

尾矿坝液化流动变形分析

孔宪京^{*1}, 潘建平^{1,2}, 邹德高¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 介绍了基于双线性模型的砂土液化流动变形分析方法, 并用二维商用软件 ALID (Analysis for Liquefaction-induced Deformation) 分析了 Mochikoshi 尾矿坝地震液化流动变形, 其中滩长分别按 5 m 和 38 m, 坝基土液化和非液化共计 3 种组合. 通过计算分析发现了该坝在不同条件下发生液化流动变形的一些规律. 计算结果表明, 增加滩长、降低水位线的高度, 将有助于减小坝体液化流动变形, 增强坝体的稳定性; 坝基土发生液化流动将导致尾矿坝整体发生流滑. 探讨了用反压体、稳定柱、加筋和密实等措施抑制尾矿坝液化流动变形.

关键词: 尾矿坝; 液化分析; 液化变形; ALID; 地震

中图分类号: TU441 **文献标志码:** A

0 引言

尾矿坝是一种特殊的土工构筑物, 其使用功能、施工工艺和静动力特性均不同于一般的水工土石坝, 其建造方法分为上游法、中线法和下游法. 上游法尾矿坝后继断面较小及占地较少, 且工艺简单、造价低, 我国大多数尾矿坝均采用上游法方式修建. 上游法修建的尾矿坝其浸润线较高, 大部分坝体处于饱和状态, 地震时易发生液化, 导致坝体破坏. 如 1978 年日本的 Mochikoshi 尾矿坝由于地震液化破坏, 近 80 000 m³ 的尾矿水合物释放出来, 给当地的环境生态和人民生命财产带来了很大的损失^[1]; 1965 年智利 La Ligua 地震中 Cobre 尾矿坝溃坝吞掉 200 人的生命^[2]; 在我国 1976 年唐山地震中有人观察到大石河尾矿坝有喷水冒砂现象, 后来的实地勘察和计算分析都表明确实曾有液化发生^[3]. 尾矿料液化后强度降低, 在土体自重作用下, 出现大的垂直和侧向变形现象, 从而导致坝体流滑破坏. 砂土液化后的大变形分析是当前研究的热点和难点, 国内大多集中于试验研究^[4,5], 很少用于实际工程分析. 然而, 为更好地进行尾矿坝抗震设计及对现有尾矿坝进行安全评价, 尾矿坝液化后大变形规律的研究是一

项很有意义的工作. 本文介绍 Yasuda 等建议的基于双线性模型的砂土液化后流动变形分析方法^[6]; 利用二维商用软件 Analysis for Liquefaction-induced Deformation (ALID)^[7] 计算分析 Mochikoshi 尾矿坝因地震液化发生的流动变形, 并探讨抑制液化变形的有效措施.

1 分析方法

1.1 液化后砂土的应力应变关系

Yasuda 等^[6~8] 用丰浦砂做室内剪切试验, 结果表明, 液化砂土即使承受很小的剪应力也可产生很大的剪应变; 剪应变产生后, 伴随着孔压的消散, 应力应变曲线急剧上升, 强度恢复正常; 相对密度 D_r 、抗液化率 F_1 越小, 强度恢复前应力应变曲线斜率越小 (即模量越低), 强度恢复后应变曲线斜率增大. 基于试验结果分析, Yasuda 提出了液化后砂土的双线性模型, 即用两段直线来近似代替大变形曲线的低强度段及强度恢复段, 如图 1 所示. 强度恢复点的应变称为参考应变 γ_1 . 双线性模型中, 强度恢复点前的应力应变关系用双折线模量 G_1 来计算, 强度恢复后则用双折线模量 G_2 来计算. 以 G_1 、 G_2 和 γ_1 为基本参数的双线性模

型可表示为

$$\tau = G_1 \gamma; \gamma < \gamma_1 \tag{1}$$

$$\tau = G_1 \gamma_1 + G_2 (\gamma - \gamma_1); \gamma \geq \gamma_1 \tag{2}$$

式中: G_1 、 G_2 是参考应变 γ_1 前后的双折线模量。

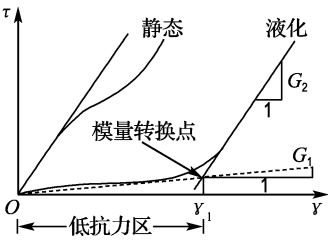


图 1 液化砂土应力应变曲线示意图
Fig.1 Schematic diagram of stress-strain curve of liquefied sand soil

