

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.06.004

三轴试验中橡胶-砂混合物泊松比计算方法研究

刘娜¹, 刘方成¹, 张小强², 任东滨¹, 张永富¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 安徽海螺建材设计研究院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 在分析常用确定泊松比方法的基础上, 基于广义虎克定律, 推导出三轴应力状态下泊松比的计算公式。根据已有的比值法、切线法和推导出的公式法, 对三轴试验得到的橡胶砂混合物的泊松比变化规律进行对比分析。研究表明: 相比于切线法、比值法, 本文推导的公式法得到的橡胶砂泊松比的变化规律更合理, 橡胶砂混合物的泊松比随橡胶颗粒含量的增加而呈减小的趋势, 在小围压条件下, 泊松比受围压影响较小。

关键词: 三轴试验; 橡胶-砂混合物; 泊松比; 切线法; 比值法; 公式法

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)06-0016-07

Study of Poisson's Ratio Calculation Method for Rubber-Sand Mixture under the Triaxial Test

Liu Na¹, Liu Fangcheng¹, Zhang Xiaoqiang², Ren Dongbin¹, Zhang Yongfu¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Anhui Conch Design & Research Institute of Building Materials, Wuhu Anhui 241000, China)

Abstract : On the basis of analyzing the common method to determine the Poisson's ratio and based on the generalized Hooke's law, deduced a calculation formula of Poisson's ratio under the triaxial stress state. According to the existing ratio method, tangent method and derived formula, compared and analyzed the Poisson's ratio variation of the rubber-sand mixture under triaxial tests. The results show that compared with the tangent method and ratio method, the change rule of Poisson's ratio of rubber sand obtained by the derived formula is more reasonable. With the increase of the content of rubber particle, Poisson's ratio of rubber-sand mixture displays a decreasing trend. Under the condition of small confining pressure, the confining pressure has little influence on Poisson's ratio.

Keywords : triaxial test; rubber-sand mixture; Poisson's ratio; tangent method; ratio method; formula method

0 引言

近年来, 随着全球汽车总量的增加, 废弃轮胎的数量也日渐增多, 造成的环境污染日益严重。如

何对废旧橡胶轮胎进行循环再利用已经成为影响社会经济和生态环境发展的一个热门问题。已有研究表明, 废旧轮胎橡胶颗粒具有质轻、耐久性能好、在不见光的情况下老化慢等特点, 是一种可以广泛应

收稿日期: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108177), 湖南省自然科学基金资助项目(10JJ4040), 湖南工业大学研究生科研创新基金资助项目(CX1410)

作者简介: 刘娜(1988-), 女, 河南新乡人, 湖南工业大学硕士生, 主研究方向为隔震材料, E-mail: 641526511@qq.com

通信作者: 刘方成(1978-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事新型岩土隔震系统方面的教学与研究, E-mail: fcliuth@gmail.com

用于路基、边坡、挡土墙等岩土工程领域的新型轻质复合材料^[1]。基于应用的需要,国内外许多学者对废弃轮胎颗粒及其与砂混合物的力学特性开展了大量的试验研究^[2-5]。但已有研究主要集中在强度和变形模量等参数上,有关橡胶砂泊松比的研究较少。

泊松比是反映材料变形特性的重要参数之一,它是在单向受力状态下,均匀分布的轴向应力所引起的侧向应变与相应的轴向应变之比的绝对值^[6]。许多工程模型的数值分析都需要输入泊松比的取值。朱俊高等^[7]在比较邓肯E-v和E-B两种模型计算得出的泊松比取值曲线的基础上,指出在大围压条件下,泊松比随着围压的增大而减小,随应力水平增大而增大,而在应力水平较低时应力水平对泊松比的影响较小。

鉴于泊松比在工程分析计算中对变形结果的影响比较显著,因此通过大量试验研究,建立泊松比与应力状态之间的关系非常必要。而对于橡胶砂这种新型混合岩土材料,对其泊松比开展基础性试验研究具有理论和实践应用意义。

1 泊松比的测定方法

现有泊松比的测定方法较多,根据泊松比测试过程中所用的基本原理不同,目前测定土的泊松比的方法主要有2类,即动力法和静力法。

1.1 动力法

一般而言,对于同一种材料,其剪切波和压缩波波速的大小是不一样的,但是它们都由弹性介质的密度、杨氏模量和泊松比等弹性参数决定。利用测量超声波速度的方法,通过式(1)和式(2)可得到材料的有关弹性参数^[8]。

$$T = \frac{c_z}{c_s}, \quad (1)$$

$$v = \frac{T^2 - 2}{2(T^2 - 1)}, \quad (2)$$

式(1)~(2)中: c_z 、 c_s 分别为介质中纵波和横波的速度;

