

基于冗余度理论的连续斜交桥抗震鲁棒性分析

张航源¹, 赵向凯², 王军文^{1,3}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 北京铁路局丰台工务段, 北京 100071

3. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 河北 石家庄 050043)

摘要: 以某高速公路三跨连续斜交桥为研究对象, 利用 OpenSees 软件建立不同斜度的全桥有限元计算模型, 采用 Pushover 方法得到结构的能力谱曲线, 基于抗震冗余度理论分析了斜度对三跨连续斜交桥冗余度需求比 r 的影响; 运用增量动力分析(IDA)法求出结构的地震易损性曲线, 基于抗震鲁棒性理论研究了斜度对抗倒塌储备系数 R_{CM} 的影响。结果表明: 冗余度需求比 r 与抗倒塌储备系数 R_{CM} 均随斜度的增加而减小, 且两者间存在较好的线性相关关系, 说明可以使用抗震冗余度理论对连续斜交桥的抗震鲁棒性和抗震性能进行评价。

关键词: 连续斜交桥; 抗震能力; Pushover 分析; IDA 分析; 冗余度; 鲁棒性

中图分类号: U448.41; U441.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)04-0542-05

Seismic robustness analysis based on redundancy theory of continuous skewed girder bridges

ZHANG Hangyuan¹, ZHAO Xiangkai², WANG Junwen^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Fengtai Working Section of Beijing Railway Bureau, Beijing 100071, China; 3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control (Shijiazhuang Tiedao University), Ministry of Education, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Taking a three-span continuous skewed girder bridge on a highway as the research object, *OpenSees* software was used to establish the full-bridge finite element model with different skew degree. The structural capacity spectrum curve was obtained by pushover method, and based on seismic redundancy theory, the effect of skew degree on the redundancy demand ratio r for a three-span continuous skewed girder bridge was analyzed. The structural seismic fragility curve was determined by a incremental dynamic analysis (IDA) method, and the influence of skew degree on the anti-collapse reserve coefficient R_{CM} was studied on basis of seismic robustness theory. Results show that the redundancy demand ratio r and the anti-collapse reserve coefficient R_{CM} decrease with the increase of skew degree, and there is a good linear correlation between the two indexes, which shows that the seismic robustness and seismic performance of the continuous skewed girder bridge could be evaluated by the redundancy theory.

Key words: continuous skew bridge; seismic capability; pushover analysis; IDA analysis; redundancy; robustness

斜交桥自身独特的外形, 导致其振动特性与地震响应非常复杂。为此, 许多学者对斜交桥的抗震性能进行了大量基础研究^[1-4], 但目前研究多集中在对斜交桥抗震能力的定性分析, 对斜交桥抗震能力的精细化定量分析比较欠缺。

在 1967 年美国垮塌的 Silver 桥事故中调查发现, 结构中没有多余的传力路径, 会降低桥梁整体的抗倒塌能力^[5]。因此, 如何适当的在结构中增加传力路径, 改善结构受力状态, 提高结构冗余度, 引起了学者们的关注。1996 年 AASHTO 规

范中首次明确给出了冗余度设计原则。但是目前在建筑结构领域中冗余度理论研究较为广泛^[6-8], 针对于桥梁领域的冗余度的研究比较缺乏^[5]。据此, 如何在桥梁领域中运用结构冗余度理论量化分析桥梁结构的抗震性能, 需要深入的研究。

鲁棒性理论的提出为更好的评价桥梁抗震性能提供了一种新的思路, 桥梁抗震鲁棒性的适当提高不仅可以在一定程度上减小地震作用下桥梁结构的损伤概率, 还能在震后的救援和重建工作中提供重要保障^[9]。但鲁棒性的理论性较强, 评价

收稿日期: 2019-11-12 修改稿日期: 2020-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508347, 51768042); 河北省自然科学基金资助项目(E2019210215, E2015210038); 河北省高等学校科学技术研究基金资助项目(ZD2019124)

第一作者: 张航源(1995—), 男, 硕士, 研究方向为桥梁抗震。E-mail: 435051747@qq.com

通信作者: 王军文(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事桥梁抗震方向的研究。E-mail: wjunwen2901@163.com

指标^[8]计算复杂,不利于实际工程的应用.由于结构冗余度理论和鲁棒性两者概念上的共性,本文拟将结合两者各自优点,将冗余度指标体现的斜交桥抗震性能与斜交桥抗震鲁棒性进行对比,探究采用相对简便的冗余度理论对斜交桥的抗震鲁棒性进行评价.

