

DOI: 10.11779/CJGE20230672

砾粒土卸载-再加载力学特性大型平面应变试验研究

王 智¹, 邵 帅^{*2}, 邵生俊^{1,3}, 严广艺⁴

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学建筑与城市规划系, 陕西 西安 710048; 3. 西安理工大学陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048; 4. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 针对水利和交通工程中平面应变类工程重复加卸荷问题, 利用压力室平面应变改造后的西安理工大学大型土工真三轴仪在不同围压条件下对两种砾粒土进行固结排水平面应变卸载-再加载试验, 研究了砾粒土在平面应变状态下的应力-应变关系和卸载回弹应变和卸载-再加载回弹坡度等力学特性。结果表明: 砾粒土的颗粒圆度、孔隙比、母岩强度和围压均会影响剪切峰值应力及剪胀特性, 颗粒圆度好、孔隙比小的砾粒土峰值应力较低且更易表现出剪胀特性, 母岩强度低会促进应变软化并降低峰值应力, 围压增大可抑制剪胀并使峰值应力增大; 体积应变和广义剪应变卸载回弹量与应力水平和围压有关; 回弹坡度随应力水平增大先增后减, 密实度较大时回弹坡度较大; 卸载-再加载过程中出现主应力轴旋转现象, 零应变方向的应力并非一直为中主应力; 回弹坡度显著大于初始切线坡度, 回弹坡度与初始切线坡度之比随围压增大快速减小。

关键词: 平面应变; 卸载-再加载; 砾粒土; 剪切回弹特性; 剪切回弹坡度

中图分类号: TU411; TV16 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)09-2010-09

作者简介: 王 智(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事土力学试验等方面的研究工作。E-mail: jarowl@qq.com。

Large-scale plane strain tests on mechanical properties of gravelly soils under unloading and reloading conditions

WANG Zhi¹, SHAO Shuai², SHAO Shengjun^{1,3}, YAN Guangyi⁴

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Department of Architecture and Urban Planning, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Aiming at the repetitive loading and unloading issue in the plane strain of water conservancy and transportation projects, the large-scale geotechnical triaxial apparatus of Xi'an University of Technology modified with a pressure chamber of plane strain, was used to conduct consolidation and drainage plane strain unloading-reloading tests on two types of gravelly soils under different confining pressures. The mechanical properties investigated include the stress-strain relationship and the unloading rebound strain and unloading-reloading rebound gradient of gravelly soils under plane strain conditions. The results show the particle roundness, pore ratio, parent rock strength and confining pressure of the gravelly soils can all affect the peak shear stress and shear dilation characteristics. The gravelly soils with good particle roundness and small pore ratio have lower peak stress and are more likely to exhibit shear dilation characteristics. Low parent rock strength promotes strain softening and reduces the peak stress, while the increasing confining pressure can suppress shear dilation and increase the peak stress. The volumetric strain and shear strain unloading rebound amount are related to the stress level and confining pressure. The rebound modulus first increases and then decreases with the increase of the stress level, and when the density is high, the rebound modulus is higher; The unloading rebound volumetric strain and the generalized shear strain are influenced by the stress level during unloading and the consolidation confining pressure, while the unloading-reloading rebound gradient is related to the proportion of elastic strain during the loading process. During the unloading-reloading process, the rotation of the principal stress axis is observed, and the stress in the non-strain direction is not always the intermediate principal stress. The rebound gradient is significantly greater than the initial tangent gradient, and the ratio of the rebound gradient to the initial tangent gradient decreases with the increasing confining pressure.

Key words: plane strain; unloading-reloading; gravelly soil; shear rebound characteristic; shear rebound gradient

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108342); 陕西省自然科学基础研究计划-引汉济渭联合基金项目(2019JLP-21, 2021JLM-50); 西安理工大学博士启动金项目(107-451122001)

收稿日期: 2023-07-17

*通信作者(E-mail: shaoshuai@xaut.edu.cn)

0 引言

砾石土(包括粗粒料、堆石料等)广泛用作路基和大坝等各种岩土工程的填筑材料^[1]。堆石坝、高填方路堤等交通及水利工程可视为平面应变条件。在填筑施工和运营过程中,如水库蓄排水、坡顶堆减载,土体受到不同的应力加-卸载过程,产生加载体胀和卸载体缩。不同土体在卸载过程中表现出不同的卸载体缩特性,这与土的物理性质、试验的应力路径、试验的边界条件和土的各向异性等因素有关^[2]。以往卸载-再加载作用下粗粒料力学特性研究多以三轴试验为主^[3-6],朱俊高等^[3]对粗粒土进行了卸载-再加载的三轴试验,分析了回弹模量与初始模量、围压和应力水平等之间的关系。褚福永等^[4]对3种粗粒土开展常规三轴卸载-再加载试验,分析了卸载体缩等力学特性,提出 K_{ur} 范围在 $(2.64\sim 4.60)K_i$ 。凌华等^[5]研究了两种砾石料的宽围压三轴加卸荷强度指标、变形参数,并指出回弹参数 K_{ur}/K_i 为 $1.98\sim 2.22$, n_{ur} 远大于 n_i 。

平面应变试验与三轴试验的最显著区别在于一对径向方向不产生应变,这种特殊应变边界条件会使土体表现出不同的力学特性^[7]。三轴条件下的回弹参数规律是否适用于平面应变状态需要开展进一步研究。因此本文对西安理工大学大型土工真三轴仪压力室进行平面应变改造,对两种砾石土开展了大型平面应变卸载-再加载试验,分析磨圆度、孔隙比对应力-应变特性的影响,对回弹变形特性、回弹参数等力学特性进行研究,可为平面应变类工程的有限元模拟参数选取提供理论依据。

