

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.01.013

## 含泥量对填砂路基动态模量的影响

陈宇亮<sup>a,b</sup>, 李雪连<sup>a,b</sup>, 周志刚<sup>a</sup>

(长沙理工大学 a. 交通运输工程学院; b. 道路结构与材料交通行业重点实验室, 长沙 410004)

**摘要:**为掌握含泥量对填砂路基动态模量的影响规律,先通过现场便携式落锤式弯沉仪(PFWD)试验与压实度试验,分析了含泥量与填砂路基动弹性模量的关系;再结合现场检测数据,建立了动态模量随压实度、稠度和含泥量变化的回归模型;最后,结合现场检测与室内PFWD试验结果,提出了填砂路基含泥量的控制标准。研究表明:现场检测路段填砂路基含泥量绝大部分在3.0%~5.5%之间,现场动态模量随含泥量增大而减少,二者具有良好的幂函数回归关系;现场的动态模量与压实度、稠度和含泥量也具有良好的回归关系;当含泥量为0~10%时,随着含泥量的增加,路基动态模量呈先增大后减小的趋势。当含泥量较小(含泥量小于3%)和较大(含泥量大于8%)时,其动态模量要明显小于其他含泥量下的动态模量。当含泥量在3%~8%范围时,动态模量变化幅度较小,故建议含泥量的控制标准为3%~8%。

**关键词:**路基工程;填砂路基;动态模量;含泥量;压实度

**中图分类号:**U416.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)01-0087-05

## Effect of Soil Content on Dynamic Modulus in Filling Sand Subgrade

Chen Yuliang<sup>a,b</sup>, Li Xuelian<sup>a,b</sup>, Zhou Zhigang<sup>a</sup>

(a. Key Laboratory of Road Structure and Materials of Ministry of Transport; b. School of Communication and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, P. R. China)

**Abstract:** To analyse the effect of the soil content on dynamic modulus in filling sand subgrade, the portable falling weight deflectometer (PFWD) test and degree of compaction test in field were carried out at first. The relationship of the soil content and the dynamic modulus was analysed as well. Based on the test data, the regression models among the dynamic modulus, degree of compaction, consistency and the soil content were established. Then combining with the out-and-indoor test results, the controlling standard of soil content in filling sand embankment was presented. The results turn out that the soil content in the embankment is 3.0%~5.5%. The dynamic modulus increases with the soil decreasing, and there is a good power function regression between them. There is also a good regression among dynamic modulus, degree of compaction, consistency and soil content. When the soil content is within 10%, the dynamic modulus increases then turn to decrease with the soil content increasing. When soil content is smaller than 3% or larger than 8%, the dynamic modulus are significantly smaller than others. So the controlling standard of soil content in filling sand embankment is recommended at 3%~8%.

**Key words:** Subgrade engineering; filling sand subgrade; dynamic modulus; soil content; degree of compaction

收稿日期:2013-03-12

基金项目:国家自然科学基金(51308075);江西省交通运输厅科技项目(200802、2012C0006);道路结构与材料交通行业重点实验室(长沙理工大学)开放基金(kfj100203、kfj30201)

作者简介:陈宇亮(1977-),男,博士生,主要从事道路工程研究,(E-mail)chenyuliangjx@163.com。

冲积平原地区高速公路建设缺乏优质路基填料。若就地取土,不仅占用耕地,而且填料质量也难以保证;若长距运土,会造成建设成本大幅增加,中国不少地区拥有丰富的江(河)砂资源。若采用江(河)砂作为路基填料,不仅料源丰富、取料方便,还可以疏浚河道、保护生态、节约耕地,减少高速公路修筑对沿线环境的影响,同时砂具有水稳性好,施工时受不利季节和水的影响小等特点,近年来在中国多条高速公路得到了一定应用,其中江西省境内有 3 条高速公路全线或部分路段采用填砂路基。

对于填砂路基的研究,目前主要集中在填砂路基的设计、施工与质量控制<sup>[1-5]</sup>、填砂路基的防护<sup>[6]</sup>、填砂路基的边坡稳定性分析<sup>[7]</sup>和填砂路基的防排水<sup>[8-9]</sup>等方面,这些研究成果对于保证填砂路基的施工质量起到了非常重要的作用。但随着填砂路基工程建设的不断推进,需要对填砂路基有更为深入的研究,当前,还没有对填砂路基的力学特性尤其是动态模量方面进行系统研究。此外,科研和工程人员认识到含泥量对填砂路基的重要影响,但没有开展深入细致的研究,得出的结论较为笼统,无法具体指导工程实践。

