

大跨度连续梁桥减隔震体系参数优化

金晶, 叶爱君

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 本文基于连续梁桥的地震反应特点和多跨连续梁桥减隔震机理, 以某大跨度连续梁桥为工程背景, 选用具有双线性恢复力滞回曲线的减震耗能支座作为减隔震体系的减隔震装置, 然后分别从横向减隔震体系和纵向减隔震体系两方面着重分析减隔震体系核心参数减震耗能支座滑动后刚度对连续梁桥地震反应的影响, 进行减隔震体系参数的优化。其中横向减隔震体系的参数优化按过渡墩支座和非过渡墩支座分别进行, 而纵向减隔震体系的参数优化就是优化原固定墩减震耗能支座的滑动后刚度。参数优化分析参考的地震反应主要指减震耗能支座的位移, 桥梁墩底剪力和弯矩以及承台底剪力和弯矩。根据参数优化分析结果, 结合支座的构造要求, 最终选取比较合理的减隔震体系参数。

关键词: 连续梁桥, 减隔震体系, 减震耗能支座, 参数优化

Parameters Optimization of Seismic Mitigation and Isolation System for Long Span Continuous Bridges

JIN Jing, YE Aijun

(State Key Laboratory for Disaster Reduction of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the seismic response characteristics of continue bridges and the seismic mitigation and isolation principal of continue bridges, taking a long span continue bridge construction as an example, selecting the damping and energy dissipation supports with the bilinear hysteretic curves as device of the mitigation and isolation system for the continue bridges, this paper develops the parameters optimization of seismic mitigation and isolation for long span continue bridges. To make things easy, the optimization is separated as for the transversal mitigation and isolation system, and for the longitudinal mitigation and isolation system. The key parameter of transversal mitigation and isolation system is the transversal K_p of the damping and energy dissipation supports, while that of longitudinal system is the longitudinal K_p of the damping and energy dissipation support on the fixed pier. The seismic response for the parameters optimization mainly includes sliding displacement of damping and energy dissipation supports, shear and moment of the bottom of the piers and the bottom of the pile caps, as well as the relative displacement of beam ends longitudinally. According to the optimization and the construction requirement of the damping and energy dissipation supports, the most appropriate mitigation and isolation parameters are finally decided.

Key words: continuous bridges; mitigation and isolation system; damping and energy dissipation supports; parameters optimization

1 引言

连续梁桥是一种应用广泛的桥型, 针对连续梁桥的地震反应分析是很重要的。不过我国新颁布的行业推荐性标准《公路桥梁抗震设计细则》只适用于单跨跨径不超过 150m 的混凝土梁桥、圬工或混凝土拱桥。对于跨度超过 150m 的梁桥或者拱桥要专门立项, 进行抗震研究。连续梁桥一般只有一个固定墩, 因此其在顺桥向地震荷载作用下, 固定墩处于非常不利的受力状态, 纵向地震荷载主要由位于固定墩上的固定支座承担。所以连续梁桥的地震反应最显著的特点是: 固定墩地震内力过大; 对固定墩支座抗剪能力要求过高。而如果一味提高固定墩的强度, 要求其在弹性范围内工作, 是很不经济的, 也是没有必要的。减隔震

技术是目前普遍使用的一种简便, 经济又先进的工程抗震手段。减隔震设计最核心的内容就是减隔震体系参数的合理选取, 所以对减隔震参数进行优化, 最终得到最合适的减隔震体系参数就显得尤为重要。本文根据减隔震的基本原理, 以某大跨度连续梁桥为工程背景, 给出了大跨度连续梁桥减隔震参数优化一般步骤及其分析方法, 并最终选择最合理的减隔震参数。

2 多跨连续梁桥减隔震机理

减隔震技术的工作机理有三条: ① 采用柔性支承延长结构周期, 减小结构地震反应; ② 采用阻尼器或能量耗散元件, 限制结构位移; ③ 保证结构在正常使用荷载作用下具有足够的刚度。当桥梁上部结构为连

