

# 含水率和应力水平对粉质黏土动力性能影响研究

黄贝贝<sup>1</sup>, 马川义<sup>2</sup>, 刘依依<sup>1</sup>, 王 凯<sup>2</sup>, 李景磊<sup>1</sup>, 蒋红光<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

<sup>2</sup>山东高速集团有限公司, 山东 济南

Email: \*hongguang\_jiang@sdu.edu.cn

收稿日期: 2021年8月25日; 录用日期: 2021年9月21日; 发布日期: 2021年9月28日

## 摘 要

基于室内动三轴试验, 对不同含水率、不同应力水平下土体动态回弹模量和长期变形特性进行了研究。结果表明: 增大围压、减小含水率可有效提高动态回弹模量。其中, 动态回弹模量随着偏应力比(即附加应力与围压比)的增加而呈指数式衰减; 同时土体塑性变形随着振次的增加逐渐累加, 荷载水平较低时, 塑性变形发展速率比较缓慢, 而当荷载水平较高时, 塑性变形发展速率明显增加。

## 关键词

动三轴试验, 粉质黏土, 动态回弹模量, 应力水平

# Effect of Moisture Content and Stress Level on Dynamic Performance of Silty Clay

Beibei Huang<sup>1</sup>, Chuanyi Ma<sup>2</sup>, Yiyi Liu<sup>1</sup>, Kai Wang<sup>2</sup>, Jinglei Li<sup>1</sup>, Hongguang Jiang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Shandong Hi-Speed Group, Jinan Shandong

Email: \*hongguang\_jiang@sdu.edu.cn

Received: Aug. 25<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 21<sup>st</sup>, 2021; published: Sep. 28<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The dynamic resilient modulus and long-term deformation characteristics of soil under different water contents and different stress levels were studied through indoor dynamic triaxial tests. The

\*通讯作者。

文章引用: 黄贝贝, 马川义, 刘依依, 王凯, 李景磊, 蒋红光. 含水率和应力水平对粉质黏土动力性能影响研究[J]. 土木工程, 2021, 10(9): 882-893. DOI: 10.12677/hjce.2021.109100

results show that increasing confining pressure and reducing water content can effectively improve the dynamic resilient modulus. The dynamic resilient modulus decreases exponentially with the increase of deviatoric stress ratio (the ratio of additional stress to confining pressure). At the same time, the plastic deformation of soil gradually accumulates with the increase of vibration times. When the load level is low, the development rate of plastic deformation is slow, and when the load level is high, the development rate of plastic deformation increases significantly. When the compaction degree is 94%, the optimal moisture content is 20%, and the plastic deformation is the smallest, which can be used to guide the subgrade design.

## Keywords

Dynamic Triaxial Test, Silty Clay, Dynamic Resilient Modulus, Stress Level

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

路基回弹模量反映了路基土在车轮荷载作用下的应力-应变非线性特性，是路面结构设计和路基质量检测的重要参数，随着路基路面设计理念的发展，采用动态回弹模量可更好地表达路基对于路面结构的支撑作用。我国《公路路基设计规范(JTG D30-2015)》也不再使用原有的静态回弹模量指标[1]，开始以动态回弹模量作为路基结构的设计指标和质量控制要求，但路基土通常处于地下水位以上且暴露于大气中，运营期间易受气候季节性变化及车辆荷载的影响[2]，因此需要考虑含水率及应力水平变化对于路基动态回弹模量的影响。

国内外很多学者都对路基土的动态回弹模量有深入的研究，总体来说，动态回弹模量受到应力水平、含水率、压实度、土体类型和土体结构等因素影响[3]。凌建明等(2007) [4]对黏土、粉土、砂土这三种典型路基土进行室内三轴实验发现，对于不同的应力水平，相同物理状态下路基土的回弹模量均有较大变化，其差异值最大可达 2.5~2.8 倍，围压应力对砂土回弹模量有显著影响，而偏应力对砂土回弹模量的影响较小。偏应力和围压应力对黏土和粉土的回弹模量均有显著影响，Lekarp (2008) [5]等认为围压应力对路基细粒土模量的影响要显著大于偏应力。董城等(2012) [6]通过对粉土进行动态回弹模量研究发现，粉土的动态回弹模量随着围压和压实度的提高而增大，随循环偏应力和含水量的增大而减小，认为偏应力比围压对回弹模量的影响更加显著。Khouryn 等(2013) [7]对路基土动态回弹模量随含水率的变化规律开展了试验研究，并建立了两者经验关系。李志勇等(2015) [8]对红黏土进行动态回弹模量试验认为回弹模量随着体应力的增加而增大，且认为偏应力对回弹模量的影响更加显著。在保证路及强度要求的前提下，对于红黏土路基而言，一般要求碾压含水率控制在  $w_{opt}-w_{opt} + 4\%$  范围内。Thompson 和 Robnet (2013) [9]认为，低黏粒含量和高粉粒含量将会导致较低的回弹模量值；同时低的塑性指数和液限指数，低比重和高有机物含量将会导致较低的回弹模量值。Janoo 和 Bayer II (2010) [10]指出当大粒径含量上升时，回弹模量也会增加。

通过对路基土的调查结果和研究现状分析，针对山东黄泛区中高液限粘土路基填料[11]，基于动三轴加载试验，开展了 3 种湿度状态、3 种围压、7 种偏应力比的土体动态回弹模量和长期变形特性试验研究，分析土体的动态回弹模量及永久(塑性)应变的演化规律，以评价该土体的动力稳定性与路

用性能。

## 2. 试验研究

### 2.1. 试验材料

试验采用山东黄泛区中高液限粘土，依托济徐高速公路的东平至济宁段和德商高速的夏津段，两高速穿越区域属黄泛区冲淤积地貌。参照《公路土工试验规程(JTG E40-2007)》，通过室内试验得到试验土样界限含水率等基本物理性质指标如表 1，颗粒分析曲线见图 1。

