

混凝土结构细部分析与设计软件 IDEA Detail 简介

筑信达 张志国

目前，我国的混凝土结构设计规范采用以平截面假定为基础的截面分析计算或校核配筋，但这种方法主要针对梁、柱、支撑等细长杆件的主体组成部分（也称为连续区域），如图 1 所示的 B 区。但实际的混凝土结构中存在大量的非连续区域，包括开洞、变截面、牛腿、柱脚、深梁等等，如图 1 所示的 D 区。这些非连续区域的受力状态更复杂，基于平截面假定的截面分析不再适用，工程师们需要借助其它工具或手段处理混凝土结构细部分析与设计的难题。

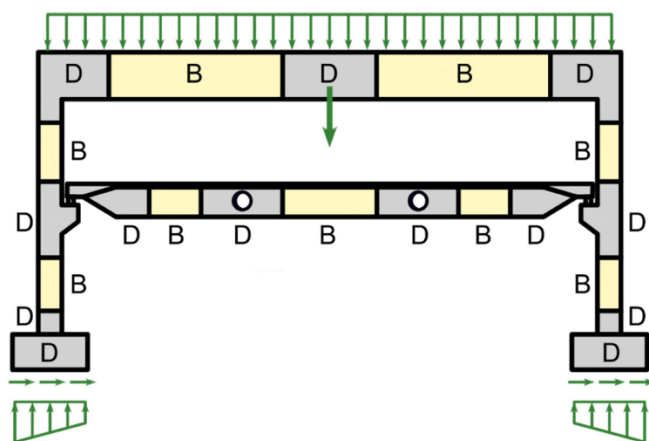


图 1 混凝土结构的连续与非连续区域

1 拉压杆模型 (STM Strut-and-Tie Models)

钢筋混凝土结构由钢筋和混凝土两部分组成，而非理想的均质材料。因此，钢筋混凝土结构的实际受力状态与钢筋布置密切相关，而钢筋布置往往依据结构的受力状态而确定。1987 年，施莱希 (Schlaich) 发表论文 *Toward a Consistent Design of Structural Concrete*，1991 年再次发表论文 *Design and Detailing of Structural Concrete Using Strut-and-Tie Models*。这两篇论文完善了钢筋混凝土拉压杆模型的实用设计方法，让 STM 理论进入工程界。

拉压杆模型是从连续体内抽象出来的离散化的桁架模型，由压杆、拉杆和节点三部分组成，用以反映混凝土内部力流的传递。如图 2 所示，蓝色的压杆由开裂后的混凝土组成，红色的拉杆由普通钢筋或预应力钢筋组成，黑色的节点是压杆和拉杆的交点。

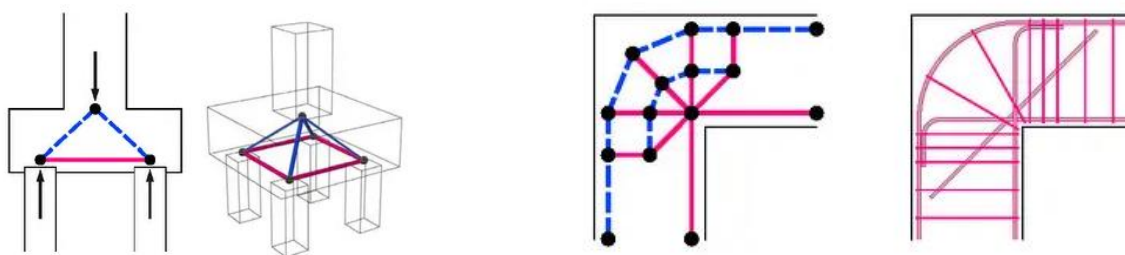


图 2 桩基承台 (左) 和梁柱节点 (右) 的拉压杆模型

拉压杆模型只需满足平衡条件和屈服准则，但没有变形协调的限制。因此，工程师在构建计算模型时可有多种选择，最优的拉压杆模型往往依赖于工程师的专业知识和经验判断。此外，拉压杆模型仅适用于混凝土开裂后的承载能力极限状态，无法用于挠度、裂缝等正常使用极限状态下的分析与设计。