续形式, 下部结构刚度较大, 整个桥的基本周期比较短时, 比较适宜进行减隔震设计。

从理论上说, 常规的滑动摩擦支座的滞回曲线接近矩形 (见图 1, F_{max} 为摩擦力, x_y 为支座发生滑动时的相对位移), 耗能能力强, 而且传到下部结构的最大水平力就是摩擦力, 是理想的减震耗能支座。但纯摩擦滑动支座没有恢复力, 震后不能回到正常位置, 这对于抗震是很不利的。

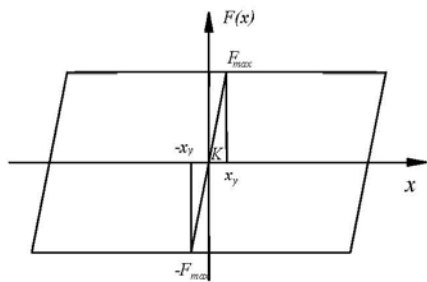


图 1 滑动摩擦支座的恢复力模型

滑动摩擦支座本身是很好的减震耗能支座, 主要缺点是没有自恢复力。因此, 只要对滑动摩擦支座加以适当的改造, 提供一个滑动后刚度, 即可得到具有较好的减震耗能作用的钢支座, 对应的滞回曲线呈双线性, 如图 2 所示。图中, K 为摩擦支座滑动前刚度, x_y 为摩擦支座滑动时发生的变形, 很小, 一般可取 2mm, K_p 为摩擦支座滑动后刚度, Q_y 为摩擦支座的摩擦力。

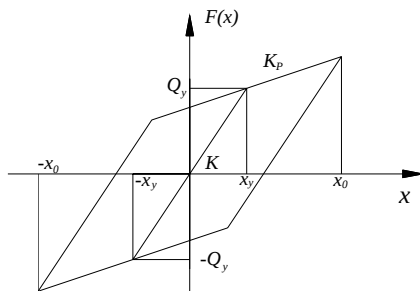


图 2 双线性恢复力模型

3 工程背景与减隔震体系方案

3.1 工程背景

本文以某六跨连续梁桥作为工程背景。该桥桥跨布置为 102m+4×185m+102m。上部结构为上、下行分离的两个单箱单室变截面的箱梁, 箱梁根部梁高 9.00m, 跨中梁高 4.80m。每个桥墩包括两个独立的矩形截面立柱。每个桥墩下均采用矩形承台斜桩基础, 桩身采用钢管桩。主桥六跨总共七个墩的编号从左到右依次为 1~7 号, 1 号墩和 7 号墩为过渡墩, 其中纵向只有最中间的 4 号墩上设置固定支座, 如图 3 所示。各墩顶横向设置两个支座, 一个固定支座, 一个滑动

支座。

地震作用下, 考虑到主桥与相邻引桥的相互耦联, 引桥会对主桥的地震反应有一定影响, 所以动力模型还包括了主桥两边相邻的各两联引桥。每联引桥的桥跨布置也为六跨一联连续梁桥, 均为 50m 一跨。引桥上部结构亦为上、下行分离的两个单箱单室变截面的箱梁, 箱梁梁高 3.00m。桥墩为变截面空心柱体, 采用钢管桩基础。桩基础按照刚度等效原则采用弹性嵌固模型。空间动力模型的滑动支座应考虑其非线性效应, 采用非线性支座单元模拟。空间动力模型见图 4。

地震动输入采用以设计反应谱为目标拟合的三条地震加速度时程, 对三条地震加速度时程均进行地震反应计算, 计算结果取最大值。图 5 为其中一条地震加速度时程。根据《公路桥梁抗震设计细则》, 按纵向+竖向, 横向+竖向两种组合输入, 其中竖向输入取水平向输入的 2/3。

