

砂质泥岩单轴抗压强度试验研究\*

郭瑞<sup>1</sup>,洪刚<sup>2</sup>,张建华<sup>3</sup>,丁宏伟<sup>4</sup>,陈维愿<sup>1</sup>

(1.陕西理工大学 土木工程与建筑学院,陕西 汉中 723001;2. 西安空军工程大学 机场建筑工程系,西安 710038;  
3. 中国有色金属工业西安勘察设计研究院,西安 710064;4. 甘肃省地质矿产勘查开发局,兰州 730000)

**摘 要:**以宁夏宁东地区砂质泥岩为研究对象,进行不同含水量和干密度条件下的单轴抗压强度试验,分析了含水量和干密度对砂质泥岩单轴抗压强度的影响,建立了以含水量和干密度为变量的砂质泥岩抗压强度数学表达式。结果表明:随着含水量增加砂质泥岩单轴抗压强度呈不断减小趋势,两者关系曲线服从指数变化规律。当含水量为 20% 时,砂质泥岩处于崩解极限状态,软化系数为 0.24;随着干密度增大,砂质泥岩单轴抗压强度呈不断增大趋势,两者关系曲线近似于幂函数变化规律;建立的数学表达式能够较好地反映含水量和干密度变化对砂质泥岩单轴抗压强度的影响,其结果为类似地区工程设计和施工参数的选取提供了科学依据。

**关键词:**岩石力学;砂质泥岩;单轴压缩试验;干密度;含水量;单轴抗压强度

中图分类号:U441      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)03-0607-06

Experimental Research on Uniaxial Compressive Strength of Sandy Mudstone

Guo Rui<sup>1</sup>, Hong Gang<sup>2</sup>, Zhang Jianhua<sup>3</sup>, Ding Hongwei<sup>4</sup>, Chen Weiyuan<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, P.R.China;  
2. Department of Airport Architecture Engineering, Air Force Engineering University of Chinese People's Liberation Army, Xi'an 710038, P.R.China; 3. Xi'an Survey and Design Research Institute of China Non-ferrous Industry, Xi'an 710054, P.R.China; 4. Gansu Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou 730000, P.R.China)

**Abstract:** Study on the sandy mudstone in Ningdong County, Ningxia Province, Based on the way of uniaxial compressive strength testing, the load-bearing characteristics of the mudstone from the water content changes were analyzed, which was compared with the measured data. The result shows that with the increase of water content, the uniaxial compressive strength of the sandy mudstone is trend to reduce, and the relationship between them is similar to the law of exponential variation. When the water content is 20%, the mudstone is near to collapse limit state and the softening coefficient is 0.24. With the increase of the dry density, the uniaxial compressive strength of sandy mudstone is trend to increase, and the relation curves of them are similar to power function. The mathematical model of the uniaxial compressive strength for sandy mudstone, which is based on the parameters of water content and dry density, can well reflect the relationship between the compressive strength, water content and dry density, which can guide on the selection of engineering design parameters in the similar area.

**Keywords:** rock mechanics; sandy mudstone; uniaxial compression test; dry density; water content; uniaxial compressive strength

\* 收稿日期:2017-12-25(修改稿)  
作者简介:郭瑞(1982-),男,陕西武功人,工学博士,讲师,主要从事岩土工程、地下结构工程等领域的教学与科研工作。E-mail:guorui19830120@163.com  
基金项目:国家自然科学基金(91225302);陕西理工大学人才启动项目(SZGQD6-11)

0 引言

泥岩在我国分布较广,由于受物理参数、结构特征及矿物成分等因素的影响,其抗压强度差异较大。国内许多研究人员对此进行了较多的研究,也取得了诸多有益的成果<sup>[1-8]</sup>,使工程技术人员对泥岩工程特性有了更为全面的认识。受所处地区自然和地理环境的影响,各地区泥岩的物理力学特征存在较大差异,我国宁夏地区第三系砂质泥岩分布较广,区域内已发生的大量工程事故表明,砂质泥岩遇水后干密度和含水量发生变化,强度降低,致使地基承载力下降,进而引起建筑物或构筑物发生变形或破坏,给人们的生产和生活带来巨大安全隐患。泥岩的抗压强度与其含水量和干密度有一定的联系<sup>[9]</sup>,然而有关这方面的研究工作却鲜有报道。鉴于上述原因,本文结合宁夏神华宁煤 400 万吨/年煤炭间接液化工程实例,针对该项目所在地的砂质泥岩进行单轴压缩试验研究,重点分析和研究砂质泥岩在不同含水量和干密度情况下抗压强度的变化规律,并基于上述研究结果建立以含水量和干密度为变量的砂质泥岩抗压强度数学表达式,对类似地区工程设计与施工参数的选取提供了科学依据。

