

文章编号: 1671-6833(2015)06-0104-05

下穿立交储水管道模型建立及力学分析

张洪亮¹, 孙 培¹, 谢定文²

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 四川省蓝地设计规划设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 为改善我国下穿立交积水现状, 提出在排水系统中增加储水管道的设计方案. 基于交通荷载作用下的管-土力学模型, 建立储水管道仿真模型, 并采用有限元方法分析该仿真模型, 对储水管道进行配筋验算, 同时分析储水管道各参数对其力学特性的影响. 研究表明: 该仿真模型是可行的; 储水管道埋土深度、土基模量、管壁厚度、管道直径等管道参数对其力学特性影响显著. 结合研究结果, 推荐储水管道埋土深度 1.5 m, 底部土基模量 40 MPa, 管壁厚度 10 cm, 管道直径 1 200 mm.

关键词: 道路工程; 下穿立交; 排水系统; 储水管道; 力学特性

中图分类号: TU992.24 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.06.021

0 引言

近几年, 国内下穿立交积水已然成为引发城市内涝的主要原因. 国内外下穿立交多采用暗式泵站进行抽升排水^[1]. 国外下穿立交排水系统的主要组成部分有雨水存储系统、雨水收集系统和排水泵站^[2-4]. 其中, 利用雨水存储系统来控制雨水径流的方法被广泛采用. Peter^[5]通过研究泵站的存储系统, 推导出存储管道和集水池的合适尺寸及位置. Gentry 等^[6]提出了一种估算小型集水区存储系统蓄水容积的简化方法. 另外《AASHTO 排水设计指南》中也详细介绍了雨水存储系统^[7]. 高雪香等^[8]提出在引道以外的路面设置反向坡, 通过自流排水排除此区域内的雨水. 冯启军^[9]提出在下穿立交的最低点处设置不同数量的进水口. 范君等^[10]提议将多篦集水井设置在立交最低处, 就近流入泵站集水池.

国内下穿立交未设置专门的储水管道, 这是导致国内下穿立交积水的主要原因之一. 一旦管道在荷载作用下的变形超过容许变形值, 管道易产生裂缝、渗漏等病害. 笔者借鉴国外的立交排水系统, 对下穿立交储水管道进行力学分析与设计.

1 交通荷载作用下储水管道模型

1.1 交通荷载作用下管-土力学模型

1.1.1 交通荷载模型

进行仿真模拟时, 由于均布荷载建模简单^[11], 所以很多学者将交通荷载等效简化为均布荷载. 但是这种简单化难以准确模拟实际的使用情况, 会影响模拟结果的精确性.

车辆在储水管道上方行驶, 实际上是以一定的间距和速度通过的. 为了准确地模拟实际情况, 拟定公路-I级和公路-II级作为新的车辆荷载标准, 以代替原来的汽车-超20级和汽车-20级标准车辆荷载, 如表1所示.

1.1.2 土基模型

对土基模型进行模拟时, 一般需从塑性和弹性两个方面来考虑. 线弹性模型的计算相对简单, 只需要材料的泊松比和弹性模量两个参数; 而弹塑性模型则相对复杂些, 但是更符合土基的实际情况^[12]. 由于研究的是在交通荷载作用下土基中储水管道的力学特性, 重点在于模拟车辆荷载及分析土基中储水管道的力学特性, 故可将土基简化为线弹性模型.

1.1.3 管-土相互作用模型

储水管道与地基土体间的相互作用十分复

收稿日期: 2015-06-20; 修订日期: 2015-09-10

基金项目: 陕西省交通科技项目(13-01K)

作者简介: 张洪亮(1974—), 男, 山东山亭人, 长安大学教授, 博士, 主要从事道路工程研究, E-mail: 631808674@qq.com.

