

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.03.055

# 早强型半柔性灌浆料研究

陈松强<sup>1,2</sup>, 杨国宝<sup>2</sup>, 徐立<sup>2</sup>, 王金昌<sup>1,3</sup>

(1.浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310000; 2.浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000;  
3.浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 半柔性复合混凝土由于其兼具沥青和水泥路面的优点,被应用于交叉口、长大纵坡等路段中。但是由于半柔性灌浆材料硬化达到要求强度需要较长的时间,因此,需要开发早强型半柔性灌浆料。选用42.5普通硅酸盐水泥(下称普通水泥)、细砂、矿粉、膨胀剂及外掺剂,采用正交试验确定满足要求半柔性灌浆料配比。而后采用快硬水泥替代普通水泥,通过研究确定替代比例为0.15~0.2时,4 h后的半柔性灌浆材料性能能够满足要求。

**关键词:** 半柔性灌浆料;正交试验;合理配比;早强

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2023)03-0217-05

## 0 引言

半柔性复合混凝土以其良好的高低温性能、抗水损坏性能,而广泛应用于公交车站、大型停车场、收费站和急转弯等易发生车辙的地方。半柔性复合混凝土应用最早是在1954年法国科涅雅克(Cognac)航空港喷气式飞机用的跑道上,作为机场耐热用的道面,称为“Salviacim”施工法,当时称为半柔性路面,法国公司并用这个方法申请了专利<sup>[1]</sup>。半柔性复合混凝土应用最广的是在日本,并且日本以“半柔性路面结构及施工方法”为名申请了专利,并提出了半柔性灌浆料的要求,见表1,同时日本在其道路规范中加入该种路面结构形式,就此复合混凝土在日本得到广泛的应用,并提出了路面结构计算方法<sup>[2]</sup>。紧接着在上世纪70年代初,美、英、前苏联等国相继开始了这一课题的研究。来自英国的学者则是把含有树脂成分的水泥砂浆加入到有沥青及碎石构成的路面上<sup>[3-4]</sup>。科威特学者H.R.Guirguis利用水泥材料的优点弥补了沥青材料的不足,使得路面的性能得到了优化<sup>[5]</sup>。20世纪末到21世纪初期,美国开始研究灌注水泥胶浆的沥青混凝土材料,并在路面工程和机场道面得到大量的应用,取得了优良的效果<sup>[6-7]</sup>。

我国开展复合混凝土研究较晚,在20世纪70年代才曾尝试将沥青-水泥砂浆用于人防工程中的渗漏建筑物内部粉刷材料。最早是由同济大学<sup>[8]</sup>

表1 水泥砂浆性能指标

| 指标   | 范围        | 备注      |
|------|-----------|---------|
| 流动度  | 8~14 s    |         |
| 抗压强度 | 10~30 MPa | 7 d 养生  |
| 抗折强度 | ≥2.0 MPa  |         |
| 抗压强度 | 20~50 MPa | 28 d 养生 |
| 抗折强度 | ≥4.0 MPa  |         |

开展的关于复合混凝土的研究,分别以灌浆法、拌和法两种手段进行试验,成型了特殊沥青混凝土,对其进行了物理、力学试验,并将研究成果应用于工程实际中,在第二年的路况调查结果发现,路用性能良好。后来哈尔滨工业大学<sup>[9-10]</sup>、长安大学<sup>[11-12]</sup>、重庆交通大学<sup>[13-14]</sup>、长沙理工大学<sup>[15]</sup>等高校对复合混凝土开展了研究。重庆交通大学和交通部公路科学研究院合作撰写有关于复合混凝土路面结构设计及施工的著作<sup>[16]</sup>。

因此,本课题利用正交试验方法建立18组半柔性灌浆料分析试验,通过数据分析确定半柔性灌浆料的配比,之后采用快硬水泥部分替代普通水泥的方法提高半柔性灌浆料的凝结时间,通过分析确定快硬水泥的替代量。

