

文章编号: 1674-599X(2021)02-0047-08

地震作用下多跨简支梁桥挡块优化设计研究

葛雄, 魏征, 邓育林

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 为研究墩柱损伤时弹塑性挡块的合理参数设计, 以三跨简支梁桥为例, 建立了 OpenSees 有限元软件计算模型。通过非线性时程分析, 动态调整挡块屈服强度, 建立了挡块屈服与墩柱损伤状态之间的直观联系, 分析了弹塑性挡块初始刚度、屈服后刚度比参数。研究表明: 挡块强度的增大, 其限位能力也增强; 当桥墩挡块强度的设定以桥墩达到中等损伤为目标时, 有利于地震惯性力合理分配; 挡块初始刚度的增大, 可有效降低主梁位移响应, 其对桥墩地震响应的影响较挡块强度的小; 强震作用下挡块屈服后, 桥梁地震响应对挡块屈服后刚度的变化十分敏感, 较小的屈服后刚度比对下部结构抗震有利, 同时不会造成上部结构位移需求的急剧增长。

关键词: 横向地震; 简支梁桥; 墩柱损伤; 挡块; 参数分析

中图分类号: U448.21⁺7

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.008

Study on optimum design of transverse retainer of multi-span simply supported bridges considering the earthquake

GE Xiong, WEI Zheng, DENG Yu-lin

(School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to study the reasonable parameter of the elastic-plastic retainer considering the damage of the pier column, a three-span simply supported girder bridge model was established using the finite element software of OpenSees. The yield strength of retainer was dynamically adjusted through nonlinear time history analysis. An intuitive connection was established between the yield strength of the retainer and the damage state of the pier column. The initial stiffness of the elastoplastic retainer and the stiffness ratio after yielding were analyzed. The results show that, the action of retainer can be improved by increasing the strength. When the strength of the retainer is set to achieve the moderate damage stress of the pier, it is conducive to reasonably distribute the seismic inertial force. The displacement response of main beam can be reduced effectively by increasing the initial stiffness of the retainer. The influence of initial stiffness on the seismic response of the pier is smaller than that of the strength. When the yield of retainer is induced by the strong earthquake, the seismic response of the bridge is very sensitive to the change of the stiffness. A small post-buckling stiffness ratio is beneficial to the seismic resistance of the substructure, and the sharp increase displacement demand of the upper structure can be limited.

Key words: lateral earthquake; simply supported beam bridge; pier column damage; retainer; parameter analysis

收稿日期: 2020-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678459); 湖北省交通运输厅科技项目(018-422-1-2); 湖北省技术创新专项重大项目(2018AAA031)

作者简介: 葛雄(1996-), 男, 武汉理工大学硕士生。

在桥梁抗震设计中,挡块在各构件间建立安全强度等级,保护关键构件,常被设计为可牺牲构件,广泛应用于公路桥梁的盖梁和桥台,限制上部结构的横向位移,并避免破坏下部结构。根据地震灾害调查研究,由于地震作用下梁体与支座间产生相对位移,造成横向挡块普遍破坏以及落梁风险^[1]。因此,合理的挡块参数设计对桥梁抗震至关重要。

近年来国内外学者研究挡块对桥梁地震反应的影响的并不多。徐略勤^[2]等人提出了弹塑性挡块的简化滞回模型,并与 2 种简化挡块的抗震分析法进行了对比,试验结果表明:挡块对桥梁墩柱的性能状态有显著影响。刘笑显^[3]等人研究了 X 形弹塑性钢挡块对简支梁桥桥墩地震响应的影响。Han^[4-5]等人根据现行的中国公路桥梁抗震设计指南,设计了 6 种挡块试验模型,研究了纵、横配筋率对桥梁挡块抗震能力的影响。项乃亮^[6]等人设计了简支梁桥缩尺模型,对不同墩梁横向约束体系的结构开展了振动台试验,试验结果表明:新型弹塑性挡块具有良好稳定的滞回耗能能力。Megally^[7-8]等人通过试验研究了桥台处可牺牲的内外剪力键的抗震性能。曹操^[9]等人对曲线梁桥进行了地震作用下有无桩土作用的非线性动力弹塑性时程分析,探讨了其响应状态。蒋建军^[10]等人对地震作用下的大跨连续刚构桥箱梁,主墩墩型和支座类型的影响进行抗震分析,并提出了减震措施。既往的研究表明:挡块的限位能力对桥梁下部结构的地震响应有显著影响,但并未研究墩柱的损伤状态与弹塑性挡块的屈服强度关系。因此,作者拟以三跨简支梁桥为例,进行单墩横桥向推倒分析,获得桥墩损伤指标,并将其作为挡块强度设计目标。通过非线性时程分析,得到桥墩在各级损伤状态下对应的挡块屈服强度,同时考虑挡块初始刚度、屈服后刚度等参数的影响,探究挡块最优参数设计,以期为类似桥梁的挡块设计提供参考。

