

文章编号:1001-4888(2018)04-0610-11

考虑混合赤泥强度增长特性的修正邓肯-张模型^{*}

冯燕博^{1,2}, 刘东燕³, 杨超¹, 陈远川²

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北宜昌 443002; 2. 重庆文理学院 建筑工程学院, 重庆 402160;

3. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331)

摘要: 混合赤泥在堆存过程中,随着脱水、滤水龄期的延长,其强度有明显增长,由初始的流塑状态转变为具有较高强度的硬塑状态。为研究混合赤泥的这种胶结硬化特性,对不同自然脱水龄期和浸水浸泡龄期下的混合赤泥开展了无侧限抗压强度试验和固结排水三轴剪切试验。试验结果表明:① 混合赤泥的胶结特性主要体现在粘聚力的增长方面;② 混合赤泥的胶结强度形成主要集中在赤泥堆存龄期前70天内。基于混合赤泥强度变化规律,提出了反映混合赤泥胶结硬化特性的结构性量化参数 m_c ,将原有不稳定的呈软化型的应力-应变曲线修正为表现出双曲线特征的硬化型曲线,并根据试验结果拟合得到初始切线模量 E_{ci} ,结构性强度参数 c_c 和 φ_c 随龄期 t 的变化公式,从而建立了考虑混合赤泥强度增长特性的修正邓肯-张模型。对比验证表明,所建立的模型可以较好地反映混合赤泥随时间的强度增长特性。

关键词: 混合赤泥; 强度增长; 结构性; 邓肯-张模型

中图分类号: TU411

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-194

0 引言

赤泥是从铝土矿提取氧化铝过程中产生的一种呈黄色或褐色的工业废渣,仅我国几大氧化铝生产基地(贵州、山东、河南等)每年赤泥排放量就高达5000万吨^[1]。目前,众多学者致力于赤泥的资源化利用研究,并已经取得了一定的成果,如有价金属的提取^[2,3]、建筑材料^[4,5]或吸附材料^[6]的制备等。然而,这些应用基本上没有达到工业生产规模,实际消耗赤泥量相对较少,且赤泥的处置费用很高(约占氧化铝生产成本的5%^[7]),大量赤泥仍采用露天筑坝的方式堆存^[8,9]。而近年来随着中国土地限制相关政策和土地价格的大幅上涨,无法建设新的尾矿库,新生成的赤泥只能在原有堆体上继续堆存。显然,随着堆存量的进一步增大,如何保证赤泥堆体的稳定性显得十分重要,一旦发生渗滤液渗漏或赤泥坝溃坝,将对周围环境造成严重的影响^[10,11]。显然,建立适用赤泥特性的本构模型对保证赤泥堆体的稳定性具有重要工程意义。

混合赤泥是将烧结法赤泥和拜耳法赤泥按照一定的配合比混合后再进行堆存的一种赤泥。现场勘察和室内试验等研究均表明,混合赤泥在堆存过程中,随着脱水、滤水龄期的延长,其强度有明显增长,由初始的流塑状态转变为具有较高强度的硬塑状态,相应的应力-应变曲线也由硬化型向软化型转变。这主要是由于混合赤泥特有的微观结构组成使其在滤水过程中产生了一定的胶结联结、结晶联结和凝结核联结,从而形成了较大的结构性强度^[12]。而针对混合赤泥的结构性强度特点,在原有土体本构模型

^{*} 收稿日期: 2017-09-25; 修回日期: 2018-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(41602301); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601130); 重庆文理学院人才引进项目(R2015JJ07); 重庆市科委项目(cstc2014jcyjA30019)

通讯作者: 杨超(1986—),男,讲师,博士,主要从事岩土力学等方面的研究。Email: vanni1010@aliyun.com

的基础上改进是建立其本构关系的有效手段。如王立忠等^[13]运用损伤比对邓肯-张模型进行修正,将结构性土应力—应变曲线分三段考虑,模拟了结构性土的应力—应变曲线。陈昌禄等^[14]、骆亚生等^[15]利用综合结构势将结构性黄土软化曲线转化为硬化曲线,将其更好地应用于邓肯-张模型中。张云等^[16]、史三元等^[17]利用三轴剪切排水试验得到了上海各主要土层和典型粉质粘土的邓肯-张模型参数,为实际工程中岩土工程问题的分析计算提供了依据。

本文基于三轴剪切试验得到的混合赤泥强度变化规律,提出反映混合赤泥结构性的量化参数 m_c ,并利用其对邓肯-张模型进行修正,建立了符合混合赤泥强度及变形特性的结构性本构关系模型。研究成果可为赤泥堆体的稳定性以及类似材料的本构模型研究提供一定参考和依据。

1 混合赤泥结构性量化参数 m_c 与强度及变形的关系

1.1 强度变化规律

取中国铝业贵州分公司排放的烧结法赤泥和拜耳法赤泥按照混合比 1 : 1 混合的干法堆载的混合赤泥为对象展开研究。考虑实际堆载过程中刚出厂、新堆积的混合赤泥,部分处于自然脱水干燥状态,但部分赤泥虽经压滤机压滤,但含水率仍旧较大,当堆场赤泥排放量较大或遇降雨气候条件,该部分赤泥在未及时脱水固结的情况下被埋置于新排放赤泥的底部,长期处于浸泡状态。因此将刚出厂的混合赤泥在最短的时间内制成试样后进行自然脱水干燥和浸水饱和处理。对自然脱水和浸水龄期分别为 7 天、28 天、70 天和 120 天等条件下的混合赤泥试样进行了无侧限抗压强度试验和固结排水三轴剪切试验(CD)(具体见文献[1,18]),得到不同条件下的混合赤泥的强度指标如表 1 所示。可以看出,① 随着脱水龄期或浸水龄期的延长,混合赤泥的粘聚力 c 均有明显的增长,而内摩擦角 φ 的变化相对较小,表明混合赤泥的胶结特性主要体现在粘聚力上;② 脱水龄期达到 70 天后,随着脱水过程的继续进行,粘聚力 c 和无侧限抗压强度 q_u 虽然还有一定增长,但增长幅度明显降低。在浸水龄期达到 70 天后,粘聚力和抗压强度同样趋于稳定,表明浸水混合赤泥与自然脱水混合赤泥的胶结强度形成过程几乎一致,均主要集中在赤泥堆存前 70 天内。

表 1 不同条件下混合赤泥的力学特性
Tab.1 The mechanical properties of mixed red mud under different conditions

试样工况	q_u/kPa	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
初始试样	115.78	61.67	37
自然脱水 7 天	716.00	130.51	36
自然脱水 28 天	881.71	296.93	36
自然脱水 70 天	1130.25	322.76	39
自然脱水 120 天	1149.86	326.13	39
浸水 7 天	85.45	95.50	37
浸水 28 天	88.97	108.44	33
浸水 70 天	117.53	116.74	34
浸水 120 天	127.61	117.66	33

