

文章编号: 1000-7598 (2009) 03-0762-07

刚性承压板下深部岩体压缩蠕变参数反演

杨文东¹, 张强勇¹, 张建国^{1,2}, 曾纪全³, 贺如平³

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 山东正元建设工程有限责任公司, 济南 250014;
3. 中国水电顾问集团 成都勘测设计研究院, 成都 610072)

摘 要: 为获得岩体深部的压缩蠕变力学参数, 进行了现场刚性承压板中心孔变形试验。推导出了圆形刚性承压板在均布荷载作用下中心孔深部岩体广义 Kelvin 模型的瞬时弹性变形。基于黏弹性理论, 经过拉普拉斯变换和逆变换, 进一步得到了黏弹性变形的计算公式。采用了以瞬时弹性模量、黏弹性模量和黏弹性系数为反演值的迭代优化反演法, 并将计算公式程序化。该方法应用于一大型水电站坝区边坡工程, 有效获得了坝区软弱岩体深部的压缩蠕变力学参数, 克服了以往仅以岩体表面位移进行力学参数反演的缺陷。

关 键 词: 岩石力学; 刚性承压板; 压缩蠕变; 蠕变参数; 参数识别

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

Inversion of compression creep parameters of deep rock under rigid bearing plate

YANG Wen-dong¹, ZHANG Qiang-yong¹, ZHANG Jian-guo^{1,2}, ZENG Ji-quan³, HE Ru-ping³

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Shandong Zhengyuan Construction Engineering Co., Ltd, Ji'nan 250061, China;

3. Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Corporation, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to get the compression creep parameters of deep rock, the center hole deformation test of rigid bearing plate is carried out in site. The generalized Kelvin model's instantaneous elastic deformation of deep rock under circular rigid bearing plate which bears the uniformly distributed load is deduced. Based on the viscoelastic theory, through Laplace transform and inverse transform, the numerical formula of the viscoelastic deformation is also obtained. Some creep parameters of soft rockmass such as instantaneous elastic modulus, viscoelastic modulus and coefficient have been achieved by way of the optimized inversion method; and the numerical formula is programmed. This method is applied to a slope project in dam zone, the compression creep parameters are obtained appropriately. This method uses the test data completely; and it is much better than the method which uses the surface displacement only.

Key words: rock mechanics; rigid bearing plate; compression creep; creep parameters; parameter identification

1 引 言

工程岩体位移监测成果表明: 岩体开挖完成之后, 岩体变形并非瞬时完成, 而是要持续一段时间才趋于稳定, 这种在恒定应力作用下岩体变形随时间缓慢持续增长的现象就是岩体尤其是软弱岩体的蠕变特性。岩体的蠕变变形参数是进行坝基、边坡和地下洞室等工程岩体变形稳定性评价分析的重要参数, 由于岩体性状的复杂性, 通常通过现场承压板压缩蠕变试验得到的蠕变变形来反演岩体蠕变参

数。按承压板的性质, 承压板可分为刚性承压板和柔性承压板。相对于被试验地基介质为刚性的称为刚性承压板, 一般通过钢板或组合钢板加载; 相对于被试验地基介质为柔性的称为柔性承压板, 用压力钢枕加载。通常刚性承压板法适用于较软弱的岩体, 柔性承压板适用于较坚硬的岩体。

压缩蠕变参数的准确性直接影响到最终的蠕变变形。许多学者在流变模型的识别及参数反演方面做了工作, 刘允芳、周密^[1]深入分析了承压垫板法试验, 从弹性力学角度给出了刚性和柔性承压板

收稿日期: 2007-06-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助 (2009CB724607); 国家自然科学基金资助项目 (No.40772173); 山东省自然科学基金资助项目 (Y2007F52)。
第一作者简介: 杨文东, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学理论研究、数值模拟方面的工作。E-mail: aotu@mail.sdu.edu.cn

板内、板外测点的位移解析表达式; 李云鹏、王芝银等^[2]通过黏弹性理论, 给出了几种流变荷载试验相应模型的黏弹性一般解; 陈炳瑞、冯夏庭等^[3]提出了用模式搜索的方法进行岩石流变模型的参数识别; 胡斌、冯夏庭等^[4]通过遗传-神经网络方法对岩体蠕变参数作了智能反演; 李迪、王昌明^[5]通过试验按弹性理论解析解或数值解进行分层变形模量的计算; 周火明、盛谦等^[6]讨论了层状复合岩体变形试验尺寸效应的影响。

