

引文格式:吴丽丽,徐胜彦,韩港豪,等. 新型波形钢腹板组合箱梁桥动力性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(3): 138-148.

WU Lili, XU Shengyan, HAN Ganghao, et al. Dynamic analysis of new corrugated steel web composite box girder bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 138-148.

DOI:10.19815/j.jace.2022.06002

新型波形钢腹板组合箱梁桥动力性能分析

吴丽丽, 徐胜彦, 韩港豪, 洪成鹏, 孙培珂

(中国矿业大学(北京) 力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要:对一种新型波形钢腹板组合箱梁桥结构开展了动力特性及抗震性能分析;以郾城黄河大桥跨中箱梁段为例,建立组合箱梁桥的多尺度有限元模型,并与实测值进行了对比,验证了多尺度模型的有效性;基于此设计了该新型波形钢腹板组合箱梁的截面参数,采用多尺度建模方法研究了各参数变化对箱梁动力特性的影响规律,通过地震反应谱法分析了该结构在各向地震作用下的结构响应。结果表明:箱梁横隔板的数量和厚度是结构动力特性的敏感参数,对结构的扭转刚度影响很大;增大波形钢腹板厚度可有效提高结构刚度,且刚度增大对频率的影响程度大于质量增大对频率的影响,建议腹板厚度宜设为20~30 mm;槽形钢板可有效提高截面的抗弯刚度,尤其对结构竖向弯曲模态影响较大;横向地震作用对混凝土顶板和横隔板应力的影响最大,纵向地震力对波形钢腹板应力的影响最大,竖向地震力对混凝土底板和槽形钢板的应力影响较大。

关键词:波形钢腹板组合箱梁;FRP筋;多尺度建模;动力特性;地震反应谱

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)03-0138-11

Dynamic analysis of new corrugated steel web composite box girder bridge

WU Lili, XU Shengyan, HAN Ganghao, HONG Chengpeng, SUN Peike

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing,
Beijing 100083, China)

Abstract: The dynamic characteristics and seismic performance analysis were conducted on a new type of corrugated steel web composite box girder bridge structure. Taking the mid-span box girder section of the Juancheng Yellow River bridge as an example, a multi-scale finite element model of the composite box girder bridge was established and compared with the measured values, and the effectiveness of the multi-scale model was verified. Based on this, the cross-section parameters of the new type of corrugated steel web composite box girder were designed, and the influence of parameter changes on the dynamic characteristics of the box girder was studied using a multi-scale modeling method. The structural response of the structure under multi-directional seismic action was analyzed using the seismic response spectrum method. The results show that the number and thickness of box girder diaphragms are sensitive parameters of structural dynamic characteristics, which have a significant impact on the torsional stiffness of the structure. Increasing the thickness of the corrugated steel web can effectively improve the

收稿日期:2022-06-02

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(51678564);中国矿业大学(北京)越崎杰出学者奖励计划项目(2602021RC59);

中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目(202106051)

作者简介:吴丽丽(1977-),女,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:jennywll@163.com。

structural stiffness, and the impact of stiffness increase on frequency is greater than that of mass increase. It is recommended to set the web thickness to 20-30 mm. Groove steel webs can effectively improve the bending stiffness of the cross-section, especially have a significant impact on the vertical bending mode of the structure. The transverse seismic action has the greatest impact on the stress of the concrete top plate and diaphragm, the longitudinal seismic force has the greatest impact on the stress of the corrugated steel web, and the vertical seismic force has a greater impact on the stress of the concrete bottom plate and groove steel plate.

Key words: corrugated steel web composite box girder; FRP bar; multi-scale modeling; dynamic characteristic; seismic response spectrum

Author resume: WU Lili (1977-), female, PhD, professor, E-mail: jennywll@163.com.

0 引言

20世纪70年代以来,预应力混凝土(PC)箱梁桥被广泛应用于现代大跨径桥梁中^[1-2]。随着桥梁跨径的增大,其自重也逐渐增大,从而导致结构跨越能力削弱和经济性降低。箱梁结构的截面构成制约了结构受力性能和施工性能,仅通过减薄板厚很难达到减小自重的目的,而腹板面积占总截面面积25%~30%,相比顶底板有更大的减重空间^[3]。

1975年,法国的CB公司提出了一种采用波形钢腹板代替混凝土腹板并结合体外预应力技术的新组合结构桥梁,并率先应用在Cognac桥。此后,这种桥广泛应用于法、德、韩、日等国,尤其是日本。20世纪80年代末日本从法国引进波形钢腹板桥梁并进行技术改进,建成第一座波形钢腹板组合箱梁桥——新开桥^[4]。中国的波形钢腹板PC桥是在20世纪90年代由周念先引入的,虽然起步相对较晚,但进展迅猛。2005年先后建成了中国首座波形钢腹板PC组合箱梁人行桥——淮安长征人行桥^[5-6]和首座装配式波形钢腹板PC组合箱梁公路桥——河南省光山县泼河大桥^[7]。波形钢腹板组合箱梁桥是由混凝土顶底板和波形钢腹板共同组成的箱型框架结构,并采用体内外预应力相结合的预应力体系。

在静力性能方面,国内外在20世纪已经有比较成熟的研究^[8]。21世纪国内外学者对波形钢腹板组合箱梁桥的动力性能开展了较深入的研究。在动力特性方面,Zhang等^[9]提出了一种完全考虑波形钢腹板剪力滞效应和手风琴效应的动力特性分析方法,并基于能量原理,通过变分方法建立了波形钢腹板组合箱梁桥的振动微分方程和自然边界条件。Mo等^[10]对4根简易的波形钢腹板箱梁进行了抗震试验研究,并对其滞回曲线、延性系数等参数进行了详细研究。王朝等^[11]对上海波形钢腹板组合箱梁

