

DOI: 10.11779/CJGE202109021

粗粒氯盐渍土动态回弹模量试验研究与理论模型

冉武平^{1, 2}, 王金山^{*1, 2}, 艾贤臣^{1, 2}, 陈慧敏^{1, 2}, 钱建固^{1, 3}

(1. 新疆大学建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆土木工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;

3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 为探究粗粒氯盐渍土动态回弹模量受荷载、盐分及湿度影响下的变化规律, 借用室内动三轴试验, 研究了不同应力状况、含水率及含盐量条件下粗粒氯盐渍土动态回弹特性。结果表明: 动态回弹模量随围压和体应力增加而增大, 随偏应力、盐分及水分的增大而减小; 粗粒盐渍土中含盐量和含水率越高, 围压、偏应力和体应力对其动态回弹模量影响越明显; 同一应力水平下, 含盐量和含水率的增加引起动态回弹模量的降低幅度逐渐增大, 且盐分较水分影响更显著。基于三参数理论模型对试验结果进行回归分析发现, 该模型具有较高的决定系数, 并建立了精度较高的模型参数预估公式, 可有效预测粗粒氯盐渍土动态回弹模量。

关键词: 粗粒氯盐渍土; 动态回弹模量; 动三轴试验; 演变规律; 理论模型

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)09-1746-09

作者简介: 冉武平(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土与道路工程方面的教学和科研工作。E-mail: rwpjxj@163.com。

Laboratory tests and theoretical model for dynamic resilient modulus of coarse-grained chlorine saline soil

RAN Wu-ping^{1, 2}, WANG Jin-shan^{1, 2}, AI Xian-chen^{1, 2}, CHEN Hui-min^{1, 2}, QIAN Jian-gu^{1, 3}

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Xinjiang Civil Engineering Technology

Research Center, Urumqi 830047, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To explore the influences of load, salinity and humidity on the dynamic resilient modulus of coarse-grained chlorine saline soil, the dynamic rebound characteristics of the soil under different stresses, salt contents and water contents are studied based on the laboratory dynamic triaxial tests. The measured results reveal that the value of the dynamic resilient modulus increases with the increase of the confining pressure and bulk stress, and decreases with the increase of the partial stress, salinity and moisture. The higher the salt content and moisture content in the soil, the more obvious the influences of the confining pressure, partial stress and bulk stress on its dynamic resilient modulus. Under the same stress, the value of the dynamic resilient modulus decreases more considerably with the increase of the salt content and moisture content, and the effects of salt tend to be more significant than those of water. Through the regression analysis of the test data based on a three-parameter theoretical model, the proposed model has a preferably higher determination coefficient, and the formula for predicting the model parameters with high precision is established. It is shown that the theoretical model is suitable to predict the dynamic resilient modulus of coarse-grained chlorine saline soil.

Key words: coarse-grained saline soil; dynamic resilient modulus; dynamic triaxial test; evolution law; theoretical model

0 引言

中国西北地区存在显著的强蒸发少降水的气候特点, 水盐迁移引起的次生盐渍化严重, 岩盐土分布极为广泛。而在盐渍土路基回弹模量(M_R)^[1-2]方面的研究还不够深入, 致使在现行规范中对于盐渍土路基设计控制指标体系存在不完善, 这不仅严重影响盐渍土路基耐久性, 更影响到盐渍土筑路技术及盐渍土的利用。对盐渍土地区的道路建设, 这种不足既影响到建设成本, 同时还不利于环境保护。故而亟需针对盐

渍土路基回弹模量的演变规律展开研究。

目前, 国内外学者对路基土动态回弹模量已有相关研究。路基土动态回弹模量的主要影响因素有土的类型^[3-4]、应力状态^[5-6]、含水率^[7]、压实度^[8]和加载序列^[9]等因素, 研究发现, 相同类型土的动态回弹模量

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768070); 民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室开放基金项目(MK201902)

收稿日期: 2020-08-12

***通信作者** (E-mail: wjs705358329@126.com)

随围压、体应力和压实度的增大而提高, 随偏应力和含水率的增加而降低, 且几乎不受加载次数和加载序列的影响。路基土动态回弹模量的测试主要分为室外和室内两种方式^[10]; 室外测试主要是基于动态弯沉的反演获取动态回弹模量, 而室内测试则通过现场取样、室内制样, 进行重复加载动三轴试验来测定动态回弹模量。室内动三轴试验能够更全面地研究各种影响因素下的动态回弹模量^[11-12], 已成为目前主流的动态回弹模量测试方法。基于国内外已有路基土回弹模量的影响因素研究成果^[13], 并结合中国典型路面结构特点、应力水平和路基土类型, 陈声凯等^[14]提出了确定不同路基土动态回弹模量的室内重复加载三轴试验标准方法。长期以来, 国内外诸多学者和研究机构在深入分析动态回弹模量主要影响因素(土的类型、含水率、压实度和应力状况等)的基础上, 分别从路基土的应力状况、土的基本物理性质指标等不同角度出发, 建立了相应的动态回弹模量理论模型^[15-16]。根据所选应力变量的不同, 理论模型大致可分为3类: 仅考虑侧限效应的模型^[17]、仅考虑剪切效应的模型^[18-20]和综合考虑剪切及侧限共同作用的复合类模型^[21-24]。

上述国内外研究结果表明, 路基土动态回弹模量(M_R)的研究大多集中在非盐渍土的影响因素、测试方法及理论模型, 对路基土受盐分影响下的动态回弹特性研究相对不足, 导致受盐渍化影响的路基结构计算响应与实际响应有所偏差; 同时考虑到盐渍土在中国分布面积之广, 其回弹特性受荷载和湿度影响显著。因此, 有必要针对盐渍土开展动态回弹模量研究, 以期为中国盐渍土地区道路设计提供合理的设计参数。鉴于此, 本文以粗粒氯盐渍土为研究对象, 借用室内动三轴重复加载试验, 开展不同应力状态、含水率和含盐量条件下动态回弹模量试验研究, 以此分析影响粗粒盐渍土动态回弹模量的因素及其变化规律, 并在此基础上遴选和优化动态回弹模量理论模型, 从而为盐渍土地区路基设计提供参数和理论依据。

