

安庆城市防洪暨堤防管理系统

堤防工程结构风险子系统

技术开发报告—B 分册

中国水利水电科学研究院防洪减灾研究所

二零零三年四月

项目编号：JZ02-2001

项目名称：安庆城市防洪暨堤防管理系统

委托单位：安庆市水利局

承担单位：中国水利水电科学研究院防洪减灾所

报告审定：程晓陶

报告审核：丁留谦

报告校核：陆吉康

项目总负责：张金接

子系统技术负责及参加人：

堤防结构风险分析子系统

技术负责：吴兴征

参加人：张金接 丁留谦 窦坤 孙东亚 赵进勇 许晓彤 黄永健

报告编写：吴兴征

目 录

| | |
|--------------------------|----|
| 第一章 基于极限平衡理论的边坡稳定分析..... | 1 |
| 1.1 计算原理 | 1 |
| 1.2 算例..... | 1 |
| 第二章 渗透稳定分析..... | 3 |
| 2.1 渗流基本方程及其离散 | 3 |
| 2.1.1 基本方程和边界条件 | 3 |
| 2.1.2 问题的离散化 | 5 |
| 2.1.3 单元网格自动剖分 | 6 |
| 2.2 计算过程 | 6 |
| 2.3 渗透稳定评价 | 7 |
| 2.4 算例..... | 7 |
| 第三章 可靠性计算原理与程序开发..... | 29 |
| 3.1 计算原理 | 29 |
| 3.2 算例..... | 31 |
| 第四章 风险分析..... | 34 |
| 4.1 计算原理 | 34 |
| 4.1.1 风险计算模型 | 34 |
| 4.1.2 失效概率的计算方法 | 36 |
| 4.2 算例..... | 36 |
| 第五章 安全评估..... | 38 |
| 5.1 安全等级的划分 | 38 |
| 5.2 加固预案的设定 | 38 |
| 5.3 全堤段安全评估成果的分析与评价..... | 39 |
| 第六章 数据库设计与维护..... | 42 |
| 6.1 数据库设计与实现 | 42 |
| 6.2 数据库维护 | 42 |
| 主要参考文献..... | 43 |

第一章 基于极限平衡理论的边坡稳定分析

1.1 计算原理

边坡稳定分析采用基于极限平衡原理的瑞典圆弧法或简化 Bishop 法。具体的计算原理可参见有关文献[0]。

当不计各土条之间条间力的影响时，可推得简化毕肖普法计算安全系数的公式

$$F_{SL} = \frac{\sum \frac{1}{m_{\alpha i}} [c'_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \varphi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (1)$$

式中： $m_{\alpha i} = \cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi'_i \sin \alpha_i}{F_{SL}}$ 。可见，式（1）两边均有未知数，采用普通迭代法求

解。根据堤段几何信息，自动给定最危险圆心的搜索范围。并采用最优化方法搜索最危险滑裂面位置。不同水位条件下堤身的浸润线由渗流分析得到。

1.2 算例

对于堤段 05+687，地形点的坐标如表 B1-1 所列。地形轮廓如图 B1.1 所示。各土层选用的土工参数如表 B1-2 所列。

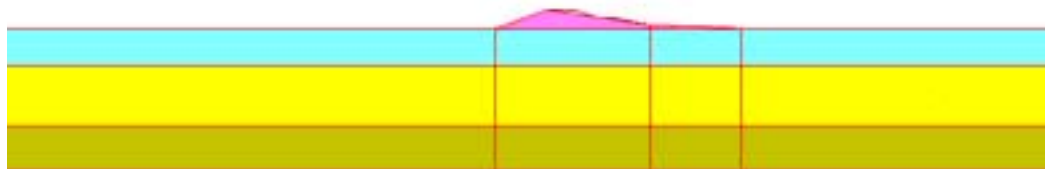


图 B1.1 设计水位下断面 05+687 横断面



图 B1.2 设计水位下断面 05+687 稳定分析计算成果

表 B1-1 桩号 05+687 桩号地形点坐标

| 土层 | 名称 | 1 (X/Y) | 2 X/Y | 3 X/Y | 4 X/Y | 5 X/Y | 6 X/Y | 7 X/Y | 8 X/Y | 9 X/Y | 10 X/Y | 11 X/Y | 12 X/Y | 13 X/Y |
|----|------|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 | 人工填土 | 0 285.00 | 260.18 285.50 | 271.55 281.71 | 279.05 279.21 | 279.05 278.71 | 289.05 278.71 | 290.55 279.21 | 298.05 281.71 | 304.05 281.71 | 316.50 284.20 | 346.50 284.80 | 350.00 285.50 | 500.00 285.00 |
| 2 | 中砂 | 0 285.50 | 271.55 285.50 | 298.05 285.50 | 304.05 285.50 | 316.50 285.50 | 500.00 285.50 | | | | | | | |
| 3 | 重壤土 | 0 299.00 | 260.18 299.00 | 271.55 299.00 | 298.05 299.00 | 304.05 299.00 | 316.50 299.00 | 350.00 299.00 | 500.00 299.00 | | | | | |
| 4 | 细砂 | 0 321.00 | 260.18 321.00 | 271.55 321.00 | 298.05 321.00 | 304.05 321.00 | 316.50 321.00 | 350.00 321.00 | 500.00 321.00 | | | | | |

表 B1-2 桩号 05+687 各土层的土工参数值

| 符号 | 名称和单位 | 第一层 | 第二层 | 第三层 | 第四层 |
|----------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| c | 粘聚力 (kPa) | 10 | 15 | 10 | 15 |
| ϕ | 内摩擦角 (°) | 16.5 | 7.5 | 16.5 | 7.5 |
| γ | 土的天然容重 (kN/m ³) | 18.07 | 16.22 | 18.07 | 16.22 |

在设计水位下计算得到的上游坡和下游坡安全系数分别为：2.25 和 3.08。稳定分析的成果，如图 B1.2 所示。

第二章 渗透稳定分析

堤坝渗流计算方法可分为流体力学解法和水力学解法两大类，但广义的概念还包括图解法、数值算法以及各种试验的方法等。

水力学解法是一种近似计算的方法，基于对渗流场作某些假定和简化，或者对渗流场的局部区段引用流体力学解，求得渗流问题的解答。水力学解法一般仅能得到渗流截面上平均的渗流要素，但因有计算简便以及能够适应各种复杂边界条件的优点，而在实际工程中被广泛采用。从精度而言，水力学解法也能满足工程的需要。

采用有限元数值模拟方法对堤身堤基渗流场的规律进行分析。该方法对堤防工程所涉及的复杂边界条件以及常用地基处理方法，如防渗墙、排水沟、减压井等均能给予较好的模拟。故这里采用有限元计算方法。

2.1 渗流基本方程及其离散

有限元法是把连续体离散化为有限个单元的集合体来进行研究，引入变分原理对研究问题建立模式，推导出近似解的一组方程，最后归结为求解多阶系数矩阵的线性方程组，以电子计算机作为工具，并在矩阵分析和数值方法的基础上进行所需精度的计算。

2.1.1 基本方程和边界条件

对于平面问题各向异性体的稳定渗流，假定水流服从达西(Darcy)定律，则在无源、无旋运动条件下，水头函数 $H(x, y)$ 应满足下列偏微分方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

式中： K_x 、 K_y 分别为 x 、 y 方向的渗透系数。

在均质等向的土体中， $K = K_x = K_y$ 是一个常数，如设 $\phi = -KH$ ，则渗流的运动方程式可写成

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ u_y &= \frac{\partial \phi}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： ϕ --- 渗流的流速势。因此，在重力作用下，均质各向同性土体中符合达西定律的渗流运动，可以看作为一种有势流动。流体力学中解有势流动的各种方法都可用来求解

这种渗流。

在骨架变形以及液体压缩可以忽略的条件下，可将运动方程（3）代入连续方程， $\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0$ 而得到渗流的拉普拉斯方程 $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$ 。因为 $\phi = -KH$ ，故水头 H 也必定满足拉普拉斯方程

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

式（2）是稳定渗流的微分方程，当结合变动的自由边界情况后，也可以近似地求解非稳定渗流问题。

对具有浸润面的稳定渗流，其边界条件（如图 B2.1 所示）有以下几种：

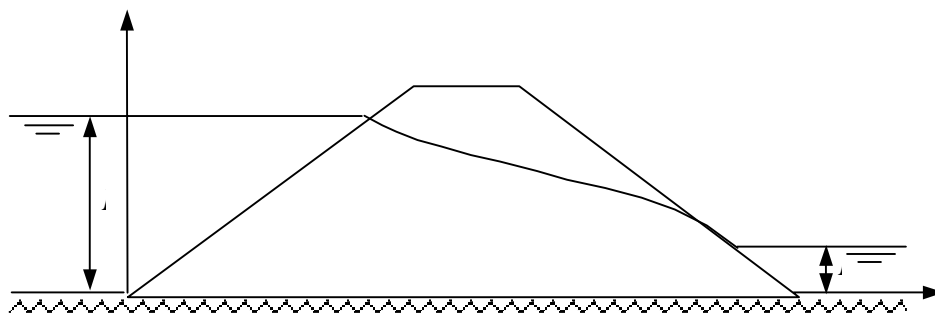


图 B2.1 堤坝渗流边界

(i) 在上游边界 AN 及下游边界 DE 上，水头函数是已知的，如以不透水层面为基准面，则在边界 AN 上有

$$H(x, y) = H_1 = \text{const}$$

在边界 DE 上有

$$H(x, y) = H_2 = \text{const}$$

(ii) 在不透水边界上，由于渗流沿着边界流动，在边界面上沿边界法线方向的渗流流速 u_n 为零，即在边界 NE 上有

$$\frac{\partial H}{\partial n} = 0$$

(iii) 边界 AC 是浸润线，也是一根流线，在浸润线上与该线法线方向的渗流流速 u_n 为零，即在边界 AC 上有

$$\frac{\partial H}{\partial n} = 0$$

又因堤坝浸润面与大气相接触，其表面压强为零，即在边界 AC 上有 $P = 0$ ，或 $H = y$ ，

y 为浸润面各点的高度。

(iv) 当堤坝浸润线末端存在逸出段时, 因该段渗流直接流入大气, 故在边界 CD 上亦有 $P=0$, 或 $H=y$ 。

其中 (i) 和 (iv) 中的流场边界上的水头等于上下游水位以及自由渗出段的位置高程, 亦称为第一类边界条件 (已知水头边界)。对于 (ii) 和 (iii), 是一根流线, 没有流量从该面流进或流出, 为第二类边界条件 (已知流量边界)。

2.1.2 问题的离散化

根据变分原理, 微分方程 (2) 的求解问题等价于下述泛函在渗流区域内的极值问题

$$I[H(x, y)] = \iint_D \frac{1}{2} \left[K_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy = \min$$

式中: $H(x, y)$ 为水头函数, 必须满足上述边界条件; D 为平面渗流的全区域。

首先把定解域 D 离散化为若干小区域 (即单元), 例如把域 D 近似地划分成为有限个三角形单元, 这样, 泛函 $I[H(x, y)]$ 可近似地表示为

$$I[H(x, y)] = \sum_{ie=1}^{ne} \iint_{ie} F dx dy \quad (5)$$

式中: ne 为单元总数; ie 为单元编号。

$$F = \frac{1}{2} \left[K_x \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 \right]$$

各单元域内的 $H(x, y)$, 可用与结点水头 H_l 有关的线性函数近似表示, l 为结点编号。这样不必在整个定解域内找适当的函数系列, 而是在各个单元中都近似用线性函数表示, 因为单元可以分得较小, 这样做是可以的。此时泛函 I 表示为各单元域泛函之和, 而各单元的泛函只与该单元结点水头 H_l 值有关, 所以泛函 I 也就变成为 np 个结点水头的多元函数 $I(H_1, H_2, \dots, H_{np})$, np 为结点总数。这样, 泛函极值的变分问题就归结为多元函数 I 的极值条件

$$\frac{\partial I}{\partial H_l} = 0 \quad l = 1, 2, \dots, np \quad (6)$$

来确定 H_l 的问题, 也就是求解方程组 (6)。

根据式 (5), 上式还可进一步表示为

$$\frac{\partial I}{\partial H_l} = \sum_{e=1}^E \iint_e \frac{\partial F}{\partial H_l} dx dy = 0 \quad l = 1, 2, \dots, np \quad (7)$$

上式为一方程组, 在每一方程中实际上只包含有 H_l 的单元泛函才参与上述对 H_l 的求导和组合, 其它单元泛函和 H_l 无关的可不必参与。有限元法最后也就可归结为在一定边

界条件下求解代数方程组 (7), 来确定各结点的水头值 H_1 。

有限元法虽然也要选择一定的函数作为近似求解的出发点, 但它是采用分段逼近的方法, 比较容易选择插值函数, 并且可适用于比较复杂的几何形状和各种边界条件, 具有更大的灵活性。

2.1.3 单元网格自动剖分

采用有限元法计算堤坝渗流, 需将其渗流场剖分成若干单元, 并对单元结点进行编号, 然后将单元信息、结点坐标和边界信息经整理后进行计算。这一整理数据的工作, 不仅量大, 而且繁琐, 同时也极易发生差错, 所以是一件令人十分烦恼的工作。为了减少数据输入量并尽可能地避免差错, 或即使发生差错也易于核对, 必须对堤坝渗流场的离散采用自动剖分的方法。即由人工给出少量数据, 通过计算程序来形成单元信息、结点坐标、各类边界信息以及计算渗流量信息等大量数据。

根据渗流场的几何形状、土层分布, 将整个堤坝渗流场划分成一些四边形的子域。这些子域称为超单元。其编号是从左到右、由上到下依次进行。

应该指出的是, 单元划分时应使研究的水头值在单元内部接近一个常数, 在急变区域应划分小单元, 变化缓慢区域可划分大的单元, 而且单元边长不宜过于悬殊, 邻边上也不能出现间断的结点。

2.2 计算过程

用有限元法解堤坝渗流问题的具体步骤如下:

1. 根据土层分布等有关工程地质及水文地质条件及计算问题的性质, 合理地确定符合实际渗流场的计算模型范围和边界性质。

2. 将计算渗流区划分为具有一定几何形状的单元。对单元和结点依次编号并确定插值函数, 对结点进行总体编号, 并给出结点局部编号与总体编号的对应关系。

3. 任选一直角坐标系(通常 x 轴向右为正, y 轴向上为正), 定出所有结点的坐标值和组成各个单元的结点号。

4. 给定各种信息, 如第一类边界结点按边界条件给出水头值, 给出渗透系数 k_x 和 k_y 等。

5. 根据结点坐标值, 以单元结点水头函数值的插值函数来逼近变分泛函方程中的水头函数, 得出单元上以结点水头值为未知量的代数方程组(单元有限元方程)。进而形成各单元的渗透矩阵。

6. 由单元渗透矩阵组集为总体渗透矩阵, 并以定解条件代入, 从而得出整个区域上的总体有限元方程。该集成过程由结点局部编号与总体编号的关系来确定。

7. 据定解条件形成右端自由项, 从而形成线性代数方程组。

8. 解线性代数方程组，求各结点的水头值。按 $h = y$ 条件迭代自由面，并修改自由面上结点坐标，然后重复第 6、7、8 步，直至满足 $h = y$ 条件为止。

