

碾压混凝土层面的剪切断裂分析

沈 英 曾昭扬 周立峰

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要 提出把碾压混凝土直剪试验与有限元计算相结合的剪切断裂模型, 这种模型考虑碾压层面上非均匀分布应力与包含应力 - 位移软化阶段效应, 由此确定的抗剪断强度参数较传统试验值提高约 30%, 更为符合实际情况.

关键词 碾压混凝土、剪切断裂模型、非均匀分布应力、软化阶段、抗剪断强度参数

引 言

碾压混凝土重力坝采用混凝土薄层碾压法施工, 坝内众多碾压层面的抗剪断强度明显低于混凝土本体, 对坝体的抗滑稳定安全性有重要影响.

目前直剪试验给出的抗剪断强度是均匀分布应力假定下的平均强度, 不能充分反映混凝土材料的强度特性. 如进行重力坝蓄水时的稳定分析, 用试件的平均强度去计算坝的整体稳定性, 也没有考虑坝体应力非均匀分布的影响, 所得到的安全系数带有很大程度的经验平均性质. 又如, 有限元应力分析虽能准确地给出坝体的线弹性应力场, 但缺少与一点应力配套的“点”强度指标, 采用试件平均抗剪断强度计算出坝内各点的安全系数值偏低, 也不能准确地进行坝体的非线性弹性应力场分析.

针对上述情况, 本文运用混凝土非线性断裂力学理论, 研究试件的剪应力、剪切位移与裂缝状况, 在原位试件抗剪断试验的基础上, 对碾压层面的“点”强度进行探讨.

1 碾压混凝土层面抗剪断强度物理模型

1.1 原位试件的剪切断裂过程

原位直剪试验, 试件 $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 30\text{cm}$ 承受均布铅直压力 N 与极限水平推

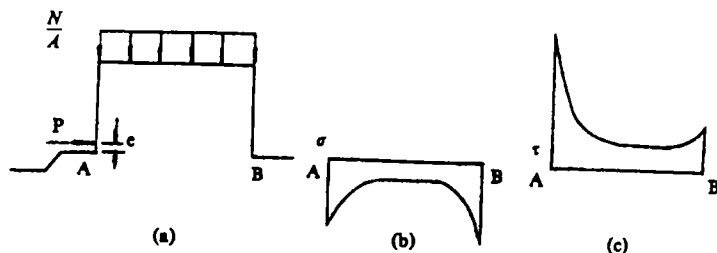


图 1 层面非均匀分布应力示意图

Fig.1 Schematic drawing of nonuniform stress distributions in the layer

1994-03-15 收到第一稿, 1994-06-30 收到修改稿.

力 P 如图 1(a) 所示, 图 1(b) 与 (c) 为层面上应力分布的示意图, 正应力 σ 在靠近两侧边缘处较大, 剪应力 τ 在靠近推力 P 作用一侧更为集中, σ 与 τ 在层面上皆为非均匀分布应力。

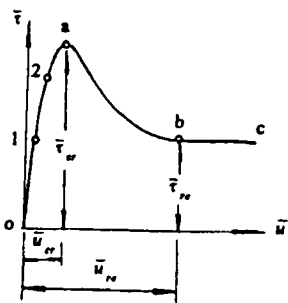


图 2 剪切层面的应力 - 位移试验曲线
Fig.2 Stress-displacement test curve
of the shear layer

对试件施加压力 N 至固定值以后, 再施加逐渐增大的推力 P 直至试件断裂滑移为止, 这个过程反映在层面的平均压应力 $\bar{\sigma}$ 不变化情况下平均剪应力 $\bar{\tau}$ 随平均剪切位移 $\bar{u}$ 变化的试验曲线图 2 上, 点 1 为比例极限, 点 2 为屈服极限, 点 a 为峰值强度, 点 b 为残余强度, 试件的极限荷载状态与峰值强度点 $a(\bar{\tau}_{cr}, \bar{u}_{cr})$ 相对应, 极限荷载下的剪切位移 $\bar{u}_{cr}$ 较层面完全剪断起始时的残余剪切位移 $\bar{u}_{re}$ 小得多。

