



强震区高进水塔 损伤机理模拟 与体型优化研究

陈震 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

强震区高进水塔损伤机理模拟 与体型优化研究

陈震 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

高进水塔的损伤机理和体型优化是水工结构设计的重要内容,本书通过对拦污栅框架布置形式与塔体连接形式、塔体垂直向变截面体型、塔体合理底板厚度进行比选,得到更为合理的高进水塔体型特征。通过研究地震激励方向与基岩材料非线性影响、基岩开挖及塔背回填与塔背相互作用影响以及基岩劣化对整体失稳影响,探讨高进水塔在强震作用下的损伤机理。本书对高进水塔的抗震设计有一定的参考意义,并可为我国在建和拟建高进水塔的破坏分析、安全评价等提供理论基础。

图书在版编目(CIP)数据

强震区高进水塔损伤机理模拟与体型优化研究 / 陈震著. — 北京:中国水利水电出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5170-4008-8

I. ①强… II. ①陈… III. ①进水塔—抗震结构—研究 IV. ①TV671

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第322410号

书 名	强震区高进水塔损伤机理模拟与体型优化研究
作 者	陈 震 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.25印张 206千字
版 次	2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

在水利水电工程中，为达到发电、供水、泄洪、排沙等综合利用的目的，往往需要在水位落差很大的天然河道、湖泊、人工水库或调节池的供水和泄水系统的首部设置进水塔。进水塔既可充当泄洪、排沙的泄水建筑物，也可用作供水、灌溉和发电的引水建筑物，它是一种重要的独立于坝体和岸边之外的塔形水工建筑物，也是泄水和引水系统中的首部建筑物和咽喉性工程。因此，进水塔与水利水电工程中的其他建筑物同等重要，进水塔设计得好坏，不仅关系到其本身功能的发挥，还涉及整个引水系统的运行。

本书研究的进水塔为岸塔式结构，与其他水工建筑物相比，岸塔式进水塔有其自身的特点，其高度一般较大，为高耸的塔式结构。强震作用下高进水塔的抗震性能不仅关系到水电站正常运行，甚至关系到整个大坝与枢纽的安危。我国西南地区部分进水塔设计地震烈度高达9度，因此必须深入开展高进水塔这类高耸水工建筑物的抗震研究。应用合理可靠的抗震设计理论和分析方法，研究高进水塔在强震作用下的损伤机理及进水塔结构与基岩的动力相互作用，通过试验校核数值模拟方法的精确性，对新建进水塔进行严谨设计，对已建进水塔进行合理的抗震安全性能评估，确保其在地震时的安全运行。

重力坝和面板堆石坝等水工建筑物一般都是一侧承受水压力，另一侧临空，完全靠自重维持稳定。岸塔式进水塔与其不同，塔正面承受水压力荷载，塔背则依靠在岸坡岩体上，即岸塔式进水塔是镶嵌在L形地基上的建筑物，因此可将顺水流向作用的荷载传递给水平地基和塔背岸坡。与仅靠自重维持稳定的大坝相比，岸塔式进水塔依靠自重和塔背岸坡岩体共同维持稳定，因此其一般不会存在大坝等水工建筑物沿水平建基面滑动或绕坝趾倾覆的破坏，只要岸塔式进水塔基底应力在岩体的允许应力范围之内，塔体就不致发生整体失稳。因此最关心的就是岸塔式进水塔的结构抗震性能。

采用有限元计算对高进水塔强震作用下的损伤机理和抗震性能进行数值模拟。由数值仿真结果分析拦污栅框架、流道周边、建基面基岩、塔背回填部位等关键位置的破坏形式，获得在强地震激励下高进水塔渐进破坏过程，建立高进水塔结构整体性能的劣化程度评价方法。通过比选手段寻求进水塔

结构合理抗震体型，提出进水塔结构合理体型判别准则。本书研究重点在于通过模拟高进水塔结构破坏的演化过程及机理分析，对塔背回填高度、塔体底板厚度、塔体垂直向变截面体型及拦污栅布置形式进行优化设计，研究成果可为我国在建和拟建高进水塔的破坏分析、安全评价和抗震设计等提供理论基础。

华北水利水电大学 陈震

2015年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 研究内容	2
第 2 章 拦污栅框架布置形式与塔体连接形式比选研究	4
2.1 研究模型	4
2.2 自振特性比较	4
2.3 位移成果与分析	5
2.3.1 塔体顶部位移	5
2.3.2 塔体底板位移	9
2.3.3 拦污栅框架位移	10
2.4 应力成果与分析	14
2.4.1 塔背混凝土应力	14
2.4.2 门井槽周边混凝土应力	19
2.4.3 通气孔周边混凝土	19
2.4.4 喇叭口上唇	19
2.4.5 底板混凝土	20
2.4.6 建基面基岩	21
2.4.7 拦污栅框架混凝土	22
2.5 小结	28
第 3 章 塔体垂直向变截面体型研究	29
3.1 研究模型	29
3.2 自振特性比较	29
3.2.1 施工期动力特性	29
3.2.2 运行期动力特性	33
3.3 位移成果与分析	36
3.3.1 塔体顶部位移	37
3.3.2 塔体底板位移	40
3.3.3 拦污栅框架位移	40
3.4 应力成果与分析	46
3.4.1 塔背混凝土应力	46

