

文章编号: 1001-4632 (2008) 05-0020-05

# 无砟轨道铁路路基变形模量 $E_{v2}$ 控制指标的试验研究

胡在良, 李晋平, 王军东, 孟军涛, 熊昌盛

(中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081)

**摘要:** 根据京津城际轨道交通工程路基测试数据, 对不同压实条件下碎石类土及级配碎石路基  $E_{v2}$  控制指标进行试验研究。抽取 422 组测试数据进行统计, 分析  $E_{v2}$  及  $E_{v2}/E_{v1}$  的分布规律及其对路基压实质量的反映程度。对其中 93 组级配碎石路基  $E_{v2}$  测试数据进行  $K_{30}$  分析比对。结果表明, 路基压实质量与  $E_{v2}/E_{v1}$  值的相关性很大, 对于不掺水泥的碎石类土填料,  $E_{v2}/E_{v1}$  较大时,  $K_{30}$ ,  $E_{vd}$  容易出现不合格; 对于掺 3%~5% 水泥的级配碎石填料,  $E_{v2}$  与  $E_{v2}/E_{v1}$  值离散性偏大, 但  $E_{v2}/E_{v1}$  值较大时,  $K_{30}$  测试值偏小。从  $E_{v2}$  多次加载曲线及现场实测不合格点测试结果也可以发现, 采用  $E_{v2}$  及  $E_{v2}/E_{v1}$  双重指标对路基压实质量控制更为有效。

**关键词:** 无砟轨道; 路基; 变形模量  $E_{v2}$ ; 控制指标

**中图分类号:** U213.1 **文献标识码:** A

我国铁路客运专线无砟轨道路基施工压实质量的控制, 是在普通铁路采用孔隙率  $n$  及地基系数  $K_{30}$  双指标控制的基础上, 引入变形模量  $E_{v2}$  和动态变形模量  $E_{vd}$ , 进行 4 指标控制<sup>[1,2]</sup>。其中, 采用变形模量  $E_{v2}$  评价路基压实质量时, 不仅与变形模量  $E_{v2}$  值有关, 还与  $E_{v2}/E_{v1}$  (试验经 2 次加载,  $E_{v1}$  和  $E_{v2}$  分别为第 1 次加载和第 2 次加载时计算的变形模量) 值有关<sup>[3-5]</sup>。

大量  $E_{v2}$  测试数据表明,  $E_{v2}$  实测值远大于规范中的  $E_{v2}$  控制值, 在未及时提出  $E_{v2}/E_{v1}$  值控制标准的情况下,  $E_{v2}$  检测很难达到预期的控制效果。本文对京津城际轨道交通工程某标段路基  $E_{v2}$  检测数据进行统计分析、比对, 并结合  $E_{v2}$  多次加载曲线及现场有代表性测点进行研究, 探讨碎石类土路基  $E_{v2}$  及  $E_{v2}/E_{v1}$  的分布规律及其对路基压实质量的控制效果。

## 1 $E_{v2}$ 测试原理

变形模量  $E_{v2}$  测试试验属于平板载荷试验, 在圆形荷载板上分级施加静荷载, 测得荷载与沉降量关系曲线, 由此计算地基的变形模量。弹性理论方

法假定地基为半无限直线变形体, 弹性半空间体上圆形局部荷载下地基沉降量  $s$  的计算公式为<sup>[6]</sup>

$$s = \frac{(1 - \mu^2) d}{E_0} \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为土的泊松比;  $E_0$  为土的变形模量, MPa;  $d$  为荷载板直径, m; 为荷载板下土的附加压力, 即施加荷载值, MPa; 为沉降影响系数, 圆形承压板取 0.79。

