



大跨度桥梁抗震体系研究

管仲国, 李建中*

同济大学桥梁工程系, 上海 200092

* E-mail: lijianzh@tongji.edu.cn

收稿日期: 2020-03-14; 接受日期: 2020-05-15; 网络版发表日期: 2020-07-28

国家自然科学基金(批准号: 51878491, 51838010)资助项目

摘要 我国基础设施建设重点正逐渐向西部转移, 为确保高烈度地震区大跨度桥梁的抗震安全性, 本文重点针对大跨度的抗震体系发展现状与未来趋势开展研究。系统总结了大跨度斜拉桥和悬索桥各种纵横向抗震体系的减震机理、优缺点及影响规律等共性问题。虽然我国的大跨度桥梁的技术发展和工程应用在中等强度及以下地震条件下的大跨度桥梁抗震体系研究上积累了丰富的成果, 但在近断层和跨断层等极端地震作用下的大跨度桥梁减震机理和减震体系上的研究还很少, 相关的减震理论和设计方法也有待完善。

关键词 大跨度桥梁, 斜拉桥, 悬索桥, 抗震体系

1 引言

自20世纪90年代, 我国开始进行大规模的交通基础设施建设, 目前已超越美国, 成为世界上公路桥梁最多的国家。其中, 我国大跨桥梁的数量已经达到世界总量的一半, 是名副其实的桥梁建设大国^[1]。当前, 我国基础设施建设重点正逐渐向西部转移, 在新疆、西藏、青海、四川、云南、海南等高烈度区形成了新一轮的大规模基础设施建设需求。大跨度桥梁一般为交通路网的关键性重点工程, 投资规模大、建设周期长, 对区域经济和社会生活的影响非常大, 确保其抗震安全将对提升整个区域的防震减灾能力具有重要的意义。

大跨度桥梁在结构约束形态上可以有更多的选择, 其地震动力响应在很大程度上也与其结构抗震体

系息息相关。目前, 围绕各类大跨度桥梁的抗震体系选择已开展了大量的研究。Ha等人^[2]、Siringoringo等人^[3]和李立峰等人^[4]研究了强震条件下公路斜拉桥的纵向抗震体系; 梁智垚和李建中^[5]、屈爱平和李龙安^[6]、郭辉等人^[7]基于天兴洲大桥和沪通长江大桥对公铁两用斜拉桥进行了不同体系下的结构地震响应对比分析; 上官甦等人^[8]、全伟等人^[9]基于铺前大桥和唐山二环路跨津山铁路桥研究了独塔斜拉桥的纵向抗震体系; 叶爱君和范立础^[10]、沈星等人^[11]、Guan等人^[12]基于苏通大桥和永宁黄河大桥研究了大跨度斜拉桥的横向抗震体系; 陈启泰等人^[13]、张新军和张超^[14]、杨孟刚和陈国阳^[15]基于普立大桥和润扬长江大桥研究了悬索桥的抗震体系。此外, Yi和Li^[16]、Guan等人^[17]、Zhou等人^[18]、Wang等人^[19]还基于苏通大桥和榕江大桥进行了不同体系的斜拉桥振动台模型试验研

引用格式: 管仲国, 李建中. 大跨度桥梁抗震体系研究. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 493–504

Guan Z G, Li J Z. Advances in earthquake resisting systems for long-span bridges (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 493–504, doi: [10.1360/SST-2020-0105](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0105)

究; Li等人^[20]基于泰州长江大桥进行了不同体系的悬索桥振动台模型试验。然而, 这些研究往往是基于特定的结构参数或场地地震特性而开展的, 相应的分析结果缺乏针对大跨度桥梁抗震体系共性问题的深入剖析。

本文基于大跨度桥梁的结构特点和工作性能分析, 系统总结各纵横向抗震体系的减震机理、优缺点及影响规律等共性问题。在此基础上, 进一步分析大跨度桥梁抗震体系的未来研究重难点问题。

2 大跨度桥梁纵向抗震体系

2.1 漂浮体系减震机理分析

大量研究表明, 大跨度桥梁采用漂浮体系可以显著提高其纵向抗震能力。究其原因, 在于大跨度桥梁采用漂浮体系, 即释放塔梁纵向约束, 可以显著延长结构的纵向基本周期并避开地震的卓越能量频段, 进而降低结构的地震内力响应^[2-4]。对于斜拉桥而言, 由于主梁和主塔之间通过斜拉索形成自平衡体系, 主梁纵向漂浮过程中会迫使塔顶共同变位, 而主塔的纵向弯曲变形又为主梁的纵向运动提供了弹性回复力, 进而形成一种大质量、弱刚度的长周期振动机制, 图1(a)所示为典型的双塔三跨斜拉桥主梁纵漂振型。随着斜拉桥跨径的增加, 主梁总质量增加, 塔高增加而导致其侧向刚度不断下降, 因此纵向漂浮的基本周期也就越长。悬索桥与斜拉桥不同, 主缆与地锚相连并与主塔塔顶相互锁定, 主梁的纵向变位并不会迫使主塔产生纵向弯曲变形而提供弹性回复力, 但其主梁的纵向振动振型一般与主缆和主梁的反对称竖弯振型相互耦合, 并由竖弯振型的重力刚度提供弹性回复力, 因此悬索桥的纵向振型

主要与主跨跨度、主缆的垂跨比、主梁的竖弯刚度和线质量相关^[14], 图1(b)所示为典型的双塔单跨悬索桥主梁纵向振型。从这个意义上看, 自锚式悬索桥在缆-塔-梁三者的传力路径与约束关系上更贴近斜拉桥, 因此其结构动力响应行为可比拟为相同结构形式的斜拉桥。

2.2 大跨度斜拉桥纵向抗震体系应用与发展

采用纯漂浮体系的大跨度斜拉桥, 主梁的惯性力是通过拉索传递至塔顶, 再通过塔身形成对塔底的弯矩作用。由于大跨度斜拉桥的塔高一般较高, 因此这种水平惯性力最终形成的弯矩也比较大。此外, 纯漂浮体系的斜拉桥由于结构柔度较大, 尽管其地震内力响应一般较小, 但主梁的位移响应则会比较大, 容易导致主引桥碰撞落梁。

为了改善纯漂浮体系地震下主梁位移响应大, 同时又因主塔塔高较大而导致塔底弯矩较大的问题, 在塔梁之间设置适当弹性约束构造较早被提出来并用于实桥工程, 如日本的Meiko-Nishi桥通过在塔梁间设置弹性拉索进行结构地震响应控制^[21]。此后, 大量学者研究了采用塔梁弹性约束装置对斜拉桥结构的减震效应, 如焦驰宇等人^[22]、张永亮等人^[23]、李立峰等人^[24]、阮怀圣等人^[25]。塔梁弹性约束的工作原理实际上是在通过塔梁弹性连接调整原有的主梁惯性力传力路径, 让一部分惯性力直接由塔梁连接装置传递至塔身, 从而减小惯性力对塔底的力矩作用, 并且在此过程中限制主梁纵向位移并同时避免因结构刚度增大而导致纵漂振型周期落入地震卓越能力频段内。

