

预制预应力综合管廊接头设计计算方法研究¹⁾

陈智强* 孔祥臣* 胡翔^{†,2)} 薛伟辰[†]

* (厦门市市政建设开发总公司, 厦门 361000) [†] (同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要 以 2010 年上海世博会园区预制预应力综合管廊工程为背景, 基于内力平衡和变形协调条件, 并考虑接头拼缝变形形态、预应力筋伸长和遇水膨胀橡胶条弹性模量的影响, 提出了包含抗弯刚度计算模型和抗弯承载力计算模型的采用预应力筋连接的预制预应力综合管廊接头设计计算方法. 与现有试验结果的对比分析表明, 该方法的计算结果与试验结果吻合良好. 该文的主要研究成果已成功应用于 2010 年上海世博会园区预制预应力综合管廊工程.

关键词 预制预应力综合管廊, 接头, 抗弯刚度, 抗弯承载力, 设计计算方法

中图分类号: TU990.3, TU378 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2011)04-042-05

CALCULATION METHOD FOR PPMT JOINT¹⁾

CHEN Zhiqiang* KONG Xiangchen* HU Xiang^{†,2)} XUE Weichen[†]

* (Xiamen Municipal Construction and Development Corporation, Xiamen 361000, China)

[†] (College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract In view of the construction of a precast prestressed municipal tunnel (PPMT) in the 2010 Shanghai Expo, a calculation method, to simulate the bending stiffness and the flexural capacity of PPMT joint, is proposed based on the internal force equilibrium and the deformation compatibility. The elongation of the prestressing tendons and the elastic modulus change of the hydroswellng rubber-sealings are taken into consideration in the calculation method. The accuracy of the calculation method is shown by the experimental results. The results of this work has been applied in the PPMT in the 2010 Shanghai Expo.

Key words precast prestressed municipal tunnel, joint, bending stiffness, flexural capacity, calculation method

预制预应力综合管廊 (precast prestressed municipal tunnel, PPMT) 是指采用预制预应力工艺施工建造的综合管廊^[1]. 相比采用现浇混凝土工艺施工建造的综合管廊, 预制预应力综合管廊具有施工质量好、建设周期短、环境污染小等优点, 应用前景广阔^[2]. 根据拼装方式和接头位置的不同, 预制预应力综合管廊可分为仅有纵向接头和同时具有纵、横向接头两类, 如图 1 所示.

预制混凝土结构的有关研究表明, 接头 (主要是横向接头) 是影响预制混凝土结构受力性能的最主要因素^[3]. 隧道预制衬砌和预制预应力综合管廊是

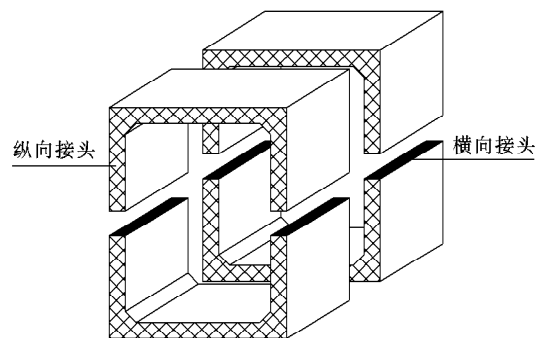


图 1 预制预应力综合管廊示意图

2011-01-05 收到第 1 稿, 2011-04-15 收到修改稿.

1) 福建省建设科技计划项目 (2009) 和国家“十一五”科技支撑计划项目重点课题 (2006BAJ16B07) 资助项目.

2) E-mail: hu_xiang@tongji.edu.cn

目前工程应用中最主要的两种地下空间预制混凝土结构型式. 针对隧道预制衬砌接头的设计计算理论, 国内外学者已开展了较为系统的研究 [4-6], 并提出将接头简化为具有一定刚度的弹簧, 弹簧的刚度取值一般通过专门的接头载荷试验确定 [7-9]. 而在预制预应力综合管廊接头的受力性能方面, 从系统查阅的国内外文献资料来看, 这方面的研究工作尚属空白.