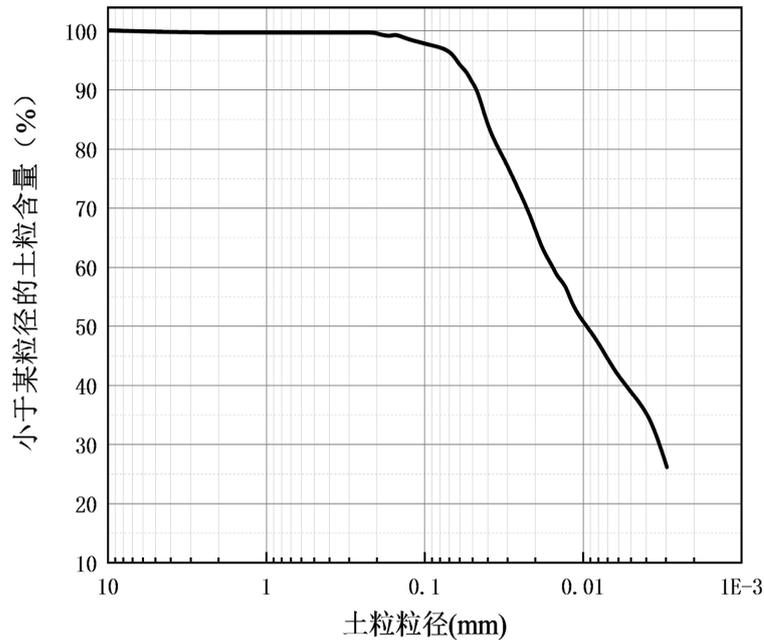


Figure 1. Soil Gradation Curve  
图 1. 土体颗粒分析曲线

Table 1. Statistical geotechnical properties of test soil  
表 1. 试验用土物理力学指标

$\rho_{d\max}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$w_{opt}$ (%)	$w_L$ (%)	$w_p$ (%)	$I_p$ (%)
1.83	17	47.7~54.9	23.4~30	24.3~24.9

### 2.2. 室内动三轴试验

为分析含水率及应力水平对粉质黏土动态回弹模量的影响，将原状土样风干、碾碎、过 2 mm 筛后，配置成目标含水率为 17%、20%、23% 三种土样，每种含水率下制备压实度为 94% 进行动三轴试验。试样采用静压压实成型，按照径高比 1:2 制作成高度为 200 mm 直径  $\phi$  为 100 mm 的圆柱体试件。

试验基于 MTS 动三轴试验系统，参照《公路路基设计规范(JTG D30-2015)》提供的路基土动态回弹模量的试验方法进行加载试验，施加频率 10 Hz 的半正弦荷载，并在试件首先在给定围压下进行预加载直至变形稳定，以消除加载帽或底座与试件之间的接触变形。每一级加载序列循环荷载加载次数为 100 次，试验加载序列如表 2 所示。对试样的每一个加载序列，取最后 5 次回弹变形的平均值，按式(1)计算各应力状态下，循环荷载作用后土样的动回弹模量。

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \quad (1)$$

式中： $M_R$  为动回弹模量； $\sigma_d$  为重复偏应力峰值： $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ， $\sigma_1$  为最大主应力， $\sigma_3$  为最小主应力，分别对应于试验中的竖向应力和围压应力； $\varepsilon_R$  为偏应力峰值对应的轴向回弹应变，取相应动载序列下最后 5 次循环加卸载的平均值。

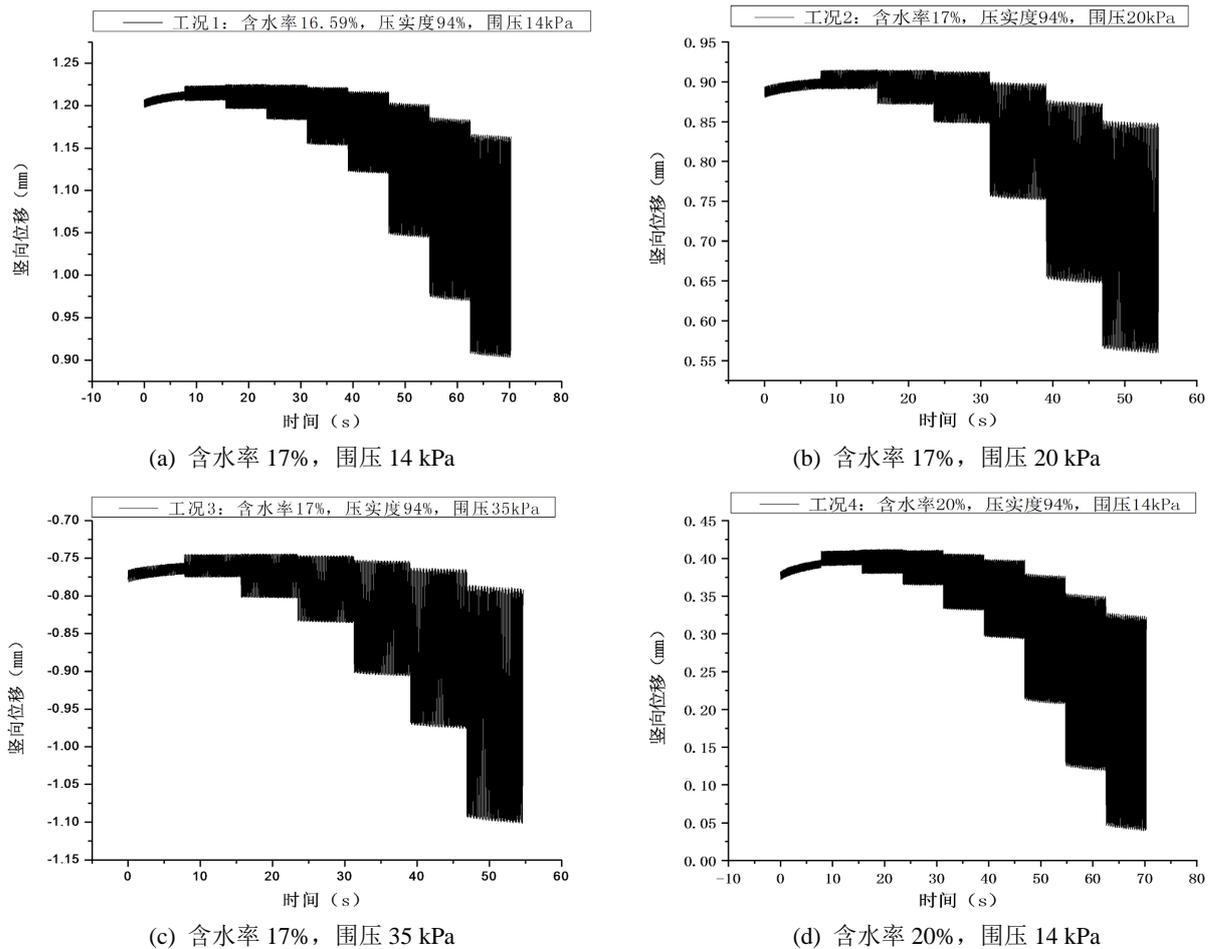
**Table 2.** Test condition table

**表 2.** 试验工况表

加载阶段	含水率	围压	偏应力
长期动力加载	wopt	14 kPa	0.2
			0.4
短时动力加载	wopt + 3%	20 kPa	0.7
			1
			1.5
	wopt + 6%	35 kPa	2
			3