## 1 原材料

普通硅酸盐水泥采用杭州钱江水泥厂生产的P.O42.5,快硬水泥采用无锡金鹰公司生成的快硬水泥,检测结果见表2、表3。矿粉技术指标和细砂的级配见表4、表5。另外选用UEA膨胀剂、聚羧酸减水剂和絮凝剂作为灌浆料的外加剂。

收稿日期: 2022-06-08

作者简介: 陈松强(1992—),男,博士,讲师,从事道路工程研究工作。

表 2 P.O42.5 水泥技术指标

| 指标      | 比表<br>面积 /<br>(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) | 初凝<br>时间 /<br>min | 终凝<br>时间 /<br>min | 抗压强度 /MPa |      | 抗折强度 /MPa |      |
|---------|---------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------|------|-----------|------|
|         |                                                   |                   |                   | 7 d       | 28 d | 7 d       | 28 d |
| P.O42.5 | 310                                               | 240               | 380               | 35.9      | 45.3 | 5.82      | 6.67 |

表 3 快硬水泥技术指标

| 指标 | 比表面积 /<br>(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ) | 初凝时间 /<br>min | 终凝时间 /<br>min | 抗压强度 /MPa |      |
|----|-----------------------------------------------|---------------|---------------|-----------|------|
|    |                                               |               |               | 1 d       | 3 d  |
| 金鹰 | 350                                           | 7             | 15            | 30        | 42.5 |

表 4 矿粉技术指标

| 技术指标 | 含水率 /% | 外观    | 亲水系数 /% |
|------|--------|-------|---------|
| 检测结果 | 0.23   | 无团结颗粒 | 0.46    |

表 5 所选细砂技术筛孔通过率

| 筛孔尺寸  | 筛孔通过率 /% |      |
|-------|----------|------|
|       | 技术要求     | 检测结果 |
| 1.18  | 100      | 100  |
| 0.6   | ≥95      | 97   |
| 0.075 | ≤2       | 1.1  |

2 半柔性灌浆料配比试验方案

已有的研究成果表明,用于灌注半柔性路面材料的素水泥砂浆的最佳水胶比宜小于 0.55,矿粉含量一般小于 20%,砂含量一般在 15%~30%之间<sup>[17]</sup>。但因为材料来源的不同,需要重新适配。通过室内试验适配,确定半柔性灌浆料的正交因素见表 6,正交试验方案见表 7。

表 6 正交因素表

| 编号 | 水灰比  | 矿粉   | 砂胶比  | 膨胀剂  | 减水剂   | 速凝剂   |
|----|------|------|------|------|-------|-------|
| 1  | 0.45 | 0.1  | 0.15 | 0    | 0     | 0     |
| 2  | 0.47 | 0.15 | 0.2  | 0.04 | 0.001 | 0.005 |
| 3  | 0.49 | 0.2  | 0.25 | 0.08 | 0.002 | 0.01  |

3 半柔性灌浆料试验结果及分析

通过试验测试,各种配比情况下的水泥灌浆料流动度及 7 d、28 d 的抗压抗折强度见表 8。极差分析见表 9。从极差分析可以看出,水灰比、矿粉、膨胀剂、减水剂及速凝剂等对流动度影响显著,砂胶比对流动度的影响很小。在抗折抗压强度方面,水灰比是影响强度的主要因素,矿粉影响试件的早期强度,膨胀剂对试件的抗压强度的影响较大。

