

# 饱水对红层地区岩石力学特性影响的 试验研究<sup>\*</sup>



刘登新<sup>1</sup>, 胡 鹏<sup>2</sup>, 赵立财<sup>3</sup>

- (1. 长江水利水电开发集团(湖北)有限公司, 湖北 武汉 430010;  
 2. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 成都 610061;  
 3. 中铁十九局集团第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 红层地区港口岩石地基在饱水作用下抗变形及承载能力衰减, 影响港口地基稳定性。为探究饱水对红层地区岩石力学特性的影响, 以砂岩、泥质砂岩和泥岩为研究对象, 开展吸水率测定、巴西劈裂、单轴及三轴压缩试验。试验发现: 泥岩吸水性能最强, 平均吸水率达到 0.505%, 泥质砂岩和砂岩的平均吸水率分别为 0.435% 和 0.414%; 3 种岩石饱水后泊松比均有一定增大, 饱水后环向变形相比轴向更为敏感, 体积扩容更为显著; 岩石饱水后, 抗拉强度、单轴和三轴抗压强度表现出不同程度的衰减。研究成果可为红层地区岩石饱水力学特性及港口地基承载性能研究提供参考。

**关键词:** 红层地区; 港口地基; 岩石; 饱水; 力学特性

中图分类号: U 655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0166-06

## Experimental study on influence of water saturation on mechanical properties of rocks in red bed area

LIU Deng-xin<sup>1</sup>, HU Peng<sup>2</sup>, ZHAO Li-cai<sup>3</sup>

- (1. Changjiang Water Resources and Hydropower Development Group (Hubei) Co., Ltd., Wuhan 430010, China;  
 2. Nuclear Industry Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610061, China;  
 3. China Railway 19th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Shenyang 110136, China)

**Abstract:** Under the action of saturated water, the rock foundation of the port in the red bed area weakens in the anti-deformation and bearing capacity, which affects the stability of the port foundation. To explore the influence of water saturation on mechanical properties of rocks in red bed area, we take sandstone, argillaceous sandstone, and mudstone as research objects to conduct the water absorption measurement, Brazilian splitting, as well as uniaxial and triaxial compression tests. The results show that mudstone has the strongest water absorption, with an average of 0.505%. The average water absorption of argillaceous sandstone and sandstone is 0.435% and 0.414% respectively. The Poisson's ratio of the three kinds of rocks increases after water saturation, indicating that the circumferential deformation is more sensitive than the axial deformation, and the volume expansion is more significant after water saturation. The tensile strength and the uniaxial and triaxial compressive strength of rock show different degrees of attenuation after saturation. The research results may serve as reference for the study on mechanical properties of water saturated rock and the bearing capacity of port foundation in the red bed area.

**Keywords:** red bed area; port foundation; rock; water saturation; mechanical properties

收稿日期: 2021-07-02

\*基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才资助项目(XLYC2007146)

作者简介: 刘登新(1972—), 男, 高级工程师, 从事水利水电工程方面的研究。

红层主要指侏罗系到新近系的陆相红色岩系, 岩性以砂岩、泥岩和页岩为主, 在我国西南地区广泛分布<sup>[1-2]</sup>。红层地区岩石多为软硬互层, 在水的作用下出现不同程度的软化, 可能会引起岩石地基承载力显著降低甚至发生滑移、破坏现象, 内陆港口建设中须加以重视<sup>[3-4]</sup>。研究饱水对红层地区岩石力学特性的影响具有重要的意义。

目前, 关于饱水对岩石力学性能影响的研究已有较多成果: 徐礼华等<sup>[5]</sup>以丹江口水库不同岩石为研究对象, 开展单轴压缩试验, 分析水作用对岩石强度、弹性模量、泊松比的影响; Alt-Epping 等<sup>[6]</sup>重点研究了饱水作用对花岗岩孔隙度及强度的影响; 周意超等<sup>[7]</sup>进行石膏岩单轴和三轴压缩试验, 分析强度及变形软化特征, 探究石膏岩饱水软化机制; 张秀莲等<sup>[8]</sup>以绿泥角闪岩为研究对象, 采用自主研究的试验系统开展吸水软化试验, 揭示了绿泥角闪岩吸水特性以及饱水软化特性; 朱俊杰<sup>[9]</sup>以滇中地区红层泥岩和粉砂质泥岩为试验对象, 对比研究饱水对强度、变形模量的影响。

