

黄河大堤防渗墙质量无损检测方法研究

王山山 ,任青文

(河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 黄河大堤防渗墙质量无损检测尽管有多种方法 ,但由于防渗墙结构的特殊性 ,已有方法还不能准确地确定其中有无损伤 .为此 ,采用一种基于振动理论的防渗墙结构无损检测方法(该方法主要利用结构模态参数的变化来判断防渗墙有无损伤) ,将现场测试和数值模拟相结合 ,研究了防渗墙在不同损伤情况下的动力特性及其变化规律 .结果表明 ,这种方法对于防渗墙质量的检测是行之有效的 ,且可检测的灵敏度随损伤类型而变化 .

关键词 黄河大堤 防渗墙 无损检测 损伤 模态参数

中图分类号 :TV312 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2004)04-0405-05

黄河下游是地上悬河 ,河势游荡多变 ,堤基复杂 ,堤身质量差 .为提高黄河大堤的防汛标准 ,在大堤下建造了防渗墙 .防渗墙的质量尤为重要 ,因为如果防渗墙存在隐患 ,则可能形成比未建防渗墙时更为集中的渗流通道 ,对大堤构成更大的威胁 .因此有必要在防渗墙建成后对其质量进行检测 .

现有检测方法大多采用 CT 弹性波法^[1] .这种方法需在混凝土防渗墙中预埋检测管 .虽然该法能够比较准确地检测埋管间墙体的质量 ,但埋管之外的部分却无法检测 .另外 ,埋管的存在不仅会影响施工及结构的整体性 ,而且费用较高 ,检测速度也较慢 .因此 ,该法不适合于大规模检测 .目前所采用的检测方法还有电磁波法、瑞利波法、高密度地震映像法等^[2,3] .这些方法检测速度快、成本低 ,不破坏结构整体性 ,不影响工程施工 ,可用于防渗墙大规模检查 .但由于防渗墙边界反射强烈 ,这些方法很难检测出防渗墙中的隐患 .为能够较好地检测防渗墙的质量 ,本文探讨了采用基于振动理论的无损检测方法 .

1 检测模型的建立及边界条件的确定

防渗墙有质量隐患或损伤时的模态参数与无隐患或损伤时的模态参数是不一样的 .基于振动理论的无损检测方法 ,就是通过某种激励 ,使防渗墙产生一定的振动响应 ,并通过测振仪器直接量测出激励力与系统振动的响应特性 ,如位移、速度、加速度等函数的时间历程 ,然后经过数字信号分析得到系统的模态特性 ,再根据防渗墙模态参数的变化判断有无隐患和损伤的^[4,5] .

本文以黄河大堤防渗墙典型工程——河南黄河新乡段为对象进行研究 ,试验段桩号为 162 + 746 ~ 162 + 753 .此部分防渗墙每段长 12.5 m ,宽 0.24 m ,深 20 m ,材料为混凝土 C10S6 .段与段之间过渡部分长 2.5 m .

防渗墙是一种典型的地下结构 ,该结构本身并不复杂 ,如考虑介质(土)与结构的相互作用 ,则其动力特性的检测和计算就比较困难 .从整体上看 ,防渗墙可被看作置于无限土体中的三维结构 ,要准确地确定结构的动力特性 ,必须首先准确地确定每段防渗墙的边界条件 .现采用现场测试方法确定防渗墙周围介质的参数和特性 ,以便为进一步确定防渗墙边界条件提供依据 .

由于相干系数 $\gamma_{xy}(\omega)$ 的大小可表示防渗墙段与段之间连结的完好程度 ,故采用相干函数测试法确定防渗墙在分段处的边界条件^[6] .其中相干函数表达式为

$$\gamma_{xy}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} \tag{1}$$

测试时首先在防渗墙相邻段上布置传感器 ,然后在其中一段上用激振器产生激振 ,再用随机振动方法进

行检测.所用仪器设备为电磁激振器、信号发生器、压电晶体加速度传感器、电荷放大器、CRAS 数据采集与分析系统.测试在扫频频率为 400~1 000 Hz 激振情况下进行.

测试结果表明,在扫频范围内,相干系数 $\gamma_{xy}(\omega)$ 基本上都大于 0.9.这说明防渗墙段与段之间联结得较好.因此,段与段之间的边界是固定的.

