

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.250972

印度尼西亚城市高架桥梁抗震设计

邹德义

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 随着我国设计行业走向全世界,需要在当地设计要求下进行各类桥梁设计。印度尼西亚作为地震带上的国家,其桥梁抗震设计尤为重要,而印尼桥梁抗震设计基于 AASHTO 规范体系,并采用当地的地震参数和作用组合进行补充。因此,在进行雅加达内二环项目中的主线高架桥梁设计时,首先对其设防标准、验算方法和内容进行了梳理,然后采用 Sap2000 有限元分析软件对该桥进行了地震响应分析和抗震性能验算。结果表明:所设计的主线高架桥梁能满足当地规范提出的抗震要求,可为类似工程设计提供参考。

关键词: 印度尼西亚;城市高架桥;抗震设计;地震参数;验算方法

中图分类号: U442;TU997 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)03-0177-05

Seismic Design of Urban Elevated Bridges in Indonesia

ZOU Deyi

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: As the design industry of China expands globally, it is necessary to carry out various bridge designs under local design requirements. As a country located on the earthquake belt, the seismic design of bridges in Indonesia is particularly important. The seismic design of bridges in Indonesia is based on the AASHTO specification system, and is supplemented with the local seismic parameters and action combinations. Therefore, in the design of the elevated bridges in the main line in the Jakarta Inner Ring II Project, firstly, the fortification standards, verification methods and contents are sorted out, and then the seismic response analysis and seismic performance verification of the bridge are carried out by using Sap2000 finite element analysis software. The results indicate that the designed elevated bridge in the main line can meet the seismic requirements proposed in the local codes, providing a reference for the design of similar projects.

Keywords: Indonesia; urban elevated bridge; seismic design; earthquake parameters; checking method

0 引 言

近年来,在国家“一带一路”发展战略的指引下,我国设计行业在世界范围内开展了设计咨询业务。印度尼西亚位于环太平洋地震带与欧亚地震带之间,地壳活动剧烈,当地的桥梁需要进行必要的抗震设计。

然而当地的桥梁设计规范并不完善,主要采用美国 AASHTO 规范^[1]体系,并针对当地特点采用荷载规范进行补充。而目前国内对于印尼桥梁设计的研究主要限于静力设计和标准结构的比选^[2-6],尚无对于抗震设计的专门研究和论述。

本文基于印尼雅加达内二环项目,对主线标准桥梁的抗震设计方法和设计过程进行深入研究。

1 工程概况

本文研究依托于印尼雅加达内二环项目,其通过 6 条收费道路形成雅加达市区的第 2 个内环路,穿越中心城区,辐射城市东、西、南、北各个方向。6 条收费道路均采用全高架形式,全长约 70 km,含有 7 座枢纽级立交。

雅加达内二环示意图见图 1。

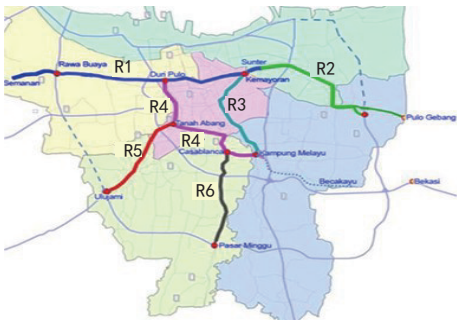


图 1 雅加达内二环示意图

收稿日期: 2025-10-14
作者简介: 邹德义(1978—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计和工程管理工作。

本次设计工作包括项目中北部东西向的 2 条道路。主线高架标准段为桥宽 26.3 m、跨径 35 m 的简支小箱梁梁桥。其上部主梁由 8 片 U 形梁组成,每片 U 形梁两端设置 1 个板式橡胶支座;下部桥墩为矩形墩,截面尺寸为 3.25 m×3.25 m,桥面距承台顶的距离约为 16 m;承台的顺桥向×横桥向×高度尺寸为 11.2 m×11.2 m×3.0 m,承台下基础由 16 根直径为 1.2 m 的钻孔灌注桩组成,桩长约 50 m。图 2 给出了主线标准段桥梁的构造图。

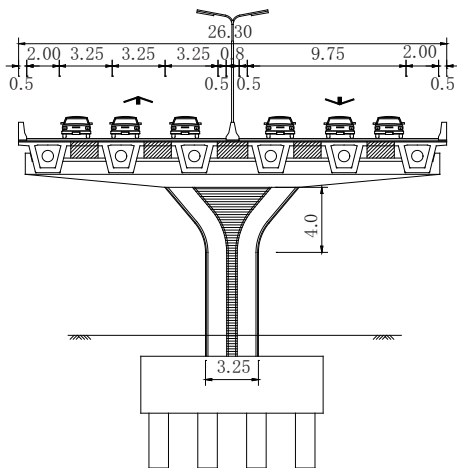


图 2 主线标准段桥梁横断面(单位:m)

