

文章编号:1671-8879(2006)05-0021-05

弱风化石粒料结构强度与组成关联因素

徐鸥明, 韩 森, 郝培文, 肖庆一

(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)

摘 要:为了评价弱风化石粒料的结构强度以及影响因素,采用加州承载比(CBR)试验和大型直接剪切试验,结合灰色关联分析方法,研究了弱风化石粒料的变形、强度宏观结构性能与不同组成指标的关系以及关联度。根据试验结果分析得到弱风化石 CBR 值、抗剪强度剪切角 φ 值与弱风化石粒料组成中最大粒径、粒料大于 4.75 mm 含量(质量含量)、小于 0.60 mm 含量、小于 0.075 mm 含量之间的关系及关联度。结果表明:影响弱风化石粒料结构强度的关键因素是集料最大粒径、粒料大于 4.75 mm 含量、小于 0.60 mm 含量和小于 0.075 mm 含量等;粒料最大粒径及粒料大于 4.75 mm 含量对粒料结构性能影响最大,小于 0.60 mm 含量次之,影响最小的是粒料小于 0.075 mm 含量。

关键词:道路工程;弱风化石粒料;结构强度;抗剪强度;关联分析

中图分类号:U414.11

文献标识码:A

Relationship between structure strength and composition for weakly-weathered-stone-gravel

XU Ou-ming, HAN Sen, HAO Pei-wen, XIAO Qing-yi

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry
of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to evaluate the structural strength and influencing factors of weakly-weathered-stone-gravel, the relationship between macrostructure performance, such as transfiguration, strength, and different compositive indexes was studied by combining CBR test and large straight shearing test with grey connection analysis method. Through analyzing the test results, the relationship between CBR value and anti-shearing strength φ value with maximum size, the content of partical that is over 4.75 mm, the content of partical that is below 0.60 mm and the content of partical that is below 0.075 mm was obtained. The result shows that the key factors are maximum size, the content of partical that is over 4.75 mm, the content of partical that is below 0.60 mm and the content of partical that is below 0.075 mm, but the most important indexes among them are maximum size and coarse content, the follow ones are particle content that is below 0.6 mm and fine content. 6 tabs, 9 figs, 6 refs.

Key words: road engineering; weakly-weathered-stone-gravel; structure strength; shear strength; grey connection analysis

收稿日期:2005-09-07

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200231800048)

作者简介:徐鸥明(1979-),男,安徽巢湖人,博士研究生.

0 引 言

粒料按照不同方式(骨架空隙、骨架密实、悬浮密实)组成各种类型的粒料基层。随着材料性质和组成方式的不同,各种粒料在力学性能上表现出很大的差异。粒料基层在车轮荷载和环境因素作用下所表现出来的力学性质,对路面的使用性能和使用寿命起决定性作用。对粒料基层材料结构强度的分析和认识,有助于设计出符合使用要求的粒料基层。

粒料同路面结构性能密切相关的有两方面力学性质,即变形特性和强度特性。粒料基层的变形特性主要是指累积变形,这是因为对于使用粒料基层的道路来说,不应在行车荷载的反复作用下因塑性变形累积而产生沉陷或车辙;而粒料基层的强度特性主要是指抗剪强度,这是因为面层厚度较薄、刚度较低时,如果受到较大的水平力(如紧急制动),传给粒料基层的应力较大,有可能出现基层承载力不足而引起的剪切破坏。

本文通过对粒料材料进行加州承载比(CBR)试验和大型直接剪切试验^[1],研究影响粒料结构性能的因素,并运用灰色关联分析方法分析这些因素对粒料结构性能的影响。

1 试验材料和级配

1.1 试验材料

试验研究所用石料,取自内蒙古已建的牧区道路沿线料场,属于弱风化石。材料参数见表 1。

表 1 集料基本性质试验结果

粗集料压碎值/%	粗集料针片状质量含量/%	粗集料冲击值/%	液限/%	塑性/%
18.9	16.8	14.8	20	5.5

1.2 级配

根据《公路路面基层施工技术规范》(JTJ 034-2000),对用于二级或二级以下公路基层的级配碎石颗粒组成范围的规定,选取了范围上限(以下称为规范上限)、中值(以下称为规范中值)和范围下限(以下称为规范下限)。同时,结合工程实践以及对比研究需要,又选取了 7 种级配进行 CBR 试验和直接剪切试验研究,各种级配的粒料组成见表 2。

