

# 大尺寸裂隙性黄土的直剪试验

卢全中, 彭建兵, 范文, 孙刚臣

(长安大学地质工程与测绘工程学院 西安市 710054)

**摘 要:** 介绍了一种改装的便携式直剪仪, 并用该仪器测试了不同形成时期、不同加载方式作用下大尺寸裂隙性黄土样的抗剪强度。结果显示在不同正应力作用下的剪应力—剪切位移曲线具有弱硬化型特点; 近期形成的裂隙性黄土抗剪强度指标  $c$  和  $\varphi$  值比形成时间相对较早的裂隙性土样小; 分级加载方式测得的内聚力比连续加载方式大, 而内摩擦角比连续加载时小, 但变幅不大; 分级加载方式测得的内聚力比剪切带的分级加载方式大, 但这两种方式对内摩擦角的影响不大。

**关键词:** 裂隙性黄土; 直剪试验; 大尺寸; 加载方式

我国黄土的分布面积约  $4.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 其中黄土高原地区连续覆盖的黄土面积达  $2.7 \times 10^5 \text{ km}^2$ <sup>[1]</sup>。黄土中存在大量不同规模、不同成因、不同力学性质、不同产状、不同尺度和不同时期的裂隙(缝)<sup>[2]</sup>, 这些裂缝、裂隙或节理对黄土的强度及其性质的影响程度不一, 为便于称谓和突出裂隙对黄土力学性质的控制作用, 我们将包含有裂缝、裂隙、节理或结构面的黄土统称为裂隙性黄土。黄土裂隙是分割黄土的结构面, 使得黄土体各向异性, 土质恶化; 是侵蚀土壤、洞穴的优势面, 使得黄土高原选择性侵蚀加剧, 水土流失严重; 是孕育地质灾害的控制和分离面, 使得黄土高原地裂缝、滑坡、崩塌、地面塌陷等灾害频繁发生; 是地下水的运移通道和储存场所, 成为黄土地区找水的有利部位<sup>[2]</sup>。因此, 弄清裂隙性黄土的强度特征, 是研究黄土地区水土流失、灾害防治、黄土体工程性质及其相关岩土工程问题的基础工作之一。

土体结构面对土体工程性质及其工程问题的影响已引起有关学者的关注<sup>[3~7]</sup>, 但对土体结构面的研究才刚刚起步, 还没有全面、深入和系统地展开。目前对裂隙性黄土强度的研究主要侧重于黄土滑坡的滑带土, 而对于黄土中广泛分布的地裂缝、构造节理等的强度特征涉及较少。由于裂隙的厚度及土样尺寸对黄土的性质影响较大, 当试样的直径或高度大于 4 倍裂缝间距时, 试样尺寸对其强度的影响基

本消失<sup>[8]</sup>, 故采用常规的直剪试验设备和试样尺寸可能偏差较大, 不能反映试样的各向异性特点, 需考虑较大的试样尺寸。鉴于此, 本文用改装的便携式直剪仪测定了不同形成时期的大尺寸裂隙性黄土试样的抗剪强度, 分析了不同加载方式对抗剪强度指标的影响。

## 1 大尺寸裂隙性黄土的直剪试验设备

在原成都地质学院生产的便携式直剪仪(该仪器只适用于扰动土样)的基础上, 经过改进, 将其改装成可以测试原状土样和扰动土样(砂土、碎石土和重塑土等)抗剪强度指标的便携式直剪仪。该仪器体积较小, 长 60 cm, 且一些主件可分开装运, 试验采用大尺寸土样(长 20 cm, 宽 16 cm, 高 8~10 cm)。因此, 该直剪仪对一些特殊土(如非均质土、裂隙土、裂缝带土、滑带土等)具有较好的适用性, 而这些特殊土不宜采用常规的小尺寸试样室内直剪仪, 往往只有通过现场的原位试验才能获得其强度参数, 同时可根据试样尺寸要求和试验设计的取样深度将土样取出拿到任何方便的场所进行, 不需较长时间呆在洞室或坑槽中, 从而具有不影响施工、安全、高效和代表性好的优点。