本文通过现场便携式落锤式弯沉仪(PFWD)试验、压实度试验和室内 PFWD 试验,分析含泥量对填砂路基动弹性模量的影响。结合现场检测数据,建立动态模量随压实度、稠度和含泥量变化的回归模型。并结合现场检测与室内试验结果,提出填砂路基含泥量的控制标准。

## 1 现场 PFWD 测试

### 1.1 现场测试点位布置

现场测试地点为江西省德兴至南昌(简称德昌高速公路)的填砂路基,在该高速公路选择了 3 个路段进行试验,第 1 个路段(编号为 DC-1-1)和第 2 个路段(编号为 DC-1-2)在同一标段,砂源相同,施工机械设备也相同。第 3 个路段(编号为 DC-2)与前两个路段砂源不同,而且在另一标段。每个路段在行车道上按 10 m 左右间隔布点,检测点位的布置示意图如图 1 所示。

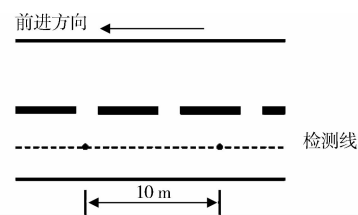


图 1 检测点位布置

### 1.2 试验内容与流程

首先选择一个测试点位,进行 PFWD 动态模量检测<sup>[10-11]</sup>,检测完成后,在原位进行现场压实度检测,然后在该点位取样,测试路段全部完成后,把所有点位的土样标签编号,送到实验室采用烘干法和筛分法测定每一点位所取土样的含水率和含泥量。试验内容与顺序按图 2 流程操作。

### 1.3 主要物性指标

各个检测路段填砂路基的主要物性指标见表 1。

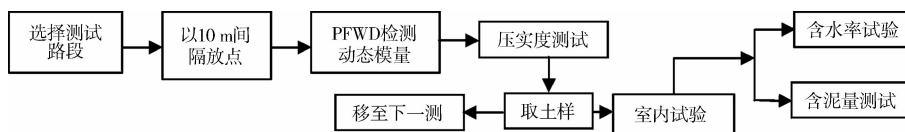


图 2 试验内容与流程

表 1 砂的主要物性指标

路段 编号	塑性 指数 $I_p/\%$	最佳 含水率 $\omega_{opt}/\%$	最大干密度 $\gamma_{dmax}/$ $(g \cdot cm^{-3})$	不均 匀系数 $C_u$	曲率 系数 $C_c$	颗粒分析试验——通过率/ $\%$					
						5 cm	2 cm	1 cm	0.5 cm	0.25 cm	0.075 cm
DC-1-1	7.2	11.4	1.818	2.36	1.35	5.6	9.8	12.3	14.7	53.5	4.1
DC-1-2	7.5	10.6	1.807	2.64	1.48	6.2	7.7	13.6	12.7	56.5	3.3
DC-2	6.9	9.9	1.827	3.12	1.66	7.1	12.0	16.6	20.3	38.7	5.2

由表 1 可知,3 个路段砂的不均匀系数均小于 5,曲率系数小于 3,因此,3 个路段的砂均为级配不良的砂。颗粒分析试验可知,DC-1-1 路段和 DC-1-2 路段粒径大于 0.25 mm 颗粒小于总质量 50%,粒径大于 0.075 mm 颗粒多于总质量 75%,故这 2 个路

段的填砂路基为细砂。而 DC-2 路段粒径大于 0.5 mm 颗粒小于总质量 50%,而粒径大于 0.25 mm 颗粒多于总质量 50%,故该路段的填砂路基为中砂。

### 1.4 试验结果与分析

1) 动态模量与含泥量关系 含泥量与填砂路基

动态模量的关系如图 3 所示。

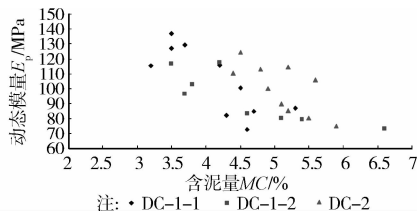


图 3 动态模量与含泥量关系

由图 3 可知,除 DC-1-2 路段有一个点位的含泥量为 6.6% 外,该检测路段填砂路基含泥量在 3.0%~5.5% 之间,DC-2 路段与其他两个路段相比,含泥量相对较大。3 个路段的动态模量在 70~140 MPa 之间,其值的大小随含泥量增加而减少。采用幂函数  $E_p = aK^b$  对动态模量与含泥量进行回归,回归关系如表 2 所示。

