

水土压力对框架地道桥受力及变形的影响

郑远彪¹, 邹圻², 王利伟³, 蒋海军³, 占玉林²

(1. 宁波市交通规划设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315000; 2. 西南交通大学; 3. 青岛市市政工程设计研究院有限责任公司)

摘要: 针对不同地下水位, 采用水土分算的方式计算框架地道桥的侧向压力分布, 利用有限元软件中仅受压单元模拟土体特性, 比较不同地下水位对于框架地道桥四等分截面的正应力分布差异、腹板侧向位移沿截面高度方向分布以及截面不同高度处侧向变形沿桥跨分布的规律, 以研究水土压力对框架地道桥受力以及变形的影响规律。研究表明: 水压力对框架地道桥的正应力分布影响较小, 但对其框架侧面变形影响较大, 对于框架地道桥的变形, 应关注边界条件等对结构框架效应的减弱, 以及梁高过高导致结构不满足平截面假定, 顶底板加腋附近应力突变的问题。

关键词: 地道桥; 数值模拟; 水土压力; 平截面假定

1 前言

城市发展与城市交通建设相辅相成, 当城市发展到一定程度, 交通网络的合理交叉排布方式就显得十分重要, 特别是铁路与公路线路交叉的设计。往常的平面交叉存在着将城市区域分割、容易造成拥堵以及引发恶性交通事故的风险, 对于现代城市的发展来说十分不利, 故此采用空间立体交叉的框架地道桥应运而生。框架地道桥具有刚度大、整体性好、变形小以及可灵活布置的特点, 通过其顶部以及内部空间提供通道的方式, 将公铁两线分开, 安全有效地解决了线路交叉的问题。

近年来, 中国对框架地道桥的研究以覆土层厚度、截面形式、截面参数以及桥梁与线路的斜交角度对其结构受力性能、土体应力与位移的影响居多。而国外研究则以新材料的应用以及结构的动力特性为主。

框架地道桥在空间分布上具有优势, 同时其受力与变形将受到周围土体以及地下水水位的影响, 加之近年来气候环境问题的恶化, 应该对框架地道桥在水土压力以及车道荷载等复杂工况共同作用下(图1)的受力变形性能予以关注。该文以某实际工程为依托, 通过大型通用有限元软件 Ansys 建立实体模型, 研究框

架地道桥在不同地下水位高度, 水土压力及移动荷载共同作用下导致的结构受力与变形。

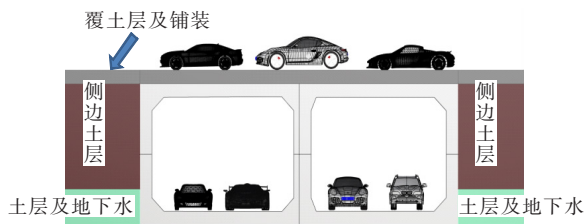


图1 框架地道桥所面临的复杂工况

2 模型建立

2.1 依托工程概况

某下穿隧道工程框架桥全长 61.4 m, 净跨径 55 m, 梁高 7.32 m, 加腋高 0.7 m, 梁横向宽度 18.5 m, 横断面采用单箱双室。箱内为双向四车道, 梁体顶部覆土层厚度为 2 m。全桥仅 $L/2$ 处截面由于设置通道与全桥标准截面不一致, 具体特征截面尺寸如图 2、3 所示。

2.2 主体结构模拟及荷载计算理论

该文采用大型通用有限元软件 Ansys 建立三维实体模型对框架桥主体进行计算分析, 混凝土采用

收稿日期: 2021-01-07(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51878564); 四川省科技计划项目(编号: 21CXTD0094, 20GJHZ0183); 宁波市交通运输局科技项目(编号: 202005); 国家重点研发计划项目(编号: 2016YFB1200401)

作者简介: 郑远彪, 男, 大学本科, 高级工程师, E-mail: 8741744@qq.com

Solid45 单元进行模拟,预应力钢筋则采用等效换算的节点荷载力进行模拟。

为模拟框架地道桥与土体的相互作用,通过 Combin14 单元配合 Link10 单元,设置基床系数以模拟土体的仅受压特性。全桥共 112 785 个节点,95 336 个单元。

