



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.03.025

曹伟, 刘云贺, 党康宁, 等. 进水塔塔背回填抗震设计优化研究与动态响应[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 151-157. CAO Wei, LIU Yunhe, DANG Kangning, et al. Seismic design optimization and dynamic response analysis of intake tower backfill[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 151-157. (in Chinese)

进水塔塔背回填抗震设计优化研究与动态响应

曹伟, 刘云贺, 党康宁, 郑晓东, 陶磊

(西安理工大学, 西安 710048)

摘要: 为分析塔背不同回填材料与不同回填厚度对进水塔动态响应的影响, 建立6种回填材料与4种回填厚度相互组合下的数值试验模型, 对进水塔进行动力分析。对比进水塔关键部位的应力与位移发现: 回填材料的不同对塔背与回填交界区域应力有一定影响, 石渣回填时, 此区域应力最大值有很大减小, 接触面应力分布状态也发生了变化; 回填厚度对塔顶位移的影响不大。根据数值试验的计算结果与分析规律, 合理使用石渣回填, 设计了一种新的回填型式。此型式下塔背与回填交界区域不在为集中应力发生的部位; 接触面最大应力大幅减小, 相同部位的应力值减小; 大应力区位置向下偏移, 且区域变大、变宽, 说明新回填型式改善了进水塔结构的应力状态, 对其安全很有利。将提出的回填方法应用于某泄洪洞进水塔结构中, 对比分析了新回填型式与原回填型式两种情况下此进水塔塔背与回填交界角点应力时程曲线、塔背与回填接触面应力云图与损伤云图。结果表明新回填型式下进水塔与回填接触面的动态响应得到了很大改善, 该方法对进水塔结构的抗震与安全具有重要意义, 可供类似工程借鉴。

关键词: 进水塔; 塔背回填; 动态响应; 回填优化; 时程分析

中图分类号: TV 732 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)03-0151-07

Seismic design optimization and dynamic response analysis of intake tower backfill

CAO Wei, LIU Yunhe, DANG Kangning, ZHENG Xiaodong, TAO Lei

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to analyze the effects of different backfill materials and different backfill thickness on the dynamic response of intake towers, we set up a numerical test model that combined 6 types of backfill materials and 4 types of backfill thickness, and conducted dynamic analysis of the intake tower. When the rock ballast was filled, the maximum stress of the area was greatly reduced, and the stress distribution of the contact surface was changed; the thickness of backfill had little influence on the displacement of the top of the tower. Based on the calculation results and analysis of the numerical test, a new type of backfill was designed with rational use of rock ballast backfill. For this type, the junction between the tower and the backfill was not in the position of the concentrated stress. The maximum stress of the contact surface was greatly reduced, and the stress value of the same area was reduced. The large stress area shifted downwards, and the area became larger and wider, indicating that the new type improved the stress state of the intake tower structure, and was beneficial to the safety of the intake tower. The proposed method was applied to the structure of a water intake tower in a flood discharging tunnel. Comparison was made between the new and original backfill types in terms of the stress time history curve of the junction between the intake tower back and backfill, as well as the stress nephogram and damage nephogram of the contact surface between the intake tower back and backfill. The results showed that the dynamic response of the contact surface between the intake tower and backfill was greatly improved by the new type of backfill. This backfill method is of great significance to earthquake resistance and safety of intake tower structures, and can be used as reference for similar projects.

Key words: intake tower; backfill; dynamic response; backfill optimization; time history analysis

收稿日期: 2016-06-22 修回日期: 2016-08-17 网络出版时间: 2017-05-07
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170507.0919.006.html>
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179154)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51179154)

作者简介: 曹伟(1990), 男, 陕西咸阳人, 主要从事水工结构抗震方面研究。E-mail: 15771919870@163.com

通讯作者: 刘云贺(1968), 男, 辽宁凌源人, 教授, 博士生导师, 主要从事结构抗震、防震减灾等方面研究。E-mail: liuyunhe1968@163.com

进水塔是引水、泄水系统的控制性水工建筑物,作为一种高耸建筑物,常常孤立在庫区中,只有塔背的下部与坝体或与边坡岩体接触,接触部位常采用开挖回填的型式进行处理。塔背与回填交界位置为结构突变部位,在地震作用下应力集中现象严重^[1,2],是塔体最容易先发生破坏的地方,所以寻求合理的塔背回填型式对提高进水塔抗震性能具有重要的研究意义。