由式 (1) 推导出

$$E_0 = 0.79(1 - \mu^2) \frac{d}{s} \quad (2)$$

式 (2) 是假定在整个地基土层中土的变形模量是不变的, 都为  $E_0$ , 荷载—沉降量 ( $\gamma$ — $s$ ) 的关系是线性的, 但这只有在地基土层比较均匀时才成立。因此采用  $\gamma$ — $s$  的增量形式计算路基变形模量  $E_{vi}$ , 取  $\mu=0.21$ , 由式 (2) 得

$$E_{vi} = 1.5r \frac{\gamma}{s} \quad (3)$$

式中:  $r$  为荷载板半径, m。

为了有效地利用测试记录的数据, 减小误差, 对加载及卸载  $\gamma$ — $s$  试验数据分别作二次回归:

$$s = a_0 + a_1 \gamma + a_2 \gamma^2 \quad (4)$$

式中:  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  分别为二次多项式的常数项、一

收稿日期: 2007-12-10; 修订日期: 2008-06-12

作者简介: 胡在良 (1978—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 助理研究员, 硕士。

次项、二次项系数。不同的加卸载曲线， $a_0$ ， $a_1$ ， $a_2$  的取值不同。

利用  $\sigma$  曲线中  $0.3\sigma_{1\max}$  和  $0.7\sigma_{1\max}$  之间的位移割线斜率计算路基变形模量  $E_{vi}$ ，得

$$E_{vi} = 1.5r \frac{1}{a_1 + a_2 \sigma_{1\max}}$$

(5)

式中： $\sigma_{1\max}$  为第 1 次加载曲线中的最大应力值，MPa。

试验采用第 1 次加载—卸载—第 2 次加载的 2 次加载过程，加卸载曲线如图 1 所示。再根据式

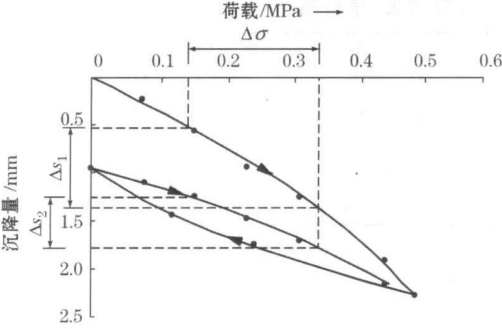


图 1  $E_{v2}$  测试荷载与沉降量的关系

表 1 碎石土及级配碎石路基压实标准<sup>[2]</sup>

检测部位	填料	$K_{30}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$E_{v2}/\text{MPa}$	$E_{vd}/\text{MPa}$	$n/\%$
基床下	碎石土	130	45	-	31
基床底层	碎石土	150	60	35	28
过渡段	正梯形	级配碎石	150	80	50
	倒梯形	级配碎石	150	60	35

抽取京津城际轨道交通工程某标段碎石土填料 329 点（基床下 165 点、基床底层 164 点）、级配碎石填料 93 点（倒梯形过渡段 57 点、正梯形过渡段 36 点），共计 422 点路基的测试数据作统计分析。

3  $E_{v2}$  测试数据分析

3.1  $E_{v2}$  测试结果分析

对 422 点碎石土及级配碎石路基的  $E_{v2}$  检测统计结果进行统计分析，结果见表 2。

表 2  $E_{v2}$  测试结果统计

测试部位	数量/点	$E_{v2}/\text{MPa}$	$E_{v2}/E_{v1}$
基床下	165	92~345	1.17~4.85
基床底层	164	87~281	1.24~3.00
过渡段	正梯形	183~926	1.36~5.59
	倒梯形	140~373	1.01~5.40

从表 2 和表 1 可以看出： $E_{v2}$  测试值均明显大于规范控制值，即  $E_{v2}$  测试值均合格；级配碎石填

(5) 可以分别计算得到  $E_{v2}$  和  $E_{v1}$ 。第 1 次加载曲线走向平缓表示承载力高，走向陡峭则表示承载力低。卸载至零荷载时对应的残余沉降量代表路基产生的塑性变形， $E_{v2}$  值是消除地基表面效应后，被压实后路基的刚度。当  $E_{v2}/E_{v1}$  值较大时，说明第 1 次变形模量  $E_{v1}$  值小，则路基的塑性变形较大，路基压实不充分<sup>[3]</sup>。

2 试验概况及试验点的选取

京津城际轨道交通工程某标段路基基床下与基床底层填料为碎石土，基床表层填料为级配碎石；过渡段填料为级配碎石，并采用正梯形、倒梯形二次过渡，其中，正梯形过渡段填料掺 3%~5% 水泥，倒梯形过渡段填料不掺水泥。采用孔隙率  $n$ 、地基系数  $K_{30}$ 、变形模量  $E_{v2}$  和动态变形模量  $E_{vd}$  共 4 个指标对路基压实质量进行检测控制，控制标准见表 1。

