

## 甘肃黄土地地区土基回弹模量

杨永红<sup>1,2</sup>, 王选仓<sup>1</sup>, 韩国杰<sup>3</sup>, 常学亮<sup>3</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. 华南理工大学 交通学院, 广东 广州 510640; 3. 甘肃省交通厅, 甘肃 兰州 730030)

**摘 要:**选取甘肃黄土地地区有代表性的几条高等级公路,采用承载板、贝克曼弯沉梁、落锤式弯沉仪 3 种方法实测土基回弹模量,建立三者之间的相互转换公式,进而提出了路基设计回弹模量取值范围为 35~71 MPa,保证率 97.7%,为进一步研究甘肃黄土地地区的路面典型结构打下基础。

**关键词:**道路工程;承载板;贝克曼弯沉梁;落锤式弯沉仪;土基回弹模量;路面典型结构

**中图分类号:**U416.1 **文献标识码:**A

### Rebound module of subgrade in Gansu loess area

YANG Yong-hong<sup>1,2</sup>, WANG Xuan-cang<sup>1</sup>, HAN Guo-jie<sup>3</sup>, CHANG Xue-liang<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Department of Communications, Gansu Province Government, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** Bearing plate, Benkelman beam deflectometer and falling weight deflectometer are utilized to test rebound module of subgrade on some typical high-grade highways in Gansu province. Their relationship formulas and design rebound module limits of subgrade is found, it is from 35 MPa to 71 MPa, the insurance rate is 97%. The results can give a basis for investigating the pavement typical structure in this area. 7 tabs, 8 refs.

**Key words:** road engineering; bearing plate; Benkelman beam deflectometer; falling weight deflectometer; rebound module of subgrade; pavement typical structure

## 0 引 言

土基回弹模量在路面结构设计中,是重要的设计参数之一。中国目前公路设计对土基回弹模量在重型击实标准下应用值及其相关关系研究较少,甘肃省也是如此<sup>[1~4]</sup>。本文采用承载板、贝克曼弯沉梁、落锤式弯沉仪 3 种方法实测了甘肃黄土地地区土基回弹模量,研究了相关关系,得出了转换公式及土基设计回弹模量取值范围,为该地区的路面结构设计

和施工质量检测奠定了基础。

## 1 承载板测试

采用直径 30 cm 的刚性承载板,在土基表面逐级加载和卸载,测出与每级荷载相对应的回弹变形,经计算求得土基现场回弹模量值。本文仅列出尹中高速公路二标测试值,如表 1 所示。

对实测回弹模量进行统计,得出平均值  $E_{01}$  和方差  $S_1$ 。按 1 倍标准差原则去除异常值,计算剩余点的土基回弹模量的平均值  $E_{02}$  和标准差  $S_2$ ,取一

定的保证率,计算土基回弹模量的代表值。即

表 1 尹中高速公路二标路基现场承载板测试弯沉原始数据

尹中高速公路 2 标承载板测试					
桩号	$E_0/\text{MPa}$	桩号	$E_0/\text{MPa}$	桩号	$E_0/\text{MPa}$
K29+800	99.2	K32+650	189.8	K31+300	129.3
K30+020	111.2	K33+050	167.6	K31+540	101.9
K30+350	109.4	K33+800	130.2	K31+750	105.6
K30+550	128.0	K34+160	181.8	K32+120	121.9
K30+800	81.4	K34+580	159.8	K32+220	92.4

$E_0 = E_{02} - Z_a S$

式中: $Z_a$  为与保证率有关的系数。

汇总利用承载板测试 5 条路所得资料(表 2)。

表 2 承载板测试路基回弹模量  $E_0$  汇总表

路段名称	路基土质	土基回弹模量 (84.1%)/MPa	土基回弹模量 (97.7%)/MPa
尹中高速公路 二标	第四系第三系黄土	101.40	83.10
三标		96.60	82.90
四标		92.40	76.70
忠树高速公路	第四系第三系黄土 (粉性土、砂性土)	74.26	52.73
凤帽一级公路	第三系风积黄土 (粉性土)	87.45	51.38
柳古公路徐界 段	第三系黄土(砂性 土、粉性土)	81.01	53.32
白银至兰州高 速公路	黄土+4 cm 沙粒	83.06	62.79