斜拉桥结构自身的阻尼比较低, Ali和Abdel-Ghaffar^[26]指出, 斜拉桥被动式减震更高效的方法是通

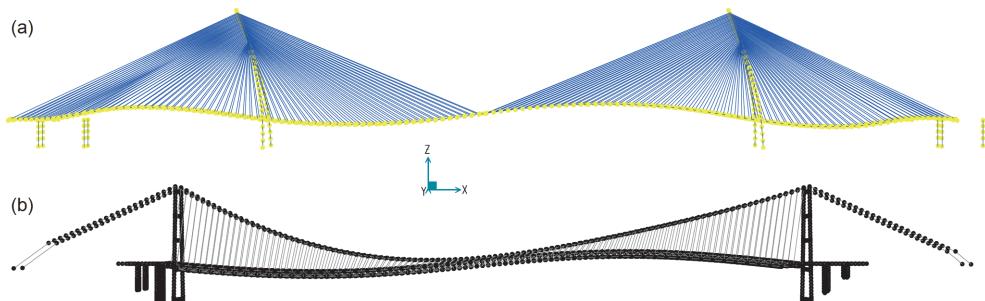


图1 (网络版彩图)大跨度桥梁纵向振型. (a) 典型斜拉桥纵向振型; (b) 典型悬索桥纵向振型

Figure 1 (Color online) Longitudinal modes of long-span bridges. (a) Typical longitudinal vibration mode of cable-stayed bridges; (b) typical longitudinal vibration mode of suspension bridges.

过附加耗能装置提高其对地震输入能量的耗散能力。非线性黏滞阻尼器由于不改变结构的静力性能, 同时在动载条件下可以显著增加结构的阻尼特性, 而在斜拉桥的抗震体系设计中备受青睐^[27]。大量学者^[28~35]对比分析了黏滞阻尼器和金属阻尼器等各种附加阻尼装置, 结果显示黏滞阻尼器能更有效地减震耗能, 改善结构在地震作用下的位移和内力。这表明: 漂浮体系+黏滞阻尼器是一种性能优异的斜拉桥抗震体系, 可以有效地抑制结构关键部位纵向位移响应、减小或防止主引桥碰撞并改善结构受力状态。

近年来, 美国的Northridge (1994年)地震、台湾的ChiChi (1999年)地震等引起人们对近断层结构抗震问题的深入思考。从动力作用机制上看, 近断层地震破坏性强的主要原因是其时域中常包含大幅值的长周期高能量脉冲(图2), 会造成结构大的位移变形乃至破坏, 尤其对柔性减隔震结构危害巨大^[36,37]。相关研究表明, 近断层地震会明显增大减隔震桥梁的减隔震位移需求^[38], 过大的位移会超出连接装置的极限变形能力, 进而可能造成上、下部结构连接失效, 或者造成主梁与其他部位碰撞, 增大内力甚至发生破坏^[39,40]。易凌志等人^[41]对漂浮体系斜拉桥在近场条件下的抗震措施研究显示, 近场地震作用下不适宜选用弹性连接体系, 选用阻尼器体系或者组合体系减震效果更为理想, 同时相对于远场地震作用, 近断层地震作用下减隔震体系的合理参数值有所不同。然而, 目前对近场条件下的大跨度桥梁减震体系的研究还很少, 尽管一些学者提出了复合减震机制用于克服近场地震作用, 但总

体上对脉冲型强震作用的减震机制和有效减震措施还缺乏足够的研究。

此外, 国内外学者也进行了很多桥梁的全桥振动台模型试验研究。Garevski等人^[42,43]在布里斯托尔大学, 以韩国JINDO桥为背景, 进行了缩尺比为1:150的斜拉桥全桥振动台试验。高文军等人^[44]对一座跨径组合为2 m×136 m的单索面独塔斜拉桥按照1:25几何缩尺比例制作了模型桥, 其模型主塔、主梁及桥墩均采取了有机玻璃, 斜拉索采用高强钢丝。周教等人^[45]以猎德大桥为背景, 进行了缩尺比为1:60的小比例悬索桥全桥模型试验, 验证了阻尼器的减震效果。房贞政等人^[46]以武汉二七长江大桥为工程背景, 设计了缩尺比为1:100的振动台试验模型, 探讨三塔斜拉桥在一致激励及多点激励下的地震响应规律。Sun和Xie^[47]进行了考虑桩土相互作用的大跨度桥梁全桥振动台模型试验。此外, 大跨度桥梁的行波效应也更为明显^[48]。Guo等人^[49]基于苏通大桥进行了千米级斜拉桥全桥模型振动台试验(图3), 针对纵向采用和不采用黏滞阻尼器, 研究了不同地震动特性输入以及考虑行波效应下黏滞阻尼器的减震效果。结果显示: 大跨度桥梁地震行波效应非常复杂, 并且行波效应很有可能会降低黏滞阻尼器的减震效果, 尤其是在近场地震作用下, 甚至观测到了附加阻尼器增大结构地震响应的情况。这显示在近场地震条件下, 考虑空间地震动效应的大跨度桥梁合理抗震体系尚须开展更深入的研究。

2.3 大跨度悬索桥纵向抗震体系的应用与发展

悬索桥的主梁在纵向地震作用下并不会迫使主塔

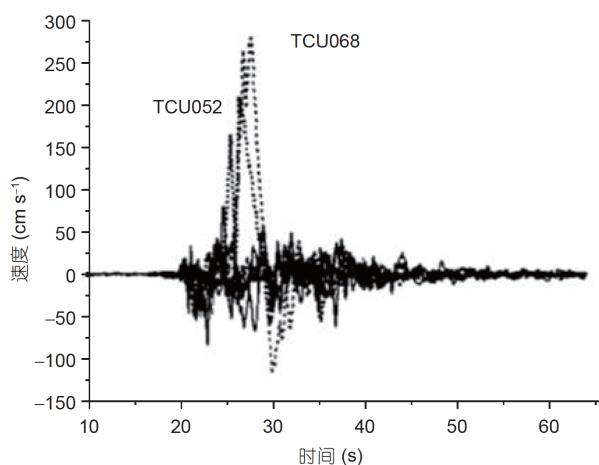


图 2 Chichi 地震近场地震波

Figure 2 Near-fault ground motions of Chichi Earthquake.



图 3 (网络版彩图)千米级斜拉桥模型振动台试验

Figure 3 (Color online) Shake table test on scaled model of cable-stayed bridge with kilometer middle span.

发生纵向弯曲, 主塔的地震响应主要与其自身的刚度和质量分布相关, 通常并不会控制结构设计。但悬索桥的主梁与主缆之间一般采用垂直吊索连接, 为提高纵向约束刚度以满足抗风等纵向荷载作用下的结构性能需要, 大跨度悬索桥有时会设置中央扣。这种连接构造也导致主梁的纵向地震惯性力主要由中央扣传递至主缆, 使得中央扣成为结构抗震的薄弱部位^[50]。

杨海洋等人^[51]研究了中央扣对悬索桥的结构动力特性及地震响应影响, 李永斌和曹冬^[52]、曾德礼^[53]、汪鸿鑫和叶爱君^[54]对比分析了刚性中央扣和柔性中央扣对悬索桥结构动力响应的影响。总体上, 中央扣的设置能较好地提升结构的整体纵向刚度, 刚性中央扣有利于减小主梁的纵向和竖向位移, 但中央扣自身的内力响应比较大, 柔性中央扣有助于减小其自身的内力响应, 但结构整体纵向刚度略小, 位移响应略大。