由于介质(土)与结构的相互作用,在测试及计算防渗墙动力特性时,需考虑周围土介质的影响.土介质对防渗墙的影响可用具有等效刚度的弹簧来代替^[7].等效刚度^[8]为

$$K=\frac{2.75G_dA_1}{L}+\frac{8G_dA_2}{(1-\mu_d)L}$$

(2)

式中: G_d ——防渗墙周围土介质的动剪切模量; μ_d ——防渗墙周围土介质的泊松比; A_1 ——防渗墙侧面面积; A_2 ——防渗墙底面面积; L ——防渗墙底面周长.

其中 A_1 、 A_2 、 L 由防渗墙几何尺寸确定, G_d 和 μ_d 由下式确定^[9].

$$G_d=\rho V_s^2$$

(3)

$$\mu_d=-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2-1\right]/\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2-1\right]$$

(4)

式中: ρ ——防渗墙周围土介质的密度; V_s ——防渗墙周围土介质的横波波速; V_p ——防渗墙周围土介质的纵波波速.

由 G_d 及 μ_d 还可以确定防渗墙周围土介质的动弹性模量 E_d ,

$$E_d=\chi(1+\mu_d)G_d=2\rho V_s^2(1+\mu_d)$$

(5)

由现场土样测得 $\rho=1\,740\text{ kg/m}^3$.周围土介质横波波速及纵波波速均采用高分辨率、大动态范围遥测地震仪进行测试.用瑞利波法现场测得横波波速 $V_s=239\text{ m/s}$,用直达波法现场测得纵波波速 $V_p=441\text{ m/s}$.把以上测定的参数代入式(3)~(5)中得 $G_d=99.39\text{ MPa}$, $\mu_d=0.29$, $E_d=256.4\text{ MPa}$.再由式(2)可确定等效刚度 K .

同样,对于防渗墙墙体,由试块试验测得 $\rho=2\,410\text{ kg/m}^3$,使用遥测地震仪用瑞利波法现场测得横波波速 $V_s=1\,887\text{ m/s}$,使用非金属声波检测仪用直达波法现场测得纵波波速 $V_p=3\,019\text{ m/s}$,由式(4)(5)得 $\mu_d=0.17$, $E_d=20\,080.1\text{ MPa}$.

另一方面,防渗墙与土体接触的侧面,由于两面都受到无限土体的作用,且与测试时激励的方向相垂直,故认为防渗墙在此方向上没有位移.

2 防渗墙的动力特性及变化规律

基于振动理论的无损检测方法是根据防渗墙模态参数的变化判断有无隐患和损伤的,而防渗墙中特定部分的质量和刚度因损伤引起的变化将在自振频率和振型的测量中有所反应,因此需要确定防渗墙完好时及有损伤时的模态变化规律.本文采用数值模拟方法计算防渗墙各阶模态参数.

在防渗墙动力特性计算时,防渗墙混凝土墙体采用实体单元,周围土介质对防渗墙的作用用等效弹簧单元来模拟.在利用基于振动理论的无损检测方法对防渗墙质量进行检测时,主要利用了防渗墙前几阶的自振频率及固有振型,因此计算时只给出了防渗墙前 3 阶的模态值.

对于无损伤的防渗墙,由式(2)算得防渗墙周围土介质对防渗墙作用的等效刚度 $K=5.495\,4\text{ GN/m}$.据此得出防渗墙前 3 阶自振频率和振型,分别如表 1 和图 1 所示.

对于有损伤防渗墙模态的计算,现首先给出几种典型的损伤情况.考虑到防渗墙的结构特点及施工情况,分别设置纵向整体受损、垂向整体受损及中间局部受损等典型防渗墙隐患.设 L_0 和 H_0 分别为完好防渗墙的纵向及垂向尺寸, L_n 和 H_n 分别为防渗墙存在纵向损伤及垂向损伤时的尺寸, D_n 为防渗墙中间局部受损尺寸.

