

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.02.011

振荡试验确定倾斜承压含水层水文地质参数

戴云峰¹, 周志芳¹, 赵燕容¹, 吴 蓉²

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学文天学院, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 为评价振荡试验在获取倾斜承压含水层水文地质参数过程中含水层倾角对计算结果的影响, 基于 Kipp 模型推导了考虑承压含水层倾角的振荡试验解析解模型。倾斜承压含水层量纲一贮水系数和量纲一导水系数不变条件下, 测试井-含水层系统的量纲一阻尼系数随着倾角的增加而增加。修正模型计算的量纲一阻尼系数与 Kipp 模型计算的量纲一阻尼系数偏差 10% 以上时, 必须考虑倾角的影响并且承压含水层倾角对水头响应曲线造成影响临界角度约为 34°。修正模型和 Kipp 模型对现场振荡试验水头响应曲线分析结果的差异表明, 忽略含水层倾角会对倾斜承压含水层导水系数和贮水系数的计算结果产生较大误差。

关键词: 振荡试验; 倾斜承压含水层; 倾角; 导水系数; 贮水系数

中图分类号: P641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2015)02-0233-10

振荡试验是水文地质学中现场确定含水层水文地质参数最为方便的一种技术。在测试井内利用迅速注入、抽取一定体积的水或压缩井内水面以上空气后瞬时泄压等方式造成井内水位瞬时升高或降低, 通过高精度的传感器采集测试井内水头响应过程, 分析水头响应数据以获取含水层导水系数和贮水系数。振荡试验与常规水文地质试验(如抽水试验和压水试验)相比更加便捷经济。常规水文地质试验往往需要更多的观测井以及较长的试验时长, 某些现场复杂地质条件甚至会导致抽水试验和压水试验无法顺利进行。

振荡试验在国外已有 60 多年的研究历史, 而国内振荡试验的研究起步较晚。Hvorslev^[1]首次利用观测水位恢复时间方法现场确定土体的渗透系数。Cooper 等^[2]和 Papadopoulos 等^[3]推导了振荡试验水头非振荡响应的解析解。Koussis 和 Akylas^[4]基于 Hvorslev 模型和 Cooper 模型开发了振荡试验的准稳态水流模型。Kamp^[5]分析了考虑振荡试验惯性效应的水头振荡响应。Kipp^[6]基于 Cooper 模型和 Kamp 模型推导了分析范围从忽略惯性效应的过阻尼振荡到考虑惯性效应的欠阻尼振荡解析解。Weeks 和 Clark^[7]基于 Kipp 模型更加精确地评价了近临界过阻尼振荡效应, 提高了水文地质参数计算的精度。Hyder 等^[8]提出了描述地下水对非完整井内振荡试验响应的半解析解模型。Butler 和 Zhan^[9]推导了高渗透系数含水层振荡试验的半解析解模型。Choi^[10]利用振荡试验获取垂直防渗墙的渗透系数。Lim 等^[11]推导了垂直防渗墙内考虑两种直接边界条件的振荡试验模型。周志芳等^[12-14]研究了裂隙介质中的振荡试验, 编制了国内首本振荡试验行业规程, 并且开发出高精度振荡试验测试系统。Zhao 和 Zhou^[15]利用振荡试验测试系统准确高效地获得泰州大桥北锚碇所在地不同深度岩土体的导水系数和贮水系数。赵燕容等^[16-17]根据现场振荡试验对比分析了 Kipp 模型和 Cooper 模型在获取含水层水文地质参数的差异。周志芳等^[18-19]利用振荡试验有效评价了地下水封储油洞库区裂隙岩体的渗透性, 通过解析反演的方法确定了测试井内每条裂隙的导水系数, 准确计算了裂隙岩体的渗透系数张量并且基于张量特征值扰动分析理论确定出优势导水裂隙。

收稿日期: 2014-07-30; **网络出版时间:** 2015-03-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20150316.1454.011.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172204); 中央高校基本科研业务费资助项目(2014B34814)

作者简介: 戴云峰(1988—), 男, 江苏兴化人, 博士研究生, 主要从事地下水科学与工程方面研究。

E-mail: daiyunfeng1988@163.com

通信作者: 周志芳, E-mail: zhouzf@hhu.edu.cn

上述振荡试验模型都以水平含水层为研究对象,但在实际现场获取含水层水文地质参数时,含水层往往并非理想的水平状态。虽然对缓倾含水层进行振荡试验获取水文地质参数时,通常将缓倾含水层近似为水平含水层,但倾斜含水层倾角对振荡试验获取倾斜含水层水文地质参数准确度的影响没有得到有效评估。本文基于 Kipp 模型推导了考虑倾斜承压含水层倾角影响的振荡试验解析解模型,并绘制了一系列标准曲线以用于振荡试验获取倾斜含水层导水系数和贮水系数。倾斜含水层倾角对振荡试验测试井内水头响应的影响以及对倾斜含水层导水系数和贮水系数计算结果的影响都得到了直接并有效的评价。

1 理论模型建立及求解

倾斜承压含水层振荡试验主井内水头响应解析解表达式,通过建立包含倾斜承压含水层内水流控制方程、测试井与倾斜承压含水层流量平衡方程以及测试井-倾斜承压含水层动量守恒方程的方程组来进行求解。