桥实桥建立有限元模型,进行了地震反应谱和时程分析,研究发现:该桥位移受横向地震激励影响最大,内力受纵向地震激励影响最大。韦忠瑄等^[12]对波形钢腹板PC组合箱梁的动力性能进行研究,发现该结构的横向刚度和扭转刚度均较小,在设计和抗震中应充分考虑,并设横隔板加强其抗扭刚度。肖英楠等^[13-14]结合波纹钢腹板混凝土箱梁结构的构造与受力特点以及混凝土箱梁结构振动理论、预应力计算方法,对波纹钢腹板混凝土箱梁开展动力特性分析,提出了预应力钢筋布置、横隔板布置等建议。

在组合箱梁桥地震反应分析方面,石锦光^[15]基于已有动力试验特性结果,对波形钢腹板连续梁桥实桥进行动力性能监测,总结了动力特性的影响因素,并利用地震反应谱分析,研究了各向地震作用下结构的受力性能。郑尚敏等^[16]分析了横隔板的设置对单箱多室波形钢腹板组合箱梁桥的影响。向宇等^[17-18]对波形钢腹板组合箱梁桥进行抗震分析,选取100条地震波进行时程分析,获得相应的易损性曲线,并将计算结果与普通混凝土箱梁对比,发现波形钢腹板组合箱梁桥结构具有良好的抗震性能,可在山区桥梁中推广使用。

尽管波形钢腹板组合箱梁桥结构应用较广泛,但仍存在一些问题,如:上下翼缘板为混凝土,现场湿工作量大;翼缘混凝土开裂难控制,影响结构的耐久性。为此,本文提出一种带槽形钢板-混凝土组合底板的波形钢腹板组合箱梁。该组合梁用自密实高性能混凝土代替普通混凝土,用玻璃纤维复合筋(GFRP筋)代替普通钢筋,用碳纤维复合筋(CFRP筋)代替普通预应力筋。相比传统上下翼缘均为混凝土的波形钢腹板箱梁,该新型箱梁采用的FRP材料具有较好的耐腐蚀性能,下翼缘设置槽形钢板一方面可以兼做下翼缘混凝土的模板,施工简捷,另一

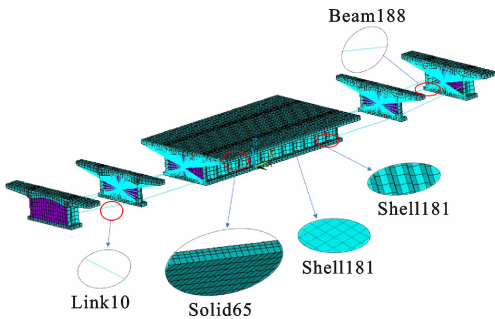


图 4 多尺度有限元模型

Fig. 4 Multi-scale finite element model

型^[28],钢材屈服后斜率 $\alpha=0.01$ 。

体外预应力筋束 CFRP 采用 Link10 单元模拟,由于体外 CFRP 筋仅在锚固点和转向块处与箱梁连接,其他并无连接。建模时采用 CP 命令将体外预应力筋束与转向块耦合连接;由于预应力 CFRP 筋是线弹性材料,可以按理想线弹性材料的本构关系进行描述,体外预应力筋的有效张拉应力为 1 440 MPa,根据文献[29]可知,张拉控制应力 σ_{con} 的取值范围为 $0.5f_{\text{ptk}} < \sigma_{\text{con}} < 0.6f_{\text{ptk}}$ (f_{ptk} 预应力筋的抗拉强度标准值);体内主筋 GFRP 采用 Link8 单元模拟,本构关系亦为线弹性模型。

传统混凝土腹板箱梁桥中混凝土顶底板和腹板由于剪切变形引起的挠度很小,可以忽略不计。波形钢腹板承担绝大部分剪力且厚度较小,因此受剪切变形影响的变形较大,一般不可忽略。因此,本文采用针对波形钢腹板组合箱梁结构多尺度建模方法,即考虑波形钢腹板剪切刚度的影响,先按照剪切刚度等效原则,将波形钢腹板等代为混凝土直腹板,同时保证等效后其重度相同。采用 Plane82 单元建立异形截面,并定义截面不同的材料属性,为小尺度部分截面划分做铺垫。模型的大尺度部分采用 Beam188 单元建立,以截面刚度中心为杆模型的中心,通过调用异形截面完成大尺度部分截面的赋予。

多尺度模型中大尺度和小尺度连接采用 Mpc184 单元建立刚性杆连接,完成两种尺度单元之间的耦合,选择杆单元的节点为主节点,实体单元的节点为从节点。

有限元模型中 GFRP 主筋与混凝土的黏结滑移用 Combine39 弹簧单元模拟,并采用本课题组前期通过 GFRP 筋与自密实混凝土黏结性能试验获得的黏结应力-滑移(τ - s)曲线定义弹簧单元的实常数^[30]。

1.4 多尺度模型的验证

前期对照参考文献[23]中郟城黄河大桥跨中箱

梁段的试验模型,采用 ANSYS 软件建立了多尺度模型和精细模型,将两种有限元计算结果与试验结果进行了对比,结果如表 1 所示。以实测值为基准,相对误差均小于 11%,验证了有限元模型的正确性。从表 1 可以看出:多尺度模型的计算时长远小于精细模型,可见多尺度模型不但具有较高的精度,还可实现模型的简化,并在同一模型中对关键部位的受力特性进行分析,在保证精度的同时,减少计算成本。

表 1 多尺度模型的验证

Table 1 Validation of multi-scale model

参数	频率/Hz	挠度/mm		
		一级加载	二级加载	三级加载
实测值	19.20	0.76	1.52	2.27
精细模型	19.09	0.70	1.39	2.08
多尺度模型	20.46	0.67	1.35	2.03
精细模型相对误差/%	0.56	7.90	8.10	8.00
多尺度模型相对误差/%	6.50	10.70	10.90	10.60

在此基础上按照图 1(a)结构参数建立本文带组合底板箱梁的多尺度有限元模型,即采用 Solid65 单元建立精细模型,采用 Beam188 单元建立杆模型,采用 Solid65 单元在跨中建立 4 m 的小尺度部分,采用 Beam188 单元在两侧建立大尺度部分,并对验证模型进行有限元分析,获得结构频率计算结果。

