

文章编号:1673-2049(2018)05-0118-10

钢管混凝土组合桁梁桥近、远场抗震性能

蒲北辰^{1,2},周绪红^{1,3},刘永健¹,刘彬^{1,2}

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司,甘肃 兰州 730000;
3. 重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

摘要:基于对传统预应力混凝土连续刚构桥的优化,提出了钢管混凝土组合桁梁桥结构形式,即上部结构采用矩形钢管混凝土组合桁梁,下部结构采用圆形钢管混凝土格构式桥墩。采用数值分析手段对比研究了传统预应力混凝土连续刚构桥、连续刚构优化桥型及新型钢管混凝土组合桁梁桥在近、远场地震作用下的抗震性能。结果表明:钢管混凝土组合桁梁桥、连续刚构优化桥型抗震性能要明显优于传统混凝土连续刚构桥,且钢管混凝土组合桁梁桥抗震性能更佳,近场地震作用下桥墩弯矩下降达41.9%,剪力下降达66.1%,远场地震作用下桥墩弯矩下降达37.5%,剪力下降达76.4%;相较于远场地震,近场地震作用致使结构输入的地震能量大幅增加,相同桥型桥墩位移最大增幅达5.7倍,桥墩弯矩最大增幅达3.5倍;钢管混凝土组合桁梁桥是一种抗震性能优越的桥梁结构形式,可为西部地区装配式钢混组合桥梁的设计选型提供参考。

关键词:组合桁梁桥;近场地震;远场地震;数值分析;钢管混凝土;抗震性能

中图分类号:U443.35 **文献标志码:**A

Anti-seismic Performance of CFST Composite Trussed Bridge Caused by Near-field and Far-field Earthquakes

PU Bei-chen^{1,2}, ZHOU Xu-hong^{1,3}, LIU Yong-jian¹, LIU Bin^{1,2}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Based on optimization toward the continuous prestressed concrete rigid bridge, a new type of bridge, whose superstructure adopted rectangular concrete filled steel tubular(RCFST) composite truss girder and superstructure adopted circular concrete filled steel tubular (CFST) lattice pier, was proposed. The comparative study of seismic performance of traditional continuous prestressed concrete rigid bridge, continuous prestressed concrete rigid optimization bridge and CFST composite trussed bridge caused by near-field and far-field earthquake were analyzed by numerical analysis method. The results show that anti-seismic performance of CFST composite truss bridge and continuous prestressed concrete rigid optimization bridge are superior to traditional continuous prestressed concrete rigid bridge. Comparing to the traditional continuous prestressed concrete rigid bridge, the anti-seismic performance of CFST composite truss bridge is excellent, bending moment and shear force of the pier decrease by 41.9%, 66.1%

收稿日期:2018-07-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701202);国家自然科学基金项目(51778058,51378068)

作者简介:蒲北辰(1977-),男,甘肃礼县人,中国市政工程西北设计研究院有限公司高级工程师,长安大学工学博士研究生,

E-mail:4831975@qq.com。

in the near-field earthquake, and decrease by 37.5%, 76.4% in the far-field earthquake. Compared to far-field earthquake, near-field earthquake enables the initial earthquake energy of structure to increase greatly, displacement and bending moment of the pier jump as much as 570%, 350% respectively. Therefore, CFST composite trussed bridge is a type of bridge which has excellent anti-seismic performance, can provide a good reference for the design selection of prefabricated steel and concrete bridge in the western regions.

Key words: composite truss bridge; near-field earthquake; far-field earthquake; numerical analysis; CFST; anti-seismic performance

0 引言

大跨高墩预应力混凝土连续刚构桥是中国西部山区公路桥梁的主流桥型之一,但在长期服役过程中该桥型出现了跨中下挠、腹板开裂等病害,严重影响了桥梁的耐久性和运营安全;同时,西部地区地震带分布广泛,地震活动频繁,桥梁结构面临近场地震(靠近活动断层区域的地震动)的严重威胁,而近场地震对结构的耗能要求较高。为有效解决预应力混凝土连续刚构桥结构病害和满足高烈度地震作用下结构的抗震需求,上、下部结构均采用钢管混凝土构件的新型组合桁梁桥应运而生,此桥型上部结构采用装配化速度快、承载能力强、结构刚度大的矩形钢管混凝土组合桁梁^[1-6],下部结构采用受压力学性能好、延性变形能力强、抗震性能佳的格构式钢管混凝土组合桥墩^[7-10],是一种非常适宜于西部山区桥梁建设的理想桥型。

国内外已建成采用钢管混凝土组合桁梁、组合桥墩的桥梁工程有瑞士 Lully 高架桥^[11]、西班牙 Ulla 高速铁路桥^[12]、湖北姊归向家坝大桥、重庆万县万州大桥^[13]、四川雅安干海子大桥^[14]、黄延高速 K15+644.312 跨线桥^[15]和雅泸高速腊八斤特大桥^[16],其中雅泸高速腊八斤特大桥跨径布置为 105 m+2×200 m+105 m,上部结构采用预应力混凝土连续梁,下部结构采用钢管混凝土组合高墩,墩梁固结,最大墩高达 182.5 m,是钢管混凝土组合桥墩在工程领域的一次成功尝试。

科学研究方面学者对钢管混凝土组合桥墩抗震性能已经开展了一系列研究工作。吴庆雄等^[17]以干海子大桥为原型,对其进行了精细化有限元分析、实桥测试和几何缩尺比例为 1:8 的振动台模型试验,研究表明:对于钢管混凝土格构墩,塑性铰可能出现在混凝土腹板和墩底 2 个区域;模型试验显示钢管混凝土格构墩的耗能变形减小了主梁的地震位移响应,格构墩具有良好的抗震性能。杨晓等^[18]进

行了钢管混凝土组合长柱的抗震性能试验,结果表明,灌混凝土组合柱的耗能能力要高于空钢管组合柱。陈伯望等^[19]完成了 2 个四肢方钢管混凝土格构柱和 1 个四肢圆钢管混凝土格构柱的低周反复加载试验,结果发现,缀管与柱肢的连接撕裂是钢管混凝土格构柱的主要破坏形态,钢管混凝土格构柱均有良好的综合抗震性能。王灿^[20]基于 OpenSees 软件对薄壁钢箱混凝土桥墩进行数值分析,研究了不同轴压比、长径比、截面含钢率等参数对空、实心截面薄壁钢箱混凝土桥墩骨架曲线的影响规律。吕西林等^[21]介绍了可更换耗能装置在桥梁领域的应用现状,为桥墩提高强度、刚度和大震作用下保持弹性提供了一种设计思路。杨有福等^[22]指出,进行格构式钢管混凝土构件抗震性能研究的关键在于强非线性条件下滞回性能分析理论与模型的建立。

