

文章编号:1673-9469(2008)03-0034-04

土石坝加筋有限元数值模拟

王海涛

(河北工程大学理学院,河北邯郸056038)

摘要:运用复合材料法模拟土工格栅加筋单元,对格栅加筋堆石坝坝顶堆石进行了数值模拟。计算中,土石料采用非线性弹性模型模拟,并用拟静力法模拟地震动荷载。对无地震和有地震两种情况下的加筋效果及加筋层数和格栅模量对加筋效果的影响进行了分析研究,并对格栅加筋机理加以解释。数值模拟结果表明:格栅加筋有利于增加土石坝坝顶堆石的稳定性和抗震性能,随加筋层数和格栅模量的增加,加筋效果愈加显著。

关键词:土工格栅;加筋;数值模拟;堆石坝;拟静力法

中图分类号:TV641

文献标识码:A

Numerical simulation to reinforcement of rockfill dam with geogrids

WANG Hai-tao

(College of Science, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Based on the assumption that geogrid and its surrounding soils being a composite material, the effect of reinforcement of dam crest rockfill with geogrids is studied by using nonlinear elastic finite element method. The influence of layer number and modulus of geogrids on effect of reinforcement is investigated. The results indicate that reinforcement is helpful in increasing stability and earthquake-resistant ability of dam crest rockfill. It also shows that effect of reinforcement becomes more evident with more layers and increasing modulus of geogrid.

Key words: geogrid; reinforcement; numerical simulation; rockfill dam; quasi-static method

土工格栅是一种常用的土工合成材料,具有变形模量大、抗拉强度高、延伸率小、耐腐蚀、抗老化、成本低且易于施工等优点。其加筋效果比土工布等土工合成材料优越^[1],在实际工程中得到了越来越多的应用。国内外学者在这方面作了大量的理论分析和试验研究^[2-5],加深了人们对土工格栅加筋机理和变形特性的认识,促进了其在工程中的推广和应用。我国西南地区水能资源储量丰富,很多大型心墙堆石坝选址于此。同时,西南地区地质条件复杂,是地震易发地区。心墙堆石坝坝壳一般为堆石或砂砾石料,在地震等外荷载作用下有发生颗粒错移、滚动的趋势,坝顶堆石部位较其它部位更加危险,对大坝安全运行形成威胁。增加堆石坝坝顶等部位的局部稳定性很有必要,铺设土工格栅应该是一种有效方法。

本文以某心墙堆石坝为例,运用拟静力法模拟地震动荷载,运用复合材料法模拟土工格栅单元,通过有限元法研究该堆石坝在坝顶一定范围铺设土工格栅对增加该堆石稳定性和抗震能力的作用,并研究不同加筋层数和格栅模量对加筋效果的影响。数值模拟结果显示,土工格栅加筋在减小加筋部位水平位移,增加坝顶堆石稳定性方面起到了一定的作用。

1 工程概况

西南地区某大坝坝顶高程 2143m,最大坝高 123m,坝址位于地震基本烈度为 7 度的地震区。大坝最大横剖面见图 1。为增加坝顶部位堆石的抗震稳定性,考虑在坝顶以下 28m 范围的上下游坝壳内设置 13 层土工格栅(层数编号由下至上)。

收稿日期:2008-03-27

作者简介:王海涛(1979-),男,河北邯郸人,硕士研究生,从事高等数学和工程数学的教学与研究。

第13层格栅距坝顶4m,第1层格栅与第2层格栅间距3m,其它格栅间距2m,水平最大宽度30m。

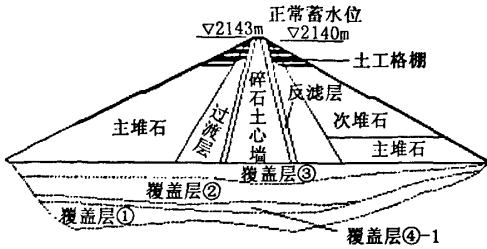


图1 最大横剖面图

Fig.1 Cross section of a rockfill dam

2 数值模拟方法

2.1 拟静力法

拟静力法是假定地震作用如同静力,用地震系数乘以建筑物重量而求得作用于建筑物上的静力的方法。计算时,依据《水工建筑物抗震设计规范》建议的地震惯性力计算公式,估计地震时各单元的地震惯性力,将它施加到各结点进行平面有限元计算。