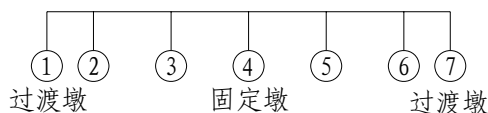


图 3 动力分析模型

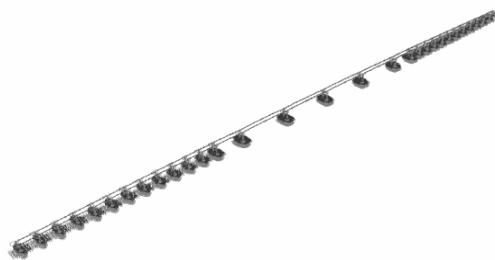


图 4 动力分析模型

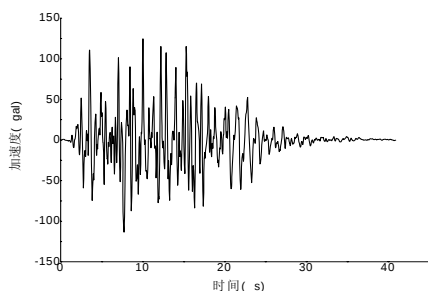


图 5 地震加速度时程

3.2 减隔震体系方案

本文选择具有图 2 所示的滞回曲线的减震耗能支座作为减隔震装置。支座的设置方式以不影响桥梁的正常使用功能为前提, 减震耗能支座必须具有限位构造, 其抗力能满足正常使用状态的性能要求, 而在地震作用下, 要求支座限位构造尽早剪断。主桥减隔震体系初步拟定为如下方案: 各墩顶支座均采用减震耗能支座, 支座的滑动摩擦系数为 2%, 支座滑动后的

刚度 K_p ，各墩顶支座横桥向均取 $4.0E+3kN/m$ ，纵桥向，固定墩上取 $4.0E+3kN/m$ ，其它墩上支座滑动后刚度为 0，固定支座设置处的减震支座需考虑限位构造，以满足正常使用荷载的要求。

4 减隔震体系参数优化

根据上述的主桥减隔震体系的减隔震效果初步分析结果，采用同样的支座设置方式，即纵桥向仅固定墩支座（4 号墩处）为有恢复刚度的减震耗能支座，横桥向均为减震耗能支座，对主桥横向减隔震体系和纵向减隔震体系分别进行减隔震体系的参数优化。

4.1 横向减隔震体系参数优化

横向减隔震体系参数优化即为对横桥向减震耗能支座滑动后刚度的优化。考虑到过渡墩（1 号墩和 7 号墩）的特殊性，将过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度和非过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度分别进行优化。优化策略如下：①保持过渡墩减隔震支座横向滑动后刚度为 $K_p=4000kN/m$ 不变，调整非过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度，调整范围为 $4000\sim 20000kN/m$ ，分析非过渡墩支座横向滑动后刚度对地震反应的影响；②在由①得到的非过渡墩减隔震支座横向刚度优化结果基础之上，调整过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度，调整范围为 $1000\sim 4000kN/m$ ，分析过渡墩支座横向滑动后刚度对地震反应的影响。

上述地震反应主要包括：减震耗能支座横向位移、各墩底横桥向内力（剪力和弯矩）、各承台底横桥向内力（剪力和弯矩）。进行上述所有横向刚度进行优化时，均采用横向+竖向输入。

由图 6 和图 7 可见，随着非过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度的增大，非过渡墩减隔震支座横向位移明显减小，并随着刚度的逐渐，当刚度大于 $8000kN/m$ 之后，位移减小的趋势逐步减缓。而非过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度的增大，对过渡墩减隔震支座横向位移的影响规律是先有所减小，而当刚度大于 $10000kN/m$ 后又略有增大。

