

DOI: 10.7672/sgjs2025180025

映射关系下桥隧短路基过渡段结构变形控制

程金平, 刘 海

(中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241000)

[摘要] 为解决桥隧间短路基过渡段结构变形对交通安全和运营效率的影响,需实施桥梁与隧道间短路基过渡段结构变形控制。现有变形控制技术存在高强度材料成本较高、数值模拟和试验研究的精度和可靠性有待进一步提高等问题,设计映射关系下桥隧短路基过渡段结构变形控制方法。通过数值模拟方法模拟桥梁在不同车辆荷载和自然环境因素作用下的沉降情况,准确预测地基沉降程度与变形趋势,实施其沉降量预测。考虑桥梁沉降与桥隧间短路基过渡段结构变形间的映射关系,预测桥隧间短路基过渡段结构的竖向变形值,确保桥梁与路基间平稳过渡,减少沉降差异带来的不良影响。依据计算结果确定过渡段结构基床底层的变形模量值,提高过渡段结构的整体性能,完成基床底层各种填料的参数设计,计算各种填料的设计厚度,设计过渡段结构基床表层厚度。测试结果表明,短路基过渡段结构 1~3 的相对沉降变形均较小,3 个结构 1 个月与 6 个月后的相对沉降变形差值较小。

[关键词] 路基;映射关系;数值模拟;过渡段;变形;沉降;优化

[中图分类号] U416.1

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0025-05

Structural Deformation Control of Bridge-tunnel Short Subgrade Transition Section Under Mapping Relationship

CHENG Jinping, LIU Hai

(CCCCSHEC Fourth Engineering Co., Ltd., Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: To address the impact of structural deformation in the short subgrade transition section between bridges and tunnels on traffic safety and operational efficiency, it is necessary to take deformation control measures for this section. Existing deformation control technologies face the issues such as high costs associated with high-strength materials and the need to further improve the accuracy and reliability of numerical simulation and experimental research. Therefore, a deformation control method for bridge-tunnel short subgrade transition section structure under mapping relationship is designed. By utilizing numerical simulation method to simulate the settlement of bridges under different vehicle loads and natural environmental factors, the degree and trend of foundation settlement can be accurately predicted, facilitating settlement prediction. Considering the mapping relationship between bridge settlement and structural deformation in the short subgrade transition section between bridges and tunnels, the vertical deformation values of this section can be predicted, ensuring a smooth transition between the bridge and subgrade, and reducing the adverse effects of settlement differences. Based on the calculation results, the deformation modulus of the subgrade bottom layer in the transition section is determined, enhancing the overall performance of the transition section. This involves completing the parameter design for various fillers in the subgrade bottom layer, calculating the design thickness of each filler, and designing the thickness of the surface layer of the subgrade in the transition section. Test results show that the relative settlement deformation of short subgrade transition sections 1, 2, and 3 is relatively small, and the difference between their relative settlement deformation after one month and six months is minimal.

Keywords: subgrade; mapping relationship; simulation; transition section; deformation; settlement; optimization

0 引言

桥隧工程是一种复杂的土木工程,其中桥梁是跨越障碍物的结构,隧道则是连接两个地点的地下通道。桥隧工程在交通基础设施建设中具有非常重要的地位,因为它们能实现道路的连续性和顺畅性,提高交通效率,且对改善地区经济发展也有至关重要的作用。桥隧间的短路基过渡段是连接桥梁和隧道的关键部位,其结构安全性和稳定性对整个交通系统来说至关重要^[1]。近年来,桥隧间短路基过渡段结构变形控制技术成为研究热点。这种结构在承受车辆荷载及自然环境因素的影响下易产生变形和破坏,严重影响交通系统的安全性和稳定性^[2]。因此,其变形控制技术研究具有重要的实际意义和理论价值。国内外学者针对桥隧间短路基过渡段结构变形控制技术开展了大量研究,提出了许多不同的控制方法。例如,有些学者提出了基于数值模拟的变形控制方法,还有学者提出了基于试验研究的变形控制方法。虽然这些方法取得了一定成果,但仍存在一些问题,如高强度材料成本较高,不利于大规模应用,数值模拟和试验研究的精度与可靠性有待进一步提高等。针对现有方法的不足,在考虑映射关系的基础上提出了一种新型桥隧间短路基过渡段结构变形控制技术。

