

# 桥台混凝土挡块对连续梁桥地震响应的影响

王 翼<sup>1,2</sup>, 莫金生<sup>1</sup>, 李建中<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 安徽工业大学 建工学院, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:** 为研究桥台混凝土挡块对中小跨径连续梁桥横向地震响应的影响,以一座连续桥梁为背景建立了有限元模型,采用非线性时程方法分析了桥台混凝土挡块的峰值强度对全桥地震响应的影响。研究表明:随着桥台混凝土挡块峰值强度的增强,桥台顶剪力需求逐渐增大,桥墩处支座位移需求逐渐减小,但减小幅值随着挡块峰值强度增加而减小并趋向于零。合理选取桥台处混凝土挡块的峰值强度能有效地减少桥墩的支座位移需求,并且能避免对桥台造成严重地震损伤。

**关键词:** 连续梁桥; 桥台; 混凝土挡块; 横向地震响应

**中图分类号:** U442.55

**文献标志码:** A

## Effect of Concrete Shear Keys at Abutment on Seismic Response of Continuous Girder Bridge

WANG Yi<sup>1,2</sup>, MO Jinsheng<sup>1</sup>, LI Jianzhong<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** To investigate the effect of the concrete shear keys at abutment on transverse seismic reaction of a short and medium span continuous girder bridge, a finite element model was built based a continuous girder bridge. The effects of peak strength of the concrete shear keys at abutment on transverse seismic reaction of a continuous girder bridge were analyzed using the nonlinear time history method. The results show that when the peak strength of the concrete shear key at abutment increases, the shear demand of the top of abutment increases while the displacement demand of bearing at pier decreases, but the decrease amplitude declined to zero. A reasonable selection of the peak strength of the concrete shear key at abutment can effectively reduce the displacement demand of bearing at the pier, and avoid the severe seismic damage on the abutment.

**Key words:** continuous girder bridge ; abutment; concrete

shear keys; transverse seismic response

在我国道路交通网中,普通梁式桥起着非常重要的作用。这类桥梁通常采用板式橡胶支座支承在盖梁上,板式橡胶支座的上下底面与主梁底面或盖梁顶面无连接<sup>[1]</sup>,同时为限制主梁在地震作用下发生横向位移,一般会在桥墩盖梁和桥台两侧设置混凝土挡块。

在 2008 年汶川地震中造成大量桥梁的损伤和破坏<sup>[2-3]</sup>,其中横向震害主要表现之一为横桥向主梁与混凝土挡块发生碰撞,引起挡块的脆性剪切破坏,主梁与支座间发生滑动,造成较大的墩梁相对位移。但也因为主梁与支座间的滑动对下部结构起到一定的隔震作用,汶川地震中桥梁下部结构发生严重破坏的情况很少<sup>[4-5]</sup>。

国内现行的桥梁设计规范<sup>[6-7]</sup>对混凝土挡块的功能定位、构造细节、抗震性能及作用影响均缺乏条款指导设计,近年来,桥墩处混凝土挡块参数对墩梁之间相对位移需求影响的研究越来越多<sup>[8-10]</sup>,但是随着桥墩处混凝土挡块的限位能力增强,桥墩墩柱越容易受到严重损伤。一些科研人员利用桥台约束连续梁桥主梁两端来减少墩梁相对位移<sup>[11]</sup>,但这会增加桥台顶的横向剪力需求。因此桥台处混凝土挡块的峰值强度对全桥的地震响应影响很大。如果桥台处挡块设计得很弱,在地震作用下桥台处挡块很容易破坏,会造成墩梁之间较大的滑动,大大增加了横向落梁风险;而如果桥台处挡块设计得很强,因桥台对主梁两端的横向约束可大大减少墩梁之间的相对位移,但会明显增加桥台顶剪力,使桥台很容易受到严重的地震损伤。因此,需要对桥台处混凝土挡块峰值强度进行合理的设计,以减小墩梁处的横向相对位移,而且可以在一定程度上使桥台挡块作为牺牲

