

悬挂式止水帷幕深基坑减压降水的简化计算方法

李 瑛, 陈 东, 刘兴旺, 谢锡荣, 童 星, 张金红

(浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘 要: 采用悬挂式止水帷幕结合坑内减压降水的墙-井系统可有效减小坑内降水量或坑外水头降深。将基坑按面积相等等效为井壁进水的大直径承压水非完整井, 并令流入井内的水量等于止水帷幕内坑底承压水含水层内的竖直面渗流量, 以此建立坑内减压抽水量与坑外承压水头降深的关系式。该理论公式计算结果在止水帷幕插入比大于 0.6 且基坑半径与承压含水层厚度之比小于 2.0 时与有限元计算结果比较接近。因未考虑渗流方向变化时的水头损失, 数值计算结果和工程案例实测数据均表明理论公式计算结果偏大。利用参数分析研究承压含水层渗透系数各向异性、基坑平面面积、止水帷幕插入长度等因素对减压降水的影响规律。坑内减压抽水量或坑外水头降深与墙-井系统三维渗流场有关, 渗流场越接近竖向渗流, 坑外水头降深越小, 水位接近初始状态。相比数值分析, 理论公式简便直观, 可用于减压降水的初步分析。

关 键 词: 承压水; 降水; 止水帷幕; 非完整井; 渗透系数

中图分类号: TU46+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2021)03-0826-08

Simplified calculation method of decompression dewatering for deep excavation with suspended waterproof curtain

LI Ying, CHEN Dong, LIU Xing-wang, XIE Xi-rong, TONG Xing, ZHANG Jin-hong

(Zhejiang Province Architectural Design and Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310006, China)

Abstract: The wall-well system could effectively decrease the discharge inside or drawdown outside the foundation pit that comprising suspended waterproof curtain and dewatering wells. Foundation pit is assumed to be a large partially penetrating well with the same area. Based on the assumption that flow into the well is equal to the vertical flow inside the waterproof curtain, an equation is established to calculate the discharge inside and drawdown outside the pit. The discharge calculated by the proposed equation is close to that by simulated results while $L/M > 0.6$ and $r/M < 2.0$. It is showed that the calculated discharge is slightly larger than those by numerical analysis or case history. This phenomenon may be attributed to the neglect of energy loss during the flow direction change. Then the influence of some factors including the ratio between horizontal and vertical permeability coefficients, the foundation area and the curtain length is studied. Parametric analyses show that the discharge inside or drawdown outside the pit can be determined by the degree of flow field approaching vertical flow. The proposed equation is suitable for preliminary analysis of decompression dewater when cutting off confined aquifer is difficult.

Keywords: confined water; dewatering; waterproof curtain; partially penetrating well; permeability coefficient

1 引 言

随着城市化的不断深入, 在国内主要城市, 如上海、南京、杭州、武汉、天津等, 开挖深度大于 20 m 的基坑不断增加, 开挖深度大于 30 m 的基坑也越来越多。这些深基坑大多处于城市中心地带, 周边环境保护要求较高, 设计和施工除了要严格控

制挡土结构的变形外还要防范坑底承压水突涌^[1-4]。对于大面积坑底抗突涌安全系数不满足要求的情况, 解决方案主要为隔断承压含水层或降水减压。但是承压含水层一般埋藏较深, 有时以粗砂或圆砾为主, 采用超深止水帷幕隔断的施工难度大^[5], 造价高, 有时因施工质量不能达到预期效果。而直接采用深井抽水降低承压水头的方案不仅对现场施工

组织要求高, 而且会导致周边地表发生沉降^[6]。

由悬挂式帷幕和坑内减压降水井组成的“墙-井”系统被发展用于解决深基坑承压水处治难题, 并在一些工程中取得良好效果^[7-8]。该方案以“降水量最小化”为原则, 仅在坑内设置承压水非完整井, 且帷幕底深于降水井底。目前对该系统工作机制的研究较少, 计算分析基本利用数值方法^[7], 如 Shen 等^[9]利用半解析方法对该系统进行了研究。数值分析结果依赖选取参数的合理性, 且不能直接揭示机制。相较而言, 解析方法建立在诸多假设之上, 虽然计算精度有限, 但能直接反映机制, 适合用于问题的初步求解。此外, 对承压水非完整井渗流的解析已有较多研究^[10], 但考虑降水井外围悬挂式帷幕影响的较少。

