

考虑位移协调的上埋式圆管涵设计方法

Design method for buried circular tube with consideration of displacement compatibility

魏红卫¹, 张起森²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 长沙交通学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 埋入式圆形涵管上的填土不但是荷载, 也是涵管与土发生作用的介质, 这种特性决定了圆管涵的工作性质。本文考虑了涵管结构与土的位移协调, 提出了相应的涵管设计方法。结合现有规范方法和试验结果的比较分析, 证实了本文方法的合理性。

关键词: 圆管涵; 位移协调; 设计方法

中图分类号: U 442

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)06-0737-05

作者简介: 魏红卫(1966-), 男, 河南汝州人, 工学硕士, 湖南大学博士研究生, 主要从事结构与土共同作用的研究。

WEI Hong-wei¹, ZHANG Qi-sen²

(1. Civil Engineering College, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Changsha Communication College, Changsha 410076, China)

Abstract: The interaction of the buried circular tube with surrounding soil dominates over the performance of tube. With consideration of displacement compatibility a design method of the buried circular tube has been proposed in this paper. In order to verify this approach, some calculations are compared with three condified methods and laboratory test results.

Key words: buried circular tube; displacement compatibility; design method

0 引言*

圆管涵是公路工程广泛应用的横穿路基的小型排水构造物, 占公路工程结构物工程量的比重较大, 平均每公里约有一个排水孔, 需 2.0 m 长的圆管涵 8~12 个。因此, 圆管涵的设计制作及施工安装质量直接影响到工程造价和使用效果。顾安全先生对 303 座填土较高的涵管资料进行了搜集和调查^[1], 管道开裂占 63.5%, 其中 70% 是纵向开裂。2000~2001 年在湖南两条公路圆管涵裂缝的调查中, 填土高于 6 m 的圆管涵裂缝较普遍, 个别涵管发生坍塌^[12, 13]。

圆管涵开裂的原因较复杂, 一方面钢筋混凝土圆管涵由于自身材料的特点, 在制作工艺上与其特殊要求的差距以及施工环节存在不合理, 如钢筋笼的制作、预制、养护、圆管涵基础处理、管节处理、回填土处理等^[2], 采用不同的圆管涵设计分析方法也是重要因素。

目前, 多数设计方法(包括公路规范)采用荷载结构法分析, 即先把圆管涵结构从周围填土隔离出来, 把土作为外荷载加在结构上, 圆管涵基础反力采用某种假设分布形式, 如常用的温克勒假设等。然后用结构力学或材料力学方法计算涵管的内力。这种设计方法忽略了结构与土的相对压缩变形, 人为将涵管结构与土分开计算, 实践证明涵管的实际内力与设计计算值有差距。

采用荷载结构法设计时, 圆涵管承受的土荷载与填土沉降、地基变形以及土与涵管的相对压缩密切相关, 如何确定正确的土压力值是设计的第一步。由于

对管道上竖向土压力认识不同, 计算方法差别较大, 出现了二十几种公式^[1], 工程使用情况也不统一, 计算值与实际受力出入较大, 导致因设计强度不足, 涵管纵向开裂的情况, 特别是高填方下的涵管开裂。顾安全先生对上埋式涵管的土压力作了深入研究, 提出的土压力计算公式, 笔者认为是众多计算公式中较符合实际情况并适合于工程应用便于与工程实测作比较的土压力公式。另外, 内力计算采用的计算图式是否能反映涵管的实际受力状态也应重视。

目前, 随着高速公路工程的发展, 对圆管涵使用安全提出了更高的要求, 探讨合理的涵管设计计算方法很有实际意义。本文在分析常用圆管涵设计计算方法的基础上, 提出涵管结构与土位移协调的设计计算方法, 通过与试验结果和现有规范计算方法相比较, 证实了本文方法的合理性。

1 土与结构的共同作用

圆管涵在周围填土的作用下, 涵管与土会发生相对位移, 如果将涵管作为完全刚性而不变形, 则这种相对位移将通过土的位移来实现。因此, 分析涵管的受力时, 应考虑结构与回填土的这种作用特性。圆管涵在土荷载作用下产生弹性变形的同时, 将受到土层对其变形的约束作用, 作用的结果使圆管涵周围土层产生应力重分布。

