

混凝土密度和抗压强度预测模型的建立与应用

李天龙¹, 姜鹏霄^{2*}, 杨建宇³

(1. 琼海市建设工程质量安全监督站, 海南 琼海 571400; 2. 中国建筑第五工程局有限公司; 3. 长沙理工大学)

摘要:为了研究橡胶取代砂石对混凝土密度和抗压强度的影响,开展了不同橡胶取代比和不同水灰比下所得混凝土试样的密度和抗压强度试验。结果表明:橡胶混凝土的密度和抗压强度受橡胶含量和水灰比的影响;随橡胶含量的增加,混凝土的密度和抗压强度急剧降低。进一步根据试验结果建立混凝土的密度预测模型,得出当橡胶含量和水灰比在试验范围内时(橡胶含量为0~60%,水灰比为0.20~0.35),相关性系数 R^2 数值接近1,表明因变量(混凝土的密度)和自变量(橡胶含量和水灰比)之间存在很强的关联性,证明提出的模型能够准确预测所得混凝土的密度和抗压强度。

关键词:橡胶混凝土;水灰比;密度;抗压强度

1 前言

目前全球国家对轮胎需求日益增长,在这些轮胎达到使用寿命成为废物后,由于其不可降解性,将会造成严重的环境污染问题。研究表明:再生轮胎可作为混凝土和砂浆生产中细骨料的替代品进行再利用。由于橡胶集料的比重较低,所得混合物的比重会随橡胶含量的增加而降低。此外,由于橡胶颗粒是弹性变形的,且水泥浆体比橡胶颗粒硬,导致在加载过程中橡胶颗粒周围快速形成裂缝,使混凝土的抗压强度降低;也可能是由于橡胶颗粒与黏合膏体之间的黏合不坚固导致裂缝形成,致使混凝土的抗压强度降低。舒兴旺采用废旧橡胶代替砂石制备了高掺量(0~50%)废旧橡胶改性环氧树脂混凝土,发现混凝土的抗压强度随橡胶掺量的增加呈线性降低;薛刚等配制了水灰比为0.35、0.40、0.45,橡胶掺量为0、10%、20%、30%的橡胶混凝土,通过轴心抗压强度试验得出:随着橡胶掺量的增加,轴心抗压强度逐渐降低,强度损失逐渐增大;橡胶掺量相同时,水灰比越小,抗压强度越大;周金枝等研究了橡胶混凝土中橡胶颗粒占细骨料体积5%~40%条件下,不同橡胶颗粒目数与混凝土密度和抗压强度的关系,建立了密度折减系数和橡胶掺量之间的

线性拟合方程,可用于橡胶混凝土的密度和抗压强度的预测。

此外,混凝土的性能可通过调节水灰比来改善。亢景付等对3种水灰比(0.3、0.4、0.5)水泥净浆中掺入不同体积含量橡胶颗粒(10%、15%、20%、30%、50%)后的开裂敏感性进行了对比分析,结果表明:在水泥净浆中掺入橡胶颗粒可以显著延缓试件的开裂时间,延缓时间随橡胶颗粒掺量的增加和水灰比的增大而延长;宋慧等指出水灰比对混凝土硬化性能的影响,发现随着水灰比从0.6增加到0.8,抗压强度降低了32%~40%;胡冉等的研究表明:水分过量会使微观毛细空隙增加。尽管降低含水量会导致水泥颗粒紧密堆积,但由于润滑性和流动性降低,可能会增加排出空隙的难度;陈代果等针对不同水灰比对混凝土的性能进行试验,结果表明随水灰比的增大,混凝土的抗压强度先增大后减小,水灰比为0.31时混凝土的抗压强度最大,当水灰比大于0.31时,由于水泥浆体流动性过大,使得在试件成型过程中,浆体在重力作用下向下层流动,堵塞下部孔隙,而上部粗骨料水泥浆体包裹过薄,导致抗压强度降低。

橡胶混凝土的密度和抗压强度取决于橡胶骨料的相对用量和所用的水灰比。因此,该文的目的是基于试验测试结果建立模型,以预测一定橡胶含量和水灰

收稿日期:2021-02-19(修改稿)

基金项目:湖南省工程实验室桥梁结构安全控制项目(编号:19KD01)