目前国内学者对进水塔的抗震性能进行了相关讨论^[3-6],关于塔背回填与塔体动态响应相互影响也有相关研究。陈震等^[7]以波动理论为基础,分析地震荷载作用下塔背回填高度对进水塔动态响应的影响,提出了塔背回填高度存在一个合理值,其不仅可降低塔背地震荷载的放大效应,也能有效缓解局部区域的应力集中。孔科等^[8]详细分析了不同的塔背混凝土有效回填高度下结构的动力特性,总结了有效回填混凝土高度对进水口结构动静性能的影响趋势。李锋^[9]以某水电站的岸塔式进水塔为例,分析了回填混凝土对进水塔动态响应的影响,得到塔背回填混凝土将岸塔式进水塔和山岩连成一体,增加了塔体约束,提高了进水塔整体刚度,有效改善了塔体在地震情况下的拉应力幅值,对进水塔结构的抗震设计非常关键。

虽然进水塔塔背回填高度和型式方面的研究取得了一些成果,但是关于塔背回填材料不同与回填厚度不同对塔体影响方面的研究却极少,本文就进水塔塔背回填材料与回填厚度的不同对进水塔动态响应^[10-12]的影响展开研究。采用 6 种不同回填材料与 4 种不同回填厚度,通过对 24 种不同回填组合下进水塔关键部位的计算结果进行对比分析,得出不同回填材料与不同回填厚度对进水塔动态响应的影响规律。基于此规律,针对如何降低进水塔关键部位的动态响应,提出了一种新的回填型式,结果表明新回填型式下结构的动态应对结构安全更有利。最后根据上文的分析结果,将新回填型式应用到国内某泄洪洞进水塔结构,对新回填型式与原回填型式两种情况下进水塔结构进行非线性分析^[13-16],其对比分析结果支撑了本文数值试验所得到的规律,表明了新塔背回填型式对进水塔结构的意义。

1 数值试验

1.1 材料参数

进水塔试验模型塔体结构为钢筋混凝土结构,其力学参数为:弹性模量 $E=28.0\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.167$,重度 $\gamma=25\text{ kN/m}^3$,地基岩体力学参数见表

1。回填材料在试验模型中共采用了 6 种不同材料,如表 1 所示,其中地基岩体一栏表示此情况不采取回填,只对塔背与地基岩体的接缝进行灌浆处理。试验模型中的石渣回填与地基岩体采用 Drucker Prager 本构模型,其他材料都按弹性处理。塔体与地基、回填的接触都考虑为黏结。

表 1 试验进水塔塔背回填材料

Tab. 1 Back filling material for test intake tower

回填材料	弹性模量/GPa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)
C15 混凝土	22.0	0.167	24
C20 混凝土	25.5	0.167	24
C25 混凝土	28.0	0.167	24
C30 混凝土	30.0	0.167	24
地基岩体	8.0	0.2	25
石渣	内摩擦角	浮容重 /(kN·m ⁻³)	容重 /(kN·m ⁻³)
	30°(有地震)	12	22

1.2 试验模型

进水塔试验模型的塔高(Z 方向)为 93 m,顺水流方向(X 方向)长 20 m,垂直水流方向(Y 方向)宽 16 m,地基垂直方向取 1 倍的塔高,长度取 2 倍的塔高,宽度取塔宽的 1 倍。塔高 24 m 到塔高 48 m 的塔背进行回填处理,根据实际工程与研究需要,选取 4 种回填厚度,分别为 2 m、4 m、6 m、8 m。根据以上选取的尺寸,运用通用有限元分析软件建立塔体-地基-回填三维体系有限元试验模型,塔体-地基-回填体系试验模型简图见图 1。

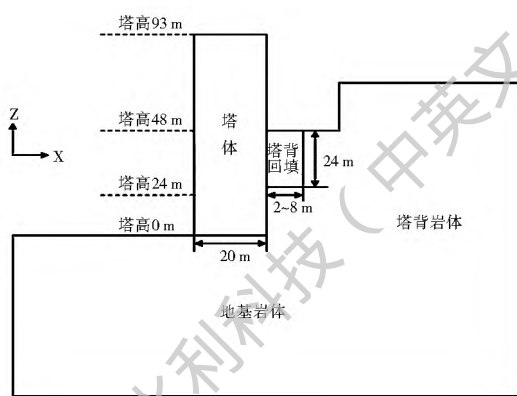


图 1 试验模型简图

Fig. 1 Diagram of experiment model

1.3 荷载施加

试验模型没有实际的工程荷载资料,所以只考虑结构自重、静水压力、扬压力、动水压力^[17]、地震荷载等基本荷载。地震波选取 EL Centro 波,并按设防烈度为 8 度,地震峰值加速度为 0.2 g 进行调

幅,地震荷载按顺水流向与横水流向施加在地基岩体上,为了消除地基质量对地震作用的放大作用,把地基考虑为无质量地基。

2 数值试验对比分析

根据以上建立的试验模型,施加的荷载,对4种回填厚度与6种回填材料组合的24种不同回填型式下的进水塔结构进行时程分析,对塔体最大位移和塔背与回填交界角部(塔高48 m处)X向最大主应力进行对比分析。

