

大型箱涵顶管法在城市防洪排涝工程穿堤建筑中的应用

覃立宁¹, 周世武¹, 李森源¹

(1. 广西珠委南宁勘测设计院, 广西壮族自治区, 南宁市, 530007)

摘要: 随着我国城镇化进程的不断发展, 区域汇流条件及内涝洪水调蓄容积的变化, 很多城区已建泵站洪水抽排能力已经不能满足现代城市发展的需要, 在防洪排涝泵站扩容改造工程中, 大孔径穿堤排水通道的需求越发凸显。大型箱涵顶管法穿堤方案具有大流量排泄洪水, 能提供稳定的洞内流态, 无需大面积开挖已建堤防, 实施周期短, 能够有效保障改造施工期城区防洪安全等优势。通过堤身加固灌浆及管棚支撑, 优化顶进箱涵断面, 采用合理的摩阻力控制措施及有效的堤身沉降控制措施, 使大型箱涵顶管法成为城市防洪排涝工程穿堤建筑改造中的一个重要的推荐方案。

关键词: 大型箱涵; 顶管法; 穿堤防; 防洪排涝工程; 沉降控制

中图分类号: **文献标识码:** A

1 大型箱涵顶管法穿堤应用背景

目前在水利及市政雨污排水行业中使用的顶管集中于3m口径以下^{[1][2]}的中小直径钢管及混凝土管, 一些小型的市政顶管还可以使用拖拽式施工方法。大直径、大尺度的大型箱涵顶管法穿堤建筑物少有研究。而大型箱涵在排涝工程中大量排泄洪水的优势, 是多孔中小口径组合管道所不能比拟的, 它为稳定的洞内流态提供必要条件, 保证在排泄洪水过程中不出现明满流交替的流态^[3]。

2 大型箱涵顶管法穿堤实施难点

与目前市政工程中的中小直径钢管、混凝土管顶进方案不同, 大型箱涵顶管穿堤工程会遇到以下设计及实施难点:

- (1) 顶进箱涵穿越防洪堤, 为了保证建成区的防洪安全, 对堤防沉降控制及防渗透控制要求高。
- (2) 大型箱涵自重大, 工作面大, 顶进施工对堤身土体扰动大, 对堤身稳定安全的保证率要求高。
- (3) 顶进大型箱涵所需的顶推力大, 受堤防区域地形限制, 难以实现双向顶进, 对顶推后背墙的设计要求高。在顶进过程中, 减小摩阻力措施要求高。
- (4) 大顶推力下大型箱涵受力传导平衡问题需要重视。

3 大型箱涵顶管法穿堤技术应用

大型箱涵顶管法穿堤技术应用以崩冲泵站扩容改造工程为例, 对箱涵顶管穿堤设计方案进行论述。崩冲泵站的概况: 崩冲泵站总装机容量2000kW, 设计抽排流量 $19.8\text{m}^3/\text{s}$, 设计自排流量 $51.7\text{m}^3/\text{s}$, 泵站主要建筑物等级为3级。

崩冲穿堤排涝箱涵设计外口断面尺寸为 $4.4\text{m (B)} \times 5.4\text{m (H)}$, 穿堤防段总长28.12m, 分两段同一方向渐次顶进, 设计方案及实施流程如表1所示。

收稿日期:

作者简介: 覃立宁 (1981-), 男, 广西合山, 高级工程师, 硕士生, 主要从事水工结构设计工作。E_mail: 34620441@qq.com

表 1 大型箱涵穿堤防顶进流程

序号	大型箱涵穿堤防顶进流程	要点
1		1、顶管段堤防渗透及稳定评价 2、顶管段堤防堤身加固
2		1、群桩后背墙制作 2、高平整度工作井制作 3、顶进段堤防管棚支撑
3		1、高强度防裂大型箱涵制作 2、设置润滑隔离层 3、水平分隔板钢刀角制作
4		1、大型箱涵顶进作业 2、顶进段堤防裂缝沉降监测 3、箱涵顶进误差控制监测
5		1、大型箱涵接缝防渗漏处理 2、顶进作业后堤防加固处理 3、拆除后背墙及附属结构