1 桥例概况与有限元模型

算例桥梁为 3×20 m 简支梁桥,横向全桥宽 11.75 m,上部结构为预应力钢筋混凝土空心板梁,沿横向布置 2 片边梁,8 片中梁,下部结构采用桩基帽梁式桥台,双柱式桥墩,如图 1 所示。桥墩为圆形截面,直径 1.4 m,墩高 4 m。桩基采用桩柱式

钻孔灌注桩,桩顶设置系梁。双柱墩墩顶设置盖梁,上部结构支承于盖梁顶部的板式橡胶支座上。桥台处采用滑板支座,桥墩处采用普通板式橡胶支座。挡块位于盖梁与桥台帽梁两侧。

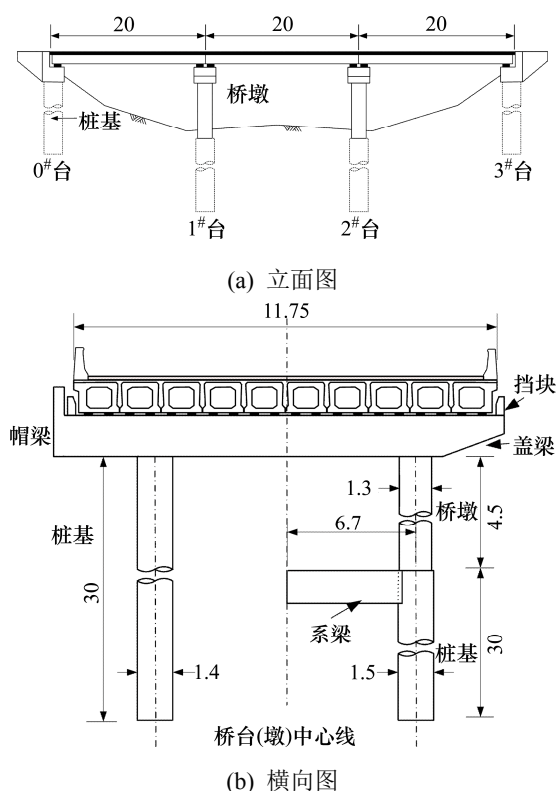


图 1 桥梁示意(单位: m)

Fig. 1 Elevation and cross section of the bridge (unit: m)

本研究采用 OpenSees 有限元软件建立模型进行静力分析和非线性时程分析,其有限元模型如图 2 所示。主梁、盖梁均采用线弹性梁单元模拟,并采用非线性 $p-y$ 曲线法建立桥台桩基-土动力相互作用计算模型。主梁左、右两侧设置弹塑性挡块,根据 Megally^[7]等人的试验结果,其简化的双折线模型如图 3 所示。其中, K_0 为挡块初始刚度; F_y 为屈服强度; Δy 为屈服位移; Δu 为极限位移; αK_0 为挡块屈服后刚度; 1#~4# 为关键截面。在 OpenSees 中,采用 Hysteretic Material 模拟挡块的非线性行为,挡块与主梁间隙设置为零,不考虑主梁与挡块之间的碰撞。

考虑到桥墩在强震作用下会进入非线性状态,为了反映桥墩的非线性地震响应及结果的准确性,墩柱单元采用 OpenSees 中的非线性梁柱单元建立,并将墩柱划分为纤维截面,如图 4 所示。

