



ETABS 弹塑性时程分析的性能校核

筑信达 吴文博

在完成弹塑性时程分析之后，会得到大量的数据，如何在大量的数据中提取出有用的信息，并对结构进行性能评估成为了一个非常重要的课题。通常来讲我们会从整体结构和重点构件两个层面分别进行评估，其中结构层面的评估一般是通过顶点位移时程、最大层间位移角以及基底剪力时程等大指标确定；而构件层面则是通过转角、力以及应变等构件指标确定。本文主要介绍如何在 ETABS 中进行构件性能校核。

1 可接受准则

在 ETABS 中，构件的性能校核结果高度依赖于可接受准则，可接受准则即各种性能指标对应不同性能状态的界限值。性能校核指标主要分为两大类，一类是变形、内力指标，一类是应力应变指标。变形、内力指标主要是指构件的转角、变形、内力等构件的一些宏观行为，通常在塑性铰或构件中指定；应力应变指标则主要是采用应力或应变作为衡量指标，通常在材料定义中指定。

1.1 塑性铰可接受准则

ETABS 中的塑性铰可分为延性铰和脆性铰，其中延性铰的可接受准则多为转角或变形，例如：M3 铰和 PMM 铰采用转角作为可接受准则，而 P 铰则采用轴向变形为可接受准则，如图 1 和图 2。