作者简介:李天龙,男,硕士,高级工程师。

*通信作者:姜鹏霄,男,博士。

比范围内所得混凝土的密度和抗压强度。

2 试验部分

2.1 原料

研究中,用于制备橡胶混凝土的材料包括普通硅酸盐水泥、砂石、采矿粉、碎石、橡胶和水。使用的普通硅酸盐水泥的化学组成如表 1 所示。

砂石铺开在阳光下以去除水分。砂石、矿粉、碎石和橡胶的物理性质如表 2 所示。

表 1 普通硅酸盐水泥的化学组成 %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI
18.63	5.26	3.21	62.96	1.93	0.38	0.36	4.02	3.25

表 2 砂石、矿粉、碎石和橡胶的物理性质

材料	相对密度	压实密度/ (kg·m ⁻³)	颗粒密度/ (g·cm ⁻³)	细度模数	含水率/ %
砂石	2.61	1 716	2.61	2.51	2.04
矿粉	2.73	1 723	2.67	3.02	1.65
碎石	2.78	1 754	2.72	2.01	1.28
橡胶	1.23	475	0.87	1.27	

2.2.2 试样制备

对砂石、水泥、矿粉和橡胶进行称重后用瓦刀混合

2.2 方法

2.2.1 配合比

选用普通混凝土作为对照,记为 Pj ,其中 P 表示普通混凝土, j 表示水灰比;掺杂了橡胶的混凝土记为 Ri/j ,其中 R 表示掺杂了橡胶的混凝土, i 为橡胶占砂石的重量百分比, j 为水灰比。试验的不同混合比如表 3 所示,每批生产 6 个样品,取样品试验的平均值作为试验结果。橡胶占砂石的重量百分比分别为 0%、10%、20%、30%、40%、50%和 60%。

均匀,再加入碎石并搅拌 10 min,然后加入水搅拌至混合均匀。用长 200 mm、宽 100 mm、深 60 mm 的钢模进行模具设计。将混合物倒入涂油的模具中,用锤子和木杆手动压实,然后将得到的混凝土块从钢模中移除。将混凝土用湿棉袋包裹,每天浇水 2 次,以防止混凝土中的水过度蒸发,养护 28 d 后开始试验。

2.2.3 密度测试

混凝土的密度根据重量除以体积计算:

密度(kg/m³)=质量(kg)/体积(m³) (1)

表 3 混凝土配合比

编号	配合比/(kg·m ⁻³)						编号	配合比/(kg·m ⁻³)					
	水泥	矿粉	砂石	碎石	橡胶	水		水泥	矿粉	砂石	碎石	橡胶	水
P0.20	5	10	11.25	5	0	1.00	R30/0.30	5	10	6.60	5	1.98	1.50
P0.25	5	10	11.25	5	0	1.25	R30/0.35	5	10	6.60	5	1.98	1.75
P0.30	5	10	11.25	5	0	1.50	R40/0.20	5	10	5.90	5	2.36	1.00
P0.35	5	10	11.25	5	0	1.75	R40/0.25	5	10	5.90	5	2.36	1.25
R10/0.20	5	10	9.20	5	0.92	1.00	R40/0.30	5	10	5.90	5	2.36	1.50
R10/0.25	5	10	9.20	5	0.92	1.25	R40/0.35	5	10	5.90	5	2.36	1.75
R10/0.30	5	10	9.20	5	0.92	1.50	R50/0.20	5	10	5.10	5	2.55	1.00
R10/0.35	5	10	9.20	5	0.92	1.75	R50/0.25	5	10	5.10	5	2.55	1.25
R20/0.20	5	10	8.10	5	1.62	1.00	R50/0.30	5	10	5.10	5	2.55	1.50
R20/0.25	5	10	8.10	5	1.62	1.25	R50/0.35	5	10	5.10	5	2.55	1.75
R20/0.30	5	10	8.10	5	1.62	1.50	R60/0.20	5	10	4.20	5	2.52	1.00
R20/0.35	5	10	8.10	5	1.62	1.75	R60/0.25	5	10	4.20	5	2.52	1.25
R30/0.20	5	10	6.60	5	1.98	1.00	R60/0.30	5	10	4.20	5	2.52	1.50
R30/0.25	5	10	6.60	5	1.98	1.25	R60/0.35	5	10	4.20	5	2.52	1.75

2.2.4 抗压强度测试

对混凝土采取轴向压缩,直到观察到混凝土试样出现破坏,根据式(2)计算混凝土的抗压强度:

抗压强度(N/mm²)=破坏载荷(N)/承压面积(mm²) (2)