1 试验方案

1.1 试验材料

为更加全面地研究粗粒盐渍土动态模量特性, 试验材料采用人工配置粗粒氯盐渍土。根据中国现行《公路土工试验规程: JTG 3430—2020》, 通过颗粒分析试验测得本试验所选非盐渍土土样粒径分配曲线如图1(a)所示。击实试验测得土样最大干密度为 2.33 g/cm^3 , 最佳含水率为 5.1%。土样的不均匀系数 $C_u=18.11>5$, 曲率系数 $C_c=1.42$ 在 1~3 之间, 故该土样级配良好。

1.2 试样制备

为分析粗粒盐渍土动态回弹模量受含水率和含

盐量的影响规律, 试样控制统一压实度 96%, 并在不同含盐量和含水率状态下制备成型。考虑盐渍土按盐渍化程度分类, NaCl 取界限含盐量: 0.0%(非盐渍土); 2.0%(弱盐渍土); 5.0%(中盐渍土); 8.0%(强盐渍土)。同一含盐量的试样分别按照 4.0%, 5.1% 和 6.0% 的含水率制备, 每组 3 个平行试样。

三轴试样尺寸 $H \times D=200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ (如图1(b)所示)。试样制备流程严格按《公路土工试验规程: JTG 3430—2020》及《公路路基设计规范: JTG D30—2015》中相关规定。为保证试样压实度均匀, 分 8 层击实; 用土样质量控制每层厚度, 以确保每层的厚度基本相同, 同时层与层之间进行拉毛处理。

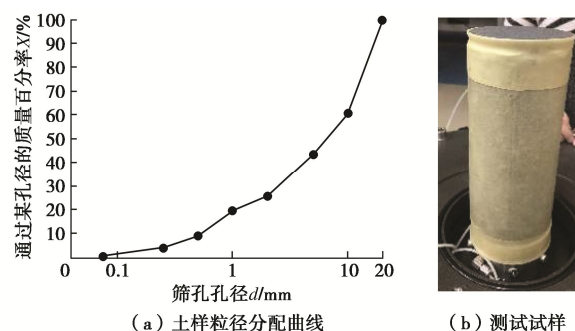


图1 测试试样土样粒径分配曲线

Fig. 1 Test sample grain-size distribution curve of soil sample

1.3 试验方法与参数

本文试验基于英国 GDS 动三轴仪测试系统 (5 Hz/60kN MinDyn)、标准三轴压力室尺寸 $H \times D=300 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$ (如图2所示)。试验采用半正弦波加载, 围压采用气压加载, 荷载频率为 1 Hz, 持载时间为 0.2 s, 间歇时间为 0.8 s。

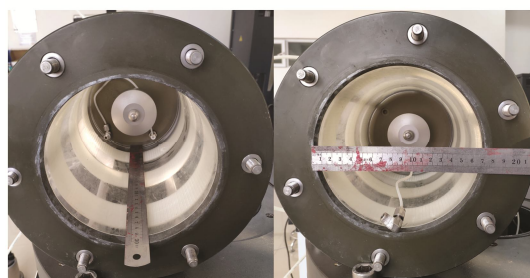


图2 标准三轴压力室

Fig. 2 Dynamic triaxial pressure chamber

根据中国典型沥青路面的结构特点和路基受力状态, 罗志刚^[13]参照 NCHRP 1-28^[24]试验方法, 提出了如表1所示的动三轴试验应力加载序列。本文则采用上述应力加载序列进行动三轴试验, 试验操作流程严格按照《路基设计规范》及《土工试验规程》中规定的路基土动态回弹模量标准测试方法, 回弹模量如下式所示:

$$M_R = \sigma_d / \varepsilon_R \quad (1)$$

式中, M_R 为动态回弹模量(MPa), σ_d 为偏应力(kPa), $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$, σ_1 为竖向应力(kPa), σ_3 为围压应力(一般 $\sigma_2 = \sigma_3$) (kPa), ε_R 为轴向回弹应变均值。

表 1 路基粗粒土三轴试验应力加载序列

Table 1 Loading sequence of triaxial tests on coarse-grained soil				
加载 序列号	围压应力 σ_3 /kPa	接触应力 0.2 σ_3 /kPa	偏应力 σ_d /kPa	荷载次数
0-预载	30	6	60	1000
1	15	3	8	100
2	30	6	15	100
3	45	9	23	100
4	60	12	30	100
5	80	16	40	100
6	15	3	15	100
7	30	6	30	100
8	45	9	45	100
9	60	12	60	100
10	80	16	80	100
11	15	3	30	100
12	30	6	60	100
13	45	9	90	100
14	60	12	120	100
15	80	16	160	100

2 试验结果与分析

2.1 应力状态对动态回弹模量的影响

为研究粗粒氯盐渍土动态回弹模量受应力状态的影响,所选试样的压实度均为 96%, 含水率为 5.1%, 试验结果如图 3~6 所示。为便于表达,本文的含水率、

含盐量、围压、偏应力、体应力和动态回弹模量分别用 ω , Z , σ_3 , σ_d , θ , M_R 来表示, 其中循环偏应力与围压应力成倍数关系 ($\sigma_d = 0.5 \sigma_3$, $1.0 \sigma_3$, $2.0 \sigma_3$), $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 。

由图 3 可知, 当含水率为 5.1% 时, 在各盐分条件下, 不同围压的粗粒盐渍土动态回弹模量随偏应力增大而减小。随着偏应力的增大, 如图 3(a) 所示 $Z=0.0\%$ 时, 各围压下粗粒盐渍土 M_R 分别降低了 2.3%, 5.6%, 7.2%, 9.9% 和 12.7%; 如图 3(b) 所示 $Z=2.0\%$ 时, M_R 分别降低了 8.2%, 11.5%, 17.4%, 22.8% 和 28.6%; 如图 3(c) 所示 $Z=5.0\%$ 时, M_R 分别降低了 11.7%, 15.5%, 19.5%, 22.2% 和 26.7%; 如图 3(d) 所示 $Z=8.0\%$ 时, M_R 分别降低了 15.4%, 16.7%, 22.3%, 26.1% 和 33.3%。由此可知, 偏应力越大动态回弹模量降低幅度越大; 粗粒盐渍土中盐分越高, 偏应力对其动态回弹模量影响越明显。这一现象的微观机理可解释为, 当土体中含盐量 Z 小于界限含盐量 (即对应于盐溶液饱和状态, 界限含盐量约 10%) [25-26], 盐分增加溶解后的离子浓度增大, 双电层厚度增加, 钠离子的润滑作用逐渐加强, 盐渍土的抗剪强度逐渐减小。在加载后期, 偏应力增大引起的剪切破坏效应大于土塑性应变一直存在, 动态回弹模量不断减小。