1 岩样概况及试验方案

1.1 岩样概况

宁夏宁东地区广泛分布的泥岩多为第三系砂质泥岩,是一种由黏土矿物沉积而成的软质岩石,一般多呈褐红和砖红色,块状构造。在天然状态下,其结构完整、力学性能较好,遇水后胀缩各向异性较为明显,极易崩解和软化(原状和浸水后特征如图 1 和图 2 所示)。

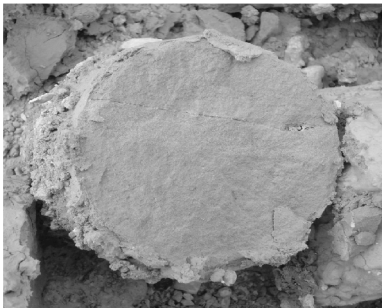


图 1 天然状态砂质泥岩

Fig. 1 Sandy mudstone in natural state

泥岩试样取自宁夏神华宁煤 400 万吨/年煤炭间接液化工程现场。为使试验结果具有代表性,选

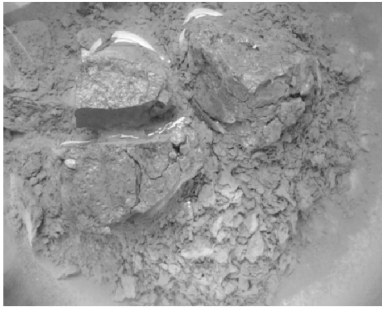


图 2 浸水状态砂质泥岩

Fig. 2 Sandy mudstone in flooding condition

取位于场地中间位置的 Z12# 技术孔为取样孔。采用 XY-130 型钻探机械进行取样(如图 3 所示),钻探取样过程严格按照《建筑工程地质钻探与取样技术标准》(JGJ/T 87—2012)规定执行,每回次进尺不大于取样间距 2.0 m,取芯长度不小于 0.8 m,选取新鲜完整的岩芯制作试样,试样为圆柱形,直径为 50~55 mm,高度为 95~100 mm。剔除有明显外观缺陷的试样,每组制作 3 个试样,将加工好的试样装入取样筒粘贴好标签后送至实验室进行测试。为分析砂质泥岩遇水崩解软化机理与其组成成分间关系,采用全自动 X 射线衍射仪对采集到的试样测试分析,通过对测试结果分析可知岩样中原生矿物主要为石英、云母、方解石及钾长石等,黏土矿物主要为高岭石,各矿物成分含量如表 1 所示。

表 1 砂质泥岩矿物组成及其含量

Table 1 Mineral content of sandy mudstone

矿物成分	石英	云母	方解石	钾长石	高岭石	其他
含量 /%	26.5 ~ 33.0	22.3 ~ 28.5	18.1 ~ 27.6	17.8 ~ 24.3	16.6 ~ 22.7	6.0 ~ 9.0

1.2 试验方案

抗压强度测试采用北京华勘生产的万能材料试验机(如图 4 所示)。将试样放置在试验机承压板中心位置,以使其加载过程中受力均匀,以 0.8 MPa/s 的速度加载,直至试件破坏读取加载值。

2 试验成果与分析

2.1 基本物理力学性质参数的变化

严格按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)中规定,分别对取于不同深度岩样天然和崩解状态下的密度、比重、孔隙率、饱和吸水



图3 取样现场

Fig. 3 Sampling in the field



图4 抗压强度试验仪器

Fig. 4 Testing instrument for compressive strength

率及自由膨胀率等物理力学性质指标进行测试。采用三倍标准差法对砂质泥岩天然状态下的物理力学性质参数测试成果进行筛选统计,对个别由于岩土的不均匀性或其他原因造成的明显异常数据予以剔除。砂质泥岩天然和崩解状态下的基本物理力学性质参数测试结果如表2所示。研究区内砂质泥岩岩样单轴压缩条件下,其典型应力-应变关系曲线可划分为裂隙压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段及破坏阶段4个阶段,如图5所示。