1 结构抗震冗余度

1.1 冗余度指标

冗余度体现了结构承受意外损害的能力,即在整体结构中某些构件失效时,结构整体依然有支撑荷载的能力. SEAOC 把结构具有多道抗力路径的特性表述为冗余度, NCHRP 把冗余度分为局部冗余度, 结构整体冗余度和传力路径冗余度三类. 现阶段, 基于承载力、可靠度和灵敏度分析的三类冗余度指标得到专家学者的广泛认同.

1.2 冗余度需求比指标

为了直观的体现和评价结构的抗震性能, 能力谱法将结构的能力谱曲线和地震动需求谱曲线绘制在一起, 本文在能力谱法的基础上进行冗余度需求比指标的计算.

ATC-3 对结构反应谱修正系数 R 定义如下.

$$R = R_s R_\mu R_R \quad (1)$$

式中, R_s 、 R_μ 、 R_R 分别表示结构的强度系数、延性系数和冗余度系数.

参照《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB02-01-2008) 计算出结构的设计反应谱, 通过 E2 地震和 E1 地震作用下反应谱值之比即可求出强度折减系数系数, 可以使用强度折减系数代替反应谱修正系数 R .

延性系数 R_μ 的表达式^[10] ($\xi=5\%$) 为

$$R_\mu = \left[c(\mu-1) + 1 \right]^{1/c} \quad (2)$$

$$c(T, \alpha) = T^a / (1 + T^a) + b/T$$

式中: T 是结构自振周期、 μ 是结构延性比、 ξ 是结构阻尼比; α 为拟合需求谱曲线屈服后刚度与初始刚度的比值; a 、 b 是 α 的相关系数, 当 $\alpha=0\%$ 、 2% 、 10% 时, $a=1.00$ 、 1.00 、 0.8 , $b=0.42$ 、 0.37 、 0.29 .

冗余度系数可根据图 1 进行计算. 图 1 中, K_e 为能力谱曲线与 E1 地震需求谱曲线交点与原点的连线, 表示拟合能力曲线的初始刚度; S_e 为能力谱曲线与 E1 地震需求谱曲线交点对应的谱加速度值; S_y 为按能量拟合的能力曲线基底剪力屈服值转换的谱加速度值; S_{MT} 为与 S_e 同周期的罕遇地震谱加速度值; S_{max} 为基底剪力峰值转换的谱加速度值; d_y 、 d_e 、 d_{MT} 、 d_{max} 分别为 S_y 、 S_e 、 S_{MT} 、 S_{max} 对应的谱位移值. 由图 1 可知:

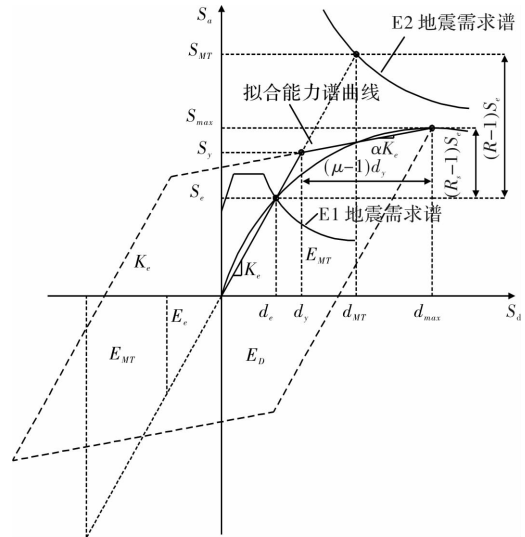


图 1 冗余度需求指标计算简图

Fig. 1 Calculation chart of redundancy requirement index

$$R = R_s R_\mu R_R = S_{MT} / S_e = \sqrt{E_{MT} / E_e} \quad (3)$$

$$R_R = \sqrt{E_{MT} / E_e} / (R_s R_\mu) \quad (4)$$

式中, E_{MT} 、 E_e 表示地震输入的总能量, 即在弹性设计方法下单自由度体系在 E2 地震和 E1 地震中消耗的地震能量.

