

交通荷载下黏土路基填料振-剪耦合 安全失效试验研究

宣寿通 赵沁来

(温州苍泰高速公路有限公司, 浙江温州 325000)

【摘要】 长期交通荷载作用下, 山区高速公路黏土路基易因内部初始损伤扩展形成剪切带, 进而引发突发失稳灾害。为揭示含损伤路基的动力剪切破坏特性, 采用多功能土体-结构物界面循环剪切试验仪, 通过预制剪切面模拟路基原生缺陷, 重点探究了交通荷载频率、路基土含水率及法向应力幅值对剪切安全性能的影响规律。结果表明: 荷载频率增加会小幅提升下峰值剪切应力, 但显著增大了其对应的剪切位移; 含水率变化对下峰值剪切应力的影响呈先降后升的非单调趋势, 低含水率下观察到明显的应力弱化现象; 法向应力幅值的增大则能显著增强下峰值剪切应力。上、下峰值剪切应力差 $\Delta\tau$ 随剪切位移呈“上凸型”增长, 并在大位移阶段随频率升高而减小; 同时, $\Delta\tau$ 随含水率及法向应力的增加表现出显著的指数增长特性。上、下峰值状态对应的等效内摩擦角范围分别为 $23^\circ \sim 45^\circ$ 和 $15^\circ \sim 40^\circ$, 且均随法向应力幅值的增加而增大。研究成果可为路基动力失稳预警及安全评估提供数据支撑。

【关键词】 山区高速公路; 黏土路基; 交通荷载; 初始损伤; 剪切特性; 峰值剪切应力; 等效内摩擦角

【中图分类号】 U416.1; TU435

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0125

Experimental study on safety failure of clay subgrade filler under vibration-shear coupling subjected to traffic loads

XUAN Shoutong ZHAO Qinlai

(Wenzhou Cangtai Expressway Co., Ltd., Wenzhou 325000, Zhejiang, China)

【Abstract】 Under long-term traffic loading, the clay subgrade of mountainous highways is prone to form shear bands due to the expansion of internal initial damage, which can subsequently trigger sudden instability disasters. To reveal the dynamic shear failure characteristics of damaged subgrades, this study employs a multifunctional soil-structure interface cyclic shear tester. By simulating the original defects of the subgrade with prefabricated shear surfaces, the study focuses on investigating the influence of traffic loading frequency, subgrade soil moisture content, and normal stress amplitude on shear safety performance. The results indicate that an increase in loading frequency slightly enhances the peak shear stress but significantly increases its corresponding shear displacement. The effect of moisture content on the peak shear stress exhibits a non-monotonic trend, decreasing first and then increasing. A notable stress weakening phenomenon is observed at low moisture content. An increase in normal stress amplitude significantly enhances the peak shear stress. The difference between the upper and lower peak shear stresses ($\Delta\tau$) increases in an “upward convex” manner with shear displacement, and decreases with increasing frequency during the large displacement stage. Additionally, $\Delta\tau$ exhibits a significant exponential growth characteristic with the increase of water content and normal stress. The equivalent internal friction angles corresponding to the upper and lower peak states range from 23° to 45° and 15° to 40° , respectively, and both increase with the increase of normal stress amplitude. The research findings can provide data support for early warning of subgrade dynamic instability and safety enhancement.

【Key words】 mountain highways; clay subgrade; traffic load; initial damage; shear characteristics; peak shear stress; equivalent internal friction angle

0 前言

在山区高速公路建设安全稳定性研究领域, 交

通荷载长期作用下的路基动力失稳问题亟待攻克。

受复杂地形限制, 山区路基常处于高填深挖工况, 其

内部易形成由地质构造或施工扰动诱发的原生裂隙。在重载交通循环剪切作用下, 初始缺陷易演化为贯通剪切带, 导致突发性滑移失稳^[1-3]。揭示交通荷载频谱特性(如荷载频率效应^[4-5])、路基含水率^[6]及轴重应力水平^[7]等关键参数对含缺陷路基渐进式剪切破坏的影响规律, 是提升山区路基服役安全性的核心科学问题。

目前, 既有研究多基于三轴试验探究土体动力响应。王启云等^[8]通过全压正弦函数模拟车长频率1~3倍的动态加载, 构建了路基填料动力本构关系; 龙尧等^[9]发现红砂岩在交通荷载谱作用下呈现颗粒破碎-重组动态平衡, 存在极限破碎级配特征; 孙建宇等^[10]证实黄河粉土抗液化能力随密实度增加、循环应力比降低而增强。值得关注的是, 现有研究多基于理想完整土体开展, 未能充分考虑山区路基普遍存在的初始损伤效应^[11-12]。事实上, 天然土体在沉积、压实中形成的初始裂隙、结构弱面或溶蚀孔隙等缺陷, 会显著改变其在交通循环荷载下的动力响应机制。李又云等^[13]针对压实黄土的动三轴试验表明, 初始含水量和干密度差异会导致残余应变累积速率的分异: 当含水率高于最优值3%时, 振陷量增加约40%, 证实了初始物理状态缺陷会加速动力荷载下的变形累积。王良川^[14]在山区岩溶高铁路基土研究中, 观察到含溶蚀孔隙的土体在循环荷载下孔隙水压力增速提高2倍, 表明地质缺陷会弱化土体排水能力并加剧液化风险。相较于整体变形分析, 直剪试验通过预设剪切面可精准捕捉交通荷载对结构弱面的定向损伤机制。刘飞禹等^[15]揭示法向应力波动显著弱化土体抗剪强度, 且干燥工况下强度衰减幅度达饱和状态的2.3倍; 陈宪麦等^[16]通过接触力链观测, 阐明循环剪切导致颗粒接触网络拓扑重构与力学性能劣化。

上述成果为交通荷载-结构弱面相互作用研究奠定方法基础。同时表明初始损伤会改变土体微结构完整性、孔隙水力联系及颗粒接触网络。这种高陡边坡路基原生缺陷在“行车振动-剪切变形”耦合作用下, 会引发接触力链断裂重组等非线性响应, 导致剪切带加速扩展。为此, 本研究依托自主研发的土体-结构物界面循环剪切试验仪, 构建含预制剪切面的类路基黏土试样, 系统研究交通荷载频率、含水率及法向应力幅值对缺陷路基渐进破坏的影响机制, 系统分析了不同荷载频率、含水率及法向应力幅值对剪切应力-剪切位移关系及抗剪强度指标的影响。研究成果可为山区高速公路在交通荷载下路基动力失稳预警及安全评估提供数据支撑。