方晓阳先生以图 1 中一刚一柔的两个涵管的工作性状的比较描述土与结构的这种特性^[3]。二者均埋入可沿竖直方向 v 压缩的土中: (a) 是假设的起始状态, 围绕管周的土刚填到环顶后, 两个管都是圆的; (b) 表示继续填土到高度 H , 在这个过程中, 涵管高度以内的土已向下压缩, 如果该处没有环存在, 则土的竖向应变将为 $\varepsilon = \Delta v/D$, 它是由图中被压缩土立方体上竖向土压力 P_v 引起的。假想的土的圆形轮廓将压成水平直径不变、竖向直径较小的椭圆。再假想可以挖出一个这样的椭圆形土洞, 而且可以将环压缩后塞进洞中, 然后让环扩展恢复到起始的周界(理想的刚性环), 如图 1(c) 所示。

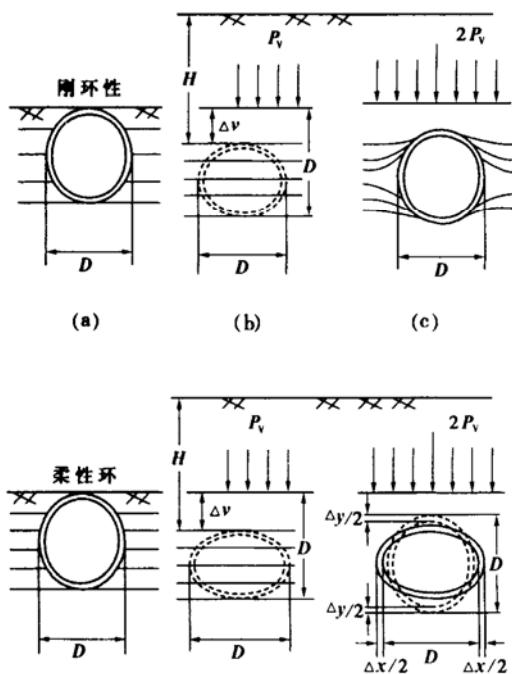


图 1 压缩性土中环的工作过程示意图

Fig. 1 Behavior of the buried circular tube in compressible soil

由于刚性环不可压缩, 环沿竖向扩展成为完整的圆形而成了土中的“硬核”, 这种扩展破坏了土的粒间应力, 使抗剪强度减低, 因而环附近土的竖向剪切阻抗大为减弱, 可以假定土为无竖向剪切阻抗的弹性土, 且土与涵管间无摩擦阻抗, 则环受到的应力集中约为 $2P_v$ 。

对于柔性环, 它在竖直和水平两个方向都可以扩展。由于 P_v 引起的土的竖向压缩使其竖向压缩性降低, 小于水平压缩性, 柔性环不能恢复到起始周界, 水平扩展比竖向扩展大, 环受到的压力集中处于 P_v 与刚性环的 $2P_v$ 之间。假设水平扩展与竖向扩展相等, 则环挠度 $\Delta y/D = \Delta x/D$ 恰好是土的竖向应变 $\varepsilon = \Delta v/D$ 的一半, 压力集中应为 $1.5P_v$ 。根据一个柔性环的实验成果表明^[3], 土与环的这种作用使压力可以减小到等于或小于 $1.0P_v$ 。

2 圆管涵与土位移协调的设计计算方法

2.1 计算模型

按国内外施工技术规范要求, 涵管周围填土的压实度要达到该回填土最大密实度的 95%, 在一般条件下, 孔周土都处于非极限状态, 是非线性压缩体, 其变形模量依应力状态变化, 但资料表明^[4,5], 当土体处于非极限状态时, 对土体垂直应力的线性与非线性分析结果十分接近。因此, 对涵管进行静力弹性分析可以得到较满意的结果。

结构与回填土介质的位移协调这样考虑: 圆管涵在土荷载作用下产生弹性变形的同时, 将受到土层对其变形的约束作用, 因此, 土层对圆管涵的约束可按圆管涵受有与其变形相适应的弹性抗力的假设形式进行考虑。

圆形管涵沿轴线方向的长度相对其截面一般很长, 路堤边坡外, 涵管的荷载沿轴向变化不大, 应力分析可简化为平面应变问题。求解时用半逆解法求解^[6]。

2.2 位移协调计算^[12]

