

大断面箱涵下穿高速公路过程的施工监测分析

覃卫民¹, 楚斌², 龙立志³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 河南省交通规划勘察设计院有限责任公司, 河南 郑州 450052; 3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 郑州—开封(郑开)城市通道下穿京港澳高速公路工程中, 顶进箱涵机动车道外廓尺寸为 46.8 m×9.3 m(宽×高), 当时其宽度为国内第一。在高速公路路面和箱涵布置大量监测点, 重点对路面位移和箱涵顶进姿态进行监测。监测成果表明: 在路面西侧测点的最终沉降值中, 第一节箱涵推进后的阶段性沉降值占一半以上, 南区测点超过 60%, 北区测点超过 54%; 箱涵顶进高速公路的 3/4 时, 路面两端位移开始加速。分析认为, 路面变形较大原因之一在于覆盖层薄、箱涵断面尺寸大以及地质条件差等工程特征, 之二为一些设计意图未能在施工中落实, 主要体现在管棚和滑行轨道的施工效果上。对箱涵顶进过程中箱涵本身和周边环境的监测信息进行深入分析, 可为今后类似工程提供借鉴。

关键词: 公路工程; 大断面箱涵; 高速公路; 顶进; 位移; 姿态控制

中图分类号: U 41

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)09 - 1790 - 08

ANALYSIS OF CONSTRUCTION MONITORING OF LARGE-SECTION BOX CULVERT JACKING PROCESS UNDERPASS EXPRESSWAY

QIN Weimin¹, CHU Bin², LONG Lizhi³

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;* 2. *Henan Provincial Communications Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450052, China;* 3. *School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China*)

Abstract: There is a large-section box culvert jacking underpass expressway in Zhengzhou—Kaifeng city access project with the largest section size in China. Systematic monitoring work is arranged for the project, the deformation on expressway and the box posture control are focused on the whole jacking process. Monitoring results show that over half of total settlements appear after the first box section underpass on west side expressway; the southern region is over 60% and the northern region is over 54%; while the box culvert is jacked into the 3/4 width of the expressway, the deformation on expressway begins to speed up on both ends. Analysis shows that engineering characteristics such as thin coverage, large-section and unfavourable geological conditions are the main factors leading to large deformation on expressway; the fact that design idea has not been carried out in jacking process increases the deformation on expressway, which leads to poor quality in construction of pipe shed and pilot draft. By analysing the monitoring information of the box and the surrounding environment, some reference can be achieved in similar projects in the future.

Key words: highway engineering; large-section box culvert; expressway; jacking; displacement; posture control

收稿日期: 2009 - 01 - 04; **修回日期:** 2009 - 05 - 26

作者简介: 覃卫民(1973 -), 男, 博士, 1996年毕业于武汉水利电力大学水利水电建筑工程专业, 现任副研究员, 主要从事岩土工程安全监测、设备研制等方面的研究工作。E-mail: qwm1973@sohu.com

1 引言

郑开城市通道下穿京港澳高速公路的箱涵顶进工程包括机动车道和非机动车道各 2 孔共 4 个独立箱涵^[1, 2], 每孔箱涵分 3 节分别是 17, 18, 17 m, 箱涵轴线与高速公路斜交夹角 114.228°。机动车道单孔箱涵外廓尺寸为 23.4 m×9.3 m(宽×高), 自重为 45 000 kN。工程采用中继间法顶进施工, 南北箱涵交替、并行顶进。工程设计中采用大管棚支护路基土体, 以及钢网格刃脚分割土体支护技术来稳固掌子面, 箱涵出口端设置一排抗拔桩加固坡面土体, 箱涵底设水平钢管作为滑行轨道, 基坑及箱涵周围采用井管降水。

京港澳高速公路路基高约 4 m, 箱涵顶部覆土厚 1.4~2.0 m, 箱涵埋入地下约 6.6 m。根据地质资料显示箱涵和 U 型槽位于亚砂土层中, 箱涵底的土层为松散细砂, 箱涵底处于亚砂土和细砂土层的交界层, 该处地下水稳定水位为地面以下 1.2 m。箱涵工程场地地质剖面见图 1。

2 监测方案

在国内的管幕-箱涵顶进工程中, 有影响力的工程有: (1) 首都机场西区空侧道路下穿 L 滑行道箱涵顶进工程^[3~5], 箱涵外廓尺寸为 13.7 m×

6.45 m(宽×高), 顶进长度达 148.3 m, 在机场滑行道下不停航、不停运顶涵施工。(2) 上海市中环线虹许路北虹路下的立交工程^[6~8], 其箱涵尺寸为 34.2 m×7.85 m(宽×高), 长 126 m, 是世界上首例采用不加固管幕内软土的管幕法工程, 也是中国大陆首次采用管幕法工程。

