

引用本文:王克海,张秉哲,郭威佐. 中小跨径桥梁抗震的概念设计与构造措施[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(2): 30-35.

WANG Ke-hai, ZHANG Bing-zhe, GUO Wei-zuo. Conceptual Design and Construction Measures of Small-to-medium Span Bridge Seismic[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(2): 30-35.

DOI:10.19815/j.jace.2021.06075

中小跨径桥梁抗震的概念设计与构造措施

王克海^{1,2}, 张秉哲², 郭威佐²

(1. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为改善中小跨径桥梁的抗震性能,总结了青海玛多地震、汶川地震等震害,阐述了合理的抗震概念设计以及合适的构造措施,基于“多道设防,分级耗能”“一可三易(损伤部位及损伤程度可控、损伤部位或构件易检、损伤部位或构件易修、损坏部位或构件易换)”的桥梁抗震理念,提出将支座作为“保险丝式单元”的桥梁抗震概念设计。针对中小跨径简支梁桥易发生落梁震害,提出了适当增加盖梁宽度和横向设置双层挡块的抗震构造设计,建议在进行桥梁抗震设计和抗震评价时,统一抗震构造措施,不应再按照烈度(或基本地震动参数)划分桥梁抗震构造设计。从结构基本周期和频谱成分的角度,总结并分析了玛多地震中结构相似的相邻桥梁发生不同震害的原因。研究成果可为同类工程的抗震设计与评价提供参考。

关键词:桥梁抗震;概念设计;构造措施;限位装置;板式橡胶支座

中图分类号:U442.55

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)02-0030-06

Conceptual Design and Construction Measures of Small-to-medium Span Bridge Seismic

WANG Ke-hai^{1,2}, ZHANG Bing-zhe², GUO Wei-zuo²

(1. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: To improve the seismic performance of small-to-medium span bridges, the reasonable seismic conceptual design and appropriate structural measures were expounded by summarizing the seismic damage of Qinghai Maduo earthquake and Wenchuan earthquake. Based on the bridge seismic concept of “multiple defenses, graded energy consumption” and “one can and three easy (the damaged part and degree of damage can be controlled, the damaged part or member can be easily inspected, repaired, and replaced)”, the seismic conceptual design of bridge with bearing as “fuse-type unit” was suggested. Considering that the small-to-medium span simply supported bridges were prone to damage caused by falling beams, the seismic structural design methods of appropriately increasing the width of bent cap and setting double-layer block transversely were proposed. It was recommended that the seismic design and seismic evaluation of the bridge should be unified with seismic structural measures and the seismic design of bridge should not be divided

收稿日期:2021-06-25

基金项目:内蒙古自治区交通科技项目(NJ-2020-17);山西交通科技项目(2020-2-01);

山西控股集团科技项目(18-JKKJ-06, 18-JKKJ-07, 19-JKKJ-11)

作者简介:王克海(1964-),男,山西平遥人,研究员,博士研究生导师,工学博士, E-mail: kh. wang@rioh. cn。

according to intensity or basic ground motion parameter. The reasons for the different earthquake damages of adjacent bridges with similar structures in Maduo earthquake were summarized and analyzed from the perspective of the basic period of the structure and the frequency spectrum components. The research findings can provide reference for seismic design and evaluation of similar engineering.

Key words: bridge seismic; conceptual design; structural measure; shear key; laminated rubber bearing

0 引言

合理的桥梁抗震概念设计和适当的构造措施能在一定程度上改善中小跨径梁桥的抗震性能。汶川地震中部分中小跨径简支梁桥由于纵向搭接长度不足发生了落梁等严重震害^[1],而对于搭接长度设计合理的部分边跨桥梁,仅发生过量的纵向位移,没有发生落梁震害。

