

橡胶混凝土物理力学性能研究

杨若冲¹ 谈至明² 施钟毅³ 黄晓明¹

1. 东南大学, 交通学院, 南京 210096

2. 同济大学, 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804

3. 上海市建筑科学研究院, 上海 200032

摘要:为研究橡胶颗粒对普通混凝土性能的变化趋势, 论文分析了不同橡胶颗粒掺量的混凝土路用性能。通过密度、抗折强度、抗压强度及劈裂强度试验, 研究掺橡胶颗粒的混凝土基本力学性能及物性的变化规律; 采用噪声仪研究了橡胶混凝土的减振降噪效果。研究表明: 随着橡胶颗粒掺量的增加, 橡胶混凝土的密度、抗折、抗压及劈裂强度、压折比及噪声水平逐渐降低; 抗折及劈裂强度降低速率明显慢于抗压强度; 橡胶混凝土力学性能随龄期的增长率比素混凝土的要慢; 总体上说, 5~8目橡胶颗粒掺入混凝土中的效果稍优于12~16目的。

关键词: 道路工程; 橡胶混凝土; 物理力学特性; 减振降噪

中图分类号: TU528.09

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2011)04-0034-07

Study on the Physical and Mechanical Performance of Rubber Concrete

YANG Ruo-chong¹ TAN Zhi-ming² SHI Zhong-yi³ HUANG Xiao-ming¹

1. Transportation College, Southeast University,
Nanjing 210096, China

2. Key Laboratory for Road and Traffic Engineering of the Ministry
of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China

3. Shanghai Research Institute of Building Sciences,
Shanghai 200032, China

Abstract: In order to study the change trends of plain concrete performance incorporated

收稿日期: 2010-09-03.

作者简介: 杨若冲(1977-), 男, 汉族, 广东潮州人, 东南大学博士后, 研究方向: 道路材料及结构分析。

with rubber particles, the performance of ordinary concrete with different rubber particles of volume fraction were analyzed. Through the tests of density, the flexural strength, compressive strength, indirect tensile strength, variation law of the basic mechanical propriety and physical characteristics of rubberized concrete were studied. The effect of vibration and noise reduction of the rubber concrete were studied by the acoustic meter. The results indicated that with the rubber particle volume fraction augmentation the density, flexural strength, compressive strength, indirect tensile strength and compressive flexural strength ratio of the rubber concrete decreased and the noise level of the rubberized concrete gradually reduced. However, the reduction extent of flexural strength and indirect tensile strength for the rubber concrete were less than that of the compressive strength. Growth of the mechanical strength by time of the rubber concrete was slower than that of plain concrete. Generally, the properties of the rubber concrete with rubber particles of 5~8 meshes were slight better than those with rubber particles of 12~16 meshes of the same volume amount.

Key words: Road engineering, rubber concrete, properties of physical and Mechanical, vibration and noise Reduction

0 前言

废旧橡胶轮胎的处理及再利用是当前废物利用的研究热点,将废橡胶颗粒掺入水泥混凝土中是废物重新利用的有效方式之一。橡胶的掺入有助于提高混凝土的韧性、减振降噪及抗冲击性能。日前,国内对橡胶混凝土路面使用性能的研究相关报道很少,少数国家修建了橡胶混凝土试验段。其中,西班牙学者^[1]研究了0%、2.5%、5%细集料体积掺量的橡胶混凝土小梁疲劳实验,提出了基于威斯卡特解的解析模型,得到不同交通条件下橡胶混凝土路面厚度设计值诺谟图。显然,该研究采用的橡胶掺量是较少的,不利于废橡胶的再利用。目前国内外的研究主要集中在力学性能及工作性上,一般认为橡胶的掺加将导致混凝土抗压强度及抗折强度迅速下降,而混凝土的抗冻性存在最佳掺量^[2-4]。F.Hernandez-Olivares及Tantala等研究了橡胶混凝土的韧性,结果表明掺加橡胶颗粒后,混凝土的韧性明显提高^[5]。Taha等研究了橡胶混凝土的断裂行为,结果表明通过设计后可得较高强度及断裂韧性的橡胶混凝土^[6]。对于橡胶混凝土的工作性,有关研究^[7-8]表明随橡胶掺量的增加,混凝土坍落度逐渐下降。因此,保证新拌混凝土具有合适的坍落度是橡胶混凝土应用于路面工程的先决条件之一。

