

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.01.009

滨海淤泥固化土的动模量与阻尼比特性研究

王桂萱, 张虎韦, 赵杰

(大连大学 土木工程技术与开发中心, 辽宁 大连 116622)

摘要: 采用海洋淤泥与固化剂混合形成的固化土对地基工程进行处理, 相比于回填土、开山石作为地基材料要更加经济, 淤泥固化土可广泛用于道路、堤防、填海造地等工程领域。通过对大连金州湾海域海洋淤泥土进行不同掺入比(8%、10%、12%)的固化处理, 采用动三轴试验对不同(掺入比、围压)条件下的固化土进行动力特性试验。结果表明: 当固结应力与动剪应变值不变时, 固化土的动剪模量随着掺入比的增大而增大, 阻尼比减小; 当动剪应变小于临界值 10^{-3} 时, 动剪模量减小的速率较小, 阻尼比增长曲线缓慢, 当动剪应变大于 10^{-3} 时, 模量值衰减速率增大, 而阻尼比增长变快; 当固化剂的掺入比大于 10% 时, 固结应力的增大对固化土动模量的影响稍有减弱。

关键词: 海洋淤泥; 固化土; 动三轴; 动剪模量; 阻尼比

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)01-0051-05

Experimental Study on Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Solidified Soil in Marine Silt

WANG Guixuan, ZHANG Huwei, ZHAO Jie

(Civil Engineering Technology Research and Development Center, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China)

Abstract: The solidified soil formed by mixing marine sludge and solidifying agent is often used to treat the foundation engineering. It is more economical than the backfill and open rock as the foundation material. The solidified soil can be widely used in roads, dikes, reclamation and other engineering fields. Through the different treatment ratios (8%, 10%, 12%) of the marine silt in the Jinzhou Bay of Dalian, the dynamic triaxial test is used under different conditions (incorporation ratio, age, confining pressure). The solidified soil was tested for dynamic properties. The results show that when the consolidation stress and dynamic shear strain are constant, the dynamic shear modulus of solidified soil increases with the increase of the mixing ratio, but the damping ratio will decrease. When the dynamic shear strain is less than the critical value 10^{-3} , the rate of reduction of the dynamic shear modulus is small, and the damping ratio growth curve is slow. When the dynamic shear strain is greater than 10^{-3} , the decay rate of the modulus value increases, while the damping ratio increases faster; When the curing agent is mixed the ratio is greater than 10%, the influence of the increase of the consolidation stress on the dynamic modulus of the solidified soil is slightly weakened.

Keywords: marine silt; solidified soil; dynamic triaxial; dynamic shear modulus; damping ratio

近年来,我国开始利用沿海滩涂进行填海造陆的工程拔地而起,如南海岛礁机场建设、大连新机场填海造陆工程、厦门翔安机场等超大规模建筑。由

于海洋淤泥土本身的力学性质无法满足工程要求,这就不得不采用开山石之类的土地资源进行地基处理,从而导致国土资源日益匮乏。所以有必要开发

收稿日期:2019-10-04

修稿日期:2019-11-13

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51678100);辽宁省自然科学基金指导计划(20170540043)

作者简介:王桂萱(1960—),男,辽宁盖州人,教授,主要从事岩土工程数值模拟、建筑物健康诊断和工程抗震等方面的研究工作。

E-mail: tumuxinxi@163.com

通讯作者:赵杰(1980—),男,河北邢台人,副教授,主要从事岩土与地下工程、工程抗震方面的研究工作。

E-mail:13942691061@163.com

一种可以代替土地资源作为填海造陆的材料,对淤泥进行固化处理是一种行之有效的处理方法,不仅解决了淤泥废弃对环境造成的危害,而且也能将固化后的土料用于道路、堤防、填海造地等工程的回填材料,又能产生新的可再生资源,对于社会可持续发展具有重大的意义。

