

# 桥梁自动抗震设计中的 Pushover 分析

筑信达 吕良

Pushover 分析方法又称非线性静力推覆分析，是一种能预测地震响应并为结构抗震性能进行评估的方法。目前中国公路桥梁抗震设计规范(JTG/T 2231-01—2020)规定：E2 地震作用下规则桥梁多柱墩需要使用非线性静力分析方法（即 Pushover 分析）计算桥墩顶处的容许位移。美标公路桥梁抗震规范《AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design》中规定，对于 D 类桥梁的抗震位移能力需要通过 Pushover 分析来求解。

CSiBridge 中嵌入了中国公路桥梁抗震设计规范及美标桥梁抗震设计规范，能实现对规则桥梁的“自动抗震分析”，具体可查看文章“[桥梁性能化抗震设计在 CSiBridge 中的实现](#)”。在对桥梁进行“自动抗震分析”时 CSiBridge 能自动依据相应规范执行 Pushover 分析求解桥墩的位移能力。本文将结合中国公路规范及 AASHTO 规范中对 Pushover 分析的规定，简要介绍在 CSiBridge 自动抗震设计中 Pushover 的实现流程及方法。

## 1. 桥梁 Pushover 分析

静力推覆分析方法自提出以来，各国学者提出了各种不同的具体实施办法，这里主要介绍中国公路规范及 AASHTO 规范中 Pushover 求解桥墩位移能力的方法。AASHTO 规范中抗震策略为 Type1 的 D 类桥梁在地震作用下，上部结构需保持弹性状态，采用下部结构延性来抵抗地震作用。而国标中的要求更加明确，对于抗震体系为类型 I 的 B 类和 C 类桥梁，地震作用下，桥梁的弹塑性变形、耗能部位位于桥墩。对于此类桥梁，AASHTO 规范和国标采用 Pushover 求解桥梁的位移能力的分析方法大致相同。其基本思路是将地震荷载等效成侧向荷载，通过对结构施加单调递增水平荷载来进行分析的一种非线性静力分析方法，它研究结构在地震作用下进入塑性状态时的非线性性能。

利用 Pushover 分析进行桥梁位移能力求解时将桥墩视为延性构件，对桥墩顶或盖梁施加侧向荷载，保证桥梁在侧向力 F 作用下，塑性铰的出现位置为桥墩底或桥墩顶。当桥墩某一塑性铰达到最大变形(即将卸载)时，结构成为机动体系，达到最大位移 $\Delta_u$ 。

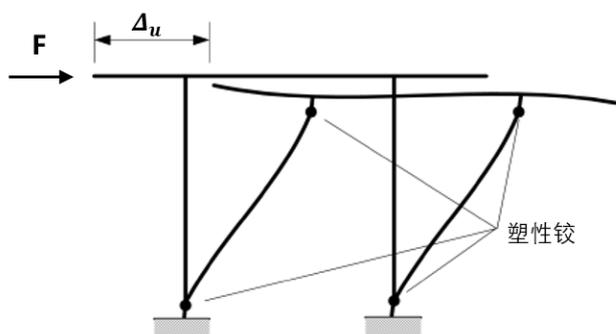


图 1-a 荷载施加方式

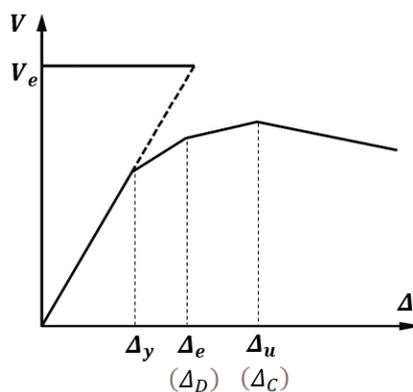


图 1-b 位移剪力图

利用 Pushover 分析，可得到全桥各处的位移。以桥墩顶的位移 $\Delta$ 代表全桥位移，以墩底剪力之和 V 代表侧向力，可以绘制剪力-位移图，如图 1-b 所示。结构位移随着侧向力的不断增大而增大，其中曲线的拐点代表了桥梁出现塑性铰，刚度下降。 $\Delta_y$ 为桥梁首次出现塑性铰时的位移， $\Delta_u$ 为结构成为机动体系时的位移，代表了桥梁的位移能力 $\Delta_c$ 。 $\Delta_e$ 为由反应谱分析得到的位移，代表了位移需求 $\Delta_D$ 。如果位移能力 $\Delta_c$ 大于位移需求 $\Delta_D$ ，则该桥梁满足规范抗震的位移。