### 3. 试验结果分析

#### 3.1. 动态回弹模量试验结果



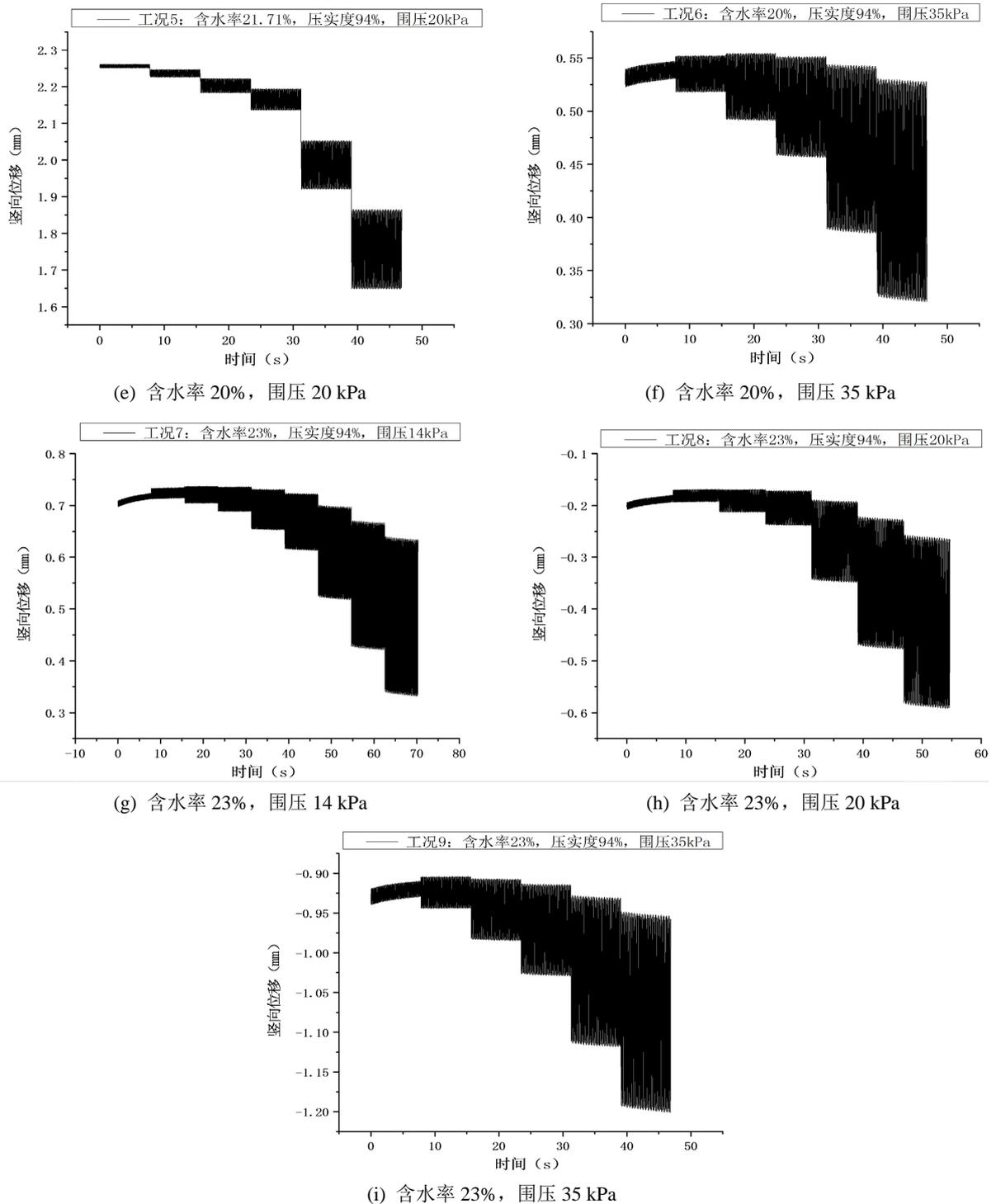


Figure 2. Vertical displacement varying with time

图 2. 各工况竖向位移随时间变化

各工况竖向位移随时间变化相关关系如图 2 所示，参照《公路路基设计规范(JTG D30-2015)》提供的路基土动态回弹模量的试验方法，计算得出不同含水率下动态回弹模量与应力状态(围压、偏应力比)的相关关系如图 3 所示。整体来说，减小含水率可有效提高动态回弹模量，同一偏应力比下，动态回弹模量

随着围压的增大而增大，随着偏应力比的增大呈非线性减小。其中，在同一围压及含水率下，随着偏应力比的增衰减约 35%，达到临界偏应力比后动态回弹模量的衰减趋于稳定，且相对于含水率变化对于动态回弹模量的影响，围压对于动态回弹模量的影响程度大一点。