1.5 新型组合箱梁桥的振型分布特征

对带组合底板波形钢腹板组合箱梁进行模态分析,结果如图 5 所示,其中 f 为频率。从图 5 可以看出:该新型波形钢腹板组合箱梁桥的基频为 1.933 Hz,小于传统组合箱梁桥基频;它的前 3 阶振型特征以弯曲振动为主,第 4 阶为扭转振动,说明该新型波形钢腹板简支组合箱梁桥的横向刚度和抗扭刚度较好。

2 结构参数对动力特性的影响分析

2.1 波形钢腹板厚度

以下各节均以第 1.1 节中波形钢腹板组合箱梁构件参数为基准,通过适当增减腹板的厚度来研究它对结构动力特性的影响。原模型中腹板厚度为 30 mm,如图 1 所示。依次改变波形钢腹板厚度为 10、20、25、40 mm,其他参数不变。

图 6、7 给出了波形钢腹板厚度改变对各阶振动频率的影响,及对第 1 阶对称竖向弯曲振动、第 2 阶横向弯曲振动、第 4 阶扭转振动频率(由于第 3 阶为

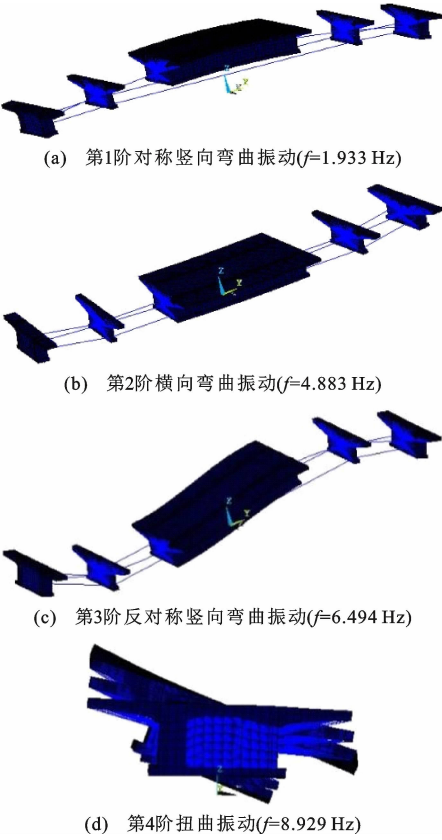


图 5 多尺度有限元模型振型

Fig. 5 Vibration mode of multi-scale finite element model

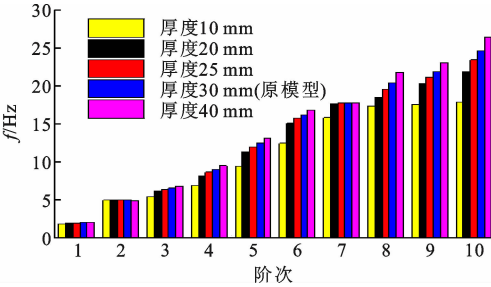


图 6 波形钢腹板厚度对结构频率的影响

Fig. 6 Influence of corrugated steel web thickness on structural frequency

反对称竖向弯曲振动,限于篇幅未给出,以下同)的影响。

从图 6、7 可以看出,波形钢腹板厚度对低阶频率的影响较小,对高阶频率的影响较大,相对原模型频率增幅最大可达 27.478%。这表明:波形钢腹板厚度的增加可在一定程度上提高结构刚度,且刚度增大的效应大于质量增大的影响。随着腹板厚度的增加,结构的竖向弯曲振动频率和扭转振动频率逐渐增加,而横向振动频率先增后减,综合考虑腹板厚度对结构刚度的影响,建议结构设计中腹板厚度宜在 20~30 mm 范围内,以保证结构的竖向弯曲刚

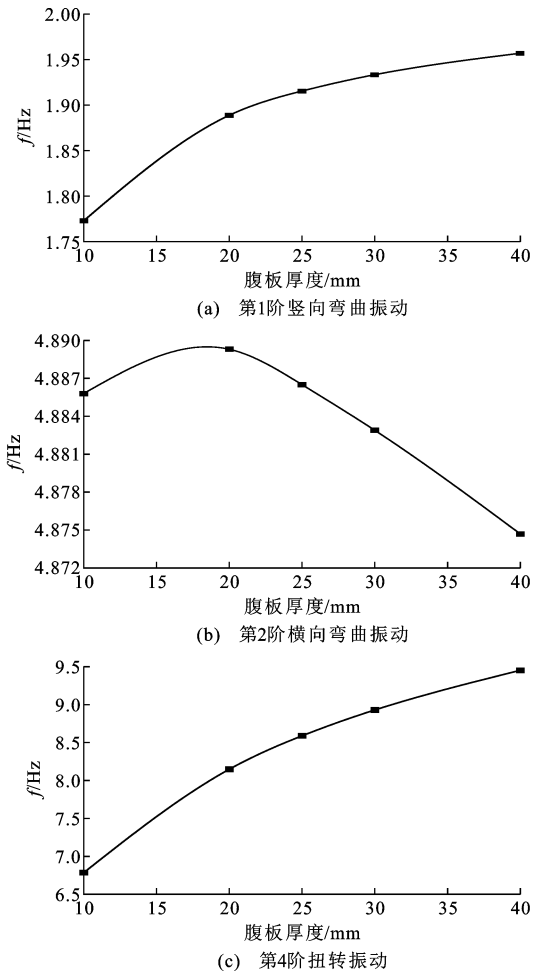


图 7 波形钢腹板厚度对振动频率的影响

Fig. 7 Influence of corrugated steel web thickness on vibration frequency

度、横向刚度及扭转刚度。

2.2 横隔板数量

波形钢腹板组合箱梁桥的抗扭刚度受横隔板的影响较大,尤其是端横隔,在原有限元模型的基础上适当增减横隔板的数目,以此研究横隔板数量对新型波形钢腹板组合箱梁桥动力特性的影响,改变方案为:方案 1,去掉跨中横隔板+两端横隔板;方案 2,去掉跨中横隔板;方案 3,去掉中横隔板;方案 4,去掉跨中横隔板+两端横隔板+中横隔板。

