

基于土水特征曲线硫酸盐渍土渗透吸力试验研究

毛雪松, 张腾达, 刘飞飞, 李颖颖

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710000)

摘要: 硫酸盐渍土地区路基盐胀等病害易发且种类多样, 病害的发生与盐渍土中含水率和含盐量有很大关系, 同时不同含水率和含盐量引起的吸力值变化对其也有较大影响。为研究硫酸盐渍土中吸力值与含盐量和体积含水率的关系, 以室内配置硫酸盐渍土作为研究对象, 通过滤纸法测定不同含盐量和体积含水率下的硫酸盐渍土的吸力值, 并绘制不同含盐量条件下的土水特征曲线和建立渗透吸力与含盐量、体积含水率之间的关系。结果表明: 在一定范围内, 体积含水率与总吸力之间呈指数关系; 渗透吸力 $= f(\text{含盐量}, \text{体积含水率})$ 的拟合模型确定为 Linear model Poly 21。

关键词: 硫酸盐渍土; 总吸力; 渗透吸力; 体积含水率; 含盐量

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)01-0027-05

Experimental study of osmotic suction of sulphate saline soil baesd on soil-water characteristic curve

MAO Xuesong, ZHANG Tengda, LIU Feifei, LI Yingging

(College of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Salt expansion and other diseases take place easily and are varied in the subgrade of sulphate saline soil areas. It is greatly related to the water content, salinity and the occurrence of diseases, and different water content and salinity causing the change in suction also has great influence on the occurrence of diseases. In order to study the relation among suction value, salinity and volumetric moisture content, the paper takes filter paper method to determine the suction value under different volumetric water content and salt content, and draws the soil water characteristic curve under different salt content. It established the relation among the osmotic suction, salinity and volumetric moisture content. The results showed an exponential relation between the volumetric water content and total suction within a certain range. The fitting model of "osmotic suction $= f(\text{salt content}, \text{volumetric water content})$ " is determined as Linear model Poly 21.

Key words: sulphate saline soil; total suction; osmotic suction; volumetric moisture content; salinity

土水特征曲线是研究非饱和土力学性质的重要工具, 主要表征非饱和土中体积含水率, 或重力含水率, 或饱和度和土中吸力的关系^[1]。非饱和土中的吸力由基质吸力和渗透吸力(或称溶质吸力)两部分组成, 两者之和称为总吸力^[2-3]。对土水特征线曲的研究最早见于农业土壤学和土壤物理学^[4]。孙德安等^[5]采用滤纸法和压力板法分析了氯盐渍土中含盐量对基质吸力和渗透吸力的影响, 发现含盐量对基质吸力的影响较小而对渗透吸力的影响较大, 但没有通过拟合工具得出含盐量与渗透吸力的具体关系式。于沉香等^[6]利用 Ku-pF 非饱和导水率仪测试了不同干密度状态下盐渍土试样的土水特征曲线发现渗透吸力的存在使土水

特征曲线转化阶段变的平缓, 同时发现干密度随土水特征曲线的影响较大。陈东霞^[7]等采用滤纸法测定基质吸力, 并且利用数学模型对所获取的含水量和吸力值进行拟合, 从而得到土水特征曲线。根据已有研究发现, 几乎没有学者对含盐量与渗透吸力的关系进行深入研究, 土水特征曲线研究中多考虑干密度、含水率和含盐量与基质吸力的关系^[8]。同时以往研究多集中于氯盐渍土和碳酸盐渍土, 或者笼统的仅说明对盐渍土的研究, 具体针对硫酸盐渍土的研究较少。由于硫酸盐渍土的土水特征曲线受多种复杂因素的影响, 目前仍不能定量的推导出体积含水率和总吸力值以及和含盐量与渗透吸力的关系, 故本文现采用滤纸

收稿日期: 2017-12-30

修改稿日期: 2019-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(211021180363)

