

# 红层泥岩路基填料动强度和累积变形特性试验研究

蒋关鲁<sup>1</sup>, 房立凤<sup>1,2</sup>, 王智猛<sup>1,2</sup>, 魏永幸<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 高速铁路路基填料的动强度和累积变形特性是保证高速铁路正常运营的重要因素之一。为验证红层泥岩能否满足高速铁路路基基床填料的要求, 进行了红层泥岩填料静、动三轴试验研究。通过静三轴试验, 研究了红层泥岩填料在静荷载作用下的强度变形特性, 获得了其剪切强度指标, 并判定红层泥岩土能满足作为高速铁路路基填料的静强度要求; 通过动三轴试验, 分析了红层泥岩土作为路基基床填料在低围压条件下的动强度特性、临界动应力、弹性模量和阻尼比及累积沉降变化的变化规律, 论证了红层泥岩用作高速铁路路基特别是基床底层填料的可行性, 并为今后红层泥岩土在高速铁路路基中的应用提供一定的参考依据。

**关键词:** 红层泥岩; 高速铁路; 路基基床; 动强度; 累积变形

中图分类号: TU41 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)01-0124-06

**作者简介:** 蒋关鲁(1962-), 男, 浙江富阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事道路与铁道工程方向的研究。E-mail: [wgljiang@yahoo.com.cn](mailto:wgljiang@yahoo.com.cn)。

## Experimental study on dynamic strength and accumulated deformation characteristics of red-mudstone filling

JIANG Guan-lu<sup>1</sup>, FANG Li-feng<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-meng<sup>1,2</sup>, WEI Yong-xing<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The dynamic strength and accumulated deformation characteristics of subgrade filling are one of the most important factors affecting the normal operation of high speed railways. In order to demonstrate the applicability of red-mudstone as subgrade bed filling, static and dynamic triaxial tests are performed. Through the static triaxial tests, the strength and deformation characteristics of red-mudstone soil are studied, the strength indices are obtained, and that red-mudstone filling can meet the static requirements of subgrade is judged. Through the dynamic triaxial tests, the dynamic strength, critical dynamic stress, elastic modulus, damping ratio and accumulated deformation of red-mudstone soil under low confining pressure are studied. According to the analysis, it is concluded that the red-mudstone soil can be used to fill subgrade bed. It may provide reference for the application of red-mudstone in subgrade engineering.

**Key words:** red-mudstone; high speed railway; subgrade bed; dynamic strength; accumulated deformation

## 0 前 言

高速铁路路基填料应具有密度大、强度高、变形小、稳定性和耐久性好、易压实、经济等特点。红层一般由红色砾岩、砂岩、砂砾岩、粉砂岩、砂质页岩和泥质岩等交互组成, 有的还含有淡水灰岩、石膏和岩盐等; 大部分为泥质胶结, 少部分是石膏、钙质和硅质胶结。红层中所含的填充物或胶结物主要为氧化铁, 特别是以赤铁矿居多, 所以呈现红色。其主要沉积时代为三叠纪、侏罗纪、白垩纪、第三纪。其颗粒易破碎、强度低、遇水后易崩解与软化, 表现出与一般填料不同的工程力学性质, 属 D 类填料。

侏罗系遂宁组红层泥岩作为高速铁路路基下部填

料的适用性已经在遂渝线无碴轨道综合试验段得到验证<sup>[1-2]</sup>, 然而, 其在高速铁路路基基床中的应用还处于空白状态。对路基基床而言, 除承受上部结构静荷载外, 还受到列车动荷载的反复作用。高速铁路路基基床因列车动荷载反复作用有可能产生强度破坏和累积变形过大等问题<sup>[3-4]</sup>, 因此, 在基床设计中, 除分析其静态指标外, 还应分析在列车荷载下的动态特性。本文通过对侏罗系遂宁组红层泥岩填料在静、动荷载作用下强度及变形特性的研究, 论证其用作高速铁路路

基金项目: 铁道部科技计划发展项目(2005K004-C)

收稿日期: 2008-11-10

基基床填料的可行性, 为路基基床设计提供必要的参数。

其衰减速度明显变缓。

### 1 静强度及变形特性

试验采用固结排水法在应变控制式静三轴仪上进行。土样取自达成铁路施工现场某一试验段工点, 红层泥岩重塑土采用最优含水率 (9.68%) 制备试样, 密度为 2.005 g/cm<sup>3</sup>, 即最大干密度 (2.11 g/cm<sup>3</sup>) 的 95%<sup>[5]</sup>。试样尺寸为  $f=39.1\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ , 围压分别为 25, 50, 100, 150 kPa, 加载速率为 0.46%/min。