同时, 将结构实际消耗的地震能量 E_D 带入式 (4), 即可得出实际结构的冗余度系数 R_r .

$$R_r = \sqrt{E_D / E_e} / (R_s R_\mu) \quad (5)$$

将式 (5) 与式 (4) 相除, 即可得出结构的冗余度需求比 r , 即

$$r = R_r / R_R = \sqrt{E_D / E_e} / R \quad (6)$$

根据图 1 可得出如下关系.

$$E_e = S_e^2 / K_e \quad (7a)$$

$$E_D = 4S_y [S_y + (S_{max} - S_y) / \alpha - S_{max}] / K_e \quad (7b)$$

$$\mu = d_{max} / d_y = 1 + (S_{max} - S_y) / \alpha S_y \quad (7c)$$

$$R_s = S_{max} / S_e \quad (7d)$$

综合以上式子, 得出基于能力谱法的冗余度指标 r 如下.

$$r = 2R_s \sqrt{(1-\alpha)(\mu-1)} / [R(\alpha\mu - \alpha + 1)] \quad (8)$$

很显然冗余度指标 $r > 1$ 时, 结构才能满足抗震需求.

2 结构抗震鲁棒性

目前工程界对结构鲁棒性的定义仍然没有统一, 主要有以下两个定义: 一是根据字面意思将鲁棒性定义为整体性和稳定性; 二是从破坏角度将鲁棒性定义为结构的易损性. 本文依据定义一,

将结构抗震鲁棒性定义为结构抵抗地震破坏的能力,以 FEMA P695 中建议的抗倒塌储备系数 R_{CM} 表征,其表达式为

$$R_{CM} = S_a(T_1)_{50\%} / S_a(T_1) \quad (9)$$

式中: $S_a(T_1)_{50\%}$ 、 $S_a(T_1)$ 分别为倒塌率概率为 50% 时对应的谱加速度、设计最大谱加速度;综合两国规范,可以用我国抗震规范中 E2 地震代替设计考虑最大地震,式(9)可以做以下变换。

$$R_{CM} = S_a(T_1)_{50\%} / (\alpha(T_1)_{E2} / g) \quad (10)$$

式中: $\alpha(T_1)_{E2}$ 为我国抗震规范中以一阶周期 T_1 计算的 E2 地震下地震影响系数; g 为重力加速度。

3 结构抗震冗余度与抗震鲁棒性之间关系

由第 1、2 节可知:结构抗震冗余度计算需要进行 Pushover 分析,而抗震鲁棒性借助 IDA 进行计算,考虑了地震动的随机性;但在本质上二者是一致的,均由结构的抗震体系与材料性能所决定,均体现了结构抵御地震荷载的能力。因此,抗倒塌储备系数 R_{CM} 与冗余度需求比 r 之间一定存在某种内在联系,可将 R_{CM} 作为因变量, r 作为自变量,拟合出 R_{CM} 与 r 的关系。

4 工程实例分析

4.1 工程背景

本文以某高速公路 3 m×30 m 连续斜交桥为背景,该桥上部结构由 5 片 T 梁组成,采用 C50 混凝土浇筑,每跨上部结构总重 645 t,全桥仅布置板式橡胶支座,支座动剪切模量 $G=1.2$ MPa,盖梁截面为 1.7 m×2.2 m,下部结构采用双柱式圆形墩(图 2),墩高 8 m,图中 α 表示斜度,特征周期为 0.4 s^[11]。为分析斜度对连续斜交桥冗余度指标的影响,建立 CSB0、CSB15、CSB30、CSB45 和 CSB60 共 5 个模型(CSB 后的数字代表斜度)。

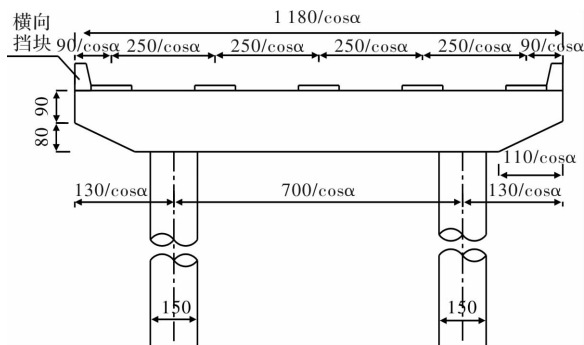


图 2 下部结构简图(单位: mm)

Fig. 2 Substructure diagram/mm

4.2 有限元模型

本文采用 OpenSees 软件建立全桥有限元模型(图 3),其中上部结构采用弹性梁单元多梁模型模拟;板式橡胶支座采用零长度单元模拟^[4],恢复力模型取直线型;盖梁采用弹性梁单元模拟;桥墩采用纤维单元模拟^[4],钢筋本构关系采用 Steel02 模型,混凝土本构关系采用 Mander 模型。

