

堤防地基渗透破坏机制及其治理^{*}

朱伟

山村和也

(河海大学岩土工程研究所, 南京, 210098)

(日本大学生产工学部土木工学科, 日本千叶县)

摘要 结合日本阿武隈川地基渗漏防治工程中所遇到的问题, 应用有限元饱和-非饱和渗流解析, 对地基渗透破坏发生机制及其影响因素作了分析和讨论。经过对地基防渗处理方案的解析, 明确了各种方法的优劣和适用条件, 指出了地基防渗处理中应当注意的问题。

关键词: 堤防渗透破坏 管涌 地基防渗 有限元法 影响因素

1 引言

河堤的渗漏一般可以分为堤身渗漏和地基渗漏两种。堤身渗漏大多是由筑堤材料不良或施工缺陷所造成, 而地基渗漏则取决于河堤的地基条件。从危害程度上讲, 地基渗漏发生的次数多, 范围广, 造成决堤的事例也比较多。象美国的密西西比河^[1,2], 日本的矢作川, 长良川^[3]都曾发生大规模的地基渗透破坏而造成灾害。在中国 1998 年长江流域的大洪水中, 地基的渗漏也造成了大量的险情。因此地基渗漏的防治是治水工程中应该首先考虑的问题之一。

发生地基渗透破坏的河堤地基一般都具有较为特殊的地质组合: 表层为较薄的弱透水层, 下卧较厚的强透水层, 也就是所谓的双层地基。美国的密西西比河, 日本的长良川和中国长江干堤都属于这类地质。除地基构成外, 洪水水位、洪水持续时间、降雨量、河堤周围的地形、初期地下水的位置等条件都对地基渗漏的发生与否、发生规模产生一定的影响。

一般来说, 将地基内的渗流考虑为稳定流进行计算, 可以得到较为安全的结果, 这一方法被堤防加固^[4]和设计^[5,6]所广泛应用。但是从本质上讲, 地基内的渗流受到各种条件影响, 是一种变化非常复杂的非稳定流。只有了解各种因素所发生的影响, 才能明确渗流的机制, 以施行合理有效的加固工程。本文结合日本阿武隈川地基防渗加固中所遇到的问题, 应用有限元饱和-非饱和和非稳定渗流解析, 从各个方面对影响渗流的机制进行了分析。对地基渗透破坏的防治方法作了探讨。

2 阿武隈川地基渗透破坏事例

阿武隈川是横跨日本福岛、宫城两县的河流, 干流长 239 km, 在 1996 年被日本建设省指定为一级河川。阿武隈川拥有 5 400 km² 的流域面积, 高水位时的流量, 在上游福岛地区为 7 000 m³/s, 在下游的岩沼地区为 10 700 m³/s。由于阿武隈川拥有多达 196 条的支流, 而且具有较为陡峻的流路坡降 (1/1 000~ 1/2 000), 所以洪水的形成具有快而猛的特点, 在历

* 收稿日期: 1999-04-01

史上曾多次造成洪水灾害。

阿武隈川堤防的标准断面和地基条件见图 1, 一般来说堤高在 6 m 左右, 边坡为 1 : 2。堤身多由细~中砂组成, 在部分地段夹杂着一些碎石。阿武隈川堤防堤基一般为双层地基, 表土层为透水性较差的粉砂土层, 下卧强透水的冲积砂砾层, 再下面是洪积砂砾层, 其透水系数是冲积砂砾层的 1/10 左右。在一些地段, 冲积砂砾层中存在 1 m 左右的粘土质夹层。另外, 也有一些地段不存在表土层, 或者表土层较薄。阿武隈川堤防的堤基具有透水性较大的特点。

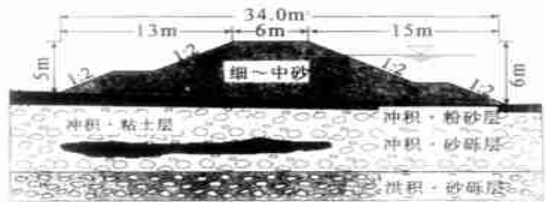


图 1 阿武隈川堤防的标准断面和地基条件

Fig 1 Standard cross section and ground condition of the Abukuma River embankment

