

# 挖掘修复道路力学响应与设计方法

胥世辉

(中铁十二局集团 第三工程有限公司, 山西 太原 030024)

**摘要:**开挖道路对既有路面结构造成直接破坏,以致行车荷载作用下的受力模式发生变化,而现有模型对新模式下的结构变形和应力计算存在缺陷。因此,正确认识开挖后道路特征,建立新模式下结构变形和应力计算模型是掘路修复理论分析的基础。在三维有限元分析成果基础上,最终确定掘路修复的设计方法与参数。

**关键词:**挖掘修复道路;数值分析;力学响应;设计方法

**中图分类号:**U416.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2011)04-0078-05

## 0 引言

开挖道路前路面结构以连续的整体作用抵抗外荷载,由此我国沥青混凝土路面设计中以弹性多层体系为理论基础<sup>[1]</sup>,把各层在水平方向上视为无限延伸的整体,其简化后的受力模式见图1所示。但是路面一经开挖铺设管道之后,对既有路面结构形成扰动,破坏了原有结构的整体性,因此,不能简单地将修复区域路面与非开挖区域路面视为一个连续整体。修复区域应是具有一定宽度的条形体,并与非开挖区域之间存在2个竖向接触面。尤其当车辆荷载作用在修复区域及其附近时,更不应忽视接触面问题,图2为开挖后的受力模式。

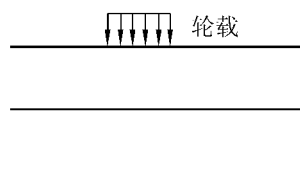


图1 开挖前道路受力模式

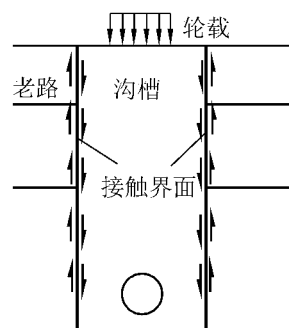


图2 开挖后道路受力模式

开挖后受力模式发生了变化(水平方向存在界面),而已有模型无法考虑水平方向的边界条件,以致对结构变形和应力计算存在缺陷。为此,需重新建立起开挖后的道路计算模型和相应的设计方法。

## 1 挖掘修复道路力学响应

由新受力模式可知,开挖后道路不仅涉及到开挖与非开挖区域的边界问题,而且在不同开挖条件下构成路表变形和结构应力计算相当复杂。这些因素很难通过纯理论解来考虑<sup>[2]</sup>,而有限元可以考虑复杂的边界条件和模拟材料的非线性,为最终计算路表变形和结构应力提供合理的依据。故在道路挖掘修复的分析中采用有限元法。

### 1.1 分析模型

为简化计算,作如下假定:①面层、基层和路基均为弹性材料,以弹性模量 $E$ 和泊松比 $\mu$ 表征其力学

收稿日期:2011-11-18

作者简介:胥世辉 男 1983年出生 助理工程师

特性; ②各结构层层间完全连续; ③行车荷载的影响深度取 2.5 ~ 6.0 m; ④开挖与非开挖区域各结构层的接触面在法向完全连续, 不考虑接触面的穿刺问题, 而仅考虑切向的摩擦和滑移<sup>[3-5]</sup> (以纵向开挖为例, 如图 3 所示); ⑤边界条件, 两个横断面(垂直行车方向)施加垂直方向约束, 两个纵断面(平行行车方向)施加三个方向约束, 路基地面施加竖向约束。

以某次干道纵向开挖为例, 开挖位置如图 4 所示, 其中路幅宽度为 13 m, 开挖宽度为 1.3 m, 开挖深度为 2.6 m, 沿行车方向取 6 m。荷载作用位置按不利情况布设, 经过有限元分析, 最不利荷载位于修复区域中间(图 4), 大小取标准荷载 0.7 MPa。开挖路面采用原结构进行修复, 各结构层材料参数取值见表 1。修复区域与非开挖区域接触面间的摩擦系数按表 2 取值。