T 为纵横波速比值;

v 为泊松比。

J. Kumar等^[9]通过波速试验,研究了不同粒径干砂的泊松比与相对密度和有效围压之间的关系,结果表明,泊松比随相对密度和有效围压的增大而减少,有效围压对细砂泊松比的影响比粗砂更为显著。利用此方法只能推定土的弹性泊松比。

1.2 静力法

由实测轴向和径向应变来计算泊松比,此方法可给出泊松比随应变的非线性变化关系。在应用这种试验方法对土体的泊松比进行探究时,对其试验结果亦有2种处理办法。

第一种是直接比值法,即根据材料力学中对于泊松比的原始定义进行计算,如式(3)所示。

$$v = \left| \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} \right|, \quad (3)$$

式中: ε_x 为径向应变; ε_z 为轴向应变。

汤大明等^[10]总结了岩石泊松比的几种试验和计算方法,并结合工程实例,提出了计算泊松比的经验公式,其实质就是径向应变与轴向应变的比值。王建华等^[11]通过橡胶、饱和细砂、饱和软黏土试样固结不排水动三轴试验,推导了对实测径向变形的修正关系,研究表明,当轴向动应变从 10^{-5} 增大至 10^{-3} 时,泊松比的变化基本为一常数,与固结压力的大小无关。

第二种是切线泊松比法,切线泊松比的计算公式如式(4)所示。

$$v = \frac{G - F \lg(\sigma_x / p_a)}{\left[1 - \frac{D(\sigma_z - \sigma_x)}{K p_a \left(\frac{\sigma_x}{p_a} \right)^n \left(1 - \frac{R_f(\sigma_z - \sigma_x)(1 - \sin \phi)}{2c \cos \phi + 2\sigma_x \sin \phi} \right)} \right]^2}, \quad (4)$$

式中: G 是围压为1标准大气压时的初始泊松比;

F 是围压为1标准大气压与10标准大气压时初始泊松比的差值;

σ_x 是围压;

p_a 是标准大气压数(1标准大气=101.325 kPa);

D 是 ε_z 与 $-\varepsilon_x$ 关系曲线渐近线的倒数;

σ_z 是轴向压力;

K, n 是试验常数,分别表示 $\lg(E/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_x/p_a)$ 直线的截距和斜率,其中 E 为弹性模量;

R_f 是破坏比;

ϕ 是内摩擦角;

c 是黏聚力。

由式(4)可知,切线泊松比的计算比较繁琐,故孙益振等^[12-13]提出切线泊松比的简化计算:对轴向应变-径向应变关系曲线一次求导,然后求倒数就可以得到切线泊松比的变化规律。并通过基于局部变形测量的三轴试验,分析了细沙、粉土、石英砂泊松比的变化规律,得到同一种材料在不同围压条件下的试样变形规律基本一致、切线泊松比随主应力比增加而增加的结论。

综上所述,在已有静力法测试岩土材料泊松比的文献资料中,对于泊松比的计算,基本上是由径向应变与轴向应变的关系曲线,通过直接或间接的方法来确定的,其实质都是径-轴向应变的比值。这种方法对处于复杂应力条件下的岩土材料来说,在物理意义上存在缺陷。泊松比的物理定义^[14]是指在单向应力状态下,均匀分布的轴向应力所引起的侧向应变与相应的轴向应变之比的绝对值。当材料处于复杂应力状态时,轴向应力和侧向应力所分别产生的轴向应变和侧向应变会相互影响,此时,侧向应变与轴向应变的直接比值并不是真正的泊松比。笔者认为,对于岩土材料在复杂应力状态下的泊松比,应根据试验边界条件,按广义虎克定律进行推导计算而得出。

2 复杂应力状态下泊松比的计算方法

在三轴试验中,试样不只受单向应力(轴向应力),还有侧向的应力(围压)。试验过程中,试样的应力应变状态如图1所示。

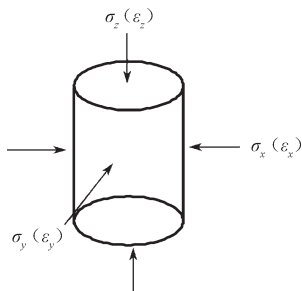


图1 三轴应力应变示意图

Fig. 1 Schematic of element stress and strain in triaxial test

根据广义虎克定律,其应力应变关系可写为:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y + \sigma_z}{E}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x + \sigma_z}{E}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_x + \sigma_y}{E}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y, \quad (8)$$

$$\sigma_x = \sigma_y. \quad (9)$$

式(5)~(9)中: $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 分别为 x, y 方向的径向应变; ε_z 为轴向应变;