总的来说,钢管混凝土组合桁梁桥抗震性能的已有研究大多着眼于构件层面,而且对近场地震作用下结构响应的研究很少。本文基于对传统预应力混凝土连续刚构桥的优化,提出了新型钢管混凝土组合桁梁桥,并以西部地区典型高墩大跨非规则连续刚构桥作为研究对象,对近、远场地震荷载作用下预应力混凝土连续刚构桥、预应力混凝土连续刚构优化桥型(只下部结构采用钢管混凝土组合桥墩)、新型钢管混凝土组合桁梁桥的结构响应进行有限元对比分析,研究结果可为钢管混凝土组合桁梁桥在近、远场高震区的工程设计提供参考。

1 工程背景

研究工程背景为西部地区某非规则高墩大跨连续刚构桥,桥跨布置为 70 m+130 m+70 m,桥宽 15.2 m,其中上部结构采用预应力混凝土单箱单室大箱梁断面,下部结构采用钢筋混凝土板式墩,左墩墩高 80 m,右墩墩高 60 m。

为改善连续刚构桥(设计方案 1)的静力性能和抗震性能,现提出设计方案 2——连续刚构优化桥

表 1 桥型方案
Tab. 1 Bridge Type Schemes

方案	上部结构	下部结构
1	变截面预应力混凝土箱梁	双肢型钢筋混凝土板式桥墩
2	变截面预应力混凝土箱梁	格构式圆形钢管混凝土桥墩
3	变截面矩形钢管混凝土组合桁梁	格构式圆形钢管混凝土桥墩

型(只下部结构采用钢管混凝土组合桥墩)和设计方案 3——钢管混凝土组合桁梁桥(表 1),各设计方案桥型布置和横断面布置见图 1,2。

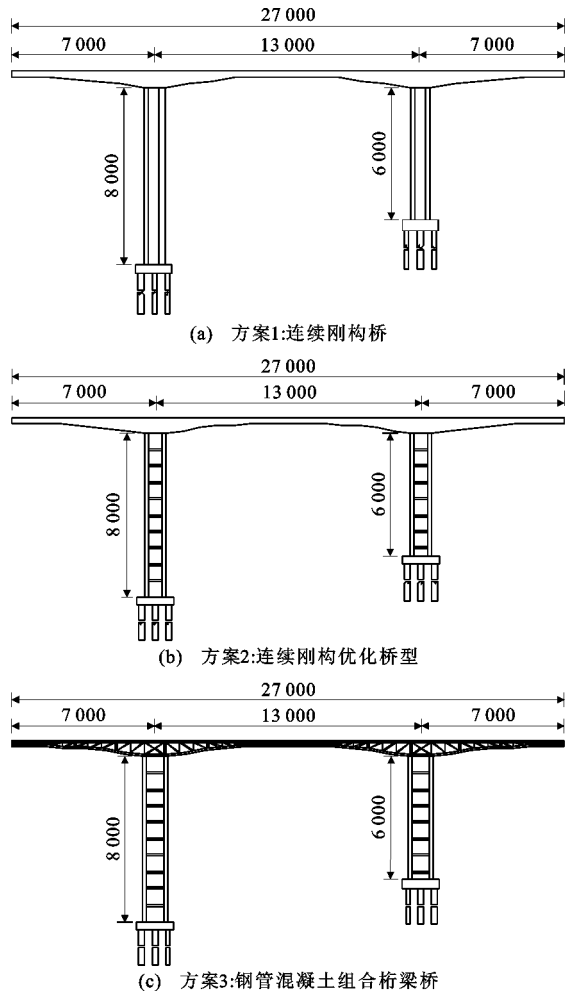


图 1 桥型布置(单位:cm)
Fig. 1 Bridge Type Layout (Unit:cm)

2 地震波选取

桥址处地震设防烈度为 8 度,设计加速度为 0.2g(g 为重力加速度)。为了考虑近、远场地震的差异,远场地震波的选取依据桥梁所处场地条件及地震烈度进行,近场地震波选取结合场地效应和脉冲特性进行。

地震波具有复杂的频谱特性,相对于远场地震

而言,近断层地震动具有断层破裂的强方向性效应、滑冲效应、上盘效应以及大幅值竖向加速度特性等显著区别于远场地震动的特征。因此,为了分析近、远场地震作用下桥梁的地震响应,分别选取 3 条近、远场地震波对结构进行动力响应分析。为了确保地震波的代表性和科学性,本文按照以下原则进行地震波的选取:①按照桥梁所处的场地条件,场地类别选为Ⅲ类场;②所在地震事件的震级大于 6.0 级;③加速度峰值大于等于 0.1g;④所选记录的反应谱及卓越周期接近,近场记录的卓越周期接近于 0.7 s,远场记录的卓越周期接近于 0.4 s;⑤对于近场记录,其所在台站的断层投影距离不大于 10 km,具有明显的长周期脉冲波形,且速度峰值与加速度峰值的比值大于 0.1;⑥对于远场记录,其断层距应大于 30 km。

根据上述原则,分别选取了 3 条具有明显脉冲效应的近场地震波和 3 条远场地震波,各条地震波的基本参数如表 2 所示。图 3,4 分别列出了近、远场地震波的加速度和速度时程曲线,可以看出近场地震波的速度时程曲线存在明显的脉冲效应,而远场地震波频谱分布较均匀。

在进行结构动力响应分析时,各地震波加速度峰值统一调整为 0.2g。为简化起见,仅考虑水平向地震动作用,不考虑竖向地震动作用以及地震动作用的空间组合。各条地震波的加速度反应谱及近、远场均值谱(阻尼比取为 5%)如图 5 所示,从图 5 可看出,2 类地震波的频谱特性存在明显差异。