2.1 塔顶位移和塔背与回填物交界角部应力分析

计算结果表明:24种不同情况下,塔体的最大位移出现在塔顶,最大位移值见表2。塔背与回填交界角部是应力集中区,最容易发生破坏,表3列出了24种不同情况下此处X向最大主应力值,都为压应力。

表2 塔顶最大位移

Tab. 2 List of the maximum displacements at top of intake tower

回填厚度	石渣	无回填	C15	C20	C25	C30
2 m	87.2	78.6	76.6	76.2	76.0	75.8
4 m	93.3	78.6	76.1	75.6	75.5	75.4
6 m	98.2	78.6	75.8	75.2	75.1	75.0
8 m	98.9	78.6	75.6	75.0	74.9	74.9

表3 塔背与回填交界角部X向最大应力

Tab. 3 List of the X direction maximum stress at junction of the tower back and the back fill M Pa

回填厚度	石渣	无回填	C15	C20	C25	C30
2 m	5.06	8.76	11.83	12.17	12.37	12.51
4 m	4.42	8.76	12.24	12.53	12.70	12.82
6 m	4.33	8.76	12.34	12.61	12.76	12.87
8 m	4.29	8.76	12.34	12.62	12.78	12.87

由表2可以看出:进水塔结构塔背不采取任何回填时塔顶位移无变化;塔背采用混凝土回填时,回填混凝土的等级与回填厚度对塔顶位移影响很小,这主要因为不同的混凝土等级,其弹性模量相差不大,而且塔顶的位移不全由于塔背回填发生变形而引起,两者也没有线性关系;当采用石渣回填时,塔顶位移增大,增幅在15.0%~32.04%,石渣的回填厚度在6 m范围内越厚,塔顶位移越大,石渣回填厚度达到6 m后,回填厚度的增大不再对位移有太大影响,这主要是因为石渣松散,受到荷载作用后变形较大,回填厚度达到一定值后,石渣在一定作用下的变形足够释放塔顶需要达到的最大位移,所以石

渣回填达到一定厚度后,塔顶位移趋于稳定。

由表3可以看出:进水塔结构塔背不采取任何回填时塔背与回填交界角部最大应力无变化。石渣回填相比混凝土回填,塔背与回填交界角部最大应力值大幅减小,减幅在59.6%~66.7%,这主要是因为石渣比较松散,受力后在应力集中部位会有较大的变形,然后发生应变传递与应力重分布,所以采用石渣回填时,塔背与回填交界部位的应力集中现象会被极大地减弱;不同等级的混凝土回填对塔背与回填交界角部的应力影响不超过6%,影响程度比较小;塔背回填厚度对塔背与回填交界角部的应力也有一定的影响,混凝土回填时,2 m内应力最小,大于4 m后应力几乎无变化。石渣回填时,2 m内应力最大,大于4 m后应力变化。

2.2 规律性探讨

根据2.1节的计算结果与对比分析可以发现:塔背采用石渣回填相比采用混凝土回填塔顶位移增大,对结构不利,而且石渣回填的越厚塔顶位移越大;石渣回填会极大地消减塔背与回填交界角部的应力集中现象,对结构很有利。石渣回填对塔背与回填交界角部应力影响程度远大于其对塔顶位移影响程度,所以在塔顶位移允许范围内,石渣回填利大于弊。

根据以上的分析规律,在基本不改变混凝土回填对塔体约束^[9]的基础上,结合工程中常用C15混凝土进行回填,所以在前文4 m厚C15混凝土回填型式上,把此塔背回填的最上角部宽1 m、深4 m的三角形区域替换成石渣回填,得到了一种新的回填型式,见图2,对此进行相同的数值计算,并对比分析两种回填型式下塔体的动态响应。

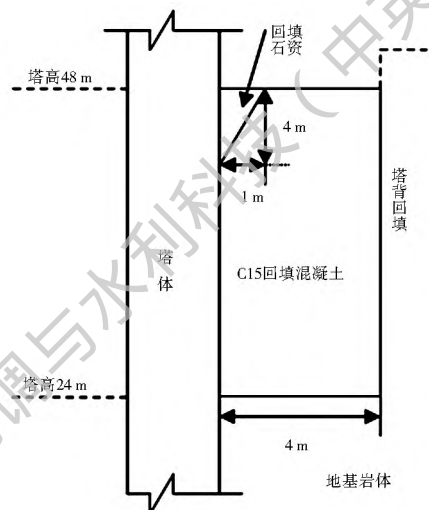


图2 图2新回填型式简图

Fig. 2 Diagram of A new way of backfill

2.3 新回填型式计算结果与对比分析

计算结果表明:新回填型式下,塔顶最大位移为 81.6 mm,相比表 2 中混凝土回填情况下塔顶位移增幅很小,相比石渣回填情况下塔顶位移减幅很小;塔背与回填交界角部最大应力为 5.76 MPa,相比石渣回填有所增大,增幅在 13.8%~34.3%之间,相比混凝土回填有大大地减小,减幅在 51.3%~55.2%之间。