收稿日期: 2016-08-12

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2013CB036302)

第一作者: 王 翼(1979—),男,讲师,博士生,主要研究方向为桥梁抗震。E-mail: wingking1979@tongji.edu.cn

通讯作者: 李建中(1963—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为桥梁抗震。E-mail: lijianzh@tongji.edu.cn

构件, 避免桥台遭受较大的地震损伤。

本文选取一座三跨连续梁桥为研究背景, 建立了三维空间动力计算有限元模型, 基于试验得到混凝土挡块滞回恢复力模型模拟桥台上混凝土挡块, 分析桥台处混凝土挡块对连续梁桥的横向地震响应的影响规律, 通过参数分析合理设置桥台处混凝土挡块的峰值强度。

## 1 混凝土挡块本构关系

针对我国中小跨度梁桥上混凝土挡块典型构造形式, 文献[12]通过拟静力试验以研究混凝土挡块的力学特性。在试验中, 底座(用以模拟盖梁和台帽)纵桥向、横桥向及高度尺寸分别为 1 600 mm、800 mm 及 600 mm, 挡块试件纵桥向、横桥向及高度尺寸分别为 600 mm、300 mm 和 500 mm。试验中为了探究混凝土挡块在地震作用下的破坏模式, 整个试验项目包括 12 组混凝土挡块试件, 其中的 6 组是按照当前我国实际桥梁工程中常见的混凝土挡块构造和配筋习惯进行设计的, 并在保持挡块构造基本不变的前提下探讨加载位置和剪切钢筋数量对挡块抗震性能的影响; 其余 6 组的设计是在国外试验结果基础上对混凝土挡块进行的改进, 探讨剪切钢筋数量、剪切钢筋位置、施工缝、钢筋规格等对挡块抗震性能的影响, 以达到提高混凝土挡块抗震性能的目的。根据国外的研究结果<sup>[13-14]</sup>, 提出采用简化的力学模型模拟挡块的力学性能, 试验得到的力与位移关系滞回曲线验证了该简化模型的合理性。混凝土挡块的简化分析模型如图 1 所示。图中,  $V_n$  为混凝土挡块的侧向抵抗力峰值强度;  $V_y$  为穿过主裂缝的水平钢筋开始屈服时, 混凝土挡块的侧向抵抗力达到屈服强度;  $V_c$ 、 $V_s$  分别为混凝土和钢筋在混凝土挡块上的剪力贡献;  $\Delta_1$  为穿过主裂缝的水平钢筋开始

屈服时混凝土挡块顶部的水平屈服位移;  $\Delta_2$  为穿过主裂缝的所有水平钢筋均达到屈服对应峰值强度时混凝土挡块顶部的水平位移;  $\Delta_3$  为混凝土挡块内混凝土完全退出工作以及斜裂缝处钢筋开始断裂时混凝土挡块顶部的水平位移;  $\Delta_4$  为钢筋对混凝土挡块强度贡献完全消失时混凝土挡块顶部的水平极限位移。

各参数可按式计算<sup>[14]</sup>:

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

$$V_c = 0.2 \sqrt{f_c} b h \quad (2)$$

$$V_s = \left[ T_1 h + T_2 (d \sin \theta + h \cos \theta) + \frac{T_s}{2s} (n_h h^2 + n_v d^2) \right] \left( \frac{1}{h+a} \right) \quad (3)$$