桥梁抗震概念设计是结合震害调查和工程经验而形成的一套抗震设计方法^[2-3],对于中小跨径梁桥的抗震概念设计,王克海等^[4]在充分总结汶川地震、玉树地震桥梁震害经验的基础上,提出了“多道设防,分级耗能”“一可三易(损伤部位及损伤程度可控、损伤部位或构件易检、损伤部位或构件易修、损坏部位或构件易换)”的桥梁抗震理念;中小跨径梁桥在破坏性地震作用下,支座作为“保险丝式单元”优先损伤,桥墩出现轻微可修复的损伤,桩基不发生损伤;此外,为防止落梁,纵向可适当加大盖梁宽度,横向可设置双侧挡块。Steelman 等^[5-6]和 Filipov 等^[7-8]发现支座滑动特性是改善桥梁抗震性能的关键因素。抗震概念设计在结构抗震领域也具有广泛的应用,王骁等^[9]、谭杰等^[10]和谭晓晶等^[11]对砌体结构的抗震构造措施进行了分析和总结;周乾^[12]分析了紫禁城中木结构中浮搁柱底体现类似的抗震概念设计。

从震害经验看,盖梁宽度不足、搭接长度不够是造成落梁震害的原因^[2]。考虑到地震发生的随机性和不确定性,地震低烈度区也可能发生大地震甚至特大地震,因此中国桥梁抗震设计规范对于构造措施要求依旧按照地震烈度进行划分是不合理的^[13-14]。已有研究表明,适当的抗震构造措施可以大大减轻震害,如合理设置挡块等限位装置间距以及主梁搭接长度等^[15];Wu 等^[16]建议挡块与主梁间距选取 1.0 倍~2.5 倍的橡胶层厚度,刘津成等^[17-18]发现了适当的挡块抗震设计对桥梁抗震性能有显著提升。

1 抗震概念设计

在汶川地震中发现采用板式橡胶支座的梁桥发生严重损伤的比例远低于采用其他支座形式梁桥^[2],寿江大桥(图1)在地震中发生了主梁移位等震害,但并未发生落梁以及桥墩塑性变形,从图1可以看出,震后在原桥墩位增设贝雷架进行简单加固调整后即可恢复运输救灾功能。因此对于中小跨径梁桥受到破坏性地震作用时,应将板式橡胶支座作为“保险丝式单元”优先损伤,板式橡胶支座发生的摩擦滑移能够有效保护桥墩和桩基,即牺牲局部保护整体。在此基础上,采用“多道设防、分级耗能”“一可三易”的抗震设计理念进行桥梁抗震概念设计。图2中采用一种具有多级凹槽的垫石作为盖梁顶部支座放置装置^[19],当采用普通板式橡胶支座或其他橡胶支座时,在运营荷载以及小震作用下,第1级凹槽可防止支座发生脱位;在中震作用下,支座发生摩擦滑移时可滑出第1级凹槽进入第2级凹槽;在大震作用下,支座可以发生充分的摩擦滑移,从而滑出第2级凹槽并有效降低传递至桥墩的地震力;在进行震后应急处置时,将主梁抬升更换已损伤的支座,能够实现震后交通迅速恢复。



图1 寿江大桥震后应急措施

Fig. 1 Post-earthquake Emergency Measures of Shoujiang Bridge

2 抗震构造措施

对于采用板式橡胶支座的中小跨径简支梁桥体

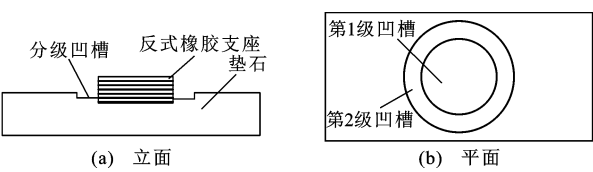


图 2 具有多级凹槽的垫石构造

Fig. 2 Structure of Cushion Stone with Multi-layer Grooves

系,已有研究和震害调查表明主梁横向错动、纵向落梁以及桥墩塑性损伤是其主要震害^[1],其中盖梁宽度不足、搭接长度不够是造成落梁震害最主要原因。汶川地震中庙子坪大桥的引桥(图 3)作为简支梁结构体系,采用了板式橡胶支座以及一定间距的挡块等抗震构造措施,震后并未发生全桥的倒塌,仅有第 9 跨发生落梁,震后经过一定维修之后可以继续使用,而距庙子坪大桥 7 km 的百花大桥(图 4)在设计时并未考虑主梁冗余搭接长度等构造措施,第 5 联发生整体垮塌,震后评估为完全失效。

