

高聚物碎石混合料的细观分析

张佳敏 孙杨艳 华佳怡 王巧梅 翁裕琳

徐州工程学院 江苏徐州 221018

摘要: 高聚物碎石混合料作为一种新型桩体材料,既能克服散体桩适用范围小的缺点,又能解决水泥粉煤灰碎石桩养护时间长的问题,具有广阔的发展前景。本文以高聚物碎石混合料组成、结构和力学性能之间的联系为研究切入点,定量分析高聚物碎石混合料微观结构,构建高聚物细观力学模型,从细观角度分析高聚物的力学性能和破坏机理,基于高聚物碎石混合料数值模型探究其组分属性对力学性能的影响,指导工程应用。

关键词: 高聚物; 微观结构; 力学性能

Microscopic analysis of polymer crushed stone mixture

Zhang Jiamin, Sun Yang Yan, Hua Jia Yi, Wang Qiaomei, Weng Yulin

Xuzhou Engineering College, Xuzhou, Jiangsu 221018

Abstract: High polymer crushed stone mixture, as a new type of pile material, can not only overcome the disadvantage of small applicability of loose pile, but also solve the problem of long curing time of cement fly ash crushed stone pile, and has broad development prospects. This article takes the relationship between the composition, structure, and mechanical properties of high polymer crushed stone mixtures as the research entry point, quantitatively analyzes the microstructure of high polymer crushed stone mixtures, constructs a micro mechanical model of high polymer, analyzes the mechanical properties and failure mechanism of high polymer from a micro perspective, and explores the influence of component properties on mechanical properties based on the numerical model of high polymer crushed stone mixtures, guiding engineering applications.

Keywords: high polymer; Microstructure; mechanical property

1 研究背景及意义

在中国社会经济发展的过程中,水利的建立有着重大的历史意义,不但具有防汛固堤的功能,并且还可以实现农业灌溉、水力发电,直接影响着中国经济社会的生产发展与人民生活。为保证社会稳定发展,必须要确保水利工程的建设质量。而在水利工程建设过程中,地基处理的质量影响着整体工程的建设质量,也是水利工程建设的重要组成部分,所谓“基础不牢,地动山摇”。在这样的情况下,有必要进一步提升水利工程地基处理技术水平,以此保障水利工程的建设质量,促进水利工程建设实现效益最大化。

随着工程的飞速发展,地基处理方法也越来越多样,而复合地基则因充分利用了桩间地与桩共同利用的独特优点以及相对比较便宜的工程造价,而获得了日益普遍的使用。复合地基首先在建筑工程、交通工程中应用广泛,后在水利工程中得到应用。近些年来,在水利工程复合地基施工过程中,最常见的施工技术就是水泥粉煤灰碎石桩,其主要由水泥、煤炭粉以及碎石组成,具有独特的优势和特点,其中较为鲜明的一点是黏性好,能够有效提高地基的承载力。水泥粉煤灰碎石桩因其成本较低、效果较好等优点,受到施工单位的广泛关注和运用。但是由于水泥胶浆需要至少 28 天的养护期才能使桩体达到所需强度,这样势必会影响一些工期要求严格的工程进度。

非水反应类高聚物材料于 20 世纪 80 年代开始应用于工程领域。众多研究表明,此类高聚物材料具有以下特点:

- (1) 反应过程中不需要水参与,适应性好;
- (2) 具有较好的抗压和抗拉性能;
- (3) 成型较快,不需养护(15 分钟即可达到最终强度的 90%);
- (4) 材料具有自膨胀性(最高可达 25 倍),可实现对裂隙或空隙的填充和挤密。

因此,这种材料已被广泛应用于水利、土木、交通和采矿等领域。

域的地基处理、防渗修复等实际工程中。将高聚物材料用于改性其他工程材料,也取得了较为理想的结果。

2 高聚物碎石混合料力学性能的细观分析

2.1 实验材料

试验采用非水反应类双组份发泡聚氨酯作为高聚物材料。A 组份的主要成分为聚醚多元醇、化学发泡剂、表面活性剂和催化剂。B 组份的主要成分是异氰酸酯和阻燃剂。将 A 和 B 混合后,A 中的聚醚多元醇与 B 中的异氰酸酯反应生成具有良好结合能的氨基甲酸酯基团,A 中的发泡剂与异氰酸酯的异氰酸酯基团反应生成二氧化碳。其余成分主要调节凝胶和发泡反应之间的平衡,最终形成具有泡孔结构的高聚物。实验所用碎石为粒径为 16~31.5mm 的玄武岩。

