

桥梁性能化抗震设计在 CSiBridge 中的实现

筑信达 吕良 张振鹏

随着结构安全性要求的提高，桥梁性能化抗震设计逐步受到重视。相较于传统抗震设计，性能化抗震设计可以在节省成本的同时提高结构的使用性能，是一种更加合理的设计方法，但也对工程师的抗震理念与实践能力有了更高的要求。

根据在地震作用下动力响应特性的复杂程度，常规桥梁分为规则桥梁和非规则桥梁两类，在 7 度及 7 度以上地区按规范《公路桥梁抗震细则》(JTGT B02-01-2008) (以下简称《08 抗震细则》) 要求需要验算规则桥梁在 E2 地震作用下的墩顶位移能力。由于时程分析计算效率的问题，在实际工程中对于规则桥梁，大多都选用反应谱分析方法进行设计。常规软件在进行反应谱分析时整个过程较为繁琐，需要用户手动计算处理数据较多，容易出现差错，并且一旦结构形式或配筋发生改变，整个过程就必须重新再做一遍，严重影响工程师的工作效率。另外在需要进行抗震设计的桥梁中，规则桥梁占据了其中很大的一部分。如何高效完成规程桥梁在 E2 地震作用下的抗震设计，是工程师急需解决的问题。

目前，CSiBridge 针对性能化设计提出了系统的解决方案，对于常规桥梁在 E2 地震荷载作用下的反应谱分析，通过简单的参数选择，即可实现“一键式”性能化抗震设计。本文结合一个工程案例，简要的介绍了桥梁性能化抗震设计在 CSiBridge 中的实现。

1 工程简述

该桥为 3x30 的连续箱梁桥，上部结构总宽度为 10.98m，梁高为 1.525m；有两个中间桥墩，每座桥墩有两根直径 0.9m 的圆形墩柱组成；分析模型如图 1 所示。桥址抗震设防烈度为 7 度，桥梁抗震设防类别为 B 类桥梁。按规范要求该桥梁需要进行 E2 地震作用下的抗震设计。

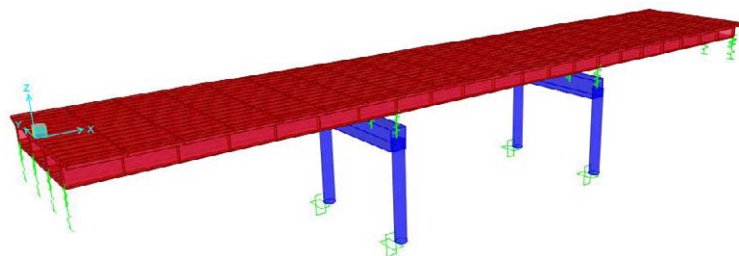


图 1 桥梁分析模型

E2 地震荷载作用下规则桥梁的抗震设计主要验算内容为桥墩顶的位移。该验算内容可以分成两部分，一个是计算桥墩顶部在 E2 地震荷载作用下能产生多大位移，即桥墩的位移需求，以字母 D 表示；另一部分为计算在桥墩不发生破坏前桥墩顶部最大能产生多大的位移，及桥墩的位移能力，以字母 C 表示。如果 $D/C < 1$ ，表示位移需求小于位移能力，即结构在 E2 地震荷载作用下不会发生破坏，通过验算。

2 位移需求计算

桥梁性能化抗震设计需要考虑桥梁结构的延性，即在 E2 地震作用下，延性构件（墩柱）可发生损伤，产生塑性变形，耗散地震能量。因此在计算位移需求之前需要对桥墩刚度进行折减，考虑构件开裂之后的刚度。然后继承构件开裂后的刚度，对结构施加反应谱荷载，计算位移需求。

2.1 桥墩等效刚度

CSiBridge 在执行反应谱分析之前，首先会对分析模型进行等效线性化，即对原桥墩截面相关参数进行折减。在下部结构抗震设计需求参数窗口中，如图 2 所示，程序默认桥墩开裂后的属性由程序默认计算获得。程序在计算桥墩开



