

EPS 路基在地铁上方道路的设计应用

孙秉毅

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要:随着地铁建设和城市开发的不断推进,影响地铁结构安全的因素不断增加。影响因素的复杂化使地铁管理部门对各方面的控制越加严格。地铁上方道路建设应采取适当方法减轻或消除道路建设对地铁结构安全的影响。泡沫混凝土作为一种轻质材料层,被广泛应用于轨道交通结构上方的填筑路基。但是泡沫混凝土工后吸水率大,在复杂情况下已无法作为轨道交通结构上方填筑材料。为解决相关问题,本项目利用 EPS 轻质材料对地铁上方新建道路进行等效荷载路基换填处理,通过总结设计经验希望为其他相关项目的方案选择和设计提供参考。

关键词:轻质材料;EPS;路基换填;地铁上方道路;等效荷载

中图分类号: U412

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)01-0044-03

0 引言

近年来,随着北京、上海等各大城市轨道交通网络的不断扩展和完善,城市地铁与城市地面道路线位重叠或相交的现象越发普遍。地铁上方荷载的变化会在很大程度上影响地铁盾构的安全稳定。地铁上方市政道路的建设对地铁结构安全的影响也得到了地铁维护保养部门的重点关注。为解决相关问题,在道路设计时通过合理的路基设计减少道路建设前后地铁上方永久荷载的变化,进而减弱影响地铁结构安全的影响因素已经成为必然趋势。在道路路基设计时,利用轻型材料对道路下方土基进行材料换填,使地铁上方永久荷载不变化和少变化,进而减轻或消除道路建设前后对地铁结构安全的影响,从而保障地铁结构安全已经成为一种普遍共识。应用于地铁上方路基填料的轻质材料以泡沫混凝土为主,但是泡沫混凝土的吸水容重变化过大,其作为地铁上方道路路基材料的可靠性已严重降低。

1 项目背景

1.1 项目概况

哥白尼路(军民路~沔北路)位于浦东新区张江高科技科技园南园。工程范围北起规划军民路交叉口北侧,南至规划沔北路,道路全长约 1.15 km。道路等级为城市次干路,道路红线宽 32 m,设计速度 40 km/h。

由于规划申通地铁 21 号线在哥白尼路工程区

间与道路平面线位基本重合,且地铁设计将在哥白尼路建设前完成相关设计。根据申通维护保养单位的相关要求,为使地铁设计相关前置因素不变化或者少变化,确保地铁结构安全,考虑通过轻质材料路基换填的方案进行路基设计。

1.2 地铁要求

根据《地铁设计规范》(GB 50157—2013)中作用在地下结构上荷载的相关要求,盾构结构上覆土荷载是永久荷载中的土层压力荷载,其数值是根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 5009)等的有关规定,并根据施工和使用阶段可能发生的变化,按照可能出现的最不利情况确定的荷载组合情况。当地铁建设前后覆土荷载出现变化时,盾构隧道往往会出现不均匀竖向沉降,并有可能因附加荷载引起的剪应力过大导致管片间的连接螺栓产生剪切破坏,发生剪切错台变形。所以,控制地铁上方土层荷载的变化对地铁结构安全的维护就显得尤为重要。

结合地铁维保单位相关要求,为保障地铁结构安全,本工程建设前后,地铁上方填土荷载不应发生明显变化,且应尽可能使道路建设前后地铁结构上方填土荷载保持平衡。

2 轻质材料分析

为减少道路建设前后地铁结构上方荷载的明显变化造成地铁结构不均匀沉降和变形,通常利用轻质材料对新建道路路基换填,以达到少增加或不增加地铁结构上方荷载的目的。

轻质材料作为一种轻质填土材料,与普通土材料

收稿日期:2021-04-09

作者简介:孙秉毅(1992—),男,博士,助理工程师,主要从事道路设计工作。

相比,容重小、材料特性好。由于轻质路基材料的优良特性,其正越来越多地被应用于道路工程建设中。轻质材料种类繁多,应用于道路的轻质材料按照容重的大小通常可以分为准轻质材料、轻质材料和超轻质材料三大类。

准轻质材料以粉煤灰轻质土为代表,容重一般为 $12\sim 16\text{ kN/m}^3$ 。其主要特点为:(1)具有自硬性,强度高,压缩性好。(2)利用废弃材料,节能环保。(3)与普通路基材料一样需要进行碾压施工,且粉煤灰压实后塑性差,类似粉土的特性。(4)减重效果不明显。(5)容易受水的冲刷。