以往承压板压缩蠕变参数的理论反演都是针对承压板下岩体表面点的位移来进行的。本文以现场刚性承压板压缩蠕变试验和中心孔变形试验数据为基础, 推导了刚性承压板下中心深部点的广义 Kelvin 黏弹性公式。综合利用表面点位移和深部中心点位移对软弱岩体的蠕变参数进行了反分析。

2 刚性承压板压缩蠕变试验的介绍

某水电站是大渡河干流近期开发的大型水电工程之一, 电站正常蓄水位 1 130 m, 大坝壅水高度约 180 m, 最大坝高约 210 m。坝区左右岸分布有规模较大的辉绿岩脉软弱体, 对坝区边坡稳定将产生重要的影响, 因此, 进行了现场大型刚性承压板中心孔变形试验来综合反映坝区辉绿岩脉软弱体的力学变形特性。

由于研究对象辉绿岩脉本身变形量较大, 因此采用百分表测量岩体表面变形。承压板中心孔直径为 56 mm, 孔深为 7 m。中心孔深部变形采用美国基康仪器公司生产的 GK-A9 振弦式多点位移计进行测量, 该多点位移计量程为 25 mm, 测量精度为 0.001 mm, 中心孔内多点位移计埋设的具体深度位置为 0.3、1.0、2.1、3.6、5.6 m, 基本保证有 3 个测点位于辉绿岩脉破碎带上。因此, 后文的参数反演中主要以表面点及中心孔下 0.0、0.3、1.0 m 的数据为基础进行了计算。

由图 1 分析知: ①加载瞬间, 岩体产生了瞬时弹性变形; ②加载过程中, 岩体的蠕变变形随着时间的增加有增大的趋势, 但经过一定的时间后, 岩体变形逐步趋于稳定, 表明岩体的蠕变是减速蠕变; ③卸载时, 岩体卸荷后的变形除有一部分瞬时恢复外, 还有随时间增加逐渐减小的变形, 表明岩体存在明显的弹性后效。

坝区试验点岩体具有明显的瞬时弹性变形、减速蠕变和弹性后效特性, 因此, 根据这一蠕变变形特性可将流变模型识别为广义 Kelvin 模型。

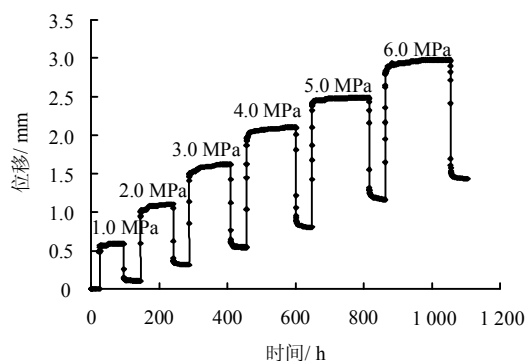


图 1 不同压力下左岸岩体压缩蠕变试验曲线
Fig.1 Compression creep test curves of the left bank rockmass under different pressures

3 圆形刚性承压板中心孔深部岩体变形计算公式的推导

承压板法试验的理论基础是半无限弹性体边界上局部承受法向集中力的问题, 即 Boussinesq 问题。如图 2 所示, 在半无限弹性体边界 (岩体表面) 上由集中力 P 引起的岩体深部任一点 A 的垂直位移为^[7]

$$w = \frac{P(1+\mu)}{2\pi ER} \left[2(1-\mu) + \frac{z^2}{R^2} \right] \quad (1)$$

式中: E 为岩石弹性模量; μ 为泊松比; z 为测点的垂直深度; R 为集中力到测点的距离。

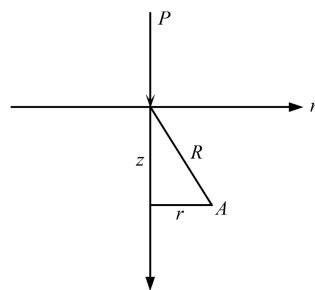


图 2 半无限体边界受法向集中力作用示意图
Fig.2 Sketch map of the semi infinite body bearing normal concentrated force on the boundary

