

磐安结构性黄土的构度及动强度衰减特性

孙萍^{1,2}, 李荣建³, 刘军定³, 张媛³, 张帅^{1,2}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081
3. 西安理工大学岩土工程研究所, 西安 710048

摘要 以磐安黄土为样本, 基于无侧限单轴抗压试验得到的磐安黄土构度指标, 分析了原状黄土与重塑黄土的结构性差异; 通过动三轴试验, 对原状黄土、重塑黄土在天然含水率、饱和含水率条件下的动强度衰减特性进行了对比研究。结果表明, 天然含水率的原状黄土及重塑黄土均具有较强的结构性, 原状黄土的结构性更强, 其动强度明显高于重塑黄土的动强度; 虽然饱和过程使得原状黄土的动强度大大降低, 但饱和原状黄土的动强度仍高于饱和重塑黄土的动强度, 且饱和原状黄土的动孔压增长趋势明显慢于饱和重塑黄土; 具有较强结构性的黄土, 其动强度曲线不会出现归一化。

关键词 黄土; 结构性; 构度; 动强度; 动孔压

结构性黄土是一种特殊的结构性土, 广泛分布于中国西北地区, 且大多位于高烈度地震区。黄土的结构性使其具有较高的强度, 而地震作用往往会导致黄土结构性弱化及动强度衰减。因此, 研究结构性黄土的动强度衰减特性对于提高黄土地区工程抗震减灾具有重要意义。黄土的结构性一直是黄土力学研究中的热点问题之一, 为了分析结构性对黄土宏观力学特性的影响, 在谢定义提出综合结构势^[1]之后, 陆续建立了诸如压缩应变结构性参数^[2]、孔隙比结构性参数^[3]、应力结构性参数^[4-6]、振次结构性参数^[7]、应力比结构性参数^[8]和圆锥贯入度结构性参数^[9]。基于原状土及重塑土的无侧限抗压强度试验, 邵生俊等^[10]提出了黄土的构度指标。在黄土力学强度方面, Li等^[11,12]通过试验研究建立了适用于结构性黄土的双曲线强度, 并将应力比结构性参数引入结构性黄土的双曲线强度中; Rinaldi等^[13]、Capdevila等^[14]通过三轴试验研究了在不同含水量、不同围压条件下粉质黄土的结构性, 并建立了黄土双线性模型。这些研究对结构性黄土地区的灾害评价提供了更加合理的强度理论。另一方面, 针对压实或重塑黄土在地震作用下的动强度及震陷问题, 也取得一定的研究成果。王谦等^[15]通过动三轴试验研究了石碑塬黄土液化机制及判别标准; 杨利国等^[16]基于压实黄土进行动强度试验, 研究了初始主应力方向角对压实黄土动强度的影响规律; 李雨倩等^[17]基于固结不排水动三轴试验, 研究了某机场边坡黄土的

动强度规律及模量衰减特性; 慕焕东等^[18]通过对西安地裂缝带重塑黄土试样的动三轴试验, 分析了地裂缝带黄土的动强度特性、动剪切模量及阻尼比等响应特征。这些成果推进了压实或重塑黄土在地震作用下动强度、动剪切模量及阻尼比等响应特性的深入研究, 但结构性较强的原状黄土动强度及其衰减特性还缺乏相应的研究。为此, 李忠铭等^[19]通过分析土的动强度与原位应力状态的相关性, 指出了原状土体动强度研究的必要性; Jiang等^[20]通过试验研究, 指出了原状黄土及重塑黄土由于微观结构的不同而导致强度与变形的差异。本文基于磐安黄土的无侧限单轴抗压试验及动三轴试验, 对比研究天然含水率、饱和含水率条件下原状黄土与重塑黄土的动强度衰减特性。

1 磐安黄土的构度及结构性

基于综合结构势建立的结构性黄土的构度指标, 其目的在于比较原状黄土与重塑黄土及饱和黄土的无侧限抗压强度的差异, 即黄土的结构可稳性 m_1 可以通过原状黄土与重塑黄土的无侧限抗压强度比值来表现, 黄土的结构可变性 m_2 可以通过饱和原状黄土与原状黄土的无侧限抗压强度比值来表现。因此, 结构性黄土的构度指标可以通过黄土结构可稳性 m_1 与黄土结构可变性 m_2 之比表达^[10], 即

