

农村公路山皮碎石土路用特性的数值模拟 与室内试验研究

曹帆¹, 李旖², 蒋应军¹

5 (1. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室;
2. 长安大学建筑学院)

摘要: 为大力发展农村公路建设, 丰富农村公路基层材料类型, 降低工程费用, 分析了山皮碎石土作为集料利用于农村公路基层的可行性, 对五种不同配合比的无机结合料稳定山皮碎石土材料进行了对比分析, 并在此基础上提出了适合于农村公路的路面结构层次, 从保证压实度、裂缝控制和接缝处理三方面讨论了水泥稳定山皮碎石土工程质量控制方法。结果表明, 随着水泥剂量的提高, 无机结合料稳定山皮碎石土材料强度增加, 抗裂性能降低; 石灰的掺入对水泥稳定山皮碎石土后期强度影响较小; 压实度提高、裂缝控制及接缝合理处理对于农村公路耐久性提高有重要意义。

15 **关键词:** 道路工程; 山皮碎石土; 农村公路; 数值模拟; 质量控制
中图分类号: U414

The numerical simulation and indoor test of road performance of hill-skill gravel soil in rural road engineering

20

Cao Fan¹, Li Yi², JIANG Yingjun¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, 710064;

2. School of architecture of chang'an university, Xi'an, 710064)

25 **Abstract:** In order to develop the construction of rural road, to enrich material type of base course and to reduce costs of engineering, the feasibility of using hill-skill gravel soil to construct the base course of rural road was analyzed. The performance of five types of hill-skill gravel soil stabilized by inorganic binder was compared. On the basis of the study of hill-skill gravel soil stabilized by inorganic binder material, the structure of rural road using hill-skill gravel soil was promoted. The engineering quality controlling method was discussed on the insurance of compactness, crack controlling and joint treatment. The results show that the strength of hill-skill gravel soil stabilized by inorganic binder material increases and crack resistance reduces when the cement dosage increases. Lime has little influence on later strength of mixture. The increasing of compactness, controlling of crack and treatment of joint have much significance of durability of rural road..

35

Key words: road engineering; hill-skill gravel soil; rural road; numerical simulation; quality control

0 引言

40 近年来, 国家大力提升农村公路经费资助力度, 旨在大力发展农村公路建设, 从而为带动农村经济大发展打下基础^{[1]-[2]}。然而, 农村公路相比高速、一级等其他等级公路而言, 具有其自身的独特性^[3]:

(1) 农村公路交通量较小, 车辆轴载较轻, 因此在设计时, 其设计标准及技术指标均与高等级公路有较大区别。

作者简介: 曹帆(1989-), 男, 长安大学公路学院研究生, 从事道路与铁道工程及道路工程材料方面研究
通信联系人: 蒋应军(1975-), 男, 长安大学教授, 工学博士, 从事道路工程研究。电话:18292095228。E-mail: jyj@gl.chd.edu.cn

45 (2) 农村公路对农村经济的发展而言具有重要意义, 因此其建设质量直接关系到农村未来的发展与农村形象。

(3) 环境保护是山区农村公路修建的重要环节, 在公路设计时, 应充分考虑对农民良田及居住地的占用情况, 并尽量减少对自然环境造成的破坏。

综上所述, 农村公路要求在较为有限的经费使用范围内, 设计能够满足农村经济发展需求的公路, 并严格控制公路修建对环境的破坏。因此, 有必要对农村公路结构形式与材料进行较为系统的研究, 为保证农村公路的良好运营, 还应对其展开较为全面的工程质量监督。

50 本文以陕西省铜川市阿子乡的一条村级公路为例, 在保证就地取材、节约工程费用并保证工程质量的前提下, 分析了路面基层材料的使用方案, 并确定了路面的合理结构层, 在此基础上, 对其工程质量控制方法提出了有益建议。

