

浦东新区青少年活动中心52m跨连桥项目技术分析

李 炜

同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 上海 200092

摘 要:浦东新区青少年活动中心项目被南北向的严茂塘分成东西两个地块,为增强地块间联系规划了两座连桥,本文针对南连桥进行分析论证。介绍了连桥的体系选型、构件布置、荷载定义等,分析了静力工况及反应谱工况下的结构响应,补充了弹性时程分析与反应谱分析的结果对比。针对本连桥还补充抗连续性倒塌分析、弹塑性极限承载力分析及罕遇地震下的弹塑性时程分析。结果表明,南连桥设计满足规范要求,整体结构具有良好的抗连续性倒塌能力及较高的弹塑性极限承载力,罕遇地震下基本实现大震不倒的水准。

关键词: 52m跨连桥;静力分析;弹塑性极限承载力分析;弹塑性时程分析

Pudong New Area Youth Activity Center project Technical analysis of the 52m-span bridge

Li Wei

Tongji Architectural Design (Group) Co., LTD. Shanghai 200092

Abstract: The project of Pudong New Area Youth Activity Center is divided into east and west plots by the Yanmaotang. In order to enhance the connection between two plots, two Bridges are planned. This paper introduces the structural system selection, component layout and load definition of the south bridge, analyzes the structural response under static and response spectrum conditions and compares the result between elastic time history analysis and response spectrum analysis. In addition, progressive collapse resistance analysis, elastic-plastic ultimate capacity analysis and elastic-plastic time history analysis under rare earthquakes are also provided. Results show that the design of the south bridge meets the code requirements, and the overall structure has good resistance to progressive collapse and high elastic-plastic ultimate capacity.

Keywords: 52m-span bridge; static analysis; elastic-plastic ultimate capacity analysis; elastic-plastic time history analysis

1 项目概况

浦东新区青少年活动中心项目位于上海浦东新区文化公园内,项目总建筑面积88433.90平方米,基地有南北向的严茂塘穿过。

南连桥桥面位于二层楼面,桥宽30m,桥跨52m,根据建筑规划,桥面布置有连廊、室外院落及休息亭等。从结构上分析,南连桥面临着跨度大、附属结构复杂及荷载重的特点,需对其进行专项分析。本文主要论述南连桥在设计过程中遇到的重难点,以及其应对措施。

南连桥设计使用年限为50年,安全等级为二级,抗震设防类别为标准设防类(丙类)^[1]。

2 结构选型及结构布置

2.1 南连桥体系布置

南连桥由严茂塘两侧各两柱墩支承,柱墩顺桥向间距52m,横桥向间距15m,考虑钢桁架作为连桥的主受力构件。主桁架上下弦中心距为3.6m,跨高比14.45,在跨度四分

