

# 南水北调中线工程总干渠液化地基现场试验研究

马述江<sup>1</sup>, 乔裕民<sup>1</sup>, 黄志全<sup>2</sup>, 高文荣<sup>2</sup>

(1. 河北省水利水电第二勘测设计研究院, 石家庄 050021; 2. 华北水利水电大学, 郑州 450045)

**摘要:** 南水北调中线总干渠磁县段的地基土具有中等震动液化现象, 如处理不当可能导致渠道沉陷甚至滑坡, 危及渠道安全。设计采用夯扩挤密碎石桩进行地基处理, 为此需在现场选取有代表性的场地上进行试桩, 通过试验验证不同桩间距对砂土液化的处理效果, 以确定合适的桩间距, 为大面积施工提供有关参数和依据。夯扩挤密碎石桩利用重锤冲击成孔, 分层填入碎石或其他置换料, 并夯击至设计标高。试验表明, 采用桩间土标准贯入试验可判断经处理后的地基土, 桩间距为 1.8 m 时不存在液化, 桩间距为 1.9 m 时存在液化。原位跨孔剪切波速试验结果显示, 处理后桩间土的剪切波速较地基处理前提高较多, 证明挤密效果明显。

**关键词:** 南水北调; 液化; 标准贯入试验; 跨孔波速试验

**中图分类号:** TU470; TV68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0142-04

## Field Test Research on the Liquefiable Subsoils Processing of Main Canal in the Middle Route of South to North Water Transfer Project

MA Shu jiang<sup>1</sup>, QIAO Yu min<sup>1</sup>, HUANG Zhi quan<sup>2</sup>, GAO Wen rong<sup>2</sup>

(1. The Second Design and Research Institute of Water Conservancy and Hydropower of Hebei Province,

Shijiazhuang 050021, China; 2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** Foundation soil of Ci Xian section of the main canal in the Middle Route of South to North Water Transfer Project has medium liquefaction phenomenon. Canal subsidence and landslide can happen if the foundation soil is not treated properly, which can affect canal safety. The ram compaction gravel piles can decrease sand ground liquefaction. In situ pile test needs to be conducted. The effects of different pile spacing on treatment of sand liquefaction were tested to determine the appropriate pile spacing, which can support the design parameters and principle for pile construction in a large area. The ram compaction gravel piles used heavy hammer impact to form the hole, and then filled in gravel or other replacement materials in each layer to reach the design height. The results showed that ground liquefaction is not shown when the pile spacing is 1.8 m but occurs when the pile spacing is 1.9 m. In addition, the shear wave test of original crosshole showed that the shear wave velocity of soil among piles increases after the treatment, which indicated the compaction effect is significant.

**Key words:** South to North Water Diversion; liquefaction; standard penetration test; crosshole wave velocity test

南水北调中线总干渠工程采用明渠常年输水, 具有输水流量大、距离长等特点。河北省磁县段总干渠桩号 0+000 至 1+850 渠段, 位于漳河北岸河漫滩上, 地基土以砂土为主, 饱和砂土具轻微-中等震动液化现象; 桩号 4+451 至 4+951 渠段, 位于漳河北岸一级阶地, 渠基下局部饱和和轻粉质壤土、饱和砂层具轻微-中等液化潜势。磁县段总干渠均处于 7 度地震区。由于南水北调输水的重要性, 对总干渠饱和和砂土液化渠基处理前进行现场试验十分必要。

夯扩挤密碎石桩技术<sup>[1-4]</sup>是利用重锤冲击成孔, 在成孔的同时, 使桩端和桩周土体得到一次挤密; 成孔至设计标高后在孔中分层填入碎石或其他置换料, 提升重锤到一定高

度, 令其自由下落, 夯击碎石到松散土体之中, 使桩端及周围土体得到第二次挤密; 依次填入碎石, 夯击碎石, 直至设计标高。夯扩挤密碎石桩可以有效挤密土体, 使松散土体更加密实, 有效消除液化, 改善土体物理力学指标, 提高地基土承载能力, 减少地基压缩变形<sup>[5-8]</sup>。