本文旨在通过合理简化建立悬挂式止水帷幕深基坑减压降水的简化计算方法, 利用基坑工程的基本参数, 估算坑内抽水量和坑外水头降深, 进而优化止水帷幕的长度, 以期类似工程承压水处理提供其他解决方案。

2 墙-井系统

图 1 为深基坑承压水减压降水墙-井系统示意图。止水帷幕未隔断承压含水层, 坑内减压井的滤管完全内包于帷幕。水流从坑外绕过帷幕进入减压井的过程简化为 3 个阶段: ①第 1 阶段: 以三维流进入基坑底部, 帷幕插入长度是控制因素; ②第 2 阶段: 在帷幕内坑底承压含水层中向上渗流, 竖直渗透系数和承压含水层厚度是控制因素; ③第 3 阶段: 水平流向减压井滤管, 滤管长度和水平渗透系数是控制因素。第 2 阶段是该系统的关键, 决定着坑内抽水量和坑外承压水头降深, 与止水帷幕的插入长度和基坑的平面尺寸有关。

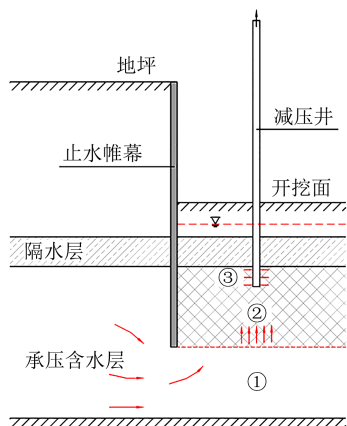


图 1 墙-井系统
Fig.1 Wall-well system

墙-井系统通过减少减压抽水量来满足抽水能力或者坑外地表沉降控制要求, 已在实际工程得到证实, 其工作机制主要包括: ①悬挂式止水帷幕增大了承压水流入减压井的渗流路径长度; ②悬挂式止水帷幕减小了承压水从坑外流向坑内的过水断面; ③利用地层沉积形成的竖直渗透系数小于水平渗透系数的特性达到减小抽水量的目的; ④水平渗流和竖直渗流的多次转换增加了渗流过程的能量消耗。经专门设计的减压降水井可满足上述要求, 相关内容可查阅相关文献^[7]。

3 计算模型

图 2 所示的计算模型用于估算墙-井系统的减压抽水量。该模型主要采用以下假定: ①降水过程为三维稳定流; ②不考虑潜水对承压水的越流补给; ③基坑等效为大直径承压水非完整井; 该假定的合理性与止水帷幕插入承压含水层的长度有关, 后文做进一步分析; ④考虑坑内降水井群工作, 坑内承压水头线简化为水平线; ⑤抽水点位于承压含水层的顶部, 实际工程可满足该做法要求; ⑥忽略地层起伏; ⑦不考虑止水帷幕厚度的影响。以上假设忽略了渗流方向变化处的能量损失, 计算结果应偏大。

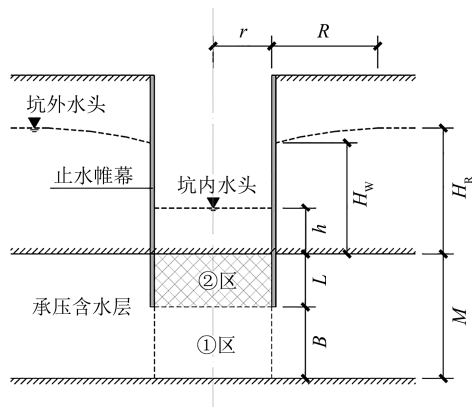


图 2 减压降水计算模型

Fig.2 Calculation model of decompression dewatering

流入①区的承压水流量 Q_1 既可简化为井底进水的承压含水层非完整井, 也可简化为井壁进水的承压含水层非完整井(为表述清楚, 简称为“大井”)。因前者成熟计算理论较少, 且 B/r 值对计算结果影响较大, 不如后者简便。故流量 Q_1 计算套用沙金焯^[11]对大井的计算公式, 即

$$Q_1 = \frac{2\pi k_h M(H_R - H_w)}{\ln(R/r) + f_0} \quad (1)$$

$$f_0 = \frac{B}{L} \ln\left(1 + \frac{LB}{Mr}\right) \quad (2)$$

式中: M 为承压含水层的厚度 (m); L 为止水帷幕插入承压含水层的长度 (m); B 为过水断面高度 (m); r 为按平面面积相等将基坑等效为圆的半径 (m); R 为大井的减压降水影响半径 (m); H_R 和 H_w 分别为承压含水层初始水头和减压降水后坑外最低水头 (m); k_h 为承压含水层的水平渗透系数 (m/d)。