3 不同桥型方案地震响应对比

各桥型方案的抗震分析采用大型有限元软件 MIDAS/Civil 来进行,为提高计算效率,主梁、桥墩均采用杆系单元模拟(图 6)。各桥型方案均采用刚构体系,地震作用下主梁协同桥墩一起受力,位移最大值一般出现在墩顶,内力反应最大值一般出现在墩底;同时,高墩较低墩地震响应明显。因此,本文在进行抗震分析时,主要关注高墩的墩顶位移、墩底弯矩及墩底剪力等地震响应指标。

3.1 近场地震作用下不同桥型地震响应对比

选取脉冲效应明显的近场地震波 H-E07140 作为输入荷载,对 3 种桥型方案的结构响应进行对比。

图 7 为地震作用下各桥型方案高墩墩顶位移、墩底弯矩及墩底剪力的时程曲线。由图 7(a)可知,在相同近场地震波作用下,方案 2 墩顶位移峰值最大,方案 3 次之,方案 1 最小;由图 7(b),(c)可知,

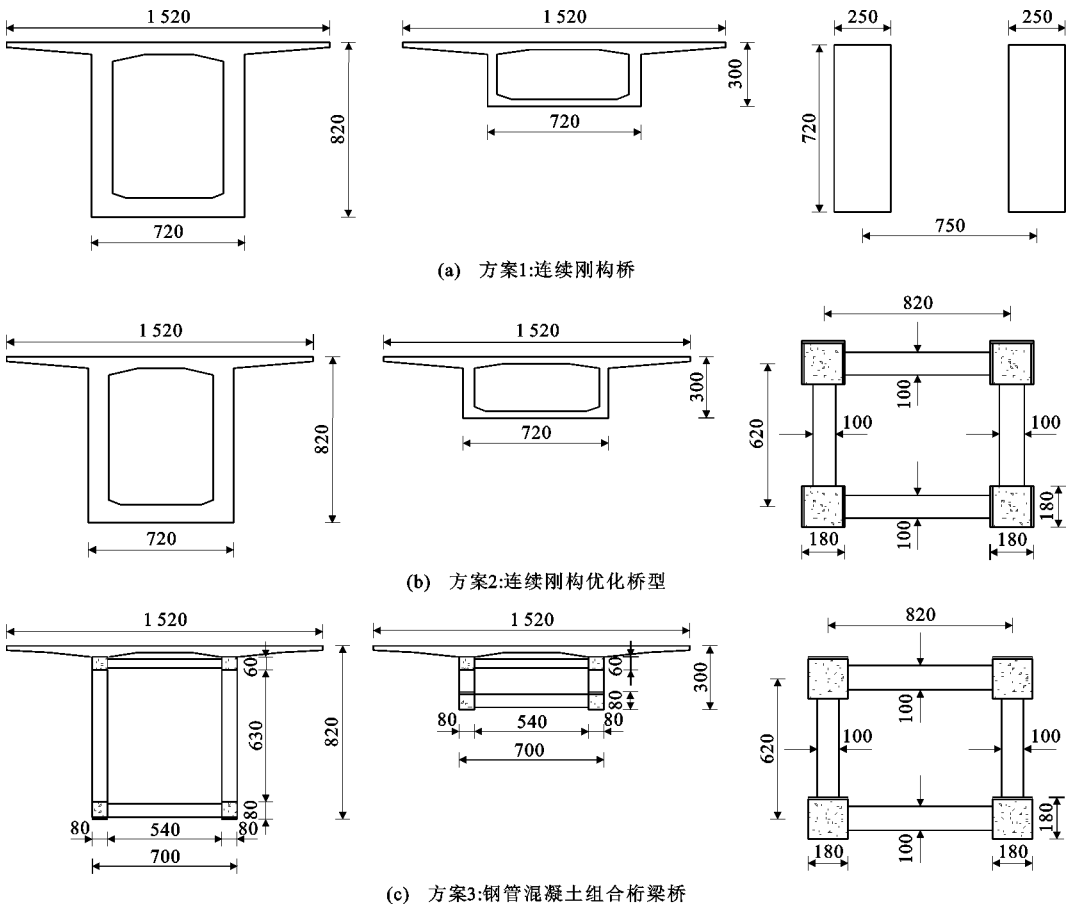


图 2 横断面布置(单位:cm)

Fig. 2 Cross Section Layout (Unit:cm)

表 2 所选取的近、远场地震波

Tab. 2 Selected Near-field and Far-field Earthquake Waves

场地	编号	地震波	地震名称	震级	断层距/km	卓越周期/s	A_p	$V_p/(cm \cdot s^{-1})$	$\frac{V_p}{A_p}/s$
近场	1	RRS228	Northridge	6.7	7.10	0.72	0.838g	166.1	0.202
	2	H-EMO000	Imperial Valley	6.5	0.50	0.66	0.314g	71.7	0.233
	3	H-E07140	Imperial Valley	6.5	0.60	0.70	0.338g	47.6	0.144
远场	1	BAD000	Northridge	6.7	56.10	0.42	0.100g	5.7	0.059
	2	H-C06000	Coalinga	6.4	49.00	0.42	0.126g	10.9	0.089
	3	BRC000	Northridge	6.7	61.60	0.40	0.109g	8.2	0.076

注: A_p 为加速度峰值; V_p 为速度峰值。

墩底弯矩及剪力时程曲线规律恰好与墩顶位移时程曲线相反,方案 1 桥墩弯矩峰值和剪力峰值最大,方案 3 略小于方案 2。

图 8 为各桥型方案桥墩位移、弯矩及剪力沿墩高方向的地震响应分布。从桥墩位移分布可以看出,各方案均是墩顶位移最大,方案 2、方案 3 墩顶位移分别比方案 1 增加 38.4%,30.6%。各方案桥墩最小弯矩位置均出现在墩身中部,方案 1 最大弯矩位置出现在墩顶,而方案 2、方案 3 均出现在墩底,方案 2、方案 3 最大弯矩分别为方案 1 的

79.7%,58.1%;各方案桥墩最大剪力位置均出现在墩底,方案 2、方案 3 最大剪力分别为方案 1 的 38.0%,33.9%。

3.2 远场地震作用下不同桥型地震响应对比

由于远场地震的频谱特性与近场地震差异较大,为了验证地震作用下不同桥型方案结构响应规律的普遍性,选取远场地震波 H-C06000 作为输入荷载,分析 3 种桥型方案的结构地震响应。