考虑到实际工程强度等指标的要求,高聚物的密度设计为大于 $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ 。由于高聚物的微观形貌受到其密度的影响,为了较为全面地观察不同密度高聚物材料和高聚物碎石混合料中高聚物的微观形貌,试验设计了中密度(指高聚物密度范围为 $0.3\sim 0.6\text{g}/\text{cm}^3$)和高密度(指高聚物密度范围为 $0.6\sim 0.9\text{g}/\text{cm}^3$)的高聚物和高聚物碎石混合料试样。高聚物试样的密度分别为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 和 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ 。高聚物碎石混合料的基体高聚物密度分别为 0.5 和 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ 。

2.2 基体高聚物密度对高聚物碎石混合料轴压性能的影响

高聚物碎石混合料是由基体、碎石、界面组成的 3 相复合材料。基体高聚物是高聚物碎石混合料的基础组分,高聚物碎石混合料的抗压强度和弹性模量随着基体高聚物密度的变化而变化。因此,研究基体高聚物密度对于高聚物碎石混合料的影响具有重要意义。

2.2.1 对高聚物碎石混合料抗压强度的影响

课题组成员开展高聚物碎石混合料宏观力学轴心抗压试验的研究,试件尺寸和参数见表 1 高聚物碎石混合料试件尺寸和参数。

表 1 高聚物碎石混合料试件尺寸和参数

编号	高聚物密度 (g/cm^3)	试件高度 (mm)	试件直径 (g)	高聚物质量 (g)	碎石质量 (g)
1-1	0.33	299.5	151.3	800	7900
1-2	0.33	300	150	900	7150
2-1	0.35	298	151.5	850	7850
2-2	0.35	300.5	150	850	7900

3-1	0.38	300	150	950	7700
3-2	0.37	299.5	155	950	7600
4-1	0.44	299	150	1120	7650
4-2	0.45	301.5	150.5	1130	7700
5-1	0.55	299.5	153.3	1490	7750
5-2	0.57	297.5	151.1	1400	7900
6-1	0.67	300.5	150	1690	7650
6-2	0.68	297.5	152	1770	7700
7-1	0.72	300	150	1780	7800
7-2	0.73	298	151.4	1870	7750
8-1	0.83	300.5	150.5	2120	7700
8-2	0.86	299.5	149.6	2090	7800

注：试件中碎石的粒径为 16~31.5mm，含量约为 50%。

对高聚物碎石混合料轴心抗压试验数据进行处理，得到了不同基体高聚物密度下高聚物碎石混合料的弹性模量和抗压强度，结果如图 1 所示。采用最小二乘法分析高聚物碎石混合料的密度、抗压强度和弹性模量之间的关系，如式 (2.1) 所示。回归方程的 R² 均在 0.9 以上，拟合良好。因此，高聚物碎石混合料的抗压强度和弹性模量可以用密度的线性函数来表示。抗压强度可以用密度的线性函数来表征。

$$\begin{cases} f_{cu} = 41.8\rho - 8.9 \\ E = 4016\rho - 1082 \end{cases} \quad 0.30 \leq \rho \leq 0.90 \quad (2.1)$$

式中， f_{cu} 为高聚物碎石混合料的轴心抗压强度，MPa；E 为高聚物碎石混合料的弹性模量，MPa； ρ 为高聚物碎石混合料中基体高聚物的密度，g/cm³。

图 1 显示了抗压强度也与基体高聚物的密度呈线性关系，随着基体高聚物密度的增加，高聚物碎石混凝土的抗压强度大大提高。

2.2.2 基体高聚物密度对高聚物碎石混合料弹性模量的影响

采用细观数值模型模拟基体高聚物密度对高聚物碎石混合料弹性模量的影响，设置高聚物碎石混合料内碎石含量为 50%，碎石粒径为 16~31.5mm（截面碎石粒径为 0~28mm），试验设置分组情况及基体高聚物力学参数如表 2 所示，对尺寸为 $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的高聚物碎石混合料圆柱体试件截面进行轴压破坏数值模拟。

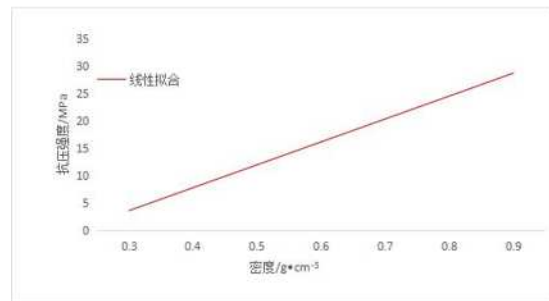


图 1 基体密度对高聚物碎石混合料抗压强度影响

表 2 高聚物碎石混合料试件分组与参数

编号	基体密度 (g/cm ³)	弹性模量 (MPa)	抗压强度 (MPa)	切线模量 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	破坏后弹性模量 (MPa)	泊松比
1	0.35	139.13	7.81	0.13913	4.98	0.13913	0.4
2	0.45	213.26	11.61	0.21326	7.96	0.21326	0.4
3	0.55	302.67	16.10	0.30267	11.62	0.30267	0.4
4	0.65	407.35	21.29	0.40735	15.96	0.40735	0.4
5	0.75	527.31	27.18	0.52731	21.00	0.52731	0.4
6	0.85	662.55	33.76	0.66255	26.72	0.66255	0.4