1 试验措施

1.1 试验用土及制样

两种试验用土分别取自陕西省秦岭沣河河滩及某公路工程单位,分别记为土样A、土样B,筛选5种粒径范围,分别如图1、2所示。

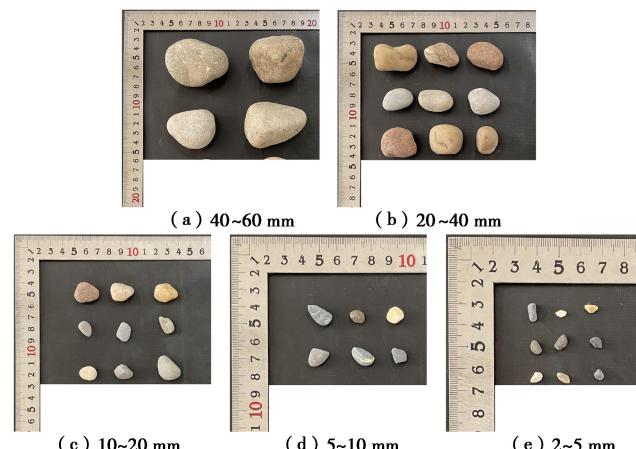


Fig. 1 Soil sample A

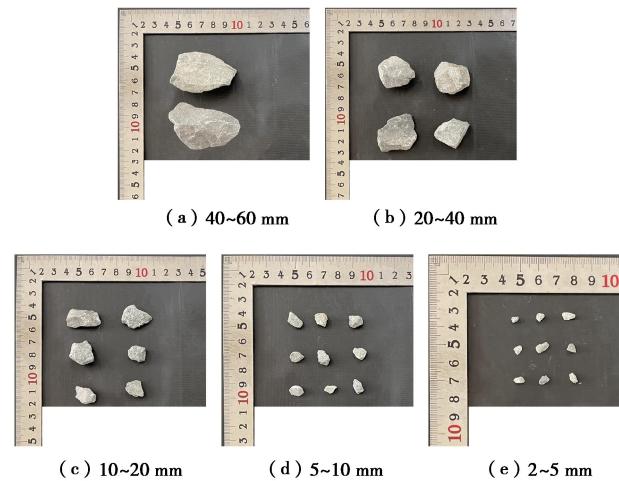


图2 土样B

Fig. 2 Soil sample B

土样A为粒径2~60 mm的圆砾,母岩为变质粉砂岩,主要矿物为石英、重晶石、方解石等,含少量云母;土样B为粒径2~60 mm的角砾,母岩为火山凝灰岩,主要矿物成分为斜长石和角闪石,含少量石英及长石。点荷载仪测得母岩单轴抗压强度分别为81.28, 119.76 MPa。试样级配相同,曲率系数 $C_c=1.49$,不均匀系数 $C_u=6.26$,工程分类为级配良好砾(GW)^[8],试验试样为长方体试样,其尺寸为长(300 mm)×宽(300 mm)×高(600 mm),试样和级配曲线如图3,试样物理性质指标见表1。

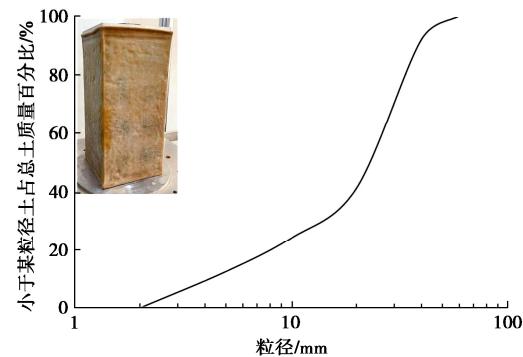


图3 试样和级配曲线

Fig. 3 Soil sample and its grading curve

表1 砾粒土物理性质指标

Table 1 Physical parameters of gravelly soils

砾粒土 编号	制样干密 度 ρ_d ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土粒相 对质量 密度 G_s	孔隙 比 e	相对 密实度 D_r	中值 粒径 d_{50}	点荷载 强度/ MPa
土样A	1.96	2.64	0.344	0.89	23.99	6.44
土样B	1.80	2.68	0.487	0.90	23.99	9.12

1.2 试验仪器及方案

试验所用仪器为平面应变改造后的西安理工大学大型土工真三轴仪^[9](图4)。仪器竖向加载方式为刚性双向对称加载,水平围压加压方式为柔性液压乳

胶囊加载。以背面安装有 6 个压力传感器的光面不锈钢板取代零应变方向上施加围压的乳胶囊，在装样过程中通过预拧紧 6 个压力传感器上的螺栓，使光面钢板与试样、压力传感器与压力室内壁紧密接触，从而限制试样在一对径向的应变发展，使试样处于平面应变状态。平面应变改造前后压力室内部如图 5 所示。



图 4 大型真三轴仪

Fig. 4 Large-scale true triaxial apparatus

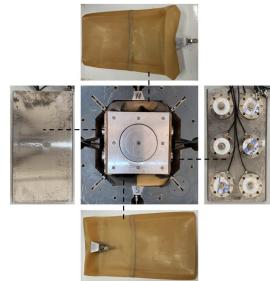


图 5 平面应变压力室

Fig. 5 Pressure chamber of plane strain

固结围压选取 100, 200, 300, 400 kPa。竖向加载速率为 0.6 mm/min^[9], 卸载-再加载试验中加载至竖向应变至 0.5%, 1%, 3%, 6%, 10% 时卸载, 竖向应力接近固结围压时再加载, 为保证卸载过程中弹性变形的恢复, 竖向卸载速率设为加载速率的 1/10, 即 0.06 mm/min, 轴向应变达到 15% 时结束试验^[10]。

2 卸载-再加载剪切特性

2.1 应力-应变曲线

图 6 为平面应变条件下两种砾粒土的卸载-再加载试验 (UR) 和单调加载试验 (ML) 的广义剪应力 q 与广义剪应变 ε_s 关系曲线图, q 与 ε_s 的定义为