需要注意的是，Pushover 求解桥梁整体的位移能力时 AASHTO 规范是需要考虑基础的作用。仅当基础对桥梁位移能力的影响较小时，可以不做考虑。而国标中并没有强调 Pushover 分析需要考虑基础的作用。另外，AASHTO 规范中判断桥墩的极限位移能力是当桥墩某一塑性铰达到最大变形（即将卸载）结构成为机动体系时对应的位移 $\Delta_u$ 。而国标中桥墩的位移能力是由第一个属于该桥墩的塑性铰达到指定的极限状态时的位移决定的，两本规范的定义稍有区别。



## 2 Pushover 的一般步骤

Pushover 分析方法能预测结构在侧向荷载作用下相关构件在各个阶段所处的状态：即从弹性阶段、开裂阶段、屈服阶段、弹塑性阶段、破坏阶段。同时找到塑性铰在结构中出现的位置、顺序以及相应的薄弱环节和倒塌破坏模式。因此在分析过程中需要考虑材料的塑性、塑性铰的位置、不同阶段的不同状态等。其一般分析步骤如下：

- 1) 建立结构的有限元分析模型。
- 2) 根据有限元模型中各单元的种类以及所采用的材料，计算各单元的塑性铰性质（恢复力模型）。
- 3) 在开裂或屈服构件的一端或两端设置塑性铰。桥梁结构中，塑性铰一般都出现在桥墩的顶、底部，上部结构由于刚度较大一般很少进入塑性。
- 4) 对结构进行静力分析，计算结构在初始荷载作用下的内力情况（即在推覆分析前，计算结构自重的影响）。
- 5) 计算结构的目标位移，施加侧向荷载，通过逐步增大侧向荷载逐级“Push”结构，直至结构中构件出现开裂或进入屈服。
- 6) 重复上一步骤，直至结构顶点水平位移达到极限位移。
- 7) 记录每一次所施加的侧向荷载与相应结构顶点的水平位移。数据整理，绘制结构的基底剪力—顶点位移关系曲线

CSiBridge 自动抗震设计依据中国规范及 AASHTO 规范要求将上述 Pushover 分析流程整合到程序当中，实现自动分析。选取的规范不同，程序会有不同的处理方式，具体的实现细节将在下节介绍。

## 3 实现要点

当桥梁的抗震设计类别被自动识别为 D 或用户将抗震设计覆盖项设置为 D 时，CSiBridge 根据 AASHTO 抗震设计规范 4.8.2 条执行 Pushover 分析确定位移能力。选择中国规范时，对于双柱或多柱排架墩的横桥向应分别根据第 7.4.7 条和第 7.3.7 条执行 Pushover 分析。

CSiBridge 基于构件的参数化建模方式，程序能识别桥墩构件的属性，并依据所选择的规范自动计算桥墩的塑性铰的长度和桥墩截面的塑性铰属性，并自动为桥墩指定塑性铰。Pushover 分析时，程序依据规范考虑结构自重的影响，依据桥梁的抗震体系所包含的桥墩数量，对每一个桥墩执行横桥向和纵桥向的 Pushover 分析。

### 3.1 塑性铰的长度及位置

当设计规范选择 AASHTO 规范时，混凝土桥墩塑性铰长度由 AASHTO 抗震设计规范 4.11.6 条确定，具体公式如下：

$$L_p = 0.08L + 0.15f_{ye}d_{bl} \geq 0.3f_{ye}d_{bl} \quad (\text{AASHTO 4.11.6-1})$$

