

第3章 设计方法

原文: [Design of buildings to resist progressive collapse, UFC 4-023-03, 2005. Chapter 3](#)

结构抗连续倒塌设计采用两种设计/分析方法: 拉结强度法 (TF) 和拆除构件法 (AP)。本章阐述了这两种方法的总体设计流程。

3-1 拉结强度法

通过拉结对结构进行捆绑, 可提供结构的连续性、延性以及多荷载传递路径。通过按照通常的设计方法设计的、承受标准荷载值的现有构件和节点来实现拉结。

根据结构类型的不同, 拉结可分为内部拉结、周边拉结、对边柱/角柱/墙的拉结。对于柱和承重墙还需提供竖向拉结。图 3-1 描述了框架结构中的拉结情况。注意: 本文所描述的拉结与美国混凝土协会编制的 2002 版《混凝土结构设计要求》(ACI318-02) 中定义的钢筋混凝土结构中的“钢筋拉结”含义不同。

周边拉结沿结构几何平面的传力路径应保持连续, 内部拉结则应从结构的一边至另一边保持连续。在某个具体的传力路径中, 不同的结构构件之间如果已有可靠连接, 均必须用于提供要求的拉结强度; 例如, 如果结构内部构件 (主梁、次梁或柱) 之间的连接具有足够强度, 则应通过该轴线上一系列的梁来提供拉结。同样的, 从基础至结构顶部均应保证足够的竖向拉结。对边柱或墙的水平拉结可不连续, 但它们必须可靠的嵌固于结构。对于由若干子结构组成的结构, 或者与主结构相分离的独立结构, 必须对每个子结构或者独立结构提供拉结。注意: 所有的拉结路径必须成几何直线, 任何在门窗等类似开洞处的转折均是不允许的。

3-1.1 拉结的荷载抗力因素设计法

按照荷载抗力因素设计法 (LFRD), 结构构件和节点提供的拉结设计强度可表示为强度折减系数 Φ 和材料名义强度 R_n 的乘积。其中 R_n 按照合适的材料规范的要求和假定取值, 并考虑材料增强系数 Ω 。(对于木结构还需考虑时间影响系数 λ)。按照 LFRD 法, 拉结强度的设计值不应小于要求的强度:

$$\text{设计强度} = \Phi R_n \geq \text{要求强度} \quad (3-1)$$

其中: Φ = 材料强度折减系数,

R_n = 材料的名义强度，按照合适的材料规范取值，并考虑材料增强系数 Ω 。（考虑材料增强系数 Ω ）。

基于本 UFC 的用途，所有材料折减系数 Φ 均按照合适的材料规范取值。

3-1.2 要求拉结强度

不同类型材料的水平和竖向拉结强度在第 4 至 8 章中有具体规定。用于提供拉结的结构构件不仅应具有足够的拉结强度，还应保证可靠连接使得拉结可以充分分布在结构的其它部分。

设计拉结强度可通过与结构构件承受的活载、恒载、风载等荷载值无关的公式确定，但该值必须大于要求的拉结强度。

某些拉结强度是基于恒载和活载的。在一些情况下，分布于结构同一层平面的荷载可能不同，如走廊荷载和房间荷载，应取作用于该层的总荷载对该层总楼面面积的平均值。当沿拉结方向各拉结跨度不同，则应取最大跨度计算该连续拉结的要求强度值。