式 (1) 建立在将渗流场以假想的虚线分开为上部渗流场和下部渗流场, 求得流线长度后加权平均。该式形式简单, 精度较高, 适用范围较广。与有限元分析和弗兰克电拟试验相比^[10], 在减压井滤管插入比 L/M 为 0.05~0.80、减压井半径与承压水含水层厚度之比 r/M 为 0.005~0.001 时, 渗流量最大误差仅为 14%。深基坑的宽度一般与承压含水层厚度相当, 甚至较大, 式 (1) 在 $r/M > 0.1$ 甚至 > 1.0 时能否适用需要作进一步验证。

对图 2 所示的计算模型, 进一步假设②区仅发生竖直渗流, 并忽略渗流方向变化处的水头损失, 则通过②区的渗流量 Q_2 为

$$Q_2 = k_v S \frac{H_w - h}{2L} \quad (3)$$

式中: k_v 为承压含水层的竖直渗透系数 (m/d); S 为基坑的平面面积 (m²); h 为基坑内平均承压水头即坑内需保持的承压水头 (m)。

根据流量连续, 令式 (1) 与式 (3) 相等, 可求得坑外最低承压水头, 即

$$H_w = \frac{mH_R + nh}{m + n} \quad (4)$$

$$m = 2\pi Mk_h / k_v \quad (5)$$

$$n = \frac{S}{2L} \left[\ln \frac{R}{r} + \frac{B}{L} \ln \left(1 + \frac{LB}{Mr} \right) \right] \quad (6)$$

式中: m 和 n 均为无量纲系数。 m 反映承压含水层的特性, 与厚度和渗透系数各向异性有关。 n 的影响因素较多, 与基坑几何尺寸、止水帷幕插入长度、承压含水层厚度、减压抽水影响半径等因素有关。

将式 (4) 代入式 (3) 可得墙-井系统抽水量 Q :

$$Q = \alpha k_v S \frac{H_R - h}{2L} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{m}{m + n} \quad (8)$$

式中: α 为无量纲系数。

式 (7) 与止水帷幕内坑底承压含水层竖直渗流的达西定律表达式相比, 仅增加 α 。对特定地层

中的某个基坑, m 为定值, n 仅与止水帷幕插入承压含水层的长度有关, 因此可得到两者之间的关系式。

式 (4) 可进一步表述为

$$H_w = h + \alpha(H_R - h) \quad (9)$$

如前所述, 墙-井系统是否可行, 既与坑外允许的承压水头降深有关, 也与坑内的减压抽水能力有关。当周边环境要求较低时, 悬挂式止水帷幕用于保证坑内减压抽水量大于承压水补给量, 此时为水位控制性减压降水。当周边环境要求较高时, 悬挂式止水帷幕用于保证坑外承压水头降深在控制范围之内, 此时为沉降控制性减压降水。地表沉降与坑外承压水头降深有较强相关性, 降深越大则地表沉降越大^[12]。

根据墙-井系统设置要求, 坑内减压井的滤管长度应小于止水帷幕插入承压含水层的长度。考虑到减压井半径与“大井”半径的相对大小, 坑内减压井可简化为不考虑帷幕影响的承压水非完整井。理论上讲, 只要减压井足够密集, 大井内的承压水头可保持为假定中的直线。但是坑内减压井数量实际有限, 降水曲线为漏斗状, 式 (7) 的计算值要比实际减压抽水量偏小。

4 验证

4.1 数值分析

图 3 所示的三维有限元模型用于验证本文公式的合理性和适用范围。数值分析采用 Midas/gts 软件, 地层参数和止水帷幕长度同下文的案例丙, 基坑为圆形, 半径为 30 m。为减小承压水降水半径的影响, 模型大小取 2 000 m×2 000 m×100 m (高)。为使降水后的坑内承压水位接近水平, 坑内布置足够数量的井点。止水帷幕采用板单元结合界面模拟。承压水及抽水边界采用节点水头模拟。为消除潜水对承压水的越流补给影响, 分别在承压水层顶底板处添加界面模拟隔水层。