刚性承压板的特点: 在岩体表面上采用千斤顶加压, 通过多层钢垫板或厚混凝土垫块与岩体刚性接触, 在钢垫板范围内岩体表面承受非均布压力, 但产生均匀垂直位移。

设刚性承压板的半径为 R_0 , 均布法向荷载为 q 。如图 3 所示, 在荷载范围内取一微单元, 与承压板中心点 O 的距离为 r , 微分单元面积 $dA = r dr d\theta$ 。取圆形承压垫板下距中心点 O 垂直深度为 z 的点 B , 则 B 点的垂直位移可由式 (1) 在荷载范

围内积分得到:

$$w_B = \iint_D \frac{q(1+\mu)}{2\pi ER} \left[2(1-\mu) + \frac{z^2}{R^2} \right] dA = \frac{q(1-\mu^2)}{\pi E} \iint_D \frac{1}{R} dA + \frac{q(1+\mu)z^2}{2\pi E} \iint_D \frac{1}{R^3} dA \quad (2)$$

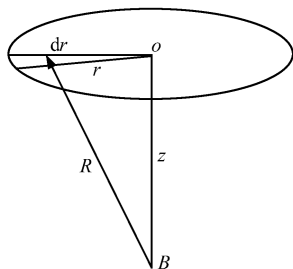


图3 刚性承压板中心孔岩体变形图

Fig.3 Rock distortion in the center hole of the rigid bearing plate

由几何关系可知 $R = \sqrt{r^2 + z^2}$, $dA = r dr d\theta$ 。

根据承压垫板下均匀垂直沉降位移条件得

$$\frac{1-\mu^2}{\pi E} \iint_D q dA = w = C \quad (3)$$

解此积分方程, 得到承压垫板下岩体表面所承受的荷载 q 的表达式为^[7]

$$q = \frac{P}{2\pi R_0 \sqrt{R_0^2 - r^2}} \quad (4)$$

式中: P 为施加在刚性承压垫板上总的压力; R_0 为承压板的半径; r 为荷载单元到圆心的距离。

$$w_B = \iint_D \frac{q(1+\mu)}{2\pi ER} \left[2(1-\mu) + \frac{z^2}{R^2} \right] dA = \iint_D \frac{P}{2\pi R_0 \sqrt{R_0^2 - r^2}} \frac{(1+\mu)}{2\pi ER} \left[2(1-\mu) + \frac{z^2}{R^2} \right] dA = \frac{P(1-\mu^2)}{2\pi ER_0} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{z^2 - R_0^2}{z^2 + R_0^2} \right) + \frac{Pz(1+\mu)}{2\pi E(R_0^2 + z^2)} \quad (5)$$

为应用方便, 把施加在承压板上的总压力 P 用千斤顶内的压力 q_0 表示, 即 $P = \pi R_0^2 q_0$, 代入上式可得实心圆形刚性承压板中心孔岩体垂直位移为

$$w_B = \frac{q_0 R_0 (1-\mu^2)}{2E} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{z^2 - R_0^2}{z^2 + R_0^2} \right) + \frac{q_0 z (1+\mu)}{2E} \frac{R_0^2}{(R_0^2 + z^2)} \quad (6)$$

由式(6)可知, 当 $z=0$ 时, 实心刚性圆形承压板岩体表面中心点垂直位移为

$$w_{z=0} = \frac{q_0 R_0 \pi (1-\mu^2)}{2E} \quad (7)$$

4 圆形刚性承压板中心孔深部岩体黏弹性变形计算公式的推导

根据弹性理论, 拉压弹性模量 E 、泊松比 μ 、弹性剪切模量 G_0 、弹性体积模量 K 之间的关系为

$$E = \frac{9G_0 K}{3K + G_0}, \quad \mu = \frac{3K - 2G_0}{2(3K + G_0)} \quad (8)$$

对于广义 Kelvin 模型, 其力学模型见图 4。

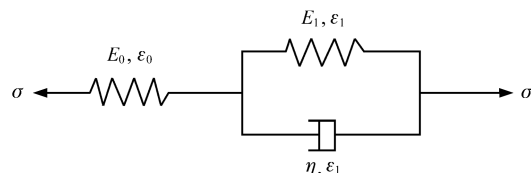


图4 广义开尔文力学模型

Fig.4 The generalized Kelvin model

其蠕变本构方程为

$$\sigma + \frac{\eta}{E_0 + E_1} \dot{\sigma} = \frac{E_0 E_1}{E_0 + E_1} \varepsilon + \frac{E_0 \eta}{E_0 + E_1} \dot{\varepsilon} \quad (9)$$