1998 年 8 月底, 4 号, 5 号台风在日本相继登陆, 受其影响在阿武隈川上游、中游发生了暴雨。在 8 月 26 日~ 9 月 1 日之间最大降雨量达到 1 269 mm (真船观测所), 各支流水位相继上涨, 多数支流超过了高水水位。此后, 干流水位上涨, 在中上游福岛县境内发生了各种类型的洪水灾害。

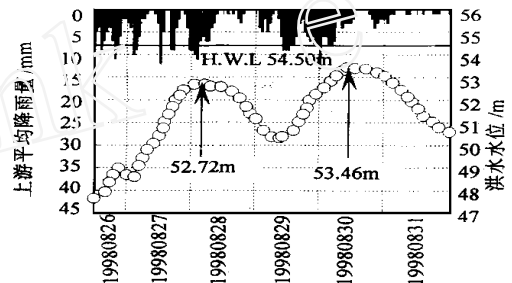


图 2 福岛地区的洪水以及降雨

Fig 2 The data of flood and rainfall in Fukushima district

福岛地区的降雨和洪水水位的状况见图 2。此次洪峰分两次, 共持续将近 5d, 第 2 次洪峰水位接近高水水位。在这期间上游的平均降雨量达到 457 mm, 福岛地区也降雨 314 mm。

在洪水期间, 阿武隈川中游地段多处发生地基的渗透破坏。虽然这些管涌、喷砂最终未能引起决堤事故, 但是否需要对其进行治理, 如何对其进行治理的问题引起了重视。由于阿武隈川中游的地下水位较深, 洪水持续时间较短(4~5d), 可以认为地基内的渗流尚处于非稳定流阶段, 加之可作为隔水层的洪积砂砾层的透水性较大, 而且在很多地区赋存较深, 所以只有了解和掌握各种因素对地基渗透破坏的影响, 才能够施行经济合理的地基防渗工程。

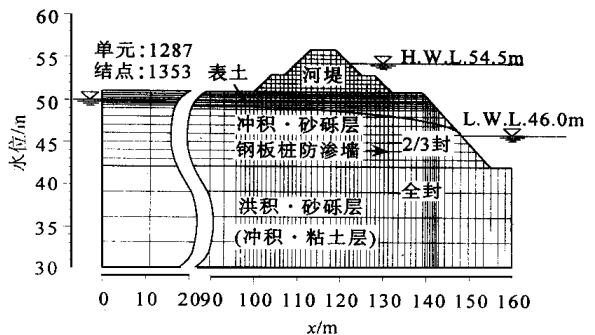


图 3 有限元解析网格及条件

Fig 3 Analysis mesh of the FEM

3 有限元法饱和-非饱和渗流解析

为了考虑洪水渗透时非饱和带的水分移动, 有限元的渗流解析采用了可以同时考虑降

雨和洪水渗透的饱和-非饱和和算法^[7]。计算考虑土中饱和-非饱和状态水的运动符合达西定理和质量保存的规则,将非饱和透水系数 k 用压力水头(Ψ)的函数来表示,对二维断面问题可以得到基本方程式(1)。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(k(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} + k(\Psi) \right) = (C(\Psi) + \alpha S_s) \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (1)$$

式中 $S_s = dn/d\Psi$ 是储留系数; $C(\Psi) = d\theta/d\Psi$ 是比水分容量; α 是判断饱和与非饱和状态的参数, $\alpha = 0$ 时计算非饱和渗流, $\alpha = 1$ 时计算饱和渗流。由此可对土堤内的饱和-非饱和渗流同时进行解析。

解析时需要掌握土的水分特征曲线(体积含水率 θ - 负的压力水头 Ψ) 和非饱和透水系数(体积含水率 θ - 比透水系数 k_r)。 θ - Ψ 可以进行实测来决定,而 θ - k_r 的测定方法比较复杂,一般根据水分特征曲线进行推定。Van Genuchten^[8]将 θ - Ψ 的关系用一个数值模型(VG模型)来表示

$$S_e = \left(\frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n} \right)^m \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \quad (3)$$