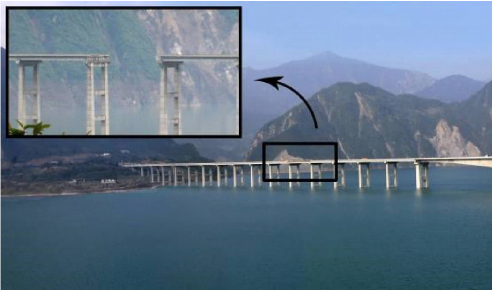


图 3 汶川地震庙子坪大桥震害

Fig. 3 Earthquake Damage of Miaoziping Bridge in Wenchuan Earthquake



图 4 汶川地震百花大桥震害

Fig. 4 Earthquake Damage of Baihua Bridge in Wenchuan Earthquake

2021 年发生的青海玛多 7.4 级地震中,野马滩大桥一号桥发生严重落梁[图 5(a)]但桥墩结构基本完好,这可能是由于矮墩刚度较大而导致桥梁整体的地震响应也较大,造成主梁发生了一定程度的碰撞,使其产生了类似多米诺骨牌式的连续落梁震害,而图 5(b)中主梁虽然发生一定纵向位移但并未发生落梁,进行主梁复位后即可恢复交通。从震害



(a) 多跨落梁



(b) 纵向位移过量但未落梁

图 5 玛多地震后的野马滩一号桥

Fig. 5 Yematan No. 1 Bridge After Maduo Earthquake

经验看,目前的抗震设计要求并不能满足强震动下的位移需求,建议适当增加盖梁宽度,以确保支座能够充分摩擦滑动以降低下部结构地震力,同时能够控制主梁纵向不落梁。现阶段规范^[14]要求纵向主梁搭接长度(盖梁宽度)最小不低于 60 cm,建议适当增加盖梁宽度,以降低主梁纵向发生落梁的概率;同时建议对于桥梁抗震设计和抗震性能评价,应统一抗震构造措施的设防要求,根据桥梁重要性和冗余度进行抗震措施的设计与设置。

对于主梁横桥向易发生错动的震害情况,建议采用适当的抗震构造措施以控制主梁横向位移,如在盖梁顶部设置双层挡块^[20](图 6),横向挡块被分成两部分:第 1 道挡块靠近主梁侧,与主梁间距约为 10 cm,第 1 道挡块设计强度较低,在轻微地震作用或正常使用荷载作用下起到一定的限位作用,实现第 1 道设防目的;第 2 道挡块为外侧挡块,与第 1 道挡块间距约为 10 cm,与主梁间距约为 20 cm,第 2 道挡块强度设计较强,确保强地震作用下主梁不发生过大位移。在强地震作用下,第 1 道挡块发生破坏并耗散部分地震能量,破坏后盖梁表面将形成粗

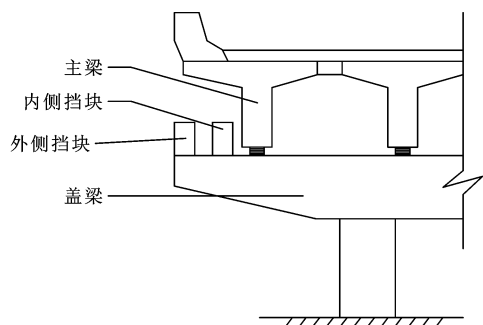


图6 双层挡块

Fig. 6 Double-layer Limit Device

糙滑动面,主梁滑动过程中持续耗散多余地震能量,此时发挥第2道设防作用。

3 桥梁抗震概念设计和构造措施的具体建议

结合历次地震震害调查和思考,提出以下关于抗震概念设计的建议:

(1)梁桥不应连续采用独柱墩。对于多柱式桥墩,宜根据墩柱的刚度和变形设置横系梁。

(2)同一联内桥墩刚度宜相近,相邻桥墩刚度比应大于0.75,当同一联内桥墩刚度相差较大时,可调整桥墩的截面尺寸、配筋和支座设计参数。对于连续梁桥,同一联内各桥墩的高度相差较大会导致其抗推刚度分配不均匀,严重时可能导致刚度较大的桥墩发生破坏,从而导致全桥的损毁。

(3)地震作用下,支座应设计为“保险丝式单元”。跨径40 m以下墩顶采用盖梁的梁桥宜优先采用普通板式橡胶支座,建议采用多级凹槽的垫石作为盖梁顶部支座放置装置。为了发挥“多道设防”的抗震概念设计,还应考虑支座对桥梁整体抗震性能的影响。

关于构造措施的建议:

(1)将梁桥“防落梁设计”引入构造措施设计中,连续梁桥和简支梁桥纵桥向梁端至桥墩(桥台)或盖梁边缘的最小距离应设计较大冗余量,建议适当增加盖梁宽度。

(2)建议采用适当的抗震构造措施限制主梁横向位移,如在盖梁顶部设置双层挡块等措施。

(3)在进行桥梁抗震设计和抗震评价时,统一桥梁抗震构造措施,根据桥梁的重要性和冗余度进行抗震措施的设置,不应再按照烈度(或基本地震动参数)划分桥梁抗震构造措施。

4 关于青海玛多地震野马滩大桥震害的解释

图5和图7为野马滩1号桥和野马滩2号桥的震害图片。野马滩1号桥全长507.4 m,上部结构为25孔20 m长简支预应力空心板梁,左幅共计17跨落梁,右幅共计18跨落梁。该桥按照A类桥设计,根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)设计采用基本地震动峰值加速度为 $0.20g$ (g 为重力加速度),E1地震作用(桥梁重要性系数1.0)的地震动峰值加速度为 $0.20g$,E2地震作用(桥梁重要性系数1.7)的地震动峰值加速度为 $0.34g$,玛多地震后国家地震局公布的桥址处烈度为Ⅷ度(相应地震峰值加速度为 $0.8g$);野马滩2号大桥右幅长888.12 m,左幅长907.2 m,均为简支预应力空心板梁,左幅共7跨落梁。该桥按照A类桥设计,根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)设计采用基本地震动峰值加速度 $0.15g$,E1地震作用(桥梁重要性系数1.0)的地震动峰值加速度为 $0.15g$,E2地震作用(桥梁重要性系数1.7)的地震动峰值加速度为 $0.255g$,玛多地震后国家地震局公布的桥址处烈度为Ⅸ度(相应地震峰值加速度为 $0.4g$)。综上,野马滩1号、2号桥实际遭受的地震作用远远大于设计考虑的地震作用,虽然盖梁宽度满足规范设计要求,但对于实际受到的地震作用,盖梁宽度偏小。



图7 玛多地震后的野马滩2号桥

Fig. 7 Yematan No. 2 Bridge After Maduo Earthquake

历次地震常常发现两座(或两跨)几乎一样的桥梁(或桥跨)地震响应差异可能很大,损伤程度也就差异很大,这次野马滩桥梁的震害重现了这一现象,具体原因可从地震反应谱曲线得到解释。图8为El Centro地震波加速度时程曲线,图9为其生成的反应谱曲线。

