

打浦路越江隧道计算模型及其参数研究

丁春林 周顺华 唐秋生

高振岗

(同济大学沪西校区铁建系,上海 200331)(上海浦江隧桥公司,上海 200023)

【摘要】针对上海市打浦路越江隧道的实际条件提出用板单元模拟隧道衬砌、车道板和竖向支撑,用土弹簧模拟土与隧道的共同作用。根据建立的模型确定了相应的计算参数。通过模型计算结果与现场测试结果的对比分析,论证了力学模型和计算参数的合理可靠性以及计算方法的正确性。为盾构法或矿山法施工的隧道及地下结构进行力学分析提供参考。

【关键词】越江隧道;力学模型;计算参数

【中图分类号】U451.3

Calculation Model and Its Parameter Research of Dapu Road Tunnel Acrossing River in Shanghai

【Abstract】Based on construction condition of Dapu road tunnel acrossing river in Shanghai, plate elements used to imitate tunnel lining, lane plate and vertical brace, as well as soil springs to imitate interaction between soil and tunnel, are put forward. According to the model founded, the corresponding calculation parameters are determined. Compared the model computed results with the in-site test results, the reasonable dependability of mechanic model and calculation parameters, and the correctness of calculation method are demonstrated, which provides reference for mechanical analysis of tunnel and underground structure that are constructed by shield-driven or mine method.

【Keywords】tunnel acrossing river mechanic model calculation parameters

0 引言

隧道与地下结构是介于结构工程和岩土工程之间的一门新兴学科,其计算理论和计算方法的演变已有数十年历史。早期地下工程的计算人们主要是仿照地面结构的方法进行,以荷载结构法为主,相应的力学模型是荷载结构模型。经过较长时期的实践,地下结构的受力变形特点逐步被认识,人们开始考虑地层对结构受力、变形的影响,提出的分析方法有地层结构法、收敛限制法等,相应的力学模型有地层结构模型和收敛限制模型等。20世纪60年代以来,随着计算机的迅速发展,地下结构的计算理论也有了很大发展。有限单元法作为一种发展最快的数值方法,在地下

结构分析中得到了广泛应用^[1,2]。

根据上海市打浦路隧道的施工特点提出用板单元模拟支护结构、车道板和竖向支撑,用土弹簧模拟围岩与隧道衬砌的共同作用。

1 基本原理

1.1 建立力学模型

应用有限元法模拟隧道支护结构与围岩的共同作用,常用的力学计算模型有两种:一是在重力场作用下,把围岩视为二维、三维连续体,分割成单元模型,同样把衬砌也分割成二维、三维连续体单元进行分析(见图1);二是把支护结构——衬砌作为骨架结构,采用梁单元,并与围岩的二维、三维连续体力学模型结合在一起进行分析^[1,2](见图2)。第一种

模型在单元划分时,衬砌及其附近单元分割得比较小,计算工作量较大,尤其是三维分析。第二种模型尽管划分的单元和节点数比第一种少,但是对于平面问题,衬砌和围岩在接触面上结点处未知数不一致,用有限元处理比较繁琐;对于空间问题,衬砌用梁单元模拟显然与实际情况有较大误差。本文考虑打浦路越江隧道的实际情况,建立的力学计算模型见图3。在这种力学模型中,隧道衬砌、车道板和竖向支撑用板单元模拟,围岩与隧道的共同作用用土弹簧模拟。由于车道板两端置于衬砌支墩上,采用现浇法施工,故车道板和衬砌之间采用固端约束;竖向支撑隔板是预制后再安装在车道板下面的,故采用两端铰接约束。该模型与上述两种模型相比具有以下优点:①划分的单元和节点数较少,计算工作量较小;②能够比较真实地模拟运营隧道空间受力变形情况。单元网格划分主要考虑以下三方面因素:①汽车轮距、轴距;②荷载作用;③计算精度。

