

含泥砂砾石的强度特性

张克昌 汪友平

(浙江省水利水电科学研究所, 杭州)

提 要

本文根据大直剪试验资料对含泥砂砾石的强度特性作了初步探讨。认为: ①莫尔强度包线是一条过原点的曲线, 用指数方程式 $\tau = Ap \left(\frac{\sigma}{p} \right)^n$ 表示较好; ②含泥量对粗料含量不同的砂砾石强度影响的特征和大小不同; ③不同性质的泥对粗料含量相同的砂砾石料强度影响的大小也不尽相同; ④剪位移-时间过程线中的直线段的起点是值得注意的特征点。

一、前 言

研究含泥砂砾石的强度特性具有重要的实际意义。密云水库走马庄副坝在1964年汛期蓄水期间, 坝面之所以出现大幅度沉降并且心墙产生纵向开裂, 含泥量大是重要因素之一。我省陈蔡水库在施工过程中发现上坝料中含泥①量偏大, 使局部坝段有大面积积水, 碾压时产生“弹簧”现象。大三轴试验表明含泥量低于5~8%时对强度指标影响不大。文献[1]认为含泥量10%是影响粗粒土的工程性质的界限值。六十年代初, 我省横山水库根据100×100×50cm大型直剪仪试验成果提出: 上坝砂砾石料的含泥量不宜超过12~15%^[2]。文献[3]则指出: 含泥量小于5%对粗粒土的各项力学性质几乎完全没有影响, 含泥量为5~15%

表1 试验组合及试验材料性质

试验编号		砂砾石性质指标			泥的性质指标			
类别	组号	粗料含量 p_s (%)	含泥量 η (%)	干容重 γ_d (t/m ³)	粘粒含量 M_c (%)	塑性指数 I_p (—)	比重 G (—)	土名
A类	D2	68.6	0~15	2.10	32~38	12	2.71	粉质粘土
	D4	55.0	3~15	2.03				
	D5	80.0	3~15	2.13				
B类	D6	68.6	0~15	2.10	8~12	<7	2.69	轻粉质壤土
	D7				48~52	17	2.72	粘土
	RD2				32~38	12	2.71	粉质粘土

①含泥系指粒径小于0.1mm的颗粒。

时,土性主要取决于砾。以上表明含泥量确实是影响砂砾石料力学性质的重要因素之一。但是,它的影响应当与粗料含量和泥的性质等因素有密切联系,这就是本文要探讨的重点内容。其中包括泥的不同含量对粗料^②不同含量的砂砾石强度的影响即表1中A类试验,以及不同性质的泥对砂砾石强度的影响,即表1中B类试验,总共进行了26组次的试验。

二、试验仪器和试验方法

试验仪器为下盒移动应力式大型直剪仪,见图1。剪力盒尺寸为 $\varnothing 95 \times 51.5\text{cm}$,最大垂直压力为1000kPa。施加荷载用2000kN液压千斤顶;用高压针型阀调整剪切过程中的垂直压力,用高压电动油泵施加水平剪力,空载时千斤顶活塞移动速率约为4.5cm/min。荷载用0.35级标准压力表量测,剪位移用水工测针量测,精度0.01cm,垂直变形用百分表量测。本仪器的结构、量测和操作均符合“土工试验规程”^[3]的要求,经30组试验运行,证明性能良好。

