

基于动变形控制法的软岩路基填筑材料回弹模量控制

詹永祥¹, 龙小波², 姚海林¹, 张静波³, 陈羽⁴

- (1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;
2. 武汉新华园置业有限公司, 武汉 430035; 3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056;
4. 贵州高速公路集团有限公司, 贵阳 550004)

摘要: 根据路基路面变形协调原理, 结合国内公路相关规范对路面弯沉的控制标准, 获得软岩路基顶面动变形允许值; 利用传递-反射矩阵方法和叠加原理推导了双轮胎振动荷载作用下弹性层状公路结构的动力响应解; 采用 Hankel 数值逆变换技术计算出实例工程中典型软岩公路路基顶面的动变形, 基于动变形控制法确定了不同软岩填筑区域对应填料的回弹模量临界值; 根据现有公路规范规定的路基结构层厚度, 提出满足动变形条件下的软岩填筑区域所需回弹模量控制要求, 并以回弹模量为依据对软岩填料进行了分类. 研究成果可为软岩填料分区优化填筑提供指导.

关键词: 软岩路基; 动变形控制; 层状公路结构; 传递-反射矩阵方法; 软岩分类

中图分类号: TU 473.1 **文献标志码:** A

The Control of Resilient Modulus of Soft Rock as Filling Material for Subgrade Based on Dynamic Deformation Control Method

ZHAN Yongxiang¹, LONG Xiaobo², YAO Hailin¹, ZHANG Jingbo³, CHEN Yu⁴

- (1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Wuhan Xinhua Yuan Real Estate Co., Ltd., Wuhan 430035, China; 3. CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China; 4. Guizhou Expressway Group Co., Ltd., Guiyang 550004, China)

Abstract: Based on deformation compatibility principle of subgrade and pavement, combined with the pavement deflection control standard of current highway related code, the tolerance value of dynamic deformation of soft rock subgrade top is obtained. The theoretical solutions of elastic multilayered road structures under dynamic double-circular loads are derived by using the transmission-reflection matrix method and the superposition principle. The dynamic deformation of soft rock subgrade top is deduced with inverse Hankel transformation. The critical value of resilient modulus of soft rock filled in area is determined based on the dynamic deformation control method. According to the thickness of the subgrade structure provided by the existing highway code, control requirements of the resilient modulus of the soft rock filler satisfying the condition of dynamic deformation is put forward, and the soft rock filler is classified according to the resilient modulus. The results of this research can provide guidance for the optimization of the soft rock filler.

收稿日期: 2016-04-06

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB036405), 国家自然科学基金项目(41402317, 41472290, 41672312), 贵州省交通运输厅科技项目(2014-122-007), 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)资助

作者简介: 詹永祥(1979-), 男, 安徽省淮南市人, 副研究员, 研究方向为岩土工程. 电话(Tel.): 027-87198350;
E-mail: zhanyongxiang@126.com.

Key words: soft rock subgrade; dynamic deformation control; multilayered road structure; transmission-reflection matrix method; soft rock classification

在软岩地区修筑山区公路时,不可避免地会面临因开挖边坡或隧道而产生大量的泥质软岩土石混合料弃渣,以往在低等级公路施工中仅按一般开山石料填筑处理,公路建成后,经常发生路基沉降。近几年来,高等级公路建设突飞猛进,软岩在高等级公路建设中如何使用受到工程技术人员的普遍关注^[1-2]。但关于软岩弃渣路用性能方面的研究相对较少,诸如软岩填料填筑部位、软岩填筑区以上优质填料最小换填厚度、软岩填筑质量控制标准等问题,目前国内外公路工程技术标准中均未做详细规定,实际工程对于软岩路基填料利用具有较大盲目性^[3]。