2 试验方法及结果

2.1 CBR 试验

根据干密度与含水量试验确定的最大干密度和最佳含水量,按《公路土工试验规程》(JTJ 051-93)

要求,在压实振动台上,通过改变振动压实时间(振实时间取每层 120、160、200 s),成型不同密实度试样。同时,考虑最不利季节因素,试样经过浸水 96 h 后进行 CBR 试验,试验结果见表 3。

表 2 弱风化石粒料级配组成情况

筛孔尺寸/mm	37.50	31.50	19.00	9.50	4.75	2.36	0.60	0.075
规范要求级配	100	90~100	73~88	49~69	29~54	17~37	8~20	0~7
规范上限	100	100	88	69	54	37	20	7
规范中值	100	95.0	80.5	59.0	41.5	27.0	14.0	3.5
规范下限	100	90	73	49	29	17	8	0
FNS 级配	100	90	73	69	54	37	8	0
FXW1 级配	100	87	70	46	26	14	5	0
FXW2 级配	100	85	65	43	20	12	30	0
FSW1 级配	100	100	90	72	57	40	23	10
FSW2 级配	100	100	95	75	60	45	25	15
D _{9.5} 粒径	100	100	100	0	—	—	—	—
D ₁₉ 粒径	100	100	0	—	—	—	—	—

表 3 弱风化石粒料 CBR 试验和剪切试验结果

级 配	CBR/%	$\varphi/(^{\circ})$	C/kPa
规范上限	95	34.14	35.10
规范中值	101	36.17	11.70
规范下限	92	36.29	9.98
FSW1 级配	53	29.64	26.62
FSW2 级配	30	29.16	47.00
FXW1 级配	57	37.23	6.71
FXW2 级配	74	38.06	2.43
FNS 级配	79	35.23	8.75
D ₁₉ 粒径	33	28.15	0
D _{9.5} 粒径	25	25.13	0

2.2 直接剪切试验

目前,用于道路试验的直剪剪切仪器仅适用于细粒土,没有适用于粗粒土的道路用大型直接剪切试验仪器^[1-2]。为了对粒料基层结构强度影响因素进行研究,作者自行研制了一个可在室内使用的大型直接剪切仪^[3-4]。剪切盒为刚性剪切盒,由上、中、下 3 个刚性试模组成,剪切盒尺寸为 400 mm×400 mm×500 mm,开缝尺寸为 10 mm。试验时,通过推动中间的剪切盒,使其相对上、下两个剪切盒发生错动,直至试样剪切破坏,剪切示意图 1。

