

# 高速公路煤矸石路基包边土厚度分析

雷 剑<sup>1</sup>,王朝辉<sup>1</sup>,高志伟<sup>1</sup>,申文胜<sup>2</sup>,王选仓<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064;

2. 邯郸市交通运输局,河北 邯郸 056002)

**摘 要:**为确定煤矸石路基包边土的合理厚度,通过分析煤矸石填筑路基成型过程,建立了具有包边土的煤矸石路基简化有限元模型,分析了不同包边土厚度对煤矸石路基包边土内竖向最大压应力及竖向最大剪应力的影响规律,研究了包边土厚度对煤矸石路基中心沉降量、煤矸石路基边缘沉降量、包边土边缘沉降以及包边土差异沉降、路基最大差异沉降的影响程度。结果表明:路基高度相同时,包边土内竖向最大压应力及竖向最大剪应力随包边土厚度增加而增大,当路基高度小于 5 m 时,内力受包边土厚度影响相对较小;包边土厚度变化对煤矸石路基中心沉降量、煤矸石路基边缘沉降量及包边土边缘沉降量影响较小,对包边土差异沉降量影响较大,随着厚度增加,差异沉降逐渐增大,但差异沉降量均在 1.5 cm 以内。

**关键词:**道路工程;包边土;煤矸石路基;有限元分析

**中图分类号:**U416.1

**文献标志码:**A

## Analysis on tipping soil thickness of coal gangue subgrade under freeway

LEI Jian<sup>1</sup>, WANG Chao-hui<sup>1</sup>, GAO Zhi-wei<sup>1</sup>, SHEN Wen-sheng<sup>2</sup>, WANG Xuan-cang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Transportation,

Handan City Government, Handan 056002, Hebei, China)

**Abstract:** To determine the reasonable tipping soil thickness of coal gangue subgrade, through analyzing the process of building coal gangue subgrade, a simplified finite element model of gangue subgrade tipping soil is developed. The influence law of the different tipping soil thickness on coal gangue subgrade tipping soil vertical side within the maximum compressive stress and vertical maximum shear stress is analyzed. The influence degree of tipping soil thickness on coal gangue subgrade center settlement, edge settlement of tipping soil and coal gangue roadbed, differential settlement of tipping soil and the subgrade maximum differential settlement is studied. The results show that: both the maximum vertical compressive stress and the maximum vertical shear stress increase with the increasing of tipping soil thickness when the embankment height is identical; while the embankment height was less than 5 m, the influence of tipping soil thickness on internal force is relatively small; the influence of tipping soil thickness on coal gangue sub-

grade center settlement, edge settlement of tipping soil and coal gangue roadbed is relatively small; the influence on differential settlement of tipping soil is relatively lager, differential settlement increases with the increase of tipping soil thickness, however, all the differential settlements are less than 1.5 cm. 6 tabs, 5 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; tipping soil thickness; coal gangue roadbed; finite element

# 0 引 言

煤矸石用作路基填料,能够减少筑路征地费用,改善环境,具有显著的经济和社会效益。然而,煤矸石路基易被水冲刷,且煤矸石在空气和水的作用下,容易发生质的变化,所以其边坡防护比填土路基更为重要。工程实施中,通常在煤矸石路基两侧加做包边护肩土(包边土),其主要作用是防止雨水和地表水浸入路基内部,防止煤矸石中残留煤粉与空气、水发生反应,生成二氧化碳等有害物质对环境造成污染;其次是有利于植树种草养护边坡及消除黑灰色对人视觉的污染<sup>[1]</sup>。包边土厚度不仅会影响煤矸石作用的发挥,也会对煤矸石路基应力及沉降产生影响。由于《公路路基施工技术规范》中没有规定煤矸石的包边土厚度,目前国内外学者对煤矸石的原材料特性、力学特性及煤矸石填筑路基的技术性能要求进行了较多研究,而关于包边土厚度的理论研究甚少,中国实体工程对包边土厚度的选择也主要基于经验<sup>[2-10]</sup>。为此,本文通过建立煤矸石路基包边土简化模型,采用有限元法分析不同包边土厚度对煤矸石路基内力及不同位置路基沉降的影响,为煤矸石路基包边土厚度的选择提供理论依据。