其中： $L$  是墩柱中最大弯矩点至反弯点的长度 (in)， $f_{ye}$  墩柱纵向钢筋的有效屈服强度 (ksi)， $d_{bl}$  墩柱纵筋的公称直径 (in)。

当设计规范选择中国公路规范时，塑性铰长度分别对应《JTG/T 2231-01—2020》第 7.4.4 条和《城市桥梁抗震规范》中的第 7.3.5 条。在两个国内规范中塑性铰的长度公式相同，具体公式如下：

$$L_p = 0.08H + 0.022f_yd_s \geq 0.044f_yd_s \quad (\text{JTG 2020 7.4.4-2})$$

式中各参数的意义与美标对应参数相同，但是由于国标公式中参数的单位为兆帕和厘米，所以在系数上与美标有差异。

需要注意的是，桥墩计算得出的塑性铰长度在顺桥向和横桥向可能是不同的，然而模型中每个塑性铰只能指定一个塑性铰长度。对于一个具体的模型，可以在“抗震设计首选项中”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。用户可以在采用其中一个设置计算之后再另用一个设置再次计算以查看影响。

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，如图 2 所示。

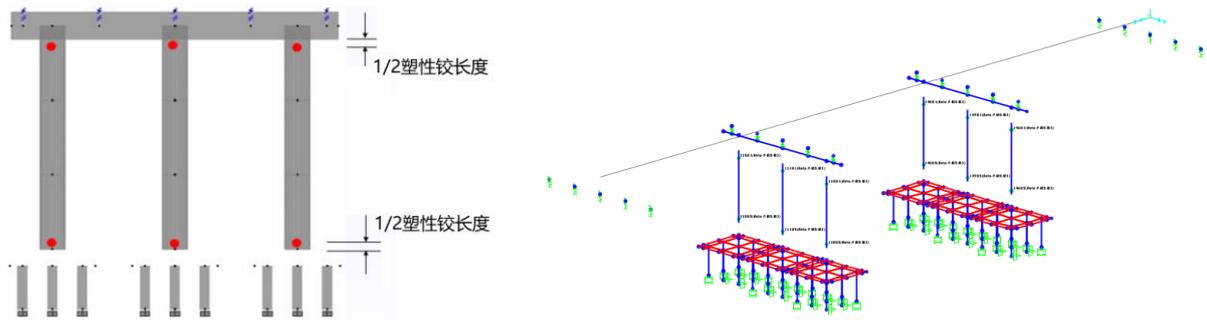


图 2 桥墩塑性铰的指定

### 3.3 材料的非线性

塑性铰的延性行为与该塑性铰所在构件材料的非线性属性密切相关。CSiBridge 内置了中国规范和 AASHTO 规范中的材料，但是材料的非线性属性须在非线性材料数据窗口中定义。程序默认混凝土非线性本构采用 Mander 模型，与 AASHTO 抗震规范和国标公路抗震规范要求相符。指定截面的配筋信息后，程序会自动计算出约束混凝土的应力应变曲线，如图 3-a 所示。类似的，钢筋的非线性材料同样在材料非线性属性数据窗口中定义。钢筋的非线性本构可采用 Simple 或 Park 模型，两个本构模型均是钢筋的应力-应变曲线分为三段：弹性段、理想塑性段和应变硬化段。不同的是在应变硬化段 Simple 模型使用抛物线形，Park 模型则使用经验公式。另外，用户也可以自定义的应力-应变数据，包括硬化起始应变、极限应变和应力-应变图的最终斜率，定义完成后可查看钢筋应力应变曲线，如图 3-b 所示。