(1) 土层在自重作用下的应力状态

假设填土表面为水平面, 则均一土层中任一点的垂直应力为

$$\sigma_v = \gamma H,$$

水平应力为

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H = \lambda \gamma H,$$

式中 H 为填土的深度; γ 为填土的容重; μ 为填土的泊松比; λ 为填土的静止侧压力系数。

这时的 σ_v 、 σ_h 即为主应力。以极坐标表示与水平轴夹角为 θ 的方向的应力则为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h) - \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \cos 2\theta, \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h) + \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \sin 2\theta. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(2) 圆涵周围土层应力状态的应力函数与应力分量表达式

由式(1)可知, 土层应力状态的应力分量由两部分组成, 即与 θ 无关的轴对称应力和与 θ 有关的变化应力。以半逆解法解题时, 可假设求解圆管涵周围土层应力状态的应力函数为 $\phi = f_1(r) + f_2(r) \cos 2\theta$ 。

通过微分方程运算, 求得应力函数表达式, 并求得应力分量为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} = \\ &\frac{A}{r^2} + 2B + (-2C - 6Er^{-4} - 4Fr^{-2}) \cos 2\theta, \\ \sigma_\theta &= \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} = \\ &-\frac{A}{r^2} + 2B + (2C + 12Dr^2 + 6Er^{-4}) \cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial \theta} = \\ &(2C + 6Dr^2 - 6Er^{-4} - 2Fr^{-2}) \sin 2\theta. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由边界条件和式(2)得管径为 a 圆管涵周围填土的应力状态:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h) \left| 1 - \frac{a^2}{r^2} \right| - \\ &\frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \left| 1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right| \cos 2\theta, \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h) \left| 1 + \frac{a^2}{r^2} \right| + \\ &\frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \left| 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right| \cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \left| 1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right| \sin 2\theta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由应力分量式(3)和平面应变的几何、物理方程^[6],通过积分运算并代入边界条件,可得填土土层的位移函数:

$$\begin{aligned} Eu &= (1 - \mu^2) \left| \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h) \left| r + \frac{a^2}{r} \right| - \right. \\ &\left. \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \left| r - \frac{a^4}{r^3} + \frac{4a^2}{r} \right| \cos 2\theta \right| \\ &- \mu(1 + \mu) \left| \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h) \left| r - \frac{a^2}{r} \right| + \right. \\ &\left. (\sigma_v - \sigma_h) \left| r - \frac{a^4}{r^2} \right| \cos 2\theta \right|, \\ Ev &= \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \left| (1 - \mu^2) \left| r + \frac{a^4}{r^3} + \frac{2a^2}{r} \right| + \right. \\ &\left. \frac{1}{2}\mu(1 + \mu) \left| r + \frac{a^4}{r^3} - \frac{2a^2}{r} \right| \right| \sin 2\theta. \end{aligned}$$

对于圆管周围填土表面有

$$\left. \begin{aligned} u_a &= \frac{1 - \mu^2}{E} a [(\sigma_v + \sigma_h) - 2(\sigma_v - \sigma_h) \cos 2\theta], \\ v_a &= \frac{2(1 - \mu^2)}{E} a (\sigma_v - \sigma_h) \sin 2\theta. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(3) 圆管涵弹性抗力产生的附加应力和附加位移

圆管涵在承受土荷载作用产生弹性变形的同时,将受到土层对其变形的约束作用,将土层对圆管涵的约束,按圆管涵受有与其变形相适应的弹性抗力的假

设形式进行考虑。

以应力函数解题,则可设圆管涵在其周围填土的接触面上任意一点 a 的弹性抗力为

$$\sigma_{ra} = S_0 + S_n \cos 2\theta, \tau_{ra} = 0.$$

式中 S_0, S_n 为常数,其中 S_0 表示均匀抗力, $S_n \cos 2\theta$ 表示变化抗力。

由边界条件 $\sigma_r|_{r=\infty} = 0, \sigma_r|_{r=a} = \sigma_r$ 和 $\tau_{r\theta}|_{r=\infty} = 0$ 以及式(2)求得弹性抗力产生的附加应力:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= S_0 \left| \frac{a}{r} \right|^2 - S_n \left| \left| \frac{a}{r} \right|^4 - 2 \left| \frac{a}{r} \right|^2 \right| \cos 2\theta, \\ \sigma_\theta &= -S_0 \left| \frac{a}{r} \right|^2 + S_n \left| \frac{a}{r} \right|^4 \cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} &= -S_n \left| \left| \frac{a}{r} \right|^4 - \left| \frac{a}{r} \right|^2 \right| \sin 2\theta. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