轻质材料以气泡混凝土等轻质材料为代表,通过气泡机的发泡系统将发泡剂用机械方式充分发泡,并将泡沫与水泥浆均匀混合,然后经过发泡机的泵送系统进行施工或成型,经自然养护所形成的一种含有大量封闭气孔的新型轻质材料。其孔结构特性的特点使其材料容重较低,一般干体积密度为 $300\sim 1\,600\text{ kg/m}^3$ 。材料主要性能有:轻质性、热工性能好、隔热防火性能好、低弹减震性、抗压性、耐久性、施工速度快、环保性、经济性。虽然气泡混凝土材料有一定的耐水性,但研究表明,气泡混凝土长期在浸水条件下吸水率仍然不低,这在一定程度上降低了其作为轻质材料的适用价值。

超轻质材料是指密度远低于一般填筑材料的轻质填筑材料,以聚苯乙烯泡沫(expanded polystyren, EPS)为代表。作为超低密度材料,EPS 的密度由成形阶段聚苯乙烯颗粒的膨胀倍数决定,一般介于 $10\sim 45\text{ kg/m}^3$ 之间。作为工程中使用的 EPS,表观密度一般在 $15\sim 35\text{ kg/m}^3$ 。目前在道路工程中用作轻质填料的 EPS 密度为普通道路填料的 $1\%\sim 2\%$ ^[1]。目前 EPS 在道路工程中的主要应用方向有铺设 EPS 隔热层、防治路基冻害,作为路肩填筑材料减小路基沉降、防止或处治路基失稳,作为桥头填筑材料防止桥头跳车、减小桥台的侧向位移,修建直立式路堤,减小对地下或邻近建筑物的影响。EPS 由于其优良的工程特性,越来越多地被应用在特殊工程建设中。但其作为非降解材料,工程建设的环保性应该被重视起来,尚待一种环保材料替代 EPS 在工程建设中的作用。

3 等载换填设计及计算

3.1 换填设计

为减少地铁结构上方荷载变化,道路设计采用

等载换填的处理方法,使道路建设前后地下结构上方荷载基本保持不变。

本工程根据轻质材料特性及地铁维保单位的相关要求,采用 EPS 块体对道路路基进行材料换填。建设后,路基及路面结构荷载基本等于挖土换填荷载。荷载换填效果如下:

$$N_{\text{面}} + N_{\text{基}} = N_{\text{换填土}} \quad (1)$$

式中: $N_{\text{面}}$ 为设计路基以上结构荷载; $N_{\text{基}}$ 为设计换填路基荷载; $N_{\text{换填土}}$ 为设计挖土换填荷载。

根据《公路路基施工技术规范》《公路路基设计规范》对 EPS 施工及设计的相关要求,结合本次道路的相关设计标准,本工程机动车道路面结构及路基换填形式如下:4 cm 沥青马蹄脂碎石(SMA-13,SBS 改性)+8 cm 粗粒式沥青混凝土(AC-25C)+0.6 cm 稀浆封层+35 cm 水泥稳定碎石+15cm 砾石砂+防渗土工布+15~35 cm 单层钢筋混凝土(含泡沫土顶面找平层)+EPS 换填(换填深度根据设计标高计算得出)+透水土工布+20 cm 砂砾垫层(见图 1)。由于市政道路管线多布置于机动车道以外道路两侧范围内,为保障除布设于机动车道下方的给排水管以外的管线敷设方案,本工程对机动车道以外路基采用泡沫混凝土换填的方式进行路基处理。

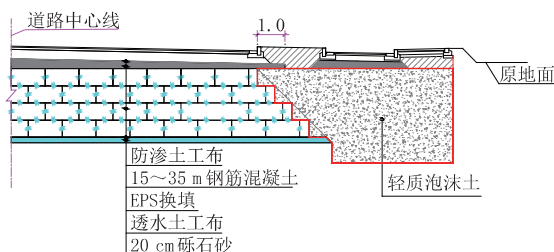


图 1 路基换填示意图

3.2 换填计算

根据等载换填原理,设计路面结构荷载+钢筋混凝土荷载+EPS 荷载+砾石砂荷载等于原地面至设计砾石砂底标高处的挖土荷载。由于路面结构、路面设计高程及 EPS 换填已经明确,仅需通过计算 EPS 换填厚度就可换算得出各材料设计高程。