式中 $m = 1 - 1/n$, S_e 是有效饱和度; θ_{\max} 是最大体积含水率; θ_{\min} 是最小体积含水率。将式(2)代入Mualem^[9]提出的水分特征曲线和非饱和透水系数的数值模型中,可以得到比透水系数 k_r 。

$$k_r = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (4)$$

在实际计算时,可以根据实测的水分特征曲线来求得VG模型的4个参数 θ_{\max} , θ_{\min} , α , n 并依此来反映土的非饱和渗透特性。

在阿武隈川堤防地基渗漏计算时,考虑到堤身形状对地基渗漏不产生大的影响,将堤身简化为对称形状进行了分割,所得到的有限元解析网格见图3。下面将对各种条件进行计算分析,如果没有特别注明,一般的解析条件如下:在河堤以下,表土厚1.0m,下部为厚8.0m强透水的冲积砂砾层,再下层是洪积砂砾层。各地层的透水系数以及反映非饱和领域水分移动特征的VG模型参数见表1。另外,考虑到区域性地下水对渗流的影响,将计算范围扩大到背水侧前方100m处。鉴于阿武隈川中游的进水河流的特征,将作为边界条件的地下水位,在左侧设定于地表下1.0m(EL. 50.0m)的位置。右侧的河川水位,初期设定于低水水位46.0m,而后随洪水发生变动。有限元计算分2个阶段,第一阶段进行稳定流计算,目的是为了得到洪水前期河堤以及地基的初期水分值以及地下水的位置,降雨强度使用湿润期平均渗透强度^[10]4.5mm/d。第二阶段进行非稳定流计算,作用外力采用图2所示的洪水水位并同时考虑其450mm的降雨。根据渗流计算可以得到各个时间地下水水位的位置(见图4)和等势线的分布(见图5)。管涌的发生与否是由作用在表土层底面的由下而上的水压力和表土层自重之间的平衡关系所决定的,将其关系可用一个局部渗透比降 i 的概念(见式(5))来表达,其计算是根据坡脚表土层底板下的水分势能 Ψ_a 和顶面水分势能 Ψ_b , 表土层厚

h 来进行。在表土层厚一定, 地表面的压力水头为 0 的条件下, 也可根据表土层底板下的压力水头对局部渗透比降进行推算, 进而对地基是否发生渗透破坏作出判断。

$$i = \frac{\Psi_a - \Psi_b}{h} \quad (5)$$

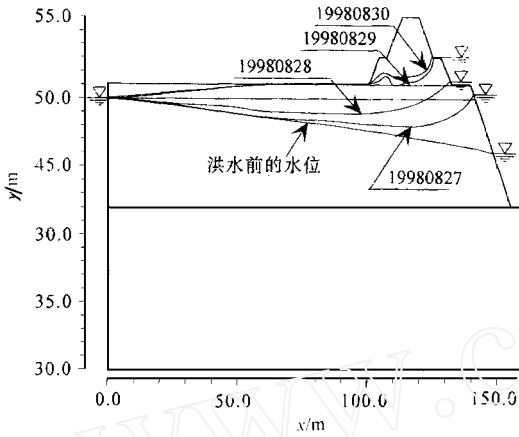


图 4 洪水前后水位变化的解析结果

Fig 4 The analytical results of ground water in the flood

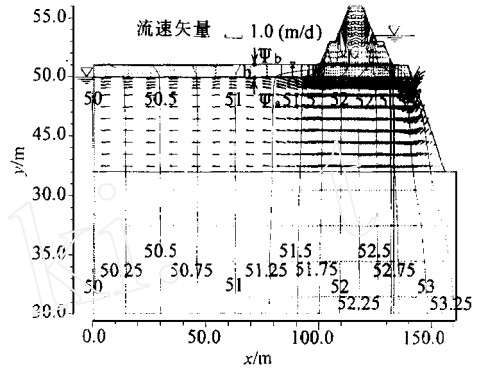


图 5 洪水时的等势线及流速矢量的解析结果

Fig 5 The analytical results of equipotential line and velocity vector in the flood