裂截面性质时，会依据规范《08 抗震细则》6.1.6 条，考虑由上部结构产生的轴力，依据弯矩—曲率曲线，计算开裂后桥墩的截面性质。

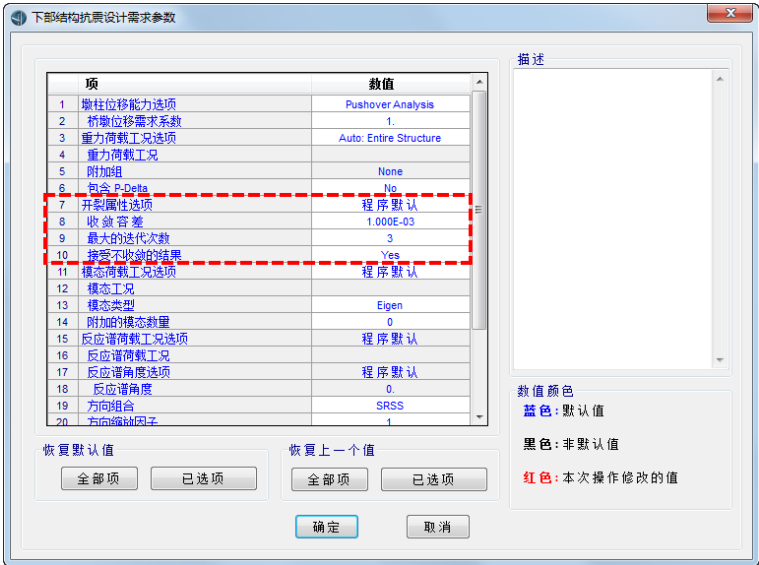


图 2 下部结构抗震设计需求参数窗口

在分析完成后，用户可以查看每一个桥墩依据规范进行刚度折减后的折减系数。操作命令如下：**高级选项卡>定义>命名属性集合>框架属性修正**。该模型共两组桥墩，每组桥墩由两个墩柱，因此需要分别对四个墩柱的刚度进行折减。如图 3 所示，该模型共有四组修正后的数据。选中其中桥墩 BT1C1，点击**修改/显示属性集**。在图 4 中，桥墩 BT1C1 关于 2 轴及 3 轴的惯性矩已按照规范进行了修改。

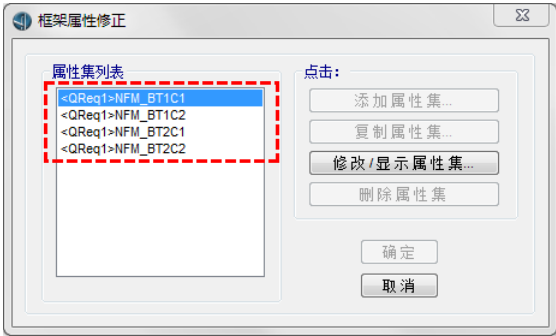


图 3 框架属性修正

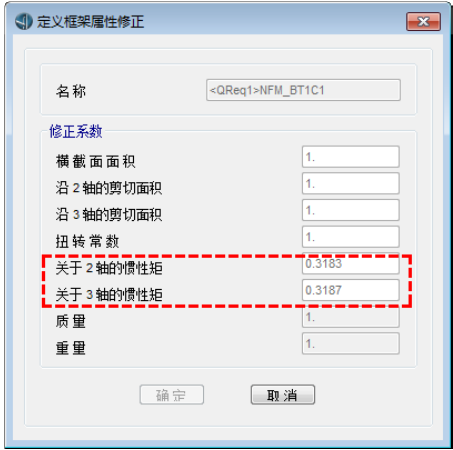


图 4 开裂截面属性修正

2.2 反应谱荷载工况计算

基于刚度修正后的模型，软件会依次执行模态分析和反应谱分析。因此需要输入反应谱函数，选项卡：**荷载>函数-反应谱函数>新建**，用户可选择导入标准反应谱函数或采用自定义的方式输入反应谱函数。最后软件会根据规范对各个方向反应谱分析结果进行组合获得位移需求。

3 位移能力计算

CSiBridge 在计算墩顶位移能力时，用户仅需定义少量参数，程序既可自动完成规则桥梁的墩顶位移能力计算。下文将对程序自动计算过程做相关介绍。

依据规范《08 抗震细则》第 7.4.7 条及第 7.4.8 条，单柱墩容许位移可通过公式直接计算。但是双柱或多柱排架



墩的横桥向位移能力必须使用 Pushover 分析确定其抗震位移能力。

对于单柱墩，如上图 2 所示，在**下部结构抗震设计需求参数窗口墩柱位移能力**选项中，选择“程序决定”时，软件首先判断桥墩为单柱墩还是多柱墩；然后根据规范，单柱墩与多柱墩顺桥向采用规范公式计算位移能力，多柱墩横桥向采用 Pushover 分析。如选择“Pushover 分析”则所有桥墩均采用 Pushover 分析计算位移能力。本文仅对采用 Pushover 分析求解位移能力过程进行简要说明。

3.1 塑性铰布置

采用 Pushover 分析求解墩顶位移能力时，必须确定各个墩柱的塑性铰属性、长度及位置。

在**桥梁抗震设计首选项**窗口中，如图 5 所示。选择设计规范“JTG/B02-01 2008”之后，软件会自动选择混凝土铰的类型为“自动:JTG/T 铰”。软件会根据真实输入的桥墩配筋，区分核心及非核心混凝土，依据 Mander 混凝土本构模型，计算出轴力作用下的弯矩-曲率曲线，并由此确定塑性铰属性。桥墩截面的配筋及相关属性可以在截面设计器中查看，而塑性铰属性也可通过点击**高级选项卡>指定>塑性铰**，选择**自动**，点击**修改/显示**自动塑性铰数据按钮，进行查看，这里不做详细介绍。