横隔板数量改变对第 1 阶竖向弯曲振动、第 2 阶横向弯曲振动、第 4 阶扭转振动频率的影响如图 8 所示。计算结果表明,4 个方案的前 3 阶模态频率数值变化相对较小,说明横隔板数量对结构低阶模态影响较小,对高阶频率影响更大。从第 4 阶振动频率来看,方案 4 中结构无横隔板,与其他方案的频率相差较大,说明波形钢腹板组合箱梁桥结构中横隔板可有效增加抗扭刚度。端横隔对结构的扭转刚

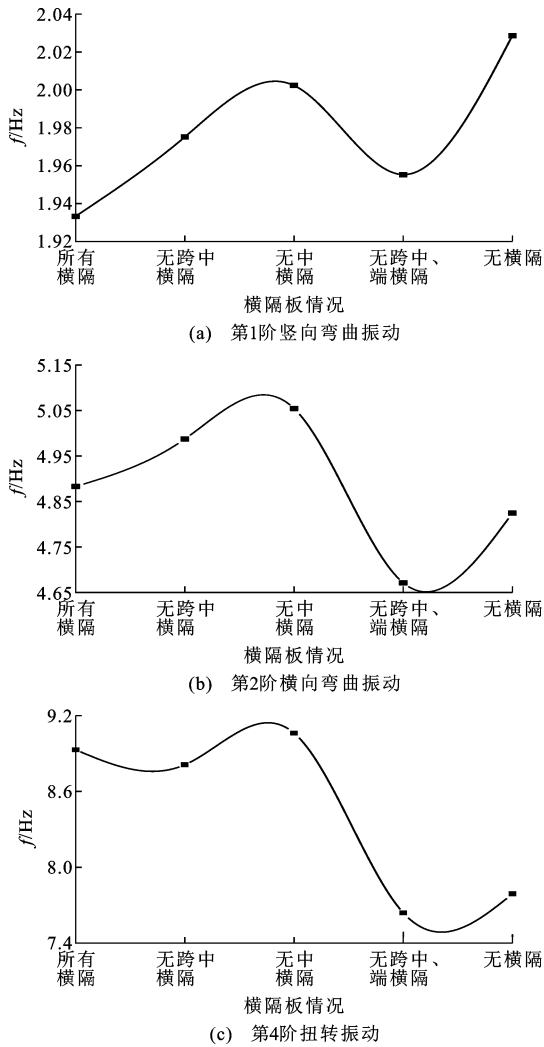


图8 横隔板对振动频率的影响

Fig. 8 Influence of diaphragm on vibration frequency

度影响很大,因此在波形钢腹板组合箱梁桥的设计中应合理设置端横隔板。

竖向弯曲振动频率、横向弯曲振动频率及扭转振动频率均出现先增后减的一致性变化,当一再减少端横隔板时,结构刚度减小程度大于质量减小程度,频率减小,说明端横隔板的重要性,尤其对于扭转刚度。

2.3 横隔板厚度

原模型均为钢横隔板,材料为 Q355 钢材。横隔板设置如图 2 所示,其中端横隔板和跨中横隔板厚度为 0.4 m,中横隔板厚度为 0.3 m。

采用以下两种方案分析横隔板厚度的影响:方案 1,保持中横隔板厚度不变,改变跨中横隔板和端横隔板的厚度 t_1 ,分别为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m,共 7 组;方案 2:保持跨中横隔板与端横隔板的厚度不变,改变中横隔板厚度 t_2 ,分别为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m,共 7 组。

图 9 和图 10 分别为方案 1 和方案 2 中结构前

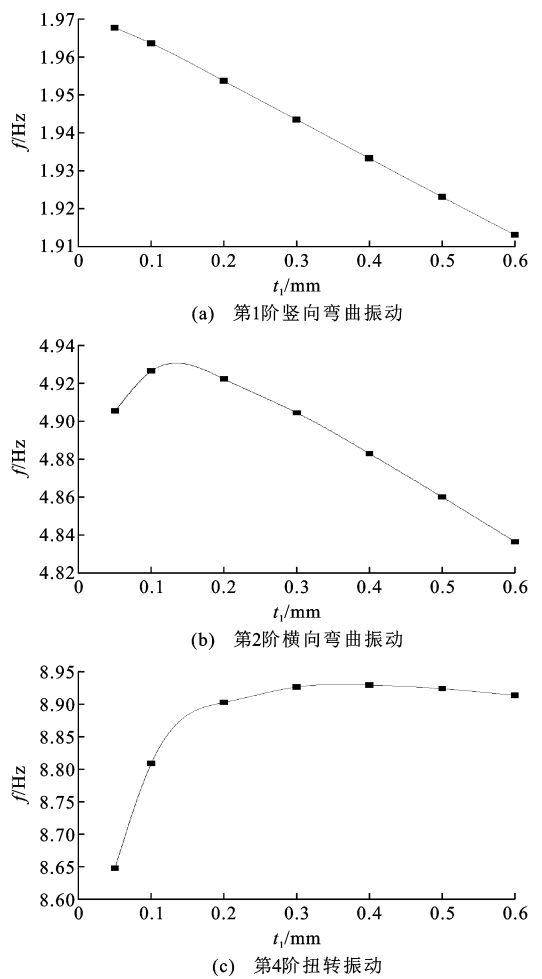


图9 方案1横隔板厚度对振动频率的影响

Fig. 9 Influence of diaphragm thickness on vibration frequency in plan 1

几阶频率随厚度变化的计算结果。由图 9、10 可知:总体上各种横隔板厚度变化对结构频率的影响不大。随着横隔板厚度的增加,端横隔板发生竖向弯曲的振动频率与中横隔板发生竖向、横向及扭转振动时的频率均呈逐渐减小趋势。说明横隔板厚度对结构刚度影响程度小于其对质量影响;端横隔板的横向弯曲振动频率、扭转振动频率出现先增后减的趋势,且在厚度为 0.2~0.4 m 时较为稳定。各阶频率均随着中横隔板厚度的增大而减小,频率改变值与原模型频率之比最大为 -4.523%,当跨中横隔板和端横隔板厚度改变时,频率相对改变率为 -7.672%,说明跨中横隔板和端横隔板厚度变化较中横隔板厚度变化对该结构的动力特性影响更大一些。

