

文章编号:1006-2106(2006)05-0055-04

# 大运高速公路湿陷性黄土路基设计和施工试验<sup>\*</sup>

孙爱斌 吴连海<sup>\*\*</sup>

(铁道第三勘察设计院, 天津 300251)

**摘要:**研究目的:针对山西省大运高速公路侯运段所经地区主要为湿陷性新黄土地基的特点,对该线路边坡及排水设计和湿陷性新黄土地基处理方法进行研究。

**研究方法:**根据该线侯运段的实际情况,结合国内外研究成果和国家现有规范,在分析该线地质、地形和水文条件,进行综合技术经济比较后,对路基边坡和排水进行个别设计,针对不同湿陷性程度的新黄土地基采用了机械碾压、重锤夯实、强夯等多种工程措施进行处理。

**研究结果:**得出了一套成功地设计经验和一系列有针对性的技术措施。

**研究结论:**经施工检验和通车运营后的验证,在该线湿陷性新黄土路基设计中采用的机械碾压、重锤夯实、强夯等多种处理措施是合理的、可行的。这些措施为今后该地区或相同类型的黄土地区进行路基设计和地基处理提供了可供借鉴的经验。

**关键词:**高速公路;湿陷性黄土;设计;施工;试验

**中图分类号:**U416.1 **文献标识码:**B

## Design and Construction Experiment of Collapsibility Loess Subgrade in Dayun Expressway

SUN Ai - bin, WU Lian - hai

(The Third Railway Survey & Design Institute, Tianjin 300251, China)

**Abstract: Research purposes:** On the basis of the fact that the ground condition of the area where Houma - Yuncheng section of Dayun expressway runs across in Shanxi province is mainly of collapsibility new loess, the paper researched the problems including the slope and drainage designs and the treatment methods for collapsibility new loess.

**Research methods:** According to the real situation of Houma - Yuncheng section and in combination with the research achievements at home and abroad and current state codes, the subgrade slope and drainage were designed specially based on the analysis of the geological, topographical and hydrological conditions and the integral comparisons of technology and economy. And the new loess subgrades with various collapsibility were treated using different measures, such as mechanical roller compaction, heavy tamping consolidation and dynamic compaction etc.

**Research results:** A set of successful design experience and a series of technical researches were presented.

**Research conclusions:** The results of construction experiment and traffic practice proved that the treatment methods used for the collapsibility new loess subgrade in this expressway were reasonable and feasible. Moreover, the treatment methods also provided valuable experience of subgrade design and treatment for this area or those with the same type of loess in future.

**Key words:** expressway; collapsibility loess; design; construction; experiment

大运高速公路侯运段起点为山西省侯马市,途经 闻喜县,终点为运城市,全长近 100 km。沿线所经地

<sup>\*</sup> 收稿日期:2006-05-26

<sup>\*\*</sup> 作者简介:孙爱斌,1974年出生,男,工程师;吴连海,1962年出生,男,教授级高级工程师,现任铁道第三勘察设计院地路处副总工程师。

区除汾河两岸阶地范围外,其它地段基本为黄土地区,且具有不同程度的湿陷性。湿陷性黄土除具有黄土的一般特性外,同时具备湿陷性,湿陷性黄土对路基的危害较多,易产生路基下沉、边坡冲蚀、坍塌、路基变形等危害。本文对该线湿陷性黄土的边坡设计、防排水设计及地基的处理方法及效果作一些分析和介绍。

## 1 地基情况

本路段所经过的黄土地区,普遍分布第四系全新统冲积的( $Q_4^{al}$ )新黄土,孔隙比大,含水量大,承载力低,结构疏松,局部含有姜石、螺壳,几乎全部具有湿陷性,而且局部发育有陷穴、暗沟、坍塌。通过对大运高速公路沿线勘探取样和试验并经计算确定,沿线所经地区为Ⅰ级(轻微)非自重湿陷性至Ⅳ级(很严重)自重湿陷性黄土场地,夹1~4层棕黄色至棕红色古土壤层及薄层卵砾石层、砂层,局部夹有少量块石。沿线湿陷性黄土层厚度不一致,一般为0~16.7 m,最大厚度达28.7 m。