两种情况下塔背接触面 X 向最大主应力时刻的应力云图见图 3(正为拉,负为压)。由图 3 可以看出,新回填型式下的塔背接触面应力云图相比 4 m 厚的 C15 混凝土回填下的塔背接触面应力云图,其最大应力减小了 54.2%,这降低了此处由于应力集中现象应力达到极限强度而发生破坏的可能;集中应力位置从塔背与回填交界角部下移到塔体、回填混凝土、回填石渣三者交线处,受到的约束增多;应力集中区域扩大,接触面应力分布平缓,这使得此区可以承受更大的力。

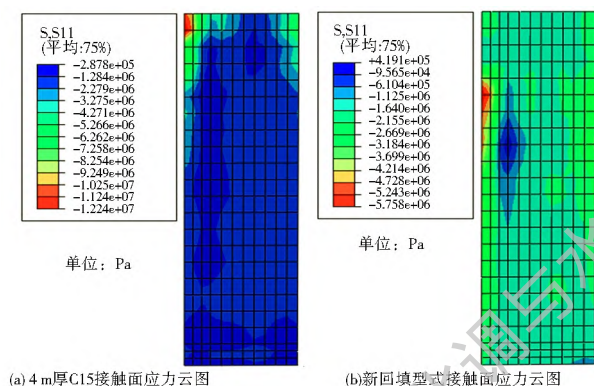


图 3 两种回填方式下塔背接触面应力

Fig.3 The stress nephogram of contact surface stress of tower back under two kinds of backfill

发生这些变化是因为:石渣相比混凝土比较松散,更易发生变形,所以在塔背与回填交界角部位置,塔体的位移得到一定的释放,角部约束作用减弱,应力减小,应变发生重分布,约束向下传递;角部的三角形石渣回填使塔体的变形从石渣回填的上部平稳的过度到下部,在变形形式上也顺应了塔体形变特点(塔体发生变形后,任何两点连线位移相对变化都大体是三角形),使角部承受较大作用力的面积增大,而且相对更均匀,这改变了角部极小区域承受作用力的状态,所以在某种程度上削弱或者消除了此处的应力集中现象;在往复地震作用下,石渣也起到了一定的缓冲作用。

新回填型式下塔体与回填接触面集中应力的大小、出现的位置与应力分布形态的变化表明:新回填型式对进水塔结构塔背受力很有利。

3 新塔背回填型式实例应用与数值计算分析

前文通过数值试验得到不同塔背回填材料和回填厚度对进水塔动态响应影响的一般规律后,提出一种新的回填型式,并对新回填型式下的试验模型进行了相同的数值计算,计算结果表明:新回填型式下进水塔塔背与回填交界角部应力值与接触面应力分布状态都得到很大的改善,对塔体的安全很有利。本节在前文研究成果的基础上,把这种新回填型式等比例应用到某水电站中的泄洪洞进水塔塔背回填中,对新旧两种回填型式下的进水塔结构进行非线性时程分析。

3.1 工程概况与有限元模型

某泄洪洞进水塔结构型式为岸塔式,主要建筑物为 1 级建筑物,塔底高程 2 640.0 m,塔顶高程 2 721.00 m,塔高 86 m,垂直水流方向宽 18.0 m,顺水流方向长度 15.0 m。泄洪洞进水塔塔座(2 663.00 高程以下)混凝土强度等级为 C30,塔筒(2 663.00 高程以上)混凝土强度等级为 C25,塔背从高程 2 660.00~3 680.00 m 采用强度等级为 C15 的混凝土进行回填。新塔背回填型式中的回填石渣力学参数见表 1。

塔体与塔背回填中的混凝土都采用弹塑性损伤模型,地基岩体与回填中的石渣采用 Drucker Prager 模型。其中混凝土的弹塑性损伤模型是根据《水工混凝土结构设计规范》^[18]给出的混凝土单轴应力—应变关系曲线与 Sidiroff^[19]能量等价原理得到损伤因子计算方法,然后结合混凝土单轴应力—应变关系曲线建立弹塑性损伤模型,最后运用 ABAQUS 中提供的混凝土损伤塑性材料模型去实现。塔体与地基、回填的接触都考虑为粘结。

依据塔体尺寸,取整个塔及塔前后、塔底 1 倍塔高范围内地基作为数值分析对象^[20,21],建立塔体—地基—回填体系三维有限元模型,见图 4。其中原塔背回填型式与改进后新的塔背回填型式见图 5。