表 1 阿武隈川河堤以及地基的渗透特性

名称	透水系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	VG 模式的参数			
		α/cm^{-1}	n	θ	θ
河堤	1.0×10^{-3}	0.020	3.0	0.50	0.05
钢板桩防渗漏	1.0×10^{-4}	0.010	2.0	0.55	0.10
表土	5.0×10^{-4}	0.010	2.0	0.55	0.10
地 冲积砂砾	4.0×10^{-2}	0.150	5.0	0.35	0.00
基 洪积砂砾	3.0×10^{-3}	0.150	5.0	0.35	0.00
冲积粘土	1.0×10^{-5}	0.008	1.0	0.60	0.15

Tab 1 The infiltration characteristic of A bukum agaw A River em bankment and foundation

4 地基渗透破坏的影响因素

为了明确各种条件对地基中非稳定渗流的影响, 进而了解地基渗透破坏的机制, 以制订合理而有效的治理方法, 我们以阿武隈川河堤为实例对各种因素进行了分析。

4 1 初期地下水水位的影响

在第一阶段的稳定渗流计算时,对计算范围左侧的水位进行变化,右侧河川保持低水位 46.0 m。在第二阶段的非稳定渗流计算时,左侧的水位保持不变,河川水位采用洪水时的水位变化。以此对洪水渗透时区域性地下水水位的位置对渗流的影响进行分析。根据计算结果,将背水坡脚附近表土层底板下的压力水头进行整理可以得到图 6 的结果。可以看到,当区域性地下水水位较深时,在表土的底板和平时的地下水面之间存在着一个较厚的非饱和带。在洪水的渗透过程中,渗透水首先充填非饱和的孔隙,之后地下水位逐渐上升,最后施加在表土底板的承压水头才开始上升。非饱和带的存在,对表土底板下水压力的增加起着缓冲作用。对阿武隈川来说,如图 6 所示,第一次洪峰时处于非饱和状态的孔隙水的负压逐渐减少。第二次洪峰发生时孔隙水由负压转为正压,地基逐渐饱和。在初期水位较高(GL -1.0 m)的条件下,表土底板的水压力上升较快,渗透比降超过临界比降 $0.5^{[6]}$,产生了发生管涌的条件。而在初期水位较低时水压力的增加有限,不具备发生管涌的条件。

同样,在考虑平常的河川水位的影响时,我们对初期的河川水位进行变化,通过计算可以得到图 7 的结果。如果平时的河川水位较高,洪水时背水坡侧表土层下的承压水头上升较快。如果初期水位在 49.0 m,第一次洪峰时,渗透比降就可接近临界比降 0.5 。

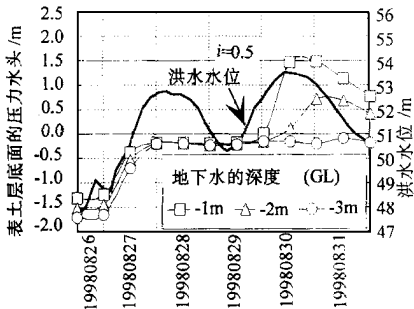


图 6 地下水的深度与孔隙水压力

Fig 6 Variation of the pore water pressure with different depth of groundwater

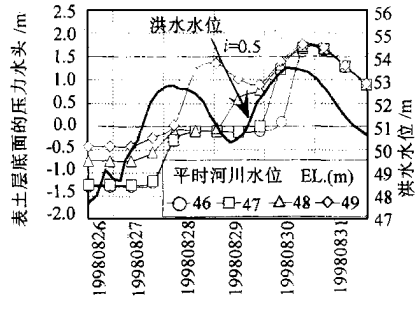


图 7 河川的平时水位与孔隙水压力

Fig 7 Variation of the pore water pressure with different normal river level

根据以上结果可以认为,地下水的赋存位置对洪水渗透时地基是否发生渗透破坏起一定的制约作用。尤其是洪水持续时间较短时其影响更为明显。依此可以推测,在本次洪水时阿武隈川堤防地基的喷砂现象多发生于初期地下水水位较浅的部位。