2 抗震设防标准

2.1 适用规范

印尼当地设计规范尚未形成完整、系统的规范体系。其国内桥梁结构设计主要采用美国 AASHTO 规范体系,并针对当地特点颁布了系列荷载规范进行补充。

对于该工程桥梁抗震设防标准,其抗震设计理念和主要采用美国桥梁抗震规范《AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design》,地震动参数则采用印尼地震参数规范《Bridge Design for Earthquake Loads》(SNI 2833:2016)。

2.2 设防标准

AASHTO 桥梁抗震规范采用“一水平、一阶段”抗震设计,其规定的设计地震超越概率为 75 年、7%,对应于设计地震重现期为 1 000 年。对于其他烈度和性能等级采用折减系数 R 来实现。

同时,印尼和美国 AASHTO LRFD 桥梁抗震规范按照重要性程度将桥梁分为 3 种类型:关键桥梁、重要桥梁以及其他桥梁,每种桥梁都对应于各自不同的抗震性能目标。该工程桥梁属于“其他桥梁”,设计寿命为 50 年,对应的抗震性能目标可表述为:在

设计地震作用下,桥梁仍具备可供应急救援车辆通行的能力。

而对于抗震设计类别(SDC),则需要根据加速度设计谱 1 s 周期处的谱加速度值(S_{D1})进行划分。该工程 $S_{D1} \geq 0.50g$,属于 SDC D 类,其抗震设计要求为:

桥梁要满足抗震体系要求,进行抗震需求分析,用 Pushover 分析方法检算延性构件位移能力,并用能力设计方法进行能力保护构件的设计,最后还须满足相应于 D 类的构造要求。

2.3 地震动参数

该工程地震动参数采用 AASHTO LRFD Seismic Bridge Design 规范形式。其反应谱公式为:

$$S_a = \begin{cases} (S_{Ds} - A_s)T/T_0 + A_s, & T \leq T_0 \\ S_{Ds}, & T_0 < T \leq T_s \\ S_{D1}/T, & T > T_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_a 为反应谱谱值; A_s 为有效峰值地面加速度; S_{Ds} 为 0.2 s 处反应谱值(反应谱峰值); S_{D1} 为 1.0 s 周期处反应谱值; T 为结构自振周期; T_s 为特征周期; T_0 为反应谱峰值段最小周期,取 0.2 s T_s 。

对于上述参数,根据印尼地震参数规范和设计资料,印尼雅加达地区场地条件为 E 类,取基本地震参数代入反应谱公式中,得到的地震动参数见表 1。根据表 1,可绘制设防地震反应谱谱线,见图 3。

表 1 地震动参数表

雅加达基本地震参数			场地修正系数			反应谱参数取值		
S_s	S_1	PGA	F_a	F_v	F_{PGA}	S_{Ds}	S_{D1}	A_s
0.40g	0.15g	0.20g	2.02	3.35	1.70	0.808 0g	0.502 5g	0.340 0g

注:按照当地的规范调整地震动参数。

表 1 中 S_s 、 S_1 和 PGA 分别为 1 000 年地震重现期各区域 B 类岩石场地 0.2 s 处反应谱值、1 s 周期处反应谱值和有效峰值地面加速度; F_a 、 F_v 和 F_{PGA} 分别为考虑场地效应对 0.2 s 处反应谱值、1 s 周期处反应谱值和有效峰值地面加速度的修正系数。

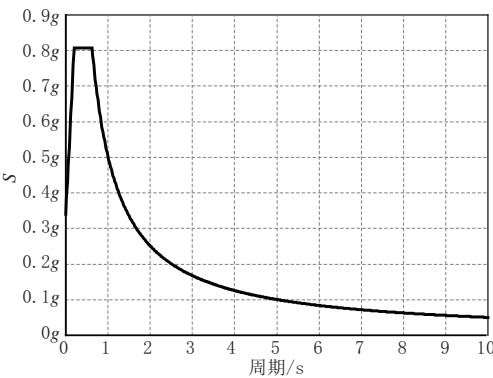


图 3 设计反应谱(5% 阻尼比)

