

基于非线性剪切梁方法的堤防液化判别分析研究^①

王海峰^{1,2}, 刘小生^{1,2}, 郭锡荣^{1,2}, 赵剑明^{1,2}, 杨正权^{1,2}, 杨玉生^{1,2}

(1.中国水利水电科学研究院,北京 100048; 2.水利部水工程建设与安全重点实验室,北京 100048)

摘要:很多河流的堤防工程修建在人口密集地区,失事后往往会造成严重后果,尤其是细粒土填筑而成的堤防,在地震作用下存在液化破坏的可能。采用合理方法对堤防进行液化判别,确定其在地震作用下的动力稳定性十分必要。针对某实际堤防工程,进行五种拟用筑堤土料动力特性试验研究,并基于试验成果,采用能够考虑地基-堤身相互作用的非线性剪切梁方法,对堤防的液化可能性进行判别。研究表明:提出的非线性剪切梁方法能够考虑地基和堤身间的相互作用,且简单实用、可操作性强;土体的相对密度、空隙比和颗粒粒径大小及其他粒分布特性对其抗地震液化能力影响较大;在设定运行工况下,Ⅷ度地震时除拟选粉质壤土外,其他四种土筑堤均有发生液化的可能,选用粉质壤土筑堤较合适。

关键词:堤防;地基;液化;动三轴试验;动变形试验;液化评价;影响因素

中图分类号: TV871;TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0434-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0434

Liquefaction Evaluation and Analysis on a Levee Engineering Based on Nonlinear Shear Wedge Method

WANG Hai-feng^{1,2}, LIU Xiao-sheng^{1,2}, GUO Xi-rong^{1,2},

ZHAO Jian-ming^{1,2}, YANG Zheng-quan^{1,2}, YANG Yu-sheng^{1,2},

(1.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2.Key Laboratory on Construction and Security of Water Projects of Ministry of Water Resources, Beijing 100048, China)

Abstract: Levee engineering is mostly built in densely-populated area, so the crash will always cause serious consequences especially for the levee filled by sandy soil which may develop into liquefaction under the action of earthquake. Therefore, the usage of reasonable methods of liquefaction on the levee to determine the dynamic stability under earthquake action is very necessary. This paper, in view of a practical levee engineering, conducted dynamic characteristic research on five kinds of materials to be used, basing on the research results of soil material dynamic characteristic test, and estimated liquefaction possibility of the levee by using the nonlinear shear wedge method which can consider the interaction between the levee and the foundation. Research shows that: the nonlinear shear wedge method can consider the interaction between the levee and the foundation, and is simple and practical; soil relative density, void ratio, particle size and particle distribution characteristics have a great influence on its ability to resist seismic liquefaction; in a set operation under the condition of 8 degree earthquake, only the silty loam levee will not lead to the occurrence of liquefaction, the other four materials exist the possibility of liquefaction, in conclusion, it is appropriate to select the silty loam to build the levee.

① 收稿日期:2014-08-20

作者简介:王海峰(1989—),男,硕士研究生,主要从事土的动力性质研究.E-mail:wanghaifengzhu@163.com

通讯作者:赵剑明(1970—),男,教授级高工,主要从事岩土工程与土工抗震研究.E-mail:zhaojm@iwhr.com

Key words: levee engineering; liquefaction; dynamic triaxial test; dynamic deformation test; affecting factor

0 引言

饱和的砂土或砂壤土在地震作用下,土体内孔隙水压力来不及消散,逐渐增加,直至有效应力为零,土颗粒完全悬浮于水中,土的承载能力和抗剪能力几乎等于零,从而引发大量破坏,即砂土的液化现象。其中尤以堤防工程失事后破坏更为严重,应引起重视。现有某实际堤防工程,拟用筑堤土料有五种,其中三种土样为砂土,两种为粉质砂壤土,均为可发生液化的土类。现欲在五种土样的动三轴液化强度试验与动变形特性试验的基础上,采用非线性剪切梁法对堤防的液化可能性进行判别,并对液化判别结果进行分析研究,为该具体工程采取相应的加固措施和处理方法提供参考。

