

湿陷性黄土水泥石挤密桩地基加固施工技术研究

李松猛

中铁十五局集团第五工程有限公司

摘要：湿陷性黄土在我国广泛分布，它在饱和吸水后在自重或者附加荷载作用下则容易出现明显的湿陷性，强度大大降低，导致高速公路路基出现沉降破坏。以澄韦高速公路CWGS-1标工程为研究对象，对水泥石挤密桩的施工方

关键词：湿陷性黄土；水泥石挤密桩；澄韦高速；复合地基

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.20.024

一、引言

湿陷性黄土为非饱和的欠压密土，具有较大的孔隙率和偏低的干密度，其产生湿陷的主要原因是受到水的侵蚀，加上一定的压力使整个土层结构被破坏，产生严重的下沉，进而对公路路基形成安全隐患^[1-2]。

湿陷性黄土地基处理方法多种多样，其均可以在设计范围内完全或部分消除地基的湿陷性，水泥石挤密桩是一种加固基床成为一种复合地基的施工工艺^[3]，主要特点是桩身水泥石经过充分拌和与充分夯实，均匀程度和密实度远高于相同水泥掺入量的水泥搅拌桩，桩身强度也是水泥石搅拌桩的2~10倍，通过侧摩阻力和桩端阻力将桩顶荷载传递给周围土体，其作用机理主要为成孔时的挤密作用和对上部荷载的分担作用^[4]。

本文以陕西省澄县境内的澄韦高速公路路基部分段落的湿陷性黄土处理为背景，从水泥石挤密桩的工艺合理性，施工效果验证等方面进行了详细的介绍和总结，为类似的工程施工提供相关的经验。

二、工程概况

(一) 工程简介

澄韦高速公路CWGS-1标工程位于陕西省渭南市澄城县境内，起点桩号K0+839.252，终点桩号K19+000，主线全长18.161km，填方路基填土高度大于4m，施工范围内土质为湿陷性黄土，等级为III、IV级，土质条件差，设计在桥涵洞两侧、涵洞基底及强夯受限部位采用水泥石挤密桩处理地基。

(二) 工程地质

工程地处黄土台塬区，地势平坦开阔，第四系全新统耕植土 (Q_4^{pd})，厚度0~0.5m，分布在地表；第四系上更新统风积 (Q_3^{eol}) 马兰黄土，灰黄色，II级普通土， $[f_{ao}] = 150kPa$ ；第四系上更新统残积 (Q_3^{eol}) 古土

壤：棕红色，硬塑，II级普通土， $[f_{ao}] = 180kPa$ ；第四系中更新统风积 (Q_2^{eol}) 离石黄土：褐黄色，硬塑，II级普通土，湿陷性离石黄土 $[f_{ao}] = 200kPa$ ，非湿陷性离石黄土 $[f_{ao}] = 220kPa$ ，黄土具自重IV级（很严重）湿陷性，湿陷深度19.6~24.1m，地表水不发育，未见地下水，场地稳定性较好。

(三) 设计概况

水泥石挤密桩设计桩径40cm，路基宽度范围桩长6m，其余5m，桩间距1m，等边三角形布置。

水泥石桩水泥剂量5%。其上铺筑40cm4%水泥石垫层，水泥石桩体压实度不应小于93%（重型击实标准），水泥石垫层压实度不小于95%（重型击实标准）。采用沉管法成孔，施工顺序为从两侧向中间，隔排隔桩跳打。水泥石桩分层回填、夯实，向孔内填料前，应对孔底进行夯实，夯击次数不小于8击，夯锤直径应小于30cm。

三、施工方案

由于挤密桩重锤夯填的施工工艺较为老套，人工配合工序多，夯填材料损耗高，质量控制难度大，施工进度慢，还会加大项目的施工成本。为避免发生使用重锤增加成本的情况，经研究规范，深度挖掘，在保证施工质量的前提下，大胆创新、敢于尝试，对施工工艺及设备进行改进，在不违反技术规范及地方性施工指南的前提下，将重锤更改为夹杆锤。