2006 年郑开城市通道下穿京港澳高速公路的箱涵顶进工程的技术特点如下: (1) 机动车道箱涵外廓尺寸为 46.8 m×9.3 m(宽×高), 当时该宽度为国内第一。(2) 箱涵顶部覆土层厚只有 1.4~2.0 m。(3) 京港澳高速公路在箱涵顶进期间保持通行, 对控制高速公路在施工期和工后沉降有较高要求。

根据工程指挥部的要求和孙钧等^[8~14]关于“管幕-箱涵”顶进非开挖工法的研究成果, 在制定监测方案时, 在高速公路路面、箱涵内部及周边地层中设置大量的监测点(见图 2), 分别对路面沉降、水平位移、土体侧向位移、地下水位、土压力、接触压力、箱涵结构内力和姿态进行监测。

在进行现场监测时, 重点放在高速公路的位移和箱涵姿态的控制上, 分别采用水准仪和经纬仪对高速公路和箱涵的沉降及水平位移进行观测, 且按二等测量要求进行作业。

3 监测成果

3.1 路面沉降监测

典型测点沉降监测成果见图 3~5(图中箱涵与测

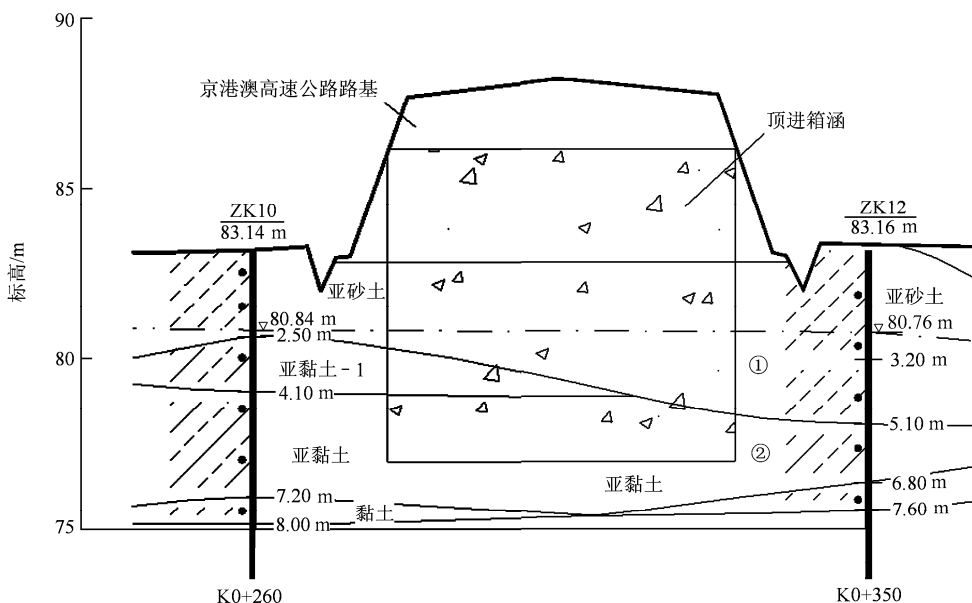


图 1 箱涵工程场地地质剖面图
Fig.1 Geological profile of expressway

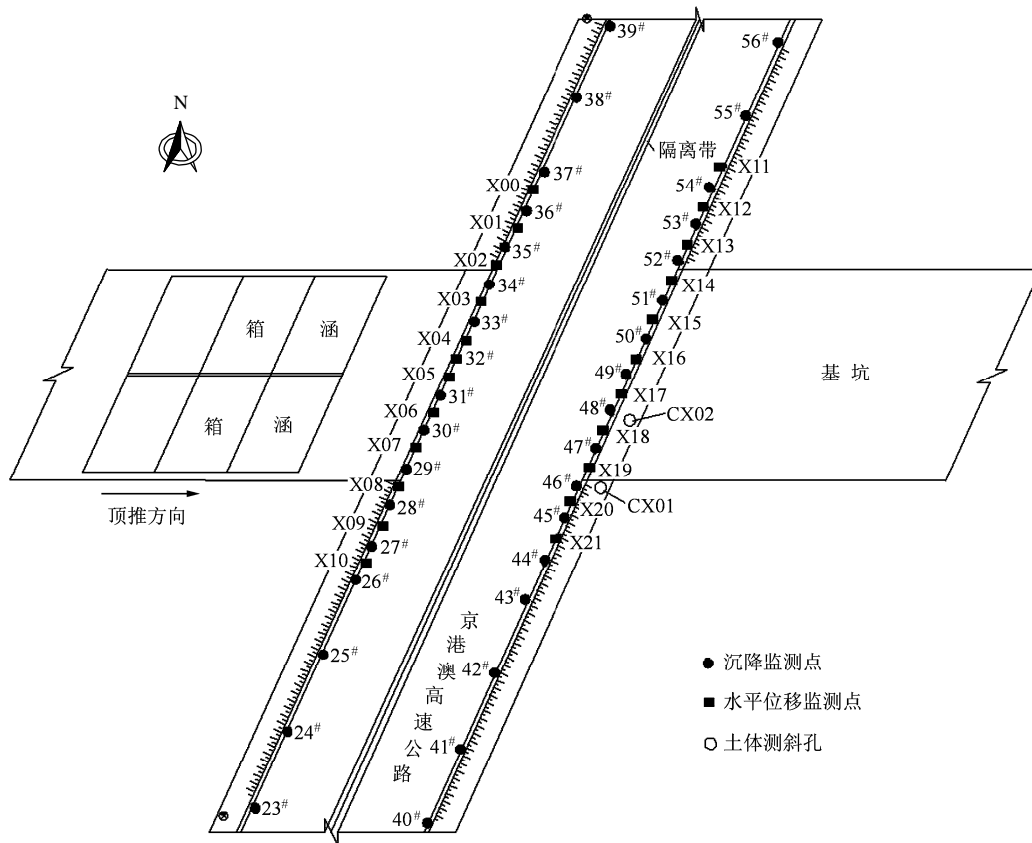
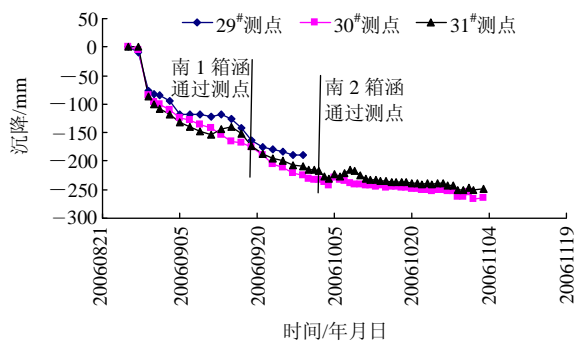
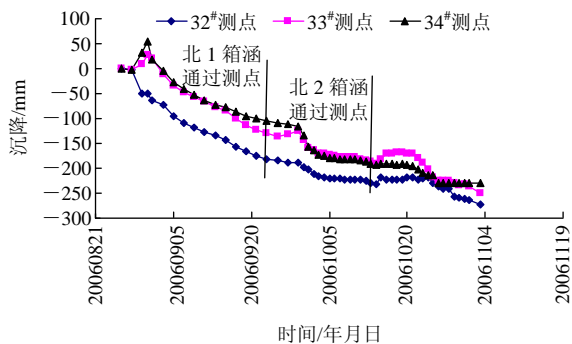