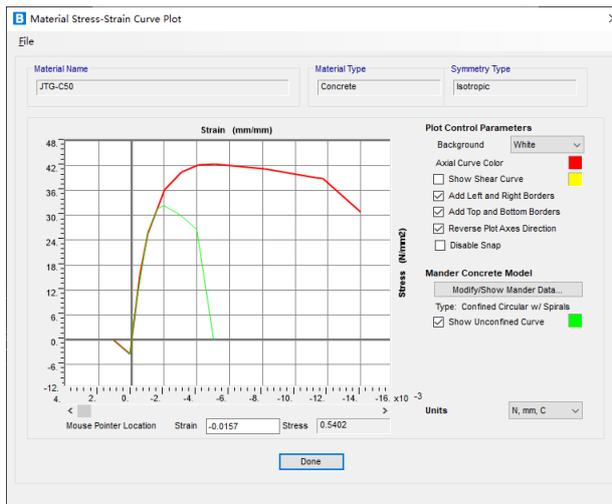


图 3-a 混凝土的应力-应变曲线

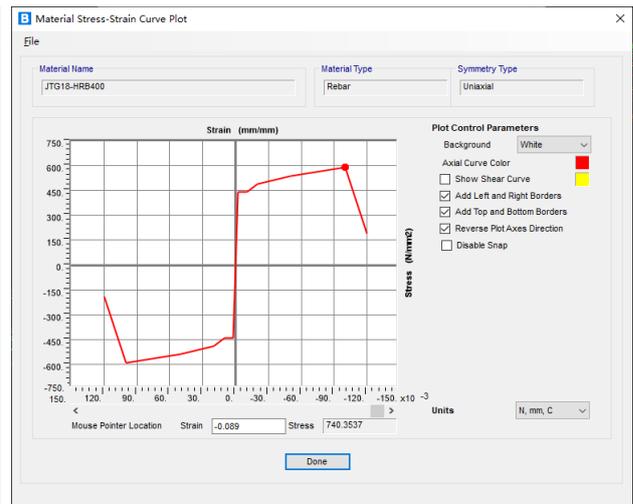


图 3-b 钢筋的应力-应变曲线

### 3.3 桥墩截面的定义

对于常规的方形截面和圆形截面 CSiBridge 中可直接通过混凝土框架截面定义，即通过构件选项卡>类型，选择框架属性>新建混凝土框架截面，然后选择方形或圆形截面，并指定截面的配筋形式。在程序内部会将方形和圆形截面转换成截面设计器截面，以确定塑性铰特性和开裂截面特性。对于复杂的桥墩截面，则可以通过 SD 截面设计器来定义。SD 截面设计器支持 DXF 文件的导入，适合各种类型的复杂截面定义，并支持对复杂截面的纤维划分。对于不满足 Mander 本构条件的桥墩截面，可通过纤维铰来计算桥墩截面的铰属性。

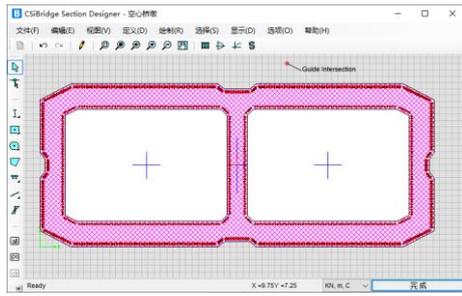


图 4-a 复杂桥墩截面的定义

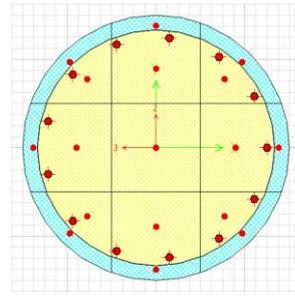


图 4-b 桥墩截面的纤维划分

### 3.4 塑性铰属性

国标公路抗震规范和 AASHTO 抗震规范中混凝土墩柱的塑性铰属性均是通过对弯矩-曲率曲线转化为理想二折线确定的。在截面设计器中可以查看 CSiBridge 对墩柱截面进行  $M-\phi$  曲线分析的结果，如图 5 所示，在视图窗口中可以看到该截面在指定轴力作用下的弯矩-曲率曲线。在红色选框 1 “理想化模型 (Idealized Model)” 选项中选择相应的规范，如这里选择的为中国规范 “JTG”，程序将依据二折线与弯曲-曲率曲线所围城两个区域面积相等的原则绘制理想弹塑性二折线。