目前,尚未有对橡胶混凝土在道路工程的物理力学特性进行系统研究。本文针对这一现状,研究橡胶颗粒替代集料后混凝土的各项力学性能、密度及工作性的变化规律;分析橡胶混凝土的减振降噪机理,对不同橡胶掺量的混凝土降噪效果进行了试验研究。

1 橡胶混凝土力学性能

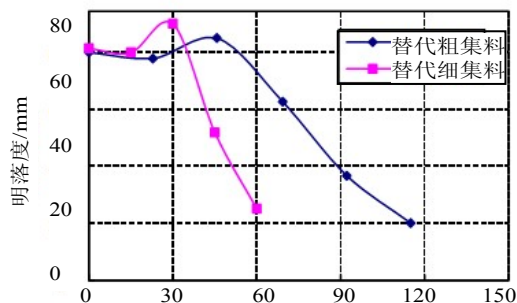
1.1 橡胶掺量的影响

为分析5~8目橡胶颗粒适用于作为混凝土的粗集料还是细集料使用,在试验研究中,尽管橡胶颗粒的粒径一定,但以等体积为替换指标,将橡胶颗粒采用等体积替代细集料或粗集料的方式掺入混凝土中,考察橡胶混凝土的工作性、密度及各项力学性能变化规律(12~16目橡胶的混凝土性能变化趋势与5~8目的一致,未列出)。

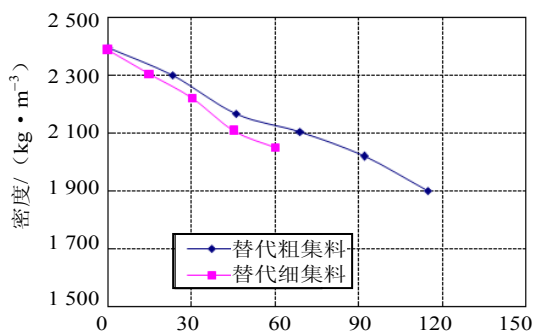
需注意的是,采用上述方式替换集料将改变素混凝土最优级配线,但因橡胶颗粒与集料的表面特性存在明显差异,如橡胶颗粒表面更为粗糙,因而需水量较集料为大;另一方面,有研究表明橡胶颗粒的吸水性明显大于集料^[9],说明将橡胶颗粒完全等同于相同粒径的集料时,橡胶混凝土级配系统中新的变量将大于一个;因此,固定的级配线仍可能不是最优性能的

橡胶混凝土级配。本文仅从废旧橡胶的环保利用角度分析橡胶掺量改变后混凝土性能的变化趋势。

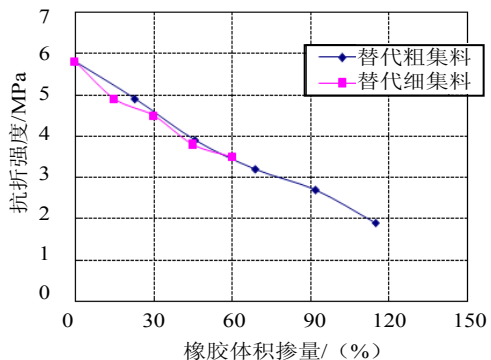
采用等体积替代细集料的橡胶掺量分别为 0%、15%、30%、45%、60%，而替代粗集料的掺量分别为 0%、10%、20%、30%、40%及 50%；为便于在同一图中表示，将其换算为替代细集料的体积分别为 0%、22%、44%、69%、92%、115%。混凝土配合比为水泥：细集料：粗集料：水 = 1：1.382：3.228：0.44， $C = 400 \text{ kg/m}^3$ ，橡胶颗粒在此基础上等体积替换细集料或粗集料。具体的试验结果见图 1。