分析层面的剪切断裂过程, 推力 P 较小时, 试件处于弹性应力阶段, 整个层面为位移连续区, 如示意图 3(a) 所示, 相当图 2 曲线 $\bar{\tau}-\bar{u}$ 的 $o1$ 阶段; 推力 P 增大至相应的剪应力约为比例极限 τ_1 时, 在 P 作用一侧首先出现互不连通的平行微裂缝, 微裂缝区并随 P 的继续增大而向右扩展, P 达到极限值时, 因层面此时的剪切位移仍然较小, 一般不会出现剪断性裂缝, 此阶段的层面情况如示意图 3(b) 所示, 相当图 2 曲线 $\bar{\tau}-\bar{u}$ 的 $12a$ 阶段; 极限状态后, 推力 P 随剪切位移 $\bar{u}$ 增大而迅速下降, 层面自 P 作用一侧逐渐出现剪断区并向右扩展, 如示意图 3(c) 所示, 发生在图 2 曲线 $\bar{\tau}-\bar{u}$ 的 ab 阶段中; 推力 P 降至相应的剪应力为残余值时, 则层面处于示意图 3(d) 所示的完全剪断滑移状态, 相当图 2 曲线 $\bar{\tau}-\bar{u}$ 的 bc 阶段。

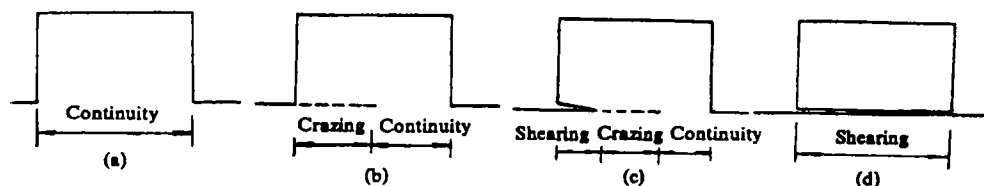


图 3 层面剪切断裂过程示意图
Fig.3 Schematic diagram of shear fracture process of the layer

1.2 一点剪断破坏过程的应力 - 位移模型

试件在剪切应力作用下的破坏通常称之为 II 型裂纹破坏。

根据图 2 压剪试件层面的试验曲线 $\bar{\tau}-\bar{u}$, 原点 o 与峰值强度点 a 之间取直线形成线弹性阶段, 峰值强度点 a 与残余强度点 b 之间取直线形成软化阶段, 残余强度点 b 以后的水平直线 bc 为层面剪断以后的滑移阶段, 形成图 4 内折线 $oabc$ 所示的层面剪应力 - 剪切位移概化曲线。

常规直剪试验层面压应力为

$$\bar{\sigma} = \frac{N}{A}$$

压应力 $\bar{\sigma}$ 作用下的层面抗剪断峰值强度为

$$\tau_a = \bar{\tau}_{cr} = \bar{c}' - \bar{f}'\bar{\sigma}$$

层面抗剪断的凝聚力 $\bar{c}'$ 与摩擦系数 $\bar{f}'$ 为层面应力平均化的试验结果，公式中压应力 $\bar{\sigma}$ 取负值。

建立层面上一点压应力 σ 的剪切断裂模型，该点的抗剪断峰值强度为

$$\tau_d = \tau_{cr} = c' - f'\sigma$$

$$c' = (1 + \alpha)\bar{c}'$$

$$f' = (1 + \alpha)\bar{f}'$$

一点的抗剪断强度 τ_{cr} 及其参数 c' 、 f' 大于层面的相应强度 $\bar{\tau}_{cr}$ 及其参数 $\bar{c}'$ 、 $\bar{f}'$ ，则待定系数 $\alpha > 0$ ，由层面强度参数确定“点”强度参数是本文的目的，将在后面进行详细论述。

一点处压应力 σ 作用下的 τ - u 剪切断裂模型如图 4 的 $odec$ 曲线所示，当该点剪应力 τ 在小于峰值强度 τ_{cr} 而不断增大时， τ 与剪切变形层上下缘的相对剪切位移 u 成比例增加，混凝土处于线弹性阶段；当剪应力 τ 达到峰值强度 τ_{cr} 以后，混凝土中的微小裂纹损伤使 τ 随相对剪切位移 u 的增大反而减小，混凝土处于软化阶段，直至裂纹扩展为剪断性裂缝， u 增大至残余位移 u_{re} ， τ 降低至残余剪应力 τ_{re} ；一点的滑移阶段多伴随试件层面的剪断滑移而发生。