图 9 为远场地震作用下各桥型方案高墩墩顶位移、墩底弯矩及墩底剪力的时程曲线。由图 9 可知,

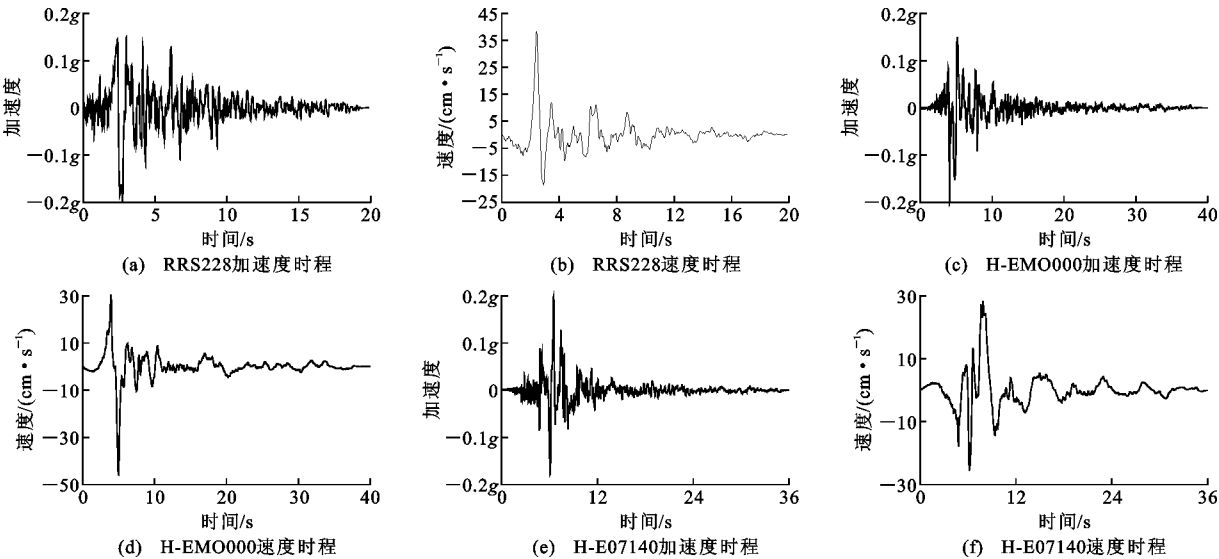


图 3 近场地震波的加速度和速度时程曲线

Fig. 3 Time History Curves of Acceleration and Velocity of Near-field Earthquake Waves

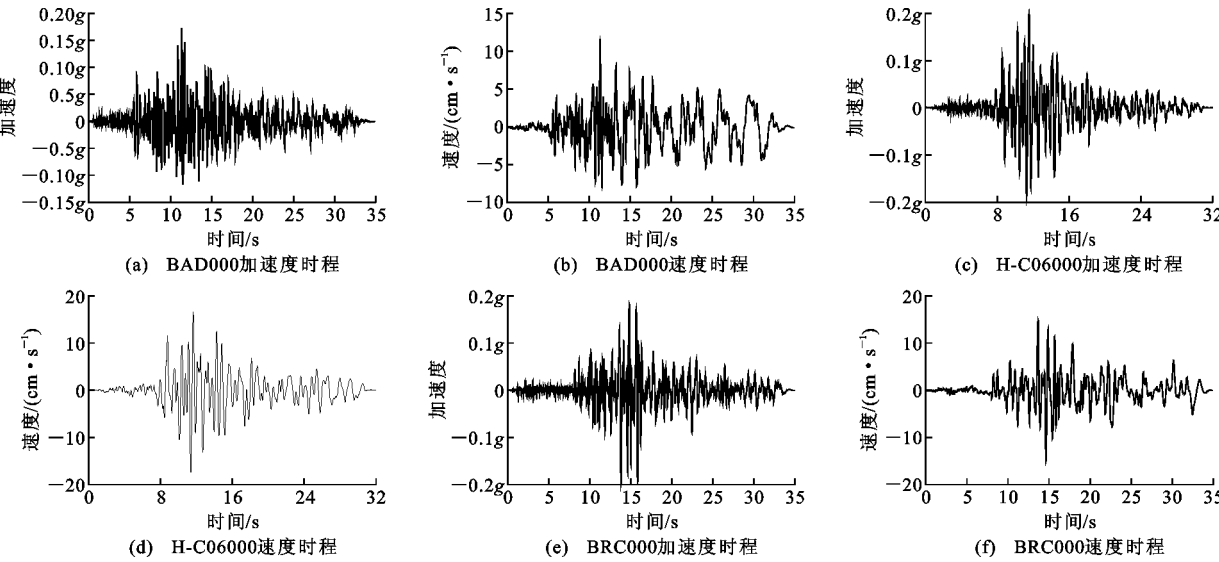


图 4 远场地震波的加速度和速度时程曲线

Fig. 4 Time History Curves of Acceleration and Velocity of Far-field Earthquake Waves