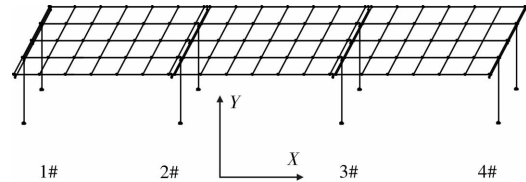


图 3 三跨连续斜交桥有限元模型图

Fig. 3 Finite element mode of three-span continuous skewed girder bridge

4.3 基于 Pushover 的冗余度分析

4.3.1 Pushover 分析

将中跨 2# 桥墩定为易损构件,以其墩顶位移达到容许位移作为极限破坏,选择能考虑高阶振型影响的加载模式^[12]进行侧向力加载;选择主梁质量中心处节点作为控制位移节点,对连续斜交桥模型进行横桥向 Pushover 分析,绘出 5 种不同斜度模型的 Pushover 曲线图(图 4)。

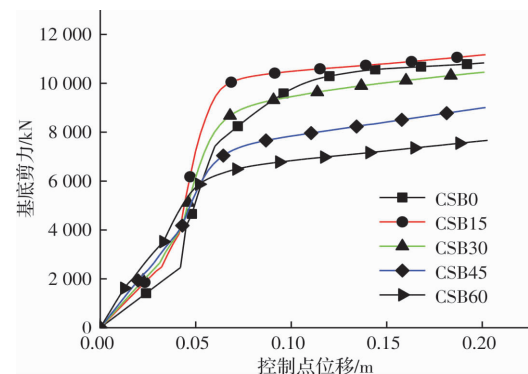


图 4 不同斜度模型 Pushover 曲线

Fig. 4 Pushover curves of different slope models

4.3.2 冗余度分析

由 1.2 节可知,计算冗余度需求比 r 需要将能力谱曲线等效为双折线形式。以模型 CSB30 为例,先将其能力谱曲线与需求谱曲线绘制在同一坐标系下(图 5);然后根据结构最大横向容许位移在能力谱曲线上找到对应的谱加速度,取其 60% 的割线作为初始刚度线^[12],取最大位移点与初始刚度线的交点作为屈后刚度直线,交点的位置根据能量相等原理确定(图 5);最后根据式(8)计算出模型 CSB30 的冗余度需求比 r 。同理得出 5 个模型的 r (表 1)。

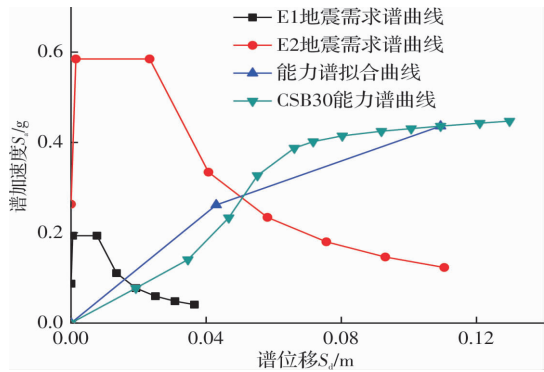


图 5 模型 CSB30 冗余度需求指标计算图

Fig. 5 Redundancy requirement index calculation chart of model CSB30

由表 1 可知, 强度系数、位移延性及冗余度需求比均随斜度的增大而减小; 且冗余度需求比 r 均大于 1, 说明严格按照抗震规范设计的斜交桥抗震能力均达到了预设抗震目标; 横桥向地震作用下斜度越大的连续斜交桥越容易发生破坏。

表 1 斜度对冗余度需求比 r 的影响

Tab. 1 Influence of slope on redundancy demand ratio r

类别	R_s	μ	r
CSB0	5.293	2.267	1.587
CSB15	4.77	2.060	1.433
CSB30	4.570	1.975	1.345
CSB45	4.404	1.902	1.295
CSB60	4.372	1.865	1.217

4.4 基于 IDA 的鲁棒性分析

4.4.1 地震动的选择

由于桥址处于 II 类场地, 因此结合地震动三要素与 ATC-63(2008)推荐的选波原则, 在 PEER 地震数据库中选择 20 条硬土 (II 类) 场地近场记录。