σ_x, σ_y 分别为 x, y 方向的径向应力,即围压;

σ_z 为轴向应力。

由式(5)和式(7)可得

$$\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} = \frac{\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)}{\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)}, \quad (10)$$

整理式(10)得

$$\nu = \frac{\sigma_x \varepsilon_z - \sigma_z \varepsilon_x}{(\sigma_z + \sigma_y) \varepsilon_z - (\sigma_x + \sigma_y) \varepsilon_x}. \quad (11)$$

由于在三轴试验中有

$$\varepsilon_V = \varepsilon_z + \varepsilon_x + \varepsilon_y, \quad (12)$$

式中: ε_V 为体积应变。

将式(12)代入式(11),整理得出如下泊松比计算公式

$$\nu = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\sigma_z + 2\sigma_x) \varepsilon_z - \sigma_z \varepsilon_V}{(\sigma_z + 2\sigma_x) \varepsilon_z - \sigma_x \varepsilon_V}. \quad (13)$$

式(13)中轴向应力、围压、轴向应变、体应变都是从三轴试验中直接采集到的数据。

3 试验简介

试验所用橡胶砂由标准砂和废旧轮胎橡胶颗粒配合而成。其中,标准砂是用灌砂法专用的粉煤灰中级砂,粒径范围为0.5~1 mm;橡胶颗粒由废旧轮胎经机械打碎得到,颗粒粒径主要分布范围为0.7~2.3 mm。将烘干的标准砂和风干的橡胶颗粒按质量配比进行混合,搅拌均匀后得到橡胶砂混合物,密封待用。为尽量减小初始密实状态对不同配比橡胶砂力学特性的影响,在装样时,不同配比的橡胶砂按相同相对密度进行控制。装样初始控制密度 ρ 按式(14)确定。

$$D_r = \frac{\rho_{\max}(\rho - \rho_{\min})}{\rho(\rho_{\max} - \rho_{\min})}, \quad (14)$$

式中: D_r 为相对密度;

ρ_{\max}, ρ_{\min} 分别为最大和最小干密度。

不同质量配比的橡胶砂混合物的密度如表1所示。试验考察橡胶颗粒质量分数分别为0, 10%, 20%, 30% 4种配比的橡胶砂,其中0即为纯砂。

表1 不同配比橡胶砂混合物的密度

Table 1 Mass density of RSM with different rubber content

配合比 / %	$\rho_{\min} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho_{\max} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	相对密度 D_r
0	1.50	1.98	1.78	0.7
10	1.44	1.78	1.69	0.7
20	1.30	1.59	1.49	0.7
30	1.09	1.38	1.28	0.7
100	0.50	0.95	0.75	0.7

三轴剪切试验在SLB-1型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪上进行,试样直径 $\Phi=39.1$ mm,高度 $H=80$ mm。共考虑了4种不同配比在同一围压条件下和相同配比在4种不同围压条件下的情况。试验工况如表2所示。

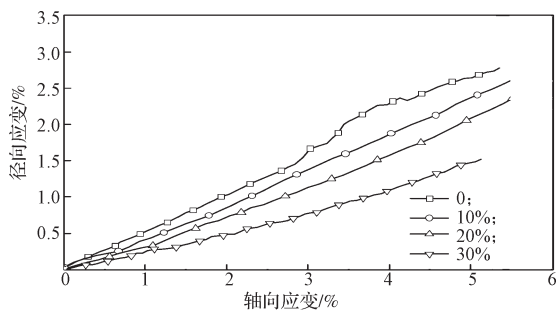
表2 试验工况
Table 2 Test conditions

试样编号	配比 / %	围压 / kPa	试样个数
S01~S03	0	100	3
S04~S06	10	100	3
S07~S09	20	100	3
S10~S12	30	100	3
S13~S15	20	50	3
S16~S18	20	150	3
S19~S21	20	200	3
S22~S24	100	100	3