3 抗震验算内容

3.1 荷载组合

在对基础以上结构进行设计验算时采用极限状态设计方法,包含正常使用极限状态和承载能力极限状态。对于地震作用下的验算,采用承载能力极限状态中的 4 种荷载组合方式,即印尼桥梁规范中的 ULS3~ULS6,涉及到的荷载包括自重、二期恒载、徐变和收缩、预应力、施工恒载、土压力等恒载作用,以及顺桥向和横桥向的地震荷载。基础以上结构荷载组合及系数见表 2。

表 2 基础以上结构荷载组合及系数

荷载		承载能力极限状态			
		ULS3	ULS4	ULS5	ULS6
恒载	自重	1.30	0.75	1.30	0.75
	二期恒载	2.00	0.70	2.00	0.70
	徐变和收缩	1.00	1.00	1.00	1.00
	预应力	1.00	1.00	1.00	1.00
	施工恒载	1.25	0.80	1.25	0.80
	土压力	1.00	1.00	1.00	1.00
地震	顺桥向地震荷载	1.00	1.00	0.30	0.30
	横桥向地震荷载	0.30	0.30	1.00	1.00

地基设计采用容许应力法,考虑的荷载主要包括正常使用工况、设计地震工况、强震工况。其中正常使用工况为常规静力设计内容,本文仅考虑后 2 种地震工况内容。地基验算荷载组合及系数见表 3。表中 R 为地震响应折减系数,其取值方式表 4。

表 3 地基验算荷载组合及系数

荷载	设计地震作用		强震作用	
	DEQ 3	DEQ 4	SEQ 5	SEQ 6
恒载	1	1	1	1
顺桥向地震	$0.7 \times 1.0 \times 1/R$	$0.7 \times 0.3 \times 1/R$	$1.0 \times 1/(R/2)$	$0.3 \times 1/(R/2)$
横桥向地震	$0.7 \times 0.3 \times 1/R$	$0.7 \times 1.0 \times 1/R$	$0.3 \times 1/(R/2)$	$1.0 \times 1/(R/2)$

表 4 地震响应折减系数 R

结构类型		桥梁重要性分类		
		关键桥梁	主要桥梁	其他桥梁
群桩墙式墩		1.5	1.5	2.0
群桩独柱墩		1.5	2.0	3.0
钢筋混凝土双柱排架墩	仅直桩	1.5	1.5	2.5
	有斜桩	1.5	2.0	3.0
多柱排架墩		3.5	3.5	5.0
上部结构与盖梁间			0.8	
上部结构伸缩缝			0.8	
墩柱与上部结构间			1.0	
墩柱与基础间			1.0	

3.2 抗震计算方法和内容

该工程标准桥梁抗震采用延性抗震体系,AASHTO 桥梁抗震规范的计算方法与中国规范存在较大差异。

3.2.1 两阶段设计方法与地震响应折减系数

对于延性抗震体系的设计理念,目前国内外基本形成了较为统一的认识:桥墩在小震下具备足够的强度;大震下允许屈服进入延性,校核其变形能力,并通过能力保护来放大基础和上下部间连接键(例如支座)的强度。

然而在实现方法上,AASHTO 规范在进行反应谱法计算时,只进行设计地震下的地震响应计算,并通过地震响应折减系数 R 对不同验算工况下、不同结构部位需要考虑的地震强度进行折算。如对延性地震下桥墩强度进行验算时,对地震力采用设计地震桥墩响应乘以 $1/R$ 的系数进行折减,从而得到小震下的响应。

该工程桥梁属于“其他桥梁”,下部结构采用群桩独柱墩,因而桥墩地震响应折减系数 $R=3.0$ 。

3.2.2 桥墩计算内容及能力保护设计方法

由于采用延性抗震体系,首先要对墩柱进行合理的配筋设计,配筋设计综合考虑静力设计和折减后的地震强度要求;随后塑性铰区域最大承载力用于确定其他能力保护构件的设计地震力。塑性铰的设计地震力要小于其他构件,以便塑性铰可在其他构件破坏前形成,从而起到能力保护作用。墩柱塑性铰设计在易于检查和维修的区域,如墩底、墩顶等。

上部结构、下部结构及支座等连接构件的水平设计地震力可由塑性铰区域的最大抗弯承载力确定,整个结构所能承受的最大水平力即为根据塑性铰区域最大抗弯承载力计算得到的水平剪力。塑性铰区域最大抗弯承载力的计算需要考虑材料超强,对于钢筋混凝土墩柱来讲,能力超强系数取 1.3,而钢墩柱的超强系数为 1.25。