由图 4 可知, 当含水率为 5.1% 时, 在各含盐量条件下, 不同偏应力的粗粒盐渍土动态回弹模量随体应力增大而增大。随着体应力的增大, 如图 4(a) 所示 $Z=0.0\%$ 时, 不同偏应力的动态回弹模量 M_R 分别提

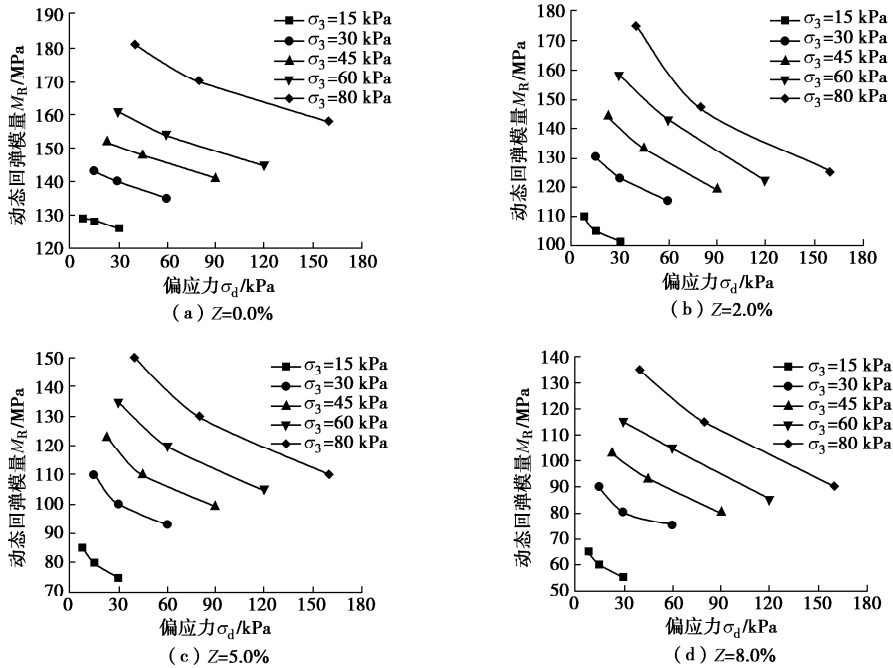
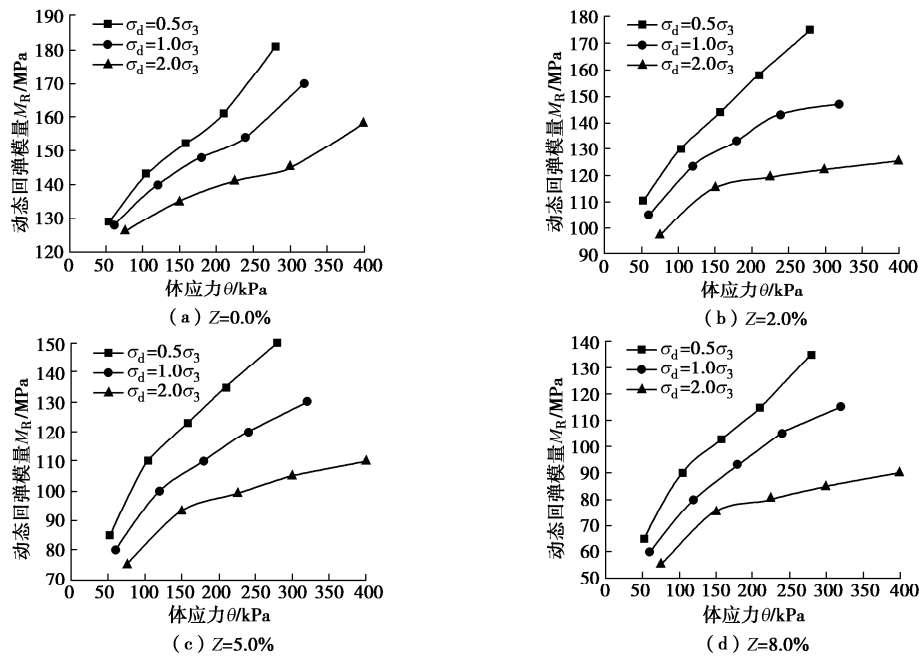
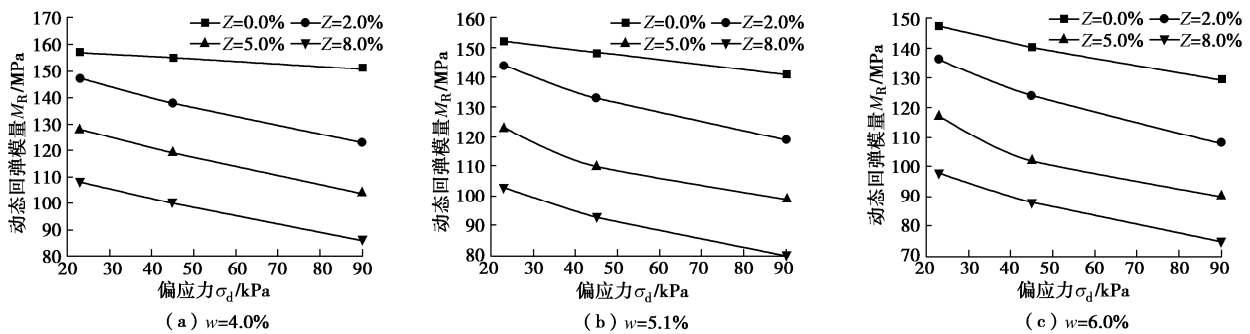