图2 地面监测平面布置图
Fig.2 Layout of monitoring planes in site

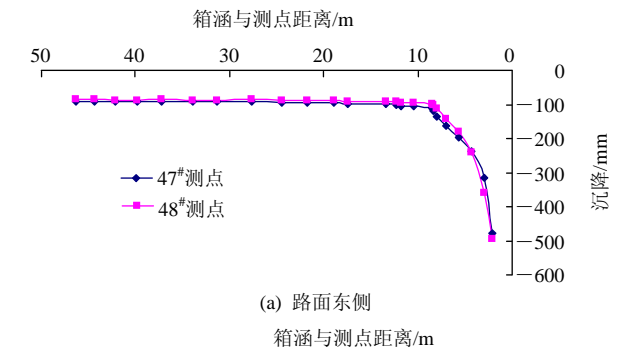


(a) 南箱涵

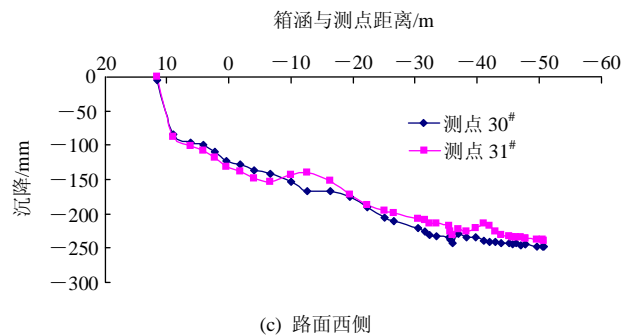


(b) 北箱涵

图3 路面西侧典型测点沉降-时间曲线
Fig.3 Settlement-time curves of west side of expressway



(a) 路面东侧



(c) 路面西侧

图4 典型测点沉降-箱涵与测点距离曲线

Fig.4 Curves of settlement-distance from box culvert to measuring points

点距离均为第一节箱涵前端与测点的距离, 未穿过测点的距离为正, 穿过测点后的距离为负; 图5中

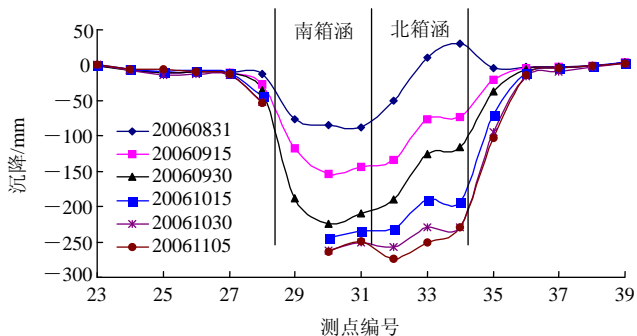


图 5 路面西侧沉降成果立面图

Fig.5 Settlement results on west side of expressway

2006 年 9 月 30 号以后 29#测点缺数据)。

在 2006 年 8 月 26 日箱涵开始顶进之前, 高速公路路面东侧区域就已有最大值为 -9 mm 的沉降, 主要是附近降水引起的固结沉降。8 月 28 日前(南箱涵入土约 4.7 m, 距离高速公路约 3.6 m), 路面测点累计沉降值都在 -5 mm 以内。路面东侧下方施工滑行轨道时, 巨大顶力的扰动造成路面剧烈下沉, 8 月 31 日西侧南箱涵前方的 29#测点累计下沉值达 -76.8 mm, 东侧南箱涵前方的 47#测点累计下沉值达 -91.3 mm, 东侧北箱涵前方的 51#测点累计下沉值为 -47.9 mm, 而西侧北箱涵前方的局部区域表现为上抬, 34#测点累计上抬值可达 30.9 mm(见图 3, 4(a))。

2006 年 9 月 6 日(南箱涵进入高速公路, 北箱涵入土 0.5 m), 高速公路上箱涵顶进区域的测点几乎都表现为下沉, 西侧测点一周下沉值为 40~50 mm, 隔离带和东侧测点一周下沉值都在 5 mm 以内。9 月 15 日(南箱涵入高速公路 10.8 m, 北箱涵入高速公路 0.7 m), 西侧测点继续呈现下沉趋势, 其中两箱涵之间区域沉降在 10 d 内的阶段性下沉值超过 50 mm, 西侧其余测点同期阶段性下沉值为 20~40 mm; 东侧测点同期阶段性下沉值在 5 mm 以内。