3.2.3 验算内容

抗震设计的验算内容主要针对下部结构,包括桥墩关键截面抗弯承载力、桥墩变形能力、墩柱桩基抗剪、支座地震位移、桩基抗压和抗拔承载力、桩顶侧向变形、桩基最不利截面抗弯承载力验算。

其中多数验算内容和方法与国内计算相似,在此不做赘述。需要说明的是,对于桩基计算印尼规范存在以下规定:

(1) 钻孔灌注桩桩端承载力与侧向摩阻力的安

全系数均为 3.0。

(2)设计地震作用下,单桩竖向承载力为 1.5 倍正常使用下的承载力值;强震作用下,单桩竖向承载力为 1.2 倍设计地震作用下的承载力值。

(3)桩基抗拔承载力取桩基侧阻力的 0.7 倍。正常使用和设计地震作用下桩基的最大侧向变形限值为 1.27 cm,强震作用下为 2.54 cm。

4 有限元模型

采用 SAP2000 程序建立了如图 4 所示的三维结构动力分析模型,模型中考虑了相邻结构边界条件的影响,在此基础上对结构进行地震反应分析。

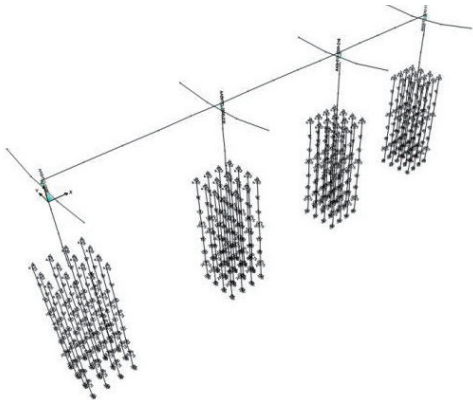


图 4 计算模型图示

在有限元分析模型中,主桁架、桥墩均采用梁单元模拟,承台近似按刚体模拟,其质量堆聚在承台质心;墩底与承台中心及桩顶中心节点用主从相连。主梁的一期恒载通过赋予截面面积和密度来实现;二期恒载以线质量形式加在梁单元上。

桩基础侧向刚度采用 p - y 法建立,采用的 p - y 曲线由 Group 桩基础程序计算得到。

该工程主线标准段采用普通板式橡胶支座,且支座上下均采用钢板锚固,支座型号选取参照印尼当地规格,支座各项性能指标均满足美国 AASHTO 规范相关要求。

有限元模型中采用线性弹簧单元模拟板式橡胶支座的力学性能,其剪切刚度 k 可按下式计算:

$$k = \frac{GA}{\sum t}$$

(2)

式中: G 为板式橡胶支座剪切模量; A 为橡胶支座的剪切面积; $\sum t$ 为支座橡胶层总厚度。

5 计算结果

基于上述有限元模型和计算方法,对该工程桥

梁各项构件的抗震情况进行验算。其主要构件抗震计算结果如下。

5.1 桥墩关键截面抗弯验算

对于该工程主线标准桥梁而言,桥墩关键截面均为墩底截面,且钢筋混凝土桥墩在恒载轴力较小时更为不利,因而最不利工况为 ULS4(纵桥向地震组合工况)和 ULS6(横桥向地震组合工况)。桥墩关键截面抗弯承载力验算结果见表 5。表中 P_D 和 M_D 分别为计算工况组合下桥墩验算截面的轴力和弯矩; ϕM_c 为考虑强度折减系数后的截面抗弯强度。

表 5 桥墩关键截面抗弯承载力验算

组合	P_D /kN	M_D /(kN·m)	ϕM_c /(kN·m)	$\phi M_c/M_D$	配筋率/%	结果
ULS4	24 222	45 863	66 006	1.44	0.60	通过
ULS6	24 218	55 113	65 997	1.20	0.60	通过

由表 5 可见,采用 0.60% 配筋率下的桥墩抗弯承载力即可满足地震下强度要求,桥墩构造设计较为富余。

5.2 支座地震位移验算

对于板式橡胶支座,AASHTO 规范与印尼规范主要对其位移能力进行验算。支座位移能力验算见表 6。

表 6 支座位移能力验算

方向	支座位移/m	容许位移/m	结果
纵桥向	0.150	0.216	通过
横桥向	0.172	0.216	通过

由表 6 可见,选取的板式橡胶支座型号满足地震下变形要求。

5.3 桩基承载力验算

桩基承载力验算分为针对地基验算和桩基结构验算。

其中针对地基验算包括桩基抗压承载力验算、抗拔承载力验算、侧向变形验算,相应的验算结果见表 7 至表 9。表中各项参数的含义参照表 5。

表 7 桩基抗压承载力验算

荷载组合	P_{DC} /kN	ϕP_c /kN	$\phi P_c/P_{DC}$	结果
DEQ 3	3 753	7 500	2.00	通过
DEQ 4	3 716	7 500	2.02	通过
SEQ 5	4 861	9 000	1.85	通过
SEQ 6	4 771	9 000	1.89	通过