1 桥隧间短路基过渡段结构变形控制设计

1.1 桥梁沉降预测

通过数值模拟方法模拟桥梁某跨在不同车辆荷载和自然环境因素作用下的沉降情况,实施其沉降量预测,具体步骤如下。

1) 建立桥梁数值模型。采用 ANSYS 软件,根据桥梁的材料性质、实际结构特点、截面尺寸等信息,建立相应模型。在建立模型时,首先需在模型中详细输入桥梁的结构形式、跨度、截面形状^[3],接着在模型中定义桥梁材料类型与物理性质。

2) 施加外在作用。对于车辆荷载,可根据实际情况采用不同加载方式和加载大小来模拟。采用的加载方式包括集中力与分布力,加载大小需根据实际车辆自重和分布情况进行调整^[4]。对于自然环境因素,如温度变化、湿度变化等,可采用相应的边界条件和加载方式来模拟;对于温度变化,可在模型中设置相应的温度边界条件,如太阳辐射、环境温度等;对于湿度变化,可在模型中设置相应的湿度边界条件,如降雨量、湿度等。

3) 数值模拟计算。在完成模型建立和荷载施加后,可通过数值模拟软件进行计算,得到桥梁某跨在不同车辆荷载和自然环境因素作用下的沉降

情况^[5]。桥梁某跨沉降量计算公式如下:

$$c = \Delta h K_i \quad (1)$$

式中: Δh 为在第 i 个车辆荷载或自然环境因素作用下的位移量; K_i 为第 i 个车辆荷载或自然环境因素对应的沉降系数。

完成桥梁某跨沉降量预测后进行桥隧间短路基过渡段结构的变形映射^[6]。

1.2 短路基过渡段结构变形映射

桥梁结构会发生沉降,导致桥隧间短路基过渡段结构发生变形,考虑桥梁沉降与桥隧间短路基过渡段结构变形间的映射关系,预测短路基过渡段结构发生的竖向变形值,具体流程如下。

当桥梁第 N_1 跨的右侧桥墩发生沉降 c 时,其两侧梁体都会发生变形^[7],此时以桥梁梁体整体坐标系为基准,第 N_1 跨梁体发生竖向变形后的右坐标可用下式表示:

$$\beta_b = \frac{\alpha_b - (N_1 - 1)H_b - H_{b0}}{H_b - 2H_{b0}}c \quad (2)$$

式中: H_b 为第 N_1 跨梁体长度; H_{b0} 为第 N_1 跨梁体的梁端悬出长; α_b 为桥梁梁体整体坐标系下第 N_1 跨梁体竖向变形后的左坐标, $(N_1 - 1)H_b \leq \alpha_b \leq N_1 H_b$; β_b 为桥梁梁体整体坐标系下第 N_1 跨梁体竖向变形后的右坐标^[8]。

通过桥梁局部坐标系与梁体整体坐标系间的变换公式将式(2)变换至局部坐标系下,并将其代入桥梁结构发生竖向变形对第 n 个轨道板变形情况的影响矩阵 F_n , 求取桥梁结构变形影响因子的对应解析矩阵 F ^[9]。

$$X_{nb} = \alpha_b - H_n \quad (3)$$

式中: X_{nb} 为桥梁局部坐标系下第 N_1 跨梁体发生竖向变形后的左坐标; H_n 为第 n 个轨道板长度。

$$F = \langle \beta_b \rangle (h_{ni}) \chi_{n1} + \langle \beta_b \rangle (h_{ni}) \chi_{n2} - l_{cy} \cdot$$

$$\int_0^{h_{ni}} \frac{C(h_{ni} - X) [(\alpha_b - H_m) - (N_1 - 1)H_b - H_{b0}]}{\delta^3 P J_s (H_b - 2H_{b0})} dt \quad (4)$$

式中: C 为常数; H_m 为第 m 个基准点的纵向坐标值; h_{ni} 为第 n 个轨道板起始点在第 i 个轨道内的纵向坐标值; χ_{n1}, χ_{n2} 为轨道板板端受力的左、右端边界条件; l_{cy} 为 CA 砂浆支撑线刚度; X 为第 n 个轨道板在局部坐标系坐标轴中的横坐标; PJ_s 为钢轨竖向抗弯刚度; δ 为截面转角; $\langle \beta_b \rangle$ 为依据式(3)获得的 β_b 的局部坐标值^[10]。

