有接头埋管在地震行波作用下的弹塑性分析

蒋 通，宋晓星
(同济大学结构工程与防灾研究所，上海 200092)

摘 要：针对具有柔性接头的地下埋管在地震波作用下的反应分析问题，基于反应位移法，将管体和接头进行等效均匀化处理建立简化的弹塑形管单元模型，推导了由这样的简化管单元模型构成的直管段在地震位移波作用下的位移计算公式。在求得等效管模型位移的基础上，再对每个管段和接头进行精细分析，求得管体及其接头的真实内力和变形。利用该方法对 PVC 管和铸铁管两种类型埋管进行了地震波作用下的反应分析，并与基于有限元分析的结果进行对比验证了方法具有充分的计算精度，可在地下埋管抗震设计中应用。

关键词：地下埋管；柔性接头；反应位移法；均匀化模型；弹塑性分析
中图分类号：TU990.3 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2007)12－1837－07

作者简介：蒋 通(1943－)，男，研究员，博士生导师，主要从事地震地面运动和工程结构抗震研究。E-mail: jt@mail.tongji.edu.cn。

Analysis of burried pipes with joints under action of seismic motion

JIANG Tong，SONG Xiao-xing
(Rearch Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Buried pipelines, especially the water supply pipeline network, are often damaged at mechanical joints under severe ground shakings were caused by a strong earthquake. Seismic design of buried pipelines with flexible joints includes two parts: checking the strength of segment of pipelines and the deformation of joints. A simplified method considering the elasto-plasticity of joints was presented to analyze buried segmental pipelines under the action of seismic motions. The segmental pipeline was simulated as an equivalent uniform pipe having the same force-deformation relation with the original pipe-joint system. The deformation of the equivalent uniform pipe under the action of seismic wave was derived by means of seismic deformation method. Based on the obtained deformation, the accurate axial force of segmental pipelines and deformation of joints could be calculated by analyzing the force-deformation relation of each segment-joint unit. The proposed formulas were applicable for the PVC and cast-iron pipelines. Some numerical examples were investigated by comparing the results of the simplified method and those of FEM. The results of the simplified method agreed well with those of the FEM and this method could be used more simply and conveniently than the FEM in the seismic design of buried segmental pipeline system.

Key words: buried pipeline; segmental pipe; flexible joint; seismic deformation method; equivalent uniform model; elasto-plastic analysis

0 引 言

1995 年 1 月 17 日，日本兵库县南部发生了 7.2 级的强烈地震，导致神户和大阪等现代化大城市生命线工程出现了严重震害。以供水埋管的震害件数为例，供水主管达到 1700 件、室外支管达到 10000 件，供水系统的修复经历了漫长的过程，给居民生活造成极大的困难。日本水道协会对该次地震中地下供水管的震害进行了详细调查和分析[1]，修订了地下供水管的抗震设计规定[2]。此后日本煤气协会也提出了地下煤气管抗震设计新规定[3]。在经历了 1994 年北岭地震等强震后，美国联邦救灾署（FEMA）也就供水管抗震设计提出了新的设计规定[4]。我国于 2003 年颁布了新的室外给水排水和燃气热力管道抗震设计规范[5]。从上世纪末到本世纪初，地下埋管的抗震性能再次引起地震工程界的高度重视。

有接头埋管震害的主要形态是接头处脱开导致漏水[1]，因此接头部分是其抗震的薄弱环节，故有接头地下埋管的分析模型应能考虑接头的弹塑性特性。例

收稿日期：2006－11－29

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

如日本的高田提出的传递矩阵法[6]和我国侯忠良[7]提出的三维埋设管线有限元分析模型，但这些方法需要建立复杂的离散分析模型，通过专用程序进行计算并对大量的计算结果进行后处理,故不便于工程中应用。

本文基于反应位移法，将管体和接头进行等效均匀化处理建立简化的弹塑形管单元模型，推导了直管段在地震位移波作用下的位移和接头受力计算公式。通过与有限元分析结果的对比验证了方法具有充分的计算精度和适用性。

1 分析原理和假定

历次地震观测和模型试验结果表明，地下埋管在地震时的反应特性受地基运动控制，而管体本身的振动和阻尼的影响不明显[8]。因此可忽略管体的惯性和阻尼建立弹性地基上的杆分析模型，将地基位移作为地震作用输入，求得管体内力和位移，这就是反应位移法的基本假定[2]，由于地震时沿管线轴向的应变远大于垂直管线的弯曲应变[8]，故本文的推导和算例仅限于沿管轴方向，基于同样的原理和方法不难将本文方法推广到垂直于管轴的弯曲受力分析。