# 1 有限元计算模型及材料参数

## 1.1 煤矸石路基有限元分析基本假定

利用大型有限元分析软件 ANSYS 建立路基沉降模型,煤矸石路基、包边土和地基土均视为弹塑性材料,本构关系采用 Drucker-Prager 理想弹塑性本构模型(D-P 模型)。对路堤、隧道和水坝等无限长带状物体的研究,常常认为不会沿延伸方向发生变形,可以简化成平面应变问题进行分析,但由于本构关系的复杂性,在有限宽度范围内土体将发生侧胀,把路堤应变当作空间问题分析更符合实际情况,计算精度更高。因此,在进行煤矸石路基有限元分析时采用板体 SOLID 45 空间 8 节点等参单元,而非 Plane 单元。有限元分析过程中采用如下假定。

(1)各层材料为均质、连续性和各向同性的理想弹塑性体,土体本构关系满足 Drucker-Prager 屈服准则。

(2)地基在本身自重作用下的固结变形和压缩变形已完成,路堤变形是在填料自重作用下产生的,不考虑行车荷载及气候因素对其造成的影响。

(3)实际工程中煤矸石路基与包边土结合部为台阶形式,接触状态较稳定,因此,进行有限元模拟时煤矸石路基与包边土接触条件为完全连续。

(4)煤矸石路基与地基均为非饱和土体,不考虑路堤填料与地基土体固结及孔隙水压力的影响,路堤重力荷载为一次性施加。

(5)边界条件,地基地面各方向均为完全约束,地基沿路基横断面方向施加水平方向约束。

## 1.2 煤矸石路基几何模型及网格划分

根据实际工程情况,选择具有代表性的路建立有限元模型,路堤填筑高度取值分别为:1、5、10、15、20 m,路基宽度为 24 m,边坡坡度为 1:1.5,包边土厚度取值分别为 1、2、3 m,地基土分为上下两层,土质分别为亚粘土和碎石土。煤矸石路基实际成型过程包括:煤矸石填筑、包边土填筑、包边土边坡削坡和边坡成型,如图 1 所示;为了简化有限元计算模型,提高运算速率,将路基分析模型中包边土假定为厚度均匀的土层,如下页图 2 所示;模型网格划分如下页图 3 所示。

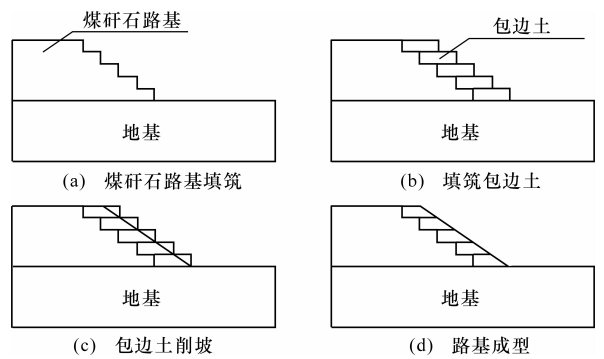


图 1 煤矸石路基填筑过程

## 1.3 煤矸石路基材料参数的确定

煤矸石路基材料的物理性质直接影响路基力学分析及沉降计算结果,对煤矸石填料进行固结试验,确定不同工况的煤矸石路基材料性质参数对于沉降量预测及路基应力分析具有重要作用。根据 D-P 模型中要求的材料物理力学性质参数,进行有限元