料的  $E_{v2}$  测试值大于碎石土的，即级配碎石填料刚度优于碎石土；部分  $E_{v2}/E_{v1}$  值明显偏大。

为分析部分  $E_{v2}/E_{v1}$  值明显偏大的现象，以其中  $E_{v2}/E_{v1} = 5.4$  点为例，将此点的  $E_{v2}$  测试值与现场  $K_{30}$ ， $E_{vd}$ ， $n$  的实测值进行对比。此点为正梯形过渡段路基中的一点，4 个指标的实测值分别为  $K_{30} = 88.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ ， $E_{vd} = 48.6 \text{ MPa}$ ， $E_{v2} = 157.3 \text{ MPa}$ ， $n = 13.6\%$ 。可以发现，此点的  $K_{30}$  和  $E_{vd}$  指标均不合格，但  $E_{v2} > 80 \text{ MPa}$ ，远大于规范控制值。此点的实测  $E_{v2}$  曲线如图 2 所示，该点第 1 次加载后路基表面产生的沉降量为 3.89 mm，压实质量不良。

一般情况下，路基压实越好， $K_{30}$ ， $E_{vd}$  值越高，则  $E_{v2}/E_{v1}$  偏小；当  $E_{v2}/E_{v1}$  较大时， $K_{30}$ ， $E_{vd}$  测试值容易出现不合格，路基压实质量较差。文献 [4] 也指出，“德国交通区域开挖工程补充合同技术条款和规定 (ZTVE StB97)” 中要求  $E_{v2}/E_{v1} \geq 2.5$ 。因此， $E_{v2}/E_{v1}$  值大小与路基压实质量有关。

因此建议：对于施工过程中的路基压实质量控

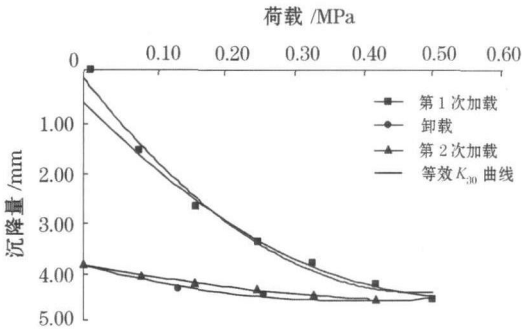


图 2 某不合格点实测  $E_{v2}$  变形曲线

表 3 不同  $E_{v2}/E_{v1}$  时级配碎石路基  $E_{v2}$  及等效  $K_{30}$  值分布

$E_{v2}/E_{v1}$	不掺水泥级配碎石		掺 3%~5% 水泥级配碎石	
	$E_{v2}/\text{MPa}$	等效 $K_{30}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$E_{v2}/\text{MPa}$	等效 $K_{30}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$
1. 0~2. 0	161~301	305~1 042	240~366	321~1 389
2. 0~3. 0	168~340	202~694	184~448	194~658
3. 0~3. 4	159~212	169~260	184~926	152~1 000
3. 4	140~241	73~149	199~449	167~263

表 3 数据表明：不掺水泥的级配碎石路基中，当  $E_{v2}/E_{v1}$  较小时，对应  $K_{30}$  值较大，当  $E_{v2}/E_{v1}$  为 3. 0~3. 4 时，对应  $K_{30}$  值明显偏小，当  $E_{v2}/E_{v1}$  3. 4 时，对应的  $K_{30}$  值全部小于  $150\text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ ，即  $K_{30}$  不合格；对于掺 3%~5% 水泥的过渡段路基，当  $E_{v2}/E_{v1}$  为 1. 0~3. 4 时， $K_{30}$  值较高，由于水泥固结作用， $E_{v2}$  值规律性稍差，但当  $E_{v2}/E_{v1}$  3. 4 时，等效  $K_{30}$  值仍偏低，但未出现  $K_{30}$  不合格现象。