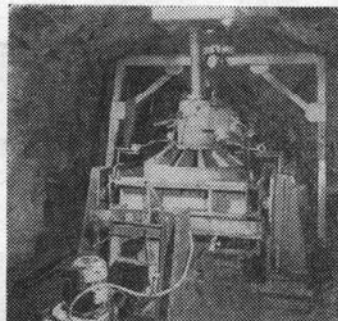


图1 大直剪仪照片

试料级配是根据陈蔡水库已填筑的坝体砂砾石料的实测级配确定的,如表2所示。试验用的含泥量为0~15%,与表2级配不同,其超量或不足部份按等重量替代法在粒径为0.1~5mm的细料中加以调整。试料最大颗粒粒径为10cm。卵石和砾的岩性以片麻岩、凝灰岩为主,砂的主要矿物成份是石英,伴有火山岩碎屑。试料起始含水量6%,分三层制备,控制密度在中密以上。粗料和细料分别分层称重加水拌和,细料先置于铁桶内湿润12小时以上,再和粗料混合拌匀。装料时用30kg铁夯板夯实。试样饱和用毛细管法。最大垂直压力为800kPa。剪切过程中,剪位移每增加1cm便调整一次垂直千斤顶压力表读数,使垂直压力维持恒定。水平剪力按“土工试验规程”推荐的方法施加,试样一般在5~8分钟左右剪损,最大剪位移达13.5cm。

表2 试料级配的组成

粗料含量	各粒径(mm)组的含量%									
%	80~100	60~80	40~60	20~40	10~20	5~10	2~5	0.5~2	0.1~0.5	<0.1
55.0	3.39	6.86	13.80	16.05	9.40	5.50	7.05	21.76	9.32	6.87
68.6	4.23	3.54	17.20	20.03	11.72	6.86	4.92	15.19	6.51	4.80
80.0	7.28	17.17	17.25	21.64	12.33	4.33	4.46	8.92	3.77	2.85

②“粗料”系指粒径大于5mm的颗粒,以 P_5 表示。

三、含泥砂砾石料的强度

(一) 含泥砂砾石料的强度包线

土的强度规律一般用莫尔强度包线 $\tau = f(\sigma)$ 来描述, τ 和 σ 分别为破坏面上的剪应力和正应力。实际上 $\tau = f(\sigma)$ 往往是一条曲线, 但在某一应力范围内可近似地用一条直线表示, 这就是土力学中广泛应用的库仑方程式

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

对无凝聚性土, 式(1)中 $c = 0$, 则有

$$\tau = \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

我们的试验资料表明 $\tau = f(\sigma)$ 确是一条曲线, 但将试验资料点绘在双对数坐标系中, 则有良好的线性关系, 如图2所示。于是, $\tau = f(\sigma)$ 的表达式可写成

$$\tau = Ap \left(\frac{\sigma}{p} \right)^n \quad (3)$$

式中, $p = 100 \text{ kPa}$ (大气压力), A 为 $\frac{\sigma}{p} = 1$ 时式(3)在 $\lg \frac{\tau}{p} - \lg \frac{\sigma}{p}$ 坐标系中所示直线在 $\lg \frac{\tau}{p}$ 轴上的截距, 该直线斜率为 n 。和 c 、 φ 值一样, A 、 n 值也是表示强度的参数, 由试验确定。

比较式(3)和式(2)可知: 当 $n = 1$ 时, $A = \tan \varphi$, 两式完全相同; 而本文试验值 $n = 0.67 \sim 0.79$, 可见两式相差较大, 在这种情况下, 若用库仑方程式确定 c 、 φ 值, 往往存在人为的任意性, φ 值相差可达 $3 \sim 5^\circ$, 甚至更大。因此, $\tau = f(\sigma)$ 用库仑方程式描述欠妥, 而用式(3)描述则较合适。

我国和日本的大直剪试验资料^[4,5]也表明 $\tau = f(\sigma)$ 是一条过原点的下弯曲线, 但没有给出方程式。然而他们的资料完全符合指数方程式(3), 如图3所示。三轴试验资料也表明 $\tau = f(\sigma)$ 用式(3)描述较好^[6]。上述资料还表明:

当垂直压力 $\sigma < 1000 \text{ kPa}$ 时, $\tau = f(\sigma)$ 的弯曲程度尤为明显。这些都说明在试验压力不高的情况下, 含泥砂砾石料的强度包线用指数方程式(3)描述符合一般规律。

