

# 浅覆土路基-构筑物结合部力学响应与设计方法

凌建明,王 硕,钱劲松

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

**摘要:**通过有限元分析,揭示了浅覆土路基-构筑物结合部“不协调变形”特征;在力学响应分析结果的基础上,进一步分析了浅覆土路基-构筑物结合部路面结构破坏模式与设计状态,并提出了控制结合部不协调变形的指标与标准。从设计状态、设计指标、设计标准、设计流程和设计步骤等方面,系统建立了基于不协调变形控制的浅覆土路基-构筑物结合部设计方法,为今后相关工程提供了设计依据、设计思路、技术支持与决策依据。

**关键词:**浅覆土路基;结合部;设计方法;不协调变形;变坡率;差异沉降

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

## Mechanical Response of Low Subgrade-structure Binding Site and Its Design

LING Jianming, WANG Shuo, QIAN Jinsong

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A finite element analysis shows that the binding site of the low subgrade and structure is characterized by an uncoordinated deformation. Based on the mechanical response analysis results, the failure mode and design status of the binding site are explored in detail, in addition, the indexes and criterion for uncoordinated deformation control are proposed. Then, the design method about the low subgrade-structure binding site is established, including the design status, indexes, criterion, process and steps, which offers a reference for the future engineering in terms of the design foundation, design idea, and technology support as well as the decision-making.

**Key words:** low subgrade; binding site; design method; uncoordinated deformation; ratio of alter gradient; discrepant settlement

城市地下道路修建时遇到埋深较大的地铁车站、地铁隧道区间与其他地下建筑时需上抬,从而导致地下通道顶板标高超出地表。地面道路修复时需在地下通道两侧填筑路基,并与通道顶部齐平。该工况下回填路基高度较低,一般不超过5 m,回填路基高度无法达到路基工作区深度需求。同时新路基填筑后对老路基与地基造成附加应力,形成典型的浅覆土路基与构筑物结合断面,该断面形式中构筑物与回填路基发生不协调变形。另外,构筑物与回填路基的刚度差异大,可能在结合部引起路面结构破坏。

## 1 路基路面力学响应

在浅覆土路基路面自重荷载与车辆荷载作用下,浅覆土路基与地下通道变形不协调,从而对路面结构产生附加应力,当不协调变形导致的附加应力与车辆荷载引起的路面应力的合力超过路面结构强度时会出现结构破坏。

有限元技术在软土地区路基变形分析中取得了良好的应用效果,变形计算结果与现场实测结果具有良好的吻合性<sup>[1-2]</sup>。本文采用有限元法,以上海市东西通道浦东大道-东方路节点通道上抬典型断面(见图1)为算例,计算其路基、地基沉降与路面结构因不协调变形产生的附加应力。有限元分析中作出如下假定:①路面各结构层为连续均质、各向同性的线弹性材料,力学特性用弹性模量和泊松比表征<sup>[3-4]</sup>;②路面各结构层在垂直方向完全连续,即不协调变形随时间而缓慢增长,路面各结构层在自重与行车荷载作用下产生竖向变形,层间不出现脱空现象,沥青面层和基层、基层和垫层之间接触条件为完全连续,垫层和地基、通道之间为摩擦接触,摩擦系数 $f=0.3$ ;③通道与地基、浅覆土路基完全连续接触。

收稿日期: 2011-12-09

基金项目: 上海市科委科研计划项目(08201202002)

第一作者: 凌建明(1966—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为路基工程与机场工程。E-mail: jmling01@yahoo.com.cn

通讯作者: 王 硕(1985—),男,博士生,主要研究方向为路基工程与岩土工程。E-mail: w\_sure@126.com

### 1.1 计算模型与参数

地基及路基的几何参数见图 2。浅覆土路基高度为 2.5 m;通道宽 22 m,浅覆土路基两侧各 14 m;地基计算深度取 22 m,各土层自上而下分为 2 m 硬壳层、5 m 灰色淤泥质粉质黏土、10 m 灰色淤泥质黏土及 5 m 灰色砂质粉土;地基计算宽度取 60 m;路面结构自上而下分别为 16 cm 沥青混凝土面层、45 cm 三渣基层及 15 cm 级配砾石垫层。