杂,可将二者视为一个耦合系统.通过简化储水管道和地基土体相互间的作用,将管土接触面之间的相互作用分解为法向和切向,同时对法向和切向上管土间的接触性状进行了定义^[13]:①法向考

虑储水管道和地基土体的竖向变形可能不一致,定义管土节点间接触后允许互相分离;②切向考虑土体和储水管道间的摩擦力,定义管土节点间接触后不会发生滑移.

表1 各级公路的汽车荷载等级

Tab.1 Rates of vehicle load on all levels of road

公路等级	高速公路	一级公路	二级公路	三级公路	四级公路
汽车荷载等级	公路-I级 汽车-超20级	公路-I级 汽车-超20级	公路-II级 汽车-20级	公路-II级 汽车-20级	公路-II级 汽车-20级

1.2 储水管道仿真模型

1.2.1 基本假设

(1) 切向上假定管土节点接触后不发生滑移,发生接触的管土节点容许相互分离.

(2) 采用汽车车队荷载,同时不考虑湿度、温度和地下水等对储水管道的影响.

(3) 假定钢筋规则地成环状排列,并且与混凝土完全粘结;混凝土各向同性;路面各结构层为各向同性、均匀连续弹性体.

(4) 面层、基层和土基间充分接触,并且相互之间不存在摩擦力.

(5) 考虑路面结构自重以及储水管道自重.

1.2.2 仿真模型基本参数

(1) 模型尺寸.考虑到地基土体为无限空间体,建模时可以依据实际尺寸进行建模.选取地基三维固体有限元计算模型参数如下:长140 m,宽6 m,高度最高处11.5 m,最低处8 m,路面纵坡取2.5%.采用三维固体模型模拟管道,各项参数如下:长140 m,壁厚100 mm,直径1 200 mm,埋土深度1.5 m.我国《室外排水设计规范》规定雨水管道最小设计坡度为:塑料管道0.2%,其他管道0.3%,故本文储水管道设计坡度取0.3%.管道基础长140 m,宽2.3 m,厚0.1 m.

(2) 边界条件.定义自由边为离路肩边缘较近的侧面,地底部、两端面以及管道两端为固支,并且将其视为储水管道的固支边界条件.

(3) 荷载条件.采用1.1.1节中选定的汽车车队荷载.根据规范中的标准选用相应大小的荷载以及正方形轮印,每个轮胎的尺寸近似为19 cm×19 cm,轮胎间距为34 cm,每辆车的轮距均为180 cm.

(4) 网格划分.采用Abaqus软件进行分析,选用Abaqus/Standard模块.对道路结构和地基进行网格划分时,均采用八节点线性减缩积分三维应力单元,管道的单元尺寸为0.12 m,地基和路面结构单元尺寸为1 m.

1.2.3 模型计算结果分析

基本参数如下:①选用混凝土储水管道,弹性模量 $E_1 = 3.0 \times 10^4$ MPa,泊松比 $\lambda_1 = 0.15$,热膨胀系数 $= 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,密度 $\rho_1 = 2\,400$ kg/m³;②沥青混凝土面层厚度18 cm,弹性模量 $E_2 = 1.5 \times 10^3$ MPa,泊松比 $\lambda_2 = 0.25$,密度 $\rho_2 = 2\,000$ kg/m³;③水泥稳定碎石基层厚度40 cm,收缩开裂后弹性模量 $E_3 = 800$ MPa,泊松比 $\lambda_3 = 0.3$,密度 $\rho_3 = 2\,100$ kg/m³;④底基层厚度20 cm,弹性模量 $E_4 = 200$ MPa,泊松比 $\lambda_4 = 0.3$,密度 $\rho_4 = 1\,900$ kg/m³;⑤地基土的变形模量 $E_5 = 40$ MPa,泊松比 $\lambda_5 = 0.4$,密度 $\rho_5 = 1\,800$ kg/m³;⑥管道基础为C8混凝土,变形模量 $E_6 = 12\,000$ MPa,泊松比 $\lambda_6 = 0.2$,密度 $\rho_6 = 2\,100$ kg/m³.在车队荷载作用下管道应力、横向位移和竖向位移计算结果分别如图1所示.