式中: E_0 为瞬时弹性模量; E_1 为黏弹性模量; η 为黏滞系数。

借助微分算子 $P = \sum_{k=0}^m p_k \frac{d^k}{dt^k}$, $Q = \sum_{k=0}^n q_k \frac{d^k}{dt^k}$ (p_k

和 q_k 为决定于材料性质的常数), 式(9)可写成:

$$P\sigma = Q\varepsilon \quad (10)$$

微分算子中的 $p_0 = 1$, $p_1 = \frac{\eta}{E_0 + E_1}$, $q_0 = \frac{E_0 E_1}{E_0 + E_1}$,

$$q_1 = \frac{E_0 \eta}{E_0 + E_1}。$$

为了考虑黏弹性解的通用性, 且在 $t=0$ 时, 能取得与弹性瞬时解相同的解, 根据 J.C.Jaeger 与 N.G.W.Cook 的研究成果给出三维黏弹性本构关系为^[8]

$$P'S_{ij} = 2Q'e_{ij} \quad (11)$$

$$P''\sigma_{ii} = 3Q''\varepsilon_{ii} \quad (12)$$

式中: S_{ij} , e_{ij} 分别为应力偏量、应变偏量; σ_{ii} , ε_{ii} 分别为体积应力和体积应变; P' 、 Q' 为微分算子, 即

$$P' = \sum_{k=0}^{m'} p'_k \frac{d^k}{dt^k}; \quad Q' = \sum_{k=0}^{n'} q'_k \frac{d^k}{dt^k} \quad (13)$$

$$P'' = \sum_{k=0}^{m''} p''_k \frac{d^k}{dt^k}; \quad Q'' = \sum_{k=0}^{n''} q''_k \frac{d^k}{dt^k} \quad (14)$$

式中: p'_k, q'_k, p''_k, q''_k 取决于材料的黏弹性性质。 P', Q' 与微分算子 P, Q 相似, 但需将 P, Q 中的所有弹性模量、黏弹性模量换为弹性剪切模量和黏弹性剪切模量; P'' 与 Q'' 是反应材料黏弹性体积变形的算子, 若材料体积变形呈弹性, 则可取 $Q'' = K, P'' = 1$ (K 为弹性体积模量)。

根据文献[9], 拉普拉斯空间中的三维黏弹性微分型本构关系可表示为

$$\bar{P}'(s) \bar{S}_{ij}(s) = 2 \bar{Q}'(s) \bar{e}_{ij}(s) \quad (15)$$

$$\bar{P}''(s) \bar{\sigma}_{ii}(s) = 3 \bar{Q}''(s) \bar{e}_{ii}(s) \quad (16)$$

式中: $\bar{P}'(s), \bar{Q}'(s), \bar{P}''(s), \bar{Q}''(s)$ 为拉普拉斯空间中的微分算子, 其表达式参见文献[2]。

在像空间中对应的形似弹性的关系式表示为^[9]

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_{ij}(s) &= 2 \bar{G}(s) \bar{e}_{ij}(s), \\ \bar{\sigma}_{ii}(s) &= 3 \bar{K}(s) \bar{e}_{ii}(s) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: $\bar{G}(s) = \frac{\bar{Q}'(s)}{\bar{P}'(s)}; \bar{K}(s) = \frac{\bar{Q}''(s)}{\bar{P}''(s)}$ 。

将式(8)进行拉氏变换, 并将式(17)代入, 经推导可得到如下参数变换式^[2, 10]:

$$\bar{E}(s) = \frac{9 \bar{Q}'(s) \bar{Q}''(s)}{3 \bar{P}'(s) \bar{Q}''(s) + \bar{P}''(s) \bar{Q}'(s)} \quad (18)$$

$$\bar{\mu}(s) = \frac{3 \bar{P}'(s) \bar{Q}''(s) - 2 \bar{P}''(s) \bar{Q}'(s)}{6 \bar{P}'(s) \bar{Q}''(s) + 2 \bar{P}''(s) \bar{Q}'(s)} \quad (19)$$

由式(6)知, 刚性承压板下岩体深部中心点的压缩变形为

$$w = \frac{q_0 R_0 (1 - \mu^2)}{2E} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{z^2 - R_0^2}{z^2 + R_0^2} \right) + \frac{q_0 z (1 + \mu)}{2E} \frac{R_0^2}{(R_0^2 + Z^2)} \quad (20)$$

