

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

## 单个粘土体裂缝中水流规律的研究

葛中华

(南京大学)

范炳恒 冯启言 王永红

(中国矿业大学, 徐州)



通过模型实验,研究粘土体裂缝中的水流规律,提出了临界水位上升速度的概念。水位上升速度大于临界值时,裂缝中水流量增加,反之则减少。裂缝水流量与水位不呈正比关系。指出粘土裂缝中最大水流量要比相同条件下基岩裂缝水流量小 30—40 倍。随着水流运动的延续,水流量将逐渐变小。在水流作用下,粘土裂缝宽度将变窄 3.0—4.0 cm,裂缝深度也大幅度变浅到裂缝水深的 50% 以上。

**关键词** 粘土裂缝 水流 临界水位上升速率 膨胀和崩塌

### 1 研究现状

单个裂缝中的水流运动,在给定裂缝宽度时,可以用平行板状窄缝槽模拟<sup>[1]</sup>,得布西涅斯基公式:

在雷诺数  $Re < 550$  时为层流,服从公式(1);当  $Re > 700$  时为紊流,服从公式(2):

$$V = \frac{\rho g}{12\mu} \cdot b^2 \cdot \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (1)$$

$$V = 4.7 \left[ b^5 \mu^{-1} \rho^{-3} \left( \frac{\Delta H}{\Delta L} \right)^4 \right]^{1/7} \quad (2)$$

其中:  $V$ : 平均流速 ( $\text{cm/s}$ );  $b$ : 裂缝宽度 ( $\text{cm}$ );  $g$ : 重力加速度 ( $\text{cm/s}^2$ );  $\rho$ : 液体密度 ( $\text{g/cm}^3$ );  $\mu$ : 动力粘滞性系数 ( $\text{g/cm} \cdot \text{s}$ );  $\Delta H$ : 二测点的水位差 ( $\text{cm}$ );  $\Delta L$ : 二测点的距离 ( $\text{cm}$ )。

由公式知,因水的  $\mu$ 、 $\rho$  和  $g$  值不变,水的流速仅与裂缝宽度和水力梯度有关,而与裂缝深度关系不大。

这些公式适用于单个基岩裂缝中的水流,而土体裂缝中的水流虽然也符合上述规律,但实际应用中,基本上不能用这些公式进行计算。因为水从裂缝中流过时,裂缝二壁土体遇水将产生一系列的变化<sup>[2]</sup>:

1. 对于粘性土来讲,土体中的粘土矿物遇水体积增大,会使整个土体体积变大。由于

四周土体的限制,土体只能在裂缝内膨胀,结果使得裂缝宽度相应变小。

2. 两壁土体遇水后,由于水的作用,颗粒骨架的支撑力变小,土体的粘结力和内摩擦角也明显减小,在上覆土体作用下,土壁将不可避免地发生崩塌、垮落,崩塌下来的土体充填土内裂缝的下部,使裂缝上部变宽,下部堵死。水流仅在被堵部分之上的裂缝中流动。

3. 水流在流动过程中,将对裂缝周壁的土体产生冲刷作用,结果把小于某一粒径的细小颗粒冲走。土颗粒被冲走后,过水能力增强,冲刷力也同时加强。这样反复发展,裂缝逐渐变大,水流也逐渐变大。当水的流速较慢而不产生冲刷时,崩塌物将堵住裂缝使水流速度更慢,产生淤积。淤积结果再次使水流变慢,淤积增强。这样不断发展,裂缝逐渐淤死,而水流则逐渐消失。

可以说,对土体裂缝中水流的研究,目前尚属空白。我们认为,要弄清粘土裂缝中水流情况,采用实体模型试验是目前唯一可行的方法。

## 2 试验及结果

为真实地了解土体裂缝中水流的实际情况,参照水利部门的经验<sup>[3]</sup>,为防止不必要的误差,我们设计了大型室内模型实验装置(图 1)。取淮河大堤粘性土按土体实际条件制成土体模型,模型中有一条固定宽度的贯穿裂缝,进行水流试验,观测水在这条裂缝中的流动情况。土体干容重为 1.9,其粒度成分见表 1。

表 1 试验土体粒度成分表

Table 1 The size grading of the tested soils

| 粒径 (mm) | <0.005 | 0.005—0.05 | 0.05—0.1 |
|---------|--------|------------|----------|
| 含量(%)   | 26     | 46         | 28       |