注:括号中数据 84.1%、97.7% 为保证率。

2 贝克曼梁测试

因承载板测定费时、较笨重,甘肃省有些单位利用弯沉仪测定。弯沉仪测定是用标准车在土基表面,测定轮隙中心下的回弹弯沉值,通过计算求得土基的回弹模量值,利用公式

$L = \bar{L} + Z_a S$

计算 84.1% 保证率的代表弯沉值。根据文献[1]中的公式

$E_0 = \frac{2p\delta}{L}(1-\mu^2)\alpha$

式中: $p=0.7\text{ MPa}$ ;  $\delta=10.65\text{ cm}$ ;  $\mu=0.35$ ;  $\alpha=0.712$ 。汇总利用贝克曼梁(BB)测试土基回弹模量,见表 3。

表 3 利用贝克曼梁测试路基回弹模量  $E_0$  取值表

路段名称	路基土质	土基回弹模量 (84.1%)/MPa
尹中高速公路二标	第四系第三系黄土	56.50
尹中高速公路三标		70.15
尹中高速公路四标		51.15
白银至兰州高速公路 K1673+420~K1675+700	黄土+4cm 沙粒	107.23
白银至兰州高速公路 K1642+640~K1644+240		149.67
白银至兰州高速公路 K1672+590~K1677+600		111.04

3 落锤式弯沉仪测试

落锤式弯沉仪(Falling Weight Deflectometer 简称 FWD)产生于 20 世纪 70 年代初,与传统的贝克曼梁(BB)测试弯沉相比,具有使用方便、快速、安全、节省人力、模拟实际情况施加动态荷载的特点,适于长距离、连续测定。本文采用丹纳特 8000 型落锤式弯沉仪,荷载范围 7~120 kN,对于公路路面,经常采用的荷载值为 50 kN,荷载脉冲为 20~30 ms,荷载脉冲升荷时间 10 ms。

土基是弹塑性体,其本构关系呈非线性。由于 FWD 冲击力作用时间很短,得到的荷载与变形曲线近似线性。因此,据文献[5]应用弹性半无限体理论计算土基回弹模量。

汇总利用 FWD 测试路基回弹模量,如表 4。

表 4 利用 FWD 测试路基回弹模量  $E_0$  取值表

路段名称	路基土质	土基回弹模量 (84.1%)/MPa
尹中高速公路二标	第四系第三系黄土	82.38
尹中高速公路三标		85.38
尹中高速公路四标		58.31
白银至兰州高速公路 K1673+420~K1675+700	黄土+4 cm 沙粒	55.75
白银至兰州高速公路 K1642+640~K1644+240		68.89
白银至兰州高速公路 K1672+590~K1677+600		54.07

4 3 种测试的相关关系

4.1 贝克曼梁与 FWD 试验结果的相关关系

不同地区、不同路面结构,FWD 与 BB 测定结果有差异。同时由于两者的荷载性质不同,即使作用荷载的大小相同,但荷载脉冲的时间相差很大,测定值有差异,与 BB 的相关关系也有所不同。在中



国 1 个地区甚至在相当大的区域范围内,土质变化不大,基层和沥青面层结构相差也并不大,研究 FWD 与 BB 的相关关系,确定实际应用中能否相互替换,对 FWD 的标准化研究具有重要的现实意义。

根据实测数据,通过回归分析,采用 84.1% 的保证率(以下相关关系同),提出两种设备测定值之间转换的推荐公式

$$l_{BB} = 0.458\ 5l_{FWD} + 49.766, R^2 = 0.785\ 2$$

4.2 承载板与 FWD 试验结果的相关关系

对于甘肃黄土地区特殊的土质,进行承载板与 FWD 相关关系研究很有必要。利用  $\bar{x} \pm \sigma$  去除异常点,分析可得公式

$$E_{\text{承载板}} = 1.396\ 4E_{FWD} - 20.322, R^2 = 0.843\ 0$$

4.3 承载板和贝克曼梁测定的相关关系

中国其他省也进行了此方面的研究<sup>[6]</sup>,但对于本地区,由试验数据进行回归,得出路基现场承载板实测回弹模量和贝克曼梁测定弯沉值  $l_{BB}$  的相关关系,如下公式所示