图 1 M3 铰可接受准则



图 2 P 铰可接受准则

脆性铰则会采用力作为可接受准则，如图 3。

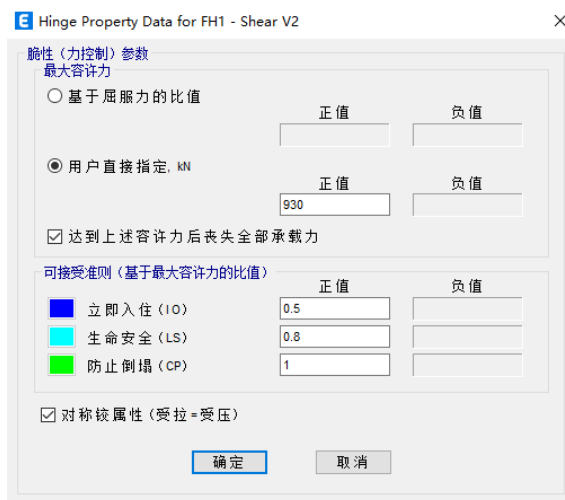


图 3 V 铰可接受准则



1.2 连接单元可接受准则

连接单元在定义时，也可以添加可接受准则，可以采取力或变形作为可接受准则，如下图所示。

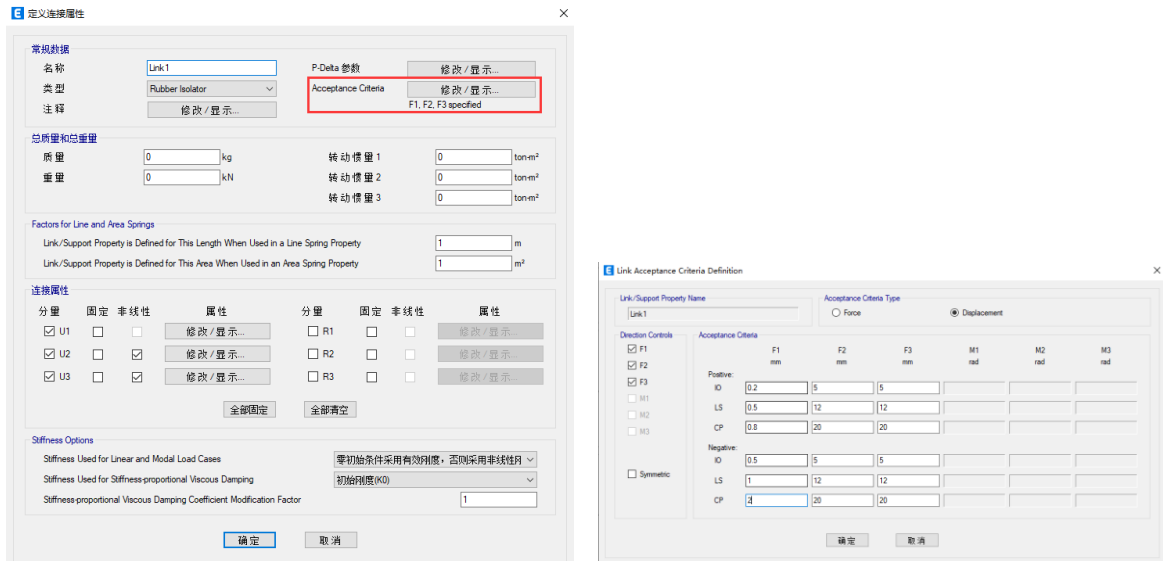


图 4 连接单元可接受准则设置

1.3 位移计 (Gauge) 单元可接受准则

位移计单元并非分析单元，而是一种后处理单元。位移计单元有两种，一种为两点位移计，一种为四点位移计。位移计单元更像是一种带有可接受准则的广义位移，因为位移计单元是获取到节点信息后，进行处理得到相关指标，而非直接获取单元的信息。

两点位移计。 两点位移计的类型 (Gauge Type) 可以选择为“Rotation (转动)”或者“Translation (平动)”，用户可以输入应变或转角的可接受准则，如图 5。用户在使用时，应该非常注意，这里面的应变和转角并不同于常规意义上的应变和转角。我们通常说的应变是截面中某一个纤维的应变，而位移计单元中的应变则是通过杆件两端的节点位移做差后除以杆件长度得到的，即 $\frac{\Delta_1 - \Delta_2}{L}$ ，这是一个宏观上对构件的描述，并且位移计单元是可以跨单元使用的。所以两点位移计常常用在分层壳模拟的剪力墙两端，检测剪力墙边缘区混凝土是否被压溃。如图 6 所示，在墙体边缘沿层高布置了两点位移计 (绿色线条)，通过这些位移计可以评估墙体边缘在层高范围内的总体变形。当然，两点位移计的使用非常灵活，用户需要依据实际的情况灵活应用。