1 山皮碎石土在基层中的应用分析

55 阿子乡地处铜川市西北部, 当地可用于路面铺筑的粘土较少, 考虑农村公路经费限制, 决定充分利用当地材料进行路面基层的修建。当地较多山体均由风化岩石堆积而成, 具有丰富的山皮碎石土资源; 除此之外当地水泥及石灰材料获取较为容易, 但石灰质量不高。通过分析, 可利用山皮碎石土材料经过水泥或灰进行稳定处理, 从而将其用作路面基层的铺筑。

1.1 原材料

60 水泥: 陕西尧柏牌 P.032.5 缓凝水泥, 技术指标略。

集料: 铜川市阿子乡山皮碎石土。当地山皮碎石土不均匀程度较大, 大颗粒棱角较为分明, 颗粒间具有较大的内摩擦角, 土体本身 4.75mm~19mm 集料含量较多, 液限、含水量与塑性指数均相对较小。本文取当地山皮碎石土样品, 其颗粒组成见表 1。

表 1 风化山皮碎石土颗粒组成

65 Tab.1 The particle composition of weathered hill-skill gravel soil

筛孔/mm	>37.5	31.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	<0.15
含量/%	5.7	8.3	13.2	16.7	24.3	8.3	6.7	4.7	8.9	3.2

1.2 CBR 数值试验分析

70 由于山皮碎石土颗粒组成不均匀性较大, 部分大粒径颗粒对山皮碎石土材料力学性能有较大影响。由于室内 CBR 试验对粒径的限制, 为验证山皮碎石土材料应用于农村公路基层的可行性, 本文利用颗粒流离散单元法对山皮碎石土材料的 CBR 进行分析, CBR 试验过程中保水等试验条件均可利用微力学参数进行表征。根据论文前期研究^[4-5], 结合表 1 山皮碎石土颗粒组成, 利用 PFC2D 数值模拟软件得到风化山皮碎石土数值 CBR 试验过程如图 1。在山皮碎石土数值试验过程中, 泊松比取 0.20, 剪切模量取 5.0GPa, 摩擦系数取 0.35。经过多次数值试验, 得到风化山皮碎石土平均 CBR 值为 95.7%。

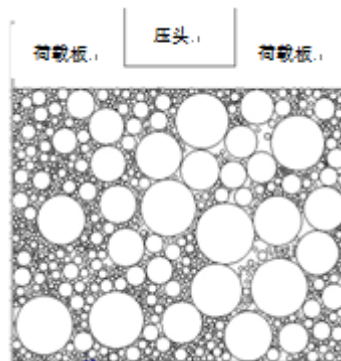


图1 山皮碎石土 CBR 数值试验

Fig. 1 CBR numerical simulation of hill-skill gravel soil

对山皮碎石土 CBR 数值试验做进一步的分析得到，其细观位移矢量如图 2 所示。由图 2 可知，大颗粒在整个粒料结构中起到了一定的骨架作用，并主要承担力的传递功能。

由于我国大陆对碎石类粒料基层未做出具体 CBR 值规定，因此本文研究参考了我国台湾省“行政院”公共工程委员会对碎石类粒料基层 CBR 值的规定（设计指标为 80%）。因此，表 1 风化山皮碎石土材料组成结构能够作为农村公路基层材料使用。为提高该段农村公路质量，经综合研究，决定采用无机结合料稳定山皮碎石土材料作为该段农村路面基层。

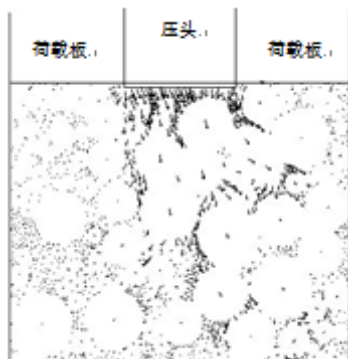


图2 山皮碎石土数值试验细观矢量

Fig. 2 The meso vector of numerical simulation of hill-skill gravel soil

1.3 室内试验方案

1.3.1 试件的制备

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009)^[6]中无侧限抗压强度测定方法制作直径×高=Φ150mm×h150mm 圆柱体试件，每组试件数目不小于 13 个。五种无机结合料稳定山皮碎石土分别为：①3%水泥+山皮碎石土（3% C-S）；②4%水泥+山皮碎石土（4% C-S）；③水泥+山皮碎石土（5% C-S）；④4%水泥+6%石灰+山皮碎石土（4% C-6% L-S）；⑤4%水泥+8%石灰+山皮碎石土（4% C-8% L-S）。