陶齐宇等人^[55]、曹发辉等人^[56]、Guo等人^[57]在泸定大渡河兴康特大桥中创新性地采用防屈曲约束支撑弹性中央扣结构, 显著提升了中央扣结构的变形能力和耗能能力(图4)。相关研究结果显示: 新型中央扣可降低主塔地震响应约20%、主梁位移约9%。

大跨度悬索桥同样具有低阻尼的结构特性, 因此具有更好耗能能力的黏滞阻尼器减震效果更优; 此外, 大跨度悬索桥的温度变形一般也较大, 黏滞阻尼器也不会对悬索桥的温度变形等正常使用性能造成影响^[50-54]。塔梁弹性约束一般仅在多塔悬索桥的中塔处使用, 以避免主梁温度变形的影响, 同时协调中塔与主梁的动力响应, 并减小中央扣的受力^[20]。

3 大跨度桥梁横向抗震体系

3.1 横向抗震体系关键问题分析

尽管斜拉桥和悬索桥在纵向传力机制上存在一定

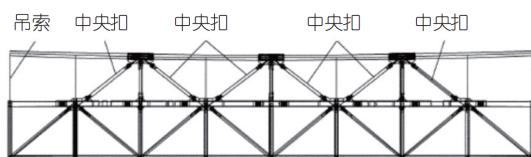


图 4 泸定大渡河兴康特大桥防屈曲约束中央扣

Figure 4 BRB buckles for the Xingkang Suspension Bridge over Luding Dadu River.

的差异, 但两者在横向传力机制上并无本质差异, 主梁的横向力均主要由主塔承担。在使用荷载状态下, 主梁及缆索的大部分横向作用(如风荷载等)经由塔梁横向约束传递至主塔, 因此客观上需要塔梁横向约束有足够的刚度和强度以满足正常运营状态的需要。此外, 若塔梁横向也类似纵向那样容许自由移动, 主梁的横向变位是类似单摆的摆动运动而不是横向漂浮, 并不会迫使主塔横向弯曲而提供约束刚度和回复力。因此, 大多数的大跨度桥梁塔梁横向约束一般都采用抗风支座的固定约束方式(图5)。然而, 这种横向固定约束可能导致较大的主塔横向地震内力响应, 因此一般仅适用于地震烈度不是很高的情况^[58]。随着设防烈度的增加, 地震设计加速度呈几何级增长, 试图通过增大截面或增加配筋来满足结构的抗震需要非常困难, 更有效的方法是引入合适的减、隔震措施建立高效的横向减震体系^[59-65]。

显然, 大跨度桥梁的横向减震体系首先应满足正常运营状态下的刚度和强度需要, 避免减震装置在正常运营条件下进入屈服或强非线性; 其次, 由于地震条件下主梁的横向惯性力主要传递至主塔, 因此塔梁横向减隔震系统还必须具有足够的恢复力/耗能能力。由此可见, 需同时满足恢复力/阻尼力和大变形能力的需要。

需要指出的是, 悬索桥的经济跨径远大于斜拉桥, 因此悬索桥的实际跨径一般也远大于斜拉桥。由于主梁的横向刚度与跨径的三次方呈反比, 因此悬索桥的横向基本振型周期一般较长, 可以有效降低主梁的横向惯性力水平, 此外悬索桥的主塔一般采用抗震性能较好的H型塔, 相比斜拉桥而言其横向抗震问题并不突出。此外, 主梁的横向刚度近似与梁宽的三次方呈正比, 因此梁宽越宽的桥梁其主梁横向刚度越大, 再加上主梁线质量也越大, 地震惯性力也就越大。宽桥多见于城市桥梁, 且城市桥梁中斜拉桥结构更为多见, 由此可见, 斜拉桥的横向抗震问题更为突出, 尤其是位于强震区的中等跨径、宽桥面、重主梁(混凝土主梁或组合梁)城市斜拉桥。因此, 以下主要讨论斜拉桥的横向抗震体系。

3.2 斜拉桥横向减震体系应用与发展

3.2.1 位移依赖型减震机制

位移依赖型的弹塑性减震机制用于横向减震体系

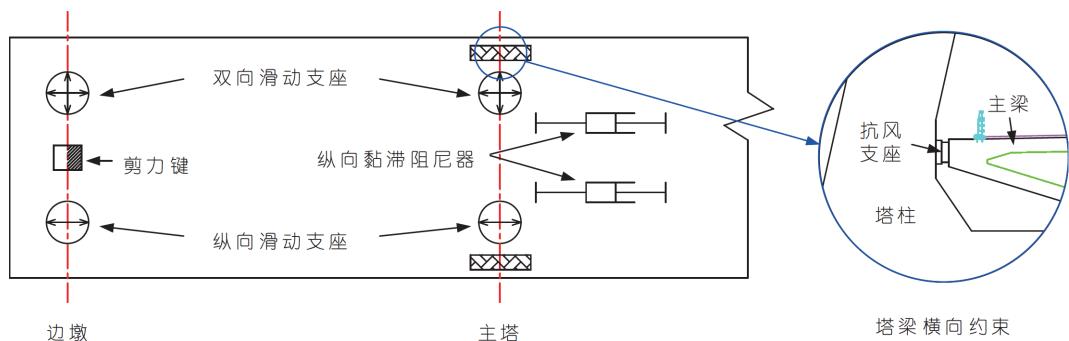


图 5 (网络版彩图) 大跨度桥梁横向固定约束体系

Figure 5 (Color online) Lateral constraining system for long-span bridges.

的突出优点是能同时满足结构在正常使用状态下的约束刚度和强度需要(保持弹性)以及在地震条件下的变形和耗能能力需要(进入塑性). 橡胶类弹塑性减震支座由于竖向承载力偏低和材料耐久性的问题, 在大跨度桥梁中较少采用; 摩擦型减震支座则难以提供强震所需的大恢复力/阻尼力; 在工程实际中应用较多的是软钢阻尼器. Guan 等人^[66]在南京夹江桥首次采用了E型钢阻尼支座用于辅助墩和边墩的横向减震(图6). 此后, 类似的C形或者三角形钢阻尼器也被用于春晓大桥、巢湖大桥、樟树赣江二桥的辅助墩或者边墩处^[67]. 但这类钢阻尼器的屈服力和变形能力是一对矛盾, 难以同时满足大屈服力和大变形能力的需求. 铺前大桥为主跨230 m的单塔钢梁斜拉桥, 塔梁横向减震措施采用屈服力7000 kN、位移能力±20 cm的软钢阻尼器, 其他工程应用则主要是用于大跨度桥梁的边

墩或辅助墩处的横向减震.

为克服软钢阻尼元件在屈服力和变形能力上的矛盾, 新奥克兰海湾桥采用四个分离塔柱间设置120组钢耗能剪力键的减震方案(图7), 将塔柱的极限侧位移率提升至8%^[68,69], 但这一方案用于其他塔型时会影响结构的外观.

3.2.2 速度依赖型减震机制+“牺牲保护”体系

大跨度斜拉桥、悬索桥横向塔梁约束释放后, 主梁除重力刚度外, 并无足够的恢复刚度, 无法满足正常使用性能要求, 而速度依赖型减震机制的刚度为零. 因此大跨度桥梁的横向减震体系并不能单独采用速度依赖型减震机制, 一般要与“牺牲保护”装置组合使用. 在正常使用状态下, 由“牺牲保护”装置提供塔梁横向



图 6 (网络版彩图) E型钢阻尼支座

Figure 6 (Color online) Energy dissipation bearings with E-shaped steel dampers.