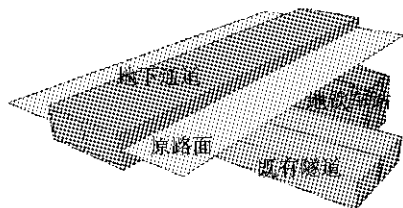


图 1 地下通道上抬示意图

Fig.1 Schematic diagram of the underpass uplifting

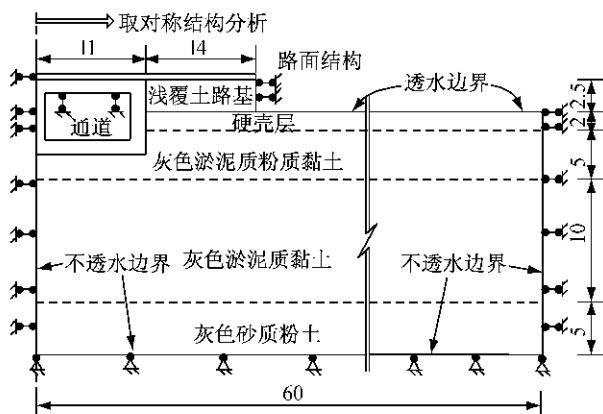


图 2 有限元分析几何模型及边界条件设置(单位:m)

Fig.2 Geometric model for finite element analysis and boundary conditions(unit:m)

由于结构的对称性,通道中心为对称面取结构的一半。结构左右边界分别为横向固定约束,无水平位移;底部为横向和竖向固定约束,无水平和垂直位移;为计算简便,设地表为透水边界,其余为不透水边界<sup>[4]</sup>。另外,地下结构物沉降与隆起量有严格限制,本算例中为确保通道下既有地铁车站、既有隧道与市政管线的安全,要求通道最大沉降及隆起量 $\leq 5$  mm,接头处差异变形 $\leq 2.5$  mm,因此在模型中作简化处理,限制通道结构的竖向位移。

地基和浅覆土路基采用 Mohr-Coulomb 模型进行模拟,路面和通道结构按线弹性模型考虑。土体与各结构材料参数通过室内试验与原位测试结合工程地质勘察报告选取。路基与各层位土体密度采用勘察报告中的平均值,路面结构密度通过蜡封法试验获取;土体渗透系数通过现场抽水试验获取;路基与地基土弹性模量分别采用通过承载板法得到的回弹模量与载荷板试验获取的变形模量,面层与基层弹性模量采用单轴压缩法获取的回弹模量,垫层与地下通道弹性模量通过经验值选取;各材料泊松比根据材料特性,依据经验值选取;各部分土体的黏聚力值与内摩擦角值通过对各层位土体重塑土样的室内直剪试验获取。计算参数如表 1 所示。为了验证各部分土体参数取值的合理性,将各部分土样室内三轴试验应力应变结果与有限元法三轴试验模拟结果进行比对,在不同围压下其相关系数达到 95% 以上,因此土体参数选取是合理的。

加载历程为:① 对地基结构进行地应力平衡;② 基坑开挖及通道结构的施工,3 个月;③ 浅覆土路基施工(荷载线性施加),6 周;④ 路面结构施工,

表 1 材料计算参数

Tab.1 Parameters for materials

材料	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	渗透系数/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )
浅覆土路基	1 873		32.6	0.35	30.7	28.2
亚黏土	1 846	$8.40 \times 10^{-7}$	25.7	0.30	17.4	20.8
灰色淤泥质粉质黏土	1 829	$6.00 \times 10^{-9}$	3.5	0.40	12.6	22.3
灰色淤泥质黏土	1 713	$3.90 \times 10^{-9}$	3.0	0.35	14.8	12.9
灰色砂质粉土	1 832	$6.20 \times 10^{-7}$	4.6	0.30	20.3	31.4
垫层	1 979		250.0	0.30		
基层	2 018		1 736.0	0.30		
面层	2 007		1 325.0	0.30		
通道	2 400		30 000.0	0.20		

1 个月;⑤ 为避免交通荷载施加后引起收敛问题,本步骤将交通荷载线性施加,1 s;⑥ 道路运营期间的固结,历时 10 年,计算中交通荷载用等效均布荷载代替,其大小为 11.5 kPa<sup>[5]</sup>。

