

自然级配碎石土换填法处理软土地基工法

吴方华¹, 李大钊¹, 闫红民²

(1. 连云港市市政工程有限公司, 江苏连云港 222000; 2. 连云港市规划市政设计研究院, 江苏连云港 222000)

摘要: 该文总结了连云港市道路工程中软基处理近 20 年的理论探研和工程施工实践所形成的施工工法, 并结合工程实例分析了该工法的经济效益和社会效益。

关键词: 自然级配碎石土; 软土处理; 换填厚度; 回弹模量; 质量要求; 碾压

中图分类号: U416.212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2006)06-0109-05

1 概述

(1) 海滨城市连云港市, 市区东部为中元古界形成的鲁南山脉的余脉前云台山, 除此以外, 市区内地质多为第四纪海相软土沉积, 属黄海海积平原, 地质沉积了较深厚的海相淤泥和淤泥质软土, 其表层则被受风化、淋滤作用所形成的硬壳层所覆盖, 连云港新浦区的浅层土主要有 4 个土层, 勘察资料表明从上至下依次是:

a. 杂填土, 厚 0 ~ 1.2 m, 呈不连续分布, 主要由粘土、少量碎石及生活垃圾、植物根系组成。

b. 粘土层, 该层即为“硬壳层”, 为高压缩性土, 黄灰色, 土质均匀, 饱和, 软 - 硬塑, 厚 1.5 ~ 2.0 m, 天然含水量 40% ~ 50%, 孔隙比为 1.16 左右, 承载力标准值约 75 kPa。

c. 淤泥层, 灰青色, 流塑, 厚 6 ~ 9 m, 天然含水量 55% ~ 74%, 孔隙比约 1.5 ~ 2.1, 承载力标准值约为 40 kPa, 属于典型的软土层。

d. 粘土层, 灰绿色, 饱和硬塑, 厚 4.8 ~ 5.2 m, 承载力标准值约 180 kPa。

(2) 道路设计中需要考虑路面的结构强度、刚度、水稳定性和热稳定性等主要性能。连云港市区水平地带大都处于软土地基上, 这种复杂的地质条件给城市道路的设计和施工提出了很高的要求, 除要求下层路基形成刚度较大的板体结构, 还要求路面结构组合达到一定的总厚度。因此采用的软基处理方法是否正确合理, 直接关系到工程的造价甚至工程的成败。

(3) 软土处理通常有搅拌桩、排水固结、挤密和换土等 4 类方法。搅拌桩法主要包括粉喷桩、水泥浆搅拌桩等。就连云港市来说, 在道桥等市政工程中多用粉喷桩, 如桥头路堤为控制沉降采用粉

喷桩, 并且是在路堤高度为 2.5 ~ 5 m 条件下采用。在城市道路中处理软土很少采用搅拌桩法, 这主要是因为该法工程费用较高。排水固结法主要为塑料排水板结合堆载预压, 以排除地下水位加速地基土固结。排水固结法主要解决路基沉降, 同时可以提高地基强度, 对软粘土地基的处理, 排水固结法是最经济合理的, 但由于城市道路工程多有工期紧的特点, 同时施工空间有限, 缺乏堆载的条件, 所以城市道路软土的处理很少采用排水固结法。连云港市新浦区的地质多为饱和软粘土地质, 土的渗透性小, 挤密法加固不易将土挤密实, 还会破坏土的结构强度, 所以连云港市在城市道路建设中一直未采用挤密法加固软土地基。

(4) 20 世纪 80 年代至今, 尤其是近 10 年来, 连云港市在城市道路建设中基本上是采用自然级配碎石土浅层换填的换土法处理软土地基。实践证明, 以这种工法处理路基的一百多公里的城市道路非常成功, 其中盐河路、潮阳路、苍梧路、海宁路等等, 先后获得国家、省、市优质工程奖项。

2 自然级配碎石土进行浅层换填的特点

(1) 自然级配碎石土换填法处理软土地基, 能充分利用当地开采自然级配碎石中产生的大量碎石土废料, 保护生态环境的同时, 促进了地方经济建设。

(2) 施工技术虽然有一定的难度, 但是比较易与掌握, 实际施工操作中可结合本地区施工机具和设备情况, 合理安排施工组织, 能显著降低工程造价, 缩短工期, 提高施工效率, 对施工环境没有特殊的要求。