9. 计算渗流量或按要求计算有关物理量，如水头、压力、坡降等水力要素，绘制流网图。进而进行渗透稳定分析，并选择合理的防渗、排渗设计方案或补强加固方案。

2.3 渗透稳定评价

当堤身或堤基表层土所承受的渗透力过大时就可能发生渗透变形和破坏。因此，评价渗透的安全性就需要将土体承受的渗透水力坡降与土层的抗渗强度进行比较得到

$$F_{SP} = J_c / J \quad (8)$$

式中： J_c 为土体的临界渗透坡降； J 为土体的渗透坡降，由有限单元法渗流计算得到。不同级水位下的初始自由面由出逸点与上游水面线与堤身交点确定，通过压缩或拉伸的方法得到单元结点坐标。

2.4 算例

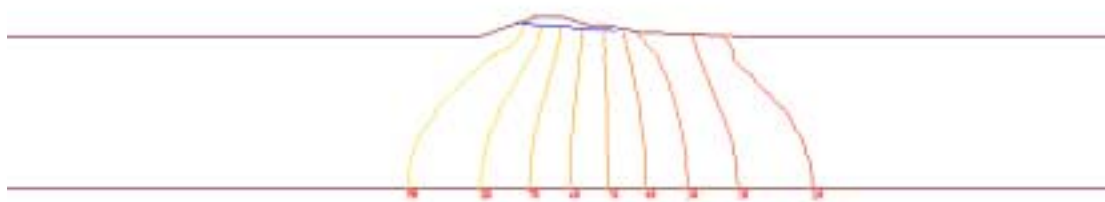


图 B2.2 设计水位下断面 05+687 渗流计算成果

以三角形单元为例，桩号 05+687 断面共剖分单元个数为 540 个，结点个数为 319 个。各单元的结点组成信息如表 B2-1 所列。各结点的坐标及相应的计算成果如表 B2-2 所列。设计水位下的渗流计算成果如图 B2.2 所示。

表 B2-1 05+687 桩号各单元的结点编号

| Element_ NO | Node _1 | Node _2 | Node _3 | Material | Element_ NO | Node _1 | Node _2 | Node _3 | Material |
|-------------|---------|---------|---------|----------|-------------|---------|---------|---------|----------|
| 1 | 2 | 1 | 4 | 4 | 251 | 169 | 168 | 170 | 3 |
| 2 | 4 | 5 | 2 | 4 | 252 | 170 | 171 | 169 | 3 |
| 3 | 3 | 2 | 5 | 4 | 253 | 170 | 72 | 75 | 3 |
| 4 | 5 | 6 | 3 | 4 | 254 | 75 | 172 | 170 | 3 |
| 5 | 5 | 4 | 7 | 4 | 255 | 171 | 170 | 172 | 3 |
| 6 | 7 | 8 | 5 | 4 | 256 | 172 | 173 | 171 | 3 |
| 7 | 6 | 5 | 8 | 4 | 257 | 172 | 75 | 78 | 3 |
| 8 | 8 | 9 | 6 | 4 | 258 | 78 | 174 | 172 | 3 |
| 9 | 8 | 7 | 10 | 4 | 259 | 173 | 172 | 174 | 3 |
| 10 | 10 | 11 | 8 | 4 | 260 | 174 | 175 | 173 | 3 |
| 11 | 9 | 8 | 11 | 4 | 261 | 174 | 78 | 81 | 3 |
| 12 | 11 | 12 | 9 | 4 | 262 | 81 | 176 | 174 | 3 |
| 13 | 11 | 10 | 13 | 4 | 263 | 175 | 174 | 176 | 3 |
| 14 | 13 | 14 | 11 | 4 | 264 | 176 | 177 | 175 | 3 |
| 15 | 12 | 11 | 14 | 4 | 265 | 176 | 81 | 84 | 3 |
| 16 | 14 | 15 | 12 | 4 | 266 | 84 | 178 | 176 | 3 |
| 17 | 14 | 13 | 16 | 4 | 267 | 177 | 176 | 178 | 3 |
| 18 | 16 | 17 | 14 | 4 | 268 | 178 | 179 | 177 | 3 |
| 19 | 15 | 14 | 17 | 4 | 269 | 178 | 84 | 87 | 3 |
| 20 | 17 | 18 | 15 | 4 | 270 | 87 | 180 | 178 | 3 |
| 21 | 17 | 16 | 19 | 4 | 271 | 179 | 178 | 180 | 3 |
| 22 | 19 | 20 | 17 | 4 | 272 | 180 | 181 | 179 | 3 |
| 23 | 18 | 17 | 20 | 4 | 273 | 180 | 87 | 90 | 3 |
| 24 | 20 | 21 | 18 | 4 | 274 | 90 | 182 | 180 | 3 |
| 25 | 20 | 19 | 22 | 4 | 275 | 181 | 180 | 182 | 3 |
| 26 | 22 | 23 | 20 | 4 | 276 | 182 | 183 | 181 | 3 |
| 27 | 21 | 20 | 23 | 4 | 277 | 182 | 90 | 93 | 3 |
| 28 | 23 | 24 | 21 | 4 | 278 | 93 | 184 | 182 | 3 |
| 29 | 23 | 22 | 25 | 4 | 279 | 183 | 182 | 184 | 3 |
| 30 | 25 | 26 | 23 | 4 | 280 | 184 | 185 | 183 | 3 |

| Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material | Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material |
|-------------|--------|--------|--------|----------|-------------|--------|--------|--------|----------|
| 31 | 24 | 23 | 26 | 4 | 281 | 184 | 93 | 96 | 3 |
| 32 | 26 | 27 | 24 | 4 | 282 | 96 | 186 | 184 | 3 |
| 33 | 26 | 25 | 28 | 4 | 283 | 185 | 184 | 186 | 3 |
| 34 | 28 | 29 | 26 | 4 | 284 | 186 | 187 | 185 | 3 |
| 35 | 27 | 26 | 29 | 4 | 285 | 186 | 96 | 99 | 3 |
| 36 | 29 | 30 | 27 | 4 | 286 | 99 | 188 | 186 | 3 |
| 37 | 29 | 28 | 31 | 4 | 287 | 187 | 186 | 188 | 3 |
| 38 | 31 | 32 | 29 | 4 | 288 | 188 | 189 | 187 | 3 |
| 39 | 30 | 29 | 32 | 4 | 289 | 188 | 99 | 102 | 3 |
| 40 | 32 | 33 | 30 | 4 | 290 | 102 | 190 | 188 | 3 |
| 41 | 32 | 31 | 34 | 4 | 291 | 189 | 188 | 190 | 3 |
| 42 | 34 | 35 | 32 | 4 | 292 | 190 | 191 | 189 | 3 |
| 43 | 33 | 32 | 35 | 4 | 293 | 190 | 102 | 105 | 3 |
| 44 | 35 | 36 | 33 | 4 | 294 | 105 | 192 | 190 | 3 |
| 45 | 35 | 34 | 37 | 4 | 295 | 191 | 190 | 192 | 3 |
| 46 | 37 | 38 | 35 | 4 | 296 | 192 | 193 | 191 | 3 |
| 47 | 36 | 35 | 38 | 4 | 297 | 192 | 105 | 108 | 3 |
| 48 | 38 | 39 | 36 | 4 | 298 | 108 | 194 | 192 | 3 |
| 49 | 38 | 37 | 40 | 4 | 299 | 193 | 192 | 194 | 3 |
| 50 | 40 | 41 | 38 | 4 | 300 | 194 | 195 | 193 | 3 |
| 51 | 39 | 38 | 41 | 4 | 301 | 194 | 108 | 111 | 3 |
| 52 | 41 | 42 | 39 | 4 | 302 | 111 | 196 | 194 | 3 |
| 53 | 41 | 40 | 43 | 4 | 303 | 195 | 194 | 196 | 3 |
| 54 | 43 | 44 | 41 | 4 | 304 | 196 | 197 | 195 | 3 |
| 55 | 42 | 41 | 44 | 4 | 305 | 196 | 111 | 114 | 3 |
| 56 | 44 | 45 | 42 | 4 | 306 | 114 | 198 | 196 | 3 |
| 57 | 44 | 43 | 46 | 4 | 307 | 197 | 196 | 198 | 3 |
| 58 | 46 | 47 | 44 | 4 | 308 | 198 | 199 | 197 | 3 |
| 59 | 45 | 44 | 47 | 4 | 309 | 198 | 114 | 117 | 3 |
| 60 | 47 | 48 | 45 | 4 | 310 | 117 | 200 | 198 | 3 |
| 61 | 47 | 46 | 49 | 4 | 311 | 199 | 198 | 200 | 3 |
| 62 | 49 | 50 | 47 | 4 | 312 | 200 | 201 | 199 | 3 |

| Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material | Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material |
|-------------|--------|--------|--------|----------|-------------|--------|--------|--------|----------|
| 63 | 48 | 47 | 50 | 4 | 313 | 200 | 117 | 120 | 3 |
| 64 | 50 | 51 | 48 | 4 | 314 | 120 | 202 | 200 | 3 |
| 65 | 50 | 49 | 52 | 4 | 315 | 201 | 200 | 202 | 3 |
| 66 | 52 | 53 | 50 | 4 | 316 | 202 | 203 | 201 | 3 |
| 67 | 51 | 50 | 53 | 4 | 317 | 202 | 120 | 123 | 3 |
| 68 | 53 | 54 | 51 | 4 | 318 | 123 | 204 | 202 | 3 |
| 69 | 53 | 52 | 55 | 4 | 319 | 203 | 202 | 204 | 3 |
| 70 | 55 | 56 | 53 | 4 | 320 | 204 | 205 | 203 | 3 |
| 71 | 54 | 53 | 56 | 4 | 321 | 206 | 125 | 127 | 2 |
| 72 | 56 | 57 | 54 | 4 | 322 | 127 | 208 | 206 | 2 |
| 73 | 56 | 55 | 58 | 4 | 323 | 207 | 206 | 208 | 2 |
| 74 | 58 | 59 | 56 | 4 | 324 | 208 | 209 | 207 | 2 |
| 75 | 57 | 56 | 59 | 4 | 325 | 208 | 127 | 129 | 2 |
| 76 | 59 | 60 | 57 | 4 | 326 | 129 | 210 | 208 | 2 |
| 77 | 59 | 58 | 61 | 4 | 327 | 209 | 208 | 210 | 2 |
| 78 | 61 | 62 | 59 | 4 | 328 | 210 | 211 | 209 | 2 |
| 79 | 60 | 59 | 62 | 4 | 329 | 210 | 129 | 131 | 2 |
| 80 | 62 | 63 | 60 | 4 | 330 | 131 | 212 | 210 | 2 |
| 81 | 62 | 61 | 64 | 4 | 331 | 211 | 210 | 212 | 2 |
| 82 | 64 | 65 | 62 | 4 | 332 | 212 | 213 | 211 | 2 |
| 83 | 63 | 62 | 65 | 4 | 333 | 212 | 131 | 133 | 2 |
| 84 | 65 | 66 | 63 | 4 | 334 | 133 | 214 | 212 | 2 |
| 85 | 65 | 64 | 67 | 4 | 335 | 213 | 212 | 214 | 2 |
| 86 | 67 | 68 | 65 | 4 | 336 | 214 | 215 | 213 | 2 |
| 87 | 66 | 65 | 68 | 4 | 337 | 214 | 133 | 135 | 2 |
| 88 | 68 | 69 | 66 | 4 | 338 | 135 | 216 | 214 | 2 |
| 89 | 68 | 67 | 70 | 4 | 339 | 215 | 214 | 216 | 2 |
| 90 | 70 | 71 | 68 | 4 | 340 | 216 | 217 | 215 | 2 |
| 91 | 69 | 68 | 71 | 4 | 341 | 216 | 135 | 137 | 2 |
| 92 | 71 | 72 | 69 | 4 | 342 | 137 | 218 | 216 | 2 |
| 93 | 71 | 70 | 73 | 4 | 343 | 217 | 216 | 218 | 2 |
| 94 | 73 | 74 | 71 | 4 | 344 | 218 | 219 | 217 | 2 |

| Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material | Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material |
|-------------|--------|--------|--------|----------|-------------|--------|--------|--------|----------|
| 95 | 72 | 71 | 74 | 4 | 345 | 218 | 137 | 139 | 2 |
| 96 | 74 | 75 | 72 | 4 | 346 | 139 | 220 | 218 | 2 |
| 97 | 74 | 73 | 76 | 4 | 347 | 219 | 218 | 220 | 2 |
| 98 | 76 | 77 | 74 | 4 | 348 | 220 | 221 | 219 | 2 |
| 99 | 75 | 74 | 77 | 4 | 349 | 220 | 139 | 141 | 2 |
| 100 | 77 | 78 | 75 | 4 | 350 | 141 | 222 | 220 | 2 |
| 101 | 77 | 76 | 79 | 4 | 351 | 221 | 220 | 222 | 2 |
| 102 | 79 | 80 | 77 | 4 | 352 | 222 | 223 | 221 | 2 |
| 103 | 78 | 77 | 80 | 4 | 353 | 222 | 141 | 143 | 2 |
| 104 | 80 | 81 | 78 | 4 | 354 | 143 | 224 | 222 | 2 |
| 105 | 80 | 79 | 82 | 4 | 355 | 223 | 222 | 224 | 2 |
| 106 | 82 | 83 | 80 | 4 | 356 | 224 | 225 | 223 | 2 |
| 107 | 81 | 80 | 83 | 4 | 357 | 224 | 143 | 145 | 2 |
| 108 | 83 | 84 | 81 | 4 | 358 | 145 | 226 | 224 | 2 |
| 109 | 83 | 82 | 85 | 4 | 359 | 225 | 224 | 226 | 2 |
| 110 | 85 | 86 | 83 | 4 | 360 | 226 | 227 | 225 | 2 |
| 111 | 84 | 83 | 86 | 4 | 361 | 226 | 145 | 147 | 2 |
| 112 | 86 | 87 | 84 | 4 | 362 | 147 | 228 | 226 | 2 |
| 113 | 86 | 85 | 88 | 4 | 363 | 227 | 226 | 228 | 2 |
| 114 | 88 | 89 | 86 | 4 | 364 | 228 | 229 | 227 | 2 |
| 115 | 87 | 86 | 89 | 4 | 365 | 228 | 147 | 149 | 2 |
| 116 | 89 | 90 | 87 | 4 | 366 | 149 | 230 | 228 | 2 |
| 117 | 89 | 88 | 91 | 4 | 367 | 229 | 228 | 230 | 2 |
| 118 | 91 | 92 | 89 | 4 | 368 | 230 | 231 | 229 | 2 |
| 119 | 90 | 89 | 92 | 4 | 369 | 230 | 149 | 151 | 2 |
| 120 | 92 | 93 | 90 | 4 | 370 | 151 | 232 | 230 | 2 |
| 121 | 92 | 91 | 94 | 4 | 371 | 231 | 230 | 232 | 2 |
| 122 | 94 | 95 | 92 | 4 | 372 | 232 | 233 | 231 | 2 |
| 123 | 93 | 92 | 95 | 4 | 373 | 232 | 151 | 153 | 2 |
| 124 | 95 | 96 | 93 | 4 | 374 | 153 | 234 | 232 | 2 |
| 125 | 95 | 94 | 97 | 4 | 375 | 233 | 232 | 234 | 2 |
| 126 | 97 | 98 | 95 | 4 | 376 | 234 | 235 | 233 | 2 |

| Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material | Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material |
|-------------|--------|--------|--------|----------|-------------|--------|--------|--------|----------|
| 127 | 96 | 95 | 98 | 4 | 377 | 234 | 153 | 155 | 2 |
| 128 | 98 | 99 | 96 | 4 | 378 | 155 | 236 | 234 | 2 |
| 129 | 98 | 97 | 100 | 4 | 379 | 235 | 234 | 236 | 2 |
| 130 | 100 | 101 | 98 | 4 | 380 | 236 | 237 | 235 | 2 |
| 131 | 99 | 98 | 101 | 4 | 381 | 236 | 155 | 157 | 2 |
| 132 | 101 | 102 | 99 | 4 | 382 | 157 | 238 | 236 | 2 |
| 133 | 101 | 100 | 103 | 4 | 383 | 237 | 236 | 238 | 2 |
| 134 | 103 | 104 | 101 | 4 | 384 | 238 | 239 | 237 | 2 |
| 135 | 102 | 101 | 104 | 4 | 385 | 238 | 157 | 159 | 2 |
| 136 | 104 | 105 | 102 | 4 | 386 | 159 | 240 | 238 | 2 |
| 137 | 104 | 103 | 106 | 4 | 387 | 239 | 238 | 240 | 2 |
| 138 | 106 | 107 | 104 | 4 | 388 | 240 | 241 | 239 | 2 |
| 139 | 105 | 104 | 107 | 4 | 389 | 240 | 159 | 161 | 2 |
| 140 | 107 | 108 | 105 | 4 | 390 | 161 | 242 | 240 | 2 |
| 141 | 107 | 106 | 109 | 4 | 391 | 241 | 240 | 242 | 2 |
| 142 | 109 | 110 | 107 | 4 | 392 | 242 | 243 | 241 | 2 |
| 143 | 108 | 107 | 110 | 4 | 393 | 242 | 161 | 163 | 2 |
| 144 | 110 | 111 | 108 | 4 | 394 | 163 | 244 | 242 | 2 |
| 145 | 110 | 109 | 112 | 4 | 395 | 243 | 242 | 244 | 2 |
| 146 | 112 | 113 | 110 | 4 | 396 | 244 | 245 | 243 | 2 |
| 147 | 111 | 110 | 113 | 4 | 397 | 244 | 163 | 165 | 2 |
| 148 | 113 | 114 | 111 | 4 | 398 | 165 | 246 | 244 | 2 |
| 149 | 113 | 112 | 115 | 4 | 399 | 245 | 244 | 246 | 2 |
| 150 | 115 | 116 | 113 | 4 | 400 | 246 | 247 | 245 | 2 |
| 151 | 114 | 113 | 116 | 4 | 401 | 246 | 165 | 167 | 2 |
| 152 | 116 | 117 | 114 | 4 | 402 | 167 | 248 | 246 | 2 |
| 153 | 116 | 115 | 118 | 4 | 403 | 247 | 246 | 248 | 2 |
| 154 | 118 | 119 | 116 | 4 | 404 | 248 | 249 | 247 | 2 |
| 155 | 117 | 116 | 119 | 4 | 405 | 248 | 167 | 169 | 2 |
| 156 | 119 | 120 | 117 | 4 | 406 | 169 | 250 | 248 | 2 |
| 157 | 119 | 118 | 121 | 4 | 407 | 249 | 248 | 250 | 2 |
| 158 | 121 | 122 | 119 | 4 | 408 | 250 | 251 | 249 | 2 |

| Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material | Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material |
|-------------|--------|--------|--------|----------|-------------|--------|--------|--------|----------|
| 159 | 120 | 119 | 122 | 4 | 409 | 250 | 169 | 171 | 2 |
| 160 | 122 | 123 | 120 | 4 | 410 | 171 | 252 | 250 | 2 |
| 161 | 124 | 3 | 6 | 3 | 411 | 251 | 250 | 252 | 2 |
| 162 | 6 | 126 | 124 | 3 | 412 | 252 | 253 | 251 | 2 |
| 163 | 125 | 124 | 126 | 3 | 413 | 252 | 171 | 173 | 2 |
| 164 | 126 | 127 | 125 | 3 | 414 | 173 | 254 | 252 | 2 |
| 165 | 126 | 6 | 9 | 3 | 415 | 253 | 252 | 254 | 2 |
| 166 | 9 | 128 | 126 | 3 | 416 | 254 | 255 | 253 | 2 |
| 167 | 127 | 126 | 128 | 3 | 417 | 254 | 173 | 175 | 2 |
| 168 | 128 | 129 | 127 | 3 | 418 | 175 | 256 | 254 | 2 |
| 169 | 128 | 9 | 12 | 3 | 419 | 255 | 254 | 256 | 2 |
| 170 | 12 | 130 | 128 | 3 | 420 | 256 | 257 | 255 | 2 |
| 171 | 129 | 128 | 130 | 3 | 421 | 256 | 175 | 177 | 2 |
| 172 | 130 | 131 | 129 | 3 | 422 | 177 | 258 | 256 | 2 |
| 173 | 130 | 12 | 15 | 3 | 423 | 257 | 256 | 258 | 2 |
| 174 | 15 | 132 | 130 | 3 | 424 | 258 | 259 | 257 | 2 |
| 175 | 131 | 130 | 132 | 3 | 425 | 258 | 177 | 179 | 2 |
| 176 | 132 | 133 | 131 | 3 | 426 | 179 | 260 | 258 | 2 |
| 177 | 132 | 15 | 18 | 3 | 427 | 259 | 258 | 260 | 2 |
| 178 | 18 | 134 | 132 | 3 | 428 | 260 | 261 | 259 | 2 |
| 179 | 133 | 132 | 134 | 3 | 429 | 260 | 179 | 181 | 2 |
| 180 | 134 | 135 | 133 | 3 | 430 | 181 | 262 | 260 | 2 |
| 181 | 134 | 18 | 21 | 3 | 431 | 261 | 260 | 262 | 2 |
| 182 | 21 | 136 | 134 | 3 | 432 | 262 | 263 | 261 | 2 |
| 183 | 135 | 134 | 136 | 3 | 433 | 262 | 181 | 183 | 2 |
| 184 | 136 | 137 | 135 | 3 | 434 | 183 | 264 | 262 | 2 |
| 185 | 136 | 21 | 24 | 3 | 435 | 263 | 262 | 264 | 2 |
| 186 | 24 | 138 | 136 | 3 | 436 | 264 | 265 | 263 | 2 |
| 187 | 137 | 136 | 138 | 3 | 437 | 264 | 183 | 185 | 2 |
| 188 | 138 | 139 | 137 | 3 | 438 | 185 | 266 | 264 | 2 |
| 189 | 138 | 24 | 27 | 3 | 439 | 265 | 264 | 266 | 2 |
| 190 | 27 | 140 | 138 | 3 | 440 | 266 | 267 | 265 | 2 |

| Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material | Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material |
|-------------|--------|--------|--------|----------|-------------|--------|--------|--------|----------|
| 191 | 139 | 138 | 140 | 3 | 441 | 266 | 185 | 187 | 2 |
| 192 | 140 | 141 | 139 | 3 | 442 | 187 | 268 | 266 | 2 |
| 193 | 140 | 27 | 30 | 3 | 443 | 267 | 266 | 268 | 2 |
| 194 | 30 | 142 | 140 | 3 | 444 | 268 | 269 | 267 | 2 |
| 195 | 141 | 140 | 142 | 3 | 445 | 268 | 187 | 189 | 2 |
| 196 | 142 | 143 | 141 | 3 | 446 | 189 | 270 | 268 | 2 |
| 197 | 142 | 30 | 33 | 3 | 447 | 269 | 268 | 270 | 2 |
| 198 | 33 | 144 | 142 | 3 | 448 | 270 | 271 | 269 | 2 |
| 199 | 143 | 142 | 144 | 3 | 449 | 270 | 189 | 191 | 2 |
| 200 | 144 | 145 | 143 | 3 | 450 | 191 | 272 | 270 | 2 |
| 201 | 144 | 33 | 36 | 3 | 451 | 271 | 270 | 272 | 2 |
| 202 | 36 | 146 | 144 | 3 | 452 | 272 | 273 | 271 | 2 |
| 203 | 145 | 144 | 146 | 3 | 453 | 272 | 191 | 193 | 2 |
| 204 | 146 | 147 | 145 | 3 | 454 | 193 | 274 | 272 | 2 |
| 205 | 146 | 36 | 39 | 3 | 455 | 273 | 272 | 274 | 2 |
| 206 | 39 | 148 | 146 | 3 | 456 | 274 | 275 | 273 | 2 |
| 207 | 147 | 146 | 148 | 3 | 457 | 274 | 193 | 195 | 2 |
| 208 | 148 | 149 | 147 | 3 | 458 | 195 | 276 | 274 | 2 |
| 209 | 148 | 39 | 42 | 3 | 459 | 275 | 274 | 276 | 2 |
| 210 | 42 | 150 | 148 | 3 | 460 | 276 | 277 | 275 | 2 |
| 211 | 149 | 148 | 150 | 3 | 461 | 276 | 195 | 197 | 2 |
| 212 | 150 | 151 | 149 | 3 | 462 | 197 | 278 | 276 | 2 |
| 213 | 150 | 42 | 45 | 3 | 463 | 277 | 276 | 278 | 2 |
| 214 | 45 | 152 | 150 | 3 | 464 | 278 | 279 | 277 | 2 |
| 215 | 151 | 150 | 152 | 3 | 465 | 278 | 197 | 199 | 2 |
| 216 | 152 | 153 | 151 | 3 | 466 | 199 | 280 | 278 | 2 |
| 217 | 152 | 45 | 48 | 3 | 467 | 279 | 278 | 280 | 2 |
| 218 | 48 | 154 | 152 | 3 | 468 | 280 | 281 | 279 | 2 |
| 219 | 153 | 152 | 154 | 3 | 469 | 280 | 199 | 201 | 2 |
| 220 | 154 | 155 | 153 | 3 | 470 | 201 | 282 | 280 | 2 |
| 221 | 154 | 48 | 51 | 3 | 471 | 281 | 280 | 282 | 2 |
| 222 | 51 | 156 | 154 | 3 | 472 | 282 | 283 | 281 | 2 |

| Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material | Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material |
|-------------|--------|--------|--------|----------|-------------|--------|--------|--------|----------|
| 223 | 155 | 154 | 156 | 3 | 473 | 282 | 201 | 203 | 2 |
| 224 | 156 | 157 | 155 | 3 | 474 | 203 | 284 | 282 | 2 |
| 225 | 156 | 51 | 54 | 3 | 475 | 283 | 282 | 284 | 2 |
| 226 | 54 | 158 | 156 | 3 | 476 | 284 | 285 | 283 | 2 |
| 227 | 157 | 156 | 158 | 3 | 477 | 284 | 203 | 205 | 2 |
| 228 | 158 | 159 | 157 | 3 | 478 | 205 | 286 | 284 | 2 |
| 229 | 158 | 54 | 57 | 3 | 479 | 285 | 284 | 286 | 2 |
| 230 | 57 | 160 | 158 | 3 | 480 | 286 | 287 | 285 | 2 |
| 231 | 159 | 158 | 160 | 3 | 481 | 288 | 237 | 239 | 1 |
| 232 | 160 | 161 | 159 | 3 | 482 | 239 | 290 | 288 | 1 |
| 233 | 160 | 57 | 60 | 3 | 483 | 289 | 288 | 290 | 1 |
| 234 | 60 | 162 | 160 | 3 | 484 | 290 | 291 | 289 | 1 |
| 235 | 161 | 160 | 162 | 3 | 485 | 290 | 239 | 241 | 1 |
| 236 | 162 | 163 | 161 | 3 | 486 | 241 | 292 | 290 | 1 |
| 237 | 162 | 60 | 63 | 3 | 487 | 291 | 290 | 292 | 1 |
| 238 | 63 | 164 | 162 | 3 | 488 | 292 | 293 | 291 | 1 |
| 239 | 163 | 162 | 164 | 3 | 489 | 292 | 241 | 243 | 1 |
| 240 | 164 | 165 | 163 | 3 | 490 | 243 | 294 | 292 | 1 |
| 241 | 164 | 63 | 66 | 3 | 491 | 293 | 292 | 294 | 1 |
| 242 | 66 | 166 | 164 | 3 | 492 | 294 | 295 | 293 | 1 |
| 243 | 165 | 164 | 166 | 3 | 493 | 294 | 243 | 245 | 1 |
| 244 | 166 | 167 | 165 | 3 | 494 | 245 | 296 | 294 | 1 |
| 245 | 166 | 66 | 69 | 3 | 495 | 295 | 294 | 296 | 1 |
| 246 | 69 | 168 | 166 | 3 | 496 | 296 | 297 | 295 | 1 |
| 247 | 167 | 166 | 168 | 3 | 497 | 296 | 245 | 247 | 1 |
| 248 | 168 | 169 | 167 | 3 | 498 | 247 | 298 | 296 | 1 |
| 249 | 168 | 69 | 72 | 3 | 499 | 297 | 296 | 298 | 1 |
| 250 | 72 | 170 | 168 | 3 | 500 | 298 | 299 | 297 | 1 |
| | | | | | 501 | 298 | 247 | 249 | 1 |
| | | | | | 502 | 249 | 300 | 298 | 1 |
| | | | | | 503 | 299 | 298 | 300 | 1 |
| | | | | | 504 | 300 | 301 | 299 | 1 |

| Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material | Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material |
|-------------|--------|--------|--------|----------|-------------|--------|--------|--------|----------|
| | | | | | 505 | 300 | 249 | 251 | 1 |
| | | | | | 506 | 251 | 302 | 300 | 1 |
| | | | | | 507 | 301 | 300 | 302 | 1 |
| | | | | | 508 | 302 | 303 | 301 | 1 |
| | | | | | 509 | 302 | 251 | 253 | 1 |
| | | | | | 510 | 253 | 304 | 302 | 1 |
| | | | | | 511 | 303 | 302 | 304 | 1 |
| | | | | | 512 | 304 | 305 | 303 | 1 |
| | | | | | 513 | 304 | 253 | 255 | 1 |
| | | | | | 514 | 255 | 306 | 304 | 1 |
| | | | | | 515 | 305 | 304 | 306 | 1 |
| | | | | | 516 | 306 | 307 | 305 | 1 |
| | | | | | 517 | 306 | 255 | 257 | 1 |
| | | | | | 518 | 257 | 308 | 306 | 1 |
| | | | | | 519 | 307 | 306 | 308 | 1 |
| | | | | | 520 | 308 | 309 | 307 | 1 |
| | | | | | 521 | 308 | 257 | 259 | 1 |
| | | | | | 522 | 259 | 310 | 308 | 1 |
| | | | | | 523 | 309 | 308 | 310 | 1 |
| | | | | | 524 | 310 | 311 | 309 | 1 |
| | | | | | 525 | 310 | 259 | 261 | 1 |
| | | | | | 526 | 261 | 312 | 310 | 1 |
| | | | | | 527 | 311 | 310 | 312 | 1 |
| | | | | | 528 | 312 | 313 | 311 | 1 |
| | | | | | 529 | 312 | 261 | 263 | 1 |
| | | | | | 530 | 263 | 314 | 312 | 1 |
| | | | | | 531 | 313 | 312 | 314 | 1 |
| | | | | | 532 | 314 | 315 | 313 | 1 |
| | | | | | 533 | 314 | 263 | 265 | 1 |
| | | | | | 534 | 265 | 316 | 314 | 1 |
| | | | | | 535 | 315 | 314 | 316 | 1 |
| | | | | | 536 | 316 | 317 | 315 | 1 |

| Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material | Element_ NO | Node_1 | Node_2 | Node_3 | Material |
|-------------|--------|--------|--------|----------|-------------|--------|--------|--------|----------|
| | | | | | 537 | 316 | 265 | 267 | 1 |
| | | | | | 538 | 267 | 318 | 316 | 1 |
| | | | | | 539 | 317 | 316 | 318 | 1 |
| | | | | | 540 | 318 | 319 | 317 | 1 |