2006 年 10 月 6 日起(南箱涵入高速公路 37.3 m, 距离东侧测点约 7.3 m, 北箱涵入高速公路 31 m), 东侧南箱涵区域测点经历了一个加速下沉的过程, 48#测点在 5 日内的阶段性下沉值达 -352.4 mm(见图 4(a)), 而西侧测点 10 d 内的阶段性下沉值在 -15 mm 以内。10 月 10 日后高速公路路面在测测点中, 东侧北箱涵前方的 32#~34#测点在 10 月 23~27 日的沉降速率大于 5 mm/d 的控制标准, 其余测点的沉降速率都在控制范围之内。

3.2 路面水平位移

在高速公路路面东侧测点(X11~X21)水平位移监测中, 2006 年 10 月 5 日(南箱涵入高速公路 36 m, 距离东侧测点约 6 m, 北箱涵入高速公路 30 m)之前的变形速率都在控制值 2 mm/d 以内, 最大累计位移为: 向北 X17 测点 22 mm, 向东 X18 测点 19 mm。10 月 5 日后箱涵顶进方向测点呈现位移速率增大的趋势, 其中 10 月 8 日向南 X17 测点为 25 mm/d, X18 测点为 22 mm/d; 向东 X16~X20 测点的位移速率分别为 46, 76, 76, 52, 18 mm/d。至 10 月 9 日监测结束, 向东 X17 测点累计位移达到 983 mm, X18 测点累计位移达到 922 mm; 向南 X17 测点累计位移达到 186 mm, X18 测点累计位移达到 134 mm。

高速公路路面西侧测点(X00~X10)水平位移监测中, 2006 年 10 月 9 日(南箱涵入高速公路 42 m, 北箱涵入高速公路 31 m)之前西侧测点(X00~X10 测点)水平位移的变形速率都在控制值 2 mm/d 以内, 最大累计位移仅为: 向北 18 mm, 向西 18mm。10 月 22 日(南箱涵顶进到位, 北箱涵入高速公路 41 m)之前监测点累计位移都在 20 mm 以内, 10 月 22 日以后日变形速率较大的有 X03 和 X04 测点, 其中 X03 测点在 10 月下旬的位移速率在 15 mm/d 以上, X03, X04 测点向南的累计位移分别为 191 和 115 mm; 向东的累计位移分别为 657 和 452 mm。西侧测点监测于 11 月 4 日结束, X03, X04 测点向南累计位移分别为 221 和 90 mm, 向东累计位移分别为 839 和 558 mm。

典型测点位移 - 箱涵与测点距离见图 6~9, 约定 X 向位移以北为正, Y 向位移以东为正。

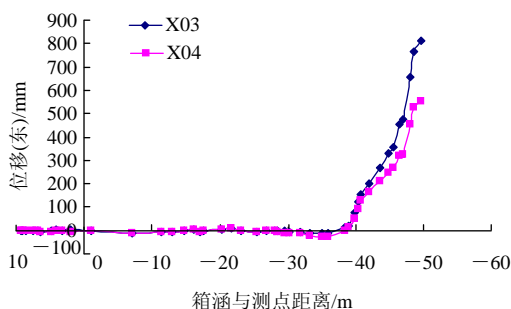


图 6 路面西侧典型测点位移(东) - 箱涵与测点距离曲线

Fig.6 Displacement(east)-distance from box culvert to measuring points curves of west side of expressway