#### 1.1 应力 - 应变关系

不同围压下红层泥岩土试样应力 - 应变关系曲线见图 1。从图中可以看出, 小应变 (0~2%) 下, 应力呈近似线性逐渐增长; 应变为 2%~3%, 应力仍呈增长趋势, 但明显呈非线性现象, 应变为 3% 左右均达到最大主应力, 即土体的破坏点; 随应变继续增大, 红层泥岩土开始破坏, 其所承受应力开始呈现衰减趋势。

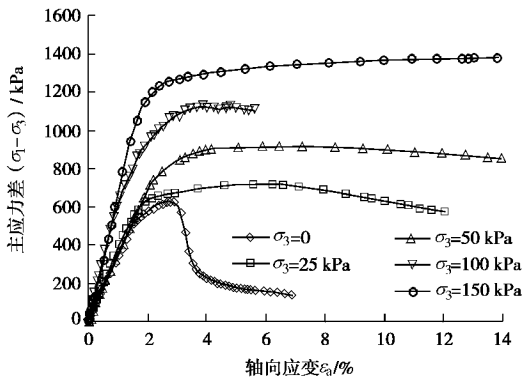


图 1 应力 - 应变关系曲线

Fig. 1 Relationship between stress and strain

从图 1 还可以看出, 随着围压的增大, 红层泥岩土达到破坏点时破坏应变增长幅度很小, 而破坏应力增长幅度明显增大, 且土体应力 - 应变曲线由软化型逐渐向硬化型发展。相同应变条件下, 土体所需应力随着围压的增大而增大。这说明围压大小对红层泥岩土强度影响较大。在实际工程中, 铁路路基可通过增加土体侧向约束措施来提高其强度, 减小其压缩沉降。

#### 1.2 割线模量与轴向应变关系

由图 1 的红层泥岩土试样的应力 - 应变曲线可求其割线模量, 即曲线上点与原点连线的斜率。不同围压下割线模量与轴向应变关系曲线如图 2 所示。由图可知, 红层泥岩土初始割线模量随着围压的减小呈由大逐渐减小趋势, 不加围压下红层泥岩土割线模量显著较小。相同围压条件下, 红层泥岩土割线模量衰减速度随着轴向应变的增大而减小, 当应变大于 3%,

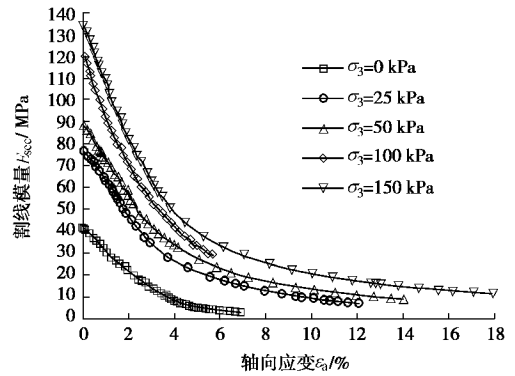


图 2 割线模量与轴向应变关系曲线

Fig. 2 Relationship between secant modulus and strain

#### 1.3 剪切强度参数

红层泥岩土  $K_f$  强度线与抗剪强度指标的确定见图 3。由图可知, 该红层泥岩土剪切强度指标为  $c' = 141.05\text{ kPa}$ ,  $j' = 44.6^\circ$ , 且无侧限抗压强度为 620 kPa, 其抗剪强度与压实系数为 0.95 的级配碎石<sup>[6]</sup>几乎相当 ( $c' = 101\text{ kPa}$ ,  $j' = 48.9^\circ$ , 围压为 20 kPa 时的抗压强度为 560 kPa), 满足高速铁路路基基床承受静载能力的要求<sup>[7]</sup>。