南水北调中线磁县段饱和和砂土液化渠基采用夯扩挤密碎石桩进行处理, 在现场有代表性的场地上进行试夯, 并根据试验结果确定大面积施工参数。

## 1 现场试验研究方案

夯扩挤密碎石桩施工前, 根据初步确定的设计参数, 在现

场有代表性的场地上进行试桩。通过与施工前测试数据进行对比,检验桩间土,以便最后确定工程采用的各项设计参数。若不符合设计要求,则改变设计参数,重新确定试桩方案。

试验段选择在不需处理的渠道基础上有代表性的场地 K0+ 012 至 K0+ 048 进行夯扩桩试桩施工,试桩区平面位置见图 1。

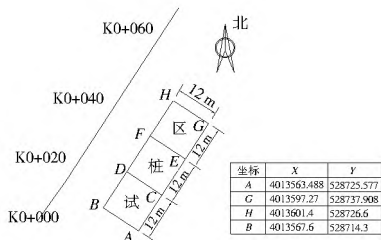


图 1 试桩区平面位置  
Fig. 1 Location of test piles

施工机械采用北京波森特岩土工程有限公司研制的步履式落锤载体扩桩机 2 台套,发电机(300 kW)1 台。夯扩桩填料取自 K7+ 000 处的泥砾料。夯扩桩施工流程如下。

(1) 确定桩位。测量人员依据设计桩位布置图放线,并用白灰标记,经监理复验合格后方可进行下道工序。

(2) 锤击成孔。直接锤击成孔,调平机架,用线锤吊线检查护筒的垂直度,确保垂直度控制在 1.5% 之内。

(3) 锤击成孔至设计标高。将桩机移至布置孔位,使护筒对准孔心,将重锤(重锤 3 500 kg,锤径 355 mm)做自由落体运动夯击土体,形成桩孔。

(4) 沉护筒至设计标高。成孔后,利用反压装置将护筒沉至孔底。清底夯实、夯平,成孔后进行孔中心位移、垂直度、孔径、孔深等检验,合格后进行下道工序。

(5) 填料夯击。提升重锤高出填料口,进行填料,要求分层填料夯击,以量斗定量,每次填料量 0.20 m<sup>3</sup>。填充料为泥砾。

(6) 测单击贯入度。待填土形成密实状态后,将重锤以 5 m 落距做自由落体运动,严禁带刹车和离合,控制单击贯入度不大于 15 cm,且后一次贯入度不大于前一次贯入度。

试验方案三组,夯扩桩桩径 550 mm,选择开挖的泥砾料为填料,桩长约为 7.0~ 9.0 m。第一组试桩:桩间距 1.7 m,梅花型布桩,共 39 根桩,桩号 K0+ 012 至 K0+ 024;第二组试桩:桩间距 1.8 m,梅花型布桩,共 39 根桩,桩号 K0+ 024 至 K0+ 036;第三组试桩:桩间距 1.9 m,梅花型布桩,共 39 根桩,桩号 K0+ 036 至 K0+ 048。

## 2 地层复勘

在试桩区选定 9 个孔位,采用直径 410 mm 螺旋钻进行地质复勘,钻探孔平面布置图见图 2。经钻进勘察,地层情况见图 3。其中最大孔深 6.37 m,最小孔深 6 m。试桩区地质特性参数为:砂土覆盖层平均为 6.21 m,持力层在 6.21 m 处,判断为埋藏卵石层。

## 3 桩间土标贯试验研究

试桩施工完毕后,进行标准贯入试验,并对桩间土的液

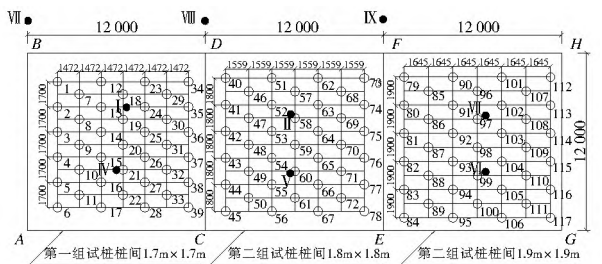


图 2 复勘孔位平面布置

Fig. 2 Location of the investigation drill holes



图 3 地质剖面

Fig. 3 Geological profile

化做出判别。检测 6 个孔位,分别是第一组试桩的 9 号、10 号和 19 号、20 号桩间土,第二组试桩的 58 号、59 号和 68 号、69 号桩间土,第三组试桩的 87 号、88 号和 97 号、98 号桩间土。

