

文章编号:1005-0523(2020)04-0014-07

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.04.003

基于动变形控制法的路基回弹模量控制研究

任圆圆

(陕西交通职业技术学院公路与铁道工程学院,陕西 西安 710018)

摘要:回弹模量作为高速公路路基设计的重要控制指标,在当前设计方法中常采用基于静力特性的控制方法,与实际情况不一致。建立基于路基动力特性的高速公路路基回弹模量控制方法对建设质量高、路用性能好的高速公路具有重大意义,目前该方面的研究相对较少。通过室内试验及有限元模拟对公路路基的动变形特性进行研究,分析路基结构的动变形随荷载作用次数的变化规律,建立路基顶面动变形与路基回弹模量的关系。从动变形角度提出高速公路路基回弹模量的要求,研究结果可为高速公路路基回弹模量的控制标准提供指导。

关键词:高速公路;路基结构;动变形;回弹模量;控制标准

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

本文引用格式:任圆圆. 基于动变形控制法的路基回弹模量控制研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(4):14-20.

Citation format:REN Y Y. Control analysis of subgrade resilient modulus based on dynamic deformation control method[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(4): 14-20.

我国高速公路通车里程逐年增加,高速公路通车后的路面质量越来越受到人们的重视。路面质量的提高除了要提高路面设计及施工质量外,路基设计及施工质量也要给予足够的重视。路基作为路面的基础,承受由路面传递下来的荷载作用,是保证路面强度、稳定性、平整度及耐久性的关键,路基质量的好坏直接关系到整个公路的使用品质^[1-2]。但一般设计方法把路基和路面的设计分离,忽略了路基与路面的相互影响。另一方面,汽车荷载是一种动荷载,但我国现行的公路设计规范为简化计算和分析,都把汽车荷载看作是静荷载。这种荷载简化方式在汽车荷载较小、路面条件较好的情况下与实际情况较为接近。但公路在使用过程中路基和路面不可避免会出现变形,这种不平整使得汽车动荷载的影响更为显著,如果依然将汽车荷载简化为静荷载,则不能真正反映公路的实际受力状态及力学响应^[3-4]。针对以上现状,进行路基动力特性研究及路基动力设计,对保证建设高质量、高路用性能的高等级公路具有重大意义,为高速公路的建设提供一定的指导意义。

选用不同的设计方法、设计参数、设计控制点等要素会导致路基的设计方法千差万别^[5]。总体来讲可以分为三大类设计方法:动应力控制、动应变控制、动变形控制。3种设计方法分别要求路基在动荷载作用下所产生的应力、累积塑性应变及变形不超过规定的范围。控制应变及应变的取值尚无统一的规定,往往因工程对象和目的不同而有较大差别。动变形控制法设计的核心理念是路基顶面在荷载作用下的变形量小于规定的安全允许范围。动变形控制使得公路在服役年限末期仍能保证行车安全性和舒适性,同时路基顶面产生的变形不会导致路面开裂、沉陷或者路基结构本身破坏等,方便建立统一控制方法。为此,本文采用动变形控制方法。回弹模量是路基设计的一个重要的控制指标^[6]。回弹模量的数据指征着路基在荷载作用下抵抗竖向变形的能力,是路基质量的一个重要评价指标。为避免路基路面结构系统的动力破坏,应将路基回弹模量控制在一定的范围内。

进行路基动力设计时,采用动变形控制法,通过路基回弹模量的控制,将路基动变形的数值控制在允许

收稿日期:2020-01-09

作者简介:任圆圆(1986—),女,讲师,硕士研究生,研究方向为道路与铁道工程。

范围内,延长路基的使用寿命。本文通过室内试验及有限元模拟对典型公路结构路基的动变形特性进行了研究,分析了路基结构的动变形随荷载作用次数的变化规律,拟建立路基顶面动变形与路基回弹模量的关系,并从动变形角度提出高速公路路基回弹模量的要求。