就淤泥固化土技术方面来讲,美、日、英等国外发达的一些国家在淤泥固化土处理方面的技术日益成熟。而我国目前处于研究起步阶段,大部分研究主要集中于固化土的静力方面,而对于动力特性方面的研究较少。我国学者对于淤泥固化土的研究也开展了大量的研究工作。吴月龙等^[1]学者通过采用充灌模袋筑堤试验对海洋淤泥土进行了固化处理研究,试验结果显示,掺加水泥使淤泥固结快,效果更加明显。周世宗等^[2]对通过掺入一定比例的矿渣和粉煤灰对南沙软土进行固化试验研究。陈冲等^[3]利用工业废渣为主要原材料配制而成的新型土体固结材料—土体固结粉,研究了土体固结粉在软土地基加固中实际工程中的实用性。胡孝彭等^[4]对河道疏浚淤泥土处置问题进行了探讨。胡孝彭等^[5]基于离心机法对淤泥固化的土水特征曲线进行了研究。由于沿海地区含沙性淤泥土的分布也比较常见,学者李晓玲等^[6]对该类土进行了全方位的分析研究,阐述了此类土含水率较小、沙的含量与所研究的沙性淤泥土的物理性质有关系。指出含沙量的多少影响了该类土本身的抗剪能力以及承载力的大小。黏粒含量的多少对淤泥软土的影响是冯志超等^[7]通过室内试验研究发现的,此类黏土影响着土最重要的两个物理指标黏聚力和内摩擦角的大小。由于淤泥土形成的环境以及年代的不同,其工程特性也各有不同之处,杨顺安等^[8-9]进行了相关问题的研究分析,得出了淤泥形成年代越久远其稳定性越好。研究学者冯晓腊^[10]利用电镜扫描技术外加室内试验进行了淤泥土的研究与分析,得出构成淤泥土的形状不同其物理力学性质也不尽相同,对建设工程的影响也不相同。在 20 世纪 50 年代,大量的外国学者对淤泥固化土的特性开始了探索研究。最早在实验室内对于淤泥固化土做了相关试验研究的是 Seed 等^[11-16]著名学者,他们在施加循环荷载条件下主要对淤泥固化土的变形和强度两方面进行了研究与分析,在同等情况下国外学者 Brown 等^[17]也进行了类似的试验研究,通过试验总结得出了淤泥固化土在施加循环荷载条件下的变形过程,以及说明了固化土的变形与加荷的时间间隔有关,因而探索出了淤泥固化土在动荷载条件下产生塑性

应变的机理。从上述资料明显可以看出,我国在淤泥固化土的动力特性研究方面少之又少,因此,通过室内试验对固化土的动力特性进行分析研究是很有必要的。

以大连金州湾海域的海洋淤泥土为研究对象,对淤泥土采用掺入比为 8%、10% 以及 12% 三种比例的固化剂进行固化处理,通过动三轴试验研究其不同掺入比条件下固化土的动力特性,为今后类似工程提供参考。

1 试验设备与工作原理

本次试验所采用的是英国 VJ Tech 公司的 DSC2000 多功能动三轴仪。

DSC2000 多功能动三轴仪工作原理就是将圆柱形土样放置在充有无气水的三轴室内的上下活塞之间,靠水压对试样施加三轴静压力(均等围压或偏压)使土样固结,竖向伺服电机施加外力,经过下面的活塞施加至试验土样,然后在动荷载作用下进行三轴试验,该动三轴仪只能做 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 范围内的变量。

2 试验材料与方法

2.1 试验用料

淤泥固化所采用的固化剂是由水泥熟料、高炉矿渣粉、石膏粉三种材料通过一定的比例混合而成,其强度和稳定性均达到合格标准,密度为 $1\ 680\text{ kg/m}^3$ 。试验所采用的淤泥取自大连金州湾海上机场纳泥区,其有关物理力学指标见表 1。

表 1 大连金州湾淤泥土物理力学指标

ω /%	$\rho_{\text{干}}$ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\rho_{\text{湿}}$ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	ω_L /%	ω_p /%	I_L	G
69.8	0.94	1.59	53.1	20.3	1.51	2.62

注: ω 为含水率; $\rho_{\text{干}}$ 为干密度; $\rho_{\text{湿}}$ 为湿密度; ω_L 为液限; ω_p 为塑限; I_L 为液性指数; G 为比重。