1 试验前期准备

1.1 试验黏土物理参数

试验所用黏土采自苍南至泰顺高速公路路基填土, 其颗粒组成以粉粒为主, 粒径范围主要集中在0.075~0.005 mm, 细粒含量较高。根据现场取样测定, 该黏土的天然含水率为17.6%, 密度为2.09 g/cm³。为进一步了解其物理特性, 依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)进行了相关测试, 具体物理指标见表1。同时, 通过击实试验获得了击实曲线(见图1), 以确定其最优含水率和最大干密度等关键参数。同时, 给出了黄河粉土的级配曲线(见图2)。

表1 试验土体物理参数
Tab. 1 Test soil physical parameters

液限/%	塑限/%	塑性指数	最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
32.27	15.06	17.21	14.45	1.962

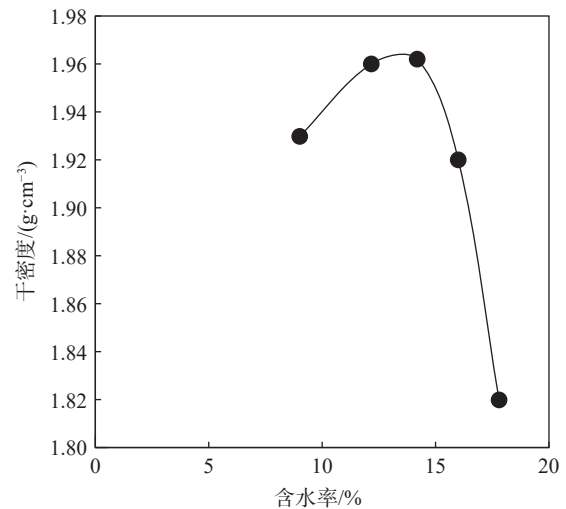


图1 黄河粉土击实曲线

Fig. 1 Compaction curve of Yellow River silt

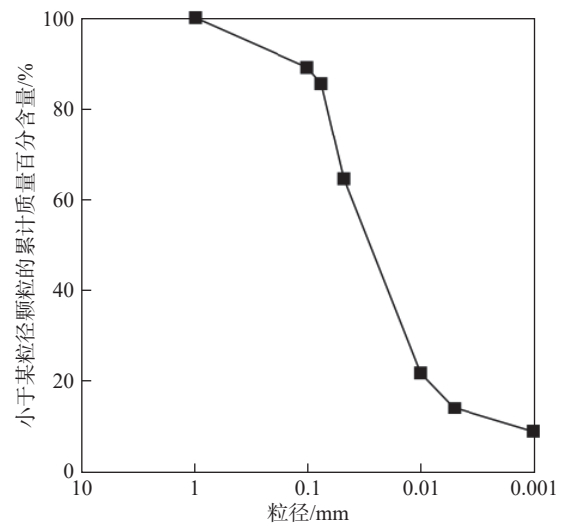


图2 黄河粉土级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of Yellow River silt

1.2 试验装置

试验装置采用自主研发的多功能土体-结构物界面循环剪切试验仪,试验剪切箱示意如图3所示。试验仪主要由上、下剪切盒组成,用于放置土体试样。法向应力和水平推力分别由高精度伺服电机系统进行闭环精确控制和施加,有效保障了试验过程中荷载的高度稳定性与可重复性。循环荷载通过剪切箱上部的法向应力加压杆施加,模拟实际工程中的动态荷载条件。剪切盒的尺寸设计为16 cm(长)×8.5 cm(宽)×16 cm(高),上剪切盒尺寸为16 cm(长)×8.5 cm(宽)×20 cm(高),以适应不同试验需求。试验所用黏土试样的尺寸为12 cm(长)×7 cm(宽)×12 cm(高),确保试样与剪切盒之间的接触面积和边界条件符合试验要求。本研究利用直剪试验仪的特性来固定剪切面位置。具体步骤如下:制备好的类路基黏土试样在直剪仪中先施加预定的法向应力进行固结;随后,固定上剪切盒,通过水平伺服电机驱动下剪切盒施加水平位移,从而在上下剪切盒之间产生初始剪切裂缝。在此过程中,借助竖向加压杆施加循环法向应力,以协同控制初始缺陷的生成及后续稳定剪切面的形成,具体装置示意图见图3。

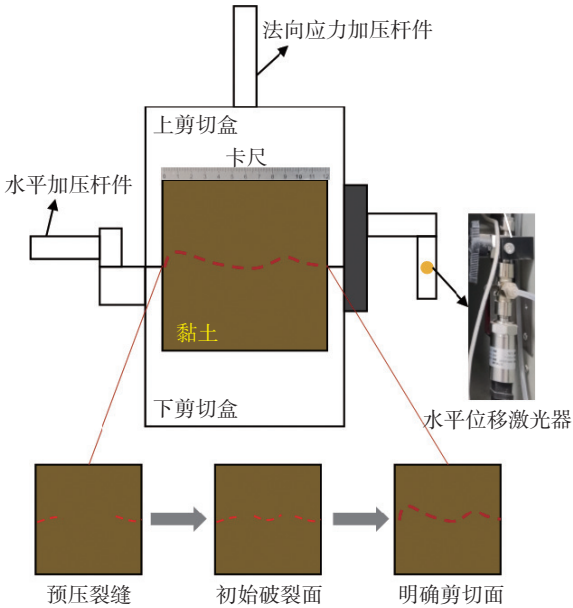


图3 试验剪切箱示意及预剪切面
Fig. 3 Test shear box and pre-shear surface

此外,试验中水平方向采用位移伺服控制。对于剪应力的测量,使用轮辐式压力传感器实时采集剪切过程中的动态剪切力 F 。该传感器响应速度快、稳定性好,能够有效捕捉剪切力在过程中的瞬时波动与变化趋势,从而避免因信号延迟或失真导致的测量误差。获取剪切力 F 后,通过其与剪切盒接触面积