1 依据动变形理论的路基设计方法

动变形方法理论指导下的路基控制法要求行车荷载作用下的路基顶面的变形量不超过允许变形量,可用式(1)表示:

$$u_{\text{tol}} \leq u_{\text{dr}} \quad (1)$$

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

1.1 路基顶面允许动变形计算

道路建筑从平面上观察是带状结构物,从纵断面上观察是层状结构物。从下往上依次为路床、路基、基层、面层。层与层之间存在相互作用。依据变形协调原理,以及相关规范通过计算可设计路基顶面动变形允许值,如式(2)所示^[7-8]:

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

式中: N_e 为设计年限内一个车道的累计当量轴次; A_c, A_s, A_b 分别为与公路等级、结构层类型和性质有关的系数; A_a 为与公路结构组合类型有关的系数。

以常见的高速公路结构举例进行推导分析,结构组成和相关参数如表1所示。利用式(2)可计算出常用公路结构在不同交通荷载等级下的路基顶面动变形的允许值,计算结果见表2。

表1 典型路面结构参数

Tab.1 Parameters of typical pavement structure

结构层名称	结构层材料	结构层参数			
		回弹模量/(20℃,MPa)	密度/(kg/m ³)	泊松比	厚度/cm
面层	细粒式沥青混凝土	1 400	2 350	0.35	4
	中粒式沥青混凝土	1 200	2 350	0.35	6
	粗粒式沥青混凝土	1 000	2 350	0.35	8
基层	水泥稳定碎石	1 400	2 300	0.25	40
底基层	水泥稳定碎石	1 000	2 300	0.25	20

表2 典型公路结构路基顶面允许动变形值

Tab.2 Allowable dynamic deformation of subgrade top of typical highway structure

交通等级	累计标准轴次/(万次/车道)	路基顶面动变形设计值/mm
特轻交通 A	<100	>0.314
轻交通 B	100~400	0.314~0.238
中交通 C	400~1 200	0.238~0.191
重交通 D	1 200~2 500	0.191~0.165
特重交通 E	>2 500	<0.165

1.2 路基顶面动变形解析计算法

公路路面结构设计常采用弹性层状体系理论,如图1所示。弹性层状体系理论同样可用于高速公路结构的动力响应问题研究,但由于随着弹性层状体系层数的增加,解析解异常复杂且难以获得,在动力问题研究中则更难以实现;因此其应用受到了限制。

此外,为了简化分析,可运用 Odermark 提出的等效厚度法,将各路面结构层厚度折算为与路基等模量的等效厚度,如式(3)所示:

$$h_e = \sqrt[3]{\frac{E}{E_0}} h \quad (3)$$

式中: h_e 为各路面结构层的等效厚度; E, h 分别为各路面结构层的模量和厚度; E_0 为路基模量。

在标准轴载作用下,利用传递-反射矩阵方法和叠加原理可推导得到交通荷载作用下弹性层状公路结构的动力响应解。根据层状结构体系,文献[9]得到路基顶面动变形计算值,如式(4)所示:

$$u_{tot}|_{z=1} = \frac{2}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} ((-v_{\rho_2} e^{-v_{\rho_2} z_1} A_2 + v_{\rho_2} e^{v_{\rho_2} z_1} B_2 + (v_{s_2}^2 - \gamma_{s_2}^2) e^{-v_{s_2} z_1} C_2 + (v_{s_2}^2 - \gamma_{s_2}^2) e^{v_{s_2} z_1} D_2) \times e^{i(\beta x + \gamma y)}) d\beta d\gamma \quad (4)$$

式中: $v_{\rho_2}^2 = \beta^2 + \gamma^2 + \gamma_{\rho_2}^2$; $v_{s_2}^2 = \beta^2 + \gamma^2 + \gamma_{s_2}^2$; $\gamma_{\rho_2}^2 = \frac{\alpha}{c_{\rho_2}^2}$; $\gamma_{s_2}^2 = \frac{\alpha}{c_{s_2}^2}$; $c_{\rho_2} = \sqrt{\frac{\lambda_2 + 2G_2}{\rho_2}}$; $c_{s_2} = \sqrt{\frac{G_2}{\rho_2}}$; $\alpha = -\omega^2 + 2V\omega\beta - V^2\beta^2$; z_1 是路基顶面与路面表面的垂直距离; A_2, B_2, C_2 和 D_2 是待求积分常数; G_2 和 λ_2 是路基土体的 Lamé 常数; ρ_2 是路基土体密度; V 是行车速度; ω 是振动频率; β 和 γ 是积分变换参数。