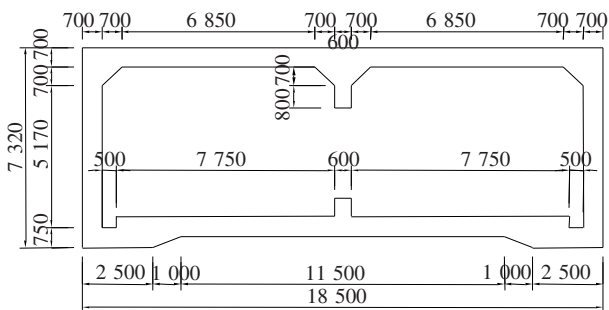


图 2 L/2 截面尺寸(单位: mm)

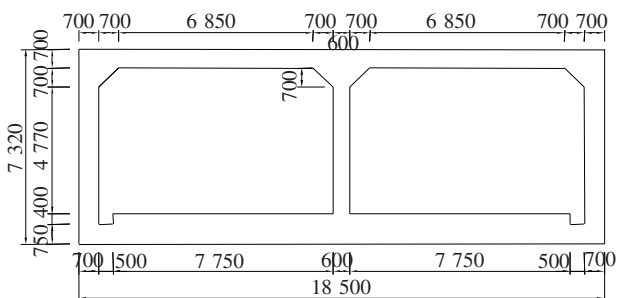


图 3 标准截面尺寸(单位: mm)

采用水土分算的方式对水、土压力进行计算,计算图示如图 4 所示。其中地下水位以上的土压力按照正常计算方式,土压力为:

$$P_{t1} = \gamma H_0 K_0 \quad (1)$$

式中: γ 为计算点以上土体的天然重度; H_0 为地下水位以上某点距地面深度; K_0 为侧压力系数。

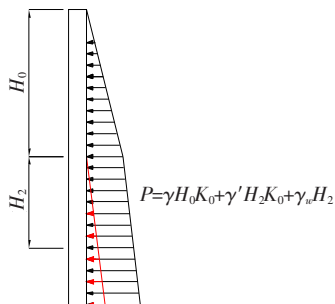


图 4 水土压力计算图示

体有效重量减轻引起的土压力减小,即考虑结构在地下水位以下的排水体积造成的浮力(换算后施加于结构地面);另一方面,还要考虑地下水对结构的压力影响。地下水位以下 H_2 深度处土压力为:

$$P_{t2} = \gamma H_0 K_0 + \gamma' H_2 K_0 \quad (2)$$

式中: γ' 为土体的浮重度。

地下水造成的压力为:

$$P_w = \gamma_w H_2 \quad (3)$$

故地下水位以下 H_2 深度处水土压力总和为:

$$P = \gamma H_0 K_0 + \gamma' H_2 K_0 + \gamma_w H_2 \quad (4)$$

式中: γ_w 为地下水重度。

上述水、土压力等梯形(三角形)分布荷载,均采用等效节点荷载形式添加。单元受如图 5 所示的梯形分布荷载,两端节点上的荷载集度分别为 q_1 和 q_2 ,单元长度为 l , α 为两坐标系之间的夹角(图示逆时针转角为正)。

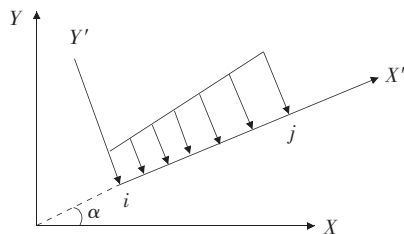


图 5 梯形分布荷载转化为等效结点荷载

梯形分布荷载在两端节点上产生的在局部坐标系中的固端力为 F_F , 即:

$$F_F = \{F_{xi} \quad F_{yi} \quad M_i \cdots F_{xj} \quad F_{yj} \quad M_j\}^T \quad (5)$$

$$F_F = \left\{ \begin{aligned} & 0 \quad \frac{q_1 l}{2} + \frac{3}{20}(q_2 + q_1)l \quad \frac{q_1 l^2}{12} + \frac{1}{30}(q_2 - q_1)l^2 \\ & \cdots \quad 0 \quad \frac{q_1 l}{2} + \frac{7}{20}(q_2 - q_1)l \quad -\frac{q_1 l^2}{12} - \frac{1}{20}(q_2 - q_1)l^2 \end{aligned} \right\}^T \quad (6)$$