3 结果与讨论

试验所得混凝土的密度和抗压强度分别如图 1、2 所示。

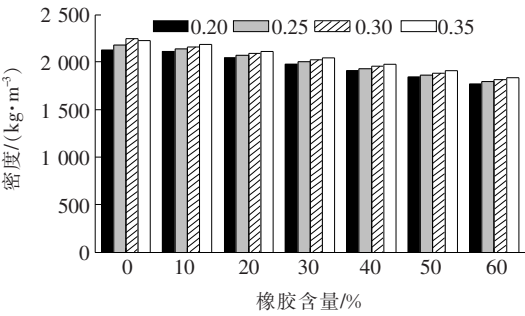


图 1 不同橡胶含量混凝土在不同水灰比下的密度

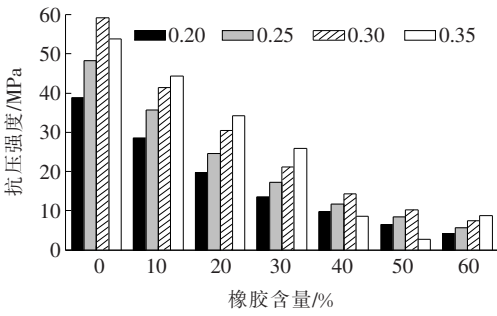


图 2 不同橡胶含量混凝土在不同水灰比下的抗压强度

由图 1、2 可以看出:① 随着橡胶含量的增加,混凝土的密度降低。无论所用的水灰比是多少,用橡胶代替砂石达 60%时,混凝土的密度约有 18%的降低,这可能是由于橡胶的密度比砂石低造成的;② 橡胶混凝土的抗压强度随着橡胶含量的增加而降低,当用橡胶代替 60%的砂石时,所得混凝土的抗压强度降低了约 87%,与所用的水灰比无关;③ 橡胶混凝土密度和抗压强度会随水灰比的不同而不同。

3.1 橡胶混凝土性能预测模型建立

采用多元回归分析建立预测模型,多元回归分析是目前应用最广泛的分析多个自变量和单个因变量之间关系的技术。因此,多元回归分析提供了一个或多个自变量($X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$)的变化导致因变量 Y 改变的方法,并且可以分析每个自变量的变化对因变

量变化影响程度的大小。根据经典线性回归模型,因变量 Y_p 与自变量 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ 之间的关系定义为: $Y_p = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon$;其中 α 为 Y 轴上的常数, $\beta_1 \sim \beta_k$ 为相关系数, $X_1 \sim X_k$ 为自变量, ϵ 为误差项。在此次试验中,水灰比和橡胶含量为自变量,因变量为所得混凝土的密度或抗压强度。

3.2 橡胶混凝土的密度预测

采用输入选择技术进行分析,即多元回归的默认分析方法,也被称为直接回归或同时回归。在这个分析方法中,所有的自变量都是同时测试的。试验回归分析结果的模型精度如表 4 所示,其中 R^2 的值接近于 1,表明因变量(混凝土的密度)和自变量(橡胶含量和水灰比)之间存在很强的关联性。

表 4 回归分析的模型精度

R	R^2	ϵ
0.996	0.992	12.921 31

随后,利用 R^2 和方差分析得到统计报告($F_{2,25} = 1\ 550, P < 0.001$),如表 5 所示,其中 P 值评估模型的总体显著性,当 $P < 0.001$ 时,说明该模型具有显著性。该模型表明,混凝土密度变化可以用橡胶含量和水灰比两个变量来解释。表 6 为回归方程中所有自变量的系数。

表 5 方差分析显示回归模型的显著性

项目	平方和	df	均方	F 值	P
回归值	516 891.726	2	258 454.953	1 550	0.000
残差值	4 191.019	25	166.632		
总和	521 082.745	27			

表 6 中的非标准化回归系数,给出了回归方程中所有自变量的系数,可以得到以下预测橡胶混凝土密度的模型:

混凝土的密度=2 071.821+498.134×水灰比-6.637×橡胶含量($R^2=0.992$) (3)

3.3 橡胶混凝土的抗压强度预测

结合 R^2 和方差分析可得到表 7 所示的常规统计报告($F_{2,25} = 1\ 580, P < 0.001$),同理,当 $P < 0.001$ 时,说明该模型具有显著性。该模型表明,混凝土的抗压强度变化可以用两个自变量来解释。表 8 中的非标准化系数给出了回归方程中所有自变量的系数。可以得到预测橡胶混凝土抗压强度的以下模型:

抗压强度=2.928+3.826×水灰比-0.036×橡胶含量($R^2=0.992$) (4)

表 6 回归方程中自变量的系数

项目	非标准化回归系数		标准化 系数 β	t	P
	系数	标准误差			
常数	2 071.821	12.775		162.068	0.000
水灰比	498.134	43.653	0.206	11.422	0.000
橡胶含量	-6.637	0.132	-0.977	-54.500	0.000

表 7 方差分析显示回归模型的显著性

项目	平方和	df	均方	F 值	P
回归值	14.575	2	7.292	1 580	0.000
残差值	0.147	25	0.005		

表 8 回归方程中自变量的系数

项目	非标准化回归系数		标准化 系数 β	t	P
	系数	标准误差			
常数	2.928	0.068		43.104	0.000
水灰比	3.826	0.231	0.296	16.748	0.000
橡胶含量	-0.036	0.001	-0.951	-53.804	0.000

4 结 论

(1) 橡胶混凝土的密度和抗压强度受橡胶含量和水灰比的影响。当橡胶含量增加时,混凝土的密度和抗压强度发生系统性降低。

(2) 在给定水灰比和橡胶含量的情况下,建立了混凝土的密度和抗压强度预测模型。当橡胶含量和水灰比在试验范围内时(橡胶为 0~60%,水灰比为 0.20~0.35),提出的模型能够预测混凝土的密度和抗压强度。

参考文献:

[1] 郝光普,曹海莹.循环荷载作用下基层再生材料的永久变形研究[J].中外公路,2020(6).

[2] 黄鹤,秦攀,黄汉义.新型桥墩模型在钢筋混凝土桥梁结构中的应用研究[J].中外公路,2020(3).

[3] 丁杨,周双喜,王中平,等.多场耦合循环作用下屋面保温材料耐候性能[J].建筑材料学报,2019(4).

[4] 申力涛.环氧树脂橡胶铺装材料路用性能研究[J].中外公路,2017(5).

[5] 韩青松.胶粉预处理方式对橡胶混凝土韧性的影响及作

用机理研究[J].中外公路,2017(1).

[6] 舒兴旺.高掺量废旧橡胶改性环氧树脂混凝土力学性能与路用性能[J].北京工业大学学报,2018(10).

[7] 薛刚,孙立所,许胜,等.橡胶混凝土抗压性能及细观破坏机理研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020(6).

[8] 周金枝,陈玉良,戴杰.橡胶混凝土密度与抗压强度关系的试验研究[J].人民黄河,2016(1).

[9] 秦浩,刘磊,安华明,等.基于不同强度等级混凝土的动力学特性研究[J].中国安全生产科学技术,2019(12).

[10] 孙晓静,冯红喜.橡胶混凝土整体道床减振性能分析[J].土木工程学报,2017(S1).

[11] 快忠,张明,连亚明.石粉对低强度自密实混凝土抗氯离子渗透和微观结构的影响[J].商品混凝土,2016(3).

[12] 亢景付,任海波,张平祖.橡胶混凝土的抗裂性能和弯曲变形性能[J].复合材料学报,2006(6).

[13] 宋慧,徐多,向君正,等.骨料及水灰比对透水混凝土性能的影响[J].水利水电技术,2019(9).

[14] 胡冉,陈益峰,万嘉敏,等.超临界 CO₂-水两相流与 CO₂毛细捕获:微观孔隙模型实验与数值模拟研究[J].力学学报,2017(3).

[15] 陈代果,付东山.水灰比、孔隙率对透水混凝土性能的影响[J].西南科技大学学报,2017(4).

[16] 胡艳丽,高培伟,李富荣,等.不同取代率的橡胶混凝土力学性能试验研究[J].建筑材料学报,2020(1).

[17] 许开成,毕丽苹,陈梦成.基于 SPSS 回归分析的锂渣混凝土抗压强度预测模型[J].建筑科学与工程学报,2017(1).

[18] 王超,李岳峰,张成良.基于不同指标无量纲化方法的岩爆预测模型优选[J].中国安全生产科学技术,2020(2).

[19] 傅鹤林,张加兵,黄震,等.冻融循环作用下板岩弹性参数及单轴抗压强度研究[J].岩土力学,2017(8).

[20] 江守燕,赵林鑫,杜成斌,等.基于多元线性回归的渡槽变形预测模型研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2020(2).