点处布置了三道垂直桁架。

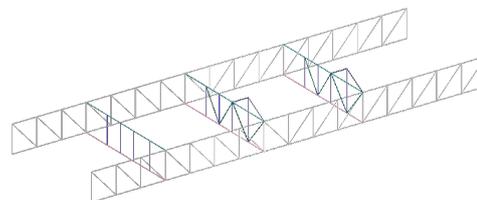


图1 垂直桁架布置图

主桁架下弦平面由横桥向15m跨的钢梁、两侧7.5m的悬挑梁及桥面次梁组成。桥面上的附属结构构件不仅是附属结构的承重构件,其也为主桁架上弦杆提供了侧向支承。

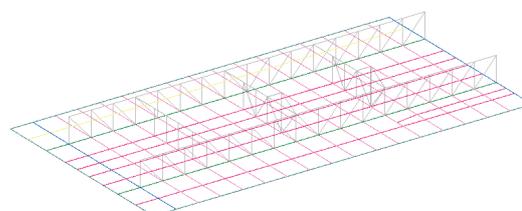


图2 附属结构布置图

主桁架在两端部通过抗震球铰支座与柱墩连接，在顺桥向及横桥向均按一端滑动，一端铰接的原则布置。

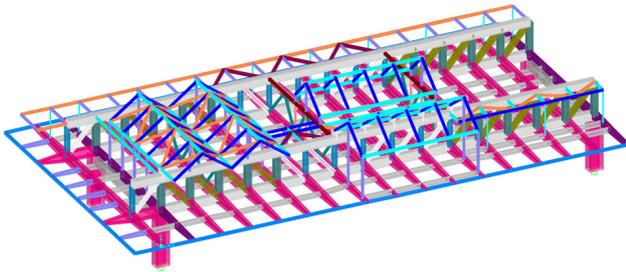


图3 计算模型图

2.2 主要构件材质及截面

柱墩混凝土强度等级采用C50；桥面采用钢筋桁架楼承板，混凝土强度等级采用C30，钢筋均采用HRB400；主桁架构件钢材采用Q355GJB，其余构件均采用Q355B。

主桁架构件截面表 表1

构件名称	截面规格	材质
上弦杆	□900x750 (带竖向加劲肋)	Q355GJB
下弦杆	□1000x700 (带竖向加劲肋)	Q355GJB
竖杆1	□600x700x45x45 (端部)	Q355GJB
竖杆2	H450x450x35x35 (中部)	Q355B
斜杆1	H500x450x40x40 (端部)	Q355GJB
斜杆2	H400x300x30x30 (中部)	Q355B
桥面次梁1	H1000x600x25x35	Q355B

3 静力分析及反应谱分析

3.1 分析软件

计算采用SAP2000软件，构件均采用梁单元模拟，地震分析分别采用反应谱法与弹性时程分析法，阻尼比取0.02。

3.2 荷载取值

- (1)结构自重：程序自动计算并放大1.1倍。
- (2)桥面恒荷载：室内取 5.5kN/m^2 ，室外取 8.5kN/m^2 。
- (3)活荷载： 3.5kN/m^2 。
- (4)雪荷载： 0.20kN/m^2 。
- (5)风荷载：基本风压取 0.55kN/m^2 ，根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)^[2]，迎风面体型系数取+0.8，背风面体型系数取-0.5。

(6)温度作用：按升温30度，降温30度考虑。

(7)地震作用：上海抗震设防烈度7度，设计基本地震加速度 $0.1g$ ，设计地震分组为第一组，场地类别IV类，特征周期 $T_g = 0.90s$ 。小震影响系数最大值0.08，中震影响系数最大值0.23。

3.3 典型工况下内力

恒活工况及地震工况下典型内力见表2（其中S代表自重荷载，D代表恒荷载，L代表活荷载，Sg代表重力荷载代表值，Eh代表水平地震荷载，Ev代表竖向地震荷载）。

典型工况下内力 表2

1.35S+1.35D+0.98L	主桁架轴力图 (kN)
<p>上弦杆最大压力：-31369kN； 下弦杆最大拉力：30164kN 桁架竖杆最大压力：-9405kN；斜杆最大拉力：8998kN</p>	
1.2Sg+0.5Eh+1.3Ev	下桥面弯矩图 (kN·m)
<p>桥面次梁最大弯矩：1597 kN·m； 悬挑梁最大弯矩：1797 kN·m</p>	