地基采用 C3D8RP 进行模拟,通道结构、浅覆土

路基及路面结构采用 C3D8R 进行模拟。采用结构化网格进行划分,单元划分如图 3 所示。路面结构横向密度为每 0.5 m 一个单元,其下通道、路基和地基按此密度等分,路面结构以外地基部分横向共 28 个单元;面层厚度方向为四个单元,基层厚度方向为四个

单元,垫层厚度方向为三个单元;路堤厚度方向每0.5 m一个单元;硬壳层和灰色淤泥质粉质黏土厚度方向每0.5 m一个单元,灰色淤泥质黏土和灰色砂质粉土厚度方向每1 m一个单元;模型纵向延伸方向为五个单元(每1 m一个单元)。

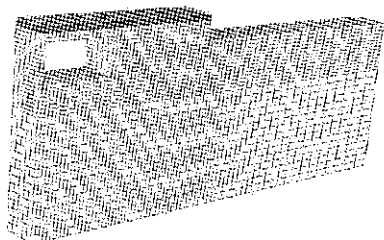


图3 单元划分图

Fig.3 Division of element mesh

引起路面附加应力的是从浅覆土路基填筑完成到固结完成两时间点之间的浅覆土路基沉降量,如图4所示。图4中 $d_i$ 为浅覆土路基填筑完成时的初始沉降量, $d_t$ 为总沉降量, $d_b$ 为 $d_t$ 与 $d_i$ 的差值,即浅覆土路基工后沉降。基于以上分析,将浅覆土路基工后沉降作为路面结构附加应力的诱因,分析得出浅覆土路基工后沉降量之后,将其作为初始位移施加于路面结构底部,分析其面层与基层应力分布情况,如图5所示。

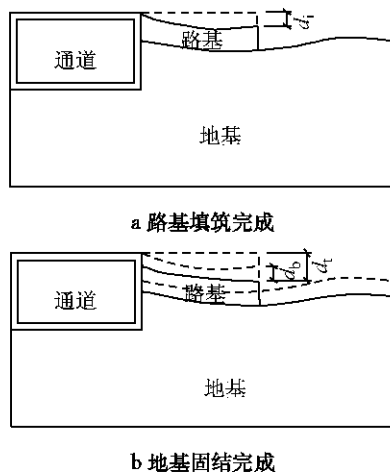


图4 浅覆土路基不同阶段沉降量示意图

Fig.4 The settlement of subgrade in different phases



图5 路面应力分析计算模型荷载与边界条件

Fig.5 Loads and boundaries of calculation model for pavement stress analysis

## 1.2 计算结果分析

图6为不同阶段地基顶部沉降情况,从图中可

看出沉降量大部分出现在浅覆土路基下部区域,各阶段最大沉降点在距离中心线22.5 m处,最大沉降量近160.0 mm。阶段3~5中在距离浅覆土路基中心线30.0 m以外处出现显著隆起,最大隆起量达到33.0 mm。浅覆土路基填筑完成后(阶段3)地基沉降量显著增加,浅覆土路基与通道结合部沉降曲线非常陡,在距离中心线11.5 m(距通道外侧0.5 m)处即达到16.5 mm。之后随着路面荷载与交通荷载的增加(阶段4~5)地基沉降量逐步增加,浅覆土路基下部沉降量增加较为显著,这主要受路面荷载与交通荷载作用区域的影响,荷载作用区域外地基沉降变化不大,隆起量减少。当道路运营10年后(阶段6),地基再次出现大幅沉降,与之前的地基沉降不同,本阶段中地基全断面均出现了明显沉降,沉降盆向外扩展,浅覆土路基荷载作用范围内沉降量依然大于其他位置。

