

论述明渠非均匀流的系统性

水力学教研室 陈文英

摘 要

本文探讨了水力学教学中难点之一“明渠非均匀流”部份的论述问题。讨论了现行教材中有关论述的不足之处,提出了笔者的见解。

水力学中的明渠非均匀流对非水利专业者来说虽不是重点,但由于它是发生在明渠水流中较均匀流更为普遍的水流现象,因之它又是学生必须掌握的基本知识。在现有的土建类水力学教材中,都以少量篇幅对明渠非均匀流作了专门论述,但所涉及内容的广度却不亚于水利专业的教材,且在论述的方法上都是孤立地提出一个又一个概念,一开始就端出断面比能、临界水深、临界坡度、急流、缓流等等轴象的定义,然后又突然提出水跃,接着又是十二种形式的水面曲线的分析等等。学生在学到这部分内容时都感到费解,普遍反映轴象、零乱、难懂。因之对非均匀流的论述问题很值得探讨,应怎样使学生在有限的教学时间内掌握必要的知识。

笔者根据教学中的体会,觉得对非均匀流的论述应抓住其系统性。这就要求讲授者首先缕出个头绪,在均匀流的基础上,抓住非均匀流的中心内容。本人认为,从水力学角度出发,对明渠非均匀流来说主要是探求水深沿程变化的规律,以区别于均匀流水深沿程不变的特点。为此,可从“渐变流段”、“急变流段”以及“非均匀流的水面衔接”这三个方面的水流现象来进行分析与计算。在论述过程应围绕上述每个中心内容,逐一引伸出有关的概念,使得所提出的概念目的性十分明确,各概念之间又存在着紧密的联系,前因后果十分清楚。这样就不易造成各概念的轴象和孤立感。下面将讨论上述主要内容的论述方法:

1、既然明渠非均匀流的核心问题是探求水深的变化规律,那么首先应该确定一个足以表征水深变化的参数,为此提出“断面比能”的概念。因为断面比能

$$e = h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2} = f(h)$$

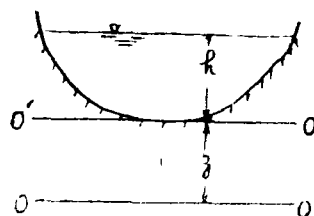
式中,对恒定流来说Q为定值, ω 为水深h的单值函数,如果水深h沿程不变则e也沿程不变,这是均匀流的情况;反之,如e沿程变化则说明h必沿程发生变化,那就是非均匀流了。而e

本文于1985年6月3日收到

的沿程变化的大小正说明了非均匀流水深沿变化的程度。这样提出“断面比能”概念的目的就很明确，学生就不致于把“断面比能”与“水流单位重量总能量”

$$E = z + h + \frac{\alpha v^2}{2g}$$

相混淆，教师也不必过多地解释二者的区别。在一般教材中，把断面比能定义为：把基准面 $O-O$ 提高 z ，使其通过水断面的最低点，对新基准面 $O'-O'$ 的机械能称为断面比能(图 1)。如果断面比能的含义单单停留在这一点上，那么学生就会产生不必要的疑问：为什么要提高基准面？为什么抛弃总机械能 E 的概念而要另引出一个新的断面比能的概念等等，使同学在本章学习一开始就感到有些糊涂。



2、在一般教材中，在断面比能的后面，紧接着推导出临界水深的公式，再根据临界水深来计算临界坡度，进而提出缓流、急流、临界流及其判别准则。这样的论述方式显然存在一个问题，即在学生还没有获得明渠非均匀流水深变化规律的整体概念之前，教材中先对局部性问题作了过多的论述，于是又失去了其目的性，使学生对什么情况下出现临界水深，为什么出现临界水深都缺乏认识，只知道 $\frac{de}{dh} = 0$ 时的水深为临界水深，这种抽象的提法又会使学生迷惑不解。

3、为了克服上述的缺点，笔者认为在断面比能的概念之后，应即根据伯诺里方程导出明渠恒定非均匀渐变流的水面曲线微分方程：

$$\frac{dz}{ds} + \frac{dh}{ds} + \frac{d}{ds} \left(\frac{\alpha v^2}{2g} \right) + \frac{dh_f}{ds} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

在这基础上引入渐变流的假设 $\frac{dh_f}{ds} \approx J = \frac{Q^2}{k^2}$ ，和棱柱形渠道的条件 $\frac{\partial \omega}{\partial s} = 0$ ，从而导出：

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \frac{Q^2}{k^2}}{\frac{de}{dh}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

4、在式(2)中就把断面比能的变化率 $\frac{de}{dh}$ 与水深的变化率 $\frac{dh}{ds}$ 联系起来了。尽管式(2)的公式形式还可以作必要的变换，但式(2)的物理意义比直接写成下式更为醒目。

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \frac{Q^2}{k^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

