

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.04.019

抽水蓄能电站地下主副厂房振动传递途径研究

卫洋波, 陈婧, 马震岳

(大连理工大学 建设工程学部 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以某抽水蓄能电站地下厂房为工程实例,采用有限元法,建立地下主厂房与副厂房的耦联体系,对副厂房进行了自振特性和共振复核的分析计算。通过改变主副厂房间结构缝填充材料的物理学参数,并以楼板的振动响应为依据,探讨了抽水蓄能电站地下主副厂房间振动传递的途径和规律。结果表明,副厂房楼板的振动大部分依靠围岩传递;当结构缝填充材料弹性模量较大时,在高频脉动压力作用下,与荷载作用位置较近的副厂房楼板的纵向振动主要通过结构缝的填充材料进行传递。研究所得相关结论为副厂房楼板的隔振减振提供有力依据。

关键词: 地下厂房;自振特性;填充材料;力学参数;传递途径

中图分类号: TV731+.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)04-0101-06

Vibrational Travel and Behavior of Pumped Storage Power Station Underground Powerhouse

WEI Yangbo, CHEN Jing, MA Zhenyue

(School of Hydraulic Engineering, Construction Engineering Department, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: By taking a pumped-storage power station underground powerhouse as an example, this paper developed a coupled finite element model of the main machine hall and the auxiliary plant, and the self-vibration features of the auxiliary powerhouse was analyzed and its resonance feature was checked. By changing the mechanical parameters of the filler material between the main powerhouse and the assistant powerhouse, and based on the vibration response of a floor to discuss the vibrational travel and behavior. The results show that the vibration of auxiliary powerhouse most depend on the surrounding rock; when the elastic modulus larger structure seam filler material, under the effect of flow pulsation pressure in high frequency, the vibration of auxiliary powerhouse that close to load position mainly through the joint filler for transfer. The results could provide valuable references to the vibration separation and vibration reduction of auxiliary powerhouse.

Keywords: underground powerhouse; self-vibration characteristics; filling material; mechanical parameter; vibrational travel and behavior

水电站在运行的过程中,由于工作环境和结构的复杂性,再加上水轮发电机组尺寸和出力日益增大,厂房结构的振动问题是无法避免的^[1-2]。尤其是抽水蓄能水电站,因为其高转速、高水头、大容量和工况复杂的特点,使得厂房结构的振动变得尤为突出^[3-5]。对于振动的研究,目前是从机组的振源(水力、机械、电磁)^[6-9]、结构自身特性入手,对厂房结构进行有限元分析,并以关键部位的位移、均方根

速度、均方根加速度和频率计权均方根加速度为指标^[10-11],结合现场监测、模型试验以及理论计算结果等数据进行对比分析,得到厂房整体结构的振动特性,而对于振动过程的传递途径问题,并没有进行全面深入的研究,如能找到厂房在运行中振动传递的途径,采取相应的措施对结构进行优化设计,就会使结构抗振性明显提高,保证结构安全有效的运行。

水电站中的副厂房放置有重要的电气设备,如

收稿日期:2017-03-27

修稿日期:2017-04-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51379030)

作者简介:卫洋波(1991—),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向为水电站厂房结构分析。E-mail: weiyangbo125@163.com

通讯作者:陈婧(1972—),女,河北易县人,副教授,主要从事水电站建筑物结构静、动力分析研究。E-mail: chjmyh@sina.com

中央控制室和通讯设备室,并且还是工作人员经常活动的场所,其振动的标准相对更为严格。对于地下厂房结构,目前许多设计均按照无人值班设计,工作室也移至地面,对副厂房的振动控制标准降低,但当厂房结构受周围环境的影响时,不能将工作室移至地面,就需要副厂房按照严格的振动控制标准来设计。地下的主副厂房一般位于相邻位置,副厂房的振动并不是直接由振源引起的,而是通过主厂房的振动间接引起的,振源依旧是主厂房机组的振动^[12],可见主厂房的振动如何向副厂房传递需要更深入、全面地进行研究。本文结合某抽水蓄能电站地下厂房的实际结构,并结合模型试验得出的荷载幅值和主频,以副厂房的自振特性及关键部位的振动结果,来探讨主副厂房结构的振动传递特性及影响因素,为副厂房结构的抗振设计提供有力依据。