综上，虽然拉压杆模型被广泛认为是混凝土 D 区设计的一种简单而实用的新方法，但在实际应用中往往存在门槛高、上手难、学习成本大等缺点，目前国内也没有成熟的商业软件供工程师选用。

2 协调应力场法 (CSFM Compatible Stress Field Method)

协调应力场法是一种基于有限单元法的连续应力场分析方法,既能用于承载能力极限状态,也能用于正常使用极限状态。其中,混凝土采用二维实体单元,非线性的应力-应变曲线可以考虑开裂对抗压强度的影响,如图3所示。左图中的系数 k_c 用于考虑混凝土开裂对抗压强度的折减,黑色曲线是根据设计规范输入的混凝土单轴力学属性(Uniaxial behavior),绿色曲线是考虑混凝土强度折减(Cracked concrete)后的单轴力学属性。从图中可以看出,虽然混凝土开裂影响抗压强度,但极限压应变 ϵ_{cu} 保持不变。

如右图所示,随着横向应变 ϵ_1 增大,混凝土开裂后的软化效应(Cracked softened concrete)使混凝土抗压强度的折减也越多。MCFT采用平均应力法(avg. stresses),零应变对应强度不折减,如图中黑色实线所示;fib MC 2010采用最大应力法(max. stresses),零应变对应的强度折减系数为0.65,如图中黑色虚线所示。实际工程应用中采用以上两种方法的结合,即图中的红色实线。

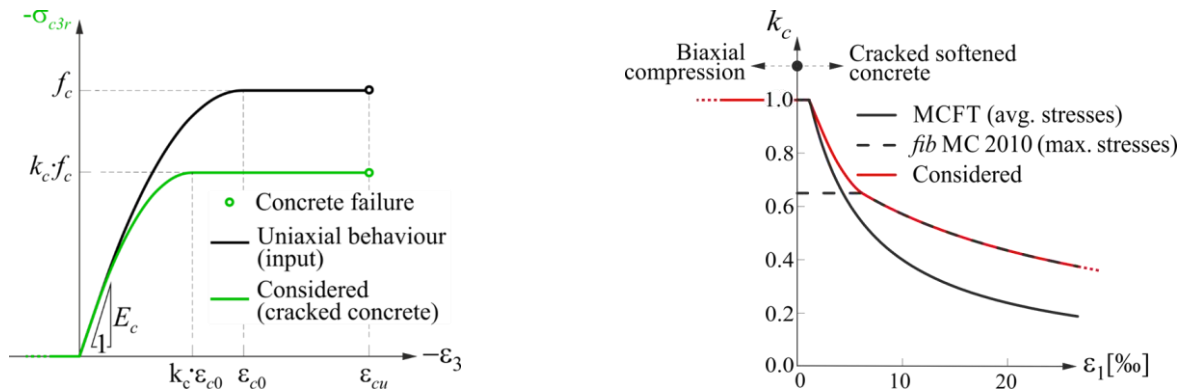


图3 混凝土的应力-应变曲线(左)和抗压强度折减系数(右)

钢筋采用一维杆单元和曲线形弹塑性本构模型,如图4(左)所示。用户根据设计规范输入的双折线形应力-应变关系并未考虑钢筋在拉力作用下的刚化效应,如图中黑色曲线所示。实际采用的蓝色曲线具有更高的刚度,但钢筋的延性有所降低,极限强度 f_t 保持不变。

钢筋和混凝土之间的粘结单元采用理想刚塑性本构模型,用于模拟两种材料之间的相对滑移,如图4(右)所示。虚线是在实验室中测量的真实(Reality)的粘结滑移 δ 与粘结剪应力 τ_b 的关系曲线,实际工程中多采用简化的刚塑性本构模型,即:粘结剪应力达到粘结强度 f_{bd} 即锚固失效。