3-1.3 不满足拉结强度要求的结构构件和节点

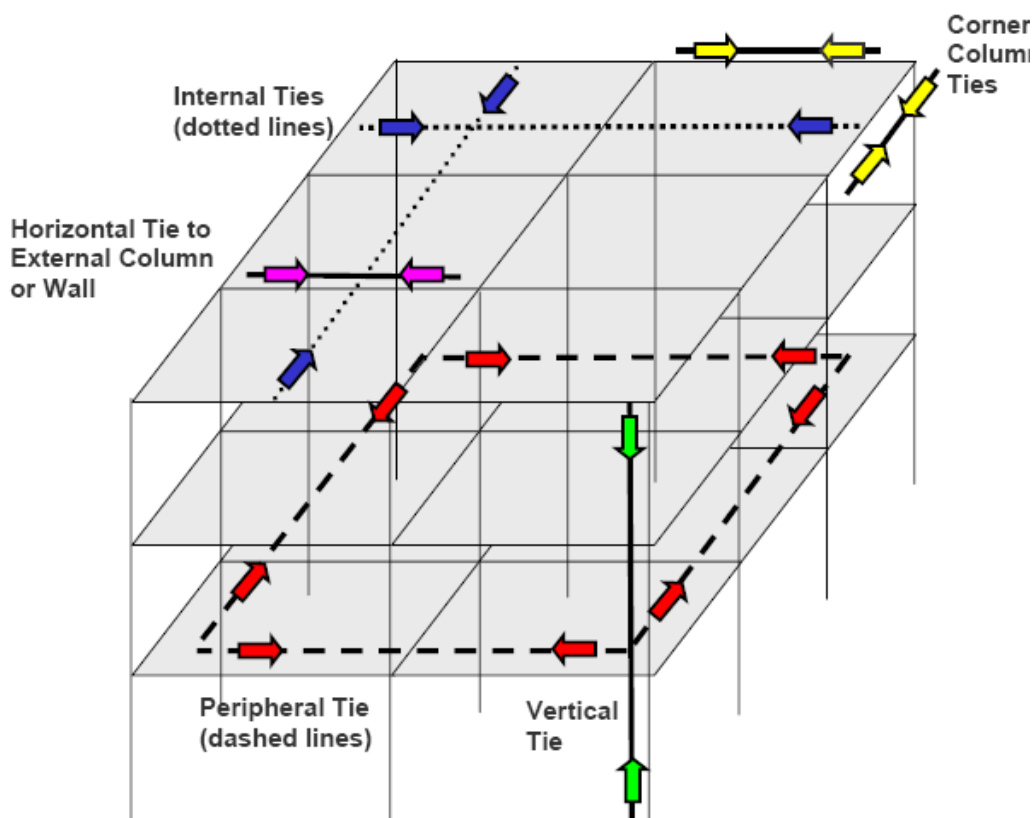
如果所有的结构构件和节点均可提供要求的拉结强度，则拉结强度法设计要求得到满足。如果结构构件或节点的竖向拉结强度不足，设计者必须采用下列两者方法之一：1) 重新设计以满足要求；2) 采用拆除构件法设计使得结构能跨越该构件而不坍塌。注意拆除构件法不能应用于水平拉结强度不满足要求的构件和节点，在这种情况下，设计者应重新设计构件和节点使得水平拉结强度满足要求。

3-2 拆除构件法

拆除构件法应用于以下两种情况：1) 如果结构构件或节点的竖向拉结强度不足，设计者可采用拆除构件法设计，使得该构件破坏后结构能跨越该构件而不坍塌。2) 对于中 (MLOP)、高(HLOP)保护等级的，应采用拆除构件法，按照第 3-2.3 部分的方法拆除某承重构件进行分析。

对于 MLOP 和 LLOP 结构，所有拆除构件分析均需进行同行评审。评审者必须为具有资格的第三方机构，并事先取得业主的批准。

Figure 3-1 Schematic of Tie Forces in a Frame Structure



注意：外围柱、外围墙和角柱中的拉结可部分或完全的通过相同的构件提供，以满足内部和周边拉结强度的要求。

3-2.1 总则

该方法遵循 LRFD 法则 (ASCE 7-02)，对于意外荷载采用荷载组合系数，对定义的设计强度采用抗力系数。

建议采用 3 维模型考虑 3 维效应以避免过于保守的设计结果。2 维模型可应用于 3 维效应可被理想平面化的情况。

可采用三种分析方法：线性静力分析、非线性静力分析以及非线性动力分析。这三种方法将在第 3-2.8 到 3-2.10 中详细描述。

- 线性静力分析：几何关系建立在小变形的基础上，材料被认为是线弹性的（也考虑塑性铰的插入，见 3-2.7 和 3-2.8）。拆除某根承重构件后，所有荷载一次性施加。
- 非线性静力分析：考虑材料和几何非线性。拆除某根承重构件后，从零