本文研究背景为重庆某港口地基工程, 所处红层地区出露岩性为砂岩、泥质砂岩和泥岩, 岩石在水的作用下承载能力及强度弱化, 影响港口地基工程稳定性。为系统性研究饱水对该区域红层岩石力学特性的影响, 以砂岩、泥质砂岩和泥岩为研究对象, 开展吸水率测定、巴西劈裂、单轴及三轴压缩试验, 分析3种岩石在不同工况下的吸水性能和强度特征, 探究饱水对岩石力学特性的影响。

## 1 试验设计

依托工程处于重庆红层地区, 主要出露砂岩、泥质砂岩和泥岩。取这3种新鲜岩石, 在实验室经锯、磨加工成 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  和 $\phi 50\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  的标准圆柱样。3种岩石天然状态下的基本物理参数见表1。首先, 将岩样在自然状态下干燥1周时间, 称重后分为干燥和饱和2组, 将饱和组的岩样置于水桶, 每2 h 加水1次, 共5次加水使水漫过岩样, 每1 d 称重1次, 共饱水14 d 得到饱水岩样。

表1 岩样物理参数

岩石类型	天然密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙率/%	天然含水率/%
砂岩	2.71	0.62	1.94
泥质砂岩	2.56	0.58	1.69
泥岩	2.32	0.55	1.03

采用RMT-150B型电液伺服岩石三轴系统对 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  岩样进行单轴和三轴抗压强度试验, 对 $\phi 50\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  岩样进行巴西劈裂试验获得抗拉强度, 试验之前先进行吸水率测定。

## 2 吸水率测定结果分析

3种岩石的吸水率测定结果见图1。

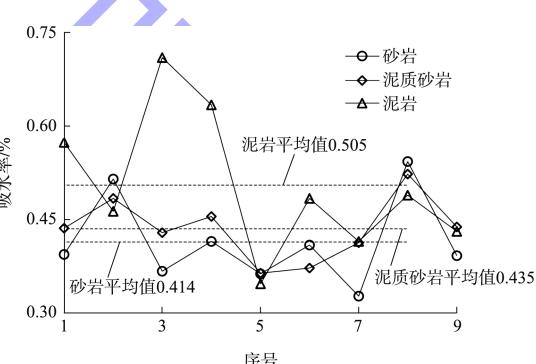


图1 岩石吸水率试验结果

由表1和图1可知, 3种岩石由于矿物成分、孔隙大小和结构类型紧密关联, 吸水性能存在差异。其中, 泥岩吸水性能最强, 吸水率为0.347%~0.710%, 平均吸水率为0.505%, 标准差为0.108; 泥质砂岩吸水性能次之, 吸水率范围为0.364%~0.523%, 平均吸水率为0.435%, 标准差为0.047; 砂岩吸水性能最弱, 吸水率范围为0.327%~0.543%, 平均吸水率为0.414%, 标准差为0.067。通常泥岩含有较多的亲水矿物成分, 砂岩亲水矿物成分较少<sup>[10-11]</sup>, 这是泥岩和砂岩吸水性能存在较大差异的主要原因。

## 3 巴西劈裂试验

巴西劈裂法广泛用于确定岩石抗拉强度<sup>[12]</sup>, 开展干燥和饱水状态下3种岩石的巴西劈裂试验, 试验前测定饱水状态下岩石的吸水率, 结果见表2。

表 2 巴西劈裂试验结果

岩石类型	工况	试样编号	吸水率/%	抗拉强度/MPa		抗拉强度软化系数
				试验值	平均值	
砂岩	干燥	A1	-	8.76		
		A2	-	8.54	8.63	
		A3	-	8.59		
	饱水	A11	0.425	7.31		0.84
		A12	0.403	7.16	7.24	
		A13	0.396	7.24		
泥质砂岩	干燥	B1	-	8.18		
		B2	-	8.63	8.35	
		B3	-	8.24		
	饱水	B11	0.447	6.09		0.72
		B12	0.416	6.14	6.05	
		B13	0.452	5.92		
泥岩	干燥	C1	-	3.15		
		C2	-	2.56	2.83	
		C3	-	2.77		
	饱水	C11	0.596	1.16		0.45
		C12	0.484	1.32	1.28	
		C13	0.517	1.37		