除此之外,钢筋端部与混凝土之间的锚固采用弹簧单元,用于模拟钢筋的拔出破坏。

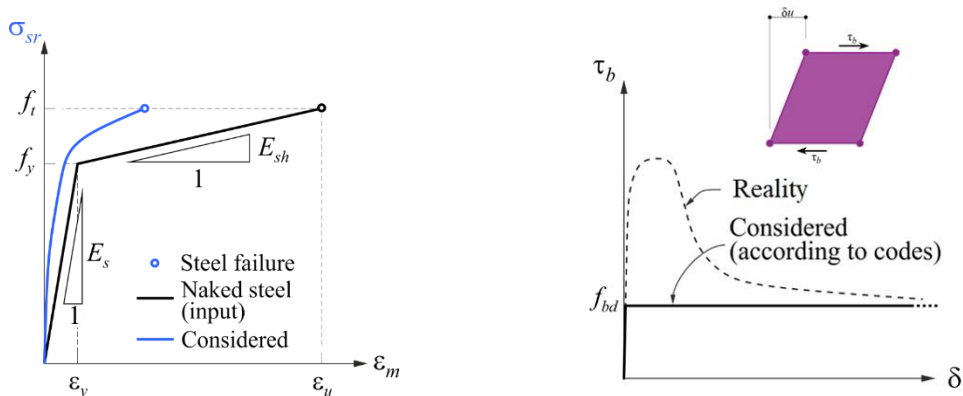


图4 钢筋的应力-应变曲线(左)和粘结单元的应力-滑移曲线(右)

3 IDEA Detail 功能概述

IDEA StatiCa Detail（以下简称“IDEA Detail”）是一款针对混凝土结构细部分析与设计的有限元软件，其理论基础即前文介绍的协调应力场法。如图 5 所示，IDEA Detail 操作界面可分为主窗口、导航区、校核结果等等，用户也可以根据需要进行关闭窗口或调整窗口位置。在导航区中可以看到，IDEA Detail 主要工作流程可分为建模、加载、配筋和校核。