4 2 表土层透水系数的影响

将表土层的实测透水系数 (5.0×10^{-4} cm/s) 作为 k_0 ,对表土层的透水系数为 $0.1 \sim 20 k_0$ 的条件进行了计算,得到的结果见图 8。由于在洪水渗透的同时,降雨也通过地表向下部渗透,所以地下水的上升受到侧向水位上升和垂向雨水渗透两方面的影响。表土透水系数较小时,由于雨水,洪水的渗入量较少的缘故,地下水的上升较为缓慢。但是,一旦地下水水位上升到达表土层底面以后,水压力的增加迅速。表土的透水系数越小,渗透比降越大,引起渗透破坏的可能性越大。而表土透水系数较大时,由于雨水,洪水的渗入量较多,相对来说地下水水位上升较快。但是在以后的水位上升过程中,虽然地表的渗漏量较大,表土底面所承受的水压力较小,不易达到发生渗透破坏的条件。以阿武隈川为例,如果表土的透水系数为强透水



层的 1/10 以下, 就会出现发生渗透破坏的条件。而表土和强透水层的透水系数相差在 10 倍以内, 对于本次阿武隈川的洪水外力来说发生地基渗透破坏的可能性不大。

4 3 表土层厚度的影响

为明确表土层的厚度对渗透破坏的影响, 对表土层厚 0.25~ 1.0 m 的地基条件进行了计算和比较, 表土层的透水系数则采用 $0.1k_0$, $1.0k_0$ 和 $10k_0$ 的 3 种。根据计算得到的表土层顶底面的水分势能, 用式 (5) 对局部渗透比降进行计算, 并以洪水渗透中的最大比降 i_{max} 对结果整理, 结果见图 9。从图中看出, 表土的透水系数较大时, 其厚薄对渗透比降的影响不大, 只是渗透量发生变化。而表土的透水系数较小时, 其厚薄对渗透比降会产生很大的影响。由于即使表土层变薄, 其底面所作用的水压力并不能有很大的减轻, 所以渗透比降的增加比较明显。可以认为, 表土层的渗透系数较大时, 表土的薄弱地段只出现漏水量的问题, 而表土层的渗透系数较小时, 表土的薄弱地段会出现渗透破坏的问题。

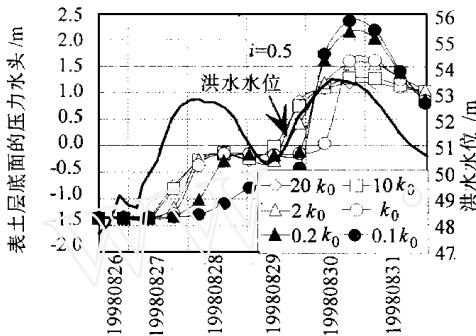


图 8 表土的透水系数与孔隙水压力

Fig 8 Variation of the pore water pressure with different seepage coefficients of surface soil

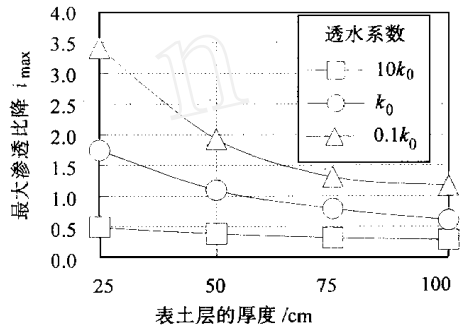


图 9 表土层的厚度与渗透比降

Fig 9 The relationship between thickness of surface soil and gradient of seepage pressure

4 4 降雨的影响

降雨的渗透主要是产生由上至下的水分移动。这能导致非饱和带水分增加, 进而加快地下水位的上升。在本次阿武隈川的洪水水位上涨的同时伴随了大量的降雨。为了搞清降雨的有无、降雨的时期对地基渗透破坏所产生的影响, 对各种降雨条件下的洪水渗透进行了计算, 结果见图 10。由图可见, 在无降雨的条件下, 由河川水位上涨所引起的地下水位的上升较为缓慢, 而且水位上升后对背坡脚表层底面所产生的承压水头也较小。而伴随着降雨的洪水则不同, 地下水位的上升较快, 在表层底面可产生较大的承压水头。在洪水到来之前的降雨也对洪水渗透发生一定的影响。如果把同样的降雨移到洪水之前的不同时期, 可以看到离洪水越近的降雨 (0d: 降雨结束后马上洪水到来), 所发生的影响越大。而降雨间隔 1 个月以后洪水到来