图 4 为止水帷幕插入比 $L/M = 0.6$ 时, 渗流达到稳定状态下的流网图。由图 4(a)可知, 水流以三维流形式绕过止水帷幕进入基坑底部, 墙-井系统内的渗流场趋近竖直向渗流。结合图 4(b), 由流径与等水头线的关系可知, 水头等值线分布形式基本合理。流入②区的渗流量可通过流网计算得到, 有限元中可通过流量选项指定计算②区的渗流量。图 5 为对下文案例丙有限元分析结果和本文公式计算结果的对比。有限元计算的降水量为墙-井系统渗流

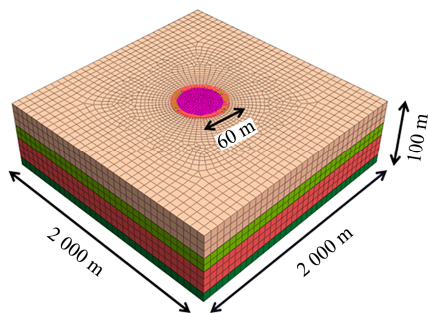
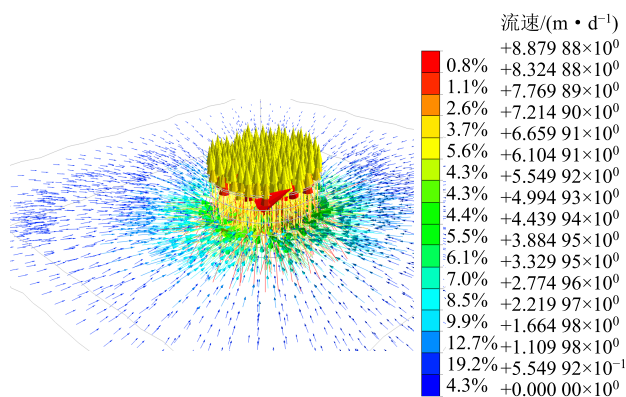
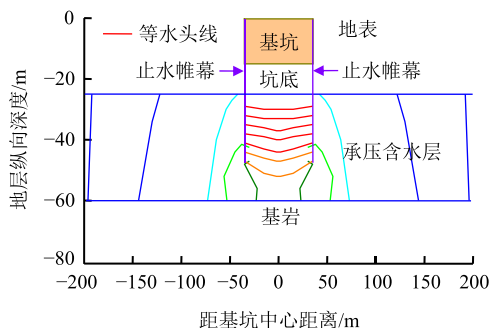


图3 三维有限元模型

Fig.3 3D finite element model for dewatering



(a) 渗流速度矢量



(b) 等水头线

图4 三维流网图

Fig.4 3D finite element diagram of flow net

达到稳定状态坑内所有减压井抽水量的总和。由图可知, 止水帷幕插入比 L/M 在 $0 \sim 1.0$ 之间时, 本文公式计算结果与有限元计算结果比较吻合, 有限元计算抽水量比本文计算抽水量小 14% 左右。如前所述, 公式未考虑渗流方向变化时的水头损失, 故计算结果比有限元结果偏大。这说明 r/M 为 0.9 时, 在 $0 \leq L/M \leq 1.0$ 范围内, 将墙-井系统等效为井壁进水的承压含水层非完整井具有合理性。

上述分析验证了本文计算公式在一定条件下具有适用性, 同时也证明了有限元计算结果的准确

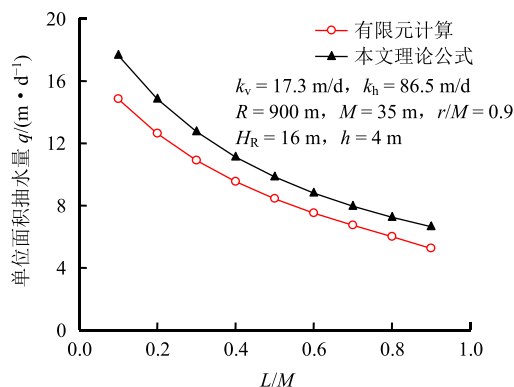


图5 抽水量计算结果对比

Fig.5 Comparison of discharges by the proposed equation and by numerical simulation

性。因此, 通过有限元计算验证本文计算公式的适用范围是合理的。其中, 地层参数同案例丙, 研究墙-井系统渗流达到稳定状态时, 止水帷幕插入长度与基坑面积对坑内抽水量的影响。对比两者计算结果, 给出本文计算公式的适用范围。