4 水泥灌浆料合理配合比范围确定

基于综合平衡分析法,本试验根据各因素对不同指标的影响程度,以影响较大的为主要指标,影响

表 7 正交试验方案

| 编号 | 水灰比  | 矿粉   | 砂胶比  | 膨胀剂  | 减水剂   | 速凝剂   |
|----|------|------|------|------|-------|-------|
| 1  | 0.45 | 0.10 | 0.15 | 0    | 0     | 0     |
| 2  | 0.47 | 0.15 | 0.20 | 0.04 | 0.001 | 0.005 |
| 3  | 0.49 | 0.20 | 0.25 | 0.08 | 0.002 | 0.010 |
| 4  | 0.45 | 0.10 | 0.20 | 0.04 | 0.002 | 0.010 |
| 5  | 0.47 | 0.15 | 0.25 | 0.08 | 0     | 0     |
| 6  | 0.49 | 0.20 | 0.15 | 0    | 0.001 | 0.005 |
| 7  | 0.45 | 0.15 | 0.15 | 0.08 | 0.001 | 0.010 |
| 8  | 0.47 | 0.20 | 0.20 | 0    | 0.002 | 0     |
| 9  | 0.49 | 0.10 | 0.25 | 0.04 | 0     | 0.005 |
| 10 | 0.45 | 0.20 | 0.25 | 0.04 | 0.001 | 0     |
| 11 | 0.47 | 0.10 | 0.15 | 0.08 | 0.002 | 0.005 |
| 12 | 0.49 | 0.15 | 0.20 | 0    | 0     | 0.010 |
| 13 | 0.45 | 0.15 | 0.25 | 0    | 0.002 | 0.005 |
| 14 | 0.47 | 0.20 | 0.15 | 0.04 | 0     | 0.010 |
| 15 | 0.49 | 0.10 | 0.20 | 0.08 | 0.001 | 0     |
| 16 | 0.45 | 0.20 | 0.20 | 0.08 | 0     | 0.005 |
| 17 | 0.47 | 0.10 | 0.25 | 0    | 0.001 | 0.010 |
| 18 | 0.49 | 0.15 | 0.15 | 0.04 | 0.002 | 0     |

表 8 水泥浆正交试验结果

| 编号 | 流动度 /s | 抗折强度 /MPa |      | 抗压强度 /MPa |      |
|----|--------|-----------|------|-----------|------|
|    |        | 7 d       | 28 d | 7 d       | 28 d |
| 1  | 16.8   | 4.3       | 5.1  | 12.5      | 24.2 |
| 2  | 12.1   | 3.9       | 3.8  | 12.1      | 21.4 |
| 3  | 11.3   | 3.1       | 4.2  | 8.5       | 22.0 |
| 4  | 13.1   | 4.1       | 7.0  | 15.6      | 28.1 |
| 5  | 63.5   | 3.4       | 4.5  | 10.8      | 24.9 |
| 6  | 11.2   | 2.0       | 4.2  | 6.9       | 15.9 |
| 7  | 37.4   | 2.5       | 5.4  | 11.8      | 21.3 |
| 8  | 11.3   | 2.9       | 3.4  | 8.3       | 13.8 |
| 9  | 22.4   | 3.3       | 3.5  | 13.2      | 18.9 |
| 10 | 14.2   | 3.7       | 4.9  | 13.8      | 24.9 |
| 11 | 14.1   | 3.5       | 3.5  | 14.1      | 23.6 |
| 12 | 16.2   | 3.0       | 4.3  | 12.6      | 19.3 |
| 13 | 11.9   | 4.0       | 4.8  | 14.0      | 24.0 |
| 14 | 29.7   | 3.2       | 4.9  | 13.4      | 23.0 |
| 15 | 15.3   | 4.2       | 5.5  | 15.0      | 24.0 |
| 16 | 90.6   | 4.0       | 6.0  | 16.8      | 26.7 |
| 17 | 16.1   | 3.4       | 6.2  | 15.0      | 24.2 |
| 18 | 11.9   | 3.0       | 4.5  | 12.1      | 19.2 |

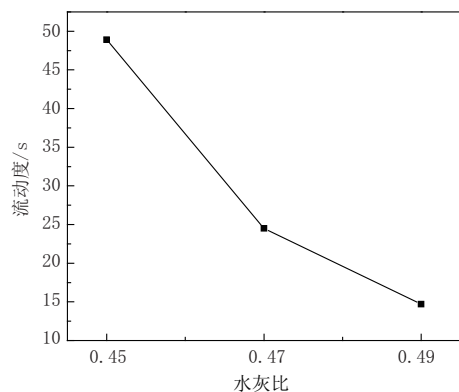
表 9 各因素影响水平极差分析

| 指标      | 水灰比  | 矿粉   | 砂胶比 | 膨胀剂  | 减水剂  | 速凝剂  |
|---------|------|------|-----|------|------|------|
| 流动度     | 18.8 | 17.5 | 2.2 | 25.0 | 25.3 | 19.1 |
| 7 d 抗折  | 2.3  | 2.2  | 2.9 | 1.9  | 1.3  | 0.8  |
| 28 d 抗折 | 3.5  | 1.3  | 1.6 | 1.2  | 1.9  | 3.3  |
| 7 d 抗压  | 2.7  | 3.0  | 1.9 | 2.6  | 0.8  | 1.9  |
| 28 d 抗压 | 3.5  | 1.8  | 1.7 | 2.9  | 0.5  | 1.1  |