本文以 2010 年上海世博会园区预制预应力综合管廊工程为背景, 对预制预应力综合管廊接头设计计算方法开展了较为系统的研究. 基于接头内力平

衡和变形协调条件, 并考虑接头拼缝变形形态、预应力筋伸长和遇水膨胀橡胶条弹性模量的影响, 建立了包括接头抗弯刚度计算模型和抗弯承载力计算模型在内的采用预应力筋连接的预制预应力综合管廊接头设计计算方法. 本文的研究成果将为预制预应力综合管廊的推广应用提供技术依据.

1 基本计算假定

本文预制预应力综合管廊接头设计计算方法的理论推导以文献 [2] 的接头试验试件为原型 (图 2).

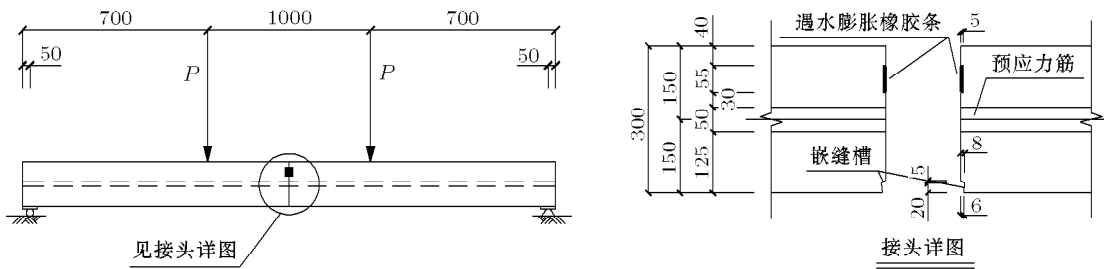


图 2 接头试验试件

基本计算假定如下:

(1) 文献 [2] 试验结果表明, 预制预应力综合管廊接头试件的变形主要由预制混凝土板的相对转动引起 (图 3), 而预应力筋的受拉伸长与接头受压区混凝土的受压缩短是产生预制混凝土板相对转动的主要原因. 预应力筋的伸长量可由公式 (1) 计算得到. 在外载荷作用下, 拼缝处预应力筋的应力增量为 $\Delta\sigma_{pz}$, 预应力筋的应力增量传递长度为 l_{tr} , 如图 4 所示, 图中应力传递长度和粘结应力分布形式按《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002) 第 6.1.9 条和第 8.1.8 条确定, 参见式 (2).

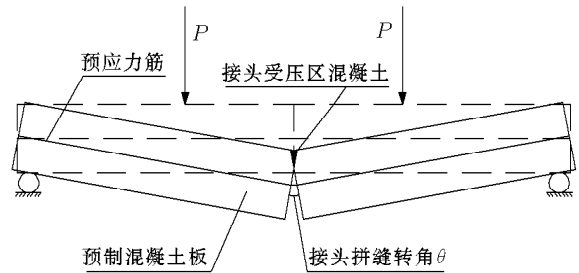


图 3 接头试件变形

$$\Delta\delta_p = \int_0^{l_{tr}} \Delta\varepsilon_{pz} dz = \frac{1}{2} \Delta\varepsilon_{pz} l_{tr} \quad (1)$$

$$l_{tr} = \alpha \frac{\Delta\sigma_{pz} d}{f_{tk}} \quad (2)$$

式中, $\Delta\delta_p$, $\Delta\varepsilon_{pz}$, $\Delta\sigma_{pz}$ 分别为接头拼缝处预应力筋相对于消压状态时的增量变形、增量应变和增量应力; l_{tr} 为预应力筋的应力增量传递长度, 根据本文实测材性计算得到的 l_{tr} 最大约为 456 mm, 小于 500 mm, 即应力增量传递长度在两集中荷载加载点范围内; α 为预应力筋外形系数; f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值; d 为预应力筋直径.