1 土样动力特性试验

试验土样的物性指标见表 1。

1.1 动三轴强度试验

为评价堤身和堤基的液化可能性,进行动三轴试验,以确定土样的动强度。试验使用了两种动三轴仪:三种砂土 S_7 、 S_{49} 和 S_{30} 是在 65 型惯性力式振动三轴仪上进行,两种壤土 S_{17} 、 S_{23} 是在 DSD-100 型电磁式振动三轴仪上进行的。试样尺寸均为直径 3.8 cm,高 10 cm。 S_7 和 S_{30} 两种砂土的试样是用煮

好的饱和试样装入试样模,振动到预期密度的方法制备的; S_{49} 土样由于相对密度很低,采用水中砂雨法制备。 S_{17} 和 S_{23} 两种壤土按预定的干容重和含水量,用击样法制样,然后放到真空缸内抽气饱和。根据工程情况的需要,试验采用等向固结条件,两种周围压力 σ' 分别为 49 kPa 和 245 kPa。试验以初始液化为破坏标准。根据工程场地确定的地震震级为 7 级,取振动周次 12 次时发生初始液化的动剪应力为抗剪强度。

为了在液化分析中应用方便,根据不同初始应力状态下的 $\Delta\tau/\sigma'_0 \sim N$ 的关系,整理出潜在破坏面上的动剪强度 $\Delta\tau_f$ 与初始有效法向应力 σ'_{f0} 的关系。对于等向固结条件,即固结比 $K=1$ 时:

$$\sigma'_0 = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$$
(1)

$$\sigma'_{f0} = \sigma'_0, \quad \tau_{f0} = 0$$
$$(\Delta\tau_f)_n = C_r \cdot (\Delta\tau)_n$$
(2)

式(1)中 σ'_0 为 45° 面上初始有效法向应力; σ'_{f0} 为潜在破坏面上的初始有效法向应力; τ_{f0} 为潜在破坏面上的初始剪应力。式(2)中 $(\Delta\tau)_n$ 为 12 周时的动剪强度; C_r 为试验条件校正系数,此次试验取值 0.56; $(\Delta\tau_f)_n$ 为校正过的 12 周时的动剪强度。表 2 汇总了五种土的动三轴试验结果。

表 1 试验土样物性指标
Table 1 Physical indexex of tested soil samples

土样 编号	土样 名称	界限粒径 d_{60}/mm	有效粒径 d_{30}/mm	不均匀系 数 C_u	比重 G	干容重 $\gamma_d/$ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	最大干容重 $\gamma_{d\max}$ $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	最小干容重 $\gamma_{d\min}$ $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙 比 e	相对密 度 D_r	饱和容重 γ_{sat} $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
S_7	细砂	0.155	0.08	1.94	2.65	13.23	15.6	11.37	0.96	0.52	18.03
S_{49}	极细砂,细砂	0.13	0.023	5.65	2.65	11.76	16.07	10.29	1.21	0.35	17.15
S_{30}	细砂	0.195	0.11	1.77	2.65	13.72	16.07	11.86	0.89	0.52	18.33
S_{17}	粉质砂壤土	-	-	-	2.66	13.72	-	-	0.9	-	18.33
S_{23}	粉质壤土	-	-	-	2.67	14.99	-	-	0.75	-	19.11

表 2 动三轴试验结果表
Table 2 Dynamic triaxial test results

土样 编号	试验控制条件							试验结果		
	$K_c = \sigma'_1/\sigma'_3$	σ'_1/kPa	σ'_3/kPa	τ_0/kPa	σ'_{f0}/kPa	τ_{f0}/kPa	σ'_{f0}/kPa	$\tau_{f0}/\sigma'_{f0}/\text{kPa}$	$\Delta\tau/\sigma'_0$	$\Delta\tau_f/\text{kPa}$
S_7	1.0	49.0	49.0	0	49.0	0	49.0	0	0.185	5.1
	1.0	245.2	245.2	0	245.2	0	245.2	0	0.180	24.7
S_{49}	1.0	49.0	49.0	0	49.0	0	49.0	0	0.150	4.1
	1.0	245.2	245.2	0	245.2	0	245.2	0	0.150	20.6
S_{30}	1.0	49.0	49.0	0	49.0	0	49.0	0	0.190	5.2
	1.0	245.2	245.2	0	245.2	0	245.2	0	0.180	24.7
S_{17}	1.0	49.0	49.0	0	49.0	0	49.0	0	0.220	6
	1.0	245.2	245.2	0	245.2	0	245.2	0	0.200	27.5
S_{23}	1.0	49.0	49.0	0	49.0	0	49.0	0	0.420	11.5
	1.0	245.2	245.2	0	245.2	0	245.2	0	0.210	28.8