3.4.2	门井槽周边混凝土应力	46
3.4.3	通气孔周边混凝土	51
3.4.4	喇叭口上唇	51
3.4.5	底板混凝土	52
3.4.6	建基面基岩	53
3.4.7	拦污栅框架混凝土	54
3.5	小结	59
第4章	合理底板厚度比选研究	60
4.1	研究模型	60
4.2	自振特性比较	61
4.3	位移成果与分析	61
4.3.1	塔体顶部位移	62
4.3.2	塔体底板位移	63
4.4	应力成果与分析	65
4.4.1	塔背混凝土应力	65
4.4.2	底板混凝土	65
4.4.3	建基面基岩	71
4.5	小结	73
第5章	地震激励方向与基岩材料非线性影响研究	75
5.1	岩体材料非线性本构模型	75
5.1.1	Mohr-Coulumb 屈服准则	75
5.1.2	Drucker-Prager 屈服准则	76
5.1.3	Drucker-Prager 系列屈服准则	77
5.2	位移成果与分析	79
5.2.1	塔体顶部位移	80
5.2.2	塔体底板位移	80
5.3	应力成果与分析	82
5.3.1	塔背混凝土应力	82
5.3.2	底板混凝土	85
5.3.3	建基面基岩	86
5.4	时程分析	88
5.4.1	基岩应力应变比较	88
5.4.2	塔背混凝土应力比较	90
5.5	小结	90
第6章	基岩开挖及塔背回填与塔背相互作用影响研究	92
6.1	研究模型	92
6.2	基岩开挖自振特性比较	92

6.3	基岩开挖位移成果与分析	93
6.3.1	塔体顶部位移	93
6.3.2	塔体底板位移	95
6.3.3	拦污栅框架位移	95
6.4	基岩开挖应力成果与分析	98
6.4.1	塔背混凝土应力	98
6.4.2	门井槽周边混凝土应力	101
6.4.3	通气孔周边混凝土	101
6.4.4	喇叭口上唇	101
6.4.5	底板混凝土	101
6.4.6	建基面基岩	102
6.4.7	拦污栅框架混凝土	103
6.5	塔背回填高度位移、应力成果分析	105
6.6	小结	106
第7章	基岩劣化对整体失稳影响研究	107
7.1	研究模型	107
7.2	塔背基岩塑性应变分析	108
7.3	塔背基岩应力分析	109
7.4	建基面基岩塑性应变分析	111
7.5	建基面塔背基岩应力分析	114
7.6	小结	116
第8章	结论	117
参考文献		119

第 1 章 绪 论

1.1 研究意义

地震是极其频繁的,全球每年发生地震约 550 万次。我国位于世界两大地震活动带之间,是一个多地震的国家。据历史记载,几乎中国的各省都曾发生过破坏性地震。20 世纪以来,中国共发生 6 级以上地震近 800 次,死于地震的人数达 55 万之多,占同期全球地震死亡人数的 53%,其中有 3 次震级为 8.5 级以上的巨大地震,中国占世界 7% 的土地却承受了全球 33% 的大陆强震,是世界上地震灾害最为严重的国家。

1976 年 7 月 28 日 3 时 42 分,河北省唐山市发生震级为 7.8 级的大地震。死亡 24.2 万人,重伤 16 万人,一座重工业城市毁于一旦,直接经济损失达 100 亿元以上,为 20 世纪世界上人员伤亡最大的地震。2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分,四川汶川县(东经 103.4°,北纬 31°,发生震级为 8.0 级地震。死亡及失踪人数近 9 万人,直接严重受灾地区达 10 万 km^2 ,经济损失已经超过 8000 亿元,是 1949 年以来影响最大的一次地震。

我国也是一个水力资源十分丰富的国家。2005 年水力资源复查结果表明,我国水力资源的理论蕴藏年发电量 6.08 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,可开发装机容量 5.41 亿 kW ,年发电量 2.47 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。截至 2009 年我国已开发装机容量达 1.72 亿 kW ,年发电量 0.56 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,在建规模约 0.7 亿 kW ,均居世界首位。但同时我国水力资源开发利用程度还比较低,远低于工业发达国家开发水平。截至 2008 年年底,我国技术可开发水力资源利用率为 26%,而美国为 67.4%,法国为 96.9%,加拿大为 38.6%,日本为 66.6%。我国水力资源的分布以及地区间开发差异也很大,东部地区经济发达,用电负荷大,但水力资源贫乏。西部地区水力资源丰富,其中四川、西藏、云南三省的技术可开发装机容量就占全国总装机容量的 61%。但西部地区经济欠发达,水力资源的开发利用率也很低,远远低于世界平均水平,西部地区仍蕴藏着丰富的水力资源等待开发利用。因此西部水力资源开发除了满足西部电力市场自身需求以外,还要考虑东部市场,实现水电的“西电东送”。

