

关于明挖隧道闭合框架结构挠度验算的设计思考

王霞

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100044)

摘要: 随着北京城市副中心的推进建设, 地下道路的修建快速发展。以北京城市副中心东六环隧道为工程背景, 在弹性地基梁理论上, 采用 MIDAS Gen/Civil 计算软件建立二维及三维荷载-结构法模型, 对明挖闭合框架结构采用不同规范依据时挠度验算结果进行了对比分析研究, 分析结果表明: 采用不同规范进行挠度验算时, 明挖隧道结构尺寸设计将不尽相同, 文章认为采用《混凝土结构设计规范》进行结构设计更为合理, 并提出挠度控制的建议, 可为相似明挖隧道工程提供有效借鉴。

关键词: 明挖隧道; 挠度限值; 数值模拟

中图分类号: U452

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)08-0316-04

0 引言

为推动北京市政府和相关市属企业单位有序向通州搬迁, 北京城市副中心的市政道路、轨道交通及博物馆、大剧院、图书馆等生活配套工程正在加速建设, 建设的成果将进一步带动中心城区人口和其他相关产业向副中心有效疏解。城市副中心的空间布局是“一轴、一带、多组团”(见图1)。“一轴”即创新发展轴依托东六环入地改造工程, 地面修建六环高线公园, 以达到有效缝合城市空间的目的。副中心行政办公区、城市绿心森林公园、北京环球主题公园及度假区、宋庄文化创意产业集聚区等多个功能中心在创新发展轴的作用下均能够有效串联。

东六环入地改造工程作为北京城市副中心部署的重点项目, 意义重大。在该隧道明挖闭合框架主体结构的设计过程中, 结构净跨长达 15~18.6 m, 为满足结构承载力要求, 高强度的钢筋和混凝土在隧道工程中的使用越来越频繁, 强度等级越高的钢筋和混凝土, 其结构构件设计时尺寸会相对减小, 就会容易忽视钢筋混凝土受弯构件在正常使用阶段的结构刚度问题, 导致结构构件可能产生过大的挠曲变形, 最终影响结构的正常使用^[1], 比如造成结构裂缝的增加、防水的失效、悬挂设备侵限、感官体现差等问题。因此为保证隧道正常运营使用, 钢筋混凝土结构的挠度变形控制同样重要, 针对结构挠度验算, 最大



图1 副中心项目规划图

挠度值不超过允许限值, 目前可以依据的规范有《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(以下称《混规》)、《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)(以下称《隧道规范》)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)(以下称《桥涵规范》), 挠度限值要求不尽相同, 不同规范的采用, 都可能造成结构不同的设计结果, 因此本文以东六环入地改造项目为工程背景, 对钢筋混凝土受弯构件采用不同规范时的挠度验算进行了对比分析, 分析结果可为相似明挖隧道工程结构设计提供有效借鉴。

1 工程背景

东六环入地改造项目为高速公路改扩建工程, 包

收稿日期: 2021-01-28

作者简介: 王霞(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事隧道及地下工程等领域的设计工作。

含改扩建部分(直接加宽段)与新建部分(入地改造段),道路全长约 16 km,道路设计起点位于现状东六环上跨西下营路分离式立交南侧约 60 m 处,设计终点位于现状东六环上跨瞳里新村路分离式立交北侧约 220 m 处,工程平面见图 2。入地改造隧道段为规划万盛南街至规划潞苑二街,全长约 9.2 km,设计时速 80 km/h,采用明挖法与盾构法相结合的施工工法,其中盾构段 7.4 km。全线隧道下穿铁路、轨道交通、房屋建筑、河流、桥梁、道路、综合管廊、高压电塔、燃气航油管线等众多风险源。

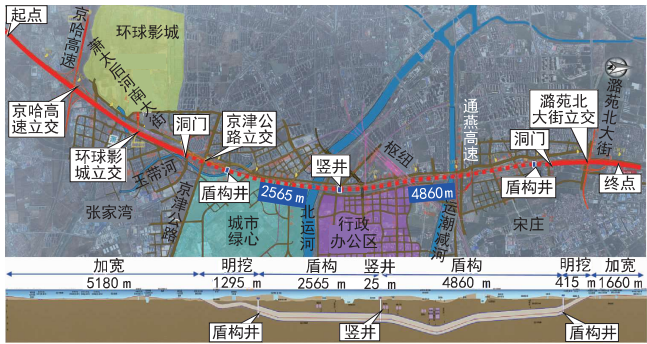


图2 工程平面图

本工程隧道工程场区内主要为第四纪沉积层,主要以高密实砂层为主,局部分布有粉土、粉质黏土并存在少量圆砾、卵石层,粒径不大于 20 cm。地表以下 9.0~10.0 m 进入潜土层,隧址区砂、卵石层内分布有多层承压水。