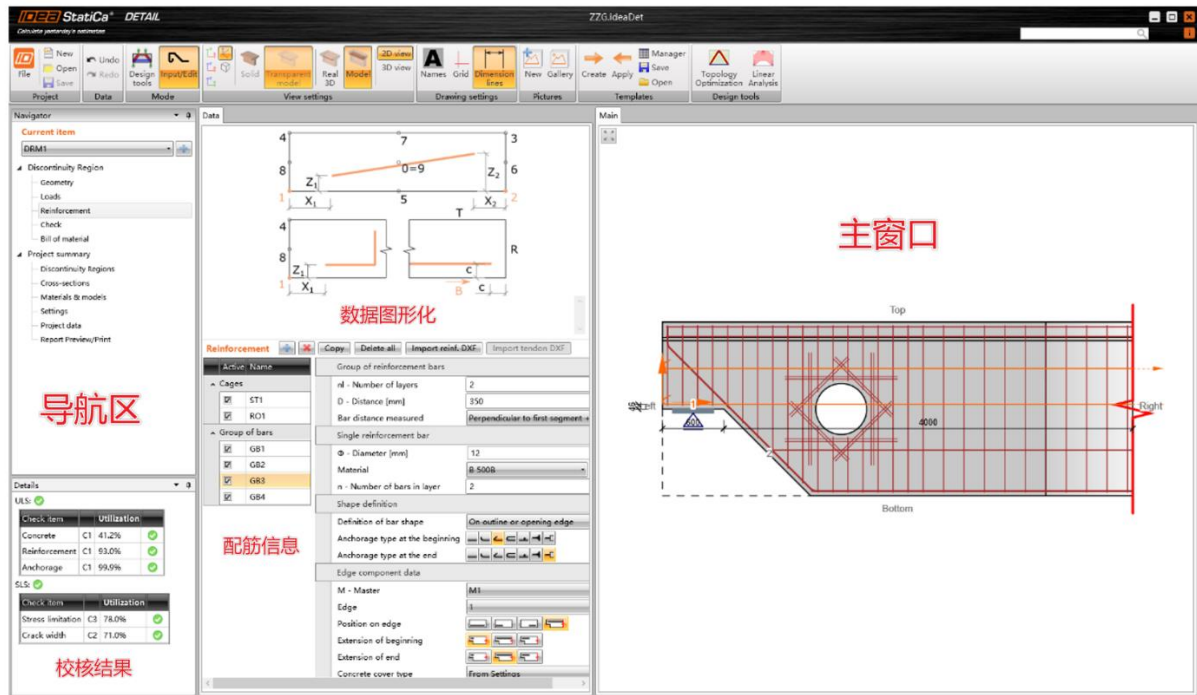


图 5 IDEA StatiCa Detail 操作界面

3.1 建模

IDEA Detail 模板库包括常见的墙、梁、节点以及横板四大类，但用户也可以根据自定义任意的混凝土细部模型。以图 6 所示的混凝土梁为例，用户可以选择变截面梁，也可以在梁腹板开洞；支座形式可以选择点支座、分布支座或预埋吊环；荷载传递方式也包括承压板、局部加载或吊环荷载等。需要注意的是，IDEA Detail 只能做二维平面分析而非三维空间分析，如果实际的混凝土结构具有明显的三维受力特点，用户应考虑采用其它通用的有限元软件，如 ANSYS、ABAQUS 等等。

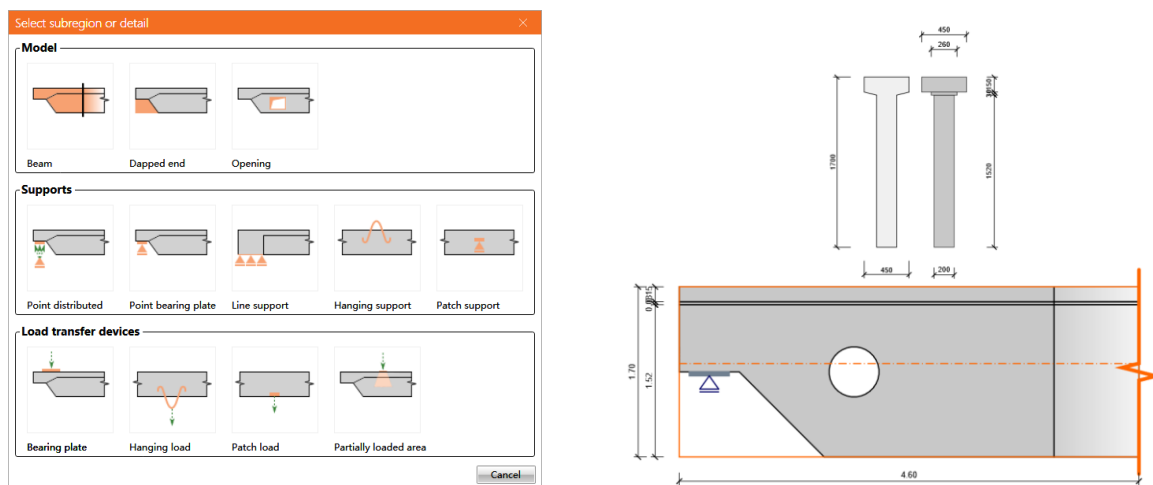


图 6 IDEA StatiCa Detail 几何建模

3.2 加载

IDEA Detail 中荷载包含构件断面处的内力和非构件区域的外荷载，内力包括平面内的弯矩、剪力和轴力，外荷载包括点荷载、线荷载、面荷载和自重荷载，如图 7 所示。IDEA Detail 自动考虑外荷载与构件内力的平衡条件，同时显示各个组成部分的内力图，便于用户形象直观地了解混凝土结构的细部受力状态。如图 7（左）所示，在均布线荷载和截面内内力分量共同作用下，蓝色为局部构件的剪力图，粉色为局部构件的弯矩图。