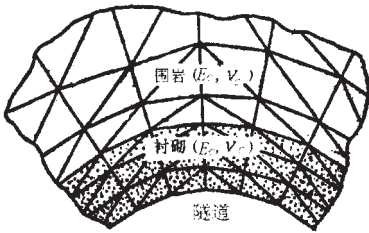


图1 连续体模型图

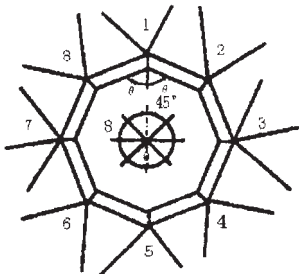


图2 隧道衬砌分割成梁单元模型图

1.2 计算理论

首先用有限元法,把隧道衬砌、车道板和竖向支撑划分为若干矩形单元 [3,5],见图4

(a)。其任意单元和一个结点*i*上的结点位移与力向量见图4(b)。

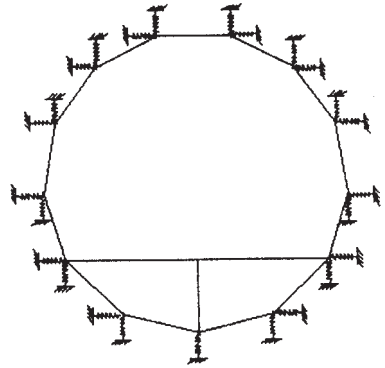
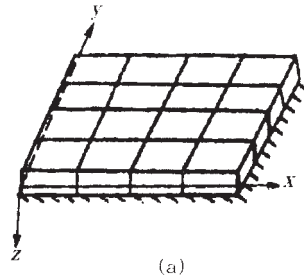
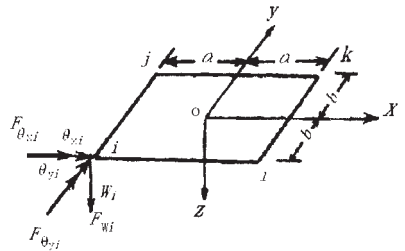


图3 板-弹簧模型断面图



(a)



(b)

图4 板单元模型图
单元位移函数

$$w(x, y) = N \delta^e \tag{1}$$

式中: $\delta^e = [\delta_i^T \ \delta_j^T \ \delta_l^T \ \delta_k^T]^T$

$$N = [N_i \ N_j \ N_l \ N_k]$$

形函数的自然坐标通式为:

$$[N]_i = [N_i \ N_{ix} \ N_{iy}] \quad (i = i, j, l, k)$$

$$N_i = (1 + \zeta_0)(1 + \eta_0) \times (2 + \zeta_0 + \eta_0 - \zeta^2 - \eta^2) / 8$$

$$N_{ix} = b \eta_i (1 + \zeta_0)(1 + \eta_0)(1 - \eta^2) / 8$$

$$N_{iy} = -a \zeta_i (1 + \zeta_0)(1 + \eta_0)(1 - \zeta^2) / 8$$

$$\tag{2}$$

式中: $\zeta_0 = \zeta_i \zeta$, $\eta_0 = \eta_i \eta$, $\zeta = x/a$, $\eta = y/b$

结点 i 的位移列阵

$$\delta_i = \{ \omega_i, \theta_{xi}, \theta_{yi} \}^T = \left\{ \omega_i - \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \right)_i \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)_i \right\}^T \quad (3)$$

相应的荷载列阵

$$f_i = \{ F_{\omega i}, F_{Q_{xi}}, F_{Q_{yi}} \}^T \quad (4)$$

对于各向同性薄板, 矩形单元的刚度矩阵为:

$$K_s^e = \frac{D}{60ab} [K_1 + K_2 + \mu K_3 + \frac{1-\mu}{2} K_4] L \quad (5)$$

单元应力:

$$M^e = \{ M_x, M_y, M_{xy} \}^T = S \delta^e \quad (6)$$

式中: D 为板的抗弯刚度; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 L 及应力矩阵 S , 参见文献^[4]。

土与隧道衬砌的相互作用用不抗拉的弹簧单元(即边界单元)来处理。计算过程中, 当弹簧单元出现拉应力时, 需将拉应力弹簧刚度降为零, 压应力弹簧刚度不变, 重新进行分析。

1.3 计算参数确定

本文在选取土弹簧系数时, 考虑到隧道已运营 20 多年, 周围土体已稳定, 参照同类土的性质, 土弹簧系数定为 $k = 50 \text{ MPa/m}^{[6]}$, 水平和竖向土弹簧刚度计算采用绕结点平均法, 即: 任一点土弹簧水平和竖向刚度等于土弹簧系数乘以该点邻近板单元的竖向和水平投影面积, 再加以平均。部分板单元结点的水平和竖向弹簧刚度计算结果见图 5。

钢筋混凝土衬砌、车道板和竖向支撑的弹性压缩模量采用等效混凝土压缩模量, 泊松比取 0.2, 具体参数见表 1。

表 1 材料参数表

单元厚度 /m	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	剪切模量 G/MPa
衬砌	3.1×10^4	0.2	1.292×10^4
车道板	3.1×10^4	0.2	1.292×10^4
竖向支撑	2.9×10^4	0.2	1.208×10^4

2 工程实例分析

打浦路隧道是上海市修建的第一座越江

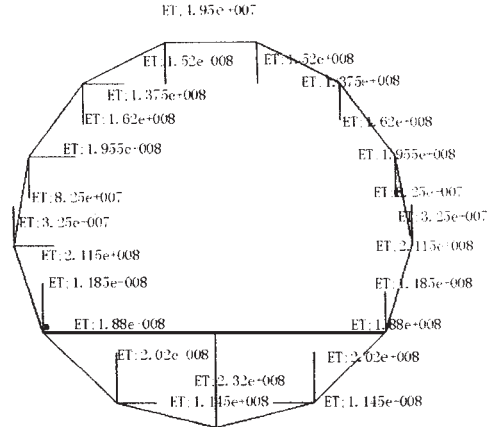


图 5 土弹簧刚度值图(单位: N/m)

隧道, 隧道全长 2 760 多米。隧道进、出口采用明挖法施工, 为矩形截面, 矩形隧道长 1 022 m; 越江部分采用盾构法施工, 为圆形截面, 圆形隧道长 1 322 m, 内有车道板、竖向支撑等受力结构。圆形隧道截面半径 4.7 m, 车道板宽 8.07 m, 竖向支撑高 2.41 m。