1.2 动变形特性试验

为了计算堤身的应力,提出对堤身的液化评价,需要对堤身进行动变形特性试验,测定土料的最大剪切模量 $G_{\max}$,剪切模量 G 和阻尼比 ζ 随剪应变 γ 的变化关系。

土样的最大动剪切模量是用室内波速试验的方法在动三轴仪内测定的。在动三轴仪的顶部和底部,分别装有超声波换能器:顶部与 SYC-2 型声波岩石参数测定仪的发射器连接,可以发射剪切波信号;底部与仪器的接收器连接,可以接受发射信号。根据信号发射和接收的时间间隔和试样的高度,在试样固结完成后计算出试样的剪切波速值:

$$G_{\max}=V_s^2 \cdot \rho / g \tag{3}$$

式中 $G_{\max}$ 为最大剪切模量; V_s 为剪切波速; ρ 为质量密度,单位为 t/m^3 ; g 为重力加速度。试验土样的剪切波速值及最大剪切模量见表 3。

表 3 土样的剪切波速与最大剪切模量
Table 3 Shear wave velocities and maximum shear modulus of soil samples

土样 编号	质量密度 ρ /($t \cdot m^{-3}$)	周围压力 σ_0' /kPa	剪切波速 V_s /($m \cdot s^{-1}$)	最大剪切模量 $G_{\max}$ /kPa
S ₇	1.84	49.0	126.7	29 537.3
		245.2	196.0	70 685.4
S ₁₉	1.75	49.0	110.6	21 406.6
		245.2	162.0	45 927
S ₃₀	1.87	49.0	125.9	29 641
		245.2	195.0	71 106.8
S ₁₇	1.87	49.0	122.0	27 833.1
		245.2	208.0	80 903.7
S ₂₃	1.95	49.0	145.0	40 998.8
		245.2	236.0	108 607.2

土样的动剪切模量和阻尼比随剪应变的变化关系,是在 DTC-158 型共振柱仪上测定的,试样的制备方法与动三轴试样相同,试样尺寸为直径 5cm、高 10cm 的圆柱体,试验结果见图 1。

2 液化可能性分析与评价

2.1 堤身液化可能性分析

堤身的地震反应用非线性剪切梁法计算。由于堤基为非岩石地基,需要考虑堤身与地基的相互作用。用下式求堤与地基体系的自振频率:

$$\omega_n=\sqrt{1-\lambda^2}\frac{\alpha_n}{H}\sqrt{\frac{G}{\rho}} \tag{4}$$

式中 α_n 为下列方程的一组根:

$$mtg(q \cdot \alpha_n)=J_0(\alpha_n)/J_1(\alpha_n) \tag{5}$$

$$q=m\frac{D}{H} \tag{6}$$

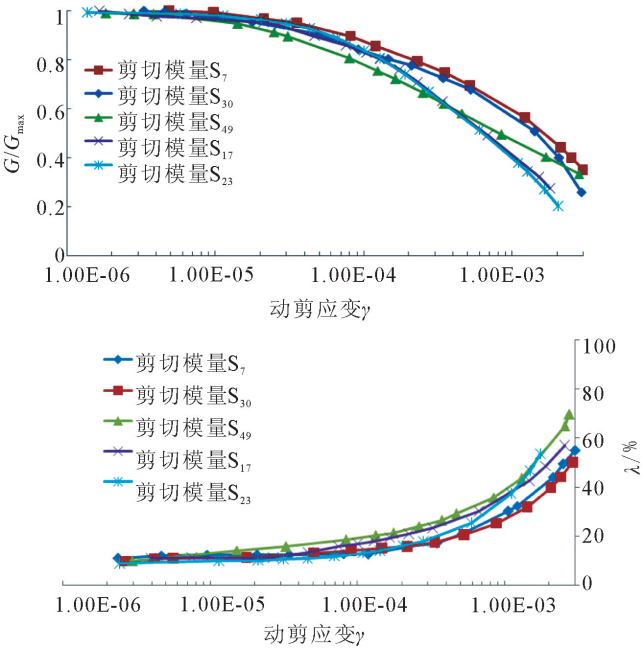


图 1 五种土样剪切模量和阻尼比随剪应变变化关系曲线
Fig.1 Variation of five soil samples' shear modulus and damping ratio with the shear strain