2.2 试验取样

在工程现场开挖 $25\text{ m} \times 25\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的试验槽,对三种不同配比(8%、10%、12%)的淤泥固化土进行试验槽浇筑,将达到 28 d 龄期的淤泥固化土进行现场取样送往实验室采用动三轴仪对其进行动力试验研究。此次试验按照国家标准《土工试验方法标准》^[18](GB/T 50123—1999)进行,每种掺入比制作 3 试样进行平行试验。

3 试验结果分析

由于篇幅所限,这里以龄期 28 d 的试样为研究

对象,对不同掺入比为(8%、10%、12%)的固化土在 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 的围压下分别进行动三轴试验,研究其固化剂的掺入比以及围压对固化土的动剪切模量和阻尼比的影响。

3.1 围压对固化土动模量与阻尼比的影响

根据淤泥固化土试样的动剪切模量与动应变幅值在不同固结压力条件下的关系曲线分析。随着固结应力的不同,其土样在三种应力作用下的动剪切模量随着动剪应变的增大呈递减趋势。当淤泥固化土土样的应变幅值在 1×10^{-3} 左右时,呈现出土样动剪模量随着动剪应变的增大而递减的速率不同,从而得出 1×10^{-3} 为该土样应变的临界值,当在临界值左侧时,固化土试样的动剪模量随应变的增大减小的速率较慢;当出现在临界值右侧时,固化土试样的动剪模量随着应变的增大减小速率加快。

在固化剂掺入比相同,动剪应变值不变的条件下,淤泥固化土的动剪切模量随着固结应力的增大而增大。在固化剂掺入比为 10%、12% 两种情况下,发现固化土样的动剪模量随着固结应力的增大而递增趋势在减小的现象。这种情况发生的原因在于,当固化剂含量较少时,与淤泥土发生物理、化学反应生成的胶凝物质相应的减少,因此对固化土颗粒间的孔隙填充也就减小,使得固化土在外荷载作用下的压缩性增强,所以固结应力对于固化土动剪模量的影响不可忽视。固化剂掺入比为 8% 的淤泥固化土试样的相关曲线就符合所描述的这一规律。随着固化剂掺入比的增大,试样的强度也随之增加,在外荷载作用下压缩性越小,从而使得固化土本身的结构性能越强。当固化剂的掺入量为 10%、12% 时,固化剂与淤泥土发生充分的物理、化学反应,生成的胶凝物质增多,使得固化土颗粒间孔隙被生成物所填充,提高了固化土本身的结构性能,因此,固结应力的增大对于固化剂掺入量较大的固化土的动剪切模量的影响较小。

根据不同固结应力阻尼比与应变关系可以得出,淤泥固化土的阻尼比与固化土动剪应变值呈正相关关系。随着剪应变区间内的不同,固化土动阻尼比的增大速率也不相同。当试验土样的应变幅值小于其临界应变幅值时,在不同固结应力作用下淤泥固化土试样的阻尼比随着应变幅值增大而增大的幅度降低;当淤泥固化土的动剪应变超过某一个临界值时,土体试样的阻尼比随着动剪应变的增大而递增的速率明显不同,显示这一临界值也是在 $\gamma_d = 1 \times 10^{-3}$ 左右。不难发现固化土试样的阻尼比在固

结应力逐渐增大情况下有稍微降低的现象。

3.2 掺入比对动模量与阻尼比的影响

依据不同掺入比固化土的动剪切模量与动剪应变幅值关系可以看出,在动剪应变幅增大的情况下淤泥固化土试样的动剪切模量呈减小的趋势。在动剪应变值相同的情况下,虽然固化土的动剪模量随着固化剂掺入比的增大而增大,但是随着动剪应变值的增大,这种呈现出动模量随掺入比增大而增大的现象逐渐在削弱。

通过不同掺入下阻尼比与动剪应变幅值关系曲线表明,不同固化剂掺入比下淤泥固化土试样的阻尼比随动剪应变幅值的变化规律与上面描述基本相符,此处不再说明。当动剪应变值相同时,其固化土试样的阻尼比随着固化剂掺入比的增大而增大的趋势并不明显,但是不难发现,当固化剂的掺入比逐渐增大时,固化土的阻尼比有稍微降低的现象。