1.3.2 试验过程

本试验采用 MTS485.10 型材料试验机，其测量精度为 ±1% 且同时具有加载速度指示装置与加载速度控制装置。上下压板具有足够的刚度并能保证均匀连续的加载。在试件成型后，本文对两批试件分别进行了 7d 标准养生与 28d 标准养生。试验过程中，控制加载速率在 1mm/min。

通过式 (1) 对试件的无侧限抗压强度进行计算：

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

100 其中, R_c 为试件的无侧限抗压强度 (MPa), P 为试件破坏时的最大压力 (N), A 为试件的截面积 (mm²)。

1.4 室内试验结果及分析

105 试件分别养生至 7 天和 28 天后, 通过室内试验, 得到的无侧限抗压强度室内试验结果如表 2 所示, 其中 ω 为最佳含水量 (%), ρ_{dm} 为最大干密度 (g cm⁻³), R_c 为无侧限抗压强度 (MPa)。水泥和石灰对 R_c 的影响见图 3~图 6。

表 2 室内试验结果

Tab.2 The results of indoor test

编号	ω /%	ρ_{dm} /(g·cm ⁻³)	7dR _c /MPa	28dR _c /MPa
①	7.5	2.138	1.8	4.7
②	7.6	2.146	2.1	5.1
③	7.9	2.182	2.4	5.2
④	9.1	2.036	2.2	5.1
⑤	9.4	2.075	2.3	5.2