表 2 动态模量与含泥量回归关系

路段	点位 $n$	回归系数		$R^2$
		$a$	$b$	
DC-1-1	10	477.64	-1.088 0	0.610 9
DC-1-2	8	273.67	-0.721 2	0.737 8
DC-2	10	837.7	-1.315 3	0.522 3
汇总	28	294.9	-0.725 5	0.462 5

由表 2 可知,3 个路段的填砂路基动态模量与含泥量具有良好的相关性,相关系数均在 0.7 以上 ( $R^2 > 0.49$ )。一般情况下,含泥量越大,路基动态模量减小,反之,含泥量越小,动态模量越大。需要指出的是,由于现场的含泥量绝大部分在 3.0%~5.5% 之间,变化不大。当含泥量不在这个范围时,是否还具有这个规律,有待于进一步的研究。

2) 动态模量与压实度、稠度和含泥量关系 填砂路基动态模量的大小应该是多因素综合的结果,一方面,压实状态对填砂路基的动态模量具有决定性的影响,现场测试表明,压实度越大,填砂路基的动态模量也越大;另一方面,填砂路基内部储水能力弱,路基成型后含水率一般较低,尤其是路基表层,对其动态模量有较大影响。为此,结合含泥量对动态模量的影响分析,根据现场检测结果,采用多元幂函数建立了动态模量与压实度、稠度和含泥量的回归关系,回归公式见式(1),回归系数如表 3 所示。

$$E_p = aK^b \omega_c^c MC^d \quad (1)$$

式中: $E_p$  为动弹性模量,MPa; $K$  为压实度; $\omega_c$  为稠度; $MC$  为含泥量,%。

表 3 动态模量与压实度、稠度和含泥量的回归关系

路段	点位 $n$	回归系数				$R^2$
		$a$	$b$	$c$	$d$	
DC-1-1	10	4.288 5	0.205 2	12.29	0.478 7	0.827 3
DC-1-2	8	139.9	8.9	3.9	-0.552 8	0.951 1
DC-2	10	361.2	16.5	0.196 3	-0.553 6	0.573 7
汇总	28	453.2	10.9	0.461 3	-0.846 4	0.713 1

由表 3 可知,动态模量与压实度、稠度和含泥量的回归系数  $R$  均大于 0.75,表明它们具有良好的回归关系。

## 2 室内 PFWD 测试

现场检测与分析可知,德昌高速公路填砂路基的含泥量大部分 3.0%~5.5% 之间,变化范围不大。动态模量与含泥量之间的关系只能得到部分体现。为全面掌握含泥量对填砂路基动态模量的影响,采用室内 PFWD 测试方法进行相应研究<sup>[12]</sup>。

### 2.1 室内 PFWD 测试方法

PFWD 进行路基回弹模量室内测试的标准配置为:承载板直径为 10 cm,落高位 5~15 cm,锤重 10 kg。所以,PFWD 安装不需要下滑杆,而直接将上滑竿拧紧固定到底座上即可,如图 4 所示。由此,杆高为 50 cm 左右。测试时 PFWD 直接作用于标准重型击实顶面,并记录荷载、位移传感器的测量值。

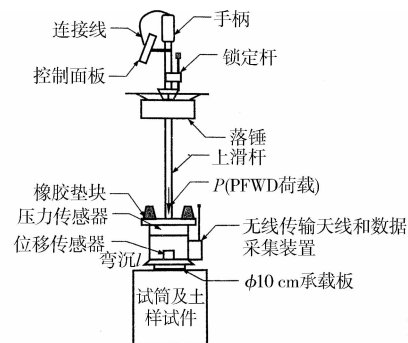


图 4 室内 PFWD 测试示意图

根据测试过程中压力和弯沉的峰值按式(2)计算土样模量  $M_R$ :

$$M_R = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{2p\delta(1-\mu^2)}{l} \cdot K \quad (2)$$