在局部坐标系中的单元等效节点荷载为 $F_E = -F_F$, 即:

$$F_E = \left\{ \begin{aligned} & 0 \quad -\frac{q_1 l}{2} - \frac{3}{20}(q_2 + q_1)l \quad -\frac{q_1 l^2}{12} - \frac{1}{30}(q_2 - q_1)l^2 \\ & -q_1)l^2 \quad \cdots \quad 0 \quad -\frac{q_1 l}{2} - \frac{7}{20}(q_2 - q_1)l \\ & \frac{q_1 l^2}{12} + \frac{1}{20}(q_2 - q_1)l^2 \end{aligned} \right\}^T \quad (7)$$

由式 $F_E = -T^T F_F$ (坐标转换矩阵 T 同前), 可得结构坐标系中单元 ij 的等效节点荷载阵列 F_E , 即:

地下水位以下土压力一方面需要考虑浮力导致土

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{c} 0 \\ \frac{q_1 l}{2} + \frac{3}{20}(q_2 + q_1)l \\ \frac{q_1 l^2}{12} + \frac{1}{30}(q_2 - q_1)l^2 \\ 0 \\ \frac{q_1 l}{2} + \frac{7}{20}(q_2 - q_1)l \\ -\frac{q_1 l^2}{12} - \frac{1}{20}(q_2 - q_1)l^2 \end{array} \right] \\
 F_E = \{ & \begin{array}{c} F_{xi} \\ F_{yi} \\ M_i \\ F_{xj} \\ F_{yj} \\ M_j \end{array} \} = -T^T \{ \\
 & \left[\begin{array}{c} \left[\frac{q_1 l}{2} + \frac{3}{20}(q_2 - q_1)l \right] \sin\alpha \\ -\left[\frac{q_1 l}{2} + \frac{3}{20}(q_2 - q_1)l \right] \cos\alpha \\ -\left[\frac{q_1 l^2}{12} + \frac{1}{30}(q_2 - q_1)l^2 \right] \\ \left[\frac{q_1 l}{2} + \frac{7}{20}(q_2 - q_1)l \right] \sin\alpha \\ -\left[\frac{q_1 l}{2} + \frac{7}{20}(q_2 - q_1)l \right] \cos\alpha \\ \left[\frac{q_1 l^2}{12} + \frac{1}{20}(q_2 - q_1)l^2 \right] \end{array} \right\} \quad (8)
 \end{aligned}$$

2.3 荷载类型及工况

计算模型中共考虑 4 种工况:

(1) 结构自重 G_1 。

(2) 二期恒载重 G_2 , 其中包括重度为 23 kN/m^3 的 17 cm 厚箱内路面铺装、重度为 18 kN/m^3 的箱顶 100 cm 厚土层、重度为 23 kN/m^3 的 70 cm 厚箱顶路面铺装以及 200 kg/m 的管线等附属荷载。

(3) 为研究不同水深对结构的影响, 该文采用水土分算, 侧向静止土压力 G_3 , 考虑土体摩擦角等系数后 $G_3 = 0.34\gamma_3 h_3$, 其中 γ_3 为天然土体重度时取 18 kN/m^3 , 为浮重度时取 11 kN/m^3 ; 水压力 G_4 取不同水深 h_4 , 计算结果 $G_4 = \gamma_4 h_4$, 其中 γ_4 为水重度, 取 9.8 kN/m^3 。