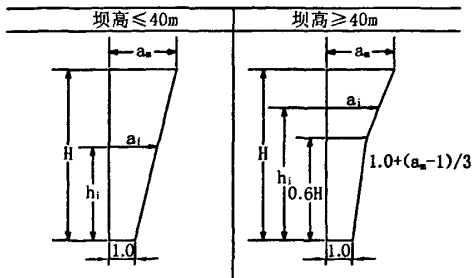
地震惯性力计算公式如下:

$$F_i = \sigma_h \zeta G_{zi} a_i / g \quad (1)$$

其中

$$\sigma_h = \frac{3}{2} \sigma_v = \begin{cases} 0.1g & e=7 \\ 0.2g & e=8 \\ 0.4g & e=9 \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_i - 在质点 i 的水平向地震惯性力代表值; σ_h 和 σ_v - 水平向和竖向设计地震加速度代表值; e - 设计烈度; ζ - 作用的效应折减系数,除另有规定外,取0.25; G_{zi} - 在质点 i 的重力作用标准值; a_i - i 的动态分布系数,可按图2选取; g - 重力加速度。



注: 图中 a_m 在设计烈度为7、8、9度时, 分别取3.0、2.5和2.0。

图2 土石坝坝体动态分布系数

Fig.2 Dynamic distribution coefficient of the dam body

2.2 土石料本构关系

土体变形具有粘弹塑性,用弹塑性模型模拟较好。然而,弹塑性模型参数测定困难,使用起来复杂,难以推广,实际工程数值计算中很少采用。非线性弹性模型虽然忽略了应力路径等因素的影响,但仍能够较好地模拟土体发生屈服后的非线性变形情况。Duncan - Chang 模型^[6]作为非线性弹性模型的代表,其模型参数确定简单,应用方便,被广泛地应用于土工计算中。

土石料应力 - 应变关系采用 Duncan - Chang $E - v$ 模型模拟。其切线弹性模量 E_t 随围压 σ_3 和破坏比 R_f 而变化:

$$E_t = [1 - R_f S]^2 K_p a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (3)$$

切线泊松比:

$$v_t = \frac{G - F \lg \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)}{(1 - A)^2} \quad (4)$$

其中

$$A = \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_t} \quad (5)$$

$$S = \frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \quad (6)$$

式中 c - 粘聚力; φ - 内摩擦角; K, n, F, D, G - 模型参数,由土的三轴排水剪试验确定; P_a - 大气压; σ_1 - 大主应力。

2.3 土工格栅数值模拟

加筋后土工格栅在土体中受到的拉力较其抗拉强度小得多,所以将土工格栅视作线弹性体^[7,8]。格栅呈网状,在大坝填筑过程中,部分堆石会“填充”到格栅网眼区域,接触面单元很难模拟这种情况。这里做如下基本假设:格栅与周围薄层土体均呈弹性变形,且两者变形协调,无相对滑动。采用复合材料法,将格栅与周围薄层土体看作一个整体。

参照相关资料^[6],取格栅泊松比0.4,抗拉强度120kN/m,弹性模量2GPa。在划分平面网格时,考虑到有限元网格形态对计算结果的影响,把土工格栅与其周围15mm厚土体做为一种宏观线弹性均质材料处理,这里假设格栅厚度为5mm。