式中: $M_R$  为 PFWD 实测的土样模量,MPa; $p$  为承载板上荷载的平均压力,MPa; $\delta$  为承载板半径,cm; $\mu$  为土体泊松比,对于沥青路面取 0.35,对于水泥混凝土路面取 0.30; $K$  为综合影响系数,考虑土工试筒筒底和筒壁的约束作用<sup>[13]</sup>,对于 PFWD 为 10 cm

直径的承载板,  $K$  取 0.593 1。

## 2.2 试验内容与程序

1) 试验材料的选择。以上述 3 个路段的砂作为试验材料。

2) 成型试件。试件的含水率均为最佳含水率, 压实度分为 94% 和 96%, 按目标含泥量分别为 0%、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9%、10% 成型试件。

3) 室内 PFWD 测试。根据上述室内 PFWD 测试方法, 对试件进行测试, 并按要求计算每个试件的动态模量。

4) 实际含泥量测定。由于目标配制的含泥量与实际含泥量存在一定误差, 为更好反映含泥量与动态模量的关系, 室内 PFWD 测试完成后, 再进行实际含泥量的测定。

## 2.3 试验结果与分析

1) 压实度为 94% 由表 4 和图 5 可知, 当试件压实度为 94% 时, 随着含泥量的增加, 砂的动态模量先增大, 后减小, 具有典型的凸行抛物线特征。11 个试件中, 动态模量最大对应的含泥量为 4%。此外, 当含泥量较小(含泥量小于 3%) 和较大(含泥量大于 8%) 时, 动态模量要明显小于其他含泥量下的动态模量。当含泥量在 3%~8% 范围时, 动态模量变化幅度不大。

表 4 室内动态模量与含泥量关系

目标含泥量 MC/%	实测含泥量 MC/%	动态模量 $M_R$ /MPa
0	0	116.3
1	0.97	124.2
2	2.00	138.7
3	2.82	177.2
4	3.81	180.6
5	4.76	168.4
6	5.86	162.4
7	6.89	157.1
8	7.95	152.9
9	8.98	127.3
10	9.84	125.5

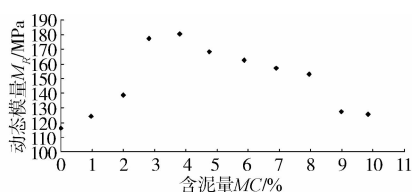


图 5 室内动态模量与含泥量关系

2) 压实度为 96% 压实度为 96% 时, 含泥量与室内动态模量的关系如表 5 和图 6 所示。

由表 5 和图 6 可知, 当试件压实度为 96% 时, 随着含泥量的增加, 砂的动态模量也先增大, 后减小。11 个试件中, 动态模量最大对应的含泥量为 3%。与压实度为 94% 相同, 当含泥量较小(含泥量小于 3%) 和较大(含泥量大于 8%) 时, 动态模量要明显小于其他含泥量下的动态模量。当含泥量在 3%~8% 范围时, 动态模量变化幅度很小。

表 5 室内动态模量与含泥量关系

目标含泥量 MC/%	实测含泥量 MC/%	动态模量 $M_R$ /MPa
0.00	0.00	143.9
1.00	0.94	147.6
2.00	1.85	164.3
3.00	2.93	195.8
4.00	3.68	191.9
5.00	4.89	192.4
6.00	5.99	188.4
7.00	6.85	190.5
8.00	7.83	186.3
9.00	8.88	157.3
10.00	9.97	156.7

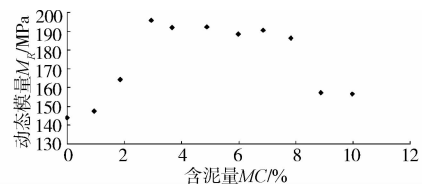


图 6 动态模量  $E_p$  与含水率  $w$  关系

填砂路基中含泥量较少时, 砂无塑性、透水性强, 粘聚力小, 易松散, 压实困难, 整体强度较低。此外, 当砂中含泥量过大时, 填料中的泥浆填充在砂颗粒之间, 使颗粒之间的滑动与滚动摩擦阻力减小, 使颗粒之间咬合能力减弱, 使填料剪胀性减小, 从而使填料的抗剪强度大大减小, 且泥浆较多的区域泥浆会和砂颗粒混合形成团状, 在填料中形成强度极低的空洞。所以较大的含泥量对砂填料的强度影响很大。综合上述分析, 在选取砂源时应应对砂的含泥量严格控制, 建议含泥量控制标准为 3%~8%。