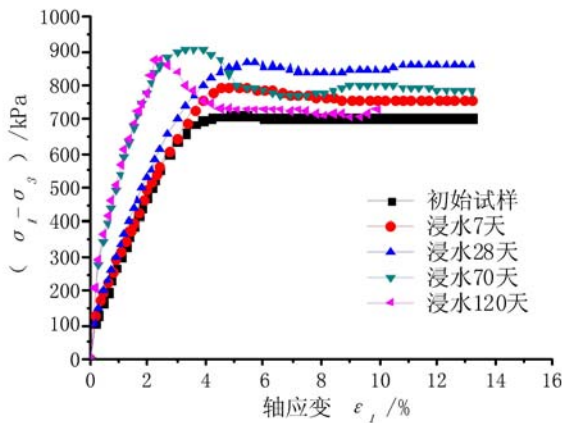


图 1 不同浸水龄期下混合赤泥应力—应变曲线($\sigma_3 = 200\text{kPa}$)

Fig.1 Relationships between stress-strain of red mud form mixing process under different immersion age($\sigma_3 = 200\text{kPa}$)

图 1 为 $\sigma_3 = 200\text{kPa}$ 时不同浸水龄期下混合赤泥的应力—应变曲线。由图可以看出,随着浸水龄期的延长,混合赤泥的应力—应变曲线由硬化型逐渐向软化型转化,且赤泥试样的破坏形式由塑性破坏转变为脆性破坏,主应力差($\sigma_1 - \sigma_3$)的峰值点逐渐增大,在龄期 70 天后趋于稳定。

1.2 结构性量化参数 m_c

研究土结构性的最好方法是使土结构性破坏,从而让其结构势充分释放。谢定义等^[19]、陈存礼

等^[20]分别用单轴试验和三轴试验条件下原状样、扰动样、饱和试样主应力差之比来表示土的结构参数,并通过试验验证了用该参数来研究土结构性对变形与强度特性的影响可以得到良好的规律性。基于此,本文根据混合赤泥在不同条件下的强度特性变化规律,提出了反映混合赤泥结构性强度形成规律的结构定量参数 m_c 。该参数根据混合赤泥刚出厂试样、自然脱水试样和浸水试样在固结排水三轴剪切试验下的应力—应变曲线得到,具体用三轴剪切下混合赤泥在相同龄期自然脱水试样和浸水试样与初始试样产生同一轴应变 ε_1 所对应的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_j$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ 之间的比值来表示混合赤泥结构性的强弱。其表达式为

$$m_c = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_d}{(\sigma_1 - \sigma_3)_c} \bigg/ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_j}{(\sigma_1 - \sigma_3)_d} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_d^2}{(\sigma_1 - \sigma_3)_c \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)_j} \quad (1)$$

式中, $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_j$ 、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ 分别为在三轴应力条件下自然脱水试样、浸水试样和刚出厂初始试样产生同一轴应变 ε_1 时所对应的主应力差。

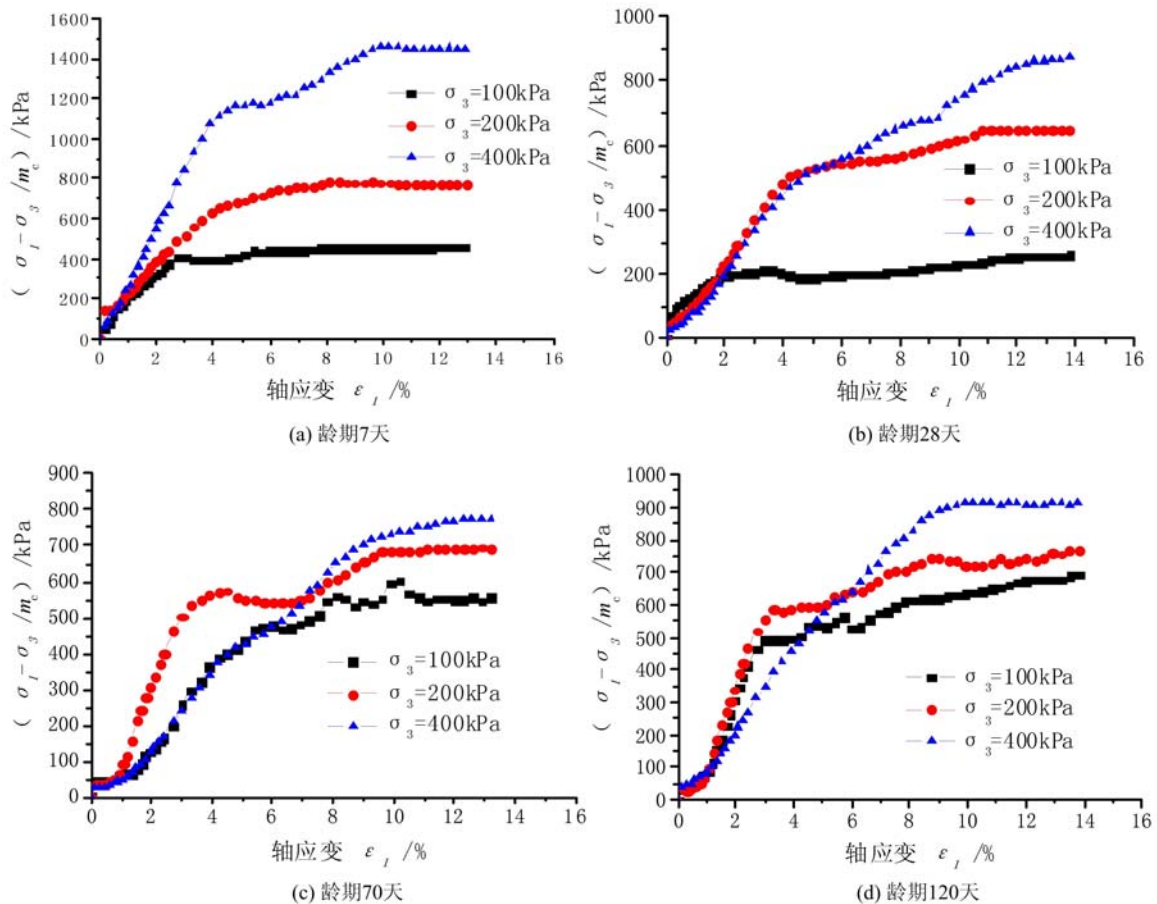


图 2 混合赤泥试样 4 个脱水龄期 $(\sigma_1 - \sigma_3)_d / m_c \sim \varepsilon_1$ 曲线

Fig. 2 The $(\sigma_1 - \sigma_3)_d / m_c \sim \varepsilon_1$ curves of unsaturated sample of mixed red mud in 4 ages