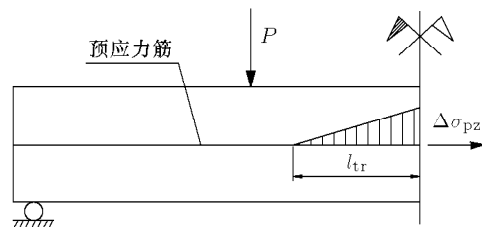


图 4 预应力筋的应力传递长度

(2) 由试验结果可知, 拼缝张开以后预制预应力综合管廊接头在拼缝接触区、脱离区和整个截面高度范围内均满足平截面假定 [2].

(3) 预应力筋本构关系采用理想弹塑性本构模型, 混凝土本构关系采用 Hognestad 本构模型, 见式 (3) 和式 (4).

预应力筋

$$\left. \begin{aligned} \sigma_p &= \epsilon_p E_p, \quad \epsilon_p \leq \epsilon_{py} \\ \sigma_p &= \sigma_{py}, \quad \epsilon_p > \epsilon_{py} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

混凝土

$$\left. \begin{aligned} \sigma_c &= f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right], \quad \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ \sigma_c &= f'_c \left[1 - 0.15 \frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{\epsilon_{max} - \epsilon_0} \right], \quad \epsilon_c > \epsilon_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

2 接头抗弯刚度计算模型

接头受力性能试验结果表明, 消压阶段 ($M \leq 19.8 \text{ kN}\cdot\text{m}$) 接头的抗弯刚度可认为与整浇混凝土截面相同, 消压后至屈服前阶段 ($19.8 \text{ kN}\cdot\text{m} \leq M \leq 87.4 \text{ kN}\cdot\text{m}$) 接头抗弯刚度随所受载荷变化而变化, 屈服后 ($M \geq 87.4 \text{ kN}\cdot\text{m}$) 接头的切线抗弯刚度可偏于安全地简化为零, 如图 5. 下面重点讨论消压后至屈服前阶段的接头抗弯刚度. 此时, 试件接头拼缝分为接触区和脱离区两部分, 计算简图如图 6 所示.

由接头平截面假定可知

$$\frac{\epsilon_c}{y_1} = \frac{\epsilon_{ce}}{y_2} \quad (5)$$

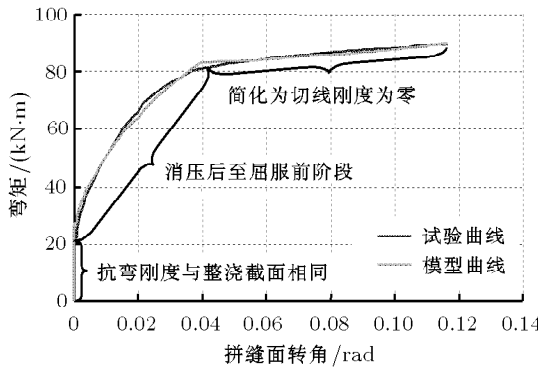


图 5 接头抗弯刚度计算模型曲线

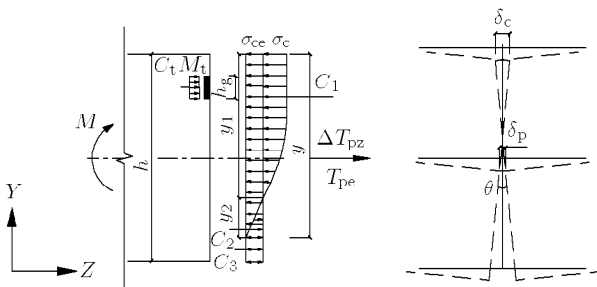


图 6 接头计算简图

$$y_1 + y_2 = y \quad (6)$$

$$\frac{\epsilon_c}{y_1} = \frac{\Delta\epsilon_{pz}}{\left| \frac{h}{2} - y_1 \right|} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta\delta_p}{\left| \frac{h}{2} - y \right|} = \theta \quad (8)$$