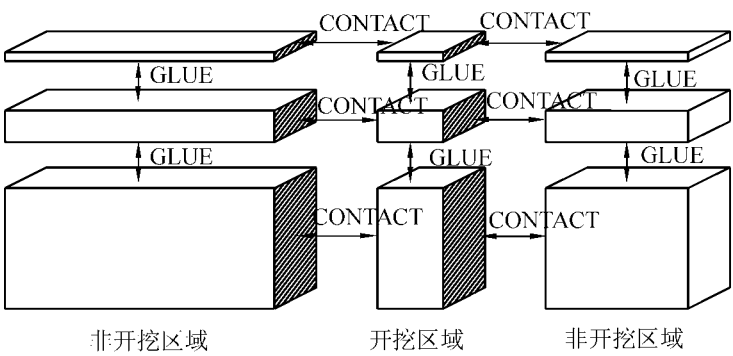


图 3 各结构层接触面考虑

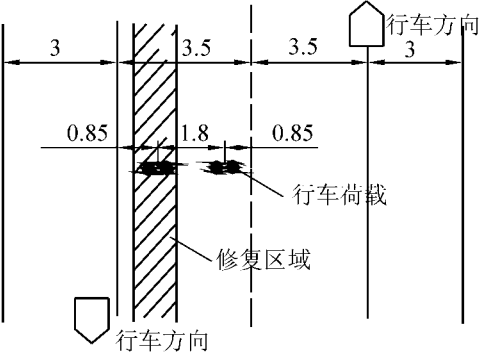


图 4 纵向开挖区域和荷载作用位置(单位:m)

表 1 开挖前后各结构层参数

状态	结构层	弹性模量 $E$ /MPa	泊松比 $\nu$	厚度 /m
开挖前	沥青混凝土面层	1 200	0.3	0.11
	三渣基层	1 500	0.3	0.45
	路基	20	0.35	2.04
开挖后	沥青混凝土面层	1 200	0.3	0.11
	三渣基层	1 500	0.3	0.45
	非开挖区域路基	20	0.35	2.04
	开挖区域路基	20	0.35	1.54
	管道(管径为 0.4 m)	18 000	0.3	0.05

表 2 各接触面摩擦系数取值

项目	面层	基层	路基
接触界面摩擦系数	0.5	0.4	0.3

采用通用有限元软件 ANSYS 中的 solid95 单元对几何模型进行网格划分。

1.2 结果分析

开挖后道路在行车荷载作用下的路表变形如图 5 所示。可见, 开挖后荷载作用下道路横向方向出现明显的变形不连续性。图 6 为沿轮载中心线(最不利情况下)的道路横断面路表变形曲线, 由此表明: ①沟槽经原结构修复后, 修复区域的最大变形量将比开挖前增大 1.5 倍; ②修复区域与非开挖区域的最大变形量比为 1.5(与现场实测的弯沉比 1.5 ~ 8 相吻合), 且存在明显的不协调变形; ③在两个竖向接触面位置, 路表变形发生了突变。尤其是在左侧接触面位置, 由于荷载无法很好地向左连续传递, 致使左侧未开挖路面的竖向变形很小; 相对而言, 因荷载横跨右侧接触面, 故右侧接触面位置的变形突变量小得多, 但同样因荷载无法很好地连续传递而形成该接触面两侧较大的变形差异。

开挖前的基层层底最大拉应力为 0.156 MPa, 而开挖后修复区域基层层底拉应力达到 0.229 MPa, 比开挖前增大了 1.5 倍。开挖前路基顶面最大压应变为 0.30, 而开挖后路基顶面的最大压应变达到 0.54, 将近开挖前的 2 倍, 表明修复区域路表变形主要源于路基的压缩变形。