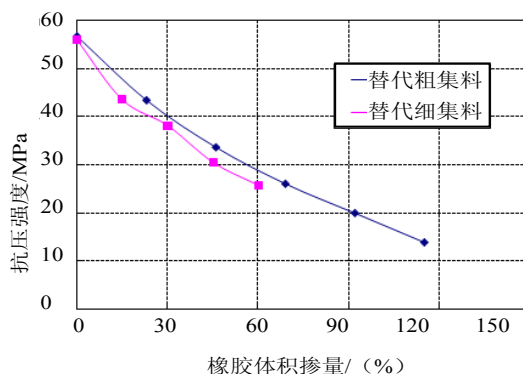
(a) 坍落度



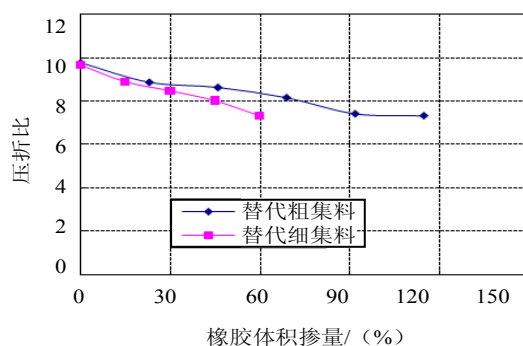
(b) 密度



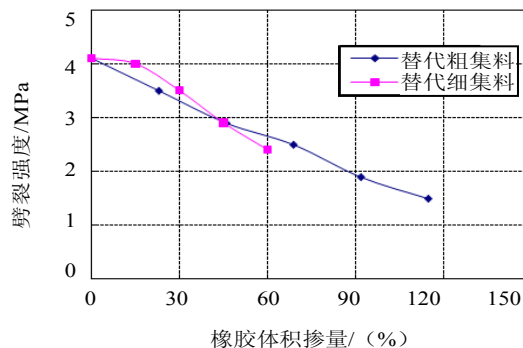
(c) 抗折强度



(d) 抗压强度



(e) 压折比



(f) 劈裂强度

图 1 力学性能及物理特性的变化规律

Fig.1 Variation of mechanical properties and physical characteristics

由图 1 可知：

1) 随橡胶掺量的增加，橡胶混凝土的密度、抗折、抗压、劈裂强度及压折比逐渐降低；当橡胶掺量为细集料的 60%及粗集料的 50%时，混凝土抗折、抗压、劈裂强度分别为素混凝土的 60.3%及 45.8%、24.5%、58.5%及 36.6%；说明抗折及劈裂强度下降速率明显慢于抗压强度，橡胶混凝土对抗压

强度指标最为敏感。

2) 随橡胶掺量的增加, 橡胶混凝土的坍落度与素混凝土基本相同, 而后略有增大, 最后逐渐减少, 与有关文献^[6]的研究结论基本一致。

3) 总体上橡胶颗粒作为粗集料比细集料具有稍好的力学性能, 而施工和易性也更佳。就力学性能而言, 级配变化对橡胶混凝土力学性能影响较小。

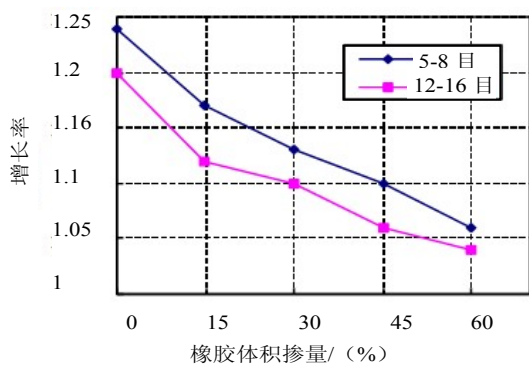
1.2 龄期的影响

考察不同龄期 (28 d 龄期与 7 d 龄期比较)、不同橡胶粒径、不同橡胶掺量对橡胶混凝土性能的影响。试验选用的橡胶粒径为 5~8 目及 12~16 目, 试验用的橡胶掺量分别为细集料的 15%、30%、45% 及 60%, 具体的配合比同前述, 试验结果见图 2。