A 的比值计算得到剪应力。对于剪切位移的测量,则采用高分辨率激光位移传感器,其精度可达0.001 mm,能够与剪切力同步、精确地记录土体试样在剪切全过程中的位移变化。

1.3 试验方案

本试验采用循环荷载剪切方法,研究荷载频率、含水率及法向应力幅值对黏土力学性能的影响。荷载频率设置为0.5, 1, 2 Hz,法向应力幅值分别为10, 30, 60 kPa,含水率选择10%(低于最佳含水率)、15%(接近最佳含水率14.45%)和20%(高于最佳含水率),以全面分析不同工况下黏土的剪切特性。其中选择0.5~2 Hz频段主要基于前期调研和文献分析,该频段被认为是表征常见车辆(尤其是中重型车辆)荷载作用下路基动力响应的关键敏感频段,能有效反映路基土体在此主要激励范围内的变形与疲劳特性^[17]。试验中,循环荷载加载路径如图4所示,剪切速率恒定为1 mm/min,直至土体发生剪切破坏。为确保试验条件的一致性,每种工况下的土样均先进行预压处理,预压应力为50 kPa,持续时间为1 h,以稳定土体结构并消除初始不均匀性。试验共设计27组,具体方案见表2,系统研究了不同荷载频率、含水率及法向应力幅值对黏土剪切应力-剪切位移关系及抗剪强度指标的影响。

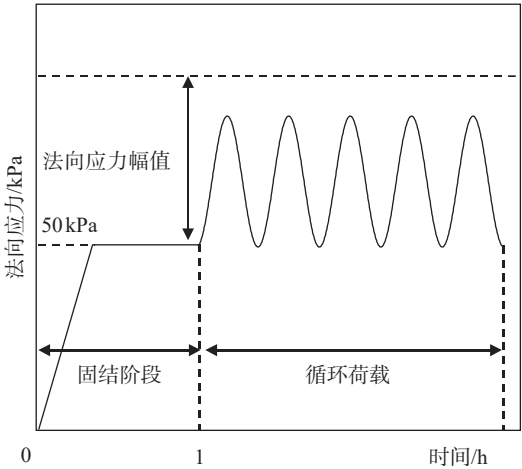


图4 循环荷载加载路径
Fig. 4 Cyclic loading path

2 各因素下黏土路基剪切特性分析

为了更好地分析各因素对黏土剪切特性的影响,本文以荷载频率1Hz、含水率15%、法向应力幅值30 kPa为基准,采用控制变量的形式对剪切应力-剪切位移曲线进行分析。由于试验施加的是法向应力幅值,这会导致剪切应力曲线存在上剪切应力 τ_t 和下剪切应力 τ_b ,两者之间的差值为剪应力,定义为 $\Delta\tau$ 。

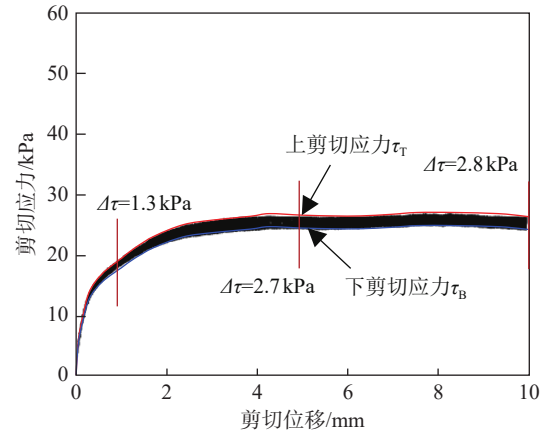
表 2 试验方案
Tab. 2 Test plan

荷载频率/Hz	含水率/%	法向应力幅值/kPa
0.5	10	10
		30
		60
	15	10
		30
		60
	20	10
		30
		60
1	10	10
		30
		60
	15	10
		30
		60
	20	10
		30
		60
2	10	10
		30
		60
	15	10
		30
		60
	20	10
		30
		60

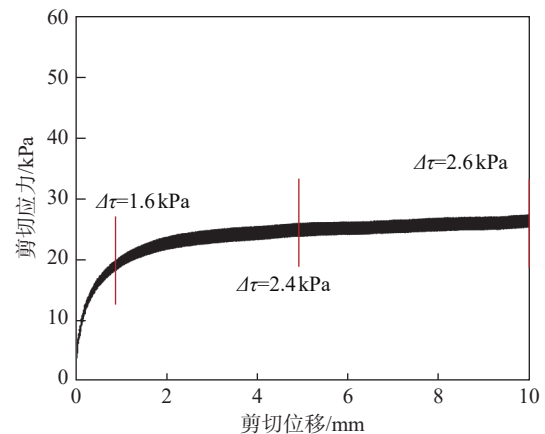
为了保证路基的受振安全,考虑最不利情况,对下剪切应力 τ_B 进行分析。

2.1 荷载频率对剪切特性的影响

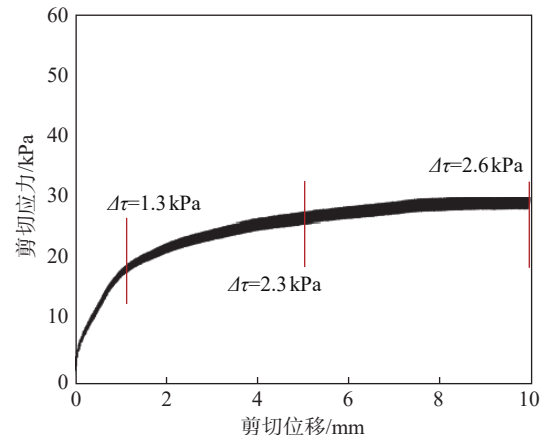
图 5 展示了低频 0.5 Hz、中频 1 Hz 和 高频 2 Hz 下黏土路基剪切应力-剪切位移关系的动态响应特征,可以看出,三种频率下剪切应力均随位移呈非线性增长,但演化路径差异显著。在低频工况下,初始剪切刚度约为 4 kPa/mm,剪切应力在初始阶段(0 ~ 2 mm)快速上升,在剪切位移 2 mm 后增速开始放缓,在 6 mm 附近达到峰值剪切应力,其值约为 24 kPa,之后剪切应力趋于稳定,剪切应力-剪切位移关系表现为典型的弹塑性行为。在中频工况下,初始剪切刚度降低至 2.8 kPa/mm,在剪切位移 8 mm 附近出现峰