图 3 含水率 $w=5.1\%$ 时不同围压下动态回弹模量 M_R 与偏应力 σ_d 关系

Fig. 3 Relationship between M_R and σ_d under different confining pressures at water content of 5.1%

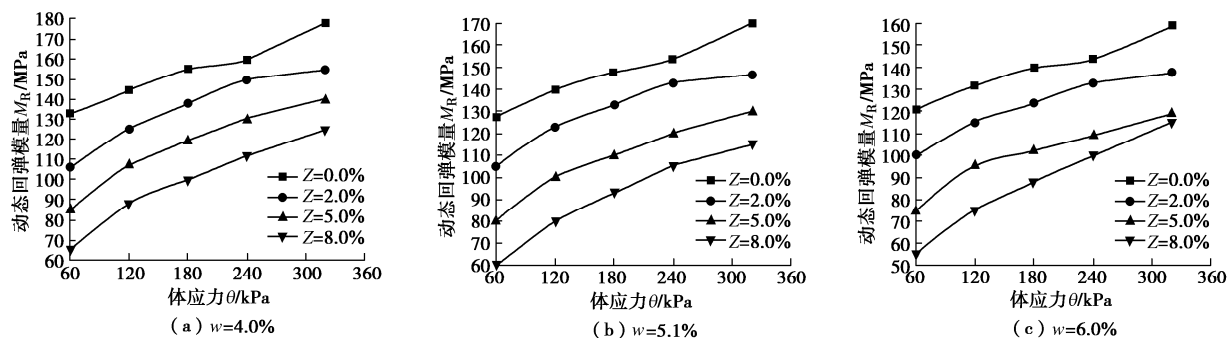
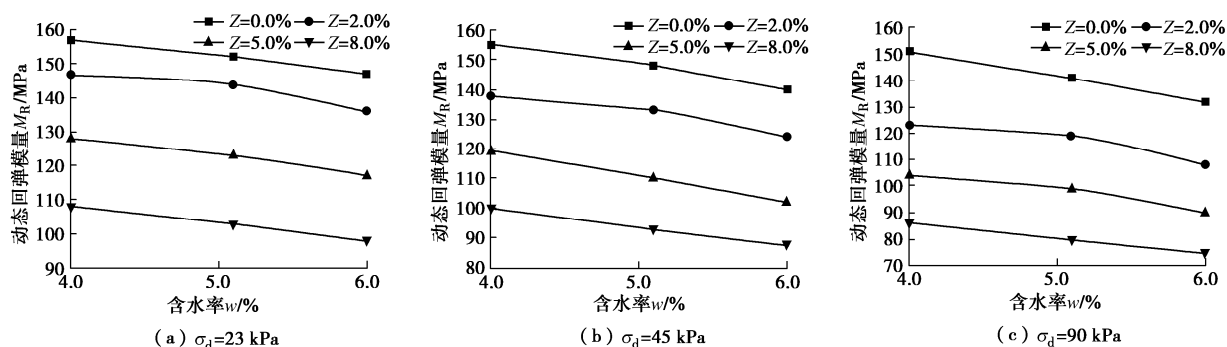
图4 含水率 $w=5.1\%$ 时不同偏应力下动态回弹模量 M_R 与体应力 θ 关系Fig. 4 Relationship between M_R and θ under different partial stresses at water content of 5.1%图5 围压 $\sigma_3=45$ kPa 时不同含盐量下动态回弹模量 M_R 与偏应力 σ_d 关系Fig. 5 Relationship between M_R and σ_d under different salt contents at confining pressure of 45 kPa

高了 40.3%, 32.8% 和 25.4%; 如图 4 (b) 所示 $Z=2.0\%$ 时, M_R 分别提高了 59.1%, 40.0% 和 28.9%; 如图 4 (c) 所示 $Z=5.0\%$ 时, M_R 分别提高了 76.5%, 62.5% 和 46.7%; 如图 4 (d) 所示 $Z=8.0\%$ 时, M_R 分别提高了 107.7%, 91.7% 和 63.6%。由此表明, 偏应力越小, 体应力增加引起动态回弹模量的增量越大; 粗粒盐渍土含盐量越高, 体应力对其动态回弹模量影响越明显。分析认为, 偏应力一定时, 体应力增加实则是围压对试样横向变形的约束增强, 土体刚度增大, 进而动态回弹模量不断提高。

由图 5 可知, 当围压为 45 kPa 时, 在各含水率条件下, 不同含盐量的粗粒盐渍土随偏应力增加动态回弹模量不断减小。当 w 从 4.0% 增长到 6.0% 时, 随偏应力增加, 粗粒盐渍土动态回弹模量降低幅度由 3.8% 增长到 23.5%。这表明含水率越小偏应力影响越微弱, 而随含水率不断增加, 偏应力影响也逐渐显著, 尤其是对高含盐量土样的动态回弹模量影响更显著。

由此可见, 偏应力对盐分浓度高的粗粒盐渍土动态回弹模量影响较明显, 即盐分浓度尚未达饱和, 则盐分浓度增大将显著弱化土体的回弹性能。

由图 6 可知, 当偏应力为 $1.0\sigma_3$ ($\sigma_3=15, 30, 45, 60$ 和 80 kPa) 时, 在各含水率下, 随体应力增加不同含盐量的粗粒盐渍土动态回弹模量不断增长, 且增长幅度趋于平缓, 由此可见含水率一定时, 粗粒盐渍土动态回弹模量对低体应力更敏感。随体应力的增加, 如图 6 (a) 所示 $w=4.0\%$ 时, 各含盐量的粗粒盐渍土动态回弹模量 M_R 增长幅度分别为 33.8%, 46.2%, 64.7% 和 92.3%; 如图 6 (b) 所示 $w=5.1\%$ 时, M_R 增长幅度分别为 32.8%, 40.0%, 62.5% 和 91.7%; 如图 6 (c) 所示 $w=6.0\%$ 时, M_R 增长幅度分别为 31.4%, 38.0%, 58.7% 和 109.1%。由此说明, 含盐量越高 M_R 增长幅度受体应力的影响越大; 低含盐量的粗粒盐渍土随含水率的增加, 其 M_R 增量趋于平缓; 而高含盐量的粗粒盐渍土 M_R 增量随含水率的增加趋于增大。