结合设计情况,总结计算流程如下:

(1)为方便计算和结果验证,对各设计高程和厚度参数进行编号,具体编号及说明如下:

$h_{\text{路面}}$ 为路面结构厚度为,取 0.676 m ;

$h_{\text{钢筋混凝土}}$ 为钢筋混凝土板计算厚度(含调平层),即钢筋混凝土板平均厚度,取值最小厚度 0.1 m 和最大厚度 $(0.1+18\times 0.5\times 0.02=0.28)\text{ m}$ 的中间值 0.19 ;

$h_{\text{填 EPS}}$ 为 EPS 填筑厚度,即设计路面高程减去路

面结构厚度和 EPS 上钢筋混凝土板厚度后的高程与地面线高程的差,可通过已有数据判别得出;

$h_{\text{换 EPS}}$ 为 EPS 换填原状土的厚度;

$h_{\text{砾石砂}}$ 为 EPS 底砾石砂垫层厚度,取 0.3m;

$h_{\text{土}}$ 为原状土挖除厚度;

$H_{\text{地面}}$ 为原地面高程,采用测量数据;

$H_{\text{设计}}$ 为设计路面高程,采用纵断面设计数据;

$H_{\text{混凝土底}}$ 为设计钢筋混凝土板底面高程, $H_{\text{混凝土底}} =$

$H_{\text{设计}} - h_{\text{路面}} - h_{\text{钢筋混凝土 max}}, h_{\text{钢筋混凝土 max}} = 0.28 \text{ m};$

$H_{\text{EPS 底}}$ 为设计 EPS 底面高程;

$H_{\text{砂底}}$ 为设计砾石砂底面高程,即挖土换填底标高。

(2)明确在不同设计地面高程下需要特定判断计算的数值和参数。经试验总结得,当填高小于一定值时, $h_{\text{填 EPS}}$ 不存在;当填高大于一定值时, $h_{\text{填 EPS}}$ 存在。并可通过相应参数计算得出;可以通过判别计算方法对相关参数判别后计算 $h_{\text{填 EPS}}$ 。当 $H_{\text{设计}} - h_{\text{路面}} - h_{\text{钢筋混凝土}} \leq H_{\text{地面}}$ 时, $h_{\text{填 EPS}}$ 为 0。当 $H_{\text{设计}} - h_{\text{路面}} - h_{\text{钢筋混凝土}} > H_{\text{地面}}$ 时, $h_{\text{填 EPS}} = H_{\text{设计}} - h_{\text{路面}} - h_{\text{钢筋混凝土}} - H_{\text{地面}}$ 。此处进行表格计算时采用 IF 命令判断计算(见图 2)。

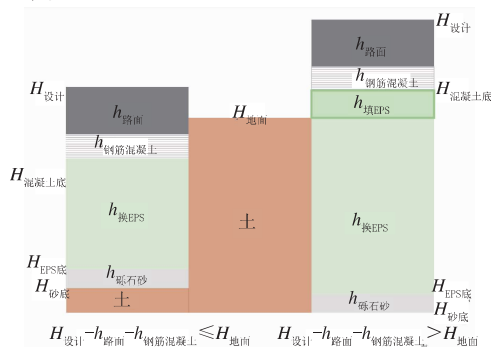


图 2 材料厚度及设计高程示意图

(3)根据相关材料要求及规范,调查统计材料容重参数如下:

$\gamma_{\text{土}} = 17 \text{ kN/m}^3$

$\gamma_{\text{路面}} = 24 \text{ kN/m}^3$

$\gamma_{\text{钢筋混凝土}} = 25 \text{ kN/m}^3$

$\gamma_{\text{EPS}} = 0.3 \text{ kN/m}^3$

$\gamma_{\text{砾石砂}} = 21 \text{ kN/m}^3$

根据路面结构设计及换填设计,等效荷载计算公式如下:

$N_{\text{路面}} + N_{\text{钢筋混凝土}} + N_{\text{填 EPS}} + N_{\text{换 EPS}} + N_{\text{砾石}} = N_{\text{换填土}}$ (2)