笔者在盾构隧道弹塑性地震反应分析中[9]将衬砌和接头等效为均匀弹塑性管体模型，取盾构隧道两个衬砌段中心线之间部分为一个等效单元，建立单元的等效弹塑性刚度，假设该计算单元内轴力无变化，求解盾构隧道在地震行波作用下各单元的位移和内力解。

对于有接头地下埋管，取 1/2 管体－接头－1/2 管体为一个等效单元，计算其等效刚度（图 1）。然而与文献[9]不同的是，由于地下埋管管体较长，若假设计算单元内的轴力无变化，将导致较大的误差。本文在求出等效单元位移反应基础上，再对每一个管段的受力和位移进行精细分析，求得管体及接头的真实内力和位移。

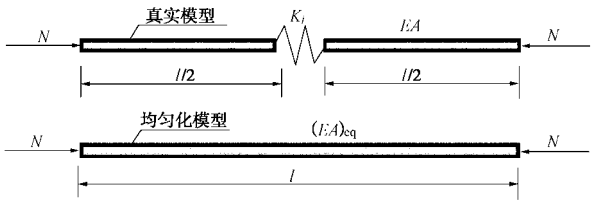


图 1 等效单元模型

Fig. 1 The model of equivalent uniform pipe

2 计算方法与公式推导

2.1 均匀化模型的等效刚度

地下管道的等效单元 1/2 管体+接头弹簧+1/2 管体模型如图 1 所示，图中，E 为管体的弹性模量，A 为管体截面积，l 为每个管段的长度，K_i 为管道接头弹簧刚度，$(EA)_{eq}$ 为均匀化模型的等效刚度。

设管体变形处于弹性范围内，根据相同轴力作用下，真实模型和等效均匀化模型产生相同变形的条件可得等效刚度

$$(EA)_{eqi}=\frac{EA}{1+\dfrac{EA}{lK_i}} \qquad (i=1,2,3)\,, \qquad (1)$$

式中，K_i 为管道接头在不同受力阶段的弹簧刚度。

管道接头受力特性采用文献[6]基于试验得出的 PVC 管和铸铁管接头计算模型，如图 2 和图 3 所示。图 2 为 PVC 管接头的计算模型，图中 K_1 为接头弹簧的受拉屈服刚度，K_2 为弹性刚度，K_3 为受压硬化刚度，N_y 和 $-N_y$ 为接头的弹性极限轴力，δ_y 和 $-\delta_y$ 为接头的弹性极限伸缩量；图 3 为铸铁管接头计算模型，图中 K_1 为接头弹簧受拉硬化刚度，K_2 为受拉屈服刚度，K_3 为弹性刚度，N_{y1} 和 N_{y2} 为接头的弹性极限轴力和最大屈服轴力，δ_{y1} 和 δ_{y2} 为接头的弹性极限伸长量和最大塑性伸长量。

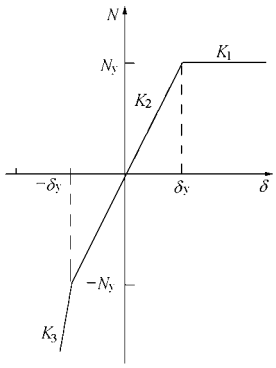


图 2 PVC 管道接头受力模型

Fig. 2 Force-deformation relation of PVC pipe joint

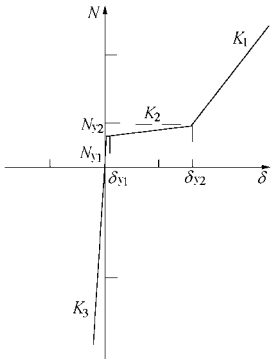


图 3 铸铁管道接头受力模型

Fig. 3 Force-deformation relation of cast-iron pipe joint

2.2 均匀化模型在地震行波作用下的求解

在地震行波作用下，根据反应位移法，沿管轴方

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

向平衡方程为

$$(EA)_{\mathrm{eq}}\cdot\frac{\mathrm{d}^2u(x)}{\mathrm{d}x^2}-K_{\mathrm{G}}\cdot u(x)=-K_{\mathrm{G}}\cdot u_{\mathrm{G}}(x)\quad 。(2)$$

式中，K_{G}，$u_{\mathrm{G}}(x)$ 分别为地基弹簧系数和沿管轴方向的地基位移，$u(x)$ 为等效均匀化管道的轴向位移。若考虑地震波为简谐平面波，可设沿管轴方向的地基位移为 $u_{\mathrm{G}}(x)=U_{\mathrm{G}}\sin(2\pi x/L)$，其中 L 和 U_{G} 为沿管轴方向的波长和振幅。

对于方程 (2)，可根据不同的管道接头类型（PVC 管和铸铁管）以及接头所处受力状态所对应的等效刚度 $(EA)_{\mathrm{eq}i}$ $(i=1,2,3)$，求得等效均匀化管道的轴向位移 $u(x)$。