我国西南强地震高发区域正规划、设计或开工建设一批高坝大库型水电工程项目。西南、西北地区水力资源丰富且多高山峡谷,非常适宜于修建高坝大库。但同时这两个地区也正是我国地震频度极高的高地震烈度区,有史以来在我国发生的 7 级以上的强震,近 70% 发生在这一地区,其震害后果都极其严重。汶川大地震让西南地区水工建筑物的抗震设计及其可能导致的次生灾害更加引人关注。进水塔是发电引水和泄洪系统中的咽喉性水工建筑物,强震区高进水塔的抗震性能不仅关系到水电站正常运行,甚至波及整个大坝与枢纽的安危,是保障电站效益的关键性建筑物。小湾电站进水塔采用岸塔式布置,呈“一”字形排列,进水塔平面尺寸为 $146\text{m} \times 32\text{m}$ (长 $\times$ 宽),最大高度 111.5m;小浪底进

水塔群呈“一”字形集中布置,前缘宽度 276.4m,高 113m,是世界上最大、结构最复杂的进水建筑物;拉西瓦水电站进水塔高度达到 115m。我国西南地区部分进水塔设计地震烈度高达 9 度,在这样的高烈度区修建高耸水工建筑物,必须深入开展高进水塔的抗震研究,应用合理、可靠的抗震设计理论和分析方法,对新建进水塔进行严谨设计,对已建进水塔进行合理的抗震安全性评估,确保其在地震时的安全运行。

进水塔是发电引水和泄洪系统中的咽喉性水工建筑物。强震区高进水塔的结构性能与安全关系到电站正常运行,甚至关系到整个大坝与枢纽的安危,也是保障电站效益的关键性建筑物。目前,我国西南强地震高发区域正规划、设计或开工建设一批高坝大库型水电工程项目,研究强地震激励作用下高进水塔的力学行为和结构性能、选择合理高效的数值分析方法、建立结构安全评价准则已经成为这类水工建筑物设计中至关重要的技术。

进水塔在引水、泄洪系统的投资中占据相当大的一部分,在确保结构安全的前提下确定合理的体型结构,对有效降低建设费用、控制电站的投资成本具有重大的经济价值。

为此本书深入研究强震区、100m 级岸塔式高进水塔抗震设计关键技术,为类似工程积累实践经验,推进我国水工结构抗震设计技术的发展。

1.2 研究内容

1. 拦污栅框架布置形式与塔体连接形式比选研究

拦污栅框架一般由栅墩、水平横纵撑、胸墙和盖板等构件组成空间体系,其空间布置、组成方式与塔体连接形式直接影响进水塔结构整体抗震性能。同时,栅墩与水平横纵撑构件尺寸与刚度相对较小,也是地震激励下高拉应力发生部位与关键性构件。本研究采用栅墩+水平横纵撑、栅墩+水平横纵撑+胸墙、栅墩+水平横纵撑+单层盖板、栅墩+水平横纵撑+多层盖板、栅墩+水平横纵撑+多层盖板+胸墙等不同形式的计算模型,通过拦污栅框架结构及塔体的动力响应比较,获得合理的拦污栅框架布置形式与塔体连接形式,为选择合理进水塔拦污栅框架结构形式提供依据。

2. 塔体垂直向变截面体型研究

目前塔体多为垂直向等截面体型居多,通过变截面模型的动力响应比较,对比分析等、变截面设计的相对合理与优、缺点,探讨高进水塔垂直向变截面体型的选用准则。

3. 合理底板厚度比选研究

通过不同厚度底板计算模型的结果比较,探讨高进水塔合理底板厚度的选择原则及与基岩的相对刚度比的关系。

4. 地震激励方向与基岩材料非线性影响研究

通过基础与塔背周围岩体材料非线性及参数敏感性分析,研究在地震作用下进水塔结构应力变形的相互作用与影响,重点研究不同地震激励方向与地基非线性发展程度对塔体基础、塔背接触面的约束行为的影响以及与线性模型的差别。

5. 基岩开挖及塔背回填与塔背相互作用影响研究

通过模拟不同基岩开挖位置,选择合理开挖深度,探讨高进水塔合理开挖深度的选择原则及设计依据。通过不同回填高度的敏感性分析,获得合理的相对回填高度,为选择合

理回填方案提供理论支持，并与常规计算理论比较。

6. 基岩劣化对整体失稳影响研究

通过基岩参数劣化数值模拟，研究对进水塔结构整体失稳的影响。建立塔底板建基面不均匀沉降、塔顶变形、位移、加速度放大系数和闸门槽等关键部位永久变形控制条件。建立允许出现拉应力部位与范围控制条件，以及局部构件损坏后对整体性能的劣化程度评价方法。基于有限元方法建立进水塔不发生整体倾覆的判别条件，并与规范推荐方法比较。根据有限元计算结果，探讨拦污栅框架构件在强震激励条件下不产生混凝土构件坍塌失效的延性钢筋混凝土结构配筋计算方法。