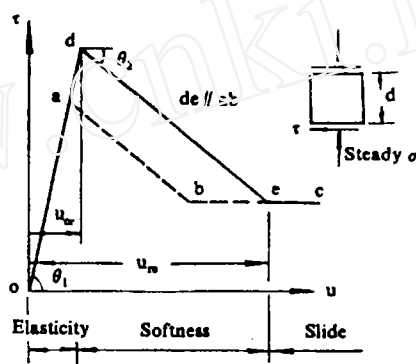


图 4 剪切断裂模型

Fig.4 Model of shear fracture

混凝土 II 型裂纹的应力位移关系与 I 型裂纹的应力应变关系有如下几个主要区别：

(1) 混凝土的裂缝取决于剪应力 τ 以及由压应力 σ 所决定的抗剪断强度 τ_{cr} ，必须同时考虑 σ 与 τ 两个因素，因而使问题复杂化，图 4 所示一点应力位移软化曲线 $odec$ 只是一个典型的代表图，各点的曲线应随各点压应力的不同而变化。

(2) 一点剪应力与剪切位移关系的剪切变形层厚度不确定，采用虚拟厚度的剪切变形层并相应确定其在各个不同应力位移阶段的刚度。

(3) 存在残余剪应力 ($\tau_{re} \neq 0$)，主要是由于剪切层面上的摩擦力与咬合力所引起的。

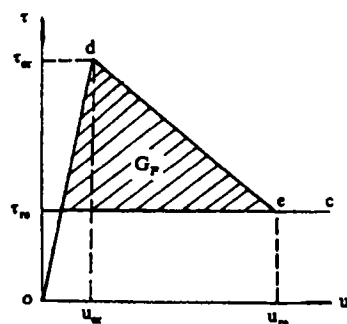


图 5 剪切断裂能
Fig.5 Shear fracture energy

1.3 剪切断裂能

如图 5 所示, G_F 为剪断单位层面面积材料所消耗的能量, 称为材料的剪切断裂能.

剪切断裂能 G_F 与材料强度 τ_{cr} 与 τ_{re} 以及位移 u_{re} 与 u_{cr} 有关. 材料的应力差 $\tau_{cr} - \tau_{re}$ 与位移 u_{re} 越大, 表示单位面积上从开始出现微裂缝至完全剪断这一过程中材料所吸收的能量也越大, 因而剪切断裂能也越大.

断裂能代表材料强度的属性, 在有限元计算中, 断裂能的大小与单元网格的划分情况无关. 在剪切断裂能 G_F 的计算中, 由于材料强度 τ_{cr} 、 τ_{re} 均与正应力 σ 有关, 因而 G_F 值也受 σ 的影响. 至于 G_F 与 σ 的具体关系目前尚缺少系统的研究.

2 有限元计算模型

2.1 试件计算简图

采用二维有限元计算, 取试件 ($0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.3\text{m}$) 与一定范围下层碾压混凝土基础的网格剖分如图 6 所示, 剪切层面 AB 上共划分为 21 个夹层单元, 首尾夹层单元为中间夹层单元长度的一半, 基础侧边为水平链杆约束, 基础底边为双向链杆约束, 试件承受压力 N 与推力 P . 按平面应力问题进行分析.