注: 试样 A 为砂岩, 试样 B 为泥质砂岩, 试样 C 为泥岩。

由表 2 可看出, 岩石饱水后, 抗拉强度表现出不同幅度的降低。3 种岩石中, 砂岩的抗拉强度最高, 干燥状态下为 8.54~8.76 MPa, 平均值为 8.63 MPa, 饱水状态下为 7.16~7.31 MPa, 平均值为 7.24 MPa, 抗拉强度软化系数为 0.84; 泥质砂岩的抗拉强度次之, 干燥状态下为 8.18~8.63 MPa, 平均值为 8.35 MPa, 饱水状态下为 5.92~6.14 MPa, 平均值为 6.05 MPa, 抗拉强度软化系数为 0.72; 泥岩的抗拉强度最低, 干燥状态下为 2.56~3.15 MPa, 平均值为 2.83 MPa, 饱水状态下为 1.16~1.32 MPa, 平均值为 1.28 MPa, 抗拉强度软化系数为 0.45。由此得出饱水对红层岩石抗拉强度的软化系数为 0.45~0.84。

3 种岩石中, 砂岩、泥质砂岩和泥岩的吸水率依次增大, 抗拉强度软化系数依次递减, 吸水率与抗拉强度软化系数存在影响关系, 吸水率的增

大对岩石抗拉强度软化起到促进作用。

## 4 单轴和三轴压缩试验

### 4.1 单轴压缩试验

3 种岩石的单轴压缩试验曲线如图 2 所示, 单轴压缩试验结果见表 3。

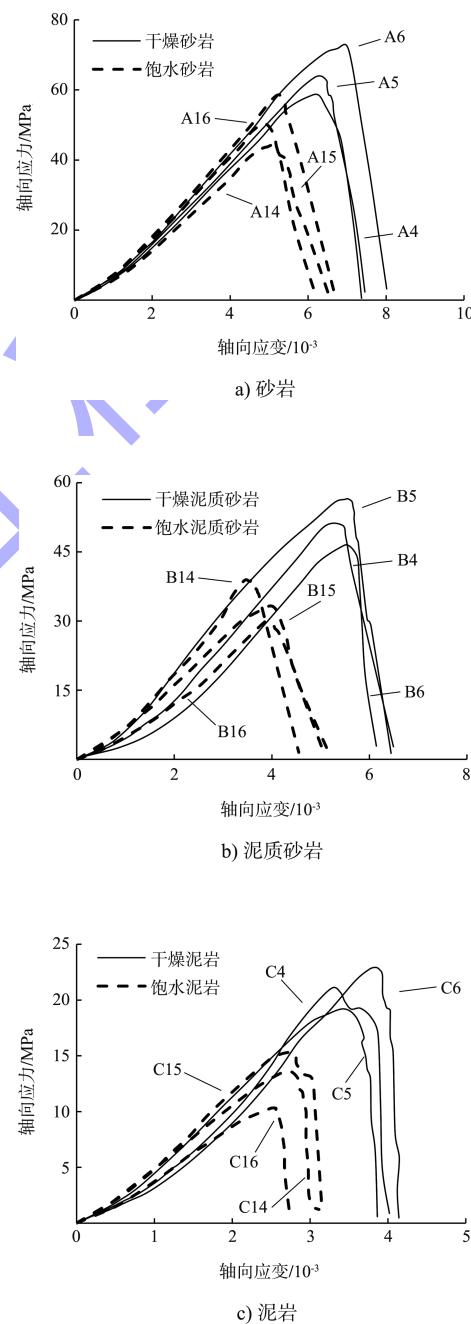


图 2 3 种岩石的单轴压缩试验曲线

表3 3种岩石的单轴压缩试验结果

岩石类型	试样编号	吸水率	抗压强度 $R_c$ /MPa	弹性模量 $E_T$ /GPa	变形模量 $E_{50}$ /GPa	泊松比 $\mu$
砂岩	A4	-	58.6	14.0	10.3	0.168
	A5	-	63.9	13.6	11.3	0.162
	A6	-	72.8	13.7	12.5	0.164
	A14	0.436	44.2	12.4	10.1	0.174
	A15	0.412	50.4	12.7	10.7	0.165
	A16	0.385	58.6	13.6	11.5	0.168
泥质砂岩	B4	-	50.8	14.3	9.7	0.184
	B5	-	56.6	13.9	11.9	0.193
	B6	-	46.4	13.7	9.2	0.176
	B14	0.419	38.9	11.4	8.6	0.192
	B15	0.451	33.3	10.3	8.3	0.197
	B16	0.473	29.9	9.9	7.4	0.188
泥岩	C4	-	21.1	7.4	5.2	0.232
	C5	-	19.2	6.9	5.6	0.217
	C6	-	22.9	6.7	4.7	0.212
	C14	0.524	13.6	5.8	3.1	0.246
	C15	0.480	15.3	4.6	4.2	0.225
	C16	0.552	10.3	4.9	2.7	0.234