### 3.1 试验仪器及过程

试验仪器采用聚龙 XZ 130 型钻孔机 1 台;钻杆 25 m;标贯器 1 只;63.5 kg 自动落锤 1 个;室内土工试验仪 1 台。

首先钻至试验土层标高以上约 15 cm 处,以避免下层土受扰动;第二步贯入时,穿心锤落距为 76 cm,使其自由落下,将贯入器直打入土层中 15 cm。以后每打入土层 30 cm 的锤击数,即为实测锤击数  $N$ ;最后提出贯入器,取出贯入器中的土样进行鉴别描述。如此继续逐层试验。当钻杆长度大于 3 m 时,锤击数应按下式进行钻杆长度修正:  $N_{63.5} = A \times N$ ,式中  $N_{63.5}$  为标准贯入试验锤击数,  $A$  为触探杆长度校正系数,如触探杆长分别为  $\leq 3$  m、6 m、9 m、12 m、15 m、18 m、21 m 时,则  $A$  相应分别为 1、0.92、0.86、0.81、0.77、0.73、0.70。

### 3.2 液化计算判断

(1) 初判。因该地层为渠道地基,因此工程正常运行时,渠基在水面以下,即  $d_w$  为 0,且该基础地层自表面至卵石层范围内均为砂土层,所以对该土层的液化初判为可能发生液化。

(2) 复判。根据标准贯入锤击数法,依据《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487-2008),即当检测实际锤击数  $N$  小于液化判别标贯击数临界值  $N_{cr}$  时,判为液化土。由公式  $N_c = N_0 / [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{3\% / \rho_c}$ ,计算得出液化判别标贯击数临界值  $N_{cr}$ 。式中:  $\rho_c$  为土的黏粒含量质量百分比率,当  $\rho_c < 3\%$  时,取

3%;  $N_0$  为液化判别标准贯入锤击数基准值, 依据表 1, 因该地区地震设防烈度为 7 度且为近震, 所以取  $N_0 = 6$ 。

表 1 液化判别标准贯入锤击数基准值

地震动峰值加速度	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g	0.40 g
近震	6	8	10	13	16
远震	8	10	12	15	18

注: 引自《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487-2008)。

表 2 液化判别结果

Table 2 Results of liquefaction judgment

孔号	取样位置	桩间距/m	标贯深度/m	标贯击数	液化判别标贯击数临界值 $N_{cr}$	液化判别
1	K0+ 012 至 K0+ 024 段 9、10 桩间土	1.7	3.0	9	8.4	不液化
			4.0	11	8.4	不液化
			5.0	12	8.4	不液化
2	K0+ 012 至 K0+ 024 段 19、20 桩间土	1.7	3.0	12	8.4	不液化
			4.0	12	8.4	不液化
			5.0	13	8.4	不液化
3	K0+ 024 至 K0+ 036 段 58、59 桩间土	1.8	3.0	8	8.4	不液化
			4.0	10	8.4	不液化
			5.0	11	8.4	不液化
4	K0+ 024 至 K0+ 036 段 68、69 桩间土	1.8	3.0	9	8.4	不液化
			4.0	10	8.4	不液化
			5.0	11	8.4	不液化
5	K0+ 036 至 K0+ 048 段 87、88 桩间土	1.9	3.0	8	8.4	液化
			4.0	9	8.4	不液化
			5.0	9	8.4	不液化
6	K0+ 036 至 K0+ 048 段 97、98 桩间土	1.9	3.0	5	8.4	液化
			4.0	8	8.4	液化
			5.0	8	8.4	液化

钻孔中逐点进行激振, 产生纵波(又称压缩波、 $P$  波)和横波(又称剪切波、 $S$  波), 而在另外一个钻孔中利用三分量检波器, 接收同一深度传来的  $P$  波和  $S$  波, 根据波传播的距离和走时计算出场地土的波速, 进而评价场地土的工程性质。