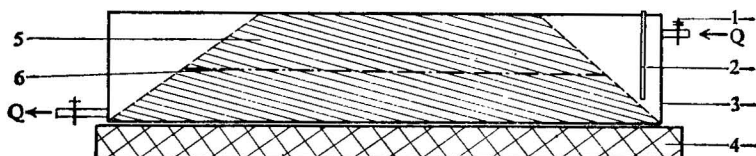


图 1 粘土裂缝水流实验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of the installation for water-flow in the clay fracture

1. 流量控制器; 2. 水位仪; 3. 模型架; 4. 底座; 5. 粘土模型; 6. 裂缝底界; Q. 流量

1. Flow controller; 2. water level gauge; 3. container; 4. foundation;

5. model clay; 6. surface of the fracture; Q. water flow

在土体模型中裂缝的大小为如下 4 种情况时,分别进行了水流试验: ①宽 2.0cm,深 20.75cm; ②宽 3.0cm,深 20.75cm; ③宽 5.0cm,深 20.75cm; ④宽 5.0cm,深 20.75cm (试验土体为已膨胀的土体)。下面是裂缝宽为 3.0cm 和 5.0cm 时的水流试验资料和土体裂缝变化观测资料。

表 2 在 3.0cm 宽裂缝中试验时的裂缝深度观测资料  
Table 2 Observation of the fissure depth during the test of a 3.0 cm, wide fissure

| 时间 (min) | 15:05' | 15:27' | 15:56' | 16:05' | 16:22' |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 深度 (cm)  | 20.75  | 17.50  | 12.50  | 10.50  | 9.00   |

注: 试验从 15:00' 开始。

表 3 3.0cm 宽裂缝中试验时裂缝宽度观测资料  
Table 3 Observation of the fissure width during the test of a 3.0 cm wide fissure

| 时间 (min) | 15:05' | 15:18' | 15:56' | 16:14' | 16:45' |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 宽度 (cm)  | 3.0    | 2.7    | 2.0    | 1.4    | 0.0    |

注: 实验从 15:00' 开始。

表 4 3.0cm 宽 20.75cm 深粘土裂缝水流观测资料  
Table 4 Observation of water-flow in a fracture 3.0cm wide and 20.75cm deep

| 时间 (min) | 水位 (cm) | 流量 (m <sup>3</sup> /h) | 时间 (min) | 水位 (cm) | 流量 (m <sup>3</sup> /h) | 时间 (min) | 水位 (cm) | 流量 (m <sup>3</sup> /h) |
|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|----------|---------|------------------------|
| 14:56'   | 30.0    |                        | 15:33'   | 38.2    |                        | 19:23'   | 48.5    | 0.075                  |
| 14:58'   | 33.5    |                        | 15:36'   | 38.6    |                        | 19:40'   | 48.5    | 0.054                  |
| 15:05'   | 34.5    |                        | 15:39'   | 39.1    |                        | 20:00'   | 48.3    | 0.046                  |
| 15:08'   | 35.0    | 0.25                   | 15:43'   |         | 0.09                   | 20:40'   | 49.1    | 0.037                  |
| 15:11'   |         | 0.35                   | 15:54'   | 41.8    |                        | 21:26'   | 49.2    | 0.021                  |
| 15:12'   | 35.6    |                        | 15:56'   | 42.2    | 0.02                   | 21:34'   | 48.2    | 0.66                   |
| 15:14'   |         | 0.41                   | 16:09'   | 43.0    |                        | 21:35'   | 48.2    |                        |
| 15:15'   | 35.8    |                        | 16:11'   |         | 0.145                  | 21:37'   | 48.2    |                        |
| 15:16'   | 35.8    | 0.42                   | 16:14'   | 43.7    |                        | 21:39'   |         |                        |
| 15:18'   |         | 0.41                   | 16:18'   | 43.9    | 0.14                   | 21:40'   | 48.0    |                        |
| 15:21'   |         | 0.41                   | 16:23'   |         | 0.17                   |          | 47.7    |                        |
| 15:22'   | 36.3    |                        | 16:28'   |         | 0.16                   | 21:50'   | 47.7    | 0.35                   |
| 15:23'   | 36.5    |                        | 16:34'   | 44.7    | 0.065                  | 22:35'   | 47.5    |                        |
| 15:25'   | 36.9    | 0.42                   | 16:45'   | 44.3    |                        | 22:45'   | 47.3    | 0.24                   |
| 15:27'   | 37.3    | 0.36                   | 19:00'   | 45.5    |                        | 22:50'   |         | 0.22                   |
| 15:30'   | 37.7    | 0.30                   | 19:07'   | 49.0    |                        | 23:00'   |         | 0.19                   |