4 动剪切模量比和阻尼比拟合

对通过动三轴试验得出的不同掺入比、不同围压条件下淤泥固化土的试验数据进行归一化处理,这样做的目的是为了减少试验数据的离散性。本章节仅整理了龄期为 28 d 固化土试样的试验数据,对 8%、10%、12% 三种掺入比的固化土在不同围压(100 kPa、200 kPa、300 kPa)作用下的动剪切模量比和阻尼比与动剪应变之间的关系进行分析。

已有大量试验分析表明,土表现出动应力与应变之间变化关系可用 Hardin - Drnevich^[19-21]模型描述:

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{a + b \cdot \gamma_d} \quad (1)$$

由此可得动割线剪切模量:

$$G_d = \frac{\tau_d}{\gamma_d} = \frac{1}{a + b \cdot \gamma_d} \quad (2)$$

同时还可得到归一化后的无量纲表达式:

$$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{1 + \gamma_d/\gamma_r} \quad (3)$$

式中: τ_d 为动剪应力; γ_d 为动剪应变; $\gamma_r = a/b$ 为参考剪应变; a, b 为拟合参数。一般情况下, $1/b = \tau_{ult}$ 为极限抗剪强度, $1/a = G_{dmax}$ 是最大的动剪切模量, G_d 为与 γ_d 对应的动剪切模量。

图 1、图 2 为不同掺入比、不同围压作用下,淤泥固化土的剪切模量比和阻尼比与剪应变幅值的关系曲线。

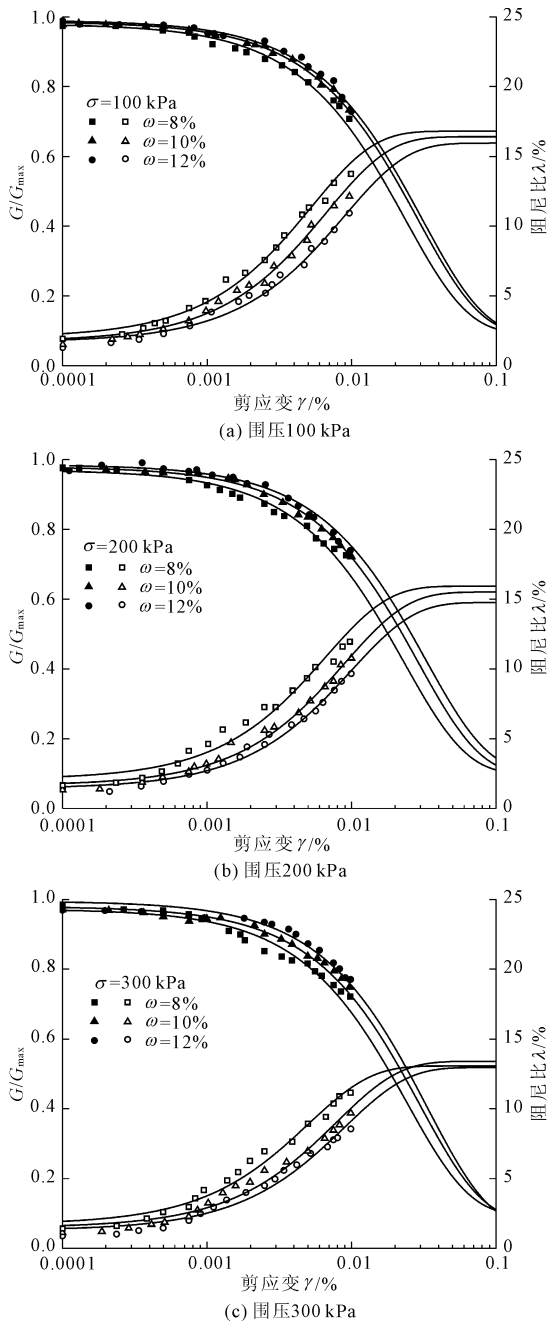


图 1 不同配比淤泥固化土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 拟合曲线

从图 1 中的 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线可知:

(1) 在固结应力相等的条件下, 固化土的动剪模量随着固化剂掺入比的增大, 衰退曲线也就越高, 但是随着动剪应变值 γ 的增大, 衰退的速率减慢。而阻尼比随着动剪应变值 γ 的增大而增大, 但是随着固化剂掺入比的增大, 阻尼比相应的减小。