2.4 槽形钢底板

本文提出的箱梁构造最大的特色是加入了槽形钢底板,如前所述,它与下翼缘混凝土底板共同工作形成钢板-混凝土组合板,提高了结构的耐久性等。

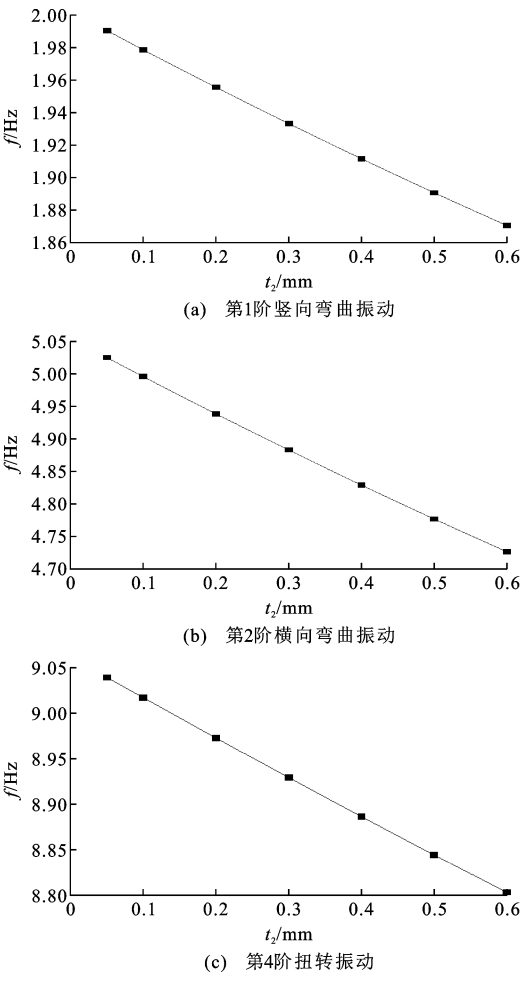


图 10 方案 2 横隔板厚度对振动频率的影响

Fig. 10 Influence of diaphragm thickness on vibration frequency in plan 2

本节主要研究槽形钢板厚度对结构动力特性的影响。原结构为混凝土底板外包槽形钢板,槽形钢板宽 7 m,厚度为 15 mm。分析方案为保持其余参数不变,仅改变槽形钢板的厚度,分别为 25、20、10、0 (无槽形钢板)mm,一共 4 组方案。

图 11 为槽形钢板厚度变化对新型波形钢腹板组合箱梁桥结构前 10 阶振动频率的影响。图 12 为新型波形钢腹板组合箱梁桥结构在有无槽形钢板等 4 种情况下自振频率变化曲线。

从图 11、12 可以看出:

(1)当无槽形钢板时,结构质量减轻,刚度下降,但结构自振频率均小于原模型自振频率,说明槽形钢板对结构刚度的影响大于其对质量的影响。

(2)结构第 1 阶频率随着槽形钢板厚度的增大而增大,第 2 阶和第 4 阶频率随槽形钢板厚度的增大呈波浪式变化,但总体变化幅度不大。增设槽形钢板的意义在于不仅能改善施工难度大、下翼缘混

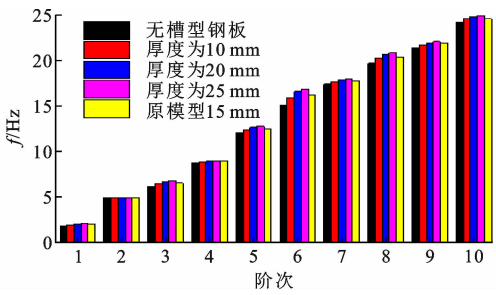


图 11 槽形钢板厚度对自振频率的影响

Fig. 11 Influence of groove steel web thickness on natural vibration frequency

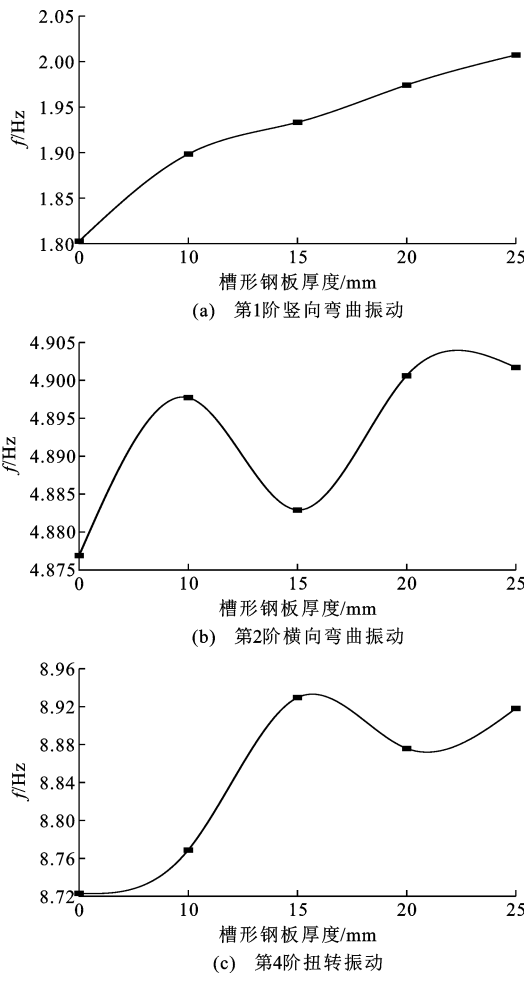


图 12 槽形钢板厚度对振动频率的影响

Fig. 12 Influence of groove steel web thickness on vibration frequency

凝土裂缝外露等问题,而且可以增加结构的刚度。

3 地震反应谱分析

3.1 反应谱曲线的选取

根据《公路桥梁抗震设计细则》^[31],对该结构进行 E1 地震作用(一般不受损或不需要修复可继续使用)的抗震计算。设该桥场地类别为 II 类,抗震设

防烈度为 7 度,抗震设防类别为 B 类,特征周期为 0.35 s,结构阻尼为 0.05,可知水平设计加速度反应谱最大值 $S_{\max}=0.096\ 75g$ (g 为重力加速度),E1 地震作用下设计反应谱曲线如图 13 所示。