改装的直剪仪属于应力式, 垂直荷载和水平荷载通过油压千斤顶施加, 其应力由精密压力表的读数经过千斤顶标定曲线转换成单位剪切面积的应



力。剪切位移和垂直位移用百分表量测,进而可换算成应变。试验时的正应力和剪应力可根据实际工程情况选择不同的加载方式,如正应力可分为分级施加和一次性施加,剪应力也可以采用分级施加和按一定的剪切速率连续施加,同时还可以观测土样沿着预置的具有一定厚度的剪切带发生剪切破坏的强度及剪切面(带)特征。

## 2 试验土样的特征及物理性质

本次试验土样采用三原地裂缝不同裂缝带和不

同深度的裂隙性黄土样,对于同一裂缝带的土样其取土深度和裂缝充填物性质相同。其中,探槽 TC10 中的土样埋深 3.0 m,含水量相对较大,裂缝由于近期活动使其充填物较新;平洞 PD2 中的土样埋深 10.0 m,含水量较小,裂缝多期活动性明显,充填物较老。各土样的裂缝特征及其基本物理性质指标列于表 1。

## 3 大尺寸裂隙性黄土的直剪试验过程

为减少或避免取样、运输和制样过程对裂隙性

表 1 裂隙性黄土样的裂缝特征及物理性质

土样编号	裂缝特征	$w/\%$	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$w_L/\%$	$w_P/\%$
TC10-2	裂缝宽 5~7 mm,沿土样剪切方向稍有起伏,充填物为浅黄色粉质粘土,可塑、松软,属于近 1~2 年内活动时的充填物。	19.7	16.7	26.8	17.1
TC10-3		19.5	16.3	26.3	17.5
PD2-1	裂缝宽 5~9 mm,沿剪切方向稍有起伏,充填物为灰黄色粉质粘土含水量较少,硬塑,稍有胶结,近 50 年内未活动,形成时间相对较早。	9.06	15.0	27.0	21.0
PD2-2		9.11	15.1	27.1	21.3
PD2-3		9.43	15.6	27.6	21.6

土样的扰动,将便携式直剪仪带到野外场地,用与试验土样尺寸配套的矩形取土器直接在设计深度处削取土样,同时要根据土样的压缩性将土中裂隙(缝)放在取土器的中间或偏上位置,以便在正应力作用下裂隙(缝)刚好位于剪切面处。土样取出后连同取土器一起置于剪切盒之上并将土样压入到剪切盒中。

试验过程正应力和剪应力采用相同的加载方式,共分 3 种工况:(1)分级加载,即在分级施加了垂直荷载后,按预先估计的抗剪强度分级(不小于 8 级)施加水平剪力,量测每级剪应力作用下的剪切位移和垂直位移,当每级剪力作用下的剪切位移稳定后,再施加下一级剪力,直到土样剪坏或剪切位移达到 20 mm 时停止试验;(2)连续加载,即在连续施加了垂直荷载后,以一定的剪切速率(0.2 mm/min)连

续施加剪力,按剪切位移每间隔 0.2 mm 分别记录对应的剪应力和垂直位移,直到土样剪坏或剪切位移达到 20 mm 为止;(3)为体现土体裂缝中可能存在的局部未充填情况,试验时在上下剪切盒之间放上 10 mm 厚的压条,待分级垂直荷载施加后,将压条取出,然后分级施加剪应力,直至土样剪坏或剪切位移达到 20 mm 为止。最后一种工况土样的变形破坏在中间形成剪切带,并允许有沿剪切带的侧向变形。