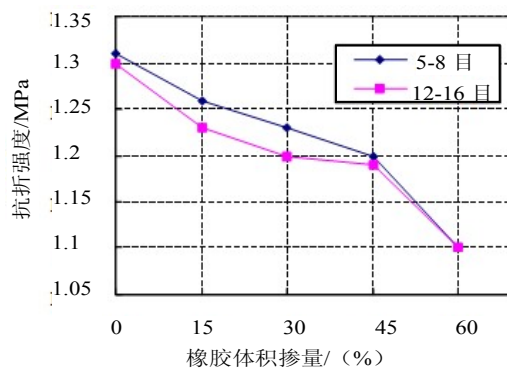
由图 2 可知:

1) 比较 5~8 目及 12~16 目两种粒径的橡胶颗粒, 相同掺量条件下, 除压折比指标外, 5~8 目的橡胶混凝土抗折强度、抗压强度及劈裂强度随龄期的增长率优于 12~16 目的橡胶混凝土; 而相同橡胶掺量的混凝土密度差别不大。

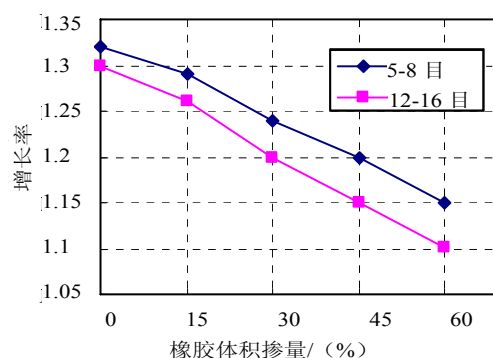
2) 素混凝土的 28 d 龄期较 7 d 龄期抗折强度增长了约 25%。当橡胶掺量为细集料 60% 时, 28 d 龄期较 7 d 的仅增长了约 5.0%; 一定程度地说明由于橡胶的存在, 混凝土内部存在较多的缺陷, 减缓了混凝土强度的增长。素混凝土的 28 d 龄期较 7 d 龄期的抗压强度增长了约 32%, 而不同橡胶掺量的混凝土抗压强度极劈裂强度增长速度小于素混凝土, 当橡胶掺量为细集料 60% 时, 28 d 龄期较 7 d 的仅增长了约 10.0%, 且随橡胶掺量的增加而不断减少; 劈裂强度指标也有相似的变化趋势。



(a) 抗折强度



(b) 抗压强度



(c) 劈裂强度

图 2 基本力学性能随龄期的变化规律

Fig. 2 Variation of the basic mechanical properties by time

2 降噪特性分析

2.1 降噪机理

从宏观的角度看, 首先, 橡胶混凝土较普通混凝土减弱了结构振动的强度。其次, 橡胶混凝土缩短了结构被激振后的振动时间, 也降低了因振动而辐射噪声的能量, 从而达到控制噪声的目的。从微观的角度看, 其本质是因为橡胶弹性模量明显小于水泥石及集料的弹性模量。当橡胶混凝土承受一定的应力时, 橡胶与水泥石及集料将产生相对应变, 由此作用于橡胶混凝土的一部分能量将耗散为热能^[10]; 另一方面, 作为粘弹性材料的废旧橡胶颗粒, 在应力的作用下, 其本身将消耗一部分“轮胎/路面”系统的能量, 因而系统产生的声波能量将较普通混凝土的为小。可将橡胶混凝土的降噪效果通过其阻尼大小来表达。

为从数学上描述车辆荷载作用于橡胶混凝土路面的阻尼振动特性，将“轮胎/路面”系统的振动简化为图3所示的模型。该振动模型的振动方程可表达为^[10]：

$$M \frac{d^2y}{dx^2} + c \frac{dy}{dx} + ky = 0 \quad (1)$$

式中， M 为“轮胎/路面”系统的振动质量； k 为“轮胎/路面”系统的刚度； c 为系统的阻尼系数； y 、 $\frac{dy}{dx}$ 、 $\frac{d^2y}{dx^2}$ 分别为系统振动的位移、速度和加速度。