按泰勒(D. W. Taylor)的观点^[7], 粗粒土的强度由颗粒间摩擦阻力和剪胀作用产生的

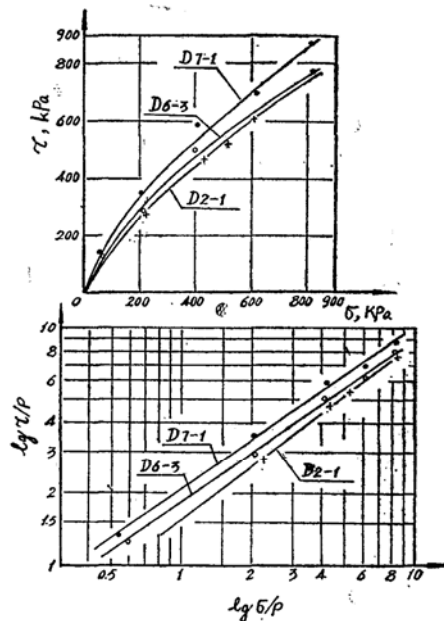


图2 剪应力 τ -正应力 σ 关系线示例

强度所组成。摩擦阻力与垂直压力成正比,而试样的剪胀效应则随垂直压力增大而降低(如图4所示),这就导致 $\tau = f(\sigma)$ 随垂直压力增大而向下弯曲,这是粗粒土的重要力学性质之一。

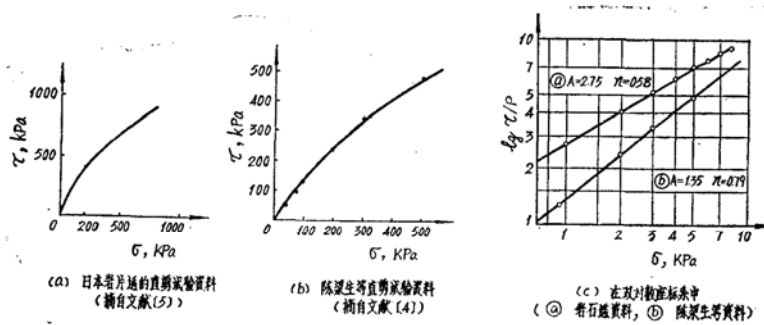


图3 清华大学和日本直剪试验资料

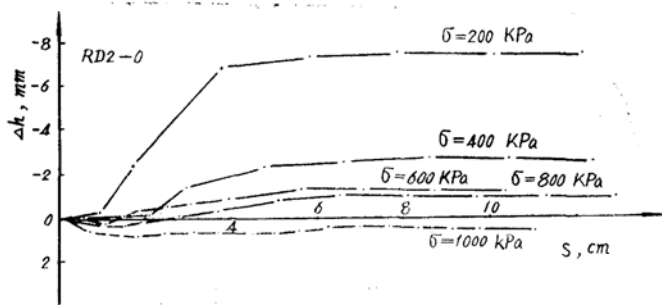


图4 沉降量 Δh -剪位移 s 曲线示例

(二)含泥量对粗料含量不同的砂砾石料强度的影响

试验资料表明,含泥量不同的一组试验指数方程式中, n 值相同,即式(3)在双对数坐标系中是一组平行线, A 值随含泥量增大而减小,如图5所示。因此,含泥量对强度的影响可用 A 值之比 $R = \frac{A_i}{A_0}$ 表达, A_0 为比较基准, A_i 为不同含泥量的 A 值, R 称为强度比, $(1-R)$ 表示强度降低率。

图6(a)中D2号曲线呈先下降后平缓的形状。一般认为粗料含量 $p_s = 70\%$ 左右的洁净砂砾石料,其强度发挥处于最佳状态。D2号试验的 $p_s = 68.6\%$,全料含泥量为 $3 \sim 15\%$ (相应的细料含泥量等于 $14 \sim 70\%$),一旦含泥量增大时,除一部份填充细料孔隙外,吸附于粗颗粒表面的泥量也随之增多,骨架间摩擦阻力与土颗粒的咬合强度相应削弱,当含泥量增大到一定程度时,其影响亦趋于稳定。