1.1 理论模型建立

振荡试验测试井为倾斜承压含水层完整井,测试井-倾斜承压含水层系统走向方向垂直剖面见图1。选取

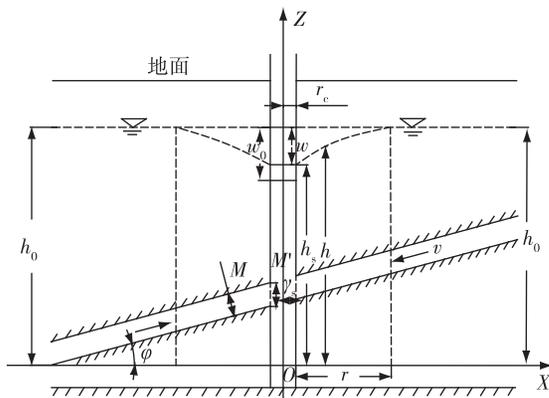


图1 振荡试验测试井-倾斜承压含水层系统走向方向垂直剖面

Fig. 1 Vertical section of the test well-tilted confined aquifer for slug tests in the strike direction

倾斜含水层下面某一水平面为基准面,测试井轴线与其相交的点为坐标原点,坐标系中 φ 为含水层倾角, M 为含水层真实厚度, M' 为含水层在测试井内的视厚度,即倾斜承压含水层的铅垂厚度, v 为倾斜承压含水层振荡试验过程中水流速度, r 为水平径向距离, r_s 为测试井过滤器半径, r_c 为测试井套管半径, h 为倾斜承压含水层内总水头, h_s 为测试井中接近过滤器的水头值, h_0 为倾斜承压含水层中初始水头值, w 为测试井内某时刻水位至初始水位的位移值, w_0 为测试井内水位至初始水位的最大位移值。

根据极坐标系中微观质量守恒定律可得承压含水层中水流控制方程为^[6]

$$\frac{\partial^2 h(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h(r,t)}{\partial r} = \frac{S}{T'} \frac{\partial h(r,t)}{\partial t} \quad (1)$$

式中 h 为倾斜承压含水层内总水头, [L]; t 为振荡试验出现最大水位差为初始时刻的时间值, [T]; r 为水平径向距离, [L]; S 为倾斜承压含水层贮水系数; 定义 $T' = M'K$ 为倾斜承压含水层视导水系数, [L²/T]; K 为倾斜承压含水层渗透系数, [L/T]; M' 为倾斜承压含水层的铅垂厚度, [L]。

水流控制方程满足初始条件为

$$h(r, t = 0) = h_0 \quad (2)$$

水流控制方程满足边界条件为

$$h(r \rightarrow \infty, t) = h_0 \quad (3)$$

式中 h_0 为倾斜承压含水层中初始水头值, [L]。

假设振荡试验过程中倾斜承压含水层水流为与含水层顶板和底板平行的层流。测试井孔穿过倾斜承压含水层在空间形成的椭圆柱面进水口在 XOY 平面投影为圆形。

测试井内部边界条件位于椭圆进水口水平径向距离 $r = r_s$ 处, 边界条件为

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(h(r,t) - f \frac{\partial h(r,t)}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_s} d\theta = h_s(t) \quad (4)$$

式中 $h_s(t)$ 为测试井中接近过滤器的水头值; f 为薄壁效应因子, 假设过滤器对测试井孔附近水头没有影

响, 即 $f=0$; r_s 为测试井过滤器半径, 即椭圆水平投影圆的半径; θ 为倾斜承压含水层中径向流在水平极坐标系中极角。

倾斜承压含水层中距离井轴线 r 处通过过水断面微元的水流满足达西定律, 过水断面微元在水平面上的投影见图 2^[20], 通过过水断面微元的流量可表示为

$$dq = M''r_0 d\theta K \frac{dh}{dl} \quad (5)$$

式中 M' 为倾斜承压含水层中与测试井轴线水平距离 r 处径向水流过水断面垂直高度, [L]; l 为沿倾斜承压含水层地下水渗流距离, [L]; r_0 为沿倾斜承压含水层过水断面与测试井轴线的距离, [L]。

$$r_0 = \frac{r}{\cos\gamma}, \quad \frac{dr}{dl} = \cos\gamma, \quad M'' = M' \cos\gamma, \quad M' = \frac{M}{\cos\varphi} \quad (6)$$

式中 φ 为倾斜承压含水层倾角; γ 为倾斜承压含水层内非倾角方向径向流与水平面的夹角, 其在 XOZ 平面的投影见图 3^[20]; M 为倾斜承压含水层的真实厚度, [L]。

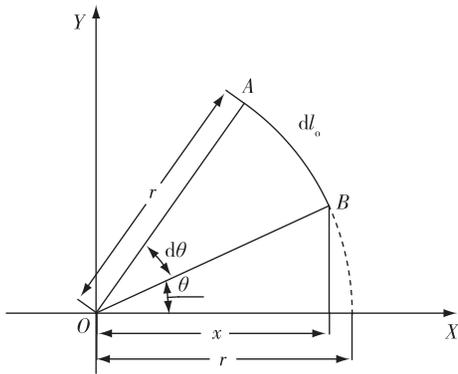


图 2 倾斜承压含水层中水头降落漏斗平面图
Fig. 2 Plan of water head drawdown funnel in tilted confined aquifer

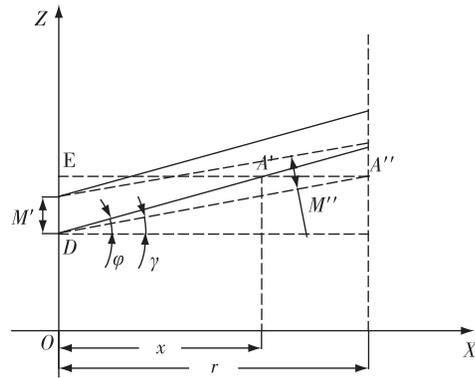


图 3 根据极坐标角 θ 和承压含水层倾角 φ 确定 γ 示意
Fig. 3 Schematic diagram for determining γ by the polar angle θ and dip φ of the tilted confined aquifer