(一) 施工流程

水泥石挤密桩施工工艺流程见图3。

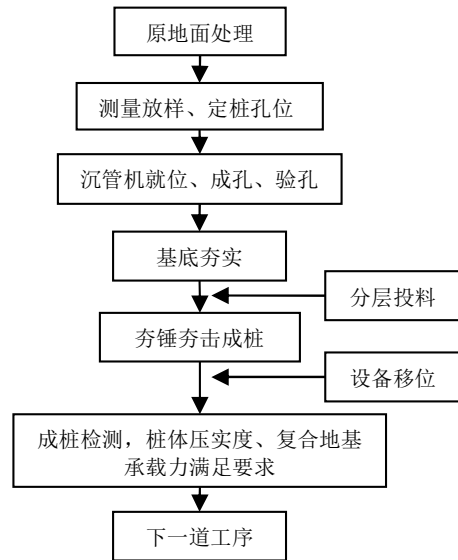


图3 水泥石挤密桩施工工艺

(二) 原地面处理

测量现场原地面高程，装载机进行清表，确保无树根、腐殖土、杂物，清表后使用装载机进行场地平整，然后用压路机进行碾压，对于场地内的个别小坑洼，先用素土回填压实，以便沉管机行走及夯击施工。

(三) 测量放样

根据从两侧向中间、隔排隔桩跳打施工的设计要求，绘制布桩图，采用全站仪放样每排两端控制桩位，钢尺量测中间桩位，桩心间距1.0米，等边三角形布置。

(四) 成孔

根据设计桩长，施工前在沉管上用红油漆标出控制深度的标记，钢管下端作成60° 角度锥形活动尖桩，桩长应满足设计要求。

沉管机就位后，使沉管尖对准桩位，调平机架，使钢管保持垂直，用线锤吊线的方法检查沉管的垂直度，偏差不大于1.5%H。

沉管机将与桩孔同直径的钢管打入土中并拔管成孔。

桩孔完成后，立即检查孔位、孔径、孔深，桩孔间距的偏差不超过桩距设计值的5%，桩孔垂直度偏差不宜大于1.5%h，桩孔中心点偏差不超过桩中心间距的5%，桩长、桩径不小于设计值。

(五) 水泥土拌和

采用水泥土拌合机拌制，拌合机将土料进行过筛，确保土料粒径不大于15mm。提前闷料土料，备足每日施工所需材料，确保拌合料性质的基本一致，施工前，试验人员检测拌合料含水率、水泥剂量，符合要求后方可进行施工。水泥土拌合料外观颜色均匀、无灰团，水泥土拌制根据每天施工任务分次拌制，已拌成的水泥土存放时间不得超过3小时，被雨水淋湿、浸泡的水泥土严禁使用。

(六) 夯填水泥土

水泥土桩分层回填、夯实，桩孔回填夯实前，对孔

底进行夯实，夯击次数8击，根据确定的分层回填厚度和夯击次数逐层填料夯实，施工时安排专人记录。回填夯实应连续施工，每个桩孔分层回填夯实，不得停顿过久或隔日施工，以免降低桩的施工质量。

四、试验段施工

(一) 试桩方案

水泥土挤密桩试验段施工里程为K8+641~K8+651.4，线中线左侧2.5m~12.5m范围，长度10.4m，宽度10m，面积104m²，桩长6.0m/根，共计137根。

夯实机型号为BSJ-10型，锤重261.0kg，底面成圆弧，锤径22cm，固定落距80cm。

试桩前，在拌合料平仓情况下，开启送料开关，匀速运转5s后，再连续送料5s拌合料重量为90.5kg，即每1s送料重量为18.1kg；松铺厚度h（cm）=每秒送料重量（kg）×秒数÷拌合料堆积密度（kg/m³）÷孔面积（m²）×100，现场实测拌合料堆积密度1180kg/m³，经计算每下料1秒拌合料的松铺厚度为12.2cm。

履带式锤击沉管机成孔速度1孔/2min（包括机械就位、沉管对中、沉管、拔管）。数据统计采用称重法、计数法、计时法。

试桩方案（一）：拟定1-1、1-2、1-3、1-4四根桩采用BSJ-10型夯实机，每层填料时间为2s，夯击次数分别为8次、9次、10次、11次，松铺厚度： $h_1=12.2 \times 2=24.4\text{cm}$ 。

试桩方案（二）：拟定2-1、2-2、2-3、2-4四根桩，每层填料时间为3s，夯击次数分别为11次、13次、14次、15次，松铺厚度： $h_2=12.2 \times 3=36.6\text{cm}$ 。

采用环刀法检测桩体压实质量、桩间土挤密系数。及时抽检孔内填料的压实质量，抽检频率应为总孔数的2%，且每个台班不应少于1孔。自桩顶向下0.5m起，宜每1m取2个土样测定干密度，计算本层填料的压实度平均值，计算出全桩桩长（5层）的平均压实度，取样点的位置应在距离孔心2/3孔半径处。压实度与松铺厚度、夯击次数关系见表1。每成桩1m功效对比见表2。