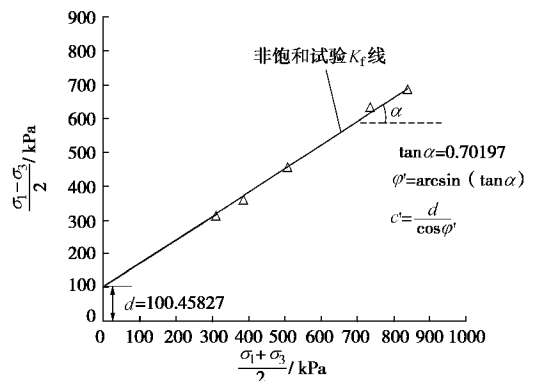


图 3 红层泥岩土  $K_f$  强度线与抗剪强度指标确定

Fig. 3  $K_f$  strength line and determination of strength indices

### 2 动强度及变形特性

#### 2.1 试验概况

为模拟红层泥岩土在列车长期荷载作用下动强度及累积变形特性, 在“英国 GDS 高级动态三轴测试系统”上进行了振动三轴试验, 该系统主要技术参数: 最大振动频率 5 Hz, 轴向力精度为 0.1%, 轴向最大位移为 90 mm, 位移精度为 0.07%, 最大存储数据点数为 100 周期。

试样密度为 2.005 g/cm<sup>3</sup>, 含水率为 9.68%, 直径为 50 mm, 高为 100 mm, 控制方式为应力控制, 波形为正弦波, 频率为 5 Hz, 试验类型为排水排气, 围

压为 25 kPa 时动应力为 25, 45, 65, 75, 95, 225, 248, 265 kPa, 围压为 50 kPa 时动应力为 50, 100, 150, 175, 200, 285, 310 kPa, 围压为 100 kPa 时动应力为 300, 360, 370, 380, 390, 400 kPa。图 4 为振动试验典型加载时程曲线示意图。

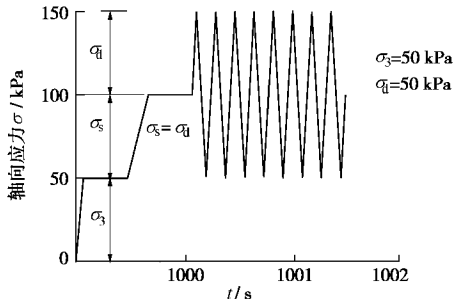


图 4 典型振动时程曲线示意图

Fig. 4 Typical time-history curves of dynamic tests

### 2.2 变形模量、阻尼比与应变的关系

图 5 为红层泥岩土典型应力 - 应变滞回曲线, 由此可计算出红层泥岩土应变对应的弹性模量及阻尼比。由于试验为应力控制, 试样在动荷载反复作用下发生变形, 由初始的柱状变为鼓状, 试样中部受力面积增大, 试样实际承担的动应力较控制应力低, 需要根据试样实际受力面积对动应力进行修正<sup>[7-8]</sup>。不同围压下经修正后红层泥岩土弹性模量及阻尼比与应变的关系曲线见图 6。从图可以看出, 随着应变的增大, 其弹性模量逐渐减小, 而阻尼比则逐渐增大。在小应变 (<1%) 条件下, 弹性模量衰减较快; 应变在 1% 附近时, 其不同围压红层泥岩土弹性模量衰减至某一值附近, 随应变继续增大, 弹性模量衰减速度开始变缓, 最终趋于稳定。阻尼比随着应变的增大增长速率逐渐变小, 最大阻尼比可达 40% 左右。

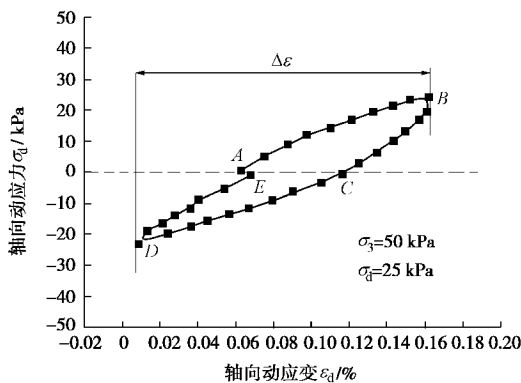


图 5 应力 - 应变滞回曲线

Fig. 5 Relationship between stress and strain under dynamic loads

从图 6 还可以看出, 在小应变条件下, 随着围压的增大, 弹性模量显著增大, 而阻尼比则逐渐减小。其原因主要在于围压较小时土体塑性应变发展较快;