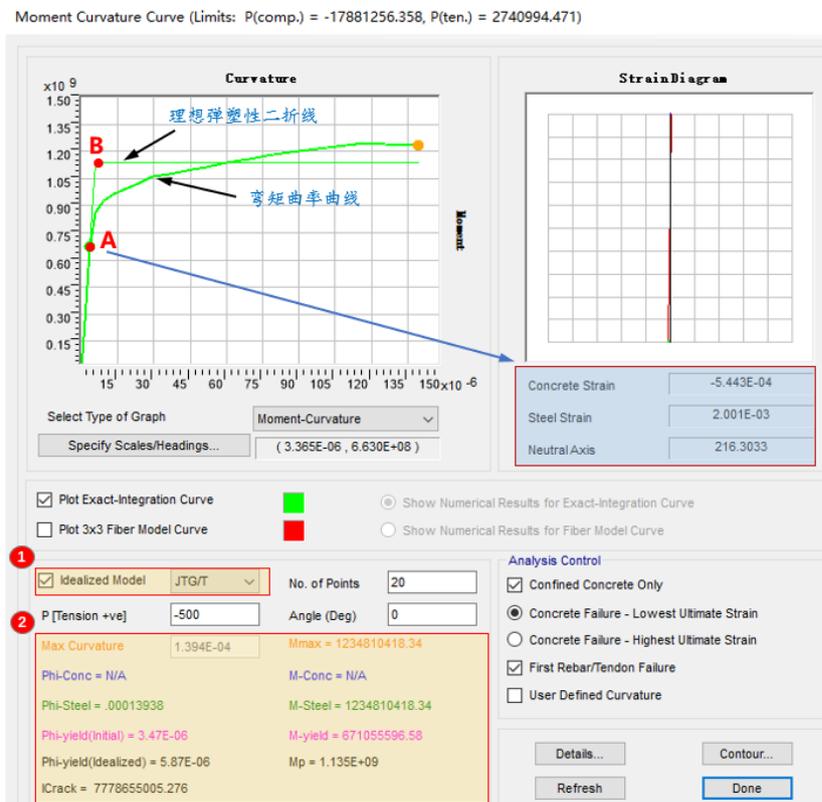


图 5 弯矩曲率曲线

选择中国规范 “JTG” 后，在红色选框 2 中会显示该桥墩截面的分析结果，这里将各个参数的对应的名称及含义整理在表 -1 中。关于该窗口中其他参数详细介绍可以参考知识库文章 “[截面设计器中弯矩-曲率窗口中的相关参数意义](#)”。

表-1 桥墩截面分析结果

表示符号	名称	含义
Phi-Conc、M-Conc	\	表示混凝土达到极限应变时，截面对应的弯矩和曲率
Phi-Steel、M-Steel	\	表示受拉钢筋达到极限应变时，截面对应的弯矩和曲率。

Phi-yield (Initial)、M-yield	屈服曲率、屈服弯矩	表示第一根钢筋进入屈服时截面的弯矩和曲率，对应图-5 中弯矩曲率曲线中的 A 点。A 点箭头所指的应变图显示了对应时刻截面的应变分布及钢筋应变值，此时钢筋的应变等于的钢筋屈服应变。
Phi-yield(idealized)、M-p	理想屈服曲率 理想屈服弯矩	表示根据所选择的理想化模型所计算出的理想屈服弯矩和理想屈服曲率。图-5 中的两折线表示依据 JTG 规范计算出理想弯矩-曲率曲线，B 点为理想屈服点，对应理想屈服弯矩和理想屈服曲率。
$I_{crack}$	开裂截面惯性矩	混凝土柱开裂之后且破坏之前可以等效成的弹性截面的抗弯惯性矩，其计算公式为： $I_{crack} = \frac{M_y}{E\phi_y}$