1.3 结构性定量参数 m_c 与强度及变形的关系

邓肯-张模型^[21]是典型的 $E-\mu$ 型模型。它以常规三轴排水试验(CD 试验)得到的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线和 $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ 曲线来确定切线变形模量 E_t 和切线泊松比 μ_t 。邓肯-张模型具有简明实用的优点,但其建立的基础是应力和应变之间、轴向应变和侧向应变之间均具有可用双曲线描述的关系。但混合赤泥由于结构性强度的存在,其应力—应变曲线不是双曲线,是一种不稳定形态的曲线,为此,在不同脱水龄期混合赤泥的应力—应变曲线中引入结构性参数 m_c ,将实时剪应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ 除以结构性参数 m_c ,再绘制 $(\sigma_1 - \sigma_3)_d / m_c$ 与 ε_1 的关系曲线如图 2 所示。可以看出经校正后混合赤泥软化或弱软化型的应力—应变曲线变成硬化型双曲线,此时便可用邓肯-张模型的双曲线来描述。

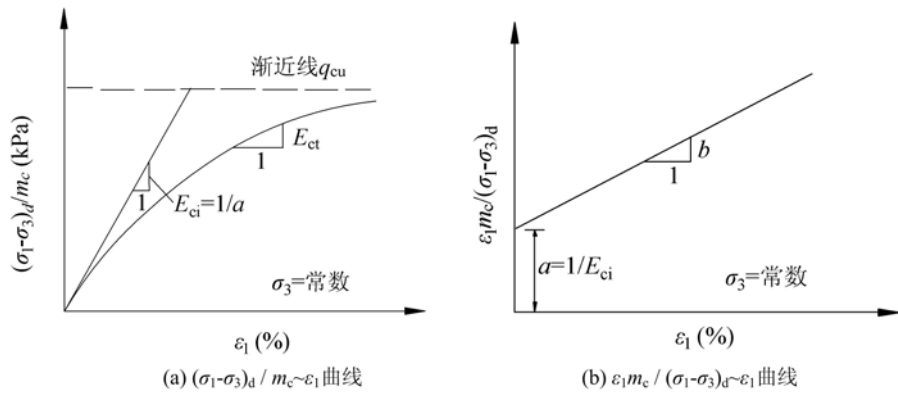


图3 混合赤泥的结构性应力—应变关系曲线

Fig. 3 Structural stress-strain curves of unsaturated red mud

2 混合赤泥结构性本构模型

2.1 邓肯-张模型及参数反演

在大量常规三轴试验的基础上, Kondner^[22]认为可以用双曲线拟合土的应力—应变关系曲线。

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_1} = a + b\epsilon_1 \quad (2)$$

式中, $\sigma_1 - \sigma_3$ 为偏应力; ϵ_1 为轴向应变; a, b 为试验常数:

$$a = \frac{1}{\left[\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_1} \right]_{\epsilon_1 \rightarrow 0}} = \frac{1}{E_i}, \quad b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\epsilon_1 \rightarrow \infty}} = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ut}} \quad (3)$$

式中, E_i 为初始切线模量; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ut}$ 为理论双曲线的最终值, 即 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的极限值。

Duncan 等^[21]根据这一双曲线应力—应变关系, 提出了一种目前被广泛应用的增量弹性模型——邓肯-张(Duncan-Chang)模型:

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2c\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi} \right]^2 E_i \quad (4)$$

$$E_i = \frac{1}{a} = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (5)$$

$$R_f = \frac{2c\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi}{(1 - \sin\varphi)} b \quad (6)$$

式中, E_t 为切线变形模量; R_f 为破坏应力比; c 和 φ 分别为土的粘聚力与内摩擦角; E_i 为初始切线模量; P_a 为大气压力; K, n 为试验常数。

对于经 m_c 修正后的混合赤泥硬化型曲线(图2), 可用邓肯-张模型双曲线来描述, 则式(2)变为

$$\frac{\epsilon_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_a / m_c} = a + b\epsilon_1 \quad (7)$$

以 $\epsilon_1 m_c / (\sigma_1 - \sigma_3)_a$ 为纵坐标、 ϵ_1 为横坐标构成新的坐标系, 则双曲线可由图3(a)的曲线转化为图3(b)的直线, 其中 a 为截距, b 为斜率。

已有研究表明, 在利用邓肯-张模型进行数据处理时发现, 模型参数 K, n 和破坏比 R_f 的计算值与实际值有较大误差^[23,24]。因此, 在求取混合赤泥邓肯-张模型参数 a, b, R_{cf} 过程中, 采用张波等^[25]、丁磊等^[26]提出的试验点的选取方法, 删除 $\epsilon_1 m_c / (\sigma_1 - \sigma_3)_a \sim \epsilon_1$ 曲线中的软化点和剔除一些不规律点, 对曲线进行调整后得到具有代表性的试验点和拟合直线如图4所示, 从而得到不同围压下4个脱水龄期混合赤泥的结构性邓肯-张模型的常数见表2所示。

从表2可以看出, 相同龄期不同围压下混合赤泥的破坏比 R_{cf} 相差不大, 因此可取 R_{cf} 的平均值 $\bar{R}_{cf}$ 来代替该龄期混合赤泥的破坏比。而4个脱水龄期下混合赤泥的破坏比平均值 $\bar{R}_{cf}$ 差距较小, 因此, 对于结构性混合赤泥来说, 其破坏比 R_{cf} 可取4个脱水龄期破坏比的平均值来表示。

