

# 加筋碎石土的归一性研究

黄英

何发祥

(昆明理工大学电力工程学院,昆明 650051) (四川大学水利系,成都 610065)

**【摘要】** 碎石土加筋前后应力-应变关系的归一性较差。围压越低,颗粒越硬,归一性越差;随围压增大,归一性增强。根据加筋前后各试验点的集中程度和围压大小,将碎石土的归一化直线划分为两条,并由归一化参数预测碎石土加筋前后的应力-应变关系。与实测曲线比较,不加筋时差别随围压增大和颗粒粗硬而增大;加筋时差别较小。同时根据归一性提出了描述该类土体切线剪切模量的归一化本构方程,其方程参数直接由三轴试验成果确定,并给出了所有方程参数。

**【关键词】** 加筋碎石土;归一性;应力-应变关系;归一化本构方程

**【中图分类号】** TU472

**【Abstract】** The normalization of relationship between stress and strain of gallet, reinforced or not, is not as good as that of soil. The lower the around pressure and the harder the stone, the more scattering the test points in cartesian system. In orthogonal system, according to the scattering points and the magnitude of around pressure, gallet, reinforced or not, can be normalized into two lines which can be used to determine the stress-strain relationship. Comparing with the test curves, the result shows that the points of reinforced gallet are more concentrated than those of unreinforced gallet. Finally, a new constitutive equation related to the normalization is proposed to calculate the tangential shear modulus of gallet. The parameters which can be directly determined by tri-axial test in the equation are also demonstrated.

**【Key words】** reinforced gallet; normalization; stress-strain relationship; normalized constitutive equation

## 0 引言

在砂土、碎石土等土体中加筋可以改善土体的性能,显著提高土体的抗剪强度,抑制变形<sup>[1],[2]</sup>,并已广泛应用于工程实践中<sup>[3]</sup>,取得了良好的效果。在碎石土中加筋对其抗剪强度特性的影响以及加筋效果和加筋机理等问题,已经进行了不同程度的研究<sup>[4]</sup>,取得了一定的研究成果。在一般土体中存在的归一性问题,在碎石土中是否存在,加筋对碎石土的归一性有何影响以及归一化本构方程等问题,至今还没有研究报道。因而,对碎石土

加筋前后的应力-应变特性作进一步的研究具有非常重要的实际意义。本文结合碎石土加筋前后的高压大三轴固结排水试验结果,对比探讨其应力-应变关系的归一性问题。

## 1 加筋碎石土的归一化性状

### 1.1 归一化曲线及方程

本文讨论 A、B 两种碎石土加筋前后应力-应变关系的归一性问题。其中, A 料颗粒硬, B 料颗粒软。采用平均主应力  $p$  作为归一化应力,得到两种碎石土加筋前后的归一化曲线(见图 1)。