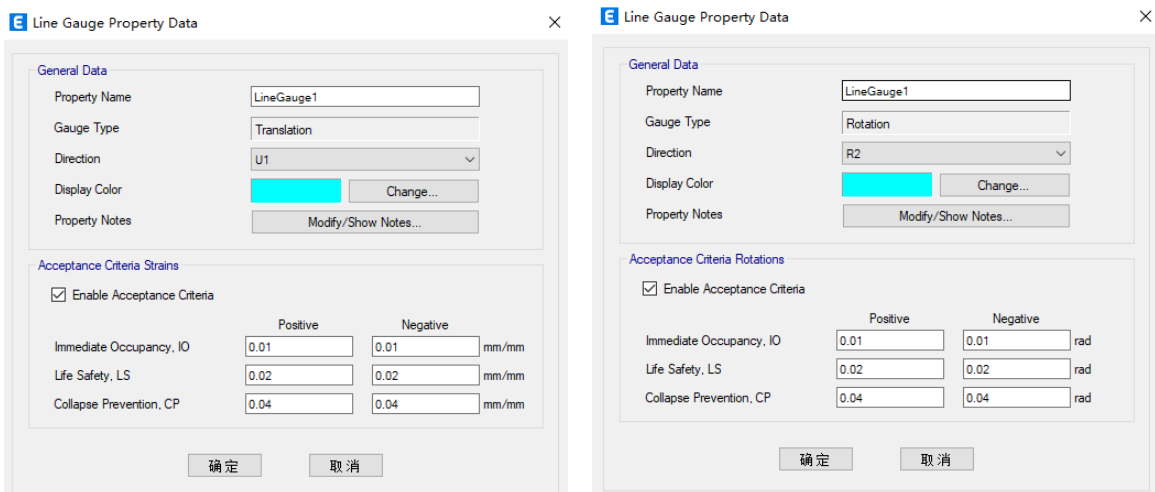


图 5 两点位移计定义

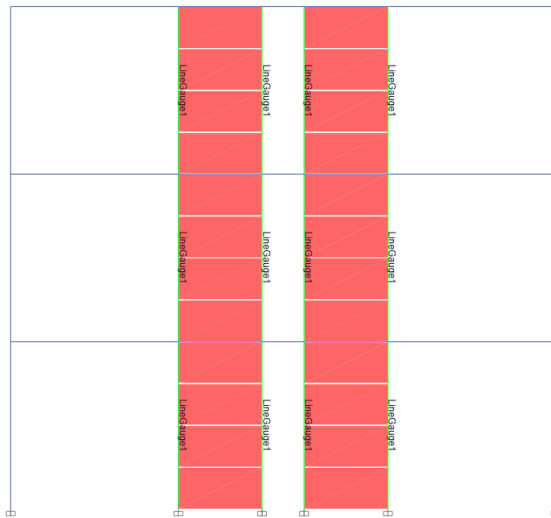


图 6 两点位移计的使用

四点位移计。四点位移的类型（Gauge Type）可以选择为“Rotation（转动）”或者“Shear（剪切）”，Direction 可以选择为“Pier”或“Spandrel”，用户可以输入剪应变或转角的可接受准则，如图 7。与两点位移计相似，四点位移计获得的指标也是一种宏观指标，只不过是节点数量扩展到 4 个，并且通过 Direction 来判断指标的方向，“Pier”为墙肢，是竖直方向，“Spandrel”为连梁，是水平方向。

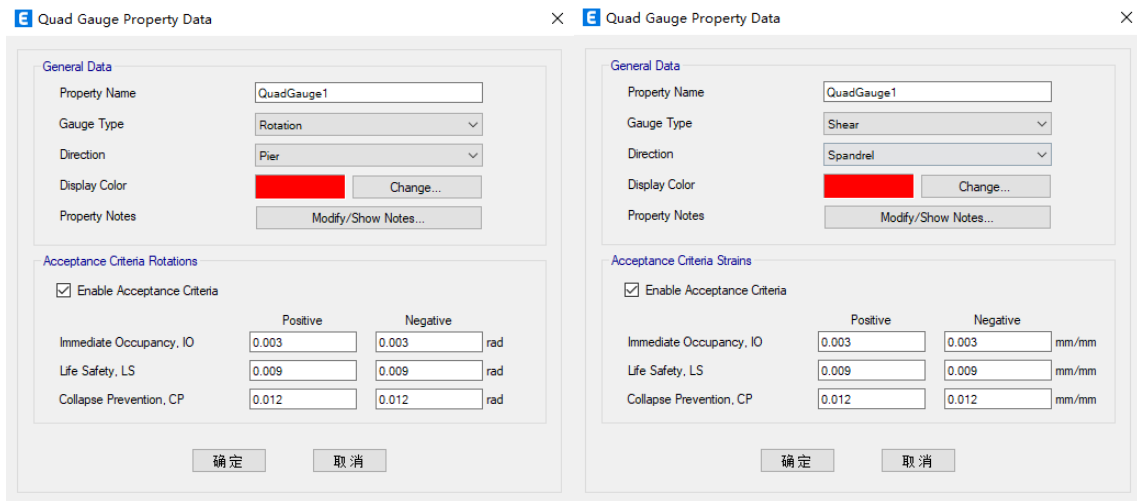


图 7 四点位移计定义

四点位移计单元可以与 ASCE41-17 规范中的一些要求建立对应关系，如图 8 所示，分别为墙肢转角，用于弯曲行为占主导的情况，适合于高宽比较大的墙肢，如超高层结构中的核心筒均属此例；墙肢剪切变形，用于剪切行为占主导的情况，适用于矮墙，例如错洞墙，以及连梁的弦转角，适用于剪切控制连梁，通常采用分层壳进行模拟。

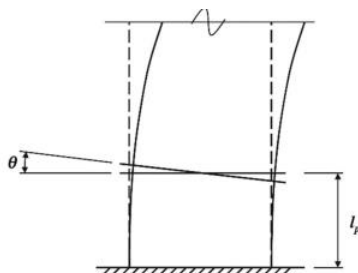


Figure 10-4. Plastic Hinge Rotation in Shear Wall Where Flexure Dominates Inelastic Response