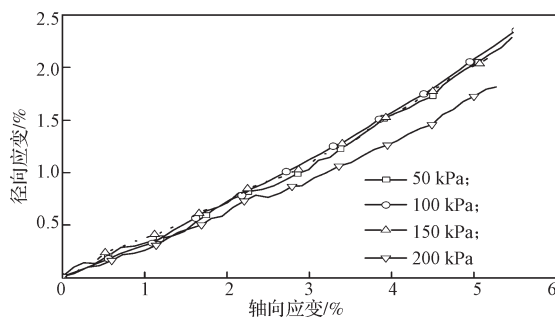
4 试验结果与分析

因比较需要, 本文对 100 kPa 围压条件下不同配比的橡胶砂试样和 20% 配比条件下不同围压的橡胶砂试样分别进行试验。对试验结果除按式 (13) 进行泊松比计算外, 还按已有文献中的直接比值法^[10]和切线斜率法^[12]对试验结果进行处理, 分别简称为公式法、比值法和切线法。

100 kPa 围压条件下, 不同配比的橡胶砂混合物的径向应变-轴向应变关系曲线如图 2a 所示; 20% 配比条件下, 不同围压的橡胶砂混合物的径向应变-轴向应变关系曲线如图 2b 所示。



a) 围压为 100 kPa



b) 配比为 20%

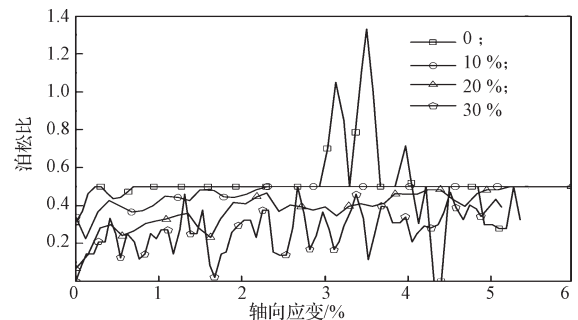
图2 径向-轴向应变关系曲线

Fig. 2 Relationship curves of radial strain and axial strain

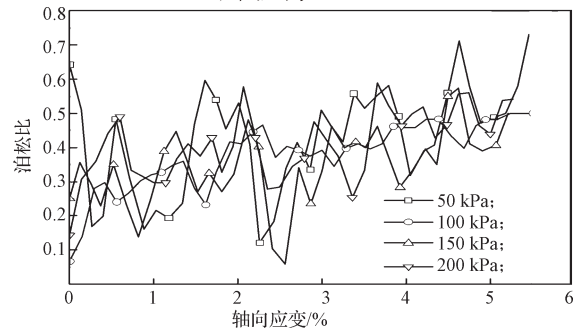
从图 2 可以看出, 径向应变与轴向应变关系曲线仅在初始阶段为曲线, 随应力增加试样变形到一定程度后, 二者之间线性关系趋于明显。从图 2a 可以看出, 由于橡胶颗粒含量不同, 不同配比之间的关系曲线存在较大差异, 橡胶颗粒含量越大, 径向

应变-轴向应变关系曲线越平缓, 反之则越陡。特别是纯砂 (配比为 0) 在轴向应变达到 4% 左右时出现轻微凸起, 在变形上解释为出现剪胀, 泊松比表现为大于 0.5。从图 2b 可以看出, 对于同一配比的橡胶砂混合物, 不同围压下径向应变-轴向应变关系曲线几乎重合, 围压对其泊松比的影响不大。

对图 2 中的关系曲线一次求导, 即得出切线泊松比与轴向应变的关系曲线如图 3 所示; 直接用公式计算得出的比值泊松比与轴向应变的关系曲线如图 4 所示; 用本文提出的计算泊松比的公式 (13) 得到的泊松比与轴向应变的关系曲线如图 5 所示。