注: 实验从 15:00' 开始。

表 5 5.0cm 宽裂缝中试验时裂缝深度观测资料  
Table 5 Observation of the fissure depth during the test of a 5.0 cm wide fissure

| 时间 (min) | 20:00' | 21:50' | 22:30' | 0:35' |
|----------|--------|--------|--------|-------|
| 深度 (cm)  | 20.0   | 14.0   | 10.0   | 6.5   |

注: 实验从 20:00' 开始。

表 6 5.0cm 宽裂缝中试验时裂缝宽度观测资料  
Table 6 Observation of the fissure width during the test  
of a 5.0 cm wide fissure

| 时间 (min) | 20:00' | 20:28' | 20:48' | 21:08' | 21:56' |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 宽度 (cm)  | 5.0    | 4.7    | 4.2    | 4.0    | 2.0    |

注: 实验从 20.00' 开始。

表 7 5.0cm 宽裂缝水流试验观测资料  
Table 7 Observation of water-flow in a 5.0 cm wide fissure

| 时间<br>(min) | 水位<br>(cm) | 流量<br>(m <sup>3</sup> /h) | 时间<br>(min) | 水位<br>(cm) | 流量<br>(m <sup>3</sup> /h) | 时间<br>(min) | 水位<br>(cm) | 流量<br>(m <sup>3</sup> /h) |
|-------------|------------|---------------------------|-------------|------------|---------------------------|-------------|------------|---------------------------|
| 20:00'      | 30.0       |                           | 21:04'      | 37.3       | 1.28                      |             |            | 1.26                      |
| 20:05'      | 33.4       | 0.62                      | 21:08'      | 37.4       |                           | 22:20'      | 43.5       | 1.42                      |
| 20:07'      | 33.0       | 0.40                      | 21:11'      | 37.8       |                           |             |            | 1.31                      |
| 20:08'      | 33.8       | 0.47                      | 21:17'      | 37.8       |                           |             |            | 1.21                      |
| 20:09'      | 34.5       | 0.82                      | 21:23'      | 38.0       |                           |             |            | 1.23                      |
| 20:11'      | 33.7       | 0.62                      | 21:25'      | 38.5       |                           | 22:30'      | 44.0       |                           |
| 20:14'      | 33.4       | 0.45                      | 21:28'      | 39.1       |                           | 22:35'      | 45.4       |                           |
| 20:16'      | 33.3       | 0.34                      | 21:33'      | 40.0       |                           | 22:40'      | 45.7       | 1.10                      |
| 20:23'      |            | 0.29                      | 21:36'      | 40.9       | 0.82                      | 22:43'      | 45.9       | 1.02                      |
| 20:25'      | 36.0       | 1.35                      |             |            | 0.96                      | 22:45'      | 46.0       | 1.02                      |
| 20:26'      |            | 1.20                      |             |            | 1.04                      | 22:46'      | 46.6       | 1.02                      |
| 20:27'      | 36.3       | 1.40                      | 21:38'      | 41.2       | 1.35                      |             |            | 1.08                      |
| 20:32'      | 36.3       | 1.40                      |             |            | 1.35                      | 22:47'      | 46.8       | 1.20                      |
| 20:33'      | 36.5       | 1.46                      | 21:43'      | 41.1       | 1.37                      | 22:48'      | 47.0       | 1.29                      |
|             |            | 1.35                      | 21:45'      | 40.9       | 1.35                      |             |            | 1.26                      |
| 20:37'      |            | 1.40                      |             |            | 1.33                      |             |            | 1.42                      |
| 20:42'      |            | 1.40                      |             |            | 1.35                      | 22:55'      |            | 1.41                      |
| 20:43'      | 36.6       | 1.42                      | 21:48'      |            | 1.35                      | 22:56'      | 46.9       | 1.29                      |
|             |            | 1.42                      |             |            | 1.35                      | 23:00'      | 46.8       | 1.29                      |
|             |            | 1.28                      |             |            | 1.35                      |             |            | 1.31                      |
|             |            | 1.32                      | 21:50'      | 41.2       | 1.35                      | 23:15'      | 46.7       | 1.31                      |
| 20:46'      |            | 1.26                      |             |            | 1.37                      | 23:32'      | 46.7       | 1.29                      |
| 20:47'      | 36.8       | 1.26                      |             |            | 1.35                      | 23:45'      | 47.4       | 0.98                      |
|             |            | 1.32                      |             |            | 1.32                      | 0:20        | 48.0       |                           |
| 20:50'      |            | 1.33                      |             |            | 1.35                      |             | 48.8       | 1.06                      |
| 20:54'      | 37.0       | 1.38                      | 21:56'      | 41.5       |                           |             |            | 0.96                      |
|             |            | 1.38                      | 21:59'      | 42.0       |                           | 0:24'       | 48.7       | 1.13                      |
| 20:56'      |            | 1.35                      | 22:01'      | 42.6       |                           |             |            | 1.17                      |
|             |            | 1.26                      | 22:07'      | 42.9       |                           |             |            | 1.13                      |
|             |            | 1.20                      | 22:10'      | 43.0       | 1.35                      |             |            | 1.13                      |
|             |            | 1.26                      |             |            | 1.31                      |             |            | 1.13                      |
|             |            | 1.26                      |             |            | 1.28                      |             |            | 1.13                      |
|             |            | 1.28                      |             |            |                           |             |            |                           |