收稿日期: 2015-06-02; 修回日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472296, 11072193); 陕西省黄土力学与工程重点实验室项目(14JS064); 中国地质调查局地质调查项目(12120114035901)

作者简介: 孙萍, 副研究员, 研究方向为岩土工程与地质灾害, 电子邮箱: sunpingcgs@163.com; 李荣建(通信作者), 教授, 研究方向为黄土力学、岩土工程抗震及边坡工程, 电子邮箱: lirongjian@xaut.edu.cn

引用格式: 孙萍, 李荣建, 刘军定, 等. 磐安结构性黄土的构度及动强度衰减特性[J]. 科技导报, 2016, 34(5): 74-78; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.05.008

$$m_u = \frac{m_1}{m_2} = \frac{(q_{u0})_o / (q_{u0})_r}{(q_{u0})_s / (q_{u0})_o} = \frac{(q_{u0})_o^2}{(q_{u0})_r (q_{u0})_s} \quad (1)$$

式中, $(q_{u0})_o$ 为原状土的无侧限抗压强度; $(q_{u0})_r$ 为重塑土的无侧限抗压强度; $(q_{u0})_s$ 为饱和原状土的无侧限抗压强度; m_1 为黄土结构的可稳性; m_2 为黄土结构的可变性。

结构性黄土的强度特性在其结构连接没有遭到破坏以前主要表现为其维持结构可稳性的能力, 但原状结构性黄土在其受荷过程中, 结构性的丧失一定伴随着结构可变性的发展^[21]。结构性原状黄土的无侧限抗压强度大于等于重塑黄土的无侧限抗压强度^[22], 而饱和原状黄土的无侧限抗压强度小于等于原状黄土的无侧限抗压强度^[23]。通过黄土的结构可稳性 m_1 与结构可变性 m_2 之比定义的结构性黄土构度指标, 可以发现没有经历固结过程的黄土的构度指标必然为 $m_u=1$, 也即黄土构度指标的最小值为 1; 但当黄土的结构可稳性大于结构可变性, 黄土的结构性越强, 构度指标必然是一个大于 1 的数值。由于结构性黄土的构度指标越大, 黄土的结构性相对越强, 因此, 结构性黄土的构度指标可以对黄土的结构性进行定量评价。

黄土试样取自天水地区磐安镇, 取土深度为 13.0 m, 原状土的干密度 (ρ_d) 为 1.45 g/cm³, 土粒比重为 2.67; 原状土天然含水率为 13%, 饱和原状土含水率为 31%。通过无侧限抗压强度试验, 分析得到了天然原状黄土、重塑黄土及饱和原状黄土的应力-应变 ($\sigma-\varepsilon_u$) 曲线, 如图 1 所示。根据图 1 中无侧限抗压 $\sigma-\varepsilon_u$ 曲线的特征值, 计算确定的磐安黄土构度指标为 7.0, 如表 1 所示。

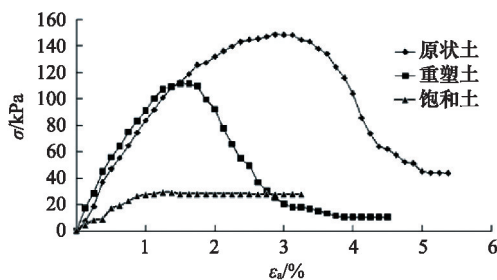


图 1 磐安黄土无侧限抗压 $\sigma-\varepsilon_u$ 曲线

Fig. 1 Curves $\sigma-\varepsilon_u$ of unconfined uniaxial compression test of Pan'an structural loess

表 1 磐安黄土无侧限抗压试验结果

Table 1 Results of unconfined uniaxial compression test of Pan'an loess

试样状态	无侧限抗压强度/kPa	构度指标
原状土	148.5	
重塑土	111.6	7.0
饱和原状土	28.1	

磐安黄土的构度指标为 7.0, 远大于饱和正常固结黄土的构度指标 (1.0), 磐安黄土的结构可稳性是其结构可变性的 7 倍, 磐安黄土颗粒联结性强, 且不容易遭到破坏, 表明该原状黄土的结构性较强。

2 磐安黄土的动强度衰减规律

为了进一步评价磐安黄土结构性对动强度衰减特性的影响程度, 进行了天然原状黄土、重塑黄土、饱和原状黄土、饱和和重塑黄土的动三轴试验。试验仪器采用微机控制多功能三轴试验机, 振动波形为正弦波, 振动频率为 1 Hz。动三轴试验采用固结应力比 $K_c = \sigma_{1c} / \sigma_{3c} = 1.0$, 固结压力 σ_{3c} 分别取为 100、200、300 kPa。对于饱和黄土试样, 以孔隙水压力完全消散作为固结标准; 对于非饱和黄土试样, 以压缩变形稳定作为固结标准。