图 6 显示了基坑面积对减压抽水量的影响规律。当 $r/M = 0.1$ 时, 在 $0.1 \leq L/M \leq 0.9$ 范围内, 有限元计算结果与本文公式结果基本一致; 当 $r/M = 1.0$ 时, 两者在止水帷幕插入比较大时的计算结果吻合度较好; 当 $r/M = 2.0$ 时, 两者计算结果开始出现差异, 且有限元计算结果较大。

图 7 为不同止水帷幕插入比时单位面积抽水量与基坑面积之间的关系。由图可知, 本文公式计算结果与有限元结果规律吻合。随基坑半径增大, 有限元计算结果和本文公式计算结果都是先增加后减小再趋于稳定, 且在 $r/M = 1.0$ 时单位面积抽水量达到峰值。当 $r/M \geq 5.0$ 时, 基坑面积对单位面积抽水量的影响较小。

图 8 为有限元计算抽水量和本文公式计算抽水量的比值 η 与基坑面积之间的关系曲线。随止水帷幕插入比增大, η 逐渐减小; $r/M \leq 2.0$ 时, 随基坑面积增大, η 先增大后减小, η 的数值在 $0.96 \sim 1.20$ 之间; $r/M > 2.0$ 时, 随基坑面积增大, η 基本不变, η 的数值在 $0.68 \sim 0.89$ 之间。

图 7 和图 8 说明, 对案例丙所处地层, 本文计算公式在止水帷幕插入比 $L/M > 0.6$ 、基坑半径与承压含水层厚度之比 $r/M < 2.0$ 时有较好的适用性。

4.2 实例分析

表 1 利用 4 个工程案例对比分析了本文公式计算值与工程实测值的差异。甲和乙分别为杭州地铁 1 号线过钱塘江隧道北风井和南风井, 丙和丁分别为杭州地铁 6 号线钱江世纪城站标准段 A 区和 B

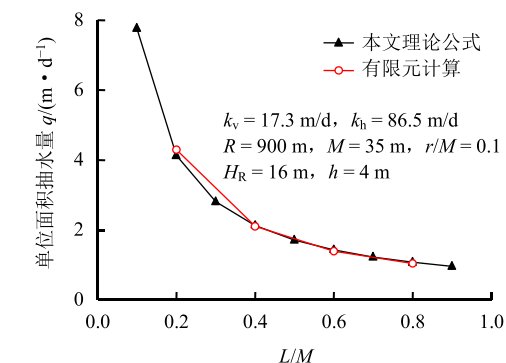
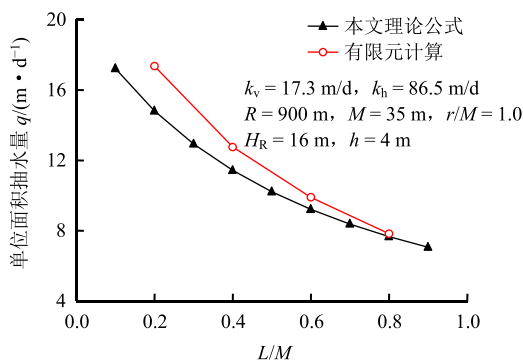
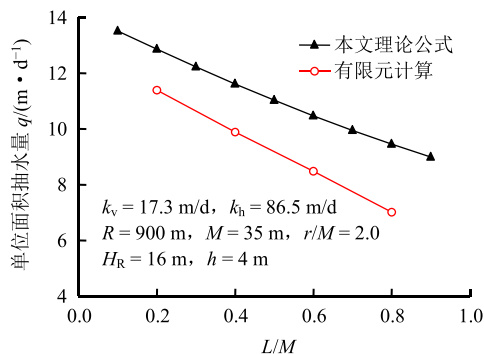
(a) $r/M = 0.1$ (b) $r/M = 1.0$ (c) $r/M = 2.0$

图6 不同基坑面积的抽水量计算结果对比

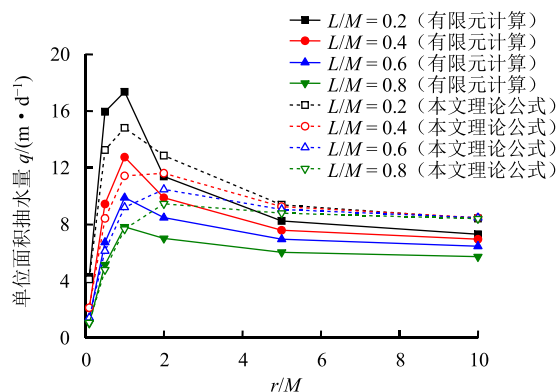
Fig.6 Discharges by proposed equation and by numerical simulation for different r/M 