然后，根据式(2)中可能出现的 $\frac{de}{dh} = 0$ 的情况，此时水面变化不连续，即 $\frac{dh}{ds} = \infty$ ，求算此时的水深，称为临界水深，进而导出临界水深的计算式。这样就可把临界水深 h_k 作为各个变化的水深 h 中的一个极值来理解。同时指出，当 $i = \frac{Q^2}{k^2}$ ，这时 $\frac{dh}{ds} = 0$ ，其水深即为正常水深。

5、在分析明渠恒定渐变流的水面曲线时，要注意以下三点：

(1) 从 $\frac{dh}{ds}$ 为正或负, 来说明水深是渐增还是渐减, 并由此分析可能出现的水深边界值 (h_0 与 h_K)。

(2) 不应抽象地分析水面曲线形状, 从抽象到抽象归纳水面曲线的类型。而应通过实例, 对各种可能出现的水面曲线作定性分析(如坝前雍水曲线, 闸孔下游雍水曲线, 变坡渠道的降水曲线等), 再从实例中抽象出水面曲线的各种类型加以归纳。

(3) 由于水面曲线的特征同它与正常水深 $N-N$ 线及临界水深 $k-k$ 线的相对位置有关, 所以在对同一断面形状的变坡渠道进行水面曲线分析时, 要分别对各坡段 i 求出与底坡相应的 h_c , 以与 h_K 相比较。为了判别各坡段上的正常水深 $h_0 < h_K$, 还是 $h_0 > h_K$, 在这里可提出临界坡度 i_K 的概念。这样, 实际渠底坡 $i > i_K$ 者称为急坡, h_0 必小于 h_K ; $i < i_K$ 者称为缓坡, 其水深 h_0 必大于 h_K ; i_K 仅作为一判别指标。这就比紧接着临界水深之后即提出临界坡度的概念更易于使人接受, 感到是顺理成章了。

当然, 在对水面曲线定性分析的基础上即可进行定量的计算, 提出便于计算的简化公式, 或分段求和法或水力指数积分法。

6、对急变流段问题, 首先应简要阐明明渠恒定急变流在什么情况下发生, 重点说明从缓流到急流与从急流到缓流处, 由于水面坡度变化剧烈、 $\frac{dh}{ds}$ 值较大所出现的急变流, 即

“跌水”(又称“水跌”)及“水跃”两种局部水力现象, 然后着重对水跃进行分析, 阐明:

(1) 水跃基本方程是建立跃前断面水深与跃后断面水深二者关系的方程。

(2) 从力的观点, 说明在共轭水深下水跃基本方程正好体现了跃前跃后断面力的平衡。从而为下面水跃的定位提供了分析的基础。

(3) 最后从水跃的消能作用及其与上下游水流衔接的复杂性, 扼要说明分析讨论水跃的目的与意义。

7、非均匀流的水面衔接问题也是水深变化规律的一部分, 因此应当集中在一起讲, 这比分散在变坡、堰闸出流等各处来论述其系统性要好一些, 且可把有关的概念联系在一起。

非均匀流中有渐变流段、急变流段, 而二者全有急流、缓流之分, 因之非均匀流的水面衔接问题无非是由急流到急流, 缓流到缓流, 缓流到急流, 急流到缓流四种情况下的水面衔接问题。但可归纳为两类情况论述:

(1) 变坡渠道的水面衔接

由于变坡点对水流的干扰牵涉到干扰是向上游传播还是向下游传播的问题, 即水面曲线是由受干扰断面向上游发展还是向下游发展。这就须首先分析不同流态下(急流或缓流)水流受干扰时的物理现象, 即由扰动波的波速 $C = \sqrt{\frac{g\omega}{B}}$, 说明急流中因 $V > C$, 扰动波不能向上游播, 而缓流中 $V < C$, 扰动波能向上游传播, 因此变坡段水面曲线衔接的原则是急流水面由上游的控制断面水深来控制, 缓流水面由下游的控制断面水深来控制。

此外应着重说明, 变坡渠道的水流由缓流过渡到急流时水面曲线的变化属于“水跌”现象, 水深必由 $h > h_K$ 经过 h_K 与下游水流相衔接。同时, 当水流由急流变缓流时, 必须以水跃衔接。然后说明水跃可能发生的位置, 根据由上、下游正常水深值 h_{01} 与 h_{02} 得出的水跃函数值 $\theta(h_{01})$ 与 $\theta(h_{02})$ 的比较, 分析出可能发生的三种位置。由此把水跃的定位与在它

前后的水面曲线的计算问题联系起来了。如远驱水跃究竟在离变坡点多远距离处能固定下来呢？这就牵涉到通过水跃函数由已知下游正常水深 h_{02} 求其共轭水深 h'_{02} ，并对水面曲线计算在两个已知水深（ h_{01} 与 h'_{02} ）的断面间的距离。

（2）人工建筑物下游水面曲线的衔接

说明几种可能性：急流到急流的水曲线的衔接；急流到缓流的水跃衔接并讨论水跃的定位问题。

综上所述，我们就不难对明渠非均匀流获得一个较为完整的系统概念了。