1.2.4 储水管道配筋计算

(1) 计算参数.储水管道内径 $d = 1\,200$ mm,外径 $D = 1\,400$ mm;储水管道壁厚 $t = 100$ mm;埋土深度 $H = 1\,500$ mm;填土容重 $\gamma_1 = 18.00$ kN/m³;混凝土强度为C25;管节长度 $L = 1\,000$ mm;钢筋强度等级为R235;钢筋保护层厚度为25 mm;现拟在该储水管道中布设 $\phi 10@100$ mm受力钢筋.

(2) 荷载计算.基于钢筋等效原则,建立钢筋混凝土储水管道模型.对仿真模型计算结果进行分析,得知正常使用极限状态组合下管顶处的最大应力为0.080 7 MPa,最大弯矩值 M_k 为4.77 kN·m;承载能力极限状态组合下管顶处最大应力为0.144 6 MPa,最大弯矩 M_{ud} 为8.54 kN·m.

(3) 强度验算.由《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)查得R235钢筋的弹性模量 $E_s = 2.1 \times 10^5$ MPa,R235钢筋的抗拉强度设计值 $f_{sd} = 195$ MPa,C25混凝土的轴心抗压强度设计值 $f_{cd} = 11.5$ MPa,构件的正截面相对界限受压区高度 $\xi_b = 0.62$.

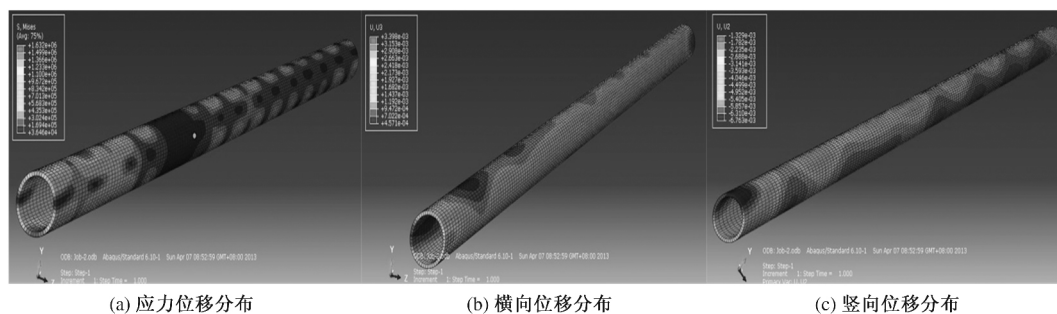


图1 管道应力、横向位移和竖向位移分布

Fig. 1 Stress distribution, lateral displacement distribution and vertical displacement distribution of storage pipe

由于在管节处要预留 10 mm 的接缝宽度,所以实际管节长度为 $1\,000 - 10 = 990$ (mm). 其截面强度应满足公式(1)~(3)的要求.

$$f_{cd}bx = f_{sd}A_s \quad (1)$$

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (2)$$

$$\gamma_0 M_{ud} \leq M_u = f_{sd}A_s \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) \quad (3)$$

式中: γ_0 为结构的重要性系数; M_u 为计算截面的抗弯承载力, $\text{kN} \cdot \text{m}$; A_s 为受拉钢筋的截面面积, mm^2 ; x 为按等效矩形应力图计算受压区高度, mm; b 为截面的宽度, mm; h_0 为截面的有效高度, mm.

由公式(1)~(3)计算可得: $x = \frac{f_{sd}A_s}{f_{cd}b} = 195 \times 11 \times 78.5 \div (11.5 \times 990) = 14.8$ (mm), $\xi_b h_0 = 0.62 \times 75 = 46.5$ (mm) $> x = 14.8$ (mm), 所有受压区高度满足验算要求. 又 $h_0 = 75$ mm, $f_{cd}A_s \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) = 11.5 \times 990 \times 24.7 \times (75 - 14.8/2) = 19.01$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$) $> \gamma_0 M_{ud} = 0.9 \times 8.54 = 7.686$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$), 故截面强度满足验算要求.

