

玻璃钢管抗八级地震及抗弯刚度仿真计算

李波¹王虎¹张英武²席雨沁¹曾严²丁智远²刘吉平^{1*}

(1 北京理工大学 北京 100081 2 冀州市中意复合材料有限公司 053200)

玻璃钢管是一种典型的柔性管。DN3200 mm夹砂玻璃钢管和 DN6000 mm夹砂玻璃钢管在土壤垂直载荷作用下,玻璃钢管产生垂直方向变形,同时产生横向膨胀变形。这种横向变形受到管周土壤的约束产生水平侧压力。而这种侧压力与管周变形量、土壤反力模量相关。此外,管的下部承受着基床反力,当基床的种类不同其基床反力的分布形式和大小也不同。在上述载荷的作用下,玻璃钢管将产生环向内力。

本文采用结构力学方法,引用弯矩系数,获得了地下玻璃钢管在动静土压下的内力矩简化公式。

DN3200 mm夹砂玻璃钢管和 DN6000 mm夹砂玻璃钢管抗八级地震及弯刚度仿真计算边界条件如表 1 所示。

表 1 DN3200 mm夹砂玻璃钢管抗八级地震及弯刚度仿真计算边界条件

仿真内容	抗八级地震仿真计算边界条件
拉伸强度 (MPa)	350
耐压强度 (MPa)	10
刚度 (N)	3000

1 地震时玻璃钢管的抗弯刚度

制作玻璃钢管的材料主要是玻璃纤维、合成树脂和各种填料,其材料结构型式主要是:纤维缠绕结构、预浸胶织物布卷织结构和树脂砂浆夹层结构。无论是哪一种结构型式的玻璃钢管,均可根据复合材料力学理论计算出其抗弯刚度。玻璃钢管的抗弯刚度是内力分析的重要参数。

设 E_y 为管壁的环向表观弹性模量, I 为管壁单位长度上的惯性矩,则有:

$$E_y I = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{\infty} \overline{Q}_{yy}^{(k)} (Z_k^3 - Z_{k-1}^3) \quad (1)$$

*通讯联系人: email-liujp@bit.edu.cn

式中： $\overline{Q}_{yy}^{(k)}$ —第 k 层沿环向偏轴刚度系数；

Z_k, Z_{k-1} —第 k、k-1 层表面离管壁中面的坐标距离；

$E_y I$ —管壁表观抗弯刚度。

上式不仅可作为工程设计的理论参考值，而且对管壁层合结构的铺层设计也是十分重要的。

作为工程实际运用，玻璃钢管抗弯刚度还应通过实验确认与检验。其实验方法是对圆管进行上下两块平行板压力试验。实验测定的计算公式为：

$$E_y I = 0.149 R^3 p / \Delta y \quad (2)$$

式中：R—管公称半径；

P—试验机加载沿管轴向单位长度上的力；

Δy —垂直变形量。

2 地震时土壤载荷作用下的内力

地下玻璃钢管周围的静土压分布模型如图 1 所示。

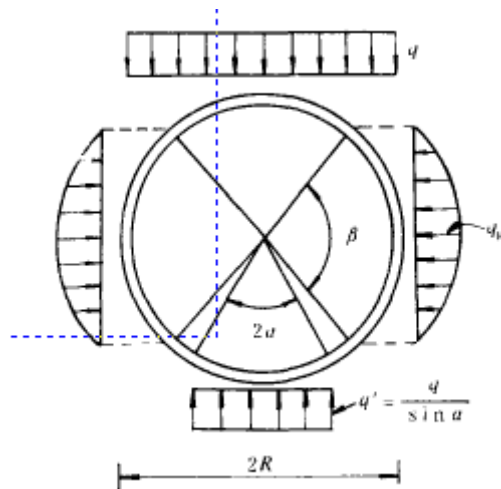


图 1 管周外压力

这种模式是 M. G 斯潘格勒 (Spangler) 在 40 年代提出来的，迄今为止，已得到广泛而成功的应用。在这种土压模式中，有三种载荷形式：垂直土压、基床反力和水平侧压力，为方便起见，将这三种载荷分别作为独立载荷，依次作用在