通常，桥墩中的轴力由于倾覆效应在 Pushover 的过程中会不断变化。因此，同一截面的屈服弯矩和塑性弯矩会随该截面中 Pushover 分析步的轴力不断变化。软件在进行分析时，会考虑上述因素，并为墩柱指定耦合的 P-M-M 铰。



图 5 抗震设计首选项窗口

依据《08 抗震细则》第 6.2.2 条，软件会自动确定各类桥墩的塑性铰位置，并依据规范第 7.4.3 计算塑性铰长度。在确定塑性铰长度和塑性铰属性之后，塑性铰将被指定在距墩柱端部 1/2 该塑性铰长度的位置，如下图所示。

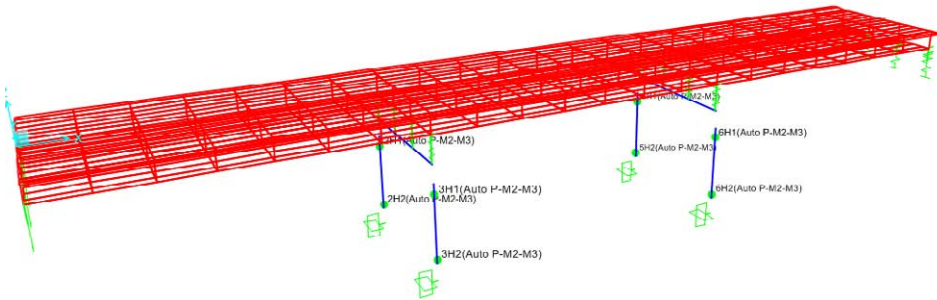


图 6 塑性铰位置

在某些情况下按照规范计算的纵桥向与横桥向塑性铰长度不同，如多柱排架墩。因此用户可以在**桥梁抗震首选项**窗口**铰长度选项**中指定采用两个塑性铰长度中的顺桥向、横桥向、较大值、较小值或平均值。用户也可以在采用其中

一个设置计算之后再另一个设置再次计算，以查看结构对塑性较长度的敏感性。本案例选择的是较小的较长度。

3.2 桥墩破坏准则

依据《08 抗震细则》7.4.8 条，当墩柱的任一塑性铰达到其最大容许转角时，盖梁处的横向水平位移即为容许位移。即桥墩破坏准则为第一个塑性铰达到极限转角（First Hinge At Limit State）时，下部结构视为破坏，如图 7 所示。

Pushover 目标位移比为 Pushover 分析的位移控制条件。该程序默认值为 4，即进行 Pushover 分析时，墩顶水平位移达到四倍的反应谱分析位移需求时，Pushover 分析停止。在进行 Pushover 分析时，某些情况下桥墩塑性转角很难达极限转角，但是如果达到了 4 目标位移比，程序也将停止 Pushover 分析。但是如果没有在达到四倍的反应谱分析位移需求之前，桥墩塑性铰就达到了极限转角，程序也将停止 Pushover 分析。

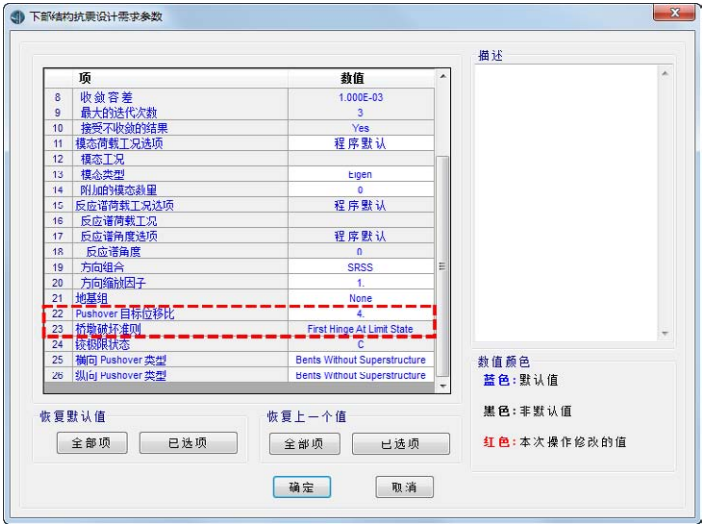


图 7 Pushover 目标位移比和桥墩破坏准则

4 分析结果

输入反应谱荷载并将完成相关参数定义即可运行抗震分析，运行完成后会软件自动弹出分析结果表格，如图 8 所示。用户也可通过命令：开始选项卡>显示表格>设计数据>桥梁>seismic design data>勾选全部查看结果表格。