图7 不同止水帷幕插入比的抽水量计算结果对比

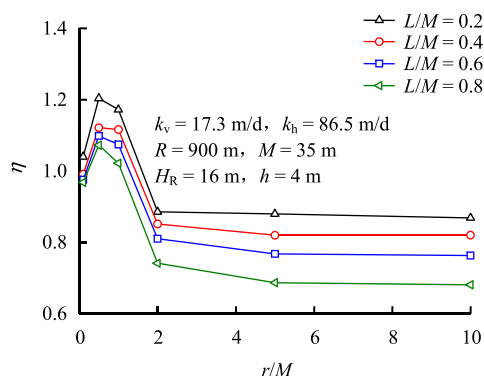
Fig.7 Discharges by proposed equation and by numerical simulation for different L/M 

图8 不同止水帷幕插入比的抽水量计算结果比值

Fig.8 Discharges by proposed equation and by numerical simulation for different L/M

区。数据主要来源于参考文献[7]和案例周边项目地勘资料。大井的减压降水影响半径按《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[13]计算。 Δ 为计算抽水量 Q_{cal} 与实测抽水量 Q_{rec} 之间的偏差, $\Delta = (Q_{cal} - Q_{rec}) / Q_{rec} \times 100\%$ 。 Q_{jgi} 为按《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[13]的公式 E.0.4 计算的抽水量, 承压水非完整井, 不考虑止水帷幕的影响, () 内数字为其与本文公式计算抽水量的倍数。 q

表1 典型工程减压降水量的实测值与计算值对比

Table 1 Water discharge in typical pit foundations

工程 编号	承压含水层特性					基坑特性				止水帷幕特性					h /m	s_w /m	H_w /m	Q_{cal} /($m^3 \cdot d^{-1}$)	Q_{rec} /($m^3 \cdot d^{-1}$)	Q_{jgi} /($m^3 \cdot d^{-1}$)	Δ /%	q /($m \cdot d^{-1}$)
	M /m	k_v /($m \cdot d^{-1}$)	k_b/k_v	R /m	H_R /m	S /m ²	L /m	B /m	R /m	L/M	r/M	m	n	α								
甲	25	17.3	5	900	23	307	4	21	10	0.16	0.40	785	232	0.77	7.0	3.65	19.4	8 190	6 000	38 540 (4.71)	26.7	19.5
乙	32	17.3	5	900	20	307	9	23	10	0.28	0.31	1 005	99	0.91	2.0	1.61	18.4	4 830	4 440	50 145 (10.38)	8.1	14.5
丙	35	17.3	5	900	16	3 041	31	4	31	0.89	0.89	1 100	166	0.87	4.0	1.57	14.4	8 839	7 200	55 417 (6.27)	18.5	6.4
丁	35	17.3	5	900	16	2 160	31	4	26	0.89	0.75	1 100	124	0.90	4.0	1.21	14.8	6 493	4 800	52 231 (8.04)	26.1	2.3

为单位面积抽水量, 可用于评估坑内降水井抽水能力, $q = Q_{\text{rec}}/S$ 。计算抽水量比实测抽水量偏大 8.1%~26.7%。该结果间接说明沙金煊公式^[1]在止水帷幕插入比 (L/M) 为 0.16~0.89、降水井半径与承压水含水层厚度之比 (r/M) 为 0.31~0.89 时有较好的适用性。与有限元计算结论对比可知, 不同案例参数下, 本文计算公式适用范围内的计算抽水量均能较好吻合。本文公式计算抽水量只有规范公式计算抽水量的 6.0%~21.2%, 说明悬挂式止水帷幕可使减压抽水量大幅度减小。

5 参数分析

以案例丙为基础对计算公式进行参数分析。图 9 所示为承压含水层渗透系数各向异性对坑内单位面积抽水量 q 和坑外水头降深 s 的影响, $s = H_R - H_w$, 分析时水平渗透系数保持不变。随着竖直渗透系数的减小, 单位面积抽水量逐渐减小, 先快后慢, 且大致以 $k_h/k_v = 4$ 为分界点。坑外承压水头降深的变化规律类似。如前所述, 地层沉积导致的水平渗透系数大于竖直渗透系数是墙-井系统工作的基础, 竖直渗透系数越小, 坑内抽水量和坑外水头降深均越小。