2 明挖结构设计概况

东六环隧道共设置南、中、北三处盾构井,为适应盾构机后配套台车工作或考虑到盾构井消防、通风、电气等附属设备布置空间有限,南井、北井均设置了后配套段。本文以南侧盾构井后配套段 64 m 明挖结构为节点进行分析,隧道结构平面、纵断面见图 3、图 4。该节点设置为三层闭合框架结构,利用第一层空腔作为隧道设备用房和储物空间,第二层空间为电缆夹层和空气净化通风风道,第三层空间为行车层、疏散救援层,同时为减少后配套段闭合框架结构侧墙高度,在闭合框架内部间距 3 m 设置 4 m×4 m 三角肋板撑,形成稳定的闭合框架空间受力体系。

该区段结构净跨 15.5~18.6 m,结构高度 16.95~23.5 m,结构顶板覆土 2.6 m,结构横断面设计见图 5,结构顶板厚度为 1.2 m,侧墙厚度为 1.3 m,中墙厚度为 1.0 m,中板厚度为 1 m,夹层板 0.5 m,底板厚度为 1.4 m。主体结构采用 C40 补偿收缩混凝土,

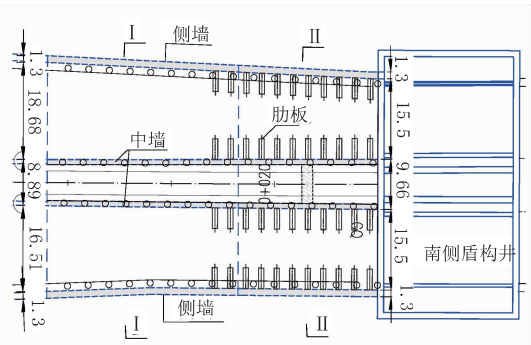


图3 隧道结构平面设计图(单位:m)

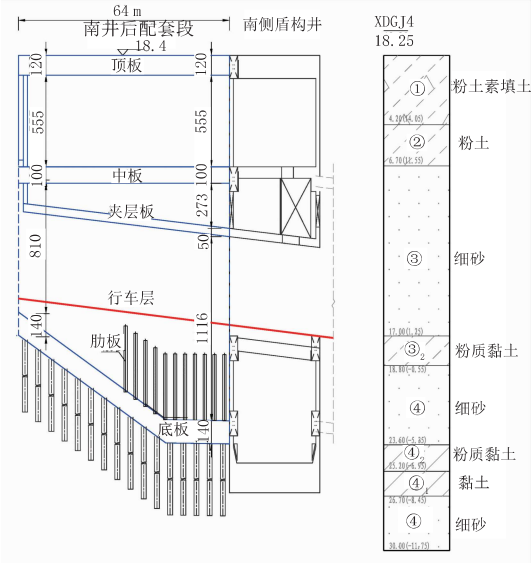


图4 隧道结构纵断面设计图(单位:cm)

设计使用年限为 100 a,结构安全等级为一级,结构重要性系数 1.1。

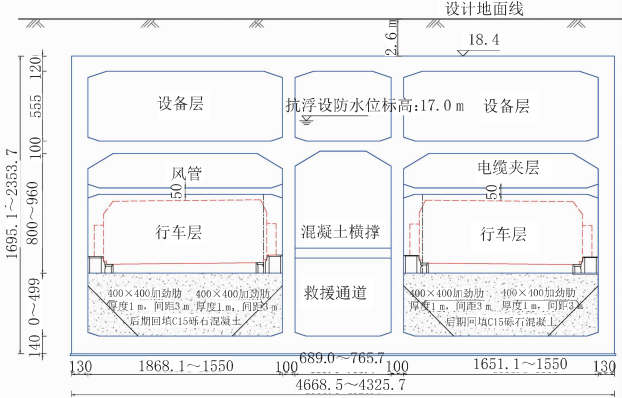


图5 隧道结构横断面设计图(单位:cm)

结构所处土层从上到下分别为:①粉质素填土、②粉土、③细砂、③₂粉质黏土、④细砂,结构底部持力土层为④层细砂层,垂直基床系数 30 MPa/m。地层参数详见表 1。

3 相关规范要求

明挖隧道结构设计时,依据规范选用的不同,钢筋混凝土受弯构件的最大挠度值限值要求也不尽相同。

表 1 地层参数表

土层	厚度 /m	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\phi/(\circ)$	静止侧压力系数 K_0	垂直基床系数 $I/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$
①	4.2	20	8	12	/	/
②	2.5	19.3	17	27	0.43	20
③	10.3	20	0	30	0.4	25
③ ₂	1.8	20.1	30	16	0.45	28
④	4.8	20.5	0	30	0.4	30