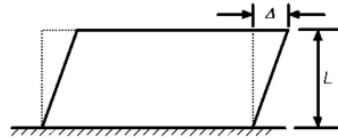


Figure 10-5. Story Drift in Structural Wall Where Shear Dominates Inelastic Response

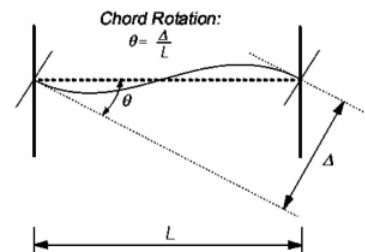


Figure 10-6. Chord Rotation for Structural Wall Coupling Beams

图 8 ASCE41-17 中对构件行为的描述



1.4 墙肢（连梁）内力可接受准则

由于剪力墙剪切破坏是一种脆性破坏，所以剪力墙在设计中通常需要满足强剪弱弯的要求，墙肢（连梁）内力可接受准则就是专门用于抗剪能力的校核。其中可接受准则的类型可以是：力、应力或应力比，即 Acceptance Criteria Type 可以选择“Force”、“Stress”或“Stress as Ratio of Sqrt (f_c')”，“Force”方法适应性更强，可以依据实际墙肢配筋情况计算墙肢抗剪承载力后输入；“Stress”方法则更为简单一些，可以对混凝土等级相同的墙肢进行统一定义；“Stress as Ratio of Sqrt (f_c')”更为简单，但是仅适用于美标，而不适用于中国规范。此外，ETABS 依据墙肢轴力的不同，可以考虑轴力对抗剪承载力的影响，如图 9 所示，拉力会降低墙肢的抗剪承载力，而压力则会增加墙肢的抗剪承载力，但是当拉力/压力增加到一定程度后，抗剪承载力维持不变，这与中国规范中的抗剪承载力公式是相似的。连梁内力可接受准则更加简单一些，如图 10 所示。但是用户需要注意的是，必须对壳单元设置有相应的墙肢/连梁标签后，才可以指定墙肢（连梁）内力可接受准则。