3.3 箱涵姿态

在箱涵轴线偏移监测中, 2006 年 8 月 25 日发

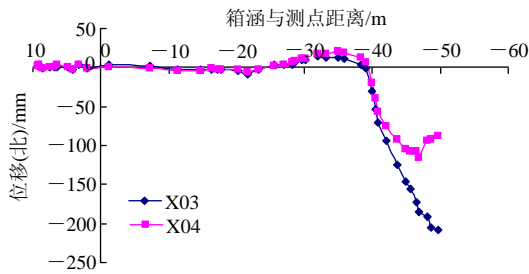


图7 路面西侧典型测点位移(北) - 箱涵与测点距离曲线
Fig.7 Displacement(north)-distance from box culvert to measuring points curves of west side of expressway

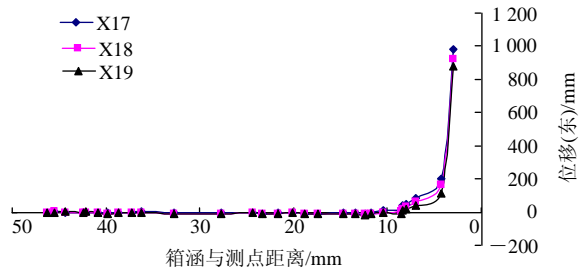


图8 路面东侧典型测点位移(东) - 箱涵与测点距离曲线
Fig.8 Displacement(east)-distance from box culvert to measuring points curves of east side of expressway

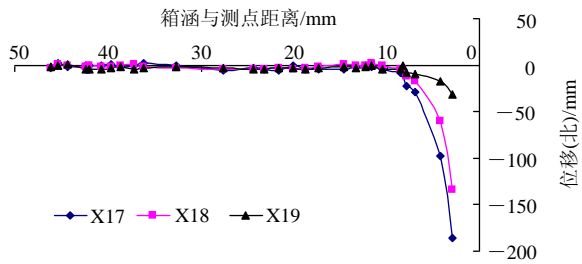
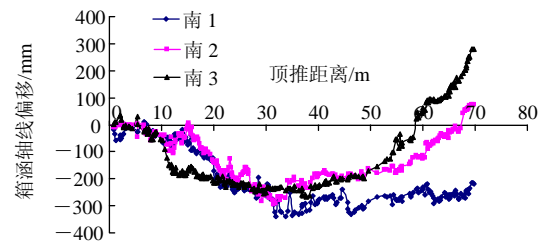


图9 路面东侧典型测点位移(北) - 箱涵与测点距离曲线
Fig.9 Displacement(north)-distance from box culvert to measuring points curves of east side of expressway

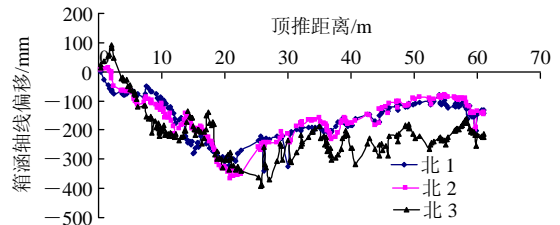
现南箱涵顶进过程中发现整体向北偏移。9月3日起南、北箱涵顶进过程中出现较大整体偏移，9月5日南箱涵偏移量为54~177mm，北箱涵偏移量为52~163mm，仍保持向北偏移。在箱涵顶进过程中，箱涵偏移虽得到一度得到纠偏，但整体偏移量依然较大，还出现南1箱涵左边墙被隔离桩擦伤的情况。

南北箱涵轴线偏移 - 顶推距离曲线分别如图10所示。

南北箱涵在入土之前，均处于轻微的抬头状态，南箱涵最大上抬值为2006年9月2日的18.2mm，北箱涵最大上抬值为9月5日的21.1mm，入土之后箱涵前端开始呈现下沉趋势，进入高速公路后箱



(a) 南箱涵



(b) 北箱涵

图10 轴线偏移 - 顶推距离曲线

Fig.10 Axis deviation-jacking distance curves

涵底板始终处于设计高程以下。南箱涵在10月4日之前一直处于“扎头”状态，随后曾一度得到较好的纠偏，10月8日后南箱涵重新处于“扎头”状态，且“扎头”程度更加严重，最终南箱涵前端下沉量为1208.8mm，比后端低637.3mm，倾斜率约为3.75%。在南箱涵就位前，北箱涵前后端高程控制得较好，在南箱涵就位后开始调整北箱涵的设计高程，尽量接近南箱涵底板最终高程，最终北箱涵前端下沉量为946.7mm，比后端低454.9mm，倾斜率约为2.68%。