式中: $m=(G/\rho)/(G'/\rho')$, 为刚度比, G 、 ρ 和 G' 、 ρ' 分别为堤和地基的剪切模量和密度; 式(5)中 J_0 和 J_1 分别为第一类零阶和一阶贝塞尔函数; 式(6)中 q 为刚度系数; H 为堤高, 取 7 m; D 为非岩石地基厚度, 实际超过 30 m, 根据经验一般取 3 倍堤高已能满足要求, D 取 21 m。

计算体系的地震反应时,堤身与堤基的最大剪切模量分别按常量考虑。土堤的最大剪切模量采用周围压力 49 kPa 时的测定结果,地基的最大剪切模量采用周围压力为 245 kPa 时的测定结果。计算结果只考虑前三阶振型。振型 $\phi_{H,n}^z$ 和振型参与系数 η_n 按下式计算:

$$\phi_{H,n}^z=J_0(\alpha_n,\frac{Z}{H}) \tag{7}$$

$$\eta_n=\frac{2}{\alpha_n \cdot N_n} \tag{8}$$

$$N_n=q[m\cos(q \cdot \alpha_n) \cdot J_1(\alpha_n) + \sin(q \cdot \alpha_n) \cdot J_0(\alpha_n)] - \{m\sin(q \cdot \alpha_n) \left[\frac{J_1(\alpha_n)}{\alpha_n} - J_0(\alpha_n) \right] - \cos(q \cdot \alpha_n) \cdot J_1(\alpha_n) \} \tag{9}$$

式(7)和式(9)中 J_0 和 J_1 分别为第一类零阶和一阶贝塞尔函数。

堤身的剪应变用下式计算:

$$\gamma(\frac{z}{H})_{,n,max}=\left|\frac{\partial \phi_{\frac{z}{H},n}\eta_n}{\partial Z}\right|\cdot S_{d,n}\tag{10}$$

$$S_{d,n}=\frac{S_a}{\omega_n^2}\tag{11}$$

$$S_a=\beta\cdot\ddot{u}_{g,max}\omega_n\tag{12}$$

式(11)中 $S_{d,n}$ 为相对位移反应谱; S_a 为绝对加速度反应谱; ω_n 为体系的自振频率。式(12)中 β 为绝对加速度反应谱系数; $\ddot{u}_{g,max}$ 为地震最大水平加速度,地震烈度Ⅶ度时为 0.1 g,Ⅷ度时为 0.2 g。

求出前三阶振型的剪应变后,用式(13)求堤身的最大剪应变反应:

$$\gamma(\frac{z}{H})_{max}=\sqrt{\sum_{n=1}^3\gamma_{(\frac{z}{H})_{,n,max}}^2}\tag{13}$$

计算中考虑了动变形特性非线性问题,根据得到的动剪切模量和阻尼比随剪应变变化的非线性关系,采用多次迭代的方法,使最后的结果满足给出的非线性关系。

针对五种土料做堤,给定水位条件,即堤内水位距堤顶 2.5 m,堤外水位在地表,从安全角度出发,堤身浸润线按距堤顶 2.5 m 考虑。分别按地震烈度Ⅶ度和Ⅷ度进行液化可能性分析, S_{49} 和 S_{23} 分别为代表性的砂土和砂壤土,其计算结果见图 2。