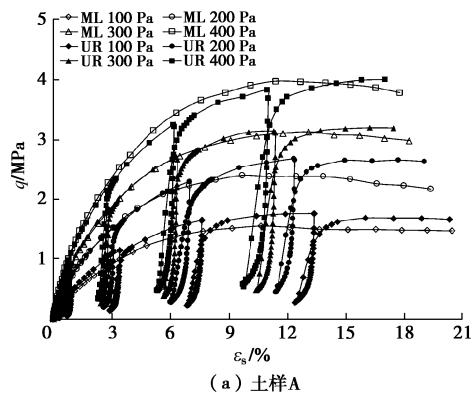
$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

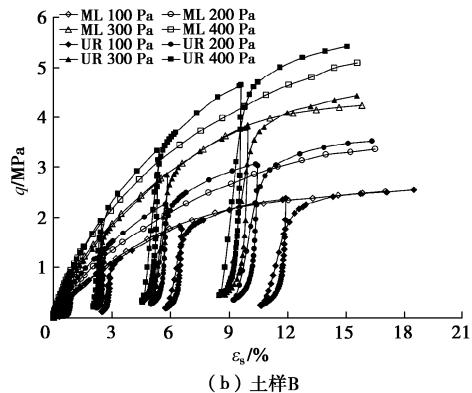
式中: σ_1 , σ_2 , σ_3 分别为大、中、小主应力; ε_1 , ε_2 , ε_3 分别为大、中、小主应变。

卸载-再加载试验中, 两种砾粒土的卸载段与再加载段均不重合, 包络形成滞回环, 卸载初始段的剪应变回弹量 $\Delta\varepsilon_s$ 很小, 随剪应力继续降低剪应变快速发生回弹, 应力水平越大则 $\Delta\varepsilon_s$ 越大, 滞回环面积增大。土样 A 在 100, 200 kPa 围压时, 最终加载段的峰值应

力低于前一加载段, 整体表现出轻微软化。围压增大后各加载段均呈硬化型, 曲线整体为弱硬化; 土样 A 在单调加载试验中均呈明显应变软化。土样 B 在两种试验中的各加载段 $q-\varepsilon_s$ 曲线均呈强硬化。土样 A 峰值应力较低及发生软化的原因在于其试样密实孔隙比小, 颗粒圆度较好使粒间咬合摩擦作用较弱, 竖向应力增大导致颗粒翻滚, 组构改变使粒间应力持续重新分布。且土样 A 强度较低更易发生裂解脆性破坏。



(a) 土样A



(b) 土样B

图 6 砾粒土卸载-再加载和单调加载 $q-\varepsilon_s$ 关系曲线

Fig. 6 $q-\varepsilon_s$ relation curves of gravelly soils under loading and unloading and monotonic loading conditions

2.2 侧向变形特性

侧向应变 ($-\varepsilon_3$) 与广义剪应力 q 及竖向应变 ε_1 的关系分别如图 7, 8 所示。平面应变卸载-再加载试验过程中砾粒土的侧向应变均表现为侧向膨胀变形。

$(-\varepsilon_3)-\varepsilon_1$ 初始加载段较小的广义剪应力由粒间咬合摩擦力承担, 试样在竖向应力作用下以压缩挤密为主, 因此竖向应变 $< 0.5\%$ 时侧向变形较小。试样随广义剪应力的增大难再压密, 粒间咬合摩擦力作用减弱, 土颗粒错动并向围压较小的侧向发生横向翻越, 侧向变形迅速增大。由于土样 A 磨圆度较好, 粒间更易产生错动, 且试样孔隙比小, 试样更为密实, 土粒易向外侧翻越; 磨圆度较差的土样 B 由于其多棱角性状使其粒间咬合摩擦力更大, 粒间较难发生错动。因此相同围压时土样 A 的侧向膨胀变形显著大于土样 B。而围

压增大会抑制侧向膨胀, 使侧向膨胀变形减小。

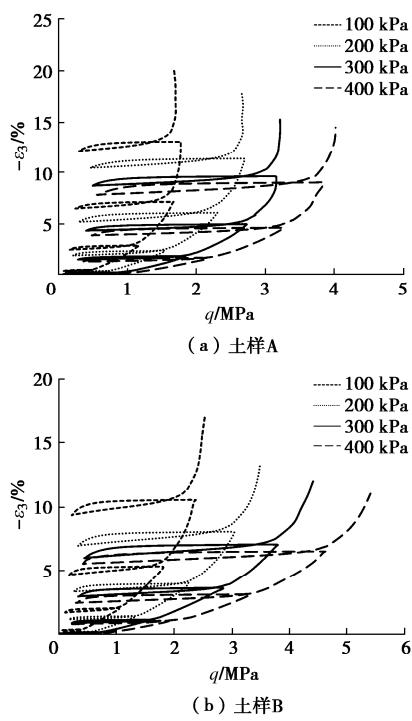


图7 砂砾土加-卸载 $(-\varepsilon_3-q)$ 关系曲线

Fig. 7 $(-\varepsilon_3-q)$ relation curves of gravelly soils under loading and unloading conditions

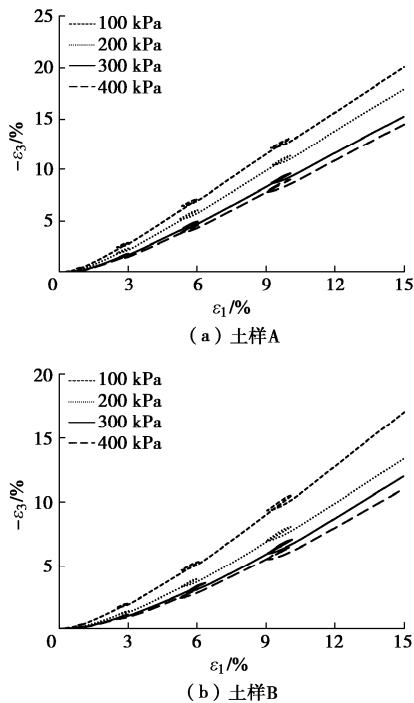


图8 砂砾土加-卸载 $(-\varepsilon_3)-\varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 8 $(-\varepsilon_3)-\varepsilon_1$ relation curves of gravelly soils under loading and unloading conditions