$$V_y = V_s + V_c \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= \sqrt{2} \varepsilon_y (L_d + L_a) \frac{H+d}{\sqrt{h^2 + d^2}} \\ \Delta_2 &= \sqrt{2} \varepsilon_y (L_d + L_a) \left( \frac{H+d}{s} \right) \\ \Delta_3 &= \sqrt{2} \varepsilon_s (L_d + L_a) \left( \frac{H+d}{s} \right) \\ \Delta_4 &= \sqrt{2} \varepsilon_u (L_d + L_a) \left( \frac{H+d}{s} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $f_c$  为混凝土的抗压强度;  $b$  为盖梁的宽度;  $h$  为盖梁上发生斜截面裂缝的竖向高度;  $d$  为斜截面裂缝的水平长度;  $T_1$  为盖梁顶部所有水平拉筋提供的拉力;  $T_2$  为混凝土挡块内斜向剪切钢筋提供的拉力;  $T_s$  为盖梁内单根水平或竖向分布钢筋的拉力;  $n_h$ 、 $n_v$  分别为盖梁内水平和竖向分布钢筋的数量;  $s$  为水平和竖向分布钢筋的间距;  $\theta$  为混凝土挡块内侧面与垂直平面间的夹角;  $a$  为主梁与混凝土挡块间的接触点到盖梁顶面的距离;  $L_a$  为盖梁裂缝发展区域的宽度, 近似取  $b$ ;  $L_d$  为钢筋锚固长度;  $H$  为混凝土挡块的高度;  $\varepsilon_y$  为混凝土挡块中斜截面裂缝底端处水平分布钢筋的屈服应变;  $\varepsilon_s$  为混凝土挡块内混凝土完全退出工作及斜裂缝处钢筋开始断裂时斜裂缝底部处水平分布钢筋的应变;  $\varepsilon_u$  为斜裂缝处钢筋完全退出工作时斜裂缝底部处水平分布钢筋的应变。

## 2 计算模型与地震动输入

### 2.1 工程背景

本文以一座 3 跨等高连续梁桥作为计算实例, 如图 2a 所示。其中, 主梁为  $3 \times 30$  m 连续预应力混

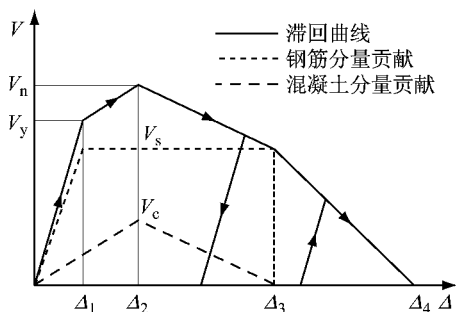


图 1 混凝土挡块简化力学模型

Fig. 1 Simplified mechanical model of concrete shear keys

混凝土箱梁,两端均设有桥台,桥为直桥且桥墩台垂直于桥轴线.主梁为单箱双室截面,宽 12.6 m,高 1.8 m;桥墩为桩柱式结构,墩柱直径为 1.8 m,墩高为 10 m,配筋率为 1.82%,桥墩桩长 20 m,桩基直径为 2.0 m;桥台桩长 20 m,桩基直径为 1.4 m,配筋率为 1.55%,采用 Ucfyber 程序计算得到桥台桩基初始屈服弯矩为 3.95 MN·m.主梁横断面、桥墩及桥台断面图如图 2b 所示.主梁采用标号 C50 混凝土,桥墩桥台盖梁及桥墩墩柱采用标号 C40 混凝土,桥墩桥台桩基础采用标号 C30 混凝土.桥墩和桥台上设

置普通板式橡胶支座,规格分别为 GYZ(圆形板式橡胶支座)650×110 和 GYZ 450×69,每个墩台盖梁上横向均设置 3 个支座.桥墩盖梁上不设置挡块,桥台盖梁两侧设置混凝土挡块,挡块与盖梁之间采用整体式浇筑.桥台混凝土挡块细部构造及配筋见图 2c,按照公式(1)~(5)可以计算出其相关力学参数数值,见表 1,其中峰值强度为桥台上 3 个支座恒载反力之和的 0.6 倍(桥台上 3 个支座恒载反力为 4.4 MN).