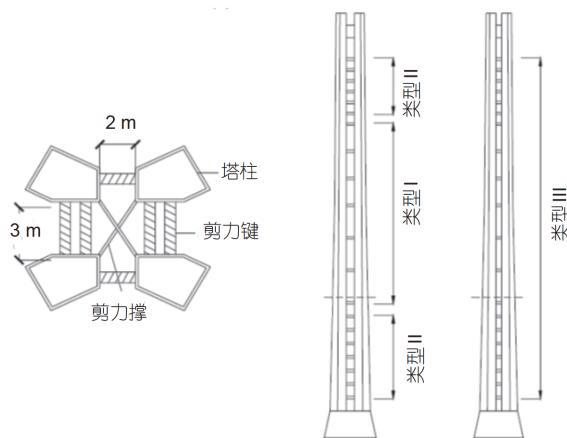


图 7 新奥克兰海湾桥主塔剪切键减震方案

Figure 7 Shear keys for seismic mitigation of the towers of the new Oakland Bay Bridge.

约束, 满足正常使用性能要求, 在强震作用下, 当塔梁间传力超过“牺牲保护”装置的最大传力时, “牺牲保护”装置发生破坏, 即发生“牺牲”, 释放塔梁横向约束, 为阻尼器减震耗能提供必要的相对运动。由于“牺牲保护”装置限定了塔梁间的最大传力, 事实上也保护了相邻的主塔和主梁结构, 这也是“保护”含义的由来。但存在的主要问题是“牺牲”构件发生破坏释放塔-梁横向约束时, 黏滞阻尼器可能受到较大速度的冲击作用, 导致黏滞阻尼器的破坏。

希腊安蒂雷翁大桥是首个采用黏滞阻尼器“牺牲保护”减震体系的大跨度桥梁。每个塔-梁横向连接处设置了4个3500 kN的黏滞阻尼器和1个10500 kN的“牺牲”限位杆, 每个墩-梁横向连接处设置了2个2500 kN的黏滞阻尼器和1个3400 kN的“牺牲”装置(图8)^[70]。在正常使用条件下, “牺牲”构件保持塔-梁、墩-梁横向固定约束以满足正常使用性能要求; 发生强震时, “牺牲”构件发生破坏释放塔-梁横向约束, 横向黏滞阻尼器发挥减震功能。这种减震方案最突出的特点是横向黏滞阻尼器可以很方便地提供大吨位阻尼力(14000 kN)和大变形能力(1750~2600 mm)。

然而, 安蒂雷翁大桥在塔-梁、墩-梁连接处的阻尼器冲程分别设计为1750和2600 mm, 远高于已知的用于大跨度桥梁减震的黏滞阻尼器设计冲程。从已公开资料上看, 并无有关阻尼器冲程的具体设计依据, 也没有提供“牺牲”构件发生破坏释放塔-梁横向约束时, 黏滞阻尼器可能受到的冲击作用。根据黏滞阻尼器“牺牲保护”减震体系的减震机制, 在黏滞阻尼器发挥

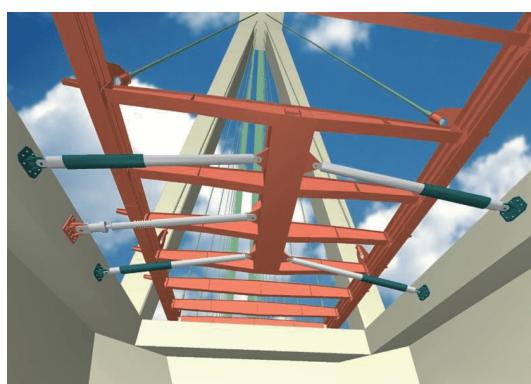


图8 (网络版彩图)希腊安蒂雷翁大桥横向黏滞阻尼器+“牺牲保护”体系

Figure 8 (Color online) Protecting lateral system for the Rion-Antirion Bridge.

减震功能前, 牺牲装置应首先发生破坏以释放塔-梁、墩-梁横向约束。目前对大吨位牺牲装置破坏瞬间对结构的冲击效应研究还较少, 但已有相关研究显示: 冲击效应可能导致黏滞阻尼器的位移需求显著增加^[71]。此外, 牺牲装置失效后, 主梁在横向上的约束仅依赖重力刚度, 体系对侧向风荷载非常敏感, 可导致数十厘米以上的大偏移量。地震序列统计资料显示, 近70%的强余震发生在主震后10天内, 且震级越高, 间隔时间越短^[72~74], 在如此短的时间内, 完成牺牲装置的更换并不现实。2008年, 安蒂雷翁大桥在Achaia-Ilia地震(距离大桥36 km, 强度约合120年回归期)作用下, 发生了限位装置屈服, 震后损伤检查、主梁复位与牺牲装置更换耗时两个多月^[75]。因此, 这种抗震体系还应满足主震后至牺牲装置修复前, 在风荷载和余震联合作用下的结构安全性需要^[76~78]。由此可见, 目前对采用速度依赖型+“牺牲保护”体系的大跨度桥梁横向抗震体系设计方法还有待进一步研究和完善。

3.2.3 复合减震机制

Sahasrabudhe和Nagarajaiah^[79]、Dicleli^[80,81]、Makris和Chang^[82]、石岩等人^[83]的研究显示, 对减隔震体系形成多阶刚度变化、增加体系耗能或者组合使用位移型和速度型的耗能装置, 有助于降低近断层地震对减隔震体系的大位移需求。目前, 常见的并联减震机制包括弹性支座、铅芯橡胶支座、摩擦支座、摩擦摆式支座以及黏滞阻尼器等的各种组合, 但这些常规减震措施难以满足强震条件下大跨度桥梁减震的大恢复力/阻尼力与大位移能力要求^[84,85]。Guan等人^[12]为了解决强震下(0.4 g)混凝土主梁斜拉桥的横向减震问题, 提出了弹性索+黏滞阻尼器的组合横向减震方案用于宁夏永宁黄河大桥(图9)。该方案可提供千吨级(12500 kN)的恢复力和±250 mm的弹性变形能力, 并联的黏滞阻尼器(阻尼系数 $2500 \text{ kN} (\text{m s}^{-1})^{-0.3}$, 阻尼指数0.3)则用于提供必要的阻尼耗能。同时, 该体系的拉索弹性刚度可满足正常使用约束要求, 可不必采用额外的限位措施。实际上, 正是塔梁横向释放时主梁横向缺乏足够的弹性刚度致使其无法像纵向那样形成漂浮体系, 而横向弹性索与黏滞阻尼器的组合则既提供了必要的弹性恢复刚度和必要的阻尼耗能, 因此可以达到类似纵向漂浮体系+黏滞阻尼器的减震效果。

为适应近场强震下的减震体系大变形需要, 管仲

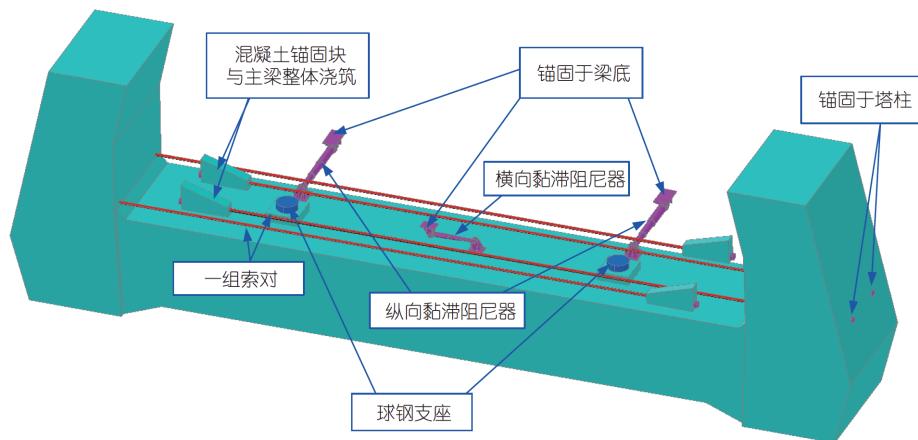


图 9 (网络版彩图)永宁黄河大桥弹性索+黏滞阻尼器组合体系

Figure 9 (Color online) Earthquake resisting system comprised of elastic cables and viscous damper for the Yongning Yellow River Bridge.