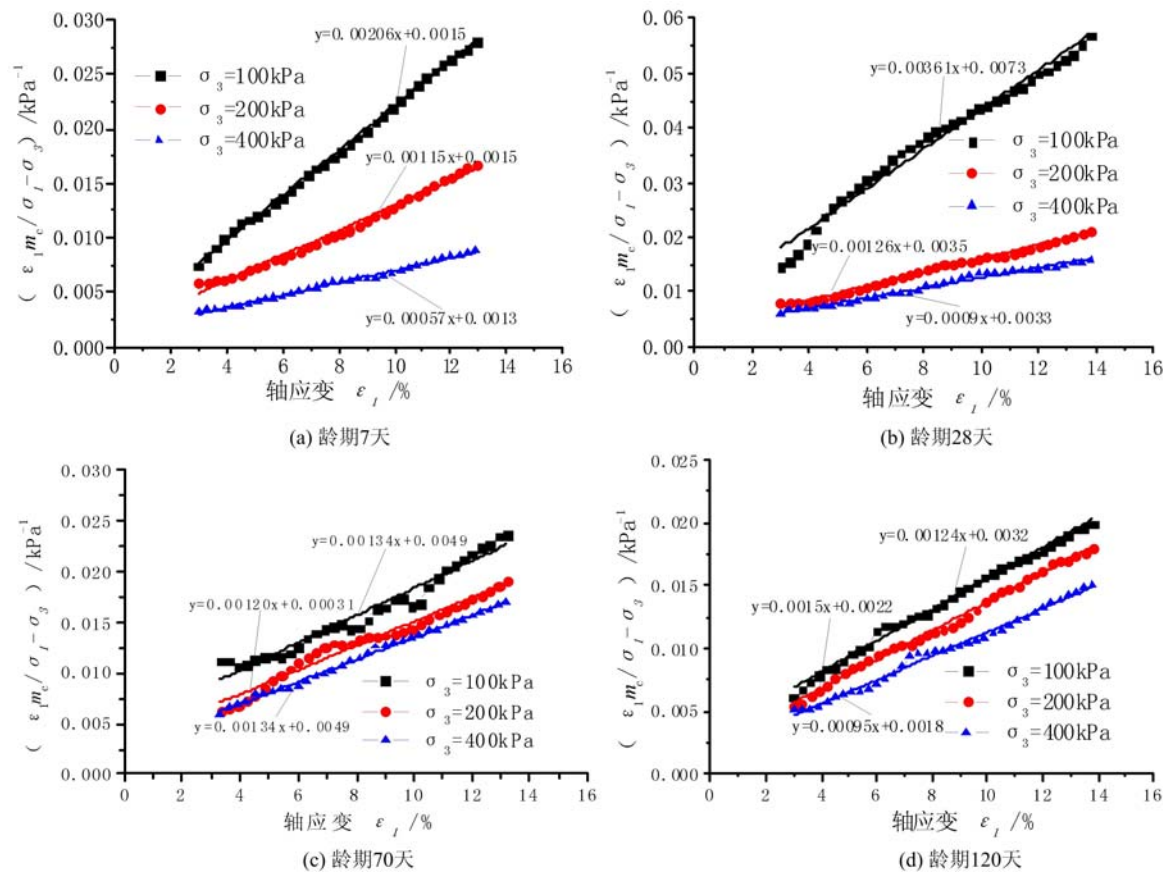


图 4 混合赤泥 4 个脱水龄期的 $\epsilon_1 m_e / (\sigma_1 - \sigma_3)_d \sim \epsilon_1$ 曲线
Fig. 4 The $\epsilon_1 m_e / (\sigma_1 - \sigma_3)_d \sim \epsilon_1$ curves of unsaturated mixed red mud in 4 ages

表 2 混合赤泥三轴应力条件下结构性本构关系试验常数

Tab. 2 The structural constitutive relation experiment constants of mixed red mud under triaxial stress condition

龄期/d	σ_3/kPa	$a/(\text{kPa}^{-1})$	$b/(\text{kPa}^{-1})$	E_{ci}/kPa	q_{cu}/kPa	R_{cf}	$\bar{R}_{cf}$
7	100	0.0015	0.00206	662.25	485.47	0.938	0.884
	200	0.0015	0.00115	689.66	869.57	0.886	
	400	0.0013	0.00057	775.19	1747.00	0.829	
28	100	0.0073	0.00361	137.74	277.01	0.909	0.838
	200	0.0035	0.00126	284.09	793.65	0.817	
	400	0.0033	0.00093	303.95	1074.22	0.788	
70	100	0.0049	0.00134	202.43	746.27	0.737	0.802
	200	0.0031	0.00120	318.47	833.33	0.830	
	400	0.0026	0.00109	387.60	917.43	0.838	
120	100	0.0032	0.00124	316.46	806.45	0.835	0.852
	200	0.0022	0.00115	452.49	869.57	0.858	
	400	0.0018	0.00095	568.18	1049.94	0.864	

2.2 初始切线模量 E_{ci} 与龄期 t 的关系

修正后的邓肯-张模型中利用经验公式(8)表示结构性初始切线模量 E_{ci} 随围压 σ_3 的变化规律:

$$\lg(E_{ci}/P_a) = \lg K_c + n_c \lg(\sigma_3/P_a) \tag{8}$$

根据试验结果和表 2,绘制 $\lg(E_{ci}/P_a)$ 与 $\lg(\sigma_3/P_a)$ 关系图并回归拟合(如图 5 所示),得到混合赤泥在 4 个不同龄期时 K_c 与 n_c 的参数值见表 3。