图6(a)中 D_4 号曲线呈先平缓后下降的形状。 D_4 号试验的 $p_s = 55\%$, 它代表粗料含量小于最佳含量的情况, 其特点是全料中细料含量较大(除填满粗料骨架孔隙外还有多余), 而细料含泥量则较小, 全料含泥量为 $3 \sim 15\%$ 时, 相应的细料含泥量为 $6.7 \sim 33.3\%$, 一旦含泥量增大一点时, 尚不足以改变填充料的性质, 吸附于粗颗粒表面的泥量仍然较小, 只有当含泥量增大到一定程度时, 其影响才逐渐体现出来, 所以在某一含泥量以内, 含泥量对强度的影响较小。图6(a)中 D_5 号曲线, $p_s = 80\%$, 它代表粗料含量稍大于最佳含量的情况, 由于试验的干容重较大, 其曲线形状类似于 D_2 号曲线。

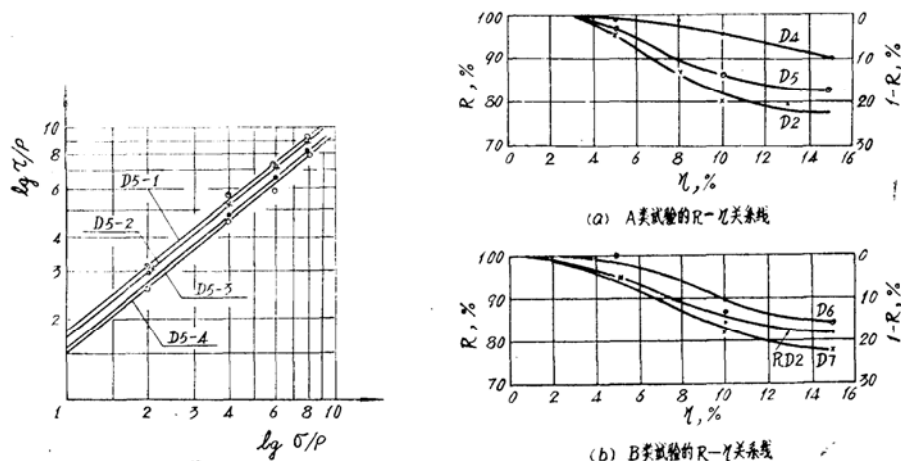


图5 $\tau = Ap \left(\frac{\sigma}{p} \right)^n$ 在双对数坐标系中呈平行线示例

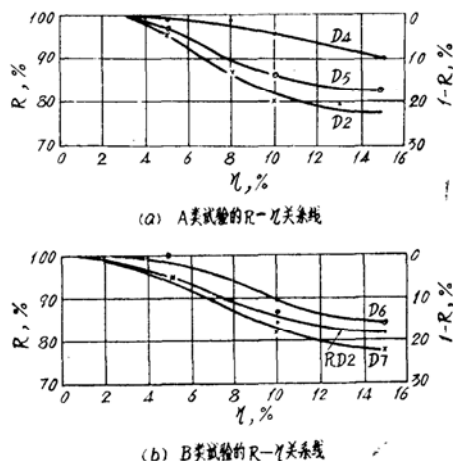


图6 强度比 R -含泥量 η 关系曲线

在评价含泥量对强度影响程度时, 常使用“几乎没有什么影响”、“显著影响”和“不致严重影响”等定性术语, 而没有给出相应的定量标准作为依据。这样, 有时对同一情况可能会有不同的评价。为了便于分析对比和实用上掌握, 本文试图把含泥量对强度的影响的定性评价建立在定量分析的基础上, 从强度方面提出一个供参考使用的标准, 列于表3。A类试验按表3标准的评价列于表4中。

表3 含泥量对强度影响的评价标准

定量标准 (强度降低率 $1 - R$)	定性评价 (对强度的影响程度)	备 注
$< 5\%$	微小	可不考虑强度降低的影响
$5 \sim 10\%$	有一定影响	强度指标适当折减
$10 \sim 20\%$	有明显影响	
$> 20\%$	严重影响	应综合考虑其他力学性指标