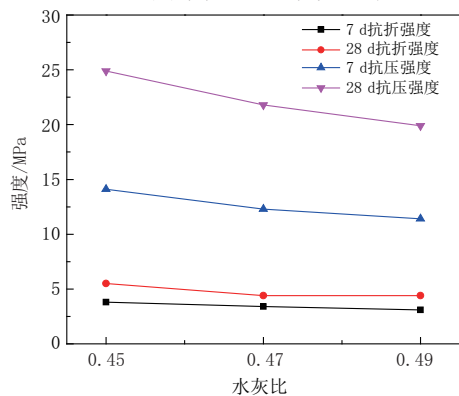
较小的为次要指标,综合分析各指标的最佳配合比范围。

(1)水灰比

由上文可知水胶比对流动度和强度的影响最显著,所以在确定水胶比的最佳范围时应以流动性和强度为主要技术指标。从图1可以看出,当水灰比为0.45、0.47和0.49时,平均流动度分别为48.9 s、24.5 s和14.7 s,7天的抗折抗压强度为3.8、3.4、3.1和14.1、12.1、11.4 MPa。当水灰比为0.49时,抗压强度已接近要求的最小值10 MPa。因此,水灰比应当控制在0.47~0.49间。



(a) 水灰比对流动度影响



(b) 水灰比对抗折抗压强度影响

图1 水灰比对灌浆料性能影响

## (2) 矿粉

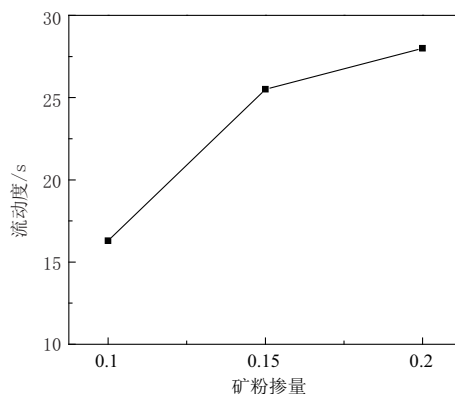
从图2可以看出,随着矿粉掺量增加,灌浆料的流动时间增加,抗压抗折强度不断降低。不过从抗压抗折强度看,满足灌浆料的性能要求。因此,可将矿粉掺量控制在0.1~0.15间。

## (3) 砂胶比

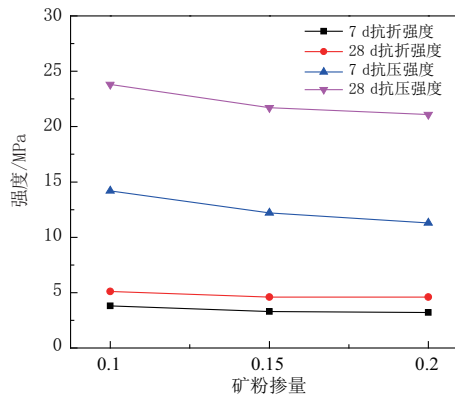
从图3可以看出,随着砂胶比的增加,灌浆料的流动时间逐渐增加,而抗压抗折强度在砂胶比为0.2时达到最大值。因此,可将砂胶比控制在0.2。

## (4) 膨胀剂

从图4可以看出,当膨胀剂掺量在0~0.04时,灌浆料的流动时间随掺量增加缓慢,当掺量大于0.04时,流动时间随掺量的增加而急剧增加;从图4(b)可以看出当膨胀剂的掺量为0.04时,抗折抗压