表 B2-2 05+687 桩号各结点的坐标及水头、渗透梯度等计算成果

| iNN | X_Coord | Y_Coord | WaterHead | Percent | SeepgradX | SeepgradY |
|-----|----------|---------|-----------|----------|---------------|--------------|
| 1 | 0 | -37.44 | 19.28912 | 99.98152 | -1.321484E-05 | 3.248526E-06 |
| 2 | 0 | -29.22 | 19.28914 | 99.98209 | -1.290436E-05 | 6.032977E-06 |
| 3 | 0 | -21 | 19.28922 | 99.98375 | -1.197292E-05 | 1.353482E-05 |
| 4 | 32.76377 | -37.44 | 19.28868 | 99.97249 | -2.538613E-05 | 4.486059E-06 |
| 5 | 32.76377 | -29.22 | 19.28872 | 99.97337 | -3.078182E-05 | 9.861596E-06 |
| 6 | 32.76377 | -21 | 19.28884 | 99.97583 | -2.819016E-05 | 2.079528E-05 |
| 7 | 62.25117 | -37.44 | 19.2872 | 99.94159 | -7.345413E-05 | 8.662736E-06 |
| 8 | 62.25117 | -29.22 | 19.28729 | 99.94337 | -8.310755E-05 | 1.980054E-05 |
| 9 | 62.25117 | -21 | 19.28754 | 99.94863 | -7.559707E-05 | 4.270356E-05 |
| 10 | 88.78983 | -37.44 | 19.28398 | 99.87429 | -1.662367E-04 | 1.833097E-05 |
| 11 | 88.78983 | -29.22 | 19.28416 | 99.87811 | -1.841032E-04 | 4.219217E-05 |
| 12 | 88.78983 | -21 | 19.28471 | 99.88947 | -1.671111E-04 | 9.058725E-05 |
| 13 | 112.6746 | -37.44 | 19.27778 | 99.74492 | -3.407288E-04 | 3.789947E-05 |
| 14 | 112.6746 | -29.22 | 19.27816 | 99.75276 | -3.722188E-04 | 8.550584E-05 |
| 15 | 112.6746 | -21 | 19.27926 | 99.77582 | -3.375183E-04 | 1.820164E-04 |
| 16 | 134.1709 | -37.44 | 19.26679 | 99.51544 | -6.495334E-04 | 7.309183E-05 |
| 17 | 134.1709 | -29.22 | 19.2675 | 99.53033 | -7.013742E-04 | 1.620396E-04 |
| 18 | 134.1709 | -21 | 19.2696 | 99.57409 | -6.355371E-04 | 3.430112E-04 |
| 19 | 153.5176 | -37.44 | 19.24857 | 99.13512 | -1.162421E-03 | 1.317973E-04 |
| 20 | 153.5176 | -29.22 | 19.24984 | 99.1616 | -1.242112E-03 | 2.886161E-04 |
| 21 | 153.5176 | -21 | 19.25357 | 99.23952 | -1.124853E-03 | 6.08118E-04 |
| 22 | 170.9296 | -37.44 | 19.22014 | 98.54162 | -1.964151E-03 | 2.246897E-04 |
| 23 | 170.9296 | -29.22 | 19.22228 | 98.58621 | -2.07899E-03 | 4.852679E-04 |
| 24 | 170.9296 | -21 | 19.22855 | 98.71714 | -1.882776E-03 | 1.018547E-03 |
| 25 | 186.6004 | -37.44 | 19.1782 | 97.66587 | -3.147822E-03 | 3.612052E-04 |
| 26 | 186.6004 | -29.22 | 19.18158 | 97.73655 | -3.30366E-03 | 7.721437E-04 |
| 27 | 186.6004 | -21 | 19.19156 | 97.9448 | -2.995026E-03 | 1.616581E-03 |
| 28 | 200.7041 | -37.44 | 19.11939 | 96.4382 | -4.801578E-03 | 5.500063E-04 |
| 29 | 200.7041 | -29.22 | 19.12448 | 96.54443 | -5.001958E-03 | 1.164287E-03 |
| 30 | 200.7041 | -21 | 19.1395 | 96.85809 | -4.548838E-03 | 2.434064E-03 |

| iNN | X_Coord | Y_Coord | WaterHead | Percent | SeepgradX | SeepgradY |
|-----|----------|---------|-----------|----------|---------------|--------------|
| 31 | 213.3975 | -37.44 | 19.04086 | 94.79879 | -6.989238E-03 | 7.920216E-04 |
| 32 | 213.3975 | -29.22 | 19.04808 | 94.94955 | -7.236233E-03 | 1.660848E-03 |
| 33 | 213.3975 | -21 | 19.06949 | 95.39636 | -6.620328E-03 | 3.476825E-03 |
| 34 | 224.8215 | -37.44 | 18.94076 | 92.70891 | -9.724406E-03 | 1.074798E-03 |
| 35 | 224.8215 | -29.22 | 18.9504 | 92.9102 | -1.001898E-02 | 2.236262E-03 |
| 36 | 224.8215 | -21 | 18.97917 | 93.51075 | -9.25812E-03 | 4.701607E-03 |
| 37 | 235.1031 | -37.44 | 18.81882 | 90.16326 | -1.294352E-02 | 1.370182E-03 |
| 38 | 235.1031 | -29.22 | 18.83089 | 90.41531 | -1.328994E-02 | 2.831129E-03 |
| 39 | 235.1031 | -21 | 18.8672 | 91.17324 | -1.246186E-02 | 5.995111E-03 |
| 40 | 244.3566 | -37.44 | 18.6768 | 87.19835 | -1.649884E-02 | 1.633854E-03 |
| 41 | 244.3566 | -29.22 | 18.69091 | 87.4929 | -1.690435E-02 | .0033577 |
| 42 | 244.3566 | -21 | 18.73374 | 88.38704 | -1.615219E-02 | 7.173929E-03 |
| 43 | 252.6847 | -37.44 | 18.51839 | 83.89127 | -2.017174E-02 | 1.82281E-03 |
| 44 | 252.6847 | -29.22 | 18.53381 | 84.21321 | -.0206433 | 3.726253E-03 |
| 45 | 252.6847 | -21 | 18.58096 | 85.1975 | -2.014467E-02 | 8.026691E-03 |
| 46 | 260.18 | -37.44 | 18.34877 | 80.35005 | -.0236374 | 1.907736E-03 |
| 47 | 260.18 | -29.22 | 18.36458 | 80.68015 | -2.412943E-02 | 3.88253E-03 |
| 48 | 260.18 | -21 | 18.41322 | 81.69551 | -2.401166E-02 | 8.415847E-03 |
| 49 | 265.812 | -37.44 | 18.20401 | 77.32796 | -2.658288E-02 | 1.893736E-03 |
| 50 | 265.812 | -29.22 | 18.21945 | 77.65038 | -2.711005E-02 | 3.840879E-03 |
| 51 | 265.812 | -21 | 18.2672 | 78.64718 | -2.739096E-02 | 8.377982E-03 |
| 52 | 271.444 | -37.44 | 18.04475 | 74.00313 | -2.913952E-02 | 1.795429E-03 |
| 53 | 271.444 | -29.22 | 18.05917 | 74.30408 | -2.976144E-02 | 3.62346E-03 |
| 54 | 271.444 | -21 | 18.10388 | 75.23753 | -3.050684E-02 | 7.932134E-03 |
| 55 | 277.076 | -37.44 | 17.87196 | 70.39573 | -3.148841E-02 | 1.615136E-03 |
| 56 | 277.076 | -29.22 | 17.88466 | 70.661 | -3.218569E-02 | 3.230582E-03 |
| 57 | 277.076 | -21 | 17.92406 | 71.48359 | -3.340601E-02 | 7.048272E-03 |
| 58 | 282.708 | -37.44 | 17.68723 | 66.53914 | -3.351469E-02 | 1.358967E-03 |
| 59 | 282.708 | -29.22 | 17.69763 | 66.75632 | -3.424861E-02 | 2.680034E-03 |
| 60 | 282.708 | -21 | 17.72978 | 67.42759 | -3.584184E-02 | 5.783037E-03 |
| 61 | 288.34 | -37.44 | 17.49273 | 62.4786 | -3.512245E-02 | 1.043396E-03 |
| 62 | 288.34 | -29.22 | 17.50039 | 62.63859 | -3.584905E-02 | 2.011882E-03 |

| iNN | X_Coord | Y_Coord | WaterHead | Percent | SeepgradX | SeepgradY |
|-----|----------|---------|-----------|----------|---------------|---------------|
| 63 | 288.34 | -21 | 17.52393 | 63.13012 | -.0376736 | 4.26274E-03 |
| 64 | 293.972 | -37.44 | 17.29104 | 58.26797 | -3.624867E-02 | 6.883781E-04 |
| 65 | 293.972 | -29.22 | 17.29569 | 58.36518 | -3.692776E-02 | 1.27261E-03 |
| 66 | 293.972 | -21 | 17.30987 | 58.66107 | -3.885933E-02 | 2.61085E-03 |
| 67 | 299.604 | -37.44 | 17.08496 | 53.96585 | -.0368591 | 3.154937E-04 |
| 68 | 299.604 | -29.22 | 17.08653 | 53.99846 | -3.745821E-02 | 5.054551E-04 |
| 69 | 299.604 | -21 | 17.09108 | 54.09348 | -3.940355E-02 | 9.17409E-04 |
| 70 | 305.236 | -37.44 | 16.87743 | 49.63318 | -3.694699E-02 | -5.592106E-05 |
| 71 | 305.236 | -29.22 | 16.87596 | 49.60248 | -.0374418 | -2.521475E-04 |
| 72 | 305.236 | -21 | 16.87108 | 49.50066 | -.0393163 | -7.475163E-04 |
| 73 | 310.868 | -37.44 | 16.67128 | 45.32935 | -3.653194E-02 | -4.0769E-04 |
| 74 | 310.868 | -29.22 | 16.66698 | 45.23975 | -.0369018 | -9.627626E-04 |
| 75 | 310.868 | -21 | 16.65336 | 44.95532 | -3.861057E-02 | -2.306947E-03 |
| 76 | 316.5 | -37.44 | 16.46916 | 41.10981 | -3.562257E-02 | -7.234931E-04 |
| 77 | 316.5 | -29.22 | 16.46239 | 40.96837 | -3.583414E-02 | -1.597076E-03 |
| 78 | 316.5 | -21 | 16.44118 | 40.52558 | -3.726497E-02 | -3.683075E-03 |
| 79 | 323.2 | -37.44 | 16.23699 | 36.26279 | -3.416535E-02 | -.0010188 |
| 80 | 323.2 | -29.22 | 16.22781 | 36.07126 | -3.419133E-02 | -2.174347E-03 |
| 81 | 323.2 | -21 | 16.19949 | 35.47998 | -3.525949E-02 | -4.860765E-03 |
| 82 | 329.9 | -37.44 | 16.01701 | 31.6703 | -3.219594E-02 | -1.26708E-03 |
| 83 | 329.9 | -29.22 | 16.00597 | 31.43991 | -3.208468E-02 | -2.640994E-03 |
| 84 | 329.9 | -21 | 15.97231 | 30.7371 | -3.287147E-02 | -5.736335E-03 |
| 85 | 336.6 | -37.44 | 15.81169 | 27.38396 | -2.989051E-02 | -1.46377E-03 |
| 86 | 336.6 | -29.22 | 15.79916 | 27.12237 | -2.968196E-02 | -3.010765E-03 |
| 87 | 336.6 | -21 | 15.76115 | 26.32875 | -3.034714E-02 | -6.432533E-03 |
| 88 | 343.3 | -37.44 | 15.62302 | 23.44505 | -2.731203E-02 | -1.622213E-03 |
| 89 | 343.3 | -29.22 | 15.60928 | 23.15827 | -.0270224 | -3.318234E-03 |
| 90 | 343.3 | -21 | 15.56747 | 22.28535 | -2.762495E-02 | -7.094396E-03 |
| 91 | 350 | -37.44 | 15.4526 | 19.88729 | -2.454475E-02 | -1.736414E-03 |
| 92 | 350 | -29.22 | 15.43806 | 19.58371 | -2.417774E-02 | -3.543658E-03 |
| 93 | 350 | -21 | 15.39348 | 18.65305 | -2.458782E-02 | -7.66199E-03 |
| 94 | 356.2745 | -37.44 | 15.31052 | 16.92117 | -2.169638E-02 | -1.783518E-03 |

| iNN | X_Coord | Y_Coord | WaterHead | Percent | SeepgradX | SeepgradY |
|-----|----------|---------|-----------|----------|---------------|---------------|
| 95 | 356.2745 | -29.22 | 15.2958 | 16.61386 | -2.121483E-02 | -3.621217E-03 |
| 96 | 356.2745 | -21 | 15.25063 | 15.6707 | -2.120082E-02 | -7.850679E-03 |
| 97 | 363.1765 | -37.44 | 15.17405 | 14.07193 | -1.873264E-02 | -1.750608E-03 |
| 98 | 363.1765 | -29.22 | 15.15982 | 13.77496 | -1.811839E-02 | -3.519913E-03 |
| 99 | 363.1765 | -21 | 15.11635 | 12.86737 | -1.769865E-02 | -7.556905E-03 |
| 100 | 370.7687 | -37.44 | 15.04709 | 11.42145 | -1.564471E-02 | -1.633467E-03 |
| 101 | 370.7687 | -29.22 | 15.03406 | 11.14947 | -1.494979E-02 | -3.240811E-03 |
| 102 | 370.7687 | -21 | 14.99455 | 10.32473 | -1.426107E-02 | -6.840713E-03 |
| 103 | 379.1201 | -37.44 | 14.93311 | 9.042006 | -1.260087E-02 | -1.44455E-03 |
| 104 | 379.1201 | -29.22 | 14.92181 | 8.806155 | -1.189492E-02 | -2.824999E-03 |
| 105 | 379.1201 | -21 | 14.88786 | 8.097231 | -1.111036E-02 | -5.852312E-03 |
| 106 | 388.3067 | -37.44 | 14.83468 | 6.987027 | -9.757169E-03 | -1.213557E-03 |
| 107 | 388.3067 | -29.22 | 14.82536 | 6.792569 | -9.101295E-03 | -2.341394E-03 |
| 108 | 388.3067 | -21 | 14.7976 | 6.212839 | -8.359556E-03 | -4.769431E-03 |
| 109 | 398.4119 | -37.44 | 14.75326 | 5.287197 | -7.222712E-03 | -9.74055E-04 |
| 110 | 398.4119 | -29.22 | 14.7459 | 5.133694 | -6.655896E-03 | -1.859994E-03 |
| 111 | 398.4119 | -21 | 14.7241 | 4.678458 | -6.038577E-03 | -3.739694E-03 |
| 112 | 409.5276 | -37.44 | 14.68937 | 3.953447 | -5.045977E-03 | -7.562878E-04 |
| 113 | 409.5276 | -29.22 | 14.68372 | 3.835522 | -4.582417E-03 | -1.435288E-03 |
| 114 | 409.5276 | -21 | 14.66704 | 3.487341 | -4.120879E-03 | -2.861037E-03 |
| 115 | 421.7549 | -37.44 | 14.64295 | 2.984343 | -3.21189E-03 | -5.802099E-04 |
| 116 | 421.7549 | -29.22 | 14.63862 | 2.893953 | -2.845063E-03 | -1.101482E-03 |
| 117 | 421.7549 | -21 | 14.62587 | 2.627681 | -2.540413E-03 | -2.188588E-03 |
| 118 | 435.205 | -37.44 | 14.61402 | 2.380442 | -1.644465E-03 | -4.577328E-04 |
| 119 | 435.205 | -29.22 | 14.61054 | 2.307812 | -1.353326E-03 | -8.793643E-04 |
| 120 | 435.205 | -21 | 14.6003 | 2.093982 | -1.195321E-03 | -1.753651E-03 |
| 121 | 450 | -37.44 | 14.60374 | 2.165696 | -6.849095E-04 | -4.046155E-04 |
| 122 | 450 | -29.22 | 14.60056 | 2.099457 | -6.541948E-04 | -9.226974E-04 |
| 123 | 450 | -21 | 14.59123 | 1.904501 | -5.665735E-04 | -1.730302E-03 |
| 124 | 0 | -10 | 19.2894 | 99.98753 | -9.799553E-06 | 2.115423E-05 |
| 125 | 0 | 1 | 19.28965 | 99.99271 | -6.423074E-06 | 2.72038E-05 |
| 126 | 32.76377 | -10 | 19.28911 | 99.98145 | -2.247214E-05 | 3.181804E-05 |