表2 砂质泥岩物理力学性质参数

Table 2 Initial physical parameters of sandy mudstone

项目	含水率 /%	比重	孔隙率 /%	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	自由 膨胀率 /%	泊 松 比	弹性 模量 /GPa	抗压 强度 /MPa
天然 状态	16.3	2.84	12.9	2.1	42.6	0.22	5.2	25.1
崩解 状态	26.0	2.98	12.52	2.42	46.61	0.24	2.2	6.15

从表2可知,砂质泥岩的含水率、比重、密度及自由膨胀率等物理力学性质在参数崩解状态下的值均大于其天然状态值。对于砂质泥岩的孔隙率,试验过程中发现,对于同一钻孔位置的岩样,随着

测试试样所在深度的增加,其孔隙呈减小变化趋势。究其原因:砂质泥岩在沉积初期孔隙率较大、透水性好,但随着其上覆沉积物厚度增加,孔隙中的水分被不断地挤出,下部岩体上覆压力逐渐增加,致使其沉积更加密实,进而孔隙率较小。从表2可以看出,砂质泥岩崩解状态下的孔隙率值比天然状态下小,分析其原因为:砂质泥岩遇水崩解后天然状态下的部分大孔隙演变成大量的微孔隙,结构形态遭到破坏,出现泥化现象,致使天然状态下的大孔隙被填充,从而引起孔隙率减小。

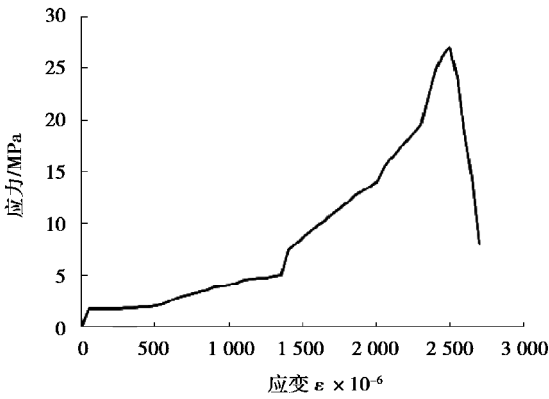


图5 砂质泥岩单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 5 Curve of uniaxial compressive stress vs. strain of sandy mudstone

2.2 含水量对砂质泥岩抗压强度的影响

为分析含水量对砂质泥岩抗压强度的影响,首先对从工程现场取得的不同深度处的岩样进行单轴抗压强度试验,然后基于最小二乘法对砂质泥岩试样单轴抗压强度测试结果进行拟合,得出含水量与抗压强度二者变化规律,如图6所示。

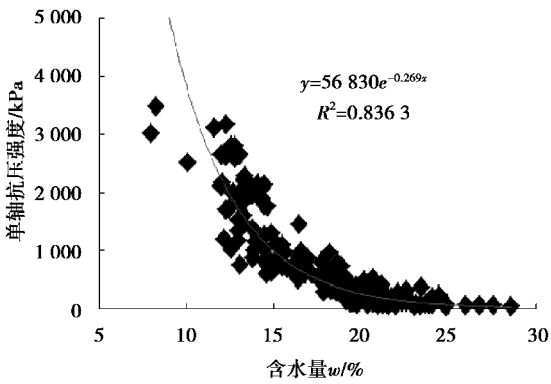


图6 砂质泥岩含水量与单轴抗压强度关系曲线

Fig. 6 Curve of water content vs. uniaxial compressive strength of sandy mudstone

从图 6 可以看出,砂质泥岩抗压强度与含水量关系拟合曲线与试验结果基本吻合,随着含水量增大,砂质泥岩抗压强度呈逐渐减小趋势,二者关系近似于指数变化。当含水量大于 20% 时,抗压强度减小幅度趋于缓慢,故可知研究区砂质泥岩抗压强度趋于稳定的分界点含水量为 20%,此时泥岩几乎达到饱和状态,处于崩解极限状态,此时的抗压强度值为砂质泥岩饱和单轴抗压强度,可计算得泥岩软化系数为 0.24。究其原因:随岩体中含水量增大,泥岩颗粒间孔隙中的水分也随之增多,包裹在颗粒表面上的水分相当于润滑剂,致使泥岩颗粒间相对滑动增大,蠕滑变形机率增大,抗压强度逐渐降低,在外力作用下结构较容易破坏。除此之外,砂质泥岩中高岭石等黏土矿物颗粒细小,亲水性强,随着含水量的增大,当水渗入岩石的孔隙中时,细小颗粒的吸附水膜便会增厚,引起岩石体积的膨胀。由于这种体胀是不均匀的,使得岩石内产生不均匀应力,部分胶结物会被稀释、软化或溶解,于是导致岩石颗粒碎裂解体,进而致使岩体抗压强度降低。