根据给定的级配,按振动成型法得出的 100%最大振实干密度和剪切盒容积,计算并称取试验所需的试样质量,将称好的试样拌和均匀后分为 8 份,

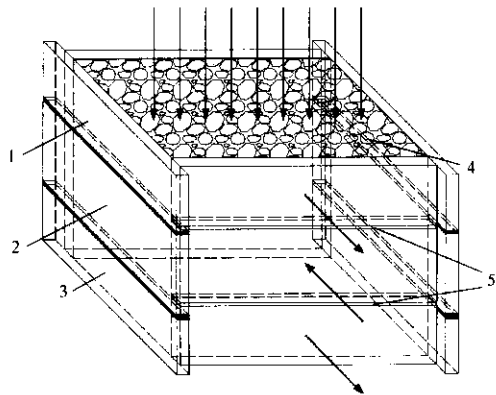


图 1 剪切盒

1、2、3-上、中、下剪切盒;4-粒料;5-预留剪切缝

每份加水拌匀后装入剪切盒内,进行人工捣实;称取传压钢板的质量,并放在试样面上,进行固结。当 1 h 垂直变形小于 0.03 mm 时,则认为已经固结稳定,可以进行试验。将剪切盒连带试样移至试验台上,要求对中放置,并用水平尺和细砂校平传压钢板,同时保证水平压力传感器正对剪切盒中间。安装垂直压力传感器和机电百分表,并使垂直压力传感器位于传压钢板正中。松开上、中、下剪切盒侧面的固定销,将开缝条取出。

准备就绪后,开启垂直液压千斤顶油泵,施加垂直压力到预定值,停止加压;然后立即启动水平液压千斤顶油泵,使水平压力传感器与剪切盒接触,并缓慢施加压力,控制水平剪切速率为 0.05 mm/s,同时启动数据采集与分析仪 7V08,每隔 3 s 对垂直压力、水平压力和水平剪切位移进行扫描,同时打印扫描结果。当分析仪扫描到水平传感器的荷载不再上升或剪切变形急剧增大时,即认为已剪损。如上述两种情况未出现,可控制剪切变形达 25~30 mm 时,即可停止试验。试样剪切破坏时间按规定控制为 5~10 min。

3 试验结果分析

3.1 最大粒径与 CBR 值关系

图 2 表示最大粒径(D_{\max})与 CBR 值的关系。由图 2 中可以看出, D_{\max} 越大,粒料 CBR 值也越大。这是因为 D_{\max} 对密度及强度有很大影响。 D_{\max} 越大,粗粒料的骨架作用就越明显,因而粒料抵抗外力作用也就越强,要达到相同的贯入量,所需的外加荷载就越大,所以粒料的 CBR 值就越大。

3.2 粗集料含量(质量含量)与 CBR 值的关系

图 3 表示粗集料含量(大于 4.75 mm 含量,以 $R_{4.75}$ 表示,后同)和 CBR 值的关系。CBR 值随 $R_{4.75}$

的增加逐渐增大,以致当 $R_{4.75}$ 为 55%~65% 时,弱风化石粒料的 CBR 值有最大值;当 $R_{4.75}$ 继续增加时,CBR 值会逐渐减小。研究认为,对于弱风化石粒料 CBR 值而言, $R_{4.75}$ 有一最佳含量。这是因为在粒料中,粗粒料部分主要起骨架作用,在开始阶段由于 $R_{4.75}$ 小的不足以形成骨架,粗粒料部分呈悬浮状态存在于细料(<4.75 mm 料)中,因而在相同的贯入量情况下,所施加的荷载要小,因此 CBR 值不大;随着 $R_{4.75}$ 逐渐增大,粗粒料之间的接触越来越多,粗颗粒形成骨架,同时细料填充骨架空隙,形成了嵌挤良好的骨架密实结构,在相同的贯入量情况下,所施加的荷载要大,因此 CBR 值逐渐变大;随着 $R_{4.75}$ 继续增大,虽然粗粒料之间的接触越来越多,但骨架的空隙没有足够的细料填充,粗颗粒之间的干涉也越来越显著,在相同的贯入量情况下,所施加的荷载又要变小,因而其 CBR 值又会变小。因此,作者认为,从有利于弱风化石 CBR 值角度考虑, $R_{4.75}$ 含量以 55%~65% 为宜。

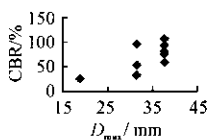


图 2 D_{\max} 与 CBR 值的关系

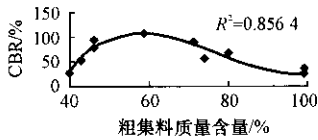


图 3 粗集料质量含量与 CBR 值的关系

3.3 粒料小于 0.60 mm 含量与 CBR 值的关系

图 4 为小于 0.60 mm 含量和 CBR 值关系。从图中可以看出,CBR 值随小于 0.60 mm 含量的增加,先增大后减小。当小于 0.60 mm 含量约为 12%~16% 时,CBR 值较大。

