

# 常用的桥梁隔震支座在 CSiBridge 中的实现

筑信达 吕良

近年来隔震支座在我国桥梁工程中的应用逐渐广泛，对桥梁抗震分析也提出了新的要求。如何正确的模拟隔震装置的力学性能直接决定了抗震分析结果的有效性。CSiBridge 继承了 SAP2000 高效稳定的分析内核，能完成各种地震工况的分析。同时软件中内置了多种类型的连接单元，方便工程师来模拟各类桥梁隔震支座。本文将介绍如何在 CSiBridge 中定义各种桥梁中常用的隔震支座。

## 1 连接单元属性

隔震支座样式繁多，不同的隔震支座在地震荷载作用下的响应也不相同。CSiBridge 中采用不同的连接单元来模拟不同类型的隔震支座。连接单元的定义流程一般为：**构件**选项卡>**连接属性**，点击**新建**，即可打开连接属性数据定义窗口，如图 1 所示。在**属性类型**中可以选择不同类型的连接单元，包括 linear、Rubber Isolator、Plasticity Wen、Friction Pendulum Isolation 等。不同的连接单元类型对应了不同的本构模型，通过对连接单元属性参数的调整，来模拟隔震支座的力学性能。

虽然连接单元的类型不同，但是其属性的定义一般可以分为四个部分，如图 1-a 中四个红框标示的部分。其中红色选框 1 定义了连接单元二阶效应的参数；红色选框 2 定义了连接单元的质量、重量、转动惯量等信息；红色选框 4 中定义的是结构的刚度选项，其参数含义可查看筑信达知识库文章《[连接单元刚度选项设置](#)》。这三部分的参数均可保持用默认值，用户也可以依据具体工程情况做一些修改。连接单元最主要的参数为红色选框 3 中的连接属性的定义，该部分的参数直接决定了支座的性能，也是本文介绍的重点。

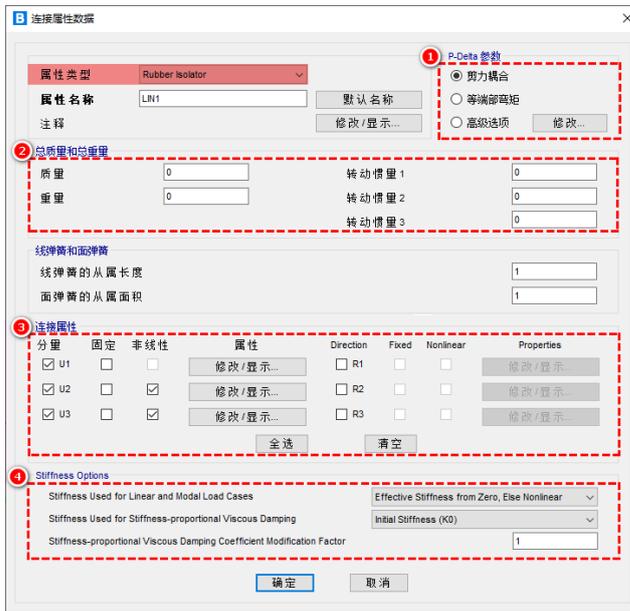


图 1-a 连接属性定义窗口



图 1-b 非线性连接属性定义窗口

隔震支座一般主要关注的是其竖向承载能力和水平方向的剪切变形能力，因此连接单元需要定义的自由度一般为三个方向的平动自由度 U1、U2、U3，即红色选框 3 中的内容。其中 U1 表示支座的轴向方向，隔震支座轴向方向刚度一般较大，多采用线性弹簧模拟。U2 和 U3 表示的是支座的两个水平方向，这两个方向的恢复力模型及定义方式一般也相同。

抗震分析类型包括线性分析和非线性分析，相应地连接单元需要定义线性属性和非线性属性，在不同的分析类型下，连接单元使用相应的属性反应其力学性能。图 1-a 中红框 3 内激活 U2 方向的非线性属性后，会弹出 U2 方向的属性定义窗口，这里会有两部分的属性需要定义，**线性分析**和**非线性分析**，如图 1-b 所示。对于线性分析，如反应谱分析，程序会调用此处定义的“线性分析”属性，即使用这里定义的有效刚度和有效阻尼。有效刚度仅用于线性分析当中，有效阻尼则体现在线性分析中隔震支座的能量耗散能力，这与隔震支座的剪切应变相关。对于“非线性分析”属性，程序会通过非线性属性中的参