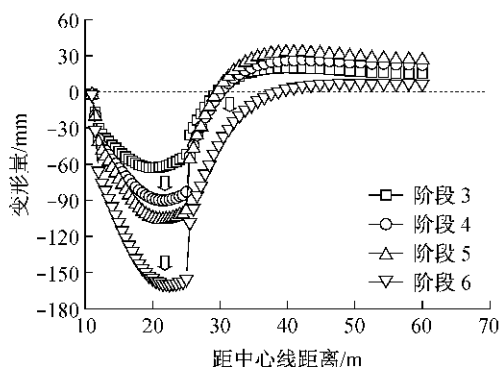


图6 不同阶段地基顶部竖向位移

Fig.6 Vertical displacement on the top of foundation in different phases

不同阶段结束后的浅覆土路基顶部变形曲线如图7所示。从图中可见浅覆土路基最内侧(路基与通道拼接处)出现大幅沉降,并且沉降量随着与通道中心线距离的增加而增加,在距通道中心线20.0 m(距通道最外侧9 m)左右时沉降量趋于稳定。浅覆土路基顶部沉降增长过程与地基沉降增长过程一致,浅覆土路基填筑完成与路面结构施工完成(阶段3~5)后浅覆土路基顶部沉降量均有所增加,且增加量随距通道中心线距离的增加而增加。道路运营10年后(阶段6)整个浅覆土路基顶部沉降量均出现较大增加,特别是距离通道中心线较近区域(距通道外侧9 m范围)亦出现相较于之前阶段更显著的增加,最大沉降量达到158.0 mm之多。路基运营10年后通道与路基拼接面处路基顶部的沉降量达到69.5 mm。

图8为浅覆土路基工后沉降量沿分析断面的分布情况,浅覆土路基工后沉降量随距通道中心线距

离的增加持续增加,并未出现各阶段结束后沉降量在距通道中心线 20.0 m 处稳定的情况,最大沉降量为 104.5 mm,浅覆土路基最内侧(靠近通道)沉降量为 22.8 mm,可见通道与浅覆土路基拼接面处差异沉降显著。

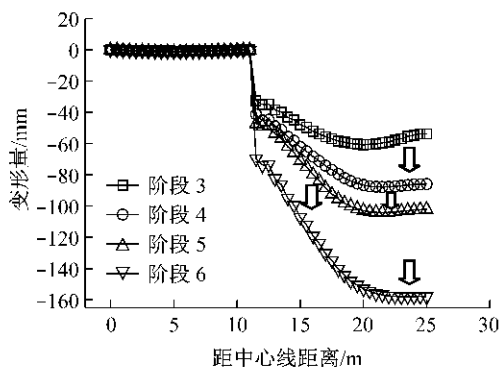


图7 不同阶段结束后通道与浅覆土路基顶部竖向位移  
Fig.7 Vertical displacement on the top of underpass and subgrade after each phase

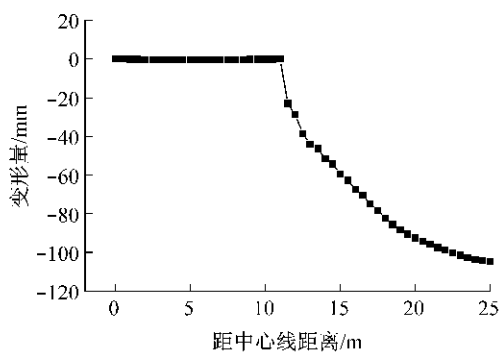


图8 浅覆土路基工后沉降量分布情况  
Fig.8 Distribution of subgrade settlement after filling

图9为各阶段基层底部横向应力分布情况,基层底部最大拉应力出现在距通道中心线 13.5 m(距通道外侧 2.5 m)处,最大拉应力 2.81 MPa;最大压应力出现在距通道中心线 11.0 m(通道与路基结合部)处,其值为 4.65 MPa。阶段 4~5 基层底部压应力与拉应力均较小,阶段 6 中基层底部压、拉应力分别在距通道中心线 13.5 m 与 11.0 m 左右各 1 m 范围内大幅增加,这与阶段 6 浅覆土路基顶部出现大幅沉降相吻合。

图10为各阶段面层顶部横向应力分布情况,面层顶部最大拉应力出现在距通道中心线 11.0 m(通道与路基拼接面)处,其值为 5.79 MPa;最大压应力出现在距中心线 13.0 m(距通道 2.5 m)处,其值为 3.47 MPa。与基层底部应力分布情况类似,阶段 6 中最大拉、压应力出现大幅提高,增大的范围同样是左右各 1 m。

## 2 浅覆土路基-构筑物结合部设计方法

### 2.1 破坏模式与设计状态

通过以上分析可知,路面结构呈现“~”型变形,浅覆土路基与地下通道构成不协调变形,道路运营 10 后面层与基层的最大弯拉应力均远大于材料强度。浅覆土路基-构筑物结合部设计的极限状态取决于结合部的路面破坏模式,数值分析结果表明浅覆土路基-构筑物结合部路面的结构性破坏模式如图 11 所示,包括:①沿路基与构筑物接触面剪切破坏;②面层顶部弯拉破坏;③基层底部或顶部弯拉破坏。