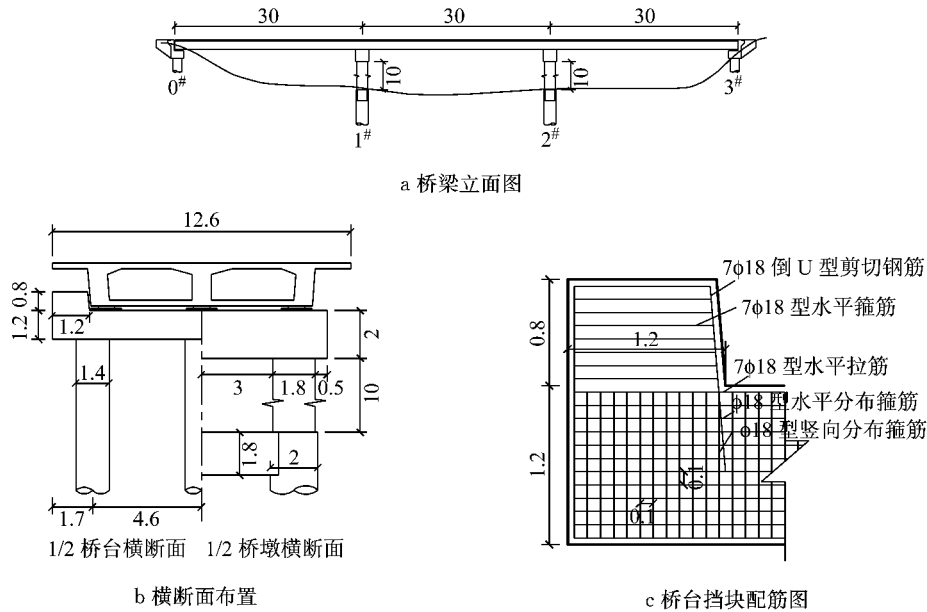


图 2 某三跨连续梁桥构造图(单位:m)

Fig.2 Structure of a three-span continuous girder bridge(unit:m)

表 1 桥台处混凝土挡块力学参数计算值

Tab.1 Analytical parameters of concrete shear keys at the abutment

$V_c$ /MN	$V_s$ /MN	$\Delta_1$ /cm	$\Delta_2$ /cm	$\Delta_3$ /cm	$\Delta_4$ /cm
1987.9	566.1	0.5	5.1	15.3	25.5

2.2 动力计算模型

采用 OpenSees 程序来建立桥梁的空间动力有限元模型.主梁、桥墩盖梁及桥台采用线弹性梁柱单元进行模拟,主梁每跨划分成 6 个等长单元以使主梁质量分布更趋合理.桥墩墩柱采用三维弹塑性纤维单元对其进行模拟,墩柱内无约束混凝土采用 Kent-Scott-Park 本构模型,约束混凝土的抗压强度、极限应变等参数根据 Mander 公式<sup>[15]</sup>确定,钢筋则采用简化的理想弹塑性双线本构模型.本例桥墩台基础形式均为桩柱式基础,因此采用分层土弹簧模型对其基础进行模拟,每根单桩上每层土施加一个土弹簧,土弹簧刚度采用 m 法计算得到,桩底固结.

由于混凝土挡块为受压单元,因此其力学性能采用滞回模型单元和只受压单元的并联来模拟,本文不考虑挡块与主梁间的间隙、碰撞以及横桥向扭转响应造成的斜碰撞对桥梁的影响.

板式橡胶支座采用理想弹塑性单元来模拟,考虑支座与梁体间的滑动摩擦效应,在支座剪力达到临界滑动力  $F_{cr}$ 之前,桥墩桥台上所有板式橡胶支座剪切刚度为

$$K_e = \frac{nGA}{\sum t} \tag{6}$$

式中: $K_e$ 为支座的水平剪切刚度; $n$ 为支座个数; $G$ 为支座的动剪切模量,《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[6]</sup>建议取  $1.2 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $A$ 为支座的剪切面积; $\sum t$ 为支座橡胶层的总厚度.