2.2 两类单元

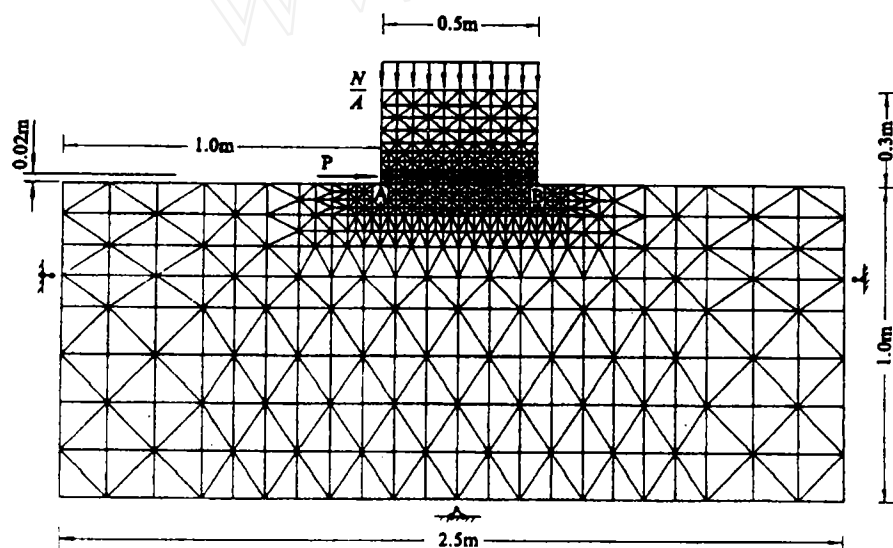


图 6 试体计算简图
Fig.6 The calculated diagram of the sample

试件底部上下碾压层之间的结合层面 AB 是一个薄弱层面, 混凝土本体的强度高于碾压层面, 因而剪切断裂破坏发生在层面内. 混凝土本体采用线弹性三节点三角形常应变单元, 碾压层面采用非线性二节点常应变夹层单元, 两种单元的组合如图 7 所示.

2.3 非线性夹层单元分析

夹层单元长度为 b 、厚度为 d 、计算宽度为 t , d 亦可视为剪切变形层或连续浇筑碾压层面的虚拟厚度.

2.3.1 夹层单元刚度矩阵

$$[k]^e = \begin{bmatrix} -k_x & 0 & k_x & 0 \\ 0 & k_y & 0 & -k_y \\ k_x & 0 & -k_x & 0 \\ 0 & -k_y & 0 & k_y \end{bmatrix}$$

k_x 与 k_y 分别为夹层单元切向与法向的刚度系数. 在符合压剪断裂模型的应力分析中, 单元刚度系数有如下三种取值情况:

a. 弹性应力阶段的单元刚度系数

$$k_x = \frac{Ebt}{2(1+\mu)d}$$

$$k_y = \frac{Ebt}{2(1-\mu^2)d}$$

b. 软化应力阶段的单元刚度系数

单元切向刚度系数 k_x 由图 4 所示曲线 $\tau-u$ 的软化阶段与弹性阶段的斜率比值 $\tan\theta_2/\tan\theta_1$ 所确定, 即

$$k_x = \frac{\tan\theta_2 Ebt}{2\tan\theta_1(1+\mu)d}$$

k_x 与 $\tan\theta_2$ 符号一致, 为负值; 单元法向刚度系数 k_y 保持弹性应力阶段的取值不变.

c. 残余应力阶段的单元刚度系数

$$k_x = 0$$

k_y 仍保持弹性应力阶段的取值不变.

2.3.2 夹层单元的断裂判据

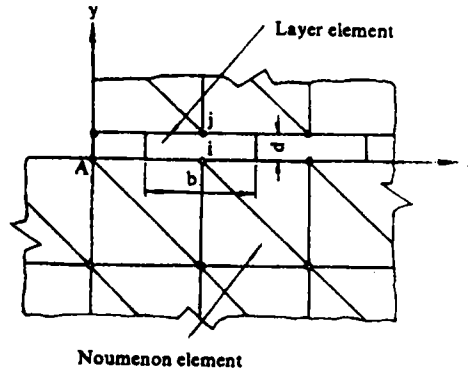


图 7 单元组合
Fig.7 Combination of elements

根据有限元应力分析过程的夹层单元计算应力 (σ_y , τ_{xy}) 进行判断.

a. 单元处于弹性应力状态

为正应力 σ_y 小于极限拉应力 R_t 与弹性剪应力 $|\tau_{xy}|$ 小于峰值强度 τ_{cr} 的状态, 判据为

$$\sigma_y \leq R_t$$

$$|\tau_{xy}| \leq c' - f'\sigma_y$$

处于弹性应力状态的单元保持其计算应力的数值与弹性刚度矩阵不变.

b. 单元处于软化应力状态

正应力 σ_y 为压应力与弹性剪应力 $|\tau_{xy}|$ 大于峰值强度 τ_{cr} 的状态, 判据为

$$\sigma_y \leq 0$$

$$|\tau_{xy}| > c' - f'\sigma_y$$

夹层单元应力由弹性阶段进入软化阶段, 变换单元切向刚度系数, 采用逐次迭代法迁移超出实际剪应力的计算应力部分.