注: 实验从 20:00' 开始。

### 3 资料分析

根据表 4 观测资料作时间( $t$ )-水位( $H$ )和时间( $t$ )-流量( $Q$ )关系曲线图(图 2)。

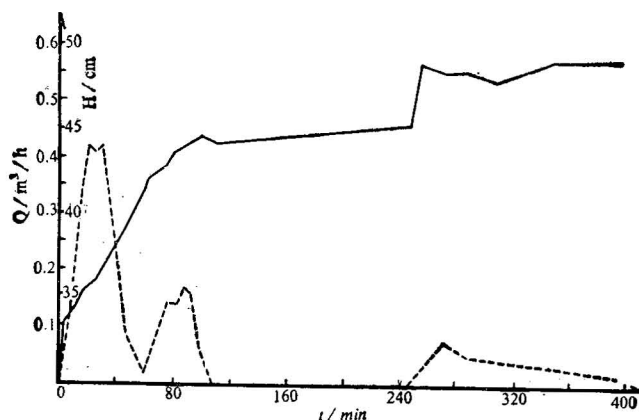


图 2 3.0cm 宽粘土裂缝中水流的  $t$ - $Q$ (虚线)、 $t$ - $H$  曲线

Fig. 2 The curves of the  $t$ - $Q$  (dot line) and  $t$ - $H$  of the water flow in the clay fracture 3.0cm wide

由图 2 可知:

1. 最大水量为  $0.42\text{m}^3/\text{h}$  时的水位为  $+36.9\text{cm}$ , 最高水位为  $+49.2\text{cm}$  时的水量为  $0.021\text{m}^3/\text{h}$ 。水量与水位不存在正比关系。

2. 试验期间水位基本上呈上升趋势, 由  $+30.0\text{cm}$  一直上升到  $+49.2\text{cm}$ , 而水流量在试验初期较大, 达  $0.42\text{m}^3/\text{h}$ , 然后就明显下降, 直到试验结束时逐渐趋于 0。测得的最小水量仅  $0.02\text{m}^3/\text{h}$ 。实验结果表明, 在  $3.0\text{cm}$  宽的裂缝中, 即使保持高水位, 裂缝中的水流量也逐渐减少, 最后随裂缝自身闭合而终止。

3. 水位上升速度大, 水流量增加, 水位上升速度慢, 水流量减少, 水流量的变化受水位上升速度影响。

据此, 作出水位上升速度  $\left(\frac{\partial H}{\partial t}\right)$  与水量增加相对速率  $\left(\frac{\partial Q}{\partial t} / Q_{\max}\right)$  的关系曲线图(图 3)。

由图 3 可知, 二者之间基本上为线性关系, 直线与  $\frac{\partial H}{\partial t}$  轴交于  $2.85\text{cm}/\text{h}$  处。当水位上升速度大于  $2.85\text{cm}/\text{h}$  时, 裂缝水流增加; 当水位上升速度小于  $2.85\text{cm}/\text{h}$  时, 裂缝水流量减少。如水位上升速度为  $2.85\text{cm}/\text{h}$ , 裂缝中水流量基本保持不变。这说明裂缝的膨胀和崩解对水量的影响正好与水位上升速度为  $2.85\text{cm}/\text{h}$  时对水量的影响相等。我们称保持裂缝水流量不变的水位上升速度为临界水位上升速率。