国等人^[86,87]进一步提出了弹塑性索+黏滞阻尼器的组合横向减震方案,通过改进拉索锚固端设计使其具有稳定的塑性能力。静载试验结果显示:发生首根索丝拉断时的极限应变约为3.3% (图10),相比弹性极限应变提高了3倍多。数值分析结果显示:尽管拉索具有只拉不压的特性,无法提供多次往复滞回耗能,但拉索的高强度特性可在强脉冲作用时形成大约束力和瞬间高耗能机制,从而对强脉冲地震形成有效的克制作用,黏滞阻尼器则可有效抑制地震的高频往复运动成分,进而显著提升整个系统抵抗近场强脉冲地震作用的能力^[88]。

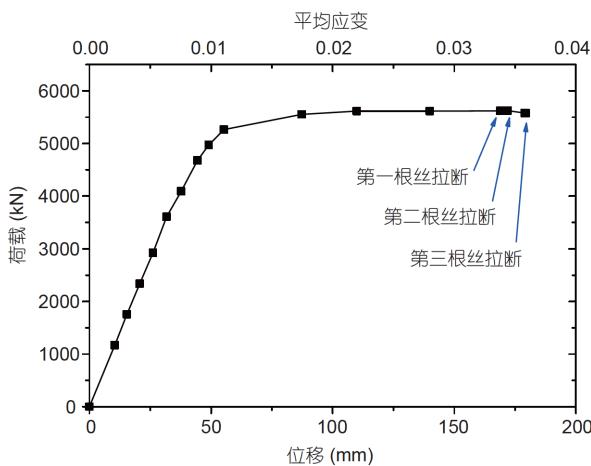


图 10 (网络版彩图)弹塑性索静载极限拉伸性能

Figure 10 (Color online) Ultimate tensile properties of elasto-plastic cables.

4 大跨度桥梁抗震体系研究展望

综合以上分析可以看出,由于我国已建成的大跨度桥梁主要集中在东南部等中等强度及以下的地震区,对该地震条件下的大跨度桥梁抗震体系研究和工程应用均已有充分的发展。此外,随着我国基础设施建设重点逐步向西部转移,对在高强地震区的大跨度桥梁合理抗震体系也开展了一定的研究和应用,但总体上数量还很少。当前我国大跨度桥梁抗震体系的研究主要还存在以下3方面的问题。

(1) 脉冲型强震下的高效减震机制研究。近断层地震波大部分能量集中在很窄的频率带,表现为时程开始阶段的大速度脉冲。传统的减震机制在强脉冲型地震下减震效率较低,针对脉冲型强震作用,寻求高效的减震控制方法,并建立新型高效的减震机制和抗震体系是解决近场条件建设大跨度桥梁的关键问题。

(2) 跨断层大跨度桥梁抗震体系研究。尽管现行规范建议桥梁选址应避开断层等不利地段,但现实中很多情况下却是避无可避,如希腊安蒂雷翁大桥、土耳其伊兹米特大桥、智利Chacao大桥等。对于跨断层大跨度桥梁的抗震体系研究不仅要考虑近场脉冲型强震作用的减震控制,还需考虑强地面变形,包括永久变形的适用性。

(3) 牺牲保护体系设计方法。牺牲保护体系通过静、动载下的结构约束要求的不同而提供两种不同的结构状态,可以很好地满足结构在正常运营和强震作

用下的结构性能需要。然而, 目前有关牺牲保护体系的设计方法还不完善, 包括牺牲装置牺牲时的冲击效应、阻尼减震措施与牺牲装置的性能配合, 以及强震发生后考虑体牺牲装置全部或部分牺牲后体系在余震和风等联合作用下的性能控制等。

5 结语

《国家防震减灾规划(2006—2020)》指出, 我国是世界上地震活动和地震灾害最严重的国家之一, 我国大陆50%的国土面积位于VII度以上的区域。近30年的

大规模交通基础设施促进了我国大跨度桥梁的技术发展和工程应用, 在大跨度桥梁的抗震体系研究上积累了丰富的成果。当前, 我国基础设施建设重点正逐渐向西部强震区转移, 对大跨度桥梁的抗震减震问题提出了更高的挑战。

目前, 在近断层、跨断层等极端地震作用下的大跨度桥梁减震机理和减震体系上的研究还很少, 相关的减震理论和设计方法也有待完善。开展相关的研究不仅可为当前我国西部强震区的大跨桥梁建设提供直接的技术支撑, 还将有助于提升我国在大跨桥梁领域的创新能力和核心竞争力。

参考文献

- 1 Feng M R. China's major bridges. In: Proceedings, IABSE Workshop, International Association for Bridge and Structural Engineering. Zurich, 2009. 1–23
- 2 Ha, D H, Park J H, Park K S. Optimization of complex dampers for the improvement of seismic performance of long-span bridges. *J Civ Eng*, 2010, 14: 33–40
- 3 Siringoringo D M, Fujino Y, Namikawa K. Seismic response analyses of the Yokohama Bay Cable-Stayed Bridge in the 2011 great East Japan Earthquake. *J Bridge Eng*, 2014, 19: A4014006
- 4 Li L, Hu S, Wang L, et al. Longitudinal constraint systems for super high-pier multi-span concrete cable-stayed bridges (in Chinese). *Earthq Eng Eng Dyn*, 2015, 35: 85–93 [李立峰, 胡思聪, 王连华, 等. 超高墩多塔混凝土斜拉桥纵向约束体系研究. 地震工程与工程振动, 2015, 35: 85–93]
- 5 Liang Z, Li J. Research on damper parameters of long-span rail-cum-road cable-stayed bridge (in Chinese). *J Tongji Univer (Nat Sci)*, 2007, 35: 728–733 [梁智垚, 李建中. 大跨度公铁两用斜拉桥阻尼器参数研究. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35: 728–733]
- 6 Qu A, Li L. Seismic design of main ship channel bridge of hutong changjiang river bridge (in Chinese). *Bridge Constr*, 2015, 45: 69–73 [屈爱平, 李龙安. 沪通长江大桥主航道桥抗震设计. 桥梁建设, 2015, 45: 69–73]
- 7 Guo H, Li Y, Hu S, et al. Research on earthquake response of highway and railway shared cable-stayed bridge with 532 m-main span and vibration-reducing effect of damper (in Chinese). *Railway Eng*, 2015, 55(1): 14–18 [郭辉, 李永强, 胡所亭, 等. 主跨532 m公铁两用斜拉桥的地震响应及阻尼器减震效果研究. 铁道建筑, 2015, 55(1): 14–18]
- 8 Shangguan S, Sun P, Yu D. Research on rational transverse seismic system of a single-tower cable-stayed bridge (in Chinese). *Highway Trans Technol (Appl Technol)*, 2017, 1: 132–136 [上官甦, 孙平宽, 于德恩. 独塔斜拉桥横桥向合理抗震体系研究. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 1: 132–136]
- 9 Quan W, Zhang L, Wang L. Optimized damping design of single pylon cable-stayed bridge in high intensity seismic region (in Chinese). *Railway Stand Design*, 2015, 59: 68–72 [全伟, 张雷, 王砾文. 高烈度震区独塔斜拉桥减震优化设计. 铁道标准设计, 2015, 59: 68–72]
- 10 Ye A, Fan L. Lateral constraint systems for super-long-span cable-stayed bridge (in Chinese). *China J Highway Trans*, 2007, 20: 63–67 [叶爱君, 范立础. 超大跨度斜拉桥的横向约束体系. 中国公路学报, 2007, 20: 63–67]
- 11 Shen X, Ni X, Ye A. Seismic system and design method of transverse metallic yielding dampers on long-span cable-stayed bridge side piers (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2016, 49: 110–119 [沈星, 倪晓博, 叶爱君. 大跨度斜拉桥边墩新型横向钢阻尼器减震体系及设计方法. 土木工程学报, 2016, 49: 110–119]
- 12 Guan Z, You H, Li J. Lateral isolation system of a long-span cable-stayed bridge with heavyweight concrete girder in a high seismic region. *J Bridge Eng*, 2017, 22: 04016104
- 13 Chen Q, Wu H, Li J. Research on seismic response reduction measures of long-span suspension bridge under rare earthquake (in Chinese). *J Kunming Univer Sci Technol (Nat Sci)*, 2013, 38: 27–31 [陈启泰, 吴金华, 李健. 罕遇地震下大跨悬索桥减隔震措施研究. 昆明理工大学学