1 计算模型和计算工况

1.1 计算模型

以某地下厂房的副厂房和与其相连的主厂房机组段为例,建立主、副厂房的耦联体系,其中副厂房主要由板、梁、柱、楼梯结构组成,共有 7 层楼板结构。主副厂房之间设有 20 mm 宽的结构缝。

运用有限元计算软件 ANSYS 对结构进行模拟分析,建模时所有混凝土结构及其开孔尺寸较大,孔洞均按实际体型尺寸进行模拟。为了更好的探究振动传递途径的影响,混凝土结构外模拟了一倍厂房宽度的围岩,岩石边界条件采用相比黏性边界精度较高的黏-弹性约束^[13-14]。划分网格时,主厂房尾水管内部钢衬和蜗壳以及副厂房各层楼板采用壳单元模拟,主厂房座环立柱以及副厂房各层楼板下的梁结构采用梁单元模拟,其余结构均用实体单元模拟。主、副厂房的有限元模型如图 1、图 2 所示。

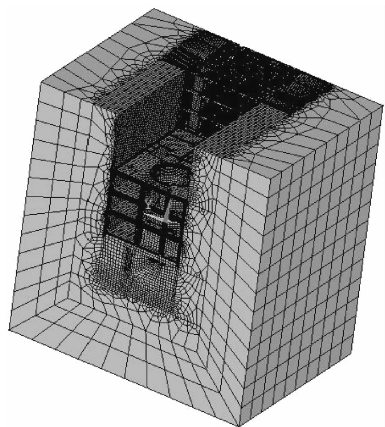


图 1 厂房整体有限元模型

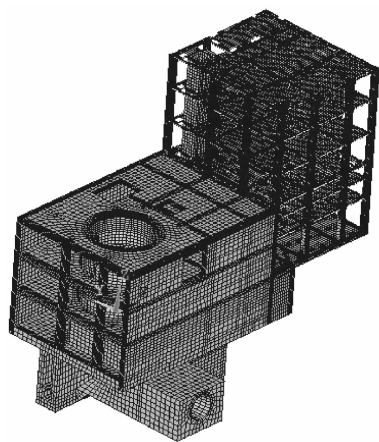


图 2 无围岩厂房整体有限元模型

主、副厂房间振动的传递可能有两途径:一是通过结构地基或者周边围岩进行传递,二是通过主、副厂房间结构缝中的填充材料来传递。为了更好的研究主、副厂房间传递规律,采用以下几种模型分别进行探讨研究。

(1) 模型 1:主、副厂房间结构缝中无填充物,即仅存在一定宽度的结构缝。主、副厂房由结构缝分开,振动传递只能通过基岩或者周边围岩进行传递,主要探讨基岩及周边围岩传递振动的效果。

(2) 模型 2:主、副厂房间结构缝中存在填充物,填充材料一般选择低弹性模量材料,如橡胶、泡沫塑料等,具有一定的传力性能。但这些填充物只传递压力,不传递拉力或剪力,因此该模型主要研究填充材料为非线性材料时主、副厂房的振动传递效果。

(3) 模型 3:与模型 2 形成对比,主、副厂房间结构缝中的填充物是一种既可以传递拉力也可以传递压力的材料,用线性弹簧单元进行模拟。

1.2 计算工况

主、副厂房的传递规律主要从以下几个方面来讨论:(1) 厂房结构在不同的频率荷载下的振动传递规律;(2) 不同的填充物性质(弹性模量、阻尼)对振动响应的影响;(3) 分别采用既能承受拉力又能承受压力的线性材料和仅能承受压力的非线性材料来模拟主、副厂房的填充物,研究副厂房振动响应的区别。具体计算工况见表 1。

2 副厂房的自振特性

首先对副厂房整体进行模态分析,计算时周边围岩为无质量,结构缝中填充材料为一种特殊的泡沫材料,弹性模量为 280 MPa,计算得到副厂房整体结构的前 20 阶自振频率如表 2 所示。各阶振型中