第 2 章 拦污栅框架布置形式与塔体连接形式比选研究

以某水电站进水塔为依托，在 3 个方向地震作用下，纵撑在顺河向的拉应力为结构应力峰值区域集中位置，且应力超过混凝土抗拉强度标准值范围贯穿所有纵撑，是结构最危险的部位。本章通过将纵撑改良为盖板，分别考虑 4 种模型。

2.1 研究模型

进水塔结构共包含 8 行纵撑，通过沿塔底向上将纵撑改为盖板来比较纵撑和盖板的应力分布规律，盖板数量分别为 1、2、3 和 8，分别对应模型 GB-1、GB-2、GB-3 和 GB-4，其说明见表 2-1。模型图例可以参考拦污栅框架的位移云图和应力云图。

表 2-1 计算模型说明			
模型	沿塔底向上施加盖板数量	模型	沿塔底向上施加盖板数量
GB-1	1	GB-3	3
GB-2	2	GB-4	8

2.2 自振特性比较

运行期考虑自重并施加 3 个方向地震作用，计算得到结构前 20 阶自振频率和相应振型，见表 2-2。

表 2-2 运行期（混凝土弹模提高 30%）结构前 20 阶自振频率和振型				
模型 阶数	GB-1	GB-2	GB-3	GB-4
1	2.9163	3.0909	3.0920	3.0846
2	3.6171	3.6341	3.6429	3.6270
3	5.8716	6.2525	6.2651	6.2732
4	7.2426	8.7105	8.7896	8.8146
5	9.0858	9.1877	9.2128	9.1921
6	9.1049	10.566	10.616	10.669
7	9.4640	11.787	12.203	12.697
8	9.6048	12.065	12.417	12.817

续表

阶数 \ 模型	GB-1	GB-2	GB-3	GB-4
9	9.8172	12.856	12.909	13.471
10	10.900	12.865	13.314	14.123
11	10.980	13.726	13.832	14.996
12	11.123	14.033	14.563	15.362
13	11.439	14.686	14.955	15.553
14	11.912	14.924	15.204	15.917
15	11.938	15.115	15.414	16.245
16	12.573	15.564	15.765	16.636
17	12.689	15.880	15.962	16.804
18	13.232	16.511	16.559	16.911
19	13.998	16.541	16.686	17.475
20	14.238	16.878	17.166	17.577

由表 2-2 可以看出，上游基岩的开挖对进水塔结构的自振特性影响较小，由于盖板相对于纵撑刚度更大，提高了拦污栅框架的刚度。各阶自振频率随着盖板不断增多也有所增加，增加最大值为 20%，出现在高阶振型中，因为高阶振型主要是拦污栅框架的振动。

2.3 位移成果与分析

为了便于成果分析与比较，各模型计算成果均按照进水塔混凝土结构各部位整理位移计算成果。约定位移值为“+”，表明该结构部位的位移与相应的坐标轴正向一致，位移值为“-”表示沿各坐标轴负向一致。如果没有特别说明，计算结果均为沿整体坐标的位移值；对计算结果整理为局部坐标系，则将有特别说明，且约定高程、沿坝轴线尺寸一律以 m 计，位移矢量、位移分量和变形值一律以 mm 计。

2.3.1 塔体顶部位移

各计算模型下塔体顶部（1699.00m 高程）顺河向水平位移 U_x 、竖向位移 U_y 和横河向水平位移 U_z 峰值、最大不均匀变形值见表 2-3~表 2-5，各模型下进水塔整体结构位移见图 2-1~图 2-3。

表 2-3 塔体顶部顺河向水平位移 U_x 峰值表 单位：mm

模型	节点号	桩号 X	高程 Y	横河向 Z	峰值 (max/min)	最大不均匀变形值
GB-1	156924	0.00	1699.00	12.10	13.90	0.29
	72288	-23.95		-16.90	13.61	
GB-2	156924	0.00	1699.00	12.10	12.58	0.26
	72288	-23.95		-16.90	12.32	