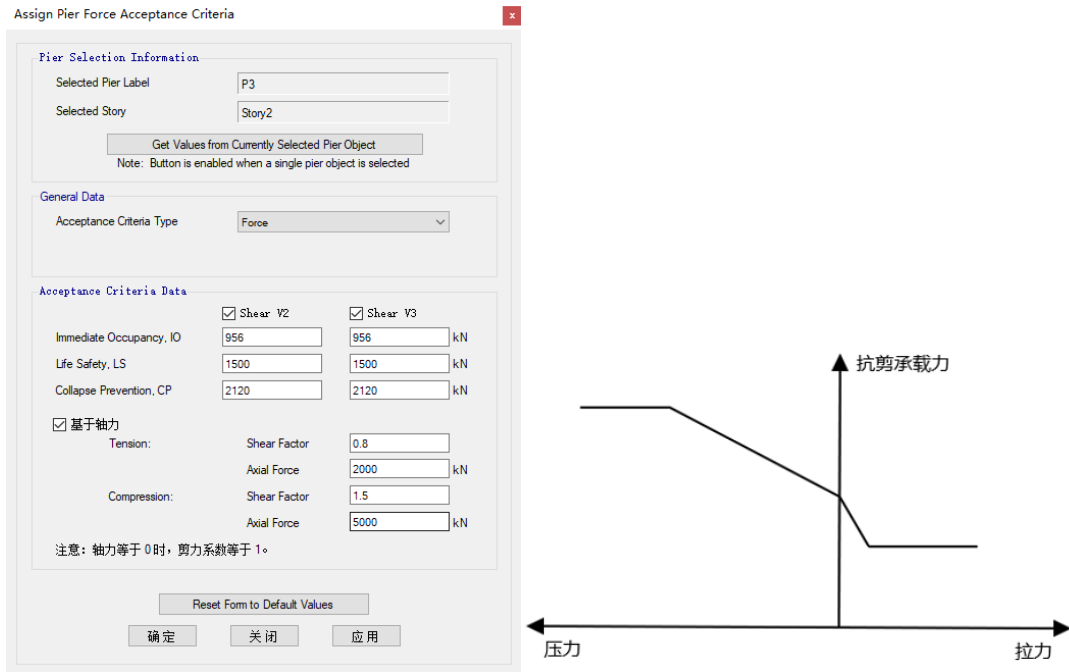


图 9 墙肢内力可接受准则

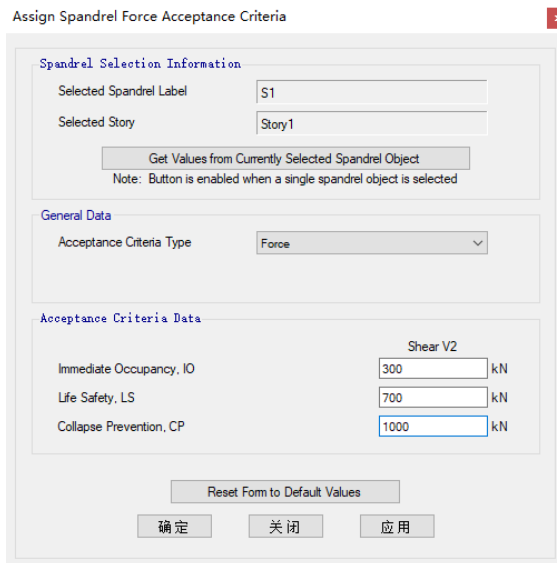


图 10 连梁内力可接受准则



1.5 材料可接受准则

材料可接受准则主要用于墙铰和纤维铰性能状态的判断，程序会获取墙铰或纤维铰中同一材料最大的纤维应变，然后依据材料的可接受准则进行判定，当存在多种材料时，以最不利的判断为最终结果。这与其他可接受准则不同，是一种微观层面的判定。此时我们应该注意的是，铰的长度会对这项指标非常敏感。在 ETABS 中我们更加推荐使用转角或者位移计(gauge 单元) 等对构件进行性能评估。

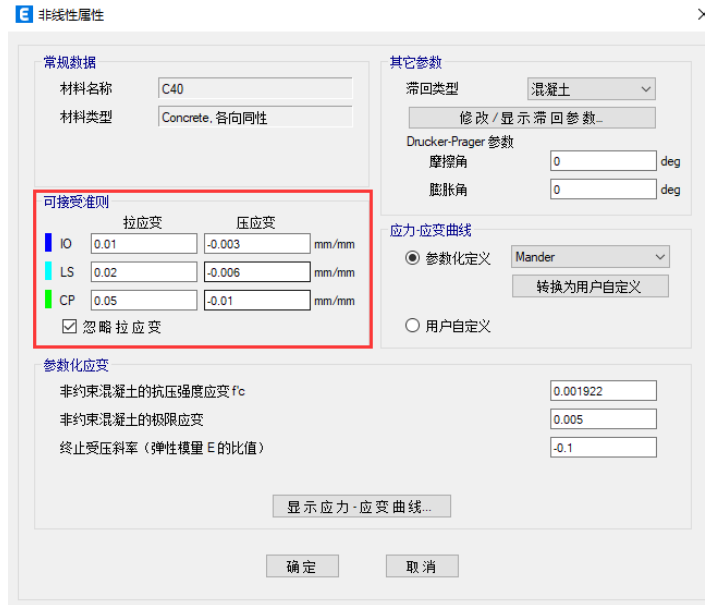


图 11 材料的可接受准则

2 性能校核

在 ETABS 中，用户可以通过**显示>变形图**命令，显示任意时刻下结构的出铰情况，通过铰不同的颜色，显示出铰不同的状态，如图 12 所示。但是图中只能对塑性铰、纤维铰和墙铰状态进行的判断，并且无法对相同性能状态下，不同铰的塑性程度进行区分。此时，用户应该通过性能校核功能对构件状态进行量化评估。