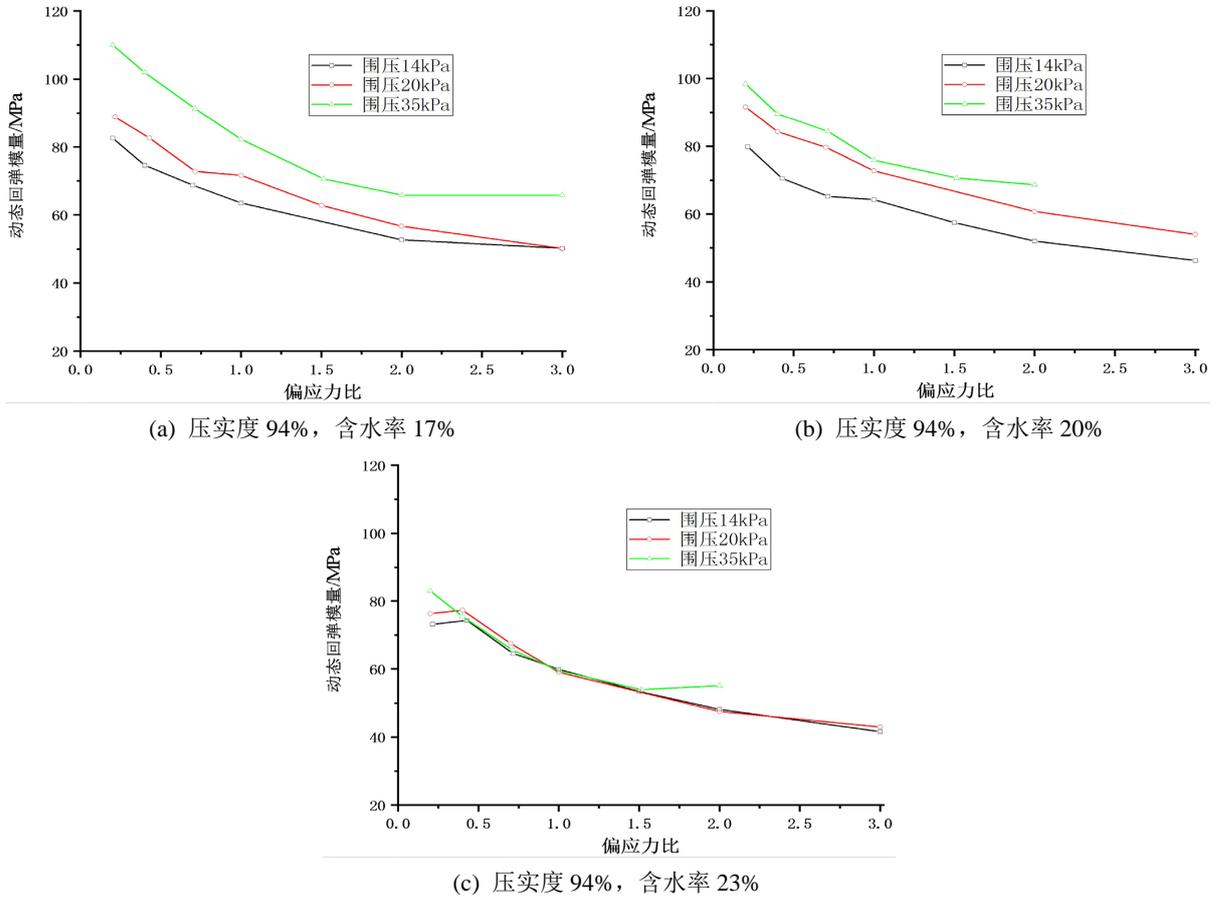
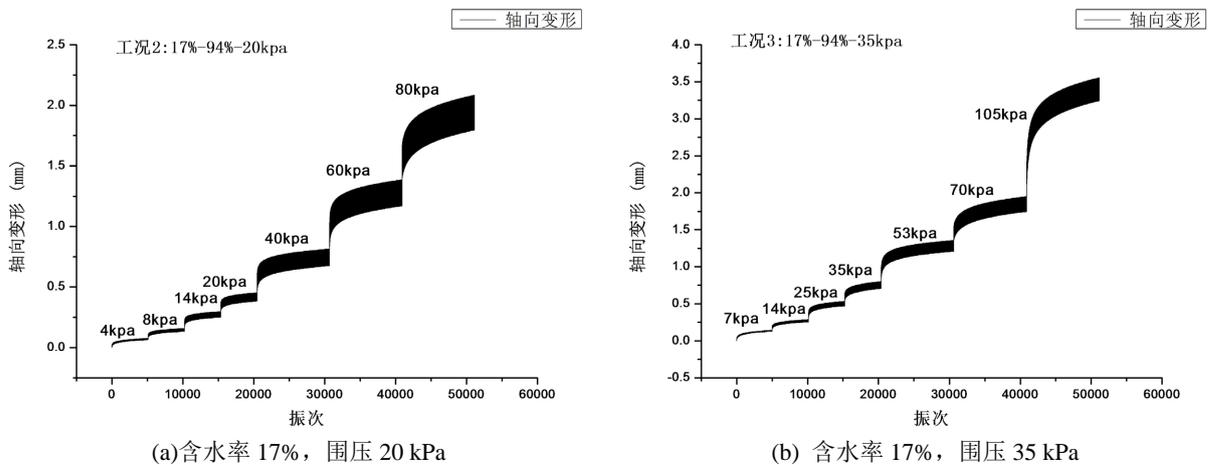
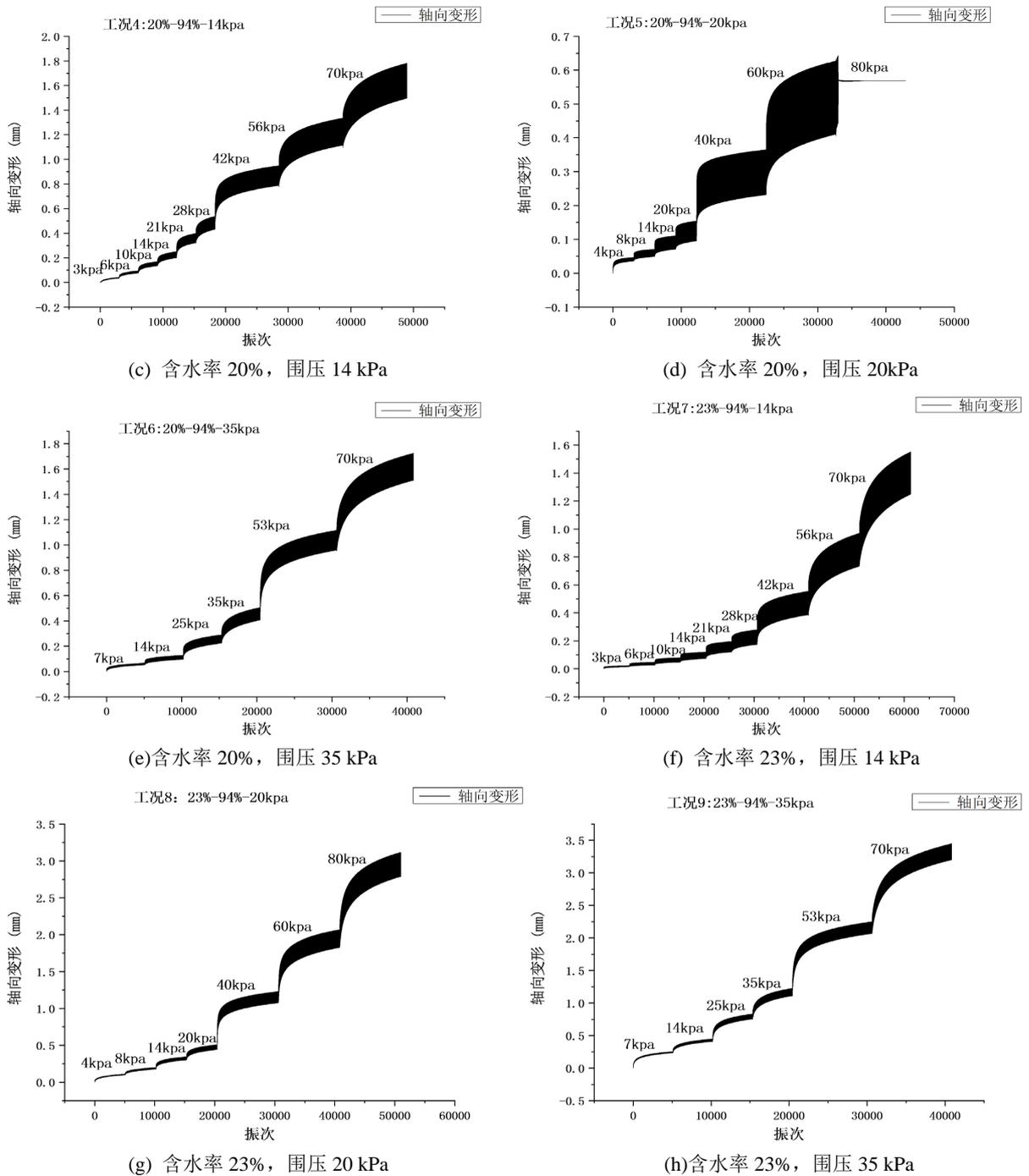