令 $A = \frac{q_0 R_0}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{z^2 - R_0^2}{z^2 + R_0^2} \right), B = \frac{q_0 z}{2} \frac{R_0^2}{(R_0^2 + Z^2)}$,

则式(20)变为

$$w = A \frac{1 - \mu^2}{E} + B \frac{1 + \mu}{E} \quad (21)$$

对于广义 Kelvin 模型, 拉普拉斯空间中岩体深部中心任一点的压缩变形为^[2, 9]

$$\bar{w}(s) = A \frac{1 - \bar{\mu}^2(s)}{s \bar{E}(s)} + B \frac{1 + \bar{\mu}(s)}{s \bar{E}(s)} \quad (22)$$

将 $\bar{\mu}(s)$ 和 $\bar{E}(s)$ 代入式(22)得:

$$\begin{aligned} \bar{w}(s) = & A \frac{1 - \left(\frac{3 \bar{P}'(s) \bar{Q}''(s) - 2 \bar{P}''(s) \bar{Q}'(s)}{6 \bar{P}'(s) \bar{Q}''(s) + 2 \bar{P}''(s) \bar{Q}'(s)} \right)^2}{s \left(\frac{9 \bar{Q}'(s) \bar{Q}''(s)}{3 \bar{P}'(s) \bar{Q}''(s) + \bar{P}''(s) \bar{Q}'(s)} \right)} + \\ & B \frac{1 + \frac{3 \bar{P}'(s) \bar{Q}''(s) - 2 \bar{P}''(s) \bar{Q}'(s)}{6 \bar{P}'(s) \bar{Q}''(s) + 2 \bar{P}''(s) \bar{Q}'(s)}}{s \frac{9 \bar{Q}'(s) \bar{Q}''(s)}{3 \bar{P}'(s) \bar{Q}''(s) + \bar{P}''(s) \bar{Q}'(s)}} \end{aligned} \quad (23)$$

整理可得:

$$\begin{aligned} \bar{w}(s) = & \frac{A}{4s} \left(\frac{\bar{P}'(s)}{\bar{Q}'(s)} + \frac{3 \bar{P}'(s) \bar{P}''(s)}{3 \bar{P}'(s) \bar{Q}''(s) + \bar{P}''(s) \bar{Q}'(s)} \right) + \\ & \frac{B}{2s} \frac{\bar{P}'(s)}{\bar{Q}'(s)} \end{aligned} \quad (24)$$

再将 $\bar{P}'(s), \bar{P}''(s), \bar{Q}'(s), \bar{Q}''(s)$ 代入式(24)

得:

$$\begin{aligned} \bar{w}'(s) = & \frac{A}{4s} \left[\frac{1 + \frac{\eta}{G_0 + G_1} s}{\frac{G_0 G_1}{G_0 + G_1} + \frac{G_0 \eta}{G_0 + G_1} s} + \frac{3(1 + \frac{\eta}{G_0 + G_1} s)}{3K(1 + \frac{\eta}{G_0 + G_1} s) + (\frac{G_0 G_1}{G_0 + G_1} + \frac{G_0 \eta}{G_0 + G_1} s)} \right] + \\ & \frac{B}{2s} \frac{1 + \frac{\eta}{G_0 + G_1} s}{\frac{G_0 G_1}{G_0 + G_1} + \frac{G_0 \eta}{G_0 + G_1} s} = \\ & \left(\frac{A}{4} + \frac{B}{2} \right) \frac{1}{G_0 G_1} \left(\frac{G_0 + G_1}{s} - \frac{G_0}{s + G_1 / \eta} \right) + \\ & \frac{3A}{4\alpha \eta (3K + G_0)} \left[\frac{G_0 + G_1}{s} - \frac{G_0^2}{(3K + G_0)(s + \alpha)} \right] \end{aligned} \quad (25)$$

经拉普拉斯逆变换可得:

$$w(t) = \left(\frac{A}{4} + \frac{B}{2} \right) \frac{G_0 + G_1}{G_0 G_1} - \left(\frac{A}{4} + \frac{B}{2} \right) \frac{1}{G_1} e^{-\frac{G_1}{\eta} t} + \frac{3A}{4} \frac{G_0 + G_1}{[3K(G_0 + G_1) + G_0 G_1]} - \frac{3A}{4} \frac{G_0^2}{(3K + G_0)[3K(G_0 + G_1) + G_0 G_1]} e^{-\alpha t} \quad (26)$$