不过, 随着围压增大, 土体侧向约束作用增大, 其内部颗粒之间的接触变得更加紧密, 延缓了其塑性应变的发展, 弹性模量随之增大; 另一方面, 土体的密实致使波在土体内部的传播路径亦随之增多, 因而其在传播过程中能量消耗将会减少, 显示表征能量损耗多少的参数阻尼比亦随之减小。但作为高速铁路基层层的红层泥岩土的压实度非常大、土体密度极高, 小应变条件下较小的围压对其颗粒间的紧密作用效果不是很明显, 因此, 不同围压下红层泥岩土达到同一应变时的阻尼比相差不大。由以上的讨论可知, 在相同的动荷载作用下, 随着围压的增加, 弹性模量增大, 而阻尼比减小, 其结果是土体的剪切应变也大大减小。在实际工程设计中, 可通过增加路基侧向约束来提高土体的侧向稳定性及抗震性能。

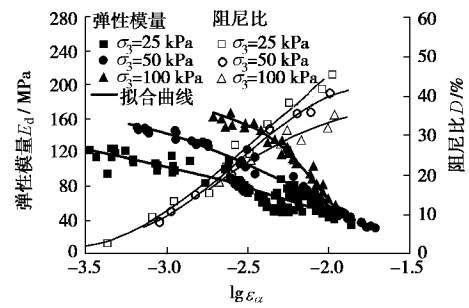


图 6 弹性模量、阻尼比与应变关系曲线

Fig. 6 Relationship between dynamic strain, dynamic modulus and damping ratio

### 2.3 动强度、累积变形特性

#### (1) 临界动应力

围压为 25, 50, 100 kPa 条件下, 红层泥岩土在不同动荷载作用下累积应变与加载次数的关系曲线见图 7。从图中可以看出, 在较小动荷载范围内, 累积应变的增加速率随加载次数逐渐变小, 超过某一加载次数后变形最终趋于稳定; 当动荷载超过某一特定值后, 一定加载次数下土体累积变形变化幅度由小开始急剧增大, 变形最后不能趋于稳定, 即土体被破坏。这说明红层泥岩土在动荷载作用下存在着一个动应力临界值, 当动荷载小于临界值时, 动荷载的反复作用使非饱和红层泥岩土内部空气被排出, 孔隙体积变小, 变形也随之减小, 直到土体变得更密实, 其内部孔隙不能再被压缩, 累积变形基本趋于稳定; 当动荷载大于临界值时, 动荷载的反复作用使土体内部结构逐渐被破坏, 土体承载能力迅速降低, 在较少的加载次数下其变形急剧增大, 即宏观上土体的破坏。

由图 7 可得围压为 25, 50 kPa, 加载次数分别为 5000, 10000 时动应力与累积应变关系曲线如图 8 所

示。从图中可以看出，累积应变均随动应力的增大而增大。当围压为 25 kPa、动应力小于 150 kPa 时（图 8 (a)），红层泥岩土在 5000~10000 振次时累积应变基本相等，这说明加载 5000 次土体变形已基本处于稳定；随动荷载继续增大，土体累积应变开始急剧增加，直至土体完全破坏。当围压为 50 kPa、动应力小于 175 kPa 时（图 8 (b)），红层泥岩土在 5000 振次左右累积应变已基本稳定；从动应力 175 kPa 开始，累积应变曲线开始出现拐点；随动荷载继续增大，不同加载次数下红层泥岩土累积应变大幅增加，直至土体完全破坏。因此，根据以上分析可得红层泥岩土在 25, 50 kPa 围压下的临界动应力( $s_s+s_d$ )分别为  $2 \times 150$  kPa、 $2 \times 175$  kPa 左右。对比图 3 中的静强度可知，在围压 25, 50 kPa 下，红层泥土路基填料的临界动应力与静强度比分别为 0.417, 0.382。