2.1 原状黄土与重塑黄土的动强度

土的动强度是在一定动载荷作用次数下产生某一破坏应变所需的动应力。均压固结条件下, 对于天然原状黄土及重塑黄土, 由于这两种状态下结构性都相对较强, 导致动三轴试验中动应变发展较小, 按综合应变 2% 作为破坏标准 (即 $\varepsilon_{d0}=0.2\%$); 对于饱和原状黄土及饱和和重塑黄土, 按试样发生液化 (峰值孔压等于固结压力) 或综合应变达到 5% 作为破坏标准 (即 $\varepsilon_{d0}=0.5\%$)。按相应的破坏标准计算破坏振次 N_f , 从而得到动应力 σ_d 与破坏振次 N_f 之间的关系曲线, 然后再转换到相应条件下的动应力比 $\sigma_d / 2\sigma_{3c}$ 与破坏振次 N_f 之间的动强度曲线。原状黄土、饱和原状黄土、重塑黄土、饱和和重塑黄土的动强度半对数坐标曲线如图 2~5 所示。

通过图 2 的曲线对比可知, 结构性原状黄土在不同固结压力条件下的动强度曲线差异较大。在均压固结条件下, 动强度中动应力比 ($\sigma_d / 2\sigma_{3c}$) 曲线随固结压力 σ_{3c} 的增大而下移。

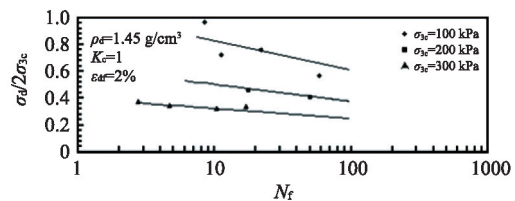


图 2 原状黄土的动强度曲线

Fig. 2 Dynamic strength of intact loess

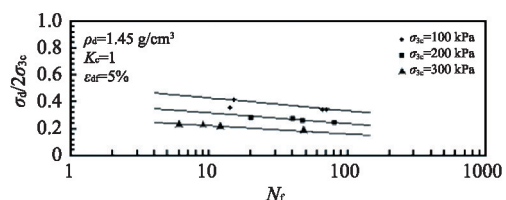


图 3 饱和原状黄土的动强度曲线

Fig. 3 Dynamic strength of saturated intact loess

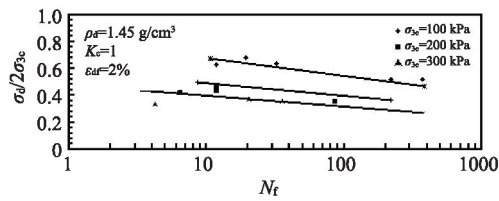


图4 重塑黄土的动强度曲线

Fig. 4 Dynamic strength of remolded loess

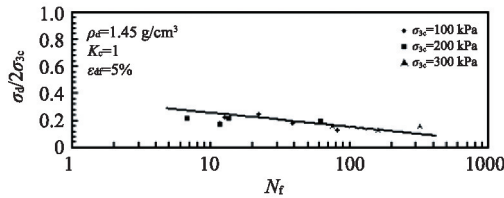


图5 饱和重塑黄土的动强度曲线

Fig. 5 Dynamic strength of saturated remolded loess

在同一破坏振次条件下, $\sigma_d/2\sigma_{3c}$ 随着固结压力 σ_{3c} 的增大而减小。当破坏振次 $N_f=10$ 时, 原状黄土在围压 100、200、300 kPa 条件下的动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 分别为 0.82、0.5、0.31。因此, 在破坏振次相同条件下, 固结压力较大时结构性黄土的破坏动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 相对较小, 原状黄土相应地能够承受较高的动应力 σ_d , 破坏相对较难。

