条基4



e) 条基5

图 7 条基在不同垫层材料下差异沉降变化

Fig. 7 Differential settlement variation of strip foundations under different cushion materials

表 4 不同垫层材料加钢格栅后差异沉降的降幅

Tab. 4 Reduction percentage of differential settlement with steel geogrid-reinforced cushion materials

垫层材料	差异沉降降幅/%						
	上侧轨道	下侧轨道	条基 1	条基 2	条基 3	条基 4	条基 5
再生石	17.12	35.44	14.49	15.18	19.89	22.23	18.58
级配碎石 1	20.37	29.02	15.43	15.81	19.84	23.01	19.12
级配碎石 2	15.77	25.14	17.25	17.44	21.10	24.46	19.47
道砟	14.91	23.79	16.29	18.11	21.49	24.82	20.56

3.2 格栅层数对差异沉降的影响

在堆场中心区地基加固工程中, 钢格栅铺设层数的减少或增加对上部结构的沉降变形有一定影响, 此外钢格栅的铺设层数同样影响着工程造价, 本文对铺设不同层数时对条基与轨道差异沉降进行研究分析, 在模型中, 垫层材料取弹性模

量 80 MPa 的级配碎石 1, 将加筋情况分别设置为无格栅、1 层格栅、2 层格栅、3 层格栅以及 4 层格栅。4 层格栅布置方式见图 4。其中, 前两层格栅布置在整个土层, 而后两层格栅仅布置在轨道下方局部位置。与无格栅的情况相比, 不同钢格栅层数导致堆场中心区差异沉降的降幅见表 5。可

以看出,随着钢格栅设置层数的增加,格栅的加筋作用越来越明显,条基与轨道基础的差异沉降逐渐降低,在加筋层数达到第 2 层时,差异沉降

已有了非常显著地降低,随着加筋层数的再增加,差异沉降仍有降低但趋势略显缓慢,综合考虑钢格栅效果和经济性,推荐使用两层钢格栅进行加固。

表 5 不同格栅层数导致堆场各部位的差异沉降降幅

Tab. 5 Percentage reduction of differential settlement in various storage yard zones with different geogrid layers

格栅形式	差异沉降降幅/%						
	上侧轨道	下侧轨道	条基 1	条基 2	条基 3	条基 4	条基 5
1 层格栅	16.30	14.39	28.40	31.36	28.71	27.79	16.94
2 层格栅	31.88	31.44	44.80	45.40	43.39	41.26	31.71
3 层格栅	36.23	34.09	45.50	48.05	44.54	43.59	33.15
4 层格栅	37.68	35.61	47.97	48.99	45.58	44.09	33.87

4 结论

1) 本文结合钢格栅加筋土提出的堆场基础-地基一体化刚度增强技术,即通过钢格栅加筋碎石垫层提升基础-地基的整体刚度,可以有效调整场地的差异沉降。

2) 垫层材料对总沉降的影响有限。随着垫层材料弹性模量的增大,场地总沉降呈下降趋势,但降幅较小。垫层材料对无钢格栅加固时的差异沉降值影响较为明显,对有钢格栅加固时的差异沉降值影响较小。综合考虑加格栅后的差异沉降控制效果与材料成本,弹性模量为 80 MPa 的级配碎石是最优选择,其加筋后条基和轨道差异沉降的降幅可达到 15%~29.02%,且材料成本较为经济。

3) 钢格栅层数的增加可有效减小条基与轨道的差异沉降。当铺设层数达到 2 层时,差异沉降的降幅显著(最大降幅达 31%~45.4%),继续增加层数虽能进一步降低沉降,但效果趋于平缓。基于经济性与工程效益的平衡,推荐采用 2 层钢格栅加固方案。

参考文献:

[1] DEMIR A, LAMAN M, YILDIZ A, et al. Large scale field tests on geogrid-reinforced granular fill underlain by clay soil[J]. Geotextiles and geomembranes, 2013, 38: 1-15.

[2] 周健,孔祥利,王孝存. 加筋地基承载力特性及破坏模式的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1265-1269.

ZHOU J, KONG X L, WANG X C. Bearing capacity behaviours and failure modes of reinforced grounds[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2008, 30(9): 1265-1269.

[3] 陈建峰,梅森,冯守中. 双向土工格栅加筋碎石桩单轴压缩试验[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 311-316.

CHEN J F, MEI S, FENG S Z. Uniaxial compression tests of biaxial geogrid-encased stone columns[J]. Journal of engineering geology, 2019, 27(2): 311-316.

[4] 黄敏,郭胜. 市政道路工程软土地基沉降处理设计分析[J]. 四川水泥, 2018(10): 36.

HUANG M, GUO S. Design analysis of soft soil foundation settlement treatment for municipal road engineering[J]. Sichuan cement, 2018(10): 36.

[5] 彭久东. 市政道路工程软土地基沉降处理设计分析[J]. 工程技术研究, 2017(7): 222, 225.

PENG J D. Design analysis of soft soil foundation settlement treatment for municipal road engineering[J]. Engineering and technological research, 2017(7): 222, 225.

[6] 罗滔,陈鹏,邱焕峰,等. 土工格栅与填料相互作用研究进展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(S1): 111-115.

LUO T, CHEN P, QIU H F, et al. A review on the interaction between geogrid and backfill[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2020, 53(S1): 111-115.

[7] 刘小丽. 土工格栅加筋优化技术在公路路基加宽施工中的应用[J]. 交通世界, 2018(17): 100-101.

LIU X L. Application of geogrid reinforcement optimization technology in highway subgrade widening construction[J]. Transpo world, 2018(17): 100-101.