卸载初段 $(-\varepsilon_3)-q$ 曲线斜率近似为0, 侧向应变几乎不发生改变。卸载末段剪应力持续减小, 侧向应变

出现收缩回弹, 卸载段与再加载段同样围成滞回环砾粒土的组构在压密-松散-再压密过程中发生改变, 高应力水平时砾粒土颗粒破碎产生的细粒碎屑与小粒径砾粒土共同填充孔隙, 试样密度增大, 再加载过程中土颗粒更易发生错动, 因此再加载段斜率显著大于上一加载段, 侧胀变形更加明显。

2.3 广义剪应变和体积应变特性

(1) 广义剪应变规律

图9为平面应变加-卸载试验中砾粒土的广义剪应变 ε_s 与竖向应变 ε_1 关系曲线。竖向应变相同时围压越大则广义剪应变越小, 加载时广义剪应变随竖向应变增大而增大, 卸载时广义剪应变随竖向应变减小而减小, 卸载-再加载过程中也出现滞回圈, 广义剪应变与侧向应变随竖向应变的发展规律基本一致。

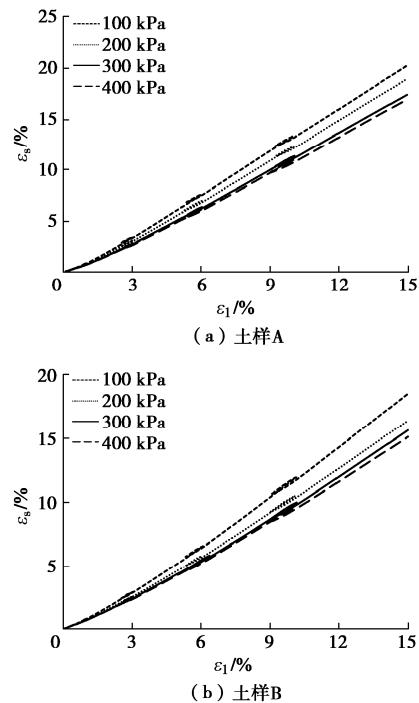


图9 砂砾土加-卸载 $\varepsilon_s-\varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 9 $\varepsilon_s-\varepsilon_1$ relation curves of gravelly soils under loading and unloading conditions

(2) 体积应变规律

砾粒土的体积应变 ε_v 与轴向应变 ε_1 关系如图10所示。两种砾粒土的体积应变整体均表现出先缩后胀的变化趋势, 同一土样条件下围压越高, 或相同围压时土样B较土样A, 体变由收缩向膨胀的转变点出现在更大的竖向应变。土样A在100~300 kPa围压条件下产生了体胀变形, 而土样B仅在100 kPa围压时表现出体胀, 土样A呈现出更加明显的剪胀特性。在竖向应变一致的条件下, 体胀取决于侧向应变的大小,

圆化程度好且孔隙比小的土样 A 的侧胀变形较大, 因此体变更易出现体胀。卸载 $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ 曲线表现为非线性特征, 与其前、后的加载 $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ 曲线围成滞回圈, 坚向应变越大则该现象越显著。再加载后的 $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ 曲线较上一加载段向正体变明显抬升, 持续加载使土颗粒排列稳定, 颗粒接触点易破碎处基本已破碎。卸载使细粒填充孔隙, 土粒组构再排列、再压密、再破碎, 因此再加载时体缩较上一加载更为明显。

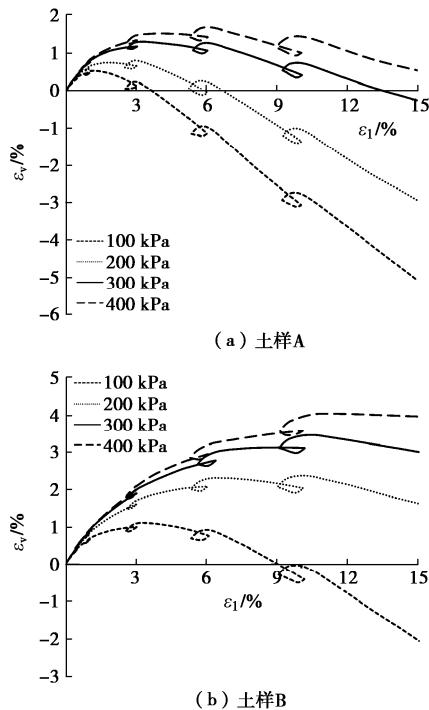


图 10 砂砾土加-卸载 $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ 关系曲线

Fig. 10 $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ relation curves of gravelly soils under loading and unloading conditions

(3) 卸载回弹变形规律

在卸载过程中剪应变回弹规律较好, 而体积应变回弹较为复杂, 即会出现回弹体缩也会出现回弹体胀。通过式(3)计算卸载点时应力水平, 并根据两种砾粒土在不同围压条件下各次加-卸载过程中的剪应变回弹量 $\Delta\varepsilon_s$ 与体积应变回弹量 $\Delta\varepsilon_v$, 分析不同应力水平卸载时的体积应变和广义剪应变回弹规律。

$$S = \frac{q_{ul}}{q_f} \quad (3)$$

式中: q_{ul} 为卸载点剪应力 (kPa); q_f 为破坏剪应力; S 为应力水平。

图 11, 12 分别为考虑应力水平和围压影响的体积应变回弹量与剪应变回弹量关系拟合曲线。平面应变状态下砾粒土的广义剪应变回弹量则与 S^2 呈近似线性关系, 体积应变回弹量则与 S^4 呈较好的线性关系, 可通过式(4), (5) 计算各围压条件下不同应力水平