(3) 连云港市目前自然级配碎石土的换填厚度一般在 80 ~ 110 cm, 最小厚度不低于 60 cm, 否则效果很差, 施工难度很大, 稍不注意容易出现“弹簧”现象; 最大换填厚度不宜超过 120 cm, 不然, 土基中的“硬壳层”全部被破坏, 增加施工难度, 效果却不明显, 更不经济。

收稿日期: 2006-09-04

作者简介: 吴方华(1969-), 男, 江苏灌云人, 高级工程师, 国家注册一级建造师, 主要从事市政工程和建筑工程项目施工管理工作。

(4)根据连云港市地质情况及已施工的道路情况,自然级配碎石土垫层一般置于粘土“硬壳土”之上,换填之后,土基中的“硬壳层”厚度约为 40~80 cm。

(5)城市道路的功能及特点决定了路基的形式为路堑式,这样的路面结构传给土基的荷载较小,自然级配碎石土换填法能满足土基强度要求,压实成形后顶面的回弹模量在 100 MPa,满足设计要求。路面工后沉降一般在 5~20 cm 范围内,小于国家规定的不大于 30 cm 的要求。

3 实用范围

适用于城市道路工程,土层为渗透性小的饱和软粘土地质、淤泥、淤泥质土、素填土、杂填土的软土地基以及暗塘等的浅层地基处理。

4 工艺原理

(1)自然级配碎石土换填法处理软土地基,就是将基础底面下一定范围内不适宜作承载层的软弱土层挖除,换填以无侵蚀性的压缩性较低的自然级配碎石土,经过分层碾压至要求的密度为止,使其满足上部结构对地基强度和稳定性的要求。路基的强度与稳定性,是保证路面强度与稳定性的基本条件,提高路基的强度与稳定性,就可以减少路面厚度,降低路面造价。

(2)现行路面设计是以回弹模量为土基的强度指数,土基回弹模量必须达到某一最小值后,才可以采用弹性理论进行路面结构设计。

(3)按现行《城市道路设计规范》(CJJ 37-1990)“路槽底面土基回弹模量值宜大于或等于 20 MPa,特殊情况下不得小于 15 MPa,不能满足此要求时应采取措施提高土基强度”,“不能进行碾压的湿软土基,又无晾晒、换土或其他加固与稳定处理条件时,可用砂、砂砾、碎石、矿渣等材料设置承托层,作为上层的施工依托,其厚度宜采用 15~30 cm”。而连云港市的土基属于典型的软土,土基回弹模量仅为 3 MPa 左右,不能满足弹性理论计算条件。工程实践中,经多次实验段试验,路槽开挖后,铺筑 30 cm 自然级配碎石土,挖掘机碾压 3 遍(起初采用 15 t 压路机碾压均出现了“弹簧”现象),采用标准承载板测定方法测算出土基回弹模量值在 20 MPa 前后,土基回弹模量取值为 $E_n=18.5$ MPa,满足了弹性理论计算条件,可以用相应的公式进行路面结构计算。也就是说,110 cm 厚山场碎石土垫层,路面结构理论计算时简化分解为两部分,下部 30 cm 自然级配碎石土用于改善土基,土基回弹模量值提高到 18.5

MPa,其余 80 cm 自然级配碎石土为结构层材料的有效计算厚度,提高垫层的强度。

5 工艺流程和操作要点

5.1 工艺流程

自然级配碎石土换填法施工工艺流程见图 1。

5.2 操作要点

5.2.1 施工准备

(1)材料、施工机具的准备。应根据工程量、施工进度、施工计划、施工条件及筑路材料合理选择满足施工要求的施工机具。

(2)技术准备。a.审核图纸和设计说明;b.施工组织设计经审批批复,并作好施工技术及安全交底;c.恢复中线,做好导线、中线及水准点的复测工作。根据设计文件和图纸,对中线及其各点的高程和横断面进行测量;对路基设计(横断面设计图和路基设计计算表)进行复核;对设计路线各线形要素用中桩和边桩进行现场标志;确定取土、弃土具体位置桩,为保证路基边坡的压实度,路基两侧设计边线外各加宽 0.5m 作为挖土、填筑边线。