通过图3的曲线对比可知, 相对于结构性原状黄土而言(图2), 饱和原状黄土在不同固结压力条件下, 动强度中动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 曲线差异相对较小, 动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 曲线随固结压力 σ_{3c} 的增大而略有下移。当破坏振次 $N_f=10$ 时, 饱和原状黄土在围压 100、200、300 kPa 条件下, 动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 分别为 0.42、0.31、0.22。试验结果表明, 饱和原状黄土由于饱和过程使其结构性大大降低, 固结压力对动强度中动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 曲线影响明显减小, 且在均压固结条件下, 动强度中动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 曲线虽然随着周围围压 σ_{3c} 的增大而下移, 但下移趋势减缓。

由于原状黄土的结构性较强, 在相同固结应力比条件下不同围压的原状黄土动强度曲线没有出现归一化的趋势, 而饱和原状黄土仍具有一定的结构性, 其动强度曲线归一化的趋势也不太明显。相对于饱和原状黄土的动强度而言, 当破坏振次 $N_f=10$ 时, 饱和过程使得原状黄土在围压 100、200、300 kPa 条件下的动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 分别下降 95.23%、61.29%、40.9%, 表明饱和过程导致天然原状黄土的结构性大大减小, 饱和原状黄土相对较易发生动强度破坏。

通过图4的曲线对比可知, 重塑黄土在不同固结压力条件下的动强度曲线仍然存在一定差异。在均压固结条件下, 动强度中动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 曲线随固结压力 σ_{3c} 的增大而下移; 同一破坏振次下, 动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 随着固结压力 σ_{3c} 的增大而减小。但当固结压力较大 ($\sigma_{3c} \geq 200$ kPa) 时, 固结压力为 200、300 kPa 条件下试验点分布在一个相对较窄的范围。

当破坏振次 $N_f=10$ 时, 重塑黄土在围压 100、200、300 kPa 条件下动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 分别为 0.68、0.49、0.38。试验分析表明, 重塑黄土仍具有一定的结构性, 动强度曲线归一化的趋势亦不明显; 与原状黄土相比, 固结压力对重塑黄土动强度的影响只在低围压时比较明显。

分析图5中饱和重塑黄土的动强度曲线, 由于重塑过程及饱和过程使得重塑黄土的结构性大大降低, 试验中固结压力对动强度曲线影响较小, 试验点基本分布在一个相对较窄的范围内, 具有相对明显的归一化趋势。当破坏振次 $N_f=10$ 时, 饱和重塑黄土在围压 100、200、300 kPa 条件下的动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 约为 0.26。

因此, 由于重塑黄土试样仍具有一定的结构性, 在相同固结应力比条件下不同围压的重塑黄土动强度曲线没有出现归一化趋势, 而饱和重塑黄土动强度曲线的归一化趋势相对较为明显。相对于饱和重塑黄土的动强度而言, 当破坏振次 $N_f=10$ 时, 饱和过程使得重塑黄土在围压 100、200、300 kPa 条件下的动应力比 ($\sigma_d/2\sigma_{3c}$) 分别下降 161.54%、88.46%、46.15%, 表明重塑及饱和过程导致重塑黄土的结构性大大降低, 饱和重塑黄土更容易发生动强度破坏。

综上所述, 黄土的结构性越显著, 其动强度曲线的归一化趋势越弱; 如果黄土的结构性越弱, 则其动强度曲线的归一化趋势越明显, 其中饱和重塑黄土动强度曲线的归一化趋势最明显。

2.2 饱和原状黄土与饱和重塑黄土的动孔压

在同一试验条件(相同的密度、固结应力比、周围压力)下, 根据不同动应力条件下饱和原状黄土、饱和重塑黄土的动孔压累积发展到破坏的过程, 可得出饱和原状黄土及饱和重塑黄土的动孔压比 u_d/σ_{3c} 与破坏振次 N_f 的半对数坐标关系曲线, 如图6、图7所示。

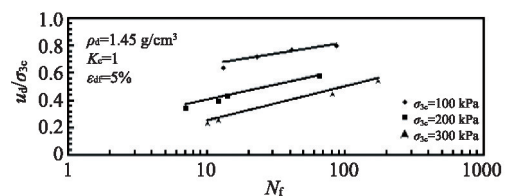


图6 饱和原状黄土动孔压比与破坏振次的关系曲线

Fig. 6 Ratio of dynamic pore pressure and failure vibrating times of saturated intact loess

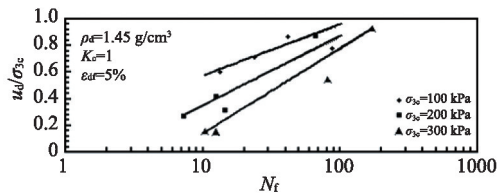


图7 饱和重塑黄土动孔压比与破坏振次的关系曲线

Fig. 7 Ratio of dynamic pore pressure and failure vibrating times of saturated remolded loess