则弹性抗力产生的附加位移计算式为

$$\left. \begin{aligned} Eu &= (1 + \mu) a \left| -S_0 \left| \frac{a}{r} \right| + \right. \\ &\left. \frac{1}{3} S_n \left| \left| \frac{a}{r} \right|^3 - 6(1 - \mu) \left| \frac{a}{r} \right| \right| \cos 2\theta \right|, \\ Ev &= (1 + \mu) S_n a \left| \frac{1}{3} \left| \frac{a}{r} \right|^3 + \right. \\ &\left. (1 - 2\mu) \left| \frac{a}{r} \right| \right| \sin 2\theta. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

圆管涵表面土层由弹性抗力产生的位移为

$$\left. \begin{aligned} Eu &= -(1 + \mu) a \left| S_0 + \frac{1}{3}(5 - 6\mu) S_n \cos 2\theta \right|, \\ Ev &= \frac{2}{3}(1 + \mu)(2 - 3\mu) S_n a \sin 2\theta. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

2.3 利用变形协调计算

利用土层与圆管间位移相等的协调条件求解圆形管道的内力,假定圆形涵管是刚性结构,四周受土层自重应力的作用,垂直压应力为 σ_v ,水平压应力 σ_h ,中间值按式(1)表示的曲线规律变化,将径向压力分为均布压力和按余弦规律变化的压力。

均布压力可使圆管产生轴向压力,这里暂不讨论。先讨论按余弦规律分布的径向压力使圆管产生的变形和内力。土层在水平轴线处的变形方向是自圆管向外移动,在垂直轴线处的变形方向则是向圆管内部移动。令 $P_0 = \sigma_v - \sigma_h$,由土压力作用下的圆管表层土位移的计算式(4)可写出由土压力作用下产生的圆管土层径向位移 u_a (假设径向土层变形为正)和切向位移 v_a 的计算式:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= \frac{2(1 - \mu^2)}{E} P_0 a \cos 2\theta, \\ v_a &= -\frac{2(1 - \mu^2)}{E} P_0 a \sin 2\theta. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

假设这时圆管与周围土层间的径向相互作用力为 $S_n \cos 2\theta$, 切向相互作用力为 $S_t \sin 2\theta$ (S_n 和 S_t 为待定常数), 则由结构力学方法^[7]可求出在径向相互作用力与切向相互作用力的联合作用下圆管各截面变形和内力为

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= a^4 (2S_n + S_t) \cos 2\theta / (18E_1 I), \\ v_1 &= -a^4 (2S_n + S_t) \sin 2\theta / (18E_1 I), \\ N &= -\frac{a^4}{3} (S_n + S_t) \cos 2\theta, \\ M &= \frac{a^2}{6} (2S_n + S_t) \cos 2\theta. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 u_1 、 v_1 、 E_1 分别表示圆管的径向位移、环向位移和弹性模量。

如不计涵管与周围土层间的切向力 (即令 $S_t = 0$), 则由式 (7) 写出涵管周围土层在表面径向弹性抗力作用力 $S_n \cos 2\theta$ 作用下各点的径向位移为

$$u_a' = -\frac{a}{3E} (1 + \mu) (5 - 6\mu) S_n \cos 2\theta, \quad (10)$$

由变形协调条件 $u_a + u_a' = u_1$ 可解得

$$S_n = \frac{6(1-\mu)}{5-6\mu+Q} P_0, \quad (11)$$

式中 $Q = \frac{E}{E_1} \frac{1}{1+\mu} \frac{a^3}{3I}$ 。

则按余弦规律分布的径向压力产生的涵管内力为式 (12)。在计算中如果考虑涵管与周围土层的切向作用力时, 则需要同时利用径向和环向的变形协调条件, 导出 S_n 和 S_t 的计算式。式 (12) 中弯距即为涵管的最大弯距, 轴力未含均布荷载产生的轴力。