开始逐步加载直至达到最大荷载值。

- 非线性动力分析：考虑材料和几何非线性。应在结构最大荷载状态下迅速拆除某根承重构件并进行动力分析。

3-2.2 拆除构件法的荷载抗力因素设计

按照荷载抗力因素设计法（LFRD），结构构件和节点提供的抗弯、抗拉/压、抗剪和抗扭强度可表示为强度折减系数 Φ 和材料名义强度 R_n 的乘积。其中 R_n 按照合适的材料规范的要求和假定取值，并考虑材料增强系数 Ω 。对于木结构还需考虑时间影响系数 λ ；见第 7.1 节。

$$\text{设计强度} = \Phi R_n \geq \text{要求强度}$$

其中： Φ = 材料强度折减系数，

R_n = 材料的名义强度，按照合适的材料规范取值，并考虑材料增强系数 Ω 。（考虑材料增强系数 Ω ）。

按照 LFRD 方法，设计强度必须大于由计算荷载引起的内力值，即要求强度。

3-2.3 构件的拆除

在 AP 模型中，承重构件在以下两种情况被拆除：1) 如果结构构件或节点的竖向拉结强度不足，该构件被拆除；2) 对于中（MLOP）、高（HLOP）保护等级的，按照规定的构件的拆除位置和尺寸拆除构件，使得结构具有足够的抗弯强度能跨越该构件而不坍塌。拆除构件的类型、位置和尺寸在下文中将有详细规定。

3-2.3.1 不具有足够竖向拉结强度的结构

拆除构件的类型、位置和尺寸取决于结构材料类型，在 4 到 8 章中有具体规定。

3-2.3.2 MLOP 和 HLOP 框架及平板结构

对于中等及高等保护等级的结构，应进行多次拆除构件分析。承重构件的拆除位置在下面的子章节中有具体规定。

3-2.3.2.1 外围柱的拆除

至少应该拆除一根外围柱的位置包括：结构短边中间处、长边中间处和角部，如图 3-2 所示。另外还包括建筑物几何尺寸发生明显变化处，如跨度突变处、凹角处、相邻柱所承受的荷载较轻处、开间具有不同尺寸处以及方向和立面不同的

结构构件。根据工程经验来识别这些典型的位置。

在每个规定的拆除位置，对每层进行一次 AP 分析，每次拆除一根柱。例如，如果某根角部柱规定被拆除，则对首层该位置角部柱的拆除进行一次 AP 分析；然后对第二层该位置角部柱的拆除进行一次 AP 分析；然后对第三层该位置的角部柱的拆除进行一次 AP 分析；依次进行直至顶层。如果设计人员认为相似楼层中（如 4 到 8 层）柱的移除结构响应类似，则 AP 分析可只进行一次，但设计者必须用文字描述作此判断的原因。

3-2.3.2.2 内部柱的拆除

对于结构的地下停车场和首层难以进行安全控制的区域，拆除结构短边中间处、长边中间处和无法控制区域角部的内部柱，如图 3-3 所示。拆除柱的长度从地下停车场或者首层无法控制区域的地面至下一层（即相应的层高）。设计者根据工程经验来判断其他还须拆除的位于无法进行安全控制的公共区域的柱。对于每个规定的拆除位置，只对地下停车场和首层进行 AP 分析，而无需对结构的其他楼层进行分析。