时的卸载广义剪应变和体积应变的回弹量。

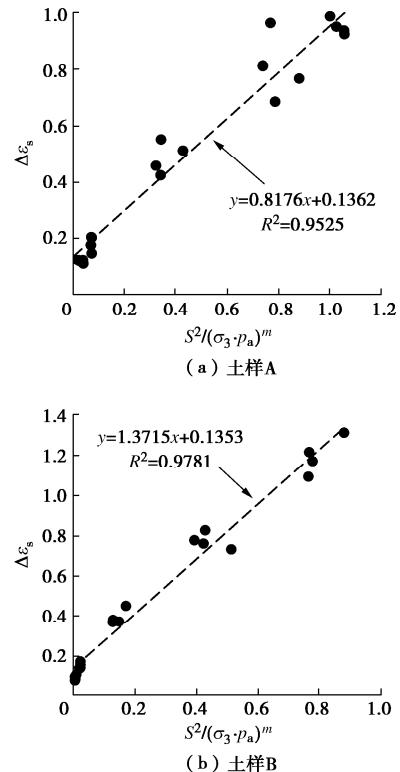


图 11 砂砾土加-卸载 $\Delta\varepsilon_s-S^2/(\sigma_3/p_a)^m$ 拟合曲线

Fig. 11 $\Delta\varepsilon_s-S^2/(\sigma_3/p_a)^m$ fitting curves of gravelly soils under loading and unloading conditions

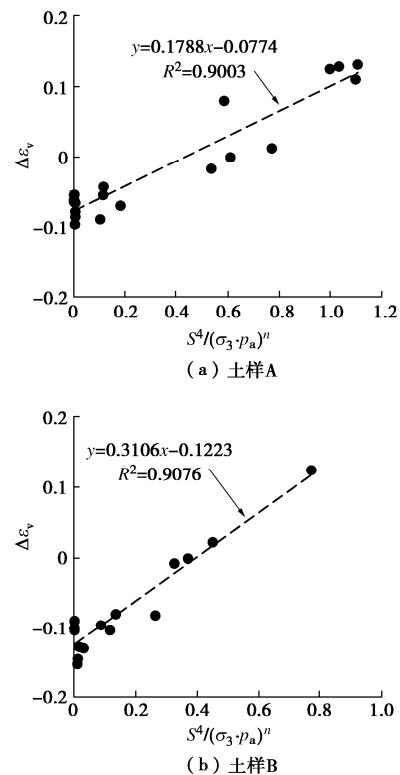


图 12 砂砾土加-卸载 $\Delta\varepsilon_v-(S^2)^2/(\sigma_3/p_a)^n$ 拟合曲线

Fig. 12 $\Delta\varepsilon_v-(S^2)^2/(\sigma_3/p_a)^n$ relation curves of gravelly soils under loading and unloading condition

$$\Delta\varepsilon_s = a S^2 \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m + b \quad . \quad (4)$$

式中: $\Delta\varepsilon_s$ 为剪应变回弹量; σ_3 为固结围压 (kPa); p_a 为标准大气压 (kPa); a, b, m 为拟合参数。

$$\Delta\varepsilon_v = c(S^2)^n \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n + d \quad . \quad (5)$$

式中: $\Delta\varepsilon_v$ 为体变回弹量; c, d, n 为拟合参数。

图 13 为各加载-卸载过程中的弹性体积应变增量 $\Delta\varepsilon_v^e$ 占总体积应变增量 $\Delta\varepsilon_v$ 百分比, 以及弹性广义剪应变增量 $\Delta\varepsilon_s^e$ 占总广义剪应变增量 $\Delta\varepsilon_s$ 百分比。可见弹性应变占比随应力水平增大也呈先增后减的规律, 低应力水平时土粒间主要表现为压缩挤密, 这部分变形以弹性为主。应力水平增大后粒间组构改变并出现颗粒破碎, 累积塑性应变增多, 弹性变形逐渐减少。

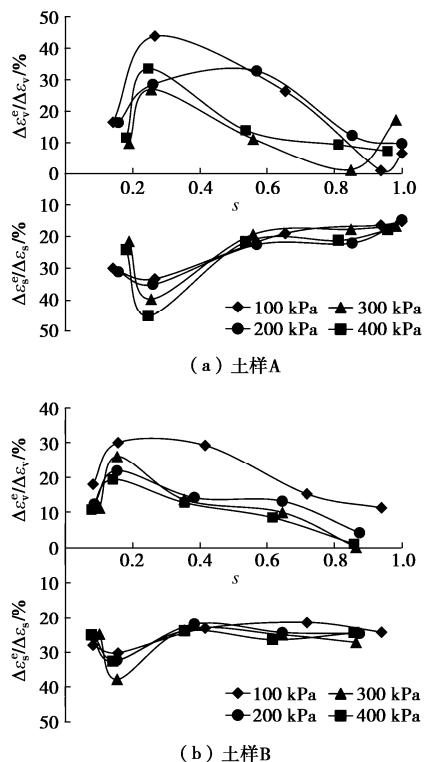


图 13 弹性应变占比与应力水平关系曲线

Fig. 13 Relation curves between elastic strain proportion and stress level

2.4 主应力轴旋转

有别于三轴试验, 平面应变试验中零应变方向的主应力并不是主动应力, 而是随轴向应力而变化的从动应力。李广信等^[11]通过承德中密砂的等围压平面应变卸载-再加载试验发现零应变方向上的主应力在剪切过程中并不一直为中主应力, 在土体接近破坏时是中主应力。将本文试验竖向应力记为 σ_1 , 钢板所受应力记为 σ_{II} , 液压囊应力记为 σ_{III} 。图 14 和图 15 为围