a) 围压为 100 kPa



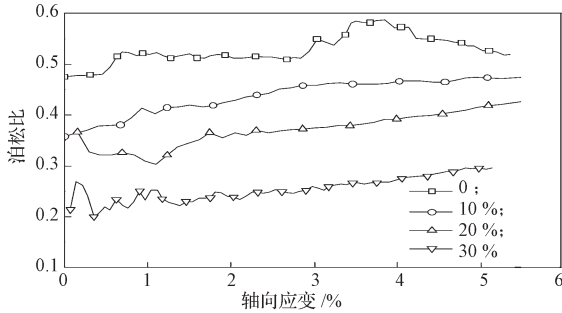
b) 配比为 20%

图3 切线法时泊松比与轴向应变关系曲线

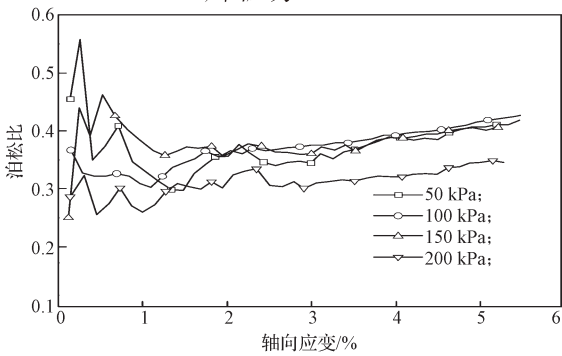
Fig. 3 The relationship curves of Poisson's ratio and axial strain by tangent method

图 3~5 是根据相同试验结果, 按 3 种不同方法得到的泊松比随轴向应变的变化规律。由图可知, 3 种不同方法得到的泊松比随轴向应变的变化趋势相似: 不同配比橡胶砂的泊松比随轴向应变 (应力) 的增加逐渐增加, 但逐渐增加的速率降低, 最终趋于某一水平渐进线, 直至破坏状态。分析 3 种方法得到的泊松比-轴向应变关系曲线可知, 它们之间也存在显著差异: 图 3 中, 切线法得到的泊松比-轴向应变曲线呈锯齿状, 这是由于径向应变-轴向应变关系曲线的不光滑导致的, 反映出该泊松比计算方法对于径向-轴向应变关系曲线的平滑性非常敏感, 容易放大试验误差, 且大量出现泊松比大于 0.5 的情况, 与实际情况明显不符; 图 4 中, 比值法得到的泊松比-轴向应变曲线比图 3 的曲线平缓, 但在加载前期有跳跃现象,

与公知的理论不符；图5中，公式法得到的泊松比-轴向应变曲线，明显较前两者更光滑，且只有橡胶颗粒质量分数为0时的纯砂在加载过程中，由于发生剪胀而导致出现泊松比大于0.5的情况，其他条件下泊松比都小于0.5。



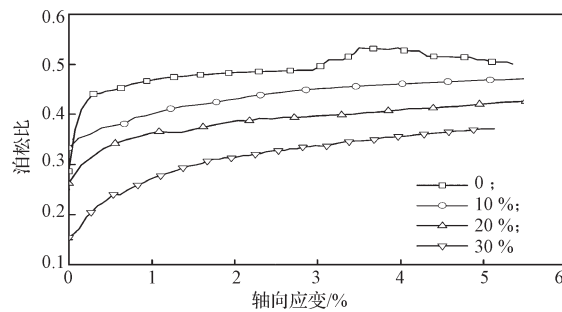
a) 围压为 100 kPa



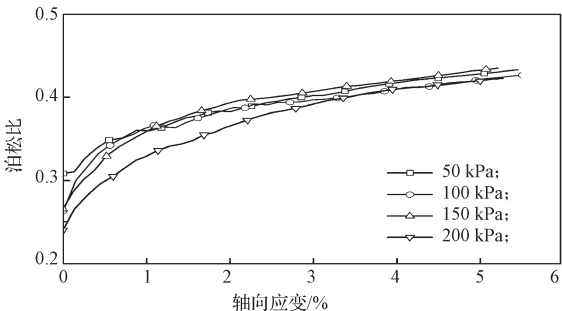
b) 配比为 20%

图4 比值法时泊松比与轴向应变关系曲线

Fig. 4 The Relationship curves of Poisson's ratio and axial strain by ratio method