2015年新版《公路路基设计规范》^[4]中,采用路基回弹模量作为新建公路路基设计控制指标,并以路床顶面竖向压应变为验算指标,但相关规范并未给出软岩路基回弹模量具体要求值^[5-6]。众所周知,路基回弹模量变化会使路基路面系统中各结构层在交通荷载作用下的应力、应变响应发生相应的变化。采用动变形控制法^[7-8],通过合理地选择软岩填筑区及控制其回弹模量,使交通荷载作用下软岩路基产生的动变形小于其变形允许值,从而保证软岩路基的长期使用性能,可为软岩路基设计、施工提供新思路。本文根据路基路面变形协调原理,结合《公路沥青路面设计规范》^[5]对路面弯沉的控制标准,获得软岩路基顶面动变形允许值;利用传递-反射矩阵方法和叠加原理推导了交通荷载作用下弹性层状公路结构的动力响应解,采用 Hankel 逆变换计算出实例工程中典型软岩公路路基顶面的动变形,基于动变形控制法确定了不同软岩填筑区域对应填料的回弹模量临界值;根据现有路基规范规定的路基结构层厚度,提出满足动变形条件下软岩填筑区域所需填料回弹模量控制要求,并以回弹模量为依据对软岩填料进行了分类。研究结果可为软岩填料分区优化填筑提供指导。

1 路基动变形设计方法

动变形控制法是以在交通荷载作用下路基顶面的变形量不大于允许变形量为控制条件,即

$$u_z \leq u_{tol} \quad (1)$$

式中: u_z 为路基顶面的计算动变形; u_{tol} 为路基顶面允许动变形。

显而易见,动变形控制法首先要根据设计任务书,结合《公路沥青路面设计规范》^[5],确定实例工程的设计交通量、交通等级以及路基路面结构组合类型及相关参数;然后利用有关规范对路面弯沉的控制标准,结合路面路基变形协调条件,得到路基顶面允许动变形值 u_{tol} ;随后根据路基路面分层结构体系模型,计算得到路基顶面动变形 u_z ;最后根据路基动变形控制要求,得到软岩填筑区对应的回弹模量要求值。

1.1 路基顶面允许动变形设计值

结合规范关于路面弯沉控制的思想,考虑路面路基的变形协调,路基顶面允许动变形值可由下式确定^[6]:

$$u_{tol} = 600N_e^{-0.2}A_cA_sA_bA_a \quad (2)$$

式中: N_e 为设计年限内一个车道累计当量轴次; A_c 、 A_s 和 A_b 分别为与公路等级、结构层类型和性质有关的系数,可参见文献^[5]确定; A_a 为路基顶面动变形与路表面动变形幅值之比,也称为公路路面结构组合系数,可参见文献^[9]确定。

1.2 分层结构体系下路基动变形计算

公路的路面路基是典型的分层结构,本次计算所用的软岩路基分层模型(见图1)由上至下依次为面层(上面层、中面层和下面层)、基层、路堤和天然地基。其中:路堤分为两层,上层为优质填料填筑区,相当于换填区;下层则为软岩填筑区。汽车荷载以面

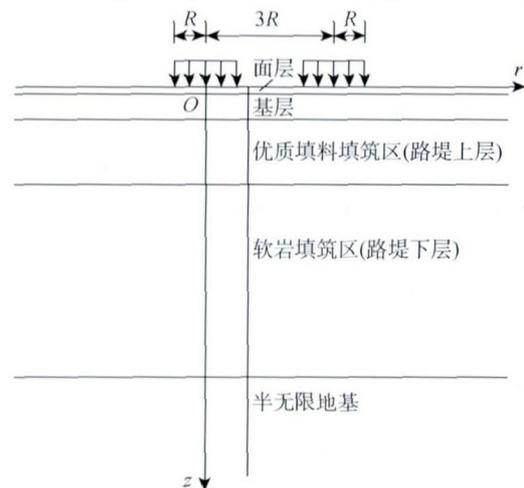


图1 软岩路基层状结构模型

Fig. 1 Multilayered structure model of soft rock subgrade

荷载的形式分布,以单轴双轮胎作为基本的荷载条件,轮胎与路面的接触假设为圆形,轮胎与路面的接触半径为 R .