## 4 大尺寸裂隙黄土的直剪试验结果及分析

### 4.1 大尺寸裂隙性黄土的剪应力~应变特征

大尺寸裂隙性黄土直剪试验的剪应力( $\tau$ )~剪切位移( $u$ )曲线见图 1。

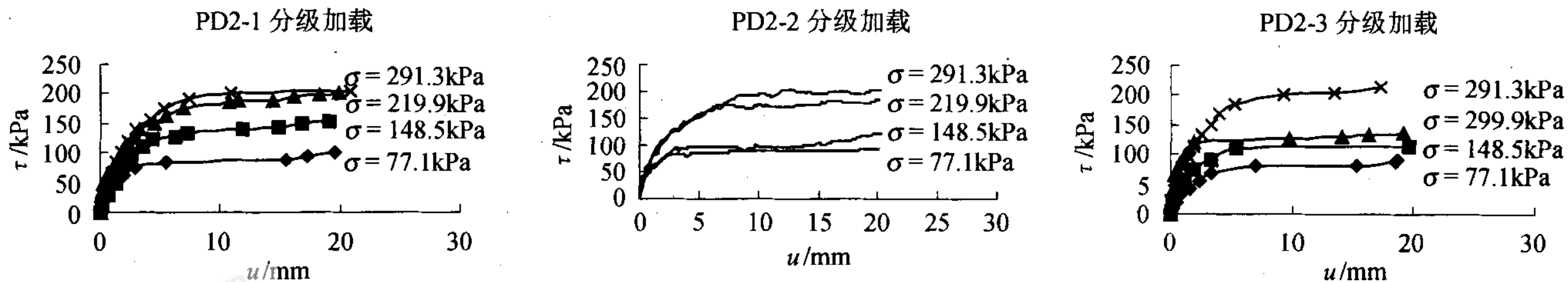


图 1 PD2 中试样的  $\tau \sim u$  曲线

由图 1 可知,PD2 中各土样在不同正应力作用下的剪应力~剪切位移曲线都较相似,均具有弱硬

化型特点,其剪切变形可分为弹性、弹塑性和塑性 3 个阶段。其中,弹性变形量最小,弹塑性变形量较大,



塑性变形量最大。弹性阶段近似为直线,随着正应力的增大,斜率逐渐变大;弹塑性阶段为一曲线,随着正应力的增大,曲线弧段也越长;塑性阶段近似为平缓的直线。各阶段的变形量也与试验过程的正应力有关,正应力较小时( $\leq 150$  kPa),弹性和弹塑性阶段的变形量均较小;正应力较大时( $\geq 150$  kPa),弹性和弹塑性阶段的变形量相对也较大。

#### 4.2 大尺寸裂隙性黄土的抗剪强度及其结果分析

计算抗剪强度时,取剪应力( $\tau$ )与剪切位移( $u$ )曲线上剪应力的峰值为抗剪强度,无峰值时取剪切位移12 mm 所对应的剪应力为抗剪强度。大尺寸裂隙性黄土直剪试验的抗剪强度指标列于表 2,  $\tau \sim \sigma$  曲线分别见图 2 和图 3。

表 2 裂隙性黄土样的抗剪强度指标

土样编号	剪切方式	$c$ /kPa	$\varphi$ /( $^{\circ}$ )
TC10-2	分级加载	31	21.8
TC10-3	连续加载	23	22.0
PD2-1	分级加载	53	28.6
PD2-2	连续加载	34	30.0
PD2-3	剪切带的分级加载	31	28.5