除第 17 阶振型中出现副厂房上部结构的整体纵向振动外,其余各阶振型均表现为各层楼板的竖向振

动。其中第 1 阶振型表现为副厂房上面四层楼板的竖向振动,频率为 12.737 Hz。

表 1 计算工况

计算模型	工况	填充材料 弹性模量/MPa	阻尼因素	作用荷载特征
模型 1	工况 1	0(无填充材料)	无阻尼	高频流道水力脉动(128.58 Hz)
	工况 2	0(无填充材料)	无阻尼	低频机械转动荷载(7.14 Hz)
模型 2	工况 3	28	无阻尼	高频流道水力脉动(128.58 Hz)
	工况 4	28	无阻尼	低频机械转动荷载(7.14 Hz)
	工况 5	280	无阻尼	高频流道水力脉动(128.58 Hz)
	工况 6	280	无阻尼	低频机械转动荷载(7.14 Hz)
	工况 7	280	阻尼比为 0.08	高频流道水力脉动(128.58 Hz)
模型 3	工况 8	同工况 3,仅将主、副厂房间的连接变为线性弹簧		
	工况 9	同工况 6,仅将主、副厂房间的连接变为线性弹簧		

表 2 副厂房整体结构的自振频率

阶次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
频率/Hz	12.737	14.609	16.426	18.484	18.717	18.94	19.092	19.403	19.564	19.733
阶次	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
频率/Hz	19.806	20.299	20.54	20.749	20.887	21.038	21.191	21.225	21.334	21.368

运用“无质量地基”概念对副厂房结构进行局部模态分析得到各层楼板的频率^[15],见表 3。各层楼

板的第 1 阶振型均表现为中间跨度较大处的竖向振动,最底层楼板由于跨度较小,因此频率较大。

表 3 副厂房各层楼板局部的自振频率

阶次	不同高程(m)自振频率/Hz							
	26.830	21.250	15.250	9.735	7.250	3.750	-2.250	
1	18.236	17.989	19.152	18.337	19.187	21.627	47.705	
2	19.218	18.651	19.356	19.115	20.840	21.838	51.300	
3	19.822	19.810	20.904	20.619	21.316	22.675	52.710	
4	21.078	20.334	21.991	21.217	21.680	24.300	73.835	
5	22.241	20.873	22.978	23.347	24.192	25.305	78.620	
6	24.987	25.935	24.355	25.093	27.536	26.459	80.640	
7	25.565	27.835	26.901	25.988	29.766	30.535	101.020	
8	27.532	27.977	27.787	27.689	30.050	32.325	101.730	
9	28.541	28.820	30.532	29.359	31.059	33.375	104.280	
10	29.715	30.983	30.824	29.767	32.269	34.066	106.450	

机组在工作情况下,其可能振源见表 4 所示。

经过共振评价分析,副厂房整体结构和上面六层楼板局部的自振频率与可能振源的错开度均在 20% 以上^[16],只有底层楼板的低阶频率与电磁频率

的错开度较小,但因电磁振动持续时间较短,基本不会引起结构的持续振动。因此可以判断出副厂房结构将不会发生显著共振。

表 4 机组可能振源频率

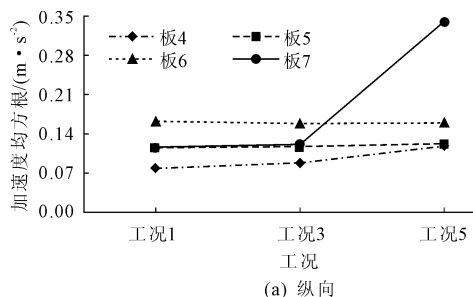
振源	转速 f_n	飞逸 f'_n	$2f_n$	电磁	叶片数	2 倍电磁	2 倍叶片数	导叶数
频率/Hz	7.14	10.42	14.28	50	64.29	100	128.58	142.86

3 主厂房向副厂房振动传递途径和规律的研究

通过上一节的计算分析可知,副厂房与机组振源频率错开度较大,基本排除了共振会引起副厂房振动的因素,可见副厂房的振动主要是由主厂房的振动引起,主厂房振动向副厂房传递的研究也变得至关重要。结构的振动响应规律应从楼板的均方根加速度幅值来进行分析。副厂房楼板从上至下依次为板 1、板 2、板 3...板 7。其中,板 1—板 3 的位置高于主厂房发电机层楼板。副厂房各层楼板典型节点分别取各层楼板靠近主厂房的跨中部位。

通过图 3 对比工况 1、工况 3 和工况 5 可知:

(1) 在高频流道水力脉动压力作用下,副厂房各层楼板典型节点均表现为纵向和竖向振动响应较大,横向较小;副厂房楼板从低到高振动响应基本上逐渐减小,主要是由于振动荷载作用位置较低,低于副厂房底层楼板,且振动能量在传递过程中会逐渐衰减。