根据系统阻尼的强弱，将振动分为欠阻尼振动、临界阻尼振动、过阻尼振动。轮胎/路面系统一般属于欠阻尼振动，即满足条件： $\omega_0 > \varepsilon$ ， ε 为衰减系数， $\varepsilon = \frac{c}{M}$ 。其解为：

$$y = Ae^{-\varepsilon t} \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (2)$$

式中， ω_0 为有阻尼衰减振动时的系统固有圆频率，与系统自身性质有关； A 为系统振动的振幅， ϕ 为振动的初相位角， A 与 ϕ 取决于系统初始条件； $Ae^{-\varepsilon t}$ 为系统衰减的振幅。

由式(2)可看出，随着系统的振动，系统振动的振幅、加速度、速度的绝对值不断减小，阻尼越大（ ε 或者 c 大），即橡胶掺量越大，振动衰减越快；从而，橡胶混凝土路面的减振降噪效果越好。

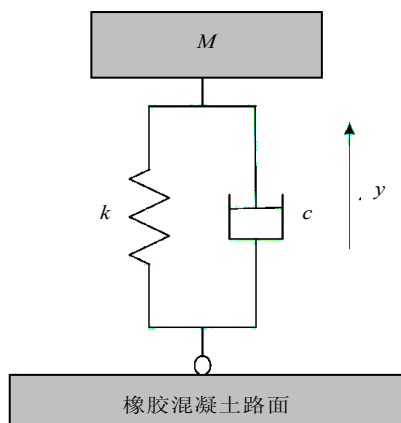


图3 轮胎/路面系统的振动模型

Fig. 3 Vibration model of the tyre/pavement system

2.2 降噪试验分析

2.2.1 试验方法设计

根据不同的降噪机理，目前，国内外对路面降噪特性主要采用驻波管法测定吸声系数及阻尼减振试验测定路面材料的阻尼比等指标进行分析。上述试验方法中，采用驻波管法测定吸声系数评价多孔材料的降噪特性，因指标敏感性等原因，较少用于减振降噪型混凝土的降噪特性分析^[11]。路面材料阻尼减振试验主要测定试件的阻尼特性，该指标与材料在实际条件下噪声水平变化的敏感性并无必然联系（如掺加阻尼材料后，混凝土阻尼比线性变化；并不意味着混凝土试件噪声值呈现线性变化的趋势）。基于此及试验条件的限制，根据前述橡胶混凝土路面的降噪机理，本文直接采用噪声水平作为评价指标进行降噪效果的评价。

由于橡胶混凝土的降噪机理主要在于降低轮胎冲击路面后的振动，本次试验采用橡胶球撞击法，该试验的示意图见图4。试验时，采用橡胶球自混凝土试件上方一定距离自由下落，噪声仪距试件一定距离则可测定橡胶混凝土的噪声水平。