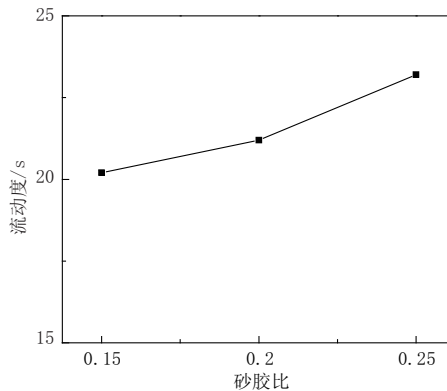


(a) 矿粉对流动度影响

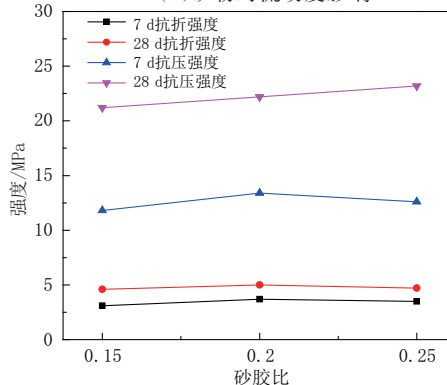


(b) 矿粉对抗折抗压强度影响

图2 矿粉对灌浆料性能影响



(a) 砂胶比对流动度影响

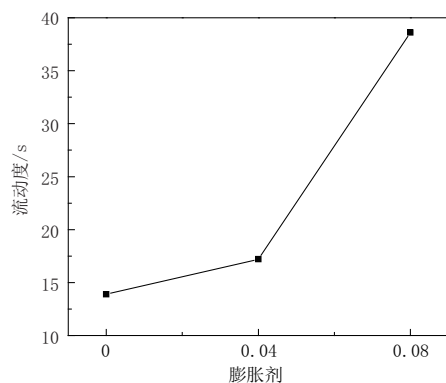


(b) 砂胶比对抗折抗压强度影响

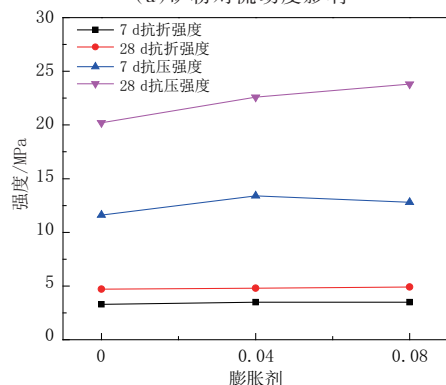
图3 砂胶比对灌浆料性能影响

强度达到最佳。因此,可将膨胀剂的掺量控制在0.04。

## (5) 减水剂



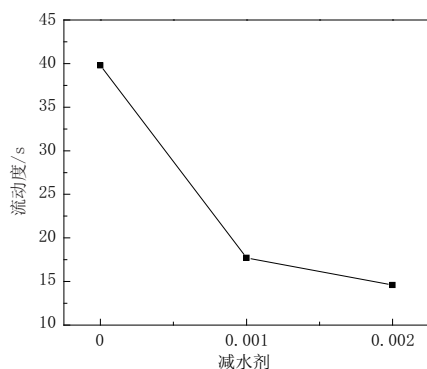
(a) 矿粉对流动度影响



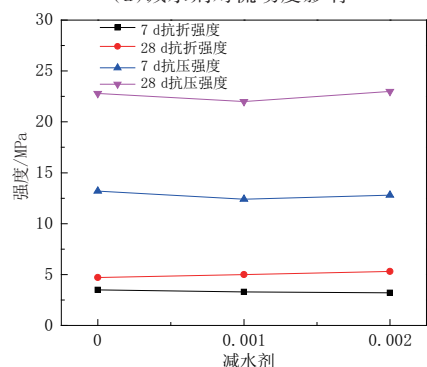
(b) 矿粉对抗折抗压强度影响

图4 膨胀剂对灌浆料性能影响

从图5可以看出,当灌浆料中掺入减水剂时,灌浆料的流动时间急剧减小,而当掺入0.002的减水剂时,灌浆料的流动时间缓慢减小,从抗压抗折强度看,随着减水剂的加入,强度不断减小。因此,可将减水剂掺量定为0.001。