(a) 荷载频率 0.5 Hz



(b) 荷载频率 1 Hz



(c) 荷载频率 2 Hz

图 5 不同荷载频率下剪切应力-剪切位移关系

Fig. 5 Shear stress-shear displacement relationship under different loading frequencies

值剪切应力,其值约为 25 kPa。在高频工况下,初始刚度降至 1.9 kPa/mm,在剪切位移 10 mm 时达到峰值剪切应力,其值约为 28 kPa,较 0.5 Hz 工况提升了约 11%,这可能与高频振动下颗粒密实化有关,剪切应力-剪切位移关系表现出独特的应变硬化特征。在实际工程中,低频工况需关注 2 mm 前的刚度衰减,累计损伤占比达到 71%,而高频工况应重点监测

6~10 mm 位移区间的硬化效应,该区间的应力增幅占到全程的 10%。从总体上看,随频率增加,峰值剪切应力小幅上升,但达到峰值剪切应力所需的位移逐渐增大。

分析上、下剪切应力差值 $\Delta\tau$ 的变化规律,可以反映循环法向应力作用下,不同因素对路基土体内部强度变化范围的影响^[18]。选取了剪切位移为 1 mm、5 mm 和 10 mm 三个特征点进行对比分析。如图 6 所示,随着剪切位移的增加, $\Delta\tau$ 呈“上凸型”增长趋势。在剪切位移为 1 mm 时,三种频率工况下的 $\Delta\tau$ 值集中在 1.3~1.6 kPa,差别不大。在剪切位移发展至 5 mm 时,频率效应开始显现,低频工况下的 $\Delta\tau$ 值达到 2.7 kPa,而中频和高频工况分别降至 2.4 kPa 和 2.3 kPa,呈现随频率升高而降低的变化规律。剪切位移 10 mm 时的变化规律与 5 mm 时基本一致。

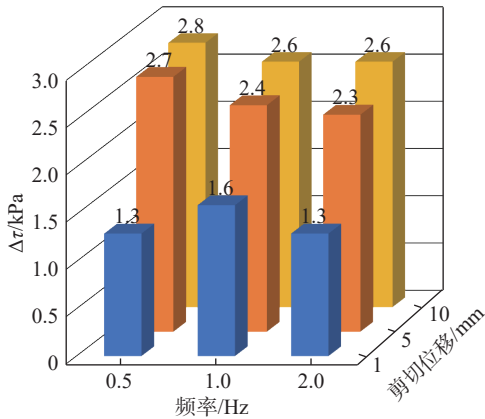
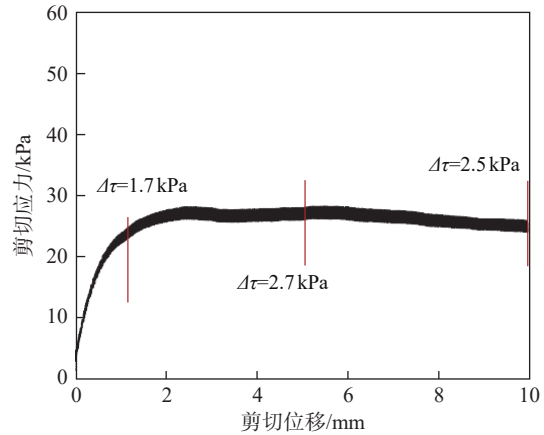


图 6 不同荷载频率下差值 $\Delta\tau$ 的变化规律

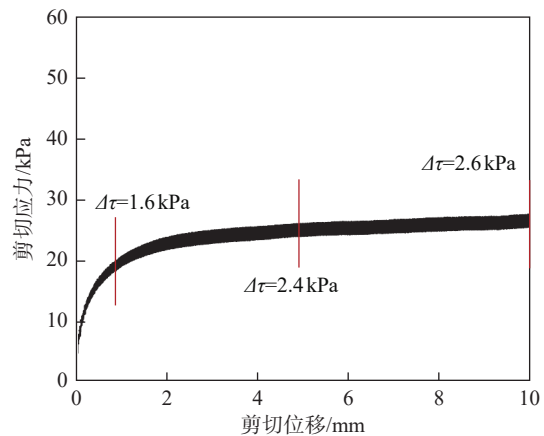
Fig. 6 The variation law of the difference $\Delta\tau$ under different load frequencies

2.2 含水率对剪切特性的影响

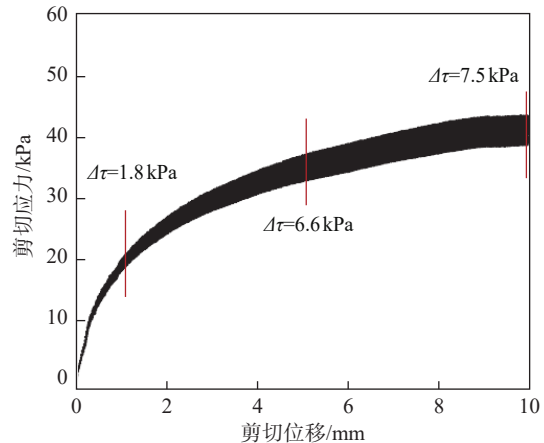
图 7 展示了不同含水率下剪切应力-剪切位移关系的演变规律。可以看出,含水率 10%、15% 和 20% 的路基土在峰值剪切应力后的动力响应分别表现为略有弱化、平稳强化、塑性强化三种状态。在低含水率 10% 工况下,初始剪切刚度为 4.0 kPa/mm,在 6 mm 附近达到峰值剪切应力,该值约为 26 kPa,之后剪切应力出现弱化,这与水膜薄弱导致的颗粒接触网络突发性解体有关。在含水率 15% 工况下,初始刚度降至 2.5 kPa/mm,在 10 mm 附近达到峰值剪切应力,该值约为 24 kPa,在剪切位移 2 mm 后,剪切应力处于小幅硬化状态,其硬化机制源于水膜润滑促进颗粒重排。在高含水率 20% 工况下,初始刚度降至 1.5 kPa/mm,在剪切位移 10 mm 时达到峰值剪切应力,该值约为 37 kPa,水分通过增强毛细力和胶结作用充当“结构调节剂”,剪切应力表现出显著的塑