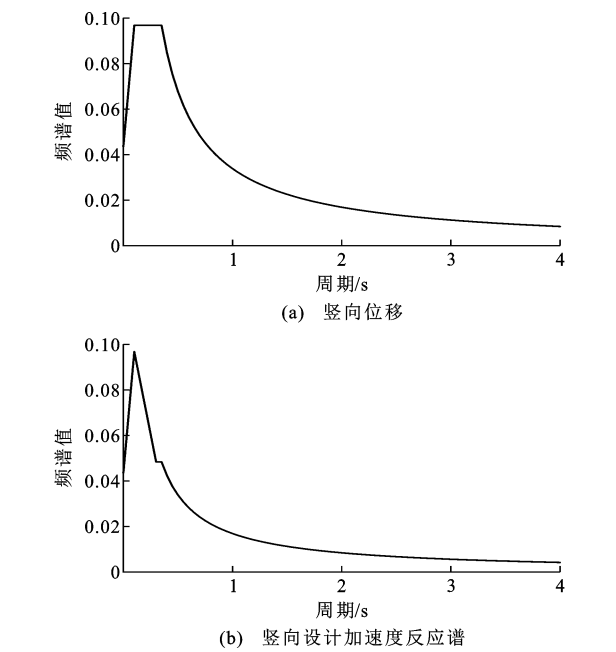


图 13 E1 地震作用下设计加速度反应谱
Fig. 13 Design acceleration response spectrum under E1 earthquake

3.2 位移分析结果

对该新型波形钢腹板组合箱梁结构进行多尺度有限元建模,并采用表 2 所示工况进行反应谱分析。考虑纵向、横向和竖向的地震分量输入,获得各个方向的最大作用效应 E_x 、 E_y 、 E_z 及设计地震作用效应 E ,并选取 7 个关键截面(图 14)。

表 2 反应谱计算工况

工况编号	地震输入模型	地震效应作用组合
1	纵向(y)	E_y
2	横向(x)	E_x
3	竖向(z)	E_z
4		$E=\sqrt{E_x^2+E_y^2+E_z^2}$

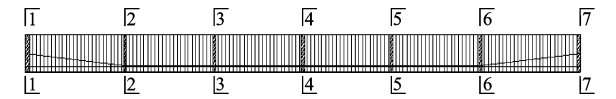


图 14 反应谱分析关键截面

对新型波形钢腹板组合箱梁桥结构进行单点反应谱分析,得到验算截面处的位移情况,如图 15 所示,其中挠度以向下变形为正,向上变形为负。

由图 15(a)可知:该新型波形钢腹板组合箱梁

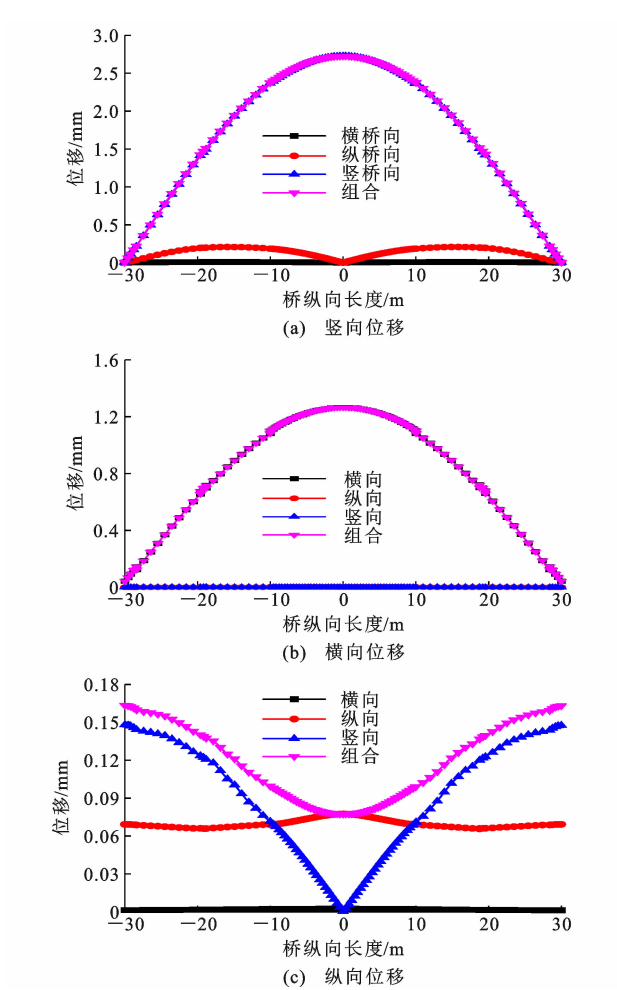


图 15 各向地震作用下结构位移
Fig. 15 Displacement of structure under earthquake from each direction

桥结构的竖向位移受竖向地震作用影响最大,整个结构在竖向地震作用下发生竖向弯曲变形,最大位移出现在跨中位置,在各向地震作用下,结构竖向位移均沿跨中横向对称分布。

由图 15(b)可知:该组合箱梁桥结构的横向位移受横向地震作用影响最大,纵向和竖桥向作用对横向位移基本无影响,结构主要发生横向弯曲,最大位移出现在跨中位置,在各向地震作用下,结构竖向位移也均沿跨中横向对称分布。