2 道路挖掘修复的设计状态和设计指标

由上述算例分析可知, 掘路修复后, 行车荷载作用下的路表变形与结构内力均发生了变化。其中开

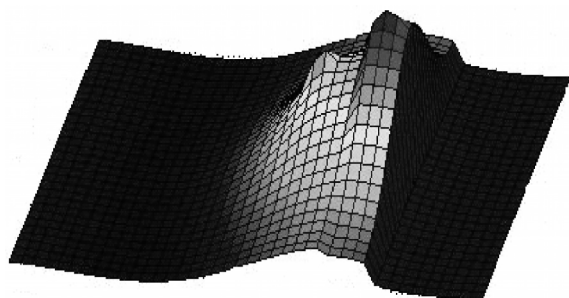


图5 开挖后荷载作用下的路表变形

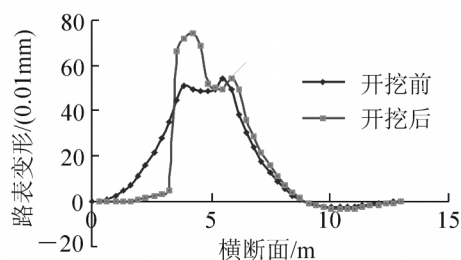


图6 开挖前后路表变形曲线的变化

挖后的路表变形比开挖前增大了1.5倍,且与非开挖区域之间构成不协调变形;而开挖后的基层层底弯拉应力虽未达到材料极限破坏值,但不同开挖条件下的基层层底弯拉应力增大了50%。并且随着沟槽路基产生塑性压缩变形,修复区域行车荷载作用下的路表变形增大,以致引发道路结构的剪切破坏和弯拉开裂。因此,掘路修复设计方法应当基于开挖后修复区域路表变形的控制。

### 2.1 道路挖掘的损坏模式与修复设计状态

掘路修复设计的极限状态取决于掘路修复的损坏模式,现场调研和数值分析均表明,掘路特有的结构性损坏模式主要包括开挖与非开挖区域沿接触面剪切开裂、结合部路面弯拉开裂、修复区域道路基层开裂等三种。

图7为挖与非开挖区域沿接触面剪切开裂模式,其形成机理通常与各种原因引起的开挖与非开挖区域接触面滑移有关。与这类损坏模式相对应的设计状态为:接触面上的剪应力 > 接触面抗剪强度。

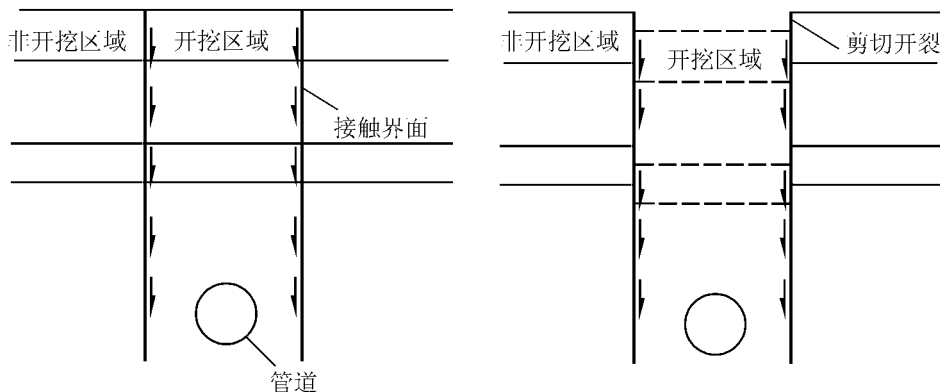


图7 沿开挖与非开挖区域接触面剪切开裂模式

图8为开挖与非开挖区域结合部面层顶面弯拉开裂模式,其形成机理为修复区域道路发生沉降,导致在开挖与非开挖区域结合部的面层顶面产生附加弯拉应力,当附加应力超过面层弯拉强度时,即造成结合部面层顶面的拉裂。与这类损坏模式相对应的设计状态:修复区域沉降引起的结合部面层顶面结构附加应力 > 接触位置面层弯拉强度

图9为修复区域基层层底弯拉开裂模式,其形成机理为修复区域道路发生沉降,导致修复区域道路结构的基层产生附加弯拉应力,当附加应力超过基层弯拉强度时,即造成修复区域基层层底的拉裂。与这类损坏模式相对应的设计状态:修复区域沉降引起的修复区域基层层底结构附加应力 > 修复区域基层弯拉强度