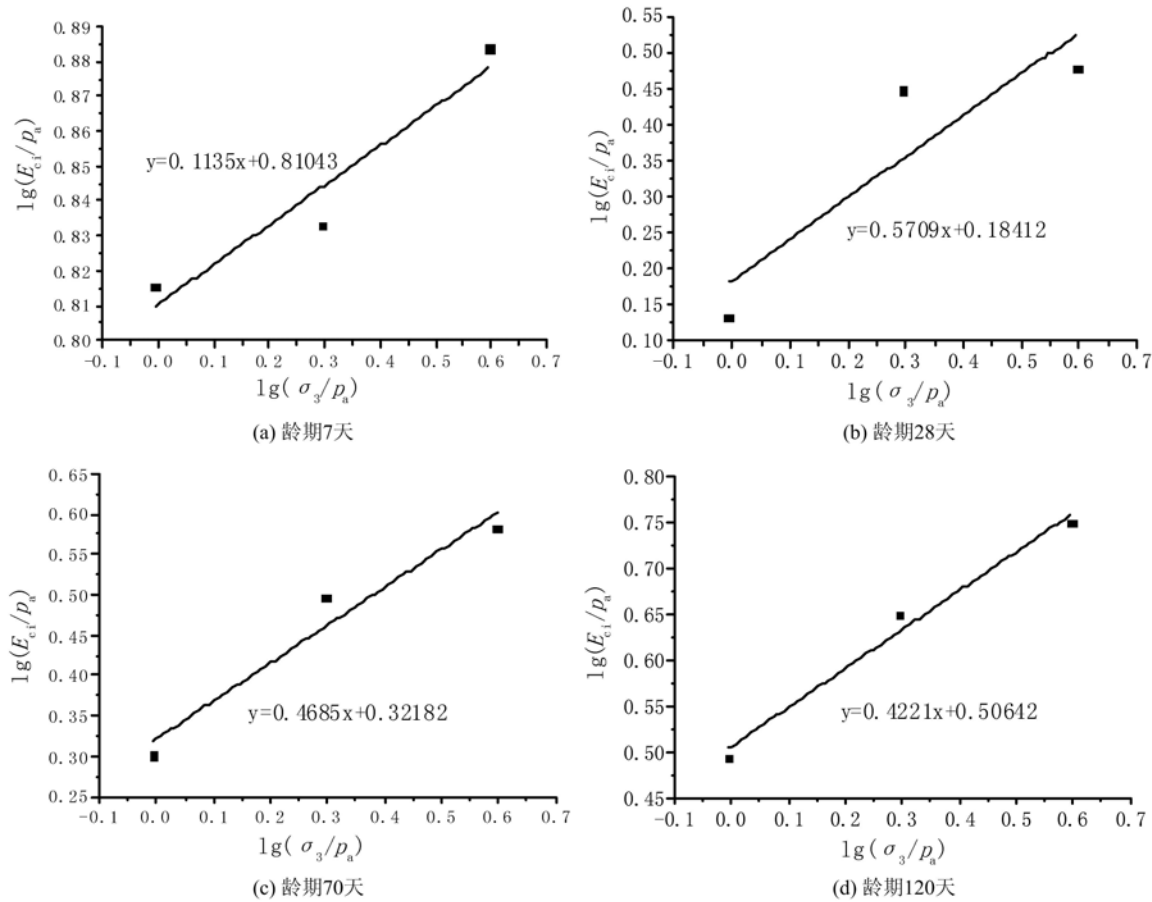


图 5 混合赤泥结构性 $\lg(E_{ci}/P_a) \sim \lg(\sigma_3/P_a)$ 关系曲线

Fig. 5 The structural $\lg(E_{ci}/P_a) \sim \lg(\sigma_3/P_a)$ relation curves of mixed red mud

表 3 混合赤泥 4 个脱水龄期下参数 K_c 、 n_c 的结果

Tab. 3 The results table of parameters K_c and n_c in structural constitutive relation of mixed red mud in 4 ages

龄期/d	$\lg K_c$	K_c	n_c
7	0.81043	6.46294	0.11359
28	0.18412	1.52799	0.57094
70	0.32182	2.09807	0.46857
120	0.50642	3.20937	0.42216

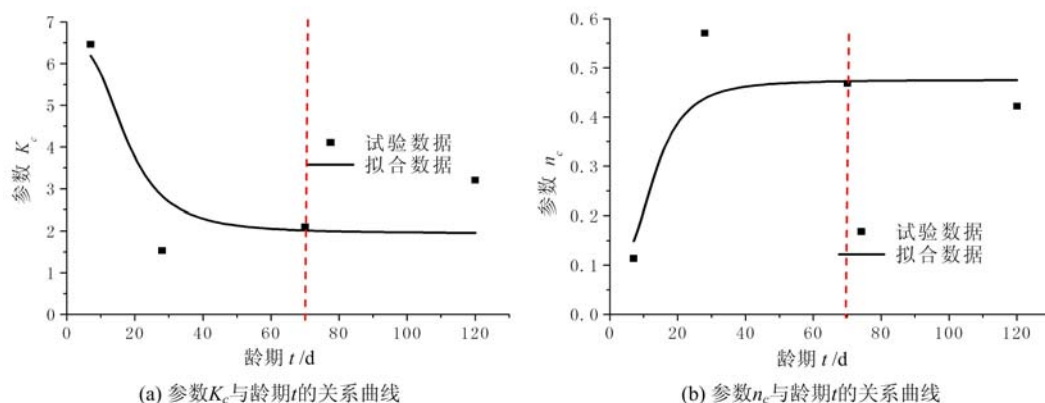
分别对不同龄期 t 下的 K_c 和 n_c 进行拟合,结果如图 6 所示,相应的拟合方程见式(9)、(10)。

$$K_c = K_1 + \frac{K_2}{1 + (t/K_0)^3} \tag{9}$$

$$n_c = n_1 + \frac{n_2}{1 + (t/n_0)^3} \tag{10}$$

式中, $K_0 = 17.5$, $K_1 = 1.96$, $K_2 = 4.51$; $n_0 = 13.5$, $n_1 = 0.48$, $n_2 = -0.37$ 。

从图 6 和式(9)、(10)可以看出,模型参数 K_c 、 n_c 与脱水龄期 t 的关系均可采用对数方程来表示。参数 K_c 随着脱水龄期 t 的增大呈降低趋势,在脱水龄期 70 天时趋于稳定;参数 n_c 随着脱水龄期 t 的增大呈增大的趋势,同样也在脱水龄期 70 天时达到稳定状态。可以看出,混合赤泥结构性邓肯-张模型参数 K_c 、 n_c 随脱水龄期 t 的变化规律与混合赤泥胶结强度的形成有直接的联系。

图 6 参数 K_c 、 n_c 与脱水龄期 t 的关系曲线Fig. 6 The curves of the relationship between parameters K_c , n_c and age t

将参数 K_c 、 n_c 与龄期 t 的拟合关系式(9)、(10)代入式(8),可得混合赤泥初始切线模量 E_{ci} 随围压 σ_3 和脱水龄期 t 的变化关系式:

$$E_{ci} = K_c P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{n_c} = \left[K_1 + \frac{K_2}{1 + (t/K_0)^3} \right] P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{n_1 + \frac{n_2}{1 + (t/K_0)^3}} \quad (11)$$

2.3 主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}$ 随龄期 t 的变化规律

根据 Mohr-Coulomb 破坏准则,引入结构性强度参数 c_c 和 φ_c ,有

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf} = \frac{2c_c \cos \varphi_c + 2\sigma_3 \sin \varphi_c}{1 - \sin \varphi_c} \quad (12)$$

从式(12)可以看出,为获取试样破坏时的主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}$,需先计算混合赤泥结构性抗剪强度指标 c_c 和 φ_c 。

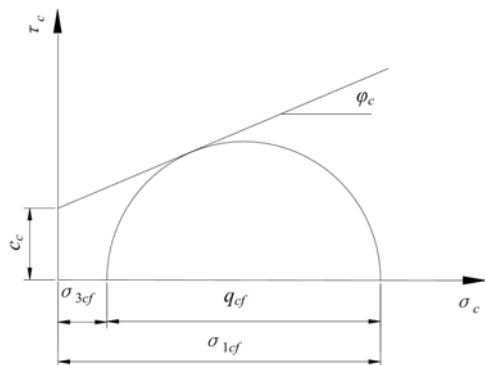


图 7 混合赤泥结构性极限摩尔圆

Fig. 7 Structural limit Mohr's circle of mixed red mud

c_c 和 φ_c 的具体计算方法为:根据任一围压下的结构性应力-应变关系曲线,得到该围压 σ_3 下混合赤泥破坏时的结构性应力 $q_{cf} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}$,绘出极限状态的摩尔圆(图 7),连接各摩尔圆的顶点(坐标为 $(q_{cf} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}/2, p_{cf} = (\sigma_1 + \sigma_3)_{cf}/2)$),可得混合赤泥的结构性破坏线(q_{cf} - p_{cf} 线)。根据 q_{cf} - p_{cf} 线,利用式(12)便可得到相应的结构性抗剪强度指标 c_c 和 φ_c :

$$\varphi_c = \sin^{-1} \tan \alpha_c, \quad c_c = \frac{a_c}{\cos \varphi_c} \quad (12)$$