因此,当第 N_1 跨右侧桥墩出现沉降 c 时,可通过下式计算扣件竖向力矩阵:

$$\mathbf{Q} = l_{cy}(\mathbf{J} + l_{cy}\mathbf{G} - l_{cy}\mathbf{P})^{-1}\mathbf{F} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{P}$ 为第 n 个轨道板全部扣件位置的竖向变形值矩阵; $\mathbf{G}$ 为 $\text{SUMX}(\cdot)$ 函数 sum 阶单位矩阵; $\mathbf{J}$ 为第 n 个轨道板的扣件力影响矩阵^[11]。

对于全部扣件位置处来说,桥墩沉降映射至桥隧间短路基过渡段结构变形的对应解析矩阵如下:

$$\mathbf{S} = l_{cy}\mathbf{G}(\mathbf{J} + l_{cy}\mathbf{G} - l_{cy}\mathbf{P})^{-1}\mathbf{F} \quad (6)$$

则任意位置处桥隧间短路基过渡段结构竖向变形值的解析式如下:

$$\beta(\alpha_r) = \varepsilon_{r0}\alpha_r - \frac{\alpha_r^3}{6PJ_s}U_{r0} + \frac{\|\mathbf{S}\|}{6PJ_s}\|\mathbf{Q}\| \quad (7)$$

式中: r 为过渡段任意位置的纵向坐标值; α_r 为局部坐标系下任意位置的横坐标; $\beta(\alpha_r)$ 为任意位置处桥隧间短路基过渡段结构竖向变形值; ε_{r0} 为 $\alpha_r = 0$ 处的钢轨转角; U_{r0} 为 $\alpha_r = 0$ 处的钢轨剪力^[12]。

就此完成桥隧间短路基过渡段结构变形的映射预测。

1.3 基床优化设计

依据计算获得的各位置处桥隧间短路基过渡段结构竖向变形值确定过渡段结构基床底层的变形模量值,具体如下:

$$Z = 0.23\beta(\alpha_r)_{\max} \quad (8)$$

式中: $\beta(\alpha_r)_{\max}$ 为 $\beta(\alpha_r)$ 的最大值; Z 为过渡段结构基床底层的变形模量值^[13]。

根据式(8)计算过渡段结构基床底层各种填料计算模量,计算公式具体如下。

细粒土的计算模量可由下式计算:

$$\phi_A = \frac{0.65}{\phi} \cdot Z \quad (9)$$

式中: ϕ 为细粒土密度^[14]。

粗粒土的计算模量可由下式计算:

$$\varphi_A = \frac{0.65}{\varphi} \cdot Z \quad (10)$$

式中: φ 为粗粒土密度。

碎石土的计算模量可由下式计算:

$$\gamma_A = \frac{0.65}{\gamma} \cdot Z \quad (11)$$

式中: γ 为碎石土密度。

通过常规土工试验获取碎石土、粗粒土、细粒土的塑性指数,分别用 $\gamma_B, \varphi_B, \phi_B$ 表示。

基于土体的累积变形曲线计算细粒土、粗粒土及碎石土的允许最大应变限值 $\phi_E, \varphi_E, \gamma_E$, 应变平均值 $\phi_D, \varphi_D, \gamma_D$, 以及模量比 $\phi_C, \varphi_C, \gamma_C$ ^[15]。

就此完成过渡段结构基床底层各种填料的参数设计,根据以上参数计算各种填料的设计厚度,

具体如下:

$$\begin{cases} \phi_F = \frac{\phi_E \phi_B}{\phi_A \phi_C \phi_D} \\ \varphi_F = \frac{\varphi_E \varphi_B}{\varphi_A \varphi_C \varphi_D} \\ \gamma_F = \frac{\gamma_E \gamma_B}{\gamma_A \gamma_C \gamma_D} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\phi_F, \varphi_F, \gamma_F$ 为 3 种填料的设计厚度^[16]。