软岩路基各结构层材料按均质、线弹性、各向同性介质考虑.根据弹性动力学原理,轴对称情况下弹性介质的位移和应力可由 2 个势函数 $\phi(r, z, t)$ 、 $\psi(r, z, t)$ 表示为^[10]

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z} \\ u_z &= \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr} &= \lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^3 \psi}{\partial r^2 \partial z} \right) \\ \sigma_{rz} &= \mu \left(2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial z} + 2 \frac{\partial^3 \psi}{\partial r \partial z^2} - \frac{\partial}{\partial r} \nabla^2 \psi \right) \\ \sigma_{zz} &= \lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{\partial^3 \psi}{\partial z \partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial r} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: u_r 、 u_z 分别为径向和轴向位移; σ_{rr} 、 σ_{rz} 、 σ_{zz} 为轴对称体系下的 3 个应力分量; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + r^{-1} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, 为 Laplace 算子; λ 、 μ 为弹性材料的 Lamé 常数; $\phi(r, z, t)$ 和 $\psi(r, z, t)$ 分别为压缩波和剪切波势函数,这 2 个势函数满足 Helmholtz 方程,

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \phi - \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 \psi - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$, $c_s = \sqrt{\mu/\rho}$, 分别为弹性介质的压缩波和剪切波速, ρ 为材料密度.

按图 1 所示的圆形均布车辆荷载作用在路面,荷载的振动频率为 ω ,则荷载可表达为

$$F(r, t) = \begin{cases} \frac{p e^{i\omega t}}{\pi R^2}, & |r| \leq R \\ 0, & |r| > R \end{cases} \quad (6)$$

式中, p 为轮胎接地压力.

在简谐荷载作用下,公路结构的应力、位移响应分量及 2 个势函数均满足如下方程:

$$\Omega(r, z, t) = \Omega(r, z) e^{i\omega t} \quad (7)$$

式中, $\Omega(r, z, t)$ 为各响应分量及势函数.

引入 m 阶 Hankel 变化,其正变换和逆变换分别为如下形式:

$$\left. \begin{aligned} \bar{f}_m(\xi, z) &= \int_0^\infty f(r, z) r J_m(r\xi) dr \\ f(r, z) &= \int_0^\infty \bar{f}_m(\xi, z) \xi J_m(r\xi) d\xi \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $J_m(z)$ 为 m 阶第 1 类 Bessel 函数; ξ 为轴对称问题径向波数; f 和 \bar{f} 分别为空间域和波数域中的

变量.

卢正等^[9]采用传递-反射矩阵方法和叠加原理推导了双轮胎振动荷载作用下弹性层状公路结构的动力响应解,并利用模型实验结果验证了方法的正确性,本文可借鉴此方法并编制相应计算程序.对于如图 1 所示的层状结构,首先利用弹性动力学理论和势函数法得到 Hankel 变换域内单层弹性介质的动应力和动位移的基本解,然后利用传递-反射矩阵法推导获得双轮胎汽车荷载作用下多层公路结构在变换域中的动力响应解,最后利用 Hankel 逆变换得到时域内的解答.详细推导和求解过程参见文献^[9].

有了路基结构在交通荷载作用下的动力响应值之后,通过反复调整上层优质填料填筑区的材料及其高度,并根据路基动变形控制要求,按式(1)即可确定对应下层软岩填筑区内软岩填料的回弹模量要求值.

2 实例工程软岩填筑区回弹模量控制

以贵州省三穗至黎平高速公路(简称三黎高速)为依托项目.三黎高速主线长 138.066 km,采用完全控制出入双向 4 车道高速公路标准,设计速度 80 km/h.路线处于山陵重丘区,地形条件复杂,地层岩性以震旦系板岩、砂质板岩、凝灰质板岩为主,少量分布有震旦系砂质泥岩、石炭系黄龙组灰岩及第四系松散黏土层.高填深挖路段极为普遍,路基填料需求量大,路堑开挖料较多,公路建设采用就地取材的方式,如何合理利用就地开挖的软岩料是工程建设亟待解决的问题.路面设计以 BZZ-100 作为标准轴载,设计使用年限 15 a,交通等级为重交通.路基设计结构层及其参数取值如表 1 所示.