图 2 是用于计算分析的应力应变概念曲线。A 点是土的初始状态,当孔压增长时,土的模量和强度随之降低,状态点从 A 移到 C,应力降低,应变增加,增量为 $\gamma_c - \gamma_A$ 。认为砂土液化流动变形是土体模量降低所导致,模量降低率 G_1/σ'_v 与抗液化率 F_1 及抗液化应力比 R_1 的关系如图 3 所示。 G_1 、 G_2 与 γ_1 的关系,分别采用式(3)和(4)确定。

$$\gamma_1 = (1\ 300/G_1)^{0.558\ 7} \tag{3}$$

$$G_2 = 2\ 000/\gamma_1 \tag{4}$$

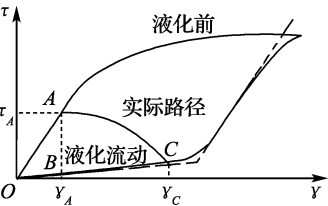


图 2 用于计算分析的应力应变概念曲线
Fig.2 Concept curves of stress-strain used for analysis

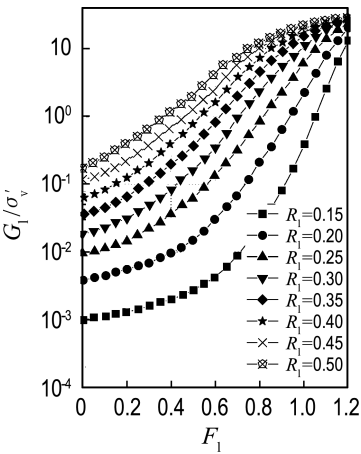


图 3 模量降低率 G_1/σ'_v 与抗液化率 F_1 的关系
Fig.3 Relationship of G_1/σ'_v and F_1

1.2 液化后流动变形分析^[7~9]

1983 年日本海中部地震,1964 年新泻地震,1995 年兵库南部地震都发生了地基液化并伴随地基的很大变形,学者们称这种现象为“液化流动变形”,液化产生流动变形由两部分组成:(1)地震时在周期荷载作用下产生的残留变形;(2)液化时土体骨架结构发生变化,产生在自重应力下的流动变形.前者数十厘米,而后者可达数米,ALID 方法主要用于分析后者的大变形.具体分析步骤如下:

- (1)基于液化前砂土应力应变曲线,用有限元计算土体的应力应变分布;
- (2)用地震反应分析方法或者简化分析方法确定抗液化率 F_1 ;
- (3)基于液化后砂土应力应变曲线,再次用有限元计算液化土体的应力应变,两次计算的应变差即为液化导致的变形。

2 算 例

2.1 Mochikoshi 尾矿坝概况^[1]

1978 年日本 Izu-Ohshim-Kinkai 发生地震,在 Mochikoshi 的两座尾矿坝由于地震液化发生溃坝.1[#]尾矿坝在地震中破坏,2[#]尾矿坝在地震后约 24 h 溃坝.这里以 1[#]坝体结构为例.初期坝坝高 14 m,外坡度为 1:2.5,内坡度为 1:1.8.主坝体高 28 m,坝顶宽 5 m,水位线垂直距离坝坡约 3 m,下游坡度约为 1:3,为上游法修筑。

2.2 计算模型与计算工况

根据尾矿库标高(+668 m)构建计算模型,如图 4 所示(部分上游库体未显示).坝基及尾矿坝材料依次为坝基土①、坝基土②、初期坝③、尾细砂④、尾粉砂⑤、尾粉土⑥、尾矿泥⑦和尾矿泥⑧。

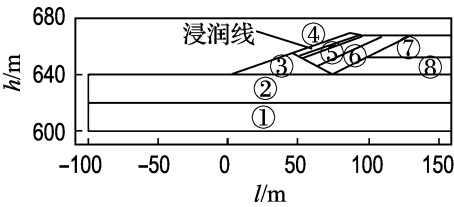


图 4 尾矿坝剖面概化
Fig.4 Simplified map of profile of tailing dam

按下列工况计算液化流动变形:(1)水位线按实际情况,滩长为 5 m,见图 4,坝基土全为①,初期坝和坝基土均为非液化土层;(2)在工况(1)中,降低水位线,滩长增加 33 m;(3)在工况(1)中,坝

基上部改为液化土层②,下部仍为非液化土层①.