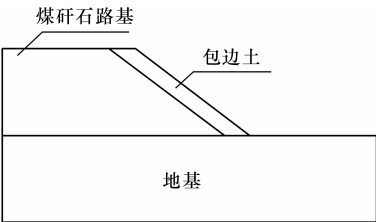


图2 有限元分析中采用的煤矸石路基简化模型

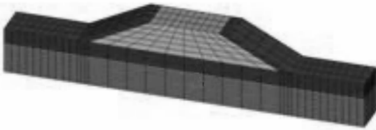


图3 路基模型网格划分

计算时选取的煤矸石路基参数主要包括:材料密度、变形模量、粘聚力、内摩擦角和泊松比。通过对青红(青岛—红其拉甫)高速邯涉(邯郸—涉县)段路基材料参数进行检测,并结合国内外煤矸石路基工程调查资料中的材料性质参数,确定煤矸石路基分析模型的数值,具体取值见表1。

表1 路基土材料参数

土质类型	变形模量/ MPa	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松 比	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
煤矸石 (90%压实度)	18	1 850	0.30	75	45
煤矸石 (93%压实度)	20	1 960	0.30	110	50
煤矸石 (95%压实度)	23	2 000	0.30	130	55
包边土	30	2 180	0.30	80	35
亚粘土地基	15	1 700	0.35	25	20
碎石土地基	60	2 250	0.35	40	30

2 包边土厚度对路基应力的影响

2.1 包边土厚度对路基竖向压应力的影响

包边土竖向压力过大,易导致包边土与煤矸石路基之间产生滑移。为了研究包边土厚度对包边土路基竖向压应力的影响,根据工程情况,选择具有代表性的路基建立有限元模型,采用有限元软件分析不同包边土厚度路堤压应力的变化规律,竖向压应力随包边土厚度的变化如图4所示。

计算结果表明:路基高度相同时,包边土内竖向最大压应力随包边土厚度增加而增大,当路基高度小于5 m时,压应力受包边土厚度影响相对较小,即包边土厚度每增加1 m,竖向压应力增大10%~30%,且压应力值均小于0.05 MPa,对路基影响相对较小;路基高度大于5 m时,压应力对包边土厚

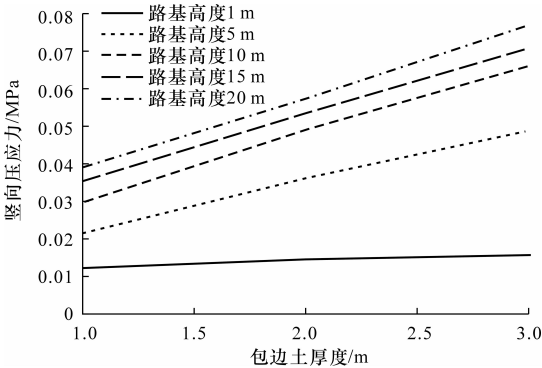


图4 煤矸石路基竖向压应力随包边土厚度的变化曲线

度变化较为敏感,包边土厚度增加1 m,竖向压应力增大30%~60%,对于填筑高度较大的煤矸石路基应选择较小的包边土厚度,减小包边土内竖向压应力,降低包边土与煤矸石路基间的差异沉降。