#### 4.2 测试仪器

跨孔法波速测试所需设备主要有震源、接收器、放大器和记录仪等。本次测试采用的数据记录仪器是武汉岩海工程技术有限公司研制生产的 RS-1616K(S) 桩基动测仪。该仪器适用于钻孔原位波速测试、常时微动测试、高应变和低应变桩基测试等。该仪器具有信号自动增益、采集、图形显示、数据存盘、数据分析等功能, 配有剪切波分析系统软件。采用的检波器是武汉岩海工程技术有限公司研制生产的 RSJ2000A/B 三分量检波器。探头自重 10 kg, 探测深度最深能达 100 m, 可与任何具有 3 个通道以上的动测仪直接对接, 适应性较广。

震源采用中国地震局工程力学研究所研制生产的 JQG-830 型剪切锤。该仪器的自振频率为 28 Hz, 可测孔径为 90 mm, 撞击体行程为 400 mm, 两孔间测量孔距为 3~5 m。该仪器通过气压胶囊压缩机构与孔壁固定, 用瞬间力提拉或自由下落重锤来激起剪切波, 该剪切波被同一深度跨孔中的三分向检波器接受, 并结合剪切锤中触发器的触发信号, 从而求得不同深度岩性土的传波速度。该仪器具有性能稳定、操

(3) 判断结果。由实测标准贯入锤击数和液化判别标贯击数临界值, 可以对桩间土是否会液化做出判别。判别结果见表 2。

## 4 原位跨孔剪切波速试验

### 4.1 试验原理

跨孔法波速测试是利用已知距离的钻孔, 在其中的一个

作方便等特点。

剪切波跨孔测试时, 在一个钻孔中激发, 另外一个钻孔接收, 通过获取地震波在二孔间的旅行时间求取传播速度。在测试过程中将三分量检波器和剪切锤使用气囊充气固定在同一深度进行测试, 满足《地基动力特性测试规范》(GB/T 50269-97) 的相关要求。对每个测点的划分合理地考虑了场地地质分层和《地基动力特性测试规范》规定的每隔 1~2 m 布置一个测点的要求。测试时均采用自下而上按预定 1 m 的深度进行测量的方式。

### 4.3 波速计算

完成波形识别工作后, 记录两接收孔间  $P$  波和  $S$  波的传播时间  $t_p$ 、 $t_s$ 。根据振源孔和测试孔之间的距离以及钻孔垂直度量测结果, 获得波的传播距离  $L$ , 由公式(1)、公式(2)分别计算  $P$  波和  $S$  波的波速  $V_p$ 、 $V_s$ :

$$V_p = L/t_p \quad (1)$$

$$V_s = L/t_s \quad (2)$$

式中:  $V_p$ 、 $V_s$  分别为  $P$  波和  $S$  波的波速(m/s);  $L$  为波的传播距离(m);  $t_p$ 、 $t_s$  分别为  $P$  波和  $S$  波的传播时间(s)。

同一测点  $P$  波、 $S$  波波速测试误差应控制在 5%~10% 之间, 否则必须分析原因或重新测试。

### 4.4 试验结果

通过对 14 个钻孔的测试和数据分析处理, 得到 101 个

不同深度的剪切波值波速范围为 153~226 m/s, 挤密区的地层剪切波波速范围为 167~297 m/s。挤密区的地层剪切波波速明显比原地层的地层剪切波速度高。

## 5 结论

通过夯扩挤密碎石桩施工现场的标准贯入试验和跨孔波速试验, 得出如下结论。

(1) 磁县段渠道夯扩挤密碎石桩试桩桩间土液化判别: 桩间距为 1.7 m、1.8 m 处理后地基土不存在液化, 桩间距为 1.9 m 处理后地基土存在液化。

(2) 从试桩的试验过程和检测结果可以得出, 采用步履式落锤载体扩桩机(重锤 3 500 kg, 锤径 355 mm), 每次填料量控制在 0.2~0.25 m<sup>3</sup> 之间并且护筒提升速度不大于 1~2 m/min 内, 单击贯入度不大于 15 cm 的施工方 案, 能够达到消除液化的设计要求。

(3) 从原位跨孔剪切波速试验结果看, 桩间土的剪切波速较地基处理前提高较多, 夯扩挤密碎石桩的挤密效果明显。

### 参考文献(References):

[1] 许芸芸, 孙忠强, 刘亚昌, 等. 夯扩挤密碎石桩在沿海高速公路砂土液化地基中的应用[J]. 铁道建筑, 2007, (4): 66-67. (XU Yunyun, SUN Zhongqiang, LIU Yachang, et al. The Application of Ram Compaction Gravel Piles in Sand Liquefaction Improving of Coastal Express Way [J]. Railway Engineering, 2007, (4): 66-67. (in Chinese))

[2] 郝树林. 等能量等变形挤密渣土桩在北京动车段地基处理工程中的应用[J]. 工程勘察, 2009, (增1): 141-144. (HAO Shulin. The Application of Equal Energy and Deformation Compaction Muck Pile in Beijing High Speed Train Section [J]. Engineering Investigation & Surveying, 2009, (Supp. 1): 141-144.