南、北箱涵底板沉降 - 时间曲线分别如图11所示。

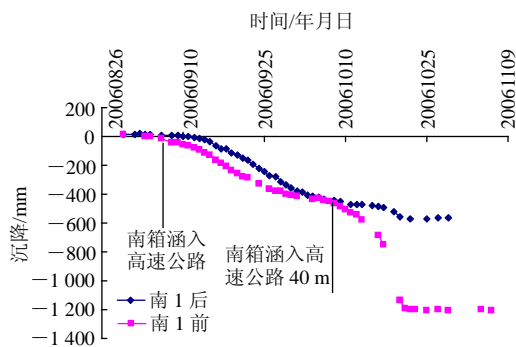
4 监测成果分析

4.1 路面变形规律

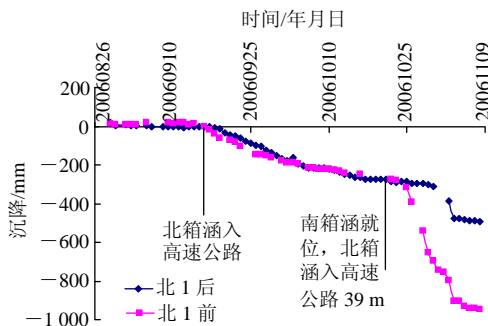
北箱涵推进初期，网格内挤土使地表隆起，33[#]，34[#]测点隆起最大值分别为26.6和54.5mm；网格内挖土使地表下沉，随着箱涵的顶进，沉降逐步增大，最终沉降分别为250.7和229.8mm。

在南箱涵就位后，北箱涵顶进对南箱涵区域仍有影响，最近的31[#]测点阶段性下沉9.4mm，远处的29[#]测点阶段性下沉3.1mm。

从图3可以看出，在路面西侧测点的最终沉降值中，第一节箱涵推进后的阶段性沉降值占有很大比例，南区的30[#]，31[#]测点超过60%，北区的32[#]~



(a) 南箱涵



(b) 北箱涵

图 11 底板沉降 - 时间曲线

Fig.11 Settlement-time curves

34#测点超过 54%。

从图 7~11(a)可以看出: 南箱涵顶入高速公路对路面西侧水平位移影响较小, 箱涵顶进高速公路的 3/4 时, 路面两端位移开始加速。南 1 箱涵和北 1 箱涵分别入高速公路 36, 39 m 时, 路面东侧和西侧水平位移测点分别进入位移向东、向南加速的阶段, 箱涵出口处的抗拔桩和联系梁都出现明显的偏移(见图 12)。

4.2 路面沉降过大的分析

表 1 给出国内典型箱涵顶进工程一览表^[5, 8, 15]。上海中环线工程采用管幕法顶进施工, 地表沉降最大值为 -255 mm, 主要出现在管幕施工期间。首都机场工程中采用超前小导洞布设滑道技术, 较好的解决“扎头”问题; 另外, 通过实验选择化学浆液形成有效地润滑系统来减小箱涵与土体的摩阻力, 使箱涵得以顺利顶入。沉降监测成果表明, 管棚施做和小导洞施工后的地表沉降最大值仅为 -10.7 mm, 箱涵顶进后的沉降最大值仅为 -33 mm。

从表 1 可以看出, 首都机场、上海中环线和郑开大道这 3 个工程都具有箱涵断面尺寸大、覆盖层薄的工程特点, 其中郑开大道和首都机场这 2 个箱涵工程在施工工法上是相同的, 具有可比性。



(a)



(b)

图 12 抗拔桩向东偏移

Fig.12 Tension piles eastward migration

表 1 国内典型箱涵顶进工程一览表^[5, 8, 15]

Table 1 Typical box project domestic^[5, 8, 15]

工程名称	断面尺寸/(m×m)	覆盖层厚/m	最大沉降/mm
梅河高速	2.20×2.40	3.6	-30
首都机场	23.20×8.55	3.5~6.2	-33
上海中环线	34.00×7.85	4.5~5.0	-255
郑开大道	46.80×9.30	1.4~2.0	-494

结合工程特点和施工情况, 对郑开城市通道箱涵工程中影响高速公路路面沉降的因素进行分析:

(1) 地质条件。根据地质勘察资料得知, 高速公路下箱涵作业区域处于中高压缩性的亚砂土和亚黏土层中, 该软土地层具有液、塑限高和孔隙比较大的特点, 在箱涵顶力和路面过往车辆动荷载的作用下可能有液化趋势, 从而降低土体强度。

(2) $\phi 180$ mm 管棚。管棚在薄覆盖层施工对高速公路路基造成一定的扰动, 对路基整体性有一定的影响。在箱涵顶进的过程中, 管棚有可能在摩擦力的作用下产生沿顶进方向上的滑动, 从而削弱支护作用。更为严重的是, 由于技术和协调等原因, 管棚在中隔带处没能牢固连接, 东西两侧支护没有形成强有力的整体, 管棚没能发挥出应有功能。