需要注意的是：对于多柱墩，在横向 Pushover 的过程，桥墩的轴力因倾覆效应而不断变化。因此，同一桥墩截面的屈服弯矩和屈服曲率依据 Pushover 分析步中轴力的改变而变化。CSiBridge 在分析时会实时读取桥墩的轴力值，并依据轴力调整塑性铰的属性。另外程序默认为桥墩指定 P-M-M 铰，相较于 P-M 铰，P-M-M 铰能同时考虑轴力与两个方向的弯矩耦合作用，计算结果更加符合工程实际。通过命令：高级选项卡>指定>截面>塑性铰，用户可以查看铰的骨架曲线和 PMM 相关面属性。

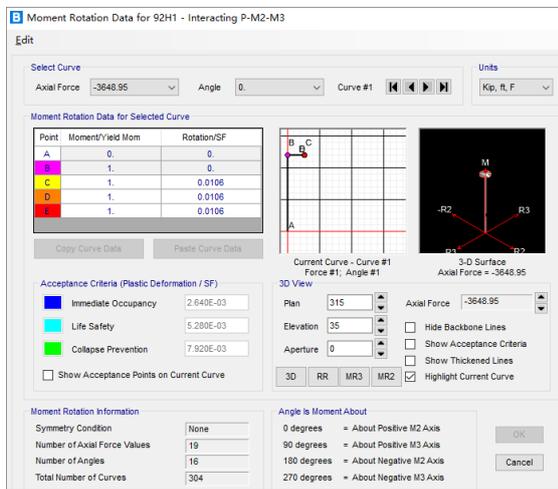


图 6-a 铰骨架曲线

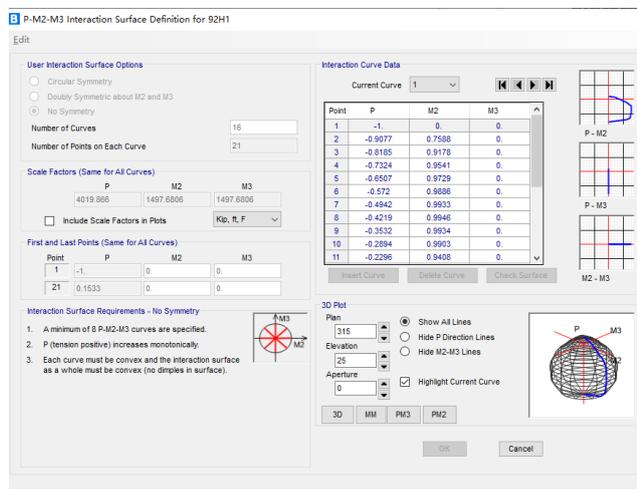


图 6-b P-M-M 相关面

### 3.5 分析过程

桥墩作为延性构件，在地震作用下会开裂，其刚度会降低，因此在 Pushover 分析时需要考虑桥墩开裂后的属性。AASHTO 抗震规范和国标公路抗震规范计算桥墩开裂截面惯性矩  $I_{crack}$  的方法相同，即通过截面分析计算桥墩截面在自重工况下的等效屈服弯矩  $M_y$  和等效屈服曲率  $\phi_y$ ，通过公式  $I_{crack} = \frac{M_y}{E\phi_y}$  计算开裂截面的惯性矩。在图 5 红色选框 1 下侧 P(Tension+)中，对桥墩截面指定上部结构引起的轴压力后，程序会自动计算出该截面的等效屈服弯矩  $M_y$ 、等效屈服曲率  $\phi_y$ ，和开裂截面惯性矩  $I_{crack}$ 。

CSiBridge 中 Pushover 分析模型可以包含或不包含上部结构。对于带上部结构进行 Pushover 分析的工况，目标桥墩保留原来的支座，其他桥墩的支座转换为滑动支座。对于不包含上部结构的 Pushover 分析，程序首先会执行一个重力工况，将桥墩取为隔离体，依据桥墩轴力计算桥墩截面的开裂特性，通过修正系数，修改墩属性为开裂截面属性，并施加自重和上部结构恒荷载用于下一步的推覆分析。

运行 Pushover 分析时，CSiBridge 会识别桥梁抗震体系 (ERS) 中包含的桥墩数量，执行多个 Pushover 分析。每个桥墩在顺桥向和横桥向分别进行 Pushover 分析。如果设计桥梁在两端桥台处使用桥墩，该桥墩也会包含在加抗震体系中自动进行 Pushover 分析。