实际上,该材料水平向和竖向变形模量并不相等,但由于竖向厚度很薄(20mm),所以竖向变形模量的微小变动对加筋区域竖向变形的

影响可以忽略不计,假设该材料为一种宏观线弹性匀质材料是可行的。

设单位面积,高 20mm 匀质材料在水平向受拉力 T ,则如图 3 所示,作用在土工格栅上的应力为 σ_g ,作用在土体上的应力为 σ_s ,则有

$$T = \sigma_g \times 5 + \sigma_s \times 15 \quad (7)$$

由基本假设可得:

$$\frac{\sigma_g}{E_g} = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{T}{20E_c} \quad (8)$$

式中 E_g - 土工格栅弹性模量; E_s - 格栅周围薄层土弹性模量; E_c - 该宏观匀质线弹性材料弹性模量。

由公式(7)、(8)可得:

$$E_c = \frac{3 \times E_s + E_g}{4} \quad (9)$$

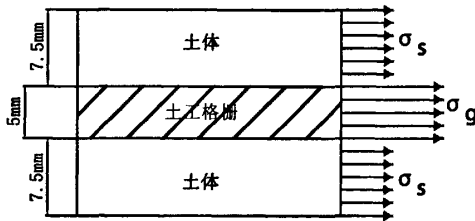


图3 土工格栅复合材料受力示意图

Fig. 3 Stress condition of the composite material

2.4 大坝材料参数

大坝坝料主要土石料有 9 种,其 Duncan - Chang $E - \nu$ 模型参数见表 1。

表中 $\Delta\varphi$ 为反映在高围压下土体摩擦角 φ 值随 σ_3 而降低的一个参数,其值可由下式确定:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg \frac{\sigma_3}{P_a} \quad (10)$$

式中 φ_0 为 $\frac{\sigma_3}{P_a} = 1$ 时的 φ 值。

3 计算结果及参数敏感性分析

运用上述数值模拟方法,在数值计算中模拟了大坝蓄水后无地震或遭遇 8 级地震的情况。这里只列出部分计算结果。

3.1 坝体位移

无地震时,除坝顶加筋区域外,大部分坝体水平位移变形规律一致,无明显差别。坝体最大水平位移均在 84cm 左右。有地震情况下加筋对坝体水平位移的影响与此大致相同。土工格栅仅在坝顶以下 28m 范围内加筋,其影响只限于坝顶堆石附近区域,计算结果是合理的。

3.2 坝顶堆石水平位移

如上所述,土工格栅加筋的影响仅限于坝顶堆石附近区域。无地震情况下,堆石最大水平位移减少 5.5%,地震力指向上游时,堆石最大水平位移减少 21.4%。格栅在增加坝顶堆石稳定性和抗震性方面能起到一定的作用,且有地震情况下格栅加筋的作用较之无地震情况下更加明显。

3.3 加筋层数的影响

分别对无地震情况下 13 层、7 层和 4 层土工格栅加筋情况进行了有限元模拟,并对结果进行了分析,以评估加筋层数对坝顶堆石稳定效果的影响,计算中假设土工格栅模量为 2GPa。其中,7

表 1 大坝主要土石料材料参数
Tab. 1 Parameters of main materials

名称	$\rho(g \cdot cm^{-3})$	$\varphi(^{\circ})$	R_f	K	n	G	F	D	K_w	$\Delta\varphi(^{\circ})$	$c(kPa)$
碎石土心墙	1.97	17	0.78	400	0.45	0.38	-0.08	2	800	0	30
反滤层	2.05	33	0.68	800	0.3	0.35	-0.14	3	1600	0	0
过渡层	2.1	50	0.7	1000	0.32	0.36	-0.02	3	2000	10	0
次堆石	2.15	50	0.72	900	0.42	0.32	0.02	4	1800	11	0
主堆石	2.25	49	0.7	990	0.35	0.3	0.03	3	1900	11	0
覆盖层④-1	1.4	38	0.75	860	0.28	0.3	0.02	5	1700	0	20
覆盖层③	1.42	39	0.65	1000	0.38	0.32	0.02	4	2000	0	0
覆盖层②	1.3	35	0.62	750	0.44	0.34	0.02	4	1500	0	0
覆盖层①	1.33	38	0.6	1050	0.4	0.33	0.03	5	2100	0	0