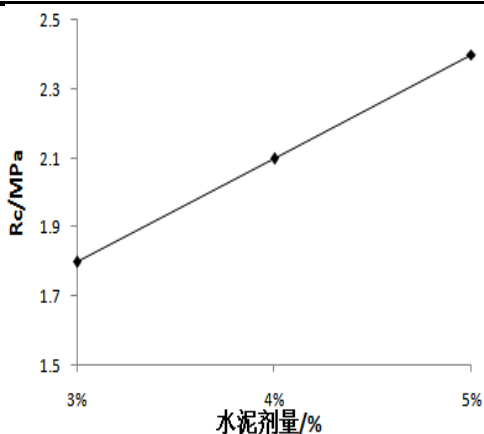


图 3 水泥剂量~7dR_c

Fig. 3 cement dosage~7dR_c

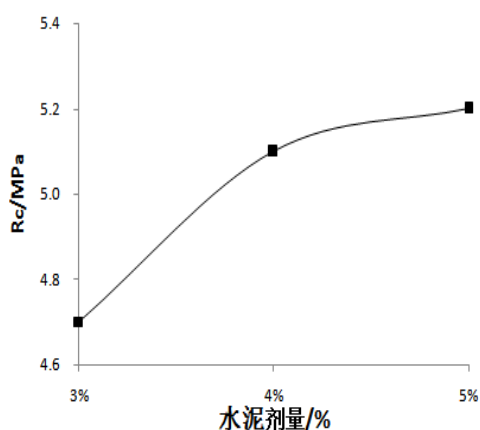


图 4 水泥剂量~28dR_c

Fig. 4 cement dosage~28dR_c

110

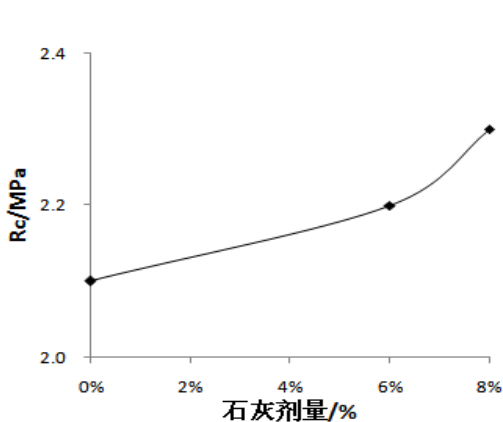


图 5 石灰剂量~7dR_c

Fig. 5 lime dosage~7dR_c

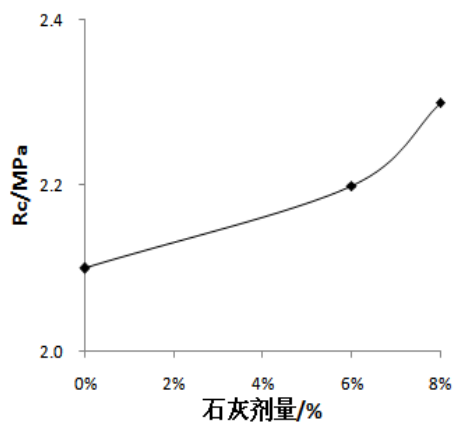


图 6 石灰剂量~28dR_c

Fig. 6 lime dosage~28dR_c

115

由表 2 和图 3~图 6 分析可知, 水泥稳定山皮碎石土 28d 强度满足农村公路基层路用条件; 水泥稳定山皮碎石土无侧限抗压强度随水泥剂量的增大而增大; 在加入石灰后, 混合料

早期抗压强度有所增长，而后期强度增长并不明显，这与当地石灰质量不良有一定关系。相比 4% 与 5% 水泥剂量试件，后期强度差别较小，综合考虑基层强度、收缩裂缝及经济条件等因素，本文采用的无机结合料稳定山皮碎石土类型为 4% C-S。

120 经综合考虑当地轴载状况、自然环境与施工碾压可行性^[7]，确定路面结构层如图 7 所示：

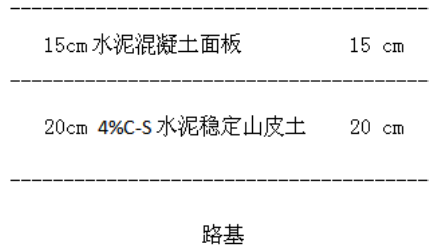


图 7 水泥稳定山皮碎石土基层路面结构

Fig.7 Pavement structure of the rural road

2 水泥稳定山皮碎石土施工质量控制

125 2.1 压实度的保证

影响水泥稳定山皮碎石土基层压实度的因素很多，包括原材料、设计、施工、自然条件等多个方面。

(1) 集料的影响。集料压碎值对施工中压实度影响较为显著。集料在压实功作用下破碎，从而使混合料配合比发生改变，直接影响到基层干密度的变化，进而使压实度受到影响。因此，山皮碎石土在使用前应满足表 3 要求^[8]。

130

表 3 集料技术要求

项目	密度/t m ⁻³	压碎值/%	针片状/%	
			大于 9.5mm	4.75~9.5mm
质量要求	≥2.6	<25	<15	<20

(2) 含水量的影响。为使混合料能够达到规定的压实度，一般在压实时，应使混合料含水量处于或略大于最佳含水量。若含水量过大，混合料在压实时，容易因形成“压实弹簧”而使压实功不能较好的传递到材料底部，造成压实度不足；若含水量较小，水泥水化作用不能充分的进行，进而使得混合料内部粘结力不足，导致施工时的离析。因此，在水泥稳定山皮碎石土施工时，山皮碎石土妥善保存，防止因雨水等原因使含水量过大；在压实时，还应严格对山皮碎石土含水量进行测试，以保证压实度达到要求。

135

(3) 碾压机械不配套的影响。水泥稳定山皮碎石土混合料只有在一定的碾压机械组合情况下，以一定的碾压次序与碾压遍数，才有可能达到合格的压实度。如果压路机的吨位不够，或碾压机械不配套，就很难达到规定的碾压效果。在施工过程中，压路机的吨位和台数必须与拌和机及摊铺机生产能力相匹配，使从拌和开始到碾压终了的时间不得超过水泥终凝时间。