(3) 滑行轨道。原定在箱涵底设 $\phi 970$ mm×14 mm 水平钢管或内径 1 500 mm 的钢筋混凝土管作为

滑行轨道，但在箱涵出口端操作顶管施工时，巨大顶力造成高速公路路面剧烈下沉，路面西侧最大下沉超过 70 mm，路面东侧最大下沉超过 80 mm，不得已将施工方案调整为分段浇筑厚 1.2 m 的全断面素混凝土滑板。即便如此，南 1 箱涵仍然出现了较大“扎头”现象，从而对路面的下沉有一定的影响。

(4) 施工管理不到位。在箱涵顶进过程中没能始终坚持“吃土顶进”的原则，掌子面土体曾经严重塌方，造成上部路面开裂塌陷。

4.3 路面水平位移过大的分析

在南箱涵出口端距离路面边缘约 4 m 处布置了 2 个土体测斜孔(见图 2)，以便在箱涵顶进过程中获得地层侧向位移分布情况。2006 年 10 月 5 日这 2 个测斜孔的最大累计位移均在 3 mm 以内；10 月 6 日(南 1 箱涵距离监测孔约 9.7 m)处于南箱涵中央方向的 CX02 监测孔遭到破坏，测斜仪测头无法放入孔中，而处于箱涵外侧 3 m 处的 CX1 监测孔孔口下 0.5 m 测点向东位移增量达 26.32 mm，累计值为 29.11 mm；10 月 7 日 CX01 监测孔遭到破坏。由此可见，箱涵顶进对前方的影响距离约为 10 m，测孔遭受土体挤压产生较大变形而破坏。

原设计中采用泥浆润滑系统减小箱涵四周的摩阻力，由于施工方经验不足，没能克服一些技术难点，使得泥浆润滑系统基本上没做^[1]。在箱涵顶进的过程中，箱涵和路基的摩擦力使路基产生位移，尤其是在箱涵将推出路基的时候，随着顶力和摩阻力的增大，出口处的路基很容易被推裂或移动。

从图 13 可以看出，箱涵上部 5 m 范围的水平位移较大，而箱涵底部以下 6 m 范围也有 10 mm 左

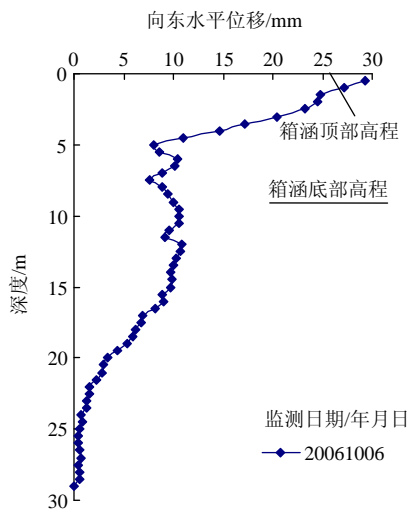


图 13 CX01 测斜孔深部土体水平位移监测成果

Fig.13 Monitoring results of horizontal displacement of deep soil in bore CX01

右的位移，这与当时南箱涵处于“扎头”状态有关，箱涵顶进对底板以下的影响范围随着南箱涵的“扎头”状态而扩大。

从箱涵顶进的进度来看，2006 年 10 月 7~8 日进度约为 1.3 m/d，略大于前几日的进度(1.0~1.1 m/d)，进度的加快对路面东侧 X16~X20 测点向东位移速率的增加起一定作用。

4.4 施工效果分析

由于管棚、滑行轨道没能发挥应有作用，加上缺少泥浆润滑系统，使得地表沉降和水平位移很大，对路面已造成破坏，高速公路不得不实行交通管制(见图 14)。



(a)



(b)

图 14 高速公路实行交通管制
Fig.14 Traffic control on expressway

箱涵的姿态控制效果不理想。原设计中以水平钢管或钢筋混凝土管作为滑行轨道，后改为全断面素混凝土滑板。即便如此，南 1 箱涵仍然出现了较大“扎头”现象而不能得到纠偏，前端最终下沉达 1 208.8 mm，以至于不得不紧急调整道路纵坡，以满足将来车辆出口时的高度需求，后续箱涵顶进施工也相应做出调整。南箱涵向南偏 66~246 mm，北箱涵向南偏 115~212 mm，各节箱涵轴线累计偏移量均超过中线偏差 30 mm 的控制标准。施工期间降水措施和效果满足设计要求。

5 结 论

顶进法已成为增加公路下穿式立交通道的一种主要施工工艺,并被逐步被推广应用。在以往国内箱涵顶进工程中,涉及现场监测的文献和分析一般围绕影响区域的沉降来进行,在郑开大道箱涵顶进工程中引入水平位移进行分析,是一种有益的尝试。通过结合工程地层条件和施工情况,全面、系统地分析了箱涵顶进过程中箱涵本身和周边环境的监测信息,总结了大型超宽箱涵下穿高速公路顶进施工的若干规律性成果,并与其他有代表性的箱涵顶进工程进行比较分析,为今后类似工程积累经验。