表4 对强度影响程度作定性评价的含泥量值

试验编号	粗料含量	对强度的影响程度			
		微小	有一定影响	有明显影响	严重影响
(A类)	(p_s)				
D5	80%	<5%	5~8%	8~15%	15%以上
D2	68.6%	<5%	5~8%	8~15%	15%以上
D4	55.0%	<10%	10~15%	15%以上	

综合上述分析,可以初步认为:①同一含泥量对粗料含量不同的砂砾石料强度影响的大小不同,而且对强度影响的定性评价也可能不同。含泥量对粗料含量为70%左右的砂砾石料强度影响最大。②粗料含量在55~80%范围内,粉质粘土的含量小于5%时,对强度的影响均属“微小”之列。

(三)不同性质泥的含量对粗料含量相同的砂砾石料强度的影响

如图7所示,当含泥量相同时,D6号土的A值大于D7号土。这意味着在含泥量相同的砂砾石料中,泥中粘粒含量 M_c 较多者,其强度较小,反之, M_c 较少者强度则较高。

如图6(b)所示,当含泥量 $\eta < 5\%$ 时, M_c 不同的三种泥对强度的影响均属“微小”;当 η 增大后, M_c 较多者,其强度降低率($1-R$)也较大。对D6号曲线, $\eta < 8\%$ 左右时对强度的影响“微小”。

综上所述,可以认为控制上坝砂砾石料中泥的粘粒含量是很重要的。当粗料含量为70%左右时,若不考虑强度降低的影响,粘性泥(如RD2号土的粉质粘土、D7号土的粘土)的含量以小于5%为宜,而砂性泥(如D6号土的轻粉质壤土)的含量可适当放宽到8%左右。

试验过程中某些现象也有助于我们认识不同性质的泥对强度的影响。D6、RD2和D7号三种试样干容重相同,当含泥量 $\eta = 5\%$ 时,制备试样所需的压密功能和固结变形达到稳定标准的时间都差不多;当 $\eta = 10\%$ 特别是 $\eta = 15\%$ 时,泥中粘粒含量 M_c 较多的RD2特别是 M_c 更多的D7号试样,要耗费更多的压密功能,固结变形达到稳定标准的时间也明显增加,在试样夯实过程中还有明显的蠕变现象,剪后卸料时细料部分呈软塑状态,粗颗粒表面有粘润感;而 $\eta = 5\%$ 时,则无此情况。这启示我们:尽管 M_c 不同,只要砂砾石料中总的含泥量较小,它们对强度影响的差异也较小;当 M_c 增大,而总的含泥量也增大时,才明显地表现出不同的粘粒含量对强度影响的差异。

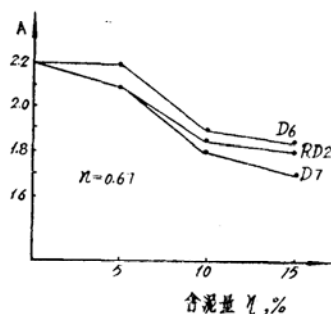


图7 B类试验的强度规律

四、含泥砂砾石料的剪切变形

(一)关于剪位移(s)-时间(t)过程线

试验资料表明(如图8所示), $s = f(t)$ 起始段的位移速率 ds/dt 随 s 增大而增大, 在某一时刻后, ds/dt 达到最大值并保持不变, 即 $s = f(t)$ 呈直线段。当剪应力超过直线段起点(F)强度时, 试样出现 ds/dt 为不变值 K 的等位移速率的大位移, K 值比起始段的 ds/dt 大几倍, 一般 $K = 3.6 \sim 3.7 \text{ cm/min}$, 这对估计坝体滑坡速度可能有参考价值。

对图8(a)所示呈峰型的 $\tau = f(s)$ 曲线来说, F 点位移值一般在峰值或临近峰值处, 如以 F 点强度作为剪损标准, 则取用峰值是合理的。对于图8(b)所示不呈峰型的 $\tau = f(s)$ 曲线来说, F 点位移值远小于“土工试验规程”推荐的剪损位移值 $s = \left(\frac{1}{10} \sim \frac{1}{15}\right) D = 9.50 \sim 6.33 \text{ cm}$ (试样直径 $D = 95 \text{ cm}$), 此时, 如取 F 点强度作为剪损标准则较为合理, 而且物理意义也较明确。