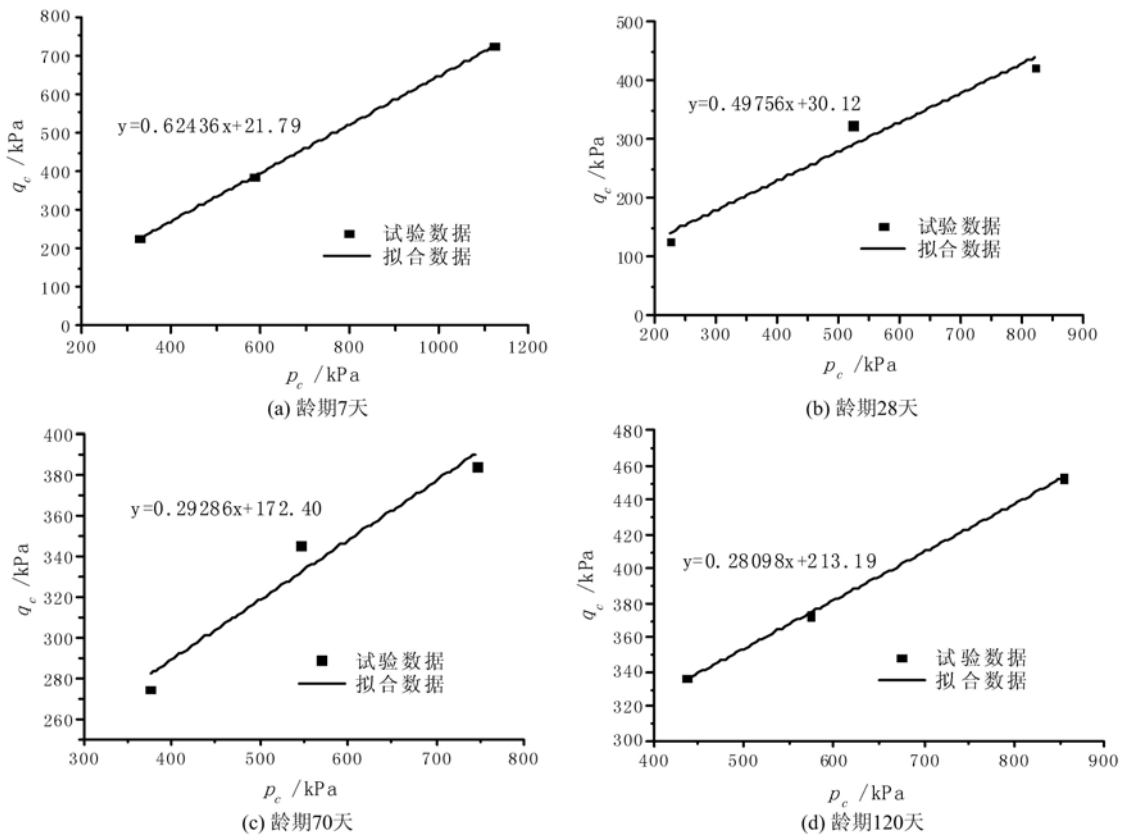
式中, α_c 和 a_c 分别为 q_{cf} - p_{cf} 线的斜率和纵轴截距。

根据试验结果,不同龄期下混合赤泥的结构性破坏线如图 8 所示,计算得到的结构性抗剪强度指标 c_c

和 φ_c 如表 4 所示。

表 4 混合赤泥 4 个脱水龄期结构性抗剪强度指标 c_c 、 φ_c Tab. 4 The structure shear strength index c_c , φ_c of mixed red mud in 4 ages

龄期/d	截距 a_c /kPa	斜率 α_c	c_c /kPa	$\varphi_c/(^\circ)$
7	21.79	0.62436	27.90	38.64
28	30.12	0.49756	34.72	29.84
70	172.40	0.29286	180.31	17.03
120	213.19	0.28098	222.14	16.32

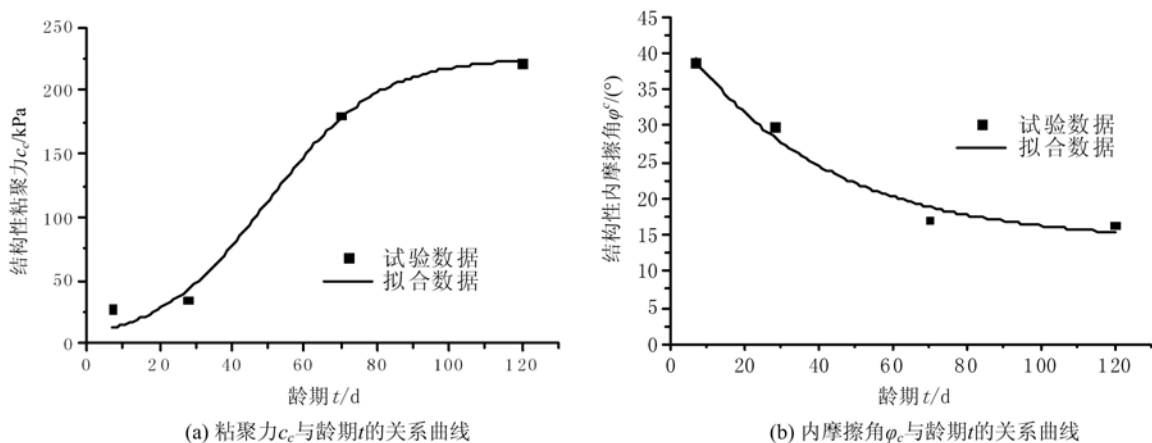
图8 混合赤泥4个脱水龄期的结构性破坏线($q_{cf}-p_{cf}$)Fig. 8 The structure-damage principal stress line of mixed red mud in 4 ages ($q_{cf}-p_{cf}$)

对混合赤泥的结构性抗剪强度指标 c_c 和 φ_c 与脱水龄期 t 进行回归拟合,结果如图9所示,相应的拟合方程见式(13)、(14):

$$c_c = \frac{c_1}{1 + c_2 e^{-c_3 t}} \quad (13)$$

$$\varphi_c = \varphi_1 + \varphi_2 e^{-\varphi_3} \quad (14)$$

式中, $c_1 = 225.78$, $c_2 = 27.06$, $c_3 = 0.07$; $\varphi_1 = 14.10$, $\varphi_2 = 30.09$, $\varphi_3 = 37.93$ 。

图9 结构性抗剪强度指标 c_c 、 φ_c 与龄期 t 的关系曲线Fig. 9 The relation curve of structure shear strength index c_c , φ_c and age t

从图9和式(13)~(14)可以看出:①混合赤泥结构性抗剪强度指标粘聚力 c_c 随着龄期的延长,呈增长趋势,在龄期70天时基本趋于稳定,这与自然脱水条件下的粘聚力的增长趋势一致^[7]。②结构性