数确定结构在不同时刻的刚度及阻尼情况。不同的类型的隔震支座其本构模型不同，接下来结合具体的支座类型来介绍如何在 CSiBridge 定义相应的连接单元。

## 2 橡胶隔震装置

橡胶隔震技术是目前研究最成熟、应用最广泛的一种隔震技术。橡胶支座具有竖向承载力大、水平变形弹性性能好等特点。铅芯橡胶支座和高阻尼橡胶支座同时还具有消能能力强且造价相对较低的特点，使其成为理想的隔震装置。

### 2.1 板式橡胶支座

分层橡胶支座由薄橡胶片与钢板相互交错叠置数层而成，上下有翼缘，支座平面形状多为圆形或矩形。图 2-a 即为矩形板式橡胶支座。大量试验结果表明，板式橡胶支座叠层橡胶内部的薄钢板对橡胶横向变形的约束作用能大大提高支座的竖向刚度，但并不影响橡胶层的剪切变形刚度，其剪力一位移滞回曲线呈狭长形，如图 3-a 中虚线所示，可近似作线性处理<sup>[1]</sup>。

在设计范围内，不考虑板式橡胶支座的滑动时，其水平刚度受其他因素影响较小。依据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)<sup>[2]</sup>第 6.3.7 条“抗震分析时应考虑支座的影响。板式橡胶支座可用线性弹簧单元模拟”，直接采用如图 2-b 所示的线性模拟即可，对应 CSiBridge 的 linear 单元。linear 单元为线性单元，在线性分析和非线性分析中其刚度均保持不变，因此确定板式橡胶支座线性刚度后，其非线性刚度也就确定了。

在考虑支座滑移后，由于板式橡胶支座在滑动后无任何恢复力机制，屈服后剪切刚度会发生变化。因此有些工程师会采用双线性分析模型模拟板式橡胶支座的滑移性能，这里不做详细介绍。

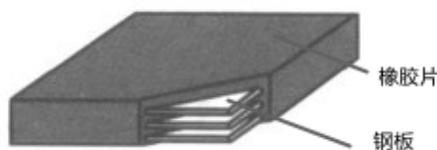


图 2-a 矩形板式橡胶支座

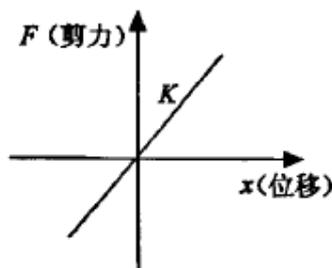


图 2-b 板式橡胶支座线性模型

### 2.2 铅芯橡胶支座

分层橡胶支座的主要缺点是阻尼很小，在较低水平力作用下（如制动力等），由于支座较柔，支座变形也可能较大。在分层橡胶支座中插入铅芯后，铅芯能提供在地震下的耗能和静力荷载下所需的屈服强度与刚度。在较低水平力作用下，具有较高的初始刚度，变形较小。在地震作用下，由于铅芯的屈服，一方面消耗地震能量，另一方面刚度降低，达到延长结构周期的目的。因此，铅芯橡胶支座(LRB)是目前桥梁减、隔震设计中用的较多的一种支座<sup>[1]</sup>。

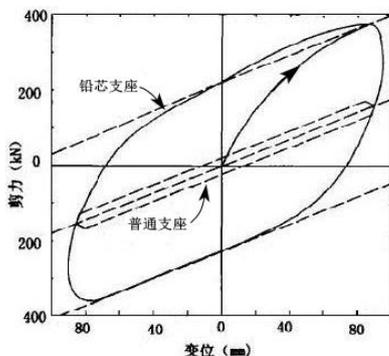


图 3-a 双轴剪切变形的滞回隔震器属性

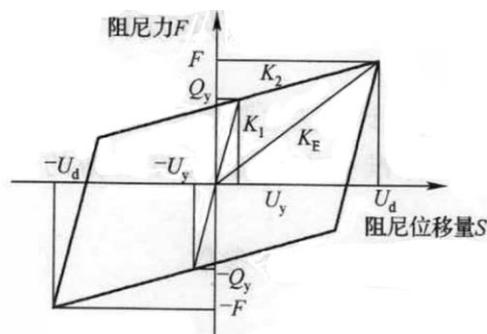


图 3-b 铅芯橡胶支座双线性恢复力模型

铅芯橡胶支座具有很大的竖向（U1 方向）刚度，是水平刚度的 500~1500 倍。其竖向恢复力模型一般采用线弹性模型，因此轴向（U1 方向）只考虑线性刚度。

由于铅芯的存在，铅芯橡胶支座在水平方向表现出明显的弹性特，其滞回曲线如图 3-a 中实线所示。计算时，一般假定铅芯橡胶支座的滞回性能符合双线性模型，如图 3-b 所示。采用屈服前刚度  $K_1$ 、屈服后刚度  $K_2$ 、和屈服强度  $Q_y$  作为铅芯橡