3.4 粒料小于 0.075 mm 含量与 CBR 值的关系

图 5 为弱风化石粒料中小于 0.075 mm 含量与 CBR 值的关系。由图中可以看出,级配碎石中小于 0.075 mm 含量对其 CBR 值有较大影响,就 CBR 而言,以小于 0.075 mm 含量 3%~5% 为宜。

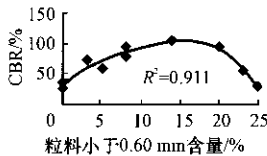


图 4 粒料小于 0.60 mm 含量与 CBR 值的关系

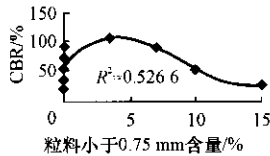


图 5 料料小于 0.075 mm 含量与 CBR 值的关系

3.5 最大粒径 D_{\max} 与 φ 值的关系

图 6 表示不同 D_{\max} 与 φ 值关系。由图中可以看出, D_{\max} 对抗剪强度指标 φ 值有很大影响, D_{\max} 大,集料剪切角增大,集料发生相互错动也就越困难,反映在宏观的抗剪强度上就是 φ 值变大。

3.6 $R_{4.75}$ 对 φ 值的影响

图 7 为 $R_{4.75}$ 与 φ 值的关系曲线。从图中可以看出,随着 $R_{4.75}$ 的增加, φ 值先增大,增大到一定程度,又随 $R_{4.75}$ 增加而减小。研究认为, $R_{4.75}$ 存在一个最佳含量,这是因为在粒料中, φ 值和粗颗粒之间的接触面积紧密相关,在开始阶段由于 $R_{4.75}$ 小不足以形成骨架,粗颗粒部分呈悬浮状态存在于细料(小于 4.75 mm)中,粗颗粒之间接触面积小,因而 φ 值不大;随着 $R_{4.75}$ 逐渐增大,粗颗粒之间的接触面积越来越大,粗颗粒克服彼此摩擦力发生位置移动的阻力增大,因而 φ 值逐渐增大;随着 $R_{4.75}$ 继续增大,虽然粗颗粒增多,但粗颗粒之间的接触面积又逐渐减小,因而其 φ 值又会变小。因此,本文认为,对于弱风化石粒料, $R_{4.75}$ 含量以 60%~80% 为宜。

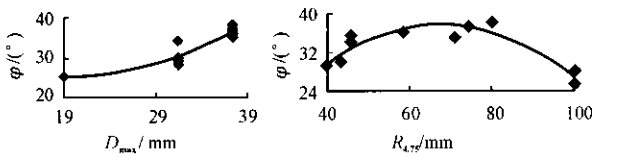


图 6 D_{\max} 与 φ 值的关系

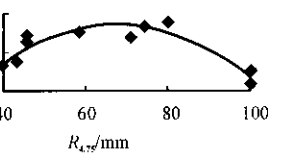


图 7 $R_{4.75}$ 与 φ 值的关系

3.7 小于 0.60 mm 含量与 φ 值的关系

图 8 为粒料小于 0.60 mm 含量与 φ 值的关系。从图中可以看出,CBR 值随粒料小于 0.60 mm 含量的增加,先增大后减小。当粒料小于 0.60 mm 含量约为 8%~14% 时, φ 值较大。

3.8 粒料小于 0.075 mm 含量与 φ 值的关系

图 9 为弱风化石粒料中小于 0.075 mm 含量与 φ 值关系。由图中可以看出,级配碎石中粒料小于 0.075 mm 含量对其 φ 值有影响,表现为随小于 0.075 mm 含量增大, φ 值有减小趋势。