层格栅是只保留第1、3、5、7、9、11、13层格栅情况下加筋,4层格栅是保留1、5、9、13层格栅加筋。从图4可以看出,在无地震情况下,随着格栅加筋层数的增加,坝顶堆石加筋区域最大水平位移有所减小。通过增加加筋层数来增加堆石坝坝顶堆石稳定性是可行的。

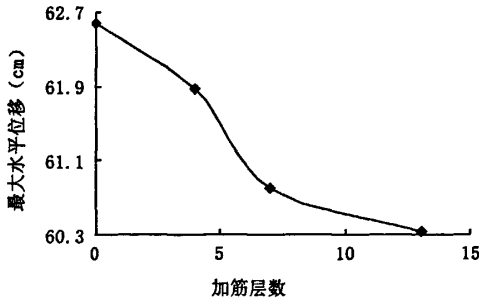


图4 格栅层数对坝顶堆石加筋区域水平位移的影响
Fig.4 The impact of layer number of geogrids on horizontal displacement of reinforced zone

3.4 格栅模量的影响

土工格栅主要靠其抗拉性能来发挥加筋作用,其弹性模量对加筋效果无疑有重要影响。计算中通过调整格栅模量来分析格栅模量对加筋的影响。限于篇幅,这里只比较无地震时不同格栅模量下坝顶堆石区域最大水平位移。如图5,随着格栅模量的增大,坝顶加筋区域最大水平位移呈减小趋势,无格栅加筋(0GPa)时水平位移较之加筋时明显增大。计算结果表明,格栅模量越大,加筋效果越明显。

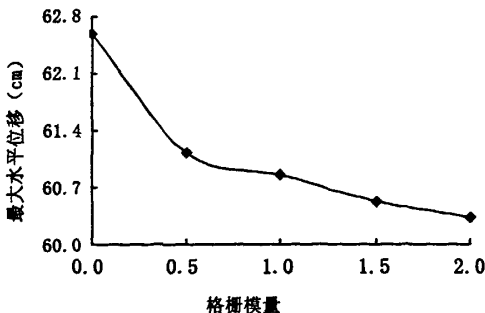


图5 格栅模量对坝顶堆石区域最大水平位移的影响
Fig.5 The impact of modulus of geogrids on maximum horizontal displacement of dam crest rockfill

5 结论

- 1) 土工格栅仅在坝顶以下28m范围内加筋,其影响只限于坝顶堆石加筋附近区域,对大部分坝体位移影响不大;
- 2) 与未加筋情况对比,加筋后,坝顶堆石区域水平位移有一定程度的减小,说明格栅加筋对增加坝顶堆石区域稳定性和抗震性能起到了一定的效果;
- 3) 格栅有一定的抗拉强度,在地震等外荷载作用下,它会发挥其抗拉性能;
- 4) 随加筋层数的增加,坝顶堆石加筋区域水平位移减小,说明加筋层数越多,加筋稳定效果愈显著;
- 5) 格栅模量对加筋效果有一定的影响。总体上,随着格栅模量的增加,加筋效果愈明显,坝顶堆石的稳定性和抗震性能得到提高。

参考文献:

- [1] 赵川. 塑料土工格栅加筋碎石土强度及其应力应变特性的试验研究[D]. 昆明: 云南工业大学, 1998.
- [2] GUIDO V A, DONG K G. Comparison of geogrid and geotextile reinforced earthslabs [J]. Canadian Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 23(1): 435 - 440.
- [3] 刘春, 赵洪波, 白世伟. 土工格栅在治理软土路基沉降问题中的研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1070 - 1073.
- [4] YETIMOGLU T, WU T H. Bearing capacity of rectangular footings on geogrid - reinforced sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, 120(12): 2083 - 2099.
- [5] 钱劲松, 凌建明, 黄琴龙. 土工格栅加筋路堤的三维有限元分析[J]. 同济大学学报, 2003, 31(12): 1421 - 1425.
- [6] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1970, 96 (SM5): 1629 - 1654.
- [7] 孙钧, 迟景魁. 新型土工材料与工程整治[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [8] 朱湘. 软土地基格栅加筋路堤结构性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2000.