(a) 减水剂对流动度影响

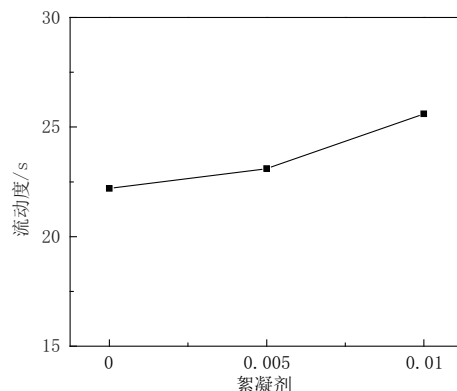


(b) 减水剂对抗折抗压强度影响

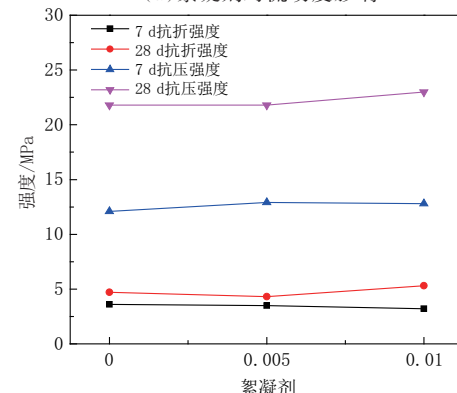
图5 减水剂对灌浆料性能影响

## (6) 絮凝剂

从图6可以看出,随着絮凝剂的加入,流动时间逐渐增加,从抗压抗折强度,絮凝剂对28 d的强度有一定的提升作用,而对7 d的强度,当掺量为0.005时,强度最大。因此,考虑将絮凝剂的掺量定为0.005。



(a) 絮凝剂对流动度影响



(b) 絮凝剂对抗折抗压强度影响

图6 絮凝剂对灌浆料性能影响

通过上述分析,推荐水泥灌浆料的配比为(水泥:矿粉):水灰比:砂胶比:膨胀剂:减水剂:絮凝剂=(0.85:0.15):0.45:0.2:0.04:0.001:0.005。

## 5 早强型灌浆料配比研究

在上一节半柔性灌浆料研究发现,即使掺加了絮凝剂,灌浆料需要养护24 h之后才能生成有效强度。对于城市道路加铺或者养护工程,路面继续快速铺筑通车,24 h的养护时间有点过长。按以往的经验,路面应当在4 h内完成铺筑通车。因此,采用快硬水泥替代部分水泥的方式,缩短灌浆料的凝结时间,以初始流动度、4 h的抗压抗折强度作为分析指标,确定快硬水泥的替代量。

通过试配,确定快硬水泥的替代量为0.1、0.15和0.2。测试结果见表10,从表中可以看出当快硬水泥掺量大于0.15时,灌浆料才能满足铺筑4 h后的通车需求,综合经济性考虑,可将灌浆料中快硬水



泥替代量的比例定为水泥掺量的0.15~0.2。

表 10 不同快硬水泥替代量灌浆料性能

| 快硬水泥替代量 | 流动度  | 4 h 抗折强度 /MPa | 4 h 抗压强度 /MPa |
|---------|------|---------------|---------------|
| 0.1     | 12.8 | 1.6           | 8.7           |
| 0.15    | 13.2 | 1.9           | 10.9          |
| 0.2     | 14.2 | 2.2           | 11.8          |

6 结 论

本课题首先通过正交试验确定满足性能要求的半柔性灌浆料配比，然后采用快硬水泥替代部分普通水泥的方法来提高灌浆料的凝结时间，具体结论如下：

(1)水灰比、矿粉、膨胀剂、减水剂及速凝剂显著影响半柔性灌浆料的流动度，而砂胶比对流动度的影响很小，水灰比是影响强度的主要因素，矿粉影响试件的早期强度，膨胀剂对试件的抗压强度的影响较大。

(2)通过数据分析，确定半柔性灌浆料的配比为（水泥：矿粉）：水灰比：砂胶比：膨胀剂：减水剂：絮凝剂=（0.85：0.15）：0.45：0.2：0.04：0.001：0.005。

(3)采用快硬水泥部分替代普通水泥，确定能够满足4h强度要求的快硬水泥替代量为0.15~0.2。

参考文献：

[1] 吕豹译.法国新型路面标准结构手册[M].北京:人民交通出版社,1987.