(a) 含水率 10%



(b) 含水率 15%



(c) 含水率 20%

图 7 不同含水率下剪切应力-剪切位移关系

Fig. 7 Shear stress-shear displacement relationship under different water contents

性强化特征。值得注意的是,20% 含水率下临界位移阈值为 8.2 mm,较含水率 10% 的工况延后了约 60%。通过分析剪切位移为 1, 5, 10 mm 三个特征点对应的上、下剪切应力差值 $\Delta\tau$,发现 $\Delta\tau$ 随剪切位移增加呈上凸性增长趋势。在 1 mm 位移时,三种含水率的 $\Delta\tau$ 差异较小;但在 5 mm 和 10 mm 时, $\Delta\tau$ 随含

水率增加呈现指数型增长,特别是在 10 mm 位移时,含水率 20% 的 $\Delta\tau$ 值比含水率 10%、15% 工况高出约 3 倍(见图 8)。这是由于含水率升高显著增厚黏土颗粒表面的结合水膜,削弱颗粒间引力,在循环剪切下,颗粒更易分离、重排和定向,结构更快弱化,导致维持相同剪切变形所需的应力差 $\Delta\tau$ 指数型增大。

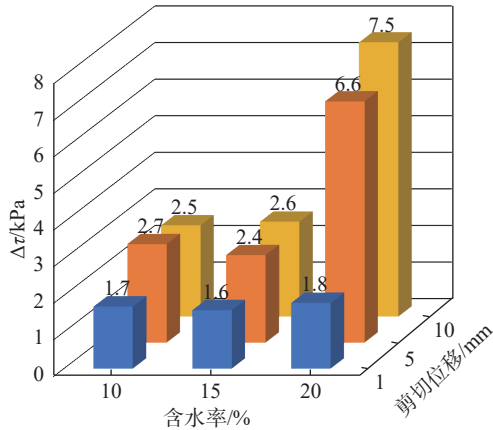


图 8 不同含水率下差值 $\Delta\tau$ 的变化规律

Fig. 8 The change rule of difference $\Delta\tau$ under different water content

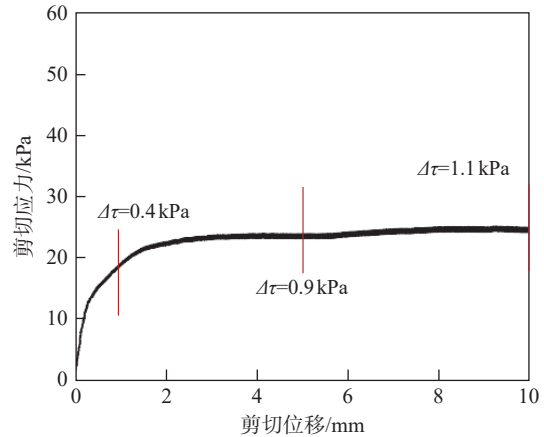
2.3 法向应力幅值对剪切特性的影响

图 9 展示了法向应力幅值 10, 30, 60 kPa 下的剪切应力-位移的关系,可以看出在低法向应力幅值 10 kPa 工况下,初始剪切刚度为 2.5 kPa/mm,在剪切位移 6 mm 时达到峰值剪切应力,该值约为 23 kPa,之后剪切应力趋于稳定。在中法向应力幅值 30 kPa 工况下,初始剪切刚度提升至 3.0 kPa/mm,在剪切位移 10 mm 时达到峰值剪切应力,该值约为 24 kPa,较 10 kPa 工况提升约 20.6%。在高法向应力幅值 60 kPa 工况下,初始剪切刚度增大至 3.5 kPa/mm,在剪切位移 10 mm 时的峰值剪切应力约为 27 kPa。剪切应力表现出的非线性强化现象可能与法向应力下黏土颗粒重组及孔隙填充导致的密实化有关。总体来看,随法向应力幅值的增加,峰值剪切应力显著提升,相同位移下的应力响应也明显增强。剪切位移为 1, 5, 10 mm 时的上、下剪切应力差值 $\Delta\tau$ 随剪切位移增加呈“上凸型”增长趋势,且在所有位移点处, $\Delta\tau$ 均随法向应力幅值的增加呈现指数型上升特征(见图 10)。这是由于法向应力幅值增大使土体更密实,动力循环作用下,高接触应力引发塑性变形累积显著加剧,克服这种强化的能量耗散机制及结构损伤所需的循环剪应力差 $\Delta\tau$ 呈指数增长。