胶支座的力学控制参数，两个水平方向恢复力模型相同。CSI Bridge 中一般通过 Rubber Isolator 非线性连接单元来模拟铅芯橡胶支座。这里主要介绍其连接属性的定义，其余属性参数的定义请查看第一节的内容。

表 1 J4Q 矩形铅芯隔震橡胶支座参数

支座平面尺寸 $a \times b$ (mm × mm)	承载力 (kN)	位移量 (mm)	支座高度 $h$ (mm)	组装后高度 $H$ (mm)	外连接钢板 $A \times B$ (mm × mm)	螺栓间距 $n_a \times l_{a1} (=l_a)$ $n_b \times l_{b1} (=l_b)$ (mm)	螺栓规格	锚固长度 $L$ (mm)	铅芯屈服力 (kN)	剪切弹性模量 $G$ (MPa)	屈服前刚度 (kN/mm)	屈服后刚度 (kN/mm)	水平等效刚度 $K_{Bm}$ (kN/mm)	等效阻尼比 $h_{Bm}$ (%)
300 × 420	1 000	± 50	137	177	380 × 500	1 × 330 (=330) 1 × 450 (=450)	M16	250	67	0.8	5.4	0.8	1.4	22.3
		± 50	137	177						1	7.4	1.1	1.8	18.9
		± 50	137	177						1.2	9.3	1.4	2.0	16.3

这里以《公路桥梁铅芯隔震橡胶支座》(JT/T 822-2011) [3]中的 J4Q 矩形铅芯橡胶支座为例，其具体参数如上图所示。对于铅芯橡胶支座，一般需要定义的三个方向的平动自由度 U1、U2、U3。铅芯橡胶支座的轴向 U1 方向，恢复力模型一般采用线弹性模型。因此在其连接属性中，仅需要定义 U1 方向的有效刚度和有效阻尼，如图 4-a 所示。其竖向刚度可以取 500kN/mm，有效阻尼可保持默认值 0。

对于 U2 和 U3 方向属性均采用的是双线性模型模拟，因此在连接属性中需包含两部分：线性分析和非线性分析。两个水平方向的定义方式相同，这里以 U2 方向为例。“线性分析”中需要定义的有有效刚度、有效阻尼。依据上述表格，可知有效刚度可以取水平等效刚度 1.4kN/mm，有效阻尼与剪切应变相关，这里填 0。对于非线性分析，依据上述表格，该选项中刚度应该取屈服刚度 5.4kN/mm，屈服强度取铅芯屈服力 67kN，屈服后刚度比为 0.8/5.4=0.14814，具体如图 4-b 所示。



图 4-a U1 方向非线性连接属性



图 4-b U2 方向非线性连接属性

### 2.3 高阻尼橡胶支座

高阻尼橡胶支座是在橡胶中加入添加剂而提高橡胶的阻尼耗能能力，其形状及构造与天然橡胶支座相同。但该橡胶材料黏性大，自身可以吸收能量，滞回曲线如图 5-a 所示。高阻尼橡胶支座滞回环的面积较大，有较大的耗能能力。从滞回曲线可见，该支座在变形较小时就表现为非线性，而且其非线性属性与反复次数、变形大小和位移历程均有关。工程中为简化计算，更多的是采用经过简化的等效线性模型以及等效双线性模型来模拟高阻尼橡胶支座的性能[1]。