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{2(1-\mu)}{5-6\mu+Q} P_0 a^2 \cos 2\theta, \\ N &= -\frac{2(1-\mu)}{5-6\mu+Q} P_0 a^4 \cos 2\theta. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

对公路工程常用的钢筋混凝土圆管涵, 略去 Q 最大弯距计算式可简化为

$$M = \frac{2(1-\mu)}{5-6\mu} \gamma_s h_s R^2 (1-\lambda), \quad (13)$$

式中 R 为涵管内外径平均半径, γ_s 、 h_s 分别为填土容重和填土高度, 其余符号意义同前。

3 计算结果分析

公路、铁路规范一直沿用荷载结构分析方法, 美国公路规范虽采用荷载结构法, 但土压力用结构与土作用系数修正^[8-11]。由于对涵管承受荷载的大小和分布形式表述以及计算模型假设不同, 计算方法和计算结果相差较大。

3.1 计算实例

以管型为 $d = 150 \text{ cm}$, $\delta = 14 \text{ cm}$, 车辆荷载标准按汽-超 20 的钢筋混凝土涵管为例, 分别按公路设计手册^[9]、铁路规范^[10]、美国公路规范^[11]以及本文的计算方法计算涵管内力, 结果列于表 1。弯距的单位为 $\text{kN}\cdot\text{m}$; M_1 、 M_2 、 M_3 分别为管顶、管侧、管底弯距。填土容重 $\gamma_s = 18 \text{ kN/m}^3$, 管顶填土高度 $h_s = 6 \text{ m}$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 弹性模量 $E = 20 \text{ MPa}$; 涵管 $d = 150 \text{ cm}$ 、 $\delta = 14 \text{ cm}$ 。土性指标测试时在每种填土高度下加载前和卸载后取样, 容重采用现场坑测法; 抗剪强度指标采用应变控制式直剪仪测得^[13]。

表 1 计算弯距值比较

Table 1 comparison calculated bending moment

计算方法	$M_1 / (\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_2 / (\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_3 / (\text{kN}\cdot\text{m})$
公路设计手册	7.17	-7.24	7.33
铁路规范	11.73	-11.80	11.88
美国公路规范	20.04	-20.12	20.19
本文计算值	20.32	-20.41	20.52

就涵管截面内力计算结果看, 铁路规范计算约为公路手册计算值的 1.6 倍; 美国公路规范计算值分别为铁路规范公路手册计算值 1.7 倍和 2.8 倍; 公路手册计算的弯距值最小。

由本文计算式 (12) 计算, 填土产生的涵管弯距为 $19.6 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 将自重和活载引起的涵管内力叠加, 则最大弯距为 $M_{\max} = 20.52 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。该计算值为公路手册计算值的 2.79 倍, 与美国规范计算值 $20.19 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 较接近。

3.2 计算方法比较分析

影响涵管内力计算值的因素很多, 其中垂直土压力的计算方法和内力计算模型的选取是两大主要因素。

(1) 垂直土压力

公路规范^[9]对圆管涵承受的垂直土压力计算, 采用 $q = \gamma_s h_s$ (γ_s 为填土的容重, h_s 为涵管上填土高度) 表征涵管承受的土荷载, 这实际是当土中无涵管时, 该高度处土的压力。没有考虑涵管与土作用体系相对于无涵管时土体应力状态的改变, 土压力计算值比另两种规范计算值小。

铁路规范^[10]对土压力的计算, 采用土压力系数 C_H 对土压力的影响因素进行修正, 考虑了涵管顶端与两侧填土相对沉降以及涵管基底的沉陷因素, 土压力系数 C_H 与 h_s/D_1 和 $SD_1 C/h^2$ 相关, 其中, S 为沉降系数, 按基底岩土性质确定, D_1 为涵管外径, C 为涵管凸出地基的高度。土压力计算值比公路规范计算值大, 但比美国公路规范小。

美国公路规范^[11]垂直土压力的计算, 用土与结构

相互作用系数 F_e 。对垂直土压力表征值 $q = \gamma_s h_s$ 进行修正。当 $h_s/D_1 < 2.0$ (D_1 为涵管外径) 时, F_e 按公式 $F_e = 1 + 0.2h_s/D_1$ 计算; 当 $h_s/D_1 > 2.0$ 时, 取 $F_e = 2 - D_1/h_s$ 。显然, 修正系数大于 1 但不超过 2。