3.1 顶管段堤防土体、堤顶道路路基加固及支护

崩冲穿防洪堤段箱涵顶部覆土厚度约 6.5m，顶进长度 28.12 米，根据堤防安全稳定评价及深土洞土体应力分析评价，原则上箱涵顶进不会对堤身结构稳定造成影响。为进一步提高堤身稳定的保证率，防止堤身土体徐变、坍塌、断裂、沉降等现象发生，确保防洪堤及堤顶防汛抢险道路安全，在箱涵顶进实施前，采用灌浆加固土体及管棚支护措施对拟顶进箱涵的顶部土体进行加固处理。为了提高管棚承载能力，加强支撑结构的抗弯性、抗震动性及抗扰动性能，对支撑管棚进行灌浆处理，使管棚能有效支撑局部散落土体。除此之外，管棚还可以隔离上部土体与箱涵，避免土体在箱涵顶进过程中随箱涵一起移动。



图 1 崩冲顶进箱涵管棚示意图

设计要点：通过堤身加固灌浆及管棚支撑，能够保证顶推箱涵上部土体的稳定性，在不中断堤顶道路交通的前提下，避免土体坍塌。管棚工艺实施难点是：管棚牵拉钻孔钻进角度控制，避免管棚倾入箱涵顶进路径。

3.2 顶进箱涵的选型

大型箱涵顶进，本质上来说就是一个深土洞开挖土体应力的重分布问题^[4]。目前，顶管施工中顶进阻力 F_p 常用规程算法^[5]如（1）式所示。

$$F_p = \pi D_0 L f_k + N_F \quad (1)$$

式中： F_p 为顶进阻力； D_0 为管道外径； L 为顶进长度； f_k 为管道外壁与土的单位面积平均摩阻力； N_F 为顶管机的迎面阻力。该计算方法基于触变泥浆稳定技术，适用于四周摩阻系数均一致的圆形管道顶进阻力计算，对于土拱效应作用下，采用箱涵润滑隔离层措施后，箱涵上表面、底板及侧面等不同作用面摩阻系数的差异不能很好的反映。摩阻系数 f 是顶推力计算的敏感值，它不仅反映了箱涵各个面层与土体的摩擦情况，还包含顶进作业中，箱涵“扎头”、“抬头”、偏移、倾斜所引起的阻抗和挖土不善、调偏预挖所产生的影响。崩冲大型箱涵顶进采用土拱效应折减顶推力算法^[6]进行箱涵最大顶推力 P_{max} 计算，并以此为依据，进行顶推箱涵选型。

$$P_{max} = K[N_1 f_1 + (N_1 + N_2) f_2 + 2E \cdot f_2 + R \cdot A] \quad (2)$$

式中： P_{max} 为最大顶力； N_1 为箱涵顶上荷载； f_1 为箱涵顶上表面与荷重摩阻系数； N_2 为箱涵自重； f_2 为箱涵底板与基底摩阻系数； f_3 为侧面摩阻系数； E 为箱涵两侧土压力； R 为钢刃角正面阻力； A 为钢刃角正面积。土拱效应卸载作用计算如（3）式。

$$q = \frac{4}{3} a \cdot h \cdot \gamma = \frac{4 a^2 \gamma}{3 f_{kp}} \quad (3)$$