140

(4) 压实层厚的影响。水泥稳定山皮碎石土基层混合料在设计时除考虑轴载的影响外，还应充分考虑压实厚度的影响。压实层过厚，压实功不能充分传递到基层底部，从而造成压实不充分；压实层过薄，容易因压实功过大而引起基层在压实过程中产生不可恢复变形，从而影响基层的耐久性。农村公路基层厚度较小，应结合路面交通状况与压实机械，合理选择压实层厚度。

145

(5) 压实时间的影响。压实过程应充分考虑水泥凝结时间, 及时进行压实。若压实时间掌握不充分, 水泥水化硬化到一定程度, 水泥稳定山皮碎石土流动性降低, 内摩阻力增大, 150 170 185 190 195 200 205 210 215 220 225 230 235 240 245 250 255 260 265 270 275 280 285 290 295 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780 785 790 795 800 805 810 815 820 825 830 835 840 845 850 855 860 865 870 875 880 885 890 895 900 905 910 915 920 925 930 935 940 945 950 955 960 965 970 975 980 985 990 995

2.2 裂缝控制

水泥稳定类混合料产生裂缝是较为普遍的现象。若路表水渗入基层, 水在车轮荷载作用下形成动水压力, 基层中的细料动水的不断冲刷下, 产生唧泥现象, 导致面层出现坑槽破坏。155 160 165 170 175 180 185 190 195 200 205 210 215 220 225 230 235 240 245 250 255 260 265 270 275 280 285 290 295 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780 785 790 795 800 805 810 815 820 825 830 835 840 845 850 855 860 865 870 875 880 885 890 895 900 905 910 915 920 925 930 935 940 945 950 955 960 965 970 975 980 985 990 995

(1) 由于干燥收缩与温度收缩作用, 水泥剂量对裂缝的产生影响较为显著。工程中, 在保证基层强度的前提下, 应尽量减少水泥剂量从而降低水泥水化过程中产生的温度应力与干缩应力。160 165 170 175 180 185 190 195 200 205 210 215 220 225 230 235 240 245 250 255 260 265 270 275 280 285 290 295 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780 785 790 795 800 805 810 815 820 825 830 835 840 845 850 855 860 865 870 875 880 885 890 895 900 905 910 915 920 925 930 935 940 945 950 955 960 965 970 975 980 985 990 995

(2) 较大粒径颗粒因其较高的弹性模量, 有助于抑制水泥稳定山皮碎石土裂缝的产生; 除此之外, 粉料含量的增加会引起水泥稳定山皮碎石土收缩应力的增大。因此在本文中可在条件允许的情况下, 对山皮碎石土级配组成进行调配, 以减少收缩裂缝。165 170 175 180 185 190 195 200 205 210 215 220 225 230 235 240 245 250 255 260 265 270 275 280 285 290 295 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780 785 790 795 800 805 810 815 820 825 830 835 840 845 850 855 860 865 870 875 880 885 890 895 900 905 910 915 920 925 930 935 940 945 950 955 960 965 970 975 980 985 990 995

(3) 压实过程中的含水量对水泥稳定山皮碎石土裂缝的产生影响较为明显, 含水量越大, 水化过程中蒸发的水分越多, 材料更易产生裂缝。因此应严格控制压实过程中材料的含水量, 减少裂缝产生。165 170 175 180 185 190 195 200 205 210 215 220 225 230 235 240 245 250 255 260 265 270 275 280 285 290 295 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780 785 790 795 800 805 810 815 820 825 830 835 840 845 850 855 860 865 870 875 880 885 890 895 900 905 910 915 920 925 930 935 940 945 950 955 960 965 970 975 980 985 990 995

(4) 基层施工完毕后, 应采取良好的养生措施, 并禁止施工车辆碾压。165 170 175 180 185 190 195 200 205 210 215 220 225 230 235 240 245 250 255 260 265 270 275 280 285 290 295 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780 785 790 795 800 805 810 815 820 825 830 835 840 845 850 855 860 865 870 875 880 885 890 895 900 905 910 915 920 925 930 935 940 945 950 955 960 965 970 975 980 985 990 995