2.3 材料参数

尾矿坝液化流动变形分析的可靠性一定程度上取决于材料参数的确定. Ishihara^[10]、阮元成

等^[11,12]、张超等^[13]对尾矿料力学特性进行了试验研究. 根据文献[1],并参考类似尾矿料的测试结果,具体物理力学参数取值见表1.

表1 尾矿料参数
Tab.1 Physical-mechanical properties of materials of tailings dam

尾矿料编号 和名称	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\gamma_m/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	$R_{l,20}$	μ	K		n		R_f	K_b	m
							静	动	静	动			
尾细砂④	16.3	19.6	25	35	0.15	0.33	110	532	0.53	0.60	0.73	35.5	0.59
尾粉砂⑤	15.9	19.5	8	30	0.15	0.33	111	514	0.47	0.54	0.70	40.1	0.47
尾粉土⑥	15.6	19.4	8	30	0.15	0.33	130	550	0.56	0.63	0.75	60.0	0.43
尾矿泥⑦	18.5	20.0	10	34	0.20	0.33	150	500	0.46	0.55	0.68	80.0	0.48
尾矿泥⑧	18.5	20.0	10	34	0.20	0.33	180	750	0.50	0.60	0.70	100.0	0.50
初期坝③	18.0	20.0	25	35	0.50	0.33	320	1 000	0.52	0.60	0.85	200.0	0.40
坝基土②	16.5	20.0	10	30	0.20	0.33	250	700	0.50	0.58	0.70	90.0	0.30
坝基土①	17.0	20.0	25	35	0.50	0.33	500	1 500	0.51	0.60	0.74	200.0	0.21

注: γ_m 为饱和容重; R_f 为破坏比; K_b 为体积模量系数; m 为体积模量指数

2.4 地震荷载

Ishihara 预测地震时地表峰值加速度在 $0.15g \sim 0.25g$. 没有实测加速度时程记录,参考 El-Centro 地震波,并将峰值调整为 $0.20g$,如图5所示.用动力有限元程序 Geodyna^[14] 计算最大动剪应力,从而确定地震液化应力比 L . 试验抗液化应力 R_l 与 L 的比值为抗液化率 F_l .

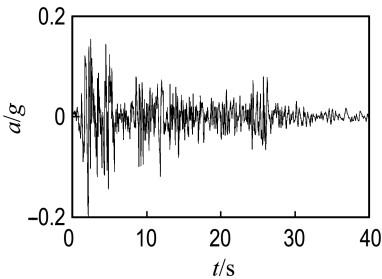


图5 地震加速度时程曲线

Fig. 5 Time history curves of seismic acceleration

2.5 结果与分析

用 ALID 计算分析上述工况,计算结果如图6~10所示. 分析结果如下:

图6是工况(1)发生液化流动变形图,图7是相应水平位移等值线,可以看出,在初期坝和坝基没有液化流动发生并在地震中保持稳定时,坝体上部液化土料将从初期坝顶溢出. 最大位移出现在初期坝上游坡脚附近,认为主坝体已经发生破坏. 据目击者描述,Mochikoshi 尾矿坝在主震后10 s主坝体发生破坏,大量尾矿料越过初期坝顶流向下游^[1]. 工况(1)的计算结果与文献报道相

符,进而说明 ALID 方法在液化流动变形分析中的实用性和有效性.

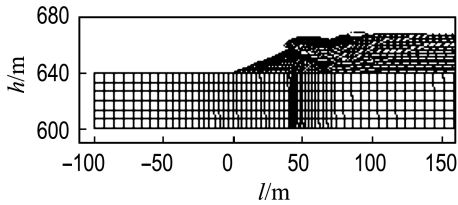


图6 工况(1)变形

Fig. 6 Deformation of Case (1)

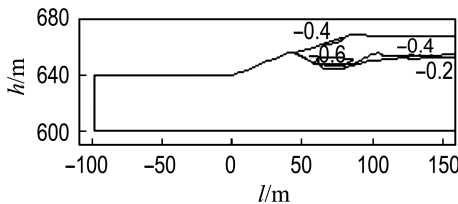


图7 工况(1)水平位移等值线

Fig. 7 Isoline of horizontal displacement of Case (1)

图8是工况(2)水平位移等值线,与工况(1)相比,降低水位线、增加滩长减小了坝体水平位移值,有利于坝体的稳定.