式中: h 为拼缝截面高度; y_1, y_2, y 分别为接头接触区内增量弯矩产生的压区混凝土截面高度、拉区混凝土截面高度和拼缝面接触区总高度; $\epsilon_{ce}, \epsilon_c, \theta$ 分别为施加预应力完成时混凝土的预压应变、弯矩载荷作用下产生的拼缝面受压区外缘混凝土应变和拼缝面转角.

将预应力筋本构代入基本假定 (1), 可得

$$\Delta\delta_p = \frac{\alpha E_p d}{2f_{tk}} \Delta\epsilon_{pz}^2 \quad (9)$$

式中, E_p 为预应力筋弹性模量, d 为预应力筋直径.

将式 (9) 代入接头平截面假定可得

$$\epsilon_c = \sqrt{\frac{2f_{tk}\theta y_1^2}{\alpha E_p d} \frac{\left| \frac{h}{2} - y \right|}{\left(\frac{h}{2} - y_1 \right)^2}} \quad (10)$$

$$y_2 = \frac{\sigma_{ce}}{E_c} \sqrt{\frac{\alpha E_p d \left(\frac{h}{2} - y_1 \right)^2}{2f_{tk}\theta} \frac{\left| \frac{h}{2} - y \right|}} \quad (11)$$

式中, E_c 为混凝土弹性模量, σ_{ce} 为施加预应力完成时混凝土的预压应力.

由接头拼缝内力平衡可知

$$\sum Z = 0, \quad C_1 = C_t + C_2 + C_3 + \Delta T_{pz} \quad (12)$$

其中

$$C_1 = \int_0^{y_1} \sigma_c(y) b dy$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \sigma_{ce} y_2 b$$

$$C_3 = \sigma_{ce} (h - y) b$$

$$C_t = \sigma_c h_g b$$

$$\Delta T_{pz} = \Delta\epsilon_{pz} E_p A_p$$

式中, C_t 为遇水膨胀橡胶条承担的合力, ΔT_{pz} 为外载荷作用下预应力筋的增量拉力, h_g 为遇水膨胀橡胶的横截面宽度.

将式 (10) 代入混凝土本构方程 (4), 可得

$$\sigma_c = f'_c \left[\frac{2}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{2\theta f_{tk} y_1^2}{\alpha E_p d} \left| \frac{h}{2} - y \right|} - \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{2\theta f_{tk} y_1^2 \left| \frac{h}{2} - y \right|}{\alpha E_p d \left(\frac{h}{2} - y_1 \right)^2} \right], \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \quad (13a)$$

$$\sigma_c = f'_c \left\{ 1 - 0.15(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_0)^{-1} \left[\sqrt{\frac{2\theta f_{tk} y_1^2}{\alpha E_p d} \left| \frac{h}{2} - y \right|} - \varepsilon_0 \right] \right\}, \quad \varepsilon_c > \varepsilon_0 \quad (13b)$$

式 (13) 是由变形协调方程和材料本构方程联立得到的接头受压区混凝土外缘应力 σ_c (可表示为 y_1 与 θ 的函数), 再联立内力平衡方程 (12) 即可得到 y_1 与 θ 的函数关系, 并进而得到其他参数与 θ 的函数关系.

为求解 $y_1 = y_1(\theta)$, 可首先假定 $\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$, 联立式 (12) 和 (13a), 并利用迭代方法可解得不同拼缝面张角 θ 下的 $y_1(\theta)$, 进而可求得 $y_2(\theta)$, $y(\theta)$ 和 $\varepsilon_c(\theta)$ 等. 判断此时 ε_c 是否满足 $\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$, 如满足则继续求解 $C_1(\theta)$, $C_2(\theta)$ 和 $C_3(\theta)$ 等; 如 $\varepsilon_c > \varepsilon_0$, 则联立式 (12) 和式 (13b), 同理可求解 $y_1 = y_1(\theta)$, $y_2(\theta)$, $y(\theta)$, $C_1(\theta)$, $C_2(\theta)$ 和 $C_3(\theta)$ 等.