c. 单元处于剪断拉开应力状态

为拉应力 σ_y 小于极限拉应力 R_t 与弹性剪应力 $|\tau_{xy}|$ 大于峰值强度 τ_{cr} 的状态, 判据为

$$0 < \sigma_y \leq R_t$$

$$|\tau_{xy}| > c' - f'\sigma_y$$

夹层单元沿层面剪断并沿层面法线拉开, 不再能够承受剪应力与拉应力, 变换单元刚度矩阵为零矩阵.

d. 单元处于拉断应力状态

为拉应力 σ_y 大于极限拉应力 R_t 的状态, 判据为

$$\sigma_y > R_t$$

夹层单元沿层面拉断, 变换单元刚度矩阵为零矩阵.

3 原位直剪试验成果分析

本文对一组 4 个试件 1、2、3、4 的现场原位峰值抗剪断强度试验的成果进行分析, 施工条件为下层混凝土浇筑碾压后层面不作处理, 间歇 4 小时后铺上层碾压混凝土. 试验时各试件的龄期约为 90 天, 试件承受逐级增大的压力 N 至固定值后, 再逐级施加推力 P 直至剪断破坏, 记录在不变压力 N 作用下推力 P 随层面剪切位移 $\bar{u}$ 的变化过程, 作用于各试件上的极限荷载 N 、 P 与残余剪力 Q 的数据列于表 1.

表 1 作用于各试件上的荷载
Table 1 The loads acting on the samples

Load		1	2	3	4
Steady pressure N	kN	-750.0	-562.5	-375.0	-187.5
Limiting horizontal force P	kN	1065.0	1002.5	710.0	597.5
Remanent shear Q	kN	787.5	690.0	517.5	310.0

3.1 试件层面的剪应力与剪切位移关系试验曲线

各试件层面在不同压应力 $\bar{\sigma}$ 作用下的剪应力 $\bar{\tau}$ 随剪切位移 $\bar{u}$ 变化的试验曲线 $\bar{\tau}-\bar{u}$ 如图 8 所示。

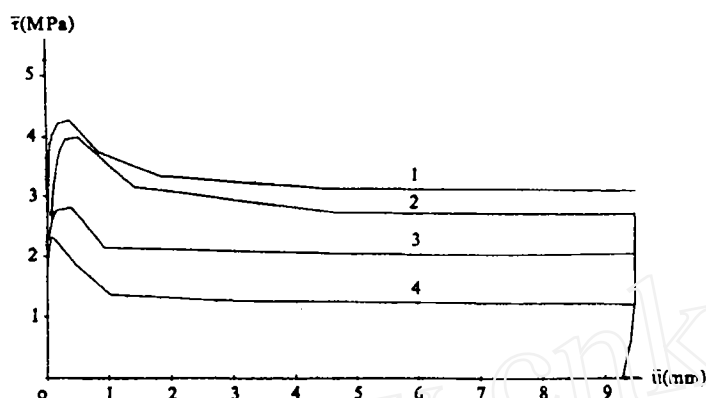


图 8 $\bar{\tau}-\bar{u}$ 试验曲线
Fig.8 The $\bar{\tau}-\bar{u}$ test curves

3.1.1 由四个试件的 $\bar{\tau}-\bar{u}$ 曲线可以看出，试件层面承受压应力 $\bar{\sigma}$ 越大，则峰值强度 $\bar{\tau}_{cr}$ 与残余强度 $\bar{\tau}_{re}$ 也越大，这种关系也可由将各试件层面的峰值强度点 $(\bar{\sigma}, \bar{\tau}_{cr})$ 与残余强度点 $(\bar{\sigma}, \bar{\tau}_{re})$ 绘于图 9 所示坐标系 $\sigma\tau$ 上得出的线性峰值强度曲线 $\bar{\tau}_{cr}-\bar{\sigma}$ 与线性残余强度曲线 $\bar{\tau}_{re}-\bar{\sigma}$ 所反映，抗剪断强度参数 $\bar{c}'$ 、 $\bar{f}'$ 与抗剪强度参数 c 、 f 分别由曲线 $\bar{\tau}_{cr}-\bar{\sigma}$ 与曲线 $\bar{\tau}_{re}-\bar{\sigma}$ 的截距与斜率求出。