桥墩保护层混凝土及核心混凝土均采用基于

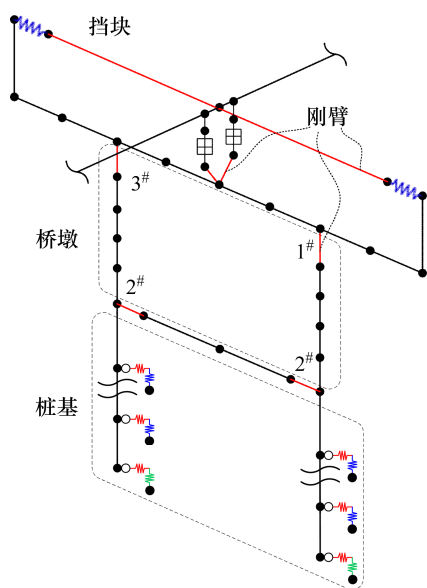


图2 桥例有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the bridge

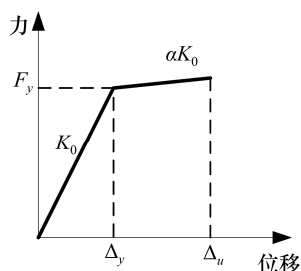


图3 理想弹塑性挡块模型

Fig. 3 Elastic-plastic model of retainer

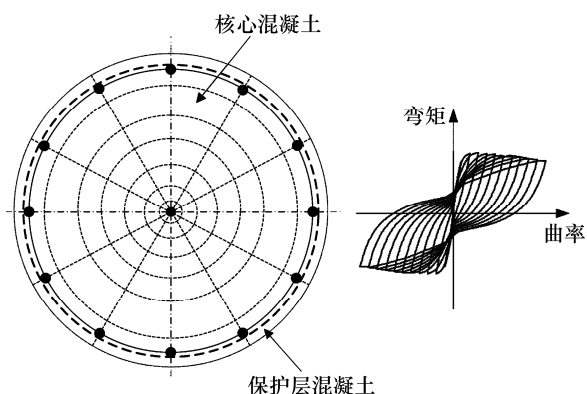


图4 桥墩纤维截面模型及弯矩-曲率关系

Fig. 4 Fiber section model and moment-curvature relationship for the bridge pier

Kent-Scott-Park 模型的 Concrete1 材料, 钢筋采用 Steel2 材料, 在 Menegotto-Pinto 钢筋模型基础上, 考虑了等效强化效应得到 Steel2 材料。钢筋和混凝土本构如图 5 所示。钢筋屈服强度 f_y 为 335 MPa, 初始弹性模量 e_s 为 2.06×10^8 。对于桥墩混凝土, f_{pc}

为混凝土 28 d 抗压强度, e_0 为混凝土达到峰值应力对应的应变, f_{pcu} 为混凝土碎裂强度, e_u 为达到碎裂强度时对应应变, 混凝土保护层混凝土和核心混凝土的 f_{pc} 分别为 28.00, 31.96 MPa, e_0 分别为 0.002, 0.004, f_{pcu} 分别为 0.6, 400 MPa, e_u 分别为 0.006, 0.01。

2 桥墩损伤指标确定

按照能力保护设计原则, 桥墩通常被设计为延性构件。在地震作用下, 墩柱底部形成塑性铰, 耗散地震能量, 因此, 墩柱的损伤状态是衡量桥梁结构地震损伤的关键指标。采用位移控制的加载模式进行单墩横桥向 Pushover 分析, 同时考虑 p-delta 效应及桥墩自重, 以期得到墩柱损伤状态。

2.1 研究方法

本算例桥梁采用双柱式桥墩, 为了方便数据处理, 双柱墩墩顶墩底截面按照图 1 编号, 横向推力作用于盖梁中点, 采用位移控制的单向加载模式。考虑到分析结果的精确性, 位移控制的加载步长调整为 5 mm, 对纤维墩柱进行 Pushover 分析, 得到各关键截面的钢筋、保护层混凝土和核心混凝土任意位移步时对应的应力、应变以及单向加载时的各截面弯矩-曲率关系, 并对墩柱进行弯矩曲率分析。

2.2 损伤指标

墩柱损伤状态研究中, 延性是量化墩柱地震作用下损伤状态重要指标之一, 包括曲率延性比、位移延性比等。本研究依据 Pan^[8]等人的研究成果, 将地震作用下桥墩损伤状态划分为无损伤、轻微损伤、中等损伤、严重损伤、完全损伤。采用曲率延性比作为损伤指标, 其计算式为:

$$\mu_\phi = \frac{\phi_{D_i}}{\phi_y} \quad (1)$$

式中: ϕ_{D_i} 为 5 个损伤状态对应的 4 个临界曲率; ϕ_y 为钢筋等效屈服时对应的曲率。

墩柱弯矩-曲率关系曲线上标定 4 个临界点作为 II ~ V 级损伤起点。各损伤状态下对应的墩柱性能、损伤表现及损伤指标见表 1。

2.3 结果分析

双柱墩各截面最外侧钢筋首次屈服及截面受压侧保护层和核心混凝土达到峰值应力时对应的位移如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 在单向力作

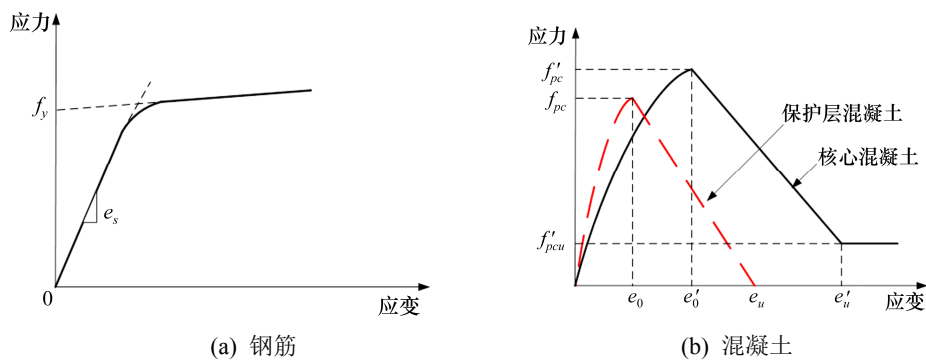


图 5 钢筋混凝土本构

Fig. 5 Constitutive model of concrete and steel

表 1 墩柱损伤指标

Table 1 Damage index of bridge pier

损伤状态	损伤表现	定性描述	损伤指标
I 无损伤	混凝土表面细微裂缝	仅出现细小裂缝	$0 < \mu_\phi \leq \mu_{\phi i}$
II 轻微损伤	混凝土表面明显开裂	第一根钢筋理论屈服	$\mu_{\phi i} < \mu_\phi \leq 1$
III 中等损伤	塑性铰开始形成	受拉钢筋等效屈服	$1 < \mu_\phi \leq \mu_{\phi dl}$
IV 严重损伤	塑性铰完全形成，混凝土剥落	保护层混凝土达到峰值应变	$\mu_{\phi dl} < \mu_\phi \leq \mu_{\phi u}$
V 完全损伤	墩柱屈服，核心混凝土压碎	核心混凝土达到峰值应变	$\mu_\phi > \mu_{\phi u}$