临界滑动力  $F_{cr}$ 和临界位移  $u_c$ 为支座发生滑动时的临界支座剪力和支座水平剪切变形,可按式计算确定:

$$F_{cr} = N\mu, u_e = \frac{F_{cr}}{K_e} = \frac{N\mu \sum t}{GA} \quad (7)$$

式中: $N$ 为恒载支座反力; $\mu$ 为支座的滑动摩擦系数,根据文献[16],支座与梁底钢板间的滑动摩擦系数近似取值为 0.2. 根据公式(6)、(7)可得桥台处板式橡胶支座的并联初始刚度和临界滑动位移分别为  $11.7 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $7.5 \text{ cm}$ ,桥墩处板式橡胶支座的并联初始刚度和临界滑动位移分别为  $14.9 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $11.8 \text{ cm}$ . 支座滑动后支座刚度为零,板式橡胶支座水平恢复力模型如图 3 所示. 图 4 给出了全桥的有限元计算模型.

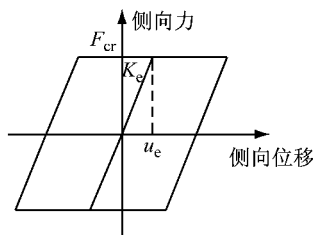


图 3 板式橡胶支座恢复力模型

Fig.3 Hysteretic model of laminated rubber bearing

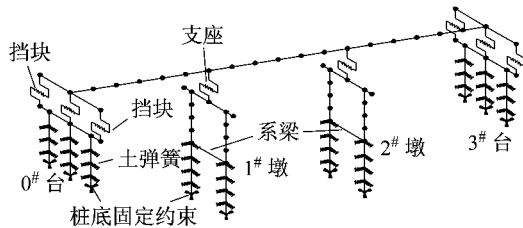


图 4 某三跨连续梁桥及其全桥有限元模型

Fig.4 A three-span continuous girder bridge and finite element model

### 2.3 地震动输入

假定计算桥例位于地震烈度 9 度区,场地分类为 II 类,根据《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[6]</sup>的规定,设计地震动峰值加速度(PGA)为  $0.4g$ ,特征周期为  $0.40 \text{ s}$ ,从太平洋地震工程研究中心(PEER)地震波数据库中选取 7 条实际地震波记录(见表 2),调幅后与设计加速度反应谱相匹配(见图 5). 由于本文主要探究的是桥梁横向地震反应的规律,因此在非线性时程分析时只进行横桥向地震输入,不考虑竖向地震动的影响.

## 3 混凝土挡块对桥梁地震反应的影响

### 3.1 分析工况

在地震作用下,桥台混凝土挡块可以通过限制台梁横向相对位移从而减少墩梁相对位移,但同时

表 2 实际加速度时程记录

Tab.2 Recorded ground motions				
编号	地震名称	记录站点	震级	PGA/g
1	Imperial Valley-02	El Centro Array #9	7.0	0.28
2	Kern County	Taft Lincoln School	7.3	0.16
3	Imperial Valley-05	El Centro Array #9	5.4	0.05
4	Borrego Mtn	San Onofre - So Cal Edison	6.6	0.04
5	San Fernando	Whittier Narrows Dam	6.6	0.10
6	Managua_ Nicaragua-01	Managua_ ESSO	6.2	0.37
7	Managua_ Nicaragua-02	Managua_ ESSO	5.2	0.26

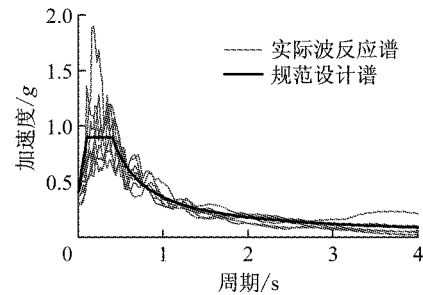


图 5 加速度反应谱

Fig.5 Spectrum of acceleration response

挡块会向桥台传递一定的地震力,可能会造成桥台的地震损伤. 对于本文中桥台混凝土挡块的模拟,可以分为以下 3 种工况:

(1) 假设桥台处混凝土挡块非常弱,在地震反应分析中不考虑挡块的效应,记作 S1 工况;

(2) 根据桥台混凝土挡块在地震作用下的实际性能,在分析时按照试验得到的非线性恢复力模式(见图 1)考虑,记作 S2 工况;

(3) 假设桥台混凝土挡块非常强,在地震作用下不受损伤,分析时挡块按照线弹性单元考虑,其线性刚度取为 S2 工况中挡块非线性模型的初始刚度,记作 S3 工况.