5 结语

(1)中小跨径桥梁抗震概念设计应结合“多道设防、分级耗能”“一可三易(损伤部位及损伤程度可

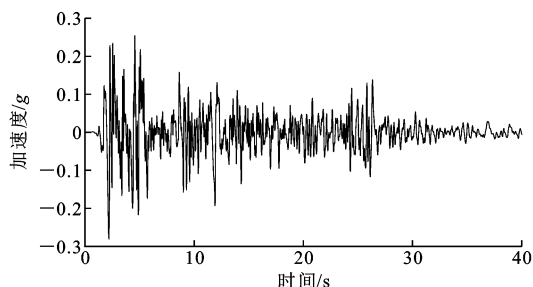


图 8 El Centro 地震波加速度时程曲线

Fig. 8 Acceleration Time History Curve of El Centro Earthquake Wave

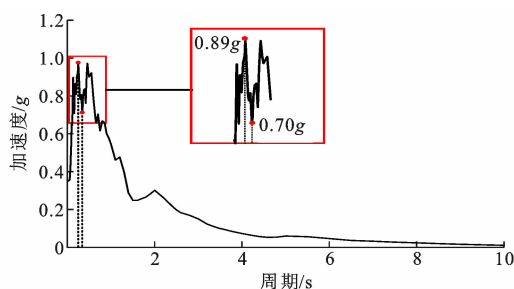


图 9 El Centro 地震波反应谱

Fig. 9 Response Spectrum of El Centro Earthquake Wave

控、损伤部位或构件易检、损伤部位或构件易修、损坏部位或构件易换)的抗震设计理念,将支座作为“保险丝式单元”,建议采用多级凹槽的垫石作为盖梁顶部支座放置装置,以更好地发挥支座隔震耗能作用。

(2)笔者发现,汶川地震中板式橡胶支座与盖梁之间的摩擦滑移使得桥墩、桩基受到的地震力大大降低,现行桥梁抗震规范没有考虑这一因素。野马滩桥如果采用板式橡胶支座并适当加大盖梁宽度,应该可以避免落梁的发生,桥墩的震害也会降低。因此建议,对于 40 m 以下跨度梁桥,墩顶采用盖梁且桥墩高度小于 20 m 时,应优先采用板式橡胶支座,同时适当增加盖梁宽度。

(3)建议将梁桥“防落梁设计”引入构造措施设计中,可采用在盖梁顶部设置横向双层挡块以及适量增加纵向搭接长度的抗震构造措施,有效控制主梁位移,避免发生落梁;建议在进行桥梁抗震设计和抗震评价时,统一抗震构造措施,不应再按照烈度(或基本地震动参数)划分桥梁抗震构造设计。

(4)对于受到相同地震作用的两座结构形式相似的桥梁,由于桥梁基本周期的微小差异导致其反应谱频谱成分不同,可能导致两桥发生完全不同的震害。

参考文献:

References:

- [1] 庄卫林,陈乐生.汶川地震公路震害分析:桥梁与隧道[M].北京:人民交通出版社,2013.
ZHUANG Wei-lin, CHEN Le-sheng. Analysis of Highways' Damage in the Wenchuan Earthquake: Bridge and Tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] 王克海.桥梁抗震研究[M].2版.北京:中国铁道出版社,2015.
WANG Ke-hai, Seismic Research of Bridge[M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.
- [3] 赵真,谢礼立.从欧洲抗震设计规范的一般规定浅谈结构抗震概念设计的重要性[J].地震工程与工程振动,2011,31(5):190-195.
ZHAO Zhen, XIE Li-li. A Brief Discussion on Importance of Seismic Concept Design of Structures Based on General Rules of Eurocode 8[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(5): 190-195.
- [4] 王克海,韦韩,李茜,等.中小跨径公路桥梁抗震设计理念[J].土木工程学报,2012,45(9):115-121.
WANG Ke-hai, WEI Han, LI Qian, et al. Philosophies on Seismic Design of Highway Bridges of Small or Medium Spans[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 115-121.
- [5] STEELMAN J S, FAHNESTOCK L A, HAJJAR J F, et al. Cyclic Experimental Behavior of Nonseismic Elastomeric Bearings with Stiffened Angle Side Retainer Fuses for Quasi-isolated Seismic Bridge Response[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(1): 04017120.
- [6] STEELMAN J S, FAHNESTOCK L A, FILIPOV E T, et al. Shear and Friction Response of Nonseismic Laminated Elastomeric Bridge Bearings Subject to Seismic Demands[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(7): 612-623.
- [7] FILIPOV E T, REVELL J R, FAHNESTOCK L A, et al. Seismic Performance of Highway Bridges with Fusing Bearing Components for Quasi-isolation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(9): 1375-1394.
- [8] FILIPOV E T, FAHNESTOCK L A, STEELMAN J S, et al. Evaluation of Quasi-isolated Seismic Bridge Behavior Using Nonlinear Bearing Models[J]. Engineering Structures, 2013, 49: 168-181.
- [9] 王骁,孙柏涛,闫培雷,等.构造柱和砌筑砂浆对砌体结构抗震能力影响分析[J].震灾防御技术,2019,