(2) 在高频流道水力脉动压力作用下,主、副厂房结构缝有填充物与无填充物比较,上部板 1—板 3 典型节点的振动响应幅值均变化较小,最大仅为 3.85%,说明主厂房结构缝中存在填充物对副厂房中高于主厂房发电机层楼板部位的振动影响很小,主要依靠周边围岩进行传递。下部各层楼板典型节点纵向和竖向振动响应则基本均呈增大趋势,其中,当结构缝中填充材料弹性模量较低时,增加幅度相对较小,纵向最大仅增加 11.5%,竖向最大仅增加 8.23%;当结构缝中填充材料弹性模量较高时,增加幅度相对较大,板 7 纵向最大增加了 198.8%,其余楼板纵向最大增加了 50.3%,各层楼板竖向最大增加了 59.1%,如图 3 所示。说明与主厂房各层楼板相邻的副厂房楼板的竖向振动依靠围岩传递的较多;当结构缝填充材料弹性模量较小时,纵向振动同样通过围岩传递的较多;当结构缝填充材料弹性模量较大时,与荷载作用位置较接近的副厂房楼板的纵向振动通过结构缝填充材料传递的相对较多。

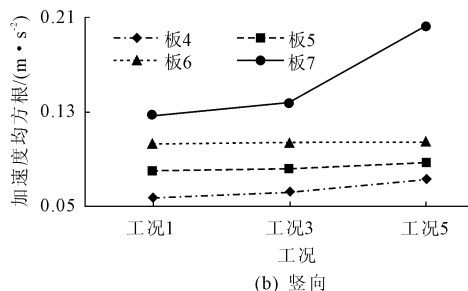


图 3 高频流道脉动压力作用下填充材料不同弹性模量时副厂房楼板均方根加速度对比

(3) 同样对比工况 3 和工况 5 可知,在高频流道水力脉动压力作用下,当主、副厂房结构缝填充物弹性模量减小时,副厂房各层楼板典型节点的振动都在减小,其中板 7 的振动减小幅度较大,纵向和竖向分别为 64.6% 和 32.0%,说明减小结构缝填充材料的弹性模量会使副厂房结构的振动减小,能够起到对副厂房结构的隔振减振作用。

通过图 4 对比工况 2、工况 4 和工况 6 可知:

(1) 在低频机械荷载作用下,副厂房各层楼板典型节点均表现为竖向振动响应较大,纵向振动响应较小,主要是由于竖向荷载幅值较大。

(2) 在低频机械荷载作用下,对于高于主厂房发电层楼板的板 1—板 3 典型节点而言,主副厂房结构缝中有无填充物对各方向的振动响应基本无影响,振动幅度普遍小于 1%。说明副厂房中高于主厂房发电机层楼板部位的振动主要依靠地基和周边

围岩进行传递。当主副厂房结构缝中有填充物时,低于主厂房发电层楼板的板 4—板 7 典型节点的竖向振动响应均小于无填充物时的振动响应,但减小的幅度很小,最大仅为 2.80%,如图 4 所示。主要是由于副厂房楼板的竖向振动反应是通过围岩传递的,考虑结构缝填充材料使副厂房的刚度有所增加,因此振动反应有所减小。

(3) 在低频机械荷载作用下,主副厂房结构缝中有无填充物对副厂房中低于主厂房发电层楼板的板 4—板 7 典型节点的纵向振动影响较大,其中与荷载作用位置较接近的板 5 和板 6 在结构缝中存在填充物时,振动增加的幅度较大,最大增加了 63.3%;而板 4 和板 7 纵向振动呈减小趋势。说明与主厂房各层楼板相邻的副厂房楼板的纵向振动也主要依靠围岩传递,副厂房结构缝填充材料对荷载作用位置较接近的纵向振动也有较大的影响。