(责任编辑 闫纯有)

土石坝加筋有限元数值模拟

作者: [王海涛](#), [WANG Hai-tao](#)
作者单位: [河北工程大学, 理学院, 河北, 邯郸, 056038](#)
刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2008, 25(3)
被引用次数: 1次

参考文献(8条)

1. [赵川](#) [塑料土工格栅加筋碎石土强度及其应力应变特性的试验研究](#) 1998
2. [GUIDO V A](#); [DONG K G](#) [Comparison of geogrid and geotextile reinforced earthslabs](#) 1986(01)
3. [刘春](#); [赵洪波](#); [白世伟](#) [土工格栅在治理软土路基沉降问题中的研究](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2003(06)
4. [YETIMOGLU T](#); [WU T H](#) [Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand](#) 1994(12)
5. [钱劲松](#); [凌建明](#); [黄琴龙](#) [土工格栅加筋路堤的三维有限元分析](#)[期刊论文]-[同济大学学报](#) 2003(12)
6. [DUNCAN J M](#); [CHANG C Y](#) [Nonlinear analysis of stress and strain in soils](#) 1970(SM5)
7. [孙钧](#); [迟景魁](#) [新型土工材料与工程整治](#) 1998
8. [朱湘](#) [软土地基格栅加筋路堤结构性能研究](#)[学位论文] 2000

本文读者也读过(10条)

1. [王绍德](#). [WANG Shao-de](#) [土工格栅在大型砂土围堰中的应用](#)[期刊论文]-[广东水利电力职业技术学院学报](#) 2006, 4(4)
2. [杨俊彪](#). [杜学玲](#). [丁军霞](#) [加筋土挡墙施工的改进措施](#)[期刊论文]-[铁道标准设计](#)2005(8)
3. [李忠](#). [赵芬](#). [LI Zhong](#). [ZHAO Fen](#) [软土地基土工格栅加筋效果的数值分析](#)[期刊论文]-[黑龙江大学工程学报](#) 2010, 37(3)
4. [吴兴中](#). [Wu Xingzhong](#) [上杭紫金山金矿新屋下拦渣坝设计](#)[期刊论文]-[亚热带水土保持](#)2005, 17(3)
5. [马家燕](#). [MA Jia-yan](#) [土工格栅应用于水工大坝初探](#)[期刊论文]-[四川水力发电](#)2007, 26(6)
6. [彭芳乐](#). [平川大贵](#). [龙冈文夫](#). [廖少明](#). [PENG Fang-le](#). [Hirakawa Diki](#). [TATSUOKA Fumio](#). [LIAO Shao-ming](#) [加筋砂土中土工格栅配置形状与刚性效果试验](#)[期刊论文]-[同济大学学报\(自然科学版\)](#) 2005, 33(5)
7. [冯志刚](#). [朱俊高](#) [土工格栅加筋堆石坝的数值模拟研究](#)[会议论文]-2006
8. [冯志刚](#). [朱俊高](#). [陈晓明](#). [FENG Zhi-gang](#). [ZHU Jun-gao](#). [CHEN Xiao-ming](#) [堆石坝加筋坝坡稳定性数值模拟研究](#)[期刊论文]-[防灾减灾工程学报](#)2008, 28(1)
9. [杜志军](#). [DU Zhi-jun](#) [面板堆石坝填筑施工参数的选择](#)[期刊论文]-[水科学与工程技术](#)2007(z1)
10. [苏国林](#) [加筋土挡墙设计与施工技术要点](#)[期刊论文]-[价值工程](#)2010, 29(9)

引证文献(1条)

1. [杨德生](#). [缪正华](#). [赵国臣](#) [复合材料加筋板剪切屈曲有限元分析](#)[期刊论文]-[黑龙江科技学院学报](#) 2009(4)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200803010.aspx