| iNN | X_Coord | Y_Coord | WaterHead | Percent | SeepgradX | SeepgradY |
|-----|----------|---------|-----------|----------|---------------|--------------|
| 127 | 32.76377 | 1 | 19.28948 | 99.98917 | -1.439963E-05 | 3.99505E-05 |
| 128 | 62.25117 | -10 | 19.28811 | 99.96062 | -5.966216E-05 | 6.548563E-05 |
| 129 | 62.25117 | 1 | 19.2889 | 99.97699 | -3.791293E-05 | 8.223969E-05 |
| 130 | 88.78983 | -10 | 19.28594 | 99.91527 | -1.314766E-04 | 1.383695E-04 |
| 131 | 88.78983 | 1 | 19.28763 | 99.95042 | -8.323146E-05 | 1.735495E-04 |
| 132 | 112.6746 | -10 | 19.28177 | 99.82818 | -2.650429E-04 | 2.771436E-04 |
| 133 | 112.6746 | 1 | 19.28518 | 99.89946 | -1.674408E-04 | 3.468923E-04 |
| 134 | 134.1709 | -10 | 19.27436 | 99.67352 | -4.983439E-04 | 5.21342E-04 |
| 135 | 134.1709 | 1 | 19.28085 | 99.80895 | -3.143525E-04 | 6.513873E-04 |
| 136 | 153.5176 | -10 | 19.26207 | 99.41689 | -8.812936E-04 | 9.232434E-04 |
| 137 | 153.5176 | 1 | 19.27365 | 99.65862 | -5.554368E-04 | 1.152529E-03 |
| 138 | 170.9296 | -10 | 19.24285 | 99.01563 | -1.475407E-03 | 1.545964E-03 |
| 139 | 170.9296 | 1 | 19.26238 | 99.42337 | -9.303494E-04 | 1.93053E-03 |
| 140 | 186.6004 | -10 | 19.21435 | 98.42072 | -2.353136E-03 | 2.457012E-03 |
| 141 | 186.6004 | 1 | 19.24562 | 99.07352 | -1.488831E-03 | 3.075975E-03 |
| 142 | 200.7041 | -10 | 19.174 | 97.57835 | -3.597389E-03 | 3.717394E-03 |
| 143 | 200.7041 | 1 | 19.22174 | 98.57503 | -2.295132E-03 | 4.684689E-03 |
| 144 | 213.3975 | -10 | 19.11908 | 96.43179 | -5.303449E-03 | 5.362858E-03 |
| 145 | 213.3975 | 1 | 19.18881 | 97.88738 | -3.444049E-03 | 6.846395E-03 |
| 146 | 224.8215 | -10 | 19.04673 | 94.92136 | -7.582277E-03 | 7.373955E-03 |
| 147 | 224.8215 | 1 | 19.14424 | 96.95692 | -5.091392E-03 | 9.627361E-03 |
| 148 | 235.1031 | -10 | 18.95401 | 92.98566 | -1.055542E-02 | 9.634336E-03 |
| 149 | 235.1031 | 1 | 19.08414 | 95.70238 | -7.509413E-03 | 1.302543E-02 |
| 150 | 244.3566 | -10 | 18.83821 | 90.56807 | -1.431771E-02 | 1.188027E-02 |
| 151 | 244.3566 | 1 | 19.00222 | 93.99201 | -.0111367 | .0168529 |
| 152 | 252.6847 | -10 | 18.69797 | 87.6403 | -.0188353 | 1.367598E-02 |
| 153 | 252.6847 | 1 | 18.88917 | 91.63196 | -.0164425 | 2.041304E-02 |
| 154 | 260.18 | -10 | 18.5354 | 84.24638 | -.0235974 | .014572 |
| 155 | 260.18 | 1 | 18.73771 | 88.46986 | -2.270032E-02 | 2.151765E-02 |
| 156 | 265.812 | -10 | 18.38877 | 81.18514 | -2.765811E-02 | 1.488602E-02 |
| 157 | 265.812 | 1 | 18.5999 | 85.59283 | -2.654436E-02 | 2.354921E-02 |
| 158 | 271.444 | -10 | 18.21866 | 77.63374 | -3.207953E-02 | 1.440398E-02 |

| iNN | X_Coord | Y_Coord | WaterHead | Percent | SeepgradX | SeepgradY |
|-----|----------|---------|-----------|----------|---------------|---------------|
| 159 | 271.444 | 1 | 18.42316 | 81.90321 | -3.432046E-02 | 2.420328E-02 |
| 160 | 277.076 | -10 | 18.02503 | 73.59135 | -3.638889E-02 | 1.276863E-02 |
| 161 | 277.076 | 1 | 18.20239 | 77.29408 | -4.204981E-02 | 2.097839E-02 |
| 162 | 282.708 | -10 | 17.81136 | 69.13067 | -3.974284E-02 | 1.024217E-02 |
| 163 | 282.708 | 1 | 17.94965 | 72.01768 | -4.671522E-02 | 1.569917E-02 |
| 164 | 288.34 | -10 | 17.58282 | 64.35959 | -4.197654E-02 | 7.314971E-03 |
| 165 | 288.34 | 1 | 17.67883 | 66.36393 | -4.892936E-02 | 1.043603E-02 |
| 166 | 293.972 | -10 | 17.34457 | 59.38551 | -4.326719E-02 | 4.303672E-03 |
| 167 | 293.972 | 1 | 17.39883 | 60.51845 | -4.991898E-02 | 5.798576E-03 |
| 168 | 299.604 | -10 | 17.10118 | 54.30428 | -4.378849E-02 | 1.311013E-03 |
| 169 | 299.604 | 1 | 17.11424 | 54.57712 | -5.034399E-02 | 1.524627E-03 |
| 170 | 305.236 | -10 | 16.85701 | 49.20684 | -4.358108E-02 | -1.655781E-03 |
| 171 | 305.236 | 1 | 16.82824 | 48.60628 | -5.025645E-02 | -2.898567E-03 |
| 172 | 310.868 | -10 | 16.61669 | 44.1898 | -4.255079E-02 | -4.536947E-03 |
| 173 | 310.868 | 1 | 16.54596 | 42.71317 | -.04912 | -7.890522E-03 |
| 174 | 316.5 | -10 | 16.3853 | 39.35911 | -4.045275E-02 | -7.095163E-03 |
| 175 | 316.5 | 1 | 16.27842 | 37.12779 | -4.554878E-02 | -1.311927E-02 |
| 176 | 323.2 | -10 | 16.12745 | 33.97596 | -3.720024E-02 | -8.866598E-03 |
| 177 | 323.2 | 1 | 16.00173 | 31.35135 | -3.855123E-02 | -1.496459E-02 |
| 178 | 329.9 | -10 | 15.88951 | 29.00866 | -.0340827 | -9.750106E-03 |
| 179 | 329.9 | 1 | 15.75943 | 26.29285 | -3.428541E-02 | -1.402098E-02 |
| 180 | 336.6 | -10 | 15.66912 | 24.40747 | -3.156791E-02 | -.0104407 |
| 181 | 336.6 | 1 | 15.53281 | 21.56174 | -3.281147E-02 | -1.322806E-02 |
| 182 | 343.3 | -10 | 15.46515 | 20.14926 | -2.920632E-02 | -1.163468E-02 |
| 183 | 343.3 | 1 | 15.30758 | 16.85972 | -.0327427 | -1.502732E-02 |
| 184 | 350 | -10 | 15.28168 | 16.31896 | -2.604131E-02 | -1.333024E-02 |
| 185 | 350 | 1 | 15.08918 | 12.30023 | -3.036454E-02 | -2.140792E-02 |
| 186 | 356.2745 | -10 | 15.137 | 13.29854 | -2.104613E-02 | -1.390119E-02 |
| 187 | 356.2745 | 1 | 14.94211 | 9.229933 | -.0197531 | -2.281343E-02 |
| 188 | 363.1765 | -10 | 15.00839 | 10.6136 | -1.639157E-02 | -1.304869E-02 |
| 189 | 363.1765 | 1 | 14.83127 | 6.915929 | -1.322242E-02 | -1.972457E-02 |
| 190 | 370.7687 | -10 | 14.89838 | 8.316814 | -1.242742E-02 | -1.136375E-02 |

| iNN | X_Coord | Y_Coord | WaterHead | Percent | SeepgradX | SeepgradY |
|-----|----------|---------|-----------|----------|---------------|---------------|
| 191 | 370.7687 | 1 | 14.74862 | 5.190337 | -9.015128E-03 | -1.591332E-02 |
| 192 | 379.1201 | -10 | 14.80684 | 6.405903 | -9.233281E-03 | -9.363377E-03 |
| 193 | 379.1201 | 1 | 14.68631 | 3.889597 | -6.243214E-03 | -1.240158E-02 |
| 194 | 388.3067 | -10 | 14.73246 | 4.853066 | -6.714352E-03 | -7.402492E-03 |
| 195 | 388.3067 | 1 | 14.63883 | 2.898333 | -4.343341E-03 | -9.449881E-03 |
| 196 | 398.4119 | -10 | 14.67359 | 3.624101 | -4.738732E-03 | -5.678365E-03 |
| 197 | 398.4119 | 1 | 14.60268 | 2.143696 | -2.983663E-03 | -7.084878E-03 |
| 198 | 409.5276 | -10 | 14.62873 | 2.687549 | -3.183324E-03 | -4.282879E-03 |
| 199 | 409.5276 | 1 | 14.57574 | 1.581168 | -1.970785E-03 | -5.273273E-03 |
| 200 | 421.7549 | -10 | 14.59672 | 2.019181 | -.0019382 | -3.251365E-03 |
| 201 | 421.7549 | 1 | 14.55674 | 1.184547 | -1.184598E-03 | -3.977591E-03 |
| 202 | 435.205 | -10 | 14.57696 | 1.606672 | -8.939729E-04 | -2.601147E-03 |
| 203 | 435.205 | 1 | 14.54508 | .9412107 | -5.34348E-04 | -3.179347E-03 |
| 204 | 450 | -10 | 14.56996 | 1.460635 | -4.079183E-04 | -2.488859E-03 |
| 205 | 450 | 1 | 14.54097 | .8553004 | -2.328905E-04 | -2.957709E-03 |
| 206 | 0 | 7.75 | 19.28982 | 99.9963 | -3.473505E-06 | 2.985825E-05 |
| 207 | 0 | 14.5 | 19.29 | 100 | -1.309841E-06 | 3.263685E-05 |
| 208 | 32.76377 | 7.75 | 19.28974 | 99.99451 | -7.557193E-06 | 4.332743E-05 |
| 209 | 32.76377 | 14.5 | 19.29 | 100 | -3.385105E-06 | 5.378252E-05 |
| 210 | 62.25117 | 7.75 | 19.28944 | 99.98825 | -1.952005E-05 | 8.966893E-05 |
| 211 | 62.25117 | 14.5 | 19.29 | 100 | -8.145332E-06 | 1.153828E-04 |
| 212 | 88.78983 | 7.75 | 19.28879 | 99.97472 | -4.258998E-05 | 1.893691E-04 |
| 213 | 88.78983 | 14.5 | 19.29 | 100 | -1.740865E-05 | 2.410324E-04 |
| 214 | 112.6746 | 7.75 | 19.28754 | 99.94868 | -8.53604E-05 | 3.783144E-04 |
| 215 | 112.6746 | 14.5 | 19.29 | 100 | -3.433819E-05 | 4.735876E-04 |
| 216 | 134.1709 | 7.75 | 19.28533 | 99.90244 | -1.597256E-04 | 7.10193E-04 |
| 217 | 134.1709 | 14.5 | 19.29 | 100 | -6.335916E-05 | 8.738954E-04 |
| 218 | 153.5176 | 7.75 | 19.28165 | 99.82567 | -2.814209E-04 | 1.256542E-03 |
| 219 | 153.5176 | 14.5 | 19.29 | 100 | -1.101993E-04 | 1.521358E-03 |
| 220 | 170.9296 | 7.75 | 19.27589 | 99.70549 | -4.708364E-04 | 2.105854E-03 |
| 221 | 170.9296 | 14.5 | 19.29 | 100 | -1.82408E-04 | 2.513367E-03 |
| 222 | 186.6004 | 7.75 | 19.26732 | 99.52647 | -7.539879E-04 | 3.362774E-03 |