$$h = a / f_{kp} \quad (4)$$

$$a = b + h_t \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \quad (5)$$

式中： f_{kp} 为箱涵顶部堤身土体的坚固性系数； γ 为土体容重； ϕ 为土体内摩擦角。

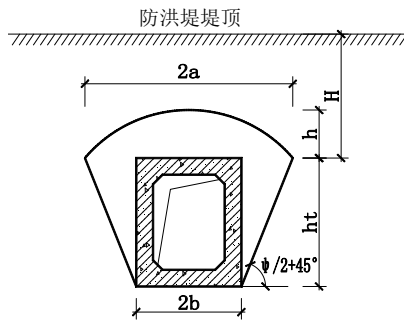


图2 土拱卸载效应计算示意图

在箱涵顶部覆土厚度不大的情况下，箱涵顶部竖向土压力按土柱实际重量计算，由于堤身土体压实较为密实，且箱涵顶部覆土层较厚，需考虑卸荷拱的顶托作用带来的竖向荷载折减，当 H 大于 2 倍卸荷拱高度 h 时，卸荷拱作用明显，可以相对准确的计算出大型箱涵顶进作业的顶推力。崩冲箱涵选型，各高宽比箱涵断面所需的顶进作业顶推力计算见表 2。

表 2 各高宽比箱涵断面所需顶推力汇总

箱涵外口尺寸(m)	高宽比	土拱效应顶推力算法	
		规程顶推力算法(kN)	(kN)
H 涵=4.4	0.815	31260	18070
B 涵=5.4			
H 涵=4.9	1.000	25570	15220
B 涵=4.9			
H 涵=5.4	1.227	20640	12510
B 涵=4.4			

依据上述分析并结合实际顶推实施效果可知，堤身土体卸载拱的作用较为明显。土拱跨度越小，在减小顶力的同时，土体坍塌的风险就越小。在过流断面一致的前提下，小高宽比箱涵断面比大高宽比箱涵对顶推力的要求更大一些，合理的顶推力计算有益于后背顶推墙的设计及实施。同时，大高宽比箱涵更利于满足大流量无压过流断面的选型要求。

另外，为了保证箱涵能够承受最大顶推力，在箱涵的结构设计及配筋上需实行高标准要求^[7]。崩冲顶进箱涵采用的混凝土标号为C40，配筋较大，保证箱涵在行进过程中是一个绝对的刚性体，并在箱涵内侧使用 $\Phi 10@100$ 的钢筋格栅网片进行防裂处理，避免箱涵顶推过程中由于局部受力不均导致构件局部破坏向整体结构失效延展。为了防止顶进过程中出现“扎头”现象，在预制箱体时在箱底前端50cm长度范围内按5%船头坡造型做成头高尾低的坡度形式，以便顶进时将高出箱涵底的土体压入箱底，增强涵底土层承载能力，防止“扎头”。

设计要点：大型顶进箱涵宜使用大高宽比断面，可以有效减小顶推力。大型箱涵设计过程需考虑箱涵断面的刚度，避免箱涵在顶推过程中受力变形而无法承载箱涵侧向被动土压力，从而进一步加剧箱涵周边土体损失，进而导致防洪堤堤身沉降的加剧。顶进作业需做好箱涵行进过程中的防裂措施，依据防洪堤沉降监测数据，及时对箱涵周边土体进行补压浆加固处理，避免堤身沉降及裂缝扩展。

3.3 箱涵顶进润滑剂的使用

箱涵顶进过程中的抗摩阻力措施是顶进箱涵能否顺利实施的一个关键性问题。为防止预制箱涵与工作井滑板粘结造成启动困难，在箱涵四周设置润滑隔离层。经过多方案比对，崩冲顶进箱涵隔离层做法是：加热石蜡至150℃，掺入一定比例（掺入量按石蜡的15%确定）的废机油，均匀浇洒在箱涵四周并刮平，待掺机油石蜡凝固后，在其表面撒一层0.2~1.0mm厚度的滑石粉，覆上塑料薄膜进行保护。在工作井底板隔离层做好后，绑扎钢筋、立模浇筑箱涵。为了在箱涵顶进过程中有效的稳固掌子面，在箱涵前端焊接水平分隔板钢刃角分割土体。



图3 箱涵润滑隔离层设置示意图

设计要点：润滑隔离层的设置可以有效降低行进摩阻系数。

3.4 工作井及顶推后背墙的设计

为了最大限度的减小摩阻力，工作井箱涵行进面要求最大限度的平整光滑，不能有波浪起伏，为了解决工作井滑板的平整度问题，满足箱涵顶进启动要求，工作井行进路径区域每2m长度范围内凹凸误差不能超过3mm。对箱涵顶进后背墙的设计，受堤防段地形限制，不能双向顶进，崩冲后背墙使用的是群桩叠加后背