### 3.2 结果分析与讨论

在 S2 工况中,桥台混凝土挡块的力学参数按照表 1 取值. 表 3 给出了以 7 条地震波作用下对应图 2 中 1#墩为例的桥墩支座最大位移需求以及以 0#台为例的台顶剪力需求的平均值.

表 3 不同工况下的桥梁地震反应  
Tab.3 Seismic responses of the bridge in different cases

工况	1#墩支座位移需求/cm	0#台顶剪力需求/MN
S1	11.7	0.877
S2	7.6	3.113
S3	5.4	6.988

由表 3 可知:在地震作用下,与工况 S2 相比较(考虑混凝土挡块的实际非线性),不考虑桥台挡块效应的 S1 工况中桥墩处的支座位移需求被高估

53.7%，而桥台顶剪力需求被低估 71.8%；而假设桥台挡块非常强的 S3 工况中桥墩处的支座位移需求仅被低估 28.9%，但桥台顶剪力需求被高估 124.5%。综上所述，考虑桥台挡块的实际力学性能时，如能对桥台处的混凝土挡块峰值强度进行合理设计，可降低桥墩处的支座位移需求，同时不会对桥台顶产生过大的剪力需求。

### 4 参数分析及验证

#### 4.1 参数分析

考虑桥台挡块在地震作用下的实际非线性性能时，挡块的峰值强度和受力状态对桥梁横向抗震性能影响显著。以下主要以计算桥例为研究对象，对混凝土挡块峰值强度的合理取值范围进行研究。参数分析时挡块的实际力学行为按照试验得到的恢复力模型考虑(S2 工况)，同时将不考虑挡块效应(S1 工况)和挡块按照线弹性考虑(S3 工况)下的地震响应值作为对比。分析时 7 条地震波分别进行横桥向输入，计算结果取 7 条波的平均值。

桥台混凝土挡块的峰值强度  $V_n$  与支座恒载反

力  $N$  的比值取值范围为 0.1~1.2。

图 6 以 1# 墩为例，给出了设计地震动水平下桥墩支座最大位移需求及以 0# 台为例的桥台顶剪力需求、支座最大位移需求和桥台单桩最大弯矩随桥台混凝土挡块峰值强度变化的规律，同时还给出了在设计地震动水平下不考虑挡块效应(S1 工况)和假定挡块为线弹性(S3 工况)时结构的地震响应。由图 6 可以看到，在设计地震动水平下考虑挡块实际非线性力学性能时(S2 工况)结构的地震响应介于 S1 工况和 S3 工况之间，随着桥台挡块峰值强度增大，桥墩支座最大位移需求会减小，但减小幅度随着桥台挡块峰值强度增加而减小。当桥台挡块峰值强度增加到 0.9 倍恒载支座反力时桥墩支座最大位移需求基本上趋于稳定，但桥台顶剪力需求及桥台单桩最大弯矩却随着桥台挡块峰值强度增加而线性增加。因此为有效利用桥台对主梁两端的约束而减小桥墩支座最大位移需求，桥台挡块峰值强度应小于 0.9 倍恒载支座反力，同时应合理选取桥台挡块的峰值强度，以保证桥台桩基在地震作用下处于弹性受力状态，避免对桥台造成地震损伤。