Figure 3. Relationship between resilient modulus of soil and stress state and physical state  
 图 3. 土体回弹模量与应力状态和物理状态关系

### 3.2. 长期变形试验结果





**Figure 4.** Relationship between axial deformation and vibration frequency of soil  
**图 4.** 土体轴向变形与振次关系

动三轴试验获得的轴向变形与振次的关系如图 4 所示。总体来说，轴向变形由可恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形组成，其中塑性变形随着振次的增加逐渐累加，但荷载水平较低时，塑性变形发展速率比较缓慢，而且在有限的振次内达到收敛；而当荷载水平较高时，塑性变形发展速率明显增加，而且需要更多的振次才能达到收敛，并随着荷载水平的提高最终呈现出不收敛状态(工况 1 因加载数据不规律，未采用)。

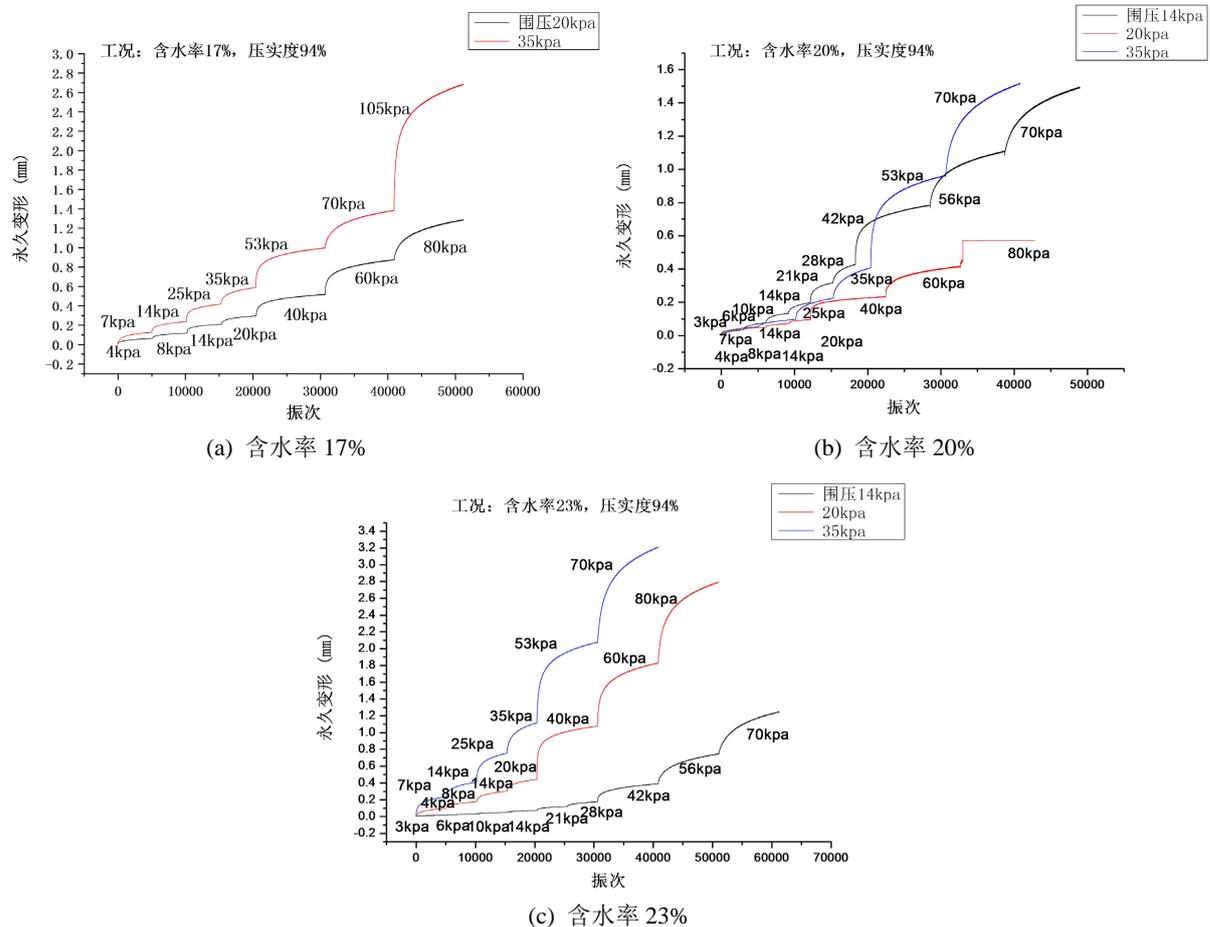


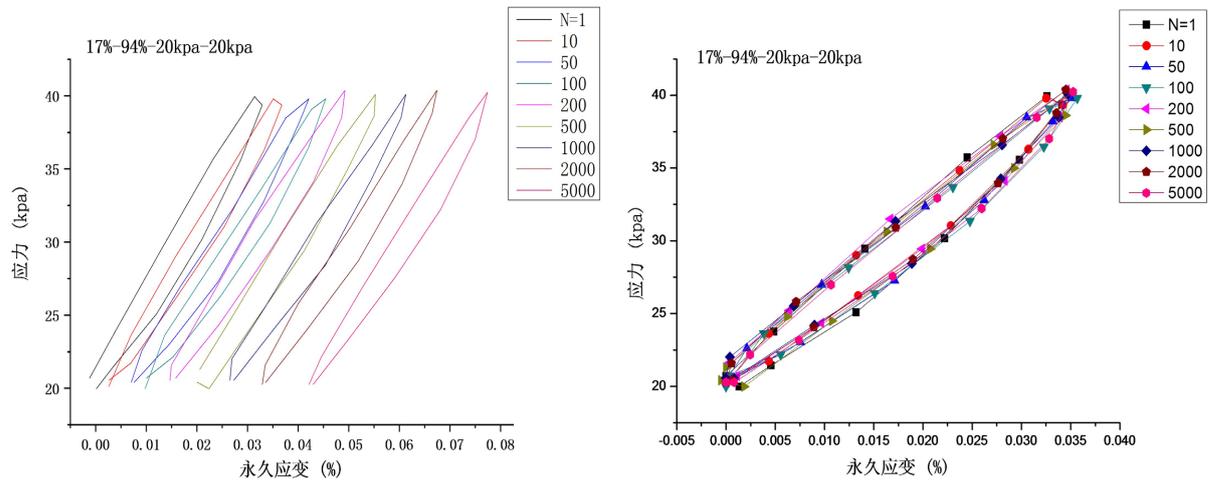
Figure 5. Relationship between permanent deformation and vibration curve