参考文献(References):

- [1] 饶为国. 管棚-大断面箱涵暗顶技术在下穿公路工程中的应用及分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(4): 106-111.(RAO Weiguo. Application and analysis of fore poling and large-section box culvert jacking for underpass highway construction[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4): 106-111.(in Chinese))
- [2] 张贵婷, 张 宏. 郑开大道顶进箱涵施工设计研究[J]. 公路, 2007, (6): 38-41.(ZHANG Guiting, ZHANG Hong. Design and research on box culvert jacking in Zhengzhou-Kaifeng City access project[J]. Highway, 2007, (6): 38-41.(in Chinese))
- [3] 李名淦, 周江天, 岑 冈. 下穿机场跑道管幕法箱涵顶进的变形规律研究[J]. 特种结构, 2006, 23(2): 78-80, 94.(LI Minggan, ZHOU Jiangtian, CEN Gang. Study on deformation rules of culvert box jacking in pipe-roof under aircraft runway[J]. Special Structures, 2006, 23(2): 78-80, 94.(in Chinese))
- [4] 陈佑新. 飞机滑行道下的长大箱涵顶进技术[J]. 建筑科学, 2007, 23(7): 94-97.(CHEN Youxin. Long and large section box-culvert jacking technology beneath aircraft taxiways[J]. Building Science, 2007, 23(7): 94-97.(in Chinese))
- [5] 夏才初, 龚建伍, 陈佑新. 滑行道下超长管棚-箱涵顶进地表沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 696-703.(XIA Caichu, GONG Jianwu, CHEN Youxin, et al. Analysis of ground settlements of over-length pile and box culvert advancing under airport taxiway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 696-703.(in Chinese))
- [6] 肖世国, 朱合华, 夏才初, 等. 管幕内顶进箱涵顶部管幕承载作用的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3355-3359.(XIA Shiguo, ZHU Hehua, XIA Caichu, et al. Support effect analysis of upper pipe-roof during a box culvert being pushed within pipe-roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3355-3359.(in Chinese))
- [7] 肖世国, 夏才初, 朱合华, 等. 管幕内箱涵顶进中顶部管幕竖向变形预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1887-1892.(XIAO Shiguo, XIA Caichu, ZHU Hehua, et al. Vertical deformation prediction on upper pipe-roof during a box culvert being pushed within a pipe-roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1887-1892.(in Chinese))
- [8] 孙 钧, 虞兴福, 孙 旻, 等. 超大型“管幕-箱涵”顶进施工土体变形的分析与预测[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1021-1027.(SUN Jun, YU Xingfu, SUN Min, et al. Analysis and prediction on soft ground deformation of a super-large shallow buried “pipe-roofing and box-culvert” jacking project under construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1021-1027.(in Chinese))
- [9] 李向阳, 夏才初, 李晓军, 等. 软土地层管幕内大断面箱涵顶进姿态控制[J]. 岩土工程界, 2006, 9(2): 65-68.(LI Xiangyang, XIA Caichu, LI Xiaojun, et al. Attitude control of culvert box advanced in pipe-roof in saturated soft soil layer[J]. Geotechnical Engineering World, 2006, 9(2): 65-68.(in Chinese))
- [10] 赵士恒. 箱形立交桥顶进施工过程中的高程控制[J]. 铁道建筑, 2006, (5): 23-24.(ZHAO Shiheng. Control of elevation of box-shaped structure during its jacking[J]. Railway Engineering, 2006, (5): 23-24.(in Chinese))
- [11] 向昌平. 大断面箱涵单端超长顶进监控量测技术的研究[J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版), 2008, 21(1): 102-104.(XIANG Changping. The monitoring technique of large cross-section box culvert during extra long distance jacking[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute(Natural Science), 2008, 21(1): 102-104.(in Chinese))
- [12] 王 雪, 李九红, 王德法. 箱涵顶进工程施工对地表变形的影响因素及控制[J]. 电网与清洁能源, 2007, (7): 59-61.(WANG Xue, LI Jiuhong, WANG Defa. Discussion on effects of culvert box advancing construction on epidermal deformation and the control measures[J]. Power System and Clean Energy, 2007, (7): 59-61.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组. GJ120-99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 4-10.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ120-99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavation[S]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1999: 4-10.(in Chinese))
- [14] 二滩水电开发有限责任公司. 岩土工程安全监测手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(Ertan Hydropower Development Company, Ltd.. Security monitoring manual for geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [15] 王春生, 任文峰, 冯忠居, 等. 梅河高速公路特长箱涵顶进施工监控技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, (6): 42-43.(WANG Chunsheng, REN Wenfeng, FENG Zhongju, et al. Study on monitoring technology of overlong box culvert jacking in Meihe expressway[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2006, (6): 42-43.(in Chinese))