管周上，并根据结构力学方法，可分别得其内力解。然后将这三种解叠加起来，得到其最后的内力分布解。

由于埋设玻璃钢管是一种薄壁结构，其轴力与剪力影响可忽略不计。下面仅考虑弯曲解。

1) 垂直土压下的内力矩解

当 $\theta \leq \pi/2$ 时

$$M_1(\theta) = R^2 q [1/\pi - 1/8 + \cos \theta / (3\pi) - \sin^2 \theta / 2] \quad (3)$$

当 $\pi/2 < \theta \leq \pi$ 时

$$M_1(\theta) = R^2 q [1/\pi + 3/8 + \cos \theta / (3\pi) - \sin \theta] \quad (4)$$

2) 基床反力下的内力矩解

当 $0 \leq \theta \leq \pi - a$ 时

$$M_2(\theta) = R^2 q [3k_1(a) - 2 \sin^2 a \cos \theta] / (6\pi) \quad (5)$$

当 $\pi - a < \theta \leq \pi$ 时

$$M_2(\theta) = R^2 q [3k_1(a) - 2 \sin^2 a \cos \theta / (6\pi) - (\sin a - \sin \theta)^2 / (2 \sin a)] \quad (6)$$

式中

$$K_1 a = a \cdot \sin a + 3 \cos a / 2 + a / (2 \sin a) - 2 \quad (7)$$

3) 水平侧压力下的内力矩解

当 $0 \leq \theta \leq \pi/2 - \beta/2$ 时

$$M_3(\theta) = R^2 q_H [3 \sin(\beta/2) + \sin(3\beta/2) - 6 \sin(\beta/2) \cos \beta] [k_2(\beta) - \cos \theta] / [12 \sin^2(\beta/2) + M]$$

当 $\pi/2 - \beta/2 \leq \theta \leq \pi/2 + \beta/2$

$$M_3(\theta) = R^2 q_H [48 \cos^2 \theta \cdot c \cos \beta + 8 \cos \theta \cdot c \cos(3\theta) - 12 \cos \beta [1 + \cos(2\theta)] - 24 \cos^2 \theta + 3(1 - \cos 4\theta)] / [96 \sin^2(\beta/2) + M_0]$$

当 $0 \leq \theta \leq \pi/2 - \beta/2$ 时

$$M_3(\theta) = R^2 q_H [3 \cdot \sin(\beta/2) + \sin(3\beta/2) - 6 \sin(\beta/2) \cos \beta] \cdot [k_2(\beta) - \cos \theta] / [12 \sin^2(\beta/2)] + M_0 \quad (8)$$

当 $\pi/2 - \beta/2 \leq \theta \leq \pi/2 + \beta/2$ 时

$$M_3(\theta) = R^2 q_H \{48 \cos^2 \theta \cdot \cos \beta + 8 \cos \theta \cdot \cos(3\theta) - 12 \cos \beta [1 + \cos(2\theta)] - 24 \cos^2 \theta + 3(1 - \cos 4\theta)\} / [96 \cdot \sin^2(\beta/2)] + M_0 \quad (9)$$

当 $\pi/2 + \beta/2 \leq \theta \leq \pi$ 时

$$M_3(\theta) = R^2 q_H [3 \cdot \sin(\beta/2) + \sin(3\beta/2) - 6 \sin(\beta/2) \cdot \cos \beta] \cdot [k_2(\beta) + \cos \theta] / [12 \sin^2(\beta/2)] + M_0 \quad (10)$$