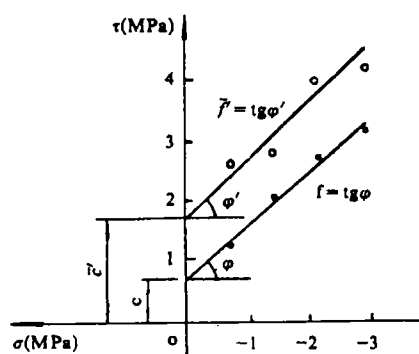


图 9 峰值与残余值强度曲线
Fig.9 The strength curves of the crest value and the remnant value

现将该组试件层面的强度参数与其它材料特性一并列表于表 2。

3.1.2 由图 8 的 $\bar{\tau}-\bar{u}$ 试验曲线可知，反映各试件弹性应力阶段刚度的各试件曲线斜率相接近，其值与各试件承受的层面压应力 $\bar{\sigma}$ 关系不大，在比例极限至峰值强度之间应力随位移的变化率(曲线斜率)呈逐渐减小趋势；各试件在峰值强度下产生的位移很小，在各试件剪切断裂的残余位移中只占很小比例。利用各试验曲线的原点、峰值强度点与残余强度点形成图 10 所示的试验概化曲线时，各试件线弹性阶段的刚度系数有一定差别。

表 2 试件层面的强度参数
Table 2 The strength parameters of the sample layer

Position	Density	Young's modulus	Poisson's ratio	Tensile strength	Crest value		Remanent value	
	γ	E	μ	R_t	$\bar{f}'$	$\bar{c}'$	f	c
	kg/m ³	MPa	/	MPa	/	MPa	/	MPa
Noumenon	2400	2×10^4	0.2	3.96	/	/	/	/
Layer	2400	1×10^4	0.3	2.24	0.9	1.68	0.86	0.70

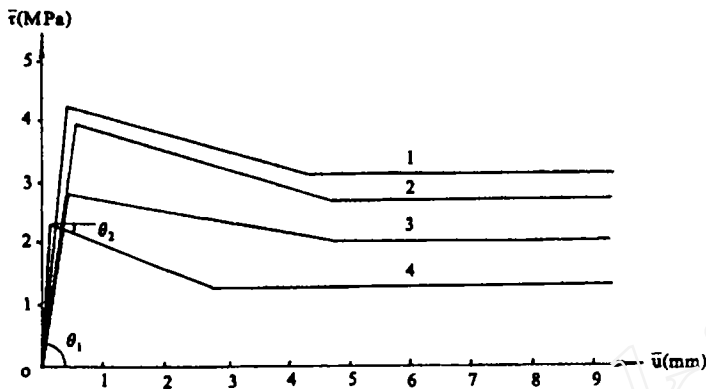


图 10 $\bar{\tau}$ - $\bar{u}$ 概化曲线
Fig.10 The $\bar{\tau}$ - $\bar{u}$ epitome curves

3.2 对概化试验曲线的分析

对图 10 中各 $\bar{\tau}$ - $\bar{u}$ 关系概化曲线进行分析, 给出各试件剪切断裂过程的应力、位移、刚度系数, 断裂能 G^* 根据图 8 试验曲线求出, 一并列于表 3.

表 3 剪切断裂过程的数据
Table 3 The data of the shear fracture process

Sample	$\bar{\sigma}$ MPa	Crest value		$\text{tg}\theta_1$ (10^4)	Remanent value		$\text{tg}\theta_2$	$u_{re}-u_{er}$ mm	G_F^* kJ/m
		$\bar{\tau}_{cr}$	$\bar{u}_{cr}$		$\bar{\tau}_{re}$	$\bar{u}_{re}$			
		MPa	mm		MPa	mm			
1	-3.00	4.26	0.36	1.18	3.15	4.35	-270.7	3.99	1.20
2	-2.25	4.01	0.51	0.79	2.76	4.60	-333.3	4.09	1.74
3	-1.50	2.84	0.37	0.77	2.07	4.69	-178.2	4.32	0.68
4	-0.75	2.39	0.10	2.39	1.24	2.67	-447.5	2.57	0.67

表 3 中给出, 各试件在峰值强度下产生的位移约为 0.1—0.5mm, 各试件剪切断裂的残余位移约为 2.7mm—4.7mm; $\text{tg}\theta_1$ 与 $\text{tg}\theta_2$ 为弹性与软化阶段的单位剪切层面的试验刚度系数. 可以看出, 各试件相关数据之间的离散性还较大, 要对某些问题做出规律性的结论, 尚需进行更深入的分析研究. 表 3 中的数据是进一步分析试件层面上一点抗剪断强度参数的基础.