（1）接头处于弹性时管道的位移解

当管道的接头处于弹性状态时，管道的等效刚度 $(EA)_{\mathrm{eq}}$ 按公式（1）计算，对 PVC 管，K_i 取图 2 中的 K_2，对铸铁管，K_i 取图 3 中的 K_3。

考虑无限长管道的一个波长，可取方程（2）的边界条件为：$u(0)=0$，$u(\frac{L}{2})=0$，解得管道位移为

$$u(x)=\alpha\cdot U_{\mathrm{G}}\cdot\sin(\frac{2\pi x}{L}),\qquad (3a)$$

式中，

$$\alpha=\frac{1}{(1+\dfrac{4\pi^2(EA)_{\mathrm{eq}}}{K_{\mathrm{G}}L^2})}\quad 。\qquad (3b)$$

（2）接头进入非线性后 PVC 管道的位移解

考虑到简谐位移波的周期性和对称性，仅取 1/2 波长进行分析。根据管道受力状态的分析，半波长范围内 PVC 管道变形可分为 3 段，即接头受拉塑性段 u_1 取 $(EA)_{\mathrm{eq}}=(EA)_{\mathrm{eq1}}$、弹性段 u_2 取 $(EA)_{\mathrm{eq}}=(EA)_{\mathrm{eq2}}$、受压塑性段 u_3 取 $(EA)_{\mathrm{eq}}=(EA)_{\mathrm{eq3}}$，$\mu_1$ 和 μ_2 为各段的分界点，如图 4 所示。

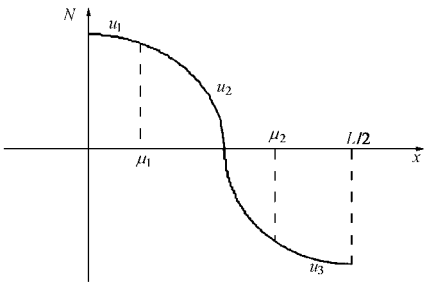


图 4 考虑接头弹塑性时 PVC 管道分段图

Fig. 4 The segmentation of PVC uniform pipes considering elasto-plastic behaviour of joints

三段的边界条件为

$$u_1(0)=0,\quad \left.\frac{\mathrm{d}u_1(x)}{\mathrm{d}x}\right|_{x=\mu_1}=\varepsilon,\qquad (4a)$$

$$\left.\frac{\mathrm{d}u_2(x)}{\mathrm{d}x}\right|_{x=\mu_1}=\varepsilon,\quad \left.\frac{\mathrm{d}u_2(x)}{\mathrm{d}x}\right|_{x=\mu_2}=-\varepsilon,\qquad (4b)$$

$$\left.\frac{\mathrm{d}u_3(x)}{\mathrm{d}x}\right|_{x=\mu_2}=-\varepsilon,\quad u_3(\frac{L}{2})=0\quad 。\qquad (4c)$$

式中，ε 为 PVC 等效均匀化管道的弹性极限应变，$\varepsilon=\dfrac{N_{\mathrm{y}}}{(EA)_{\mathrm{eq2}}}$，由式（2）和（4）可解得各段的位移为

$$u_1(x)=\frac{\varepsilon\cdot\sinh(\lambda_1x)}{\lambda_1\cdot\cosh(\lambda_1\mu_1)}+\alpha_1U_{\mathrm{G}}\sin(\frac{2\pi x}{L})-\frac{2\pi\lambda_1\cdot L\cdot U_{\mathrm{G}}\cdot\cos(2\pi\mu_1/L)\cdot\sinh(\lambda_1x)}{\cosh(\lambda_1\mu_1)(4\pi^2+(\lambda_1L)^2)},\qquad (5)$$

$$u_2(x)=\frac{\varepsilon\left[\cosh(\lambda_2x-\lambda_2\mu_1)+\cosh(\lambda_2x-\lambda_2\mu_2)\right]}{\lambda_2\sinh(\lambda_2\mu_1-\lambda_2\mu_2)}-\frac{2\pi L\cdot\lambda\cdot U_{\mathrm{G}}\cos\dfrac{2\pi\mu_2}{L}\cosh(\lambda_2x-\lambda_2\mu_1)}{\sinh(\lambda_2\mu_2-\lambda_2\mu_1)(4\pi^2+(\lambda_2L)^2)}+\frac{2\pi L\cdot\lambda\cdot U_{\mathrm{G}}\cos\dfrac{2\pi\mu_1}{L'}\cosh(\lambda_2x-\lambda_2\mu_2)}{\sinh(\lambda_2\mu_2-\lambda_2\mu_1)(4\pi^2+(\lambda_2L)^2)}+\alpha_2U_{\mathrm{G}}\sin(\frac{2\pi x}{L})\quad ,\qquad (6)$$