压为 400 kPa 时两种砾粒土料单调加载和卸载-再加载试验的应力 σ_i ($i=I, II, III$) 与轴向应变 ε_1 的关系曲线。

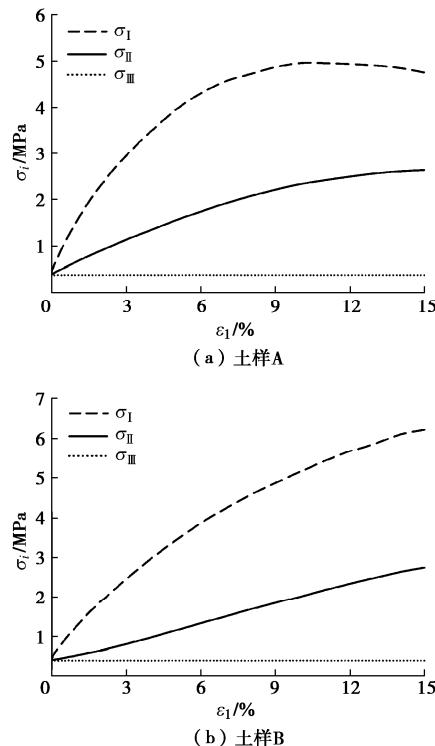


图 14 400 kPa 围压砾粒土单调加载应力-应变曲线

Fig. 14 Monotonic loading stress-strain curves of gravelly soils under confining pressure of 400 kPa

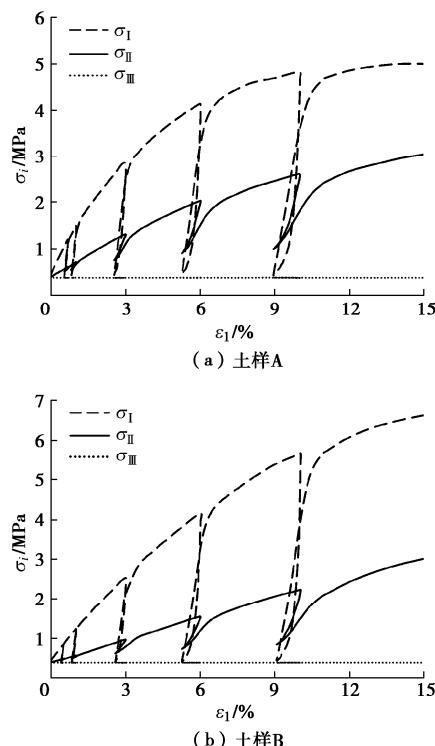


图 15 400 kPa 围压砾粒土加-卸载应力-应变曲线

Fig. 15 Loading and unloading stress-strain curves of gravelly soils under confining pressure of 400 kPa

单调加载试验中, σ_1 的增长大于 σ_{II} , 三向主应力-应变曲线无交叉, 主应力轴为 $\sigma_1=\sigma_I$, $\sigma_2=\sigma_{II}$, $\sigma_3=\sigma_{III}$, 主应力轴保持为图 16(a) 所示的应力状态; 在卸载-再加载平面应变试验中, σ_1 和 σ_{II} 由围压开始升高, σ_1 的加载段、卸载段和再加载段的斜率明显大于 σ_{II} , 两种砾粒土的 σ_1 应力路径与 σ_{II} 在卸载末段和再加载初段发生交叉, 均出现了主应力轴旋转现象, 卸载-再加载过程中主应力轴在图 16(a) 和图 16(b) 之间转换。在砾粒土的平面应变卸载-再加载试验中, σ_1 既会是大主应力和中主应力, σ_{II} 也并非一直为中主应力, 这与文献[11, 12]的研究结论一致, 李广信等^[11]认为平面应变减载过程中主应力轴旋转的原因在于零应变方向上存在由土的弹塑性的弹塑性减载屈服所反映的残余应力。

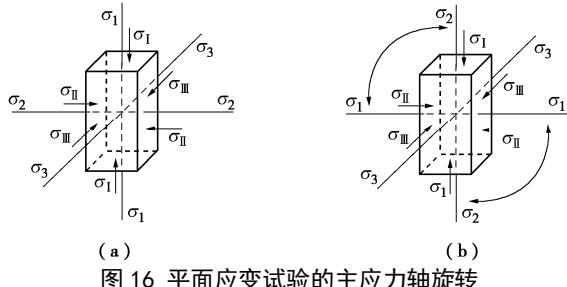


图 16 平面应变试验的主应力轴旋转

Fig. 16 Rotation of principal stress axis in plane strain tests

3 平面应变砾粒土回弹特性

以往对土体剪切和回弹的力学特性的研究采用求取模量等力学参数^[3-4, 6], 但在平面应变状态下模量存在不唯一性, 胡克定律增量形式如下所示:

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_1 &= \frac{1}{E} d\sigma_1 - \frac{\nu}{E} (d\sigma_2 + d\sigma_3), \\ d\varepsilon_2 &= \frac{1}{E} d\sigma_2 - \frac{\nu}{E} (d\sigma_1 + d\sigma_3), \\ d\varepsilon_3 &= \frac{1}{E} d\sigma_3 - \frac{\nu}{E} (d\sigma_1 + d\sigma_2). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在等围压平面应变状态中 $d\varepsilon_2=0$, 且 $d\sigma_3=0$ 。因此式(6)可简化为

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_1 &= \frac{1}{E} d\sigma_1 - \frac{\nu}{E} d\sigma_2, \\ d\sigma_2 &= \nu d\sigma_1, \\ d\varepsilon_3 &= -\frac{\nu}{E} (d\sigma_1 + d\sigma_2). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由泊松比定义: $\nu=-d\varepsilon_3/d\varepsilon_1$ 。

将式(8)代入式(7)可得

$$\left. \begin{aligned} E &= (1-\nu^2) \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1}, \\ E &= (1+\nu) \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