据表 4: 作水量与水位关系曲线图(图 4)。由图中可清楚地看到, 水流量并不是  $H$  的线性函数, 也非正比函数。高水位时水量最小而低水位时水量最大。这就是说, 只要水位上升速度低于  $2.85\text{cm}/\text{h}$ , 就可保持很小的水流量。如水位上升速度很快, 即使水位不很

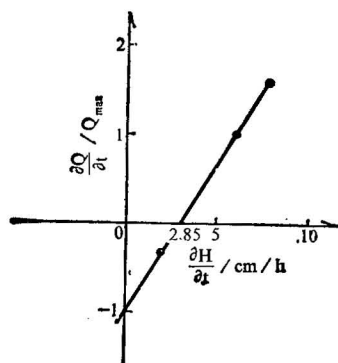


图 3 3.0cm 宽裂缝试验的

 $\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial t} / Q_{max}$  曲线图

Fig. 3 The " $\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial t} / Q_{max}$ " curve  
of water-flow of the fracture  
3.0 cm wide

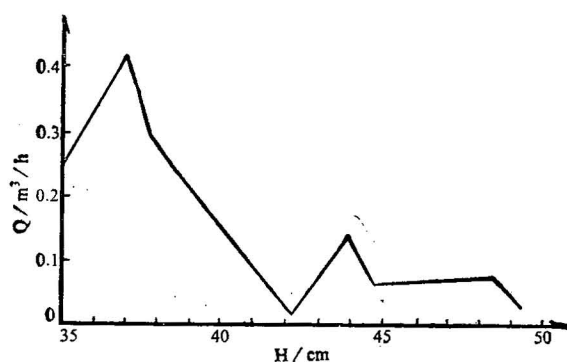


图 4 3.0cm 宽裂缝试验的 H-Q 曲线图

Fig. 4 The "H-Q" curve of the water-flow  
of the fracture 3.0cm wide

高, 水流量也较大。当然, 一旦水位基本稳定后, 水流量又将开始下降, 最终趋于 0。  
根据表 7 试验资料作时间(t)-流量(Q)和时间(t)-水位(H)关系曲线图(图 5)。

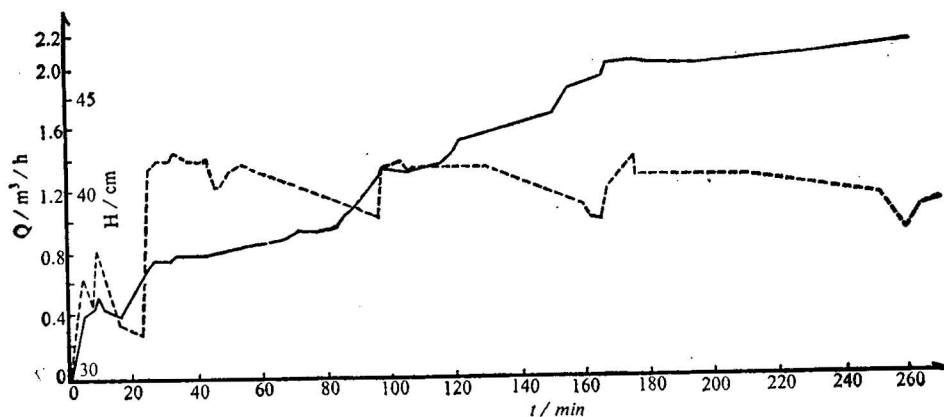


图 5 5.0cm 宽裂缝试验的 "t-Q"(虚线)、"t-H" 曲线图

Fig. 5 The "t-Q" (dot line) and "t-H" curves of the fracture  
water-flow 5.0cm wide

从图 5 中可得:

1. 整个试验期水位基本呈逐渐上升趋势, 由初期的 +30.0cm 上升到后期的 +44.7 cm。水量在试验初期基本也呈上升趋势, 当水量达到最大值  $1.46 \text{ m}^3/\text{h}$  后, 就不再增加并开始逐渐下降。测得的最高水位 +48.7cm 时的水量为  $1.17 \text{ m}^3/\text{h}$ , 最大水量  $1.46 \text{ m}^3/\text{h}$  时的水位为 +36.5cm。最高水位并不对应于最大水量。