(2) 当固化土的剪应变 $\gamma < 10^{-3}$ 时, 不同掺入比条件下固化土的动剪模量近似一条直线, 衰减趋势并不明显, 阻尼比的增大较为缓慢。当剪应变 $\gamma > 10^{-3}$ 时, 不同掺入比对固化土的动剪模量和阻尼比影响很大, 动剪模量的衰减曲线分布的范围逐渐变

大, 衰减速率增大, 而阻尼比的增大速率也变快。

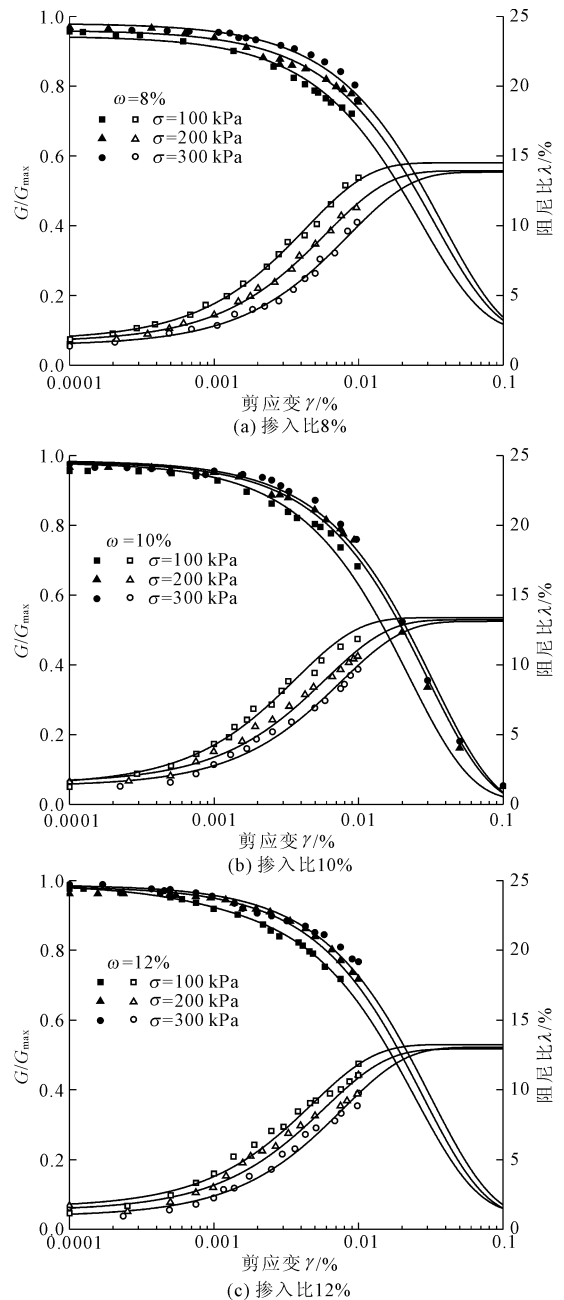


图 2 不同围压下淤泥固化土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 拟合曲线

由图 2 不同围压下淤泥固化土的 $G/G_{\max} - \gamma$ 和 $D - \gamma$ 拟合曲线可得出:

(1) 在动剪应变幅值不变的条件下, 固化土的动剪切模量比随着围压的增大而增大; 原因是随着围压的增大, 固化土试样内部的土颗粒之间接触更加密实, 孔隙含量减少, 固化土试样的相对密度逐渐增大, 这使得土颗粒之间的咬合力和胶结力随之增大, 同时固化土试样本身的刚度也得到了提高, 因此, 淤泥固化土的动模量随着围压的增大而增大。

(2) 淤泥固化土的动剪模量和阻尼比随着动剪应变幅值变化的趋势与图 1 结论叙述类似,此处不再赘述。

(3) 就淤泥固化土的阻尼比而言,随着围压的增大,阻尼比减小。原因是围压的增大使得固化土颗粒结构之间的孔隙变少,密实度增加,由于固化土在动荷载的作用下以波的形式进行能量传播,所以固化土的密实程度为波的传递提供了多条路径,使得传播速度增大,此时固化土试样内部能量的耗散较小,这也就代表了能量损耗的参数阻尼比相应也会减小。