图6 偏应力 $\sigma_d = 1.0 \sigma_3$ 时不同含盐量下动态回弹模量 M_R 与体应力 θ 关系Fig. 6 Relationship between M_R and θ under different salt contents at $\sigma_d = 1.0 \sigma_3$ 图7 围压 $\sigma_3 = 45$ kPa 时不同含盐量下动态回弹模量 M_R 与含水率 w 关系Fig. 7 Relationship between M_R and w under different salt contents at confining pressure of 45 kPa

当偏应力一定时, 含盐量越高, 体应力增加引起粗粒盐渍土动态回弹模量的增量越显著。因此可认为, 高含盐量条件下, 随体应力的增加引起动态回弹模量增加主要是由围压 σ_3 所致。

2.2 含水率对动态回弹模量的影响

由图7可知, 当围压为45 kPa时, 在各偏应力条件下, 不同含盐量的粗粒盐渍土动态回弹模量随含水率的增大而减小。当含水率从4.0%增加到6.0%, 如图7(a)所示 $\sigma_d = 23$ kPa时, 不同含盐量的粗粒盐渍土 M_R 分别降低了6.4%, 7.5%, 8.6%和9.3%; 如图7(b)所示 $\sigma_d = 45$ kPa时, M_R 分别降低了9.7%, 10.1%, 13.3%和12.0%; 如图7(c)所示 $\sigma_d = 90$ kPa时, M_R 分别降低了12.6%, 12.2%, 13.5%和12.8%。由此表明, 盐分一定时, 随着偏应力的增大, 含水率的增加引起动态回弹模量的降低幅度不断增大, 且降低量的最大差值在3.5%~6.2%; 各应力条件下, 随含水率增加, 不同含盐量的粗粒盐渍土动态回弹模量降低幅度趋于增大, 其最大差值在1.3%~3.6%。这是因为水分增加引起土颗粒之间水膜加厚, 同时溶盐破坏了土体中的盐分骨架, 特别是高含盐量条件下, 随含水率增大引起盐溶液的润滑作用增强, 削弱了土体粗颗粒之间的摩擦强度, 导致动态回弹模量逐渐下降。

2.3 含盐量对动态回弹模量的影响

由图8可知, 当围压为45 kPa时, 在各偏应力条件下, 不同含水率的粗粒盐渍土 M_R 随含盐量的增

加而减小。当含盐量 Z 从0.0%增加到8.0%, 如图8(a)所示 $\sigma_d = 23$ kPa时, 不同含水率的粗粒盐渍土 M_R 分别减少了31.2%, 32.2%和33.3%; 如图8(b)所示 $\sigma_d = 45$ kPa时, M_R 分别减少了35.5%, 37.2%和37.1%; 如图8(c)所示, $\sigma_d = 90$ kPa时 M_R 分别减少了43.0%, 43.3%和41.9%。由此表明, 随含盐量增加, 不同含水率的粗粒盐渍土动态回弹模量降低幅度趋于增大, 其最大差值在1.4%~2.1%; 湿度一定时, 随偏应力的增加, 含盐量增加引起动态回弹模量的降低量逐渐变大, 且降低量的最大差值在8.6%~11.8%。类似于上文的微观机理分析, 当土中盐分浓度尚未达临界饱和状态前, 盐分浓度的增加弱化了土颗粒间的接触连结, 降低了土粗颗粒间的摩擦与咬合; 在钠盐含量过大时, 土体电位差降低, 土颗粒间的吸引力超过排斥作用, 土体发生聚集或凝结, 使得孔隙变大, 同时, 溶解的盐分加强了土颗粒之间的润滑作用, 抗变形能力下降, 这也与既有的研究结论相一致^[27-28]。

3 动态回弹模量理论模型与分析

3.1 动态回弹模量理论模型甄选

由上述试验结果分析可知, 应力状况是粗粒盐渍土动态回弹模量 M_R 最主要的影响因素。因此, 在确定动态回弹模量理论模型时, 首先应尽可能准确地依据本构定律建立起应力-应变的关系模型, 而其他物性因素的影响则可通过模型参数予以体现。

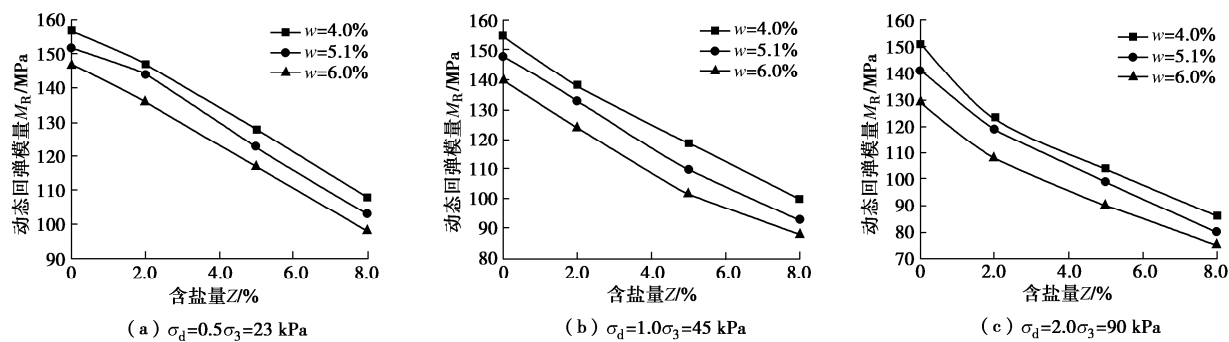


图 8 围压 $\sigma_3=45$ kPa 时不同含水率下动态回弹模量 M_R 与含盐量 Z 关系

Fig. 8 Relationship between M_R and Z under different water contents at confining pressure of 45 kPa