土体方案提供后背顶力。顶推后背墙布置 13 条直径 1.5m 的混凝土灌注桩做为后背支撑，后背墙能够提供 15000kN 的后背顶力。

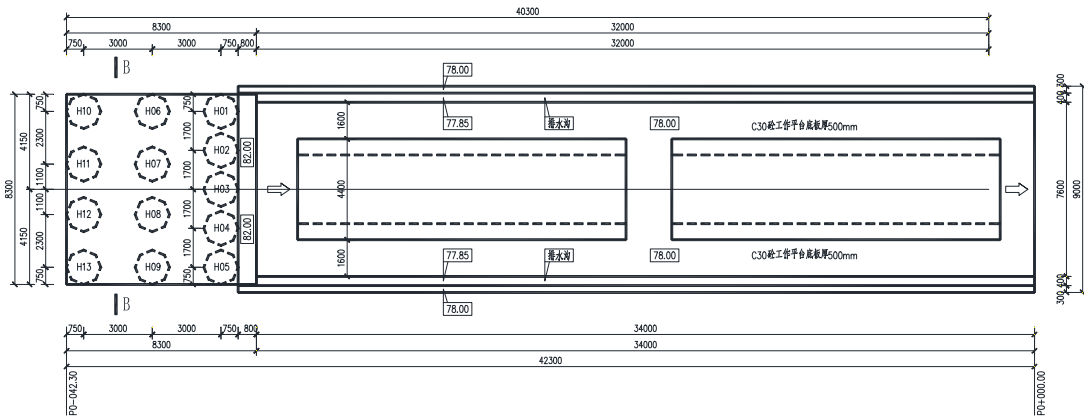


图 4 崩冲顶进箱涵后背墙群桩平面布置示意图

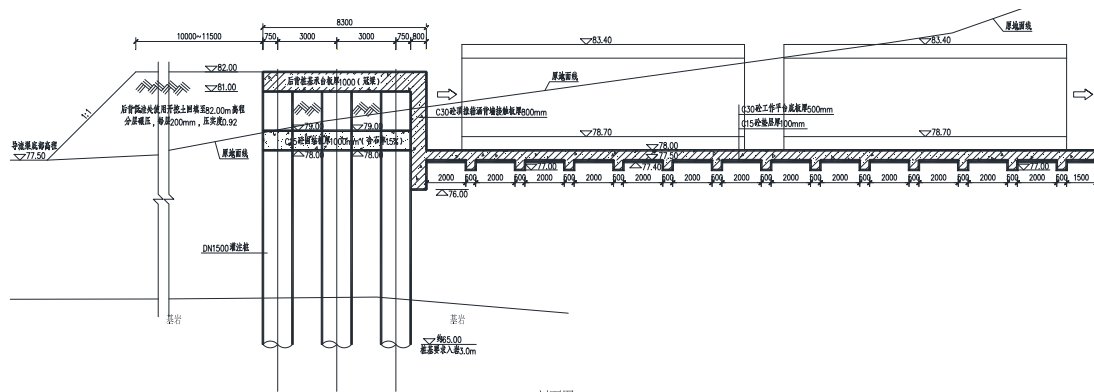


图 5 崩冲顶进箱涵后背墙群桩剖面示意图

设计要点：工作井滑板的平整度问题是大型箱涵顶进能否顺利实施的关键问题，可以采用钢抹压光，自流平或其他工艺控制工作井箱涵行进面的平整度。

3.5 大型箱涵顶进设计

箱涵顶进水平轴线允许偏差 $<50\text{mm}$ ，箱涵内底高程允许偏差 $<30\text{mm}$ 。避免顶进时箱涵出现超标准“扎头”、“抬头”、偏移、倾斜等现象。因为箱涵所穿越的土层主要为堤身素填土层，顶进时有可能出现箱涵底的土体跟随箱涵滑动的现象，这种情况较难处理。为了防止此类情况的发生，必要时可在顶进过程中的箱涵前端铺设滑板。顶进过程中的滑板铺设采用预开挖、预绑扎钢筋网、现浇混凝土的设置方案。