对比分析图6、图7中饱和原状黄土、饱和重塑黄土动孔压比 u_d/σ_{3c} 与破坏振次 N_f 的关系曲线变化规律可知,均压固结条件下,饱和原状黄土及饱和重塑黄土的动孔压比 u_d/σ_{3c} 随着破坏振次 N_f 增大均呈增大趋势,但饱和原状黄土动孔压比随破坏振次呈现相对较缓的增大趋势,而饱和重塑黄土动孔压比随破坏振次则呈现相对快速增大的趋势。这是由于饱和重塑土样经过重塑、饱和两个扰动过程,黄土的结构性大大降低,使得饱和重塑黄土的结构性弱于饱和原状黄土的结构性,从而导致饱和重塑黄土动孔压比随破坏振次呈现相对快速增大的趋势。

3 结论

1) 在相同固结应力比条件下,由于天然含水率下原状黄土及重塑黄土的结构性均较强,不同围压下天然原状黄土与重塑黄土的动强度曲线均未呈现归一化趋势;饱和原状黄土仍具有一定的弱结构性,动强度曲线归一化趋势不太明显,而饱和重塑黄土的动强度曲线归一化趋势相对趋于明显。因此,黄土的结构性越显著,黄土动强度曲线的归一化趋势越弱;如果黄土的结构性越弱,那么黄土动强度曲线的归一化趋势越明显。

2) 相对于饱和原状黄土的动强度,当破坏振次 $N_f=10$ 时,经饱和过程导致天然原状黄土在围压 100、200、300 kPa 下的动应力比下降幅度分别为 95.23%、61.29%、40.9%,饱和过程使天然原状黄土的结构性大大降低,饱和原状黄土相对较易发生动强度破坏。

3) 相对于饱和重塑黄土的动强度,当破坏振次 $N_f=10$ 时,经过饱和过程导致重塑黄土在围压 100、200、300 kPa 下的动应力比下降幅度分别为 161.54%、88.46%、46.15%,重塑及饱和过程使得重塑黄土的结构性大大降低,饱和重塑黄土更易发生动强度破坏。

4) 在均压固结条件下,饱和原状黄土的结构性强于饱和重塑黄土的结构性,饱和原状黄土的动孔压比随着破坏振次的增大呈现相对缓慢的增大趋势,而饱和重塑黄土的动孔压比随着破坏振次的增大呈现相对快速增大的趋势。

参考文献 (References)

[1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.
Xie Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13.

[2] 谢定义, 齐吉林. 土结构性及其量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.
Xie Dingyi, Qi Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651-656.

[3] 陈存礼, 胡再强, 高鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1891-1896.

Chen Cunli, Hu Zaiqiang, Gao Peng. Research on relationship between structure and deformation property of intact loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 1891-1896.

[4] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531-536.
Shao Shengjun, Zhou Feifei, Long Jiyong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 531-536.

[5] 邵生俊, 邓国华. 原状黄土的结构性强度特性及其在黄土隧道围岩压力分析中的应用[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 93-98.
Shao Shengjun, Deng Guohua. The strength characteristics of loess with different structures and its application in analyzing the earth pressure on loess tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11): 93-98.

[6] 邵生俊, 龙吉勇, 杨生, 等. 湿陷性黄土结构性变形特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1668-1672.
Shao Shengjun, Long Jiyong, Yang Sheng, et al. Analysis of structural deformation properties of collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1668-1672.

[7] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 复杂应力状态下的土结构性参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4248-4251.
Luo Yasheng, Xie Dingyi, Shao Shengjun, et al. Structural parameter of soil under complex stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4248-4251.

[8] 邓国华, 邵生俊. 基于真三轴试验的黄土结构性变化规律研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 679-684.
Deng Guohua, Shao Shengjun. Research on change structural characteristics of loess based on true triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 679-684.

[9] 方娟, 邵生俊, 陈昌禄. 单轴抗压强度和圆锥贯入度条件下的构度指标[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2014, 33(2): 207-212.
Fang Juan, Shao Shengjun, Chen Changlu. Structural index by unconfined compressive strength and cone penetrometer[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2014, 33(2): 207-212.