a) 围压为 100 kPa



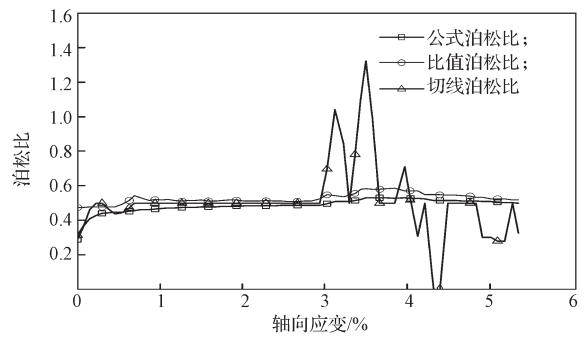
b) 配比为 20%

图5 公式法时泊松比与轴向应变关系曲线

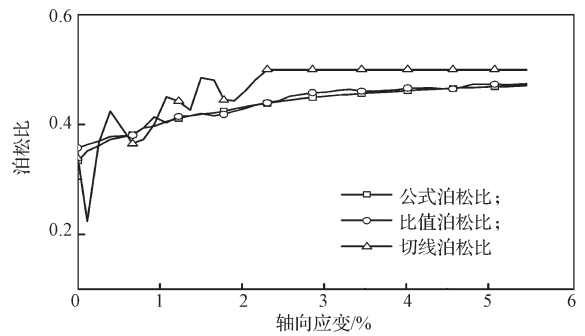
Fig. 5 The relationship curves of Poisson's ratio and axial strain by derived formula

由图5a可知，随着橡胶颗粒含量的增加，橡胶砂泊松比-轴向应变曲线逐渐降低。由图5b可知，对于橡胶颗粒质量分数为20%的橡胶砂，当应变较小时，围压越大，泊松比越小；而随着应变的增大，围压对其泊松比影响减小。