由图2和表3可看出, 饱水作用对3种岩石的单轴抗压强度具有较明显的软化效应。3种岩石中, 砂岩的单轴抗压强度最高, 干燥状态下抗压强度为58.6~72.8 MPa, 平均值为65.1 MPa, 饱水状态下抗压强度为44.2~58.6 MPa, 平均值为51.0 MPa, 抗压强度软化系数为0.78; 泥质砂岩的单轴抗压强度次之, 干燥状态下抗压强度为46.4~56.6 MPa, 平均值为51.3 MPa, 饱水状态下抗压强度为29.9~38.9 MPa, 平均值为34.0 MPa, 抗压强度软化系数为0.66; 泥岩的单轴抗压强度最低, 干燥状态下抗压强度为19.2~22.9 MPa, 平均值为21.1 MPa, 饱水状态下抗压强度为10.3~16.9 MPa, 平均值为13.1 MPa, 抗压强度软化系数为0.62。由此得出饱水对红层岩石抗压强度的软化系数为0.62~0.78, 与饱水对抗拉强度的软化系数相差不大。

饱水作用不仅影响红层岩石的抗拉强度和单轴抗压强度, 还影响岩石的变形参数。计算不同岩石的弹性模量  $E_T$ 、变形模量  $E_{50}$  和泊松比  $\mu$  的平均值, 将饱水状态各参数平均值与干燥状态平均值之比作为各参数的变化系数, 同时比较抗拉强度  $R_b$  和单轴抗压强度  $R_c$  的软化系数, 结果见表4。

表4 3种岩石的力学参数变化

试样	$P_T$	$P_{50}$	$P_\mu$	$P_b$	$P_c$
砂岩	0.94	0.95	1.03	0.84	0.78
泥质砂岩	0.76	0.80	1.04	0.72	0.66
泥岩	0.73	0.65	1.07	0.45	0.62

注:  $P_T$ 为弹性模量;  $P_{50}$ 为变形模量;  $P_\mu$ 为泊松比变化系数;  $P_b$ 为抗拉强度软化系数;  $P_c$ 为单轴抗压强度软化系数。

由表4可看出, 3种岩石经历饱水作用后,  $E_T$ 、 $E_{50}$ 、 $R_c$  和  $R_b$  均有所降低, 泥岩的力学参数变化系数和软化系数最小, 泥质砂岩次之, 砂岩的力学参数变化系数和软化系数最大, 说明吸水率紧密影响岩石力学性能: 吸水率越大, 力学参数衰减幅度越大。3种岩石的泊松比变化规律较为相似, 饱水后均有所增大, 说明饱水后环向变形相比轴向更为敏感, 体积扩容更为显著。由此看出, 水对红层地区港口岩石地基的影响主要体现在岩石地基抗变形以及承载能力的衰减, 港口岩石地基设计、施工时须充分考虑水作用的影响。