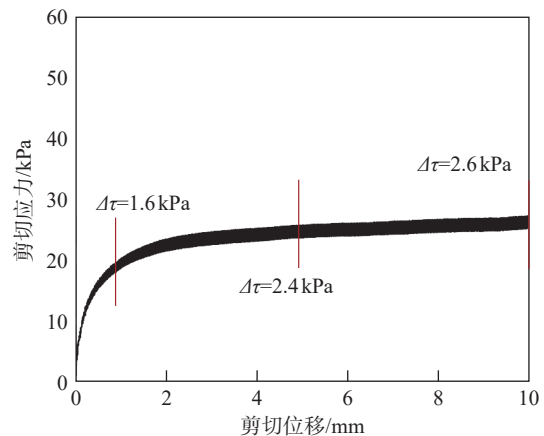
3 等效内摩擦角分析

3.1 等效内摩擦角的变化规律

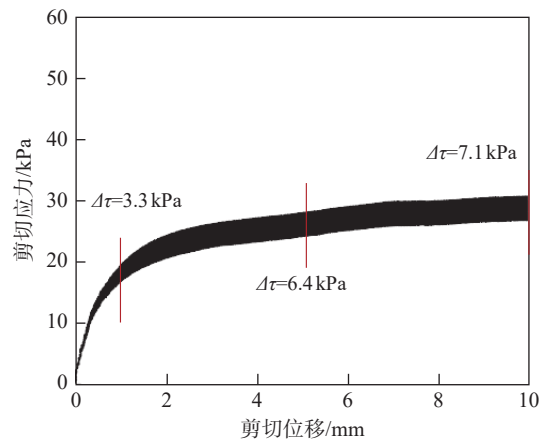
观察图 5—图 10 可以发现,由于试验加载条件



(a) 法向应力幅值 10 kPa



(b) 法向应力幅值 30 kPa

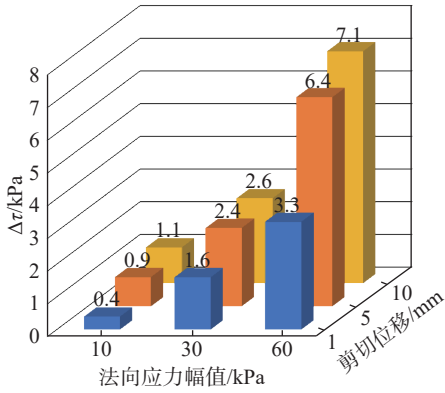


(c) 法向应力幅值 60 kPa

图 9 不同法向应力幅值下剪切应力-剪切位移关系

Fig. 9 Shear stress-shear displacement relationship under different normal stress amplitudes

为循环荷载,这势必会产生两种峰值剪切应力,即上峰值剪切应力和下峰值剪切应力(见图 11)。为了更细致地描述循环法向应力作用下土体抗剪强度响应特性的上下边界,进而有助于揭示循环荷载导致的峰值强度参数波动范围,参考刘飞禹等^[18]的研究,即本文选取循环过程中的上峰值应力和下峰值应力,作为峰值阶段的两个代表性应力状态,应用莫尔-库仑

图 10 不同法向应力幅值下差值 $\Delta\tau$ 的变化规律Fig. 10 The variation law of difference $\Delta\tau$ under different normal stress amplitudes

(Mohr-Coulomb)强度准则求解对应的上界与下界静力峰值强度参数(即上、下峰值内摩擦角)。公式如下:

$$\tau_p = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中: τ_p 为峰值剪切应力; σ_n 为法向应力幅值; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力。此处采用等效摩擦系数法将黏聚力转化为内摩擦角, 即等效内摩擦角^[19-22], 公式为:

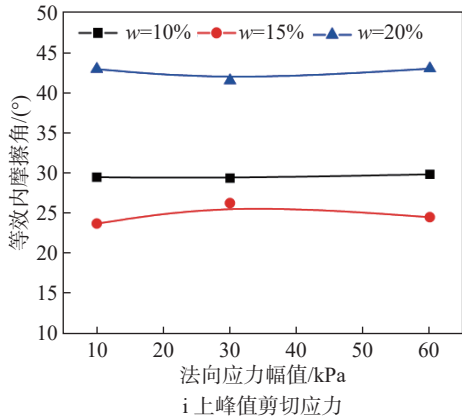
$$\tau_p = \sigma_n \tan \varphi^* \quad (2)$$

转化为:

$$\varphi^* = \begin{cases} \arctan\left(\frac{\tau_{pT}}{\sigma_n}\right) \\ \arctan\left(\frac{\tau_{pB}}{\sigma_n}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: φ^* 为等效内摩擦角; τ_{pT} 为上峰值剪切应力; τ_{pB} 为下峰值剪切应力。

对原始数据点进行适当的平滑处理(如采用移动平均趋势线), 并在图中同时保留原始数据点(以散点形式)和清晰的趋势线。令 φ_p^* 为上峰值剪切应力对应的等效内摩擦角, φ_T^* 为下峰值剪切应力对应的等效内摩擦角, 根据式(1)计算得出等效内摩擦角的变化规律。



(a) 荷载频率0.5 Hz

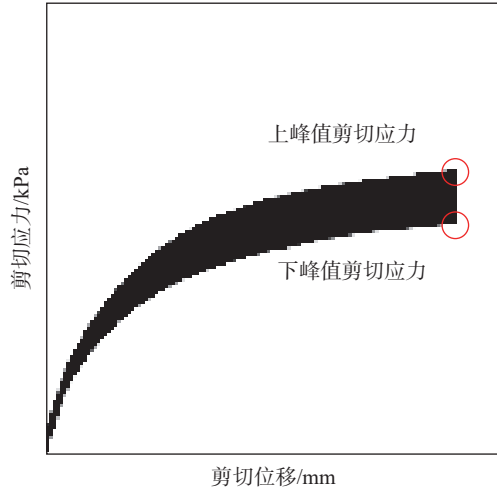


图 11 峰值剪切应力的表示

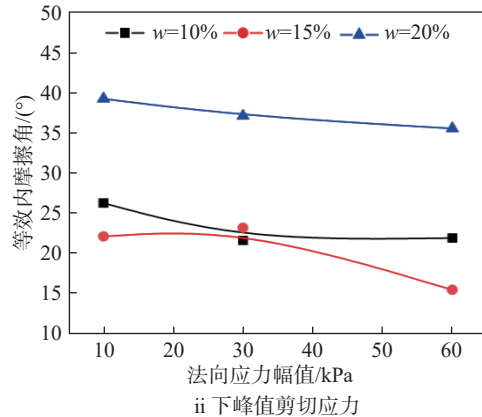
Fig. 11 Representation of peak shear stress

化如图 12 所示。可以看出 φ_p^* 范围在 $23^\circ \sim 45^\circ$, 而 φ_T^* 范围在 $15^\circ \sim 40^\circ$, 两者差异显著。随着荷载频率的增加, 等效内摩擦角逐渐减小。随着含水率的增加, 等效内摩擦角变化不太明显, 总体上呈现减小后增加的趋势。除个别数据点外, 随着法向应力幅值的增加, 等效内摩擦角基本上持续降低, 特别是对于下峰值剪切应力的情况。

3.2 φ_p^*/φ_T^* 的确定

3.1 节分析了 φ_p^* 和 φ_T^* 的变化规律, 由于是以半正弦波的形式作为循环荷载进行施加的, 因此 φ_T^* 可以近似为恒定法向应力下直剪试验得到的内摩擦角, 即常规直剪试验得到的内摩擦角。