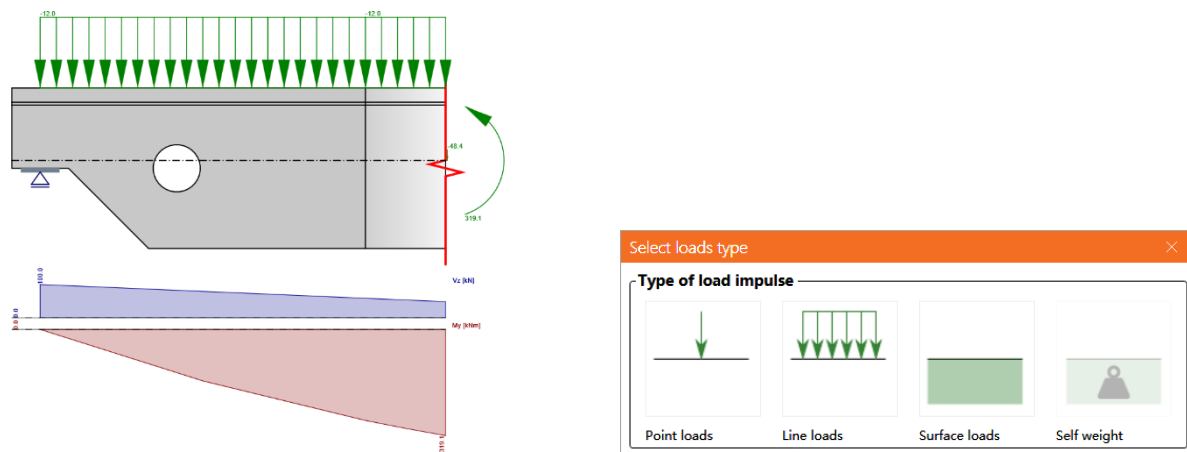


图 7 IDEA StatiCa Detail 施加荷载

3.3 配筋

为了辅助用户布置钢筋，IDEA Detail 提供线性分析和拓扑优化两种辅助配筋工具。线性分析只计算采用线弹性本构模型的混凝土部分，忽略钢筋以及钢筋和混凝土之间的粘结和锚固，以云图方式显示的应力流可以帮助用户快速掌握混凝土受拉和受压区域的分布情况，如图 8（左）所示。拓扑优化用于计算在特定区域内混凝土材料的最优分布，优化结果代表荷载作用下的最小总应变能和最大结构刚度。如图 8（右）所示，拓扑优化的形状类似于拉杆和压杆组成的桁架，用户可以以此为基础布置钢筋。

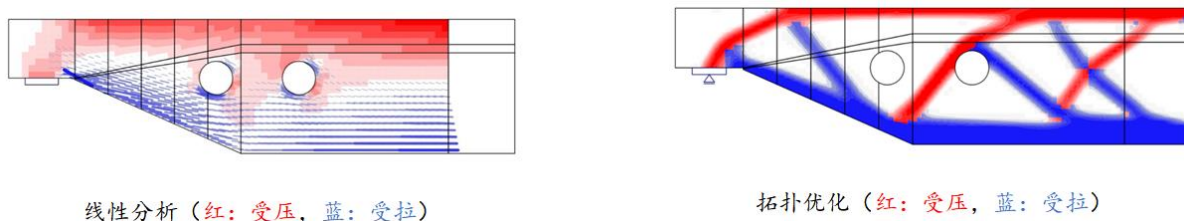


图 8 IDEA StatiCa Detail 辅助配筋工具

混凝土结构细部的配筋形式多样，IDEA Detail 除提供常规的纵筋、箍筋和弯起钢筋外，还可以快速布置方孔或圆孔附近的钢筋网，同时在几何模型中标识钢筋的直径和数量，如图 9 所示。