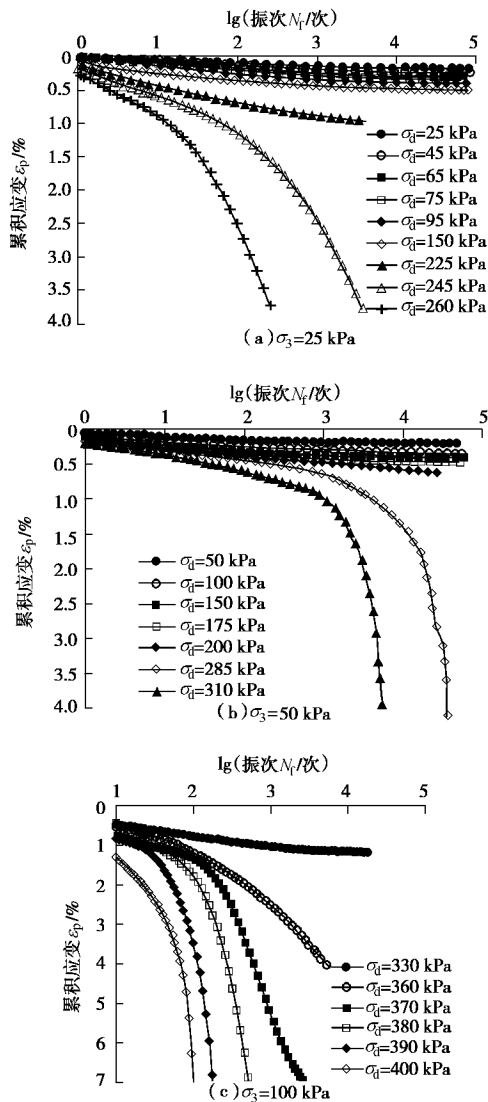


图 7 累积应变与加载次数关系曲线

Fig. 7 Relationship between accumulated strain and load times

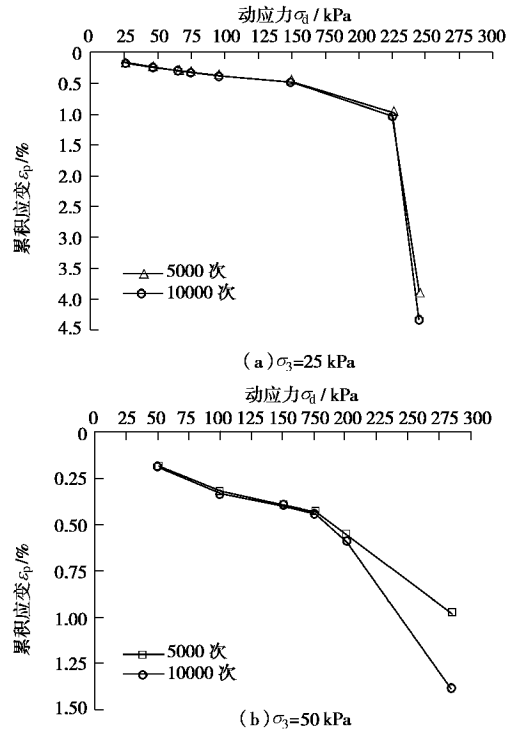
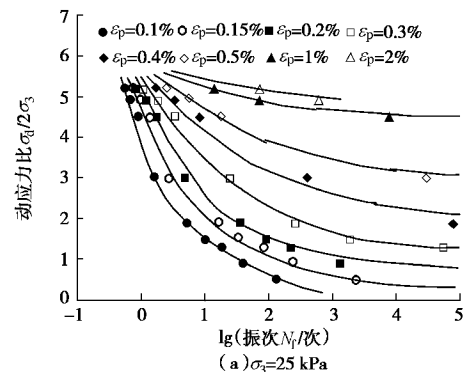


图 8 动应力 - 累积应变关系曲线

Fig. 8 Relationship between dynamic stress and accumulated strain

(2) 累积变形特性

基于试验中不同级别动荷载下的轴向起始应力不同，不宜将轴向应力作归一化处理。GDS 动三轴记录的是试验总应变，本试验主要研究的是红层泥岩基床土在动荷载作用下产生的累积应变，应将试样在静力荷载下的变形扣除，并以施加动荷载之前的试样高度为初始高度来计算<sup>[9]</sup>。根据原始累积应变与加载次数关系曲线（图 7），将不同动应力下循环振次与  $s_d/2s_3$  进行归一化处理，得到围压为 25, 50 kPa 时的累积变形曲线见图 9。从图 9 可以看出，达到相同累积应变所需的振动次数随动应力的减小而增大，但其增加幅值明显加大。这说明较大的动应力对红层泥岩土累积沉降影响较显著，而较小动应力要达到较大动应力相同的累积应变值所需振次将大幅增加。