表 2 路基土回弹模量典型复合模型

Table 2 Typical composite models for resilient modulus of subgrade soil			
提出者	模型名称	模型公式	模型的特点
Uzan ^[21]	Uzan 模型	$M_R = k_1 \theta^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	①存在量纲问题; ②存在模量不定值问题
Witczak 等 ^[22]	八面体剪应力模型	$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{k_3}$	①存在模量不定值问题
Lytton 等 ^[23]	Superpave 性能模型	$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta - 3k_4}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} \right)^{k_3}$	① $\tau_{oct} \rightarrow 0$ 时出现计算困难, ②需在剪应力项中加 1
NCHRP 1-28A ^[24]	NCHRP 1-28A 模型	$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}$	①考虑了体应力和剪应力影响; ②克服了量纲和模量不定值问题

注: M_R 为动态回弹模量 (MPa); p_a 为大气压强绝对值, 通常取 100kPa; θ 为体应力 (kPa), $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, σ_1 , σ_2 , σ_3 为主应力; τ_{oct} 为八面体剪应力 (kPa), $\tau_{oct} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} / 3$; k_i 为模型参数, $k_1, k_2 \geq 0$, $k_3 \leq 0$, $k_4 \leq 0$ 。

在现有的回弹模量理论模型中, 按所选应力变量的不同可分为 3 类: 仅考虑剪切效应的模型、仅考虑侧限效应的模型和综合考虑剪切与侧限效应的复合类模型。事实上, 路基土的动态回弹模量不仅随围压增加而增大, 也有随剪应力增加而减小的性状, 即动态回弹模量既是体应力的函数, 亦是剪应力或偏应力的函数。因此, 将体应力和剪应力的影响综合在一个回弹模量模型中, 可以更真实、全面地反映路基土的力学特性。这类典型复合模型的主要特点如表 2 所示。

从表 2 中可以看出, Uzan 模型和八面体剪应力模型虽然都考虑了侧限及剪切效应的影响, 但二者均存在量纲与模量的问题。而 Yau 等^[29]利用美国 LTPP 项目中各种路基土与粒料的回弹模量测试数据对 Superpave 性能模型进行了验证。统计分析结果表明, 超过 50% 的测试结果用其拟合时, 式中参数 $k_4=0$, 因此, 可以考虑剔除该参数, 按 NCHRP 1-28A 模型进行动态回弹模量预测, 该模型也是中国《公路路基设计规范: JTG D30—2015》中推荐的理论模型。

上述试验测试结果分析表明, 围压和偏应力对粗粒氯盐渍土动态回弹模量 M_R 具有显著依赖性。因此, 动态回弹模量预测的理论模型应选用既能考虑侧限效应, 亦能体现剪切影响的复合类模型。本文将采用 NCHRP 1-28A 模型对测试结果进行回归分析, 该模型

既考虑了体应力和剪应力对动态回弹模量的影响, 又克服了量纲不统一、模量不定值等问题, 因而具有较广泛的适用性。测试中应力状况对回弹模量的影响直接体现在模型的 θ 和 τ_{oct} 中, 而含盐量及含水率等物性因素的影响则反映在模型参数 k_1, k_2, k_3 中, 粗粒氯盐渍土动态回弹模量理论模型为

$$M_R = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3}, \quad (2)$$

式中, 各变量意义与表 2 中变量意义相同。

3.2 理论模型参数回归分析

对各测试工况下试验数据进行回归分析, 获得模型参数 k_1, k_2, k_3 的回归结果如表 3 所示。

从表 3 回归结果可以看出, $k_1=0.854 \sim 1.497$, $k_2=0.242 \sim 0.687$, $k_3=-1.729 \sim -0.452$, 各回归参数值与美国路面长期使用性能 LTPP^[30]数据库中的参数取值基本一致; 所得理论模型与试验测试结果之间具有较高的决定系数 ($R^2>0.94$), 因此采用该模型预测动态回弹模量可获得较高的精度。

如图 9 所示, 动态回弹模量的预测值与实测值吻合较好, 最大残差绝对值为 8.77, 最大偏差为 8.96%, 小于 10%。该三参数复合模型能够较好地反映体应力和偏应力对动态回弹模量的影响, 与试验结果存在良

表 3 动态回弹模量理论模型参数回归分析结果

测试工况		模型参数			相关系数	最大残差值
含盐量 $Z/\%$	含水率 $w/\%$	k_1	k_2	k_3	R^2	Max
0.0	4.0	1.497	0.242	-0.452	0.907	8.38
	5.1	1.466	0.255	-0.580	0.889	8.59
	6.0	1.433	0.279	-0.823	0.879	8.51
2.0	4.0	1.407	0.428	-1.288	0.971	8.77
	5.1	1.382	0.407	-1.269	0.963	8.18
	6.0	1.309	0.393	-1.310	0.950	7.82
5.0	4.0	1.187	0.503	-1.393	0.966	8.06
	5.1	1.118	0.499	-1.366	0.959	7.58
	6.0	1.077	0.505	-1.552	0.952	8.33
8.0	4.0	0.976	0.615	-1.617	0.969	7.75
	5.1	0.919	0.644	-1.719	0.968	7.68
	6.0	0.854	0.687	-1.729	0.957	8.20

注：回归分析时， M_R 的单位为 MPa，应力单位为 kPa。
好的统计关系，适合于表征粗粒盐渍土回弹特性的应力依赖性。

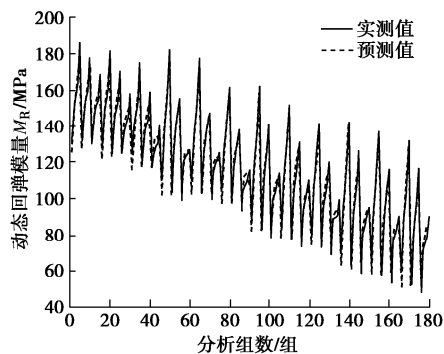


图 9 动态回弹模量实测值与预测值对比

Fig. 9 Comparison between measured and predicted values

3.3 基于物性指标的模型参数预估公式

上述试验结果表明，含水率与含盐量两个物性指标对粗粒盐渍土动态回弹模量均有影响。因此，有必要将所获理论模型中的参数 (k_1 , k_2 , k_3) 与含盐量、含水率等物性指标之间建立模型参数预估公式，从而实现由物性参数预测粗粒盐渍土的动态回弹模量。