式中: $N_{\text{路面}}$ 为设计路面结构荷载; $N_{\text{钢筋混凝土}}$ 为设计钢筋混凝土板计算荷载; $N_{\text{填 EPS}}$ 为 EPS 填筑荷载; $N_{\text{换 EPS}}$ 为 EPS 换填原状土的荷载; $N_{\text{砾石}}$ 为砾石砂垫层荷载; $N_{\text{换填土}}$ 为挖除原状土的荷载。

代入各材料厚度和高程参数如下:

$$h_{\text{路面}} \times \gamma_{\text{路面}} + h_{\text{钢筋混凝土}} \times \gamma_{\text{钢筋混凝土}} + h_{\text{填 EPS}} \times \gamma_{\text{EPS}} + h_{\text{换 EPS}} \times \gamma_{\text{EPS}} + h_{\text{砾石砂}} \times \gamma_{\text{砾石砂}} = h_{\text{土}} \times \gamma_{\text{土}} \quad (3)$$

其中 $h_{\text{换 EPS}} + h_{\text{砾石砂}} = h_{\text{土}}$,代入式(3)可得:

$$h_{\text{路面}} \times \gamma_{\text{路面}} + h_{\text{钢筋混凝土}} \times \gamma_{\text{钢筋混凝土}} + h_{\text{填 EPS}} \times \gamma_{\text{EPS}} + h_{\text{换 EPS}} \times \gamma_{\text{EPS}} + h_{\text{砾石砂}} \times \gamma_{\text{砾石砂}} = (h_{\text{换 EPS}} + h_{\text{砾石砂}}) \times \gamma_{\text{土}} \quad (4)$$

由式(4)可得:

$$h_{\text{路面}} \times \gamma_{\text{路面}} + h_{\text{钢筋混凝土}} \times \gamma_{\text{钢筋混凝土}} + h_{\text{填 EPS}} \times \gamma_{\text{EPS}} + h_{\text{砾石砂}} \times \gamma_{\text{砾石砂}} - h_{\text{砾石砂}} \times \gamma_{\text{土}} = h_{\text{换 EPS}} \times (\gamma_{\text{土}} - \gamma_{\text{EPS}}) \quad (5)$$

由式(5)可得:

$$h_{\text{换 EPS}} = (h_{\text{路面}} \times \gamma_{\text{路面}} + h_{\text{钢筋混凝土}} \times \gamma_{\text{钢筋混凝土}} + h_{\text{填 EPS}} \times \gamma_{\text{EPS}} + h_{\text{砾石砂}} \times \gamma_{\text{砾石砂}} - h_{\text{砾石砂}} \times \gamma_{\text{土}}) / (\gamma_{\text{土}} - \gamma_{\text{EPS}})$$

由 $h_{\text{换 EPS}}$ 可以得出各材料层相应高程和厚度数据,进而可通过断面法统计路基工程量数据。

通过计算得出本项目路基 EPS 最大厚度为 1.45 m,最小厚度为 0.61 m;车行道下实际挖深最大为 1.62 m,最小为 1.6 m。这说明在纵断面变化不大的情况下,由于 EPS 容重很小,导致采用 EPS 轻质材料进行等载换填时,路基挖土深度差异较小,有利于道路路基施工和等载效果保证。

3.3 稳定性验算

根据相关规范规程的规定,轻质材料填筑区位于地下水位以下或受到洪水淹没时,应根据式(6)进行抗浮稳定性验算。根据《建筑地基基础设计规范》的相关要求,抗浮安全系数一般取 1.05。参照《公路路基设计规范》,本项目按照路堤抗浮安全系数不小于 1.2 考虑计算。

$$F_f = \frac{\sum \gamma_i h_i}{\gamma_w h_{jw}} \quad (6)$$

式中: F_f 为抗浮稳定系数; γ_i 为各层材料的重度, kN/m^3 ; h_i 为各层材料的厚度,m; γ_w 为水的重度, kN/m^3 ; h_{jw} 为路堤浸水的深度,m。

总结计算流程如下:

(1)根据等载换填计算得出的 $H_{\text{EPS 底}}$ 数值判断断面是否处于项目区域地下水位以下,如果在地下水位以下,则进行抗浮稳定性计算;如果不在地下水位以下,则不进行抗浮稳定性计算。