(3)试验路段。a.开工前,需要时,选择试验路段进行填筑压实试验,确定压实方法设备类型及组合工序,确定最佳方案指导全线施工;b.至少在开工前 28 d 完成试验段的压实试验;c.试验段的位置由监理工程师现场选定,长度为不小于 200 m 的全幅路基为宜。

5.2.2 施工阶段划分

自然级配碎石土换填法处理软土地基采取流水作业,施工阶段划分为,挖土区段,填筑区段,平整区段,碾压区段,检测区段。

(1)挖土区段,路堑挖土应为全断面开挖,从上而下一次成形。注意按设计要求准确放样,不断检查校正,边坡表面削齐拍平,挖、装、运、卸基本作业密切配合。开挖前,应充分作好排水设施,设置截水沟以排除路堑上方边坡地表水对边坡坡面的冲刷。在基槽开挖中,需尽可能减少对土基的扰动,同时做好路槽内的排水工作,它不仅有利于保持土基的强度,而且对施工中防止出现“弹簧”现象也很有作用。路堑挖方完成后,对路基表层土进行土工试验。

(2)填筑区段,采用机械施工,分层填筑。自卸车运输至作业面,有专人指挥卸车,根据载重量及松铺厚度确定卸车距。填筑区段基底不能满足填筑要求时,应进行基底清理,基底软弱可采取抛石挤淤、铺设竹筋处理措施等。