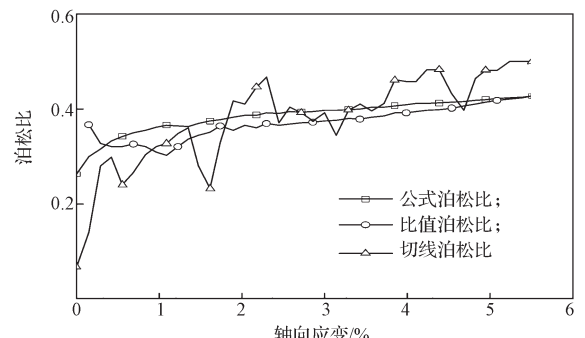
图6给出了配比和围压都相同时，由3种不同方法得到的泊松比-轴向应变曲线。



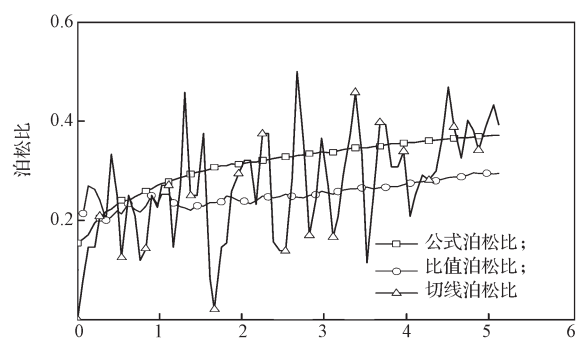
a) 配比为 0 围压为 100 kPa



b) 配比为 10% 围压为 100 kPa



c) 配比为 20% 围压为 100 kPa



d) 配比为 30% 围压为 100 kPa

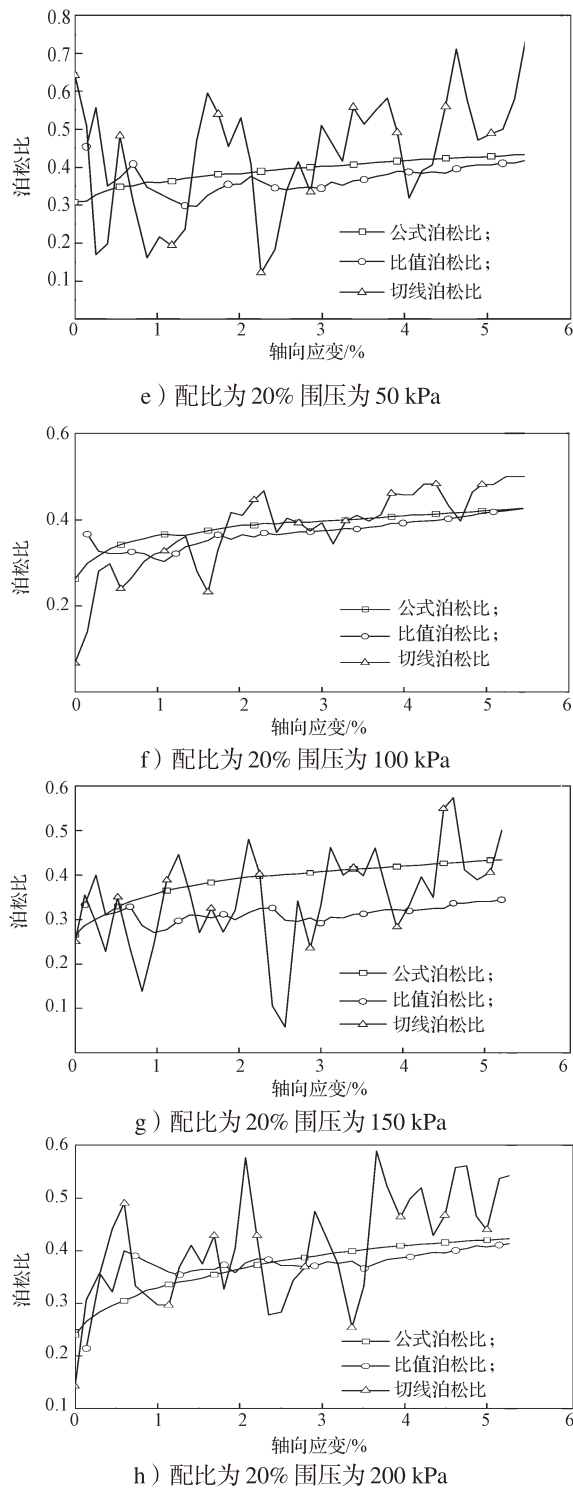


图6 相同条件下不同方法得到的泊松比-轴向应变曲线
Fig. 6 Poisson's ratio-axial strain curves by different methods under the same condition

由图6可知: 1) 3种方法计算得到的泊松比结果存在差异, 总体来说, 直接比值法与本文公式法得到的泊松比较接近。2) 在加载初期, 3种方法得到的泊松比存在差异, 但随着轴向应变的增大, 差异逐渐减小。3) 随着橡胶含量的增大, 3种方法得到的泊松比差异表现出增大的趋势。4) 围压变化对

3种方法得到的泊松比差异影响较小。5) 对比3种计算泊松比的方法, 本文的公式法得到的泊松比关系曲线更合理地反映了在加载过程中泊松比随轴向应变增加的变化趋势。

由于通常认为橡胶为不可压缩性材料^[15-17], 故其弹性变形范围内的泊松比约为0.5。为进一步比较3种不同方法所得泊松比的差异, 再对纯橡胶颗粒在围压为100 kPa的条件下进行三轴压缩试验, 得到纯橡胶颗粒的泊松比-轴向应变曲线, 如图7所示。

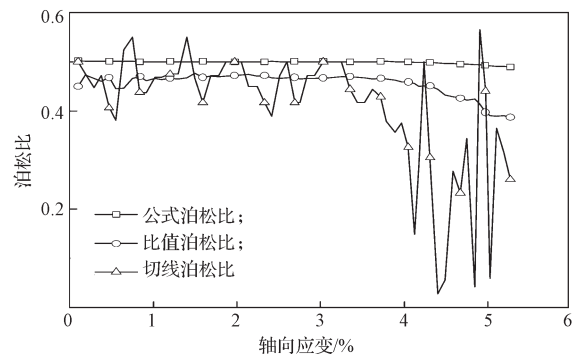


图7 纯橡胶颗粒的泊松比-轴向应变曲线
Fig. 7 Poisson's ratio-axial strain curves of pure rubber particles

由图可知, 在100 kPa围压下, 由直接比值法得到的纯橡胶颗粒的泊松比小于0.5, 且随着轴向应变的增大而减小; 由切线法得到的泊松比波动较大; 而按本文公式(13)计算得到的泊松比维持在0.5左右, 此结果与通常认为的橡胶泊松比相一致。由此进一步验证了本文根据广义虎克定律所推导的用于计算三轴应力状态下试样泊松比的公式更为合理。

5 结语

针对目前常用的比值法和切线法等计算材料泊松比的不足, 本文根据虎克定律, 推导了适用于计算三轴试验条件下泊松比的公式。对橡胶砂混合物三轴试验结果的分析表明: 相比于比值法、切线法等现有常用泊松比的计算方法, 采用本文推导的公式计算得到的三轴应力条件下橡胶砂泊松比的变化规律更为合理; 在小围压条件下, 泊松比受围压的影响较小; 橡胶砂混合物的泊松比随橡胶颗粒含量的增加而呈减小的趋势。

参考文献:

[1] Anbazhagan P, Mamatha M, Soumyashree P, et al. Laboratory Characterization of Tyre Crumbs Soil Mixture for Developing Low Cost Damping Materials[J].