2.2 包边土厚度对路基竖向剪应力的影响

包边土内最大竖向剪应力随包边土厚度的变化关系如图5所示。

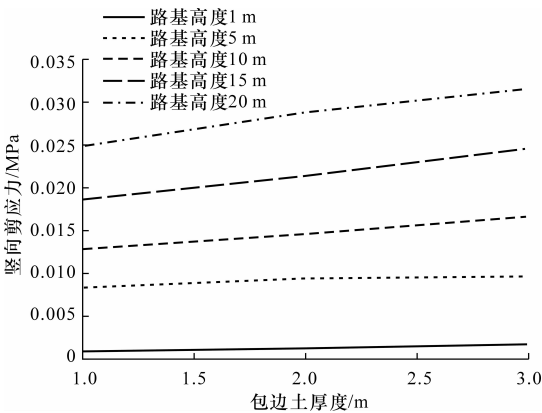


图5 煤矸石路基竖向剪应力随包边土厚度的变化曲线

(1)路基高度相同时,包边土内最大竖向剪应力随包边土厚度增加而增大,路基高度小于5 m时,包边土内最大竖向剪应力较小,均在0.01 MPa以内;剪应力大小受包边土厚度影响较小,包边土厚度每增加1 m,竖向最大剪应力增大约10%;对于高度小于5 m的煤矸石路基,可根据具体工程情况选择适合施工的包边土厚度。

(2)路基高度大于10 m时,随着厚度的增加,包边土内最大竖向剪应力增长速率较大,包边土厚度为1~3 m时,剪应力在0.015~0.03 MPa范围内变化;为减小包边土内竖向剪应力,增强路基稳定性,对于填筑高度较大的煤矸石路基宜采用厚度较小、抗剪强度较高的包边土。

(3)对于不同高度的煤矸石路基,包边土厚度较大时,其内部压应力与剪应力分布情况会对路基产

生不利影响,如果只考虑包边土厚度对路基应力工作状态的影响,在实际施工过程中,宜采用便于施工并且能够保证煤矸石不受外界降雨、空气等因素影响的最小保护层厚度作为包边土厚度。

### 3 包边土厚度对路基沉降的影响

计算了不同包边土厚度及不同路基高度的煤矸石路基沉降量,沉降分析点位置分别在路基中心、煤矸石路基填筑边缘及包边土外边缘。计算结果见表 2~表 6。

表 2 路基高度为 1 m 时不同厚度包边土路基沉降量

包边土 厚度/m	不同位置路基沉降量/cm				
	路基中心	路基边缘	包边土边缘	包边土差异沉降	路基最大差异沉降
1	0.67	0.52	0.42	0.10	0.25
2	0.67	0.57	0.41	0.16	0.26
3	0.67	0.60	0.39	0.21	0.28

表 3 路基高度为 5 m 时不同厚度包边土路基沉降量

包边土 厚度/m	不同位置路基沉降量/cm				
	路基中心	路基边缘	包边土边缘	包边土差异沉降	路基最大差异沉降
1	4.16	3.56	3.33	0.23	0.83
2	4.16	3.69	3.25	0.44	0.91
3	4.17	3.80	3.19	0.61	0.98

表 4 路基高度为 10 m 时不同厚度包边土路基沉降量

包边土 厚度/m	不同位置路基沉降量/cm				
	路基中心	路基边缘	包边土边缘	包边土差异沉降	路基最大差异沉降
1	10.28	9.08	8.74	0.34	1.54
2	10.30	9.29	8.63	0.66	1.67
3	10.32	9.48	8.54	0.94	1.78

表 5 路基高度为 15 m 时不同厚度包边土路基沉降量

包边土 厚度/m	不同位置路基沉降量/cm				
	路基中心	路基边缘	包边土边缘	包边土差异沉降	路基最大差异沉降
1	18.02	16.31	15.89	0.42	2.13
2	18.04	16.61	15.79	0.82	2.25
3	18.06	16.88	15.65	1.23	2.41

表 6 路基高度为 20 m 时不同厚度包边土路基沉降量

包边土 厚度/m	不同位置路基沉降量/cm				
	路基中心	路基边缘	包边土边缘	包边土差异沉降	路基最大差异沉降
1	27.24	25.19	24.71	0.48	2.53
2	27.25	25.56	24.61	0.95	2.64
3	27.27	25.86	24.42	1.44	2.85

分析表 2~表 6 不同包边土厚度条件下路基沉降计算结果,可得出如下结论。

(1)对于不同高度煤矸石路基,包边土的厚度在 1~3 m 之间变化时,煤矸石路基中心沉降量、路基边缘沉降量及包边土边缘沉降量基本保持不变,包边土厚度由 1 m 增加到 3 m,路基最大差异沉降量增加 12%~15%,包边土厚度的变化对煤矸石路基整体沉降影响较小。