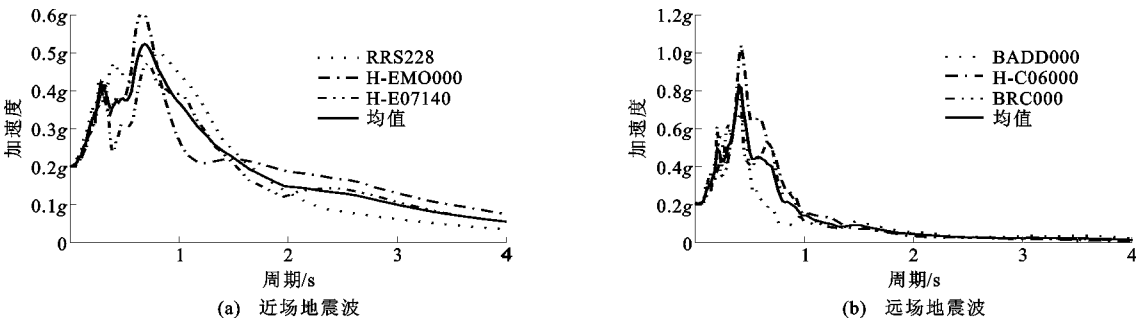


图 5 地震波加速度谱

Fig. 5 Acceleration Spectrums of Earthquake Waves

在相同远场地震波作用下,各桥型方案位移、内力响应规律基本与近场地震作用下保持一致。

图 10 为各桥型方案桥墩位移、弯矩及剪力沿墩高方向的分布。从图 10 可以看出,各桥型方案的地

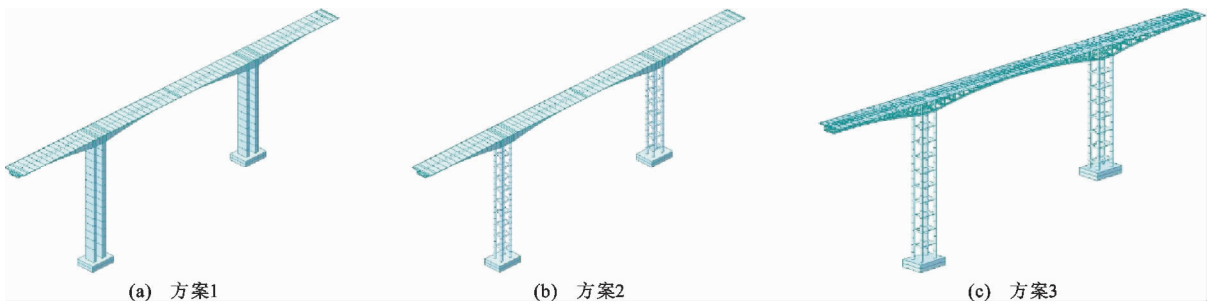


图 6 桥型方案有限元模型

Fig. 6 Finite Element Models of Bridge Schemes

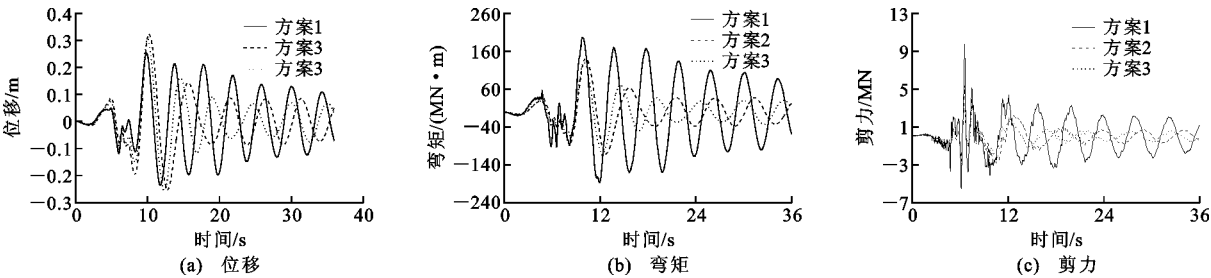


图 7 近场地震波作用下不同桥型动力响应

Fig. 7 Dynamic Responses of Different Bridge Types Under Near-field Earthquake

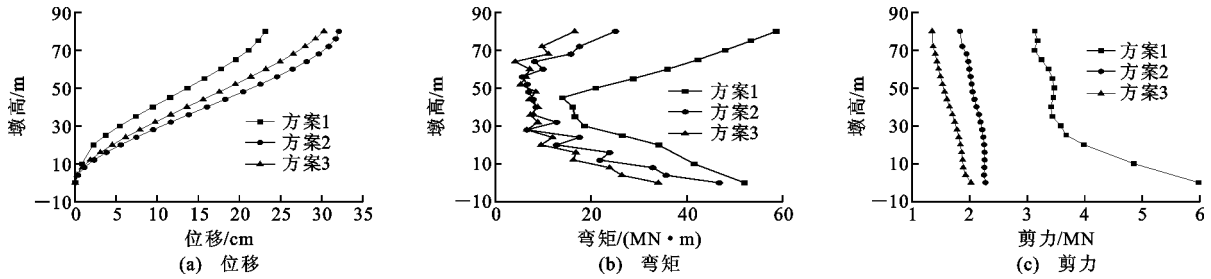


图 8 近场地震波作用下不同桥型桥墩响应

Fig. 8 Pier Responses of Different Bridge Types Under Near-field Earthquake Waves

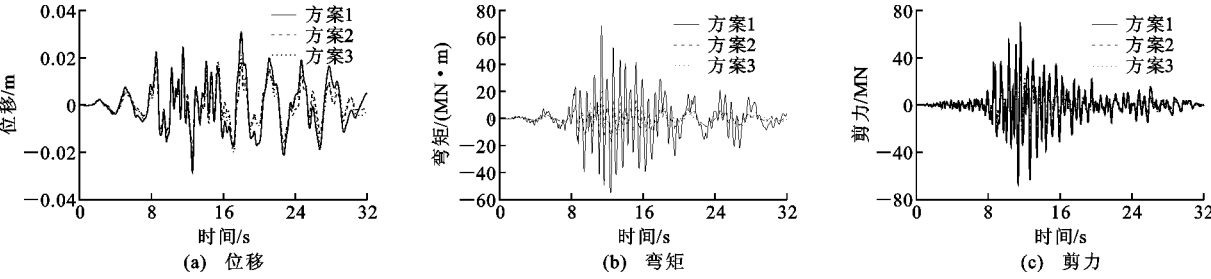


图 9 远场地震波作用下不同桥型动力响应

Fig. 9 Dynamic Response of Different Bridge Under Far-field Earthquake Waves

震响应分布规律与近场地震很相似。远场地震作用下,方案 1 的最大位移为 2.4 cm,方案 2、方案 3 比方案 1 增加 14%,15%。从桥墩弯矩分布可以看出,各方案桥墩最小弯矩位置均出现在墩身中部,方案 1 最大弯矩位置出现在墩顶,而方案 2、方案 3 均出现在墩底,方案 2、方案 3 最大弯矩分别为方案 1 的 85.1%,62.5%;各方案桥墩最大剪力位置均出

现在墩底,方案 2、方案 3 最大剪力分别为方案 1 的 29.0%,23.6%。

通过上述分析可知,无论是在近场地震还是远场地震作用下,方案 1 桥墩位移均要小于方案 2、方案 3,而方案 2、方案 3 的弯矩、剪力要显著低于方案 1,表明格构式钢管混凝土桥墩延性变形能力要明显高于普通钢筋混凝土板式墩,耗能变形致使结构的