2.3 接缝处理

接缝是水泥稳定类材料施工过程中必须要谨慎处理的环节之一。水泥稳定山皮碎石土基层因其本身刚度较大, 若接缝处理不良, 将会成为整个路面结构层的薄弱点, 降低路面耐久性。170 175 180 185 190 195 200 205 210 215 220 225 230 235 240 245 250 255 260 265 270 275 280 285 290 295 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780 785 790 795 800 805 810 815 820 825 830 835 840 845 850 855 860 865 870 875 880 885 890 895 900 905 910 915 920 925 930 935 940 945 950 955 960 965 970 975 980 985 990 995

在施工时, 应对接缝进行合理、科学的处理。水泥稳定山皮碎石土基层末端应人工整平, 紧靠混合料放置方木应与混合料压实厚度同高, 与宽度等宽。方木的另一侧设支撑, 保证在碾压时不移动变形。用 3m 直尺检测平整度, 以保证接缝周围平整度满足要求; 同时应对接缝周边压实度进行检测, 以保证接缝周围混合料已充分压实, 从而防止接缝因压实不足产生破坏。175 180 185 190 195 200 205 210 215 220 225 230 235 240 245 250 255 260 265 270 275 280 285 290 295 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780 785 790 795 800 805 810 815 820 825 830 835 840 845 850 855 860 865 870 875 880 885 890 895 900 905 910 915 920 925 930 935 940 945 950 955 960 965 970 975 980 985 990 995

3 结论

(1) 本文研究表明, 水泥稳定山皮碎石土用于农村公路基层的铺筑中, 能有效代替水泥稳定粘性土或碎石在路面基层中的使用, 从而有效利用当地资源, 节约工程费用。180 185 190 195 200 205 210 215 220 225 230 235 240 245 250 255 260 265 270 275 280 285 290 295 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780 785 790 795 800 805 810 815 820 825 830 835 840 845 850 855 860 865 870 875 880 885 890 895 900 905 910 915 920 925 930 935 940 945 950 955 960 965 970 975 980 985 990 995

(2) 足够的压实度、裂缝的控制与接缝的合理处理是水泥稳定山皮碎石土基层施工质量180 185 190 195 200 205 210 215 220 225 230 235 240 245 250 255 260 265 270 275 280 285 290 295 300 305 310 315 320 325 330 335 340 345 350 355 360 365 370 375 380 385 390 395 400 405 410 415 420 425 430 435 440 445 450 455 460 465 470 475 480 485 490 495 500 505 510 515 520 525 530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600 605 610 615 620 625 630 635 640 645 650 655 660 665 670 675 680 685 690 695 700 705 710 715 720 725 730 735 740 745 750 755 760 765 770 775 780 785 790 795 800 805 810 815 820 825 830 835 840 845 850 855 860 865 870 875 880 885 890 895 900 905 910 915 920 925 930 935 940 945 950 955 960 965 970 975 980 985 990 995

[参考文献] (References)

- 185 [1] 畅芬叶, 杜相儒. 农村公路建设评价方法研究[J]. 中外公路, 2013, 03: 212-215.
[2] 李丽, 吴群琪. 建立农村公路建设项目社会经济评价体系的必要性思考[J]. 交通标准化, 2009, Z1:

212-215.

[3] 李宗耀. 我国农村公路建设中的资金问题[J]. 交通标准化,2007, 06:56-58.

[4] 任蛟龙. 级配碎石 CBR 数值试验方法及其应用[D]. 西安: 长安大学, 2011.

190 [5] Kevin Francis Malone, Baohua Xu. Determination of contact parameters for discrete element method simulations of granular systems [J].Science Direct, 2008(6):766-771

[6] JTG E51-2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社. 2009.

[7] 陈琛. 农村公路经济适用型路面结构及其施工技术研究[D]. 唐山:河北理工大学, 2007.

195 [8] JTG E42-2005, 公路工程集料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社. 2005.