**作者简介:**黄英,1963年生,女,岩土工程硕士,副教授。主要从事有关岩土工程的教学、科研和技术服务工作。

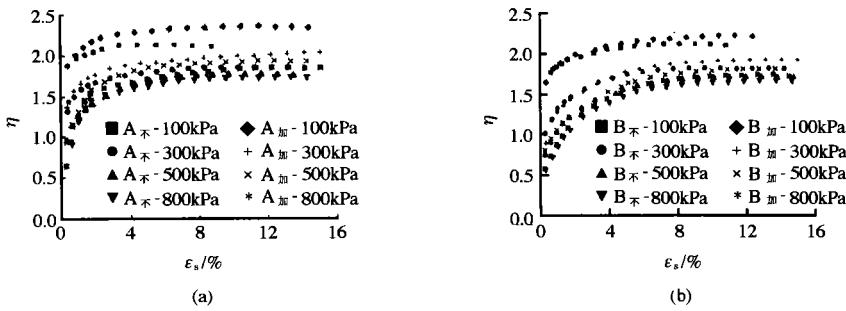


图1 碎石土加筋前后的归一化曲线

图1表明:不论加筋与否,两种碎石土的归一性较差,都随围压而变化。在各级压力下,加筋前后A料试验点的差别大于B料,尤以 $\sigma_3 = 100$  kPa明显。说明颗粒软的B料的归一性好于颗粒硬的A料的归一性。根据碎石土加筋前后各试验点的集中程度和围压大小,可将各归一化试验点分为两部分: $\sigma_3 = 100$  kPa和 $\sigma_3 = 300 \sim 800$  kPa,表明碎石土的归一化程度随围压增大而增强。如果用图2的归一化直线来表示,则对应有两条归一化直线: $\sigma_3 = 100$  kPa归一化为一条直线,

$\sigma_3 = 300 \sim 800$  kPa归一化为另一条直线,与是否加筋的关系很小。二者的归一化直线方程都可表示为:

$$\frac{\epsilon_s}{\eta} = a + b\epsilon_s \quad (1)$$

式中: $\epsilon_s$ ——试样的剪应变, %;

$\eta$ ——试样的偏应力  $q$  与平均主应力  $p$  之比,  $\eta = q/p$ ;

$a$ 、 $b$ ——归一化参数,可由图2确定。

两种碎石料加筋前后的归一化参数及相关系数  $R$  见表1。

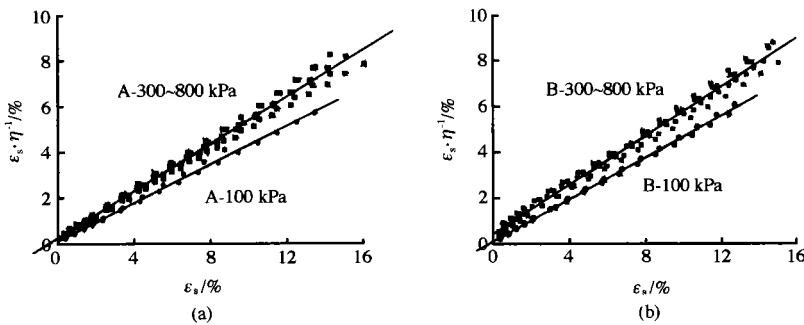


图2 碎石土加筋前后的归一化直线

表1 碎石土加筋前后的归一化参数

方程	$\frac{\epsilon_s}{\eta} = a + b\epsilon_s$						$\epsilon_s = m + n\epsilon_1$						
	$\sigma_3 = 100$ kPa			$\sigma_3 = 300 \sim 800$ kPa			$\sigma_3 = 100$ kPa			$\sigma_3 = 300 \sim 800$ kPa			
试验参数	$a/\%$	$b$	$R$	$a/\%$	$b$	$R$	$m/\%$	$n$	$R$	$m/\%$	$n$	$R$	
土料	A	0.111 1	0.421 3	0.998 2	0.236 4	0.516 3	0.995 3	-0.129 9	1.002 0	0.999 7	-0.401 3	0.969 4	0.997 7
	B	0.101 4	0.458 2	0.999 1	0.436 1	0.534 6	0.994 6	-0.220 2	1.021 3	0.999 5	-0.405 0	0.918 1	0.998 4