续表

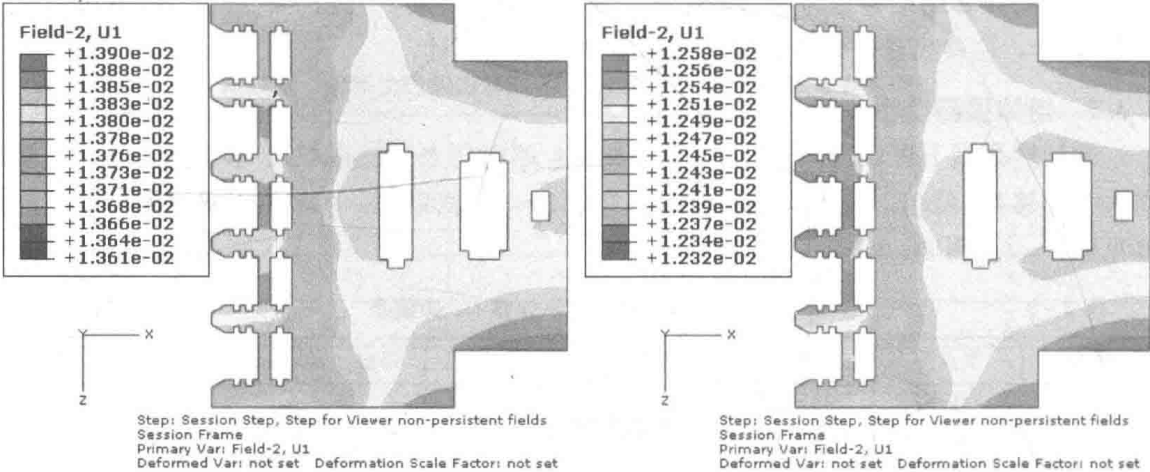
模型	节点号	桩号 X	高程 Y	横河向 Z	峰值 (max/min)	最大不均匀变形值
GB-3	156924	0.00	1699.00	12.10	12.58	0.26
	72288	-23.95		-16.90	12.32	
GB-4	156924	0.00	1699.00	12.10	12.63	0.24
	39412	-23.95		16.90	12.39	

表 2-4 塔体顶部竖向位移 U_y 峰值表 单位: mm

模型	节点号	桩号 X	高程 Y	横河向 Z	峰值 (max/min)	最大不均匀变形值
GB-1	156922	0.00	1699.00	12.10	1.18	3.81
	240043	-11.00		0.00	-2.63	
GB-2	156922	0.00	1699.00	12.10	0.87	3.43
	240043	-11.00		0.00	-2.56	
GB-3	156922	0.00	1699.00	12.10	0.90	3.45
	240043	-11.00		0.00	-2.55	
GB-4	156922	0.00	1699.00	12.10	0.98	3.51
	240043	-11.00		0.00	-2.53	

表 2-5 塔体顶部横河向水平位移 U_z 峰值表 单位: mm

模型	节点号	桩号 X	高程 Y	横河向 Z	峰值 (max/min)	最大不均匀变形值
GB-1	39422	-19.80	1699.00	16.90	12.83	4.78
	118681	0.00		0.00	8.05	
GB-2	39422	-19.80	1699.00	16.90	12.86	4.59
	118681	0.00		0.00	8.27	
GB-3	39422	-19.80	1699.00	16.90	12.79	4.50
	118681	0.00		0.00	8.29	
GB-4	39422	-19.80	1699.00	16.90	12.66	4.35
	118681	0.00		0.00	8.31	



(a)模型 GB-1 顺河向水平位移 U_x (b)模型 GB-2 顺河向水平位移 U_x

图 2-1 (一) 进水塔塔顶顺河向水平位移 U_x 分布 (单位: m)

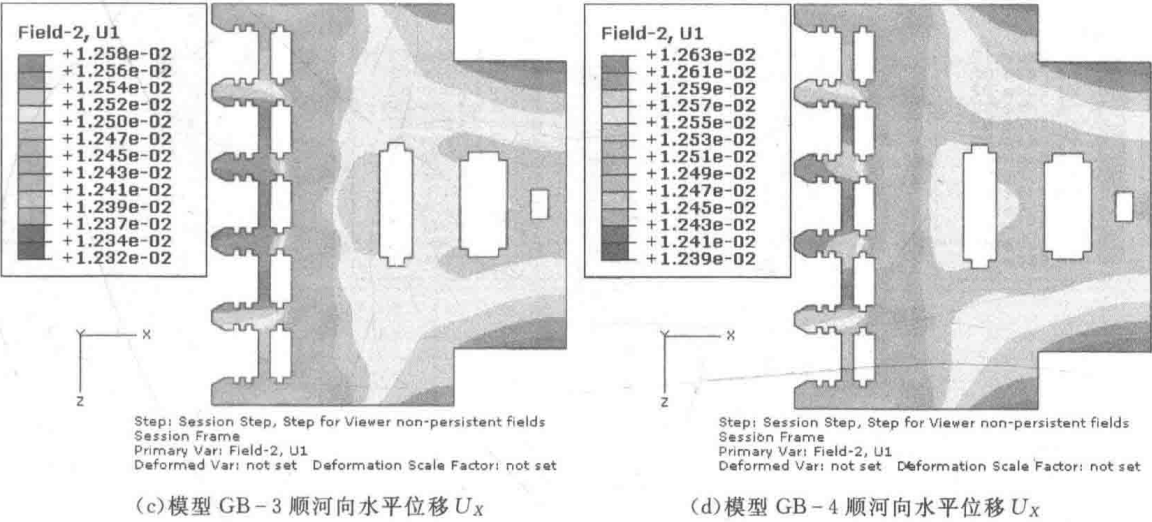


图 2-1 (二) 进水塔塔顶顺河向水平位移 U_x 分布 (单位: m)