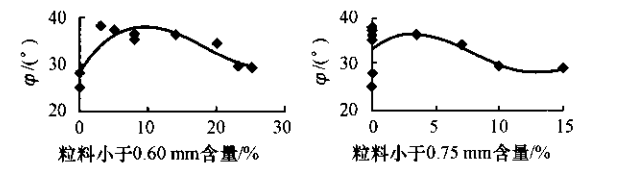


图 8 粒料小于 0.60 mm 含量与 φ 值的关系

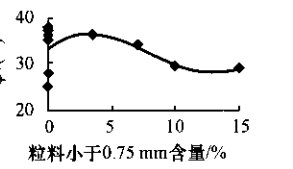


图 9 粒料小于 0.075 mm 含量与 φ 值的关系

4 颗粒组成和粒料性能的关联度分析

灰色关联分析方法,是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,亦即“灰色关联度”,作为衡量因素间关联程度的一种方法。灰色系统理论提出了对各子系统进行灰色关联度分析的概念,意图通过一定的方法,去寻求系统中各子系统(或因素)之间的数值关系。因此,灰色关联度分析对于一个系统发展变化态势提供了量化的度量,非常适合动态历程

分析^[5-6]。

4.1 颗粒组成与粒料变形性能的关联度分析

关联分析原始数据如表 4 所示,参考数列为 CBR 值,比较数列为弱风化石粒料的组成。

表 4 关联分析原始数据

CBR 值/%	粗集料	最大粒径	小于 0.60 mm	小于 0.075 mm
	质量含量/%	D_{\max} /mm	质量含量/%	质量含量/%
105	58.5	37.5	14	3.5
95	46.0	31.5	20	7.0
92	71.0	37.5	8	0
79	46.0	37.5	8	0
74	80.0	37.5	3	0
57	74.0	37.5	5	0
53	43.0	31.5	23	10.0
33	100.0	31.5	0	0
30	40.0	31.5	25	15.0
25	100.0	19.0	0	0

每个数列进行均值化处理,即用每个数列的平均值去除数列中的各个数据,均值化处理后产生新的数列(表略)。比较数列对参考数列的关联系数如表 5 所示。

表 5 比较数列与参考数列的关联系数

k	1	2	3	4
$\xi_1(k)$	0.725	0.798	0.868	0.753
$\xi_2(k)$	0.716	0.790	0.831	0.801
$\xi_3(k)$	0.852	0.872	0.744	0.575
$\xi_4(k)$	0.789	0.961	0.808	0.612
$\xi_5(k)$	0.979	1.000	0.692	0.628
$\xi_6(k)$	0.899	0.897	0.829	0.688
$\xi_7(k)$	0.928	0.950	0.590	0.491
$\xi_8(k)$	0.659	0.822	0.795	0.795
$\xi_9(k)$	0.942	0.806	0.504	0.337
$\xi_{10}(k)$	0.632	0.923	0.839	0.839

关联度为: $\gamma_1=0.812$ (粗集料含量对 CBR 值的关联度); $\gamma_2=0.882$ (最大粒径对 CBR 值的关联度); $\gamma_3=0.750$ (小于 0.60 mm 含量对 CBR 值的关联度); $\gamma_4=0.652$ (小于 0.075 mm 含量对 CBR 值的关联度)。

关联序列为 $\gamma_2 > \gamma_1 > \gamma_3 > \gamma_4$ 。

结果表明,CBR 值与粒料最大粒径、粗集料含量等因子关系最密切,与粒料小于 0.6 mm 含量较密切,与小于 0.075 mm 含量关系一般。因此,在考

虑提高粒料基层抗压密实变形能力时,应首先从改善粒料级配组成尤其是对最大粒径和粗集料含量的合理选择入手,以期使路面得到良好的抗变形能力。

4.2 颗粒组成与粒料强度性能的关联度分析

参考数列选用由直接剪切试验得出的 φ 值,用于表征粒料的强度特性;比较数列同上,见表 6。

表 6 关联分析原始数据(强度特性)