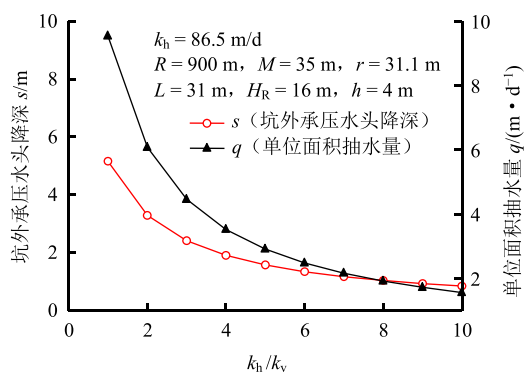


图 9 承压含水层渗透系数各向异性对降水的影响
Fig.9 Relationship between k_h/k_v and $s(q)$

图 10 分析了基坑平面面积对减压抽水的影响。当 $0.1 \leq r/M \leq 1.8$ 时, 基坑面积对单位面积抽水量的影响较大, 随着面积增大, 单位面积抽水量增速逐渐减缓, 与前文计算规律相一致。坑外水头降深随基坑面积增大而增加。需要指出的是, 本文公式将基坑按平面面积相等等效为圆, 没有考虑平面形状的影响。

止水帷幕插入承压含水层的长度对减压降水的影响如图 11 所示。随着插入比 L/M 的增大, 单位面积抽水量呈双曲线式减小, 坑外水头降深的变

化规律相似。具体对案例丙而言, 若以单位面积抽水量小于 10 m/d 为控制标准, 则帷幕插入比应大于 0.52; 若以坑外水头最大降深小于 2 m 为控制标准, 则帷幕插入比应大于 0.65。此外, 按止水帷幕插入长度为 0 时计算的抽水量为 50 776 m³, 与按《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[13]公式 E.0.4 计算的抽水量 55 417 m³ 十分接近。

图 12 对系数 α 进行了分析。 α 随帷幕插入比的增大而增大, 最大值约 0.90, 且变化速率大致以 0.7 为分界点先大后小。 α 随基坑平面面积或等效半径