γ 角度的大小取决于倾斜承压含水层倾角 φ 和径向流水平极角 θ , 根据图 3 可得

$$\cos\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2\varphi \cos^2\theta}} \quad (7)$$

根据测试井-倾斜承压含水层流量平衡原理可将套管内水位变化与倾斜承压含水层流入井中的水量联系起来, 由式(5)~式(7)可得测试井附近水头满足如下方程:

$$\pi r_c^2 \frac{dw(t)}{dt} = \int_0^{2\pi} T' \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2\varphi \cos^2\theta}} r \frac{\partial h(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_s} d\theta \quad (8)$$

式中 r_c 为套管半径; $w(t)$ 为测试井中 t 时刻水位至初始水位的位移值。初始条件为

$$w(t=0) = w_0 \quad (9)$$

测试井-倾斜承压含水层仍然满足 Kipp 模型所建立的井-含水层动量守恒方程, 可获得根据几何尺寸计算测试井内有效水体长度 L_e 以及测试井内水位波动方程:

$$L_e = L + \frac{r_c^2}{r_s^2} \frac{M'}{2} \quad (10)$$

$$\frac{d^2w(t)}{dt^2} + \frac{g}{L_e} w(t) = \frac{g}{L_e} [h_s(t) - h_0] \quad (11)$$

式中 L 为测试井内水面到井与倾斜承压含水层相交构成的椭圆进水口的中心距离, $[L]$; g 为重力加速度, $[L/T^2]$ 。初始条件为

$$w(t=0) = w_0, \quad \left. \frac{dw}{dt} \right|_{t=0} = w_0^*, \quad h_s(t=0) = h_0 \quad (12)$$

式中 w_0 为测试井内水位最大位移值, $[L]$; w_0^* 为测试井内水面初速度, $[L/T]$, 且假设测试井内水面初速度为 0。

1.2 理论模型求解

通过引入量纲一变量和量纲一参数将上述方程、初始条件和边界条件转化为量纲一的形式^[6]:

$$w' = -\frac{w(t)}{w_0}, \quad w_0^{*'} = -\frac{w_0^* r_s^2 S}{w_0 T'}, \quad h' = \frac{h_0 - h(r,t)}{w_0}, \quad h_s' = \frac{h_0 - h_s(r,t)}{w_0} \quad (13)$$

$$t' = \frac{t T'}{r_s^2 S}, \quad \hat{t} = \frac{t'}{\sqrt{\beta}}, \quad r' = \frac{r}{r_s} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{r_c^2}{2r_s^2 S}, \quad \beta = \frac{L_c}{g} \left(\frac{T'}{r_s^2 S} \right)^2 \quad (15)$$

式中 w' 为测试井内量纲一水位变化值; $w_0^{*'}$ 为测试井内量纲一水面初速度; h' 为倾斜承压含水层内量纲一水头值; h_s' 为测试井过滤器处量纲一水头值; t' 为量纲一时间; \hat{t} 为标准曲线分析的量纲一时间; r' 为量纲一径向距离; α 为量纲一贮水系数; β 为量纲一惯性系数。

量纲一水流控制方程、量纲一波动方程和量纲一流量平衡方程组成的方程组可以通过拉普拉斯变换技术求解, 求解因变量拉普拉斯变换方程组可得

$$w'(s) = -\frac{\frac{\alpha K_0(\sqrt{s})}{\sqrt{s} f_1(s)} + \beta s - \beta w_0^{*'}}{\beta s^2 + \frac{\alpha K_0(\sqrt{s})}{\sqrt{s} f_1(s)} s + 1}, \quad f_1(s) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi \cos^2 \theta}} K_1(\sqrt{s}) d\theta \quad (16)$$

式中 s 为拉普拉斯变量; $w'(s)$ 为测试井内量纲一变化水位 $w'(t')$ 的拉普拉斯变换; β 为量纲一惯性系数; K_0 、 K_1 分别为 0 阶、1 阶第二类修正贝塞尔函数。

对式(16)中 $f_1(s)$ 进行数值积分并拟合可得

$$f_1(s) \approx R(\varphi) K_1(\sqrt{s}) \quad (17)$$

式中 $R(\varphi) = 1.116\sqrt{\cos \varphi} - 0.1093$ ($\varphi \in [0, \frac{\pi}{2})$, 使用弧度值计算), 拟合均方根误差 (E_{RMS}) 为 0.005。

对式(16)进行直接拉普拉斯逆变换, 定义井-倾斜承压含水层系统的量纲一阻尼系数 ζ 表达式为

$$\zeta = \frac{\alpha \ln \beta}{8R(\varphi) \sqrt{\beta}}, \quad \varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right) \quad (18)$$

Kipp^[6] 根据二阶振荡系统理论确定, 当井-含水层系统的量纲一阻尼系数 $\zeta < 1$ 时, 系统欠阻尼; 当井-含水层系统的量纲一阻尼系数 $\zeta = 1$ 时, 系统临界阻尼, 此时惯性效应仍然相当重要; 当井-含水层系统的量纲一阻尼系数 $\zeta > 1$ 时, 系统过阻尼。由于 $w'(s)$ 的表达式较为复杂, Kipp^[6] 利用数值逆变换对此进行拉普拉斯逆变换以获得测试井内时间域的水位变化表达式 $w'(t')$ 。本文分别在 $\zeta < 1$, $\zeta = 1$ 和 $\zeta > 1$ 这 3 种情形下对 $w'(s)$ 直接进行拉普拉斯逆变换。式(14)定义了一种新的量纲一时间, 重新定义绘制标准曲线的量纲一时间是为了方便根据匹配点计算有效水体长度。根据式(14)可得根据匹配点计算有效水体长度的表达式:

$$L_c = \left(\frac{t}{\hat{t}} \right)^2 g \quad (19)$$

将方程 $\hat{t} = \frac{t'}{\sqrt{\beta}}$ 代入水位变化表达式 $w'(t')$ 得到关于量纲一时间 \hat{t} 的标准曲线计算方程 $w'(\hat{t})$ [17]:

当 $\zeta < 1$ 时, 测试井内水位响应为欠阻尼振荡, 水位响应量纲一表达式为

$$w'(\hat{t}) = -e^{-\zeta \hat{t}} \left[\cos(\sqrt{1-\zeta^2} \hat{t}) + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \hat{t}) \right] \quad (20)$$

当 $\zeta = 1$ 时, 测试井内水位响应为临界阻尼振荡, 水位响应量纲一表达式为

$$w'(\hat{t}) = -e^{-\hat{t}}(1 + \hat{t}) \quad (21)$$

当 $\zeta > 1$ 时, 测试井内水位响应为过阻尼振荡, 水位响应量纲一表达式为

$$w'(\hat{t}) = -e^{-\zeta \hat{t}} \left[\cosh(\sqrt{\zeta^2-1} \hat{t}) + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2-1}} \sinh(\sqrt{\zeta^2-1} \hat{t}) \right] \quad (22)$$

计算 T' 的系列步骤可参考 Kipp 模型计算步骤, 但所获得导水系数不是倾斜承压含水层的真实导水系数, 而是其视导水系数, 根据式(6)真实导水系数可通过下式求解:

$$T = T' \cos \varphi \quad (23)$$

2 水头响应标准曲线分析

为了评价倾斜承压含水层倾角对振荡试验水头恢复过程的影响, 分别计算倾斜承压含水层真实导水系数、贮水系数和真实厚度不变条件下, 倾斜承压含水层倾角 φ 为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 和 75° 时测试井中水头响应标准曲线。并且对过阻尼振荡、临界阻尼振荡和欠阻尼振荡 3 种类型的振荡试验进行分析。

根据式(18)可知利用量纲一贮水系数 α 、量纲一惯性系数 β 和倾斜承压含水层倾角 φ 计算振荡试验测试井-倾斜承压含水层系统的量纲一阻尼系数 ζ 。不同倾斜承压含水层若倾角不同、贮水系数和导水系数相同条件下, 则倾斜承压含水层的量纲一贮水系数和量纲一导水系数可认为一致, 倾斜承压含水层倾角的差异将直接导致测试井-倾斜承压含水层系统的量纲一阻尼系数差异。在本文修正模型以及 Kipp 模型中, 量纲一惯性系数都是绘制标准曲线的唯一参数。在利用标准曲线配线法反演含水层介质的贮水系数和导水系数时, 量纲一惯性系数确定的可靠性将显得尤为关键。本文通过分别改变 α 值和 β 值, 分析量纲一阻尼系数对倾斜承压含水层倾角的敏感性, 计算结果如下:

(1) 当 $\alpha = 5.0 \times 10^3$, $\beta = 1.3 \times 10^9$ 时, 测试井内水头响应标准曲线随承压含水层倾角的变化过程见图 4(a)。由曲线形态可知承压含水层倾角大于 30° 时量纲一水头响应曲线会出现明显差异, 倾角小于 30° 时修正模型计算不同倾角量纲一水头响应曲线基本重合, 并且与 Kipp 模型的计算结果十分接近。

(2) 当 $\alpha = 5.0 \times 10^3$, $\beta = 1.3 \times 10^8$ 时, 测试井内水头响应标准曲线随承压含水层倾角的变化过程见图 4(b)。由曲线形态可知承压含水层倾角大于 30° 时量纲一水头响应曲线会出现明显差异, 倾角小于 30° 时修正模型计算不同倾角量纲一水头响应曲线基本重合, 并且与 Kipp 模型的计算结果十分接近。

(3) 当 $\alpha = 5.0 \times 10^3$, $\beta = 5.5 \times 10^6$ 时, 测试井内水头响应标准曲线随承压含水层倾角的变化过程见图 4(c)。由曲线形态可知承压含水层倾角大于 30° 时量纲一水头响应曲线会出现明显差异, 倾角小于 30° 时修正模型计算不同倾角量纲一水头响应曲线基本重合, 并且与 Kipp 模型的计算结果十分接近。

图 4 中从欠阻尼振荡到过阻尼振荡的水头响应曲线随倾角的变化趋势表明, 倾斜承压含水层倾角小于 30° 时可不考虑倾角对水位恢复过程的影响, 量纲一阻尼系数 ζ 随倾斜承压含水层倾角和量纲一惯性系数的变化趋势见图 5, 量纲一阻尼系数变化值见表 1。当 $\alpha = 5.0 \times 10^3$, $\beta = 1.3 \times 10^9$ 时, 随着倾斜承压含水层倾角增加量纲一阻尼系数值逐渐增加, 倾角越大量纲一阻尼系数增加幅值也越大。当 $\alpha = 5.0 \times 10^3$, $\beta = 1.3 \times 10^8$ 时和当 $\alpha = 5.0 \times 10^3$, $\beta = 5.5 \times 10^6$ 时, 倾斜承压含水层倾角对水头恢复过程的影响与上述分析一致, 图 5 中四次多项式拟合曲线也表明倾斜承压含水层倾角越大, 倾角的变化对量纲一阻尼系数的影响越显著。