3.2 荷载施加与动态响应分析

有限元模型根据工程实例给出的资料计入结构自重、上部永久设备重、静水压力、扬压力、浪压力、风压力、雪荷载、动水压力、地震荷载。其中动水压力采用附加质量法^[17,22],地基考虑为无质量地基,地震波采用 EL Centro 波,峰值加速度根据工程的抗震设防标准 100 年超越概率 2% 的地震动峰值取为 0.304 g,对塔体结构施加顺水流向、横水流向地震作用。

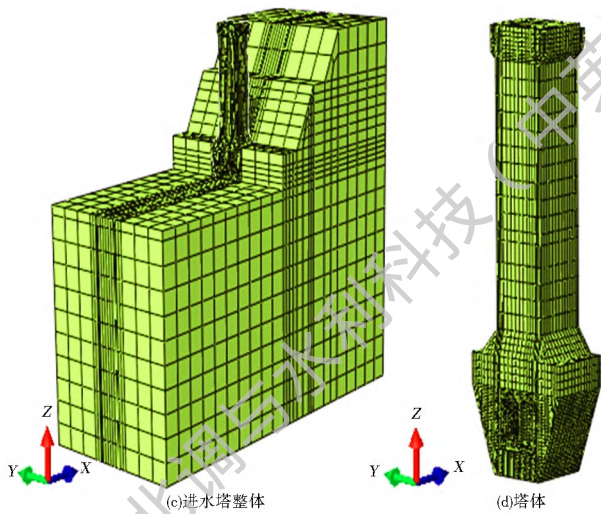


图4 进水塔整体与塔体有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the whole tower and the tower body

原塔背回填型式与新的塔背回填型式2种情况下塔背与回填交界角点X向主应力时程曲线见图6。塔体动态响应相对稳定后的两个极大值时刻

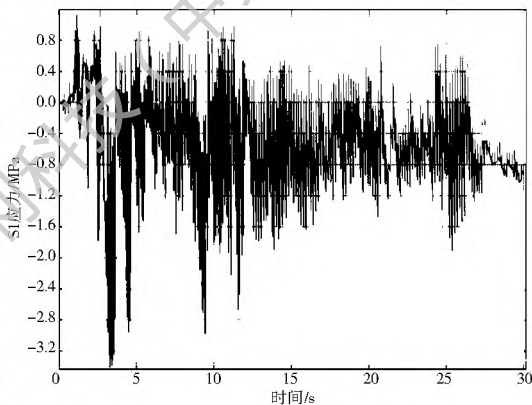
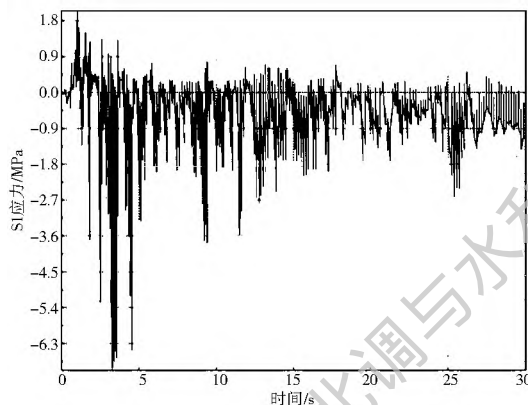


图6 两种回填型式下塔背与回填交界角点应力时程曲线

Fig. 6 The stress time history curves of the junction of tower back and backfill under two kinds of backfill