式中

$$M_0 = R^2 q_H \{11 \sin(2\beta)/32 + 3\beta(3 - 4 \cos \beta)/16 - \sin \beta/2 + [3 \sin(\beta/2) + \sin(3\beta/2) - 6 \sin(\beta/2) \cos \beta] \cdot [\cos(\beta/2) - k_2(\beta)(\pi - \beta)/2]\} / [6\pi \sin^2(\beta/2)] \quad (11)$$

$$K_2(\beta) = (3/8) \cdot \{[1 - \cos(2\beta) + 4 \cos \beta (\cos \beta - 1)] / [3 \cdot \sin(\beta/2) + \sin(3\beta/2) - 6 \sin(\beta/2) \cdot \cos \beta]\} \quad (12)$$

$$q_H = \begin{cases} ek_\alpha q R^4 / (E_y I + k_b e R^4) & \text{管径较小时;} \\ k_\alpha q / k_\beta & \text{管径较大时。} \end{cases} \quad (13)$$

式中：e—土壤被动阻力系数；

k_α 、 k_β —分别由管底基础夹角 2α 与水平侧压圆心角 β 所确定的常数，其值通过计算后列于表 2 和 3 中。

表 2 管基系数 k_α

管基支承半角 $\alpha / (^\circ)$	0	15	22.5	30	45	60	90
k_α	0.110	0.108	0.105	0.102	0.096	0.090	0.083

表 3 水平侧压系数 k_β

$\beta / (^\circ)$	80	90	100	110	120	130	140	150	180
k_β	0.055	0.058	0.061	0.064	0.066	0.067	0.068	0.069	0.070

3 地面动载引起的内力矩

当管道穿越公路等地段时，行驶车辆将对埋设管道产生地面动载荷，其土压按线性分布。根据结构力学方法进行推导，可得任意截面的弯矩为：

$$M_D(\theta) = [0.5917 - 0.5125\cos\theta - 0.5\sin^2\theta - 0.1367 \times (1 - \cos\theta)^3] q_L R^2 \quad (14)$$

式中： q_L —埋设管单位面积所承受的地面动载荷。

令 $\theta = 0^\circ$ ，由式（14）可得管顶处的弯矩为：

$$M_D(0) = 0.0792 q_L R^2 \quad (15)$$

令 $\theta = \pi$ ，则可得管底处的弯矩为：

$$M_D(\pi) = 0.0106 q_L R^2 \quad (16)$$

显然，地面动载荷在管顶处可引起最大弯矩。

4 内力分析与简化

为了更清楚地分析垂直土压与侧向土压对玻璃钢管内力的影响，将分别研究这两类土压的作用。

将内力矩公式无量纲化，并约定：当仅考虑垂直土压作用时，设

$$\overline{M}_P(\theta) = [M_1(\theta) + M_2(\theta)] / (R^2 q) \quad (17)$$

当仅考虑侧向土压作用时，设

$$\overline{M}_H(\theta) = M_3(\theta) / (R^2 q_H) \quad (18)$$

按上述约定进行计算，其结果如图 2 所示，其中垂直土压的管基支承半角分别为 $\alpha = 30^\circ$ 和 90° ；侧向土压的分布角 $\beta = 100^\circ$ 。

这些线表明：垂直土压与侧向土压各自产生的内力矩沿 θ 角的变化趋势正好相反，它们具有相互减弱的作用，而且随着侧向土压增大，其总的内力矩将减少。这种变化规律同样适用于管的轴力与剪力的变化。