3-2.3.2.3 节点处水平构件的连续性

无论是内部柱还是外围柱的拆除，必须保证与柱相交节点处水平构件的连续性，如图 3-4。

Figure 3-2 Location of External Column Removal for MLOP and HLOP Structures

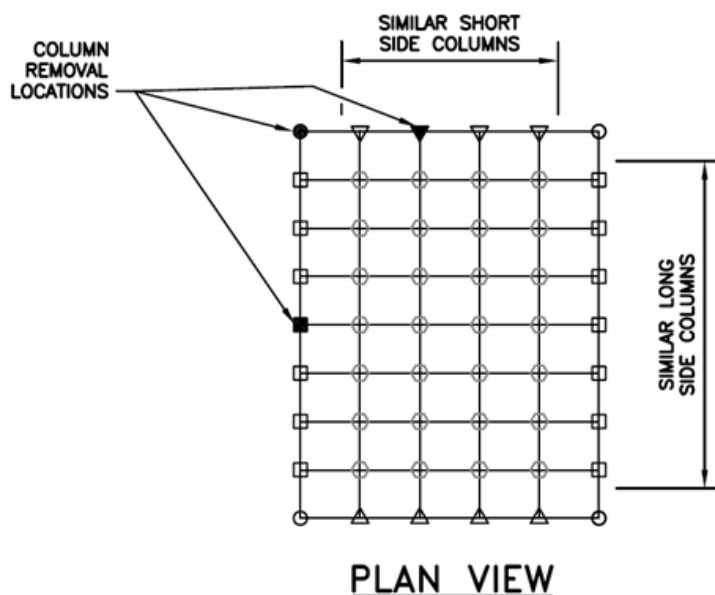


Figure 3-3 Location of Internal Column Removal for MLOP and HLOP Structures

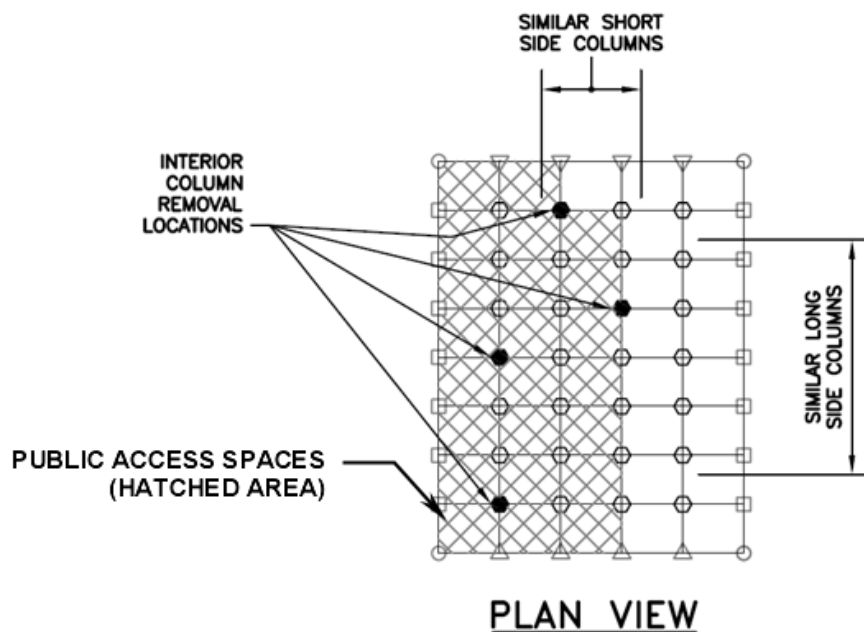
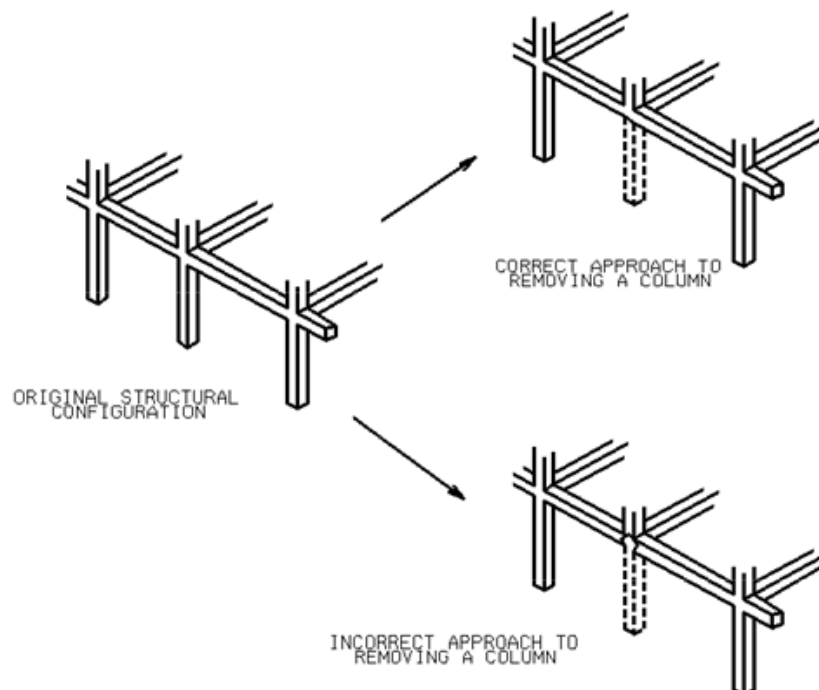