在箱涵顶推过程中，为了尽量的减小土体位移空间，防止堤身沉降引起堤身裂缝的产生，不主张施工超挖。在局部需调整顶进误差，控制顶进方向时，会有少量的调整型引导开挖。顶管速度的控制，一般控制在每天 1.5~2.5 米的速度推进，中间不宜间断，需做好备用设备保障，编制应急预案保证顶进进度及穿堤施工安全。

设计要点：顶进摩擦系数取值要力求恰当，避免造成土体和箱涵一起位移的深层滑动，导致堤防箱涵顶进出口土体挤压坍塌事故的发生。滑板施工的关键是保证滑板顶面平整，保证滑板的强度、刚度，确保其在施工期间不变形、不移位。

3.6 堤防沉降控制及防渗加固处理

在做好顶管段堤身土体、堤顶道路路基加固及支护措施前提下，沿箱涵顶进线路及土体 45° 扩散角范围内布置堤顶沉降控制监测点，提前掌握顶进过程中堤身各项变形参数变化情况。其次，要做好地面交通的疏导，在薄弱地段，必要的时候还可以架设贝雷桥进行临时通车，保证顶管上方不要有过大的附加荷载。

堤身土体沉降采用 Peck 提出的土体损失产生的地面（防洪堤顶面）沉降槽原理进行分析计算^[8]：

$$S(x) = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (6)$$

$$S_{\max} = \frac{V_{\text{loss}}}{\sqrt{2\pi}i} \quad (7)$$

$$i = \frac{h}{\sqrt{2\pi} \tan(45^\circ - \phi/2)} \quad (8)$$

式中： $S(x)$ 为行进路线 x 处堤顶沉降值； S_{\max} 为堤顶最大沉降值； V_{loss} 为顶管单位长度土体损失量； i 为沉降槽宽度系数； ϕ 为土层内摩擦角。

由于崩冲采用小型机械预挖掘进后顶推的模式进行大型箱涵的顶推作业，土体损失率取值 2.5%，依据公式（7）进行分析计算，顶管穿越堤防阶段最大堤身沉降量为 $S_{\max}=16.7\text{mm}$ ，沉降量对比小口径管道顶推产生的土体沉降要大。

顶进箱涵作业完成后必须及时进行回填灌浆处理加固堤防。顶进箱涵施工，对土体的扰动比较大，叠加滑板铺设的局部施工超挖，控制局部顶进误差的调整型引导开挖，若不及时回填灌浆固结，土体徐变将导致堤防产生新的渗漏通道，威胁堤防安全。因此，除了加强顶推过程中箱涵周边土体的补压浆加固处理，箱涵顶进作业后堤防防渗充填加固处理须做到系统周密无遗漏。

为了减小堤防加固灌浆引起的箱涵侧周土体加固沉降或变形隆起，需合理安排灌浆次序，设置合理的灌浆压力，减小堤身土体的扰动，避免出现较大范围的土体二次应力重分布。崩冲顶进作业后堤防防渗加固处理采用从箱涵内预埋管向土体注浆的方案，施工次序为遵循先下后上，先下游后上游，分序跳孔灌浆，避免堤身土体由于扰动产生塑性变形，减小固结沉降的发生。经过有效沉降控制措施，根据最终堤防沉降观测数据显示，崩冲大型箱涵顶进施工完成后，堤身最大沉降量为 19.2mm，与前期计算分析结果基本相符。