由表2可知：竖向荷载作用下，主桁架上下弦杆在跨中有较大的轴力；连桥下桥面向外侧悬挑梁有较大弯矩。

柱墩在地震工况下典型内力见表3。

柱墩地震工况下内力 表3

1.2Sg+1.3Eh+0.5Ev	柱墩顺桥向弯矩包络图 (kN·m)
<p>柱墩最大弯矩为13820 kN·m。</p>	

由表3知：地震作用下，柱墩顺桥向有最大弯矩。

3.4 典型工况下变形

选取主桁架跨中及柱墩顶部作为控制节点进行计算分析。

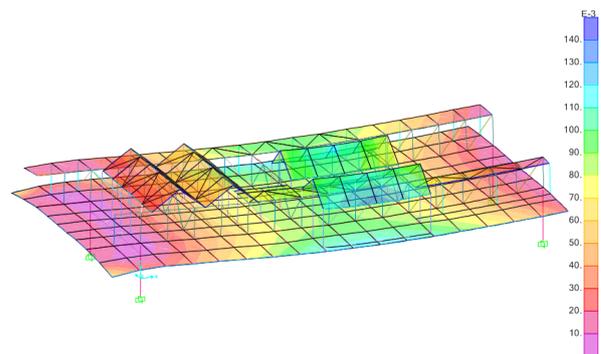


图4 S+D+L下竖向变形图

柱墩顶部地震工况下变形 表4

工况	柱墩顶部水平变形(mm)	
	顺桥向	横桥向
1.0Sg+1.0Eh	2.9 (1/2044)	2.6 (1/2280)

由分析可知：恒活荷载工况下，跨中竖向挠跨比为 $1/520$ ，满足限值 $[1/400]$ 的要求；活荷载工况下，跨中竖向挠跨比为 $1/2330$ ，满足限值 $[1/500]$ 的要求；柱墩顶部在地震作用下，位移角为 $1/2044$ ，满足规范限值 $[1/550]$ 的要求。

3.5 结构自振特性分析

在SAP2000中查看南连桥的频率信息，前几阶自振振型如下。

续表:

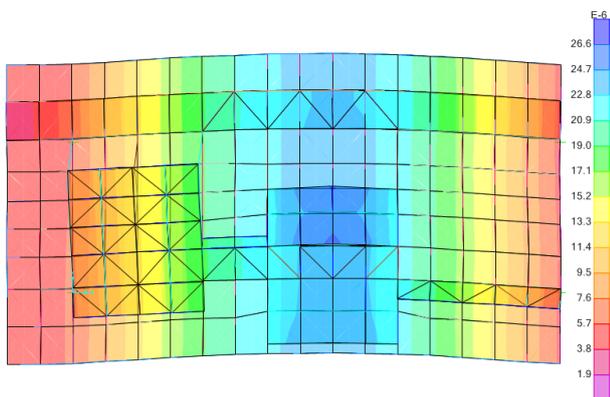


图5 T1 = 1.052s

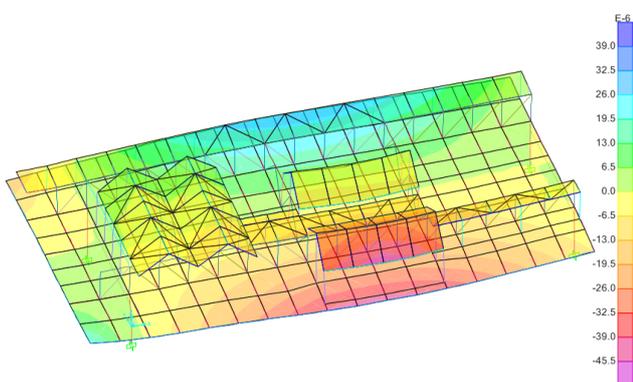


图6 T2 = 0.596s

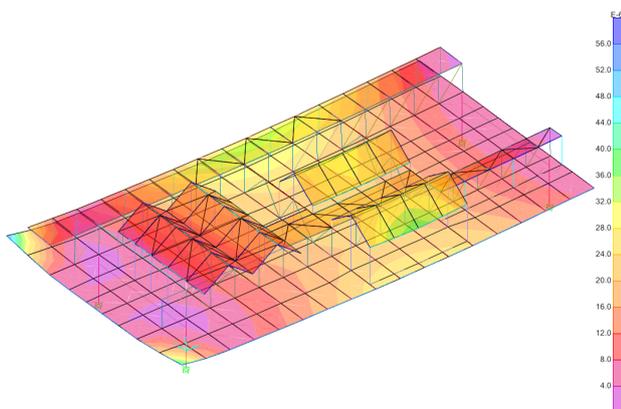


图7 T3 = 0.539s

由分析结果可知，前二阶为平动，第三第四阶为纵向扭转及整体扭转，表明南连桥整体抗扭刚度较好。

3.6 地震反应谱分析及弹性时程分析

经反应谱分析，多遇地震下基底X向剪力2786kN，基底Y向剪力2543kN，剪重比7.03%，大于规范1.6%。

选取两条天然地震波及一条人工波进行弹性时程分析，并与反应谱法的结果进行对比。

反应谱法与弹性时程法对比 表5

方法	地震波	基底反力 X(kN)	基底反力 Y(kN)
反应谱法	-	2786	2543

方法	地震波	基底反力 X(kN)	基底反力 Y(kN)
弹性时程法	760Lomamp.men	2701	2533
	NGA1175	2046	1892
	NGA2104	2370	1810

由表5可知：每条地震波时程分析的基底反力均大于振型分解反应谱法计算结果的65%，多条地震波时程分析的基底反力平均值大于振型分解反应谱法计算结果的80%，满足《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[3]的要求。

4 专项分析

4.1 抗连续性倒塌分析

由于严茂塘两侧为车辆道路，考虑到结构的重要性及发生撞击事故的可能性，现补充抗连续性倒塌专项分析。抗连续性倒塌主要有三种设计方法，分别是局部加强法、拉结构件法及拆除杆件法^[4]，此处分析使用局部加强法（采用附加偶然作用力模拟撞击）。

南连桥中，柱墩及主桁架端部斜杆是可能受到撞击的部分，因此在相应杆件处附加80kN/m²的偶然作用力，验算此时的构件承载力。所选取的作用点见图8。

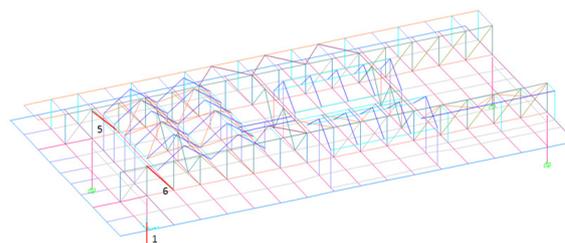


图8 抗连续性倒塌杆件选取图

根据分析，主桁架端部斜杆在偶然作用组合下，应力比为0.51，满足规范要求。在柱墩配筋设计时，采用平时与偶然作用下内力包络设计。

4.2 弹塑性极限承载力

此处使用ABAQUS软件，采用带初始缺陷的模型，考虑材料及变形双非线性的影响，分析南连桥的整体表现。初始缺陷形态采用屈曲分析第1阶整体失稳模态，幅值参照《空间网格结构技术规程》(JGJ7-2010)^[5]，取跨度的L/300。钢材考虑1%的强化率。

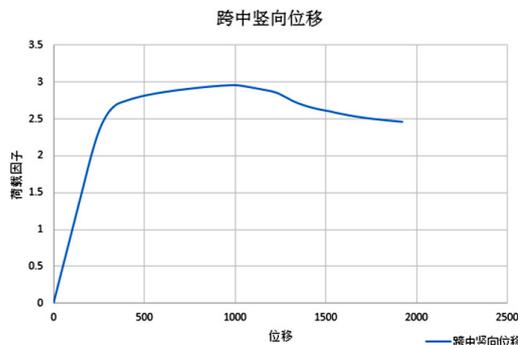


图9 跨中荷载-位移曲线

由荷载-位移曲线可知,当荷载因子达到2.33时,结构开始表现出非线性,随后结构非线性逐渐明显,竖向位移显著增大。南连桥极限荷载因子为2.95,表明结构的极限承载力较强。

当荷载因子为2.95时,跨中竖向挠度为正常使用状态下的7.8倍,结构在发生破坏之前已出现较大变形。

4.3 罕遇地震下弹塑性时程分析

为保证柱墩实现抗震设计中两阶段三水准的目标,对南连桥补充罕遇地震下的弹塑性时程分析。此处使用Midas软件进行,根据上海市《建筑抗震设计标准》(DG/TJ08-9-2023)^[6],地震波幅值最大值取 200cm/s^2 ,阻尼比取0.05。分析采用的地震波见表6。