Figure 3-4 Removal of Column From Alternate Path Model



3-2.3.3 MLOP 和 HLOP 承重墙结构

3-2.3.3.1 外围承重墙的拆除

至少应该拆除外墙的位置包括：结构短边中间处、长边中间处和角部，如图 3-2 所示。另外还包括建筑物几何尺寸发生明显变化处，如跨度突变处、凹角处、相邻墙所承受的荷载较轻处、开间具有不同尺寸处以及方向和立面不同的结构构件。根据工程经验来识别这些典型的位置。应拆除墙的长度见 3-2.3.3.3。如果可能引起更严重的破坏，设计者必须根据墙的最大高度调整拆除位置。

在每个规定的拆除位置，对每层进行一次 AP 分析，每次拆除一段墙。例如，如果某段短边墙规定被拆除，则对首层该位置墙的拆除进行一次 AP 分析；然后对第二层该位置墙的拆除进行一次 AP 分析；然后对第三层该位置的墙的拆除进行一次 AP 分析；依次进行直至顶层。如果设计人员认为相似楼层中（如 4 到 8 层）墙的移除结构响应类似，则 AP 分析可只进行一次，但设计者必须用文字描述作此判断的原因。

3-2.3.3.2 内部承重墙的拆除

对于结构的地下停车场和首层难以进行安全控制的区域，拆除结构短边中间处、长边中间处和无法控制区域角部的内部承重墙，如图 3-3 所示。拆除墙的高度从地下停车场或者首层无法控制区域的地面至下一层（即相应的层高）。设计者根据工程经验来判断其他还须拆除的位于无法进行安全控制的公共区域的承重墙。对于每个规定的拆除位置，只对地下停车场和首层进行 AP 分析，而无需对结构的其他楼层进行分析。应拆除墙的长度见 3-2.3.3.3。如果可能引起更严重的破坏，设计者必须根据墙的最大高度调整拆除位置。

3-2.3.3.3 承重墙的拆除长度

对于建筑物非角段区域取两倍墙高，但不应小于开间宽度。对建筑物角部两个方向分别取一倍墙高，且不小于开间宽度。对于不是承重墙但与内部承重墙交接的外围墙段，每个方向分别取一倍墙高，且不小于开间宽度。对于外墙不是承重墙但与内承重墙相交的位置，如图 3-5 所示，外墙的拆除长度等于一倍墙高。

Figure 3-5 Location of External Load-Bearing Wall Removal for MLOP and HLOP Structures