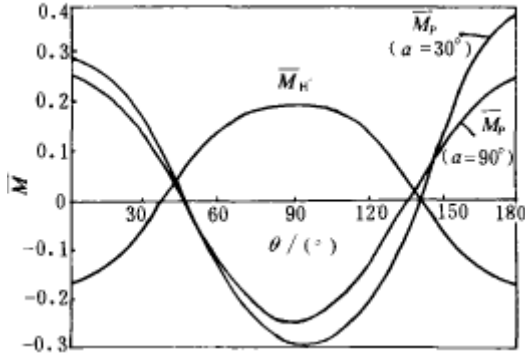


图 2 玻璃钢管内力矩

由图 2 可知，当 $\theta = 180^\circ$ 时，即在管底处，两类土压所引起的合力矩最大。考虑到动土压，则有：

$$M_1 = (K_\pi q - 0.0166q_H + 0.0106q_L)R^2 \quad (19)$$

如果管径很大，则 q_H 可由式 (13) 来确定，上式可简化为：

$$M_1 = (K_{\pi 1} q + 0.0106q_L)R^2 \quad (20)$$

在管顶处，即 $\theta = 0^\circ$ ，动土压可引起最大内力矩，叠加上静土压作用的解，则在管顶处的弯矩为：

$$M_D = (K_o q - 0.166q_H + 0.0792q_L)R^2 \quad (21)$$

如果管径很大，仍由式 (13) 确定 q_H ，则式 (21) 可简化为：

$$M_D = (K_{o1} q + 0.0792q_L)R^2 \quad (22)$$

在式 (19) ~ (22) 中， K_π 、 $K_{\pi 1}$ 、 K_o 、 K_{o1} 均为弯曲系数，如表 4 所示。

表 4 弯曲系数 ($\beta = 100^\circ$)

$2\alpha / (^\circ)$	30	45	60	90	120	180
K_π	0.468	0.419	0.377	0.314	0.275	0.250
$K_{\pi 1}$	0.174	0.133	0.099	0.052	0.030	0.021

K_o	0.296	0.292	0.286	0.274	0.261	0.250
K_{o1}	0.002	0.006	0.008	0.013	0.016	0.024

表 4 的数值是根据式 (4) ~ (22) 中相应公式计算而得, 其中 K_{π} 、 $K_{\pi 1}$ 和 K_o 、 K_{o1} 分别是管底和管顶的弯曲系数。在设计中, 可根据管基支承角 2α 的实际情况进行选择。

作为工程应用, 通常是以最大应力所在截面作为管子的强度分析依据。前面分析表明: 其最大应力发生在管底或管顶处, 计算公式为:

$$\sigma_y = 6M/t^2 \leq [\sigma_y] \quad (23)$$

因此, 式 (19) ~ (23) 可作为地下玻璃钢管工程设计公式。

例: 已知管径 $DN=3200\text{mm}$, 环向许用应力 $(\sigma_y)=89.5\text{MPa}$ 。埋置深度 $H=3000\text{mm}$, 基础支承角 $2\alpha=60^\circ$ 。且 $\beta=100^\circ$ 。土壤密度 $\gamma=1.9 \times 10^{-3}\text{kg/cm}^3$, 不考虑动载荷。求满足外压强度条件的最小壁厚 $t_{\min}$ 。

解: (1) 求 q , q_L

$$\begin{aligned} q &= H \cdot \gamma = 3000 \times 10^{-3} \times 1.9 \times 10^{-3} \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \\ &= 5.7 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_L &= 9.8 \cdot H \cdot \gamma = 9.8 \times 3000 \times 10^{-3} \times 1.9 \times 10^{-3} \times 10^6 \times 10^{-6} \text{ MPa} \\ &= 0.056 \text{ MPa} \end{aligned}$$

(2) 求 M , 由式 (20) $M_1 = (K_{\pi 1} q + 0.0106 q_L) R^2$ 求解

由 $2\alpha=60^\circ$ 根据表 7.4 可查得 $K_{\pi 1}=0.099$,

由 (1) 知, $q=5.7\text{kg/m}^2$, $q_L=0.056\text{MPa}$, $R=1.6\text{m}$, 则

$$\begin{aligned} M &= (0.099 \times 5.7 + 0.0106 \times 0.056) \times 1.6^2 \\ &= 1.45 \times 10^6 \text{ N} \end{aligned}$$

(3) 求 $t_{\min}$, 由式 (7.23) $\sigma_y = 6M/t^2 \leq [\sigma_y]$ 得:

$$t_{\min} = \sqrt{6M/(\sigma_y)}$$

式中, $M=1.45 \times 10^6$, $(\sigma_y)=89.5$

经计算, $t_{\min}=3.12\text{cm}$

由本例可见，本文提出的简化计算公式是十分方便的。

参考文献：

（略）