$$u_3(x)=\frac{\varepsilon\cdot\sinh(\dfrac{L\lambda_3-2\lambda_3x}{2})}{\lambda_3\cdot\cosh(\dfrac{L\lambda_3-2\lambda_3\mu_2}{2})}+\frac{2\pi\lambda_3\cdot L\cdot U_{\mathrm{G}}\cdot\cos(\dfrac{2\pi\mu_2}{L})\cdot\sinh(\dfrac{L\lambda_3-2\lambda_3x}{2})}{\cosh(\dfrac{L\lambda_3-2\lambda_3\mu_2}{2})(4\pi^2+(\lambda_3L)^2)}+\alpha_3U_{\mathrm{G}}\sin(\frac{2\pi x}{L})\quad ,\qquad (7)$$

以上各式中，

$$\left.\begin{aligned}\alpha_i&=\frac{1}{(1+\dfrac{4\pi^2(EA)_{\mathrm{eq}i}}{K_{\mathrm{G}}L^2})}\\ \lambda_i&=\sqrt{\frac{K_{\mathrm{G}}}{(EA)_{\mathrm{eq}i}}},\quad (i=1,2,3)。\end{aligned}\right\}\qquad (8)$$

由位移协调条件 $u_1(\mu_1)=u_2(\mu_1)$，$u_2(\mu_2)=u_3(\mu_2)$，联立非线性方程组式（5）和（6），式（6）和式 (7)，采用牛顿迭代法求解，可得分界点 μ_1，μ_2 的值。再将其回代到式（5）～（7）得到轴向位移。

（3）接头进入非线性后铸铁管道的位移解

对接头进入非线性变形的铸铁管，同样可取半波长进行分析。然而与 PVC 管不同的是，铸铁管接头的非线性变形均发生在受拉的受力状态，即受拉屈服和受拉硬化。因而对于铸铁管，应根据接头受拉屈服和接头受拉硬化两种情况分析，其分段示意如图 5 所示。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

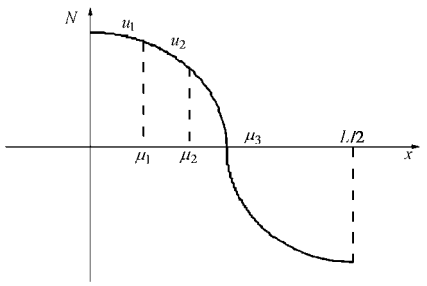


图 5 考虑接头弹塑性时铸铁管道分段图

Fig. 5 The segmentation of cast-iron uniform pipes considering elasto-plastic behaviour of joints

当接头仅处于受拉屈服阶段 K_2 时，图 5 中 μ_1 和 u_1 不存在，只有两段，即接头受拉屈服段 u_2 取 $(EA)_{eq}=(EA)_{eq2}$、弹性段 u_3 取 $(EA)_{eq}=(EA)_{eq3}$。两段的边界条件为

$$\left.\begin{aligned} &u_2(0)=0\ ,\ \frac{\mathrm{d}u_2(x)}{\mathrm{d}x}\Big|_{x=\mu_2}=\varepsilon_1\ ,\\ &u_3(\frac{L}{2})=0\ ,\ \frac{\mathrm{d}u_3(x)}{\mathrm{d}x}\Big|_{x=\mu_2}=\varepsilon_1\ 。\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

式中，ε_1 为铸铁等效均匀化管道的弹性极限应变，$\varepsilon_1=\dfrac{N_{y1}}{(EA)_{eq3}}$。

同理可解得各段位移为

$$u_2(x)=\frac{\varepsilon_1\cdot\sinh(\lambda_2 x)}{\lambda_1\cdot\cosh(\lambda_2\mu_2)}+\alpha_2 U_G\sin(\frac{2\pi x}{L})-\frac{2\pi\lambda_2\cdot L\cdot U_G\cdot\cos(\frac{2\pi\mu_2}{L})\cdot\sinh(\lambda_2 x)}{\cosh(\lambda_2\mu_2)(4\pi^2+(\lambda_2 L)^2)}\quad , \tag{10}$$

$$u_3(x)=\frac{-\varepsilon_1\cdot\sinh(\frac{L\lambda_3-2\lambda_3 x}{2})}{\lambda_3\cdot\cosh(\frac{L\lambda_3-2\lambda_3\mu_2}{2})}+\frac{2\pi\cdot\lambda_3\cdot L\cdot U_G\cdot\cos(\frac{2\pi\mu_2}{L})\cdot\sinh(\frac{L\lambda_3-2\lambda_3 x}{2})}{\cosh(\frac{L\lambda_3-2\lambda_3\mu_2}{2})(4\pi^2+(\lambda_3 L)^2)}+\alpha_3 U_G\sin(\frac{2\pi x}{L})\quad , \tag{11}$$