报: 自然科学版, 2013, 38: 27–31]

- 14 Zhang X, Zhang C. Study of rational anti-seismic structural system for long-span suspension bridge (in Chinese). *World Bridge*, 2017, 1: 39–44.
[张新军, 张超. 大跨度悬索桥合理抗震结构体系研究. 世界桥梁, 2017, 1: 39–44]
- 15 Yang M, Chen G. Seismic response reduction measurement of long-span self-anchored suspension bridges with single-tower (in Chinese). *J Railway Sci Eng*, 2010, 7: 19–22 [杨孟刚, 陈国阳. 大跨度独塔自锚式悬索桥减隔震措施. 铁道科学与工程学报, 2010, 7: 19–22]
- 16 Yi J, Li J. Longitudinal seismic behavior of a single-tower cable-stayed bridge subjected to near-field earthquakes. *Shock Vib*, 2017, 2017: 1–16
- 17 Guan Z, Li J Z, Guo W, et al. Design and validation of a shaking-table test model on a long-span cable-stayed bridge with inverted-Y-shaped towers. *Eng Struct*, 2019, 201: 109823
- 18 Zhou L, Wang X, Ye A. Shake table test on transverse steel damper seismic system for long span cable-stayed bridges. *Eng Struct*, 2019, 179: 106–119
- 19 Wang R, Xu Y, Li J. Transverse seismic behavior studies of a medium span cable-stayed bridge model with two concrete towers. *J Earthq Eng*, 2017, 21: 151–168
- 20 Li J, Yan J, Peng T, et al. Shake table studies of seismic structural systems of a Taizhou Changjiang Highway Bridge model. *J Bridge Eng*, 2015, 20: 04014065
- 21 Takahashi M. Earthquake resistance design of the Meiko Nishi Bridge. In: Proceedings of 1st US-Japan Bridge Engineering Workshop. Tsukuba: Public Works Research Institute, 1984
- 22 Jiao C, Li J, Peng T. Effects of different connecting styles between towers and deck on seismic responses of a long-span cable-stayed bridge (in Chinese). *J Vibr Shock*, 2009, 10: 179–184 [焦驰宇, 李建中, 彭天波. 塔梁连接方式对大跨斜拉桥地震反应的影响. 振动与冲击, 2009, 10: 179–184]
- 23 Zhang Y, Chen X, Guo Y. Influence of longitudinal elastic constraints on dynamic characteristic and seismic response of railway cable-stayed bridge (in Chinese). *J Railway Sci Eng*, 2011, 8: 21–26 [张永亮, 陈兴冲, 郭永强. 塔梁间纵向弹性约束对铁路斜拉桥动力特性及地震反应的影响. 铁道科学与工程学报, 2011, 8: 21–26]
- 24 Li L, Liu B, Zhang C, et al. Research on the seismic performance of mid-span cable-stayed bridges with elastic constraints between tower and beam (in Chinese). *J Earthq Eng Eng Vibr*, 2013, 33: 146–152 [李立峰, 刘本永, 张晨熙, 等. 中等跨径斜拉桥塔梁弹性约束装置的减震效应研究. 地震工程与工程振动, 2013, 33: 146–152]
- 25 Ruan H, Li L, Yang G, et al. Study of seismic techniques for Huanggang Changjiang River Rail-cum-Road Bridge (in Chinese). *Bridge Constr*, 2013, 43: 34–39 [阮怀圣, 李龙安, 杨光武, 等. 黄冈公铁两用长江大桥抗震技术研究. 桥梁建设, 2013, 43: 34–39]
- 26 Ali H E M, Abdel-Ghaffar A M. Seismic energy dissipation for cable-stayed bridges using passive devices. *Earthq Eng Struct Dyn*, 1994, 23: 877–893
- 27 Shen X, Camara A, Ye A. Effects of seismic devices on transverse responses of piers in the Sutong Bridge. *Earthq Eng Eng Vib*, 2015, 14: 611–623
- 28 Soneji B B, Jangid R S. Passive hybrid systems for earthquake protection of cable-stayed bridge. *Eng Struct*, 2007, 29: 57–70
- 29 Calvi G M, Sullivan T J, Villani A. Conceptual seismic design of cable-stayed bridges. *J Earthq Eng*, 2010, 14: 1139–1171
- 30 Camara A, Astiz M A. Analysis and control of cable-stayed bridges subject to seismic action. *Struct Eng Int*, 2014, 24: 27–36
- 31 Martínez-Rodrigo M D, Filiatrault A. A case study on the application of passive control and seismic isolation techniques to cable-stayed bridges: A comparative investigation through non-linear dynamic analyses. *Eng Struct*, 2015, 99: 232–252
- 32 Ruanggrassamee A, Kawashima K. Seismic response control of a cable-stayed bridge by variable dampers. *J Earthq Eng*, 2006, 10: 153–165
- 33 Chang C M, Loh C H. Seismic response control of a cable-stayed bridge using different control strategies. *J Earthq Eng*, 2006, 10: 481–508
- 34 Vader T S, McDaniel C C. Influence of dampers on seismic response of cable-supported bridge towers. *J Bridge Eng*, 2007, 12: 373–379
- 35 Zhang X, Zhao C, Guo J. Investigation of seismic performance of super long-span cable-stayed bridges. *Earthq Struct*, 2018, 14: 493–503
- 36 Somerville P G, Smith N F, Graves R W, et al. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismol Res Lett*, 1997, 68: 199–222
- 37 Bray J D, Rodriguez-Marek A. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2004, 24: 815–828
- 38 Dicleli M. Performance of seismic-isolated bridges in relation to near-fault ground-motion and isolator characteristics. *Earthq Spectr*, 2006, 22: 887–907