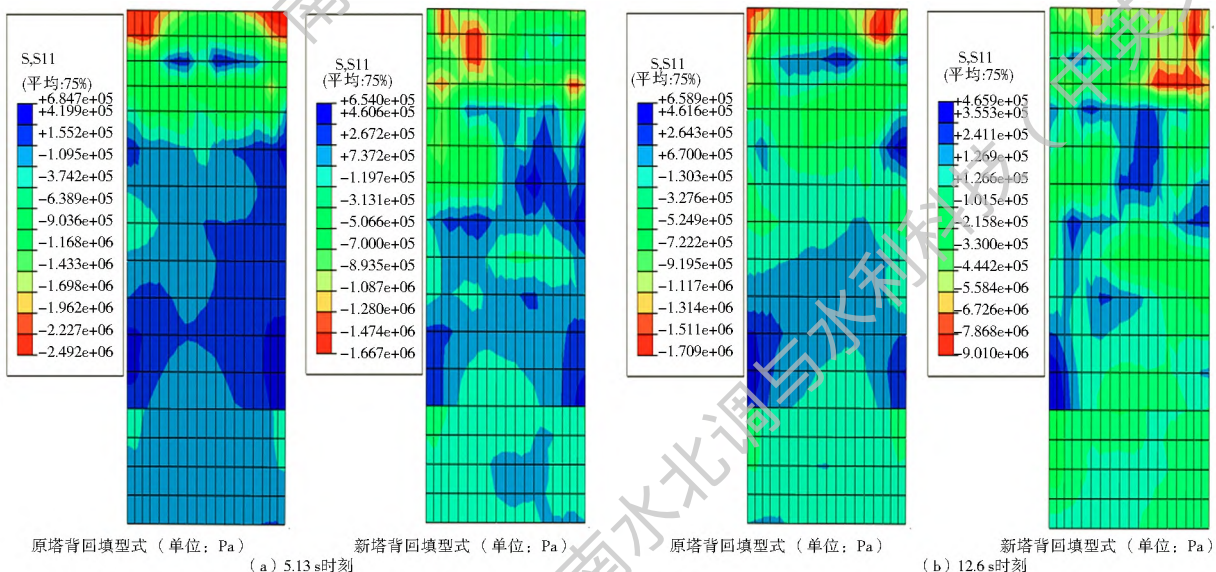


图7 两种回填型式下5.13s与12.6s时刻塔背与回填接触面应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of contact surface of tower back and backfill at 5.13 s and 12.6 s under two kinds of backfill

5.13 s与12.6 s塔背与回填接触面X向主应力云图见图7(正为拉,负为压),相应时刻塔背与回填接触部位损伤云图见图8。

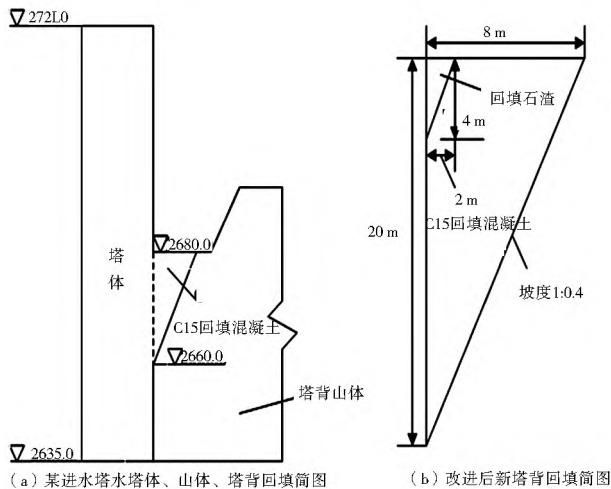


图5 进水塔塔背回填与改进后新回填型式简图

Fig. 5 Diagram of the original back filling and the improved back filling method of the intake tower

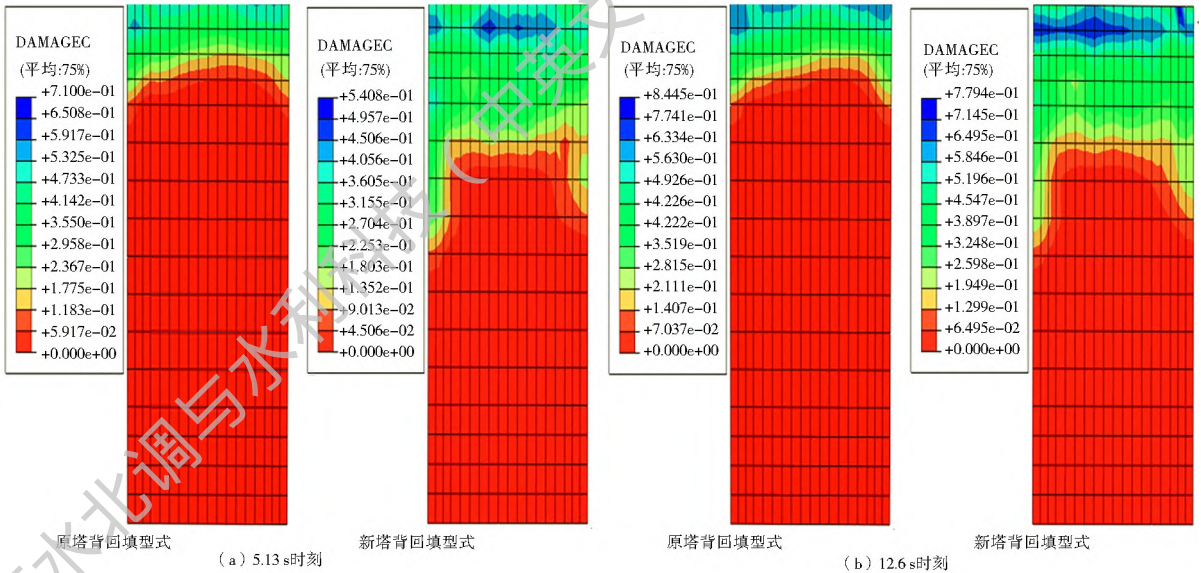


图 8 两种回填型式下 5.13 s 与 12.6 s 时刻塔背与回填接触面损伤云图

Fig. 8 Damage nephogram of contact surface of tower back and backfill at 5.13 s and 12.6 s under two kinds of backfill