## 4 结果查看

Pushover 分析完成后，在变形图中通过调整分析步可以查看桥墩在每一步的分析过程中结构的变形以及铰的状态。

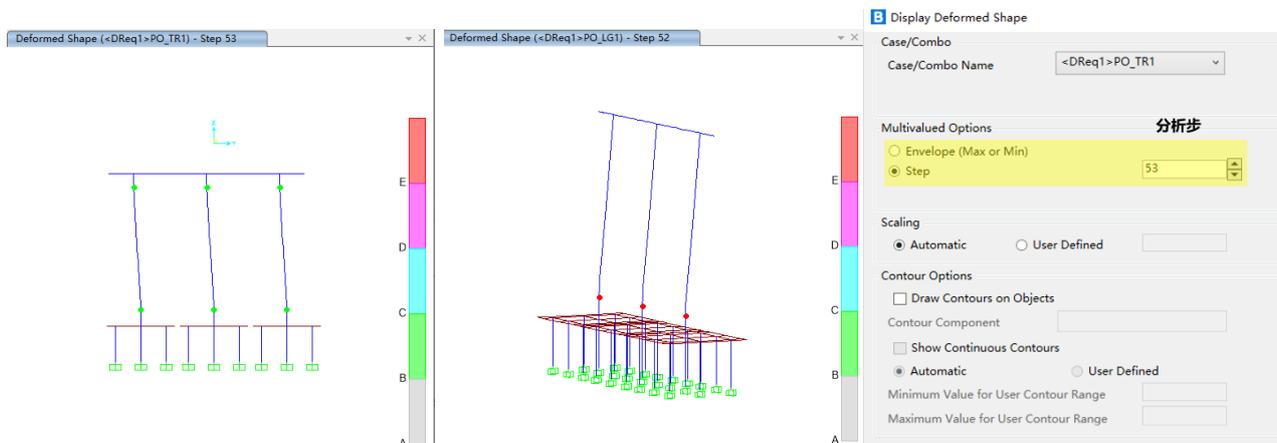


图 7 桥墩结构变形及铰状态

### 4.1 桥墩顶的容许位移

依据 AASHTO 规范，位移能力是桥墩刚好开始强度失效（Pushover 曲线斜率为负）时的最大位移。通过查看 Pushover 分析曲线，如图 8 所示，该曲线为墩底剪力和位移曲线，当墩底剪力开始减小时表示塑性铰达到其极限曲率状态，此时对应的墩顶位移即为所求的桥墩位移能力  $\Delta_c$ 。对于中国规范，可以通过表格显示塑性铰每一个分析步的状态，找到该桥墩第一个的塑性铰达到指定的极限状态时的分析步，即可确定桥墩的位移能力  $\Delta_c$ 。