当 $z=0$ 时, $B=0$, $A=\frac{\pi q_0 R_0}{2}$, 则刚性承压板表面各点的位移为

$$w(t) = \frac{\pi q_0 R_0 (G_0 + G_1)}{8 G_0 G_1} + \frac{3 \pi q_0 R_0 (G_0 + G_1)}{8 [3K(G_0 + G_1) + G_0 G_1]} - \frac{\pi q_0 R_0}{8 G_1} e^{-\frac{G_1}{\eta} t} - \frac{3 \pi q_0 R_0 G_0^2}{8 (3K + G_0) [3K(G_0 + G_1) + G_0 G_1]} e^{-\alpha t} \quad (27)$$

式中: $w(t)$ 为岩体 t 时刻的压缩变形 (cm); $\alpha = [3K(G_0 + G_1) + G_0 G_1] / [(3K + G_0)\eta]$; q_0 为法向均布荷载 (MPa); R_0 为承压板半径 (cm); G_0 为岩体的弹性剪切模量 (MPa); K 为弹性体积模量 (MPa); G_1 为岩体的黏弹性剪切模量 (MPa); η 为黏弹性系数 (MPa·h)。

将 $t=0$ 代入式 (27) 可得到刚性承压板边的瞬时压缩变形

$$w(0) = \frac{\pi q_0 R_0}{2} \frac{(1 - \mu^2)}{E} \quad (28)$$

5 参数反演方法及结果

5.1 蠕变参数的理论反演方法

5.1.1 瞬时弹性模量的反演

承压板半径 $R_0 = 50$ cm, 岩体泊松比 $\mu = 0.25$, 对于某时刻 t_1 的突变位移 $\Delta w(t_1)$, 可按由式 (6) 计算得到瞬时弹性模量 E_0 :

$$E_0 = \frac{q_0 R_0 (1 - \mu^2)}{2 \Delta w(t_1)} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{z^2 - R_0^2}{z^2 + R_0^2} \right) + \frac{q_0 z (1 + \mu)}{2 \Delta w(t_1)} \frac{R_0^2}{(R_0^2 + z^2)} \quad (29)$$

而弹性剪切模量 G_0 和弹性体积模量 K 可根据下面计算公式得到:

$$G_0 = \frac{E_0}{2(1 + \mu)}, \quad K = \frac{E_0}{3(1 - 2\mu)} \quad (30)$$

5.1.2 黏弹性参数的反演

根据前面确定的刚性承压板深部中心点黏弹性压缩变形的计算公式 (27), 采用优化反演法, 即把参数反演问题转化为一个目标函数的寻优问题, 通过计算误差函数, 逐次修正未知参数的试算值, 直到获得最优值。在此取设计变量为

$$X = (X_1, X_2) = (G_1, \eta) \quad (31)$$

目标函数为

$$F(X) = \sum_{i=1}^n (w_i(X, t_i) - w_i)^2 \quad (32)$$

式中: n 为实测位移数; $w_i(X, t_i)$ 为根据刚性承压板深部中心点黏弹性压缩变形公式求解得到的 t 时刻的计算变形值; w_i 为 t 时刻的试验变形值。