将上述结果代入接头拼缝弯矩平衡方程

$$\left. \begin{aligned} \sum M &= 0 \\ M + M_t &= C_1 \left(\frac{h}{2} - \frac{3}{8} y_1 \right) + \\ &C_2 \left(\frac{2}{3} y_2 + y_1 - \frac{h}{2} \right) + C_3 \frac{y}{2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中 M_t 为遇水膨胀橡胶条承担的弯矩, 其计算方法为

$$M_t = y_g C_t$$

式中, y_g 为遇水膨胀橡胶承担的合力的力臂, 由图 2 可知 $y_g = 82.5 \text{ mm}$. 即可得到不同接头拼缝张角 θ 对应的弯矩载荷

$$M = M(\theta)$$

因此, 在消压到屈服前阶段预制预应力综合管廊的接头抗弯刚度 K 可表示为

$$K = \frac{M(\theta)}{\theta}$$

式中, θ 表示接头拼缝面转角, $M(\theta)$ 表示与 θ 相对应的接头弯矩. $M(\theta)$ 可在给定 θ 的情况下由式 (8), (11), (13) 和式 (14) 联立求得.

3 接头抗弯承载力计算模型

试件的破坏形态表明, 极限破坏时预制预应力综合管廊接头受压区混凝土压碎、预应力筋屈服. 试件的破坏机制为桁架机制. 由接头拼缝的内力平衡可知

$$\begin{aligned} \sum Z &= 0, \quad f_{py} A_p = f_c b y_c \\ y_c &= \frac{f_{py} A_p}{f_c} \end{aligned}$$

式中, f_{py} 表示预应力筋的屈服应力, A_p 表示预应力筋截面积, f_c 表示混凝土抗压强度, b 表示接头横截面宽度, y_c 表示接头受压区混凝土高度.

因此, 预制预应力综合管廊接头极限抗弯承载力为

$$M_u = f_{py} A_p \left(\frac{h}{2} - \frac{y_c}{2} \right)$$

式中, M_u 表示接头极限抗弯承载力, A_p 表示预应力筋截面积, h 表示接头横截面高度.

4 试验验证

为验证本文建立的预制预应力综合管廊接头抗弯设计计算理论的准确性, 将计算值与文献 [2] 的试验结果进行了对比, 如表 1 所示.

由对比结果分析可知:

(1) 本文建立的预制预应力综合管廊接头抗弯刚度计算模型和抗弯承载力计算模型考虑了接头平面假定、预应力筋伸长和遇水膨胀橡胶条弹性模量的影响, 能够较好地计算接头在弯矩作用全过程中的内力状态和变形形态, 模型计算值与试验值吻合较好;

(2) 接头消压弯矩计算值与试验值的误差较大 (弯矩误差约为 0.25, 跨中挠度误差约为 0.32), 这主要是由接头拼缝的平整度和预留沟槽尺寸等均存在一定的制作误差所致;

(3) 在消压后至屈服前阶段, 随着载荷的增大试件接头受力逐渐均匀, 试件的实际受力状态能够更好地符合计算模型的各种基本假定, 模型计算值与试验值的误差随着接头拼缝张角增大而减小.