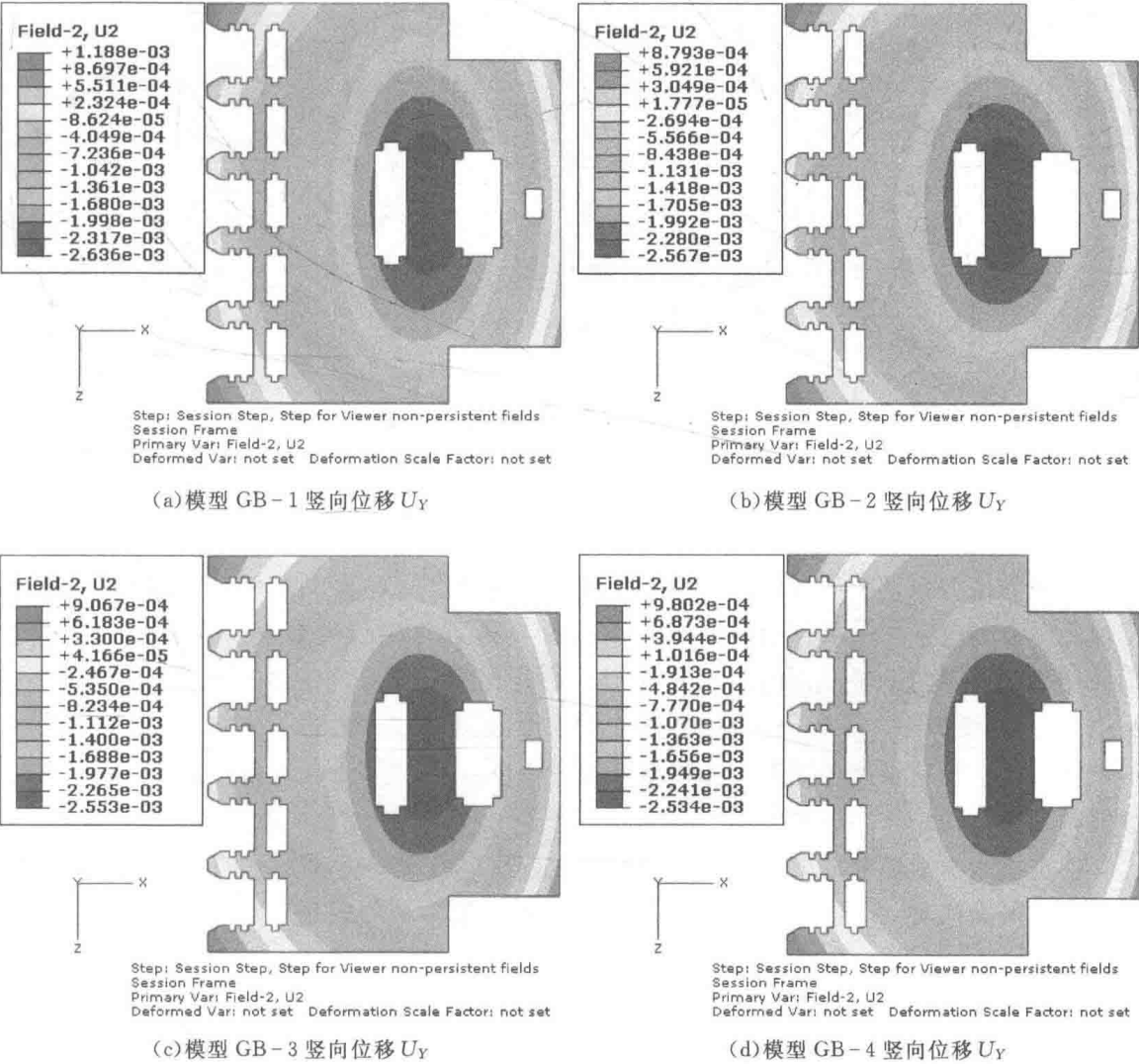