### 2.2 道路挖掘修复的设计指标与标准

如前所述,掘路修复后路面结构附加应力均是由修复区域道路过大的变形而导致不协调变形引起的,而表征这种变形的指标是修复区域的弯沉值(或者与非开挖区域的弯沉比)。因而控制了修复区域路表弯沉即控制了路面结构的附加应力,故可以选择“修复区域路表弯沉”作为道路挖掘设计指标。

由损坏模式和损坏机理可知,以结合部面层顶面弯拉开裂或修复区域基层层底弯拉开裂为控制状态时,均与修复区域的变形有密切关系,而控制修复区域变形则以修复后路表弯沉为表征。因此,道路开挖

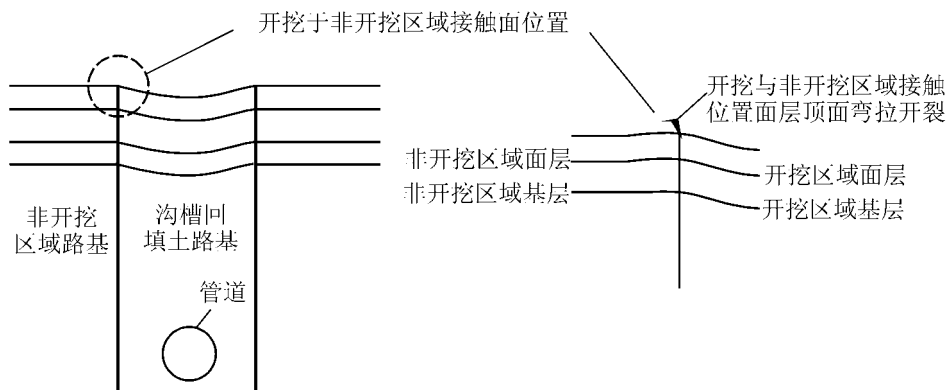


图8 开挖与非开挖区域结合部面层顶面弯拉开裂模式

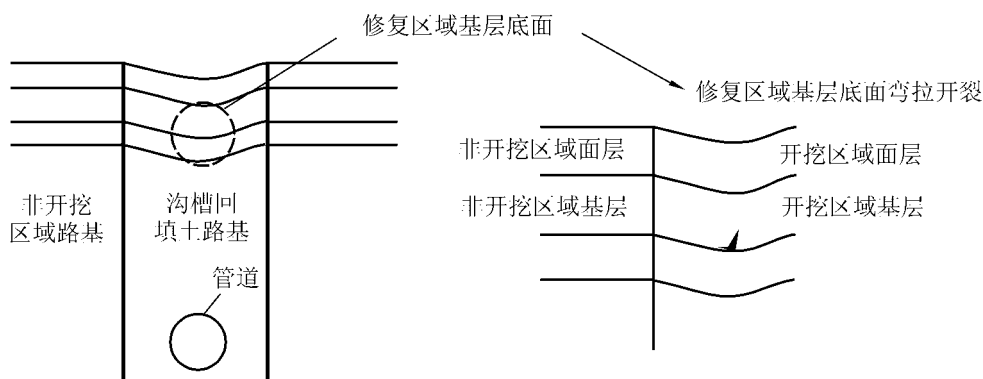


图9 修复区域基层底面弯拉开裂模式

修复的设计标准为  $l_r \leq l_0$  或  $l_r/l_0 \leq 1$  其中,  $l_r$  为开挖区域修复后路表弯沉值;  $l_0$  为开挖前路表弯沉值。

### 2.3 道路挖掘修复设计方法

设计流程如图10所示。设计步骤为:

(1) 旧路路况调查。包括道路等级、交通量、旧路结构层材料和厚度。

(2) 开挖前测定路表弯沉, 结合调研资料反算各结构和路基模量值。

(3) 依据沟槽开挖特点, 如开挖位置、宽度和管道埋设深度等, 从而选定沟槽路基修复材料(模量)和路面修复结构。

(4) 运用有限元方法进行路表变形分析, 确保修复区域路表变形控制在容许范围内。如果路表变形不满足设计要求, 则重新调整修复路面结构。

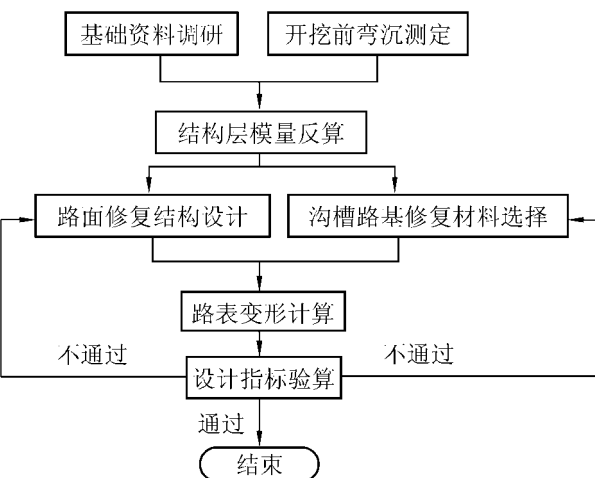


图10 设计流程图

## 3 结论

(1) 修道路路表变形比开挖前增大1.5倍, 基底弯拉应力增大50%。

(2) 掘路特有的结构性损坏模式主要包括开挖与非开挖区域沿接触面剪切开裂、结合部路面弯拉开裂、修复区域道路基层开裂三种。

(3) 以“修复区域路表弯沉”作为道路挖掘设计指标, 要求修复区域路表弯沉值不大于非开挖区域路表弯沉值。

(4) 为挖掘修复道路设计提供了设计流程与设计步骤。

(下转第86页)

Cai Junjun

(The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China)

**Abstract:** To meet the increased railway transportation capacity and the needs of rapid modern economic development, in addition to building some new railways, the transformation of the existing railways speed-raising is also necessary. The plane transformation of medium and small radius curves has become one of the bottlenecks in the speed-raising of existing lines. Taking the research program of Jiagedaqi to Tahe section in "Harbin to Mohe Railway Reconstruction Project" as an example, this article discusses the design principles and ideas for transformation of existing railway line. In combination with the engineering design process of this transformation project, according to the status quo of the existing railway and the characteristics of the plane, the discussion is focused on the reconstruction methods of small radius curve in plane transform. When the transformation is completed, the results show that the railway plane conditions can satisfy the speed-increase requirements of the Jiagedaqi to Tahe railway section, and achieves good results, which may provide reference for the speed-raising transformation of the existing railway in the future.

**Key words:** existing line speed-raising transformation; design principles; small-radius curve; plane transform measures

(责任编辑 车轩玉)

(上接第 81 页)

## 参 考 文 献

- [1] 姚祖康. 道路路基和路面工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 1994.
- [2] 王硕, 刘占辉. 非饱和重塑黄土抗剪强度影响因素的试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2010(3): 86-88.
- [3] 叶先磊, 史亚杰. ANSYS 工程分析软件应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] Duan Shaowei, Shen Pusheng. Crack analysis of concrete road with excavation of deep foundation pit[J]. Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics, 2004, 21(3): 40-43.

## Mechanical Response and Design Method for Rehabilitation of Excavated Pavement

Zan Shihui

(The Third Engineering Company of the 12th China Railway Bureau Group, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The existing pavement structure is damaged by the digging directly, so the force model is varied under the traffic load, but the existing calculation model is defective for the structure deformation and stress calculation under the new mode. Therefore, recognizing the pavement characteristic after the excavation and establishing the calculation model for the structure and stress calculation under the new mode is the basis for theory analysis of pavement rehabilitation. The design method and parameters of excavated pavement rehabilitation is presented based on the 3D finite element analysis.

**Key words:** excavated pavement rehabilitation; numerical analysis; mechanical analysis; design method

(责任编辑 刘宪福)