利用表 1 中的参数对典型软岩公路结构进行计算,并结合《公路沥青路面设计规范》中关于交通荷载的分级,可以得到不同交通等级下软岩路基顶面动变形的允许值,如表 2 所示.

交通等级采用重交通, $N_e = 500, 900$ 万次/车道,根据表 2 可知,路基顶面的动变形允许值为 0.232 和 0.209 mm.

路堤上层优质填料填筑区厚度(即换填厚度) $h = 0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.9, 2.5, 3.0$ m,优质填料回弹模量 $E_h = 120, 160, 200$ MPa 时,计算对应路堤下层软岩填筑区不同优质填料回弹模量时的路基顶面动变形值;根据路基顶面动变形的允许值,确定软岩填筑区软岩回弹模量临界值大小.

表 1 软岩路基结构计算参数

Tab. 1 Computational parameters of typical soft rock subgrade structure

结构层名称	回弹模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	软岩结构厚度/cm	
沥青混凝土面层	细粒式	1 400	2 500	0.25	4
	中粒式	1 200	2 500	0.25	6
	粗粒式	1 000	2 500	0.25	8
水泥稳定碎石基层	1 400	2 400	0.25	41	
级配碎石底基层	200	2 300	0.30	20	
优质填料填筑层	160~200	2 000	0.30	—	
软岩填筑层	—	2 000	0.30	—	

表 2 典型软岩路基结构动变形允许值

Tab. 2 Tolerance values of typical soft rock subgrade structure

交通等级	N _e /(万次·车道 ⁻¹)	u _{tol} /mm
轻交通(A)	<150	>0.301
中交通(B)	150~500	0.301~0.232
重交通(C)	500~900	0.232~0.209
特重交通(D)	900~2 000	0.209~0.175
极重交通(E)	>2 000	<0.175

绘制不同换填厚度下路基顶面动变形与软岩回弹模量变化趋势如图 2 所示. 图 2 用途如下:

(1) 对于已知优质换填材料、软岩填料及交通等级情况下,最小换填厚度可以通过查图插值得到,由此可确定软岩填筑区.

(2) 在已知交通等级、换填厚度及换填材料情况下,可以查图插值得到软岩填筑区回弹模量的临界值,以此判断软岩填料能否填筑路堤.

根据路基顶面动变形的允许值,找出不同换填厚度下的软岩填筑区软岩回弹模量临界值,如表 3 所示. 根据《公路路基设计规范》^[4]中对路基结构层位的划分,分别以路面底面以下 0.3, 0.8, 1.2 及 1.5 m 的位置为优质填料填筑区与软岩填筑区的分界线,查表 3 可以得到软岩的回弹模量临界值(E_{cr}),将其绘制成散点图如图 3 所示. 由图 3 可见,不同换填材料、不同累积当量轴次下,软岩临界回弹模量值分布较分散,本次取临界回弹模量均值作为软岩填料划分依据.

根据行车荷载对路基不同结构层位的影响,将软岩填料的路用性能分成 I~IV 4 个等级,以软岩回弹模量为依据,进行软岩填料等级划分,各级软岩填料回弹模量区间建议值如表 4 所示. 表中, H 为路堤填筑高度.