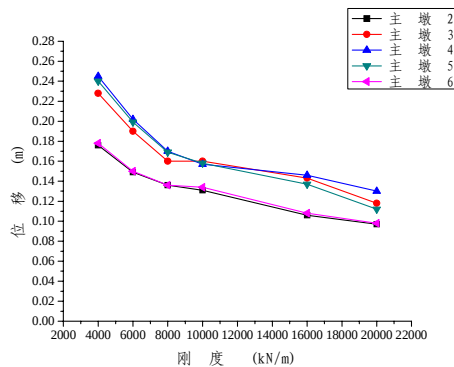


图 6 非过渡墩支座横向刚度——非过渡墩支座横向位移关系

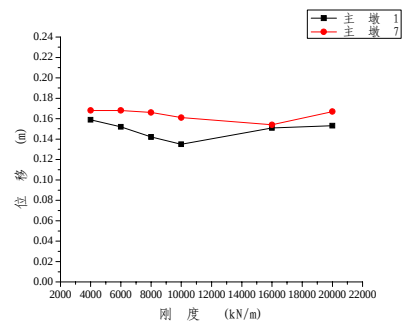


图 7 非过渡墩支座横向刚度——过渡墩支座横向位移关系

图 8、图 9、图 10 和图 11 分别描绘了非过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度对各墩底横桥向内力（剪力和弯矩）、各承台底横桥向内力（剪力和弯矩）的影响规律。可见，承台底剪力对非过渡墩支座横向滑动后刚度的变化并不敏感，而当滑动后刚度小于 $8000kN/m$ 时，墩底剪力、墩底弯矩和承台底弯矩的变化也变得不明显。

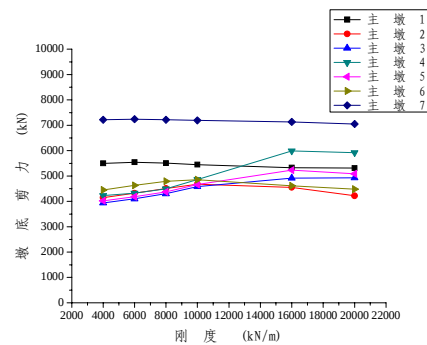


图 8 非过渡墩支座横向刚度——墩底剪力关系

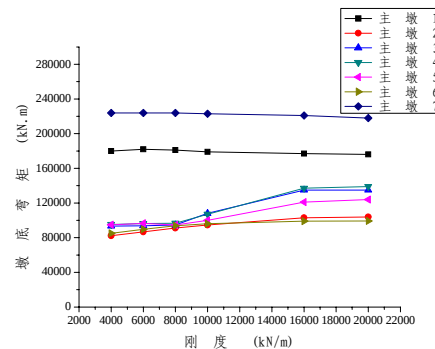


图 9 非过渡墩支座横向刚度——墩底弯矩关系

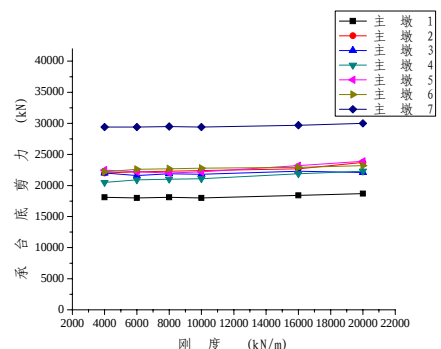


图 10 非过渡墩支座横向刚度——承台底剪力关系

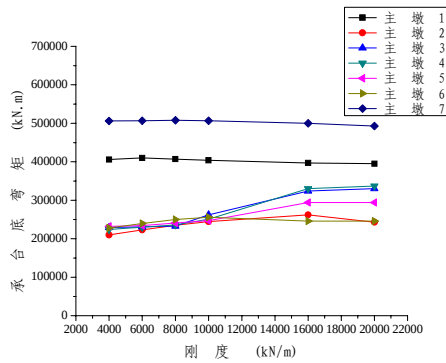


图 11 非过渡墩支座横向刚度——承台底弯矩关系

根据上述数据，综合分析非过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度对减震耗能支座横向位移、各墩底横向内力（剪力和弯矩）以及各承台底横向内力（剪力和弯矩）的影响规律，当非过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度大于 8000kN/m 之后，主桥各非过渡墩的墩底和承台底内力明显增大，而非过渡墩支座的滑动位移减小明显趋缓，过渡墩支座的滑动位移有增大的趋势，因此认为取非过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度为 8000kN/m 是比较合适的。