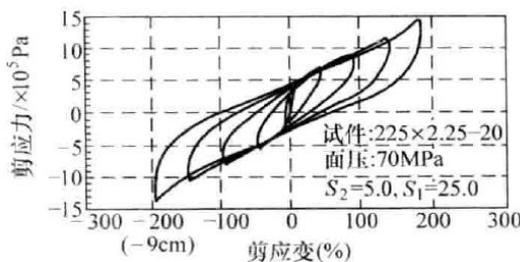


图 5-a 高阻尼橡胶支座滞回曲线

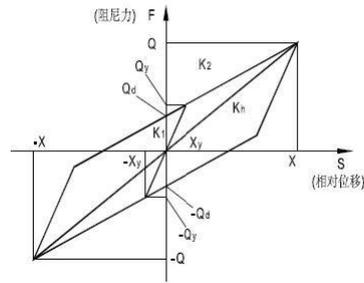


图 5-b 高阻尼隔震橡胶支座力学模型

根据规范《公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座》(JT/T 842-2012) [4]附录 A.4.2 条，高阻尼橡胶支座可以采用如图 5-b 所示的



双线性恢复力模型进行分析计算。比较图 5-b 及图 3-b 可以发现，高阻尼橡胶支座采用双向性恢复力模型时与铅芯橡胶支座的恢复力模型相同，即都可以采用 Rubber Isolator 非线性连接单元来模拟，因此两种支座的参数输入方式也相同。这里以规范《公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座》(JT/T 842-2012) [4]页附录表 B.1 中的高阻尼橡胶支座为例，其参数如表 2 所示，对照该表格定义各个方向的连接属性。其中图 6-a 表示 U1 方向的性连接属性，图 6-b 表示 U2 方向连接属性。

表 2 高阻尼隔震橡胶支座参数

序号	规格尺寸 $d$ (mm)	承载力 $P_n$ (kN)	剪切模量 $G$ (MPa)	支座总高 $h$ (mm)	设计位移 $X_0$ (mm)	容许位移 $X_1$ (mm)	极限位移 $X_2$ (mm)	单层橡胶厚度 $t_1$ (mm)	加劲钢板厚度 $t_2$ (mm)	封层钢板厚度 $t_3$ (mm)	预埋钢板厚度 $t_4$ (mm)	支座钢板厚度 $t_5$ (mm)	预埋钢板厚度 $t_6$ (mm)	设计容许转角 $\theta$ (rad)	水平屈服力 $Q_s$ (kN)	初始水平刚度 $K_1$ (kN/mm)	屈服后水平刚度 $K_2$ (kN/mm)	水平等效刚度 $K_e$ (kN/mm)	竖向压缩刚度 $K_v$ (kN/mm)	等效阻尼比 $\xi$ (%)
6	395	1317	0.8	167	63	157	220	7	3	20	20	440	460	0.0093	45	6.77	1.04	1.39	579	15
			1.0	177	70	175	245							0.0083	57	7.64	1.18	1.57	652	15
			1.2	187	77	192	269							0.0076	74	10.44	1.23	1.71	711	17



图 6-a U1 方向非线性连接属性



图 6-b U2 方向非线性连接属性

实际工程一般采用规范中推荐的双线性模型来模拟高阻尼隔震橡胶支座的力学性能，但是采用该方法模拟时会过于简单，对于某些情况可能与实际情况有较大的差别。在 CSiBridge 中还可以直接通过 High Damping Rubber Isolator 非线性连接单元来定义高阻尼橡胶隔震支座的属性。该连接单元基于 N. Masaki, T. Mori, N.Murota, K.Kasai 所提出的本构模型。该本构模型将一个弹性弹簧与多个滞回弹簧并联方式来考虑高阻尼橡胶隔震支座水平方向的力学性能，可通过调整弹性弹簧参数和滞回弹簧的参数来模拟各种滞回曲线。其模拟结果也更符合高阻尼橡胶隔震支座的性能，有兴趣的工程师可参考软件自带的《CSI 分析参考手册》[5]第十五章的相关内容。

### 3 摩擦隔震装置

#### 3.1 摩擦滑移隔震支座

摩擦滑移隔震体系是采用摩擦滑移层为隔震层的隔震体系，主要依靠滑移层的水平滑动隔绝地震作用。该类型支座利用不锈钢与聚四氟乙烯材料之间相对低的滑动摩擦系数制成，也称为聚四氟乙烯滑板支座。常规的摩擦滑移隔震支座包含滑板支座和活动盆式支座，这两种的支座的定义方式相同。

依据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01 2008) [2]第 6.3.7 条“抗震分析时应考虑支座的影响。板式橡胶支座可用线性弹簧单元模拟；活动盆式支座可用双线性理想弹塑性弹簧单元模拟”。其恢复力模型如图 7-a 所示。在 CSiBridge 中一般通过 Wen 塑性属性(Wen Plasticity Property)连接单元来模拟该支座的非线性属性。单轴变形的 Wen 塑性属性如图 7-b 所示。关于其参数的详细定义可查看筑信达知识库文档《盆式橡胶支座相关参数定义》，这里不再重复介绍。