(a)  $\sigma_3=25$  kPa

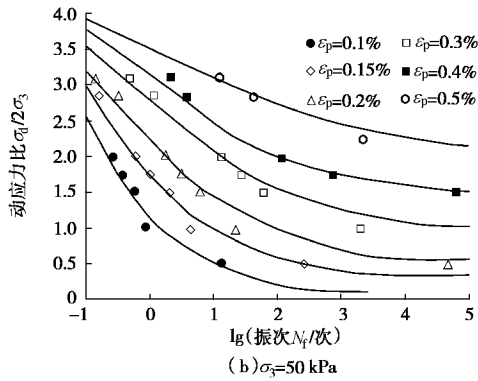


图9 动强度曲线

Fig. 9 Curves of dynamic strength

(3) 围压对累积应变的影响

为了分析围压对累积应变的影响,图 10 给出了围压为 25, 50 kPa、振次  $N_f=5000$  时累积应变与动应力关系曲线。从图中可以看出, 动应力较小时, 累积应变随动应力的增大基本呈线性衰减, 衰减速率较小; 当动应力达到某一特征值后, 其累积应变出现明显拐点, 即土体破坏点, 土体变形曲线大幅下降。相同动应力条件下, 累积应变随围压的增大而减小。这说明侧压力的增加能提高红层泥岩土的竖向抗变形能力, 有效地减小路基基床的工后沉降变形。

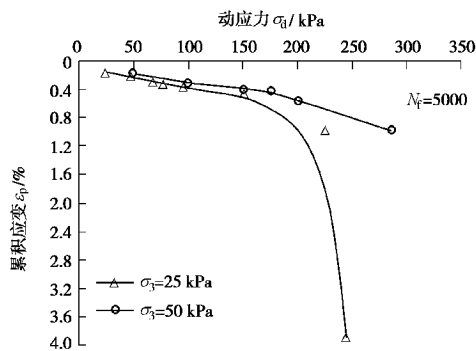


图 10 动应力 - 累积应变曲线

Fig. 10 Relationship between dynamic stress and accumulated strain

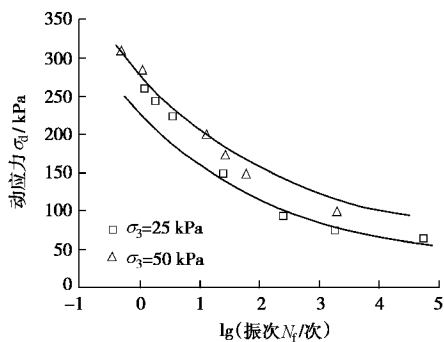


图 11 累积应变 0.3% 时动应力 - 振次关系曲线

Fig. 11 Relationship between dynamic stress and loading times under accumulative strain of 0.3%

一般来讲, 高速铁路轨道正下方路基基床在列车荷载下的最小侧压力约为 30~50 kPa, 且随路基基床的深度增加而增大, 列车运营后路基基床的累积应变控制在不大于 0.3%<sup>[7]</sup>。由图 9 可得累积应变为 0.3% 时红层泥岩土动应力与振次关系(图 11)。从图 11 可以看出, 在动荷载作用下, 累积应变趋于稳定的动应力峰值( $s_s+s_d$ )在围压 25, 50 kPa 条件下分别为  $2 \times 50 \text{ kPa}$ 、 $2 \times 75 \text{ kPa}$ , 满足红层泥岩作为高速铁路路基基床底层填料的动力特性要求<sup>[4]</sup>。

### 3 结 论

(1) 密度为  $2.005 \text{ g/cm}^3$  红层泥岩土剪切强度指标为  $c'=141.05 \text{ kPa}$ ,  $j'=44.6^\circ$ , 满足高速铁路路基基床承受静载能力的要求。

(2) 在动荷载作用下, 红层泥岩土弹性模量随应变增大呈衰减趋势, 且随围压的增大显著增大; 阻尼比随应变的增大逐渐增大, 不同围压下阻尼比相差不大。

(3) 红层泥岩土累积应变随动荷载振次的增加逐渐增大。当动荷载不超过临界动应力时, 累积应变最终趋于稳定; 当动荷载超过临界动应力时, 土体结构遭到破坏, 应变急剧增长, 不能达到稳定。在低围压下, 其动静强度比约为 0.38~0.41。