由图 12 和图 13 可见，保持非过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度 8000kN/m 不变，随着过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度的变化，3 号墩、4 号墩、5 号墩的减震耗能支座的横向位移均没有显著改变，2 号墩和 6 号墩由于比较靠近过渡墩所以其减震耗能支座的横向位移的变化规律与过渡墩减震耗能支座横向位移相类似，即刚度增大，位移减小。

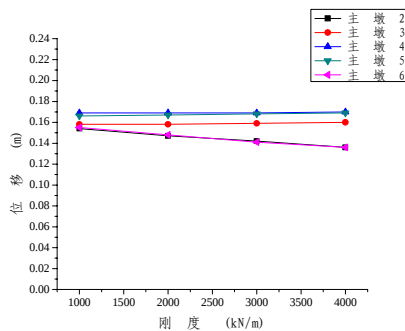


图 12 过渡墩支座横向刚度——非过渡墩支座横向位移关系

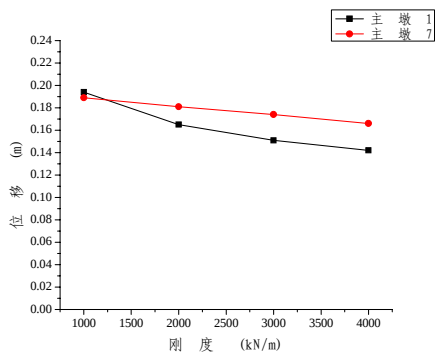


图 13 过渡墩支座横向刚度——过渡墩支座横向位移关系

由图 14、图 15、图 16、图 17 可知，过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度的变化对各墩底和承台底的剪力和弯矩均没有显著影响。

结合上述的过渡墩减震耗能支座滑动后刚度对减震耗能支座横向位移的影响规律，认为取过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度 2000kN/m 是比较合适的。

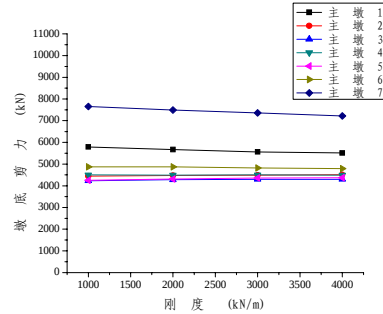


图 14 过渡墩支座横向刚度——墩底剪力关系

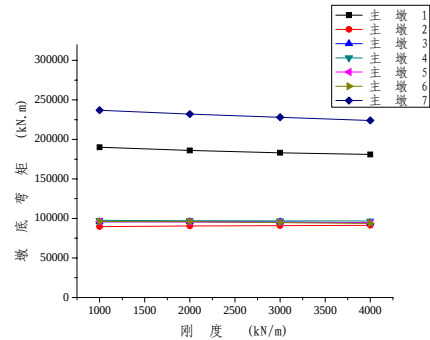


图 15 过渡墩支座横向刚度——墩底弯矩关系

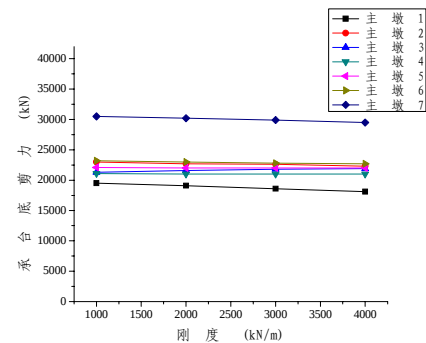


图 16 过渡墩支座横向刚度——承台底剪力关系

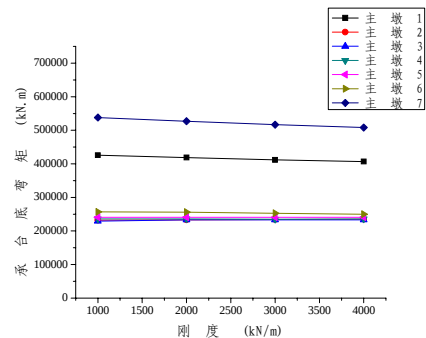


图 17 过渡墩支座横向刚度——承台底弯矩关系

4.2 纵向减隔震体系参数优化

纵向减隔震体系参数优化即为固定墩（4号墩）减震耗能支座纵向滑动后刚度的优化。优化策略如下：调整4号墩减震耗能支座纵向滑动后刚度，调整范围为4000~20000kN/m，分析纵向滑动后刚度对主桥地震反应的影响。