《混规》^[2]中规定:对于正常使用极限状态,钢筋混凝土构件应按荷载的准永久组合并考虑长期作用的影响进行变形验算,其最大挠度值应满足表 2 的挠度限值。如果结构构件运营使用上允许,构件制作时可设置预拱度,验算挠度时,可将计算所得的挠度值减去预拱值。

表 2 受弯构件的挠度限值

构件类型	挠度限值
吊车梁	手动吊车 $l_0/500$
	电动吊车 $l_0/600$
屋盖、楼盖及楼梯构件	当 $l_0 < 7\text{ m}$ 时 $l_0/200(l_0/500)$
	当 $7\text{ m} \leq l_0 \leq 9\text{ m}$ 时 $l_0/250(l_0/300)$
	当 $l_0 > 9\text{ m}$ 时 $l_0/230(l_0/400)$

注:表中 l_0 为构件的计算跨度。

《隧道规范》^[3]中规定:对于受弯构件,按荷载的基本组合计算的最大挠度值不应大于表 3 规定的允许值。

表 3 受弯构件的挠度限值

构件类型	允许挠度
梁、板构件	当 $l_0 < 5\text{ m}$ 时 $l_0/250$
	当 $5\text{ m} \leq l_0 \leq 8\text{ m}$ 时 $l_0/300$
	当 $l_0 > 8\text{ m}$ 时 $l_0/400$

《桥涵规范》^[4]中规定:受弯构件在使用阶段的挠度应考虑长期效应的影响,即按规范频遇组合和规范规定刚度计算的挠度值,乘以挠度长期增长系数 η_0 。挠度长期增长系数 η_0 :

(1)当采用 C40 以下混凝土时, $\eta_0=1.6$;

(2)当采用 C40~C80 时, $\eta_0=1.45\sim 1.35$,中间强度等级可按直线内插法取值。

钢筋混凝土受弯构件按上述计算的长期挠度值,由汽车荷载和人群荷载频遇组合在梁式桥主梁产生的最大挠度不应超过计算跨径的 $1/600$ 。

4 结构挠度验算对比分析

本文采用 MIDAS GEN/Civil 对南侧盾构井后配

套段明挖结构进行了二维、三维荷载-结构法模拟计算,计算将围护结构作为一种永久性刚度储备考虑,不考虑围护桩对结构的复合作用^[5]。三维选取结构纵向长度 64 m,二维选取纵向长度 1 m,弹性地基采用软件中弹性连接进行模拟,弹性刚度取为结构底土层的基床系数。对各结构的自重、水土压力、设备荷载、地面超载等作用按照实际情况施加,同时考虑施工阶段和使用阶段,对混凝土结构构件进行承载能力极限状态和正常使用极限状态的计算,计算模型见图 6、图 7,结构变形计算云图见图 8、图 9。

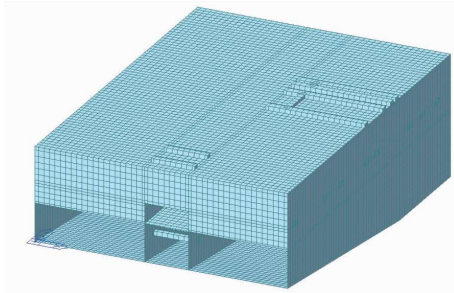


图 6 三维模型图

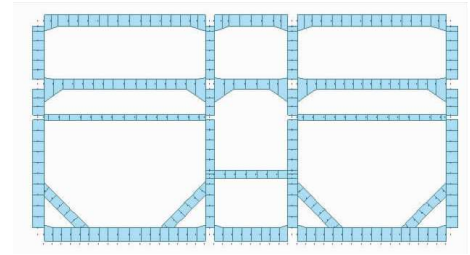


图 7 二维模型图

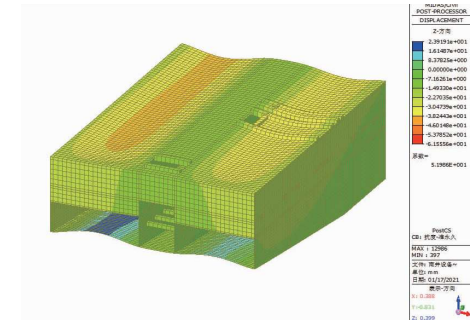


图 8 三维模拟结构变形图(单位:mm)

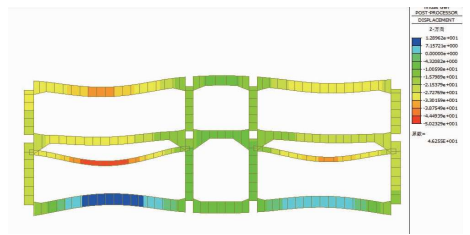


图 9 二维模拟结构变形图(单位:mm)

受弯构件长期挠度受环境加载龄期、环境温度湿度的影响较大,当环境较为干燥时,挠度增大系数增加 20%~40%^[1],综合考虑《桥涵规范》中 C40 混凝土时挠度长期影响系数为 1.45,该参数取用 1.45。