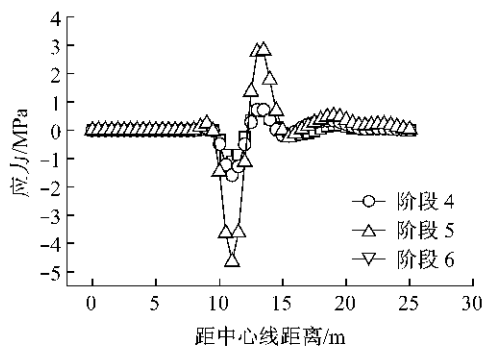


图9 不同阶段基层底部横向应力分布  
Fig.9 Transverse stress distribution at the bottom of base in different phases

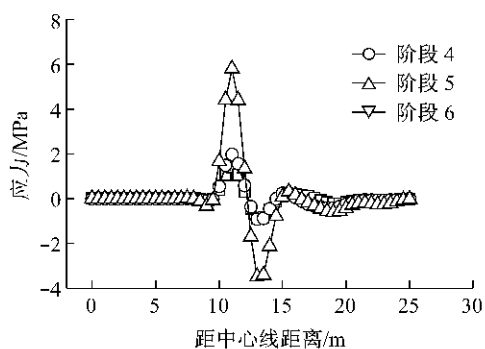
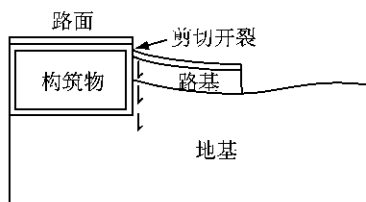


图10 不同阶段面层顶部横向应力分布  
Fig.10 Transverse stress distribution on the top of the surface in different phases

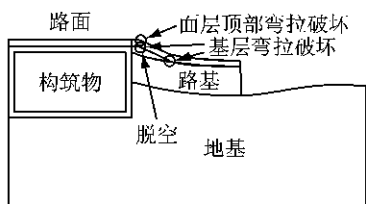
沿路基与构筑物接触面剪切破坏的机理和路基与通道接触面处出现大量滑移相关,与之相对应的设计状态:接触面相对应的路面结构剪应力>路面结构抗剪强度。

面层顶部弯拉破坏的机理为浅覆土路基与构筑物的不协调变形导致面层顶部出现附加弯拉应力,

当附加应力超过面层弯拉强度时,即造成结合部面层顶部的拉裂。与这类损坏模式相对应的设计状态:由浅覆土路基与构筑物不协调变形引起的结合部面层顶部弯拉应力>面层材料弯拉强度。



a 沿路基-构筑物接触面剪切破坏模式



b 面层与基层弯拉破坏模式

图 11 浅覆土路基-构筑物结合部路面破坏模式

Fig. 11 Failure mode of binding sites between low subgrade and structure

基层底部或顶部弯拉破坏的机理为浅覆土路基与构筑物的不协调变形导致基层顶部或底部出现附加弯拉应力,当附加应力超过基层弯拉强度时,即造成结合部基层顶部或底部的拉裂。与这类损坏模式相对应的设计状态:由浅覆土路基与构筑物不协调变形引起的结合部基层底部(顶部)弯拉应力>基层材料弯拉强度。

## 2.2 设计指标与标准

### 2.2.1 设计指标

浅覆土路基-构筑物结合部路面的附加应力由浅覆土路基与构筑物的不协调变形引起,因此从道路的结构强度出发,以浅覆土路基-构筑物结合部的不协调变形为控制对象,采用变坡率为设计指标。

如图 12 所示,浅覆土路基与构筑物工后差异沉降对路面结构的影响程度,不仅与工后差异沉降的绝对值有关,还与差异沉降点的距离有关,因此在浅覆土路基-构筑物结合部设计中应确定工后差异沉降对路面坡度变化的影响即变坡率,计算式为

$$\Delta\delta_{ij} = \frac{|S_i - S_j|}{L_{ij}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\Delta\delta_{ij}$ 为*i,j*两点由于工后差异沉降引起的路面变坡率,%; $S_i$ 为*i*点的工后沉降; $S_j$ 为*j*点的工后沉降; $L_{ij}$ 为*i,j*两点间的水平距离。