上述地震反应主要包括：支座纵向位移、各墩底横向内力（剪力和弯矩）、各承台底横向内力（剪力和弯矩），以及梁端相对位移。进行上述所有横向刚度进行优化时，均采用纵向+竖向输入。

由图18可知，随着4号墩减震耗能支座纵向滑动后刚度的增大，各支座的纵向位移普遍都有所减小，特别是4号墩减震耗能支座纵向位移减小的尤为显著。而当4号墩减震耗能支座纵向滑动后刚度大于8000kN/m之后，各支座的纵向位移减小趋势有所放缓。

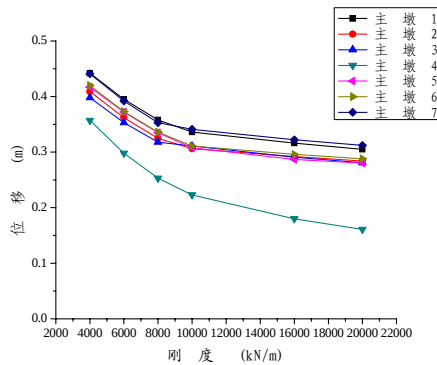


图 18 主墩 4 支座纵向刚度——支座纵向位移关系

图19、图20、图21、图22分别给出了4号墩减震耗能支座不同纵向滑动后刚度对应的各墩墩底剪力，墩底弯矩和各承台底剪力、承台底弯矩。由图可知，4号墩的墩底剪力和弯矩，以及承台底弯矩随着4号墩减震耗能支座纵向滑动后刚度的增大而明显增大，特别是在4号墩支座纵向滑动后刚度大于8000kN/m以后。而对于其它滑动墩的墩底和承台底剪力、弯矩的影响均很小。