可见由式(9)所计算出的模量 E 并不一致。施维成等^[13]认为这是由于平面应变条件下模量 E 和泊松比 ν 存在各向异性。因此在考虑中主应力影响的基础上, 可采用 $q-\varepsilon_1$ 曲线各坡度讨论平面应变条件下的剪切回弹特性。

3.1 应力水平对回弹坡度的影响

取 $q-\varepsilon_1$ 曲线各卸载-再加载滞回圈两交点连线的斜率为回弹坡度 G_{ur} , 其与应力水平关系见图 17。

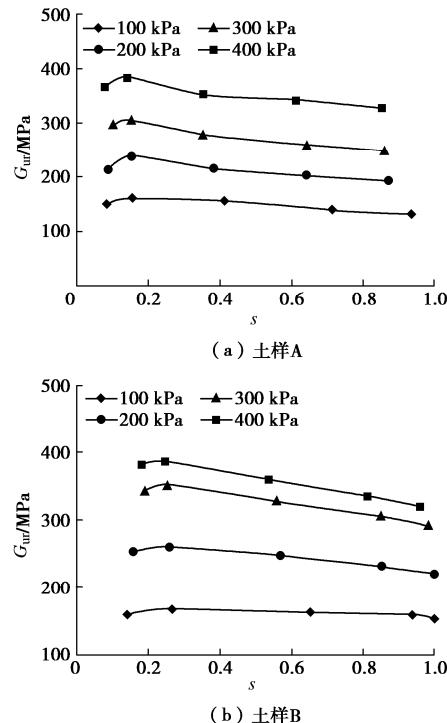


图 17 砾粒土的回弹坡度与应力水平关系曲线

Fig. 17 Relation curves between rebound gradient and stress level of gravelly soils

由图 17 可见, 两种砾粒土回弹坡度均随应力水平升高呈先增后减的变化规律, 土样 A 与土样 B 的回弹坡度峰值分别出现在应力水平为 0.25 和 0.15 左右, 随后回弹坡度持续下降。低应力水平时试样以体缩为主, 试样密度增大, 弹性势能较大, 表现为回弹坡度增大; 应力水平增大后试样出现体胀或体胀趋势, 试样密度降低使颗粒变为松散, 回弹坡度逐渐降低。

3.2 初始围压对回弹坡度的影响

图 17 可见相同围压条件下不同应力水平时的回弹坡度出现下降, 但降幅规律较小, 故可取相同围压条件下不同应力水平时回弹坡度平均值为该初始围压条件的回弹坡度。本文平面应变试验中的围压 σ_{III} 始终为小主应力 σ_3 , 因此仍可采用 Janbu 经验公式分析初始围压和回弹坡度之间的关系:

$$G_{ur} = l_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{m_{ur}}. \quad (10)$$

式中: l_{ur} , m_{ur} 为回弹坡度参数; p_a 为标准大气压 (kPa)。

式(10)等号两端取对数后可得

$$\lg\left(\frac{G_{ur}}{p_a}\right) = m_{ur} \lg\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right) + \lg l_{ur} \quad (11)$$

两种砾粒土的 $\lg(G_{ur}/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 关系如图 18 所示, 两者呈较明显线性关系。表明式(10)可合理表征平面应变状态砾粒土回弹坡度与围压关系。

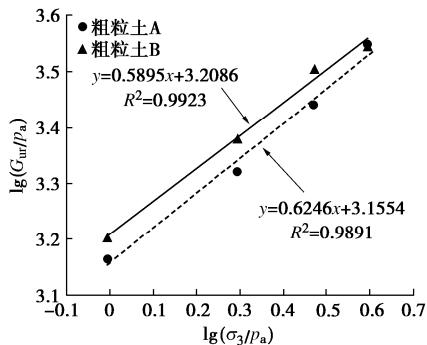


图 18 砾粒土 $\lg(G_{ur}/p_a)$ - $\lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线

Fig. 18 $\lg(G_{ur}/p_a)$ - $\lg(\sigma_3/p_a)$ relation curves of gravelly soils

3.3 回弹坡度与初始切线坡度关系

砾粒土的初始斜率通过单调加载平面应变试验求得, 初始坡度与围压关系可由式(12)求取, 等号两端取对数可得初始切线坡度参数 l_i 与 m_i 。

$$G_i = l_i p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{m_i} \quad (12)$$

式中: l_i , m_i 为初始切线坡度参数。

砾粒土的 $\lg(E_i/p_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 关系如图 18 所示, 两者同样有较好的线性关系。整理本文平面应变试验的坡度及其参数见表 2。

表 2 砾粒土坡度参数

Table 2 Gradient parameters of gravelly soils

土样编号	坡度参数					
	l_{ur}	l_i	m_{ur}	m_i	l_{ur}/l_i	m_{ur}/m_i
土样 A	188843	54739	0.512	0.648	3.45	0.79
土样 B	192531	57969	0.556	0.749	3.32	0.74

砾粒土的回弹坡度、初始坡度和坡度比 G_{ur}/G_i 汇总见表 3。两种砾粒土的坡度比 G_{ur}/G_i 范围在 2.55~3.39, 回弹坡度显著大于初始坡度。坡度比与围压存在乘幂函数关系, 可用式(13)表示, 式(13)等号两边取对数后 $\lg(G_{ur}/G_i)$ 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 呈明显线性关系 (图 19), 可见两种砾粒土的坡度比随围压增大而减小, 表明围压越大则 G_{ur} 与 G_i 差异越小。

$$\frac{G_{ur}}{G_i} = A \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^B \quad (13)$$

式中: A 与 B 为拟合参数。

表 3 砾粒土坡度和坡度比

Table 3 Gradient and gradient ratios of gravelly soils

土样编号	σ_3/kPa	G_{ur}/MPa	G_i/MPa	G_{ur}/G_i
土样 A	100	190	56	3.39
	200	265	81	3.27
	300	324	109	2.97
	400	397	139	2.86
土样 B	100	193	58	3.33
	200	281	97	2.99
	300	356	135	2.64
	400	411	161	2.55