2.3 干密度对砂质泥岩抗压强度的影响

根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)采用烘干法和量积法测试不同岩样含水量和天然密度,换算出干密度,采用万能材料试验机测试岩样单轴抗压强度。依据试验结果绘制砂质泥岩试样单轴抗压强度与干密度间关系曲线,并通过最小二乘法拟合,不同干密度条件下砂质泥岩单轴抗压强度变化规律如图 7 所示。

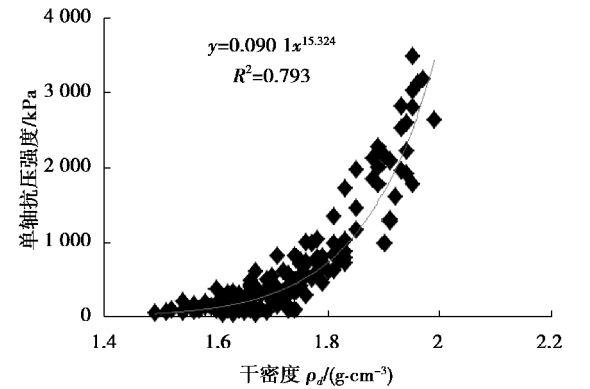


图 7 砂质泥岩干密度与单轴抗压强度关系曲线  
Fig. 7 Curve of dry density vs. uniaxial compressive strength of sandy mudstone

从图 6 可以看出,除个别点较为离散外,抗压

强度与干密度关系拟合曲线与试验结果整体变化趋势基本吻合。当干密度值小于 1.6 时,砂质泥岩抗压强度随着干密度值的增大变化较为平缓,当干密度值大于 1.6 时,随干密度值增大二者关系曲线近似于幂函数变化,整体相关性较好。在其他条件基本相同时,随着干密度增大,砂质泥岩抗压强度整体呈现出不断增大趋势。究其原因:随着砂质泥岩干密度增大,其泥岩颗粒间孔隙逐渐减小,岩体密实度增加,在外部荷载作用下其抵抗能力较强。除此之外,由于泥岩颗粒间孔隙减小,密实度进一步加强,泥岩颗粒孔隙中的水分难入渗,遇水崩解的可能性随之降低,抗压强度提高。

3 砂质泥岩单轴抗压强度数学表达式

3.1 单轴抗压强度数学表达式建立

基于对砂质泥岩抗压强度随含水量和干密度变化试验结果的分析,首先运用最小二乘法对砂质泥岩单轴抗压强度与( $e^{\rho_d/w}$ )间关系进行拟合,得到二者关系曲线如图 8 所示,然后依据拟合关系曲线图通过 MATLAB 线性回归分析法建立基于含水量和干密的砂质泥岩抗压强度数学表达式。

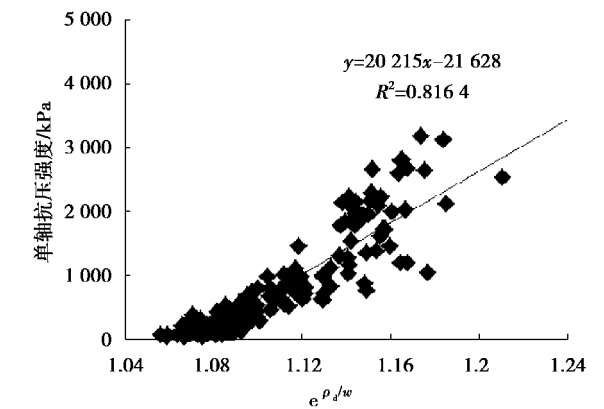


图 8 砂质泥岩单轴抗压强度与  $e^{\rho_d/w}$  关系曲线  
Fig. 8 Curve of  $e^{\rho_d/w}$  vs. compressive strength of sandy mudstone