### 2.2.2 设计标准

现行规范<sup>[6]</sup>要求路基路拱横坡度的工后增大值

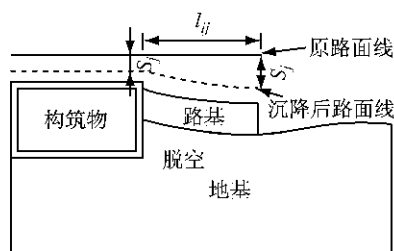


图 12 设计指标示意图

Fig. 12 Diagram of design specifications

应不大于 0.5%。前文算例分析中绝对工后最大差异沉降为 158.0 mm,整体变坡率为 1.13%,面层与基层的最大弯拉应力均超过材料的强度。另外,构筑物与路基拼接工程中,路基填筑对构筑物的影响较小,即构筑物不会跟随浅覆土路基沉降而发生较大沉降,所以在构筑物与路基拼接面附近的差异沉降对路面结构性能影响很大。本研究选取距构筑物与路基拼接面 2 m 处变坡率  $\Delta\delta_2$  与路基整体变坡率  $\Delta\delta_1$  分别制定设计标准。借助算例中路面应力计算模型,分析变坡率对路面应力影响,将  $\Delta\delta_2$  与  $\Delta\delta_1$  作为控制参数,之间各点沉降量依据算例分析中浅覆土路基顶部线形给定,其结果如表 2~3 所示。

表 2 面层最大弯拉应力

Tab.2 Maximum bending stress on the surface MPa

$\Delta\delta_2/\%$	$\Delta\delta_1$					
	0.3%	0.4%	0.5%	0.6%	0.8%	1.0%
0.4	1.01	1.01	1.00	0.99	0.99	0.99
0.5	1.27	1.26	1.26	1.25	1.23	1.22
0.6	1.53	1.52	1.52	1.52	1.20	1.48

表 3 基层最大弯拉应力

Tab.3 Maximum bending stress on the base MPa

$\Delta\delta_2/\%$	$\Delta\delta_1$					
	0.3%	0.4%	0.5%	0.6%	0.8%	1.0%
0.4	0.44	0.43	0.43	0.43	0.42	0.42
0.5	0.54	0.54	0.54	0.54	0.53	0.52
0.6	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65	0.64

通过表 2~3 中的数据可发现  $\Delta\delta_2$  对路面结构的应力影响更为显著,并且当  $\Delta\delta_1 < 1.0\%$  时在相同的  $\Delta\delta_2$  下面层与基层的最大弯拉应力随  $\Delta\delta_1$  的增大略微降低。

浅覆土路基与构筑物拼接路基之上的路面结构应选用具有较高抗拉强度的材料,面层推荐选用密级配细粒式沥青混凝土或 SMA 结构,基层推荐选用二灰碎石或二灰砂砾。依据现行规范<sup>[7]</sup>,上述两类沥青混合料的 15℃ 劈裂强度为 1.2~1.9 MPa,上述两类基层材料的劈裂强度为 0.5~0.8 MPa。 $\Delta\delta_2$  与

$\Delta\delta_t$  可依据所采用的面层、基层材料与表 2~3 中面层、基层的最大应力分布选定,另外基于路面平整度与行车舒适性的要求, $\Delta\delta_2$  与  $\Delta\delta_t$  分别不大于 0.5%, 1.0%。

## 2.3 设计步骤与流程

### 2.3.1 设计步骤

(1) 基础资料调研. 包括道路等级、道路设计标高、地基土层分布、土层物理参数、构筑物结构形式与材料参数、当地机械施工能力与施工队伍技术水平。

(2) 根据既有构筑物结构形式、道路设计标高与道路设计等级确定浅覆土路基高度、路基宽度。

(3) 依据浅覆土路基-构筑物结合部特点、浅覆土路基高度、构筑物结构形式与当地道路设计经验选取路面结构形式。

(4) 根据浅覆土路基设计高度与宽度、路面结构厚度、构筑物结构形式、构筑物与道路各层位材料参数、当地气候水文特征、机械施工能力与既有路基处置效果,结合工程特点通过数值计算甄选浅覆土路基处置方案。可依据所采用的面层、基层材料与表 2~3 中面层、基层的最大应力情况选定  $\Delta\delta_2$  与  $\Delta\delta_t$ , 当具体工程所选用路面材料模量或路面结构形式与本文有较大差异时,应依据本文计算方式重新计算不同变坡率下的面层与基层最大拉应力,结合所选用材料的劈裂强度选定  $\Delta\delta_2$  与  $\Delta\delta_t$ ,但分别不大于 0.5% 与 1.0%。