内摩擦角 φ_c 随着脱水龄期的延长呈先降低后趋于稳定的变化规律。

将式(11)、(13)和(14)代入式(4),即为考虑混合赤泥强度增长特性的结构性邓肯-张模型。

3 模型检验

根据得到的修正邓肯-张模型分别计算并绘制围压 $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ 、 200kPa 、 400kPa 下脱水龄期为 7 天、28 天、70 天、120 天时混合赤泥的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_d \sim \varepsilon_1$ 曲线,并与试验结果进行对比,如图 10 所示(图中实线为模型计算曲线,点为试验结果点)。从图 10 可以看出,不同围压和脱水龄期的混合赤泥应力—应变关系曲线计算值与试验值具有较好的一致性,表明本文提出的混合赤泥结构性本构关系能较好地模拟三轴应力条件下不同脱水龄期混合赤泥的强度和变形特性。

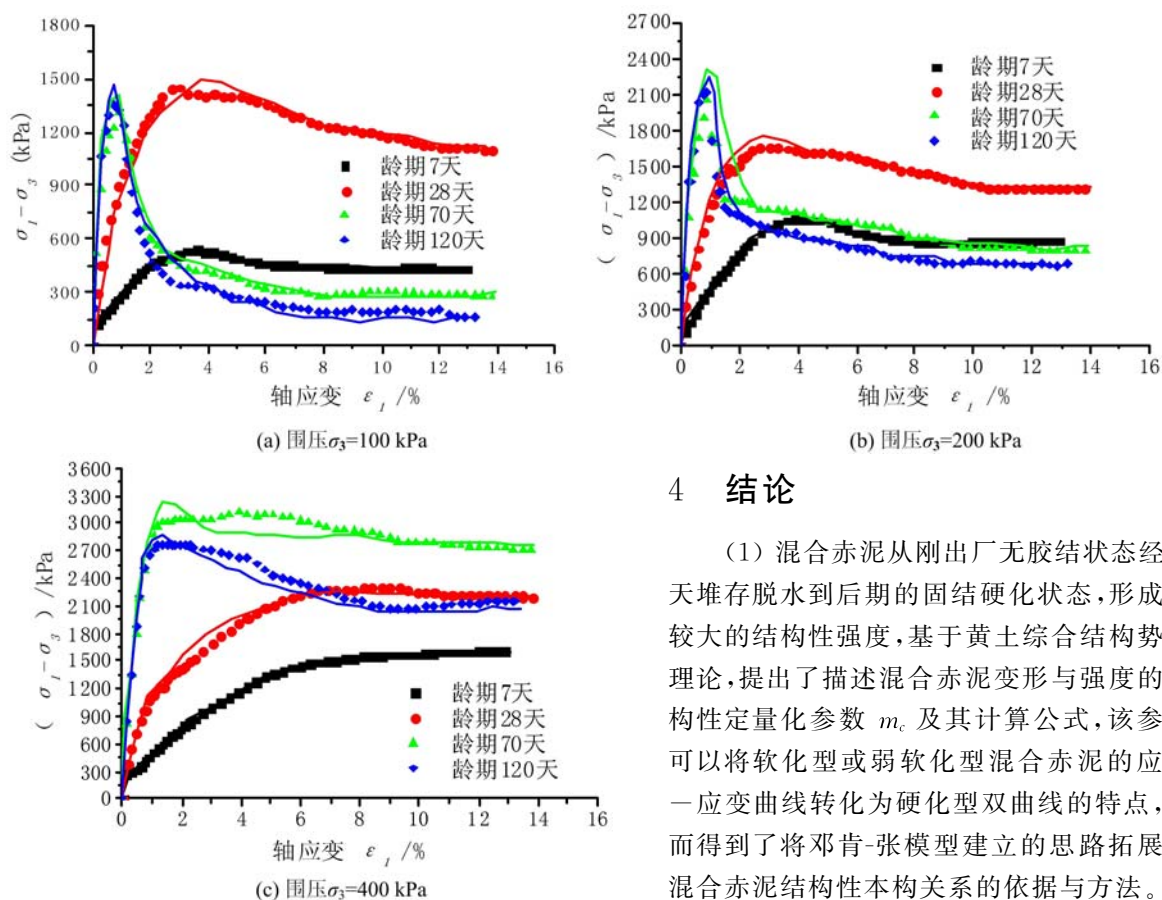


图 10 不同脱水龄期混合赤泥应力—应变关系理论值与试验值对比图

Fig. 10 Stress-strain relationship of the calculated value compared with the test value of dry mixed red mud in different ages

不同围压下混合赤泥应力—应变曲线的计算,与实际试验结果吻合较好,表明了所提出的混合赤泥的结构性本构关系的正确性。

参考文献:

- [1] 南相莉, 张延安, 刘燕, 等. 我国主要赤泥种类及其对环境的影响[J]. 过程工程学报, 2009, 9(1): 459—464 (NAN Xiangli, ZHANG Yanan, LIU Yan, et al. Main categories of red mud and its environmental impacts[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(1): 459—464 (in Chinese))
- [2] QU Yang, LIAN Bin. Bioleaching of rare earth and radioactive elements from red mud using *Penicillium tricolor* RM-10[J]. Bioresource Technology, 2013(136): 16—23.

4 结论

(1) 混合赤泥从刚出厂无胶结状态经露天堆存脱水到后期的固结硬化状态,形成了较大的结构性强度,基于黄土综合结构势的理论,提出了描述混合赤泥变形与强度的结构性量化参数 m_c 及其计算公式,该参数可以将软化型或弱软化型混合赤泥的应力—应变曲线转化为硬化型双曲线的特点,进而得到了将邓肯-张模型建立的思路拓展到混合赤泥结构性本构关系的依据与方法。