(4) 活载, 包括箱内双向四车道城-A 荷载 Q_1 以及箱顶双向六车道城-A 荷载 Q_2 。

除自重外的恒载、活载分布位置如图 6 所示。活载的空间分布如图 7 所示, 有限元模型如图 8 所示。

3 计算结果分析

3.1 地下水对截面正应力分布的影响

不同地下水深度对截面正应力分布的影响规律如

图 9 所示。选取 $L/2$ 截面、 $L/4$ 截面以及与 $L/4$ 位置对称的 $3L/4$ 截面腹板处各节点(图 10), 查看其在不同水位下的正应力分布情况, 由于该文中结构及所施加荷载在桥跨方向具有高度对称性, 针对 $L/4$ 位置以及 $3L/4$ 位置, 仅展示 $L/4$ 位置数据用作分析。

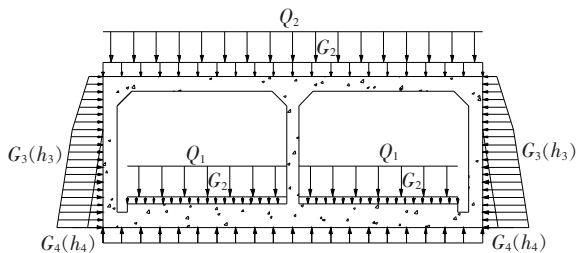


图 6 框架桥各类荷载分布图示

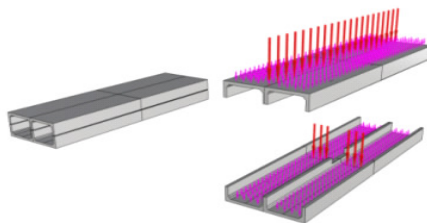


图 7 车道活载的空间分布

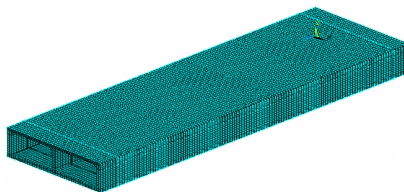


图 8 有限元模型

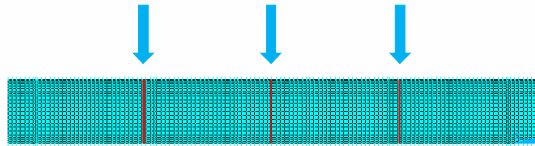


图 9 截面选取示意

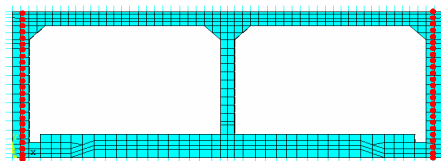


图 10 腹板节点分布

图 11 为不同水深下 $L/2$ 截面正应力分布, 图 12 为不同水深间腹板正应力差值。

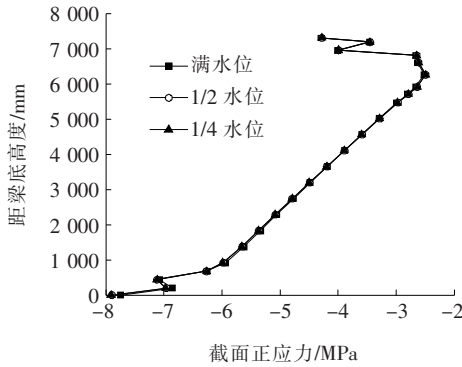


图 11 水深对跨中截面腹板正应力分布的影响

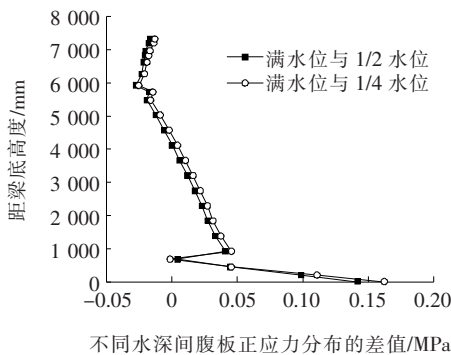


图 12 不同水深间腹板正应力分布的差值

由图 11、12 可以看出：截面的正应力分布随水深变化较小，正应力差值最大仅为 0.17 MPa。此外，受梁高影响，截面的正应力分布不满足平截面假定。同样地，图 13 为不同水深下 $L/4$ 截面正应力分布，图 14 为不同水深间腹板正应力差值。