#### 4.2 三轴压缩试验

3种岩石在干燥和饱水状态下的三轴压缩试验曲线见图3。三轴压缩试验结果见表5。

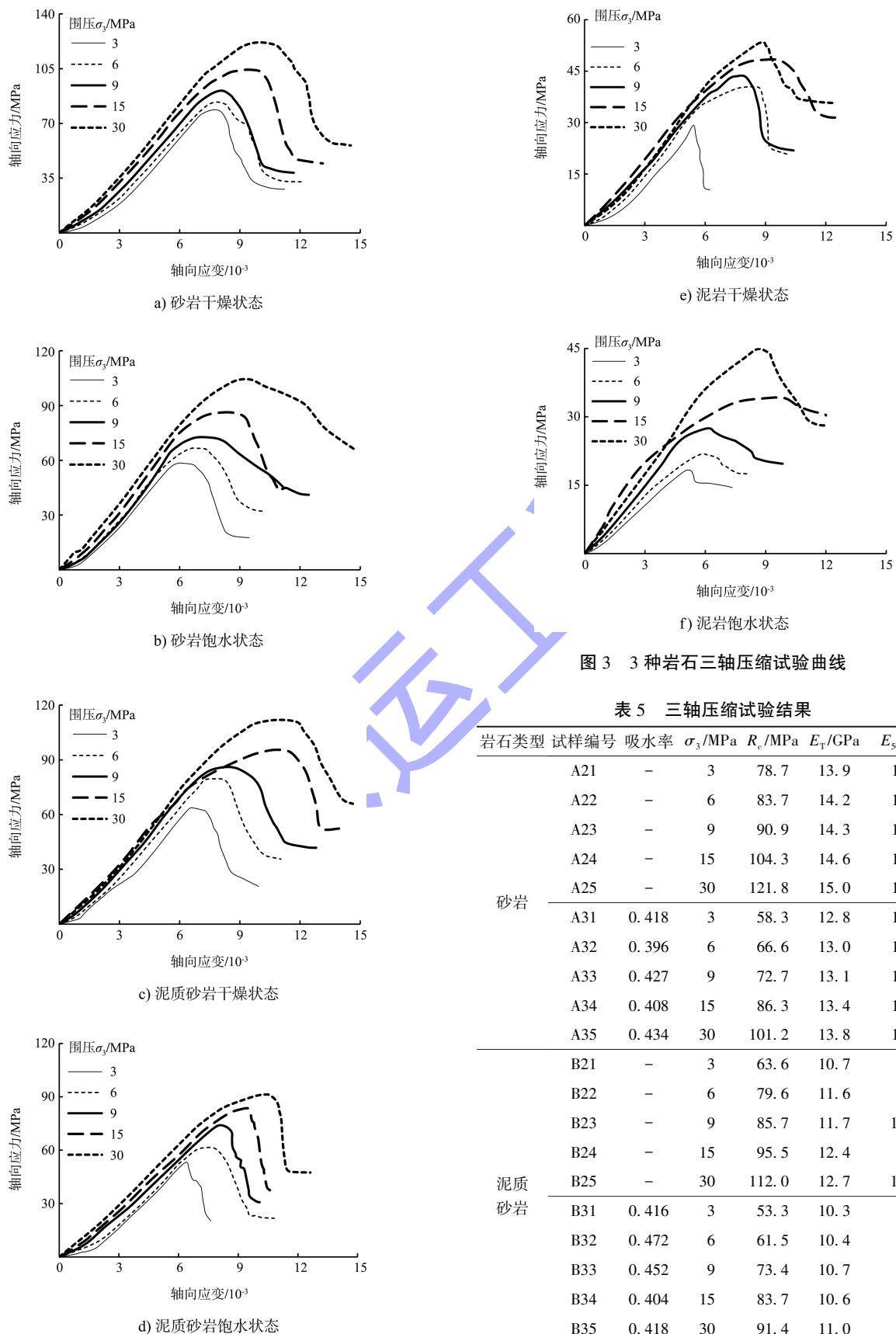


图 3 3 种岩石三轴压缩试验曲线

表 5 三轴压缩试验结果

岩石类型	试样编号	吸水率	$\sigma_3$ /MPa	$R_c$ /MPa	$E_T$ /GPa	$E_{s0}$ /GPa
砂岩	A21	-	3	78.7	13.9	11.9
	A22	-	6	83.7	14.2	12.6
	A23	-	9	90.9	14.3	12.2
	A24	-	15	104.3	14.6	12.7
	A25	-	30	121.8	15.0	13.0
泥质砂岩	A31	0.418	3	58.3	12.8	10.9
	A32	0.396	6	66.6	13.0	11.0
	A33	0.427	9	72.7	13.1	11.2
	A34	0.408	15	86.3	13.4	11.4
	A35	0.434	30	101.2	13.8	11.8
泥岩	B21	-	3	63.6	10.7	8.9
	B22	-	6	79.6	11.6	9.4
	B23	-	9	85.7	11.7	10.0
	B24	-	15	95.5	12.4	9.8
	B25	-	30	112.0	12.7	10.6
	B31	0.416	3	53.3	10.3	8.2
	B32	0.472	6	61.5	10.4	8.4
	B33	0.452	9	73.4	10.7	8.6
	B34	0.404	15	83.7	10.6	8.8
	B35	0.418	30	91.4	11.0	9.1