图 5. 永久变形 - 振次曲线

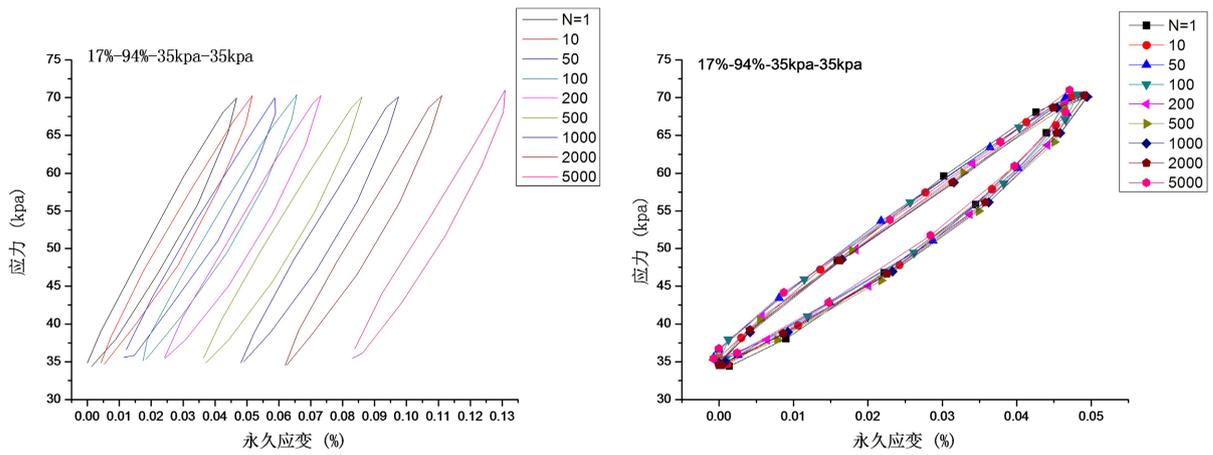
取轴向变形曲线中的波谷点绘制塑性变形(永久变形)与振次的关系曲线, 如图 5 所示。当围压为 14 kPa、20 kPa、35 kPa 时, 塑性变形的发展均分为 3 个阶段以含水率 17%、压实度为 94%、围压为 20 kPa 为例:

- 1) 轴向荷载由 4 kPa 增大至 20 kPa 时, 塑性变形增长缓慢, 经过 20,000 次动力加载, 塑性变形仅为 0.296 mm (塑性应变变量 0.15%), 而且塑性变形在有限的振次内达到收敛, 不再增加;
- 2) 轴向荷载由 20 kPa 增大至 60 kPa 时, 塑性变形增长加快, 经过 20,000 次动力加载, 塑性变形增量为 0.580 mm (塑性应变增量 0.29%), 而且塑性变形需要更多的振次才能达到收敛;
- 3) 轴向荷载由 60 kPa 增大至 80 kPa 时, 塑性变形出现急剧增长, 经过 10,000 次动力加载, 塑性变形增量为 0.409 mm (塑性应变增量 0.20%), 且塑性变形不再收敛, 土体已开始屈服。

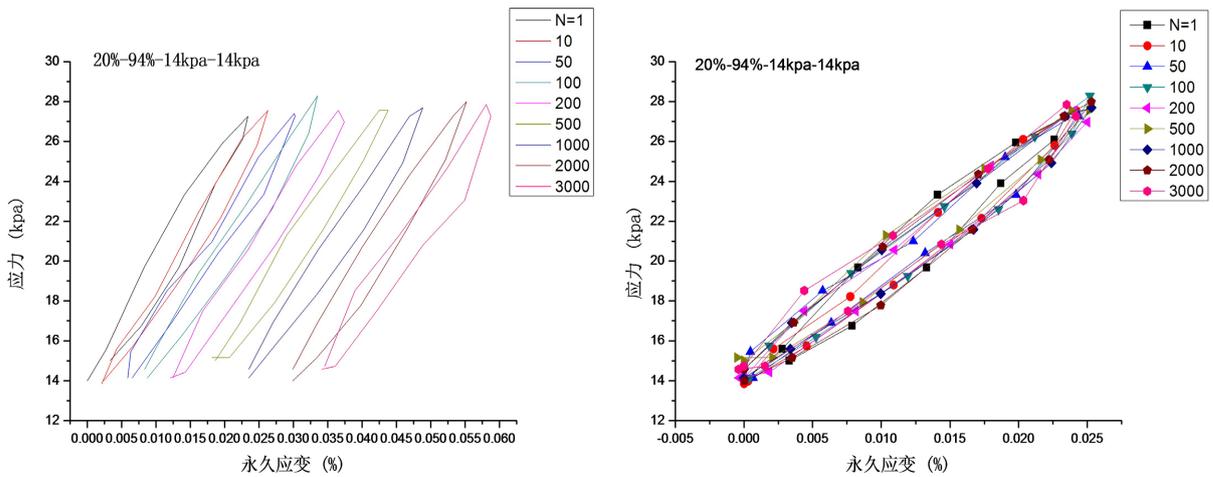
为研究应变发展规律, 选取动应力比(轴压与 2 倍围压比)为 0.50 下的永久应变与对应的应力, 作应力 - 应变关系曲线如图 6。选取振次为 1、10、50、100、200、500、1000、2000 和 5000 次下的应力 - 应变曲线, 即典型振次下的滞回曲线。随着循环振次的增加, 应力 - 应变滞回圈逐渐向应变增大的方向移动, 从图 6 中可以看出, 以含水率 17%、压实度为 94% 工况为例, 在围压为 20 kPa 时, 试样在最初的 2000 次循环产生了 0.033% 的累积应变, 而在 2000 至 5000 次的循环内仅仅产生了 0.009% 的累积应变; 在围压为 35 kPa 时, 在最初的 2000 次循环产生了 0.062% 的累积应变, 在 2000 到 5000 次循环内产生了 0.021% 的累积应变。这都显示了累积应变速率随循环振次的增加而逐渐减小。