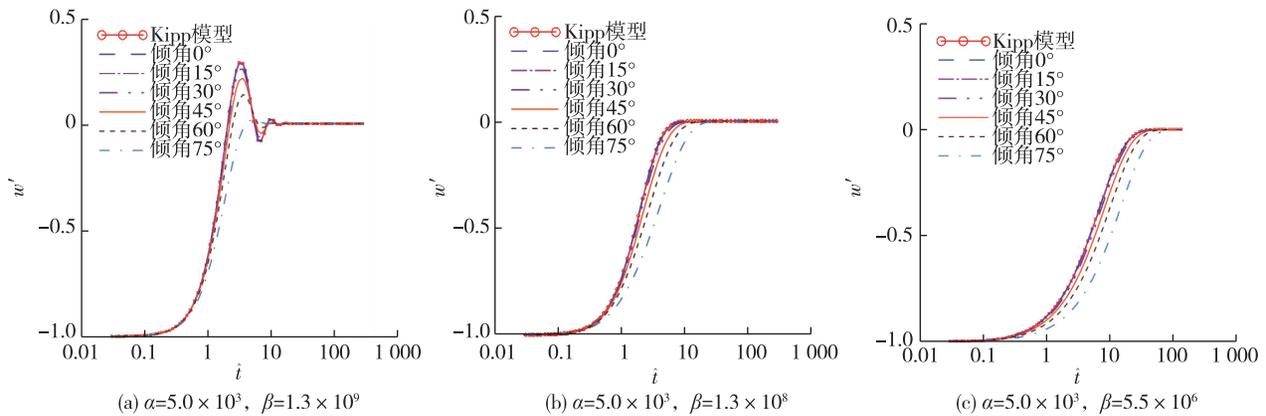


图 4 不同倾角修正模型水头响应曲线与 Kipp 模型对比

Fig. 4 Comparison of the water head response curves of the modified model with that of the Kipp model for different dips

由表 1 可知量纲一惯性系数 β 减小时，测试井-倾斜承压含水层系统的量纲一阻尼系数 ζ 将增加，即水头恢复趋于过阻尼振荡，水头恢复曲线形态由图 4(a) 转变为图 4(b) 和图 4(c)。量纲一惯性系数 β 减小的量级越大，则量纲一阻尼系数 ζ 增加幅值也越大。

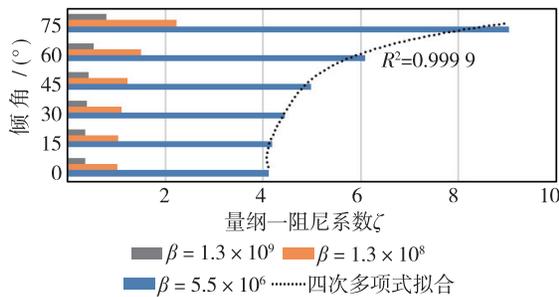


图 5 倾斜承压含水层倾角影响分析 ($\alpha = 5.0 \times 10^3$)

Fig. 5 Analytical chart for the dip effect of the tilted confined aquifer ($\alpha = 5.0 \times 10^3$)

表 1 不同倾角和量纲一惯性系数 β 条件下量纲一阻尼系数 ζ 的计算值

Table 1 Calculation results of the dimensionless damping parameter ζ at different dips and dimensionless inertial parameter β

惯性系数	倾角 0°	倾角 15°	倾角 30°	倾角 45°	倾角 60°	倾角 75°
$\beta = 1.3 \times 10^9$	0.361 4	0.368 4	0.391 5	0.438 7	0.535 1	0.793 5
$\beta = 1.3 \times 10^8$	1.017 3	1.037 1	1.102 1	1.235 2	1.506 5	2.233 9
$\beta = 5.5 \times 10^6$	4.108 6	4.188 4	4.451 1	4.988 5	6.084 1	9.021 9

为确定倾斜承压含水层倾角对水头恢复影响的临界值，若使用修正模型计算的量纲一阻尼系数与 Kipp 模型计算的量纲一阻尼系数偏差 10% 以上时，则认为必须考虑倾角的影响。根据上述计算结果，当 $\alpha = 5.0 \times 10^3$; $\beta = 5.5 \times 10^6, 1.3 \times 10^8, 1.3 \times 10^9$ 时，倾斜承压含水层倾角影响的临界值为 34° ，此时修正模型计算的量纲一阻尼系数与 Kipp 模型计算的量纲一阻尼系数偏差 10.27%。当 $\alpha = 5.0 \times 10^5, 1.24 \times 10^5, 4.4 \times 10^4$; $\beta = 1.5 \times 10^{11}$; $\varphi = 34^\circ$ 时，修正模型计算的水头响应曲线与 Kipp 模型计算的水头响应曲线如图 6 所示。

上述分析表明使用振荡试验确定倾斜承压含水层水文地质参数时，若倾斜承压含水层倾角大于 34° ，仍然忽略倾角影响使用 Kipp 模型会导致水文地质参数的计算错误。

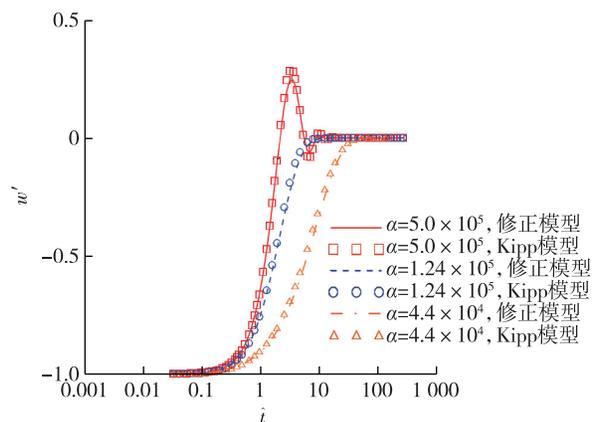


图 6 修正模型水头响应曲线与 Kipp 模型对比

Fig. 6 Comparison of the water head response curves of the modified model with that of the Kipp model