式中，α_i 和 λ_i $(i=2,3)$ 表达式同式（8）。

由位移协调条件 $u_2(\mu_2)=u_3(\mu_2)$，联立式（10）和（11）求得分界点 μ_2，再回代到式（10）和（11）中求得轴向位移。

当有接头处于受拉硬化阶段时，应按图 5 分三段进行计算，即接头受拉硬化段 u_1 取 $(EA)_{eq}=(EA)_{eq1}$，受拉屈服段 u_2 取 $(EA)_{eq}=(EA)_{eq2}$，弹性段 u_3 取 $(EA)_{eq}=(EA)_{eq3}$，按照如下边界条件求解式（2）。

$$\left.\begin{aligned} &u_1(0)=0,\quad \frac{\mathrm{d}u_1(x)}{\mathrm{d}x}\Big|_{x=\mu_1}=\varepsilon_2\ ,\\ &\frac{\mathrm{d}u_2(x)}{\mathrm{d}x}\Big|_{x=\mu_1}=\varepsilon_2,\ \frac{\mathrm{d}u_2(x)}{\mathrm{d}x}\Big|_{x=\mu_2}=\varepsilon_1\ ,\\ &u_3(\frac{L'}{2})=0,\quad \frac{\mathrm{d}u_3(x)}{\mathrm{d}x}\Big|_{x=\mu_2}=\varepsilon_1\ 。\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

式中，ε_2 为铸铁等效均匀化管道进入受拉硬化时的极限应变

$$\varepsilon_2=\frac{N_{y1}}{(EA)_{eq3}}+\frac{N_{y2}-N_{y1}}{(EA)_{eq2}}\ 。$$

解得三段位移为

$$u_1(x)=\frac{\varepsilon_2\cdot\sinh(\lambda_1 x)}{\lambda_1\cdot\cosh(\lambda_1\mu_1)}+\alpha_1 U_G\sin(2\pi x/L)-\frac{2\pi\lambda_1\cdot L\cdot U_G\cdot\cos(\frac{2\pi\mu_1}{L})\cdot\sinh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1\mu_1)(4\pi^2+(\lambda_1 L)^2)}\quad , \tag{13}$$

$$u_2(x)=\frac{\varepsilon_1\cosh(\lambda_2 x-\lambda_2\mu_1)-\varepsilon_2\cosh(\lambda_2 x-\lambda_2\mu_2)}{\lambda_2\sinh(\lambda_2\mu_2-\lambda_2\mu_1)}-\frac{2\pi L\cdot\lambda_2\cdot U_G\cos\frac{2\pi\mu_2}{L}\cosh(\lambda_2 x-\lambda_2\mu_1)}{\sinh(\lambda_2\mu_2-\lambda_2\mu_1)(4\pi^2+(\lambda_2 L)^2)}+\frac{2\pi L\cdot\lambda\cdot U_G\cos\frac{2\pi\mu_1}{L}\cosh(\lambda_2 x-\lambda_2\mu_2)}{\sinh(\lambda_2\mu_2-\lambda_2\mu_1)(4\pi^2+(\lambda_2 L)^2)}+\alpha_2 U_G\sin(\frac{2\pi x}{L})\quad , \tag{14}$$

$$u_3(x)=\frac{\varepsilon_1\cdot\sinh(\frac{L\lambda_3-2\lambda_3 x}{2})}{\lambda_3\cdot\cosh(\frac{L\lambda_3-2\lambda_3\mu_2}{2})}+\frac{2\pi\lambda_3\cdot L\cdot U_G\cdot\cos(\frac{2\pi\mu_2}{L})\cdot\sinh(\frac{L\lambda_3-2\lambda_3 x}{2})}{\cosh(\frac{L\lambda_3-2\lambda_3\mu_2}{2})(4\pi^2+(\lambda_3 L)^2)}+\alpha_3 U_G\sin(\frac{2\pi x}{L})\quad , \tag{15}$$

由 $u_1(\mu_1)=u_2(\mu_1)$，$u_2(\mu_2)=u_3(\mu_2)$，联立式（13）、式（14）和式（14）、式（15）可求出分界点 μ_1，μ_2，回代到式（13）～（15）可求得轴向位移。

（4）单个管段内接头和管体的受力分析

以上求得的等效均匀化管道的位移解，反映了有接头埋管在地震位移波作用下变形的大概分布，不能准确的表达每个管段内管体和接头的受力及变形。必须根据求得的每个管段两端位移对各个管段进行内力和位移的精细分析，才可求得管体和接头的真实位移和内力。精细计算模型如图 6 所示。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