(4) 裂缝宽度验算公式如下:

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{0.87h_0A_s} \quad (4)$$

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \varphi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (5)$$

式中: ω_{\max} 为按荷载效应标准组合并考虑长期作用影响计算的最大裂缝宽度, mm; α_{cr} 为混凝土构件受力特征系数; φ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数, 当 $\varphi < 0.2$ 时, 取 $\varphi = 0.2$, 当 $\varphi > 1$ 时, 取 $\varphi = 1$; σ_{sk} 为按荷载效应的标准组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉钢筋的应力或预应力混凝土构件纵向受拉钢筋的等效应力, N/mm^2 ; c 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离, mm, 当 $c < 20$ 时, 取 $c = 20$, 当 $c > 65$ 时, 取 c

$= 65$; ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率, 在最大裂缝宽度计算中, 当 $\rho_{te} < 0.01$ 时, 取 $\rho_{te} = 0.01$; d_{eq} 为受拉区纵向钢筋的等效直径, mm.

由《给排水工程管道结构设计规范》(G50332—2002)查得: 对于采用钢筋混凝土结构构件的刚性管道而言, 在组合作用下, 当计算截面处于受弯、大偏心受压或受拉状态时, 截面容许的最大裂缝宽度不能超过 0.2 mm.

根据荷载效应的标准组合计算公式, 得到弯矩值 M_k 为 4.77 $\text{kN} \cdot \text{m}$, 根据公式(4)算出 σ_{sk} 为 84.6 N/mm^2 , 将带入公式(5)即可算出 ω_{\max} 为 0.043 mm < 0.2 mm, 故裂缝宽度满足验算要求.

综上所述, 未配钢筋时储水管道上的最大拉应力超过规范要求. 通过对配筋后的储水管道进行分析, 发现其各项力学指标均满足规范要求.

2 储水管道参数力学分析

2.1 储水管道埋土深度的影响

《室外排水设计规范》(GB50014—2006)中规定布设在行车道下的管道, 其管道最小埋土深度一般不宜小于 0.7 m. 通过查阅资料发现 0.7 m 的埋土深度偏小, 从而导致很多埋地管道出现破坏. 取 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4 m 的埋土深度, 分析埋土深度变化对储水管道应力和位移的影响, 结果见表 2.

由表 2 可知, 储水管道上最大应力、横向位移和竖向位移随着埋土深度的增加而逐渐减小. 当埋土深度从 0.9 m 增加到 2.4 m 时, 最大应力、横向位移和竖向位移分别降低了 37.6%、40.3%、47.4%, 但当埋土深度达到 1.5 m 时, 应力和位移值的变化趋于平缓, 故埋土深度建议采用 1.5 m.

2.2 土基模量的影响

当埋土深度为 1.5 m 时, 取土基模量为 20,

40 60 80 MPa,分析土基模量变化对储水管道应力和位移的影响,结果见表3。

表2 埋土深度对应力和位移的影响

Tab.2 Influence of covering earth thickness on stress and displacement

埋土深度 <i>H</i> /m	最大应力/ MPa	横向位移/ mm	竖向位移/ mm
0.9	0.172 2	1.104	2.274
1.2	0.132 1	0.907	1.642
1.5	0.129 7	0.734	1.332
1.8	0.119 7	0.693	1.257
2.1	0.111 7	0.672	1.220
2.4	0.107 5	0.659	1.196

表3 土基模量对应力和位移的影响

Tab.3 Influence of modulus of soil base on stress and displacement

土基模量 <i>E</i> /MPa	最大应力/ MPa	横向位移/ mm	竖向位移/ mm
20	0.141 2	0.895	1.613
40	0.129 7	0.734	1.332
60	0.117 7	0.682	1.236
80	0.110 9	0.642	1.165