| iNN | X_Coord | Y_Coord | WaterHead | Percent | SeepgradX | SeepgradY |
|-----|----------|---------|-----------|----------|---------------|---------------|
| 223 | 186.6004 | 14.5 | 19.29 | 100 | -2.894076E-04 | 3.965024E-03 |
| 224 | 200.7041 | 7.75 | 19.25507 | 99.27083 | -1.168125E-03 | 5.147392E-03 |
| 225 | 200.7041 | 14.5 | 19.29 | 100 | -4.462331E-04 | 6.013564E-03 |
| 226 | 213.3975 | 7.75 | 19.23808 | 98.91608 | -1.77587E-03 | 7.601844E-03 |
| 227 | 213.3975 | 14.5 | 19.29 | 100 | -6.794134E-04 | 8.841715E-03 |
| 228 | 224.8215 | 7.75 | 19.2148 | 98.42996 | -2.701973E-03 | 1.090763E-02 |
| 229 | 224.8215 | 14.5 | 19.29 | 100 | -1.048444E-03 | 1.273845E-02 |
| 230 | 235.1031 | 7.75 | 19.18246 | 97.75482 | -4.232529E-03 | 1.530193E-02 |
| 231 | 235.1031 | 14.5 | 19.29 | 100 | -1.708485E-03 | 1.827457E-02 |
| 232 | 244.3566 | 7.75 | 19.13503 | 96.76468 | -7.104667E-03 | 2.100419E-02 |
| 233 | 244.3566 | 14.5 | 19.29 | 100 | -3.133831E-03 | 2.682533E-02 |
| 234 | 252.6847 | 7.75 | 19.05673 | 95.13009 | -1.343917E-02 | .027646 |
| 235 | 252.6847 | 14.5 | 19.29 | 100 | -1.806272E-02 | 2.990788E-02 |
| 236 | 260.18 | 7.75 | 18.90074 | 91.87346 | -2.236598E-02 | 2.569335E-02 |
| 237 | 260.18 | 14.5 | 19.03984 | 94.77737 | -6.339481E-03 | 3.902026E-02 |
| 238 | 265.812 | 7.75 | 18.80295 | 89.83192 | -1.902964E-02 | 3.384206E-02 |
| 239 | 265.812 | 14.5 | 19.11131 | 96.26952 | -1.399997E-02 | 6.264275E-02 |
| 240 | 271.444 | 7.75 | 18.63184 | 86.25977 | -3.628743E-02 | 3.872558E-02 |
| 241 | 271.444 | 14.5 | 18.96857 | 93.2896 | -5.162284E-02 | 5.710159E-02 |
| 242 | 277.076 | 7.75 | 18.3716 | 80.82661 | -5.165642E-02 | 3.099376E-02 |
| 243 | 277.076 | 14.5 | 18.60215 | 85.6399 | -.0676248 | 3.117044E-02 |
| 244 | 282.708 | 7.75 | 18.06864 | 74.50179 | -5.631912E-02 | 2.007793E-02 |
| 245 | 282.708 | 14.5 | 18.20281 | 77.30296 | -6.646884E-02 | 1.566199E-02 |
| 246 | 288.34 | 7.75 | 17.7551 | 67.95623 | -5.640395E-02 | 1.193624E-02 |
| 247 | 288.34 | 14.5 | 17.83247 | 69.5713 | -6.240154E-02 | 8.869179E-03 |
| 248 | 293.972 | 7.75 | 17.44081 | 61.39475 | -.056 | 6.431109E-03 |
| 249 | 293.972 | 14.5 | 17.48504 | 62.31808 | -6.032713E-02 | 5.48152E-03 |
| 250 | 299.604 | 7.75 | 17.12494 | 54.80034 | -5.628509E-02 | 1.930425E-03 |
| 251 | 299.604 | 14.5 | 17.14357 | 55.18926 | -.0609263 | 2.850711E-03 |
| 252 | 305.236 | 7.75 | 16.80355 | 48.09086 | -5.731322E-02 | -3.209573E-03 |
| 253 | 305.236 | 14.5 | 16.78955 | 47.79863 | -6.491049E-02 | -8.540343E-04 |
| 254 | 310.868 | 7.75 | 16.47472 | 41.22584 | -5.815613E-02 | -1.096245E-02 |

| iNN | X_Coord | Y_Coord | WaterHead | Percent | SeepgradX | SeepgradY |
|-----|----------|---------|-----------|----------|---------------|---------------|
| 255 | 310.868 | 14.5 | 16.39391 | 39.53889 | -.0740649 | -9.640351E-03 |
| 256 | 316.5 | 7.75 | 16.15254 | 34.49971 | -.0540153 | -2.342648E-02 |
| 257 | 316.5 | 14.5 | 15.90595 | 29.35184 | -.0624749 | -4.071053E-02 |
| 258 | 323.2 | 7.75 | 15.8787 | 28.78284 | -3.569512E-02 | -2.342478E-02 |
| 259 | 323.2 | 14.5 | 15.70105 | 25.0741 | -2.763941E-02 | -3.408259E-02 |
| 260 | 329.9 | 7.75 | 15.65867 | 24.1893 | -3.087899E-02 | -1.688336E-02 |
| 261 | 329.9 | 14.5 | 15.54911 | 21.90215 | -2.399403E-02 | -1.708386E-02 |
| 262 | 336.6 | 7.75 | 15.44731 | 19.77681 | -3.212988E-02 | -1.204879E-02 |
| 263 | 336.6 | 14.5 | 15.3965 | 18.71602 | -.028542 | -6.456226E-03 |
| 264 | 343.3 | 7.75 | 15.20178 | 14.6509 | -3.904854E-02 | -1.321216E-02 |
| 265 | 343.3 | 14.5 | 15.16679 | 13.92038 | -5.624723E-02 | 1.134239E-04 |
| 266 | 350 | 7.75 | 14.88649 | 8.068681 | -4.314218E-02 | -3.456909E-02 |
| 267 | 350 | 14.5 | 14.5 | 0 | -5.587705E-02 | 9.231412E-02 |
| 268 | 356.2745 | 7.75 | 14.75542 | 5.332353 | -.0132901 | -3.511502E-02 |
| 269 | 356.2745 | 14.5 | 14.5 | 0 | -3.650497E-03 | -3.410726E-02 |
| 270 | 363.1765 | 7.75 | 14.67983 | 3.75433 | -7.610241E-03 | -2.557067E-02 |
| 271 | 363.1765 | 14.5 | 14.5 | 0 | -2.145252E-03 | -2.422893E-02 |
| 272 | 370.7687 | 7.75 | 14.63097 | 2.734257 | -4.756812E-03 | -.0189305 |
| 273 | 370.7687 | 14.5 | 14.5 | 0 | -1.368149E-03 | -1.771037E-02 |
| 274 | 379.1201 | 7.75 | 14.59669 | 2.018643 | -3.143991E-03 | -.0140971 |
| 275 | 379.1201 | 14.5 | 14.5 | 0 | -9.144105E-04 | -1.308041E-02 |
| 276 | 388.3067 | 7.75 | 14.57149 | 1.49253 | -2.131891E-03 | -.0104785 |
| 277 | 388.3067 | 14.5 | 14.5 | 0 | -6.212999E-04 | -9.661309E-03 |
| 278 | 398.4119 | 7.75 | 14.55266 | 1.099313 | -1.442244E-03 | -7.749204E-03 |
| 279 | 398.4119 | 14.5 | 14.5 | 0 | -4.169355E-04 | -7.114457E-03 |
| 280 | 409.5276 | 7.75 | 14.53875 | .8090501 | -9.418311E-04 | -5.725296E-03 |
| 281 | 409.5276 | 14.5 | 14.5 | 0 | -2.659381E-04 | -5.259525E-03 |
| 282 | 421.7549 | 7.75 | 14.529 | .6053939 | -5.583034E-04 | -4.303402E-03 |
| 283 | 421.7549 | 14.5 | 14.5 | 0 | -1.479317E-04 | -4.001288E-03 |
| 284 | 435.205 | 7.75 | 14.52303 | .4807792 | -2.417518E-04 | -3.437348E-03 |
| 285 | 435.205 | 14.5 | 14.5 | 0 | -4.746334E-05 | -3.307719E-03 |
| 286 | 450 | 7.75 | 14.52092 | .4367987 | -9.492668E-05 | -3.160406E-03 |

| iNN | X_Coord | Y_Coord | WaterHead | Percent | SeepgradX | SeepgradY |
|-----|----------|---------|-----------|----------|---------------|---------------|
| 287 | 450 | 14.5 | 14.5 | 0 | 0 | -3.099653E-03 |
| 288 | 266.8359 | 16.895 | 19.29 | 100 | -1.473019E-02 | 7.843133E-02 |
| 289 | 273.4918 | 19.29 | 19.29 | 100 | -7.384813E-02 | .1091684 |
| 290 | 271.8023 | 16.7205 | 19.13426 | 96.74863 | -6.143342E-02 | 8.469192E-02 |
| 291 | 277.7926 | 18.941 | 18.70872 | 87.86481 | -9.745621E-02 | 7.119571E-02 |
| 292 | 276.7687 | 16.546 | 18.70809 | 87.85162 | -8.032452E-02 | 4.319832E-02 |
| 293 | 282.0934 | 18.592 | 18.30711 | 79.48035 | -8.030622E-02 | 2.209365E-02 |
| 294 | 281.7351 | 16.3715 | 18.30372 | 79.4096 | -.0738414 | 1.870917E-02 |
| 295 | 286.3943 | 18.243 | 17.99025 | 72.8654 | -6.849798E-02 | 1.121596E-02 |
| 296 | 286.7015 | 16.197 | 17.9539 | 72.10652 | -6.620023E-02 | 1.096318E-02 |
| 297 | 290.6951 | 17.894 | 17.70782 | 66.96907 | -.0631694 | 1.033298E-02 |
| 298 | 291.668 | 16.0225 | 17.63573 | 65.4641 | -6.219776E-02 | 8.614597E-03 |
| 299 | 294.9959 | 17.545 | 17.43931 | 61.36345 | -6.184639E-02 | 9.299438E-03 |
| 300 | 296.6344 | 15.848 | 17.33049 | 59.0916 | -6.144708E-02 | 6.174001E-03 |
| 301 | 299.2967 | 17.196 | 17.17406 | 55.82597 | -6.232249E-02 | 5.461998E-03 |
| 302 | 301.6008 | 15.6735 | 17.02441 | 52.70175 | -6.301732E-02 | 3.773046E-03 |
| 303 | 303.5975 | 16.847 | 16.90281 | 50.1631 | -6.721161E-02 | -1.752708E-03 |
| 304 | 306.5672 | 15.499 | 16.70241 | 45.97932 | -7.017253E-02 | -4.237782E-03 |
| 305 | 307.8984 | 16.498 | 16.61369 | 44.12704 | -7.327835E-02 | -1.331799E-02 |
| 306 | 311.5336 | 15.3245 | 16.33911 | 38.39472 | -8.362842E-02 | -1.550045E-02 |
| 307 | 312.1992 | 16.149 | 16.28311 | 37.22574 | -9.601453E-02 | -2.954197E-02 |
| 308 | 316.5 | 15.15 | 15.85774 | 28.34527 | -6.661941E-02 | -5.796938E-02 |
| 309 | 316.5 | 15.8 | 15.8 | 27.13987 | -5.572973E-02 | -6.980955E-02 |
| 310 | 322.85 | 15.09 | 15.69152 | 24.87523 | -2.332945E-02 | -3.834242E-02 |
| 311 | 322.5 | 15.68 | 15.68 | 24.63466 | -2.089477E-02 | -2.777418E-02 |
| 312 | 329.2 | 15.03 | 15.55589 | 22.04363 | -2.126943E-02 | -1.489419E-02 |
| 313 | 328.5 | 15.56 | 15.56 | 22.12944 | -2.048451E-02 | -1.739291E-02 |
| 314 | 335.55 | 14.97 | 15.42497 | 19.31037 | -.0238861 | 1.929783E-02 |
| 315 | 334.5 | 15.44 | 15.44 | 19.6242 | -2.125585E-02 | 7.313597E-03 |
| 316 | 341.9 | 14.91 | 15.26971 | 16.06905 | -4.873223E-02 | .1193033 |
| 317 | 340.5 | 15.32 | 15.32 | 17.11899 | -2.864479E-02 | .3172979 |
| 318 | 348.25 | 14.85 | 14.85 | 7.306896 | -4.218575E-02 | .5320863 |

| iNN | X_Coord | Y_Coord | WaterHead | Percent | SeepgradX | SeepgradY |
|-----|---------|---------|-----------|----------|-----------|-----------|
| 319 | 346.5 | 15.2 | 15.2 | 14.61377 | 0.02310 | 0.215 |

第三章 可靠性计算原理与程序开发

3.1 计算原理

工程结构可靠性常用的计算方法，主要有一次二阶矩法、改进一次二阶矩法、JC法、Monte Carlo法等。其中：一次二阶矩法和改进一次二阶矩法对变量的分布型式要求十分苛刻，分布型式只有为正态分布时，才能得到精确的结果，否则只能得到偏差较大的结果；而JC法和Monte Carlo法则通俗易懂，又不受随机变量分布规律限制，计算精度高，广泛为国内外工程界所采用，两者中Monte Carlo法解题思路更为清晰简单，且能求解出非线性极限状态方程的失效概率和可靠指标。因此Monte Carlo法对于极限状态函数形式较为复杂的堤防可靠性分析较为适用。它又被称为随机模拟法或统计试验法，基本原理^[0]如下：

(一) 随机抽样方法

先在(0,1)区间上产生均匀分布随机数。可采用的方法有乘同余法、混合同余法等，其中混合同余法的递推公式为

$$\begin{aligned} x_i &= (\lambda x_{i-1} + C) \pmod{M} \\ r_i &= x_i / M \quad (i=1,2,\dots,n) \end{aligned} \quad (9)$$

式中： λ 、 x_0 、 C 和 M 为选定的常数。式(9)表示 $\lambda x_{i-1} + C$ 除以 M 的余数为 x_i ，将其再除以 M 即得(0,1)上均匀分布的随机数 r_i 。

将随机数序列 $\{r_i\}$ 转换为 (a,b) 区间上的均匀分布随机数序列 $\{R_i\}$

$$R_i = a + (b - a)r_i \quad (10)$$

采用反函数法将均匀分布随机数 $\{r_i\}$ 转换为符合某一指定概率分布的随机数。其前提是经验分布的反函数存在，否则采用随机变量函数法。

设 X 为具有分布函数 $F_X(x)$ ，且反函数 $F_X^{-1}(x)$ 存在的连续随机变量， r 是均匀分布随机变量 R （分布函数为 $F_R(r)$ ）的值。若给定累计概率 $F_X(x) = r$ ，则有

$$x = F_X^{-1}(r) \quad (11)$$

若已知 $\{r_i\}$ ，则可得符合 $F_X(x)$ 的随机数序列：

$$x_i = F_X^{-1}(r_i) \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (12)$$

(二) Monte Carlo 模拟法的基本步骤

统计确定与可靠性分析有关的各基本变量（如材料参数、荷载等）的概型分布及其

分布参数;

对所有基本变量按统计特征进行第一次随机采样, 将其代入极限状态方程式, 获得第一次模拟结果;

重复 n 次独立随机采样, 进而估算失效概率。

(三) Monte Carlo 模拟法的结果和精度

在工程结构可靠性分析中, 设极限状态方程式 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$, 其失效概率为

$$P_f = P(g(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0) \quad (13)$$

式中: X_i 为基本随机变量 (如材料性能, 结构尺寸及外来荷载的作用), 借助随机抽样对基本变量赋值时, 计算结果只有 $g(\cdot) > 0$ 和 $g(\cdot) \leq 0$ 两种可能, 故可定义指标函数:

$$I(g(X_1, X_2, \dots, X_n)) = \begin{cases} 1, & g(\cdot) \leq 0 \\ 0, & g(\cdot) > 0 \end{cases} \quad (14)$$

根据伯努利大数定理及正态分布随机变量的特性得到的失效概率 P_f 为

$$\hat{P}_f = \frac{1}{N} \sum I(g(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0) = \frac{M}{N} \quad (15)$$

式中: M 为次模拟计算中 $g(\cdot) \leq 0$ 的总次数。

Monte Carlo 模拟法不仅可按式 (15) 计算失效概率, 还可根据模拟计算结果拟合出功能函数的分布形式, 据以估计其一、二阶矩 $\hat{\mu}_x$ 和 $\hat{\sigma}_x^2$ 。进而按下式近似计算可靠度指标 β

$$\beta = \frac{\bar{\mu}_x}{\bar{\sigma}_x} \quad (16)$$

Monte Carlo 模拟法的误差一般可用 $\hat{\mu}_x$ 表示。功能函数值 Z 越离散, 误差将越大。当模拟次数充分大时, 已经证明由模拟结果样本求得估计值的标准差与模拟次数的平方根成反比。因此, 加大模拟次数可望提高模拟精度, 特别是当计算得到的失效概率较小时。一般要求 Monte Carlo 法的样本数必须大于引起一次 $Z < 0$ 所需的平均样本数的 100 倍, 即 $N \geq 100 / P_f$ 次时, 可满足精度要求。