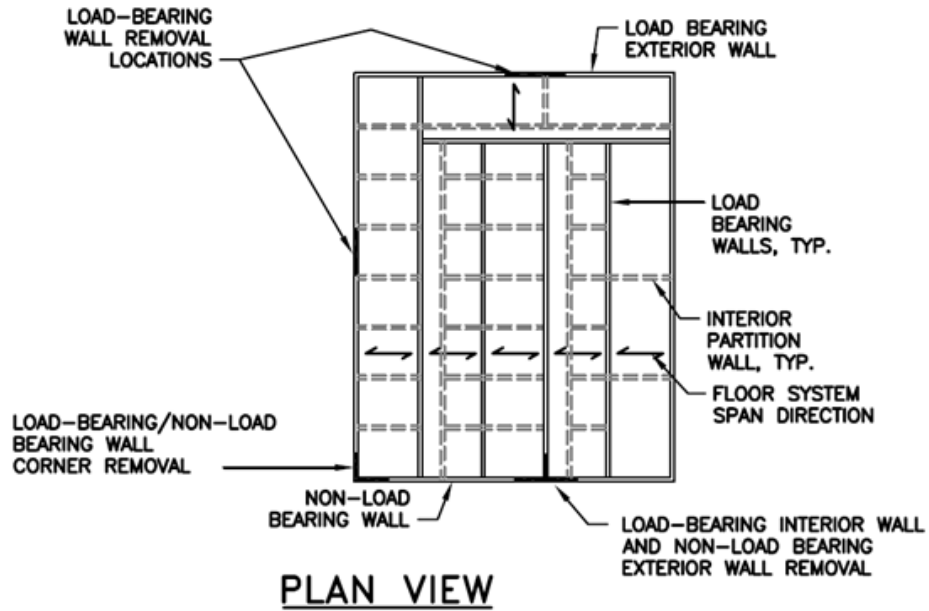
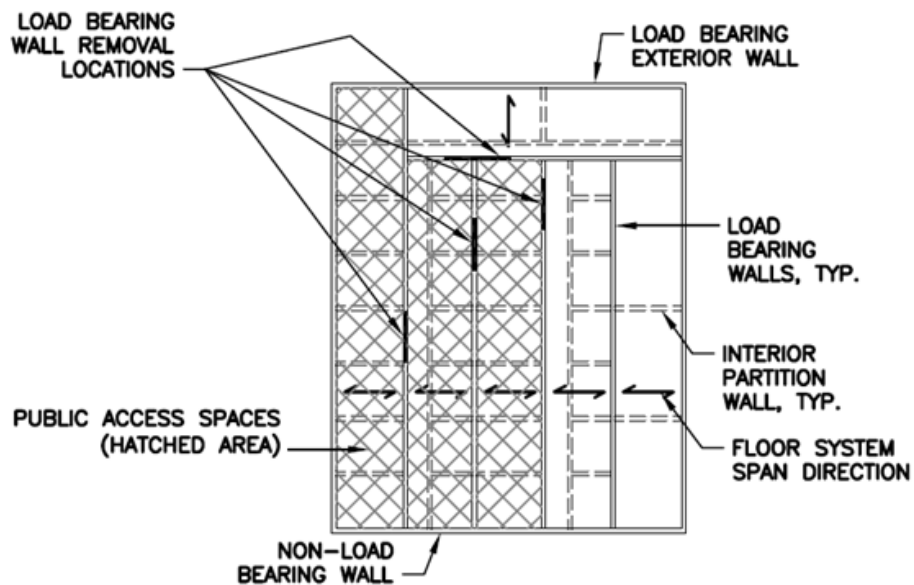


Figure 3-6 Location of Internal Load-Bearing Wall Removal for MLOP and HLOP Structures



3-2.4 拆除构件法的荷载计算

3-2.4.1 非线性动力分析荷载组合

对于所有结构类型的非线性动力分析，对整个结构施加如下荷载组合：

$$(0.9 \text{ or } 1.2)D + (0.5L \text{ or } 0.2S) + 0.2W$$

其中，D = 恒荷载 (kN/m² 或者 lb/ft²)

L = 活荷载 (kN/m² 或者 lb/ft²)

S = 雪荷载 (kN/m² 或者 lb/ft²)

W = 风荷载，见 ASCE 7-02 对主要抗风体系的规定
(kN/m² 或者 lb/ft²)

3-2.4.2 线性/非线性静力分析荷载组合

对于线性/非线性静力分析，对结构中拆除构件相连的楼板以及拆除构件以上所有楼板施加如下荷载组合：

$$2.0[(0.9 \text{ or } 1.2)D + (0.5L \text{ or } 0.2S)] + 0.2W$$

对于结构的其他部分采用 3-2.4.1 中的荷载组合。

对于承重墙结构，相邻开间指结构平面上移除墙与最近相邻墙之间的部分。

3-2.4.3 涉及到失效构件的荷载计算

在后文中可以看到，结构构件和节点的内力和变形可能超过容许准则，此时该构件或节点被认为失效并应从结构中移除。

对于非线性动力分析，考虑冲击作用，将失效构件所承担的荷载乘以放大系数 2.0 并迅速施加于该失效构件下部的结构上，然后继续进行分析。荷载施加的面积不应大于失效构件所支承区域的面积。