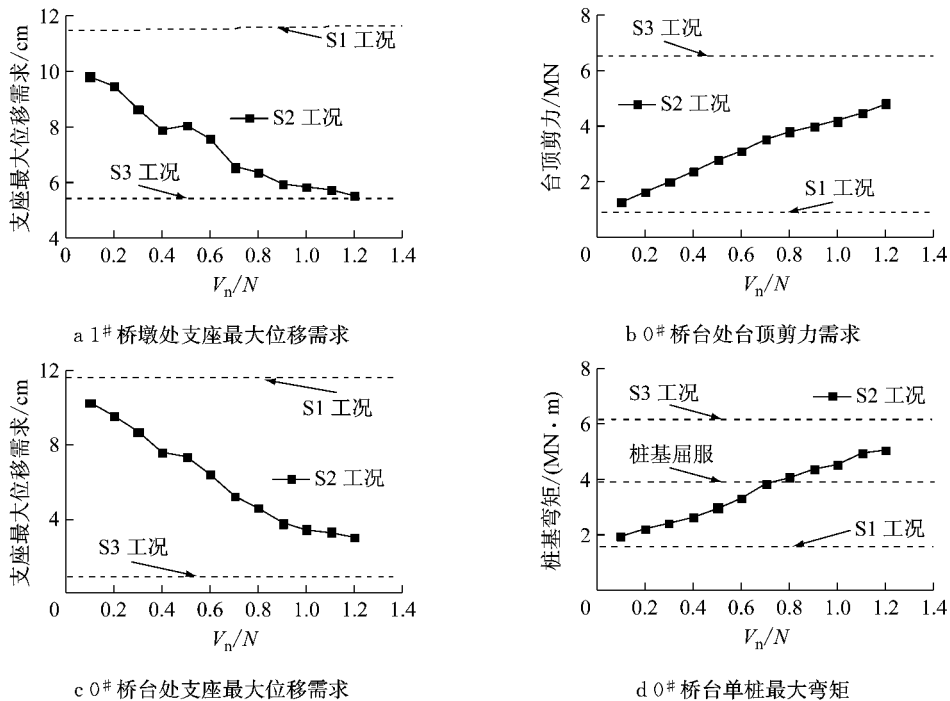


图 6 桥台处混凝土挡块峰值强度对桥梁地震响应的影响

Fig.6 Effect of peak strength of shear keys at abutment on seismic response of the bridge

由以上分析可知，在设计地震动水平下，算例中桥台上混凝土挡块相对合理的峰值强度取值为支座恒载反力的 0.7 倍左右，此时桥墩处支座的最大位

移需求与不考虑挡块效应(S1 工况)相比降低了 44%，同时桥台顶剪力需求与假定挡块为线弹性(S3 工况)相比降低了 42%，并且能避免对桥台造成地震

损伤.

### 4.2 参数取值验证

分别取桥跨布置为  $3 \times 25$  m 和  $3 \times 35$  m, 研究在不同主梁跨径情况下, 桥台上混凝土挡块的峰值强度变化时结构的抗震性能状况. 其中, 桥跨布置为  $3 \times 25$  m 的连续梁桥桥墩桥台板式橡胶支座规格分别为 GYZ 600 $\times$ 90 和 GYZ 450 $\times$ 69, 桥跨布置为  $3 \times 35$  m 的连续梁桥桥墩桥台板式橡胶支座规格分别为 GYZ 500 $\times$ 70 和 GYZ 700 $\times$ 102. 按照式(6)、(7)可得出桥跨布置为  $3 \times 25$  m 的连续梁桥桥台处板式橡胶支座的并联初始刚度和临界滑动位移分别为  $11.7 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $6.2 \text{ cm}$ , 桥墩处板式橡胶支座的并联初始刚度和临界滑动位移分别为  $15.7 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $9.4 \text{ cm}$ ; 桥跨布置为  $3 \times 35$  m 的连续梁桥桥台处板式橡胶支座的并联初始刚度和临界滑动位移分别为  $14.1 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $7.2 \text{ cm}$ , 桥墩处板式橡胶支座的并联初始刚度和临界滑动位移分别为  $18.0 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $11.4 \text{ cm}$ .