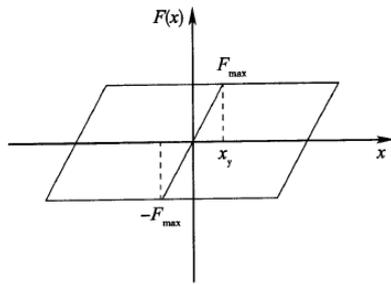


图 7-a 活动盆式支座恢复力模型

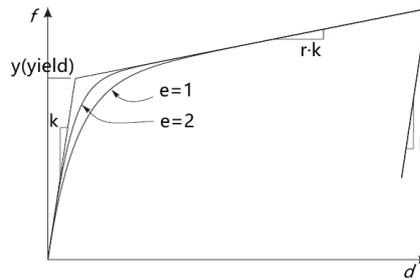


图 7-b Wen 塑性属性参数定义

### 3.2 摩擦摆隔震支座

摩擦摆隔震支座(Friction Pendulum Isolation, FPI) 克服了纯摩擦隔震系统不能复位的缺点, 将滑动支座和钟摆的概念相结合构成的一种隔震装置。其滑动面是曲面, 通过结构自重提供所需的自复位能力, 帮助上部结构回到原来的位置; 利用一个简单的钟摆机理延长结构的自振周期。图 8-a 为其构造简图, 它包括一个具有球形曲面的滑块和球形铸钢滑动曲面。铸钢曲面与滑块曲面具有相同的曲率半径, 在竖向荷载作用下, 曲面压应力均匀。支座可以在任何方向滑动, 其尺寸主要由最大设计位移控制<sup>[1]</sup>。

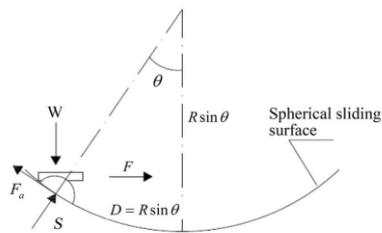


图 8-a 摩擦摆系统模型示意图

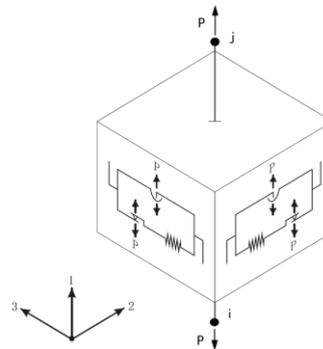


图 8-b 双轴摩擦摆模型

CSiBridge 中通过 Friction isolation 连接单元来模拟 FPI, 其等效力学模型如图 8-b 所示。摩擦摆支座在轴向 U1 方向 (只能承受轴压力, 不能承受轴拉力, 类似于缝单元。在水平方向上通过将摩擦元和摆元并联, 来考虑支座的剪切变形。其中摩擦力大小与轴力、摩擦系数、速度及速率参数 (用于描述摩擦系数随滑移速度变化的关系) 相关, 摆力与轴力、水平位移、曲面半径相关。剪切力等于摩擦力加摆力。

表 3 摩擦摆支座参数

支座型号	摩擦面曲率半径	静摩擦系数	动摩擦系数		支座滑动位移 /mm	竖向等效刚度 kN/m	水平等效刚度 kN/m	等效阻尼比 s/m	滑动前刚度 kN/m	摩擦系数变化参数 s/m
			慢速	快速						
FPS-XXX	4.5	0.03	0.085	0.06	200	$1 \times 10^7$	2977.8	0.26	1200	20

以某型号摩擦摆隔震支座为例, 其具体参数如上表 3 中所示, 简要说明如何在 CSiBridge 中定义该支座各个方向的连接属性。摩擦摆隔震支座 U1 方向仅能承受压力, 在线性分析和非线性分析时其刚度不变, 因此线性属性中的有效刚度和非线性属性的刚度均为竖向等效刚度  $1 \times 10^7 \text{ kN/m}$ 。为了减轻在分析中可能存在的数值振荡问题, 程序引入了参数“阻尼系数”。该参数一般保持默认值 0, 关于该系数详细解释可参考《CSI 分析参考手册》<sup>[5]</sup>第十五章的相关内容。在水平方向, 以 U2 方向为例, 线性分析中的有效刚度将取表格中的水平等效刚度 2977.78 kN/m。而非线性分析中刚度表示的支座滑移前的刚度, 这里为 1200 kN/m。其余的参数依据与表 3 中的参数一一对应, 直接填写即可, 具体填入参数如下图所示。