对于纵向整体受损隐患,设置了两种典型情况.一是轻度损伤情况,即设防渗墙在纵向边缘 1 m 处由于夹泥等原因断开.此时防渗墙的长度 $L_1=L_0-1\text{ m}=11.5\text{ m}$.那么由式(2)计算出的防渗墙周围土介质对防渗

表 1 完好防渗墙前 3 阶的自振频率

Table 1 First three order natural frequencies of intact diaphragm wall

阶次	1	2	3
ω/Hz	75.054	105.690	116.420

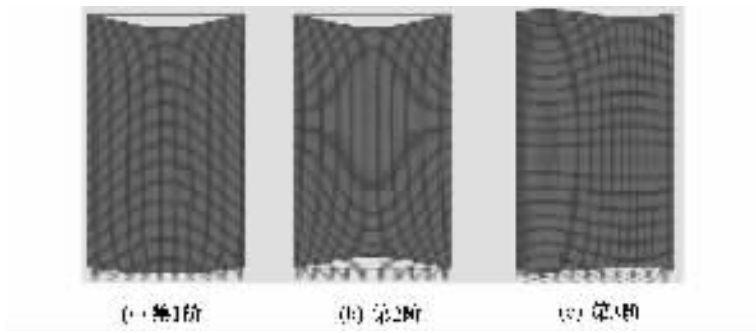


图 1 完好防渗墙前 3 阶振型

Fig.1 First three order mode shapes of intact diaphragm wall

墙作用的等效刚度 $K = 5.5422 \text{ GN/m}$ 。二是中度损伤情况，即设防渗墙在纵向 $1/4$ 处由于夹泥等原因断开，此时防渗墙的长度 $L_2 = L_0 - 3.125 \text{ m} = 9.375 \text{ m}$ ，那么由式(2)计算出的防渗墙周围土介质对防渗墙作用的等效刚度 $K = 5.5292 \text{ GN/m}$ 。在这两种情况下得出的防渗墙前 3 阶的自振频率如表 2 所示，纵向整体受损情况下前 3 阶防渗墙典型振型如图 2 所示。

表 2 纵向损伤防渗墙前 3 阶自振频率

Table 2 First three order natural frequencies of diaphragm wall with longitudinal damage

阶次	完好防渗墙自振频率 ω/Hz	纵向轻度损伤防渗墙自振频率 ω_{11}/Hz	$(\omega_{11} - \omega)\omega^{-1}/\%$	纵向中度损伤防渗墙自振频率 ω_{12}/Hz	$(\omega_{12} - \omega)\omega^{-1}/\%$
第 1 阶	75.054	40.875	- 45.54	49.145	- 34.52
第 2 阶	105.690	64.214	- 39.24	77.343	- 26.82
第 3 阶	116.420	70.291	- 39.62	82.663	- 29.00

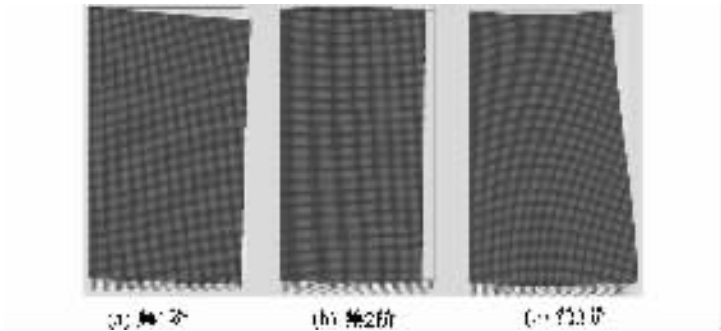


图 2 纵向损伤防渗墙前 3 阶振型

Fig.2 First three order mode shapes of diaphragm wall with longitudinal damage

从表 2 可以看出，两种纵向损伤防渗墙自振频率第 1 阶值分别减小 45.54%、34.52%，第 2 阶值分别减小 39.24%、26.82%，第 3 阶值分别减小 39.62%、29.00%，减小幅度都很大。在结构损伤判别中，只要自振频率变化幅度大于 5%，就能作为损伤存在的一个判据^[10]。另一方面，比较振型图可知，完好防渗墙与纵向损伤防渗墙前 3 阶振型也完全不同，非常容易区别。综上可知，对于纵向损伤防渗墙，可以采用前 3 阶模态中的任意一阶模态参数来检测防渗墙隐患。