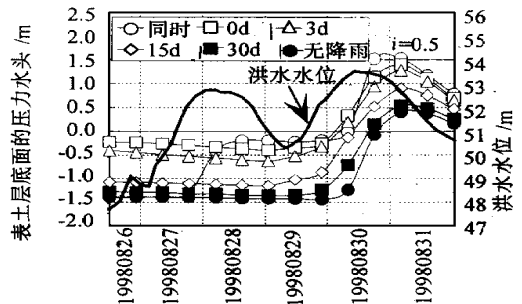


图 10 降雨以及间隔时间对孔隙水压力的影响

Fig 10 The effect of rainfall and time interval on the pore water pressure

(30d), 降雨对洪水渗透发生的影响很小, 比较接近无降雨的状态。由此可见象本次阿武隈川发生 450 mm 左右的降雨, 可对 1 个月内到来的洪水产生一定的影响。

4.5 洪水波形的影响

洪水波形主要包括洪水水位高度、洪水持续时间、洪峰的次数。首先将阿武隈川的洪水水位上下平移 1.0 m, 对其影响进行了计算, 结果见图 11。对最高水位达到高水水位的洪水水位(曲线 1)来说, 其承压水头增加了将近 1 m。而整体水位降低 1.0 m 的洪水水位(曲线 2)只能引起微小的地下水位上升。可见洪水水位的高低对地基渗透破坏产生很大的影响。

对于洪水的持续时间, 笔者设定了两种达到高水水位的洪水进行了计算(见图 12)。对长期持续高水水位的洪水(波形 2)来说, 如果洪水持续 5 d 以上, 表层土所承受的水压力基本稳定, 渗流接近稳定流状态。对于上下起伏的洪水(如波形 1), 相当于阿武隈川的洪水 3 次连续作用。从计算结果可知, 表土层所承受的水压力也随洪水水位而波动。在第一波洪水时, 背面坡脚表土层底面的压力水头缓慢上升, 在时间上滞后于洪水水位。而第二波, 第三波的洪水却没有这种滞后现象。这是因为河川水位降低时, 背面坡脚下的地下水位基本维持在表土层下, 河川水位再次上升时水压力可以迅速传递到表土层底面。由此可以推测, 在多次洪水作用时, 非饱和带不具有明显的缓冲作用。另外, 与稳定流状态的承压水头相比, 洪水波动时表土所承受的水压力比较小。