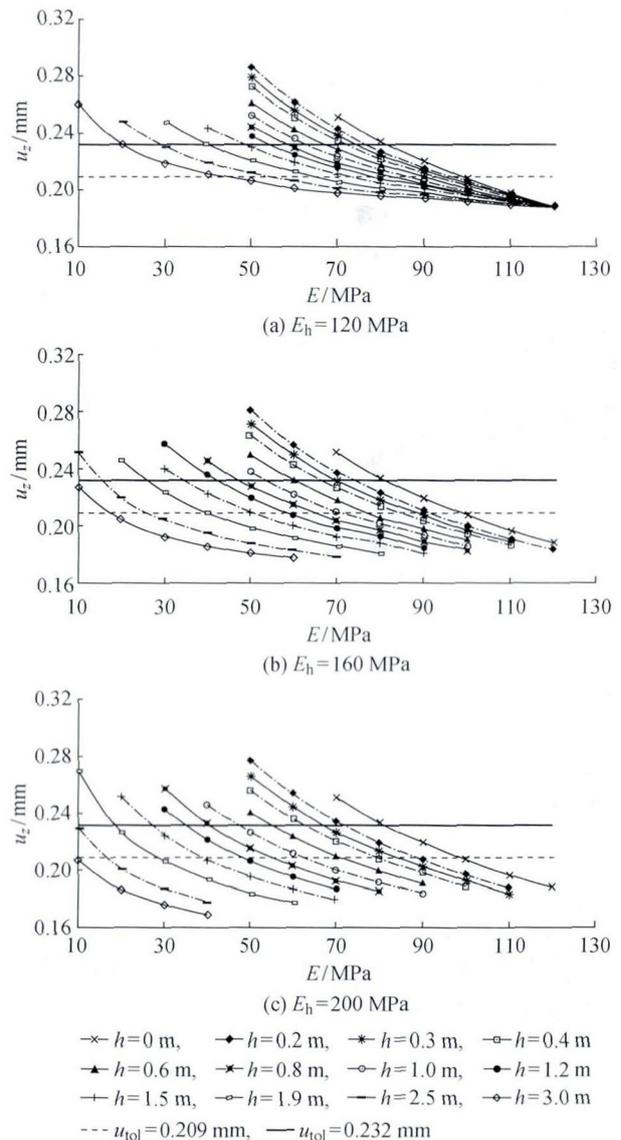


图 2 不同换填厚度下路基顶面动变形计算值与软岩回弹模量的关系

Fig. 2 Dynamic deformation calculation of subgrade vs. resilient modulus of soft rock with different replacement thicknesses

表 3 不同换填厚度下软岩回弹模量临界值

Tab. 3 Critical values of resilient modulus of soft rock with different replacement thicknesses

h/m	E_{cr}/MPa					
	$N_e=500$ 万次/车道			$N_e=900$ 万次/车道		
	$E_h=120$ MPa	$E_h=160$ MPa	$E_h=200$ MPa	$E_h=120$ MPa	$E_h=160$ MPa	$E_h=200$ MPa
0	>81	>81	>81	>100	>100	>100
0.2	>76	>74	>72	>97	>93	>90
0.3	>74	>70	>67	>95	>89	>85
0.4	>72	>66	>63	>93	>85	>80
0.6	>67	>60	>56	>90	>77	>72
0.8	>63	>54	>48	>87	>71	>64
1.0	>57	>47	>41	>83	>65	>56
1.2	>54	>42	>35	>79	>60	>44
1.5	>48	>35	>27	>74	>51	>40
1.9	>40	>26	>19	>66	>40	>28
2.5	>28	>16	>10	>55	>26	>17
3.0	>20	>10	>10	>44	>18	>10

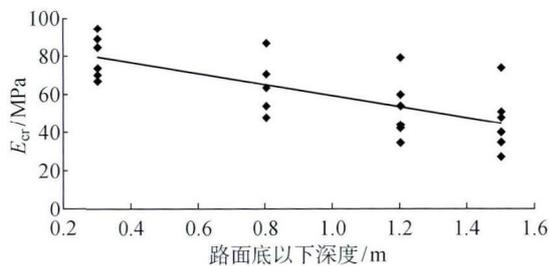


图 3 路基各结构层下软岩填料临界回弹模量值分布

Fig. 3 The distribution of critical resilient modulus of soft rock filling material under different structural layers of subgrade