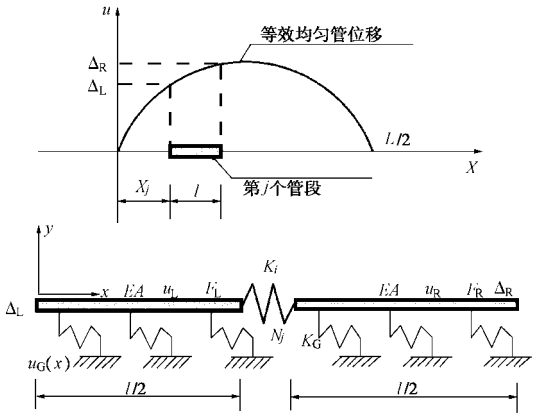


图 6 管道与接头的精细计算模型

Fig. 6 The accurate analytic model of pipe-joint unit

如图 6 所示，取任意第 j 个管段，图中 K_i 为接头弹簧刚度，N_j 为接头处轴力，X_j 为该管段左端在整体坐标中的位置，Δ_L 和 Δ_R 为等效均匀化方法求出的第 j 个管段的左端和右端位移。设左半段管体位移为 u_L 轴力为 F_L，右半段管体位移为 u_R 轴力为 F_R，对应于方程（2）的通解可得

$$u_L(x)=A_1\cdot\sinh(\lambda x)+B_1\cdot\cosh(\lambda x)+\alpha\cdot U_G\cdot\sin(\frac{2\pi(x+X_j)}{L})\ (x\in(0,\frac{l}{2}))\quad,\qquad(16)$$

$$u_R(x)=A_2\cdot\sinh(\lambda x)+B_2\cdot\cosh(\lambda x)+\alpha\cdot U_G\cdot\sin(\frac{2\pi(x+X_j)}{L})\ (x\in(\frac{l}{2},l))\quad,\qquad(17)$$

$$F_L(x)=EA\big(A_1\cdot\lambda\cdot\cosh(\lambda x)+B_1\cdot\lambda\cdot\sinh(\lambda x)+\frac{2\pi\cdot\alpha\cdot U_G}{L}\cdot\cos(\frac{2\pi(x+X_j)}{L})\big)\quad(x\in(0,\frac{l}{2}))\,,\qquad(18)$$

$$F_R(x)=EA(A_2\cdot\lambda\cdot\cosh(\lambda x)+B_2\cdot\lambda\cdot\sinh(\lambda x)+\frac{2\pi\cdot\alpha\cdot U_G}{L}\cdot\cos(\frac{2\pi(x+X_j)}{L}))\ (x\in(\frac{l}{2},l))\,,\qquad(19)$$

式中，A_1，B_1，A_2，B_2，为待定常数，$\lambda=\sqrt{\frac{K_G}{EA}}$，

$$\alpha=\frac{1}{(1+\frac{4\pi^2EA}{K_GL^2})}\quad。\qquad(20)$$

根据两端位移条件和力平衡条件可得

$$\left.\begin{aligned}&u_L(0)=\Delta_L\ ,\ F_L(\frac{l}{2})=F_R(\frac{l}{2})=N_j\ ,\\&u_R(l)=\Delta_R\ ,\ N_j=K\cdot\delta\ ,\end{aligned}\right\}\qquad(21)$$

对于上式中 $N_j=K\cdot\delta$ 应根据接头的非线性状态选用不同计算公式如下：

对于 PVC 管，当接头弹性时，

$$N_j=K_2(u_R(\frac{l}{2})-u_L(\frac{l}{2}))\quad,\qquad(22a)$$

接头受拉塑性时，

$$N_j=N_y+K_1(u_R(\frac{l}{2})-u_L(\frac{l}{2})-\delta_y)\quad,\qquad(22b)$$

接头受压硬化时，

$$N_j=-N_y+K_3(u_R(\frac{l}{2})-u_L(\frac{l}{2})+\delta_y)\quad。\qquad(22c)$$

对于铸铁管，接头弹性时，

$$N_j=K_3(u_R(\frac{l}{2})-u_L(\frac{l}{2}))\quad,\qquad(23a)$$

接头受拉屈服时，

$$N_j=N_{y1}+K_2(u_R(\frac{l}{2})-u_L(\frac{l}{2})-\delta_{y1})\,,\qquad(23b)$$

接头受拉强化时，

$$N_j=N_{y2}+K_1(u_R(\frac{l}{2})-u_L(\frac{l}{2})-\delta_{y2})。\qquad(23c)$$

根据式（22a）～（23c）及式（16）～式（20），联立式（21），可求出常数 A_1，B_1，A_2，B_2和接头轴力 N_j,从而得到管体和接头的真实位移 u_L，u_R 和内力 F_L，F_R。限于篇幅，本文仅给出接头处的轴力表达式如下：