表1 试桩桩体压实度统计表

击实次数	8	9	10	11	13	14	15	平均含水率/%
桩号	1-1	1-2	1-3	1-4	-	-	-	13.7
松铺厚度24.4cm（压实度）	90.6	92.9	94.1	94.7	-	-	-	
桩号	-	-	-	2-1	2-2	2-3	2-4	13.7
松铺厚度36.6cm（压实度）	-	-	-	90.2	92.6	93.8	94.3	

表2 试验桩每成桩1.0m压实度统计表

击实次数	8	9	10	11	13	14	15
桩号	1-1	1-2	1-3	1-4	-	-	-
松铺厚度24.4cm (压实度)	96	124	137	158	-	-	-
桩号	-	-	-	2-1	2-2	2-3	2-4
松铺厚度36.6cm (压实度)	-	-	-	69	81	89	101

由上述数据对比可知，在保证压实度合格的情况下，含水率在最佳含水率±2%范围时，增加合适的松铺厚度及夯击次数，施工功效提升较为明显，填料3s夯击15击较填料2s夯击10击，施工功效提高26.3%，经过比选，确定BSJ-10型夯实机每层填料3s，松铺厚度36.6cm，松铺系数=36.6÷600（桩长）×26（层）=1.58，每层夯击15次，理论成桩功效101×6.0/60=10.1min/根，实际功效10.6min/根（每根考虑30s的机械就位、夯锤对中耗时）。

(二) 试验结果

桩体压实度均大于93%，满足设计要求，桩间土平均挤密系数为0.828、0.802、0.810，原状土挤密系数平均值0.703，水泥土挤密桩施工后桩间土密实度提高17.8%，挤密效果显著。

对试验段挤密桩进行静载荷、桩间土挤密系数试验检测，静载荷试验3处，挖探井3处，特征值取250kpa，检测结果均满足要求。见表3、表4。

表3 单桩复合静载荷试验结果

试验点编号	最大加载力/kPa	最大沉降量/mm	特征值取值/kPa	检测结果
N2-58	500	11.35	250	满足要求
M2-65	500	12.55	250	满足要求
N2-74	500	11.73	250	满足要求

表4 桩间土挤密系数试验结果

桩号	平均干密度/g/cm ³	最大干密度/g/cm ³	平均挤密系数
1#	1.60	1.87	0.85
1#1/2	1.55	1.87	0.81
2#	1.59	1.87	0.85
2#1/2	1.54	1.87	0.82
3#	1.57	1.87	0.84
3#1/2	1.52	1.87	0.82

取样位置：1#距桩边横向10cm位置取样，1#1/2为两桩横向中间位置取样，每个位置按深度1~5m每间隔1m取1个样。

五、施工提升效果

根据现场需要，每台沉管机需要配备两台重锤夯填，重锤夯击提升高度由人工控制，每次提升的高度相

对误差大不易控制，引发夯填机具的不稳定，造成设计孔径为40cm的挤密桩，成孔普遍在46cm-50cm。增大了夯填材料的损耗率，使其施工的扩孔系数加大、成型偏差，造成“葫芦”形。

通过现场调整机械组合，为解决该类问题，将重锤与夹杆锤相结合，将锤头更换为0.2t夹杆锤锤头，并改装动力设备，提升夯击动能行程为自动控制，每台成孔机可配备3台夯机，夹杆锤夯机可自动填充材料，通过对比优势明显，首先是减少人工投入，提高功效，其人工费较重锤每米减少1元，人工成本得到节约。其次扩孔系数得到了有效控制，施工成孔直径约为42cm，施工材料损耗率比重锤施工材料损耗率低约30%，材料费（主材水泥）得到大幅节约，经过验证，实际施工效果满足各项检测指标。

在实际施工中，可以根据现场及实际情况通过使用夹杆锤改进传统的重锤工艺，提高施工效率，大幅节约人工和材料成本。

结语

通过水泥土挤密桩试验段的施工分析，验证了所采用的施工方案、施工工艺、施工参数的可行性。水泥土挤密桩能够有效的消除地基黄土的湿陷性，桩体压实度满足设计要求，桩间土平均挤密系数为0.828、0.802、0.810，原状土挤密系数平均值0.703，水泥土挤密桩施工后桩间土密实度提高17.8%，使复合地基的承载力得到大幅度的提高。

参考文献

[1]赵志强. 水泥土挤密桩在湿陷性黄土地基处理中的应用研究[J]. 建筑技术开发, 2018, 45(4): 121-122.
 [2]刘好正. 挤密桩复合地基在湿陷性黄土地基处理中的应用[J]. 铁道标准设计, 2010(10): 14-18.
 [3]刘民. 水泥土挤密桩处理湿陷性黄土地基的施工质量控制[J]. 佳木斯职业技术学报, 2018, (1): 480-481.
 [4]龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.