过渡段结构基床表层厚度的设计具体如下:

$$R_0 = \frac{2Bv_0(1-\eta^2)}{\pi T_2} \left\{ \begin{aligned} & \ln \frac{\sqrt{1+\bar{\omega}^2 + \theta_1^2 \cdot \vartheta^{\frac{2}{3}}} + \bar{\omega}}{\sqrt{1+\bar{\omega}^2 + \theta_1^2 \cdot \vartheta^{\frac{2}{3}}} - \bar{\omega}} + \\ & \bar{\omega} \ln \frac{\sqrt{1+\bar{\omega}^2 + \theta_1^2 \cdot \vartheta^{\frac{2}{3}}} + 1}{\sqrt{1+\bar{\omega}^2 + \theta_1^2 \cdot \vartheta^{\frac{2}{3}}} - 1} \\ & - \frac{1-2\eta}{1-\eta} \theta_1 \vartheta^{\frac{1}{3}} \cdot \\ & \arctan \frac{\bar{\omega}}{\theta_1 \vartheta^{\frac{1}{3}} \sqrt{1+\bar{\omega}^2 + \theta_1^2 \cdot \vartheta^{\frac{2}{3}}}} \\ & \left(1 - \frac{1}{\vartheta} \right) + \frac{2}{\vartheta} \left[\ln \frac{\sqrt{\bar{\omega}^2 + 1} + \bar{\omega}}{\bar{\omega} \ln \frac{\sqrt{\bar{\omega}^2 + 1} + 1}{\bar{\omega}}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: R_0 为过渡段结构基床表层厚度; B 为基床底层与表层构成的矩形荷载的短边长的一半; θ_1 为基床表层厚度与 B 的比值; $\bar{\omega}$ 为荷载长宽比; T_2 为基床底层弹性模量; η 为泊松比; v_0 为荷载强度; ϑ 为基床底层与表层构成的矩形荷载的长边长的一半。

就此完成桥隧间短路基过渡段结构基床优化设计,实现其结构变形控制。

2 案例工程测试

2.1 案例工程

利用设计的考虑映射关系的桥隧间短路基过渡段结构变形控制技术对某工程实施桥隧间短路基过渡段结构变形控制,测试该技术的结构变形控制能力。

桂林—恭城—贺州公路(桂林—钟山段)项目(以下简称“桂钟路”)合同段路线长度为 14.963km,起讫桩号 K105+814.932—K120+780.000。沿线共设桥梁 5.161km(12 座,含立交桥 1 座、天桥 1 座),其中龙围大桥主桥为 44m+80m+44m 预应力连续现浇箱梁结构,上跨贵广高速铁路隧道;隧道 8.056km(4 座),建筑限界净宽 10.75m,

净高 5.0m,均为长隧道。本标段桥隧比达 87.9%,标段内有通道、涵洞 9 座。

该工程中含有 3 个桥隧间短路基过渡段结构,现对此 3 个结构实施变形控制。

2.2 试验过程

首先实施 3 个结构处的桥梁沉降预测,预测结果为:结构 1 桥梁沉降 15.5mm,结构 2 桥梁沉降 12.2mm,结构 3 桥梁沉降 10.8mm。

接着考虑桥梁沉降与桥隧间短路基过渡段结构变形间的映射关系预测竖向变形值。具体预测结果为:结构 1 竖向变形值 9.85mm,结构 2 竖向变形值 8.53mm,结构 3 竖向变形值 6.84mm。

最后实施 3 个桥隧间短路基过渡段结构的基床优化设计。

其中,细粒土、粗粒土、碎石土计算用的塑性指数 $\phi_B, \varphi_B, \gamma_B$ 的常规土工试验结果分别为 10,3,0。

计算获得的细粒土、粗粒土、碎石土的模量比 $\phi_C, \varphi_C, \gamma_C$ 分别为 0.26,0.21,0.18,应变平均值 $\phi_D, \varphi_D, \gamma_D$ 分别为 0.025,0.014,0.011,允许最大应变限值 $\phi_E, \varphi_E, \gamma_E$ 分别为 0.046,0.032,0.025。并计算三者的计算模量,从而获得各种填料的设计厚度。综合基床表层厚度计算结果完成整体优化设计,实现 3 个结构的变形控制。

2.3 测试结果分析

对于实施的基床优化设计,分别通过传感器对 3 处实施长期的桥梁与隧道相对沉降变形分析。3 个结构处的相对沉降变形结果如图 1 所示。

根据相对沉降变形结果,发现短路基过渡段结构 3 处的桥梁与隧道相对沉降变形最小,1 个月后的相对沉降变形<1.5mm,6 个月后的相对沉降变形约在 2.0mm。短路基过渡段结构 1,2 的相对沉降变形也较小。同时 3 个短路基过渡段结构 1 个月与 6 个月后的相对沉降变形差值较小,说明长时间后其相对沉降速度会越来越低,表明设计技术的变形控制效果较好。