a.填筑区段,目前连云港经验施工分层为,第

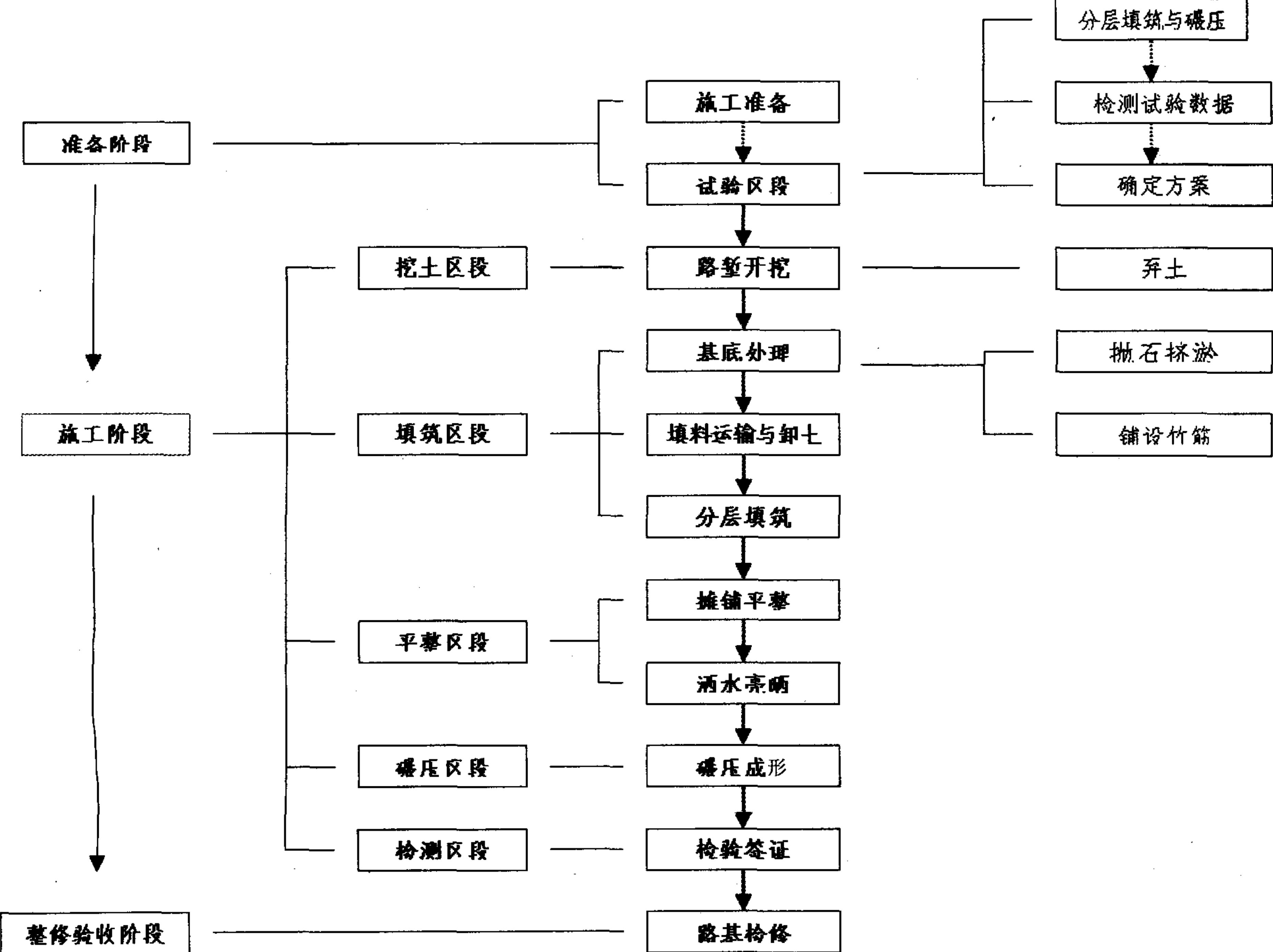


图 1 自然级配碎石土换填法施工工艺图

一层 60 cm 左右,然后为 15 ~ 30 cm 一层,松铺系数为 1.2 ~ 1.3。第一层施工铺筑时,把自然级配碎石土中的较大的块石,用挖掘机整合大面朝下平铺一层,然后形成自然级配填筑。

b.碾压区摊铺完成的碎石土表面应平整无明显的大块料露头,表面无孔洞、孔隙,无多余的填石料堆放。开始碾压时应用 12t 或者 18t 压路机由两侧路肩逐渐错轮向路中心进行,稳压 3 ~ 4 遍,使用碎石稳定就位。在第一遍碾压后,应再次找平,稳压后,表面应平整,并具备要求的路拱和纵坡。

c.稳压后再用 25 t 振动压路机、18 t 钢轮压路机慢速碾压,将全部填缝料振入粗碎石间的孔隙中。碾压时直线段由两边向中间,小半径曲线由内侧向外侧纵向进退式进行。横向接头对于振动压路机一般重叠 0.4 ~ 0.5 m,对于三轮压路机一般重叠后轮宽的 1/2;前后相邻区段纵向应重叠 1.0 ~ 1.5,达到无漏压、无死角,确保碾压均匀。路面两侧应多压 2 ~ 3 遍,直至达到设计弯沉值,城市主干道一般为 $L < 240(1/100\text{ mm})$ 。

d.在路基施工范围内遇到原地基为淤泥时,

根据淤泥量的大小,一般采用挖除换填或抛石挤淤的方法处理。抛石挤淤应按图纸或监理工程师的要求采用符合要求的片石,从路基中部向两侧对称抛填,抛填压实至最后两遍石面下沉不超过 20 mm 时,在其上填筑山场碎石土。

e.挖后基础较软弱,或者粘土层厚度小于 40 cm 时,铺设双层竹筋,再填筑自然级配的碎石土。竹筋为竹片交织组合而成,铺设时每层相互连接密排,上下两层组合搭接,横向为 20 cm,纵向为 75 cm。基础软弱时,竹筋上抛填大面向下的块石,然后分层填筑。

(3)检测区段。成品检测的方法分感官检测和顶面弯沉测量。当 18 t 压路机碾压后无松动、无波浪、无弹簧、没有任何蠕动现象,无明显轮迹(轮迹小于 5 mm),可判断为密实状态,否则应重新碾压。合格后经有关方面签认,方可进行下一层填筑施工。由于自然级配碎石土粒径较大,不便现场取样,所以控制质量,验收碎石土垫层时,不测量其压实度指标,而是测量弯沉值。碾压成型后的路基通过顶弯沉值测试其是否达设计要求,现场实测弯沉代表值应小于或等于理论实测弯沉值。

6 材料

自然级配碎石土,采用地产材料,要求碎石、粗砂含量大于 70%,成自然级配状态,且压实后呈密实结构,碎石不得含有严重风化变质颗粒式腐植质较多的山土。表层填料粒径不大于 20 cm,中间层自然级配,下层最大粒径不大于层厚度的 0.7 倍。

竹筋,规格为 40 cm×150 cm,竹片交织组合而成,双层铺设。材质为新鲜成竹劈开的长 150 cm,宽 4~5 cm 竹片编织,不得霉变、腐朽,保持新鲜成竹片的强度和韧性。