表 4 根据回弹模量确定的软岩填料分级建议值

Tab. 4 Recommended classification values of the soft rock filler determined by resilient modulus

填料分级	E/MPa	适用的路堤填筑范围	
		路面底以下深度/m	结构层位
I 级	>80	0~H	路堤、路床
II 级	65~80	0.3~H	路堤、下路床
III 级	65~40	0.8~H	路堤
IV 级	<40	1.5~H	下路堤

以回弹模量作为软岩分类及填筑控制指标,在三黎高速公路碾压实验段上得到成功应用并在全线推广,目前公路运营状况良好.研究成果可为其他类似软岩路基工程提供参考.

3 结 论

(1) 结合现有规范关于路面弯沉的控制标准,

提出了软岩路基动变形控制指标及软岩路基动变形设计方法,得到不同软岩填筑区对应的软岩填料回弹模量临界值.

(2) 以规范规定的路基结构层厚下计算的软岩回弹模量临界值为依据,进行软岩填料等级划分,可为软岩路基填料的科学利用提供依据.

(3) 现有的路基设计和填筑控制指标为承载比(CBR),如何将回弹模量和 CBR 值联系起来,得到一个准确而适用的关系式以指导软岩路基填筑施工,还需要进一步的研究.同时软岩作为路基填料,影响其使用性能的因素众多,尤其是水的影响.在本文提出的以回弹模量控制软岩填筑质量的基础上,路基路面还需做好防排水工作,以防止路基湿化变形.

参考文献:

[1] 郑明新,方焘,刁心宏,等.风化软岩填筑路基可行性室内试验研究[J].岩土力学,2005,26(Sup):53-56.
ZHENG Mingxin, FANG Tao, DIAO Xinhong, et al. Experimental study on feasibility of filled subgrade with weathered soft rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(Sup): 53-56.

[2] 但汉成,李亮,胡萍,等.风化软岩路基填料击实工程特性室内试验研究[J].铁道学报,2009,31(4):75-81.
DAN Hancheng, LI Liang, HU Ping, et al. Interior experimental study on compaction of weathered soft rock subgrade engineering characteristics filling mate-

- rials[J]. **Journal of The China Railway Society**, 2009, 31(4):75-81.
- [3] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. **岩土力学与工程学报**, 2005, 24(1):33-38.
ZHOU Cuiying, DENG Yimei, TAN Xiangshao, *et al.* Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(1):33-38.
- [4] 中华人民共和国交通部. 公路路基设计规范:JTG D30-2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015:8-9.
- [5] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面设计规范:JTG D50-2006[S]. 北京:人民交通出版社,2006:32-35.
- [6] 中华人民共和国交通部. 公路路面基层施工技术规范:JTJ 034-2000[S]. 北京:人民交通出版社,2000:48-50.
- [7] 卢正,姚海林,吴万平,等. 高速公路路基结构分析及动变形设计方法[J]. **岩土力学**, 2010, 31(9):2907-2912.
LU Zheng, YAO Hailin, WU Wanping, *et al.* Structural analysis and design method of dynamic deformation of expressway subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9):2907-2912.
- [8] 卢正,姚海林,胡梦玲,等. 基于动变形控制法的路基临界高度与湿度关系研究[J]. **岩土力学**, 2014, 35(1):184-188.
LU Zheng, YAO Hailin, HU Mengling, *et al.* Study of relationship between critical height and humidity of subgrade based on dynamic deformation control method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(1):184-188.
- [9] 卢正,姚海林,胡梦玲,等. 基于传递-反射矩阵法的层状公路结构动力响应研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(12):3767-3774.
LU Zheng, YAO Hailin, HU Mengling, *et al.* Study of dynamic response of multilayered road structures based on transmission-reflection matrix method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12):3767-3774.
- [10] SU X Y, TIAN J Y, PAO Y H. Application of the reverberation-ray matrix to the propagation of elastic waves in a layered solid[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2002, 39(21/22): 5447-5463.