从图 8 可以看出,当干密度和含水量比值( $e^{\rho_d/w}$ )小于 1.09 时,砂质泥岩抗压强度随着两者比值的变化较为平缓,但当  $e^{\rho_d/w}$  大于 1.09 时,随着  $e^{\rho_d/w}$  值增大,砂质泥岩抗压强度也随之增大,除个别数据偏离直线以外,砂质泥岩抗压强度与  $e^{\rho_d/w}$  的整体相关性较好,且在其他条件基本相同时,两者间呈现出较好的线性函数关系。



根据砂质泥岩抗压强度与  $e^{\rho_d/w}$  关系拟合曲线,通过 MATLAB 线性回归分析,建立以含水量和干密度为参数的砂质泥岩抗压强度数学表达式,即  $f_{rk}=A \cdot e^{\rho_d/w})+B \cdot \ln w$ 。其中: $A,B$  为试验参数(计算其值分别为 6370.5, -2 185.5); $\rho_d$  为泥岩干密度, $w$  为含水量。通过上式计算时,若所得抗压强度值小于 0,则表明岩体中含水量较大,接近饱和状态。这一类试样较难制作,且试验得到的抗压强度值较小,可认为无法完成单轴抗压强度试验。

3.2 工程实例验证

文献[10]为在本文研究区所在本地地进行的桩基静载荷试验,该试验通过在试桩桩身埋设测试元件,并与桩的静载荷试验同步进行桩身荷载传递

性状测试,以分析桩周土层侧阻力和桩底端阻力特征,测试技术和方法成熟,结果可靠。文献中 4 组试桩主要技术参数见表 3。根据勘察现场桩基承载力实测值和文献[11-12]中嵌岩桩嵌岩段承载力计算方法( $Q_{rk}=\xi f_{rk} \frac{\pi}{4} d^2$ )及嵌岩段侧阻和端阻综合系数取值方法(计算取综合系数值为 1.39),反算出研究区内砂质泥岩的单轴抗压强度;基于试桩成孔时测得的砂质泥岩含水量和干密度值,根据建立的砂质泥岩抗压强度数学表达式  $f_{rk}=A \cdot e^{\rho_d/w})+B \cdot \ln w$  计算出与不同含水量和干密度值对应的砂质泥岩抗压强度,并与实测抗压强度值进行对比,如表 4 所示。

表 3 各试桩技术参数  
Table 3 Technology parameters of test piles

桩号	桩端持力层	进入砂质泥岩深度 /m	孔口标高 /m	成孔深度 /m	施工桩长 /m	桩顶出露高度 /m	总桩长 /m	有效桩长 /m	试验桩顶标高 /m
S1	砂质砂质泥岩	2.0	1 297.361	16.10	16.80	0.70	16.80	16.10	1 298.061
S2		2.0	1 297.556	16.28	16.98	0.70	16.98	16.28	1 298.256
S3		2.0	1 297.549	16.90	17.60	0.70	17.60	16.90	1 298.249
S4		2.0	1 297.713	16.63	17.33	0.70	17.33	16.63	1 298.413

表 4 实测数据与计算数据对比  
Table 4 Comparison of measured results and calculated data

桩号	含水量 /%	干密度 /( $g \cdot cm^{-3}$ )	实测抗压强度 /Pa	计算抗压强度 /Pa	差值百分比 /%
S1	12.1	1.85	2 964.0	2 824.6	4.7
S2	12.3	1.82	2 890.6	2 720.7	5.9
S3	11.7	1.89	3 165.5	3 044.3	3.8
S4	9.8	1.95	4 472.7	4 345.5	2.8

由表 3 可见,根据公式  $f_{rk}=A \cdot e^{\rho_d/w})+B \cdot \ln w$  计算的砂质泥岩抗压强度与实测值较为接近,二者最大差值百分比为 5.9%,表明基于含水量和干密度建立的砂质泥岩单轴抗压强度数学表达式能够较好地反映三者间的关系,对区域内类似工程设计和施工参数的选取提供了计算依据。

4 结论

(1)随着含水量增大,砂质泥岩单轴抗压强度呈逐渐减小趋势,二者关系近似于指数变化。宁夏宁东地区砂质泥岩单轴抗压强度趋于稳定的分界点含水量值为 20%,此时砂质泥岩处于崩解极限状态,软化系数为 0.24,其崩解状态下的孔隙值小于天然状态。