7 机具设备

(1)机具设备

- 土方机械:挖掘机、装载机
- 运输机械:自卸卡车
- 压实机械:12 t 或 18 t 压路机、25 t 振动压路机
- 其他:洒水车
- 测量和检验实验设备:全站仪或经纬仪、水准仪、平整度检验仪、弯沉检测仪等。

(2)2000 年改建的城市交通干道连云港市苍梧东路,全长 2.685 km,规划红线 60 m 宽三板块结构,机动车道宽 23 m。采用山场碎石土换填法处理软土地基,其中桩号 1+320~1+840 段长 520 m,换填厚度平均为 100 cm,挖方 12 200 m³,回填自然级配碎石土 12 500 m³。在正常施工条件下,该施工段的施工机械设备配备见表 1。

表 1 施工机械设备配置表

施工工序	名称	规格	数量
施工准备	潜水泵	2~4 寸	2
测量放线	全站仪		1
	水准仪		1
挖运土方	履带式单斗挖掘机 1 m ³		2
	自卸汽车 10 t		6
填筑山场碎石土	自卸汽车 10 t		6
	装载机	2L-400	2
	光轮压路机	3Y-10	1
	光轮压路机	3Y-18/21A	1
	振动压路机	CA25	1
	洒水车 4 000 L		1
检测	平整度检验仪		1
	弯沉检测仪		1
	弯沉检测载重车		1

8 劳动组织及安全

8.1 劳动组织

仍以上例 520 m 长道路工程为例,劳动组织

配备见表 2。

表 2 劳动组织配备表

人员(人)	数量
项目经理	1
测量人员	2
施工技术员	1
压路机操作人员	5
洒水车	1
运输机械操作人员	13
辅助工人	10
安全人员	1
弯沉检测	3

8.2 安全

(1)施工现场必须做好交通安全工作,设专人指挥车辆、机械。交通繁忙的路口应设立标志,并有专人指挥。夜间施工,路口及基准桩附近应设置警示灯或反光标志,专人管理灯光照明。

(2)现场操作人员必须按规定佩带防护用具,施工机械设备应有专人负责保养、维修和看管,确保安全生产。施工现场的电线、电缆应尽量放置在不车辆、人、畜通行的部位。各种机械操作手、电工必须持证上岗,同时加强对司机、电工的教育,严格遵守各专用设备使用规定和操作规程。

(3)施工前做好施工安全交底,施工过程中,安全员随时检查安全情况。

9 质量要求

(1)填筑山场碎石土前,下承层即土基的平整度必须符合规范要求;

(2)《公路土工试验规程》要求 0~30 cm 路堑的路基填方材料最大粒径 10 cm。实际施工操作中表层最大粒径按 20 cm 控制,过小不现实;中间层按自然级配控制;

(3)下层最大粒径按规范要求不大于层厚的 0.7 倍控制。换填深度内有地下水,应采取临时排水措施,降低到换填基底面 0.5 m 以下,防止受水浸泡,地基被扰动;

(4)垫层的碾压夯实遍数应通过试验确定,并以此作为控制施工的依据。振动碾压过程中,12 t、18t 压路机为 6~8 遍,25 t 振动压实机为 5 遍,碾压速度一般控制在 1~2 km/h;

(5)碾压过程中,如粒料过干,应适当洒水。碾压合格后经有关方面签认,方可进行下一层填筑施工。碾压成型后的路基通过顶弯沉值测试其是否达设计要求,现场实测弯沉代表值应小于或等于理论实测弯沉值;

(6)城市主干道湾沉值不小于 240(1/100 mm)。根据实践经验,山场碎石土填筑碾压后,抗压回弹

模量不小于为 100 MPa。

10 效益分析

10.1 经济效益

以 2000 年改建的城市交通干道连云港市苍梧东路为例,全长 2.685 km,规划红线 60 m,机动车道宽23 m,采用山场碎石土换填法处理软土地基,其中,桩号 1+320 ~ 1+840 段长 520 m,换填厚度平均为 100 cm,挖土 12 200 m³,回填山场碎石土12 500 m³,造价为 53.0 万元。