由表3可知,储水管道上最大应力、横向位移和竖向位移随着土基模量的增加而逐渐减小。当土基模量由20 MPa变为80 MPa时,最大应力、横向位移和竖向位移分别降低了21.5%、28.3%、27.8%。在土基模量由20 MPa变到40 MPa时,应力和位移变化较快;而土基模量大于40 MPa后,变化则较平缓,故土基模量建议采用40 MPa。

2.3 储水管道管壁厚度的影响

对管壁厚度为8 9 10 11 12 cm的储水管道进行研究,分析储水管道管壁厚度对储水管道应力和位移的影响,结果见表4。

表4 管壁厚度对应力和位移的影响

Tab.4 Influence of wall thickness of storage pipe on stress and displacement

管壁厚度 <i>t</i> /cm	最大应力/ MPa	横向位移/ mm	竖向位移/ mm
8	0.147 0	0.837	1.579
9	0.141 7	0.801	1.451
10	0.129 7	0.734	1.332
11	0.124 6	0.713	1.293
12	0.110 9	0.681	1.235

由表4可知,储水管道上最大应力、横向位移和竖向位移随着管壁厚度的增加而逐渐减小。可以看出,当储水管道管壁厚度从8 cm变为12 cm

时,应力和位移都逐渐减小,最大应力、横向位移和竖向位移分别降低了45.1%、8.5%、6.7%。而当管壁厚度 ≥ 10 cm时,应力和位移变化均很小,故管壁厚度建议采用10 cm。

2.4 管道直径的影响

当储水管道的直径取1 000 1 200 1 400 1 600 mm时,分析储水管道直径变化对储水管道应力和位移的影响,计算结果见表5。

表5 管道直径对应力和位移的影响

Tab.5 Influence of diameter of storage pipe on stress and displacement

管道直径 <i>d</i> /mm	最大应力/ MPa	横向位移/ mm	竖向位移/ mm
1 000	0.172 3	1.199	2.052
1 200	0.129 7	0.734	1.332
1 400	0.117 1	0.627	1.047
1 600	0.146 4	0.725	1.143

由表5可知,随着管径的增大,应力和位移先减小后增大。当管径为1 400 mm时,最大应力和位移取到最小值;而当管径为1 200 mm时,储水管道的应力和位移与管径为1 400 mm时相差不大。考虑到储水管道的单位重量、施工费用、运输费用和管材价格等因素的影响,建议选用管径为1 200 mm的储水管道。

2.5 储水管道长度设计

借鉴国内外经验,推荐出图2所示的下穿立交排水系统。它由雨水收集系统、雨水存储系统、排水泵站等组成。储水管道和集水池共同构成雨水存储系统,主要作用是削弱洪峰流量。

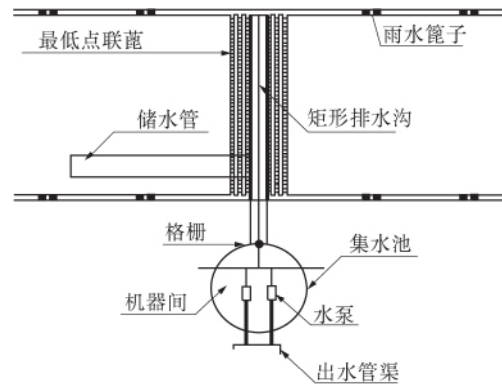


图2 下穿立交排水泵站系统示意图

Fig.2 The schematic diagram of drainage pump station systems in the underpass interchange

为了保证所需的存储容积不超过总的存储容积,有必要确定管道的长度。目前,国外的存储管道主要为直径1 200~1 400 mm。存储的有效库容是存储管道、集水池最高水位以及水泵抽水最低

水位之间所有存储空间的总和,可按式(6)计算储水管道的长度:

$$L = \frac{V_{\text{req}} - V_{\text{cs}} - V_{\text{w}}}{A_s} \quad (6)$$

式中: L 为所需存储单元的总长度, m; V_{req} 为所需最小存储体积, m^3 ; V_{cs} 为收集系统低于允许高水位的容积, m^3 ; V_{w} 为湿井低于允许高水位的容积, m^3 ; A_s 为储水管道横截面面积, m^2 .