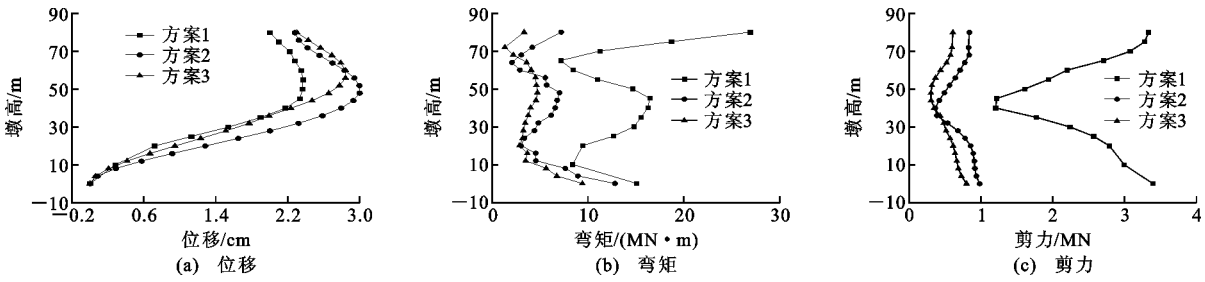


图 10 远场地震波作用下不同桥型桥墩响应

Fig. 10 Pier Responses of Different Bridge Types Under Far-field Earthquake Waves

地震响应内力下降明显。

4 同一桥型方案地震响应对比

大幅值、长周期脉冲作用是近场地震的重要表现特征,这些显著特征导致地震能量以递增的形式传递,难以在短时间内耗散,会对桥梁结构造成更加严重的破坏。相关研究均表明,近断层地震下的结构震害显著区别于远场。因此,有必要对比分析结

构在近、远场地震激励下的响应差异。

图 11,12 分别为各桥型方案在 6 条近、远场地震波作用下的位移和弯矩时程曲线。由图 11 可知,近场地震作用下桥墩墩顶位移明显大于远场地震。由图 12 可知,弯矩时程具有与位移类似的分布特征,近场地震作用下桥墩墩底弯矩要远高于远场地震,是远场地震的数倍。

图 13 为各桥型方案在近、远场地震作用下位移

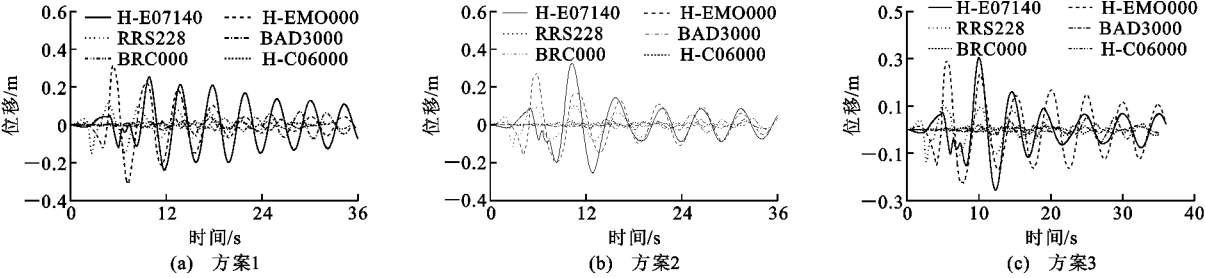


图 11 近、远场地震波作用下不同桥型位移时程曲线

Fig. 11 Time History Curves of Displacements of Different Bridge Types Under Near-field and Far-field Earthquake Waves

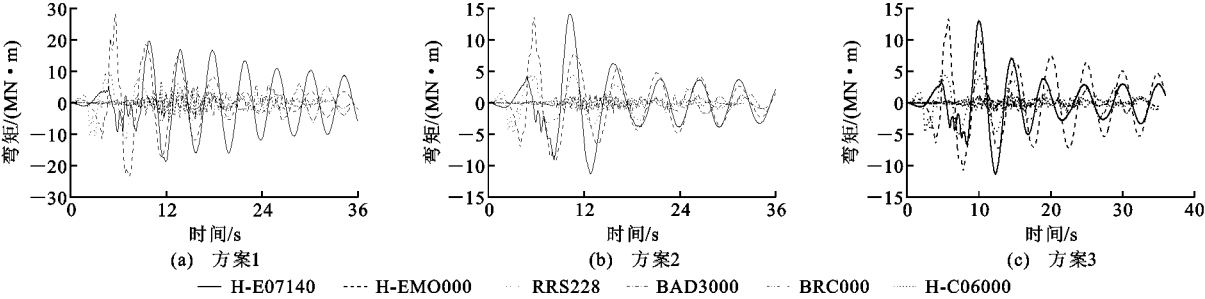


图 12 近、远场地震波作用下不同桥型弯矩时程曲线

Fig. 12 Time History Curves of Bending Moments of Different Bridge Types Under Near-field and Far-field Earthquake Waves

沿墩高方向的分布。由图 13 可知,各类地震波作用下桥墩位移的分布趋势基本一致,但远场地震作用下墩顶位移较小,近场地震作用下的位移呈明显增大趋势。近场地震波 H-E07140, H-EMO000 和 RRS228 作用下,方案 1 桥墩最大位移分别为 22.3, 31.7, 14.5 cm, 方案 2 桥墩最大位移分别为方案 1 的 127.7%, 86.1%, 88.7%, 方案 3 桥墩最大位移分别为方案 1 的 120.2%, 91.8%, 90.4%。远场地

震波 BAD3000, BRC000 和 H-C06000 作用下方案 1 桥墩最大位移分别为 7.3, 4.0, 3.1 cm, 方案 2 桥墩最大位移分别为方案 1 的 72.6%, 85.0%, 74.2%, 方案 3 桥墩的最大位移分别为方案 1 的 75.3%, 65.0%, 74.2%。方案 1 在近、远场地震作用下的位移均值分别为 22.8 cm 和 4.8 cm, 方案 2 在近、远场地震作用下的位移均值分别为 23.3 cm 和 3.7 cm, 方案 3 在近、远场地震作用下的位移均值分别