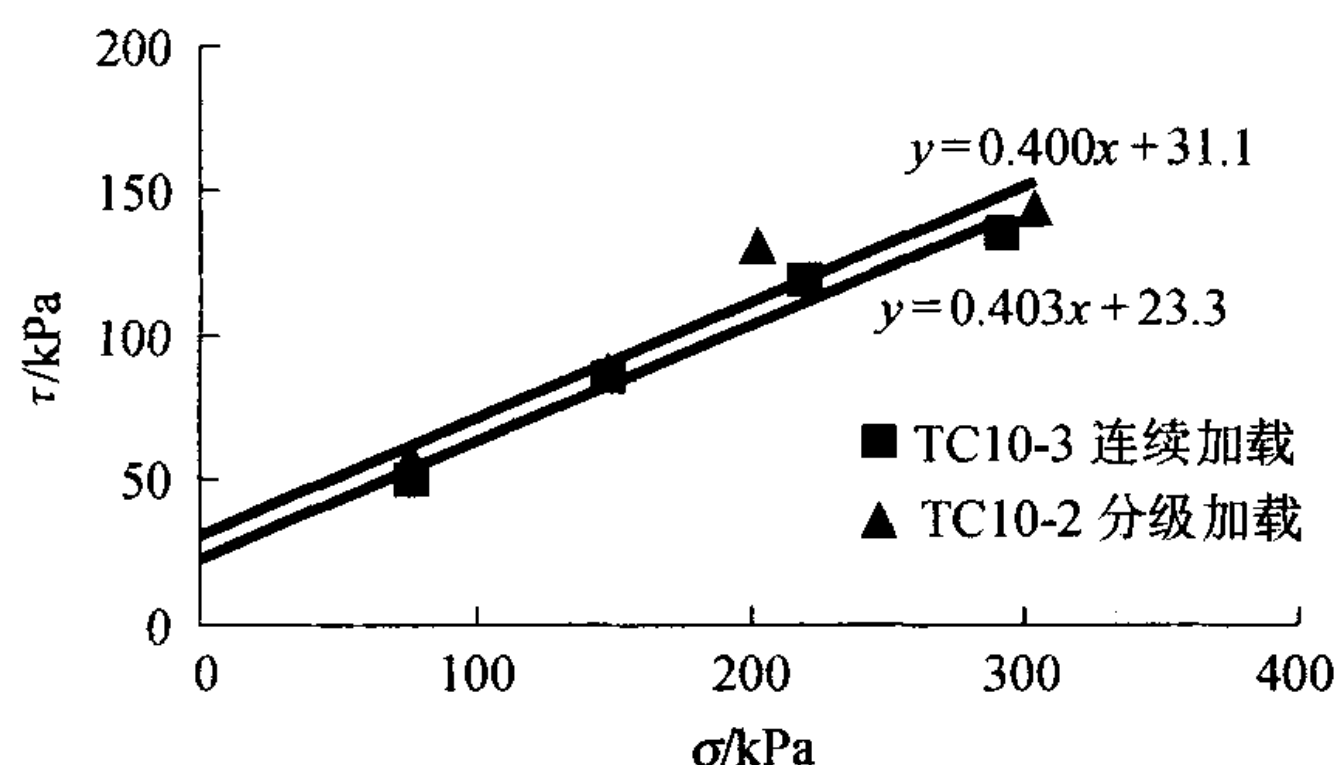


图 2 TC10 中试样的  $\tau \sim \sigma$  回归曲线

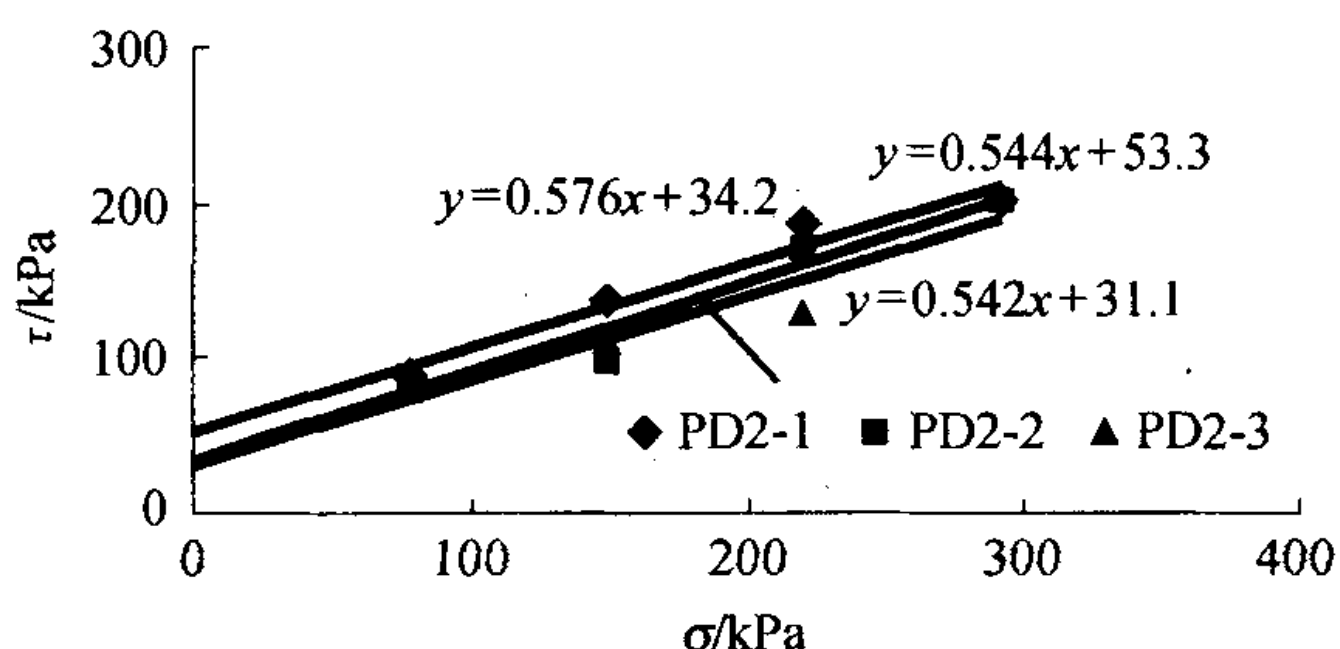


图 3 PD2 中试样的  $\tau \sim \sigma$  回归曲线

从表 2、图 2 和图 3 可以看出,TC10 中的裂隙近期活动频繁,其充填物松软,含水量较高,因此强度也较低,测得的抗剪强度指标  $c$  和  $\varphi$  值小;而对于裂隙形成时间相对较早的 PD2 中的裂隙性土样,由于

透水性较强,裂缝充填物含水量较低,胶结程度相对好些,测得的抗剪强度指标  $c$  和  $\varphi$  值大。

无论是新近充填还是形成时间相对较早的裂隙性黄土,不同的加载方式对测得的抗剪强度影响较大。主要体现在分级加载方式测得的内聚力比连续加载方式大,TC10 中试验土样的内聚力偏大 8 kPa,PD2 中土样的内聚力偏大 19 kPa;分级加载方式测得的内摩擦角比连续加载时稍小,但变幅不大,TC10 中试验土样的内摩擦角偏小  $0.2^{\circ}$ ,PD2 中土样的内摩擦角偏小  $1.4^{\circ}$ 。其原因可能是分级加载方式中各级荷载作用下土样的缓慢趋稳变形过程有助于土样的进一步压密和颗粒的定向排列;连续加载方式可认为是无限个分级荷载在土样远未达到变形稳定就快速施加下一级荷载的过程,此时的土样压密效果相对前者要差些,颗粒也来不及调整方向就进入下一轮的剪切变形。