3.3 试件层面上一点抗剪断强度参数

以直剪试验的层面抗剪断强度参数 $\bar{c}'$ 、 $\bar{f}'$ 与 II 型裂纹破坏的断裂模型为基础, 假设一点强度参数相对层面强度参数的增幅为 α 进行有限元试算, 试件在极限荷载

作用下形成层面上满足强度极限的剪应力分布为所求的结果, 即有

$$c' = (1 + \alpha)\bar{c}'$$

$$f' = (1 + \alpha)\bar{f}'$$

以有限元计算给出试件 1 在极限荷载下层面的各种应力与强度分布曲线图 11 为例, 说明层面非线性应力分布与裂缝开展的规律.

曲线 σ_e-x 与曲线 τ_e-x 为线弹性的压应力与剪应力分布曲线, 曲线 σ_u-x 与曲线 τ_u-x 为非线性的压应力与剪应力分布曲线.

非线性压应力分布曲线 σ_u-x 与线弹性压应力分布曲线 σ_e-x 很接近, 层面两侧部位的压应力数值很大, 为内部压应力的 5—6 倍左右.

由非线性压应力曲线 σ_u-x 可以决定峰值抗剪强度曲线 $\tau_{cr}-x$ 与残余抗剪强度曲线 $\tau_{re}-x$, 与非线性压应力分布曲线 σ_u-x 特点一样, 在层面两侧区域的抗剪(断)强度高于内部区域的抗剪(断)强度.

非线性剪应力分布曲线 $\tau_u-x(abcd)$ 是由线性剪应力分布曲线 τ_e-u 根据断裂模型的应力与位移 $\tau-u$ 关系形成应力重新分布的结果, 曲线段 ab 是由大于峰值强度的线弹性剪应力进入软化阶段而形成的, 曲线段 bc 是由迁移应力叠加于线弹性应力进入软化阶段而形成的, 曲线段 cd 为迁移应力叠加于线弹性应力后仍处于线弹性应力阶段的结果, 曲线段 abc 对应的层面状态为自左向右开展的微裂缝区域, 曲线段 cd 对应的层面状态为位移连续区域.

由线弹性应力曲线 τ_e-x 过渡到非线性曲线 τ_u-x , 两条曲线交点 m 以左的两曲线之间的面积与以右的两曲线之间的面积相等, 因此曲线 τ_u-x 以下的面积与曲线 τ_e-x 以下的面积也相等, 与极限推力 P 形成如下的关系, 即

$$P = t \int_A^B \tau_u dx$$

t 为试件层面的宽度, 为 0.5m. 剪应力在层面上所形成的抗力与推力 P 相平衡.

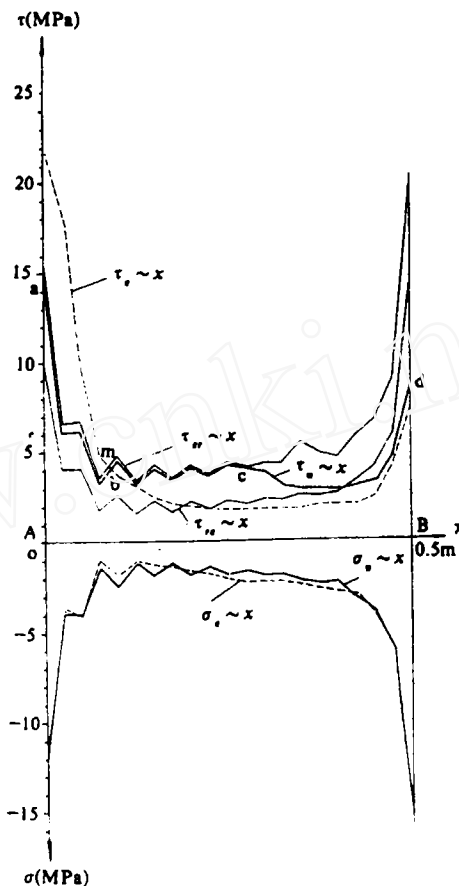


图 11 试件 1 的应力与强度曲线
Fig.11 The stress and strength curves of sample No.1

假定点强度参数高出面强度参数的幅度 α 后:

(1) 如 α 取值偏大, 试件承载能力高于实际的数值, 与极限荷载条件相矛盾, 应该继续降低 α 值.

(2) 如 α 取值偏小, 试件承载能力低于实际的数值, 则有

$$t \int_A^B \tau_u d\alpha < P$$

静力平衡条件遭到破坏, 应继续提高 α 值.

以上述的 (1)、(2) 条件控制 α 的试算过程, 当相应极限荷载下的微裂缝区扩展到可能的最大范围时为所求结果.

试件 2、3、4 的层面非线性应力分布与裂缝开展规律与试件 1 的相同, 不再列述. 试件 1、2、3、4 的点抗剪断强度参数的计算结果汇总于表 4.

表 4 试件层面的点强度参数

Table 4 The point strength parameters of the sample layer

Sample	Layer strength		Point strength		Incrementary ratio	Number of craze elements	Ratio of craze area to layer	Average	
	$\bar{c}'$	$\bar{f}'$	c'	f'	α			c'	f'
	MPa	/	MPa	/	%			MPa	/
1	1.68	0.90	2.150	1.152	28	12	57.5	2.25	1.21
2			2.201	1.180	31	15	72.5		
3			2.234	1.197	33	9	42.5		
4			2.402	1.278	43	15	72.5		

点抗剪断强度参数 ($c'=2.25\text{MPa}$, $f'=1.21$) 大于层面抗剪断强度参数 ($\bar{c}'=1.68\text{MPa}$, $\bar{f}'=0.90$) 的幅度为 34%.

4 结 论

1. 一般混凝土试件的强度参数是按该试件的断面平均应力得出的, 忽视了材料在非均匀分布应力与剪切断裂渐进破坏中具有较高的点抗剪断强度参数的规律.

本文所提出的混凝土 II 型裂纹的断裂模型, 在分析压应力、剪应力与剪切位移关系的基础上计算剪切裂缝开展过程, 以求得试件的点剪切断裂强度参数.

2. 利用非线性有限元夹层单元, 按剪切断裂模型建立不同应力阶段的应力位移模式, 夹层单元可模拟实际的层厚、可虚拟剪切形变层厚度或无厚度的层面等, 由夹层单元给出极限荷载下层面强度处于极限状态的应力分布规律.

3. 碾压混凝土直剪试验成果整理表明, 点抗剪断强度参数较面抗剪断强度参数高出约 30%, 对于碾压混凝土材料抗剪断强度的充分利用与修建高碾压混凝土坝的可行性论证均有积极的意义.

4. 本文所述确定一点抗剪断强度参数的基础是直剪试验资料较为精确与剪切断裂模型较为完善, 由于 II 型裂纹破坏机制的复杂性, 目前所进行的工作还是初步的, 将在今后的研究工作中进一步深入与完善.

参 考 文 献

- 1 水利水电工程岩石试验规程 DLJ204-81 SLJ2-81(试行). 水利电力出版社. 北京, 1985

ANALYSIS OF SHEAR FRACTURE OF ROLLER COMPACTED CONCRETE LAYER

Shen Ying Zeng Zhaoyang Zhou Lifeng

(*Department of Hydroelectric, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract The shear strength of the compacted layer is one of the important factors determining the stability of the roller compacted concrete dam. A new shear fracture model combining the direct shear test with the finite element calculation is put forward in this paper. The new model considers the non-linear distribution stresses and includes the effect of the softening stress-displacement stage in the compacted layer. Thus, the shear strength parameters determined by the aforementioned method are about thirty percent higher than the traditional experimental values. The new model more closely reflects the actual situation.

Key words roller compacted concrete, shear fracture model, non-linear distribution stresses, softening stress-displacement stage, shear strength parameters