根据 93 点级配碎石的实测数据，绘制  $E_{v2}$  值、 $E_{v2}/E_{v1}$  值与等效  $K_{30}$  值相关关系图，如图 3 所示。

对图 3 中数据进行拟合表明， $E_{v2}$  与  $E_{v2}/E_{v1}$  的相关性较差，分布离散，相关系数仅为 0. 10，说明  $E_{v2}$  与  $E_{v2}/E_{v1}$  相互独立，两者具有不同的物理意义； $E_{v2}$  与  $K_{30}$  的相关性一般，相关系数为 0. 42； $E_{v2}/E_{v1}$  与  $K_{30}$  的相关性较好，相关系数为 0. 73，说明  $E_{v2}/E_{v1}$  与  $K_{30}$  的相关性较大，且  $E_{v2}/E_{v1}$  值随  $K_{30}$  值的增大而减小。由此可以得出： $E_{v2}$  与  $E_{v2}/E_{v1}$  表征了不同的物理意义，二者不可互相替代， $E_{v2}/E_{v1}$  值能有效反映路基压实程度。

3. 3 多次加载的  $E_{vi}$  特征

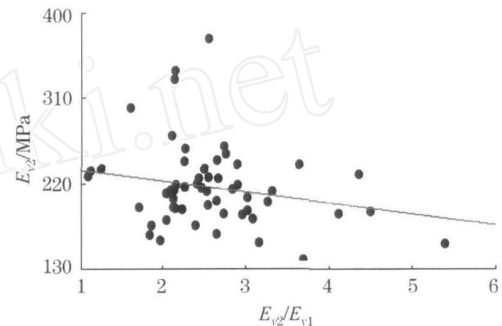
图 4 为  $E_{vi}$  试验进行 3 次加载得到的曲线，即第 2 次加载至 0. 5 MPa 后稳定 120 s，再进行第 2 次卸载及第 3 次加载试验，加卸载方式与时间间隔重复第 1 次卸载与第 2 次加载的步骤。

从图 4 可以看出：3 次加载与 2 次加载曲线基本接近， $E_{v2} = 186. 3\text{ MPa}$ ， $E_{v3} = 209. 4\text{ MPa}$ ， $E_{v2}/E_{v1} = 2. 53$ ， $E_{v3}/E_{v2} = 1. 12$ ，第 1 次加载后路基

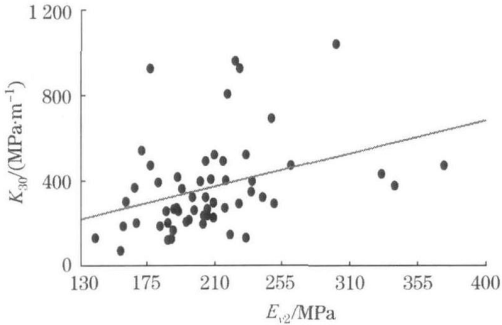
制，在采用上述 4 个指标控制的基础上，宜增加采用  $E_{v2}/E_{v1}$  值进行控制。

3. 2  $K_{30}$  比对分析

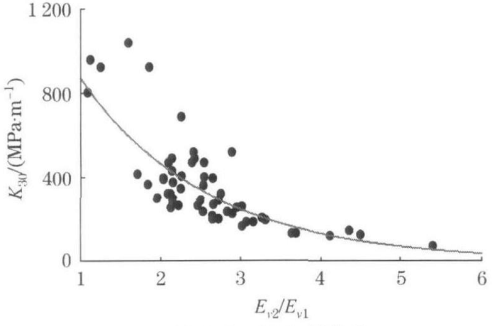
由于  $E_{v2}$  测试的第 1 次加载与  $K_{30}$  测试的测试条件与测试方法接近，因此，取 93 点级配碎石路基  $E_{v2}$  第 1 次加载曲线中沉降量为 1. 25 mm 时荷载所对应的数据作为  $K_{30}$  值的近似计算点，计算等效  $K_{30}$  值。不同  $E_{v2}/E_{v1}$  值范围的  $E_{v2}$  值及等效  $K_{30}$  值分布见表 3。