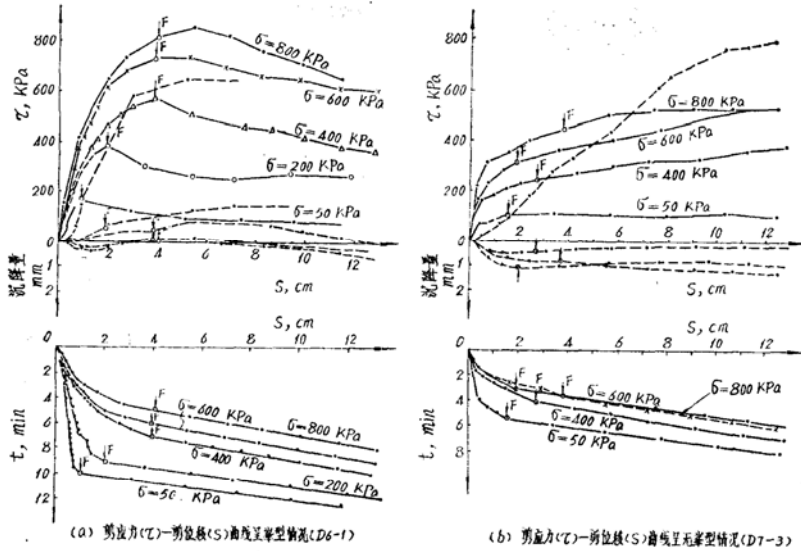


图8 剪位移 s -时间 t 过程线示例

综上所述, $s = f(t)$ 直线段的斜率及其起点看来是个值得引起注意的关键。

(二) 关于剪应力 τ -剪位移 s 关系线

如图9所示, 粗料含量相同而含泥量 η 不同的一组 $\tau = f(s)$ 曲线在 η 较小时呈驼峰型, η 增大, 峰顶变胖; η 进一步增大时, 肥胖的峰顶消失, 而呈无峰型, 这就是说, $\tau = f(s)$ 曲线的性状随含泥量增大而逐渐变化, 其过渡段大致在 $\eta = 5 \sim 8\%$ 左右, 它与粗料含量和泥的性质等因素有关。图10表示在粗料含量相同的条件下, 含泥量 η 较小时, 剪胀效应较明显; 随 η 增大, 剪胀效应逐渐削弱。这意味着砂砾石料中含泥量的增加相当于土的密度降低(当然还有其他力学性质的改变)。因此, 从这个意义上可以认为在试验应力范围内, 根据 $\tau = f(s)$ 曲线的不同形状, 可以大致判断含泥砂砾石料的密实程度。

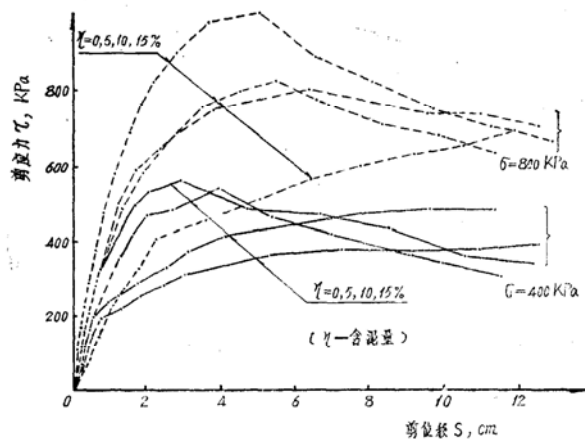
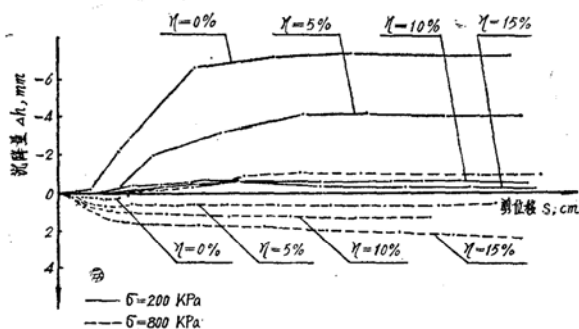
图9 随含泥量而变化的 τ - s 曲线示例(PD2)