第一作者: 毛雪松(1976—), 女, 博士, 教授, 主要从事道路工程教学与研究工作。E-mail: xuesongmao@yahoo.com.cn

通信作者: 张腾达(1994—), 男, 硕士生, 主要从事道路防灾减灾研究。E-mail: 1154190749@qq.com

法^[9]测定不同含盐量硫酸盐渍土土体的吸力值,从而绘制不同含盐量条件下的土水特征曲线,并绘制渗透吸力与含盐量、体积含水率的三维曲面图,来揭示一定范围内体积含水率与总吸力的关系以及含盐量、体积含水率对渗透吸力的影响规律。

1 滤纸法测试试验

1.1 试验原理

硫酸盐渍土中除了水分自身迁移引起土体力学性能变化外,盐渍土中所含的盐分也会随着水分发生迁移。水分迁移的动力来源于毛细管作用、薄膜水迁移、吸附-薄膜水迁移和土水势作用,尤其受到土水势中多种势能的影响。本实验主要研究基质势和溶质势的影响。滤纸法主要遵循热力学平衡原理,土体发生水分迁移时,盖在上面的滤纸也将产生迁移现象,直至水分迁移稳定后,滤纸和土体的吸力值相等,但两者的含水量并不相同,从而间接确定土样的吸力值。通过率定试

验获取所用滤纸的率定曲线,经过计算得到滤纸的吸力值,并最终获取土体的总吸力值。本试验采用英国 whatman42 号无灰级定量滤纸,直径为 55 mm 和 47 mm^[10],率定公式如公式(1)所示。根据滤纸与土体接触程度的不同分为接触法和非接触法,本文采用滤纸法^[11]中的非接触法来测定硫酸盐渍土的总吸力。

$$\begin{aligned} \lg s &= 5.327 - 0.077 \ 9w_f, w_f < 45.3\% \\ \lg s &= 2.412 - 0.013 \ 5w_f, w_f \geq 45.3\% \end{aligned} \quad (1)$$

式中: s 为土体的总吸力值, kPa; w_f 为滤纸的质量含水率, %。

1.2 试验样品

试验所需土样采取人工挖土的方法,间隔相应距离各挖深 50 m 后在土坑中取圆柱形土柱 20 个,为保证试验质量,取样后立即用塑料薄膜密封放置铝筒内,如图 1 所示。在室内采用“干盐加湿土法^[12]”,模仿大多学者的硫酸盐配制方法,自行完成硫酸盐渍土的配制,同时完成水分盐分标定。土体的基本物理性质指标,如表 1 所示。

表 1 土样的基本物理特性指标

Tab. 1 Basic physical characteristics of soil samples

含水率 $w / \%$	干密度 $\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	液限 w_L	塑限 w_P	塑性指数 I_P	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
16.3	1.41	28.4	17.7	10.7	7.48	1.40



图 1 取土试样

Fig. 1 Soil sample

1.3 试验方法及步骤

实验采用土样含盐量分别为 0%、0.4%、

0.8%、1.2% 和 1.6%, 每组质量含水率分别为 5%、8%、12%、15% 和 18%。首先根据上述范围配制 25 组不同含盐量不同含水率的土样, 圆形土柱的高度和直径都是 50 mm, 每组配制 6 个试件, 配制过程应尽量均匀, 以致完成后土柱各个方向都均匀平整。下一步将烘干后的滤纸进行称量计数, 然后将滤纸与土体非接触放置。将处置好的土柱用保鲜膜密封, 在恒温恒湿箱中放置 7 天, 以便于滤纸和土柱的含水率达到平衡状态。平衡结束后, 快速取出滤纸, 将滤纸放在洁净干燥的铝盒中称量, 记录下铝盒和滤纸的质量。然后把放有滤纸的铝盒标记好后放入烘箱中, 温度设置为 105 °C, 烘干时长为 8 h。然后将烘干后的滤纸快速称量, 滤纸称重的操作过程要求在 5 s 内完成, 快速记录称量的滤纸质量。这个过程完成后在试验土柱中取出适量土样放置烘箱内进行烘干, 测定其质量含水率。每一组试验都同上述步骤一样, 重复该试验过程即可, 此处不做赘述。