以 1# 墩和 0# 台为例, 不同主梁横向刚度结构的地震反应结果如图 7 所示.

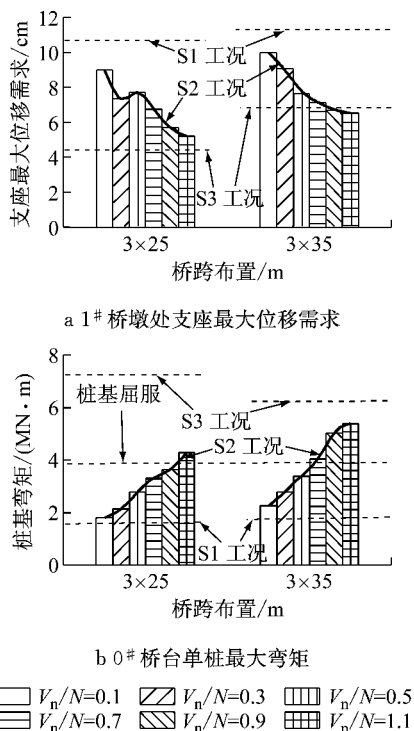


图 7 桥台处混凝土挡块峰值强度对不同主梁跨径桥梁地震响应的影响

Fig. 7 Effect of peak strength of shear keys at abutment on seismic response of the bridge with different spans

由图 7 可以看到, 在不同主梁跨径的结构中, S2

工况下当桥台挡块峰值强度设置为 0.7 倍的支座恒载反力左右时, 桥墩处支座的最大位移需求与 S1 工况相比降低了 37% 左右, 支座的最大位移需求可以得到有效的控制; 同时, S2 工况下桥台单桩承受的最大弯矩与 S3 工况相比降低了 35%~55%, 保证桥台不会受到较大的地震损伤. 随着主梁跨径增加, 支座的恒载反力增大, 桥台挡块按 0.7 倍的支座恒载反力取值时可能会使桥台桩基进入屈服, 但屈服程度较小, 因此桥台不会遭受严重的地震损伤.

## 5 结论

本文以一座三跨连续梁桥为例, 用非线性时程分析方法讨论改变桥台处挡块峰值强度对全桥横向地震响应的影响, 结论如下:

(1) 桥墩处支座最大位移需求及桥台顶剪力需求受到桥台挡块峰值强度的影响, 忽略桥台挡块的分析方法可能会高估桥墩处支座最大位移需求, 低估桥台顶剪力需求; 而假设桥台挡块很强时可能会低估桥墩处支座的最大位移需求, 高估桥台顶剪力需求.

(2) 随着桥台混凝土挡块峰值强度的增强, 桥台顶剪力需求逐渐增大, 桥墩处支座位移需求逐渐减小, 但减小幅值随着挡块峰值强度增加而减小并趋向于零.

(3) 在设计地震动水平下, 当算例中桥台处挡块峰值强度取值为 0.7 倍左右的支座恒载反力时, 对桥墩处支座位移需求控制效果较好, 并且能避免对桥台造成严重的地震损伤.

### 参考文献:

[1] 范立础, 聂利英, 李建中. 地震作用下板式橡胶支座滑动的动力性能分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 30.  
FAN Lichu, NIE Liying, LI Jianzhong. Dynamic characteristic analysis of laminated rubber bearing sliding under earthquake [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 30.

[2] LI Jianzhong, PENG Tianbo, XU Yan. Damage investigation of girder bridges under the wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(4): 337.

[3] 蒋劲松, 庄卫林, 刘振宇. 汶川地震百花大桥震害调查分析[J]. 桥梁建设, 2009(6): 41.  
JIANG Jinsong, ZHUANG Weilin, LIU Zhenyu. Investigation and analysis of seismic damage to baihua bridge in Wenchuan earthquake [J]. Bridge Construction, 2009(6): 41.