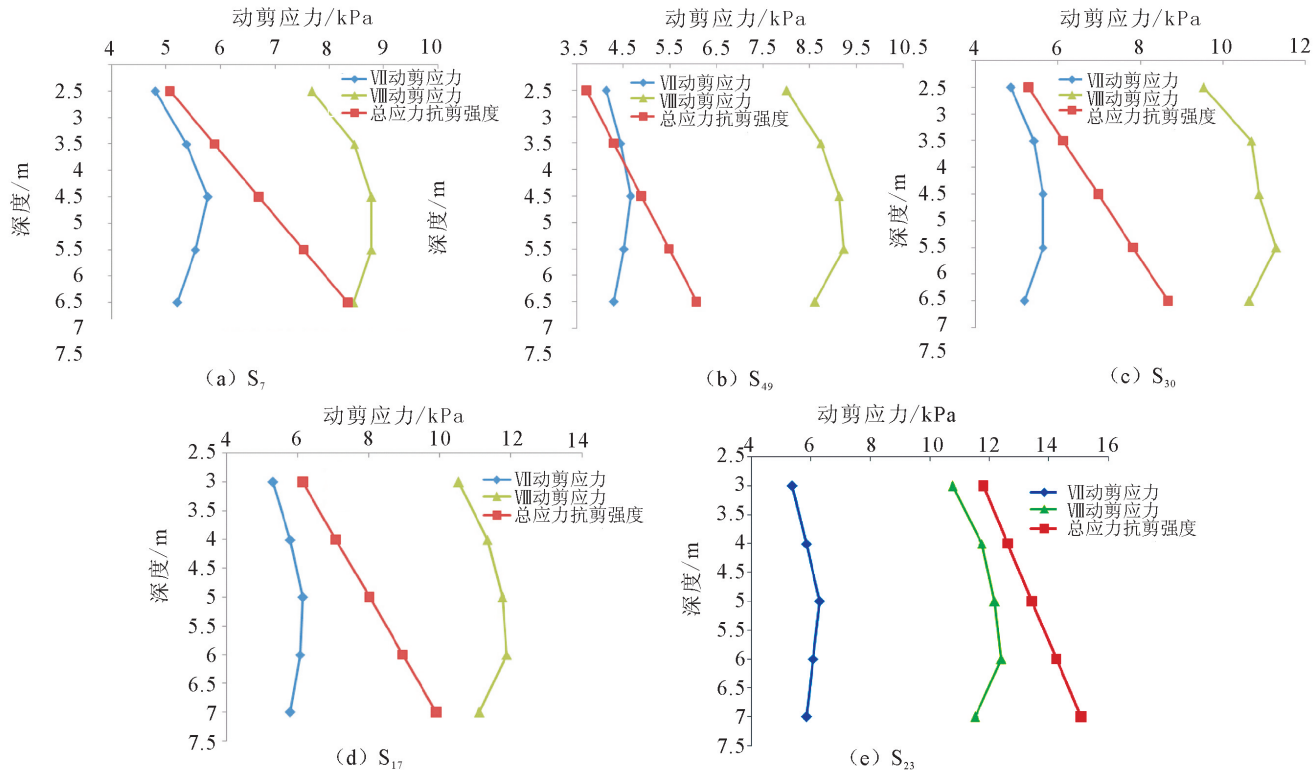


图 2 五种土样堤防的液化分析

Fig.2 Liquefaction analysis of levees constructed using different soil materials

2.2 液化评价

从计算结果看,三种砂土的抗液化强度都比较低,其中 S_{49} 最差, S_7 和 S_{30} 强度很接近,稍好于 S_{49} ;两种粉质土 S_{17} 和 S_{23} 也是可液化土类, S_{23} 的抗液化强度比 S_{17} 高。

当用以上五种土做坝料筑堤时,在给定的水位条件下,堤内水位低于坝高 2.5 m,堤外水位与地表持平,在地震烈度Ⅶ度时只有 S_{49} 类砂土可能发生液化,其他四种土未发生液化;在地震烈度Ⅷ度时,只有粉质壤土 S_{23} 未发生液化,其他四种土均发生液化。

3 分析研究成果

(1) 本文提出的非线性剪切梁方法能够考虑到地基和堤身间的相互作用,计算得到堤与地基体系的自振频率与振型参与系数。计算中考虑动变形特性非线性问题,根据得到的动剪切模量和阻尼比随剪应变变化的非线性关系,采用多次迭代的方法,使最后的结果满足给出的非线性关系,简单实用,可操作性强。