2 硫酸盐渍土总吸力与体积含水率的关系研究

2.1 硫酸盐渍土的土水特征曲线

通过试验获取的数据, 带入已知的率定公式, 计算土体总吸力值. 为了更加直观而准确地反映土体中体积含水率和总吸力的关系, 绘制不同硫酸盐含量条件下土体的总吸力与体积含水率变化关系曲线, 如图 2.

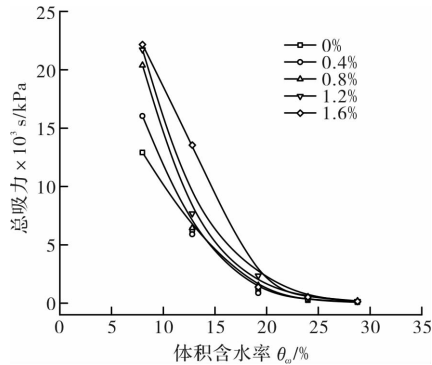


图 2 不同硫酸盐含量的盐渍土土水特征曲线

Fig. 2 Soil water characteristic curve of saline soil with different sulfate content

由图 1 可知, 同经典的土水特征曲线相比, 该试验曲线符合其大致趋势, 主要特点如下:

(1) 在一定的范围内, 所有试样的总吸力值随体积含水率的增加而不断减少. (2) 同一般土体的土水特征曲线相比, 该土水特征曲线在体积含水率为 10%~20% 期间有明显的凹陷, 原因主要是盐分的浓度在饱和前以先快后慢的速率增加, 而基质吸力是呈线性变化, 两者重叠便出现明显的突变现象. (3) 不同含盐量的 SWCC 曲线分布有明显的差异性, 整体上发现, 含盐量小的试样曲线始终处于含盐量大的试样曲线下方, 说明在土中总吸力一定时, 含盐量大的试样体积含水率也较大, 同时对水分的吸持能力也较强. 即含盐量越大试样的持水能力也越强. 含盐量 0% 的试样总吸力值在整个过程中均最小, 即说明素土的总吸力值明显小于盐渍土. (4) 各试样土水特征曲线在 20% 含水率之前曲线较陡, 后面则趋于平缓, 直至同种同样不同含盐量的体积含水率趋于一致出现交叉现象, 说明在含水率较小时, 总吸力对体积含水率的变化敏感程度明显高于体积含水率较高时. 交叉重合现象大致出现在吸力值在 10 kPa 及以下, 说明在该吸力值条件下含盐量对试样的持水能力几乎没有影响.

2.2 土水特征曲线拟合分析

以往研究土水特征曲线拟合的数学模型 Van

Genuchten^[13], Fredlund and Xing^[14] 以及 Gard-
e^r^[15] 大多针对非饱和土类这一较大范围, 但硫酸盐渍土由于不同盐分的掺入属于特殊土. 本文采用专业函数绘图软件 Origin 对所测定的数据进行曲线拟合分析, 旨在得到硫酸盐渍土中体积含水率和总吸力值的关系. 试拟合多次后发现函数类型 Exponential 中的 Exp2PMod1 函数拟合效果最好. 数据拟合后得到在一定的含盐量条件下, 土体体积含水率和总吸力呈现指数关系, 且拟合后的相关系数均大于 0.98. 这样, 不同含盐量的硫酸盐渍土的基质吸力和体积含水率有一个共同的关系式: $s = Ae^{-B\theta_w}$, 如表 2 所示. 这个公式可以帮助对硫酸盐渍土土水特征曲线预测模型的建立.