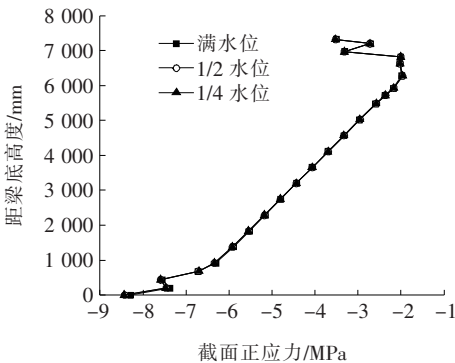


图 13 水深对 $L/4$ 截面腹板正应力分布的影响

由图 13、14 可以看出： $L/4$ 截面的正应力分布规律与 $L/2$ 处基本一致，截面正应力分布不满足平截面假定且不同工况下正应力差值仅为 0.15 MPa。

由于不同工况下截面正应力分布规律一致且差异较小，图 15 为截面正应力沿截面周边的典型分布模式。

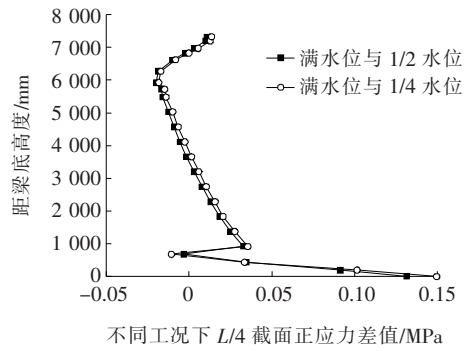


图 14 不同水深间腹板正应力分布的差值

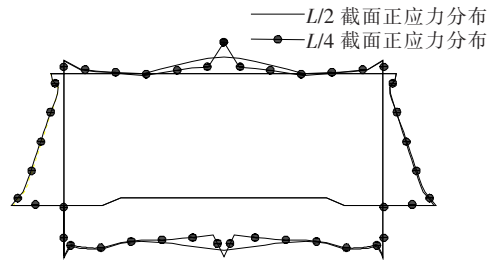


图 15 复杂荷载作用下典型截面的正应力分布

由图 15 可以看出： $L/2$ 截面与 $L/4$ 截面正应力分布规律基本一致，在腹板范围内差异极小；正应力分布仅在顶、底板中部存在不同，主要原因为跨中截面中腹板存在开孔，导致其顶、底板应力分布不受刚度突变影响，较为平缓。

3.2 地下水位对结构变形的影响

为进一步探明地下水位对框架地道桥受力、变形的影响，图 16 为典型截面腹板在不同地下水位下侧向变形的规律。图 17 为变形前后的截面。

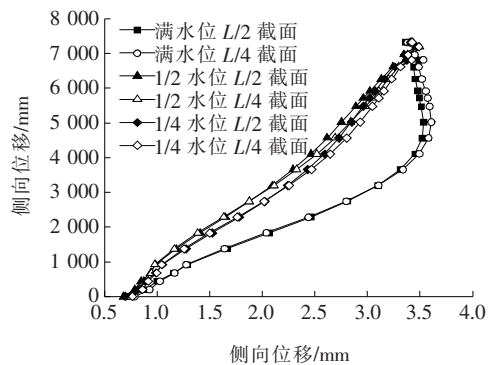


图 16 不同水位下典型截面腹板侧向位移分布

由图 16、17 可以看出：相同地下水深下，腹板侧向变形较为接近，最大差距不超过 0.3 mm；当地下水位超过 $1/2$ 截面高度后，截面变形明显增大，最大增幅约为 75%；在土体仅受压的边界条件影响下，腹板的侧向变形规律与悬臂梁类似。