## 1.2 应力-应变关系预测

将表1确定的归一化参数代入式(1),即可得到由其预测的碎石土加筋前后的应力-应变关系曲线(见图3)。与试验曲线比较,在不加筋情况下,随围压增大,实测曲线与预

测曲线的差别越大,A料的差别大于B料;在加筋情况下,随围压增大,实测曲线与预测曲线的差别减小,吻合较好,A、B料的差别不显著。

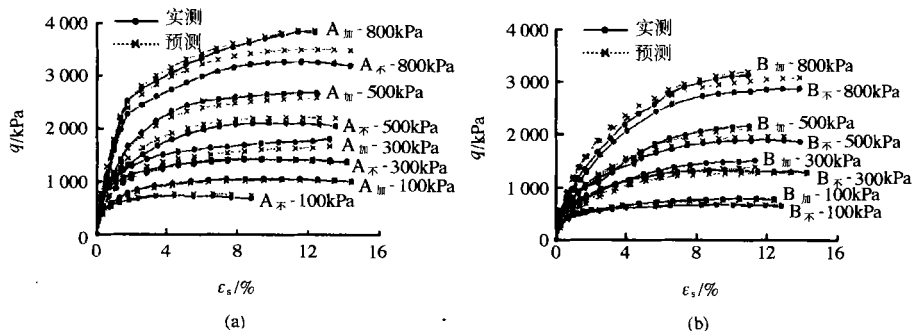


图3 碎石土加筋前后预测曲线和实测曲线的比较

## 2 归一化本构方程的建立

将式(1)变换得:

$$\frac{q}{p} = \frac{\epsilon_s}{a + b\epsilon_s} \quad (2)$$

两边对  $\epsilon_s$  求导得:

$$\frac{a}{(a + b\epsilon_s)^2} = \frac{p \frac{dq}{d\epsilon_s} - q \frac{dp}{d\epsilon_s}}{p^2} \quad (3)$$

式中:  $\frac{dq}{d\epsilon_s}$  定义为切线剪切模量  $G_t$ , 由式(2)

求出  $\epsilon_s$  代入式(3)得:

$$G_t = \frac{(p - bq)^2 + aq \times \frac{dp}{d\epsilon_s}}{ap} \quad (4)$$

式中:  $\frac{dp}{d\epsilon_s}$  按以下方法确定。

先将  $\frac{dp}{d\epsilon_s}$  改写成:

$$\frac{dp}{d\epsilon_s} = \frac{dp}{d\epsilon_1} \times \frac{d\epsilon_1}{d\epsilon_s} \quad (5)$$

碎石土的剪应变  $\epsilon_s$ 、轴应变  $\epsilon_1$  和体应变  $\epsilon_v$  的关系为:  $\epsilon_s = \epsilon_1 - \frac{\epsilon_v}{3}$ , 对碎石土的应力-应变特性的研究发现, 不论加筋与否, 碎石土

的剪应变  $\epsilon_s$  与轴应变  $\epsilon_1$  之间呈线性关系, 二者的关系可表示为:

$$\epsilon_s = m + n\epsilon_1 \quad (6)$$

式中:  $m$ 、 $n$  是试验参数, 由  $\epsilon_s$ - $\epsilon_1$  关系确定的。

对式(6)求导得:

$$\frac{d\epsilon_1}{d\epsilon_s} = \frac{1}{n} \quad (7)$$

而平均主应力  $p$  与轴应变  $\epsilon_1$  的关系可表示为双曲线关系, 即:

$$p = \frac{\epsilon_1}{c + d\epsilon_1} \quad (8)$$

式中:  $c$ 、 $d$  是试验参数, 将式(8)转化为直线方程, 由  $\epsilon_1/p$ - $\epsilon_1$  关系确定。

将(8)式对  $\epsilon_1$  求导, 并由式(8)求出  $\epsilon_1$ , 则可得:

$$\frac{dp}{d\epsilon_1} = \frac{(1 - pcd)^2}{(1 - pcd + pd)^2} \quad (9)$$

代式(7)、式(9)入式(5)可得:

$$\frac{dp}{d\epsilon_s} = \frac{(1 - pcd)^2}{(1 - pcd + pd)^2} \times \frac{1}{n} \quad (10)$$

代式(10)入式(4)得:

$$G_t = \frac{p - bq}{ap} + \frac{q}{p} \times \frac{(1 - pcd)^2}{(1 - pcd + pd)^2} \times \frac{1}{n} \quad (11)$$

上式就是切线剪切模量的归一化本构方程。式中：参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $n$  均由三轴试验成果确定。

### 3 本构方程参数的确定

根据碎石土加筋前后的三轴试验成果，分别作出  $\epsilon_s/\eta\epsilon_s$ 、 $\epsilon_s-\epsilon_1$ 、 $\epsilon_1/p-\epsilon_1$  关系曲线，见图2、图4、图5。