如前文所述,粉喷桩多用于道桥等市政工程中,如桥头路堤,为控制其沉降采用粉喷桩,并且是在路堤高度为 2.5 ~ 5 m 条件下采用。在城市道路中处理软土很少采用搅拌桩法,主要因为造价高。对于520 m × 24 m 路基,如若采用水泥粉喷桩,设计桩长应该穿透淤泥层,这里取 10 m,桩径一般设计50 cm,桩距 1.4 m,造价为 222.8 万元。

即使采用其他粉喷桩如粉煤灰或碎石挤密桩为软基础处理法,造价至少也需要 167.5 万元,而自然级配碎石土换填法工期最短,造价最省。

方案一:自然级配碎石土换土法。

挖运土 12 200 m³,填筑山场碎石 12 500 m³,总造价为 53.0 万元,合理配置人工、机械,正常施工条件下,工期约为 30 d。

挖运土造价:

$12200 \times (42.58 + 107.09) = 15.0(\text{万元})$

填筑碎石土造价:

$12500 \times 30 = 37.5(\text{万元})$

方案二:采用水泥粉喷桩软基础处理法。

粉喷桩 6 360 m,总造价为 159.16 万元,合理配置人工、机械,正常施工条件下,工期 4 为月。

粉喷桩造价:

$(24 \div 1.4) \times (520 \div 1.4) \times 10 \times 35 = 222.8(\text{万元})$

方案三:采用其他粉煤灰或者碎石挤密桩软基础处理法。

桩长 6 360 m,总造价为 100.50 万元,合理配置人工、机械,正常施工条件下,工期为 4 个月。

粉煤灰或者碎石挤密桩造价:

$(24 \div 1.4) \times (520 \div 1.4) \times 10 \times 25 = 167.5(\text{万元})$

经上述造价分析,仅仅从造价计算和工期比较,自然级配碎石土换填法工期提前 3 个月,节省造价分别为 169.8 万元和 114 万元。

10.2 社会效益

本工法既充分利用开采山场碎石中产生的大量废料碎石土,减少了大量堆砌、废置的各种费用,又能与当地经济技术的发展水平相适应,促进地方经济的发展,解决连云港市类型的软土地基处理问题。按连云港市十几年建设 120 km 的城市道路计算,比较粉喷桩软基础方法,产生直接效益 39 000 万元;比较其他粉煤灰或者碎石挤密桩软基础处理法,产生直接效益 26 000 万元。

11 应用实例

1982 ~ 1992 年,连云港市主要次干道路面总厚度一般要求在 70 cm 以上,自然级配碎石土垫层厚度在 40 ~ 50 cm,当时没有实测弯沉值等硬性指标要求,仅有观感要求,这样条件下建成的城市道路,经几年的使用后观察发现,破损严重,分析认为山场碎石土进行浅层换填厚度不够,路基强度不足。例如 1980 年以后修建的解放路、海连路、新虚路,破损严重,几经修补。

1992 ~ 1994 年,经进一步试验研究和理论研究,确立了换填厚度不小于 60 cm。1995 年以后修建的城市道路,一般换填厚度范围为 80 ~ 110 cm。又经过十几年的观察研究,使用情况良好,沉降量符合设计要求,基本没发现破损情况。例如,1995 年修建的朝阳路、1996 年改建的海连东路、1999 年改建的解放路、2001 年新建的郁洲北路、2000 年改建的苍梧路、2003 年建设的学院路、振兴南路,2004 ~ 2005 年新建的海宁西路、海宁中路、海宁东路,见表 3。

表 3 工程应用实例表

工程项目名称	朝阳路	海连东路	苍梧东路	海宁大道
项目建设地点	连云港市市区	连云港市市区	连云港市市区	连云港市市区
项目工期	1a	1a	1a	2a
规格	城市主干道 规划红线宽 50 m,机动车道宽 24m	城市主干道 规划红线宽 45 m,机动车道宽 24m	城市主干道 规划红线宽 60 m,机动车道宽 23m	城市主干道 规划红线宽 60 m,机动车道宽 24 m
换填部位	机动车道慢车道	机动车道慢车道	机动车道慢车道	机动车道慢车道
自然级配碎石换填厚度(m)	80 ~ 130	80	80 ~ 110	80 ~ 110
工程量(km ³)	32 300	23 300	56 000	160 000
理论实测弯沉值(1/100mm)	机动车道 255	机动车道 235	机动车道 250	机动车道 270
现场实测弯沉代表值(1/100mm)	机动车道 220	机动车道 229	机动车道 240	机动车道 250