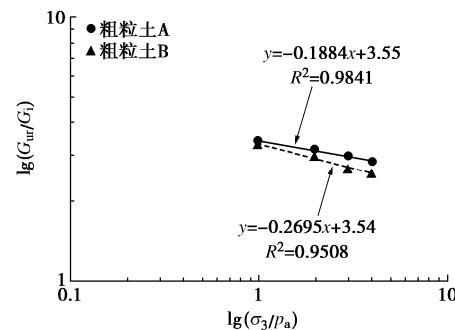


图 19 砾粒土 $\lg(G_{ur}/G_i)$ - $\lg(\sigma_3/p_a)$ 拟合线

Fig. 19 (G_{ur}/G_i) - (σ_3/p_a) fitting curves of gravelly soils

4 结论

(1) 颗粒圆度、孔隙比、母岩强度和围压对砾粒土卸载-再加载剪切峰值应力和体变特性产生影响。圆度好且孔隙比小的土样 A 侧向膨胀变形更显著, 体变易呈剪胀, 峰值应力较低。母岩强度较低的土样 A 在高应力水平时易破碎, 因其应变软化并降低峰值应力; 围压增大约束砾粒土侧向膨胀, 抑制剪胀体变, 提高剪切峰值应力。侧向应变回弹在卸载初始阶段较小, 呈近似线性, 随卸载持续而快速增大, 呈现非线性。

(2) 两种砾粒土的回弹斜率随应力水平增大先增后减, 不同围压条件下广义剪应变和体积应变的回弹量分别与 S^2 和 S^4 呈较好的线性关系。零应变方向应力在单调加载试验中始终为中主应力, 而在卸载和再加载过程中随竖向应力的大小而改变, 但变化速率比竖向应力更小, 出现主应力轴旋转。

(3) 初始切线坡度和回弹坡度在对数坐标中均与围压呈线性关系, 回弹坡度明显大于初始切线坡度, 两者比值和围压呈乘幂函数关系, 并随围压增大而减小。两种砾粒土的坡度参数比值 l_{ur}/l_i 分别为 3.45, 3.32, m_{ur}/m_i 分别为 0.79, 0.74, 由于平面应变条件下的弹性参数存在各向异性, 因此对平面应变工况应独立进行平面应变回弹试验, 测试其剪切和回弹参数。

参考文献:

- [1] ZHANG Jiu-chang, YUE Li, WANG Ru-bin. A generalised

- plastic model for gravel soils considering evolution of void ratio and particle breakage[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, **9**: 767821.
- [2] 李广信, 武世锋. 土的卸载体缩的试验研究及其机理探讨[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(1): 47-50. (LI Guangxin, WU Shifeng. Experimental research on volume-contraction of soil under unloading and examination of its mechanism[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(1): 47-50. (in Chinese))
- [3] 朱俊高, 王元龙, 贾华, 等. 粗粒土回弹特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(6): 950-954. (ZHU Jungao, WANG Yuanlong, JIA Hua, et al. Experimental study on resilience behaviour of coarse grained soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(6): 950-954. (in Chinese))
- [4] 褚福永, 朱俊高, 贾华, 等. 粗粒土卸载-再加载力学特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(4): 1061-1066. (CHU Fuyong, ZHU Jungao, JIA Hua, et al. Experimental study of mechanical behaviour of coarse-grained soil in unloading and reloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(4): 1061-1066. (in Chinese))
- [5] 凌华, 陈生水, 翟迎春, 等. 宽围压加卸荷条件下特高坝填筑料强度变形研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(1): 27-33. (LING Hua, CHEN Shengshui, ZHAI Yingchun, et al. Experimental study on strength and deformation of filling materials of super-high dams with wide confining pressures under loading and unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(1): 27-33. (in Chinese))
- [6] 王永鑫, 邵生俊, 王智, 等. 真三轴剪切作用下粗粒料卸荷特性的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(7): 1503-1512. (WANG Yongxin, SHAO Shengjun, WANG Zhi, et al. Experimental study on the unloading characteristics of coarse aggregate under true triaxial shear loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(7): 1503-1512. (in Chinese))
- [7] WU T Y, ZHANG T H, GU C, et al. Cyclic behavior of saturated clays in plane strain state[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2022, **148**(1): 1-14.
- [8] 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. (Standard for Engineering Classification of Soil: GB/T 50145—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese))
- [9] 邵生俊, 王永鑫. 刚柔混合型大型真三轴仪研制与验证[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(8): 1418-1426. (SHAO Shengjun, WANG Yongxin. Development and verification of large-scale true triaxial apparatus with rigid-flexible-flexible loading boundary mechanism[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(8): 1418-1426. (in Chinese))
- [10] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [11] 李广信, 黄永男, 张其光. 土体平面应变方向上的主应力[J]. *岩土工程学报*, 2001, **23**(3): 358-361. (LI Guangxin, HUANG Yongnan, ZHANG Qiguang. The principal stress of soil in the direction of plane strain[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(3): 358-361. (in Chinese))
- [12] 李广信, 郭瑞平. 土的卸载体缩与可恢复剪胀[J]. *岩土工程学报*, 2000, **22**(2): 158-161. (LI Guangxin, GUO Ruiping. Volume-contraction in unloading of shear tests and reversible dilatation of soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(2): 158-161. (in Chinese))
- [13] 施维成, 朱俊高, 张坤勇, 等. 平面应变条件下粗粒土的变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, **34**(1): 101-108. (SHI Weicheng, ZHU Jungao, ZHANG Kunyong, et al. Experimental study of deformation characteristics of coarse-grained soil under plane strain condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(1): 101-108. (in Chinese))