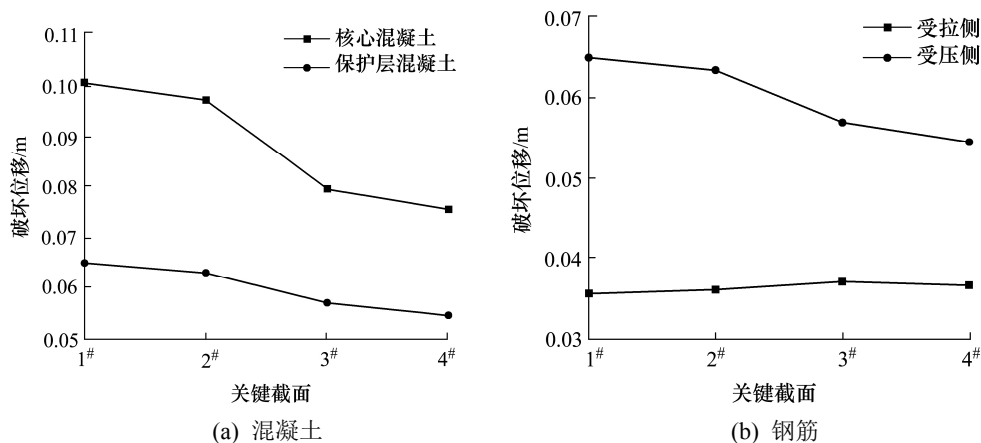


图 6 混凝土与钢筋首次屈服位移

Fig. 6 First-yield displacement of concrete and steel

用下，各关键截面受拉侧钢筋首次屈服时间相差不大，受压侧钢筋和混凝土最早屈服位置均出现在 4[#] 截面，同时考虑到在地震作用下塑性铰常出现在墩底截面，所以选定 4[#] 截面(右墩底)作为危险截面进行弯矩曲率分析。

横向推力-位移曲线如图 7 所示，参考 Priestley^[11] 建议的弯矩-曲率近似曲线进行弯矩曲率分析，确定纤维墩柱损伤指标。在 OpenSees 中进行单墩 pushover 分析后，经过处理得到的墩底截面弯矩-曲率近似曲线，如图 8 所示。得到了各个损伤状态对应的临界曲率和曲率延性比，见表 2。

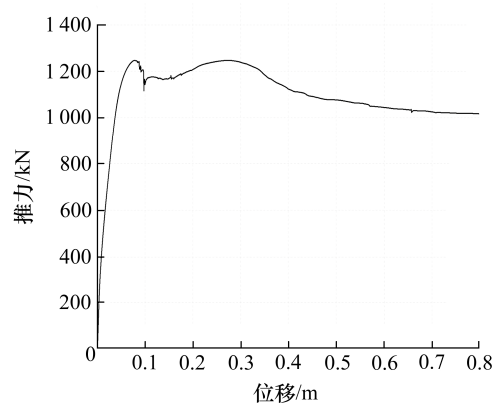


图 7 推力-位移曲线

Fig. 7 Force-displacement curve

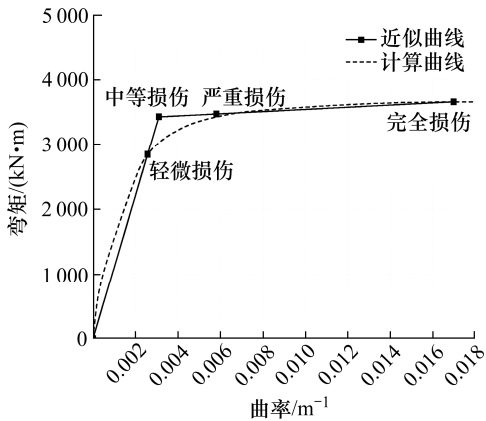


图 8 Priestley 建议的弯矩-曲率近似曲线

Fig. 8 Similar $M-\phi$ relation curve proposed by the Priestley

表 2 桥墩量化损伤指标

Table 2 Quantified damage index of bridge pier		
损伤状态	截面曲率/ m^{-1}	曲率延性比
II	0.002 57	0.829
III	0.003 10	1.000
IV	0.005 81	1.875
V	0.016 97	5.476