(5) 对路面结构进行指标验算或力学响应计算,要求路面各结构层应力均在其强度允许范围内;验算路面变形,使路面满足功能性要求。若路面验算不合格应重新选定路面结构,并重新进行浅覆土路基处置方案与路面结构验算。

### 2.3.2 设计流程

设计流程如图 13 所示。设计流程中共有四组判定,当不协调变形及变坡率不满足时应调整路基处置方案;当非典型沥青路面结构时路面结构力学响应不满足,或典型沥青路面结构时设计指标验算不满足,应首先考虑更改路基处置方案,若仍无法满足则更改路面结构设计。

## 3 结论

(1) 浅覆土路基-构筑物结合部受回填路基高度低、路基与构筑物力学性质差异大、构筑物沉降或隆起量微小等因素影响,浅覆土路基与构筑物存在

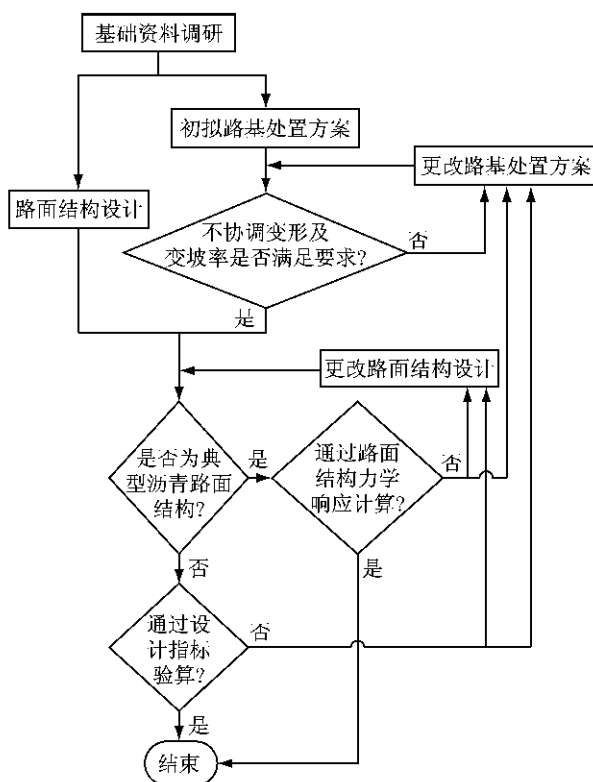


图 13 设计流程图

Fig. 13 Flow chart of design

显著不协调变形,特别是浅覆土路基在拼接面处与构筑物存在较大差异沉降,从而引起路面结构应力突变,导致路面破坏,影响路面结构使用性能与结构性能。

(2) 浅覆土路基-构筑物结合部路面结构性破坏模式可分为三类,包括:沿路基与构筑物接触面剪切破坏,面层顶部弯拉破坏,基层底部或顶部弯拉破坏。

(3) 将变坡率作为浅覆土路基-构筑物结合部的路基设计指标,对距浅覆土路基-构筑物拼接面 2 m 处变坡率  $\Delta\delta_2$  与整体变坡率  $\Delta\delta_t$  分别设定设计标准,基于路面平整度与行车舒适性的要求, $\Delta\delta_2$  与  $\Delta\delta_t$  分别不大于 0.5%, 1.0%。

(4) 在设计状态与设计标准的基础上提出浅覆土路基-构筑物结合部的路基路面设计流程与设计步骤,为今后相关工程提供设计依据、设计思路、技术支持与决策依据。

## 参考文献:

- [1] LING Jianming, QIAN Jinsong, HUANG Qinlong. Failure mechanism and design criterion for low-volume roads subgrade widening [J]. Transportation Research Record, 2007, 2 (1989): 135.

(下转第 147 页)