3 现场试验应用

为验证本文提出倾斜含水层振荡试验模型的正确性, 将本文修正模型计算的标准曲线用于现场振荡试验分析。现场试验在山东省的一个地下洞库内进行, 采用河海大学自主研发的振荡试验测试系统对测试井进行了准确地定向编录和气压式振荡试验。

3.1 试验场地及概况

振荡试验在山东省的一个地下洞库内进行, 洞室围岩为早白垩世二长花岗岩 (K1ηγ)。现场对测试井钻孔的每一进尺进行一组振荡试验, 试验段长度随着进尺的增加而增加。在选择的试验场地内进行钻孔取芯, 同时进行人工地质信息编录和测试系统的定向编录, 试验钻孔共钻进 11 进尺, 钻孔深度为 10.12 m, 其中, 第一进尺为 0~0.5 m; 第二进尺为 0.5~0.89 m。第一进尺未见裂隙, 第二进尺发现两条裂隙, 钻孔取芯照片与对应进尺振荡试验测试系统定向编录结果对比见图 7。钻孔岩芯裂隙的产状与振荡试验系统定向编录的结果吻合, 说明测试系统稳定可靠。第二进尺内裂隙产状统计见表 2, 裂隙 1 和裂隙 2 均位于地下水位以下。由所取岩芯可见, 裂隙 2 中存在填充物质, 故将裂隙 2 等效为厚度较薄的倾斜承压含水层, 则测试井视为倾斜含水层完整井。在第二进尺钻孔取芯工作结束以后, 在井深为 0.89 m 的钻孔内进行气压式振荡试验。

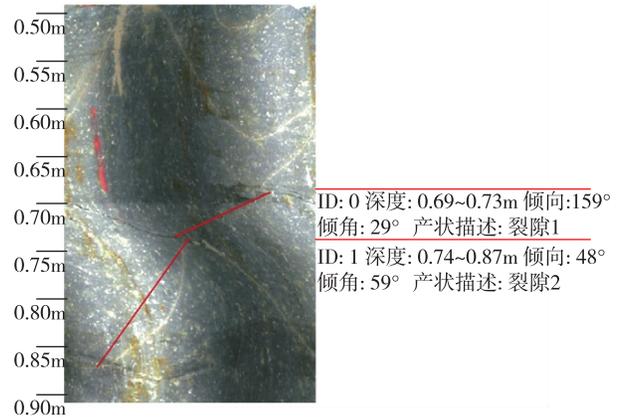


图 7 第二进尺钻孔岩芯与对应进尺振荡试验测试系统定向编录结果对比

Fig. 7 Comparison of the drill core and the recorded result by the test system of slug test in the second drilling depth

表 2 第二进尺揭示裂隙产状统计

Table 2 Results of the fracture occurrence in the second drilling depth

进尺	裂隙编号	振荡试验系统测得产状		取芯后罗盘测得倾向/(°)
		倾向/(°)	倾角/(°)	
第二进尺	裂隙 1	159	29	27
	裂隙 2	48	59	60

3.2 振荡试验结果分析

分别利用 Kipp 模型和本文修正模型对气压式振荡试验水头响应曲线进行分析, 并与周志芳等^[18]利用解析反演的方法获取的裂隙 2 导水系数结果进行对比。周志芳等^[18-19]解析反演计算结果表明, 裂隙 1 导水系数低于裂隙 2 导水系数 3 个数量级, 并且裂隙岩体渗透张量的特征值扰动分析结果也表明裂隙 2 为钻孔内优势导水裂隙。故在利用 Kipp 模型和本文修正模型对振荡试验水头响应进行分析时, 忽略裂隙 1 的导水性。标准曲线的分析结果表明, 当裂隙倾角大于 34° 时, 则不能将倾斜裂隙等效为水平裂隙, 裂隙 2 的倾角测量值为 59°, 推测裂隙的倾角会对裂隙水文地质参数的计算结果造成影响。

第二进尺内气压式振荡试验水头响应曲线与 Kipp 模型标准曲线匹配结果见图 8(a), 第二进尺内气压式振荡试验水头响应曲线与本文修正模型标准曲线匹配结果见图 8(b)。两种模型的导水系数和贮水系数的计算结果见表 3。由于裂隙的开度很小, 未能精确测量, 所以无法根据裂隙开度计算裂隙的渗透系数。

表 3 中的解析反演模型计算结果是周志芳等^[18]利用第二进尺到第十一进尺的振荡试验当量渗透系数以及测试系统获得的裂隙产状数据反演计算所得, 计算结果与压水试验分析结果吻合。由于试验过程中, 并未对裂隙 2 单独进行压水试验, 本文中的裂隙 2 的振荡试验计算结果未与压水试验的计算结果进行对比。表 3 表明, 修正模型计算裂隙 2 导水系数结果更加接近解析反演获得的裂隙 2 导水系数, 直接使用 Kipp 模型分析倾斜填充裂隙振荡试验水头响应不仅低估了裂隙的导水系数, 而且低估了裂隙的贮水系数。