沿线所经地区地下水,在勘探孔揭示深度内,以第四系孔隙潜水为主。一般高阶地地下水埋深为10~50 m左右。沿线历年年平均年总降水量为303.9~756.5 mm。

## 2 工程措施选择

### 2.1 设计原则

黄土地区的路基设计包括路堤、路堑边坡设计、排水设计和黄土地基处理。设计的前提是首先确认黄土的类型及湿陷程度,研究分析产生路基病害的原因,然后采取消除病害的相应措施。

#### 2.1.1 路堑设计

黄土路堑设计包括边坡形式、坡率的确定,边坡防护及加固措施的采用等内容。本段路线穿过重丘区,黄土崩众多。路堑边坡较高,最高处达43 m。为此,根据勘测期间对沿线路段的工程地质情况的分析和研究,采用工程地质法初步拟定断面形式,再采用圆弧法对路堑边坡稳定性进行验算。最后确定,对于沿线高度小于30 m的路堑边坡,参照现行规范进行常规设计,对超过30 m的边坡,采用边坡每10 m设一级平台,最下两级平台宽3.0 m,上部各级平台宽度为5 m的边坡形式,边坡坡率采用1:1。黄土路堑边坡如不进行防护,在地表水及地下水的影响下,常发生剥落、冲刷等坡面破坏或滑坍、崩坍及泥流等坡体破坏。因此根据边坡形式及高度,并考虑经济性,对于路堑边坡高度较矮的坡面,仅对边坡坡脚2 m高范围内进行防护,而对于边坡较高的坡面则采用浆砌片石护面墙重

型防护。

#### 2.1.2 路堤设计

本线沿线部分路段沟壑纵横,因而该线路堤设计的关键是高路堤的设计。黄土高路堤的首要病害是路堤工后下沉,其次是坡面冲刷及滑坍。本线沿线降水及气候较好,适当采用植物防护和圬工防护即可解决坡面防护问题。关键是路堤下沉问题。而黄土高路堤下沉的原因主要是上部荷载作用下以及受降水影响造成的路堤本身的压缩,天然地基压缩和地基湿陷变形。路堤的填筑高度对工后沉降有直接的关系,因而在设计中考虑了填土沉落,当路堤边坡高度大于20 m时,路基面宽度根据边坡高度分别预留加宽值,单侧加宽值为0.4~0.6 m。为了防止路堤滑坍和增强高路堤的整体稳定性,路堤边坡采用土工格栅加固,自下而上,每隔0.5 m铺设一层,水平方向铺设宽度为3.0 m。

新黄土可以通过严格控制压实度,来确保压实质量。而要解决天然地基的压缩性和湿陷性问题则应必须确认黄土的类型及湿陷程度,采取适宜的路基防排水和地基处理措施。

#### 2.1.3 防排水

水是黄土地区路基产生病害的主要外部原因,黄土地区路基必须配有良好的防排水工程。为此,在设计时,除按常规进行排水工程的设计以外,对较高路堑边坡平台加设了浆砌片石防护或是在平台上加设了排水沟,以便快速及时地排走坡面集水,减少地表水对路堑边坡的冲刷及下渗。

#### 2.1.4 地基处理

地基处理必须针对黄土地基的湿陷性采用合理有效的措施。为此,首先要对地基的处理范围和厚度作出合理的选择。而处理的范围和厚度一般要根据地基土的湿陷类型、湿陷等级和公路工程等级等具体情况来选定。地基处理措施一般采取消除或减少地基的全部湿陷量或部分湿陷量的处理方法。

根据《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ25—90)的规定,并参考《地基处理手册》中湿陷性黄土地基建筑物的设计措施认为,一般情况下,对于Ⅰ、Ⅱ级自重湿陷性黄土地基及Ⅲ级非自重湿陷性黄土地基,当地基需要消除部分湿陷量时,可采用对上部土层整片处理,整片处理的厚度在非自重湿陷性黄土地区可取1.5~2.0 m,在自重湿陷性黄土地区,取1.0~3.0 m,需部分或全部消除地基的湿陷性时,一般可以采取灰土垫层、重锤夯实、强夯等方法。在非自重湿陷性黄土地基上,对于Ⅰ级,一般不需要处理地基;对于Ⅱ级,处理厚度可为1.0~1.5 m;对于Ⅲ级,处理厚度应为1.5~2.0 m,才能起到防止湿陷危害的作用。在自重湿陷