- 14(3):501-512.
- WANG Xiao, SUN Bai-tao, YAN Pei-lei, et al. Influence of Structural Columns and Masonry Mortar on Seismic Capacity of Masonry Structure[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2019, 14(3): 501-512.
- [10] 谭杰, 李恒, 蔡永建, 等. 湖北应城4.9级地震建筑物震害调查与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(5): 206-215.
- TAN Jie, LI Heng, CAI Yong-jian, et al. Seismic Damage Investigation and Analysis of Buildings During Yingcheng M4.9 Earthquake in Hubei[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(5): 206-215.
- [11] 谭晓晶, 吴斌, 辛文杰, 等. 林甸县农村砌体房屋抗震性能调查与分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 36-42.
- TAN Xiao-jing, WU Bin, XIN Wen-jie, et al. Investigation and Analysis of Seismic Behavior of Masonry Buildings in Rural Areas Located in Lindian County[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(2): 36-42.
- [12] 周乾. 紫禁城古建筑的传统防震方法[J]. 工业建筑, 2019, 49(6): 210-217.
- ZHOU Qian. Traditional Aseismic Methods of Ancient Buildings in the Forbidden City[J]. Industrial Construction, 2019, 49(6): 210-217.
- [13] 王克海, 李冲, 李悦. 中国公路桥梁抗震设计规范中存在的问题及改进建议[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(2): 95-103.
- WANG Ke-hai, LI Chong, LI Yue. Problems in Chinese Highway Bridge Seismic Specifications and Suggestions for Improvement[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(2): 95-103.
- [14] 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01-2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Specifications for Seismic Design of Highway Bridges: JTG/T 2231-01-2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [15] 王克海, 孙永红, 韦韩, 等. 汶川地震后对我国结构工程抗震的几点思考[J]. 公路交通科技, 2008, 25(11): 54-59.
- WANG Ke-hai, SUN Yong-hong, WEI Han, et al. Comments on Seismic Strengthening for Structural Engineering in China After Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(11): 54-59.
- [16] WU G, WANG K H, ZHANG P P, et al. Effect of Mechanical Degradation of Laminated Elastomeric Bearings and Shear Keys Upon Seismic Behaviors of Small-to-medium-span Highway Bridges in Transverse Direction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 17(1): 205-220.
- [17] 刘津成, 徐略勤, 李建中, 等. 挡块强度对不规则连续梁桥横向地震响应的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(6): 86-92, 85.
- LIU Jin-cheng, XU Lue-qin, LI Jian-zhong, et al. Effect of Retainer Strength on Transverse Seismic Response of a Nonstandard Continuous Girder Bridge[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(6): 86-92, 85.
- [18] 谭帮奇, 徐略勤, 李钟雄, 等. 挡块对连续梁桥横向地震响应的影响对比研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(1): 8-15.
- TAN Bang-qi, XU Lue-qin, LI Zhong-xiong, et al. Comparative Research on the Effects of Side Retainers on Transverse Seismic Response of Continuous Girder Bridges[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(1): 8-15.
- [19] 王克海, 李冲. 垫石凹槽分级限位无顶钢板和底钢板的橡胶支座: CN201420086825.5[P]. 2014-02-27.
- WANG Ke-hai, LI Chong. Rubber Bearing with Grading Limit of Cushion Stone Groove Without Top Steel Plate and Bottom Steel Plate: CN201420086825.5[P]. 2014-02-27.
- [20] 王克海, 韦韩, 李茜. 双层钢筋混凝土抗震挡块: CN201952720U[P]. 2011-08-31.
- WANG Ke-hai, WEI Han, LI Qian. Double Layer Concrete Seismic Stop: CN201952720U[P]. 2011-08-31.