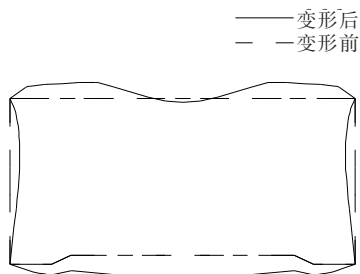


图 17 框架截面变形前后

图 18 为不同工况下梁底、中、顶位置侧向变形沿跨径的分布情况。

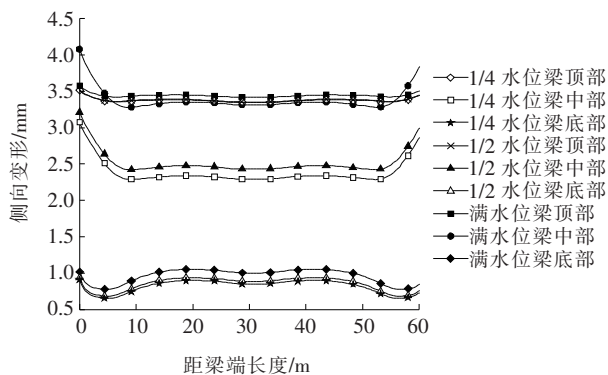


图 18 不同工况下截面侧向变形沿梁长的分布

由图 18 可以看出:梁底、中、顶位置侧向变形规律与腹板变形规律可以一一对应,且梁段两端、梁段中部,由于边界条件约束较弱或截面开孔洞削弱,导致地道桥截面的框架效应减弱,侧向变形大于其他部位。

4 结论

(1) 框架地道桥正应力分布受水土压力影响较小,截面正应力分布受加腋设置、截面孔洞影响明显。

(2) 同一截面处,由于土体仅受压并且与地下水共同作用,截面的侧向变形受地下水位高度影响明显。

(3) 截面的应力分布受框架加腋、截面中腹板开孔洞影响明显,且梁高较高情况下截面不满足平截面

假定,因此需要对加腋附近混凝土应力予以关注。

(4) 截面的侧向变形受梁段端部土体约束、截面中腹板开孔洞影响明显,截面框架效应受到影响,建议对这些位置的截面变形、防渗问题予以关注。

参考文献:

- [1] 董锐,李迪钦,詹刚毅.覆土厚度对框架式地道桥受力性能影响[J].新疆大学学报,2020(1).
- [2] 朱国闯.某输水干渠双层复合框架桥有限元分析[D].郑州大学硕士学位论文,2015.
- [3] 张崇斌.下穿铁路框架立交桥结构参数对比研究[J].中国水运,2015(2).
- [4] 王爱霞.利用箱形框架结构优势精心设计铁路框架桥[J].铁路勘察,2012(3).
- [5] 李森,于洋,黄祖慰,等.下穿铁路斜交框架地道桥主要设计参数分析[J].铁道标准设计,2019(9).
- [6] 卫星,强士中.铁路斜交框架立交桥的空间分析[J].铁道建筑,2004(5).
- [7] 于文杰,窦国涛,张安静.采空区框架桥侧向土压力研究[J].煤炭技术,2020(9).
- [8] 李鹏浩.框架桥在土压力下的力学性能研究[J].道路桥梁,2019(28).
- [9] 朱建栋,杜守继,付功义.地道桥结构与土相互作用的有限元分析[J].岩土力学,2004(2).
- [10] Manuel F B H, Alberto F, Javier F, et al. A Vibration Prediction Model for Culvert-Type Railroad Underpasses[J]. Engineering Structures, 2018, 172: 1 025-1 041.
- [11] Mohankar R H, Pidurkar M D, Patil P R, Analysis of Underpass RCC Bridge[J]. International Journal of Civil and Structural Engineering, 2010, 1(3): 558-564.
- [12] Vega J, Fraile A, Alarcon E, et al. Dynamic Response of Underpasses for High-Speed Train Lines[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(23): 5 125-5 140.
- [13] 马建林.土力学[M].3版.北京:中国铁道出版社,2011.
- [14] 郭诗惠,刘炳.非线性破坏准则下土体剪胀性对地震主动土压力的影响[J].中外公路,2019(2).
- [15] 宋陈雨,霍继炜,高宇甲,等.三门峡黄土结构性对土水特征曲线的影响[J].中外公路,2020(5).