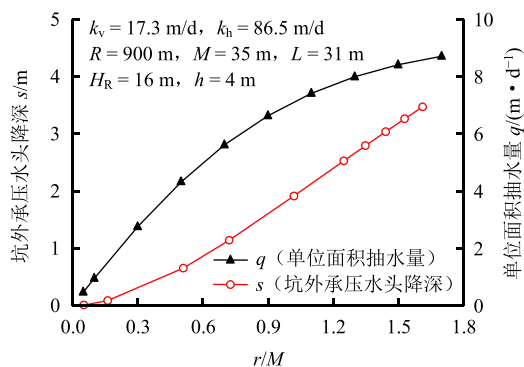


图 10 基坑平面面积对降水的影响
Fig.10 Relationship between r/M and $s(q)$

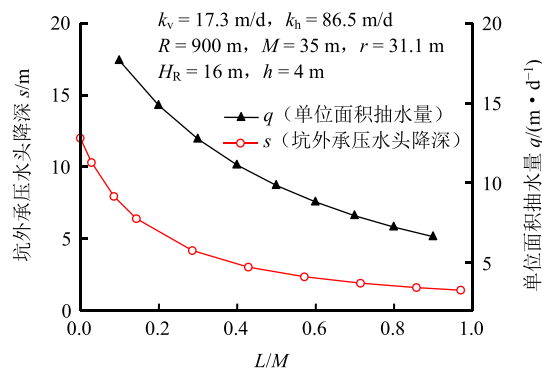


图 11 止水帷幕插入长度对降水的影响
Fig.11 Relationship between L/M and $s(q)$

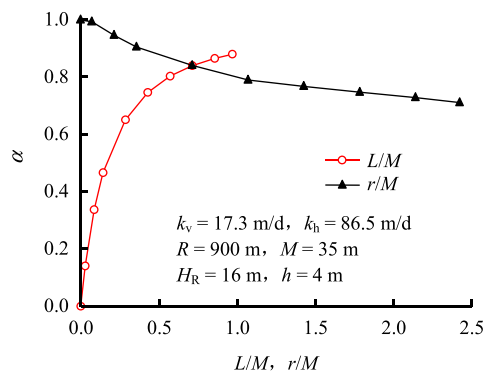


图 12 基坑面积和帷幕长度对系数 α 的影响
Fig.12 Relationship between L/M (r/M) and α

增大而减小,变化速率较小;基坑等效半径从 M 增大到 $2M$, α 的数值减小不到 0.05。这说明系数 α 表征的是墙-井系统三维渗流与竖直渗流的接近程度;数值越接近于 1.0 则越趋近竖直渗流;数值越接近于 0 则越趋近水平渗流。回到式 (9),渗流场越接近竖直渗流,坑外水头降深越小,水位接近初始状态;反之,渗流场越接近无止水帷幕时的渗流。

6 结 论

(1) 墙-井系统的三维渗流可简化为 3 阶段,由此建立的计算公式直接反应机制,可用于降水初步设计。因未考虑渗流方向变化时的能量损失,计算结果偏大。

(2) 本文公式计算结果在止水帷幕插入比 $L/M > 0.6$ 、基坑半径与承压含水层厚度之比 $r/M < 2.0$ 时与有限元计算结果比较接近。

(3) 止水帷幕内坑底承压含水层的竖直渗流是关键,竖直渗透系数越小,坑内抽水量或坑外水头降深越小。

(4) 止水帷幕的插入比越大,墙-井系统渗流场越趋近竖直渗流,坑内抽水量或坑外水头降深越小;反之,渗流场越接近无止水帷幕时的渗流。

(5) 计算公式未考虑止水帷幕底部含水层对水头的消耗作用,亦未考虑基坑平面形状的影响,可做进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 张雪婵, 张杰, 龚晓南, 等. 典型城市承压含水层区域性特征[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1998-2004.
ZHANG Xue-chan, ZHANG Jie, GONG Xiao-nan, et al. Regional property of confined aquifer in typical cities[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2010, 44(10): 1998-2004.
- [2] 刘国彬, 王洪新. 上海浅层粉砂地层承压水对基坑的危害及治理[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 790-792.
LIU Guo-bin, WANG Hong-xin. Influence of the pressure water in shallow silty sand in Shanghai on excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(6): 790-792.
- [3] 张杰青, 陈海兵, 施木俊, 等. 基坑地下承压水的控制设计及抢险方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 1108-1110.
ZHANG Jie-qing, CHEN Hai-bing, SHI Mu-jun, et al. Control design and method of rushing to deal with an emergency of the ground press water of foundation pit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Suppl.): 1108-1110.
- [4] 虞利军, 陶灵聪, 苏华. 钻孔引发基坑管涌事故的分析与处理对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(9): 72-74.
YU Li-jun, TAO Ling-cong, SU Hua. Analysis on foundation pit piping accident caused by drilling and the treatment countermeasures[J]. **Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)**, 2016, 43(9): 72-74.
- [5] 刘杨, 刘维, 史培新, 等. 超深地连墙成槽富水软弱层局部失稳理论研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 1): 10-18.
LIU Yang, LIU Wei, SHI Pei-xin, et al. Local instability analysis of the ultra-deep wall-to slotted in water rich soft layer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(Suppl.1): 10-18.
- [6] 曾超峰, 薛秀丽, 宋伟伟, 等. 开挖前降水引发基坑变形机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2963-2972, 2983.
ZENG Chao-feng, XUE Xiu-li, SONG Wei-wei, et al. Mechanism of foundation pit deformation caused by dewatering before soil excavation: an experimental study[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(9): 2963-2972, 2983.
- [7] 吴林高, 朱雁飞, 娄荣祥, 等. 深基坑承压水危害综合治理技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
WU Lin-gao, ZHU Yan-fei, LOU Rong-xiang, et al. Comprehensive treatment of damages caused by confined water in deep excavation engineering[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016.
- [8] 王建秀, 郭太平, 吴林高, 等. 深基坑降水中墙-井作用机理及工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 564-570.
WANG Jian-xiu, GUO Tai-ping, WU Lin-gao, et al. Mechanism and application of interaction between underground wall and well in dewatering for deep excavation[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2010, 6(3): 564-570.
- [9] SHEN S L, WU Y X, MISRA A. Calculation of head difference at two sides of a cut-off barrier during excavation dewatering[J]. **Computers and Geotechnics**, 2017, 91: 192-202.