当目标函数满足 $F(X) < \varepsilon$ (ε 为预先规定的小正数), 则迭代终止, 此时的参数即为最优值。求值过程见图 5。

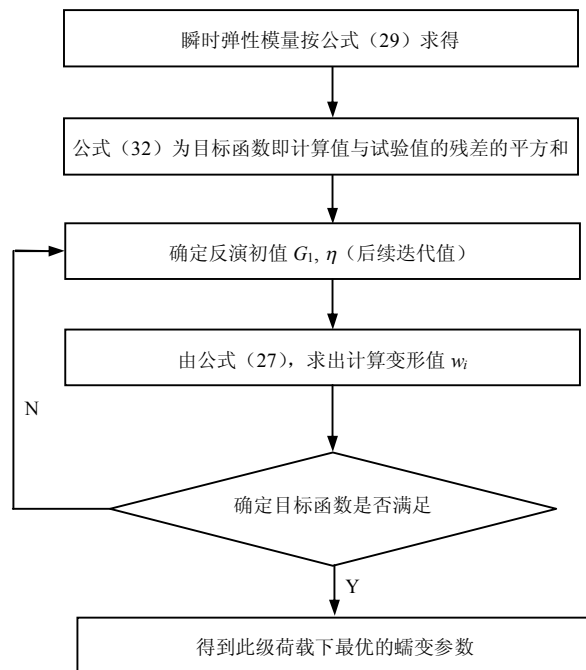


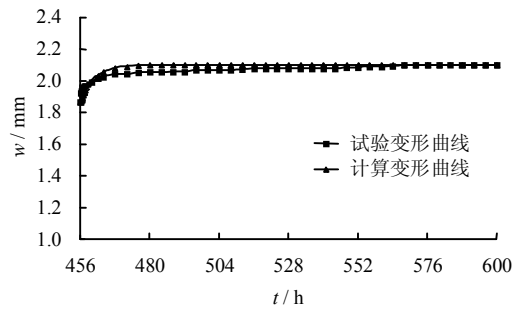
图 5 反分析技术路线图

Fig.5 Flow chart of back analysis of displacements

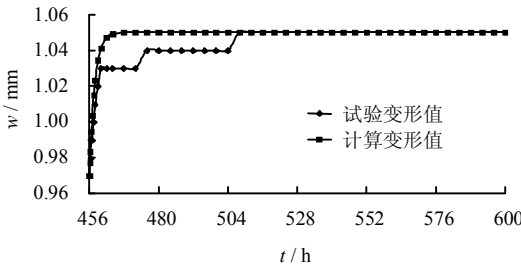
5.2 蠕变参数的理论反演结果

因加载级数较多, 下面仅以 $P=4$ MPa 时表面点, 中心孔下 30 cm 和 100 cm 反演出的参数为例, 给出计算变形曲线与试验变形曲线的对比图, 见图 6。

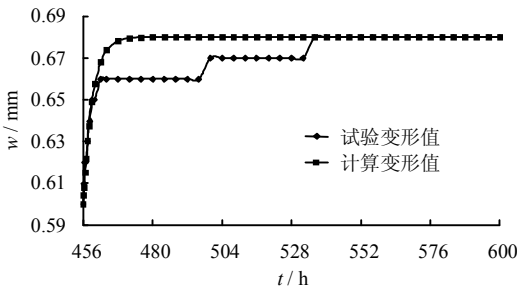
表面点, 中心孔下 30、100 cm 沉降位移反演得到的蠕变参数见表 1~3。



(a) 表面点 $P = 4\text{ MPa}$ 作用下计算变形曲线与试验变形曲线对比



(b) 中心孔下 30 cm, $P = 4\text{ MPa}$ 作用下计算变形值与试验变形值比较



(c) 中心孔下 100 cm, $P = 4\text{ MPa}$ 作用下计算变形值与试验变形值比较

图 6 不同深度计算值与实测值对比图

Fig.6 Comparison of calculated displacement with the measurement at different depths

表 1 表面点计算力学参数

Table 1 Parameters of materials in the surface

压缩荷载 / MPa	G_0 / MPa	G_1 / MPa	η / MPa · h
1	617	1 902	4 158
2	627	2 544	29 180
3	627	2 968	44 081
4	631	3 585	17 851
5	635	6 407	11 110
6	668	3 859	9 295
平均值	634	3 544	19 279

表 2 中心孔下 30 cm 计算力学参数

Table 2 Parameters of materials in 30 cm depth

压缩荷载 / MPa	G_0 / MPa	G_1 / MPa	η / MPa · h
1	1 656	3 191	4 506
2	1 057	5 520	29 119
3	1 129	4 129	44 018
4	1 024	9 690	17 813
5	1 070	6 446	11 080
6	993	10 576	9 767
平均值	1 155	6 592	19 384

表 3 中心孔下 100 cm 计算力学参数

Table 3 Parameters of materials in 100 cm depth

压缩荷载 / MPa	G_0 / MPa	G_1 / MPa	η / MPa · h
1	1 521	3 718	4 148
2	1 245	5 601	29 119
3	1 081	4 801	44 018
4	913	5 610	17 813
5	845	11 250	11 080
6	798	7 492	9 767
平均值	1 067	6 412	19 324

由上列表中数据可知：由中心孔下不同深部位移反演得到的黏滞性数 η 差别不大，表明由不同深度的岩体蠕变达稳定的时间基本一致；而深部点的瞬时剪切模量 G_0 和黏弹剪切模量 G_1 较表面点的参数偏大，说明深部岩体风化程度小，较为坚硬，仅按表面位移反演得到蠕变参数过于保守。应综合考虑不同深部位移反演得到的参数。建议取平均值(见表 4)。