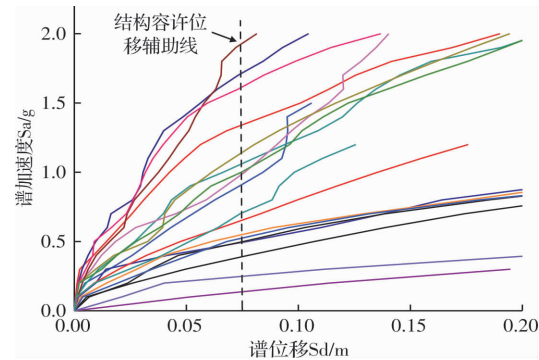


图 6 模型 CSB30 的多条地震动 IDA 曲线

Fig. 6 Multiple IDA curves of model CSB30

4.4.2 IDA 分析终止条件

合理确定桥梁结构倒塌极限并以此作为 IDA 分析的终止条件可以减小分析工作量, 加快计算速率。本文把基于位移的损伤准则——DM 准则作

为 IDA 分析的终止准则。

4.4.3 IDA 分析

以模型 CSB30 为例进行 IDA 分析, 计算出模型的第一阶周期 $T_1 = 1.314$ s, 其对应的阻尼比为 5% 时谱加速度 $S_a = 0.400$ g。对谱加速度 S_a 采用等步调幅, 计算出模型 CSB30 在多条地震波作用下的 IDA 曲线 (图 6), 图 6 中容许位移辅助线左侧代表结构未破坏, 右侧表示结构已经发生破坏。将各地震动强度对应的结构倒塌概率绘制到同一坐标系中, 并将这些数据进行拟合, 最终可得出模型 CSB30 的易损性曲线 (图 7), 在图中标注了倒塌概率 50% 所对应的地震动强度值。

4.4.4 基于 IDA 的抗倒塌储备系数

通过图 7 可以得出模型 CSB30 倒塌概率为 50% 时对应的谱加速度 $S_a = 0.75$ g, 同时根据规范得出 $\alpha(T_1)_{E2} = 0.181$ g。由式 (10) 计算出模型 CSB30 的抗倒塌储备系数 $R_{CM} = 0.75 / 0.181 = 4.134 > 1$, 表明模型 CSB30 可达到预期抗震设防目标, 结构抗震性能良好。

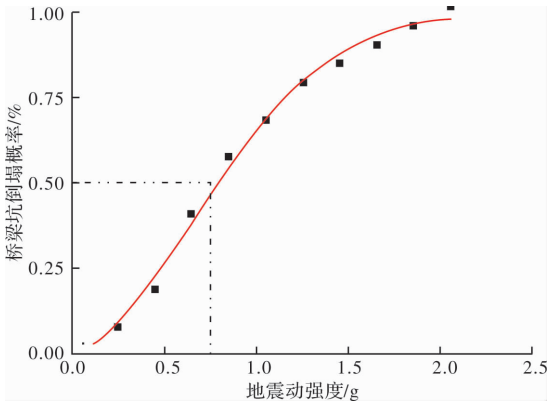


图 7 模型 CSB30 的易损性曲线

Fig. 7 Fragility curves of model CSB30

同理可得出不同模型的抗倒塌储备系数 R_{CM} 的值 (表 2)。由表 3 可知, 连续斜交桥的 R_{CM} 随斜度的增加而减小, 这一结论与 4.3.2 节冗余度需求比 r 随斜度变化的规律基本一致。说明基于 Pushover 的冗余度分析与基于 IDA 的抗震鲁棒性分析均能对连续斜交桥的抗震性能进行评价。

表 2 抗倒塌储备系数 CMR

Tab. 2 Collapse resistance coefficient CMR

类别	$S_a(T_1)_{50\%}/g$	$\alpha(T_1)_{E2}$	R_{CM}
CSB0	0.951	0.184	5.155
CSB15	0.822	0.184	4.449
CSB30	0.753	0.181	4.135
CSB45	0.735	0.181	4.024
CSB60	0.682	0.180	3.778

根据第3节方法,使用 Origin 软件拟合出抗倒塌储备系数 R_{CM} (表2)与冗余度需求比 r (表1)的关系(图8)。线性相关指数 $R^2 = 0.980$, 说明 R_{CM} 和 r 间存在较好的线性关系,可以使用冗余度理论对连续斜交桥进行抗震性能的量化评价。