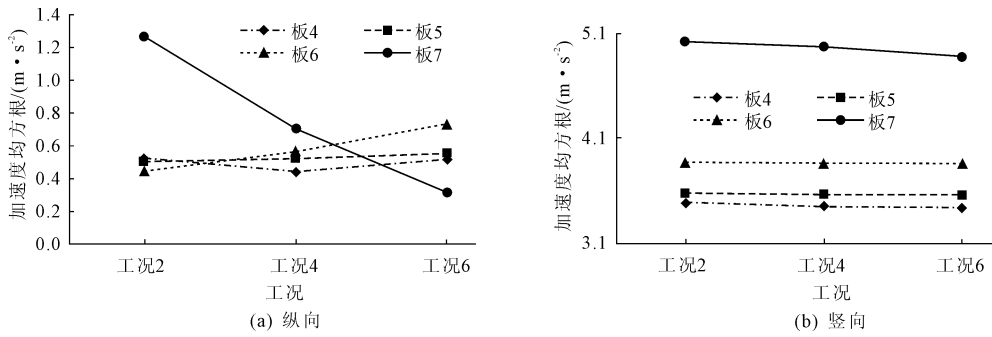


图 4 低频机械荷载作用下填充材料不同弹性模量时副厂房楼板均方根加速度对比

(4) 对比工况 4 和工况 6 可知,在低频机械荷载作用下,当主、副厂房结构缝填充物弹性模量减小时,除底层楼板外副厂房其余各层楼板典型节点的纵向振动均有所减小。其中与荷载作用位置最近的板 6 振动减小幅度较大,最大为 30.0%。说明减小结构缝填充材料的弹性模量会使副厂房结构的振动减小,能够起到对副厂房结构隔振、减振的作用。

通过图 5、图 6 对比工况 5 和工况 7、工况 3 和工况 8、工况 6 和工况 9 可以看出:

(1) 当考虑结构缝中填充材料的阻尼时,副厂房楼板的振动明显减弱,最小也减小了 67.5%,如图 5 所示。而且从图 5 中也可以看出在填充材料增加阻尼后,楼板的响应减小且随着楼板高程降低与无阻尼情况变化趋势一致,楼板的振动响应随着高程的降低逐渐增加。

(2) 将填充材料换成即抗拉又抗压的线弹性材

料时,副厂房各层楼板典型节点的纵向动位移基本上呈减小趋势,其中高于主厂房发电层楼板的板 1—板 3 变化的幅度很小,不超过 1%;低于主厂房发电层楼板的板 4—板 7 减小的幅度相对较大,在高频流道脉动压力下楼板纵向振动幅值最大减小了 11.1%,在低频机械荷载作用下楼板的纵向振动幅值最大减小了 24.0%,如图 6 所示。

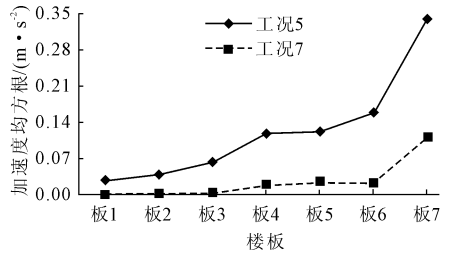


图 5 高频流道脉动压力下填充材料不同阻尼时副厂房楼板纵向均方根加速度对比

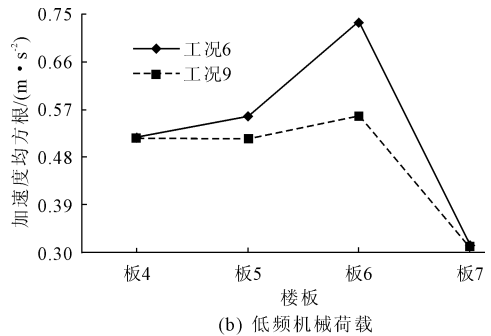
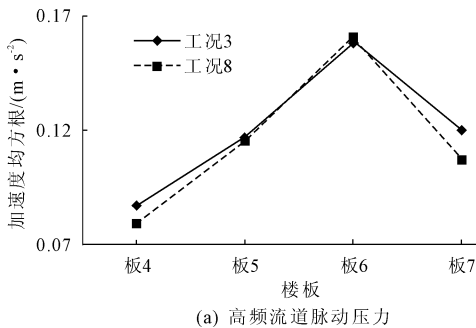


图 6 填充线性和非线性材料时副厂房楼板的纵向均方根加速度对比

4 结 论

(1) 副厂房整体和局部楼板的低阶自振频率与可能振源的错开度基本上均大于 20%,因此,副厂房不会发生明显共振。

(2) 副厂房低于主厂房发电机层以下楼板的振动较其他高程处的楼板强烈,主要是由于振动在传递过程中能量衰减造成的。对结构缝中填充物采用

不同的模拟方法和力学参数计算分析得出,减小填充物的弹性模量和增加填充物的阻尼,均能够降低楼板振动,其中在高频流道脉动压力作用下减小的幅度较大。

参考文献:

[1] 董毓新. 水轮发电机组振动[M]. 大连:大连理工大学出版社,1989.