由上述计算可见,该工程桩基在地震下各项承载力均满足规范要求,且存在较大富余。

桩基结构的验算主要针对桩基截面抗弯承载能力的验算,其验算结果见表 10。

表 8 桩基抗拔承载力验算

荷载组合	P_{DC}/kN	$\phi P_c/kN$	结果
DEQ 3	993*	-4 563	通过
DEQ 4	1 036*	-4 563	通过
SEQ 5	-3 376	-5 475	通过
SEQ 6	-3 218	-5 475	通过

注:*表明该地震组合工况下桩基不存在上拔力。

表 9 桩基顶侧向变形验算

荷载组合	桩顶侧向变形/mm	容许变形/mm	结果
DEQ 3	1.47	12.7	通过
DEQ 4	1.26	12.7	通过
SEQ 5	9.31	25.4	通过
SEQ 6	7.82	25.4	通过

表 10 桩基截面抗弯承载力验算

组合	P_{Si}/kN	$M_s/(kN \cdot m)$	$\phi M_c/(kN \cdot m)$	$\phi M_c/M_s$	配筋率/%	结果
ULS4	-3 532	1 357	1 404	1.03	1.50	通过
ULS6	-3 384	865	1 471	1.70	1.50	通过

由表 10 可见,采用 1.50% 配筋率下的桩基抗弯承载力可以满足地震下强度要求。

6 结 语

(1) 印尼桥梁的抗震设计主要基于 AASHTO 规

范体系,并采用当地的地震参数和作用组合进行补充。

(2) 采用 AASHTO 规范进行桥梁抗震设计时,与国内主要的不同在于其采用了基于力的设计方法和抗震折减系数的方法,从而可实现多水准设计。

(3) 本文所述桥梁各类构件均满足印尼雅加达地区抗震设计要求,可为当地类似工程设计提供参考。

参考文献:

[1] LRFDSEIS-2 AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design[S].2nd Edition.
[2] 李一卓,王阔然,范铁峰.印度尼西亚标准跨径桥梁设计规范与结构形式浅析[J].公路,2013(1):53-60.
[3] 俞明德.基于印尼桥梁规范对中国小箱梁与印尼 U 梁的比较分析[J].中国市政工程,2017(2):112-118.
[4] 白午龙.中美印桥梁设计规范汽车荷载比较[J].城市道桥与防洪,2019(3):79-82.
[5] 殷亮,胡小康.基于美国规范的印尼组合梁桥设计验算浅析[J].工程设计,2020(4):663-666.
[6] 苏伟,施威,张上,等.印尼雅万高铁时速 350 km 简支梁设计研究[J].铁道标准设计,2020(10):47-50;61.

(上接第 176 页)

参考文献:

[1] 黄思友,侯兵,陈杰,等.斜拉桥索梁锚固区应力分析[J].城市道桥与防洪,2023,294(10):70-74.
[2] 黄斌,杨睿,张振华,等.矮塔斜拉桥索梁锚固区受力性能研究[J].浙江交通职业技术学院学报,2022,23(1):19-23.
[3] 吕文舒,王祺顺,李谦.大跨度斜拉桥索梁锚固区空间受力分析及配筋设计[J].湖南交通科技,2021,47(1):115-118.
[4] 华波,朱安静,孙磊.组合式锚拉板索梁锚固构造在混凝土斜拉桥

中的应用研究[J].世界桥梁,2019,47(2):72-77.
[5] 梅应华,朱大勇,严瑾.混凝土主梁斜拉桥锚拉板式索梁锚固区受力性能研究[J].世界桥梁,2019,47(1):26-31.
[6] 毛晓东.铁路矮塔斜拉桥索梁锚固区局部应力分析[J].兰州交通大学学报,2018,37(2):1-6.
[7] 李国豪.桥梁结构稳定与振动[M].北京:中国铁道出版社,2003.
[8] JTG/T 3365-01—2020 公路斜拉桥设计规范[S].
[9] 朱绪江,郭健,方明山,等.斜拉桥变宽度主梁的剪力滞效应分析[J].工程力学,2021,38(增刊 1):93-99.