由图 15(c)可知:波形钢腹板组合箱梁桥在各向地震作用下,组合效应对纵向位移的影响较大,竖向地震作用次之,横向位移很小,并且各方向地震作用对纵向位移的影响较小。综上,地震反应谱分析对结构影响最大的为竖向输入,其次是横向输入,影响最小的为纵向输入;关键截面位移最大为竖向地震输入导致的竖向位移,最大值出现于跨中;各向地震作用下位移基本沿纵向呈对称分布,其中横向和

纵向作用下位移沿桥纵向先增后减,竖向地震作用下位移先减后增;建议应注意跨中位置截面的设计。

3.3 内力分析结果

各向地震作用下结构各构件应力峰值及位置如表 3 所示。由表 3 可知:各地震作用下结构应力差值相对较小,其中横向地震作用对混凝土顶板和横隔板的应力影响最大,纵向地震作用对波形钢腹板

的应力影响最大,竖向地震作用对混凝土底板和槽形钢板的应力影响较大;受弯构件的最大应力峰值位置基本不变,均出现于跨中位置;受剪构件的最大应力出现在构件端部与混凝土连接部位;横隔板的最大应力出现在端横隔处;结构受力合理,且峰值应力均满足规范要求,说明该箱梁桥具有较好的抗震性能。

表 3 各向地震作用下结构内力峰值

Table 3 Peak value of structural internal force under earthquake from each direction

构件	内力	横向作用	纵向作用	竖向作用
混凝土顶板	最大纵向应力/MPa	0.942(跨中两侧)	0.184(不同尺度连接处)	0.414(跨中下缘边缘)
	最大法向应力/MPa	0.252(端部与波钢连接处)	0.172(端部与波钢连接处)	0.268(端部与波钢连接处)
波形钢腹板	最大剪应力/MPa	0.924(两端与混凝土连接处)	1.03(跨中上端)	0.918(两端与混凝土连接处)
混凝土底板	最大纵向应力/MPa	0.502(跨中两侧)	0.127(跨中两侧)	0.87(跨中两侧边缘)
	最大法向应力/MPa	1.83(端部两侧)	0.282(端部边缘)	0.429(端部边缘)
槽形钢板	最大纵向应力/MPa	2.43(跨中横向弯曲一侧)	3.43(跨中横向弯曲一侧)	4.77(跨中一侧边缘)
	最大 Von Mises 应力/MPa	2.82(跨中两侧)	3.27(跨中两侧)	4.43(跨中两侧边缘)
横隔板	最大 Von Mises 应力/MPa	0.617(端横隔下端两侧)	0.17(端横隔和中横隔两侧)	0.228(端横隔和中横隔两侧)

4 结 语

(1)波形钢腹板厚度对低阶频率的影响较小,对高阶频率的影响较大,相对原模型频率增幅最大可达 27.478%。随着腹板厚度的增加,结构的竖向弯曲振动频率和扭转振动频率逐渐增加,而横向振动频率先增后减,综合考虑腹板厚度对结构刚度的影响,建议在结构设计中腹板厚度取值在 20~30 mm 范围内,以保证结构的竖向弯曲刚度、横向刚度及扭转刚度。

(2)横隔板数量的改变对结构低阶模态影响较小,对高阶频率影响更大。该新型波形钢腹板组合箱梁桥结构中横隔板可有效增加抗扭刚度。端横隔对结构的扭转刚度影响较大,在组合箱梁桥的设计中应合理设置端横隔。

(3)各种横隔板厚度变化对结构频率的影响不大。随着横隔板厚度的增加,端横隔发生竖向弯曲的振动频率与中横隔发生竖向、横向及扭转振动时的频率均呈逐渐减小趋势。端横隔的横向弯曲振动频率、扭转振动频率出现先增后减的趋势,且在厚度为 0.2~0.4 m 时较为稳定。当跨中横隔板和端横隔板厚度改变时,频率相对改变率为-7.672%,说明跨中横隔板和端横隔板厚度变化较中横隔板厚度变化对该结构的动力特性影响更大一些。

(4)当无槽形钢板时,结构质量减轻,刚度下降,但结构自振频率均小于原模型自振频率,说明槽形钢板对结构刚度的影响大于其对质量的影响。增设

槽形钢板的意义在于不仅能改善施工难度大、下翼缘混凝土裂缝外露等问题,而且可以增加结构的刚度。

(5)地震反应谱分析结果表明,新型波形钢腹板组合箱梁桥结构抗震性能良好。结构受竖向地震作用影响最大,横向次之,受纵向地震作用影响最小。在各向地震作用下,结构跨中位置的挠度与内力均为最大值,各处位移和应力均满足规范设计要求,结构应力差值相对较小,其中横向地震作用对混凝土顶板和横隔板的应力影响最大,纵向地震作用对波形钢腹板的应力影响最大,竖向地震作用对混凝土底板和槽形钢板的应力影响较大。

参考文献:
References:

[1] 吕志涛,刘 钊,孟少平. 浅论我国预应力混凝土梁桥的技术与发展[J]. 桥梁建设,2001,31(1):52-56.
LV Zhitao, LIU Zhao, MENG Shaoping. A brief review on the technology and development of prestressed concrete beam bridges in China[J]. Bridge Construction,2001,31(1):52-56.

[2] MUTSUYOSHI H, HAI N, PERERA J, et al. Development of modern prestressed concrete bridges in Japan[J]. The Masterbuilder,2013(7):114-124.