- International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2011, 4(6) : 63-66
- [2] Gotteland P, Lambert S, Balachowski L. Strength Characteristics of Tyre Chips-Sand Mixtures[J]. *Studia Geotechnica Et Mechanica*, 2005, 27(1/2) : 55-66.
- [3] Rao G V, Dutta R K. Compressibility and Strength Behaviour of Sand-Tyre Chip Mixtures[J]. *Geotechnical Geological Engineering*, 2006, 24(3) : 711-724.
- [4] 辛凌, 刘汉龙, 沈扬, 等. 废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土强度特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(3) : 428-433.
Xin Ling, Liu Hanlong, Shen Yang, et al. Consolidated Undrained Triaxial Compression Tests on Lightweight Soil Mixed with Rubber Chips of Scrap Tires[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(3) : 428-433.
- [5] 李丽华, 肖衡林, 唐辉明, 等. 轮胎碎片-砂混合土抗剪性能优化试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(4) : 1063-1067.
Li Lihua, Xiao Henglin, Tang Huiming, et al. Shear Performance Optimizing of Tire Shred-Sand Mixture[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4) : 1063-1067.
- [6] 崔伟群, 曾校丰. 求取泊松比的理论探讨[J]. *地学前缘*, 1998, 5(4) : 243-244.
Cui Weiqun, Zeng Xiaofeng. Discussion on Theory for Poisson's Ratio[J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5(4) : 243-244.
- [7] 朱俊高, 周建方. 邓肯E-v模型与E-B模型比较[J]. *水利水电科技进展*, 2008, 28(1) : 4-7.
Zhu Jungao, Zhou Jianfang. Comparison of Duncan's E-v and E-B Models[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2008, 28(1) : 4-7.
- [8] 吴世明, 陈龙珠. 饱和土的泊松比及含气量对它的影响[J]. *水利学报*, 1989(1) : 37-43.
Wu Shiming, Chen Longzhu. Poisson's Ratios of Saturated and Highly-Saturated Soils[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1989(1) : 37-43.
- [9] Kumar J, Madhusudhan B N. Effect of Relative Density and Confining Pressure on Poisson Ratio from Bender and Extender Elements Tests[J]. *Géotechnique*, 2010, 60(7) : 561-567.
- [10] 汤大明, 曾纪全, 胡应德, 等. 关于泊松比的试验和取值讨论[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(增刊1) : 1772-1775.
Tang Daming, Zeng Jiquna, Hu Yingde, et al. Discussion on Testing and Interpretation for Poisson's Ratio[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(S1) : 1772-1775.
- [11] 王建华, 周扬锐, 张群. 一种测试动三轴试样泊松比的方法[J]. *世界地震工程*, 2010, 26(增刊1) : 23-27.
Wang Jianhua, Zhou Yangrui, Zhang Qun. Measuring Method for Poisson Ratio of Cyclic Triaxial Specimens[J]. *World Earthquake Engineering*, 2010, 26(S1) : 23-27.
- [12] 孙益振. 基于三轴试样局部变形测量的土体应力应变特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
Sun Yizhen. Study on The Stress-Strain Characteristics of Soils with Triaxial Test Based on Local Deformation Measurement[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [13] 孙益振, 邵龙潭, 范志强, 等. 非黏性土泊松比试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(增刊1) : 63-68.
Sun Yizhen, Shao Longtan, Fan Zhiqiang, et al. Experimental Research on Poisson's Ratio of Sandy Soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(S1) : 63-68.
- [14] Domenico N. Poisson's Ratio: An Interdisciplinary Link[J]. *The Leading Edge*, 1995, 14(9) : 983-986.
- [15] 黄智, 王万录, 廖克俊, 等. 具有负泊松比材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2002(10) : 49-51.
Huang Zhi, Wang Wanlu, Liao Kejun, et al. Advances in Research on with Negative Poisson's Ratio Materials[J]. *Materials Review*, 2002(10) : 49-51.
- [16] 史炜, 杨伟, 李忠明, 等. 负泊松比材料研究进展[J]. *高分子通报*, 2003(6) : 48-57.
Shi Wei, Yang Wei, Li Zhongming, et al. Advances in Negative Poisson's Ratio Materials[J]. *Polymer Bulletin*, 2003(6) : 48-57.
- [17] 杨鸣波, 阳霞, 李忠明, 等. 负泊松比材料的结构与性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2001, 17(6) : 15-18, 24.
Yang Mingbo, Yang Xia, Li Zhongming, et al. The Structure and Properties of the Material with Negative Poisson's Ratio[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2001, 17(6) : 15-18, 24.

(责任编辑: 邓光辉)