DesReqName	BridgeObj	SDCategory	SpanName	Station	Direction	GenDispl	Demand	Capacity	DCRatio	Status
QReq1	BOBJ1	Pushover	Span 1	20	TRANS	<QReq1>GD_TR1	0.063989	0.074614	0.8576	Finished - Hinge 2H2 reaches limit st...
QReq1	BOBJ1	Pushover	Span 1	20	LONG	<QReq1>GD_LG1	0.011277	0.045332	0.2488	Finished - None of the hinges reach...
QReq1	BOBJ1	Pushover	Span 2	40	TRANS	<QReq1>GD_TR2	0.063989	0.074614	0.8576	Finished - Hinge 5H2 reaches limit st...
QReq1	BOBJ1	Pushover	Span 2	40	LONG	<QReq1>GD_LG2	0.011277	0.044887	0.2512	Finished - None of the hinges reach...

图 8 抗震需求/能力比表格

在以上表格中显示了所有 4 个需求/能力比（DCRatio Unitless），即每个桥墩的横桥向（TRANS）和顺桥向（LONG）



(本案例桥梁有 2 个桥墩)。需求/能力比小于 1.0 的值意味着桥墩在抗震设计请求中定义的地震作用下有充足的承载能力;大于 1.0 的值意味着地震作用超出桥墩的承载能力。该案例桥梁两个桥墩的两个方向上的需求/能力比均小于 1, 表明该桥梁墩顶位移能力通过抗震验算。

该表格同时给出了桥墩的位移需求 (Demand) 和位移能力 (Capacity), 以及进行 Pushover 分析时桥墩是否达到极限转角。在该窗口右上角下拉选项中, 用户可以得到更多其他信息, 如: 墩柱的弯矩和剪力抗震需求、开裂截面数据、支座反力等信息。在完成设计验算后, 可以使用**设计菜单>桥梁设计>创建抗震设计报告**命令创建一个报告, 将分析计算结果以文档的形式输出。

另外, 软件在进行“一键式”抗震设计计算时, 中间所有的计算步骤及信息, 用户均可查看及检查。在进行自动抗震设计时, 会将每一步的操作都生成一个对应的荷载工况, 如图 9 所示, 自动生成工况均以前缀<QReq1>表示。其中<QReq1>GRAV 表示计算桥墩刚度折减的重力工况; <QReq1>MODAL 表示用于反应谱分析的模态工况; <QReq1>RS_(X、Y、XY)表示沿三个方向的反应谱分析工况; <QReq1>bGRAV 表示进行 Pushover 分析前, 用于计算上部结构作用于桥墩轴力的重力工况; <QReq1>PO_(TR1、LG1、TR2、LG2)表示两个桥墩分别沿桥纵向和横向的 Pushover 分析。每个工况的具体细节可点击右侧**修改/显示荷载工况**查看。

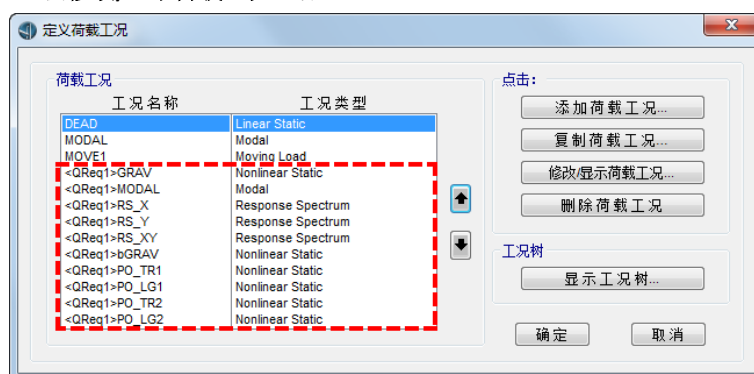


图 9 “一键式”抗震设计时程序生成的相应工况

5 总结

对于常规桥梁在 E2 地震荷载作用下的反应谱分析, CSiBridge 给出了“一键式”的解决方案。CSiBridge 将繁琐的模型处理及数据处理全部交由软件完成, 大大降低人为错误; 采用参数化的建模方式, 当桥梁结构信息发生修改时, 能快速调整模型, 而后进行分析, 避免重新建模的困扰; 最后契合中国规范, 基于 SAP2000 的分析内核, 计算高效而且稳定, 可成为从事桥梁性能化抗震设计工程师手中的利器。

限于篇幅, 文章对一些技术细节没有展开说明, 具体可以查看 CSiBridge 附带的技术文档《中美规范抗震设计技术指南》。