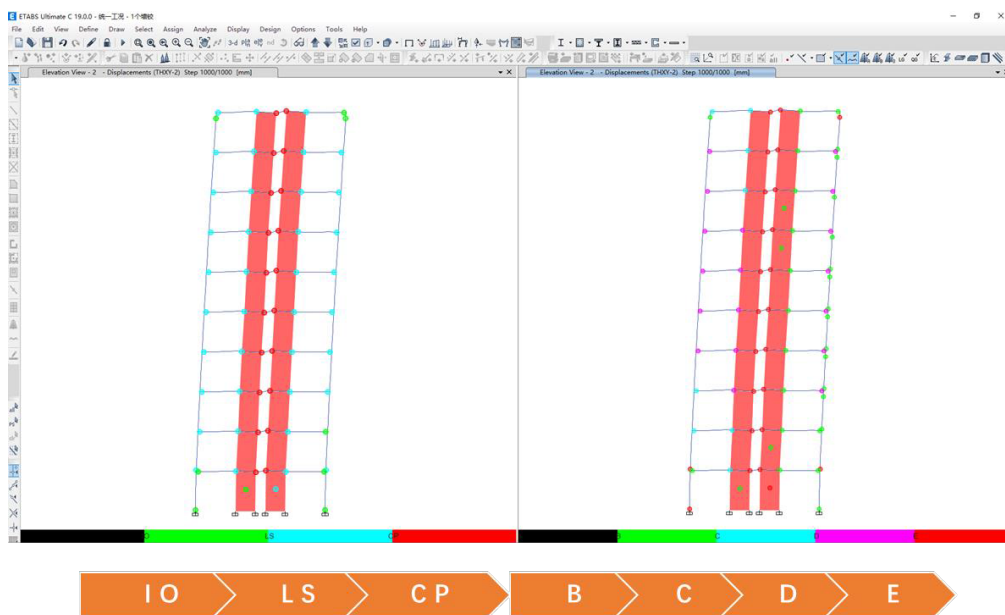


图 12 铰状态显示



用户可以通过**定义>性能校核**命令定义性能校核数据，如图 13。首先是需求集列表，通常可以按照地震输入不同进行划分，同时还可以对不同需求集的校核结果进一步处理：取均值+标准差或取最大值。对应中国规范的规定，当取三组加速度时程曲线输入时，计算结果宜取时程法的包络值，当取七组加速度时程曲线输入时，计算结果宜取时程法的平均值。其次是需求集对应的工况，通常对应为 X 向和 Y 向时程工况。最后是性能评价指标，用户可以选择全部或部分性能评价指标进行性能校核，用于性能校核耗时较长，建议适当选择所需的指标。