3 结语

1)在研究中,考虑映射关系设计了一种桥隧间短路基过渡段结构变形控制技术,取得了一些重要研究成果。

2)针对桂钟路合同段工程实施桥隧间短路基过渡段结构变形控制,测试该技术的结构变形控制能力。

3)计算 3 个路段的计算模量,获得细粒土、粗粒土、碎石土填料的设计厚度;综合基床表层厚度计算结果完成整体优化设计,实现 3 个结构的变形

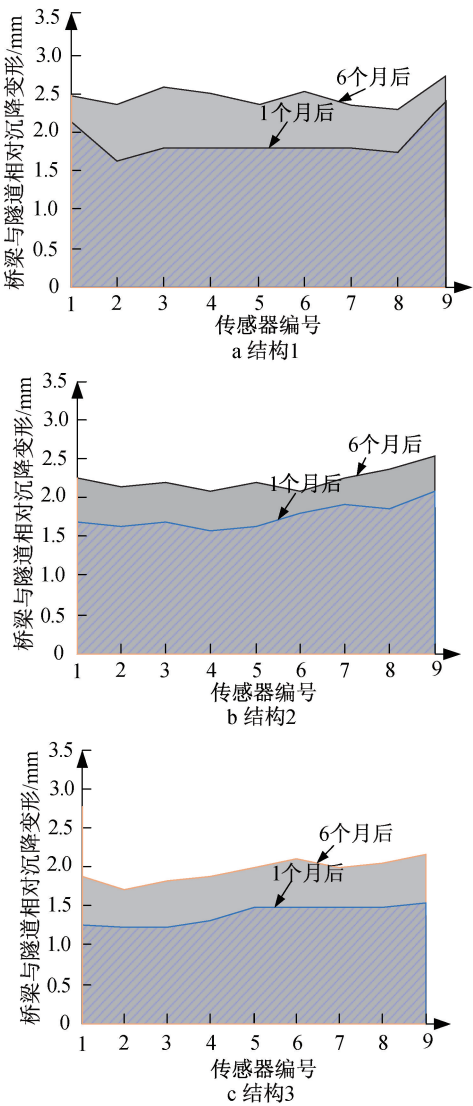


图 1 3 个结构处相对沉降变形结果
Fig.1 Relative settlement deformation results at three structures

控制。

4)根据相对沉降变形结果,发现短路基过渡段结构 3 处的桥梁与隧道相对沉降变形最小,1 个月后的相对沉降变形<1.5mm,6 个月后的相对沉降变形约在 2.0mm。3 个短路基过渡段结构 1 个月与 6 个月后的相对沉降变形差值较小,说明长时间后其相对沉降速度会越来越低。

参考文献:

[1] 魏丽敏,李双龙,何群,等. 深埋式桩板结构桥隧过渡段动力特性研究[J]. 铁道学报,2021,43(1):141-148.
WEI L M, LI S L, HE Q, et al. Study on dynamic characteristics of deep-buried pile-slab subgrade in bridge-tunnel transition section[J]. Journal of the China railway society, 2021, 43(1): 141-148.
[2] 郭杰,王森荣,杨荣山. 桥隧过渡段无砟轨道无缝线路纵向力学特性研究[J]. 铁道标准设计,2022,66(11):43-48.

GUO J, WANG S R, YANG R S. Research on longitudinal mechanical properties of continuous welded rail of slab track at the transition between bridge and tunnel [J]. Railway standard design, 2022, 66(11): 43-48.

[3] 刘富强,郑木莲,王帅,等. 短路基处CPC层对AC+CPC复合式路面应力变形的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(3): 494-501.

LIU F Q, ZHENG M L, WANG S, et al. Effects of CPC layer on stress and deflection of AC+CPC composite pavement structure at short subgrade [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (natural science), 2021, 37(3): 494-501.

[4] 张晓丽,罗章波,郭璇. 软弱滨水地层盾构隧道近穿路桥变形控制与机理分析[J]. 铁道建筑, 2023, 63(6): 113-117.

ZHANG X L, LUO Z B, GUO X. Deformation control and mechanism analysis of shield tunnel closely passing through subgrade and pile in weak riverside strata [J]. Railway engineering, 2023, 63(6): 113-117.

[5] 常文浩,蔡小培,罗必成,等. 严寒地区路桥过渡段无砟轨道结构变形及损伤[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(1): 15-25.