当接头处于弹性时，轴力为

$$N_j=\frac{\frac{2\pi Kbc}{L}-a\lambda K(\Delta_L-\Delta_R+2cd)}{\frac{bK}{EA}+\lambda a^2}\quad,\qquad(24)$$

式中，$a=\cosh(\frac{\lambda l}{2})$，$b=\sinh(\lambda l)$，

$c=\alpha\cdot U_G\cos(\frac{2\pi(x+l)}{L})$，$d=\sin(\frac{\pi l}{L})$，其中 K，对 PVC 管取图 2 中 K_2，对铸铁管取图 3 中 K_3。

当接头处于非线性状态时，轴力为

$$N_j=\frac{\frac{2\pi Kbc}{L}-\lambda a^2(K\delta-N)}{\frac{bK_1}{EA}+\lambda a^2}-\frac{a\lambda K(\Delta_L-\Delta_R+2cd)}{\frac{bK}{EA}+\lambda a^2}。\qquad(25)$$

式中，K，δ 和 N 应根据管类型和接头的非线性阶段而分别取值。对 PVC 管，当接头处于受拉塑性时取图 2 中 K_1，δ_y 和 N_y，当接头处于受压硬化时取图 2 中 K_3，$-\delta_y$ 和 $-N_y$；对铸铁管，当接头处于受拉屈服时取图 3 中 K_2，δ_{y1} 和 N_{y1}，当接头处于受拉硬化时取图 3 中 K_1，δ_{y2} 和 N_{y2}。

求得接头的轴力 N_j 后，由式（22a）～（23c）可求得接头的变形量 $u_R(\frac{l}{2})-u_L(\frac{l}{2})$。

3　方法适用性的验证

为了验证方法的适用性，将本文计算结果和有限

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

元通用软件 ANSYS[10]计算结果进行对比，ANSYS 分析中管体采用 PIPE16 单元，接头弹簧与地基弹簧用 COMBIN39 单元模拟。计算实例各项参数[6]见表 1。

表 1 计算实例参数

Table 1 Parameters of the example

参数	PVC 管	铸铁管
外径/mm	114	328
壁厚/mm	7	7
管体长度/m	5	6
$E/(\mathrm{N\cdot mm^{-2}})$	3.0×10^3	1.6×10^5
位移幅值/mm	25	25
波长 L/m	100	120
$K_G/(\mathrm{N\cdot mm^{-2}})$	5	10
$K_1/(\mathrm{N\cdot mm^{-1}})$	4	11000
$K_2/(\mathrm{N\cdot mm^{-1}})$	400	1250
$K_3/(\mathrm{N\cdot mm^{-1}})$	2000	223800
N_y/N	1000	—
N_{y1}/N	—	22380
N_{y2}/N	—	42380

根据表中的参数，本文的计算方法和 ANSYS 计算结果，如以下各图表所示。

从图 7 和图 8 看出，PVC 管在地震位移波作用下管体和接头的位移、轴力的本文方法计算结果和 ANSYS 分析结果吻合良好，图 7 中位移突变反应了管道接头的变形。

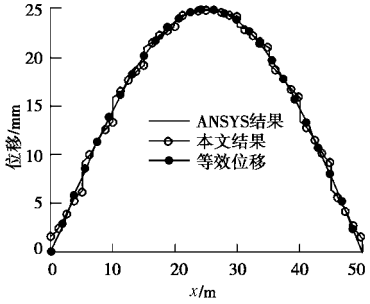


图 7 PVC 管位移计算结果

Fig. 7 The deformation of PVC pipe

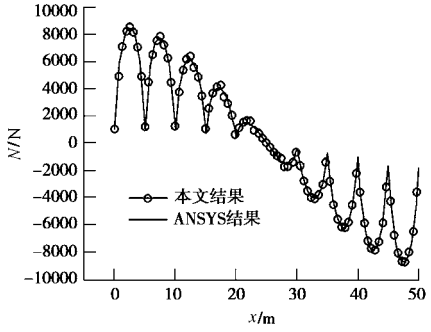


图 8 PVC 管轴力计算结果

Fig. 8 The axial force of PVC pipe

表 2 中列出最大接头变形和轴力的值，按照本文计算公式得出的接头变形和 ANSYS 分析结果相对误差仅为 1.2%，接头轴力的相对误差为 4%。

表 2 PVC 管接头最大变形量与轴力

Table 2 The largest force and deformation of PVC pipe joint

	受拉最大接头		受压最大接头	
	本文方法	ANSYS	本文方法	ANSYS
坐标/m	0	0	50	50
受力/N	1003.1	1003.1	-1941.5	-1859.6
变形/mm	3.28	3.32	-2.97	-2.93