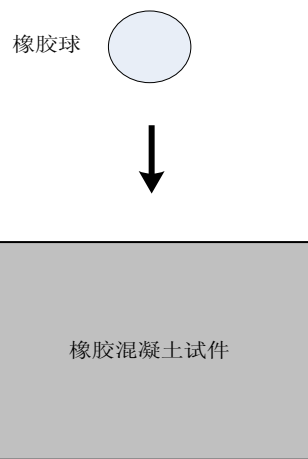


图4 橡胶球撞击法

Fig. 4 Impaction method of rubber ball

2.2.2 降噪效果试验分析

为分析不同距离及橡胶颗粒掺量对试验结果的影响，选取三种不同的测试距离进行分析，分别为0.15 m、3.5 m及8.0 m。橡胶球下落高度为1.0 m。

试验采用的混凝土配合比及橡胶颗粒掺量及掺加方式均与节 1.1 相同, 仅增加了 12~16 目的橡胶颗粒与 5~8 目橡胶颗粒进行比较。具体试验结果见图 5。

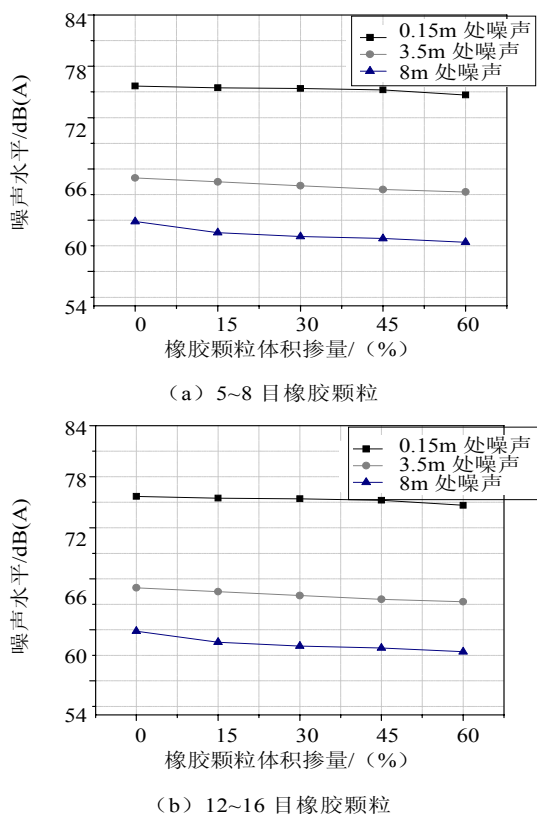


图 5 不同测试距离的噪声试验结果

Fig. 5 The experiment results of the noise levels at different testing distances

由图 5 可知:

1) 掺 5~8 目橡胶颗粒的混凝土与掺 12~16 目橡胶颗粒的混凝土相比, 两者的噪声变化规律一致, 但前者降噪性能稍优于后者。对于不同的测试距离, 均

随橡胶掺量的增加噪声水平呈现小幅降低; 当橡胶掺量为细集料的 15% 及 60% 时, 橡胶混凝土噪声水平较素混凝土约分别低 0.34 dB(A) 及 1.6dB(A)。

2) 对于三种不同的测试距离, 随橡胶掺量的增加, 橡胶混凝土降噪水平均逐步降低, 且距离越远降噪效果稍优。当测试距离为 0.15 m 时, 相同体积掺量的橡胶混凝土噪声水平分别比 3.5 m 及 8 m 测试距离处的噪声水平高出约 9.7 dB(A) 及 15.8 dB(A)。

3 结 论

橡胶混凝土具有良好的韧性及降噪效果, 但抗折及抗压强度下降较为明显。它较适用于作为对水泥混凝土有一定韧性要求的场合, 如作为混凝土铺面的功能层。具体结论如下:

1) 随橡胶掺量的增加, 橡胶混凝土的密度、抗折、抗压及劈裂强度及压折比逐渐降低; 抗折强度及劈裂强度降低速率明显慢于抗压强度, 而抗压强度降低速度最快。5~8 目橡胶作为粗集料比细集料具有稍好的力学性能, 而施工和易性也更佳。

2) 不同橡胶掺量的混凝土抗折强度增长速度小于素混凝土的; 相同橡胶掺量条件下, 除压折比指标外, 5~8 目的橡胶混凝土抗折、抗压及劈裂强度随龄期的增长率优于 12~16 目的橡胶混凝土; 而相同橡胶掺量的混凝土密度差别不大。

3) 掺 5~8 目橡胶颗粒的混凝土与掺 12~16 目橡胶颗粒的相比, 两者的噪声变化规律一致, 但前者降噪性能稍优于后者。对于不同的测试距离, 随橡胶掺量的增加, 噪声水平呈现小幅降低。

参考文献

[1] Turatsinze A., Bonnet S., Granju J. Mechanical characterization of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres[J]. Building and Environment. 2005, 40(2): 221-226.

[2] Fattuhi N. I., Clark L. A. Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber[J]. Construction and Building Materials. 1996, 10(4): 229-236.

[3] Zhu Han. Rubber crumbs in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(10): 1587-1596.

[4] Siddique R., Naik T. R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber - an overview[J]. Waste Management. 2004, 24(6): 563-569.