$\varphi/(^{\circ})$	粗集料 质量含量/%	最大粒径 D_{\max}/mm	小于 0.60 mm 质量含量/%	小于 0.075 mm 质量含量/%
36.17	58.5	37.5	14	3.5
34.14	46	31.5	20	7.0
36.29	71	37.5	8	0
35.23	46	37.5	8	0
38.06	80	37.5	3	0
37.23	74	37.5	5	0
29.64	43	31.5	23	10.0
28.15	100	31.5	0	0
29.16	40	31.5	25	15.0
25.13	100	19.0	0	0

同理可得:

粒料粗集料含量与粒料抗剪强度的关联度为: $\gamma_1 = 0.863$;粒料最大粒径与粒料抗剪强度的关联度为: $\gamma_2 = 0.966$;粒料小于 0.60 mm 含量与粒料抗剪强度的关联度为: $\gamma_3 = 0.705$;粒料小于 0.075 mm 含量与粒料抗剪强度的关联度为: $\gamma_4 = 0.613$ 。

关联序列为 $\gamma_2 > \gamma_1 > \gamma_3 > \gamma_4$ 。

结果表明, φ 值与粒料最大粒径、粗集料含量等因子关系最密切,与粒料小于 0.60 mm 含量较密切,与小于 0.075 mm 含量关系一般。因此,从提高粒料基层的抗剪切能力的角度来说,选择合理的最大粒径和粗集料含量,对改善和提高路面的抗剪切性能至关重要。

5 结 语

(1)试验结果表明,弱风化石粒料的 CBR 试验和剪切试验得出的规律相似,弱风化石粒料 CBR 值和抗剪强度 φ 值与最大粒径、粗集料含量、小于 0.60 mm 含量和小于 0.075 mm 含量有关。

(2)灰色关联分析表明,弱风化石粒料的结构强度与粒料的最大粒径、粗集料含量等因子关系最密切,与粒料小于 0.60 mm 含量关系密切,而与小于 0.075 mm 含量关系一般。这说明,在进行粒料级配选择时,应重点关注粒料最大粒径以及粗集料含

量这两个因素,同时注意控制 0.60 mm 和 0.075 mm 筛孔的通过百分率,这对于研究和改善粒料的结构性能具有重要的指导意义。

(3)为了使粒料获得较好的结构性能,粗集料含量宜为 60%~65%;而为了防止施工离析,不宜过分增大最大粒径,粒料最大粒径宜控制在 53 mm 以内,即集料公称最大粒径不宜超过 37.5 mm。

参考文献:

References:

[1] 徐鸥明. 牧区道路粒料基层材料特性研究[D]. 西安: 长安大学,2004.
XU Ou-ming. Study on the material property of pasturing area road gravel base[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.

[2] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社,1998.
GUO Qing-guo. Project characteristics and application of coarse-grained soil[M]. Zhengzhou: Water Conservancy Press of Yellow River, 1998.

[3] 马 龑,莫石秀,王秉纲. 基于剪切性能的级配碎石关键筛孔合理范围确定[J]. 交通运输工程学报,2005,5(4):27-31.
MA Biao, Mo Shi-xiu, WANG Bing-gang. Rational range determination of key sieve pores for graded crushed stone based on shear performance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 27-31.

[4] 郑南翔,吴传海. 二灰碎石力学性能影响因素的灰色理论分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(5):20-23.
ZHENG Nan-xiang, WU Chuan-hai. Mechanics performances for lime fly-ash broken stone mixture by gray theory[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(5): 20-23.

[5] 郑南翔,丛卓红. 黄土地区深路堑、高路堤合理横断面的评价方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(5):14-17.
ZHENG Nan-xiang, CONG Zhuo-hong. Grey system evaluation for deep cutting and high embankment reasonable transect at loess area[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(5): 14-17.

[6] 刘清泉. 路用石料的摩擦特性分析[J]. 中国公路学报,2004,17(3):16-19.
LIU Qing-quan. Analysis of tribological property of pavement stone[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 16-19.