3 弹塑性挡块参数分析

为研究挡块屈服与墩柱损伤状态之间的关系，在 OpenSees 有限元软件中，对桥墩挡块屈服强度进行了网格时程分析，得到了桥墩在各级损伤状态下对应的挡块屈服强度 F_y ，并对各挡块强度下挡块初始刚度 K_0 、屈服后刚度 α 等参数变化对横桥向地震响应的影响进行了研究，优化弹塑性挡块参数设置。

在进行桥梁结构非线性时程地震反应分析时，从美国太平洋地震工程研究中心的强震数据库 (pacific earthquake engineering research center, 简称为 PEER) 中选取 10 条场地类别接近的实测地震加速度时程，见表 3。考虑到墩柱在强震下才进入非线性状态，将每条地震波的峰值加速度 (peak ground acceleration, 简称为 PGA) 调整为 0.4 g。

3.1 桥墩挡块强度的确定

通过桥墩挡块屈服强度网格时程分析，动态调整桥墩挡块强度，使桥墩达到目标损伤状态，得到各级损伤状态对应的挡块强度，分析过程中保持桥台挡块各项参数、桥墩挡块初始刚度 $K=3\times10^5\text{ kN/m}$ 、屈服后刚度比 $\alpha=0.03$ 不变。

挡块屈服强度变化时墩底截面曲率结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出，随着挡块屈服强度的增

Table 3 Selected seismic waves			
序号	地震事件	测站名称	PGA/g
1	Borrego Mtn	El Centro Array 9 [#] (180)	0.132 7
2	Coalinga-01	Parkfield - Fault Zone 2(000)	0.118 0
3	Northridge-01	Camarillo(267)	0.126 9
4	Loma Prieta	Palo Alto-1900 Embarc.(055)	0.214 6
5	Taiwan SMART1(45)	SMART1 C00(NS)	0.153 0
6	Taiwan SMART1(45)	SMART1 E01(EW)	0.160 0
7	Taiwan SMART1(45)	SMART1 M07(EW)	0.155 3
8	Taiwan SMART1(45)	SMART1 M07(NS)	0.160 9
9	Cape Mendocino	Eureka-Myrtle & West(090)	0.178 2
10	Landers	Indio-Coachella Canal(090)	0.109 4

加，墩底截面曲率逐渐增大，桥墩由弹性进入非线性状态，直至塑性铰完全形成，墩柱严重损伤。非线性时程分析结果表明：墩柱 II、III、IV 级损伤对应的挡块屈服强度分别为 $F_{y1}=636.7\text{ kN}$ ， $F_{y2}=832.4\text{ kN}$ ， $F_{y3}=1\,500.6\text{ kN}$ 。

墩底截面弯矩-曲率时程结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出，当桥墩挡块强度较小时，通过

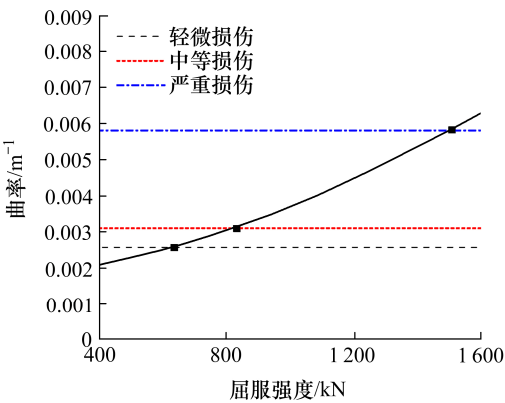


图 9 墩底截面曲率(10 条波平均值)

Fig. 9 Section curvature of pier bottom

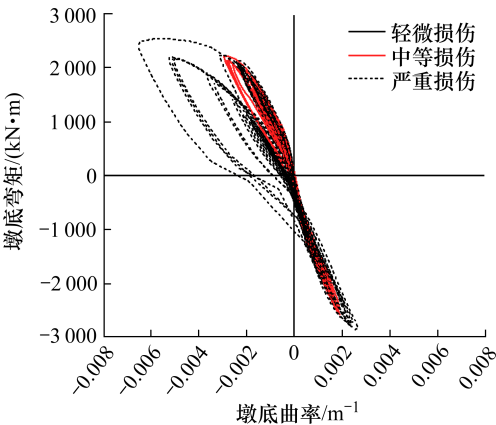


图 10 墩底弯矩-曲率时程

Fig. 10 $M-\phi$ curve of pier bottom

挡块传递到下部结构的地震力有限,墩底弯矩-曲率时程曲线呈狭长形,桥墩处于弹性状态,随着挡块强度的增大,墩底截面开始产生非弹性变形,形成塑性铰耗散地震能量。挡块强度继续增大,墩底截面变形迅速发展,塑性铰完全形成,桥墩在地震作用下严重损伤。