弹塑性时程分析地震波 表6

序号	编号	来源地震
1	HKD066 0309260450	Hokkaido, Japan
2	NGA_452	Morgan Hill
3	NGA_175	Imperial Valley, USA
4	NGA_1215	Chichi, Taiwan
5	NGA_1237	Chichi, Taiwan
6	NGA_1355	Chichi, Taiwan
7	NGA_1382	Chichi, Taiwan

选取基底剪力及柱墩位移角两个指标进行分析,计算结果见表7~表8。

时程分析基底反力及剪重比 表7

地震波序号	X为输入主方向		Y为输入主方向	
	Vx(kN)	剪重比	Vy(kN)	剪重比
1	11511	0.373	9447	0.306
2	11238	0.364	10262	0.332
3	10457	0.338	7108	0.230
4	15315	0.496	11891	0.385
5	15756	0.510	11299	0.366
6	17658	0.572	12463	0.404
7	11931	0.386	15158	0.491

时程分析基柱墩位移角 表8

地震波序号	X为输入主方向		Y为输入主方向	
	位移(mm)	位移角	位移(mm)	位移角
1	13.2	1/449	9.6	1/617
2	12.3	1/482	14.2	1/417
3	12.9	1/459	9.3	1/637
4	20.9	1/283	14.2	1/417
5	16.9	1/350	12.4	1/478
6	21.5	1/275	12.4	1/478
7	13.6	1/436	16.7	1/335

由时程分析结果可知: X向基底剪力最小为多遇地震反应谱分析结果的3.67倍; Y向基底剪力最小为多遇地震反应谱分析结果的2.79倍。柱墩顶部最大位移角为1/275,满足规范[1/50]的要求。

以5号地震波为例,结构塑性开展如图10。南连桥仅铰接端柱墩轻微进入了塑性,柱脚转角变形最大达到了0.0018,小于美国FEMA防止倒塌(CP)等级规定的塑性转角。由分析可知,南连桥在罕遇地震下具有较好的安全性,基本达到“大震不倒”水准。

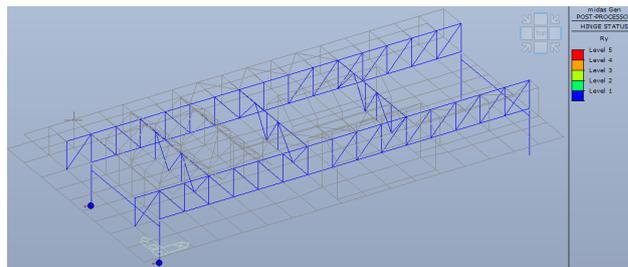


图10 罕遇地震下塑性开展图

5 结论

本工程属于大跨度结构,通过不同软件计算分析了不同地震水准下的结构响应,显示连桥具有适当的刚度,结构布置合理。通过弹性时程分析,补充验证了反应谱计算结果。本单体补充了双非线性下的弹塑性极限承载力分析,表明连桥具有较高的极限承载能力。本单体补充了抗连续性倒塌分析,表明在偶然荷载作用下,结构仍有较好的整体性及较高的抗连续性倒塌的能力。本单体还补充了罕遇地震下的弹塑性承载力分析,分析结果表明南连桥基本满足“大震不倒”的水准。

参考文献

- [1]建筑抗震设防分类标准: GB 50223-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2008.
- [2]建筑结构荷载规范: GB 50009-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2012.
- [3]建筑抗震设计规范: GB 50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2016.
- [4]混凝土结构设计规范: GB 50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2015.
- [5]空间网络结构技术规程: JGJ7-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2010.
- [6]建筑抗震设计标准: DG/TJ 08-9-2023[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2023.