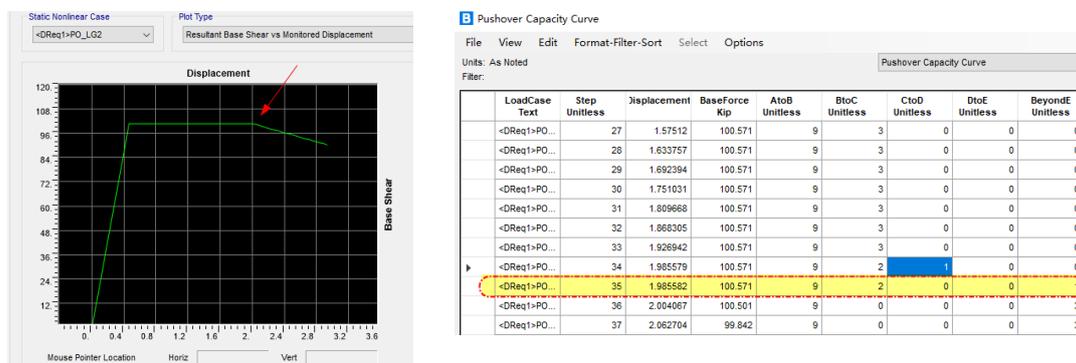


图 8 Pushover 分析曲线及表格显示结果

### 4.2 桥墩开裂截面特性

由 CSiBridge 自动抗震设计中的 Pushover 分析求解桥墩位移能力时，程序会自动生成重力工况求解桥墩的开裂截面属性。依据开裂截面属性和未开裂截面属性的比值，可以求得桥墩截面的抗弯刚度折减系数。用户可以在工况中查看重力工况的设置，计算得到的桥墩各个方向的抗弯刚度折减系数可以直接通过表格查看，类似图-9 所示。

DesReqName	BridgeObj Text	SpanName Text	Station mm	Column Text	FModifier Text	I22Mod Unitless	I33Mod Unitless
DReq1	BOBJ1	Span1	18047.21	1	<DReq1>NFM_BT1C1	0.283624	0.283129
DReq1	BOBJ1	Span1	18047.21	2	<DReq1>NFM_BT1C2	0.287355	0.287415
DReq1	BOBJ1	Span1	18047.21	3	<DReq1>NFM_BT1C3	0.283624	0.283129
DReq1	BOBJ1	Span2	36335.21	1	<DReq1>NFM_BT2C1	0.283624	0.283129
DReq1	BOBJ1	Span2	36335.21	2	<DReq1>NFM_BT2C2	0.287355	0.287415
DReq1	BOBJ1	Span2	36335.21	3	<DReq1>NFM_BT2C3	0.283624	0.283129

图-9 开裂截面折减系数

## 5 总结

国标与 AASHTO 抗震规范在进行 Pushover 分析时两者思路方法大致相同，仅在一些细节的处理上有所差异。将这些异同整理到表-2 中，如下所示（下表中“\”表示规范并未规定）：

表-2 国标与 AASHTO 抗震规范中 Pushover 分析的异同

\		JTGT 2231-01-2020	AASHTO 抗震规范
Pushover 适用范围		对于抗震体系为类型 I 的 B 类和 C 类桥梁	抗震策略为 Type1 的 D 类桥梁
不同点	塑性铰长度计算公式	$L_p = 0.08H + 0.022f_y d_s \geq 0.044f_y d_s$ (JTG 2020 7.4.4-2)	$L_p = 0.08L + 0.15f_{ye} d_{bl} \geq 0.3f_{ye} d_{bl}$ (AASHTO 4.11.6-1)
	桥墩位移能力判定方法	首个塑性铰达到极限状态	当桥墩某一塑性铰达到最大变形（即将卸载） 结构成为机动体系时对应的位移
	是否考虑基础	\	需要
相同点	塑性铰的确定方法	理想二折线	理想二折线
	混凝土的非线性属性	Mander 本构	Mander 本构
	钢筋的非线性属性	\	钢筋的应力-应变模型应能体现出弹性部分、 屈服平台和应变硬化范围
	桥面开裂截面属性	考虑桥墩最不利的轴力组和，通过截面分析求得开裂截面属性（7.4.7）	需考虑恒载及倾覆引起的桥墩轴力（4.11.4）， 通过截面分析求得开裂截面属性

CSiBridge 通过 Pushover 求解桥墩位移能力时紧密结合中国公路桥梁抗震设计规范及美标桥梁抗震设计规范，能自动计算桥墩开裂截面塑性、识别桥墩构件、计算并指定塑性铰，并可通过图形或表格的方式查看分析结果。减少了工程时处理模型的繁琐、塑性铰的属性迭代计算工作及结果处理的工作，能极大的提高工程师进行桥梁抗震分析设计的工作效率。

### 参考资料

- [1] Computers & Structures Inc., 北京筑信达工程咨询有限公司. CSI 分析参考手册. 2019.
- [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] 公路桥梁抗震设计规范：JTGT 2231-01-2020[S].人民交通出版社，2020
- [4] AASHTO guide specifications for LRFD seismic bridge design-2th Edition-(2011)