[3] 陈宝春,黄卿维. 波形钢腹板 PC 箱梁桥应用综述[J]. 公路,2005(7):45-53.
CHEN Baochun, HUANG Qingwei. A summary of application of prestressed concrete box-girder bridges

- with corrugated steel webs[J]. Highway, 2005(7): 45-53.
- [4] KONDO C. Design and construction of new PC box girder bridge with corrugated steel webs[J]. Bridge and Foundation (Japan), 1994(9): 13-20.
- [5] 李宏江. 波形钢腹板箱梁扭转与畸变的试验研究及分析[D]. 南京: 东南大学, 2003.
- LI Hongjiang. Experimental study and analysis on torsion and distortion of box girder with corrugated steel webs[D]. Nanjing: Southeast University, 2003.
- [6] 袁安华, 陈建兵, 万水, 等. 波形钢腹板 PC 组合连续箱梁人行桥设计介绍[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2004, 17(3): 55-58, 63.
- YUAN Anhua, CHEN Jianbing, WAN Shui, et al. On a design of pre-stressed concrete composite continuous box-girder footbridge with corrugated steel webs[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2004, 17(3): 55-58, 63.
- [7] 余杰, 韩勇, 王文林, 等. 浈河大桥的构造与施工[J]. 交通科技, 2005(6): 45-47.
- YU Jie, HAN Yong, WANG Wenlin, et al. Structural characteristics and construction of Pohe bridge[J]. Transportation Science & Technology, 2005(6): 45-47.
- [8] KHALID Y A, CHAN C L, SAHARI B B. Bending behaviour of corrugated web beams[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 150(3): 242-254.
- [9] ZHANG Y T, JIANG L Z, ZHOU W B, et al. Shear lag effect and accordion effect on dynamic characteristics of composite box girder bridge with corrugated steel webs[J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 4346.
- [10] MO Y L, JENG C H, KRAWINKLER H. Experimental and analytical studies of innovative prestressed concrete box-girder bridges[J]. Materials and Structures, 2003, 36(2): 99-107.
- [11] 王朝, 陈华利, 万水. 某波形钢腹板 PC 组合箱梁高架桥的抗震分析[J]. 山西建筑, 2009, 35(29): 291-292.
- WANG Chao, CHEN Huali, WAN Shui. Analysis on the anti-seismic performance of the pre-stressed composite box-girder viaduct with corrugated steel webs[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(29): 291-292.
- [12] 韦忠瑄, 孙鹰, 沈庆, 等. 波形钢腹板 PC 组合箱梁的动力特性研究[J]. 固体力学学报, 2011, 32(增1): 394-398.
- WEI Zhongxuan, SUN Ying, SHEN Qing, et al. Study on dynamic properties of the prestressed concrete box-girder with corrugated steel webs[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011, 32(1): 394-398.
- [13] 肖英楠. 波纹钢腹板箱梁桥在汽车荷载作用下的动力响应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- XIAO Yingnan. Vehicle-bridge coupling vibration responses of bridge with corrugated steel webs[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [14] 王妍. 波纹钢腹板连续箱梁桥车桥耦合振动分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- WANG Yan. Vehicle-bridge coupling vibration of continuous box girder bridge with corrugated steel webs[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [15] 石锦光. 波形钢腹板 PC 组合箱梁的动力特性分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- SHI Jinguang. Dynamic characteristics analysis of PC composite box-girder with corrugated steel webs[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [16] 郑尚敏, 万水, 程海根. 单箱多室波形钢腹板组合箱梁动力特性研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(9): 41-46.
- ZHENG Shangmin, WAN Shui, CHENG Haigen. Research on the dynamic characteristics of multi-room single box composite girder with corrugated steel webs[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(9): 41-46.
- [17] 向宇, 孙君翠, 侯立超, 等. 某装配式波形钢腹板组合小箱梁桥梁地震易损性分析[J]. 公路工程, 2018, 43(4): 32-38.
- XIANG Yu, SUN Juncui, HOU Lichao, et al. Seismic fragility assessment for a prefabricated composite box-girder bridge with corrugated steel webs[J]. Highway Engineering, 2018, 43(4): 32-38.
- [18] 李兆霞, 李爱群, 陈鸿天, 等. 大跨桥梁结构以健康监测和状态评估为目标的有限元模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(5): 562-572.
- LI Zhaoxia, LI Aiqun, CHEN Hongtian, et al. Finite element modeling for health monitoring and condition assessment of long-span bridges[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(5): 562-572.
- [19] SHIM K W, MONAGHAN D J, ARMSTRONG C G. Mixed dimensional coupling in finite element stress analysis[J]. Engineering with Computers, 2002, 18(3): 241-252.
- [20] BIN S, LI Z X. Multi-scale modeling and trans-level simulation from material meso-damage to structural failure of reinforced concrete frame structures under

- seismic loading[J]. Journal of Computational Science, 2016, 12: 38-50.
- [21] YU Y, CHAN T H T, SUN Z H, et al. Mixed-dimensional consistent coupling by multi-point constraint equations for efficient multi-scale modeling[J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(5): 837-853.
- [22] BABUSKA I, CALOZ G, OSBORN J E. Special finite element methods for a class of second order elliptic problems with rough coefficients[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1994, 31(4): 945-981.
- [23] 冀 伟. 波形钢腹板组合箱梁桥的力学性能分析与试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
- JI Wei. Experimental study and analysis on mechanical performance of the composite box girder bridge with corrugated steel webs[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2013.
- [24] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts; JTG 3362—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [25] 公路波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计规范: DB41/T 643—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- Code for design of the prestressed concrete box-girder highway bridge with corrugated steel webs; DB41/T 643—2010[S]. Beijing: China communications Press, 2010.
- [26] 纤维增强复合材料钢筋混凝土桥梁技术标准: CJJ/T 280—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Technical standard for concrete bridge with FRP reinforcements; CJJ/T 280—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [27] HOGNESTAD E. Study of combined bending and axial load in reinforced concrete members[R]. Urbana: Champaign University of Illinois, 1951.
- [28] 刘志才. 波形钢腹板组合箱梁抗剪及抗弯分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- LIU Zhicai. Analysis of shear resistance and flexural behavior of composite box girders with corrugated steel webs[D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [29] 许 锋. CFRP 筋体外预应力加固钢筋混凝土梁受弯性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- XU Feng. Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened by external prestressing CFRP tendons[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [30] 吴丽丽, 王 慧, 杨畅涵, 等. GFRP 筋与自密实混凝土黏结性能的试验研究[J]. 复合材料学报, 2021, 38(10): 3484-3494.
- WU Lili, WANG Hui, YANG Changhan, et al. Experimental study on bond properties between GFRP bars and self compacting concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(10): 3484-3494.
- [31] 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02-01—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- Guidelines for seismic design of highway bridges; JTG/T B02-01—2008[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.