2. 水位上升速度直接影响裂缝中的水流量。由于试验过程中不同时间的水位上升速

度不同,反映到水流量上也产生相应的变化。在试验初期即 20:00'—20:27',水位上升速度为 16.5cm/h,水量增加相对速率为 3.65。在 20:27'—20:42',水位上升速度为 1.15cm/h,水量基本保持不变。但在 20:09'—20:23',水位上升速度为 -10.5cm/h,水量相对增加速率为 -2.8。试验后期,水位上升速度为 10.5cm/h,水量相对增加速率为 1.99。图 6 是 5.0cm 宽粘土裂缝中试验的

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial t} / Q_{\max}$$

曲线图。从图中看出,水位上升速度与水量相对增加速度间基本上为线性关系。在  $\frac{\partial H}{\partial t}$

为 1.15cm/h 时,水量基本保持不变,在水位保持不变时,水量减少相对速率为 0.25。

3. 从试验结果可看出,裂缝中水流量虽然有逐渐下降的趋势,但在试验期内下降较小。在短时期内,裂缝中的水流量不会有较大的降低,说明膨胀和崩解的影响到一定程度之后不再继续增大。裂缝有一部分没有受到影响,尚存部分空隙可供水通过。当然这时的水流量要远低于裂缝没有膨胀和崩塌时的水流量。

根据表 7 实测资料作水位(H)-水量(Q)关系曲线(图 7)。由图可知,试验初期低水位时,H与Q基本上是正比关系,水位增高达到+36.5cm 之后,水量不再增加,并时有下降,在 1.0—1.3m<sup>3</sup>/h 之间波动。这种趋势一直持续了 4 小时,直至试验结束。

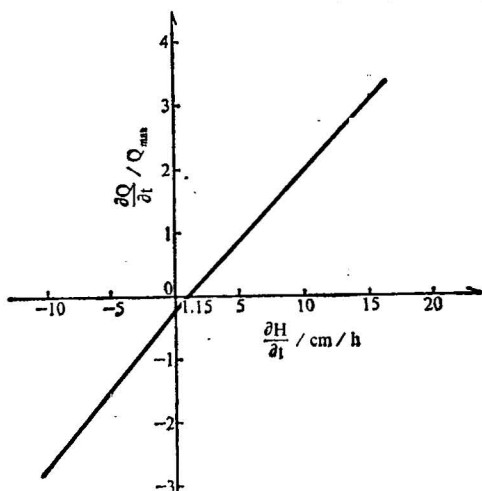


图 6 5.0cm 宽裂缝水流的

$\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial t} / Q_{\max}$  曲线

Fig. 6 The " $\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial t} / Q_{\max}$ " curve of the fracture water-flow 5.0cm wide

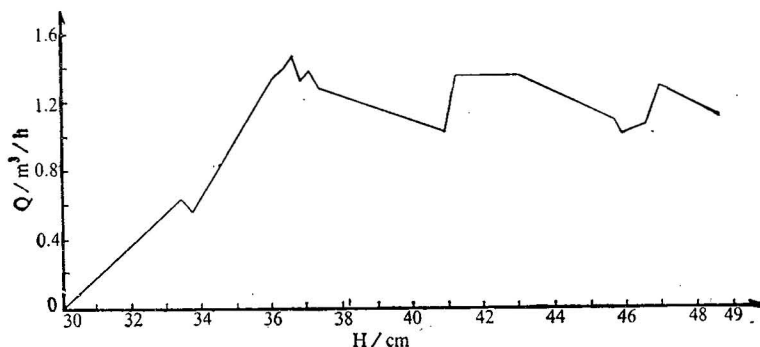


图 7 5.0cm 宽裂缝水流的 H-Q 曲线

Fig. 7 The "H-Q" curve of the fracture water-flow 5.0 cm wide

## 4 结论

综上所述,可得如下几点结论:

1. 对粘土体裂缝中的水流而言, 水位与流量并不呈正比关系, 由于膨胀和崩塌的影响, 最大水流量常出现在裂缝中产生水流的初期, 当水位逐渐升到最高时, 裂缝中的水流量并不很大。