横向加载 10 条地震波时,墩身弯矩及主梁各节点横向位移响应平均值如图 11 所示。从图 11 中可以看出,随着挡块屈服强度增大,主梁各关键节点位移均呈减小趋势,挡块发挥出显著的限位作用,但会加剧桥墩损伤。挡块强度由 F_{y1} 增大到 F_{y2} 时,墩柱由轻微损伤变为中等损伤,墩底弯矩增加 6.3%,墩底开始形成塑性铰耗散地震能量,桥墩处主梁位移减小 5.0%。当挡块强度继续增大到 F_{y3} 时,桥墩处于严重损伤状态,墩底塑性铰完全形成,墩底弯矩增幅达到 17.7%,而桥墩处主梁位移降幅仅为 9.5%。表明:调整挡块强度使桥墩底部形成塑性铰后,继续增大挡块屈服强度,会使得上下部结构

地震力分配失衡,对下部结构抗震不利。桥墩挡块强度的设定以桥墩达到中等损伤为目标,更有利于上、下部结构地震惯性力合理分配。

3.2 初始刚度的影响

挡块的初始刚度受到挡块材料弹性模量、几何参数、配筋率的影响,对桥梁横桥向整体刚度有着不可忽视的贡献。参考刘笑显^[3]等人对弹塑性挡块的研究,将初始刚度设置为 5 个等级 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 ,取值分别为 5×10^4 kN/m、 1×10^5 kN/m、 2×10^5 kN/m、 3×10^5 kN/m、 4×10^5 kN/m,挡块屈服后刚度 α 取 0.03。在不同的挡块强度下,上部结构地震响应随挡块初始刚度变化如图 12 所示。从图 12(a)中可以看出,在各设定的挡块强度下,桥墩达到了相应的损伤状态,挡块初始刚度也会影响桥墩地震响应,墩底曲率随着挡块初始刚度提高而增大。挡块强度为 F_{y2} 时,随着初始刚度的增大,墩柱由轻微损伤变为中等损伤,挡块初始刚度对桥墩地震响应的影响较挡块强度的小。表明:各挡块强度下,提高挡块初始刚度,均可有效降低主梁位移需求,桥墩处主梁位移最大降幅为 15.9%。其原因为:挡块初始刚度增大使得横桥向整体刚度增大,挡块发挥出了更为显著的限位作用,但在初始刚度达到 K_4 后,在地震作用下主梁横向位移需求趋向于稳定;挡块刚度继续增大,对降低其地震响应影响有限。

3.3 屈服后刚度比的影响

弹塑性挡块采用双线性恢复力模型,挡块屈服进入塑性阶段后,刚度显著下降,常用屈服后刚度比来量化其刚度折减。为了解挡块屈服后刚度比对桥梁结构地震响应的影响,将屈服后刚度比 α 分别设置为 0.01、0.03、0.06、0.09、0.12。各挡块强度下,上部结构地震响应随挡块屈服后刚度比变化如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,在各设定挡块强度下,屈服后刚度比对桥梁横向地震响应影响显著。随着屈服后刚度比增大,墩底变形逐渐增大。挡块强度为 F_{y2} 时,挡块屈服后刚度增大使得墩柱由轻微损伤变为严重损伤,墩底截面变形急剧增长,墩底曲率最大增幅达到 116.4%。同时,屈服后强度增大使得桥墩处主梁位移有所减小,但最大降幅仅为 15.9%。结合其对下部结构响应的影响,屈服后刚度比取较小

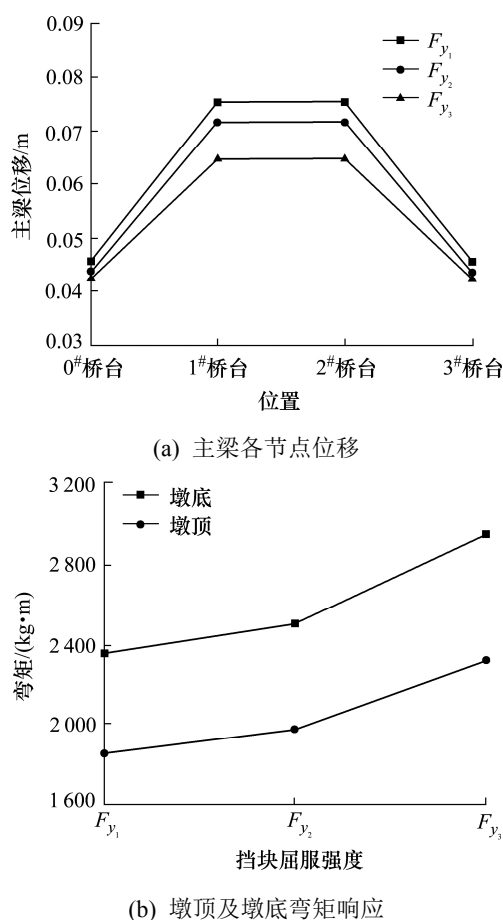
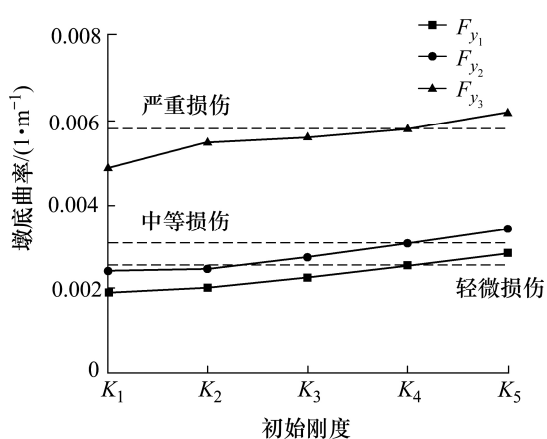
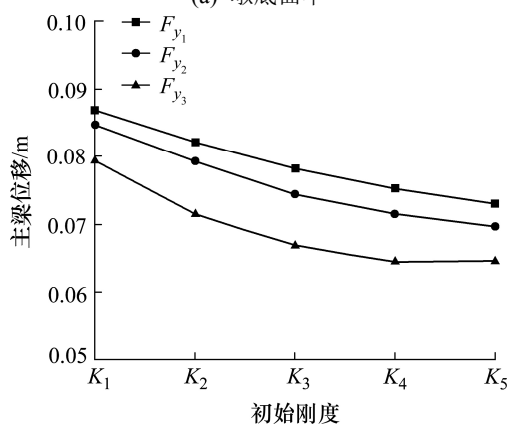