5 结 论

采用动三轴试验仪器,研究了不同掺入比、不同围压作用对淤泥固化土在大应变下动剪模量和阻尼比的影响,主要结论如下:

(1) 固化土的动剪模量随着动剪应变幅值的增大衰减速率增大,阻尼比随着应变值的增大而增大。这说明了固化土的弹性变形逐渐减小,而结构内部的损伤与塑性变形在增大。当固化土的动应变幅值 $\gamma_d < 10^{-3}$ 时,动剪模量的减小速率变缓,阻尼比的增大速率减慢;当固化土的动应变幅值 $\gamma_d > 10^{-3}$ 时,动剪模量的衰减速率加快,阻尼比的曲线增长速度明显变大。

(2) 当动剪应变幅值相同时,固化土的动模量随着固结应力的增大而增大。但是当固化剂掺入比为 10% 以及 12% 时,固化土的动模量随着固结应力的增大而增大的现象在减弱。当固化剂的掺入比大于 10% 时,其结构内部的孔隙减少,因此压缩性降低。所以固结应力对固化土动模量的影响在减弱。

(3) 在动剪应变幅值相同,固化剂掺入比相同的条件下,固化土的动剪切模量比随着围压的增大而增大;阻尼比随着围压的增大而减小。

参考文献:

[1] 吴月龙,朱方方,陈东东,等. 吹填海泥掺水泥充灌模袋筑堤试验[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(5):79-82.

[2] 周世宗,梁仕华,戴君,等. 矿渣和粉煤灰固化南沙软土试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2015,13(4):76-79,125.

[3] 陈冲,刘卫东,闫雪明. 土体固结粉在软土地基加固中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(3):169-172.

[4] 胡孝彭,郭建军,张艳梅,等. 重庆永川区城区河道疏浚淤泥处置问题的探讨[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(4):168-171.

[5] 胡孝彭,赵仲辉. 基于离心机法研究固化淤泥的土水特

征曲线[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(2):5-8,57.

[6] 李晓玲,高慧民,周洁. 沿海沙性淤泥土工程地质特性试验研究[J]. 华北水利水电学院学报. 1999(3):35-36,40.

[7] 冯志超,朱伟,张春雷,等. 黏粒含量对固化淤泥力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报. 2007(S1):3052-3057.

[8] 杨顺安,张瑛玲,刘虎中,等. 深圳地区吹填淤泥的工程特征[J]. 地质科技学报. 1997(1):87-91.

[9] 杨顺安,劳作优,邓富国. 深圳机场区淤泥层的沉积环境分析与应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,1999(4):42-47.

[10] 冯晓腊. 论深圳淤泥类软土微观结构对工程性质的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报,1996(3):34-39,33.

[11] Seed H B, Chan C K, Monismith C L. Effects of repeated loading on the strength and deformation of compacted clay[J]. Highway Research Board Proceedings, 1955, 34:541-558.

[12] Seed H B, McNeill R L. Soil deformation in normal compression and repeated loading tests[J]. Highway Research Board Bulletin, 1956,141:44-53.

[13] Seed H B, Chan C K. Effect of stress history and frequency of stress application on deformation of clay subgrades under repeated loading[J]. Highway Research Board Proceedings, 1958,37:555-575.

[14] Seed H B, Chan C K. Undrained strength of compacted clays after soaking[J]. Proceedings of American Society of Civil Engineers, 1959,85(10):31-47.

[15] Seed H B, Chan C K, Lee C E. Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements[C]//International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Supplement University of Michigan, Ann Arbor, 1962.

[16] Seed H B, Mity F G, Monismith C L, et al. Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated-load tests[J]. Nchrp Report, 1967(35):117.

[17] Brown S F, Hyde A F L. The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading[J]. Géotechnique, 1976,26(1):173-184.

[18] 土工试验方法标准:GB/T 50123—1999[S]. 北京:中国计划出版社,1999.

[19] Kondner R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1963,89(1):115-144.

[20] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects (terzaghi lecture)[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972,98(6):603-624.

[21] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972,98(7):667-692.