(4) 相同围压下红层泥岩土累积应变随动应力及加载次数的增大而增大。相同振次条件下, 随围压的增大, 其累积变形减小, 临界动应力增大。

(5) 密度为  $2.005 \text{ g/cm}^3$  红层泥岩土的动态特性基本满足高速铁路路基基床底层填料的要求。

### 参考文献:

[1] 王智猛, 蒋关鲁, 魏永幸. 红层泥岩填料物理力学特性的试验研究[J]. 路基工程, 2006, 128(5): 86 - 88. (WANG Zhi-meng, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing. Experimental study on physical and mechanical characteristics of red-mudstone filling[J]. Subgrade Engineering, 2006, 128(5): 86 - 88. (in Chinese))

[2] 魏永幸, 蒋关鲁. 客运专线无砟轨道路基关键技术探讨——以遂渝线无砟轨道综合试验段为例[J]. 铁道工程学报, 2006(5): 39 - 44. (WEI Yong-xing, JIANG Guan-lu. Exploration on key technology of ballastless track subgrade—a case study of comprehensive experimental section of ballastless track on Suining-Chongqing line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(5): 39 - 44. (in Chinese))

[3] 冯立臣, 蒋关鲁, 王志猛, 等. 客运专线土质路基无砟轨道基床动态特性的模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2008, 492(8):

- 78 - 81. (FENG Li-chen, JIANG Guan-lu, WANG Zhi-meng, et al. Experimental study on dynamic characteristics for ballastless track subgrade bed of high speed railway[J]. Railway Engineering, 2008, **492**(8): 78 - 81. (in Chinese))
- [4] 王智猛, 蒋关鲁, 魏永幸, 等. 达成线红层泥岩路基循环加载试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(12): 1888 - 1893. (WANG Zhi-meng, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing, et al. Experimental study on dynamic performance of red-mudstone subgrade under cyclic loading in Dazhou-Chengdu line[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(12): 1888 - 1893. (in Chinese))
- [5] 胡安华, 蒋关鲁, 王智猛, 等. 高速铁路路基红层泥岩填料力学特性试验研究[J]. 铁道工程学报, 2008(2): 21 - 25. (HU An-hua, JIANG Guan-lu, WANG Zhi-meng, et al. Experimental research on mechanical characteristics of red rock filling for subgrade of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(2): 21 - 25. (in Chinese))
- [6] 木幡行宏, 蒋关鲁. 繰返し載荷履歴を受けた粒度調整碎石の三軸せん断特性[J]. 鉄道総研報告, 1998, **12**(4): 43 - 48. (KOHATA Y, JIANG Guan-lu. Deformation properties of a well-graded crushed gravel subjected to cyclic triaxial loading[J]. Journal of Railway Technical Research Institute, 1998, **12**(4): 43 - 48. (in Japanese))
- [7] 日本鉄道総合技術研究所. 鉄道構造物等設計標準—同解説(土構造物)[S]. 2007. (Japan Railway Technical Research Institute. Design standards for railway structures and commentary (earth structures)[S]. 2007. (in Japanese))
- [8] 蒋关鲁, 木幡行宏, 須長誠. 粗粒材料の微小ひずみレベルでの变形特性に及ぼす影響因子[J]. 鉄道総研報告, 1998, **12**(4): 49 - 54. (JIANG Guan-lu, KOHATA Y, SUNAGA M. Some factors affecting small stiffness deformation characteristics of a sandy gravel[J]. Journal of Railway Technical Research Institute, 1998, **12**(4): 49 - 54. (in Japanese))
- [9] JIANG Guan-lu, KOHATA Y, TATSUOKA F. Small deformation characteristics at low pressure of dense gravel[C]// Proc of Second Int Symposium on Prefailure Deformation Characteristics of Geomaterials. Balkema, 1999: 291 - 298.
- [10] 李华明, 蒋关鲁, 吴丽君, 等. 黄土地基动力沉降特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2220 - 2224. (LI Hua-ming, JIANG Guan-lu, WU Li-jun, et al. Experimental study on dynamic settlement behavior of loess foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2220 - 2224. (in Chinese))

### 请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 5 版确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中排列首位; 本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊), 并被评为“百种中国杰出学术期刊”; 本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录, 并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、万方网和重庆维普网全文检索; 本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, 大 16 开, 双栏排版, 160 页, 每月中旬出版, 2009 年起每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000 - 4548, 国内统一刊号 CN32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO0520。

欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: (210024) 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 联系电话: (025) 85829534, 85829553; 传真: (025) 85829555; [E-mail:ge@nhri.cn](mailto:E-mail:ge@nhri.cn)。

(本刊编辑部)