性黄土地基上,对于Ⅰ级的处理厚度,应为1.0~1.5 m;对于Ⅱ级,应为1.5~2.0 m;对于Ⅲ级,应为2.0~3.0 m。

2.2 地基处理设计方案

根据本线全段工程地质报告中湿陷性的等级划分,设计时将该段详细地划分为多个湿陷性等级段落。设计中充分分析各段地基湿陷性,采取较强的排水工程处理措施,并综合考虑沿线各地的材料来源、交通运输状况、施工便利条件后,对沿线各路段分别采取以下不同的处理方案。

2.2.1 第1种情况

对于地面上方侧距坡脚30 m、地面下方侧距坡脚20 m范围内黄土地区的陷穴,采用开挖回填夯实或灌砂并夯实的方法处理。

2.2.2 第2种情况

对于一般黄土湿陷性地段地基,根据湿陷性的试验指标分别采取不同措施,并在大面积施工前开展试验性施工,以取得经验。

- (1) 当湿陷性系数 $\delta_s < 0.07$ 、湿陷等级为Ⅰ级自重至Ⅱ级自重时,采用重型压路机碾压;
- (2) 当湿陷性系数 $\delta_s \geq 0.07$ 、或湿陷等级为Ⅲ级时,采用重锤夯实消除湿陷性;
- (3) 杨家庄大桥大里程端K56+318.1~K56+601.1段湿陷等级为Ⅳ级,湿陷性黄土分布厚度11 m左右。且地表陷穴特别发育,故对该段采用了先将地表5 m厚范围内新黄土挖除,并对基底进行重锤夯实,合格后再从坑底逐层填筑至路基设计高度的设计方案。

3 施工试验

3.1 试验方案

3.1.1 机械碾压法

机械碾压法的压实效果主要取决于施工机械的种类、能量、碾压速度以及被压实地基土的含水量。因此,施工前应应对不同的路段进行试验。

为了确定达到增加地基密实度、减少或消除湿陷性、提高地基整体强度的最佳压实遍数,并研究利用机械碾压法来处理Ⅱ级自重湿陷性地段的可行性,开始路基施工前于2001年2月进行了机械碾压试验,利用25KJ冲击压实机对K75+600~K76+000段(湿陷性黄土厚度2.6~3.8 m)原地面进行了冲击碾压试验。分别进行了碾压6遍、10遍、20遍、30遍、40遍的试验,实测了不同碾压遍数的压实度、沉降量,并用N<sub>10</sub>轻型触探仪进行了贯入度检测。

在当月下旬利用50 t羊足碾在相同地基类型的万方数据

K86+900~K87+100段进行了碾压试验,分别进行了碾压4遍、6遍、8遍的试验,并测定了压实度、沉降量及贯入度检测。

3.1.2 重锤夯实法

重锤夯实质量效果与锤重、锤底直径、落距、夯击遍数、夯击土的种类和含水量等有密切关系,合理选择上述参数和控制含水量,才能达到较好的夯实效果。故进行重锤夯实之前应进行试夯。试夯的面积不宜小于10 m×10 m。夯锤形状宜采用圆台形,落距4~6 m,夯锤重量为2~3 t。锤底直径宜为1.2~1.4 m。通过现场试验,确定了符合夯击要求的最少夯击遍数、最后下沉量(指最后两击的平均下沉量,为1~2 cm)、总下沉量及有效夯实深度等有效数据。施工时夯击次数应比试夯时确定的最少夯击次数增加1~2击。现场路基施工时,一般采取夯击2~3遍,累计夯击次数为10~15击。施工的夯打方法是,第一遍宜一夯挨一夯地进行,第二遍应在前一遍的间隙点夯击,如此反复进行,最后两遍应一夯套半夯,当地面或基坑地面标高不同时,应按先深后浅的顺序(逐层)夯实,并对夯实质量进行了检测。