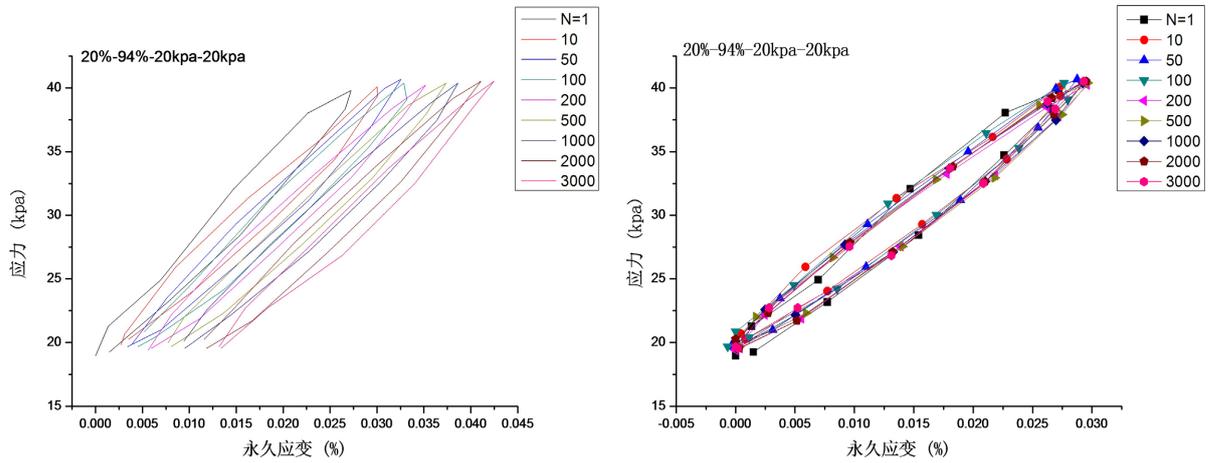
(a) 含水率 17%，围压 20 kPa



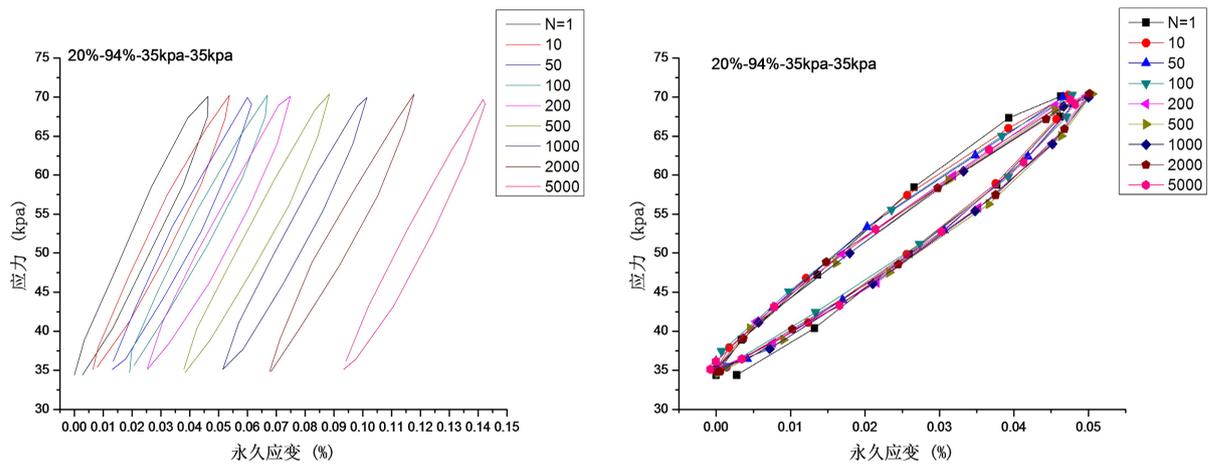
(b) 含水率 17%，围压 35 kPa



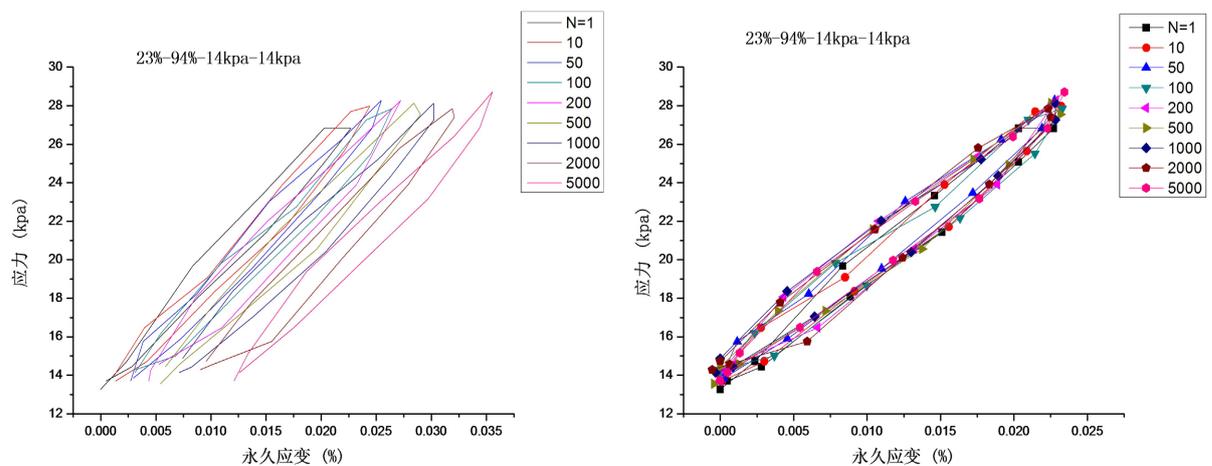
(c) 含水率 20%，围压 14 kPa



(d) 含水率 20%，围压 20 kPa



(e) 含水率 20%，围压 35 kPa



(f) 含水率 23%，围压 14 kPa

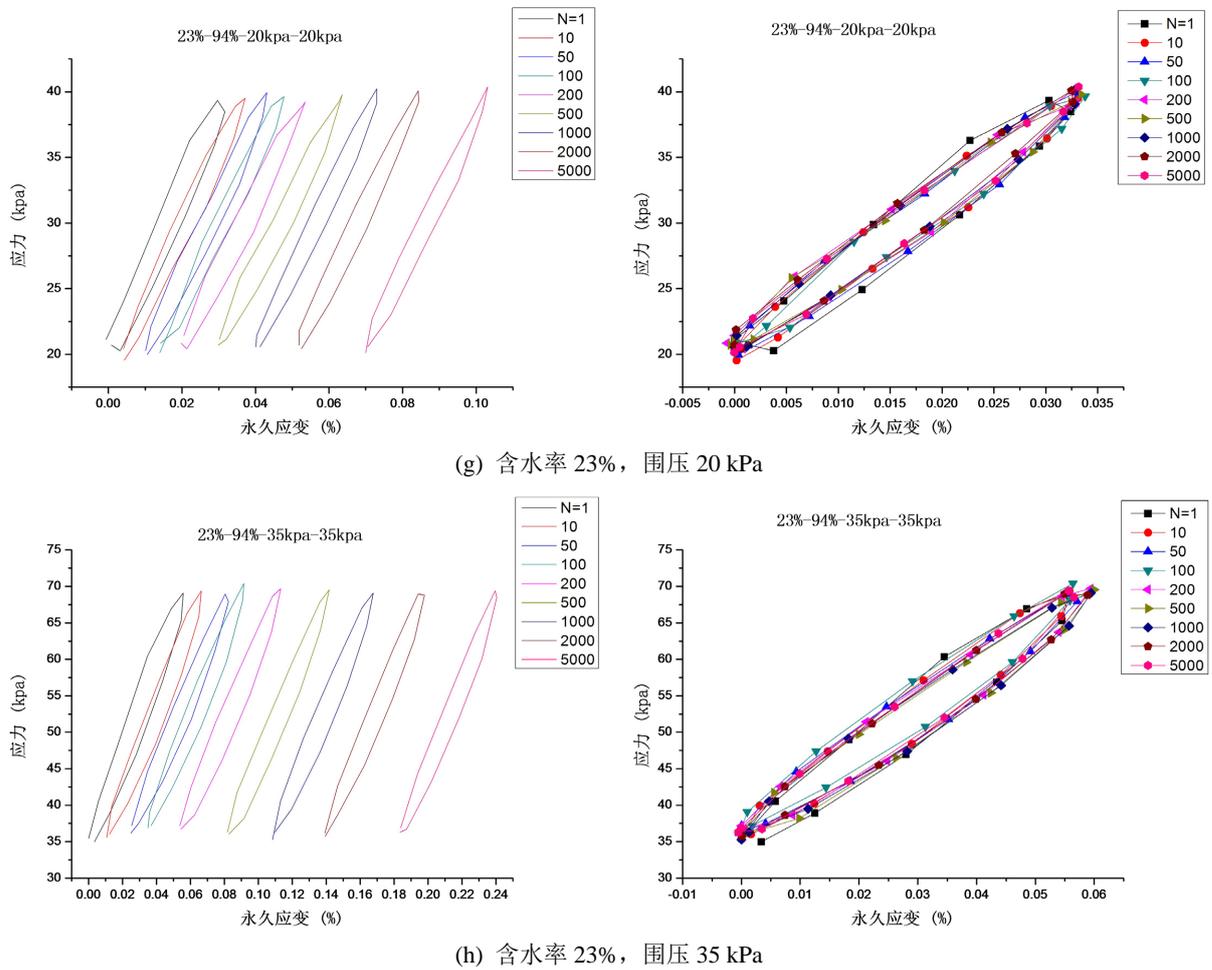


Figure 6. Stress-strain curve under long-term dynamic loading

图 6. 长期动力加载下的应力 - 应变曲线

为分析试样应力 - 应变曲线随循环振次的变化，将每一振次下的累积变形忽略，使应力 - 应变滞回圈统一从原点出发，如图所示，可以看出随着振次的增加，滞回圈在一定范围内并未向横轴或纵轴倾斜，说明在相同动应力下，回弹变形值基本保持不变，也同时说明了回弹模量在同一动应力下，随振次的增长基本维持稳定，土体强度较高并没有发生软化的现象。

#### 4. 结论

通过对土体试样进行室内动三轴试验，对不同含水率，不同应力水平下所得试验数据进行处理分析，得到关于土体动态回弹模量和长期变形试验成果等相关结论如下：

- 1) 减小含水率可有效提高动态回弹模量，同一偏应力比下，动态回弹模量随着围压的增大而增大，随着偏应力比的增大呈非线性减小；
- 2) 其中塑性变形随着振次的增加逐渐累加，但荷载水平较低时，塑性变形发展速率比较缓慢，而且在有限的振次内达到收敛；而当荷载水平较高时，塑性变形发展速率明显增加，而且需要更多的振次才能达到收敛，并随着荷载水平的提高最终呈现出不收敛状态；
- 3) 典型振次下的滞回曲线。随着循环振次的增加，应力 - 应变滞回圈逐渐向应变增大的方向移动且累积应变速率随循环振次的增加而逐渐减小，最终回弹变形值基本保持不变。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准. JTG D30-2015, 公路路基设计规范[S].
- [2] 钱劲松, 王朋, 凌建明, 等. 潮湿多雨地区高速公路路基湿度的实测特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 1812-1817.
- [3] 林小平, 李兴华, 凌建明, 等. 路基土回弹模量湿度调整系数预估研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 1490-1494.