[2] 马震岳,张运良,陈 婧,等. 水电站厂房和机组耦合动

- 力学理论及应用[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [3] 尚银磊,李德玉,欧阳金惠.大型水电站厂房振动问题研究综述[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(1):48-52,59.
- [4] 陈 婧,王粉玲,马震岳.大型抽水蓄能电站地下厂房结构振动响应分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(6):78-81.
- [5] 刘 建,伍鹤皋,傅 丹.洪屏抽水蓄能电站地下厂房结构动力响应分析[J].水力发电,2014,40(8):109-112.
- [6] 沈 可.水电站厂房结构振动研究[D].南宁:广西大学,2002.
- [7] 王学谦,赵兰浩.抽水蓄能电站地下厂房振因仿真分析[J].南水北调与水利科技,2013,11(3):76-81.
- [8] 孙万泉,马震岳,赵凤遥.抽水蓄能电站振源特性分析研究[J].水电能源科学,2003,21(4):78-80.
- [9] 苗毓海,陈 婧.瀑布沟水电站地下厂房机墩组合结构刚度分析[J].水利与建筑工程学报,2013,11(4):110-115.
- [10] 陈 婧,马震岳,刘志明,等.水轮机压力脉动诱发厂房振动分析[J].水力发电,2004,30(5):24-27.
- [11] 宋志强,马震岳,陈 婧,等.龙头石水电站厂房振动分析[J].水利学报,2008,39(8):916-921.
- [12] 秦 亮,王正伟.水电站振源识别及其对厂房结构的影响研究[J].水力发电学报,2008,27(4):135-140.
- [13] 孙万泉.水电站厂房结构振动分析及动态识别[D].大连:大连理工大学,2004.
- [14] 李慧君.水电站地下厂房内源振动计算模型和边界条件的研究[D].大连:大连理工大学,2009.
- [15] 王 伟.水电站主厂房楼板与墙柱连接形式及设备隔振措施研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [16] 水电水利规划设计院.水电站厂房设计规范:NB/T 35011—2013[S].北京:中国电力出版社,2013.

(上接第 61 页)

- [27] Yang J, Wang F Z, Liu Y P. CoMParison of ordinary pores with internal cured pores produced by superabsorbent polymers[J]. Advanced Materials Research, 2015,1129:315-322.
- [28] Wang F Z, Yang J, Hu S G, et al. Influence of superabsorbent polymers on the surrounding cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 2016,81:112-121.
- [29] 张 新,程 华,王仲刚,等.三维均匀化理论预测多孔混凝土等效弹性模量[J].后勤工程学院学报,2015,31(3):87-91.
- [30] 张 新.基于随机模型的海水集料混凝土力学性能数值模拟及试验研究[D].重庆:后勤工程学院,2015.
- [31] 王发洲,杨 进,程 华,等.基于内部孔结构的功能型混凝土研究初探[J].建筑材料学报,2015,18(4):608-613.
- [32] 朱国华.蠕变和刚度控制的碳-玻璃纤维海水集料混凝土梁抗弯设计试验研究[D].重庆:后勤工程学院,2016.
- [33] Zhu Guohua, Cheng Hua, Deng Zhiping. Creep behavior analysis and creep rupture prediction of carbon-glass fiber reinforced polymer tendon[J]. Chemical Engineering Transactions, 2015,46:463-438.
- [34] 郑国欣,程 华,朱国华.非筋材海水集料混凝土梁正截面承载力分析与试验研究[J].后勤工程学院学报,2017,33(1):6-10,20.
- [35] 邓智平.海水集料混凝土动态力学性能研究[D].重庆:后勤工程学院,2016.
- [36] Deng Zhiping, Cheng Hua, Wang Zhonggang, et al. Compressive behavior of the cellular concrete utilizing millimeter-size saturated SAP under high strain-rate loading[J]. Construction and Building Materials, 2016,119:96-106.
- [37] Deng Zhiping, Cheng Hua, Zhu Guohua. Dynamic behavior and constitutive model of super absorbent polymer concrete under iMPact loading[J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2015,8(6):2974-2980.