3.1.3 强夯法

杨家庄大桥大里程端K56+318.1~K56+601.1段Ⅳ级湿陷地段,对原设计处理措施进行了部分更改。采取了挖除地表3 m厚土层并对基底采用强夯的处理方案。强夯的动力为履带吊车,夯锤直径2.35 m,锤重15 t,落距15 m。经过试夯(结果见表1),施工方法定为每个夯点锤击5锤,梅花型的中心间距5 m。夯击完成后,将地基整平,适当补充水分后,用50 t的拖震碾压机碾压3遍,用25 kJ冲击压路机碾压10遍。

表1 试夯沉降量汇总表 (单位:cm)

| 夯击次数    | 1  | 2  | 3  | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  |
|---------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 夯点1 沉降量 | 51 | 78 | 95 | 108 | 120 | 129 | 138 | 147 | 155 | 163 | 169 | 177 | 185 |
| 夯点2 沉降量 | 50 | 78 | 94 | 109 | 120 | 130 | 135 | 145 | 156 | 160 | 165 | 172 | 180 |
| 夯点3 沉降量 | 53 | 77 | 94 | 108 | 122 | 131 | 140 | 150 | 158 | 166 |     |     |     |
| 夯点4 沉降量 | 47 | 72 | 93 | 107 | 118 | 128 | 137 | 144 | 152 | 163 |     |     |     |
| 夯点5 沉降量 | 47 | 68 | 88 | 100 | 112 |     |     |     |     |     |     |     |     |

3.2 施工质量检测方法

施工结束后,对重锤夯实处理地基的质量进行检验,方法如下:

- (1) 检查重锤夯实施工记录,基底表面的总下沉量不小于试夯总下沉量的90%。
- (2) 沿线路方向每隔50 m任选一点(且每处不能少于三点),自地面下2 m深度范围内每隔50~100 cm取原状土样测定湿陷性指标。检验后,如质量不合格,进行补夯至合格为止。

(3) 对于采用重型压路机碾压消除湿陷性的检测参照重锤夯实法,自地面下 1 m 深度范围内每隔 50 cm 取原状土样测定湿陷性指标。检验后,如质量不合格,进行补碾至合格为止。

3.3 试验检测结果

部分实测数据见表 2、表 3。

表 2 25 kJ 冲击压实机 N<sub>10</sub> 轻型触探仪贯入度检测

| 遍数      | 原地面 |       | 6 遍 |       | 10 遍 |       | 20 遍 |       | 30 遍 |       | 40 遍 |       |
|---------|-----|-------|-----|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
|         | 次数  | 深度/cm | 次数  | 深度/cm | 次数   | 深度/cm | 次数   | 深度/cm | 次数   | 深度/cm | 次数   | 深度/cm |
| 1#点检测数据 | 70  | 30    | 74  | 30    | 86   | 30    |      |       |      |       |      |       |
|         | 25  | 60    | 45  | 60    | 43   | 60    |      |       |      |       |      |       |
|         | 23  | 90    | 41  | 90    | 40   | 90    |      |       |      |       |      |       |
|         | 19  | 120   | 35  | 120   | 42   | 120   |      |       |      |       |      |       |
| 2#点检测数据 | 50  | 30    |     |       |      |       | 125  | 30    | 198  | 30    |      |       |
|         | 80  | 60    |     |       |      |       | 72   | 60    | 76   | 60    |      |       |
|         | 55  | 90    |     |       |      |       | 71   | 90    | 72   | 90    |      |       |
|         | 56  | 120   |     |       |      |       | 62   | 120   | 66   | 120   |      |       |
| 3#点检测数据 | 40  | 30    |     |       |      |       | 76   | 30    |      |       | 78   | 30    |
|         | 36  | 60    |     |       |      |       | 70   | 60    |      |       | 105  | 60    |
|         | 78  | 90    |     |       |      |       | 67   | 90    |      |       | 92   | 90    |
|         | 70  | 120   |     |       |      |       | 65   | 120   |      |       | 71   | 120   |

表 3 25 kJ 冲击压实机沉降量检测

(单位:cm)

| 遍数     | 原地面 | 20 遍 | 30 遍 | 40 遍 |
|--------|-----|------|------|------|
| 1#点沉降量 | 0   | 14.0 | 15.9 | 21.4 |
| 2#点沉降量 | 0   | 14.0 | 16.7 | 19.7 |
| 3#点沉降量 | 0   | 12.5 | 16.4 | 19.7 |
| 4#点沉降量 | 0   | 11.8 | 13.4 | 18.2 |
| 5#点沉降量 | 0   | 15.0 | 17.4 | 22.6 |
| 6#点沉降量 | 0   | 16.4 | 18.0 | 20.7 |
| 7#点沉降量 | 0   | 19.1 | 19.6 | 23.5 |
| 8#点沉降量 | 0   | 11.8 | 14.7 | 16.2 |
| 9#点沉降量 | 0   | 14.6 | 15.0 | 18.9 |