- [4] 凌建明, 陈声凯, 曹长伟. 路基土回弹模量影响因素分析[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(4): 446-451.
- [5] Lekarp, F., Isacsson, U. and Dawson, A. (2000) State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, **126**, 102-113. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66))
- [6] 董城, 冷伍明, 李志勇. 粉土动态回弹模量试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012(12): 4834-4839.
- [7] Khoury, N., Brooks, R., Boeni, S.Y., et al. (2013) Variation of Resilient Modulus, Strength, and Modulus of Elasticity of Stabilized Soils with Postcompaction Moisture Contents. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **25**, 160-166. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000574](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000574)
- [8] 李志勇, 董城, 邹静蓉, 等. 湘南地区红黏土动态回弹模量试验与预估模型研究[J]. 岩石力学, 2015, 36(7): 1840-1846.
- [9] Thompson, M.R. and Robnett, Q.L. (1979) Resilient Properties of Subgrade Soils. *Transportation Engineering Journal*, **105**, 71-89. <https://doi.org/10.1061/TPEJAN.0000772>
- [10] Janoo, V.C. and Bayer II, J.J. (2006) The Effect of Aggregate Angularity on Base Course Performance. U.S. Army.
- [11] 蒋红光, 曹让, 马晓燕, 等. 考虑路基平衡湿度状态的黄泛区中高液限黏土抗剪强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2819-2828.