- 39 Jónsson M H, Bessason B, Haflidason E. Earthquake response of a base-isolated bridge subjected to strong near-fault ground motion. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2010, 30: 447–455
- 40 Dimitrakopoulos E, Makris N, Kappos A J. Dimensional analysis of the earthquake-induced pounding between adjacent structures. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2009, 38: 867–886
- 41 Yi L, Sun D, Li H. Isolation measures' study for span hybrid girder cable-stayed bridge under near-fault earthquake motion (in Chinese). *Highway Eng*, 2017, 4: 255–259, 309 [易凌志, 孙德荣, 李辉辉. 近断层地震作用下大跨混合梁斜拉桥减隔震措施研究. 公路工程, 2017, 4: 255–259, 309]
- 42 Garevski M A, Brownjohn J M W, Blakeborough A, et al. Resonance-search tests on a small-scale model of a cable-stayed bridge. *Eng Struct*, 1991, 13: 59–66
- 43 Garevski M A, Severn R T. Damping and response measurement on a small-scale model of a cable-stayed bridge. *Earthq Eng Struct Dyn*, 1993, 22: 13–29
- 44 Gao W, Tang G, Huang F, et al. Shaking table test study of north main bridge of Xiaozhang Sea-Crossing Bridge (in Chinese). *Bridge Constr*, 2013: 11–17 [高文军, 唐光武, 黄福伟, 等. 厦漳跨海大桥北汊主桥振动台试验研究. 桥梁建设, 2013: 11–17]
- 45 Zhou M, Wang J, Yuan W, et al. Seismic performance assessment of Liede Bridge based on detailed finite element analysis (in Chinese). *J Tongji Univer (Nat Sci)*, 2008, 36: 143–148 [周救, 王君杰, 袁万城, 等. 基于精细有限元分析的猎德大桥抗震性能评价. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36: 143–148]
- 46 Fang Z, Zhang C, Chen Y, et al. Research on the shaking table test of three towers cable-stayed bridge based on three shaking table system (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2012(S1): 25–29 [房贞政, 张超, 陈永健, 等. 基于三台阵振动台的多塔斜拉桥试验研究. 土木工程学报, 2012 (S1): 25–29]
- 47 Sun L, Xie W. Full-model shaking table tests of seismic behavior of a super-long-span cable-stayed bridge with pile foundations. *J Bridge Eng*, 2019, 24: 04019102
- 48 Xiong M, Huang Y, Zhao Q. Effect of travelling waves on stochastic seismic response and dynamic reliability of a long-span bridge on soft soil. *Bull Earthq Eng*, 2018, 16: 3721–3738
- 49 Guo W, Li J, Guan Z. Shake table studies of the longitudinal seismic mitigation effect of viscous dampers on a kilometer-scale cable-stayed bridge (in Chinese). *China J Highway Trans*, 2019, 32: 156–164 [郭葳, 李建中, 管仲国. 黏滞性阻尼器对千米级斜拉桥纵向减震效果的振动台试验研究. 中国公路学报, 2019, 32: 156–164]
- 50 Xu B, Yu Y, Zhang F, et al. Influence of central buckle on seismic response of suspension bridges (in Chinese). *Eng Constr*, 2011, 25: 498–500 [徐斌, 於亚辉, 张飞, 等. 中央扣对悬索桥地震反应的影响. 工程与建设, 2011, 25: 498–500]
- 51 Yang H, Zhong T, Xia H. Study on effect and mechanism of central buckle on seismic response of long span suspension bridge (in Chinese). *J China Railway Soc*, 2015, 37: 94–100 [杨海洋, 钟铁毅, 夏禾. 中央扣对大跨度悬索桥地震响应影响及机理研究. 铁道学报, 2015, 37: 94–100]
- 52 Li Y, Cao D. Study of stochastic seismic response of long-span suspension bridge with rigid central buckle (in Chinese). *World Bridge*, 2017, 45: 48–54 [李永斌, 曹冬. 具有刚性中央扣的大跨度悬索桥随机地震响应研究. 世界桥梁, 2017, 45: 48–54]
- 53 Zeng D. Analysis on influence of flexible central buckle on single span suspension bridge (in Chinese). *Railway Eng*, 2019, 59: 16–18, 25 [曾德礼. 柔性中央扣对单跨悬索桥的影响分析. 铁道建筑, 2019, 59: 16–18, 25]
- 54 Wang H, Ye A. Influence of flexible central buckle on seismic response of long-span suspension bridges (in Chinese). *J Civil Eng Manage*, 2019, 36: 161–165 [汪鸿鑫, 叶爱君. 柔性中央扣对大跨度悬索桥地震反应的影响. 土木工程与管理学报, 2019, 36: 161–165]
- 55 Tao Q, Cao F, Jiang J, et al. Key techniques of seismic design of Xingkang Dadu River Bridge in Luding (in Chinese). *Bridge Constr*, 2018, 48: 94–99 [陶齐宇, 曹发辉, 蒋劲松, 等. 泸定大渡河兴康特大桥抗震设计关键技术. 桥梁建设, 2018, 48: 94–99]
- 56 Cao F, Tao Q, Jiang J, et al. Innovative application of energy-dissipative central buckle on long-span suspension bridges (in Chinese). *Southwest Highway*, 2018, 147: 73–77 [曹发辉, 陶齐宇, 蒋劲松, 等. 大跨度悬索桥耗能型中央扣的创新应用. 西南公路, 2018, 147: 73–77]
- 57 Guo W, Li J, Xiang N. Seismic performance of the buckling-restrained brace central buckle for long-span suspension bridges. *J Earthq Tsunami*, 2018, 12: 1850015
- 58 Zhang X J, Fu G N. Seismic performance and its favorable structural system of three-tower suspension bridge. *Struct Eng Mech*, 2014, 50: 215–229
- 59 Zhou F, Tan P. Recent progress and application on seismic isolation energy dissipation and control for structures in China. *Earthq Eng Eng Vib*,