(2) 在三种砂土的对比分析中, S_{49} 类砂土最容易发生液化,对比其物性指标,可以发现其不均匀系数与孔隙比明显大于其他两种。可能是因为初始孔

隙比越大,相对密度越小,孔隙越多,则孔隙水压力传递越快,在不排水条件下砂土越容易发生液化。不同粒径土的室内试验表明,粗粒砂土较细粒砂土更难于液化,而从 S_{19} 砂土的不均匀系数(界限粒径与有效粒径之比)可以看出,其细粒土含量多于其他两种砂土,粗粒土的粒径也小于其他两种砂土。但不均匀系数越大的砂土越容易发生液化的结论还有待进一步的试验验证。两种粉质壤土的对比中, S_{23} 较不容易发生液化,其干容重和饱和容重明显大于 S_{17} ,而孔隙比则明显要小,即越密实的砂壤土越不容易发生液化。

(3) 总的来看,在设定运行工况下,每种情况都存在不同程度的问题,总趋势是地震烈度越强,土的密度越差,越容易发生液化。用以上五种土做堤防时,除 S_{23} 粉质壤土外都应采取工程措施,提高其密实程度。Ⅷ度地震时,只有拟选的 S_{23} 粉质壤土堤身不会发生液化,其他四种土筑堤均有发生液化的可能,选用该土筑堤较合适。

参考文献(References)

[1] 刘颖,谢君斐.砂土震动液化[M].北京:地震出版社,1984.
LIU Ying, XIE Jun-fei. Vibrated Liquefaction of Sandy Soil

[M].Beijing:Seismological Press,1984.(in Chinese)
[2] 顾淦臣.土石坝地震工程[M].南京:河海大学出版社,1989.
GU Gan-chen. Earthquake Engineering for Earthrock Dams [M].Nanjing: Hohai University Press,1989.(in Chinese)
[3] 杨玉生,刘小生,赵剑明,等.土石坝坝体和地基液化分析方法与评价[J].水利发电学报,2011,30(6):90-97.
YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, ZHAO Jian-ming, et al. Methods for Liquefaction Potential Evaluation of Embankment and Foundation and Discussion on These Methods[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2011,30(6):90-97.(in Chinese)
[4] 杨健,陈庆寿.砂土液化影响因素及其判别方法[J].西部探矿工程,2004(2):1-2.
YANG Jian, CHEN Qing-shou. Affecting Factors and Distinguishing Methods of Sandy Soil Liquefaction[J]. West-China Exploration Engineering,2004(2):1-2.(in Chinese)
[5] 杨依民.饱和砂土的三轴试验及地震液化分析研究[D].大连:大连理工大学,2013.
YANG Yi-min. Triaxial Test and Analysis of Seismic Liquefaction of Saturated Sand[D].Dalian:Dalian University of Technology,2013.(in Chinese)
[6] 赵剑明,常亚屏,陈宁.加强高土石坝抗震研究的现实意义及工作展望[J].世界地震工程,2004,20(1):95-99.
ZHAO Jian-ming, CHANG Ya-ping, CHEN Ning. Significance and Prospects About Earthquake Resistant Studies of High Earth-rockfill Dams[J]. World Earthquake Engineering,2004,20(1):95-99.(in Chinese)

(上接 433 页)

[6] Shukla S K, Khandelwal S, Verma V N, et al. Effect of Surcharge on the Stability of Anchored Rock Slope With Water Filled Tension Crack Under Seismic Loading Condition[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2009,7(4):529-538.
[7] Shukla S K, Hossain M M. Stability Analysis of Multi-directional Anchored Rock Slope Subjected to Surcharge and Seismic Loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2011,31(2):841-844.
[8] 许光祥.饱水岩石边坡抗倾覆稳定系数计算[J].岩土工程学报,1999,21(2):227-229.
XU Guang-xiang. Calculation of Stability Factor Against Overturning for Saturated Rock Slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1999,21(2):227-229.(in Chinese)
[9] Das B M. Principles of Geotechnical Engineering (5th ed)[M]. Ontario: Thomson Canada Lt.,2006.