随机变量的分布类型可以采用下述分布类型: 1) Deterministic (确定性); 2) Uniform (均匀分布); 3) Gauss(Normal) (标准正态分布); 4) Lognormal (对数正态分布或极值 III 型分布); 5) Exponential (指数分布); 6) Gamma (γ 分布); 7) Gumbel-Maximum (极值 I 型分布); 8) Gumbel-Minimum (极值 I 型分布); 9) Frechet-Maximum (极值 II 型分布); 10) Weibull-Minimum (最小威布尔分布); 11) Rayleigh (瑞利分布); 12) Truncated Normal (截尾分布) 等。

3.2 算例

基于上述计算原理，以典型防洪堤为算例^[0]，上游坡坡率为 m_1 ，下游坡坡率为 m_2 。堤顶宽度为 w ，堤防高度为 H_0 ，上游水位为 H_{uw} ，下游水位为 H_{dw} 。并取坡率 m_1 、 m_2 为3，顶宽 w 为7m，高度 h_0 为10m作为典型的堤防断面。在可靠度分析中，土的强度参数、天然容重、孔隙水压力、临界坡降以及上、下游水位等参数均应视为随机变量，为简化起见，文中考虑的一些土工参数的统计特征如表B3-1所列。应指出，可靠性指标 β （这里包括边坡失稳的可靠性指标 β_s 和渗透变形失稳的可靠性指标 β_p 两部分），以下主要讨论土工参数统计量的变化对可靠性指标 β 的影响。当变化其中某一参数时，其它参数均取表B3-1中的数值。

表 B3-1 土工参数的统计特征

| 随机变量 | 符号 | 名称和单位 | 分布 | 均值 | 标准差 |
|-------|----------|-----------------------------|----|-------|-------|
| x_1 | c | 粘聚力 (kPa) | 正态 | 12.54 | 2.8 |
| x_2 | ϕ | 内摩擦角 (°) | 正态 | 21.58 | 3.5 |
| x_3 | γ | 土的天然容重 (kN/m ³) | 正态 | 18.84 | 3.1 |
| x_4 | J_c | 临界坡降 | 正态 | 0.55 | 0.093 |

(1) c 、 ϕ 的均值对 β_s 的影响

当 c 或 ϕ 的均值变化而其它参数不变时， β_s 将随之变化。例如，当 μ_c 由8.54kPa增至16.54kPa， β_s 值由2.455增加到5.282；当 μ_ϕ 由15.58°增至27.58°， β_s 值由4.015减小到3.737。图B3.1、图B3.2分别为一组 $\mu_c \sim \beta_s$ 和 $\mu_\phi \sim \beta_s$ 关系曲线。由上述分析可知，堤坡稳定的可靠性指标 β_s 受 c 、 ϕ 均值影响的程度不一样，其中 μ_c 较敏感。

(2) c 、 ϕ 的变异系数对 β_s 的影响

当 c 或 ϕ 的变异系数变化而其它参数不变时， β_s 将随之变化。例如，当 δ_c 由3.218减少至2.418时， β_s 值由3.391增加到4.501；当 δ_ϕ 由5.52减少至1.52时， β_s 值由3.845增加到3.881。图B3.3、图B3.4分别为一组 $\delta_c \sim \beta_s$ 和 $\delta_\phi \sim \beta_s$ 关系曲线。由上述分析可知，堤坡稳定的可靠性指标 β_s 受 c 、 ϕ 变异系数影响的程度也不一样，其中 δ_c 较敏感，而 δ_ϕ 的变化对 β_s 的影响不大。

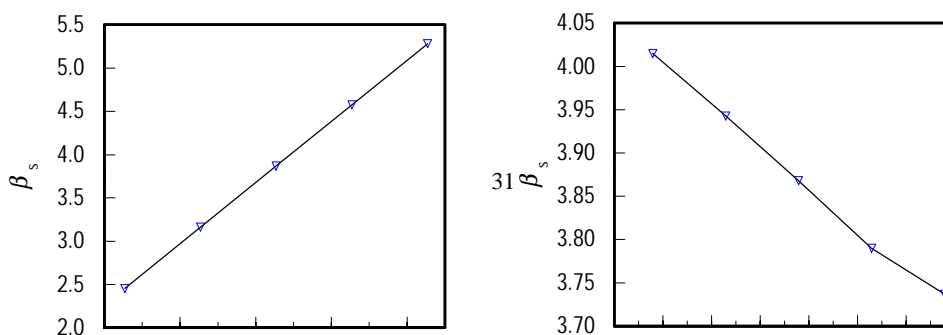


图 B3.1 $\mu_c \sim \beta_s$ 关系

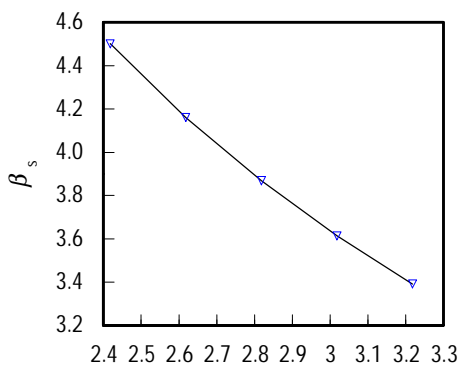


图 B3.2 $\mu_\phi \sim \beta_s$ 关系

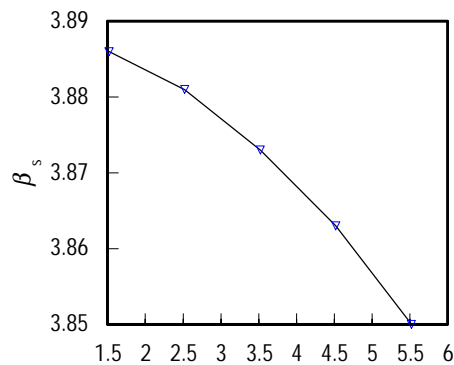


图 B3.3 $\delta_{\delta_c} \sim \beta_p$ 关系

图 B3.4 $\delta_\phi \sim \beta_p$ 关系

计算表明，土体容重 γ 的均值和标准差的变化对结构风险的影响不大，可将其作为确定性参数。

(3) 临界渗透坡降 J_c 的均值和标准差对 β_p 的影响

图 B3.5、图 B3.6 分别为一组 $\mu_j \sim \beta_p$ 和 $\delta_j \sim \beta_p$ 关系曲线。当 μ_j 由 0.45 增至 0.65， β_p 值由 2.849 增加到 5；当 δ_j 由 0.073 增至 0.123， β_p 值由 5 减小到 2.967。可见，临界坡降 J_c 的统计参数显著地影响可靠性指标 β_p 。土的临界渗透坡降与土的颗粒组成和结构、不均匀系数、容重和施工等因素有关。因此，在堤防的建设中，合理地选择土质类型并控制施工质量是极其重要的。

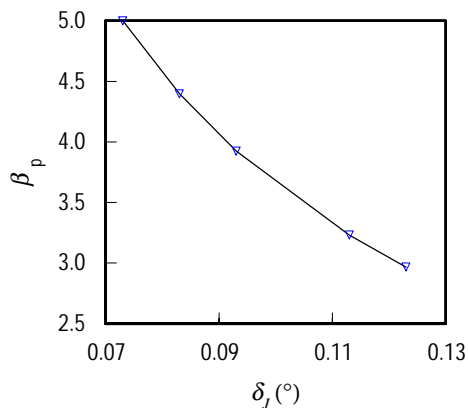
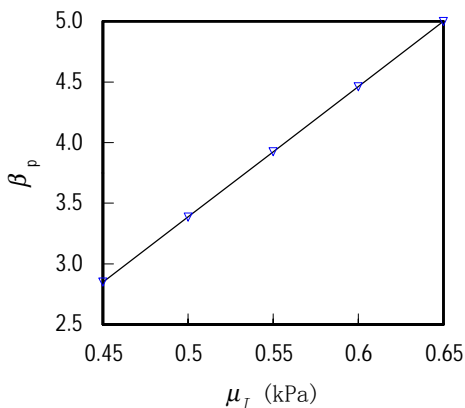


图 B3.5 $\mu_j \sim \beta_p$ 关系

图 B3.6 $\delta_j \sim \beta_p$ 关系

第四章 风险分析

4.1 计算原理

常规的定值安全评估方法^[0]，由于没有考虑到设计变量的变异性，安全系数的大小并不能完全确切地表征工程的安全程度。基于可靠性理论的风险评估方法将结构的多种参数作为随机变量，并可根据不同堤防结构重要性程度采取相应设计，无疑有其先进性和科学性^{[0],[0]}。

风险是指体系在规定的工作条件和规定的时间内，其不能完成预定功能的概率及由此所产生的后果。则风险可表示为失事概率及其后果的函数：

$$\bar{R} = f(P, C) \quad (17)$$

式中： \bar{R} 是风险度； P 是失事概率或风险概率； C 是对应的失事后果或风险损失，常用相应于失事概率的损失期望值表示，通常将其分为生命损失、经济损失和环境恶化等。这里将风险分析的重点放在失事概率的计算上。

4.1.1 风险计算模型

在大多数情况下，堤防结构破坏分析仅需比较抵抗力 R 和荷载作用 S 这两个值。此时，可靠性函数可表示为

$$Z = R - S \quad (18)$$

则

$$\bar{R} = P(R < S) = \iint_{Z < 0} f_{R,S}(r, s) dr ds \quad (19)$$

式中： $f_{R,S}(r, s)$ 是荷载 S 和强度 R 的联合概率密度函数。显然，直接采用式 (19) 计算失事概率是极为困难的。考虑到荷载 S 主要由上游水位的不确定性所决定，而强度 R 主要由堤防土体的物理力学特性所决定，所以可以认为两者是相互独立的随机变量。式 (19) 可写为

$$P\{Z < 0\} = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_0^s f_R(r) dr \right) f_S(s) ds = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \quad (20)$$

式中： $f_R(r)$ 和 $f_S(s)$ 分别为 R 和 S 的概率密度函数。 $f_R(r) f_S(s) dr ds$ 则是 R 位于 r 和 $r + dr$ 之间，同时 S 位于 s 和 $s + ds$ 之间的概率。

由分部积分，公式 (17) 中的双重积分可被简化为单重积分

$$P\{Z < 0\} = \int_0^{\infty} \left\{ \int_0^s f_R(r) dr \right\} f_S(s) ds = \int_0^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \quad (21)$$

式中： $F_R(s)$ 是抗力 R 的累积分布函数。

利用概率组合的方法可以间接估算 \bar{R} 。设荷载 S 与上游水位 H 的联合概率密度函数为：

$$f_{H,S}(s,h) = f(s|h)f_0(h) \quad (22)$$

式中： $f(s|h)$ ——给定某一水位 h 下荷载 s 的条件概率密度函数；

$f_0(h)$ ——堤防上游水位概率密度函数。

于是利用全概率公式即可得荷载的概率密度函数为：

$$f(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s|h)f_0(h)dh \quad (23)$$

上式中，从理论上讲， H 在 $-\infty$ 到 ∞ 之间变化，实际上，堤防的上游水位 $H > 0$ ，即应为正值，而且有一定变化幅度。将(23)代入式(19)加以整理可得：

$$\bar{R} = P(S > R) = \int_r^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(s|h)f_0(h)dh \right] ds = \int_0^{\infty} \left[\int_r^{\infty} f(s|h)f_0(h)dh \right] ds \quad (24)$$

令 $F_s(h) = \int_r^{\infty} f(s|h)ds$ ，则有

$$\bar{R} = P(S > R) = \int_{h_1}^{h_2} F_s(h)f_0(h)dh \quad (25)$$

式中： h_1 ——计算堤防失稳风险时规定的最低水位值；

h_2 ——计算堤防失稳风险时规定的最高水位值。

式(25)即为堤防的失稳风险模型。为避免对该式直接积分求解的困难。可采用离散化数值积分的方法求解。把荷载概率密度曲线上 $S \leq h_2$ 的部分分成 N 段，则有：

$$\begin{aligned} \bar{R} = P(S > R) &= \int_{h_1}^{h_2} F_s(h)f_0(h)dh \\ &= \sum_{i=1}^N \Delta F_0(\bar{h}_i) \bar{F}_s(h_i) \end{aligned} \quad (26)$$

式中： $\Delta F_0(\bar{h}_i)$ 是洪水位频率曲线第 i 段区间概率； N 是洪水位频率曲线计算段数。 $F_s(h)$ 是相应于某一水位 h 的荷载大于强度的概率； $\bar{F}_s(h_i)$ 是第 i 段区间内荷载大于强度的概率均值。

在一定的洪水位下，假定堤防失稳形式主要为边坡滑动（包括地基）失稳和渗透变形失稳。对于边坡稳定而言，“荷载”为作用于堤体的滑动力矩 M_s ，“强度”为抗滑力矩 M_r 。对于渗透稳定而言，“荷载”为渗透坡降 J ，“强度”为临界坡降 J_c 。假定上述两种失稳事件是相互独立的，则可将堤防边坡失稳风险度 R_{SL} 和渗透变形失稳风险度 R_{SP} 分别讨论，然后计算堤防失稳风险度 \bar{R} 。即

$$\bar{R} = R_{SL} + R_{SP} \quad (27)$$

4.1.2 失效概率的计算方法

式 (26) 中的 $\bar{F}_s(h_i)$ 积分式难以得到解析解。因为 $F_s(h) = \int_r^{\infty} f(s|h)ds$ 中的 $f(s|h)$ 是一极其复杂的函数。根据可靠性理论, 经过分析对比现有的计算失效概率的方法, 选用上述的 Monte Carlo 方法。

4.2 算例

仍以前述均质堤为算例, 探讨几何形状对结构风险的影响。在某一洪水位 (以堤防高度以下 0.5m 定义) 下, 对不同边坡坡率、顶宽和高度的堤防结构失稳风险进行比较分析。以下变动某一几何参数分析时, 其它参数取为典型断面的值。计算表明, 堤防下游坡发生边坡失稳的风险明显大于上游坡, 约大 40%, 故以下仅给出堤防下游坡的风险度。

1) 上游坡率

图 B4.1 给出上游坡率 m_1 分别为 1.5、2.5、3、3.5 和 4.5 时堤防发生边坡失稳和渗透变形失稳的风险度。边坡上游坡率的变化对下游坡的稳定性略有影响, 但变化趋势不明显。而坡率的增加, 延长了渗透路径, 使堤防发生管涌的风险性明显降低。