2018, 17: 19–27

- 60 Wesolowsky M J, Wilson J C. Seismic isolation of cable-stayed bridges for near-field ground motions. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2003, 32: 2107–2126
- 61 Wang H, Wang C, Li A, et al. Seismic performance of new isolated continuous bridge in high intensity region (in Chinese). *J Southeast Univer (Nat Sci)*, 2014, 44: 793–798 [王浩, 王春峰, 李爱群, 等. 高烈度区新型减隔震连续梁桥的抗震性能. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44: 793–798]
- 62 He X, Yang Y, He J, et al. Study on pounding effects between large-span cable-stayed bridge and its approach bridge in high seismic zones (in Chinese). *J Wuhan Univer Technol (Transport Sci Eng)*, 2017, 41: 559–563 [何雄君, 杨阳, 何佳, 等. 高震区大跨钢-混结合梁斜拉桥纵向碰撞效应研究. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41: 559–563]
- 63 Han Q, Du X, Liu W, et al. Shaking table test of isolated continuous girder bridge model under different earthquake intensity earthquake intensity excitations (in Chinese). *China J Highway Trans*, 2008, 21: 50–56 [韩强, 杜修力, 刘文光, 等. 不同地震烈度下隔震连续梁桥模型振动台试验. 中国公路学报, 2008, 21: 50–56]
- 64 Shan D, Zhou X, Yang J, et al. Bridge seismic damage identification based on seismic fragility analysis (in Chinese). *J Vibr Shock*, 2017, 36: 195–201 [单德山, 周筱航, 杨景超, 等. 结合地震易损性分析的桥梁地震损伤识别. 振动与冲击, 2017, 36: 195–201]
- 65 Zhuo W, Zeng W. Probabilistic deformation capacity model for rectangular RC bridge columns (in Chinese). *Eng Mech*, 2015, 32: 57–63 [卓卫东, 曾武华. 矩形RC桥墩变形能力概率模型. 工程力学, 2015, 32: 57–63]
- 66 Guan Z, Li J, Xu Y. Performance test of energy dissipation bearing and its application in seismic control of a long-span bridge. *J Bridge Eng*, 2010, 15: 622–630
- 67 Shen X, Wang X, Ye Q, et al. Seismic performance of transverse steel damper seismic system for long span bridges. *Eng Struct*, 2017, 141: 14–28
- 68 McDaniel C C, Seible F. Influence of inelastic tower links on cable-supported bridge response. *J Bridge Eng*, 2005, 10: 272–280
- 69 McDaniel C C, Uang C M, Seible F. Cyclic testing of built-up steel shear links for the new bay bridge. *J Struct Eng*, 2003, 129: 801–809
- 70 Infant S, Papanikolas P, Benzoni G, et al. Rion-Antirion Bridge: Design and full-scale testing of the seismic protection devices. In: Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, 2004. 2174
- 71 Yang B. Research on Seismic Response and Design Method of Seismic Isolation Bridge with Sacrificial Device (in Chinese). Dissertation of Masteral Degree. Shanghai: Tongji University, 2017 [杨彬. 带有牺牲装置的减隔震桥梁地震响应与设计方法研究. 硕士学位论文. 上海: 同济大学, 2017]
- 72 Wu B, Ou J. The statistical relationship between the magnitude of the main and aftershocks and the parameters of the ground motion model (in Chinese). *Earthq Eng Eng Vibr*, 1993, 13: 28–35 [吴波, 欧进萍. 主震与余震的震级统计关系及其地震动模型参数. 地震工程与工程振动, 1993, 13: 28–35]
- 73 Jiang H, Qu Y, Li Y, et al. Some statistical characteristics of aftershock sequences of moderate to strong earthquakes in mainland China (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2006, 49: 1110–1117 [蒋海昆, 曲延军, 李永莉, 等. 中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征. 地球物理学报, 2006, 49: 1110–1117]
- 74 Wen W. Study on Parameter Characteristics and Damage Spectra for Mainshock-Aftershock Ground Motions (in Chinese). Dissertation of Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 [温卫平. 主余震地震动参数特征及损伤谱研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015]
- 75 Infant S, Papanikolas P, Stathopoulos-Vlamis A. The behavior of Rion-Antirion Bridge during the earthquake of Achaia-IIlia on June 8, 2008. In: Proceedings of 3rd International Fib Congress incorporating the PCI Annual Convention and Bridge Conference. Venice, 2010
- 76 Xie X, Lin G, Duan Y F, et al. Seismic damage of long span steel tower suspension bridge considering strong aftershocks. *Earthq Struct*, 2012, 3: 767–781
- 77 Jung D, Andrawes B. Seismic damage assessment of SMA-retrofitted multiple-frame bridge subjected to strong main shock-aftershock excitations. *J Bridge Eng*, 2017, 23: 04017113
- 78 Wang Z, Yang H, Pang Y, et al. The residual displacement research of multi-tower cable-stayed bridge under mainshock-aftershock seismic sequences (in Chinese). *Struct Eng*, 2015, 31: 103–110 [王征南, 杨浩林, 庞于涛, 等. 多塔斜拉桥在主震-余震序列波下地震位移研究. 结构工程师, 2015, 31: 103–110]
- 79 Sahasrabudhe S, Nagarajaiah S. Effectiveness of variable stiffness systems in base-isolated bridges subjected to near-fault earthquakes: An experimental and analytical study. *J Intell Mat Syst Str*, 2005, 16: 743–756

- 80 Dicleli M. Supplemental elastic stiffness to reduce isolator displacements for seismic-isolated bridges in near-fault zones. *Eng Struct*, 2007, 29: 763–775
- 81 Dicleli M. Performance of seismic-isolated bridges with and without elastic-gap devices in near-fault zones. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2008, 37: 935–954
- 82 Makris N, Chang S P. Effects of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2000, 29: 85–107
- 83 Shi Y, Wang D, Sun Z. Analysis of seismic response of seismically mitigated and isolated bridge subjected to near-fault ground motion (in Chinese). *Bridge Constr*, 2014, 44: 19–24 [石岩, 王东升, 孙治国. 近断层地震动下减隔震桥梁地震反应分析. 桥梁建设, 2014, 44: 19–24]
- 84 Wei B, Cui R, Dai G, et al. Impact of laminated rubber bearings on seismic response of irregular continuous bridges (in Chinese). *China J Highway Trans*, 2013, 26: 110–117 [魏标, 崔睿博, 戴公连, 等. 橡胶支座对非规则连续梁桥地震反应的影响. 中国公路学报, 2013, 26: 110–117]
- 85 Meng Q L, Zhang M Z, Zhou G L. The study on SMA pseudo-rubber metal damper's control efficiency on aseismic pounding in high-pier bridge in shaking table testing. In: Li L. Advanced Materials Research. Vol. 163-167. Switzerland: Trans Tech Publications, 2011. 4429–4441
- 86 You H, Guan Z. Elastoplastic cable pair and viscous damper used in the lateral seismic isolation of cable-stayed bridges (in Chinese). *J Vibr Shock*, 2017, 36: 183–188 [游瀚, 管仲国. 弹塑性索和黏滞阻尼器系统用于斜拉桥横向减震分析. 振动与冲击, 2017, 36: 183–188]
- 87 Guan Z, You H, Guo H. Responses of cable-stayed bridge transversely isolated with elasto-plastic cable pairs and fluid viscous damper subjected to near fault ground motions (in Chinese). *J Tongji Univer (Nat Sci)*, 2016, 44: 1653–1659 [管仲国, 游瀚, 郭河. 近断层斜拉桥弹塑性索与阻尼器组合横向减震. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44: 1653–1659]
- 88 Guan Z, You H, Li J. An effective lateral earthquake-resisting system for long-span cable-stayed bridges against near-fault earthquakes. *Eng Struct*, 2019, 196: 109345

Advances in earthquake resisting systems for long-span bridges

GUAN ZhongGuo & LI JianZhong

Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

The demand for the construction of infrastructure is being transferred to the West of China. To ensure the seismic safety of new long-span bridges in the area of high seismic activity, the state of the art earthquake-resisting systems for long-span bridges are investigated and further developed. The common issues of the isolation mechanism, advantages and disadvantages, and influence of practical earthquake resisting systems are summarized. During the recent development of practical applications of long-span bridges, many approaches and techniques have been developed for such bridges with moderate seismic risks. However, there are few studies (as well as the corresponding design theory and specifications) on earthquake-resisting systems for appropriate long-span bridges with extremely high seismic risks (e.g., near-fault or cross-fault conditions).

long-span bridge, cable-stayed bridge, suspension bridge, earthquake resisting system

doi: [10.1360/SST-2020-0105](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0105)