$$E_{\text{承载板}} = 7242.3l_{BB}^{0.863\ 6}, R^2 = 0.832\ 9$$

4.4 刚性承载板测试  $E_0$ 、贝克曼梁测试及 FWD 测试三者之间的相关系数

承载板和贝克曼梁的相关系数  $K_1$

$$E_{\text{承载板}} = K_1 E_{\text{贝克曼梁}}, K_1 = 1.18$$

承载板和 FWD 的相关系数  $K_2$

$$E_{\text{承载板}} = K_2 E_{FWD}, K_2 = 1.37$$

贝克曼梁和 FWD 的相关系数  $K_3$

$$E_{\text{贝克曼梁}} = K_3 E_{FWD}, K_3 = 1.42$$

5 路基设计回弹模量

无论室内试验还是现场承载板试验都不能完全模拟路基土实际受力状态。因此,在选择路基土设计回弹模量时,应考虑路基实际压实度和不利季节含水量等因素。

5.1 路基设计回弹模量

本文对中国甘肃黄土地区白兰高速公路进行了含水量和压实度测试,如表 5 所示。测试时间是在 8 月份,虽然不是在不利季节进行测试,但在一定程度上反映了一定的关系。路基土一般要求在接近于最佳含水量时进行压实,这时密实度通常可达到最大值。随着时间的推移,路基土的含水量会发生变化,含水量对黄土  $E_0$  有显著影响。压实度也是影响路基回弹模量的重要因素,对高等级公路的路基<sup>[6~8]</sup>,0~80 cm 要求压实度达到 95%,80~150 cm 一般要求压实度达到 93%。可见含水量和压实

度是影响路基土回弹模量的主要因素,通过提高路基压实度,可以增大路基强度。

本文确定路基设计回弹模量采用现场承载板试验,以路基土所能达到的含水量和压实度为依据,对实测路基回弹模量进行合理折减。一般将现场实测值取一定保证率后,考虑不利季节影响,折减系数采用文献[6]中 15%~30% 的折减系数,干燥路段或塑性指数小于 15 的路基土取低限,中湿路段或塑性指数大于 15 的路基土取高限,如表 6 所示。

表 5 白银至兰州高速公路含水量和压实度测试

序号	桩号	测定层	路基材料	含水量 w/%	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	湿密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	压实 度/%
1	K1678+020	路基	黄土+4cm 沙粒	6.5	2.049	2.183	111.4
2	K1670+040	路基	黄土+4cm 沙粒	9.8	1.726	1.896	93.8
3	K1670+000	路基	黄土+4cm 沙粒	10.6	1.793	1.983	97.4
4	K1670+000-R	路基	黄土+4cm 沙粒	10.1	1.821	2.004	99.0
5	K1670+100-R	路基	黄土+4cm 沙粒	8.2	1.858	2.011	101.0

表 6 甘肃柔性路面路基设计回弹模量  $E_0$  取值表(承载板测试)

路段名称	路基土质	路基回弹模量 (97.7%)/MPa	路基设计回弹模量 (97.7%)/MPa
尹中高速公路二标 三标 四标	第四系第三系黄土	83.10	58.17~70.64
		82.90	58.03~70.47
		76.70	53.69~65.20
忠树高速公路	第四系第三系黄土 (粉性土、砂性土)	52.73	36.91~44.82
凤帽一级公路	第三系风积黄土 (粉性土)	51.38	35.97~43.67
柳古公路徐界段	第三系黄土(砂性土、粉性土)	53.32	37.32~45.32
白银至兰州高速公路	黄土+4 cm 沙粒	62.79	43.95~53.37

5.2 一些路段已采用路基设计回弹模量分析

从两阶段施工图设计中,调查一些路段的路基回弹模量取值,对应其三级自然区划<sup>[2]</sup>,如表 7。

从表 7 可以看出,路基回弹模量取值范围在 28~43 MPa 之间,而表 6 实测路基设计回弹模量在 35~71 MPa 之间(取 97.7% 保证率)。比较可以看出,在进行路面结构设计时,路基回弹模量较多查规范取值,使得一些路面结构层厚度偏厚,造成工程预算偏高。

表 7 甘肃柔性路面路基设计回弹模量调查汇总表

等级	公路路段名称	地质情况	二级自然区划	三级自然区划	路基设计回弹模量/MPa
高速公路	中川机场尹家庄至机场段	第四系、第三系黄土	Ⅲ <sub>3</sub>	Ⅲ <sub>3-2</sub>	37
	G312 线连霍公路岷口至兰州柳沟河段	风积黄土或冲洪积黄土(粉质低液限粘土)	Ⅲ <sub>3</sub>	Ⅲ <sub>3-2</sub>	干燥 43 中湿 37
	白兰高速公路(白银~杨家窑段)	粉质低液限粘土	Ⅲ <sub>3</sub>	Ⅲ <sub>3-2</sub>	37
	白兰高速公路(杨家窑子至忠和段)	湿陷性黄土(粉性土)	Ⅲ <sub>3</sub>	Ⅲ <sub>3-2</sub>	35
一幅高速公路	G312 线中川机场忠和至树屏段	第三系、第四系黄土(粉性土、砂性土)	Ⅲ <sub>3</sub>	Ⅲ <sub>3-2</sub>	39
	G312 线树屏至徐家磨段	粉性土	Ⅲ <sub>3</sub>	Ⅲ <sub>3-2</sub>	39(干燥) 28(中湿)
二级公路	西兰公路平壑观至岷口段	第四系新黄土(粉性土)	Ⅲ <sub>3</sub>	Ⅲ <sub>3-2</sub>	干燥 37.5 中湿 33