Yau 等^[29]选用了美国 LTPP 数据库中一些路基土的物理性质指标，试图同模型参数建立回归关系，但分析结果表明，不同类型的路基土与各自的物理性质指标具有较好的相关性，没有一项物性指标可以为各种路基土都接受，因此，Yau 等^[29]认为难以建立统一的符合精度要求的 k_1 , k_2 , k_3 预测关系式。

本文仅结合含水率 w 和含盐量 Z 两个重要物性影响因素，对理论模型中的参数 k_1 , k_2 , k_3 进行多元线性回归分析，结果如下式所示：

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= -7.026Z - 4.896\omega + 1.729 \quad (R^2 = 0.992), \\ k_2 &= 4.622Z + 0.929\omega + 0.235 \quad (R^2 = 0.964), \\ k_3 &= -11.965Z - 8.150\omega - 0.399 \quad (R^2 = 0.823). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

可见，该模型参数 k_1 , k_2 , k_3 回归系数均在 0.82

以上，表明所得模型参数与盐渍土物性指标之间存在较好的线性关系。

3.4 模型准确性验证

为验证理论模型及其参数预测公式的准确性，另配制含盐量 $Z=10.0\%$ （过盐渍土）土样，控制压实度不变，在含水率为 4.0%、5.1%和 6.0%的 3 种湿度条件下进行动回弹模量测试，并将试验结果与模型的预测值进行对比。

如图 10 所示，对比试验工况下的实测值与基于物性指标的预测值相关性，可知由式（2）和式（3）联立形成的基于盐渍土物性指标的理论模型的准确度在 0.915 以上，总体上试验值与预测值之间的误差较小。可见该基于相关物性指标建立的模型参数预估公式具有较高的准确度，在预估区内可预测其他湿度的氯盐渍土动态回弹模量受应力路径影响的演变规律。

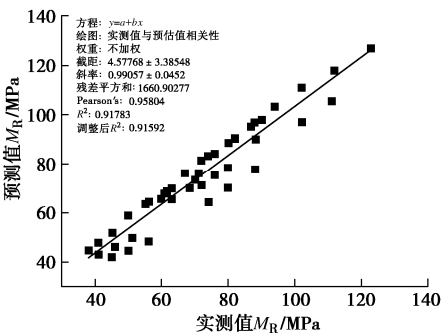


图 10 基于物性指标的预测值与实测值相关性

Fig. 10 Correlation between predicted and measured values based on physical property indexes

4 结 论

本文针对粗粒氯盐渍土的动态回弹模量开展室内循环三轴试验研究，着重探讨盐分及湿度对循环累计变形的影响特性，并提出了简易的理论模型。试验观

察较为全面地反映了粗粒氯盐渍土动态回弹模量的演变规律, 基于试验观察所建立的动态回弹模量理论模型可综合考虑了荷载、湿度及盐分变化(试验前后盐含量保持不变)的影响。本文主要研究结论归纳如下:

(1) 粗粒氯盐渍土动态回弹模量具有较强的应力依赖性。相同湿度和盐分条件下, 动态回弹模量会有随围压和体应力增大而提高, 随偏应力增大而降低的趋势; 在同一围压水平下, 偏应力对高含盐量和高含水率的动态回弹模量影响较明显; 而偏应力一定时, 体应力增加引起动态回弹模量的增加主要是由围压所致。

(2) 粗粒氯盐渍土动态回弹模量受水分和盐分影响较大, 且盐分较水分更显著。相同应力水平下, 动态回弹模量随含盐量和含水率的增大而减小, 其降低幅度分别为 31.2%~43.3% 和 6.4%~13.5% ($\sigma_3=45$ kPa 时); 随着偏应力的增大, 盐分和水分的增加引起动态回弹模量降低量趋于增大, 且降低量的最大差值范围分别为 8.6%~11.8% 和 3.5%~6.2% ($\sigma_3=45$ kPa 时); 各应力水平下, 动态回弹模量降低量受盐分和水分的最大差值分别在 1.3%~3.6% 和 1.4%~2.1% ($\sigma_3=45$ kPa 时)。

(3) 通过对 4 种典型理论模型作对比分析, 甄选出适用性较广泛的 NCHRP 1-28A 三参数模型对粗粒盐渍土动态回弹模量的试验结果进行回归分析。误差分析表明, 该模型参数与美国 LTTP 数据库中参数取值基本一致, 具有较高的模型决定系数; 同时, 建立了基于材料物性指标的该模型参数预估公式, 可有效预测粗粒氯盐渍土动态回弹模量的退化规律。

鉴于本文仅对一种级配的粗粒氯盐渍土动态回弹模量受应力状态、含水率及含盐量的影响展开研究, 同时在实际工况中, 存在盐分随水流失的现象, 今后需要考虑水盐迁移影响下, 针对多种级配的粗粒氯盐渍土动态回弹特性展开进一步研究。

参考文献:

- [1] SEED H B, CHAN C K, LEE C E. Resilient characteristics of subgrade soils and their relations to fatigue failures in asphalt pavements[C]// Proceedings of International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Supplement, 1962, Michigan.
- [2] ANDREI D, WITCZAK M W, SCHWARTZ C W, et al. Harmonized resilient modulus test method for unbound pavement materials[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1874(1): 29 - 37.
- [3] RAHIM A M. Subgrade soil index properties to estimate resilient modulus for pavement design[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2005, 6(3): 163 - 169.
- [4] 凌建明, 苏华才, 谢华昌, 等. 路基土动态回弹模量的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5): 919 - 925. (LING Jian-ming, SU Hua-cai, XIE Hua-chang, et al. Laboratory research on dynamic resilient modulus of subgrade soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(5): 919 - 925. (in Chinese))
- [5] 陈声凯, 凌建明, 罗志刚. 路基土回弹模量应力依赖性分析及预估模型[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6): 95 - 99. (CHEN Sheng-kai, LING Jian-ming, LUO Zhi-gang. Stress-dependent characteristics and prediction model of the resilient modulus of subgrade soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(6): 95 - 99. (in Chinese))
- [6] 冉武平, 李玲, 张翥, 等. 重塑黄土动态回弹模量依赖性分析及预估模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(9): 130 - 137. (RAN Wu-ping, LI Ling, ZHANG Xiao, et al. Dependence analysis and prediction model of dynamic resilient modulus of remodeled-loess[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2018, 45(9): 130 - 137. (in Chinese))
- [7] 刘维正, 曾奕珺, 姚永胜, 等. 含水率变化下压实路基土动态回弹模量试验研究与预估模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 175 - 183. (LIU Wei-zheng, ZENG Yi-jun, YAO Yong-sheng, et al. Experimental study and prediction model of dynamic resilient modulus of compacted subgrade soils subjected to moisture variation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 175 - 183. (in Chinese))
- [8] 董城, 李志勇, 岳志平, 等. 砂土路用动态特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3407 - 3412. (DONG Cheng, LI Zhi-yong, YUE Zhi-ping, et al. Experimental study of dynamic characteristics of sand for highway subgrade[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3407 - 3412. (in Chinese))
- [9] MUHANNA A S, RAHMAN M S, LAMBE P C. Resilient modulus measurement of fine-grained subgrade soils[J]. Transportation Research Record, 1999, 1687(1): 3 - 12.
- [10] 张翥, 赵队家, 刘少文, 等. 美国路基土回弹模量确定方法研究现状[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(4): 795 - 798. (ZHANG Xiao, ZHAO Dui-jia, LIU Shao-wen, et al. Research progress on determination of resilient modulus of subgrade soils in U. S.[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2012, 31(4): 795 - 798. (in Chinese))
- [11] 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. (LING Jian-ming, CHEN Sheng-kai, CAO Chang-wei. Analysis of influence