在 φ_T^* 确定而无循环剪切设备时, 如果能通过 φ_p^* 来大体判断 φ_p^* , 对后续路基动荷载数值模拟及设计可提供一定的参数支撑。基于此, 需要大体确定 φ_p^* 与 φ_T^* 的倍数关系。根据 3.1 节中的数据统计, 本文绘制了 27 组 φ_p^*/φ_T^* 的变化规律, 如图 13 所示, φ_p^*/φ_T^* 基本为 1~2, 平均为 1.32。



ii 下峰值剪切应力

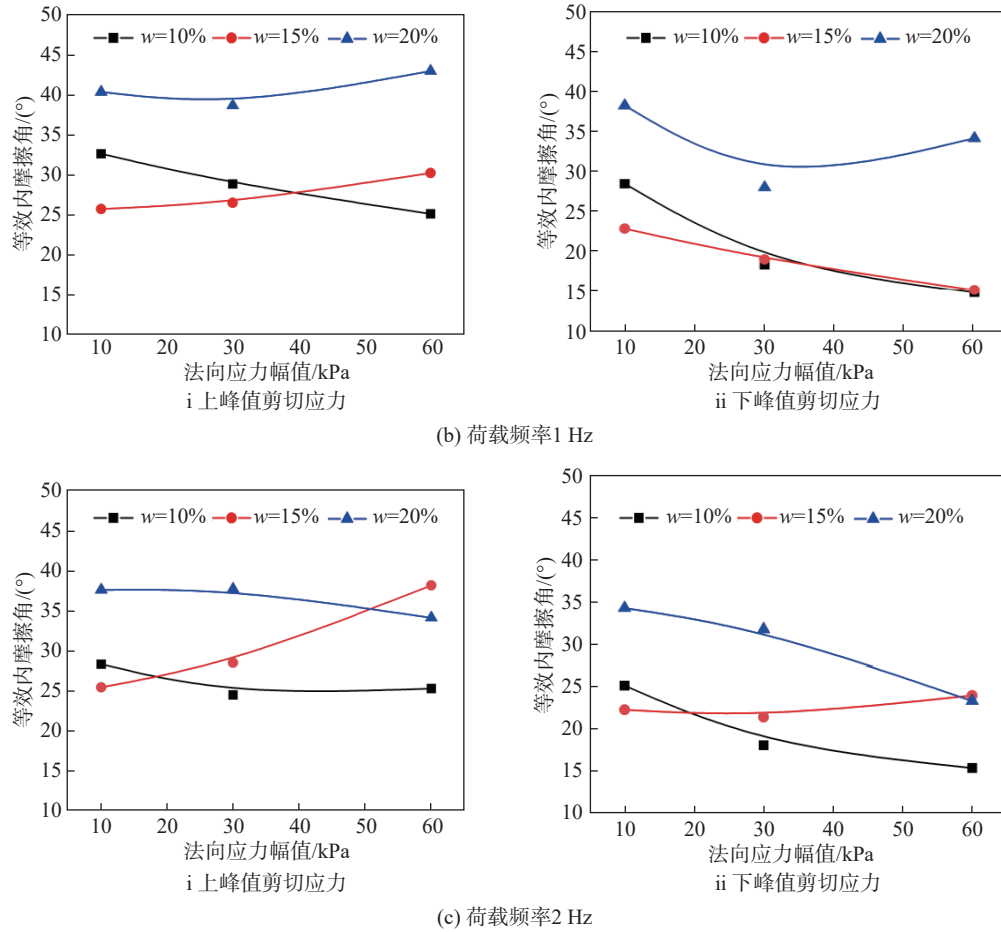


图 12 等效内摩擦角的变化规律
Fig. 12 The variation law of equivalent internal friction angle

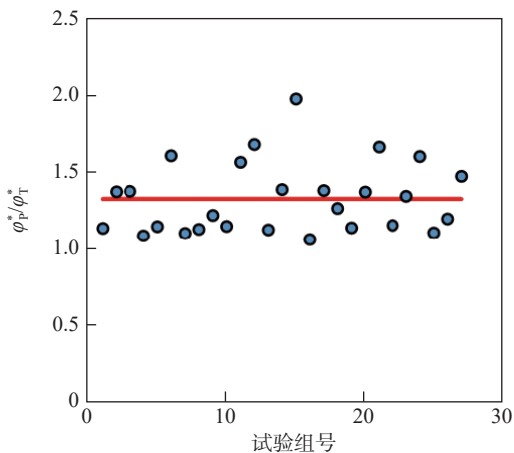


图 13 φ_p^*/φ_T^* 的确定
Fig. 13 Determination of φ_p^*/φ_T^*

4 结论

本文通过多功能土体-结构物界面循环剪切试验仪,研究了交通荷载频率、含水率及法向应力幅值对初始损伤路基的剪切渐进破坏的影响机制,主要结论如下:

(1)随着荷载频率增加,峰值剪切应力略有增加,

但对应的剪切位移逐渐增大。峰值剪切应力随含水率增加先减小后增大,低含水率下存在应力弱化现象。法向应力幅值增加时,峰值剪切应力显著增大。

(2)随着剪切位移的增加, $\Delta\tau$ 呈“上凸型”增长趋势。在剪切位移较大时, $\Delta\tau$ 随荷载频率升高而降低, $\Delta\tau$ 随含水率和法向应力幅值的增加呈现指数型增长。

(3)上峰值剪切应力对应的等效内摩擦角 φ_p^* 范围在 $23^\circ \sim 45^\circ$, 而下峰值剪切应力对应的等效内摩擦角 φ_T^* 范围在 $15^\circ \sim 40^\circ$, 两者差异显著。荷载频率增加时,等效内摩擦角逐渐减小。含水率增加时,等效内摩擦角变化不明显,总体呈先减小后增大的趋势。等效内摩擦角随法向应力幅值的增加而增大,尤其在下峰值剪切应力工况下较为显著。