1.3 路基顶面动变形试验及有限元分析

从上面分析可以看出,路基顶面动变形的解析计算式非常复杂,计算参数众多。而有限元数值分析方法比解析法更加方便快捷,为此通过有限元分析方法来探究路基动力响应。同时为了验证有限元模拟的正确性,本文进行室内试验与模拟结果对比。

1) 室内试验。为了方便室内试验与有限元模拟结果对比,试验及模拟均采用双矩形加载板来模拟双轮作用,矩形板尺寸为 0.2 m×0.2 m,2 个矩形加载板的中心间距为 0.3 m,具体如图 2 所示。矩形加载板通过刚性梁柱与上部伺服作动器连接。半正弦波荷载的施加通过液压伺服控制,为加快试验过程,试验中加载频率取 20 Hz,分析路基顶面动变形随加载次数的变化情况,路基顶面动变形通过预埋设传感器获得,试验温度为 20 ℃。

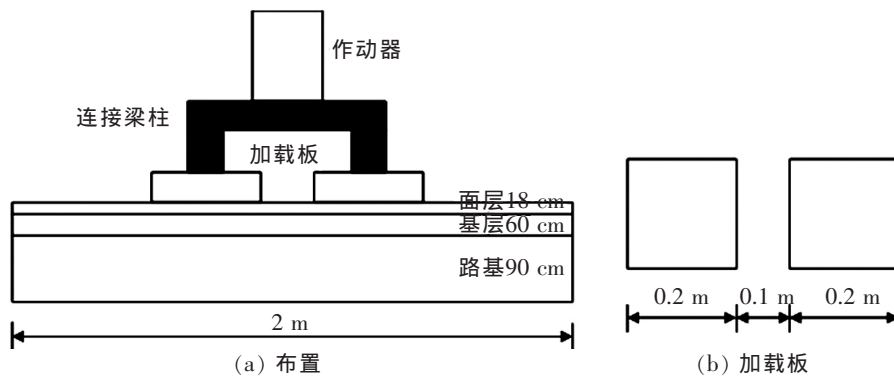


图2 室内试验图示

Fig.2 Diagram of indoor test

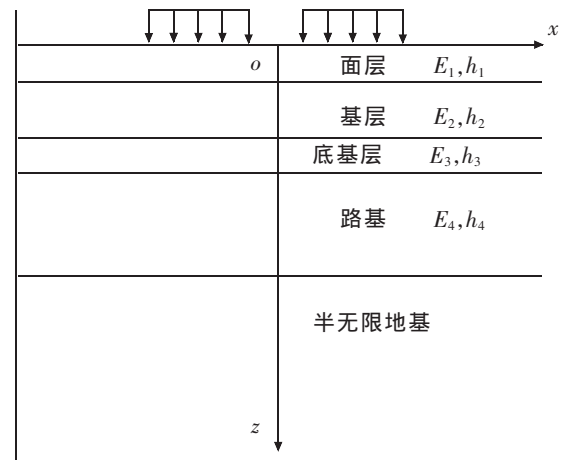


图1 路基动变形计算层状模型

Fig.1 Layer model of dynamic deformation calculation of subgrade

为方便试件制备及试验,面层简化为厚度 18 cm 的 AC-13 沥青混合料。基层为水泥稳定碎石,厚度为 60 cm,路基土的厚度为 90 cm,路基土的物理力学参数如表 3 所示。路基土静态回弹模量试验的试件制备及试验方法均按照《公路土工试验规程》(JTGE40-2007)^[10]的要求进行。

表 3 路基土物理力学参数
Tab.3 Physical and mechanical parameters of subgrade soil

密度/(kg/m ³)	含水量/%	压实度/%	回弹模量/(20 °C,MPa)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1 950	10.5	96	38.50	46.7	35.5