[2] 建设省中国技术事务所. 半たわみ性コンボツツ舗装の開発[J].道路建设,1992,531(4):52-60.

[3] Schmidt R J,Santucci L E,Conge L D,et al.Performance characteristics of cement-modified asphalt emulsion mixes [J].In:Association of

Asphalt Paving Technologists,1973,300-319.

[4] Guirguis H R,Daoud E K,Hamdani S K.Asphalt concrete mixture with cement-coated aggregates[J].In:Transportation Research Record No843,Washington D C,Transportation Research Board of the National Academies,1982,80-85.

[5] Guirgeis H R,Daoud E K,Hamdani S K.Asphalt Concrete Mixture Made With Cement-Coated Aggregates[Z].1982,TRR 843:80-85.

[6] WU S P,CONG P L,YU J Y.Experimental investigation of related properties of asphalt binders containing various flame retardants[J].Fuel,2006,85(9): 1298-1304.

[7] Monismith C I,Tayebali A A.Pavement deformation considerations in Asphalt Concrete Pavement sections[J].Association of Asphalt Paving Technologists,1988,57:414-446.

[8] 正素勤,林绣贤,楼海祥.新型路面的复合材料——特种沥青混合料的研究[J].华东公路,1989(2):76-81.

[9] 谭积青,张肖宁,张太平.半柔性铺装技术浅析[J].广东公路交通,2000(2):7-9.

[10] 潘大林,张肖宁,王树森.半柔性路面水泥胶浆的配制研究[J].中南公路工程,2000(2):6-7,9.

[11] 程磊,郝培文.基于体积法的半柔性路面母体沥青混合料设计方法[J].长安大学学报(自然科学版),2002(1):1-3.

[12] 程磊.半柔性路面用混合料性能及其设计方法研究[D].西安:长安大学,2002.

[13] 凌天清.半柔性路面材料的微观结构分析及强度理论[A]//中国公路学会.第四届国际道路和机场路面技术大会论文集[C]//中国公路学会,2002.

[14] 李常贵.半柔性路面混合料设计方法[J].重庆交通学院学报,2003(S1):42-48.

[15] 王伟鹏.半柔性复合路面材料与结构研究[D].长沙:长沙理工大学,2012.

[16] 吴国雄.半柔性复合路面设计与施工[M].北京:人民交通出版社,2009.

[17] 成志强,孔繁盛,贾蓉蓉.半柔性路面水泥基灌浆材料泌水性能研究[J].中外公路,2016,36(4):276-279.

(上接第 192 页)

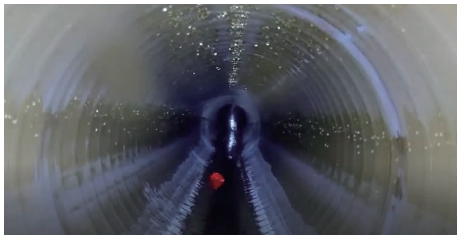


图 6 修复后管道

业,对原管道清理要求低,即使管道内有部分水流也可施工。

(2)机械制螺旋缠绕法非开挖修复技术不影响过流能力。内衬管道材质防腐性能强、摩阻系数小,

不仅提高了过流能力,且对过流能力长期运行更有保障。

(3)机械制螺旋缠绕法非开挖修复技术施工简单迅速。对于不同直径的管道,缠绕速度1~5 min/m,适用作业空间受限区域,遇突发情况可随时切断型材终止施工,恢复路面交通,因此对类似工程具有借鉴指导意义。

参考文献：

[1] CJJ/T 210—2014,城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程[S].

[2] 王刚,王卓.机械式螺旋缠绕管道非开挖带水修复技术应用案例[J].中国给水排水,2018,34(6):3.