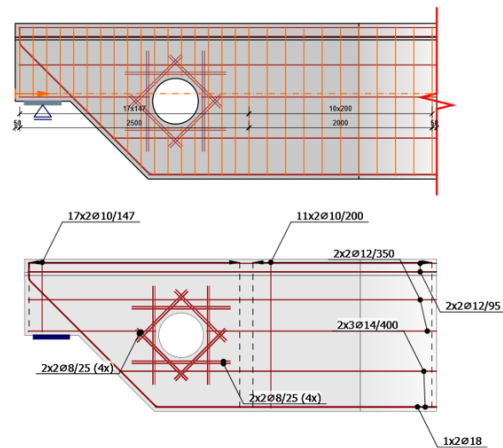
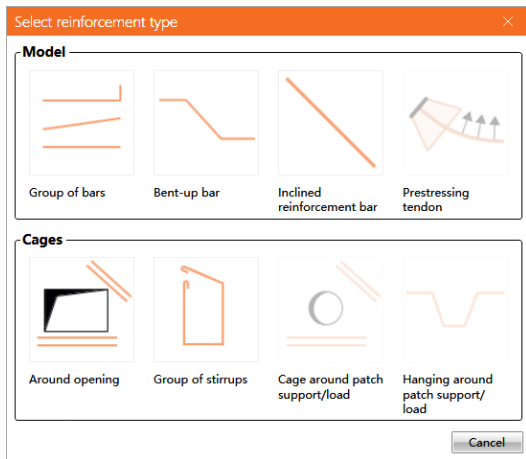


图 9 IDEA StatiCa Detail 布置钢筋

3.4 校核

目前，IDEA Detail 只支持基于欧标和美标的校核，后续也会加入基于中国规范的校核。如前文所述，IDEA Detail 采用协调应力法完成有限元分析后，既可以校核承载能力极限状态下的混凝土强度、钢筋强度和钢筋锚固，也可以校核正常使用极限状态下的裂缝宽度、挠度和应力，如图 10 所示。

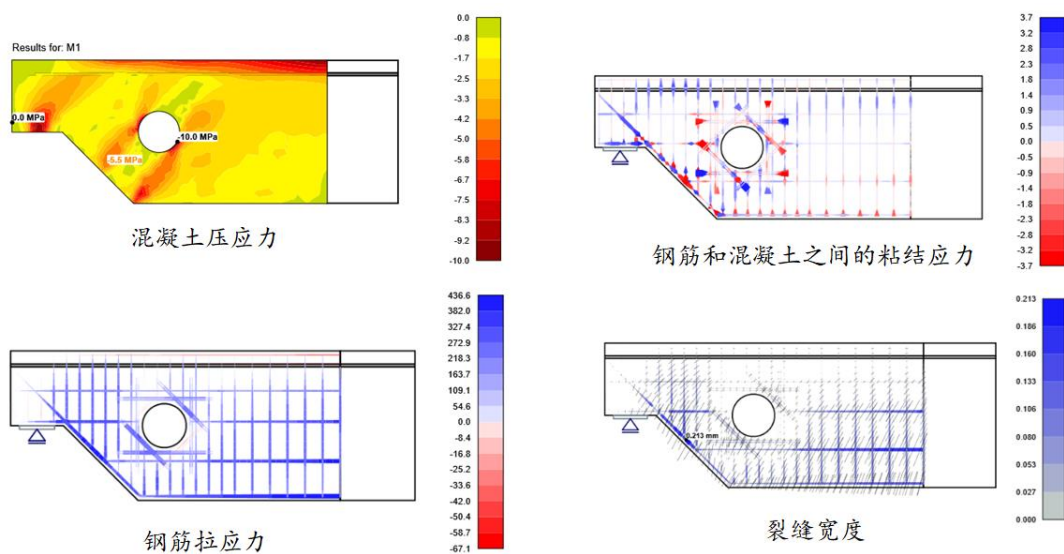


图 10 IDEA StatiCa Detail 计算结果

4 总结

在混凝土结构工程中，非连续区域（也称 D 区）的细部分析与设计一直是广大工程师的痛点和难点。虽然理论上可以采用拉压杆模型做承载力校核，但实际应用并不多，主要还是门槛高、难度大，也没有成熟的商业化软件。协调应力场法是处理混凝土细部分析与设计的又一利器，虽然不适合手算，但专业的混凝土结构设计软件 IDEA Detail 可以采用该方法，帮助工程师完成混凝土结构的细部分析与设计。

鉴于篇幅有限，本文无法更加全面具体地介绍 IDEA Detail 的各个功能细节和应用技巧，感兴趣的读者可以登录筑信达网站 (www.cisec.cn) 或拨打筑信达技术热线了解更多产品功能，也欢迎申请试用软件并提供反馈意见。