- factors on resilient modulus of subgrade soils[J]. Journal of Building Materials, 2007, **10**(4): 446 - 451. (in Chinese))
- [12] 朱俊高, 王元龙, 贾 华, 等. 粗粒土回弹特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(6): 950 - 954. (ZHU Jun-gao, WANG Yuan-long, JIA Hua, et al. Experimental study on resilience behaviour of coarse grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 950 - 954. (in Chinese))
- [13] 罗志刚. 路基与粒料层动态模量参数研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2007: 52 - 72. (LUO Zhi-gang. Research on Dynamic Modulus Parameters of Subgrade and Granular Layers[D]. Shanghai: College of Transportation Engineering, Tongji University, 2007: 52 - 72. (in Chinese))
- [14] 陈声凯, 凌建明, 张世洲. 路基土动态回弹模量室内试验加载序列的确定[J]. 公路, 2006, **11**(5): 148 - 152. (CHEN Sheng-kai, LING Jian-ming, ZHANG Shi-zhou. Fixing loading sequence for resilient modulus test of subgrade soil[J]. Highway, 2006, **11**(5): 148 - 152. (in Chinese))
- [15] ZHANG J H, PENG J H, LIU W Z, et al. Predicting resilient modulus of fine-grained subgrade soils considering relative compaction and matric suction[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, **22**(3): 703 - 715.
- [16] 张军辉, 彭俊辉, 郑健龙. 路基土动态回弹模量预估进展与展望[J]. 中国公路学报, 2020, **33**(1): 1 - 13. (ZHANG Jun-hui, PENG Jun-hui, ZHENG Jian-long. Progress and prospect of the prediction model of the resilient modulus of subgrade soils[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, **33**(1): 1 - 13. (in Chinese))
- [17] SEED H B, MITRY F G, MONOSMITH C L, et al. Prediction of Pavement Deflection from Laboratory Repeated Load Tests (NCHRP Report 35)[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1967.
- [18] THOMPSON M R, ELLIOTT R P. ILLI-PAVE Based Re-sponse Algorithms for Design of Conventional Flexible Pavements[R]. Washington D C: Transportation Research Record, 1985.
- [19] MOOSADEH J, WITCZAK M W. Prediction of Subgrade Moduli for Soil That Exhibits Nonlinear Behavior[R]. Washington D C: Transportation Research Record, 1981.
- [20] DRUMM E C, BOATENG-POKU Y, JOHNSON P T. Estimation of subgrade resilient modulus from standard tests[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(5): 774 - 789.
- [21] UZAN J. Characterization of Granular Materials[R]. Washington D C: Transportation Research Record 1022, Transportation Research Board, National Research Council, 1985.
- [22] WITCZAK M W, UZAN J. The Universal Airport Pavement Design System-Report I of V: Granular Material Characterization[R]. Washington D C: Department of Civil Engineering, University of Maryland, 1988.
- [23] LYTTON R L, UZAN J, FERNANDO E G, et al. Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes[R]. Washington D C: Report SHRP A-357, Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1993.
- [24] NCHRP Project 1-28. Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design-Final Report[R]. Washington D C: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 1997.
- [25] 洪安宇, 杨晓松, 党进谦, 等. 非饱和氯盐渍土抗剪强度特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, **30**(4): 52 - 55. (HONG An-yu, YANG Xiao-song, DANG Jin-qian, et al. Shear strength property of unsaturated chlorine saline soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, **30**(4): 52 - 55. (in Chinese))
- [26] 陈炜韬, 王明年, 王 鹰, 等. 含盐量及含水率对氯盐渍土抗剪强度参数的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, **27**(4): 1 - 5. (CHEN Wei-tao, WANG Ming-nian, WANG Ying, et al. Influence of salt content and water content on the shearing strength parameters of chlorine saline soil[J]. China Railway Science, 2006, **27**(4): 1 - 5. (in Chinese))
- [27] 张宁霞, 刘保健, 赵丽娅. 氯盐渍土的工程特性研究[J]. 工程勘察, 2012, **40**(6): 14 - 17. (ZHANG Ning-xia, LIU Bao-jian, ZHAO Li-ya. Study on engineering characteristics of chlorine saline soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, **40**(6): 14 - 17. (in Chinese))
- [28] 李永红. 氯盐渍土的变形和强度特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006. (LI Yong-hong. Research on Deformation and Strength Properties of Chlorine Saline Soil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006. (in Chinese))
- [29] YAU A, VON QUINTUS H L. Predicting elastic response characteristic of unbound materials and soils[R]. Washington D C: 83rd Annual Meeting of Transportation Research Board (CD-ROM), 2004.
- [30] FHWA. Study of LTPP laboratory resilient modulus test data and response characteristics-final report[R]. FHWA-RD-02-051, LTPP, Federal Highway Administration, 2002.