图 11 桥梁地震响应

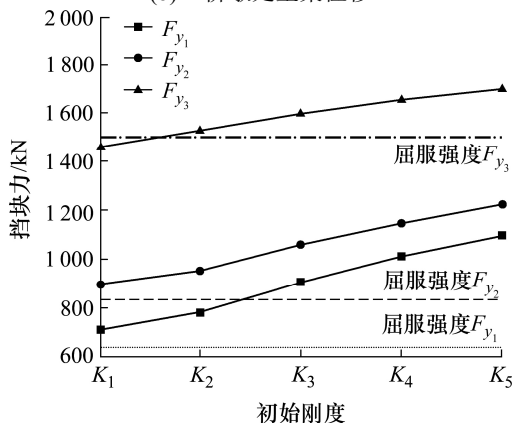
Fig. 11 Seismic response of bridge



(a) 墩底曲率



(b) 1#桥墩处主梁位移

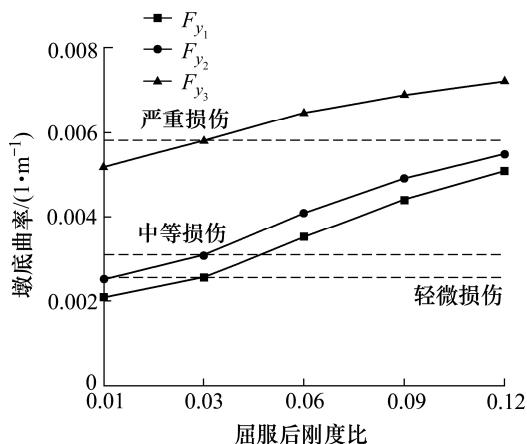


(c) 1#桥墩挡块力

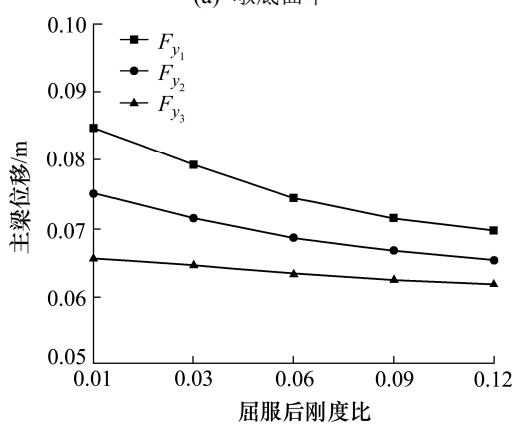
图12 初始刚度对横桥向地震响应的影响

Fig. 12 Effect of initial stiffness on transverse seismic response

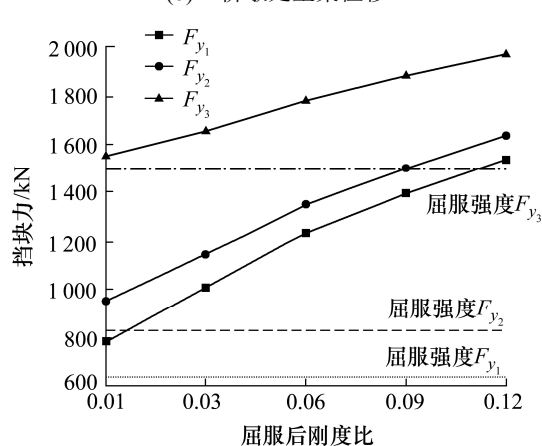
数值时,对下部结构抗震有利,同时不会对主梁位移需求产生较大影响。从图13(c)可以看出,各设定挡块强度下,挡块均已进入塑性状态,使得桥梁结构地震响应对挡块屈服后刚度的变化十分敏感。随着屈服后刚度的增加,通过挡块传递至下部结构的地震力迅速增长,导致墩柱损伤加剧,这一现象在挡块强度较低时更为显著。