经过结构计算,闭合框架顶板、中板、夹层板基本组合、频遇组合、准永久组合下的计算挠度值见表 4,依据三本规范进行挠度验算,可知:

(1)依据《混规》,三维、二维 I-I 结构区段、II-II 结构区段,结构顶板、中板准永久组合并考虑长期影响下的挠度值满足 10/300 限值要求,夹层板挠度不

表 4 结构挠度计算结果及验算汇总表

建模	结构区段	结构位置	混凝土结构设计规范			公路隧道设计规范			公路桥涵设计规范		
			准永久组合 - 挠度 × 1.45	限值 (l ₀ /300)	是否满足	基本组合 - 挠度	限值 (l ₀ /400)	是否满足	频遇组合 - 可变荷载挠度	限值 (l ₀ /600)	是否满足
二维	I-I 区段	顶板	58.29	62.27	满足	51	46.70	不满足	5.365	31.13	满足
		中板	40.02	62.27	满足	34.2	46.70	满足	2.32	31.13	满足
		夹层板	72.065	62.27	不满足	69.2	46.70	不满足	2.32	31.13	满足
	II-II 区段	顶板	37.41	56.00	满足	33.1	42.00	满足	5.365	28.00	满足
		中板	20.735	56.00	满足	17.7	42.00	满足	3.045	28.00	满足
		夹层板	33.205	56.00	满足	28	42.00	满足	2.755	28.00	满足
三维	I-I、II-II 区段	顶板	64.96	62.27	满足	57.5	46.70	不满足	4.35	31.13	满足
		中板	50.025	62.27	满足	42.4	46.70	满足	1.305	31.13	满足
		夹层板	87	62.27	不满足	73.4	46.70	不满足	1.595	31.13	满足

满足要求;

(2)依据《隧道规范》,三维、二维 I-I 结构区段、II-II 结构区段,中板基本组合情况下挠度值满足 10/400 限值要求,顶板、夹层板均不满足规范要求;

(3)依据《桥涵规范》,三维、二维 I-I 结构区段、II-II 结构区段,结构顶板、中板、夹层板频遇组合可变荷载(地面超载、温度作用)下的挠度值考虑长期影响后均满足 10/600 限值要求。

经过对比分析可知:

《桥涵规范》只考虑了温度作用、地面超载等可变荷载作用下的挠度限值,并不能全面考虑隧道覆土、水压力等恒载对结构挠度的影响,该规范挠度验算方法并不适用于隧道结构工程;

《隧道规范》顶板、夹层板挠度不满足限值要求,10/400 限值要求针对隧道此类非特殊要求的结构较为严格;

夹层板《隧道规范》、《混规》挠度验算均不满足要求,针对 15.5~18.6 的结构跨径,结构厚度设置偏薄。

夹层板挠度不满足规范要求的解决思路:

由于夹层板结构到隧道行车限界仅有 38 cm,此空间需预留部分管线、照明灯具、监控等设备的布设,空间有限,设计考虑适当增加夹层板结构厚度到 600 mm,同时夹层板施工时需预先起拱。预拱度可按结构恒载和 1/2 可变荷载频遇值计算的长期挠度值之和采用,通过计算该结构夹层板可设置 2 cm 预拱度,验算夹层板挠度时,可将所得的挠度值减去预拱度即可满足规范要求。

6 结论与建议

本文以高速公路东六环入地改造工程为分析案例,采用荷载-结构法对南侧盾构井后配套段多层闭合框架结构进行了计算,通过采用不同规范对结构顶板、中板、夹层板挠度验算进行了对比分析,得出如下结论和建议:

(1)对明挖隧道受弯构件进行挠度验算时,《桥涵规范》并不适用于隧道工程,建议采用《混凝土结构设计规范》进行结构设计更为合理;

(2)明挖结构受弯构件控制挠度时,优先考虑增加结构构件的尺寸进一步增加构件整体刚度来减小挠度变形,也可以通过增设斜撑等减跨方式控制;对于均无设置条件时,可考虑构件施工时预先起拱的方式,预拱值需满足规范要求。

(3)目前明挖隧道结构净跨径越来越大,作为使用年限 100 a 的结构工程,应重点关注结构挠度的验算,这将有利于提高隧道工程的主体结构耐久性,并延长隧道的使用年限。

参考文献:

[1] 李志华,苏小卒.钢筋混凝土受弯构件挠度计算方法综述分析[J].四川建筑科学研究,2011,37(2):30-34.

[2] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].

[3] JTG JTG 3370.1—2018,公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S].

[4] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[5] 王护佳,彭帅.地铁明挖车站主体结构计算中的几个关键点[J].现代城市轨道交通,2013(2):45-48.