[10] 邵生俊, 郑文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 15-19.
Shao Shengjun, Zheng Wen, Wang Zhenghong, et al. Structural index of loess and its testing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 15-19.

[11] Li R J, Liu J D, Yan R, et al. Characteristics of structural loess strength and preliminary framework for joint strength formula[J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(3): 319-330.

[12] Li R J, Liu J D, Yan R, et al. Evaluation of loess landslide disaster based on the developed hyperbola strength of structural loess[J]. Disaster Advances, 2013, 6(s5): 316-326.

[13] Rinaldi V A, Capdevila J A. Effect of cement and saturation on the stress-strain behavior of a silty clay[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils. American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication, 2006, 147: 1157-1168.

[14] Capdevila J A, Rinaldi V A. Stress-strain behavior of a heterogeneous and lightly cemented soil under triaxial compression test[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 20(6): 6745-6760.

[15] 王谦, 王峻, 王兰民, 等. 石碑塬饱和黄土地震液化机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增2): 4168-4173.

- Wang Qian, Wang Jun, Wang Lanmin, et al. Dissussion on mechanism of seismic liquefaction of saturation loess in Shibeit Tableland, Guyuan city[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (Suppl 2): 4168-4173.
- [16] 杨利国, 骆亚生, 李焱, 等. 初始应力条件对压实黄土动强度影响的研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 87-91.
Yang Ligu, Luo Yasheng, Li Yan, et al. Research on effect of initial stress conditions on dynamic strength of compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 87-91.
- [17] 李雨倩, 李光元, 谷天峰, 等. 基于动三轴试验的黄土高边坡地震稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(30): 232-236.
Li Yuqian, Li Guangyuan, Gu Tianfeng, et al. Analysis on earthquake stability of loess slope based on dynamic triaxial text[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(30): 232-236.
- [18] 慕焕东, 邓亚虹, 彭建兵. 西安地区地裂缝带黄土动力特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(5): 951-957.
Mu Huandong, Deng Yahong, Peng Jianbing. Experimental research on loess dynamic characteristics at ground fissure belt in Xi'an area [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(5): 951-957.
- [19] 李忠铭, 愈国安. 不同应力状态土的动强度问题[J]. 桂林工学院学报, 2002, 22(3): 269-273.
- Li Zhongming, Yu Guoan. On dynamic strength of soil under different stress conditions[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2002, 22 (3): 269-273.
- [20] Jiang M J, Zhang F G, Hu H J, et al. Structural characterization of natural loess and remolded loess under triaxial tests[J]. Engineering Geology. 2014, 181(2): 249-260.
- [21] 宋章, 程谦恭, 张炜, 等. 原状黄土的结构强度变形特性分析[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(3): 6-11.
Song Zhang, Cheng Qiangong, Zhang Wei, et al. Analysis of structural strength and deformation properties of intact loess[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, 24(3): 6-11.
- [22] Kamei T, Tokida M. Comparison of undrained shear characteristics of undisturbed and remoulded cohesive soil[C]//Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. Tokyo: Published by Japan Society of Civil Engineers, 1993: 135-138.
- [23] Zhong Z L, Liu Y X, Liu X R, et al. Influence of moisture content on shearing strength of unsaturated undisturbed quaternary system middle pleistocene[J]. Journal of Central South University. 2015, 22(7): 2776-2782.

Structural index and dynamic strength attenuation characteristics of structural loess in Pan'an

SUN Ping^{1,2}, LI Rongjian³, LIU Junding³, ZHANG Yuan³, ZHANG Shuai^{1,2}

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China
2. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China
3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

Abstract Based on the unconfined uniaxial compression tests of Pan'an loess, the structure index and the structure variations between the intact loess and the remolded loess are analyzed. Then, by means of dynamic triaxial tests, the comparison is performed for dynamic strength attenuation characteristics between natural intact loess, remolded loess, saturated intact loess and saturated remolded loess. Results show the followings. Owing to the structure of loess, the dynamic strength of natural intact loess with stronger structure is obviously higher than that of remodeled loess; though the saturation process makes the dynamic strength of intact loess reduced greatly, the dynamic strength of saturated intact loess is still higher than that of the saturated remodeled loess, and the dynamic pore pressure of saturated intact loess grows significantly slower than that of the saturated remodeled loess. In addition, the dynamic strength curves of loess with stronger structure will not be normalized.

Keywords loess; structure; structural index; dynamic strength; dynamic pore pressure

(责任编辑 韩星明)