式(11)中，参数  $a$ 、 $b$  由图2确定，参数

$n$  由图4确定，参数  $c$ 、 $d$  由图5确定。进一步的研究表明，参数  $c$ 、 $d$  又随围压  $\sigma_3$  和加筋情况而变化，可表示为：

$$c = e_1 + f_1 \ln\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right) \quad (12)$$

$$d = e_2 + f_2 \ln\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right) \quad (13)$$

式中： $e_1$ 、 $f_1$ 、 $e_2$ 、 $f_2$ ——拟合参数，由  $c-\sigma_3$  和  $d-\sigma_3$  关系确定)。

$P_a$ ——为大气压力，kPa。

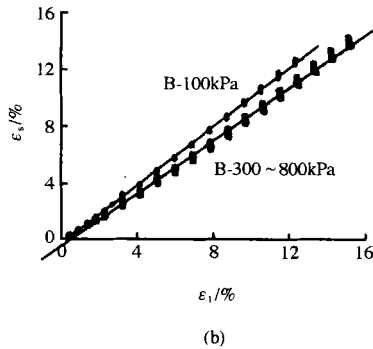
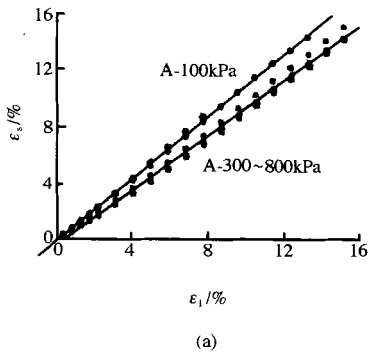


图4 碎石土加筋前后的  $\epsilon_1-\epsilon_s$  关系

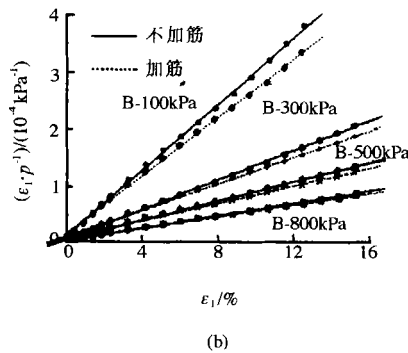
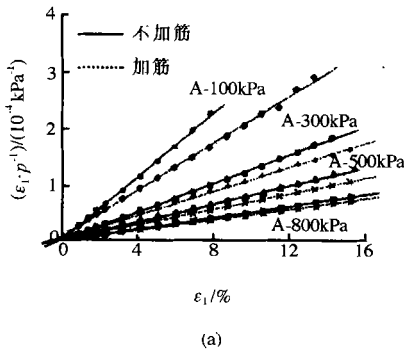


图5 碎石土加筋前后  $\epsilon_1/p-\epsilon_1$  关系

此外，图4、图5还反映出碎石土加筋前后的一些变化特点。图4表明，碎石土加筋前后的  $\epsilon_s-\epsilon_1$  关系呈现与  $\frac{\epsilon_s}{\eta} = a + b\epsilon_1$  相同的规律，即加筋前后的  $\sigma_3 = 100$  kPa 集中在—

条直线上， $\sigma_3 = 300 \sim 800$  kPa 则集中在另一条直线上，说明低围压对其有影响，高围压和加筋对其影响很小。且B料各试验点的集中程度大于A料，说明颗粒越软，试验点的集中程度越高，加筋的作用减小。图5表明，

碎石土加筋前后的  $\epsilon_1/p-\epsilon_1$  关系随加筋和围压而变化,反映出加筋对 A 料的影响大于 B 料,说明颗粒越硬,加筋效果越好。且随围压增大,加筋与不加筋的试验点靠近,加筋的效