(4) φ_p^* 与 φ_T^* 的比值集中在 $1 \sim 2$, 平均数为 1.32, 可为路基动荷载数值模拟及设计提供参考依据。

参 考 文 献

[1] 唐楚轩, 刘 杰, 冯一诺, 等. 交通荷载作用下非饱和风

- 积沙路基动力响应研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(S1): 194-202. (TANG C X, LIU J, FENG Y N, et al. Dynamic responses of unsaturated Aeolian sand subgrade to traffic loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(S1): 194-202. (in Chinese))
- [2] LEI H, ZHANG J F, QIAN J G, et al. Dynamic shakedown limits of the pavement on saturated subgrade subjected to traffic rolling-sliding loading[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 163: 105743.
- [3] LI X, YANG Y M, WANG J T, et al. Deformation of pavement subgrade subjected to traffic loads considering multi-direction principal stress rotation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 162: 107480.
- [4] RUI X X, SHEN Y, MA Y H, et al. Frequency effect on mechanical properties of calcareous sand under cyclic traffic loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 171: 107955.
- [5] 冯伟强. 振动频率和粗粒含量对粗粒土动力特性试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021. (FENG W Q. Experimental study on the effect of vibration frequency and content on the static and dynamic characteristics of coarse-grained soil[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021. (in Chinese))
- [6] 亓 帅, 马 伟, 索 智, 等. 压实含水率对黏土路基填料动力回弹模量影响研究[J]. *北京建筑大学学报*, 2024, 40(5): 66-73. (QI S, MA W, SUO Z, et al. Influence of remoulding water content on resilient modulus of subgrade clay soils[J]. *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 2024, 40(5): 66-73. (in Chinese))
- [7] GENG M, WANG D B, LI P Y. Undrained dynamic behavior of reinforced subgrade under long-term cyclic loading[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018(1): 5685789.
- [8] 王启云, 欧阳恒, 张丙强, 等. 高速铁路无砟轨道路基填料动力试验荷载分析[J]. *铁道标准设计*, 2018, 62(2): 6-11. (WANG Q Y, OUYANG H, ZHANG B Q, et al. Analysis of dynamic test load on filler of ballastless track subgrade of high speed railway[J]. *Railway Standard Design*, 2018, 62(2): 6-11. (in Chinese))
- [9] 龙 尧, 张同文, 张家生, 等. 红砂岩粗粒土动力试验及颗粒破碎模型研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(3): 270-279. (LONG Y, ZHANG T W, ZHANG J S, et al. Dynamic tests and particle breakage model of red sandstone coarse grained soil[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(3): 270-279. (in Chinese))
- [10] 孙建宇, 吕颖慧, 张贵秀, 等. 黄河冲积粉土动三轴试验与动力特性研究[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2025, 39(6): 909-916, 929. (SUN J Y, LYU Y H, ZHANG G X, et al. Dynamic triaxial test and dynamic characteristics of the yellow river alluvial silt[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2025, 39(6): 909-916, 929. (in Chinese))
- [11] CUI X H, LING X. Effects of differential subgrade settlement on damage distribution and mechanical properties of CRTS II slab track[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121821.
- [12] CUI X H, XIAO H J. Interface mechanical properties and damage behavior of CRTS II slab track considering differential subgrade settlement[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(6): 2036-2045.
- [13] 李又云, 谢永利, 刘保健. 路基压实黄土动力特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(5): 1037-1046. (LI Y Y, XIE Y L, LIU B J. Experimental research on dynamic characteristics of roadbed compaction loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(5): 1037-1046. (in Chinese))
- [14] 王良川. 循环荷载作用下岩溶路基土的动力特性试验研究[J]. *矿冶工程*, 2014, 34(3): 16-18, 22. (WANG L C. Experimental study on dynamic characteristics of subgrade soil under cyclic load in Karst area[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2014, 34(3): 16-18, 22. (in Chinese))
- [15] 刘飞禹, 梁崇旭, 王 军, 等. 含水率和法向循环荷载对残积土剪切特性的影响[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(8): 172-180. (LIU F Y, LIANG C X, WANG J, et al. Effect of water content and normal cyclic load on shear characteristics of residual soils[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(8): 172-180. (in Chinese))
- [16] 陈宪麦, 陈 楠, 魏子龙, 等. 循环直剪试验对道砟剪切性能影响的研究[J]. *铁道工程学报*, 2023, 40(5): 39-46. (CHEN X M, CHEN N, WEI Z L, et al. Research on the influence of cyclic direct shear test on the shear performance of ballast[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2023, 40(5): 39-46. (in Chinese))
- [17] 蔡袁强, 赵 莉, 曹志刚, 等. 不同频率循环荷载下公路路基粗粒填料长期动力特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(5): 1238-1246. (CAI Y Q, ZHAO L, CAO Z G, et al. Experimental study on dynamic characteristics of unbound granular materials under cyclic loading with different frequencies[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(5): 1238-1246. (in Chinese))
- [18] 刘飞禹, 朱 晨, 王 军. 剪切速率和法向加载频率对筋土界面剪切特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(5): 832-840. (LIU F Y, ZHU C, WANG J. Influences

- of shear rate and loading frequency on shear behavior of geogrid-soil interfaces[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(5): 832-840. (in Chinese).)
- [19] 王 瑞, 郭聚坤, 寇海磊, 等. 钢-粉质黏土界面剪切特性及本构模型研究 [J]. *工业建筑*, 2019, 49(10): 123-128,150. (WANG R, GUO J K, KOU H L, et al. Study of shear characteristics and constitutive model of steel-silty clay interface[J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(10): 123-128,150. (in Chinese))
- [20] LEE Y K, CHOI B H. Equivalent friction angle and cohesion of the generalized Hoek-brown failure criterion in terms of stress invariants[J]. *Tunnel & Underground Space*, 2012, 22(6): 197-198.
- [21] JIANG Y J, ZHAO Y. Experimental investigation of dry granular flow impact via both normal and tangential force measurements[J]. *Géotechnique Letters*, 2015, 5(1): 33-38.
- [22] 彭芳乐, 小竹望, 龙冈文夫. 土工格栅加筋砂土的变形与破坏机理解析 [J]. *岩土力学*, 2004, 25(6): 843-849. (PENG F L, KOTAKE N, TATSUOKA F. Numerical analysis of deformation and failure mechanism of geogrid-reinforced sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 843-849. (in Chinese))

收稿日期: 2025-03-19