对于垂向整体受损隐患，也设置了两类典型情况。一是轻度损伤情况，即设防渗墙在底部 1 m 处由于施工原因或夹泥等其他原因断开，此时防渗墙高度 $H_1 = H_0 - 1 \text{ m} = 19.0 \text{ m}$ ，那么由式(2)计算出的防渗墙周围土介质对防渗墙作用的等效刚度 $K = 5.2272 \text{ GN/m}$ 。二是中度损伤情况，即设防渗墙在垂向 $1/4$ 处由于施工原因或夹泥等其他原因断开，此时防渗墙的高度 $H_2 = H_0 - 5.0 \text{ m} = 15.0 \text{ m}$ ，那么由式(2)计算出的防渗墙周围土介质对防渗墙作用的等效刚度 $K = 4.1545 \text{ GN/m}$ 。在这两种情况下算得的防渗墙前 3 阶自振频率如表 3 所示。

从表 3 可以看出，两种垂向损伤防渗墙自振频率第 1 阶值分别减小 0.06%、0.45%，第 2 阶值分别增大 2.17%、11.73%，第 3 阶值相对变幅为 -0.03%、5.41%。对于垂向轻度损伤，3 阶频率变化幅度都很小，最大为 2.17%。如考虑测试噪声等因素的影响，则根据频率变化不能有效地判断防渗墙是否存在损伤。再者，比

表3 垂向损伤防渗墙前3阶的自振频率

Table 3 First three order natural frequencies of diaphragm wall with vertical damage

阶次	完好防渗墙自振频率 ω/Hz	垂向轻度损伤防渗墙自振频率 $\omega_{\text{H1}}/\text{Hz}$	$(\omega_{\text{H1}} - \omega)\omega^{-1}/\%$	垂向中度损伤防渗墙自振频率 $\omega_{\text{H2}}/\text{Hz}$	$(\omega_{\text{H2}} - \omega)\omega^{-1}/\%$
第1阶	75.054	75.011	-0.06	74.719	-0.45
第2阶	105.690	107.980	2.17	118.090	11.73
第3阶	116.420	116.380	-0.03	122.720	5.41

较振型图可知,完好防渗墙与垂向损伤防渗墙两者基本相同,因此从振型图上也不能有效地判断防渗墙是否存在损伤.对于垂向中度损伤,第1阶频率变化幅度也很小,且振型图的变化也不大,故据频率变幅也不能有效地判断防渗墙是否存在损伤.但第2阶和第3阶的频率变化都很大,振型图的类型也发生了变化,具体特点为第2阶振型图与完好防渗墙的第3阶振型图相似,第3阶振型图与完好防渗墙的第2阶振型图相似,很容易区别.这种情况下可采用后2阶模态中的任意一阶模态参数来检测防渗墙中的隐患.

对于中间局部受损隐患,设置了两种典型情况.一是轻度损伤,即设在防渗墙中心处有一直径为 $D_1 = 1\text{ m}$ 的圆形夹泥区域,此区域的混凝土材料被周围土代替.圆形夹泥区域在有限元划分时采用实体单元.此时由式(2)计算出的防渗墙周围土介质对防渗墙作用的等效刚度 $K = 5.4954\text{ GN/m}$.二是中度损伤,设在防渗墙中心处有一直径为 $1/4$ 防渗墙长度,即 $D_2 = 3.125\text{ m}$ 的圆形夹泥区域.此时由式(2)计算出的防渗墙周围土介质对其作用的等效刚度 $K = 5.4954\text{ GN/m}$.这两种情况下算得的防渗墙前3阶自振频率如表4所示.

表4 局部损伤防渗墙前3阶自振频率

Table 4 First three order natural frequencies of diaphragm wall with local damage

阶次	完好防渗墙自振频率 ω/Hz	局部轻度损伤防渗墙自振频率 $\omega_{\text{P1}}/\text{Hz}$	$(\omega_{\text{P1}} - \omega)\omega^{-1}/\%$	局部中度损伤防渗墙自振频率 $\omega_{\text{P2}}/\text{Hz}$	$(\omega_{\text{P2}} - \omega)\omega^{-1}/\%$
第1阶	75.054	75.309	0.34	72.949	-2.80
第2阶	105.690	105.920	0.22	84.170	-20.36
第3阶	116.420	118.510	1.80	88.719	-23.79