表 2 基质吸力和体积含水率关系的拟合方程

Tab. 2 Fitting equations for the relationship between matrix suction and volumetric moisture content

含盐量/%	拟合方程	相关系数
0	$s = 133\ 180e^{-0.260\theta_w}$	$R^2 = 0.990\ 7$
0.4	$s = 121\ 977e^{-0.249\theta_w}$	$R^2 = 0.996\ 4$
0.8	$s = 119\ 434e^{-0.226\theta_w}$	$R^2 = 0.999\ 7$
1.2	$s = 159\ 471e^{-0.236\theta_w}$	$R^2 = 0.991\ 8$
1.6	$s = 211\ 836e^{-0.251\theta_w}$	$R^2 = 0.982\ 0$

3 渗透吸力与含盐量、体积含水率关系的研究

非饱和土中的土水势由重力势、压力势、基质势、溶质势和温度势五部分组成. 本试验中各组试验是在同一的环境下进行的, 则土体重力势和温度势可以不考虑, 并且以同一个面为参考, 同时盐渍土属非饱和土, 压力势为零. 因而该试验中硫酸盐渍土土水势仅有基质势与溶质势. 不同含盐量硫酸盐渍土的吸力值减去素土吸力值, 即得到硫酸盐渍土含盐量与渗透吸力关系图, 如图 3.

根据土中曲线的走向趋势, 可以看出如下特点: (1) 在一定范围内同一含水率条件下渗透吸力随含盐量的增加而不断增加, 呈正比例关系. 由前述可知, 此时渗透吸力的数值为相同含水率下盐渍土与素土的吸力差值, 所以导致渗透吸力增加的主要原因是因为含盐量的增加. 并且含盐量越大, 渗透吸力也越大. 这种现象的解释是因为盐分的加入, 土体中的水分与盐分融合成盐溶液, 盐分越大, 溶质含量越大, 浓度增加, 随之土体中的孔隙水压力降低, 最终表现为渗透吸力值不

断增加.