图10 不同含泥量的剪胀曲线示例(RD2)

五、结 语

本文根据系统组合的26组大型直剪试验资料的分析,对含泥砂砾石料的强度特性有以下几点认识:

1. 含泥砂砾石料(含泥量0~15%)在试验应力范围内的莫尔强度包线用指数方程式 $\tau = Ap\left(\frac{\sigma}{p}\right)^n$ 描述较适合,强度参数 A 、 n 值由试验确定之。对中等高度的土石坝,用式(3)在 $\sigma = 200 \sim 800 \text{ kPa}$ 范围内的割线 c 、 φ 值是可行的。

2. 含泥量对粗料含量不同的砂砾石料强度的影响不同,不同性质的泥(如轻粉质壤土、粉质粘土和粘土)对粗料含量相同的砂砾石料强度的影响也不尽相同。在设计中,取用含泥

砂砾石料强度指标时应综合考虑含泥量、泥的不同性质和粗料含量等因素。

3. 在不考虑强度降低的条件下, 对中低坝, 上坝砂砾石料含泥量的控制标准可考虑粘性泥的含量一般以小于5%为宜, 砂性泥的含量可适当放宽到8~10%。

4. A类D2号试验和B类RD2号试验的试验条件相同, 但A、n值不同, 这是由于两者粗料料场不同, 粗料形状及其表面糙度有明显的差异, 看来这也是影响强度的因素之一。

5. 剪位移随时间过程线中直线段的斜率及其起点的物理意义是个值得探讨的问题。

参加本项工作的还有吴恒任同志。

参 考 文 献

- [1] 郭庆国, 关于粗粒土工程特性及其分类的探讨, 水利水电技术, 1979年第6期。
- [2] 水电部五局、东北勘测设计院, 土坝设计(上册), 水利电力出版社, 1978年, p. 165。
- [3] 水利电力部, 土工试验规程SDS01—79上册, 水利出版社, 1980年, p. 212~213。
- [4] 陈梁生等, 关于密实的卵石和砂的抗剪强度及边坡稳定的一个探讨, 中国土木工程学会第一届土力学及基础工程学术会议论文集选集, 中国工业出版社, 1964年, p. 95。
- [5] 岩片透, 粗粒材料のせん断試験の問題点とその結果の適用性, 土と基礎, Vol. 21, No. 4, (182), 1973, pp. 41~48。
- [6] 张启岳、司洪洋, 粗粒土大型三轴压缩试验的强度与应力-应变特性, 水利学报, 1982年第9期, p. 23。
- [7] Taylor, D. W., Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., 1948. pp. 345~346。

Strength Characteristics of Sand-Gravel with Fine-Grained Soil

Zhang Ke-chang and Wang You-ping

(Research Institute of Water Resources and HydroPower Zhejiang Province, Hangzhou)

Abstract

This paper is a preliminary study of strength characteristics of sand-gravel with different contents of fine particles (minus 0.1mm), based upon the data obtained from large scale direct shear test. Some Conclusions in this paper are: (1) The Mohr's envelope is a curve passing through the origin and good enough to be expressed by exponential equation $\tau = Ap \left(\frac{\sigma}{p} \right)^n$; (2) The effects of fine particles contents on the strength of Sand-gravel with different contents of coarse aggregates have different characteristics and magnitude; (3) The effects of fine particles in different nature on the strength of sand-gravel even with same contents of coarse aggregates also have different magnitude; and (4) Graphs of shear displacement against time show that the starting point of straight line section is a characteristics point worth noticed.