(2) 根据试验结果建立了参数 K_c 、 n_c 、 c_c 、 φ_c 与脱水龄期 t 的拟合关系式,从而提出了考虑混合赤泥强度增长特性的修正邓肯-张模型。

(3) 利用修正的邓肯-张模型进行了不

- [3] Zhu Deqing, Chun Tiejun, Pan Jian, et al. Recovery of iron from high-iron red mud by reduction roasting with adding sodium salt [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 19(8):1-5.
- [4] 孙恒虎, 冯向鹏, 刘晓明, 等. 机械力化学效应对赤泥结构特性和胶结性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(增2):568-570 (SUN Henghu, FENG Xiangpeng, LIU Xiaoming, et al. The influence of mechanochemistry on the structure speciality and cementitious performance of red mud[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(supp2):568-570 (in Chinese))
- [5] Harekrushna S, Subash C M, Santosh K S, et al. Progress of red mud utilization: an overview[J]. American Chemical Science Journal, 2014, 4(3):255-279.
- [6] Tavakoli M R, Dornian S, Dreisinger D B. The leaching of vanadium pentoxide using sulfuric acid and sulfite as a reducing agent[J]. Hydrometallurgy, 2014, 141(2):59-66.
- [7] Kumar S, Kumar R, Bando P A. Innovative methodologies for the utilization of wastes from metallurgical and allied industries[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006, 48(4):301-314.
- [8] Orescanin V, Nad K, Mikelic L, et al. Utilization of bauxite slag of the purification of industrial wastewaters[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2006, 84B(4):265-269.
- [9] UNEP. Environmental aspects of alumina production technical review (First Edition) [M]. Paris, France: Industry and Environment Office, UNEP, 1985:37-43.
- [10] Turkmen S. Treatment of the seepage problems at the Kalecik Dam (Turkey)[J]. Engineering Geology, 2003, 68(3):159-169.
- [11] Turkmen S, Ozguler E, Taga H, et al. Seepage problems in the karstic limestone foundation of the Kalecik Dam (south Turkey)[J]. Engineering Geology, 2002, 63(3):247-257.
- [12] 冯燕博, 刘东燕, 刘芳语, 等. 混合赤泥胶结特性产生机理及对其力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(1):49-56 (FENG Yanbo, LIU Dongyan, LIU Fangyu, et al. An experimental study of the cementation mechanism and mechanical behavior of mixed red mud[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1):49-56 (in Chinese))
- [13] 王立忠, 赵志远, 李玲玲. 考虑土体结构性的修正邓肯-张模型[J]. 水利学报, 2004(1):83-89 (WANG Lizhong, ZHAO Zhiyuan, LI Lingling. Non-linear elastic model considering soil structural damage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(1):83-89 (in Chinese))
- [14] 陈昌禄, 邵生俊, 马林. 考虑黄土结构性的修正邓肯-张模型研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(11):223-228 (CHEN Changlu, SHAO Shengjun, MA Lin. Study on modified Duncan-Chang model considering loess structural[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2011, 39(11):223-228 (in Chinese))
- [15] 骆亚生, 谢定义. 复杂应力条件下土的结构性本构关系[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(5):14-18 (LUO Yasheng, XIE Dingyi. Structural constitutive relation of soils under complex stress conditions[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2005, 37(5):14-18 (in Chinese))
- [16] 张云, 薛禹群, 吴吉春, 等. 上海第四纪土层邓肯-张模型的参数研究[J]. 水文地质工程地质, 2008(1):19-22 (ZHANG Yun, XUE Yuqun, WU Jichun, et al. Parameters of Duncan-Chang model for hydrostratigraphic units in Shanghai City[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008(1):19-22 (in Chinese))
- [17] 史三元, 李群, 刘德乾. 邯郸市粉质粘土邓肯-张模型参数试验研究[J]. 河北建筑科技学院学报, 2006, 23(2):1-3 (SHI Sanyuan, LI Qun, LIU Deqian. Study on parameters of Duncan-Chang model for Handan silty clay[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2006, 23(2):1-3 (in Chinese))
- [18] 冯燕博, 刘东燕, 赵倩蕾, 等. 不同工况条件混合赤泥力学特性变化规律[J]. 环境工程学报, 2015, 9(8):4021-4026 (FENG Yanbo, LIU Dongyan, ZHAO Qianlei, et al. Change rules of mechanical properties of red mud from mixing process under different working conditions[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(8):4021-4026 (in Chinese))
- [19] 谢定义, 齐吉林. 土的结构性及其量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6):651-656 (XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6):651-656 (in Chinese))
- [20] 陈存礼, 胡再强, 谢定义. 赤泥的变形-强度特性与结构性关系的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12):1862-1866 (CHEN Cunli, HU Zaiqiang, XIE Dingyi. Research on the relationship between deformation-strength

- property and structure of red mud[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12):1862—1866 (in Chinese))
- [21] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5):1629—1653.
- [22] Kondner R L. Hyperbolic stress strain response: cohesive soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1963, 89(1):115—144.
- [23] 张茹, 何昌荣, 费文平, 等. 高土石坝筑坝料本构模型参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 4(增 1):4428—4434 (ZHANG Ru, HE Changrong, FEI Wenping, et al. Study on parameters of constitutive model of materials of a high embankment dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 4(suppl): 4428—4434 (in Chinese))
- [24] 赵红芬, 何昌荣, 王琛, 等. 高应力下砾质心墙料切线模量研究[J]. 岩土力学, 2008, 11(增刊):193—196 (ZHAO Hongfen, HE Changrong, WANG Chen, et al. Research on tangent modulus of gravel core materials under high pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 11(suppl):193—196 (in Chinese))
- [25] 张波, 汪传武, 黄德强. 邓肯模型参数 k 、 n 、 R_f 整理方法研究[J]. 西部探矿工程, 2012(7):156—159 (ZHANG Bo, WANG Chuanwu, HUANG Deqiang. Research on sorting method for k , n , R_f in Duncan-Chang model parameters[J]. West-China Exploration Engineering, 2012(7):156—159 (in Chinese))
- [26] 丁磊, 张林洪, 代彦芹. 邓肯-张模型参数中 k 与 n 值的计算方法研究[J]. 西北水电, 2010(1):19—22 (DING Lei, ZHANG Linhong, DAI Yanqin. Study of calculation method for values k and n in Duncan-Chang model parameters[J]. Northwest Water Power, 2010(1):19—22 (in Chinese))

On the Modified Duncan-Chang constitutive model of mixed red mud by taking account of strength growth characteristic

FENG Yan-bo^{1,2}, LIU Dong-yan³, YANG Chao¹, CHEN Yuan-chuan²

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Yichang 443002, Hubei, China; 2. Schll of Civil & Architecture Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China; 3. Schll of Civil & Architecture Engineering, Chongqing University of Sciences and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: During the storage of mixed red mud, its strength increases obviously with the prolongation of water filtration age and dehydration, resulting it transformed from initial fluid-plastic state to hard-plastic state with high strength. In order to study the cementing hardening characteristics of mixed red mud, unconfined compressive strength experiment and consolidation drainage tri-axial shear experiment were carried out for mixed red mud at different ages of natural dehydration and immersion in water. Experimental results show that ①the cementation characteristics of mixed red mud is mainly embodied in the growth of cohesion; ②The formation of bonding strength of mixed red mud mainly concentrated in the early 70 days of storage age. Based on the change characteristics of mixed red mud strength, the structural parameter m_c that reflects the cementation hardening characteristics of mixed red mud was put forward. By using m_c , the original unstable softening stress-strain curves can be modified to the hardening curve with hyperbolic characteristic. Then the fitting formula for initial tangent modulus E_{ci} , structural strength parameters c_c and φ_c change with age t were established. Thus, the modified Duncan-Chang constitutive model considering the strength growth characteristics of mixed red mud was constructed. Comparison results show that the model can better reflect the strength growth characteristic of mixed red mud.

Keywords: mixed red mud; strength growth; structural constitute; Duncan-Chang constitutive model