表 1 试件变形、内力与极限承载力的计算值与试验值对比

受力阶段		试验值与计算值		
		试验值	计算值	计算值 / 试验值
消压	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	19.8	14.8	0.75
	预应力筋应变	1.935×10^{-3}	1.929×10^{-3}	0.99
	跨中挠度 /mm	0.25	0.17	0.68
消压后至屈服前	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	27.5	34.6	1.26
	$\theta = 0.00036 \text{ rad}$			
	预应力筋应变	1.963×10^{-3}	2.352×10^{-3}	1.20
	跨中挠度 /mm	0.5	0.48	0.96
	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	46.1	55.4	1.20
	$\theta = 0.0049 \text{ rad}$			
	预应力筋应变	2.784×10^{-3}	3.166×10^{-3}	1.14
	跨中挠度 /mm	3.08	3.26	1.06
	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	61.4	72.3	1.18
	$\theta = 0.0122 \text{ rad}$			
	预应力筋应变	3.451×10^{-3}	4.089×10^{-3}	1.18
	跨中挠度 /mm	6.67	7.27	1.09
极限承载力	$M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	95.6	92.1	0.96

5 结 论

(1) 以 2010 年上海世博会园区预制预应力综合管廊工程为背景, 基于接头内力平衡和变形协调条件, 建立了考虑接头拼缝变形形态、预应力筋伸长和遇水膨胀橡胶条弹性模量影响的预制预应力综合管廊接头设计计算方法. 该方法可计算采用预应力筋连接的预制预应力综合管廊接头抗弯刚度和抗弯承载力.

(2) 基于本课题组完成的预制预应力综合管廊接头受力性能试验, 对本文建立的预制预应力综合管廊接头设计计算方法进行了验证. 结果表明, 该设计计算方法的计算结果与试验结果吻合较好, 可用于采用预应力筋连接的预制预应力综合管廊接头受力性能的模拟计算.

参 考 文 献

- 1 薛伟辰, 胡翔, 王恒栋. 上海世博园区预制预应力综合管廊力学性能试验研究. 特种结构, 2009, 26(1): 105-108 (Xue Weichen, Hu Xiang, Wang Hengdong. Experimental studies on mechanical properties of PPMT in Shanghai expo area. *Special Structures*, 2009, 26(1): 105-108 (in Chinese))
- 2 胡翔, 薛伟辰. 预制预应力综合管廊接头受力性能试验研究. 土木工

- 程学报, 2010, 43(5): 29-37 (Hu Xiang, Xue Weichen. Experimental study of mechanical properties of PPMT. *China Civil Engineer Journal*, 2010, 43(5): 29-37 (in Chinese))
- 3 薛伟辰. 预制混凝土框架结构体系研究与应用进展. 工业建筑, 2002, 32(11): 47-50 (Xue Weichen. Progress of studies and applications of precast concrete frame structure systems. *Industrial Construction*, 2002, 32(11): 47-50 (in Chinese))
- 4 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道. 北京: 中国铁道出版社, 1991
- 5 Iftimie T. Prefabricated Lining, Conceptual analysis and comparative studies for optimal solution. In: Abdel Salam, ed. *Tunnelling and Ground Conditions*, Balkema, Rotterdam, 1994
- 6 村上博智, 小泉. シールドセグメントリングの耐荷机构について. 土木学会論文報告集, 1978, (150): 103-115
- 7 张厚美, 过迟, 傅德明. 圆形隧道装配式衬砌接头刚度模型研究. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 309-313 (Zhang Houmei, Guo Chi, Fu Deming. A study on stiffness model of circular tunnel prefabricated lining. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3): 309-313 (in Chinese))
- 8 陆同寿, 崔铁军. 圆形衬砌接头刚度模型试验与研究. 隧道及地下工程, 1987, 8(4): 21-23 (Lu Tongshou, Cui Tiejun. Model test study on stiffness of circular lining joints. *Underground Engineering and Tunnels*, 1987, 8(4): 21-23 (in Chinese))
- 9 Murakami H, Koizumi A. Study on loading bearing capacity and mechanics of shield segment ring. *Proc for the Japan Society for Civil Engineering*, 1978, 272(4): 103-115

(责任编辑: 刘希国)