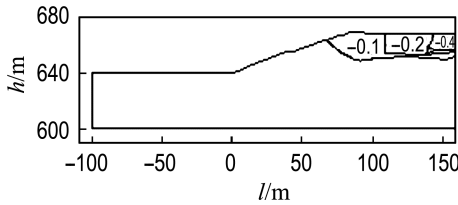


图8 工况(2)水平位移等值线

Fig. 8 Isoline of horizontal displacement of Case (2)

图 9 是工况(3)的变形图,如果坝基土发生大面积液化,将导致整个坝体滑移. 图 10 是相应的水平位移等值线,最大值出现在初期坝脚处.

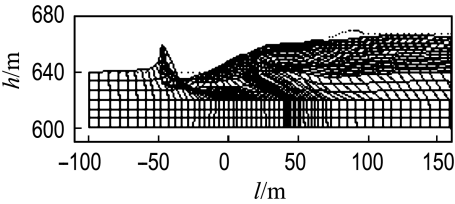


图 9 工况(3)变形

Fig. 9 Deformation of Case (3)

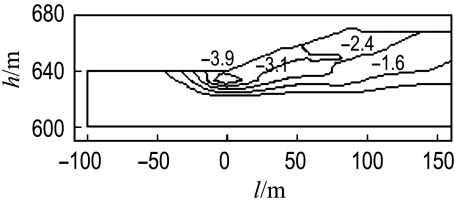


图 10 工况(3)水平位移等值线

Fig. 10 Isolines of horizontal displacement of Case (3)

3 抑制尾矿坝液化变形措施的思考

目前抑制砂土液化流动变形的措施主要有两类:(1)提高砂土本身的抗液化强度;(2)采取有效措施,增加附属结构阻止液化砂土的流动. 图 11、12 是工况(1)在下游坡修筑反压体和在上游增设稳定柱加固后的水平位移等值线图,可见较加固前的液化变形大大减小. 在坝体外坡施加反压体,以达到防止液化尾矿料推动坝壳向下游流动的目的;在上游增设稳定柱,增强周围土体的强度和坝体排水功能,降低水位线,同时能阻挡库内液化尾矿料的流动. 图 13 是另外两种措施示意图. 其中,图(a)采用加筋技术,在主坝体外坡加土工织物包裹堆填,以提高坝体的抗变形能力,增强稳定性;图(b)是在坝基土液化流动时,对坝基液化土层采取密实加固. 上述措施的有效性及其实用性有待进一步理论分析和试验、实践验证.

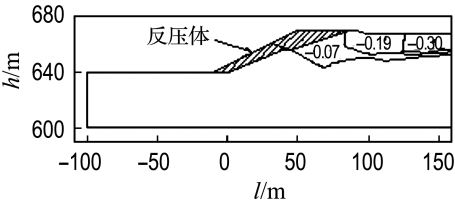


图 11 反压体加固的水平位移等值线

Fig. 11 Isolines of horizontal displacement under taking reinforce of forcing buttress

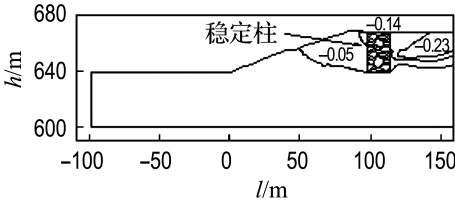


图 12 稳定柱加固的水平位移等值线

Fig. 12 Isolines of horizontal displacement under taking reinforce of stabilizing column

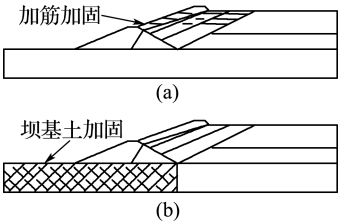


图 13 两种尾矿坝抗液化变形措施示意图

Fig. 13 Schematic diagrams of countermeasures against liquefaction-induced deformation for tailings dam

4 结 语

用二维有限元程序 ALID 分析了Mochikoshi尾矿坝因液化产生的流动变形,分析结果和文献报道相符. 坝体不能阻挡液化尾矿料流动,将导致坝体上部尾矿料从初期坝坝顶溢出,往下游流出. 坝基土出现液化时,将导致整个坝体滑移,后果非常严重. 这时应该按照规范的要求,对坝基土进行加密、加固等措施. 对于较高烈度区,应该参照上述加固措施修建尾矿坝,或对已建尾矿坝进行加固处理. 为了更好地进行尾矿坝抗震设计及安全性评价,了解尾矿坝液化流动变形特性及其规律尤显重要. 将分析结果运用在实际工程设计中,积极防止尾矿坝因液化而导致的滑移破坏,尤其防范因坝基液化流动影响整个坝体的稳定. ALID 计算方法简便而实用,是一个用于砂土液化后流动变形分析的有效工具.