为准确得到路基的动力响应,路基土的回弹模量也应采用动态回弹模量,动态回弹模量比静态回弹模量更接近在动载作用下的回弹模量,壳牌石油公司给出了路基填料的动态回弹模量与静态回弹模量的关系如式(5)所示^[1]:

$$E_{动}=2E_{静} \quad (5)$$

式中: $E_{动}$ 为路基的动态回弹模量; $E_{静}$ 为路基的静态回弹模量。

本文利用室内承载板试验测得的静态回弹模量与动三轴试验测得动态回弹模量进行对比,来获取土基动、静态回弹模量的联系。路基土的动态回弹模量测试结果如表 4 所示。

表 4 路基土动态回弹模量测试结果
Tab.4 Test results of dynamic resilient modulus of subgrade soil

偏应力/kPa	动态回弹模量/MPa			
	10	20	30	40
10	113.06	123.56	138.06	150.62
20	107.30	116.15	125.05	139.52
30	105.21	113.56	121.36	132.86
40	103.53	107.95	115.20	125.97

土基的动态回弹模量受应力状态的影响,动态回弹模量值在较大的范围内浮动^[11-13]。从表中数据可以看出,本次试验的路基土动态模量分布范围为 103.53~150.62 MPa,与静态回弹模量的测量结果相差很大,约为静态回弹模量的 2.69~3.91 倍。为此,壳牌石油公司给出路基动静态回弹模量的换算关系是经验性的,针对具体的路基土应根据工程实际情况通过试验来建立联系,以更好地反映路基特性。

2) 动荷载。车辆在行驶过程中,由于汽车作为机械体自身的振动及道路路面的不绝对平整,汽车轮胎与路面的接触方式可以近似认为振动接触,汽车车轮对道路的荷载作用近似认为正弦波动变化。车辆动荷载对路面的作用可以看作正弦分布,考虑荷载实际情况是非负值;因此行车动荷载可以看作是半正弦波荷载,采用式(6)形式来描述:

$$P(t)=P_{max}|\sin(\theta t)| \quad (6)$$

式中: P_{max} 为动荷载幅值; θ 为荷载圆频率, $\theta=2\pi v/L$;v为行车速度;L为车身长度。动荷载幅值 P_{max} 可通过式(7)求得:

$$P_{max}=kP_0 \quad (7)$$

式中:k为动荷载冲击系数; P_0 为静荷载。整理以上相关变量,行车动荷载可表示为

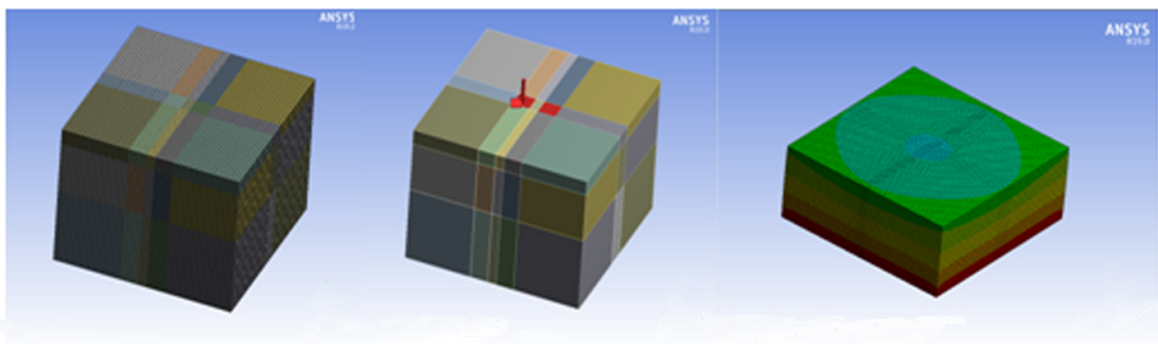
$$P(t)=kP_0|\sin(2\pi v/L)| \quad (8)$$

室内试验及数值模拟的荷载参照表 5 取值

3) 有限元分析模型。三维有限元模型建立采用商业有限元软件 ANSYS Workbench 平台,如图 3 所示。材料参数取值参照表 1、表 3、表 4 和表 5。模型尺寸与加载方式与图 2 所示室内试验一致。对底部边界 x, y, z 三个方向的速度进行约束,对 x 和 z 方向的边界进行水平速度约束,各结构层间接触条件为完全连续。土体在重复荷载作用下会因土颗粒的相互滑移及重新排列而产生不可恢复的永久塑性变形,本文中路基土采用基于莫尔-库伦屈服准则的弹塑性模型。