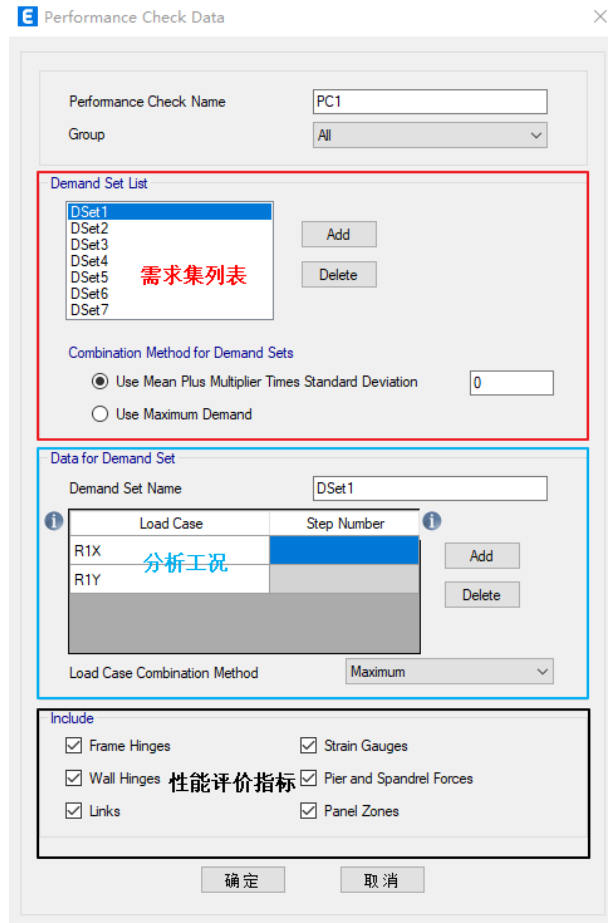
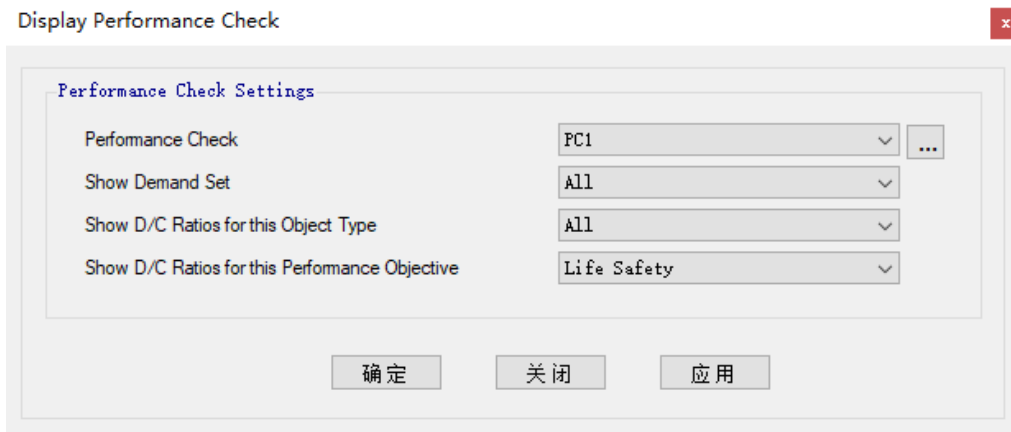


图 13 性能校核定义

用户可以通过**显示>性能校核**命令查看性能校核的结果，如图 14 所示。



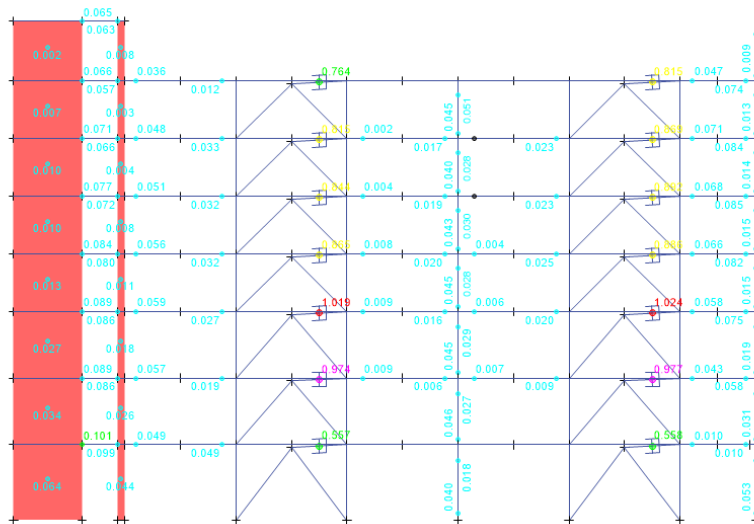


图 14 性能校核结果查看

并且用户还可以通过选项>图形颜色>输出命令调整颜色以及 D/C 比的数值，如图 15 所示。



图 15 输出颜色设置

3 结语

本文介绍了塑性铰、连接单元、位移计单元、墙肢内力以及材料的可接受准则的设置，并介绍了性能校核功能的定义与显示。截至发稿时，由于这部分功能的界面汉化工作正在进行中，本文的部分插图还是英文界面，但在即将发布的 ETABSV19.1.0 版本将实现相关功能菜单的汉化。

ETABS 作为一款工程分析与设计软件，从工程概念出发，更关注结构构件层面的变形或力的变化。通过不同类型、不同层面的可接受准则，结合性能校核功能，能综合评估建筑结构的抗震性能。

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] Computers & Structures Inc. ETABS v18.1.1 联机帮助文档. 2020