6 结 语

本文选取甘肃黄土地区有代表性的高等级公路,如尹中高速公路(二、三和四标)、忠树高速公路、白兰高速公路、凤翥一级公路及柳古公路徐界段,利用承载板、贝克曼弯沉梁、FWD 测试车 3 种方法实测土基回弹模量,通过较系统、全面的研究,建立了三者之间的相关关系,得出了甘肃黄土地区土基回弹模量设计参数范围在 35~71 MPa 之间(97.7%的保证率),比规范上的取值偏大,比较真实地反映了路基实际的强度。

参考文献:

References:

[1] JTJ 059-95. 公路路基路面现场测试规程[S]. 1995.  
JTJ 059-95. Field test methods of subgrade and pave-

ment for highway engineering[S]. 1995.

[2] 景宏君,张 斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报,2004,4(2):14-18.  
JING Hong-jun, ZHANG Bin. Loess subgrade strength law[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2004,4(2):14-18.

[3] 景宏君,张 斌. 黄土地区公路路基冲击压实试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2004,24(1):25-29.  
JING Hong-jun, ZHANG Bin. Loess subgrade strength law [J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition),2004,24(1):25-29.

[4] 叶 成. 甘肃黄土分类分区与公路区域研究[D]. 西安:长安大学,2000.  
YE Cheng. Study of loess classification and highway district in Gansu[D]. Xi' an: Chang' an University, 2000.

[5] 查旭东,王秉纲. 基于同伦方法的路面模量反算研究[J]. 中国公路学报,2003,16(1):1-5.  
ZHA Xu-dong, WANG Bing-gang. Back calculation of modulus for pavements based on homotopy method [J]. China Journal of Highway and Transport,2003,16 (1):1-5

[6] 张洪华. 应用 FWD 测定土基回弹模量的研究[J]. 中国公路学报,1994,(增 1):9-13.  
ZHANG Hong-hua. The study of subgrade resilient modulus determined by FWD [J]. China Journal of Highway and Transport,1994,(Sup1):9-13.

[7] JTJ014-97. 公路沥青路面设计规范[S]. 1997.  
JTJ014-97. Specification for design of highway asphalt pavement[S]. 1997.

[8] 武和平. 高等级公路路面结构设计方法[M]. 北京:人民交通出版社,2000.  
WU He-ping. Pavement structure design methods of high-grade highway[M]. Beijing:People's Communication Press,2000.

弹性混凝土有了用武之地

科学家将纤维加入混凝土中,制成了一种重量轻、抗裂缝并且更耐久的可弯曲材料。研究者说,这种已在日本、韩国、瑞士和澳大利亚得到应用的新型混凝土 2005 年夏将首次在美国投入使用。用纤维增强的混凝土并非新事物。但密歇根大学研制出的这种纤维混凝土抗裂性比目前修建人行道的材料高 500 倍,重量也轻 40%。混凝土是水泥、水以及沙子或砂砾的混合物。在修建桥梁和建筑物时,通常使用金属丝或金属条来加强混凝土。

工程学教授维克托·李解释说,除了没有粗砂砾之外,这种新型混凝土的主要成分与普通混凝土几乎一样。它的外观也与普通混凝土相似,但在承受巨大压力时它会弯曲而不是断裂,因为纤维会在其内部移动。纤维有点类似人体内的韧带,能发挥灵活的连接作用。

这种新型材料被称作“工程水泥复合料”(ECC)。密歇根州运输部将使用 ECC 来修补横跨 94 号州际公路的一座桥。使用这种混凝土无须再用伸缩接头。伸缩接头是连接两段普通混凝土桥面的可移动的钢齿,而 ECC 使长长的连续不断的桥面成为可能。

密歇根州运输部的试验性研究小组负责人史蒂夫·卡尔说:“ECC 材料有望解决我们面临的一些桥面耐久性问题,例如过早出现裂缝等。我们希望 ECC 能奏效,并能在我们取得大规模生产的经验之后降低其成本。”