## 3 结论

1) 现场检测路段填砂路基含泥量绝大部分在 3.0%~5.5% 之间, 现场动态模量随含泥量增大而

减少,二者具有良好的幂函数回归关系。

2)现场动态模量与压实度、稠度和含泥量具有良好的回归关系。

3)当试件压实度为94%和96%时,随着含泥量的增加,砂的动态模量先增大,后减小。当含泥量较小(含泥量小于3%)和较大(含泥量大于8%)时,动态模量要明显小于其他含泥量下的动态模量。当含泥量在3%~8%范围时,动态模量变化幅度很小。

4)为保证填砂路基的强度与施工质量,在选取砂源时应对砂的含泥量严格控制,建议含泥量的控制标准为3%~8%。

#### 参考文献:

- [1] 蒋鑫,凌建明,李进. 高速公路填砂路基设计若干关键问题[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(3):570-575.  
Jiang X, Ling J M, Li J. Some critical problems on sand embankment design for expressway [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3):570-575.
- [2] Chen F M, Liu R N. Research on the dry compactness technology in subgrade filled with wind-blown sand in sand damage area [J]. Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, 2008, 1026-1033
- [3] 孙宝志,田志军,阚红娜. 泌南高速公路填砂路基施工技术[J]. 中外公路,2012,32(9):44-48.  
Sun B Z, Tian Z J, Kan H N. Construction technology of sand-filled subgrade in Binan freeway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(9):44-48.
- [4] 李战国,张务民,潘凤文,等. 滨海吹填砂和淤泥路基的固化及施工研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2012,36(2):252-256.  
Li Z G, Zhang W M, Pan F W, et al. Study of stabilization and construction of hudraulic fill sand and silt mixture in coastal area [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2012, 36(2):252-256.
- [5] 李兵. 填砂路基施工技术要点和质量控制研究[J]. 工程建设与设计,2011(3):126-129.  
Li B. Study on the main points of construction technology and quality control for natural sand embankment [J]. Construction & Design For Project, 2011(3):126-129.
- [6] 江西省乐温高速公路建设项目办公室. 高速公路填砂路基关键技术研究与应用[R]. 2006.
- [7] 蒋鑫,凌建明,谭炜,等. 高速公路填砂路基边坡稳定性分析[J]. 铁道工程学报,2008(9):1-6.  
Jiang X, Ling J M, Tan W, et al. Slope stability analysis of sand embankment for expressway engineering [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(9):1-6.
- [8] Rushing T S. Full-scale evaluation of mat surfacings for roads over sand subgrades [J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(2):57-63.
- [9] 上海长江隧桥工程建设发展有限公司. 长江口细砂路堤设计与施工关键技术[R]. 2008.
- [10] 陈宇亮,徐远明,王新武. 基于动弹性模量的土石混填路基压实质量控制技术[J]. 交通科学与工程,2011,27(1):20-23.  
Chen Y L, Xu Y M, Wang X W. Controlling methods of compaction quality of subgrade filled with earth-rock mixtures based on dynamic modulus [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(1):20-23.
- [11] 查旭东. PFWD快速检测路基模量研究[J]. 公路交通科技, 2009, 25(1):26-30.  
Zha X D. Study of rapid test of subgrade modulus with PFWD [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 25(1):26-30.
- [12] Hossain Z, Zaman M, Doiron C, et al. Characterization of subgrade resilient modulus for pavement design [C]//Geo-Frontiers, 2011: 4823-4832.
- [13] 查旭东,宋小金,戴许明. 室内承载板法土工试筒约束的综合修正[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2006,3(3):36-42.  
Zha X D, Song X J, Dai X M. Comprehensive correction for restraint action of soil tube with laboratory bearing plate method [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 3(3):36-42.
- [14] Song Y L, Zhang Y W, Lin M. Experimental research eolian sand on subgrade engineering application [C]// ICCTP, 2011: 3625-3630.
- [15] Mishra D, Tutumluer E, Moaveni M, et al. Laboratory and field measured moduli of unsurfaced pavements on weak subgrade[C]//Geocongress, 2012: 1381-1390.
- [16] Yu W B, Che F Q, Feng W J, et al. Properties of subgrade and construction techniques of mobei expressway[C]//Geocongress, 2012: 1410-1417.