表 5 荷载参数取值
Tab.5 Parameter of load

参数	取值
P_0/kN	100
k	1.3
θ/Hz	20



(a) 有限元模型及网格划分 (b) 荷载施加 (c) 路基顶面变形结果

图 3 有限元动变形分析

Fig.3 Finite element analysis of dynamic deformation

4) 室内试验及有限元模型结果对比。室内试验及有限元模型均进行 10 000 000 次加载,记录加载过程中的路基顶面变形,得到路基顶面动变形随加载次数的变化曲线,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,随着动荷载作用次数的提高,路基的累计变形逐渐增加,累计变形与加载次数的关系可采用 $u_{tdl}=aN^b$ 的形式来描述。模拟结果与室内试验结果的具体拟合参数如表 6 所示,两者具有很好的一致性。

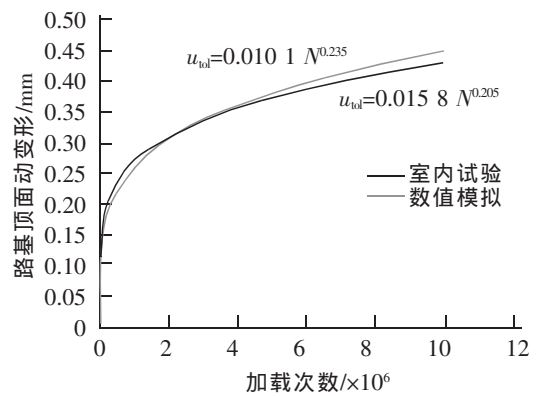


图 4 路基顶面动变形与加载次数的关系曲线

Fig.4 Relation curve between dynamic deformation of subgrade top and loading times

表 6 路基顶面动变形与加载次数的关系

Tab.6 Relationship between dynamic deformation of subgrade top and loading times

项目	a	b	拟合公式
室内试验	0.015 8	0.205	$u_{tdl}=0.015 8 N^{0.205}$
数值模拟	0.010 1	0.235	$u_{tdl}=0.010 1 N^{0.235}$

2 路基顶面动变形与路基回弹模量关系研究

上述试验及模拟验证了模拟计算的可靠性,为探究路基顶面动变形与路基回弹模量关系,变化路基的回弹模量分别取值 20,40,60,80,100,120,140,160,180,200,220,240,260,280,300 MPa,同时加载次数参考表 2 交通等级划分的临界值分别取 100,400,1 200 万次及 2 500 万次,通过有限元计算各种情况下的路表动变形量,由此可得到路基顶面动变形量随路基回弹模量的变化规律,如图 5 所示。

从图 5 可以看出,路基顶面动变形与路基回弹模量为幂函数关系,随着路基回弹模量的提高,路基动变形逐渐降低,且降低速率越来越小。根据表 2 的路基顶面动变形要求,可以由该图得到典型公路结构在不同交通荷载等级下的路基回弹模量临界值,用于指导实际工程中路基回弹模量取值。

3 动变形控制设计步骤

基于以上分析,可以归纳出路基动变形控制设计的主要步骤为:明确设计任务,完善前期资料调查。这里最主要的工作内容是调查交通量以及明确所设计公路的技术等级。根据经验确定公路的结构形式,材料组成等一系列设计参数。根据公式计算路基顶面依据动变形理论的运行变形值。根据有限元计算结果得到路基顶面在不同交通量作用下的动变形计算值。基于有限元计算结果建立路基动变形与路基回弹模量的关系。根据路基动变形控制标准式(1)确定满足动变形要求的路基回弹模量临界值。