对模型试件施加位移荷载，细观数值模拟结果如表 3 所示，由式 (2.1) 计算的结果也列入表 3。可以看出，随着基体高聚物密度

的增加，高聚物碎石混合料的弹性模量大大提高，数值模拟计算结果与试验拟合结果较为接近。

表 3 不同密度下高聚物碎石混合料轴压模拟结果

编号	基体高聚物密度 (g/cm ³)	数值模拟弹性模量 (MPa)	宏观试验弹性模量 (MPa)	数值模拟抗压强度 (MPa)	宏观试验抗压强度 (MPa)
1	0.35	310.61	323.60	5.61	5.73
2	0.45	688.36	725.20	9.45	9.91
3	0.55	1074.16	1126.80	13.58	14.09
4	0.65	1457.62	1528.40	17.71	18.27
5	0.75	1847.59	1930.00	22.41	22.45
6	0.85	2220.85	2331.6	26.46	26.63

由表可知基体高聚物密度对高聚物碎石混合料试件弹性模量有着明显影响：当基体高聚物密度较小时，高聚物碎石混合料试件表现为韧性断裂，破坏时试件开裂部分仍连接在一起；当基体高聚物密度

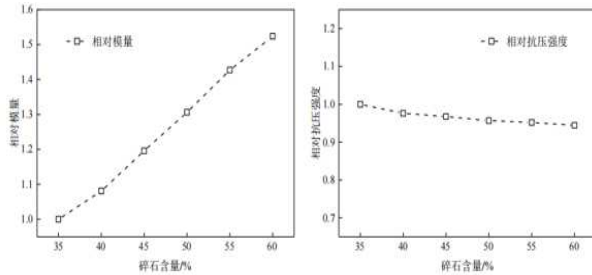
较大时，高聚物碎石混合料试件表现为脆性破坏，基体高聚物的强度提升，使其压缩破坏时应变能增加，碎石颗粒所受压力剧增，破坏时试件开裂部分易形成贯穿裂缝，出现碎石颗粒被劈裂现象。

2.3 碎石颗粒对高聚物碎石混合料轴压性能的影响

为探索碎石颗粒对高聚物碎石混合料轴压性能的影响,本实验从碎石颗粒的颗粒形状、碎石含量、碎石粒径三个因素对高聚物碎石混合料抗压强度和弹性模量的影响进行研究。

2.3.1 对高聚物碎石混合料抗压强度的影响

为探索高聚物碎石混合料抗压强度与颗粒形状的关系,模拟了颗粒形状分别为圆形、椭圆形和多边形的高聚物碎石混合料试件的抗压强度。对试验结果进行归一化处理得出结论:在其他条件不变的情况下,颗粒形状对高聚物碎石混合料抗压强度的影响较小,试件的破坏裂缝主要发生在界面过渡区,圆形颗粒更易形成贯穿裂缝,椭圆形颗粒次之,多边形界面具有一定的椭圆度和棱角,一定程度上阻止了裂缝的延伸。



(1) 弹性模量随碎石含量变化 (2) 抗压强度随碎石含量变化

图 2 轴压力学常数随碎石含量变化

为找出高聚物碎石混合料弹性模量和抗压强度与碎石含量的关系,模拟了碎石含量分别为 35%、40%、45%、50%、55%、60%的高聚物碎石混合料试件的抗压强度,对试验结果进行归一化处理,得出高聚物碎石混合料抗压强度随碎石含量增加的变化规律如图 2 所示。从图 2 中可以看出,碎石含量为 60%时,抗压强度降低了 6%。相同高聚物密度下,由于碎石含量一般在 50%左右,则制作高聚物碎石混合料所需的高聚物原材料为单独制作相同尺寸高聚物试件所需原材料的 50%,而两种试件的强度差异较小,故碎石

的加入能起到节省高聚物的作用。由于碎石具有较高的刚度和强度,当高聚物注浆材料用量相同时,掺入碎石的复合材料的承载力会显著提高。随着碎石含量的增加,抗压强度呈降低趋势,降低幅度迟缓,而碎石粒径对高聚物碎石混合料对其抗压强度几乎无影响。