(a)  $E_{v2}/E_{v1}$  与  $E_{v2}$  的关系

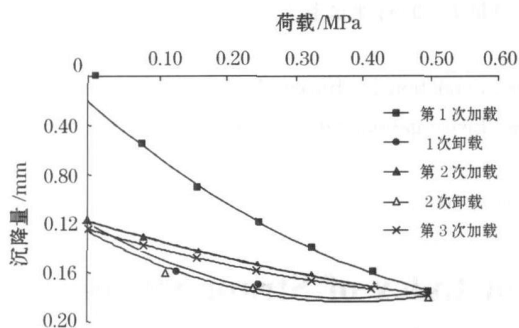


(b)  $E_{v2}$  与  $K_{30}$  的关系



(c)  $E_{v2}/E_{v1}$  与  $K_{30}$  的关系

图 3 变形模量  $E_{v2}$  控制指标与  $K_{30}$  值之间的关系

图4 经3次加载的  $E_{v2}$  测试曲线

表面产生的沉降量为 1.17 mm, 第2次加载后路基表面产生的沉降量仅为 0.07 mm。可以发现, 第1次加载可以消除路基表面松弛现象, 但  $E_{v2}$  测试施加的荷载较大, 最大荷载为 0.5 MPa, 经第1次加卸载后, 对路基产生压实作用。路基越松散, 产生的永久塑性变形就越大, 从而计算出的  $E_{v2}/E_{v1}$  就偏大。因此,  $E_{v2}/E_{v1}$  值直观地反映了路基的压实程度, 对于施工过程中的路基, 采用  $E_{v2}/E_{v1}$  值控制压实质量更有效。

### 3.4 分析讨论

针对  $E_{v2}$  质量控制存在的问题, 对现场未压实松散级配碎石填料及湿度较大夹软黏土的松散碎石土混合料进行现场测试,  $E_{v2}$  值均满足相应路基控制标准。未压实松散级配碎石路基  $E_{v2}$  试验结果为  $E_{v1} = 27.9$  MPa,  $E_{v2} = 170.3$  MPa,  $E_{v2}/E_{v1} = 6.09$ , 试验最大沉降量为 4.72 mm; 夹泥松散碎石土填料路基  $E_{v2}$  试验结果为  $E_{v1} = 11.8$  MPa,  $E_{v2} = 49.3$  MPa,  $E_{v2}/E_{v1} = 4.18$ , 试验最大沉降量为 12.30 mm。2个试验点的  $E_{v1}$  测试值均很小,  $E_{v2}/E_{v1}$  值偏大, 最大沉降量大, 路基不密实, 压实质量差, 但  $E_{v2}$  值均已达到基床下路堤变形模量

控制标准  $E_{v2} = 45$  MPa 的要求。分析结果表明,  $E_{v2}/E_{v1}$  值是表征路基压实程度的重要指标, 因此, 采用  $E_{v2}$  及  $E_{v2}/E_{v1}$  双重指标控制有利于路基压实质量的控制。

目前, 在我国铁路无砟轨道路基施工质量控制中,  $E_{v2}$  测试已作为一种控制手段, 但是, 如果仅对  $E_{v2}$  值进行控制, 会出现  $E_{v2}$  测试 100% 合格但路基质量并不合格的现象, 很难达到预期的控制效果。因此建议, 考虑到我国填料及工况与国外均存在差异, 在参考国外检测指标的基础上, 针对我国铁路无砟轨道路基填料和施工工艺的特点, 进行大量  $E_{v2}$  试验, 统计并总结经验, 探索合理的控制标准, 制定与之相适应的相关技术指标及标准。

## 4 结 论

针对  $E_{v2}$  测试在路基压实质量控制中存在的问题, 对京津城际轨道交通工程某标段碎石土及级配碎石路基的  $E_{v2}$  测试数据进行了统计分析, 得到如下结论。

(1) 路基压实质量与  $E_{v2}/E_{v1}$  值的相关性很大。对于不掺水泥的碎石类土路基, 当  $E_{v2}/E_{v1}$  较大时,  $K_{30}$ ,  $E_{vd}$  容易出现不合格, 与  $E_{v2}$  值相比,  $E_{v2}/E_{v1}$  值更能反映路基的压实质量。