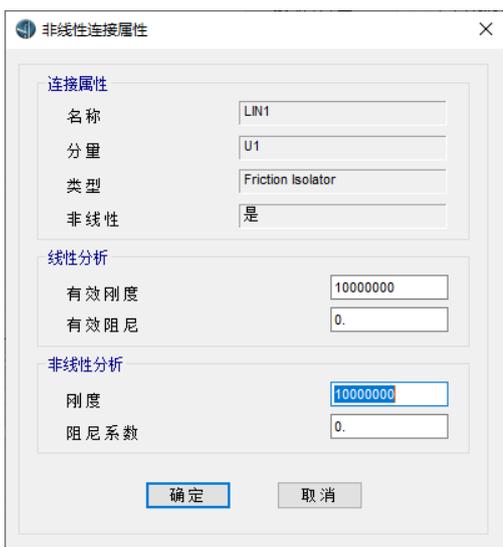


图 9-a U1 方向非线性连接属性



图 9-b U2 方向非线性连接属性

另外，除了常规的摩擦摆隔震支座，还可以很方便的定义其他类型的摩擦摆隔震支座。如抗拔摩擦摆隔震支座和三重摩擦摆隔震支座。常规摩擦摆隔震支座是以接触为基础的，无法承受拉力。而抗拔摩擦摆隔震支座既可承受拉力也可承受压力，能抑制设备的隆起，在各种工况下能更有效的使地震力沿结构的主方向传递。在某些条件下能有效地限制桥梁结构沿横向及纵向的位移<sup>[6]</sup>，其结构示意图 10-a 所示。在 CSiBridge 中可以通过 Double-Acting Friction-Pendulum Isolator 非线性连接单元来模拟。

三重摩擦摆隔震支座（Triple Friction Pendulum Bearing TFPB）克服了摩擦单摆支座的初始刚度往往较大，从初始刚度到第二刚度过度时会有一个跳跃的问题，并且具有良好的耗能能力和足够的水平位移，在不同水准地震作用下表现出不同刚度和阻尼的自适应性，在工程中的应用也逐渐广泛<sup>[6]</sup>。其结构示意图如图 10-b 所示，CSiBridge 中可直接通过 Triple Pendulum Isolator 非线性连接单元来模拟。

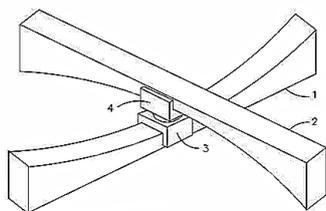


图 10-a 抗拔摩擦摆隔震支座

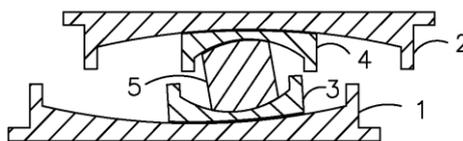


图 10-b 三重摩擦摆隔震支座

## 4 总结

CSiBridge 中连接单元类型丰富，覆盖了工程中常用的各类隔震支座。不同的隔震支座适用范围不同，力学性能差异较大，需采用不同类型的连接单元来模拟，其背后的理论及假设都有所不同。用户必须在了解隔震连接单元基本原理及软件相关设置的条件后才能保证分析设计的正确性。关于各类连接单元的详细介绍用户可以查看软件自带的《CSI 分析参考手册》<sup>[5]</sup>。

### 参考资料

- [1] 庄军生. 桥梁减震、隔震支座和装置[M]. 中国铁道出版社, 2012.
- [2] 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02-01-2008[S]. 人民交通出版社, 2008
- [3] 公路桥梁铅芯隔震橡胶支座: JT/T 822-2011 [S]. 人民交通出版社, 2012
- [4] 公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座: JT/T 842-2012[S]. 人民交通出版社, 2012
- [5] Computers & Structures Inc., 北京筑信达工程咨询有限公司. CSI 分析参考手册. 2019.
- [6] 龚健, 周云. 摩擦摆隔震技术研究和应用的回顾与前瞻( I )——摩擦摆隔震支座的类型与性能[J]. 工程抗震与加固改造, 2010(03):4-13.