致谢:本文的工作得到日本电机大学 Yasuda 教授、日本东北学院大学 Yoshida 教授和日本软件工厂株式会社 Adachi 社长的帮助.

参考文献:

[1] ISHIHARA K. Post-earthquake failure of a tailings dam due to liquefaction of the pond deposit [C] // International Conference on Case Histories in

- Geotechnical Engineering**. St. Louis :University of Missouri, 1984:1129-1143
- [2] HARPER T, MCLEOD H, DAVIES M. Seismic assessment of tailings dams [J]. **Civil Engineering**, 1992, **12**:64-66
- [3] 王余庆,王治平,辛鸿博,等. 大石河尾矿坝1976年唐山大地震震害及有关强震观测记录[J]. 工业建筑, 1994, **7**:38-42
- [4] 刘汉龙,周云东,高玉峰. 砂土地震液化后大变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(2): 142-146
- [5] 张建民,王 刚. 砂土液化后大变形的机理[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(7):835-840
- [6] YASUDA S, YOSHIDA N, MASUDA T, *et al.* Stress-strain relationships of liquefied sands [C] // **Earthquake Geotechnical Engineering**. Rotterdam: Balkema, 1995:811-816
- [7] 安田进,安达健司,吉田望,等. 2次元液化流动解析说明书[M]. 东京:ALID研究会, 2005
- [8] YASUDA S, YOSHIDA N, KIKU H, *et al.* A simplified method to evaluate liquefaction-induced deformation [C] // **Earthquake Geotechnical Engineering**. Rotterdam: Balkema, 1999: 555-560
- [9] YASUDA S, IDENO T, SAKURAI Y. Analyses for liquefaction-induced settlement of river levees by ALID [C] // **Proceedings of the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering**. Singapore: World Scientific Publishing, 2003:347-350
- [10] ISHIHARA K, TRONCOSO J, KAWASE Y. Cyclic strength characteristics of tailings materials [J]. **Soils and Foundations**, 1980, **20**(4):127-142
- [11] 阮元成,郭 新. 饱和尾矿料动力变形特性的试验研究[J]. 水利学报, 2003, **34**(4):24-29
- [12] 阮元成,郭 新. 饱和尾矿料静、动强度特性的试验研究[J]. 水利学报, 2004, **35**(1):67-73
- [13] 张 超,杨春和,白世伟. 尾矿料的动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(1):35-40
- [14] 邹德高,孔宪京. Geotechnical Dynamic Nonlinear Analysis—GEODYNA使用说明[Z]. 大连:大连理工大学土木水利学院工程抗震研究所,2003

Analysis of liquefaction-induced flow deformation of tailings dam

KONG Xian-jing^{*1}, PAN Jian-ping^{1,2}, ZOU De-gao¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Architectural and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology,

Ganzhou 341000, China)

Abstract: A simplified procedure for the analysis of liquefaction-induced residual deformation is introduced based on the bilinear model. By using the finite element code ALID(Analysis for Liquefaction-Induced Deformation), liquefaction-induced flow deformation of Mochikoshi tailings dam under different conditions is estimated. They include a dry beach 5 m long with liquefied or non-liquefied foundation soil and a dry beach 38 m long with non-liquefied foundation soil. Through calculation and analysis, some rules of liquefaction-induced flow deformation of this tailings dam are found. The analytical results show that the longer dry beach and lower water table induce the smaller deformation and keep the better stability. If the liquefied foundation soil flows, tailings dam will wholly slip. Moreover, some countermeasures for liquefaction-induced flow deformation, such as forcing buttress, stabilizing column, densification foundation and reinforcement with fibre, are discussed.

Key words: tailings dam; liquefaction analysis; post-liquefaction deformation; ALID; earthquake