为了验证计算模型和计算参数的合理性和正确性, 本文利用 SAP 程序计算了在载重 20t 和 30t 汽车作用下车道板的受力情况。计算模型网格划分见图 6。模型计算长度取测试点前后各 5 m, 共 10 m; 汽车平面尺寸及纵向荷载排列见图 7。车道板下表面钢筋应力计算值和现场钢筋应力测试值见图 8。隧道衬砌、车道板和竖向支撑变形图见图 9 图 10, 其最大变形值见表 2。

由图 8、9、10 可知, 模型计算结果与现场

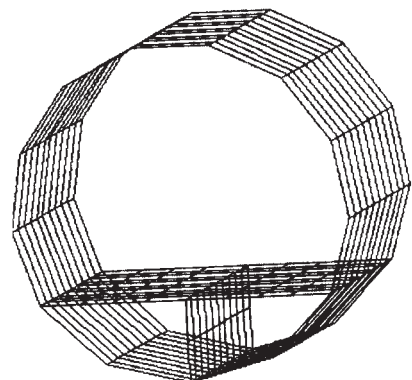
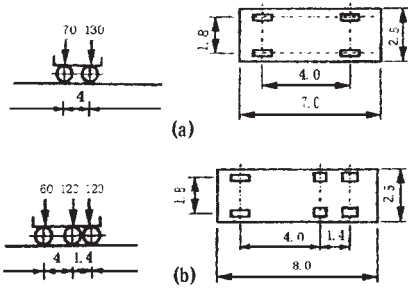


图 6 网格划分图

测试结果是比较一致的, 结构变形是合理的。

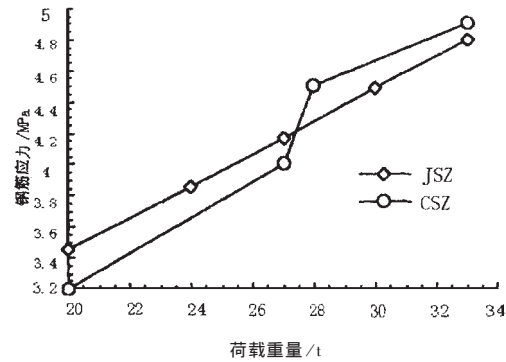


(a) 20t 纵向荷载排列及汽车平面尺寸
(b) 30t 纵向荷载排列及汽车平面尺寸

图 7 20t 和 30t 纵向荷载排列及汽车平面尺寸图

表 2 隧道最大变形值

荷载类型	最大变形/m	发生部位
20t	1.347×10^{-4}	车道板
30t	1.565×10^{-4}	车道板



JSZ——计算值 CSZ——测试值

图 8 不同荷载作用下车道板钢筋应力计算值与测试值比较图

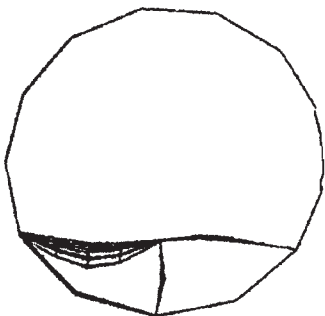


图 9 20t 荷载作用隧道模型变形投影图

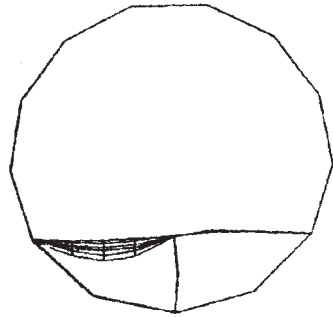


图 10 30t 荷载作用隧道模型变形投影图

3 结 论

1) 采用板单元模拟运营隧道衬砌、车道板和竖向支撑, 用土弹簧模拟土与隧道衬砌的共同作用, 这一模型能够比较真实地反映隧道在运营状态下的空间受力和变形情况。模型计算结果与现场测试结果是比较吻合的, 该力学模型和计算参数选取是合理可靠的, 计算方法是切实可行的, 它为盾构法或矿山法施工的隧道及地下结构进行力学分析提供参考。

2) 用土弹簧模拟围岩与隧道的共同作用, 这种模型计算方法简单, 划分的单元和节点数较少, 避免围岩用连续体模型单元划分多、计算工作量大、耗时多等缺点。

参 考 文 献

- 孙钧, 侯学渊主编. 地下结构. 北京: 科学出版社, 1987, 14~30, 482~500
- 樗木武著. 隧道力学. 关宝树, 麦侗曾译. 北京: 中国铁道出版社, 1983, 53~55, 161~256
- 杜正国 赵雷. 弹性地基板的动态刚度矩阵迭代法. 西南交通大学学报, 1993 (5): 24~29
- O C 监凯维奇. 有限元法(上册). 北京: 科学出版社, 1985, 245~247
- 赵雷, 彭俊生. 斜交地地桥-土的相互作用. 土木工程学报, 1994, 27(5)
- 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计, 北京: 中国建筑工业出版社, 1994, 53~56