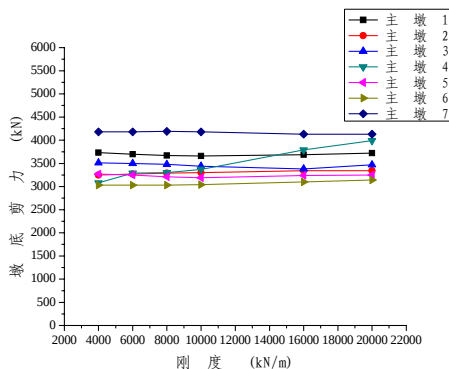


图 19 主墩 4 支座纵向刚度——墩底剪力关系

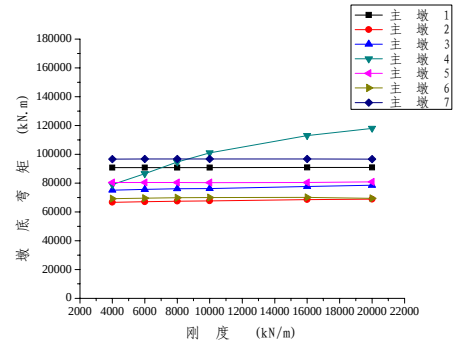


图 20 主墩 4 支座纵向刚度——墩底弯矩关系

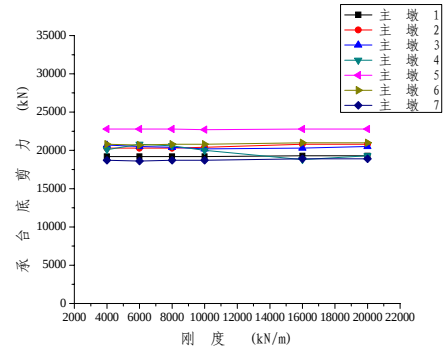


图 21 主墩 4 支座纵向刚度——承台底剪力关系

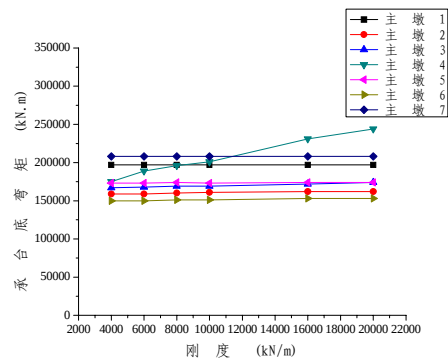


图 22 主墩 4 支座纵向刚度——承台底弯矩关系

图23给出了4号墩减震耗能支座的纵向滑动后刚度的不同取值所对应的主桥左右两侧的梁端相对位移。可见，随着4号墩减震耗能支座纵向滑动后刚度的增大，主桥左右两侧梁端相对位移均显著减小。当4号墩减震耗能支座纵向滑动后刚度大于8000kN/m以后，梁端相对位移的减小趋势逐渐放缓。

结合前述分析规律可见，4号墩减震耗能支座纵向滑动后刚度大于8000kN/m之后，各支座的纵向位移减小趋势有所放缓，4号墩墩底剪力和弯矩，以及承台底弯矩增大趋势加快，梁端相对位移减小趋势逐渐放缓。于是认为取4号墩减震耗能支座的纵向滑动后刚度为8000kN/m是比较合适的。

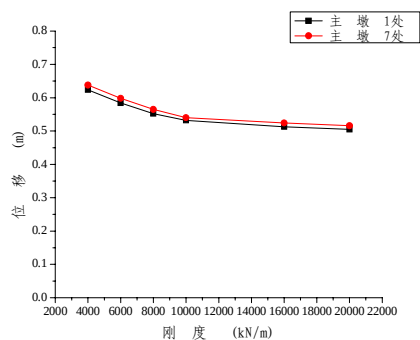


图 22 主墩 4 减隔震支座纵向刚度——梁端相对位移关系

根据以上分析结果, 兼顾主桥结构的内力和位移反应, 并考虑支座的构造要求, 最终选取主桥减震耗能支座的参数如下: 过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度取 $2 \times 1000 \text{ kN/m}$, 非过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度取 $2 \times 4000 \text{ kN/m}$, 原固定墩(4 号墩)减隔震支座纵向滑动后刚度取 $2 \times 4000 \text{ kN/m}$ 。

4 总结

本文先介绍了连续梁桥地震反应的主要特点以及多跨连续梁桥的减隔震机理, 以某大跨度连续梁桥作为工程背景, 选择具有双线性恢复力滞回曲线的减

震耗能支座作为减隔震体系方案。然后分别从横向减隔震体系和纵向减隔震体系两方面着重分析减隔震体系核心参数减震耗能支座滑动后刚度对连续梁桥地震反应的影响, 进行减隔震体系参数的优化。其中横向减隔震体系的参数优化分过渡墩支座和非过渡墩支座分别进行, 而纵向减隔震体系的参数优化就是优化原固定墩减震耗能支座的滑动后刚度。参数优化分析参考的地震反应主要指减震耗能支座的位移, 桥梁墩底剪力和弯矩以及承台底剪力和弯矩。根据参数优化分析结果, 结合支座的构造要求, 最终选取比较合理的减隔震体系参数。横向减隔震体系的参数: 过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度取 $2 \times 1000 \text{ kN/m}$, 非过渡墩减震耗能支座横向滑动后刚度取 $2 \times 4000 \text{ kN/m}$; 纵向减隔震体系的参数: 原固定墩减隔震支座纵向滑动后刚度取 $2 \times 4000 \text{ kN/m}$ 。

参考文献:

- [1] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [2] JTG/T B02-01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[S]
- [3] Priestley M.J.N. Seismic Design and Retrofit of Bridges [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.