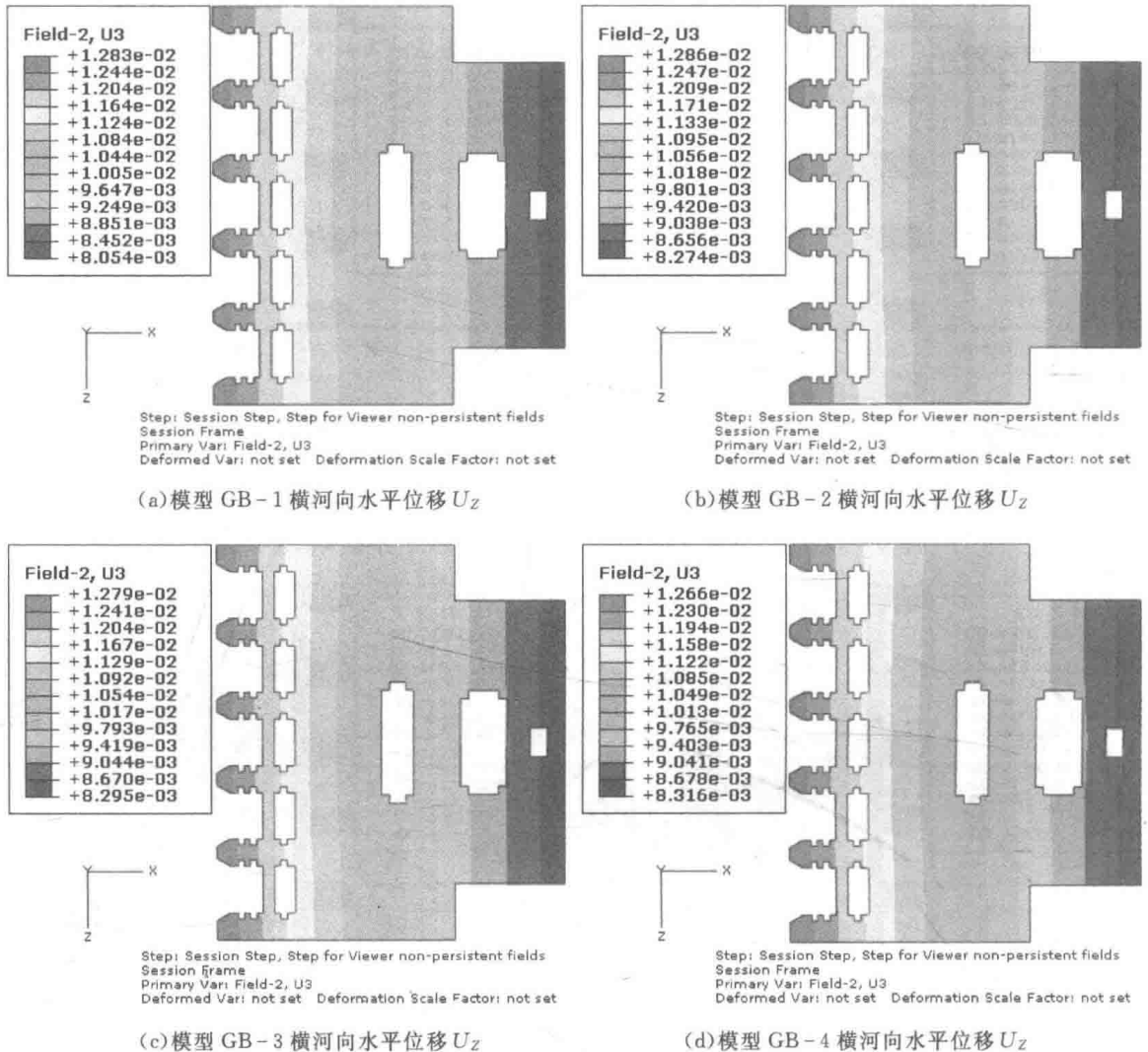