(in Chinese))

[3] 符德军. 等能量等贯入度控制挤密碎石桩[J]. 山西建筑, 2007, 33(12): 122-123. (FU Dejun. Control of Compacted Gravel Pile with Equal Energy and Penetration [J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(12): 122-123. (in Chinese))

[4] 胡存亮. 等能量等变形夯扩挤密桩在高速公路地基处理中的应用[J]. 交通标准化, 2007, (4): 69-71. (HU Cunliang. Application of Equal Energy and Equal Distortion Ramming Expanded Pile in Expressway Foundation Treatment [J]. Communication Standardization, 2007, (4): 69-71. (in Chinese))

[5] 张金成, 段亮亮. 等能量等变形挤密碎石桩处理液化砂土的效果[J]. 工程勘察, 2009(增1): 145-148. (ZHANG Jincheng, DUAN Liangliang. The Results of Equal Energy and Deformation Compaction Pile Treating Liquefaction Sand [J]. Engineering Investigation & Surveying, 2009, (Supp. 1): 145-148. (in Chinese))

[6] 封艳琴. 夯扩碎石桩在软基处理中的优势分析[J]. 北方交通, 2008(8): 128-130. (FENG Yanqin. Analysis of Superiority of Ram Replacement Stone Column to Treatment of Weak Foundation [J]. Northern Communications, 2008(8): 128-130. (in Chinese))

[7] 付殿武, 李凤起, 戚银生, 等. 夯扩挤密碎石桩处理液化砂土[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(2): 282-285. (FU Diangu, LI Fengqi, QI Yingsheng, et al. Study on Compacted Crushing Stone Pile in Treatment for Saturated Sand after Liquefaction [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(2): 282-285. (in Chinese))

[8] 刘振京. 应用挤密碎石桩加固可液化地基的试验研究[J]. 路基工程, 2008, (3): 86-88. (LIU Zhenjing. Experimental Study of Compaction Gravel Piles Treating Liquefiable Foundation [J]. Subgrade Engineering, 2008, (3): 86-88. (in Chinese))

(上接第 141 页)

计算了气候变化对受水区径流量的影响, 研究成果对于气候变化对水循环的影响分析具有重要的理论价值, 对于研究未来情景下受水区需调水量具有重要的借鉴作用。

### 参考文献(References):

[1] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 南水北调中线一期工程项目建设书[R]. 2004. (Yangtze River Water Resources Investigation Planning and Design Institute Board. The First Phase of the Middle Route of South to North Water Transfer Project Proposal [R]. 2004. (in Chinese))

[2] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63-73. (QIN Dahe, CHEN Zhenlin, LUO Yong, et al. Updated Understanding of Climate Change Sciences [J]. Advances in Climate Change, 2007, 3(2): 63-73. (in Chinese))

[3] 国家气候中心. 中国地区气候变化预估数据集 Version 1.0 使用说明[Z]. 2008. (National Climate Centre. China Regional Climate Change Forecast Data Set Version 1.0 [Z]. 2008. (in Chinese))

[4] Gleick P H. Climate Change, Hydrology and Water Resources [J]. Reviews of Geophysics, 1989, 27(3): 329-344.

[5] 刘春葵. 气候变异与气候变化对水循环影响研究综述[J]. 水文, 2003, 23(4): 1-7. (LIU Chunzhen. The Review of Impact Study of Climate Variability and Change on the Water Cycle [J]. Hydrology, 2003, 23(4): 1-7. (in Chinese))

[6] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (JIA Yangwen, WANG Hao, NI Guangheng, et al. A Distributed Watershed Hydrological Model Theory and Practice [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))