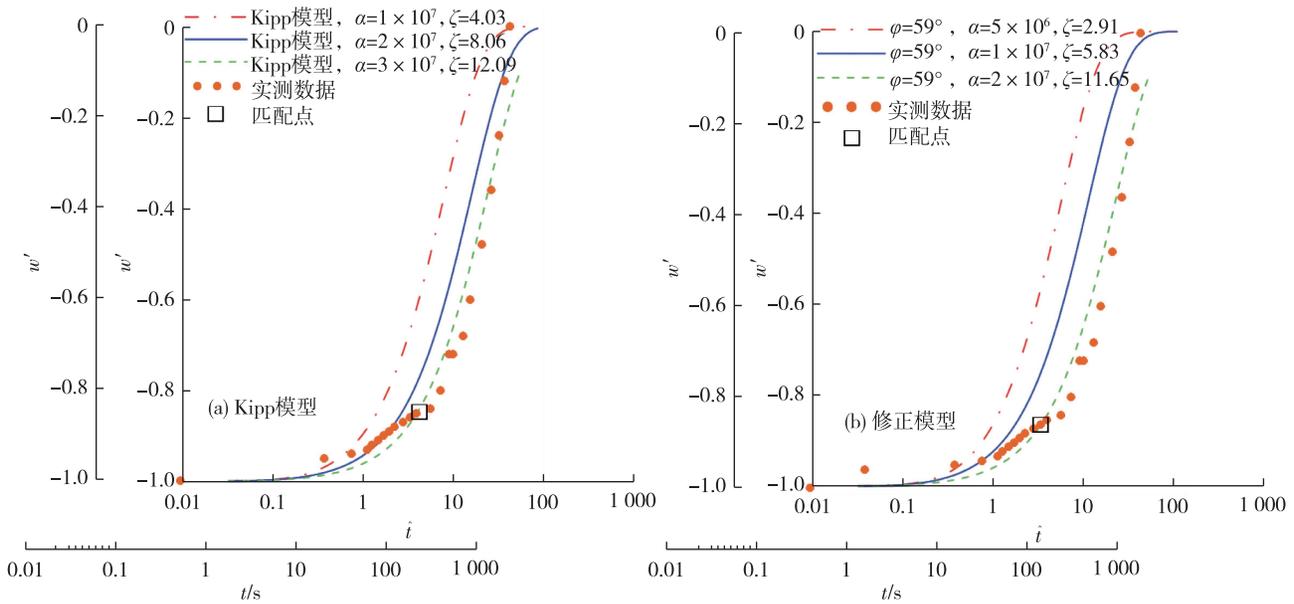


图 8 实测水头响应曲线与标准曲线匹配结果

Fig. 8 Matching result of the measured response of the water head with the type curves

表 3 Kipp 模型和修正模型分析振荡试验结果

Table 3 Analysis results of the Kipp and modified models for slug test

类型	测试井参数		模型	匹配点 t/\bar{t}	贮水系数	导水系数/($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)
	r_c/m	r_s/m				
气压式	0.063 5	0.044 5	Kipp	400/4	3.4×10^8	0.58
			修正	350/3.5	5.1×10^8	0.87
			反演 ^[18]	-	-	1.08

4 结 论

(1) 基于考虑倾斜承压含水层倾角的振荡试验解析解模型，利用承压含水层量纲一贮水系数和量纲一导水系数绘制了不同承压含水层倾角条件下欠阻尼振荡、临界阻尼振荡和过阻尼振荡 3 种振荡试验类型的水头响应标准曲线。

(2) 倾斜承压含水层振荡试验中测试井-含水层系统的量纲一阻尼系数由倾斜承压含水层的量纲一贮水系数、量纲一导水系数和倾角决定。倾斜承压含水层倾角对量纲一阻尼系数值以及水头响应曲线形态的影响表明测试井-含水层系统的量纲一阻尼系数随着倾斜承压含水层倾角增加而增加，并且倾角较大，倾角的变化对量纲一阻尼系数的影响越显著。量纲一惯性系数减小时，测试井-含水层系统的量纲一阻尼系数将增加，且量纲一惯性系数减小的量级越大，量纲一阻尼系数增加的幅值也越大。当修正模型计算的量纲一阻尼系数与 Kipp 模型计算的量纲一阻尼系数偏差 10% 以上时，需要考虑倾角的影响并且承压含水层倾角对水头响应造成影响的临界角度约为 34° 。

(3) 修正模型和 Kipp 模型对现场振荡试验水头响应曲线分析结果的差异表明，忽略倾斜承压含水层倾角会给倾斜承压含水层水文地质参数计算结果造成较大误差，文中现场试验中忽略含水层的倾角不仅导致低估倾斜承压含水层的导水系数并且低估其贮水系数。

参考文献:

[1] HVORSLEV M J. Time lag and soil permeability in ground-water observations [R]. Vicksburg: Bulletin No. 36, Engineers Waterways Experiment Station of U. S. Army Corps, 1951.