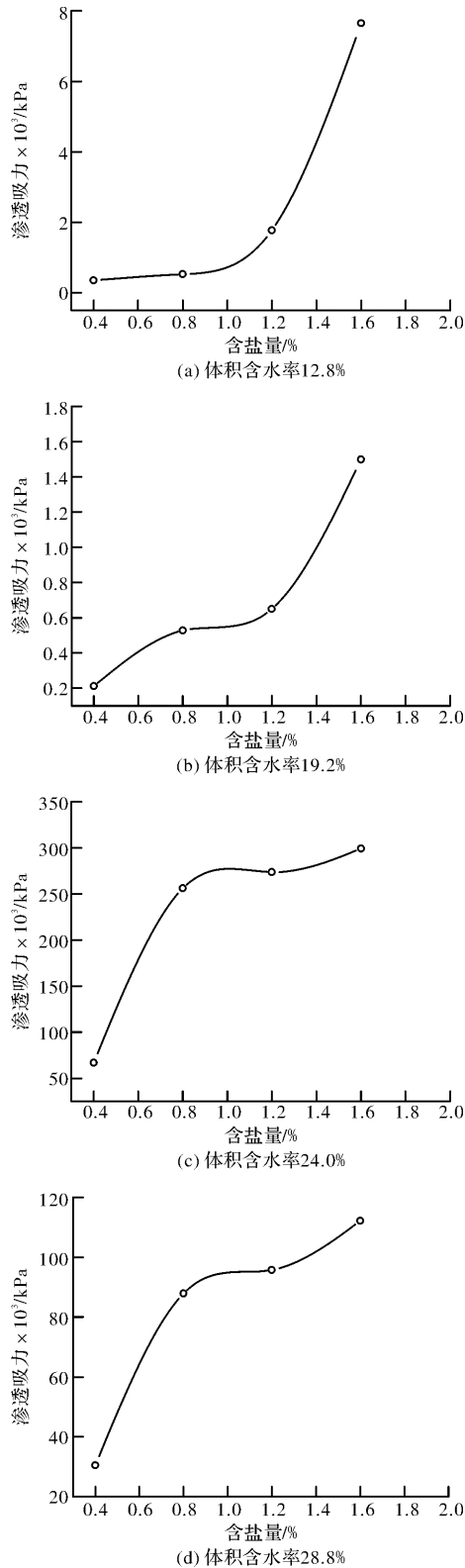


图3 含盐量与渗透吸力关系曲线图

Fig. 3 salinity and osmotic suction

(2)从曲线的变化可以看出,在含盐量小于1.2%的初始阶段,渗透吸力增长的速度较快,当含盐量大于等于1.2%时,渗透吸力的增长速度有所减慢,曲线相对更加平缓.说明试样渗透吸力在含盐量1.2%时发生突变,注意到在渗透吸力与

含盐量关系图中该突起尤其明显,说明突起的形成与渗透吸力有很大的关系.硫酸盐渍土中盐分浓度在饱和前随着水分和盐分迁移呈先快后慢的速度增长,溶质含量的变化即反应在渗透吸力的变化上.同时注意到在随着含盐量的继续增加,渗透吸力并没有持续增加而是趋于一个稳定值,这是因为土中自由水的含量有限,当土中硫酸盐全部变成盐溶液后,随后即使再加大盐分掺入量,渗透吸力并不能保持持续增长的趋势.

研究吸力时,体积含水率是其宏观的主要影响因素,含盐量的增加对渗透吸力^[16]产生较大的影响,故对渗透吸力与含盐量、体积含水率的关系建立显得十分必要.根据图1中数据,体积含水率取值0~30%,含盐量取值0~1.6%.由于没有经验模型作为参考,现依托MATLAB^[17]拟建立“渗透吸力= $f(\text{含盐量}, \text{体积含水率})$ 模型,采用cftool工具箱进行拟合分析.首先导入数据初建三维曲面图(图4);然后选择Interpolant执行Biharmonic(V4)算法对图形进行曲面的圆滑处理(图5),最后选择Polynomial算法,多次试拟合后,确定拟合函数 $z=f(x, y)$,即渗透吸力= $f(\text{含盐量}, \text{体积含水率})$ 的三维曲面图(图6).

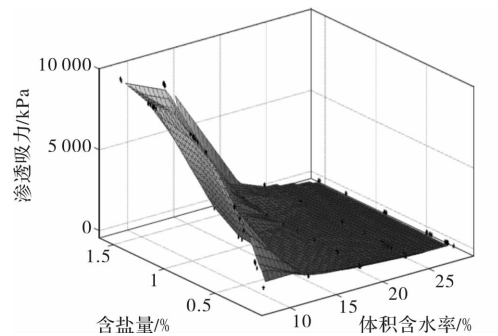


图4 渗透吸力与含盐量、体积含水率的双变量关系

Fig. 4 Bivariate relationship between osmotic suction and salinity and volumetric moisture content

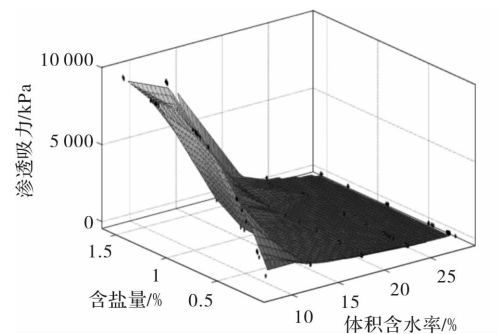


图5 渗透吸力与含盐量、体积含水率圆滑处理

Fig. 5 Osmotic suction and salinity, volumetric moisture content smoothing

拟合函数的确定系数 R-square 和 Adjusted R-

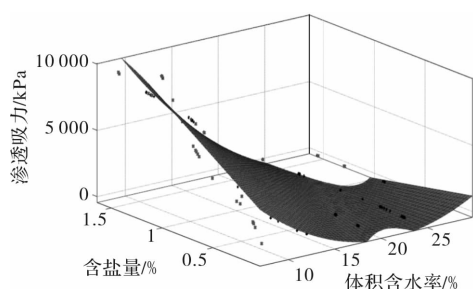


图6 渗透吸力与含盐量、体积含水率的三维曲面图

Fig. 6 Three-dimensional surface map of osmotic suction and salinity and volumetric moisture content