从表4可以看出,两局部损伤防渗墙自振频率第1阶值为 0.34% 、 -2.80% ,第2阶值相对变幅为 0.22% 、 -20.36% ,第3阶值相对变幅为 1.80% 、 -23.79% .对于局部轻度损伤,3阶频率变化幅度都很小,最大为 1.80% ,故根据频率变化不能有效地判断防渗墙是否存在损伤.比较局部轻度损伤防渗墙振型图与完好防渗墙振型图可知,两者频率基本相同,故从振型图上也不能有效地判断防渗墙是否存在损伤.对于局部中度损伤,第1阶频率变化幅度也很小,且振型图变化也不大,故据频率变化不能有效地判断防渗墙是否存在损伤.虽然第2阶频率变化较大,但从第2阶振型图可知,此阶振型为圆形夹泥区域的振型,由于在测试时传感器只能布置在防渗墙表面处,难以测试圆形夹泥区域的模态参数,所以此阶模态参数不能应用于实际测试.第3阶频率变幅很大,减少了 23.79% ,振型图类型也发生了变化,与完好防渗墙第1阶振型图相比,也较易区别.这种情况下可采用第3阶模态来检测防渗墙中的隐患.

3 结 论

基于振动理论的无损检测方法可有效地确定防渗墙整体质量状况,可对防渗墙质量进行大规模检测.该法对防渗墙不同类型的隐患具有不同的灵敏度.对于纵向防渗墙损伤检测,该法灵敏度较高,它既可检测中度损伤,又可检测轻度损伤,并且可采用前3阶模态中的任意一阶模态参数来检测防渗墙隐患.这为现场测试提供了一定的方便.对于防渗墙垂向及局部损伤检测,该法灵敏度不高.因此,对于轻度损伤,用该法就很难测出;对于中度损伤,垂向损伤可采用第2阶或第3阶模态中的任意一阶模态参数来进行检测,局部损伤则只能采用第3阶模态进行检测.

参考文献:

[1] 张升光,赵连营,张永政.混凝土防渗墙技术在黄河堤防加固中的应用[J].水利水电技术,2001,32(8):17—19.

[2] 李力 ,侯建国 ,杨成林 ,等 .探地雷达和瑞雷波方法在水工混凝土质量检测中的应用[J]. 水利水电技术 ,2001 ,32(5) :35—39.

[3] 王世恩 ,刘超常 ,锅伯强 .用瑞利波检验高喷防渗墙的施工质量及地层分布特征[J]. 工程勘探 ,1998 (6) :62—64.

[4] REN Wei-xin ,GUIDO D R. Structural damage identification using modal data. 1 :simulation verification[J]. ASCE ,Journal of Structural Engineering ,2002 ,128(1) :87—95.

[5] REN Wei-xin ,GUIDO D R. Structural damage identification using modal data. 2 :test verification[J]. ASCE ,Journal of Structural Engineering ,2002 ,128(1) :96—104.

[6] 王山山 ,江泉 ,马良筠 .用振动法检测特殊桩基的质量[J]. 力学与实践 ,2001 ,23(4) :19—20.

[7] 申爱国 .土-结构相互作用体系自振特性的计算[J]. 西南交通大学学报 ,2000 ,35(1) :7—10.

[8] 王腾 ,王奎华 ,谢康和 .成层土中桩的纵向振动理论研究及应用[J]. 土木工程学报 ,2002 ,35(1) :83—87.

[9] 孟高头 .土体原位测试机理、方法及其工程应用[M]. 北京 :地质出版社 ,1997.21—185.

[10] SALAWU O S. Detection of structural damage through changes in frequency : a review[J]. Engineering Structures ,1997 ,19(9) :718—723.

Study on nondestructive detection method for diaphragm wall of Yellow River dike

WANG Shan-shan , REN Qing-wen

(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Owing to the special structure of the diaphragm wall of the Yellow River dike , there is still not an accurate method for nondestructive detection of quality defects of the diaphragm wall . In this paper , a vibration theory-based method was presented for nondestructive detection of the structure of the diaphragm wall . In this method , the damages of the diaphragm wall were determined mainly according to the variation of modal parameters , and the dynamic characteristics of the diaphragm wall and their variation were studied by combination of the field test with numerical simulation . The result shows that the method is effective for detection of diaphragm walls , and that the sensitivity of detection varies with the type of damages .

Key words : Yellow River dike ; diaphragm wall ; nondestructive detection ; damage ; modal parameter