- [2] COOPER Jr H H, BREDEHOEFT J D, PAPADOPULOS I S. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water [J]. *Water Resources Research*, 1967, 3(1): 263-269.
- [3] PAPADOPULOS S S, BREDEHOEFT J D, COOPER H H. On the analysis of 'slug test' data [J]. *Water Resources Research*, 1973, 9(4): 1087-1089.
- [4] KOUSSIS A D, AKYLAS E. Slug test in confined aquifers, the over-damped case: Quasi-steady flow analysis [J]. *Groundwater*, 2012, 50(4): 608-613.
- [5] KAMP G. Determining aquifer transmissivity by means of well response tests: The underdamped case [J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(1): 71-77.
- [6] KIPP K L. Type curve analysis of inertial effects in the response of a well to a slug test [J]. *Water Resources Research*, 1985, 21(9): 1397-1408.
- [7] WEEKS E P, CLARK A C. Evaluation of near-critical overdamping effects in slug-test response [J]. *Groundwater*, 2013, 51(5): 775-780.
- [8] HYDER Z, BUTLER JR J J, MCELWEE C D, et al. Slug tests in partially penetrating wells [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(11): 2945-2957.
- [9] BUTLER J J, ZHAN X. Hydraulic tests in highly permeable aquifers [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(12): W12402.
- [10] CHOI H. Analysis of slug tests to determine hydraulic conductivity of vertical cutoff walls [D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
- [11] LIM J, LEE D, ZLOTNIK V A, et al. Analytical interpretation of slug test in a vertical cutoff wall [J]. *Groundwater*, 2014, 52(2): 284-290.
- [12] 周志芳. 裂隙介质水动力学原理[M]. 北京:高等教育出版社,2007:312-316. (ZHOU Zhifang. Theory on dynamics of fluids in fractured medium [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 312-316. (in Chinese))
- [13] 周志芳,王锦国,黄勇,等. 钻孔振荡式渗透系数取值试验规程研究[R]. 南京:河海大学,2008. (ZHOU Zhifang, WANG jinguo, HUANG Yong, et al. Regulation study of determining transmissivity by slug tests in boreholes [R]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [14] 周志芳,王仲夏,曾新翔,等. 岩土体渗透性参数现场快速测试系统开发[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(6):1292-1296. (ZHOU Zhifang, WANG Zhongxia, ZENG Xinxiang, et al. Development of rapid field test system for determining permeable parameters of rock and soil masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6): 1292-1296. (in Chinese))
- [15] ZHAO Y R, ZHOU Z F. A field test data research based on a new hydraulic parameters quick test technology [J]. *Journal of Hydrodynamics: Ser B*, 2010, 22(4): 562-571.
- [16] 赵燕容,周志芳. 基于 Kipp 和 CBP 模型确定含水层渗透性的现场微水试验对比研究[J]. 工程勘察,2012(12):32-38. (ZHAO Yanrong, ZHOU Zhifang. Comparative study on field slug tests to determine aquifer permeability based on Kipp model and CBP model [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2012(12): 32-38. (in Chinese))
- [17] 赵燕容. 振荡试验确定岩体渗透系数的理论和方法研究[D]. 南京:河海大学,2013. (ZHAO Yanrong. Research of the theory and method of estimating the hydraulic conductivity parameter of rock by slug tests [D]. Nanjing: Hohai University, 2013. (in Chinese))
- [18] 周志芳,庄超,戴云峰,等. 单孔振荡式微水试验确定裂隙岩体各向异性渗透参数[J]. 岩石力学与工程学报,2015, 34(2): 271-278 (ZHOU Zhifang, ZHUANG Chao, DAI Yunfeng, et al. Determining anisotropic hydraulic conductivity in fractured rocks based on single-borehole slug test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 271-278 (in Chinese))
- [19] 周志芳,庄超. 裂隙岩体渗透张量的特征值扰动分析[J/OL], 水利学报. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20150203.1534.006.html>. (ZHOU Zhifang, ZHUANG Chao. Disturbance analysis of the eigenvalues of hydraulic conductivity tensor in fractured rocks [J/OL]. *Journal of Hydraulic Engineering*. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20150203.1534.006.html>. (in Chinese))
- [20] КОЩЕВЦЫЙ Н С, 秦成明. 稳定流倾斜含水层完整承压井涌水量公式的推导[J]. 青海地质, 1983(1):53-58. (КОЩЕВЦЫЙ Н С, QIN Chengming. Derivation of inflow water formulation of completely penetrating well in steady flow of tilt confined aquifer [J]. *Qinghai Geology*, 1983(1): 53-58. (in Chinese))

Determination of the hydrogeological parameters of a tilted confined aquifer by slug tests*

DAI Yunfeng¹, ZHOU Zhifang¹, ZHAO Yanrong¹, WU Rong²

(1. School of Earth Sciences and Engineering of Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Wentian College of Hohai University, Maanshan 243000, China)

Abstract: The effect of the dip of an aquifer on the hydrogeological parameters of a tilted confined aquifer was evaluated by slug tests. Using the Kipp model, an analytical solution model was derived for the slug tests considering the dip of the tilted confined aquifer. When the dimensionless storage coefficient and inertial parameter were constant, the dimensionless damped coefficient of the test well-aquifer system increased with increasing dip. When the dimensionless damped coefficient calculated by the modified model differs by 10% than the value calculated by the Kipp model, the effect of the dip should be considered, and the critical dip for affecting the water head response was 34° . The difference in the analytical results between the modified and Kipp models indicates that ignoring the dip of aquifer will cause error in the estimation of the transmissivity and storage coefficient of the tilted confined aquifer.

Key words: slug tests; tilt confined aquifer; dip; transmissivity; storage coefficient

征 稿 启 事

《水科学进展》是以水为论述主题的学术期刊，主要反映国内外在暴雨、洪水、干旱、水资源、水环境等领域中科学技术的最新成果、重要进展，当代水平和发展趋势，报道关于水圈研究的新事实、新概念、新理论和新方法，交流新的科研成果、技术经验和科技动态；她涉及与水有关的所有学科，包括水文科学、大气科学、海洋科学、地质科学、地理科学、环境科学、水利科学和水力学、冰川学、水生态学以及法学、经济学和管理科学中与水有关的内容。

本刊热诚欢迎广大水科学工作者踊跃投稿，尤其欢迎以下几方面的稿件：

- (1) 题材较重大，能为国家对与水有关的重大问题的决策提供科学依据的稿件；
- (2) 反映水科学各分支学科重要研究成果尤其是前沿课题的稿件；
- (3) 探讨水圈与地球其他圈层相互关系及水与社会发展相互关系等宏观科学问题的稿件；
- (4) 报道对推动水科学发展有重要意义的新事实、新概念及新途径的稿件；
- (5) 运用多学科的理论与方法探讨水科学基础理论(尤其是跨学科的生长点)与实际问题的稿件；
- (6) 介绍有推广价值，思路新颖的技术方法和经验的稿件。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41172204).