square 值均在 0.95 以上,从而拟合的曲面方程效果较好,可以反映三者之间的关系.因此选用 linear model poly 21 作为“渗透吸力= f (含盐量,体积含水率)”的模型,表达式为见公式(2):

$$f(x, y) = 583.3 - 1953x + 776.1y + 1077x^2 - 1059xy \quad (2)$$

4 结论

(1)使用滤纸法测定硫酸盐渍土总吸力和体积含水率,研究发现,硫酸盐渍土的土水特征曲线符合非饱和土经典土水特征曲线,但同时由于盐分的加入表现出了不同之处,即硫酸盐渍土土水特征曲线有明显的凹陷现象.

(2)通过对数据的拟合分析发现,一定范围内,硫酸盐渍土体积含水率和总吸力之间呈指数关系: $s = Ae^{-B\theta_w}$. 这为以后硫酸盐渍土数学模型的预测提供借鉴作用.

(3)根据计算机语言 MATLAB 的拟合结果表明,在一定的范围内,硫酸盐渍土渗透吸力与含盐量、体积含水率呈幂函数关系.拟合结果 R^2 在 0.95 以上,拟合效果较好.拟合模型确定为 linear model poly 21.

(4)同时研究发现,在一定的含水率条件下,含盐量的变化对渗透吸力的影响较大,对基质吸力的影响较小.

参考文献 References

- [1] 谭晓慧,余伟,沈梦芬等. 土-水特征曲线的试验研究及曲线拟合[J]. 岩土力学, 2013, 34(S2): 51-56.
TAN Xiaohui, YU Wei, SHEN Mengfen, et al. Experimental study and curve fitting of soil-water characteristic curve [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (S2): 51-56.
- [2] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soil [M]. New York: Wiley Inter, 1993.
- [3] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil be-

- havior[M]. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [4] MARSHALL T J, HOLMES J N. Soil physics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1981.
- [5] 孙德安,刘文捷,吕海波. 桂林红黏土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3345-3351.
SUN Dean, LIU Wenjie, LU Haibo. Soil-water characteristic curve of Guilin red clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3345-3351.
- [6] 于沉香,张虎元,王志硕,等. 盐渍土土水特征曲线测试及预测[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 113-118.
YU Shenxiang, ZHANG Huyuan, WANG Zhishuo et al. Test and prediction of salinity soil water characteristic curve[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(2): 113-118.
- [7] 陈东霞. 厦门地区非饱和残积土土水特征及强度性状研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
CHEN Dongxia. Study on soil water characteristics and strength characteristics of unsaturated residual soil in Xiamen[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [8] 赵天宇,王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土地土水特征曲线[J]. 中南大学学报, 2012, 43(6): 2445-2453.
ZHAO Tianyu, WANG Jinfang. Characteristics of loess soil water characteristics considering density and dry-wet cycles[J]. Journal of Central South University, 2012, 43(6): 2445-2453.
- [9] 白福青,刘斯宏,袁 骄. 滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 928-933.
BAI Fuqing, LIU Sihong, YUAN Jiao. Experimental study on the determination of soil water characteristics of expansive soil in Nanyang by filter paper method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 928-933.
- [10] 于天文. 吉林西部盐渍土水热盐力多物理场耦合模型研究[D]. 长春:吉林大学, 2016.
YU Tianwen. Study on multi-physics coupling model of salinized soil in western Jilin Province[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [11] 李永红. 氯盐渍土的变形和强度特性研究[D]. 西安:西北农林科技大学, 2006.
LI Yonghong. Study on deformation and strength characteristics of chloride saline soil[D]. Xi'an: Northwest A & F University, 2006.
- [12] 王兢,倪文. 人工配制含盐土的初步固结试验研究[J]. 公路, 2010(6): 188-191.
WANG Wei, NI Wen. Initial consolidation test of artificially prepared saline soil[J]. Highway, 2010(6): 188-191.
- [13] VAN GENUCHTEN M T. A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.