4 结论

通过室内试验及有限元模拟对高速公路路基的动变形特性进行了研究,从动变形角度探讨了高速公路路基回弹模量的控制要求,得到如下结论:

1) 三维有限元数值模型分析行车动荷载作用下高速公路路基顶面的动变形规律表明:随着动荷载作用次数的提高,路基的累计变形逐渐增加,累计变形与加载次数的关系可采用 $u_{\text{顶}}=aN^b$ 的形式来描述。室内试验与模拟结果一致,验证了数值分析方法的可靠性。

2) 路基顶面动变形与加载次数以及路基回弹模量成幂函数关系。随着路基回弹模量的提高,路基动变形逐渐降低,且降低速率越来越小。加载次数增加的同时提高路基回弹模量,可使路基顶面变形不超过允许范围。

参考文献:

- [1] 沈金安. 国外沥青路面设计方法总汇[M]. 北京:人民交通出版社,2004:26-27.
- [2] PUPPALA A J, SARIDE S, CHOMTID S. Experimental and modeling studies of permanent strains of subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1379-1389.
- [3] 凌建明, 王伟, 邬洪波. 行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J]. 同济大学学报, 2002, 30(11): 1315-1320.
- [4] 李正明, 郭鑫, 张思远. 动载作用下高速公路半填半挖路基动力响应[J]. 公路工程, 2014(1): 126-130.
- [5] SALOUR F, ERLINGSSON S. Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(3): 236-246.

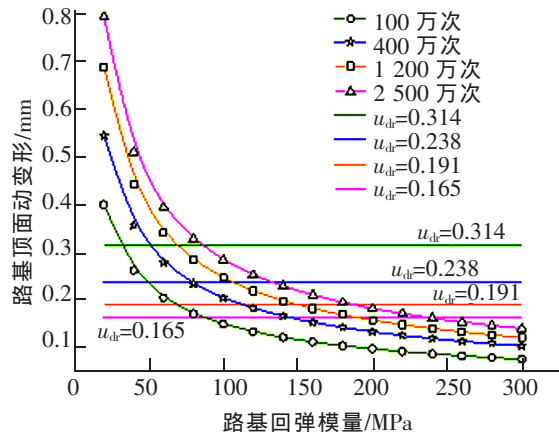


图 5 路基顶面动变形与路基回弹模量关系曲线
Fig.5 Relation curve between dynamic deformation of subgrade top and subgrade resilient modulus

- [6] 姚海林, 卢正, 罗海宁, 等. 交通荷载作用下 Kelvin 地基上不平整路面的动力响应分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 890-896.
- [7] 中华人民共和国交通部. JTGD30-2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [8] 中华人民共和国交通部. JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [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): 3767-3809.
- [10] 中华人民共和国交通部. JTGE40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [11] 杨园野, 丁海滨, 赵秀绍, 等. 含红砂岩砾粒红黏土路基碾压特性及效果研究[J]. 华东交通大学学报, 2019, 35(2): 31-34.
- [12] 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(1): 184-188.
- [13] 张祥, 冉武平. 冻融循环下重塑黄土动回弹模量演化规律[J]. 公路工程, 2018, 43(5): 46-51.

Control Analysis of Subgrade Resilient Modulus Based on Dynamic Deformation Control Method

Ren Yuanyuan

(College of Highway and Railway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China)

Abstract: As an important control index of expressway subgrade, resilient modulus is often based on the static characteristics in the current design method, which is inconsistent with the actual situation. It is of great significance to establish the control method of resilient modulus of subgrade based on the dynamic characteristics of subgrade for the construction of expressway with high quality and good road performance. In this paper, the dynamic deformation characteristics of highway subgrade are studied through laboratory tests and finite element simulation. The variation law of dynamic deformation of subgrade structure with loading times is analyzed, and the relationship between dynamic deformation of subgrade and resilient modulus of subgrade is established. From the point of view of dynamic deformation, the requirement of resilient modulus of expressway subgrade is put forward. The research results may provide guidance for the control standard of resilient modulus of expressway subgrade.

Key words: expressway; subgrade structure; dynamic deformation; resilient modulus; control standard