(2)厚度变化对于包边土差异沉降量影响较大,随着厚度增加,差异沉降逐渐增大,包边土厚度由 1 m 增加到 3 m,其差异沉降量增加 160%~200%,但该部分差异沉降量较小,均在 1.5 cm 以内,且处于路肩部位,差异沉降对路面结构影响相对较小。

(3)根据不同包边土厚度条件下路基沉降计算结果,影响煤矸石路基沉降量的主要因素是路基填筑高度,包边土作为煤矸石路基的保护层,对整个路基沉降变形的影响十分微弱,确定包边土厚度时,其对于路基沉降的影响应作为次要因素考虑。

### 4 结 语

(1)路基高度相同时,包边土内竖向最大压应力及竖向最大剪应力随包边土厚度增加而增大,当路基高度小于 5 m 时,内力受包边土厚度影响相对较小;为增强路基稳定性,对于填筑高度较大的煤矸石路基宜采用厚度较小、抗剪强度较高的包边土。

(2)包边土厚度变化对煤矸石路基中心沉降量、煤矸石路基边缘沉降量及包边土边缘沉降量影响较小,厚度变化对于包边土差异沉降量影响较大,随着厚度增加,差异沉降逐渐增大,但该部分差异沉降量较小,均在 1.5 cm 以内;确定包边土厚度时,其对路基沉降的影响可作为次要因素考虑。

(3)建议实际工程中采用便于施工并且能够保证煤矸石不受外界降雨、空气等因素影响的最小保护层厚度作为包边土厚度,既满足包边土应力工作状态要求,又可以降低路基差异沉降。

#### 参考文献:

#### References:

[1] 狄升贯. 高速公路煤矸石路基路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2008.  
[2] JTG F10—2006,公路路基施工技术规范[S].  
[3] 邱 钰,缪林昌,刘松玉. 煤矸石在道路建设中的应用研究现状及实例[J]. 公路交通科技,2002,19(2):1-5.

- (上接第 25 页)

- QIU Yu, MIAO Lin-chang, LIU Song-yu. Application study and practice of coal gangue applied to road construction[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(2): 1-5.
  - [4] 刘松玉, 邱钰, 童立元. 煤矸石的强度特征试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(1): 199-205.  
LIU Song-yu, QIU Yu, TONG Li-yuan. Experimental study on strength properties coal wastes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 199-205.
  - [5] Banks S B, Banks D. Abandoned mines drainage impact assessment and mitigation of discharges from coal mines in the UK[J]. Engineering Geology, 2001, 60(1): 31-37.
  - [6] 姜振泉, 赵道辉, 隋旺华. 煤矸石固结压密性与颗粒级配缺陷关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(3): 212-216.  
JIANG Zhen-quan, ZHAO Dao-hui, SUI Wang-hua. Study on relationship between consolidation-compaction and size grade shortage of coal gangue[J]. Journal of China University of Mining & Technology,
  - [7] 申文胜. 煤矸石填筑路基冲击压实施工关键技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(7): 41-43.  
SHEN Wen-sheng. Study on key construction techniques of impact compaction of coal gangue subgrade[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(7): 41-43.
  - [8] 沈付湘, 申文胜. 高速公路煤矿矸石路基现场性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(5): 39-42.  
SHEN Fu-xiang, SHEN Wen-sheng. Study on on-site performance of coal gangue subgrade of express way[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(5): 39-42.
  - [9] 谭炜, 贾致荣, 杨若冲. 包边填砂路基边坡稳定性计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(3): 38-42.  
TAN Wei, JIA Zhi-rong, YANG Ruo-chong. Study on stability of sand-filled embankment slope with cover layer[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(3): 38-42.
  - [10] 程红光. 煤矸石在公路工程中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.