由于内摩擦角所反映的摩擦强度是由土颗粒接触面或颗粒与胶结物质接触面上的摩擦产生,起主要作用的是土颗粒大小及其形态,而这些颗粒的局部定向排列对摩擦角的影响不是很大,所以两种加载方式测得的内摩擦角变幅较小。

同种裂隙性黄土的分级加载和剪切带的分级加载方式对测得的抗剪强度值也有不同影响。分级加载方式测得的内聚力比剪切带的分级加载方式大,两者相差 22 kPa(见表 2),而两种加载方式对内摩擦角影响不大。造成内聚力变化较大的原因可能与剪切带的分级加载过程中,剪切带附近的土颗粒存在侧向变形,有助于应力的消散。

#### 5 结论与讨论

(1) 改装的便携式直剪仪可以测试大尺寸的原状土样和扰动土样的抗剪强度,对非均质土、裂隙土、裂缝带土、滑带土等特殊土具有较好的适用性,具有不影响施工、安全、高效、代表性好的优点。试验时的正应力和剪应力可根据实际工程情况选择不同的加载方式。

(2) PD2 中各裂隙性黄土样在不同正应力作用下的剪应力—剪切位移曲线都较相似,均具有弱硬化型特点,其剪切变形可分为弹性、弹塑性和塑性 3 个阶段。各阶段的变形量与试验过程的正应力有关,正应力  $\leq 150$  kPa 时,弹性和弹塑性阶段的变形量均较小;正应力  $\geq 150$  kPa 时,弹性和弹塑性阶段的变形量相对也较大。