杨家庄大桥大里程端 K 56 + 318.1 ~ K 56 + 601.1 段试夯后,用灌砂法检查密实度大于 88 %。再次整平洒水后,再用 50 t 的拖震碾压机碾压 3 遍,然后用 18 ~ 21 t 的三轮压路机碾压 3 遍,经检测密实度为 91 % ~ 95 %,达到了设计要求。

3.4 试验结论

根据试验路段测试结果和现场挖探,证明设计中

采用的地基处理措施是合理的,用机械碾压治理湿陷性黄土地基是切实可行的,对 I、II 级非自重湿陷地段和 II 级自重湿陷地段地基的处理效果较好。在冲击压实一定遍数后,能提高地基承载力,对减少工后沉降、保持路基稳定极为有利。根据试验结果和全线的具体情况,分类确定了具体的碾压遍数和碾压宽度:对非湿陷性地段,仅为减少工后沉降而采用冲击碾压时,其遍数宜为 6 ~ 10 遍,宽度为坡脚增加 1 ~ 2 m;对于 I、II 级非自重湿陷地段,为消除地表湿陷性,加固地基,减少工后沉降,其压实遍数宜为 15 ~ 20 遍,宽度至排水沟外侧。对于 II 级自重湿陷地段,压实遍数宜为 40 遍,宽度为排水沟外侧再加 1 m。以上措施得到了山西省有关专家及现场施工监理的认可。

4 结束语

目前,大运高速公路侯运段已经竣工,并于 2004 年 8 月通车运营。经施工检验,在该线湿陷性新黄土路基设计中采用的多种处理措施是合理的、可行的,并在该公路正式通车 1 年后的运营使用中得到了验证。该项目的设计获得了 2005 年度中国铁路工程总公司优秀设计二等奖。这些措施为我们今后对该地区或相同类型的黄土地区进行路基设计和地基处理提供了可供借鉴的经验。湿陷性问题的发生的首要条件是水,因此也可以采用换填二八灰土或三七灰土层或同时夹铺两布一膜土工布等工程措施来解决渗水问题,并配合地表排水工程解决防排水等问题,同样可以避免因黄土湿陷性而造成的危害。

参考文献:

[1] 李毓林. 铁路工程设计技术手册·路基(修订版)[M]. 北京:中国铁道出版社,1992.

[2] 交通部第二公路勘察设计院. 公路设计手册·路基(第二版)[M]. 北京:人民交通出版社,1996.

[3] 冯连昌,郑晏武. 中国湿陷性黄土[M]. 北京:中国铁道出版社,1982.

[4] 曾国熙,卢肇钧. 地基处理手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1988.

(编辑 刘启山 曹淑荣)

# 大运高速公路湿陷性黄土路基设计和施工试验

作者：[孙爱斌](#)，[吴连海](#)，[SUN Ai-bin](#)，[WU Lian-hai](#)  
作者单位：[铁道第三勘察设计院](#), 天津, 300251  
刊名：[铁道工程学报](#)   
英文刊名：[JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)  
年，卷(期)：2006 (5)

## 参考文献(4条)

1. [李毓林](#) [铁路工程设计技术手册·路基](#) 1992
2. [交通部第二公路勘察设计院](#) [公路设计手册·路基](#) 1996
3. [冯连昌](#); [郑晏武](#) [中国湿陷性黄土](#) 1982
4. [曾国熙](#); [卢肇钧](#); [蒋国澄](#); [叶政青](#) [地基处理手册](#) 1988

引用本文格式：[孙爱斌](#), [吴连海](#), [SUN Ai-bin](#), [WU Lian-hai](#) [大运高速公路湿陷性黄土路基设计和施工试验](#) [期刊论文]  
]-[铁道工程学报](#) 2006 (5)