(下转第 38 页)

(3)节点为刚接时圆柱面巨型网格结构结构的倒塌破坏仍为失稳破坏,结构的抗倒塌能力比节点铰接时提高了12.78%,不算太大,为了考虑施工方便,因此按照铰接节点设计是偏保守且合理的。

参考文献 References

- [1] 董石麟. 空间结构的发展历史、创新、形式分类与实践应用[J]. 空间结构, 2009,15(3):22-43.
DONG Shilin. The development history, innovation, classification and practical application of spatial structures[J]. Spatial Structures, 2009,15(3):22-43.
- [2] 贺拥军,周绪红,刘永健,等. 超大跨度巨型网格结构[J]. 建筑科学与工程学报,2005,(3):25-29.
HE Yongjun, ZHOU Xuhong, LIU Yongjian, et al. Super-span reticulated mega-structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005,(03):25-29.
- [3] Design of buildings to resist progressive collapse:UFC 4-023-03[S]. Washington DC: Department of Defense, 2005.
- [4] Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects: GSA 2005[S]. Washington DC: General Services Administration, 2005.
- [5] Japanese society of steel construction council on tall buildings and urban habitat. Guidelines for collapse control design, II research[S]. Tokyo:J95CC, 2005.
- [6] LI Jun, HAO Hong. Numerical study of structural progressive collapse using substructure technique [J]. Engineering Structures, 2013,52(2):101-113.
- [7] 李易,叶列平,陆新征. 基于能量方法的RC框架结构连续倒塌抗力需求分析 I:梁机制[J]. 建筑结构学报,2011,32(11):1-16.
LI Yi, YE Lieping, LU Xinzhen. Progressive collapse resistant demand of RC frame structures based on energy method I: beam mechanism[J]. Journal of building structures, 2011,32(11):1-16.
- [8] 吕大刚,于晓辉,王光远. 基于单地震动记录IDA方法的结构倒塌分析[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(6):33-39.
LÜ Dagang, YU Xiaohui, WANG Guangyuan. Structural collapse analysis based on single-record IDA method[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(6):33-39.
- [9] 刘成清,何斌,陈驰,等. ANSYS/LS-DYNA 工程结构抗震、抗撞击与抗连续倒塌分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
LIU Chengqing, HE Bing, CHEN Chi, et al. Seismic, impact and continuous collapse resistance analysis of ANSYS/LS-DYNA engineering structures[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2014.
- [10] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范:GB50009-2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
China Academy of Building Research. Load code for the design of structures: GB50009-2012[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [11] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings: GB50011-2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [12] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2002,31(3): 491-514.

(编辑 桂智刚)

(上接第31页)

- [14] FREDLUND D G, Xing A. Equations for The soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994(31):521-532.
- [15] GARDNER W R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. Soil Science, 1958, 85: 228-232.
- [16] 李萍,李同录,王红,等. 非饱和黄土土-水特征曲线与渗透系数 Childs & Collis-Gerge 模型预测[J]. 岩土力学,2013,34(S2):184-189.
LI Ping, LI Tonglu, WANG Hong, et al. Prediction of soil-water characteristic curve and permeability coefficient of unsaturated loess with Childs & Collis-Gerge model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 184-189.
- [17] 谷琪,王家鼎,全云莉,等. 滤纸法测非饱和黄土土水特征曲线试验及拟合研究[J]. 土壤通报,2016,47(3): 588-593.
GU Qi, WANG Jiading, Tong Yunli, et al. Experiment and fitting study on water characteristic curve of unsaturated loess soil by filter paper method[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(3): 588-593.

(编辑 桂智刚)