(3) 近期形成的裂隙性黄土由于充填物松软,含



水量较高,测得的抗剪强度指标 $c$ 和 $\varphi$ 值小;形成时间相对较早的裂隙性土样,由于裂缝充填物含水量较低,胶结程度相对好些,测得的 $c$ 和 $\varphi$ 值大。

(4)分级加载方式测得的内聚力比连续加载方式大,而内摩擦角比连续加载时小,但变幅不大;分级加载方式测得的内聚力比剪切带的分级加载方式大,但这两种方式对内摩擦角的影响不大。

(5)土体结构面不一定是一条平面或规则的曲面,因此沿裂缝剪切的大尺寸土样直剪试验的代表性和真实性要好于小尺寸试样,但同组大尺寸试样的含水量、密度等条件难以保持一致,使得试验结果离散,给理论分析也带来了不便。

#### 参考文献:

[1] 刘东生,等. 黄土与环境[M]. 科学出版社,1985.

- [2] 卢全中,彭建兵,陈志新,等. 黄土高原地区黄土裂隙发育特征及其规律研究[J]. 水土保持学报,2005,19(5).
- [3] 唐大雄,刘佑荣,张文殊,等. 工程岩土学[M]. 地质出版社,1999.
- [4] 张咸恭,王思敬,张倬元,等. 中国工程地质学[M]. 科学出版社,2000.
- [5] 孙广忠,孙毅. 地质工程学原理[M]. 地质出版社,2004.
- [6] 蒋建平,章杨松,罗国煜. 基于土体中结构面的岩土工程问题探讨[J]. 工程地质学报,2002,10(2).
- [7] 蒋建平,章杨松,罗国煜. 土体宏观结构面及其对土体破坏的影响[J]. 岩土力学,2002,23(4).
- [8] 沈珠江,陈铁林. 岩土破损力学—结构类型与荷载分担[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(13).

## Direct Shear Tests of Large-size Fissured Loess

LU Quan-zhong, PENG Jian-bing, FAN Wen, SUN Gang-chen

(Geology Engineering and Surveying Department, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** A refitted portable direct shear apparatus is introduced. Using this apparatus shear strength of large-size fissured loess samples formed in different time are tested with different loading methods. The results show that curves of  $\tau \sim u$  under different normal stress are little harden. The values of cohesion and friction angle of newly formed fissured loess samples are smaller than those of older samples. The values of cohesion under stepped loading are larger than those under continuously loading, while values of friction angle under stepped loading are smaller with a little variation. And values of cohesion under stepped loading are larger than those under stepped loading with shear zone, but the two methods have little influence on values of friction angle.

**Key words:** fissured loess; direct shear test; large-size; loading method

### 昆曼国际大通道思小段通车

2006年4月6日,昆曼国际公路云南思茅至小勐养高路公路比预计工期提前80 d建成通车。

昆曼国际大通道思小高速公路是我国第一条穿越国家级热带雨林自然保护区的高速公路,也是云南省建设生态环保公路的成功范例。思小高速公路全长97.7 km,全程双向4车道,设计行车时速60 km,于2003年6月20日正式开工建设。思小高速公路全线有三分之一的路段穿越西双版纳热带雨林保护区,为有效保护沿线生态环境,建设者们在建设理念上大胆创新,坚持“保护、恢复”并重的原则,遵循“人与自然和谐发展”和“自然、和谐、平衡、唯美”的原则,努力保护自然生态环境,实现了“车在路上行,人在画中游”的美好愿望,把思小高速公路建成了一条集热带雨林风光、乡土文化、人文元素和现代科技于一体的高速公路。

昆曼国际大通道是建设中国—东盟自由贸易区的重要基础设施,是大湄公河次区域经济交通合作的重点项目之一,也是亚洲公路网的重要组成部分。昆曼公路全长1 818 km,从昆明起,连接老挝、泰国,并与马来西亚至新加坡的高速公路相连。