从图 9 和图 10 看出，铸铁管在地震位移波作用下管体和接头的位移、轴力的本文方法计算结果和 ANSYS 分析结果吻合良好，表 3 中列出最大接头变形和轴力的值，按照本文计算公式得出的接头变形和 ANSYS 分析结果相对误差仅为 0.9%，接头轴力的相对误差为 0.9%。

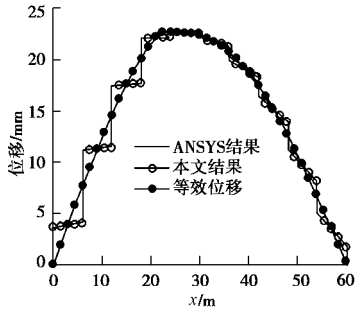


图 9 铸铁管位移计算结果

Fig. 9 The deformation of cast-iron pipe

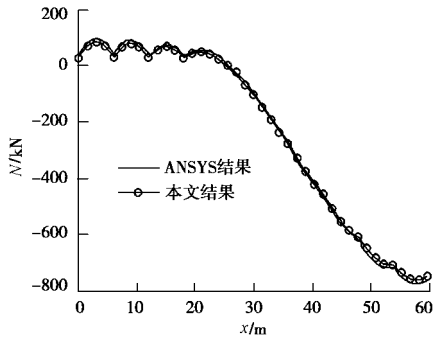


图 10 铸铁管轴力计算结果

Fig. 10 The axial force of cast-iron pipe

表 3 铸铁管接头最大变形量对比

Table 3 The largest force and deformation of cast-iron pipe joint

	受拉最大接头		受压最大接头	
	本文方法	ANSYS	本文方法	ANSYS
坐标/m	0	0	60	60
受力/N	31633.7	31584.0	-743240.0	-749832.0
变形/mm	7.5	7.42	-3.32	-3.35

从以上的图表可看出，本文的计算方法对于 PVC

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

管和铸铁管均具有很高的计算精度。

4 结　　语

将有接头地下埋管的管体－接头模型等效为简化均匀管模型，推导了具有不同接头弹塑性受力特性的 PVC 管和铸铁管在地震位移波作用下的位移计算公式；在求得该位移的基础上对每个管段的内力和位移进行精细分析，解得管体和接头的真实位移和内力。计算实例结果表明本文方法和 ANSYS 分析结果吻合良好。本文方法无需对管道进行单元离散并进行复杂的有限元计算，可直接用公式求得有接头地下埋管在地震作用下的内力和变形，更适合于工程实用。

参考文献：

[1] 日本水道協会. 1995 年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析[M]. 大阪: 日本水道協会出版, 1996. (Japan Water Works Association. A survey report for water supply system due to the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake[M]. Osaka: JWWA, 1996. (in Japanese))

[2] 日本水道協会. 水道施設耐震工法指針[M]. 大阪:日本水道協会出版. 1997. (Japan Water Works Association. Guidelines on seismic design of water supply system[M]. Osaka: JWWA, 1997. (in Japanese))

[3] 日本ガス協会. 高圧ガス導管耐震設計指針. 东京: 日本ガス協会出版.2000. (The Japan Gas Association. Guidelines on seismic design of high pressure gas pipelines[M]. Tokyo: JGA, 2000. (in Japanese))

[4] American Lifelines Alliance. Seismic guidelines for water pipelines[S]. US: FEMA, 2005.

[5] GB50032—2003 室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. (GB50032—2003 Code for seismic design of outdoor water supply, sewerage, gas and heating engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2003. (in Chinese))

[6] 高田至郎. ライフライン耐震工学. 東京:共立出版株式会社, 1991. (TAKADA Shiro. Earthquake engineering of lifeline[M]. Tokyo: Kyoritsu Shuppan Co, Ltd, 1991. (in Japanese))

[7] 甘文水, 侯忠良. 地震行波作用下三维埋设管线反应分析. 工业建筑, 1992, **21**(2): 200－204. (GAN Wen-shui, HOU Zhong-liang. Response analysis of three-dimensioned buried pipeline under seismic progressive wave[J]. Industrial Construction, 1992, **21**(2): 200－204. (in Chinese))

[8] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988. (HU Yue-xian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Earthquake Press, 1988. (in Chinese))

[9] 蒋　通, 苏　亮. 地震作用下盾构法隧道的弹塑性受力分析[J]. 岩土工程学报[J], 1999, **21**(2): 200－204. (JIANG Tong, SU Liang. Elasto-plastic stress analysis of shield tunnels under earthquake actions[J]. Chinese Journal of Geotechnical engineering, 1999, **21**(2): 200－204. (in Chinese))

[10] 夸克工作室. 有限元分析基础篇 ANSYS 与 MATLAB[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. (Quarx Studio. Fundamental finite element analysis with ANSYS and matalb[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net