(2)随着岩样干密度增大,砂质泥岩的单轴抗压强度呈不断增大趋势,二者间关系曲线近似于幂函数变化,整体相关性较好。

(3)研究区内砂质泥岩单轴抗压强度与  $e^{\rho_d/w}$  的整体相关性较好,在其他条件基本相同时,两者间呈现较好的线性关系。以含水量和干密度为参数建立的砂质泥岩单轴抗压强度计算公式  $f_{rk} = A \cdot e^{\rho_d/w} + B \cdot \ln w$  能够较好地反映三者间关系,为类似地区工程设计和施工参数的选取提供了科学依据。

参考文献(References)

[1] 张永安,李峰. 红层泥岩的剪切蠕变试验研究[J]. 工程勘察,2010,38(4):23-26.(Zhang Yongan, Li Feng, Experimental study on shear creep properties of the mudstone in red beds[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010,38(4):23-26. (in Chinses))

[2] 黄志全,王伟国,李宣. 宁夏固原地区泥岩工程特性试验研究[J]. 华北水利水电学院学报,2013,34(6):60-63. (Huang Zhiquan, Wang Weiguo, Li Xuan. Experimental study on the engineering characteristics of the mudstone in Guyuan area, Ningxia Province [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2013, 34 (6): 60-63. (in Chinses))

[3] 李硕标,陈剑,易国丁. 红层岩石微观特性与抗压强度关系试验研究[J]. 工程勘察,2013,41(3):1-5. (Li Shuobiao, Chen Jian, Yi Guoding. Experimental study on the relationship between micro-characteristics and compressive strength of the red bed rock [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013,41(3):1-5. (in Chinses))

[4] 周翠英,朱凤贤,张磊. 软岩饱水试验与软化临界现象研究[J]. 岩土力学,2010,31(6):1709-1715.(Zhou Cuiying, Zhu Fengxian, Zhang Lei. Research on saturation test and softening critical phenomena soft rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (6): 1709-1715. (in Chinses))

[6] 高保彬,李回贵,刘云鹏,等.单轴压缩下煤岩声发射及分形特征研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(5):986-911.(Gao Baobin, Li Huigui, Liu Yunpeng, et al. Study of acoustic emission and fractal characteristics of coal rock under uniaxial compression

[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013,9(5):986-911. (in Chinese))

[7] 洪刚,冯忠居,郭瑞,等.高速公路特长箱涵顶进摩阻系数试验分析[J].地下空间与工程学报,2015,11(4):986-911.(Hong Gang, Feng Zhongju, Guo Rui, et al.Experiment analysis on friction coefficient of oversize box culvert jacked into highway subgrade [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4):986-911. (in Chinese)).

[8] 原先凡,邓华锋,李建林.砂质泥岩卸荷流变本构模型研究[J].岩土工程学报,2015,37(9):1734-1739. (Yuan Xianfan, Deng Huafeng, Li Jianlin. Unloading rheological constitutive model for sandy mudstone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015,37(9):1734-1739. (in Chinese))

[9] 奚家米,杨更社,庞磊,等.低温冻结作用下砂质泥岩基本力学特性试验研究[J].煤炭学报,2014,39(7)1262-1268.(Xi Jiami, Yang Gengshei, Pang Lei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of sandy mudstone under low freezing temperature [J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(7):1262-1268. (in Chinese)).

[9] 张建华. 宁东砂质泥岩单轴抗压强度的试验研究[J]. 有色勘察设计,2015(3):1-6. (Zhang Jianhua. Experimental study on uniaxial compressive strength of the sandy mudstone in the east of Nanjing[J]. Colored Survey and Dseign, 2015(3):1-6. (in Chinese))

[10] 神华宁煤 400 万吨/年煤炭间接液化项目桩基静载荷试验报告[R]. 北京:机械工业出版社,2012. (Static load test report of pile Foundation on coal liquefaction project in Shenhua Ningxia[R]. Beijing: China Machine Press,2012. (in Chinese))

[11] 王卫东,吴江斌,王向军.嵌岩桩嵌岩段侧阻和端阻综合系数研究[J].岩土力学,2015,36(增2):289-295. (Wang Weidong, Wu Jiangbin, Wang Xiangjun. Study of comprehensive coefficient of shaft/tip resistance for rock-socketed piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(Supp.2):289-295. (in Chinese)).

[12] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范(JGJ94-2008)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.( China Building Science Research Institute. Technical code for building pile foundations (JGJ94-2008) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))