通过对以上各参数的分析,推荐的储水管道各参数如下:埋土深度 1.5 m,土基模量 40 MPa,储水管道管壁厚度 10 cm,管道直径 1 200 mm.

3 结论

(1) 基于管-土力学模型建立了储水管道仿真模型,通过对其进行分析,计算出在车队荷载作用下储水管道的应力、横向位移和竖向位移.

(2) 对储水管道进行配筋验算,其结果表明:未配钢筋时,储水管道上的最大拉应力超过了极限拉应力,配筋后则能满足规范要求.

(3) 埋土深度、底部土基模量、管壁厚度、管道直径等管道参数与储水管道力学特性具有良好的对数相关性,本文推荐储水管道参数为埋土深度 1.5 m,底部土基模量 40 MPa,管壁厚度 10 cm,管道直径 1 200 mm.

参考文献:

- [1] 王锋,万芸,陈金锥. 城市道路下穿立交排水优化设计[J]. 交通科技, 2009(4): 78-80.
- [2] CONG Xiangyu, NI Guangheng, HUI Shibo, et al. Simulation of storm waterlogging value of urban interchange bridges [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2006 (2): 13-17.
- [3] 谢定文. 下穿立交排水泵站系统设计[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2013.
- [4] PETER N. Highway storm water pump station design [J]. Hydraulic Engineering Circular, 2001: (24) 1-7.
- [5] 徐飞. 下穿立交排水泵站系统优化设计研究[J]. 道路工程, 2014(2): 154-156.
- [6] 厉晶晶. 雨水收集利用系统关键技术及工程示范研究[D]. 镇江: 江苏大学环境学院, 2010.
- [7] AASHTO. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures [R]. Washington D C: AASHTO, 2002.
- [8] 高雪香,赵铁立,杨其新. 下穿式立交雨水排水系统改进[J]. 四川建筑, 2006, 26(3): 99-100.
- [9] 冯启军. 立交桥下穿引道排水系统研究[D]. 济南: 山东大学土建与水利学院, 2009.
- [10] 范君,崔红梅. 城市下立交雨水排水系统设计[J]. 中国新技术新产品, 2009(12): 88-89.
- [11] 吴小刚. 交通荷载作用下软土地基中管道的受力分析模型研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2004.
- [12] 张士乔,吴小刚. 垂直荷载作用下的管道纵向受力分析模式初探[J]. 中国市政工程, 2001(4): 41-45.
- [13] 张崇文,陈荣,张社荣. 沟埋式大型钢筋混凝土管与土相互作用动力性能的研究[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(4): 24-32.

Model Building and Mechanics Analysis on Storage Pipe of Underpass

ZHANG Hongliang¹, SUN Pei¹, XIE Dingwen²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Sichuan Blue Planning and Design Institute Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to improve the present waterlogging condition of underpass, a scheme of adding a storage pipe in underpass is given. Based on the tube-soil mechanics model, a simulation mechanical model of storage pipe is built, which is analyzed by finite element method. The reinforcement of the storage pipe is calculated, while the influence of parameters on the mechanical property of storage pipe is studied. The test results show that: the covering earth thickness, the soil base modulus, the wall thickness and the diameter have significant influence on mechanical property of storage pipe. According to the research results, a new storage pipe is recommended as follows: covering earth thickness of 1.5 m, soil base modulus of 40 MPa, wall thickness of 10 cm and diameter of 1200 mm.

Key words: road engineering; underpass; drainage system; storage pipe; mechanical property