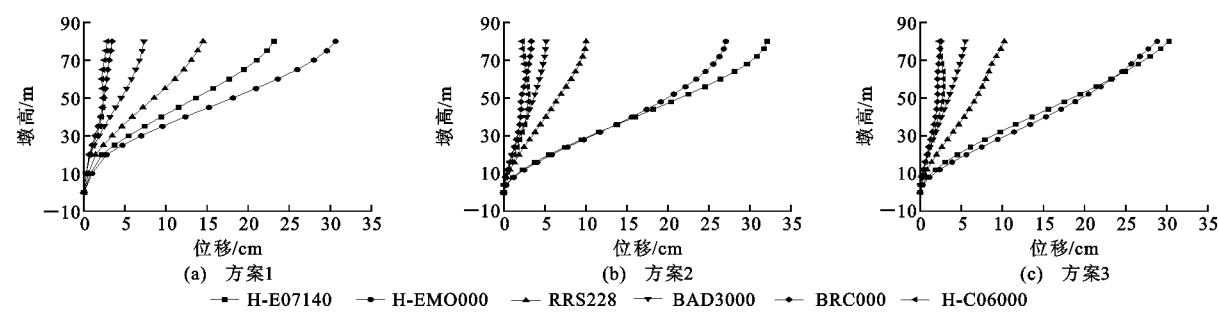


图 13 近、远场地震波作用下不同桥型桥墩位移分布

Fig. 13 Distribution of Pier Displacements of Different Bridge Types Under Near-field and Far-field Earthquake Waves

为 23.3 cm 和 3.5 cm。

图 14 为各桥型方案在近、远场地震波作用下弯矩沿墩高方向的分布。由图 14 可知,在近场地震波 H-E07140, H-EMO000 和 RRS228 作用下,方案 1 墩顶弯矩分别为 58 603, 106 608, 31 097 kN·m, 方案 2 墩顶弯矩分别为方案 1 的 42.7%, 21.7%, 72.8%, 方案 3 墩顶弯矩分别为方案 1 的 28.3%, 19.0%, 24.5%。远场地震作用下方案 1 墩顶弯矩分别为 19 714, 25 418, 26 903 kN·m, 方案 2 墩顶弯矩分别为方案 1 的 25.3%, 27.1%, 26.7%; 方案 3 墩顶弯矩分别为方案 1 的 15.6%, 13.6%, 12.4%。方案 1 在近、远场地震作用下的弯矩均值分别为 65 436 kN·m 和 24 011 kN·m, 方案 2 在近、远场地震作用下的弯矩均值分别为 23 609 kN·m 和 6 347 kN·m, 方案 3 在近、远场地震作用下的弯矩均值分别为 14 819 kN·m 和 3 288 kN·m。

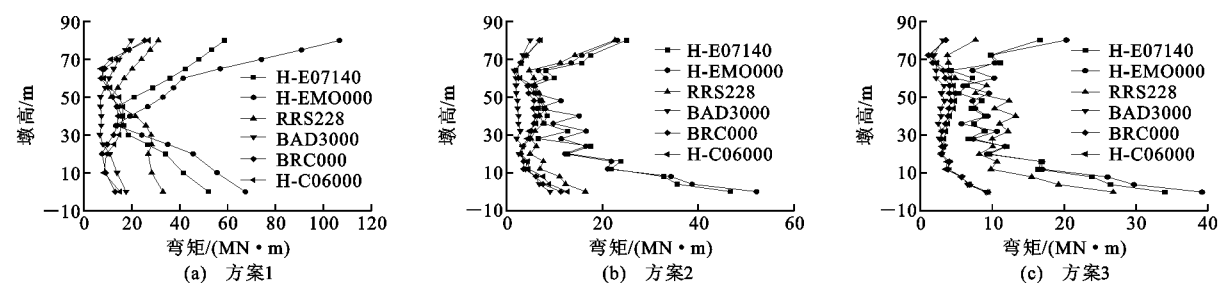


图 14 近、远场地震波作用下不同桥型桥墩弯矩分布

Fig. 14 Distribution of Pier Bending Moments of Different Bridge Types Under Near-field and Far-field Earthquake Waves

通过上述分析可知:各桥型方案桥墩在近场地震作用下的位移响应均明显大于远场地震作用下的位移响应,最大增幅高达 5.7 倍,且近场地震作用下位移时程曲线存在明显的脉冲效应,而远场地震作用下位移时程曲线则比较平缓;各桥型方案桥墩地震响应内力近场地震亦要明显大于远场地震,弯矩最大增幅高达 3.5 倍。

下降分别达 41.9%, 66.1%, 远场地震作用下弯矩、剪力下降分别达 37.5%, 76.4%。

(3)近场地震作用下结构输入的地震能量大幅增加,无论是传统连续刚构桥、还是连续刚构优化桥型以及新型钢管混凝土组合桥梁其桥墩地震响应位移及内力均显著增加,位移最大增幅高达 5.7 倍,弯矩最大增幅高达 3.5 倍。

(4)相对短周期的刚性桥梁,近场地震对柔性体系桥梁的作用更为明显,对新型钢管混凝土组合桥梁进行近场地震波作用下的振动台试验研究是下一步的研究方向。

5 结 语

- (1)为解决传统预应力混凝土连续刚构桥的结构病害和抗震问题,提出了新型钢管混凝土组合桥梁结构形式。
- (2)新型钢管混凝土组合桥梁和下部结构采用钢管混凝土格构式桥墩的连续刚构优化桥型其抗震性能均要明显优于传统混凝土连续刚构桥,新型钢管混凝土组合桥梁抗震性能更为优越,与传统混凝土连续刚构桥相比近场地震作用下弯矩、剪力

参考文献: References:

[1] 刘永健,刘君平,张俊光. 主管内填混凝土矩形和圆形钢管桁架受弯性能对比试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(4): 86-93.

LIU Yong-jian, LIU Jun-ping, ZHANG Jun-guang.