CHANG W H, CAI X P, LUO B C, et al. Structure deformation and damage of ballastless track of roadbed-bridge transition section in severe cold region [J]. China railway science, 2021, 42(1): 15-25.

[6] 胡敏文,夏佳莉,寿树德,等. 相邻基坑围护结构变形及控制的模拟与实测[J]. 浙江工业大学学报, 2023, 51(5): 497-503, 552.

HU M Y, XIA J L, SHOU S D, et al. Simulation and measurement on the deformation and control effect of adjacent foundation pit excavations [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2023, 51(5): 497-503, 552.

[7] 杜永峰,张超,王光环,等. 基于环境温度概率模型的超长隔震结构温缩变形控制研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(2): 58-68, 91.

DU Y F, ZHANG C, WANG G H, et al. Thermal shrinkage deformation control of very-long isolated structures based on the probabilistic model of ambient temperature [J]. China civil engineering journal, 2023, 56(2): 58-68, 91.

[8] 赵伟,陈桥枫,张富国,等. 近接既有结构深大基坑隆起变形控制——以天津地铁5号线思源道站接建地下空间工程为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 1192-1198.

ZHAO W, CHEN Q F, ZHANG F G, et al. Heave deformation control method of large-scale deep foundation pit adjacent to existing structure: taking the underground space project connecting to Siyuandao Station of Tianjin Metro Line 5 as an example [J]. Science technology and engineering, 2023, 23(3): 1192-1198.

[9] 寇鼎涛. 北京地铁大兴机场线矩形断面大跨度隧道上穿施工时对既有线结构变形的控制[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(8): 56-64.

KOU D T. Existing line structural deformation control during Beijing Metro Daxing Airport express rectangular section large-span tunnel over-crossing construction [J]. Urban mass transit, 2023, 26(8): 56-64.

[10] 冷伍明,周思危,聂如松,等. 既有重载铁路路桥过渡段轨道结构纵向差异沉降监测分析与预测[J]. 铁道学报, 2021, 43(6): 150-157.

LENG W M, ZHOU S W, NIE R S, et al. Monitoring analysis and prediction of longitudinal differential settlement of track structures in bridge-subgrade transition sections in existing heavy-haul railways [J]. Journal of the China railway society, 2021, 43(6): 150-157.

[11] 王永涛,姜鲁宁,孙勇,等. 高速公路路-桥过渡段台背回填区受力与变形特性[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 6223-6229.

WANG Y T, JIANG L N, SUN Y, et al. Mechanical and deformation characteristics of the backfill soil at abutment of road-bridge transition section of expressway [J]. Science technology and engineering, 2023, 23(14): 6223-6229.

[12] 吴玉意,朱磊,徐凯,等. 基于结构力学的沿空留巷顶板变形控制原理研究与应用[J]. 煤炭技术, 2022, 41(12): 101-106.

WU Y Y, ZHU L, XU K, et al. Research and application of control principle on roof deformation of gob-side entry retaining based on structural mechanics [J]. Coal technology, 2022, 41(12): 101-106.

[13] 范晓真,刘东海,徐立明,等. 基于变形控制的悬臂式支护结构嵌固深度计算方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(2): 434-445.

FAN X Z, LIU D H, XU L M, et al. Deformation controlled calculation method for the embedded depth of cantilever retaining structure [J]. Journal of basic science and engineering, 2022, 30(2): 434-445.

[14] 陈安英,朱光超,完海鹰,等. 斜交网格钢框架-混凝土核心筒结构施工变形控制数值模拟[J]. 工业建筑, 2021, 51(2): 76-82.

CHEN A Y, ZHU G C, WAN H Y, et al. Numerical simulation of deformation control for a hybrid structure combined with diagrid structure and concrete core tube [J]. Industrial construction, 2021, 51(2): 76-82.

[15] 朱汉华,周小涵,王葵,等. 隧道围岩与支护结构变形协调控制机理及工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(1): 79-86, 94.

ZHU H H, ZHOU X H, WANG Y, et al. Investigation on control mechanism of balanced and coordinated deformation of tunnel surrounding rock and application in engineering [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(1): 79-86, 94.

[16] 李天降,朱孟君,王哲,等. 软土区管廊基坑柔性支护下基坑变形控制标准[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21): 9199-9206.

LI T J, ZHU M J, WANG Z, et al. Deformation control standard of pipe gallery excavation with flexible retaining structure in soft soil area [J]. Science technology and engineering, 2023, 23(21): 9199-9206.