2.3.2 对高聚物碎石混合料弹性模量的影响

为探索高聚物碎石混合料抗压强度与颗粒形状的关系,模拟了颗粒形状分别为圆形、椭圆形和多边形的高聚物碎石混合料试件的弹性模量,对试验结果进行归一化处理得出结论:碎石颗粒的加入会提高复合材料的弹性模量,对复合材料的强度影响较小,能节省约一半的高聚物材料。碎石含量的增加会提高高聚物碎石混合料的弹性模量,从而使抗压强度有略微下降,但对高聚物碎石混合料单轴压缩的最终破坏模式没有影响。

在其他条件相同的情况下,碎石粒径对高聚物碎石混合料弹性模量的影响较小,对高聚物碎石混合料抗压强度几乎没有影响,随着碎石粒径的增加,高聚物碎石混合料的弹性模量有所增加,增加量不足 8%。颗粒形状和碎石粒径对高聚物碎石混合料的力学性能影响较小。

随着碎石含量的增加,弹性模量呈近似线性趋势上升,如图 2 所示,碎石含量为 60%时,高聚物碎石混合料的弹性模量增加了 52%,试件的破坏裂缝主要发生在界面过渡区,碎石含量的增加,不影响高聚物碎石混合料的破坏模式,主裂缝的发展方向与试件高度方向平行或呈 45° 角,碎石含量增大到 60%时,试件裂缝含量较多,破坏程度较大。为找出高聚物碎石混合料弹性模量和抗压强度与碎石粒径的关系,模拟了截面碎石粒径分别为 4~22、10~28、16~34、22~40mm 的高聚物碎石混合料试件的弹性模量和抗压强度变化,试验分组情况及计算结果如表 4 所示可以看出,在其他条件相同的情况下,碎石粒径对高聚物碎石混合料弹性模量的影响不明显,对其抗压强度几乎无影响,随着碎石粒径的增加,高聚物碎石混合料的弹性模量增加量不足 8%。

表 4 碎石粒径对高聚物碎石混合料轴压模拟结果

编号	基体密度 (g/cm ³)	碎石含量 (%)	截面碎石粒径 (mm)	弹性模量模拟结果 (MPa)	相对模量	抗压强度模拟结果 (MPa)	相对抗压强度
1	0.5	50	4~22	861.94	1	10.69	1
2	0.5	50	10~28	889.07	1.03	10.47	0.98
3	0.5	50	16~34	916.57	1.06	10.52	0.98
4	0.5	50	22~40	929.21	1.08	10.43	0.98

3 结论

本章采用高聚物碎石混合料细观模型,对高聚物碎石混合料的弹性模量和抗压强度进行了数值模拟。结合已有的宏观试验结果,对高聚物碎石混合料的力学性能进行了多尺度分析,研究了基体高聚物密度、碎石颗粒形状、碎石含量及粒径等因素对高聚物碎石混合料弹性模量和抗压强度变化规律的影响,得出具体结论如下:

(1) 基体高聚物密度是影响高聚物碎石混合料弹性模量和抗压强度的一个重要因素。基体高聚物是高聚物碎石混合料的基本组成部分,高聚物碎石混合料的弹性模量和抗压强度均随材料中基体高聚物密度的增大而明显增加。基体高聚物密度对高聚物碎石混合料的破坏形态和主裂缝的发展位置有较大影响。

(2) 碎石颗粒的加入会提高复合材料的弹性模量,对复合材料的强度影响较小,能节省约一半的高聚物材料。碎石含量的增加会提高高聚物碎石混合料的弹性模量,从而使抗压强度有略微下降,但对高聚物碎石混合料单轴压缩的最终破坏模式没有影响。颗粒形状和碎石粒径对高聚物碎石混合料的力学性能影响较小。

参考文献:

[1]李迅.碎石增强高聚物复合材料的微观结构及力学性能[D].郑

州大学[2023-07-19].

[2]王娟,方宏远,余自森等.高聚物碎石混合料单轴受压性能试验研究[J].建筑材料学报,2019,22(02):320-326.

[3]石明生,李禄禄,夏洋洋等.高聚物布袋注浆桩成桩规律试验研究[J].长江科学院院报,2021,38(05):75-81.

作者简介:张佳敏(2002—)女,汉族,江苏启东人,本科在读,共青团员,研究方向:安全工程;

孙杨艳(2002—),女,汉族,江苏扬州人,本科在读,共青团员,研究方向:安全工程;

华佳怡(2002—),女,汉族,江苏无锡人,本科在读,共青团员,研究方向:工程造价;

王巧梅(2001—),女,汉族,江苏淮安人,本科在读,共青团员,研究方向:工程造价;

翁裕琳(2003—),女,汉族,江苏徐州人,本科在读,共青团员,研究方向:工程造价。

基金项目:江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(xcx2023276)