(2) 对于掺 3% ~ 5% 水泥的过渡段路基, 由于水泥固结的影响,  $E_{v2}$  控制指标离散性较大, 但  $E_{v2}/E_{v1}$  值偏大时,  $K_{30}$  值仍偏低。

(3)  $E_{v2}$  与  $E_{v2}/E_{v1}$  相互独立, 二者相关性较小, 表征不同的物理意义。对于施工过程中的路基压实质量控制, 采用  $E_{v2}$  及  $E_{v2}/E_{v1}$  双重指标控制更有效。

## 参 考 文 献

- [1] 李恕放. 客运专线无砟轨道路基压实标准  $K_{30}$  与  $E_{v2}$  的探讨 [J]. 铁道标准设计, 2006 (2): 1-3.  
(LI Nufang. Exploration for the Compacting Criteria of  $K_{30}$  and  $E_{v2}$  on the Ballastless Track in Dedicated Passenger Railways [J]. Railway Standard Design, 2006 (2): 1-3. in Chinese)
- [2] 中华人民共和国铁道部. 铁建设函 [2005] 754 号 客运专线无砟轨道铁路设计指南 [Z]. 北京: 中国铁道出版社, 2005: 13-17.
- [3] Claus Gobel, Klaus Lieberenz, Frank Richter. 铁路路基工程 [M]. 铁道第二勘察设计院, 德国 PEC + S 集团公司, 译. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 56-60.
- [4] 龙卫, 肖金凤. 变形模量  $E_{v2}$  与  $K_{30}$  平板载荷试验的对比分析 [J]. 铁道建筑技术, 2006 (5): 36-39.  
(LONG Wei, XIAO Jinfeng. Comparison Analyses of the Strain Modulus  $E_{v2}$  and  $K_{30}$  Plate Loading Test Methods [J]. Railway Construction Technology, 2006 (5): 36-39. in Chinese)

- [5] 薄会申, 李 铂. 地基系数  $K_{30}$  与变形模量  $E_v$  及动态变形模量  $E_{vd}$  的对比试验研究 [J]. 铁道勘察, 2007, 33 (3): 59-61.  
(BO Huishen, LI Bo. Study on Comparison Experiments for Foundation Coefficient  $K_{30}$  and Deformation Modulus  $E_{vd}$  as Well as Dynamic Deformation Modulus  $E_{ve}$  [J]. Railway Investigation and Surveying, 2007, 33 (3): 59-61. in Chinese)
- [6] 赵明华. 土力学与基础工程 [M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000.

## Experimental Research on the Control Index of Strain Modulus $E_{v2}$ for the Ballastless Track Subgrade

HU Zailiang, LI Jinping, WANG Jundong,  
MEN G Juntao, XIONG Changsheng

(Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on the tested data of  $E_{v2}$  on the ballastless track subgrade of Beijing-Tianjin inter-city rail transit project, the control index of strain modulus  $E_{v2}$  is studied for the gravel filling material under different compaction conditions. In order to obtain the distribution rule of  $E_{v2}$  and  $E_{v2}/E_{v1}$  and their reflection degree on the construction quality of railway subgrade, 422 sets of tested data are selected to make statistical analyses. The sampled 93 sets of graded broken stone  $E_{v2}$  are analyzed and compared with  $K_{30}$ . Such conclusions can be made that, firstly, there is close pertinence between the value of  $E_{v2}/E_{v1}$  and the subgrade compaction quality. Secondly, for the graded broken stone without mixing cement, the parallel tested data of  $K_{30}$  and  $E_{vd}$  is easy to be unqualified if  $E_{v2}/E_{v1}$  is larger. For the graded broken stone mixing 3% ~ 5% cement, the distribution of  $E_{v2}$  and  $E_{v2}/E_{v1}$  is discrete. But the tested data of  $K_{30}$  is small when the value of  $E_{v2}/E_{v1}$  is larger. Finally, from  $E_{v2}$  multiple loading curve and the test results of unqualified points in field tests, it is found more effective to control the subgrade compaction quality by adopting double-index  $E_{v2}$  and  $E_{v2}/E_{v1}$ .

**Key words:** Ballastless track; Subgrade; Strain modulus  $E_{v2}$ ; Control index

(责任编辑 刘卫华)