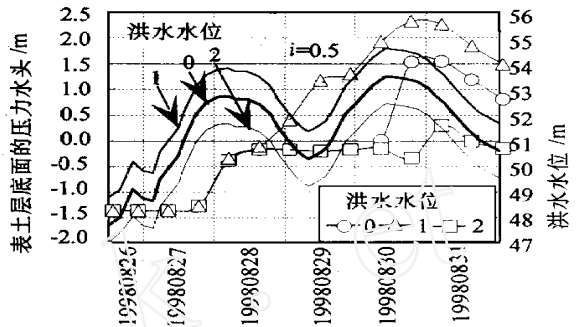


图 11 洪水水位对孔隙水压力的影响

Fig 11 The effect of flood level on the pore water pressure

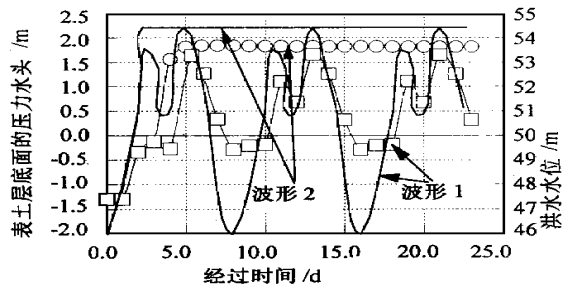


图 12 洪水波形对孔隙水压力的影响

Fig 12 The effect of flood wave type on the pore water pressure

5 地基渗透破坏的治理

地基渗透破坏治理的主要方法可以

分为 3 种: 对洪水在地基内的渗透进行阻截, 以减轻表土层下的承压水头, 代表性的方法是防渗幕墙; 对洪水在地基内的渗透进行诱导, 以释放表土层下的承压水头, 代表性的方法是减压沟, 减压井; 增加表土层对承压水头的抵抗能力, 代表性的方法是背水侧增加盖重。阿武隈川的地基防渗工程拟采用钢板桩防渗幕墙进行处理。根据地质条件, 防渗幕墙可能出现 4 种情况(见图 13): (a), (b) 是用防渗幕墙封闭到隔水层的冲积粘土层或堆积砂砾层。在强透水层中有厚 1.0 m 的粘土夹层的地段, 以此作为隔水层(c)。而(d)是假设在不存在隔水层的地段使用防渗幕墙。我们针对这 4 种情况的效果进行了分析。计算采用了上下起伏的洪水波形(图 12, 波形 1)和长期持续的洪水波形(图 12, 波形 2), 并在洪水的前 5 d

考虑了与阿武隈川洪水相同的降雨。根据这两种波形, 既可了解象阿武隈川的短期洪水时针对非稳定流的防渗效果, 也可分析长期洪水时针对稳定流的防渗效果。各地层的透水性参数同样采用表 1 的数值。而钢板桩防渗墙的透水系数是将其换算为厚 1 m 的土体时的数值。

对于长期持续的洪水来说, 防渗幕墙需要封闭到良好的隔水层(透水系数为强透水层 1/10 以下), 才能有效地控制渗透坡降 $i < 0.5$ (图 14(b))。封闭到粘土夹层的防渗幕墙虽然有一定的防渗效果, 但不能满足 $i < 0.5$ 的要求(图 14(c))。而没有隔水层的悬挂式防渗幕墙在长期洪水作用下基本上没有防渗效果(图 14(d)), 达到稳定流时的渗透比降与没有防渗幕墙时(图 12)几乎相同。

对于上下起伏的洪水波形来讲, 象(a), (b)方案用防渗幕墙封闭能够有效地控制渗透破坏(图 15(b))。此时的隔水层的透水系数只要小于强透水层 5 倍就可基本满足防渗要求。封闭到粘土夹层的防渗幕墙(图 15(c)), 也可控制渗透坡降 i 达到 0.5 以下(图 15(c))。而没有隔水层的悬挂式防渗幕墙在上下起伏的洪水作用时也没有明显的防渗效果(图 15(d))。因此, 在没有隔水层的地基条件下不宜采用防渗幕墙的方法, 而应该考虑采用减压或增加盖重的方法。

必须指出, 由于地基渗透破坏发生与否是与地基条件、地下水条件、洪水条件、降雨条件密切相关的, 所以在考虑是否需要进行地基防渗处理, 采用什么样的方法进行防渗处理时, 首先应该明确这些条件, 尤其是洪水外力的条件, 以利于有的放矢。以阿武隈川为例, 在区域性地下水位较深的地段, 如果考虑洪水的持续时间在 5 d 以内, 就没有必要采取防渗措施。