(2)计算轻质路堤浸水深度和水位线以上材料厚度。

(3)通过式(6)进行稳定性验算,通过计算得知本项目抗浮稳定系数最小值为 1.55,满足抗浮稳定

对 E2 地震作用下反应谱及非线性时程分析计算结果展开验算。限于篇幅,列出部分桥上建筑钢构件在 E2 非线性时程分析中的验算结果,反应谱的计算结果虽未列出,但满足规范要求,验算表中的界限值对应于正应力。可以看出,桥墩、桩基础关键截面、桥上钢构件抗弯承载力满足规范要求。

5 桥梁结构地震反应分析方法

目前,可采用的地震反应分析方法包括静力法、反应谱法和非线性时程分析法。其中,静力法由于忽略了结构的动力特性,因而具有很大的局限性,所以本研究采用反应谱法和非线性动态时程分析法,对广西柳州凤凰岭大桥开展抗震设计与验算。反应谱法计算简便,可以通过较少的计算量获得结构的最大反应值,因而成为各国规范中的基本分析手段。但反应谱只是弹性范围内的概念,没有考虑结构的塑性发展,而且只能得到结构最大反应,不能反映结构在地震动过程中的经历和地震持续时间的影响,因而本研究在反应谱分析法的基础上同时采用了可考虑各种非线性因素的、较为精确的非线性时程分析法,对桥梁结构和桥上建筑的地震动响应进行研究。从两种方法的计算结果来看,反应谱方法和非线性时程法的结果互相印证和校核,差距在合理范围内,确保了凤凰岭大桥抗震分析的准确性和可靠程度。

6 结 语

本文以广西柳州凤凰岭大桥工程为背景,采用两水平抗震设计方法,对含有桥上建筑的大跨连续梁桥在 E1、E2 地震作用下采用反应谱法和非线性时程分析法,以 SAP2000(v19.2)软件作为建模工具,进行了地震反应分析与验算,得到了如下结论,对该类桥梁的抗震设计提供了参考。

(1)在 E1 地震作用下,主桥桩基础最不利单桩截面地震弯矩小于其初始屈服弯矩,保持弹性工作状态,桥墩关键截面和上部钢桁架杆件亦保持弹性工作状态。

(2)在 E2 地震作用下,桥墩关键截面及桩基础最不利单桩截面地震弯矩小于其等效屈服弯矩,满足其各自性能目标,上部钢桁架所有构件均能满足强度要求,支座位移满足要求。

(3)本研究采用了反应谱法和非线性时程分析法两种地震动分析方法对广西柳州凤凰岭大桥开展了地震动响应研究。两种方法互相补充、印证,确保了计算分析结果的准确性和可靠程度。

参考文献:

- [1] GJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].
- [2] 叶爱君,管仲国.桥梁抗震[M].2 版.北京:人民交通出版社,2011.
- [3] JTC 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [4] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].

~~~~~  
(上接第 46 页)

性的相关要求。这说明 EPS 路基换填技术在本项目是合理可行的,不需采用特殊的抗浮稳定性处理措施。

## 4 施工要点

EPS 块体施工时应尽量减少场地堆放,并采取防火防风等材料保护措施,EPS 块体下砾石砂垫层宽度应超过路基边缘 0.5~1 m。EPS 现场施工时,非标准尺寸应在车间电热丝切割加工完成后再运输至施工现场,且 EPS 块体铺砌应错缝铺设,块体之间应设置爪件连接并保证连接质量。EPS 顶面钢筋混凝土板或土工材料应覆盖全部块体材料,并向外延伸 0.5~1.0 m。

## 5 结 语

随着城市地铁不断建设、地铁周边地块或交通设施的不断开发,当前影响地铁结构变形的因素愈加复杂<sup>[2]</sup>,地铁上方、改建道路对地铁结构安全的影响也不断放大。通过使用 EPS 材料路基换填,降低地铁结构上方荷载变化,可以有效减轻对地铁结构变形的影响。只是当前相关规范等对相关设计或施工要求较宽泛,相关细节仍待进一步深化,并增加对相关项目的研究总结工作。

### 参考文献:

- [1]孔德宝.多年冻土地区挡土墙监测研究与数值模拟计算[D].西安:长安大学,2013.
- [2]潘栋.地铁结构变形预测模型与安全评估分析[D].南京:东南大学,2016.