(2) 内力计算方法

公路规范和铁路规范内力计算, 均忽略管壁环向压力及径向剪力, 仅考虑管壁的弯距, 且不考虑支承情况, 采用统一弯距系数。对于圆形管节外廓上土压力及活载压力分布, 采用球型辐射状图形, 管节自重产生的反力也按球型辐射状处理^[9, 10]。

美国公路规范的计算方法中, 垂直与侧向土压力均按在直径范围均匀分布, 支点反力假定在支承范围内均匀分布。按弹性分析计算管环内力。

本文在计算过程中着重考虑涵管与土的相互作用, 应用对称条件, 忽略管壁径向剪力, 仅考虑管壁的弯距和轴力。

(3) 计算内力与实验资料的比较

湖南某高速公路对 $d = 150 \text{ cm}$ 、 $\delta = 14 \text{ cm}$, 设计填土高度 4~6 m 的涵管进行室内加载实验(按照文献[10]规定的加载方法)^[13], 涵管出现 0.2 mm 裂缝时的荷载为 75 kN, 相应的管顶截面弯距 $M = 19.576 \text{ kN}\cdot\text{m}$; 出现开裂时荷载为 55 kN, 相应的管顶截面弯距 $M = 14.356 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。同时, 对上述涵管在填土为 6 m 的裂缝调查中发现相当数量的涵管有开裂现象, 裂缝宽度达 1~2 mm 以上^[13]。

按公路规范计算, 最大弯距 $M_{\max} = 7.33 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 按铁路规范计算, 最大弯距 $M_{\max} = 11.88 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 均小于试验开裂弯距 14.356 kN·m。理论上不会出现裂缝, 与实际调查和试验结果不同。

按美国公路规范计算, 最大弯距 $M_{\max} = 20.19 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 接近试验 0.2 mm 宽度裂缝时的弯距 19.58 kN·m。

由式(12)计算, 填土产生的涵管弯距为 19.6 kN·m, 将自重和活载引起的涵管内力叠加, 则最大弯距为 $M = 20.52 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。该计算值为公路手册计算值的 2.79 倍, 与美国规范计算值 20.19 kN·m 以及出现 0.2 mm 宽裂缝的试验弯距 19.58 kN·m 较接近,

说明计算方法较合理。

4 结 语

(1) 就涵管截面内力计算结果看, 铁路规范计算值和公路手册计算值均小于美国公路规范计算值和试验结果; 公路手册计算方法求得的内力值相对偏小。

(2) 本文认为采用荷载结构分析方法时, 用 $q = \gamma_s h_s$ (γ_s 为填土的容重; h_s 为涵管上填土高度) 计算涵管承受的土荷载, 应作适当修正, 以表征涵管与土作用体系相对于无涵管时土体应力状态的改变。

(3) 本文的设计计算方法, 较好地反映了土与涵管的相互作用特性, 计算结果与试验结果和实体工程调查情况接近, 计算方法合理。

参考文献:

- [1] 顾安全. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究[J]. 岩土工程学报, 1981, 3(1): 3-15.
- [2] 魏红卫, 王革立. 钢筋混凝土圆管涵裂缝分析与控制[J]. 混凝土与水泥制品, 2001, 10: 25-29.
- [3] 温特科恩 H F, 方晓阳. 基础工程手册[M]. 叶书麟, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [4] 钱家欢, 等. 土工原理与计算[M]. 北京: 水力电力出版社, 1994.
- [5] 陈希哲. 土工学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [6] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982.
- [7] 李廉锟. 结构力学(上、下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [8] JTJ 021-89, 公路桥涵设计通用规范[S]. 1989.
- [9] 顾克明, 等. 公路桥涵设计手册·涵洞[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [10] 铁道部第四勘测设计院. 铁路设计手册·桥涵[M]. 北京: 中国铁道出版社.
- [11] 美国公路桥梁设计规范[S]. 辛济平, 等译, 1994.
- [12] 魏红卫. 埋入式圆形涵管的受力分析及裂缝控制研究[D]. 湖南: 长沙交通学院, 2001.
- [13] 谭冬莲. 高等级公路中钢筋混凝土圆管涵受力性能理论与实验研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2002.