2. 裂缝中水流量的变化受水位上升速度影响。对于一定宽度的裂缝而言, 当水位上升速度大于某一定值时, 水流量增加, 而当水位上升速度小于这一定值时, 水流量却逐渐减少。我们称这一定值为临界水位上升速度值。试验求得 3.0cm 宽裂缝的临界值为 2.85 cm/h, 5.0cm 宽裂缝的临界值为 1.15cm/h。这时土壁膨胀和崩塌所引起的水流量减少值正好等于水位上升所产生的水流增加值。一般来讲, 在其它条件相同的情况下, 宽裂缝的临界值要比窄裂缝的小。在本次试验条件下, 2.0cm 宽裂缝中水流试验的临界值为 5.0cm/h。根据不同裂缝宽度  $b$  的试验资料获得临界值  $V_H$  与裂缝宽度  $b$  为反函数关系, 关系式为:  $V_H = A_1 b^{-A_2} + A_3$ 。将在三个宽度不等的裂缝中水流试验资料代入此式后, 得:

$$V_H = 13b^{-1} - 1.5$$

3. 由于粘土成分的差异, 其侧向膨胀量各不相同。试验结果表明, 3.0cm 宽裂缝基本上全都闭合, 而 5.0cm 宽裂缝尚有 1—2cm 宽的裂缝水流空间。因此, 每侧侧向的平均膨胀量约为 1.5—2.0cm。愈靠近裂缝, 侧向膨胀量愈大, 愈远则侧向膨胀愈小。试验中仅考虑裂缝二侧各 5.0cm 内的粘土膨胀, 而忽略二侧各 5.0cm 以外侧向膨胀的影响。

4. 由于崩塌作用的影响, 裂缝中水流速度一般不大, 水流的冲刷作用不强。

5. 裂缝土壁膨胀速度较快, 根据试验结果, 其膨胀速度平均为 0.8—0.9cm/h。而且膨胀初期的速率大, 到后期膨胀速率小。因此, 在水位上升不很快的条件下, 窄裂缝仅在初期有水流通过, 而在后期则只能通过很小水流。

6. 粘土裂缝的崩塌较少, 但由于粘土的团块状结构, 一旦产生崩塌, 水流就不易将其冲走, 这样将堵住部分水流空间, 使裂缝下部产生淤积。根据对 5.0cm 宽裂缝中淤积情况的观测, 当崩塌产生时, 裂缝中水流量就减少很多, 然后水流量逐渐增加, 但由于崩塌体的淤积, 水流量再也达不到原先的情况。

7. 由于粘土裂缝二壁土体的膨胀和崩塌, 土体裂缝中的水流量明显低于岩石裂缝中的水流量。对于 5.0cm 宽的粘土裂缝而言, 至少要是小 40 倍。对于 3.0cm 宽的粘土裂缝也要小几十倍。在水位保持不变的条件下, 粘土裂缝中的水流量不再增大反而逐渐变小。

本文承蒙中国矿业大学沈文教授指导, 在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 薛禹群等. 地下水动力学原理. 北京: 地质出版社, 1989. 288—291 页.
- 2 陆兆溱. 工程地质学. 北京: 水利电力出版社, 1989. 405—410 页.
- 3 南京水利科学研究院. 水工模型试验. 北京: 水利电力出版社, 1985. 25—43 页.



## THE STUDY OF WATER-FLOW IN A CLAY FRACTURE

Ge Zhonghua

(*Nanjing University*)

Fan Binghen, Feng Qiyang and Wang Yonghong

(*China University of Mining, Xuzhou*)

### Abstract

The present paper tries to study through model experiments the law governing the water-flow in clay fractures and proposes the concept of the critical rising rate of the waterhead. When the rising rate of waterhead is greater than the critical value, the water-flow in fracture increases; otherwise, the water-flow decreases. The water-flow in fracture is not directly proportional to the waterhead. Under the same conditions the maximum water-flow in rock fracture is about 30—40 times that in the clay fracture. As the water-flow continues, it will gradually decrease in the clay fracture, the width of the fracture will narrow 3—4 cm and the depth of the fracture will greatly decrease to about 50% of the average depth of the fracture water.

**Key words:** clay fracture, water-flow, the critical rise rate of waterhead, expansion and collapse

### 作 者 简 介

葛中华, 1962 年生, 江苏溧阳人。1983 年毕业于南京大学, 1986 年毕业于中国矿业大学北京研究生部获硕士学位, 毕业后在中国矿业大学任讲师。现为南京大学地球科学系水文地质及工程地质专业 91 级博士生。邮政编码: 210008。