崩冲顶进箱涵通过箱涵预埋管灌浆充填加固顶进路径周边堤身土体。

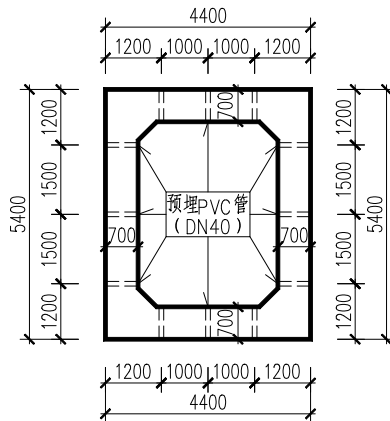


图6 崩冲顶进箱涵预埋梅花形布置灌浆管示意图

设计要点：顶进作业完成后，及时分序回填固结灌浆，可以避免土体扰动塑性变形，减小固结沉降的发生。

4 结论

(1) 通过堤身加固灌浆及管棚支撑，能够很好的保证顶推箱涵上部土体的稳定性。钢管顶棚灌浆处理，可以形成一个高强度支撑构件。

(2) 大型顶进箱涵宜使用大高宽比断面，润滑隔离层的设置可以有效降低行进摩擦系数。

(3) 顶管速度的控制,一般控制在每天 1.5~2.5 米的速度推进,中间不宜间断,需编制应急预案保证顶进进度及穿堤施工安全。

(4) 顶进过程中的箱涵前端铺设滑板可以避免摩阻力过大,造成土体和箱涵一起位移的深层滑动现象,避免堤防箱涵顶进出口土体挤压坍塌事故的发生。

(5) 顶进箱涵作业实施后,通过及时对箱涵周边土体充填灌浆等加固处理,能够很好的避免大型箱涵顶进施工后堤防沉降及堤身裂缝的产生,避免在顶进箱涵周边形成渗漏通道,确保穿堤箱涵的防渗满足要求,使箱涵与防洪堤融为一体,充分发挥大型箱涵大流量排泄城区洪水的作用。

参 考 文 献:

- [1] 梁级,康卫国,颜佩君,刘平.大直径雨水管顶管及曲线顶管施工技术[J],城市道桥与防洪,2005(06):98-101.
- [2] 崔龙飞.大直径钢顶管穿越长江大堤设计与施工问题分析[J],给水排水2020(1):109-114.
- [3] SL 279-2016 水工隧洞设计规范[S].
- [4] 张海丰,马保松,王福芝.被动土拱效应对土压力计匹配误差的影响[J],岩土工程学报,2016(2):350-354.
- [5] GB50268-2008 给水排水管道施工及验收规范[S].
- [6] 冯卫星,王克丽.地道桥设计与施工[M].
- [7] 中国非开挖技术协会.顶管施工技术及验收规范(试行)[S].
- [8] 魏刚,吴华君,陈春来.顶管施工中土体损失引起的沉降预测[J],岩土力学,2007(28):359-363.

Pipe-jacking technique for large box culvert in dike-crossing construction of urban flood protection and water logging drainage project

QIN Lining¹,ZHOU Shiwu¹,LI Senyuan¹

(1.GUANGXI PEARL RIVER WATER RESOURCES COMMISSION NANNING SURVER & DESIGN
INSTITUTE, Guangxi Nanning 530007,China)

Abstract: With the development of urbanization and the change of regional confluence and flood storage capacity, pumping and drainage capacity of existing pump stations could not meet the need of modern city development. Large caliber dike-crossing pipe becomes increasingly important in extended reconstruction of pump station for flood control and drainage. Pipe-jacking for large box culvert is the most recommended dike-crossing technique in urban flood protection and water logging drainage project, which could avoid large-scale excavation, shorten the construction time, and keep security of urban flood control during construction period.

Keywords: Large box culvert; Pipe-jacking technique; Dike-crossing; Flood protection and water logging drainage project; Settlement control

作者简介：覃立宁（1981-），男，广西合山，高级工程师，硕士生，主要从事水工结构设计工作。

E_mail:34620441@qq.com

详细通信地址：广西壮族自治区南宁市西乡塘区相思湖东路8号西江局，邮编：530007

电话：13878168106