表 4 建议计算力学参数

Table 4 Parameters of materials for calculating

G_0 / MPa	G_1 / MPa	η / MPa · h
952	5 516	19 329

6 结 语

综合利用现场刚性承压板试验与中心孔变形试验数据。基于黏弹性理论，推导了圆形刚性承压板在均布荷载作用下中心深部任意点(包括表面点)的位移反演公式，并以广义 Kelvin 模型为例反演获得了试验区域岩体的瞬时弹性模量、黏弹性模量和黏弹性系数。

结果表明，这种方法得到的曲线较好地拟合了现场试验位移曲线，并全面利用了试验数据，弥补了以往仅以表面点位移进行参数反演的不足。

参考文献

- [1] 刘允芳, 周密. 承压垫板法试验的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 257—262.
LIU Yun-fang, ZHOU Mi. Experimental study on bearing pad[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(2): 257—262.
- [2] 李云鹏, 王芝银, 丁秀丽. 流变荷载试验曲线的模型识别及其应用[J]. 石油大学学报, 2005, 29(2): 73—77.
LI Yun-peng, WANG Zhi-yin, DING Xiu-li. Model identification for rheological load test curve and its application[J]. **Journal of the University of Petroleum**, 2005, 29(2): 73—77.
- [3] 陈炳瑞, 冯夏庭, 丁秀丽, 等. 基于模式搜索的岩石流变模型参数识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 207—211.
CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, DING Xiu-li, et al. Rheological model and parameters identification of rock based on pattern search and least-square techniques[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(2): 207—211.
- [4] 胡斌, 冯夏庭, 王国峰, 等. 龙滩水电站左岸高边坡泥板岩体蠕变参数的智能反演[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3064—3070.
HU Bin, FENG Xia-ting, WANG Guo-feng, et al. Intelligent inversion of creeping parameters of left bank high slope shale rock masses at Longtan hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3064—3070.
- [5] 李迪, 王昌明. 现场承压板变形试验的分层弹模计算[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(2): 24—29.
LI Di, WANG Chang-ming. Calculation on elastic moduli of stratified layers under deformation test with rigid bearing plate[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2003, 20(2): 24—29.
- [6] 周火明, 盛谦, 陈殊伟, 等. 层状复合岩体变形试验尺寸效应的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 289—292.
ZHOU Huo-ming, SHENG Qian, CHEN Shu-wei, et al. Numerical simulation on size-effect in deformation test of layer composite rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 289—292.
- [7] TIMOSHENKO S, GOODIER J N. Theory of Elasticity[M]. 徐芝纶译. 北京: 高等教育出版社, 1990: 481—488.
- [8] JAEGER J C, COOK N G W. 岩石力学基础[M]. 中国科学院工程力学研究所译. 北京: 科学出版社, 1981: 397—403.
- [9] 杨挺青, 罗文波, 徐平. 黏弹性理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 13—48.
- [10] 王芝银, 李云鹏, 杨志法. 石窟薄层顶板破坏的早期潜在原因分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1531—1536.
WANG Zhi-yin, LI Yun-peng, YANG Zhi-fa. Analysis of initial latent causes for grotto roof damage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1531—1536.
- [8] 薛新华, 姚晓东. 边坡稳定性预测的模糊神经网络模型[J]. 工程地质学报, 2007, 15(1): 77—82.
XUE Xin-hua, YAO Xiao-dong. A fuzzy neural network model for predicting slope stability[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(1): 77—82.
- [9] 谷琼, 蔡之华, 朱莉, 等. 一种基于PCA的GEP算法及在采煤工作面瓦斯涌出量预测中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(4): 569—577.
GU Qiong, CAI Zhi-hua, ZHU Li, et al. A novel GEP algorithm based on PCA and its application in predicting the amount of gas emitted from coalface[J]. **Journal of Basic Science and Engineering**, 2007, 15(4): 569—577.
- [10] 卫海英. SPSS10.0 for Windows 在经济管理中的应用[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [11] YAMAOKA K, NAKAGAWA T, UNO T. Application of Akaike's information criterion (AIC) in the evaluation of linear pharmacokinetic equations[J]. **Journal of Pharmacokinetics and Pharmaceutics**, 1978, 6(2): 165—175.
- [12] 黄晓冬. 基于 GEP 的函数关系挖掘及其在数据滤波中的应用[硕士学位论文 D]. 成都: 四川大学, 2004.

上接第 761 页