- Experimental Research on RHS and CHS Truss with Concrete Filled Chord[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(4): 86-93.
- [2] 高诣民, 刘永健, 姜磊, 等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土桁架受弯性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 171-180.
- GAO Yi-min, LIU Yong-jian, JIANG Lei, et al. Experimental on Flexural Behaviour of Rectangular Concrete Filled Steel Tubular Truss Stiffened with PBL[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 171-180.
- [3] 刘永健, 刘彬, 戴立先, 等. 装配式矩形钢管混凝土组合桁梁桥: 中国, CN201621053366. 6[P]. 2017-04-12.
- LIU Yong-jian, LIU Bin, DAI Li-xian, et al. Prefabricated Rectangle CFST Composite Truss Bridge; China, CN201621053366. 6[P]. 2017-04-12.
- [4] 刘彬, 刘永健, 周绪红, 等. 中等跨径装配式矩形钢管混凝土组合桁梁桥设计[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(4): 20-31.
- LIU Bin, LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, et al. Design of Mid-span Fabricated RCFST Composite Truss Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4): 20-31.
- [5] LIU Y J, XIONG Z H, LUO Y L, et al. Double-composite Rectangular Truss Bridge and Its Joint Analysis[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition, 2015, 2(4): 249-257.
- [6] 周绪红, 刘永健, 姜磊, 等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土结构力学性能研究综述[J]. 中国公路学报, 2017, 30(11): 45-62.
- ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian, JIANG Lei, et al. Review on Mechanical Behavior Research of Concrete Filled Rectangular Hollow Section Tube Stiffened with PBL[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(11): 45-62.
- [7] 盛叶, 赖成火, 黄文金, 等. 不同截面形式钢管混凝土压弯柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增): 278-284.
- SHENG Ye, LAI Cheng-huo, HUANG Wen-jin, et al. Experimental Research on CFST Member with Different Sections Under Combined Compression and Bending[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(S): 278-284.
- [8] 王宇航, 李硕, 周绪红, 等. 弯-剪-扭耦合荷载作用下钢管混凝土短柱受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(11): 1-12.
- WANG Yu-hang, LI Shuo, ZHOU Xu-hong, et al. Study on Mechanical Behavior of Concrete Filled Steel Tubular Short Columns Under Compound Bending-shear-torsion Load[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(11): 1-12.
- [9] 刘永健, 程高, 张宁, 等. 开孔钢板加劲型方钢管混凝土轴压短柱试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(10): 39-46.
- LIU Yong-jian, CHENG Gao, ZHANG Ning, et al. Experimental Research on Concrete-filled Square Steel Tubular Columns Stiffened with PBL[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(10): 39-46.
- [10] 姜磊, 刘永健, 张俊光. 开孔钢板加劲型方钢管混凝土长柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 122-128.
- JIANG Lei, LIU Yong-jian, ZHANG Jun-guang. Experimental Study on Axial Compression Behavior of Concrete-filled Square Steel Tubular Long Columns Stiffened with PBL[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 122-128.
- [11] DAUNER H G, ORIBASI A, WERY D. The Lully Viaduct, a Composite Bridge with Steel Tube Truss[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46(1/2/3): 67-68.
- [12] MATO F M, CORNEJO M O, RUBIO L M. Viaduct over River Ulla; An Outstanding Composite (Steel and Concrete) High-speed Railway Viaduct[J]. Structural Engineering International, 2014, 24(1): 131-136.
- [13] 张贵忠. 万州大桥钢管混凝土桁架技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- ZHANG Gui-zhong. Study on the Technologies of CFST Truss of Wanzhou Bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.
- [14] 吴庆雄, 黄育凡, 陈宝春. 钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁振动台阵试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 89-96.
- WU Qing-xiong, HUANG Yu-fan, CHEN Bao-chun. Shaking Tables Testing Study of Lightweight Bridge with CFST Composite Truss Girder and Lattice Pier[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(9): 89-96.
- [15] 刘永健, 马印平, 田智娟, 等. 矩形钢管混凝土组合桁梁连续刚构桥实桥试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(5): 53-62.
- LIU Yong-jian, MA Yin-ping, TIAN Zhi-juan, et al. Field Test of Rectangular Concrete Filled Steel Tubular Composite Truss Bridge with Continuous Rigid System[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(5): 53-62.
- [16] 汪碧云, 杨君, 牟廷敏, 等. 钢管混凝土组合高墩在

- 大跨径连续刚构桥梁中的应用[J]. 西南公路, 2011(4):108-115.
- WANG Bi-yun, YANG Jun, MOU Ting-min, et al. Application of Concrete Filled Steel Tubular Combined High Pier in Long Span Continuous Rigid Frame Bridge[J]. Southwest Highway, 2011(4):108-115.
- [17] 吴庆雄, 黄育凡, 陈宝春. 钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁非线性地震响应分析[J]. 工程力学, 2015, 32(12):90-98, 116.
- WU Qing-xiong, HUANG Yu-fan, CHEN Bao-chun. Nonlinear Aseismic Performance of Lightweight Bridge with CFST Composite Truss Girder and Lattice Pier[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(12):90-98, 116.
- [18] 杨 晓, 何庆锋, 刘义仁, 等. 钢管混凝土组合长柱低周往复抗震性能试验[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(6):215-223.
- YANG Xiao, HE Qing-feng, LIU Yi-ren, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Concrete Filled Steel Tube Composite Long Columns Under Low-reversed Cyclic Loading [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(6):215-223.
- [19] 陈伯望, 邹艳花, 唐 楚, 等. 四肢方圆钢管混凝土格构柱低周反复加载试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增2):108-112.
- CHEN Bo-wang, ZOU Yan-hua, TANG Chu, et al. Contrast Research on Square and Circular CFST Laced Columns Pseudo-static Test [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S2):108-112.
- [20] 王 灿. 基于 OpenSees 的薄壁钢箱混凝土墩柱抗震性能分析[D]. 西安:长安大学, 2014.
- WANG Can. Seismic Behaviors Analysis of Concrete-filled Thin-walled Square Steel Box Piers Based on OpenSees[D]. Xi'an:Chang'an University, 2014.
- [21] 吕西林, 陈 聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1):27-36.
- LU Xi-lin, CHEN Cong. Research Progress in Structural Systems with Replaceable Members[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1):27-36.
- [22] 杨有福, 刘 敏. 格构式钢管混凝土构件抗震性能研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12):10-20.
- YANG You-fu, LIU Min. Progress of Research on Seismic Behavior of Concrete-filled Steel Tube Latticed Members [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12):10-20.