2) 下游坡率

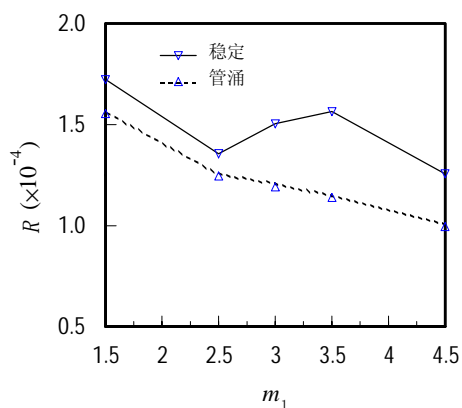
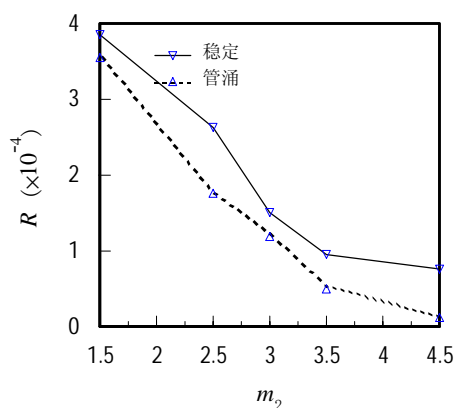
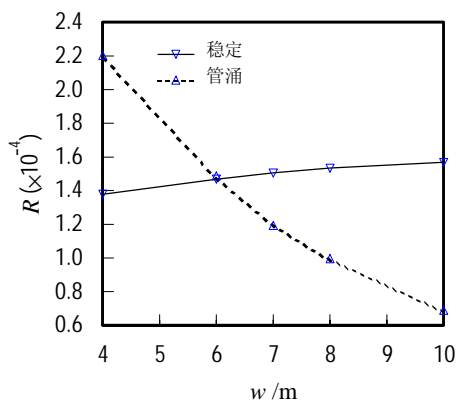
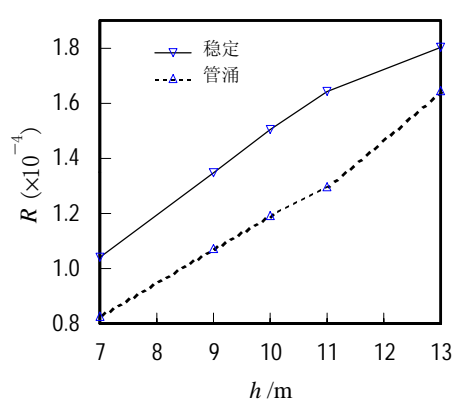
图 B4.2 给出下游坡率 m_2 变化时堤防发生失稳的风险度。由图可以看出, 随着堤防下游坡率的增加, 堤防发生边坡失稳的风险和渗透变形失稳的风险均显著降低, 实际工程中通过适当放缓堤坡或设置戗台, 以增强堤身 (基) 抵抗渗流破坏的能力, 这在理论上是合理的, 但这会增加工程造价。

3) 堤防顶宽

图 B4.3 给出顶宽 w 分别为 4m、6m、7m、8m 和 10m 时堤防发生失稳的风险。可以看出, 边坡发生失稳的风险随着 w 的变化不甚明显, 而发生管涌的风险性明显降低, 显然与渗径的增加相关。

4) 堤防高度

图 B4.4 给出不同堤防高度 h_0 下堤防发生失稳的风险。由图可见, 随着堤防高度的增加, 发生边坡失稳和渗透变形失稳的风险均增加。边坡失稳风险增加的原因有两点: 其一是对于所考虑的顶高和坡角而言, 随着堤高的增加, 所考虑洪水位相应升高, 使得堤身浸润线较高, 进而影响滑动面的位置; 其二是当顶高增加时, 滑动力矩的增加显著快于抗滑力矩的增加。不同高度下渗透变形失稳风险增加的原因在于, 下游坡出逸点高度的增加量相对上游水位的增加量较小, 计算得到的渗透坡降增加。

图 B4.1 上游坡率对 R 的影响图 B4.2 下游坡率对 R 的影响图 B4.3 顶宽对 R 的影响图 B4.4 高度对 R 的影响

以上是给定某一洪水位并形成稳定渗流情况下，对临水侧和背水侧堤坡进行稳定分析和对堤身进行渗透变形风险分析的结果。事实上，堤防通常在不同的洪水位下工作，考虑洪水位的随机变化规律，由式(27)可以得到洪水位由 8.0m 至堤防高程 10.0m 时的典型堤防断面的风险为 0.328%。

第五章 安全评估

针对高洪水位下堤段发生险情的类别，从堤顶高程以下每隔 0.5m 为一级，共计算 9 级水位。可对堤防安全评估的计算工况进行设定，以预估在非常运行条件下的工程安全状况。此外，系统可通过修改堤防土工参数和边界条件等输入数据进行不同加固方案的比较分析。

5.1 安全等级的划分

对某堤段在每一级水位下可得到 9 种安全评估指标，即三种计算模式（上游边坡稳定、下游边坡稳定、堤段渗流稳定）及其相应的安全性指标（安全系数、可靠度指标、风险度）。

参照水库大坝安全评价导则^[9]，综合考虑各专项安全指标进行堤防安全评价，安全等级划分采用如下标准和规则。安全性指标均达到 A 级的，安全等级为 A 级；安全性指标达到 A 级和 B 级的，安全等级为 B 级；安全性指标中有一项（含一项）以上是 C 级的，安全等级为 C 级。各项安全性指标中有一至二项是 B 级，其余的均达到 A 级，且堤防的工程质量及运行管理优良的，可考虑将其定义为 A 级堤防。用户可根据工程实际确定等级划分标准。进而可从预案库中找出相应的加固预案。

5.2 加固预案的设定

水灾一旦发生，无疑使建筑物——人类活动的场所遭受损坏或破坏。受灾害破坏后长期以来仅凭经验主管地判断修复加固的方法。加固或修复以后常常有三种效果：一是措施得当，满足要求；二是措施过头，造成浪费，并有可能影响建筑物的使用功能或使用时间；三是措施不足，致使受损构件承载能力仍然不足，留下安全隐患。如何科学地诊断灾后结构的受损程度，确定其残余承载力和合理地加以修复加固，目前已成为有关工程技术人员所关心的问题。

当堤防安全等级为 B 级和 C 级时，系统会自动根据计算结果从预案库中找出相应的加固预案。目前，系统中的预案主要有：

预案一：加强江水位、堤身沉降及河床冲淤变化的观测，堤防上游坡及护岸进行加固。

预案二：修建堤脚平台，加强盖重防护。

预案三：加强管涌观察或减压井观测，对堤基进行防渗加固。

5.3 全堤段安全评估成果的分析与评价

由上述计算原理和系统设计思路，对位于长江下游北岸的安庆江堤及广济圩江堤进行了全堤段风险分析。

图 B5.1、图 B5.2 和图 B5.3 分别给出堤防在各级水位下上游和下游堤坡稳定分析得到的安全系数、可靠度指标和失稳风险度。由图可见，随着水位的逐级降低，使得堤身浸润线降低，进而影响滑动面的位置，堤坡的安全系数和可靠度指标大致呈线性增加，而失稳的风险度也在逐步降低。且由于下游坡压盖等因素的影响，堤防上游坡的安全性指标比下游坡的明显要小。

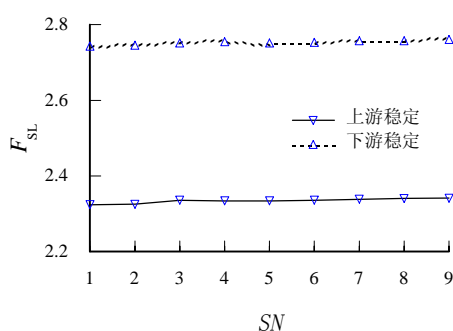


图 B5.1 各级水位下的边坡稳定安全系数

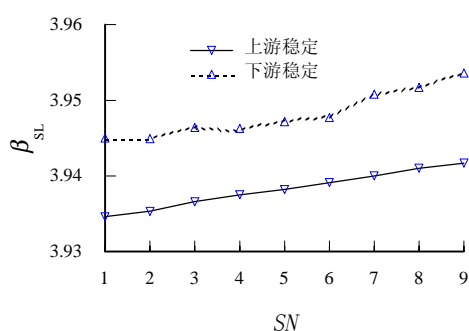


图 B5.2 各级水位下的边坡稳定可靠度指标

图 B5.4、图 B5.5 和图 B5.6 分别给出堤防在各级水位下堤身渗透稳定的安全系数、可靠度指标和失稳风险度。可见，随着水位的逐级降低，堤身的渗透坡降减小，相应的安全系数和可靠度指标增加明显，失稳风险度显著降低，到达一定的低水位后，风险度几乎降为零。

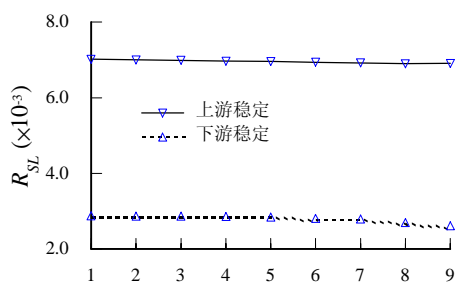


图 B5.3 各级水位下的边坡失稳风险度

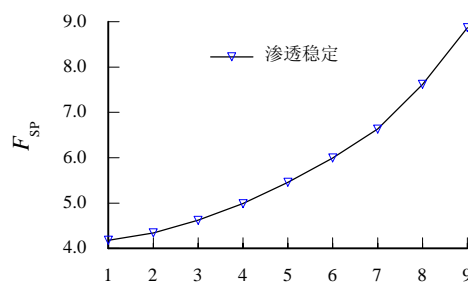


图 B5.4 各级水位下的渗透稳定安全系数

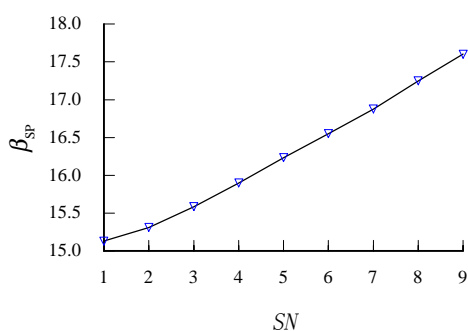


图 B5.5 各级水位下的渗透稳定可靠度指标

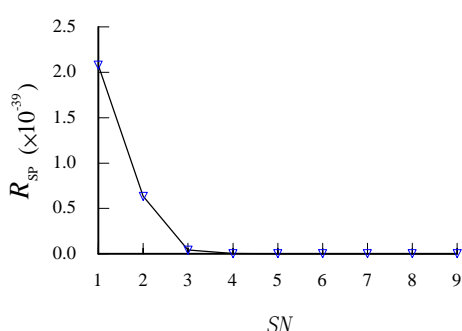


图 B5.6 各级水位下的渗透失稳风险度

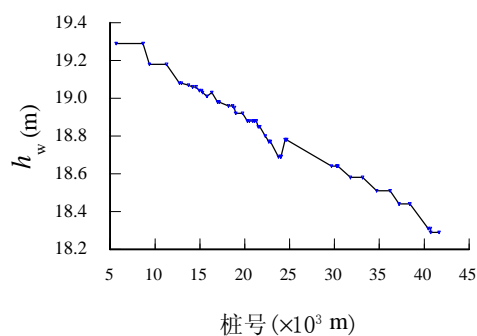


图 B5.7 全堤段的设计水位

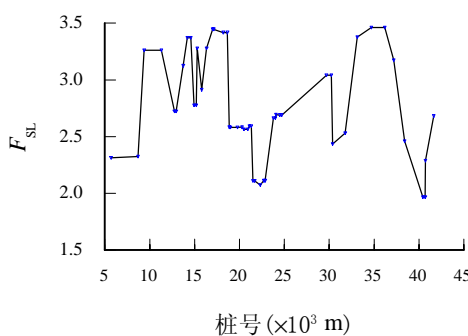


图 B5.8 设计水位下的全堤段安全系数的分布

图 B5.7 给出全堤段设计水位情况。全堤段的边坡稳定安全系数的分布如图 B5.8 所示。由图可见，各典型断面的安全系数存在较明显的差异，其统计方差为 0.55。

全堤段风险分析的成果表明：五十余个典型断面的各项评估指标均能达到设计规范的要求，出现险情的风险度较低，尤其是渗透失稳。在设计水位下，上游边坡失稳的风险度为 0.696×10^{-2} ；而在第一级水位下，边坡失稳的风险度为 0.702×10^{-2} ，水位每降低 0.5m，风险度平均降低 0.02%。在设计水位下，渗透失稳的风险度为 2.94×10^{-44} ；而在第一级水位下，渗透失稳的风险度为 2.08×10^{-39} ，水位每降低 0.5m，风险度平均降低 1 至 2 个量级。

可见，江堤按一定的标准进行加高培厚或防渗加固后，合理地修订防汛特征水位是可行的。

第六章 数据库设计与维护

6.1 数据库设计与实现

采用面向对象的数据库技术，将输入信息如堤身、堤基、护岸、地层资料，输出信息如堤段边坡稳定和渗流稳定计算成果都视为相互关联的对象，研究它们之间的拓扑关系，基于用户需求分析，对收集的资料进行整理、筛选、压缩并按不同性质建立各种数据表。采用优化数据集合方式，建立数据冗余度小、一致性好、独立性高的数据库结构。

在本子系统数据库的建设中，重点强调了土工参数数据库的管理。土工试验测得的土性指标，可按其在工程设计中实际作用分为一般特性指标和主要计算指标。前者如土的天然密度、天然含水率、土粒比重、颗粒组成、液限、塑限、有机质、水溶盐等，它们是土分类、定名和阐明其物理化学特性的土性指标；后者如土的凝聚力、内摩擦角、压缩系数、变形模量、渗透系数等，是指在设计计算中直接用以确定土体的强度、变形和稳定性等力学特性的土性指标。通过对同类地区相同条件下土性指标的历史资料的总结与归类统计分析，可正确地了解有关参数的统计特性（如参数的均值、方差、变异系数、概率分布型式、空间分布的自相关性、土性指标间的互相关性等），为堤防结构的稳定、渗流等安全性评价标准的研究奠定资料基础。

6.2 数据库维护

数据库维护模块具有对用户身份进行验证、密码修改、信息添加、修改、删除及再恢复，图片上传，字段及关键字搜索，界面灵活变换等功能。具有兼容性强、可扩展性强、开放式设计、安全性强、操作简单方便及辅助功能强等特点。

登录身份验证、密码修改功能

为了提高系统的安全性能，系统设有权限访问机制，分系统管理员、编辑和浏览三个级别。用户的增、删、改可以通过管理员在后台完成；系统还设有密码修改功能，用户在得到权限后可以修改自己的密码。

信息的添加、修改功能

该模块具有友好的用户界面，可以方便地实现数据的增加、修改和删除。SQL Server2000 可以使数据库的数据存储容量几何级增长，用户基本不需要对 SQL Server2000 做任何事，数据存储所有的操作都可以通过本系统直接完成。

信息的删除以及再恢复功能

考虑到用户在使用过程中存在一些误操作,并有可能影响一些数据的完整性。系统对删除功能做了加强,用户既可以恢复已删除到垃圾箱中的数据,也可以彻底删除没用的数据。

主要参考文献

陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学.清华大学出版社,1994.

黄克中,毛善培.随机方法与模糊数学应用.同济大学出版社,1987.

吴兴征,丁留谦,张金接.蒙特卡罗法在堤防工程中的应用研究.2002年防洪抗旱减灾论文选集.黄河水利出版社,2002.

吴兴征,丁留谦,张金接.堤防安全评估系统的设计与实现.人民长江.2003.

吴兴征,丁留谦,孙东亚.基于可靠性理论的堤防安全评估系统的开发.水利水电技术.2003.

吴兴征,丁留谦,张金接.防洪堤的可靠性设计方法探讨.水利学报.2003,(4):87-93.

中华人民共和国行业标准 SL258-2000.水库大坝安全评价导则.中华人民共和国水利部,2001.