由图 6 可知:新回填型式下进水塔塔背与回填交界角点的最大压应力与最大拉应力都减小为原回填的一半,而且新回填型式下此位置应力值变化较小,相对过度平坦,这主要是因为,塔背回填的上部改为松散的石渣后,对角部的反作用减小,此处需要发生的位移得到一定的释放,起到了一定的缓冲、消能作用,所以此处的应力集中现象被消减,应力变化平缓。

由图 7 可知:相比原塔背回填型式,新塔背回填型式下塔背与回填接触面最大拉应力值有小幅降低,最大压应力值有 30% 的降低,而且大应力分布区的区域减小,分布更分散、平缓,顶部角区域的应力集中位置向下偏移。由图 8 可知:新塔背回填型式下塔背与回填接触面的损伤最大值也有所减小,较大损伤部位由接触面顶部偏移到约束更强的下部,而且损伤区扩大,说明接触面的耗能区扩大。这是因为,塔背回填上部松散的石渣对角部约束较小,接触部位的应变与应力发生重分布,石渣回填下部的混凝土约束承担较大约束作用,石渣回填承担较小约束作用,且起到了缓冲作用。

4 结论

(1) 塔背采用混凝土回填时,回填混凝土等级与回填厚度的不同对塔顶位移影响很小;塔背采用石渣回填时,塔顶位移小幅增大,而且在一定回填厚度内,石渣回填地越厚塔顶位移越大。

(2) 石渣回填相比其他回填材料会极大地减弱塔背与回填交界部位的应力集中现象;回填的厚度对塔背与回填交界部位的应力有一定影响,但影响

不大。

(3) 石渣回填引起的塔背与回填交界部位应力的减小幅度远大于其引起的塔顶位移增大幅度,所以在一定程度上可以采取石渣回填。

(4) 合理的把塔背与回填上部交界部位的小范围回填混凝土替换成石渣后,塔背与回填交界角部位的最大应力值大幅减小、应力集中区下移;塔背与回填接触面的受力状态也发生改变,受力区变大、变散、过度平缓,这些变化极大地改善了塔背的受力状态,降低了此处塔体混凝土产生破坏的可能,增强了塔体结构的抗震性与安全性。

本文由数值试验得到的规律具有普遍的指导意义,提出的新回填型式使进水塔塔背与回填接触部位的动态响应得到很大改善,其对进水塔的安全与抗震性能有很大的实际意义,对类似工程具有适用性与参考价值。

参考文献(References):

- [1] 张亚敬,张燎军,陈立.汶川地震实测波作用下高耸进水塔结构损伤开裂分析[J].水电能源科学,2011,29(9):97-99. (ZHANG Ya-jing, ZHANG Liao-jun, CHEN Li. Cracking Analysis of high rise intake tower in Wenchuan Earthquake monitored wave[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2011, 29(9): 97-99. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2011.09.027
- [2] 李睿,李宁,任堂,等.高耸进水塔结构在地震作用下的动态响应分析[J].防灾减灾工程学报,2014,34(1):58-66. (LI Qian, LI Ning, REN Tang, et al. Dynamic response analysis of high intake tower structures under earthquake action[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(1): 58-66. (in Chinese))