(a) 墩底曲率



(b) 1#桥墩处主梁位移



(c) 1#桥墩挡块力

图13 屈服后刚度比对横桥向地震响应的影响

Fig. 13 Effect of post-yield stiffness on transverse seismic response

4 结论

通过建立量化的简支梁桥墩柱损伤指标,并将弹塑性挡块屈服强度与墩柱损伤状态有机结合。采用非线性时程分析方法,得到了桥墩在各损伤状态

下对应的挡块强度,同时对挡块初始刚度与屈服后刚度比进行了参数分析,得到结论:

1) 挡块强度增大会使得其限位能力增强,但调整挡块强度使桥墩底部形成塑性铰后,继续增大挡块屈服强度,会导致上、下部结构地震力分配失衡,对下部结构抗震不利。桥墩挡块强度设定以桥墩达到中等损伤为目标,有利于地震惯性力合理分配。

2) 挡块初始刚度的增大,可有效降低主梁位移需求,但初始刚度增至 3×10^5 kN/m 后,上部结构横向位移需求趋向于稳定,传递到下部结构的惯性力却会持续增加。总而言之,挡块的初始刚度对桥墩地震响应的影响较挡块强度的小,合理设置初始刚度能使桥梁地震响应最小化。

3) 强震作用下,挡块屈服进入塑性状态后,桥梁结构地震响应对挡块屈服后刚度的变化十分敏感,随着屈后刚度的增加,通过挡块传递至下部结构的地震力迅速增长,导致墩柱损伤加剧。屈后刚度比取较小数值时,对下部结构抗震有利,同时不会对主梁位移需求产生较大影响。

参考文献(References):

- [1] 范立础,李建中.汶川桥梁震害分析与抗震设计对策[J].公路,2009,54(5):122-128.(FAN Li-chu,LI Jian-zhong. Analysis of Wenchuan bridge seismic damage and anti-seismic design countermeasures[J].Highway,2009, 54(5): 122-128.(in Chinese))
- [2] 徐略勤,李建中.挡块对规则连续梁桥简化抗震分析方法的影响[J].世界地震工程,2013,29(2):124-131.(XU Lue-qin, LI Jian-zhong. Effects of retainer on simplified seismic analytical methods for regular continuous girder bridge[J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(2): 124-131.(in Chinese))
- [3] 刘笑显,李建中,陈旭.X形弹塑性钢挡块对简支梁桥横向地震反应影响[J].振动与冲击,2015,34(2): 143-149. (LIU Xiao-xian,LI Jian-zhong,CHEN Xu.Effects of X-shaped elastic-plastic steel shear keys on transverse seismic responses of a simply-supported girder bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(2): 143-149.(in Chinese))
- [4] Han Q, Zhou Y L,Zhong Z L, et al. Seismic capacity evaluation of exterior shear keys of highway bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(2): 4016119.
- [5] 吴刚,成志辉,王克海,等.中小跨径梁桥横向混凝土挡块模型及参数影响分析[J].地震工程与工程振动,2018, 38(1):170-177.(WU Gang, CHENG Zhi-hui, WANG Ke-hai, et al. Effect analysis of mechanical models and parameters of shear keys of small-to-medium spanning highway bridges in transverse direction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(1): 170-177.(in Chinese))
- [6] 项乃亮,李建中.考虑板式支座滑移的中小跨度梁式桥振动台试验[J].土木工程学报,2018,51(7):104-111. (XIANG Nai-liang, LI Jian-zhong. Shaking table tests of a short to medium-span girder bridge considering the sliding of laminated-rubber bearings[J]. China Civil Engineering Journal,2018,51(7):104-111.(in Chinese))
- [7] Megally S, Silva P, Seible F. Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutments[R]. Department of Structural Engineering, University of California, 2001.
- [8] Pan Y, Agrawal A K,Ghosn M. Seismic fragility of continuous steel highway bridges in New York State[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6): 689-699.
- [9] 曹操,李传习,刘永明.小半径曲线连续梁桥地震反应分析[J].交通科学与工程,2018,34(2):64-70.(CAO Cao, LI Chuan-xi, LIU Yong-ming. Seismic response analysis of minor radius curve continuous beam bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(2): 64-70.(in Chinese))
- [10] 蒋建军,郑万山,唐光武,等.大跨连续刚构桥箱梁抗震分析与减震措施研究[J].公路工程. 2020, 45(2): 28-33. (JIANG Jian-jun, ZHENG Wan-shan, TANG Guang-wu, et al. The research on seismic absorption measures and seismic analysis about the box girder on large-span continuous rigid frame bridge[J].Highway Engineering, 2020,45(2):28-33.(in Chinese))
- [11] Priestley M J N, Seible F, Calvi G M. Seismic design and retrofit of bridges[M].Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1996.