图 2-2 进水塔塔顶竖向位移 U_y 分布 (单位: m)


图 2-3 进水塔塔顶横河向水平位移 U_z 分布 (单位: m)

在静力模型中,由于结构自重和水荷载作用塔顶出现向上游的位移,流道附近混凝土出现向下游的位移,但最大值均不超过 3mm。在地震作用的模型中,由于顺河向地震激励的作用,塔顶向下游偏移的值显著增大,在模型 GB-1 中,达到最大值 13.90mm (表 2-3)。其他模型中,位移值均在 12mm 左右,各模型位移差别较小。

在塔体结构自重的作用下,各模型塔顶竖向位移 U_y 在 3mm 左右 (表 2-4),相对于顺河向和横河向位移幅值较小。

由于横河向地震激励的作用,塔顶横河向位移与顺河向位移大小相当,在模型 GB-1 中,达到最大值 12.83mm (表 2-5)。塔顶横河向位移不均匀变形值也在模型 GB-1 达到最大,为 4.78mm (表 2-5)。

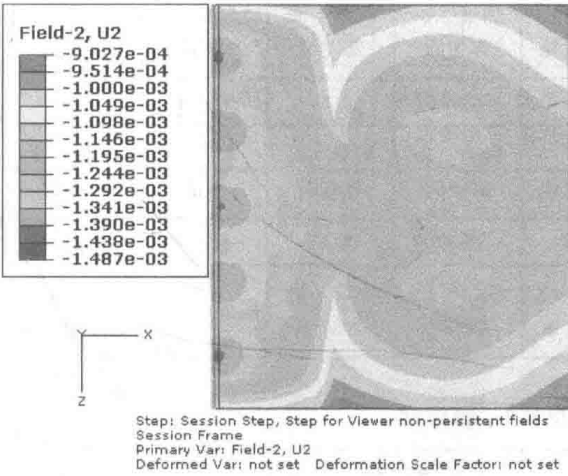
各种模型下,进水塔结构的位移总趋势基本以流道中心线呈对称分布。4 个模型塔顶各向位移相差最大值为 1.3mm,出现在顺河向塔顶位移。随着盖板数量不断增加,塔顶顺河向和横河向位移略有减小,这是由拦污栅框架结构刚度的增加引起的。

2.3.2 塔体底板位移

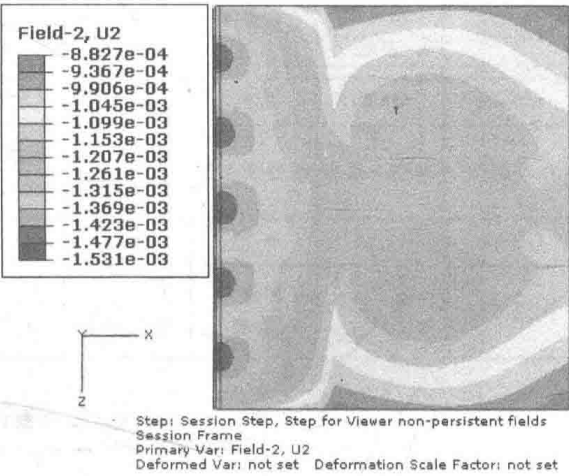
进水塔塔体底板（桩号塔 0—030.00~塔 0+000.00、高程 1624.00~1628.00m）竖向位移 U_Y （沉降）是结构设计中比较关心的结果，各计算模型下的位移峰值和最大不均匀沉降值见表 2-6，各模型下的等值线云纹图见图 2-4。

表 2-6 塔体底板竖向位移 U_Y 峰值表 单位：mm

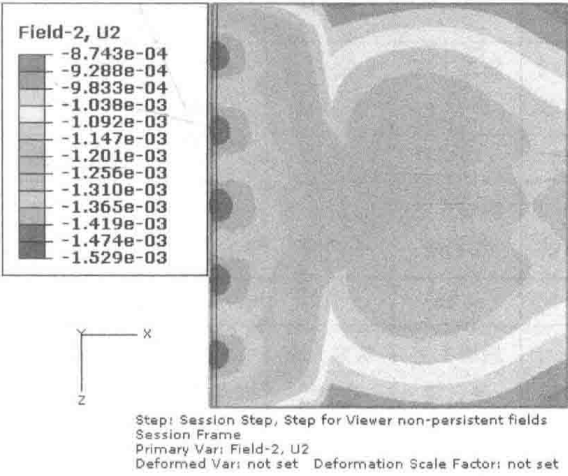
模型	节点号	桩号 X	高程 Y	横向向 Z	峰值 (max/min)	最大不均匀变形值
GB-1	50478	-19.80	1628.00	-16.90	-0.90	0.58
	371145	-30.00	1624.00	-16.90	-1.48	
GB-2	236857	0.00	1628.00	-16.90	-0.88	0.65
	303676	-30.00	1624.00	16.90	-1.53	
GB-3	236857	0.00	1628.00	-16.90	-0.87	0.65
	303676	-30.00	1624.00	16.90	-1.52	
GB-4	236857	0.00	1628.00	-16.90	-0.86	0.66
	303676	-30.00	1624.00	16.90	-1.52	



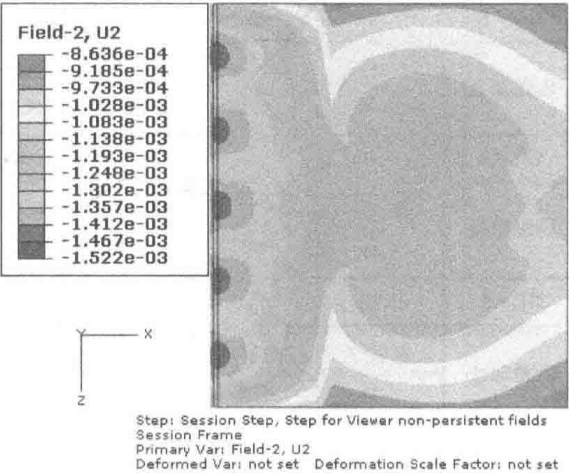
(a)模型 GB-1 竖向位移 U_Y



(b)模型 GB-2 竖向位移 U_Y



(c)模型 GB-3 竖向位移 U_Y



(d)模型 GB-4 竖向位移 U_Y

图 2-4 混凝土底板竖向位移 U_Y 分布云（单位：m）