- [3] 陈厚群,徐泽平,李敏.汶川大地震和大坝抗震安全[J].水利学报,2008,39(10):1158-1167.(CHEN Hourqun, XU Zeping, LI Min. Wenchuan Earthquake and seismic safety of large dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1158-1167. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2008.10.002
- [4] 张子艳,任旭华,乐成军,等.泸定水电站岸塔式进水塔结构动力响应分析[J].水力发电学报,2010,36(4):37-39.(ZHANG Ziyan, REN Xuhua, LE Chengjun, et al. Structure dynamic response analysis on bank intake tower of lading hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 36(4): 37-39. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2008.10.002
- [5] 程汉昆,赵宝友,马震岳.岸塔式进水塔结构的抗震与稳定性分析[J].水电能源科学,2011,29(11):94-96.(CHENG Hankun, ZHAO Baoyou, MA Zhenyue. Aseismic and stability analysis of intake tower in hydropower station[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 94-96. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7709.2011.11.026
- [6] 乐成军,任旭华,邵勇,等.水电站进水塔结构抗震设计研究[J].水力发电,2009,35(5):86-89.(LE Chengjun, REN Xuhua, SHAO Yong, et al. Aseismic design of intake tower in hydropower station[J]. Water Power, 2009, 35(5): 86-89. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2009.05.025
- [7] 陈震,何双华.基于波动理论的进水塔塔背回填高度仿真分析[J].水利水电技术,2012,43(2):35-37.(CHEN Zhen, HE Shuanghua. Wave motion theory based simulation analysis on height of backfill for rear of intake tower[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(2): 35-37. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2012.02.009
- [8] 孔科,冯桂山,范春竹,等.进水塔背回填高度对其静动力特性的影响[J].武汉大学学报:工学版,2011,44(2):192-196.(KONG Ke, FENG Guishan, FAN Chunzhu, et al. Effects of backfill height of intake tower back on its static and dynamic performances[J]. Engineering Journal Of Wuhan University, 2011, 44(2): 192-196. (in Chinese))
- [9] 李锋.塔背回填混凝土对进水塔地震响应的影响分析[J].西北水电,2015(1):85-87.(LI Feng. Analysis of impacts on earthquake response of intake tower by backfill concrete on tower back[J]. Northwest Water Power, 2015(1): 85-87. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2015.01.022
- [10] Ren X H, Zhang J X, Le C J, Liu A H. Seismic behavior analysis for intake tower of Luding Hydropower Station[J]. Earth and Space: Engineering, Science, Construction and Operations in Challenging Environments, ASCE, 2010, 2983-2991. DOI: 10.1061/41096(366)283
- [11] 彭翠玲,李声平,吴杰芳,等.水布垭水电站进水塔结构抗震分析与安全评估[J].长江科学院院报,2005,22(2):50-52.(PENG Cuiling, LIShengping, WU Jiefang, et al. Seismic analysis and security evaluation of intake tower structure in Shuibuya hydropower station[J]. Journal Of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(2): 50-52. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2005.02.014
- [12] 杨乐,王海军,赵典申.高耸岸塔式进水口结构动力特性仿真分析[J].水力发电,2011(5):25-28.(YANG Le, WANG Haijun, ZHAO Dianshen. Analysis on static and dynamic characteristics of bank intake tower[J]. Water Power, 2011(5): 25-28. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2011.05.009
- [13] 郭胜山,陈厚群,李德玉,等.重力坝与坝基体系地震损伤破坏分析[J].水利学报,2013(11):1352-1358.(GUO Shengshan, CHEN Hourqun, LI Deyu, et al. Seismic damage and failure analysis of gravity dam and foundation system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013(11): 1352-1358. (in Chinese))
- [14] 吴佐国,张燎军,叶尚芳,等.威远江水电站泄洪洞独立进水塔结构抗震分析[J].水力发电,2009,35(5):50-53.(WU Zuoguo, ZHANG Liaojun, YE Shangfang, et al. Structure aseismic analysis of independent intake tower of spillway tunnel of Weiyuanjiang hydropower station[J]. Water Power, 2010, 36(4). (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2009.05.023
- [15] 陈震,徐远杰.基于波动理论的高进水塔非线性有限元分析[J].土木工程学报,2010(S1):560-566.(CHEN Zhen, XU Yuanjie. Nonlinear finite element analysis of high intake tower based on wave motion theories[J]. China Civil Engineering Journal, 2010(S1): 560-566. (in Chinese))
- [16] (美)R.克拉夫, J.彭津.结构动力学[M].北京:高等教育出版社,2006.(R. W. Clough and J. Penzien, Dynamics of structures [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese))
- [17] NB 35047-2015.水电工程水工建筑物抗震设计规范[S].(NB 35047-2015. Code for seismic design of hydraulic structures of hydropower project[S]. (in Chinese))
- [18] SL191/T-96.水工混凝土结构设计规范[S].(SL191/T-96 Design specification for hydraulic concrete structures[S]. (in Chinese))
- [19] Sidiroff F. Description of anisotropic damage application to elasticity[J]. Physical Nonlinearities in Structures, 1981, 237-244 DOI: 10.1007/978-3-642-81582-9_35
- [20] SL285-2003.水利水电工程进水口设计规范[S].(SL285-2003 Design specification for intake of hydraulic and hydroelectric engineering[S]. (in Chinese))
- [21] 刘晶波,谷音,李彬.结构-地基开放系统动力相互作用问题的高效解法[J].土木工程学报,2006,39(5):112-116.(LIU Jingbo, GU Yin, LI Bin. An efficient method for the dynamic interaction of open structure foundation systems[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 112-116. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2006.05.018
- [22] 黄虎,李异,张建伟.基于流固耦合的高耸进水塔塔水压力分布研究[J].水力发电,2012,38(6):30-33.(HUANG Hu, LI Yi, ZHANG Jianwei. Study on hydrodynamic pressure distribution of high intake tower based on fluid-structure interaction[J]. Water Power, 2012, 38(6): 30-33. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2012.06.009