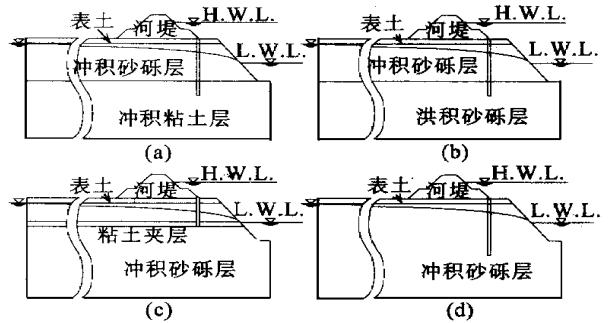


图 13 地基防渗处理的四种情况

Fig 13 The 4 methods of the ground leakage control

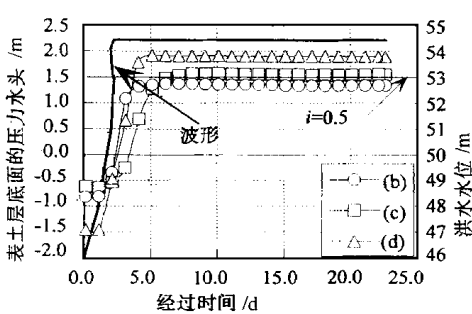


图 14 对于长期洪水的防渗效果

Fig 14 Infiltration protective effect for long tem flood

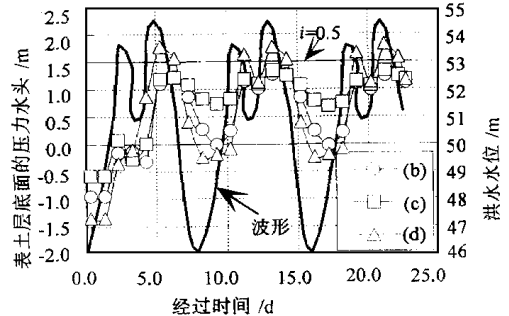


图 15 对于波状洪水的防渗效果

Fig 15 Infiltration protective effect for multiundulate flood

6 结 语

本文结合阿武隈川的地基防渗治理工程的实例,对地基渗透破坏的影响因素进行了分析和探讨,并对地基防渗方法及其效果作了讨论。从中得知:

(1) 地基渗透破坏的发生与否、强烈程度与地基条件、地下水条件、洪水条件、降雨条件密切相关,尤以区域性地下水位和洪水的持续时间的影响最为关键。

(2) 无论是稳定流还是非稳定流,如果有良好的隔水层,采用封闭式防渗幕墙具有确实的效果。而没有隔水层,则难以得到防渗效果,此时应该考虑采用其它方法。

(3) 明确各种条件,尤其是洪水的波形和持续时间对防渗加固非常重要。根据短期洪水或长期洪水而对症下药;根据地下水条件、表土条件而因地制宜,采用经济合理的方法进行治理。

参 考 文 献

- 1 Waterways Experiment Station, Corps of Engineers Investigation of underseepage and its control, lower Mississippi levees Technical memorandum No. 3-424, 1956, (10)
- 2 William E. Read, Robinson M. M. Lower Mississippi valley floods of 1982 and 1983 Transaction of ASCE, 1985
- 3 山村和也, 久乐胜行 堤防の地盘漏水に関する研究 土木研究所报告, 1972, 145: 1-23
- 4 董哲任 堤防除险加固实用技术 北京: 中国水利水电出版社, 1998 56-63
- 5 水利部水利水电规划设计总院 堤防工程设计规范 北京: 中国计划出版社, 1998 84-88
- 6 日本河川协会 河川土工指针, 1976, 218-230
- 7 朱 伟 堤防の安定性に影响を持つ堤体内渗透流の研究 [日本大学博士学位论文] 日本千叶: 日本大学, 1996, 10-24
- 8 van Genuchten, M. Th. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils Soil Sci Am J. 1980, 44(5): 892-898
- 9 Mualem Y. Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media: Generalized Macroscopic Approach Water Res., 1978, 14(2): 325-334
- 10 朱 伟, 山村和也 堤防の长期的な水分量の变动 土木学会论文报告集, 1997, (582): 99-108

Mechanism of seepage failure in levee foundation and the protecting methods

Zhu Wei

(Hohai University)

Yamamura Kazuya

(Nihon University, Chiba, 275-0006 Japan)

Abstract

With the problems encountered in protecting the seepage failure of ABUKUMA river in Japan, we discussed the mechanism and the influencing factors of seepage failure in the foundation of river embankments using the saturated-unsaturated flow FEM analyses. In this paper, we discussed superiority and inferiority of the protecting methods as well as the applicable conditions for them. Furthermore, also discussed some key points in the protecting project.

Key words: river embankment, seepage failure, piping and boiling, FEM, influence factor.