续表5

岩石类型	试样编号	吸水率	$\sigma_3/\text{MPa}$	$R_e/\text{MPa}$	$E_T/\text{GPa}$	$E_{50}/\text{GPa}$
泥岩	C21	-	3	29.2	7.2	6.6
	C22	-	6	40.5	7.5	6.9
	C23	-	9	43.5	7.8	7.2
	C24	-	15	48.3	8.0	7.3
	C25	-	30	53.4	8.3	7.6
	C31	0.482	3	18.2	5.1	4.7
	C32	0.464	6	21.9	5.4	5.0
	C33	0.547	9	27.4	6.2	5.5
	C34	0.508	15	34.1	6.3	5.8
	C35	0.523	30	44.8	6.9	6.2

由图3和表5可知, 岩石变形及强度特征与围压和含水状态紧密关联。岩石在同一含水状态下, 围压越高, 其峰值强度越高, 弹性模量和变形模量大致呈递增趋势; 岩石在同一围压下, 饱水状态下的峰值强度、弹性模量和变形模量低于干燥状态, 这说明饱水作用促进岩石承载能力的降低。

岩石抗剪强度指标黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  通常可通过绘制不同围压下的莫尔圆, 并作其公切线求解<sup>[13]</sup>, 绘制试验点最佳关系曲线如图4所示, 取斜率和截距计算得到抗剪强度指标(表6)。

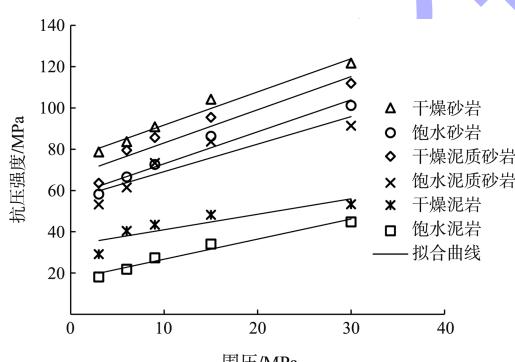


图4 试验点最佳关系曲线

表6 岩石抗剪强度指标

岩石类型	工况	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(^\circ)$
砂岩	干燥	39.8	37.3
	饱水	33.5	38.6
泥质砂岩	干燥	31.4	33.8
	饱水	25.3	34.5
泥岩	干燥	22.5	18.3
	饱水	11.6	18.5

由图4和表6可看出, 岩石抗压强度与围压大致呈线性递增关系。经历饱水作用后, 砂岩、

泥质砂岩、泥岩的内聚力  $c$  分别降低 15.83%、19.43% 和 48.44%, 内摩擦角  $\varphi$  分别增大了 3.49%、2.07% 和 1.09%, 说明饱水作用明显促进岩石内聚力的降低, 对内摩擦角的影响不大。

岩石在饱水作用下, 随着吸水率增高, 抗拉、单轴抗压、三轴抗压强度和内聚力明显降低, 其中泥岩的降幅最大。港口地基设计和施工时应充分考虑岩石的饱水软化效应, 查明软弱夹层的分布, 采取工程措施以保证地基基础的稳定性。

## 5 结论

1) 砂岩、泥质砂岩和泥岩是红层地区广泛分布的岩石种类, 其中泥岩吸水性能最强, 平均吸水率达到 0.505%, 泥质砂岩和砂岩的平均吸水率分别为 0.435% 和 0.414%。

2) 在饱水作用下, 红层地区岩石的抗拉强度、单轴抗压强度、三轴抗压强度和内聚力均有不同程度的降低, 泥岩的衰减幅度最大, 泥质砂岩次之, 砂岩相对最小。

3) 经历饱水作用后, 砂岩、泥质砂岩、泥岩的内聚力  $c$  分别降低 15.83%、19.43% 和 48.44%, 内摩擦角分别增大 3.49%、2.07% 和 1.09%。饱水作用明显促进岩石内聚力的降低, 对内摩擦角的影响不大。

4) 水对红层地区港口岩石地基的影响主要体现在岩石地基抗变形以及承载能力的衰减。地基基础工程设计、施工时应充分考虑岩石的饱水软化效应, 查明软弱夹层的分布, 采取足够工程措施以保证地基基础稳定性。

## 参考文献:

- [1] 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34-40.
- [2] 薄婧方, 姚建新, 林宝玉, 等. 四川东部和重庆地区三叠纪海相红层分布及时代[J]. 地质学报, 2019, 93(2): 285-301.
- [3] 高文华, 朱建群, 张志敏, 等. 软质岩石地基承载力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 953-959.