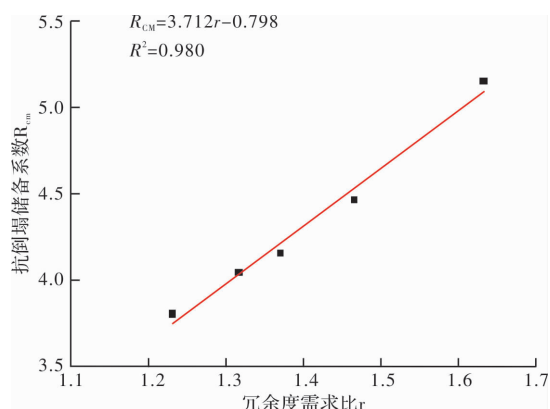


图8 r 与 R_{CM} 的关系

Fig. 8 The relationship between r and R_{CM}

5 结论

(1)连续斜交桥的斜度越大冗余度需求比 r 越小,结构越易损;

(2)连续斜交桥抗倒塌储备系数 R_{CM} 随斜度增大而减小,斜度过大会降低结构抗震鲁棒性,减弱结构易损性;

(3)抗倒塌储备系数 R_{CM} 与冗余度需求比 r 间存在较好的线性相关关系,说明可以使用抗震冗余度理论对连续斜交桥的抗震鲁棒性进行评价。

参考文献 References

[1] 王军文,沈贤,李建中. 地震作用下斜交简支梁桥旋转机理及斜度影响研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(3):32-37.
WANG Junwen, SHEN Xian, LI Jianzhong. Study of rotation mechanism and skew degree influence of skewed simple-supported beam bridge under earthquake excitation [J]. Bridge Construction, 2014, 44(3):32-37.

[2] 许永吉,卓卫东,孙颖. 两跨连续斜交梁桥振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(5):228-233.
XU Yongji, ZHUO Weidong, SUN Ying. Shaking table tests for a two-span continuous skew girder bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(5):228-233.

[3] 庄一舟,李增锋,程俊峰,等. 半整体式桥台无缝线斜交桥的抗震性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(3):24-30.
ZHUANG Yizhou, LI Zengfeng, CHENG Junfeng, et al. Analysis on seismic performance of semi-intergral abutment jointless skew bridge [J]. Journal of Archi-

ecture and Civil Engineering, 2017, 34(3):24-30.

[4] 闫聚考,李少华,王军文. 强震下多跨斜交简支梁桥桥面旋转机理研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1): 29-34.
YAN Jukao, LI Shaohua, WANG Junwen. Study of rotation mechanism of decks of skewed multi-span simply-supported girder bridges under strong earthquake [J]. Bridge Construction, 2017, 47(1): 29-34.

[5] HOVELL C G. Evaluation of redundancy in trapezoidal box-girder bridges using finite element analysis[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2007.

[6] 黄冀卓,王湛. 钢框架结构鲁棒性评估方法[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 46-54.
HUANG Jizhuo, WANG Chan. An approach for evaluation of the structural robustness of steel frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 46-54.

[7] 左琼,姚志华,齐娟,等. 抗震等级对钢筋混凝土框架抗倒塌能力的影响[J]. 建筑结构, 2014, 44(增刊): 428-431.
ZUO Qiong, YAO Zhihuang, QI Juan, et al. Influence of the seismic measure grades on the seismic collapse resistance of reinforced concrete frames [J]. Building Structure, 2014, 44(S):428-431.

[8] 梁仁杰,吴京,章丛俊. 结构抗倒塌能力简化评估方法及其应用[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(6):13-18.
LIANG Renjie, WU Jing, ZHANG Congjun. A simplified evaluation method of structural collapse resistant capacity and its application [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6):13-18.

[9] 陈宝春,黄冀卓,余印根. 桥梁抗倒塌能力鲁棒性设计研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(1):1-7.
CHEN Baochun, HUANG Jizhuo, YU Yingen. Robustness design of bridges collapse resistance [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2014, 33(1):1-7.

[10] FAJFAR P, KRAWINKLER H. Nonlinear seismic analysis and design of reinforced concrete Buildings [M]. England: Elsevier Science Publishers Ltd, 2005.

[11] 赵向凯. 基于冗余度理论的连续斜交桥抗震鲁棒性分析[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2017.
ZHAO Xiangkai. Seismic robustness analysis based on redundancy theory of continuous skewed girder bridges [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.

[12] 柳春光. 桥梁结构地震响应与抗震性能分析 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LIU Chunguang. Analysis of seismic response and seismic performance of bridge structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.