果逐渐减小,尤以 B 料显著。

对加筋前后的 A、B 两种碎石土,由三轴试验成果确定的归一化本构方程参数及相关系数  $R$  分别见表 1、表 2 和表 3。

表 2 碎石土的  $\epsilon_1/p-\epsilon_1$  拟合参数表

围 压		$\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$			$\sigma_3 = 300 \text{ kPa}$			$\sigma_3 = 500 \text{ kPa}$			$\sigma_3 = 800 \text{ kPa}$			
拟合参数		$c$ $/((10^{-4} \cdot \text{kPa}^{-1}))$	$d$ $/10^{-2}$	$R$	$c$ $/((10^{-4} \cdot \text{kPa}^{-1}))$	$d$ $/10^{-2}$	$R$	$c$ $/((10^{-4} \cdot \text{kPa}^{-1}))$	$d$ $/10^{-2}$	$R$	$c$ $/((10^{-4} \cdot \text{kPa}^{-1}))$	$d$ $/10^{-2}$	$R$	
土	A	不加筋	0.044 7	0.280 0	0.999 3	0.042 1	0.124 0	0.999 7	0.038 9	0.078 5	0.999 5	0.033 5	0.050 2	0.999 7
		加筋	0.105 0	0.205 0	0.999 2	0.070 1	0.104 0	0.999 5	0.055 0	0.066 7	0.999 6	0.038 6	0.045 5	0.999 7
料	B	不加筋	0.137 3	0.289 8	0.999 6	0.079 5	0.127 6	0.999 6	0.074 0	0.083 2	0.999 2	0.053 3	0.052 6	0.999 1
		加筋	0.173 0	0.253 2	0.999 4	0.122 3	0.114 2	0.999 0	0.093 8	0.074 9	0.997 7	0.063 8	0.049 3	0.998 2

表 3 碎石土的  $c-\sigma_3$  及  $d-\sigma_3$  拟合参数表

拟合类型		c			d			
拟合参数		$e_1/10^{-6}$	$f_1/10^{-6}$	$R$	$e_2/10^{-6}$	$f_2/10^{-6}$	$R$	
土料	A	不加筋	6.897	-0.502 7	0.932 5	78.978	-11.317	0.985 7
		加筋	25.109	-3.166 9	0.999 7	56.121	-7.858	0.991 9
	B	不加筋	31.170	-3.881 0	0.978 8	80.505	-11.668	0.985 1
		加筋	41.043	-5.188 4	0.997 0	70.487	-10.030	0.985 4

#### 4 结 论

1) 碎石土加筋前后应力-应变关系的归一性较差,围压越低,颗粒越硬,归一性越差;随围压增大,归一性增强,且颗粒软的归一性好于颗粒硬的归一性。根据加筋前后各试验点的集中程度和围压大小,碎石土的归一化直线可划分为  $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$  和  $\sigma_3 = 300 \sim 800 \text{ kPa}$  两条。

2) 由归一化参数预测的碎石土加筋前后的应力-应变关系与实测曲线比较,不加筋时差别随围压增大而增大,且颗粒越粗硬,差别越大;加筋时差别随围压变化较小,吻合较好。说明归一化参数用来预测加筋碎石土的应力-应变关系,更符合实际情况。

3) 根据碎石土归一性建立的切线剪切模量的归一化本构模型能够考虑平均主应力、偏应力、剪应变、轴应变、围压以及加筋的综合影响,且方程参数简单,直接由三轴试验成

果确定。

4) 综合研究表明,碎石土的颗粒越粗硬,加筋前后各试验点的离散性越大,加筋对其影响越大,加筋效果越好。这实际上从另外一个角度证明了碎石土加筋的作用。

#### 参 考 文 献

- 1 邹新华等. 加筋砂土三轴试验特性研究. 长沙交通学院学报, 1998, 21((3))
- 2 Chandrasekaran b, Broms B B, Wong K.S. Strength of Fabric Reinforced Sand Under Axisymmetric Loading. Geotextiles and Geomembranes, 1989, (8)
- 3 周志刚等. 土工格栅加固碎石桩复合地基的机理分析. 土木工程学报, 1998, 31(1)
- 4 保华富等. 聚合物土工格栅加筋碎石土试验研究. 岩土工程学报, 1999, 21(2)

收稿日期: 1999-10-25