对于线性/非线性静力分析，如果失效构件所承担的荷载已经乘以放大系数 2.0，则将将此荷载施加于该失效构件下的结构上，然后继续进行分析；如果失效构件所承担的荷载未经放大，则将将此荷载乘以放大系数 2.0 并施加于该失效构件下部的结构上，在进行分析。荷载施加的面积不应大于失效构件所支承区域的面积。

Figure 3-7. Examples of Linear and Nonlinear Static Load Locations for External and Internal Column Removal (Left Side Demonstrates External Column Removal; Right Side Shows Internal Column Removal)

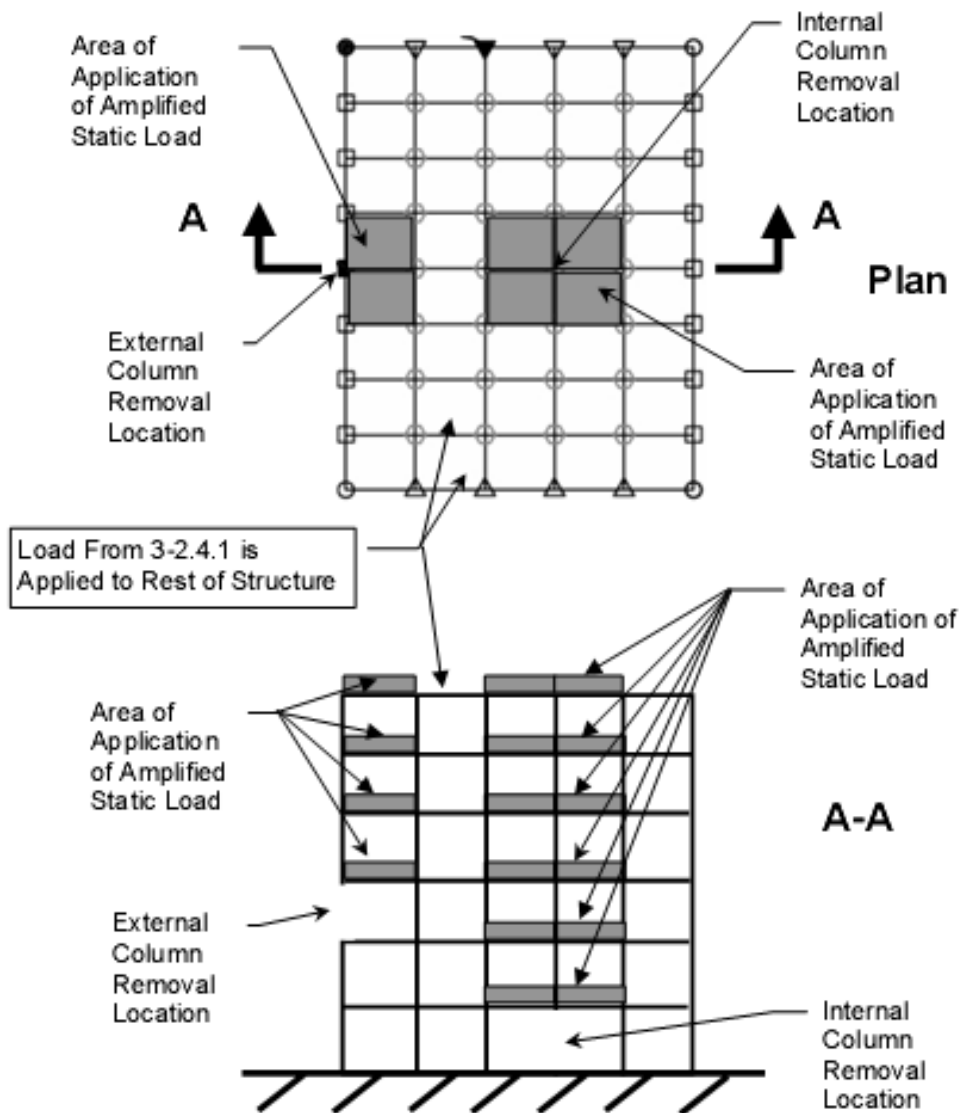
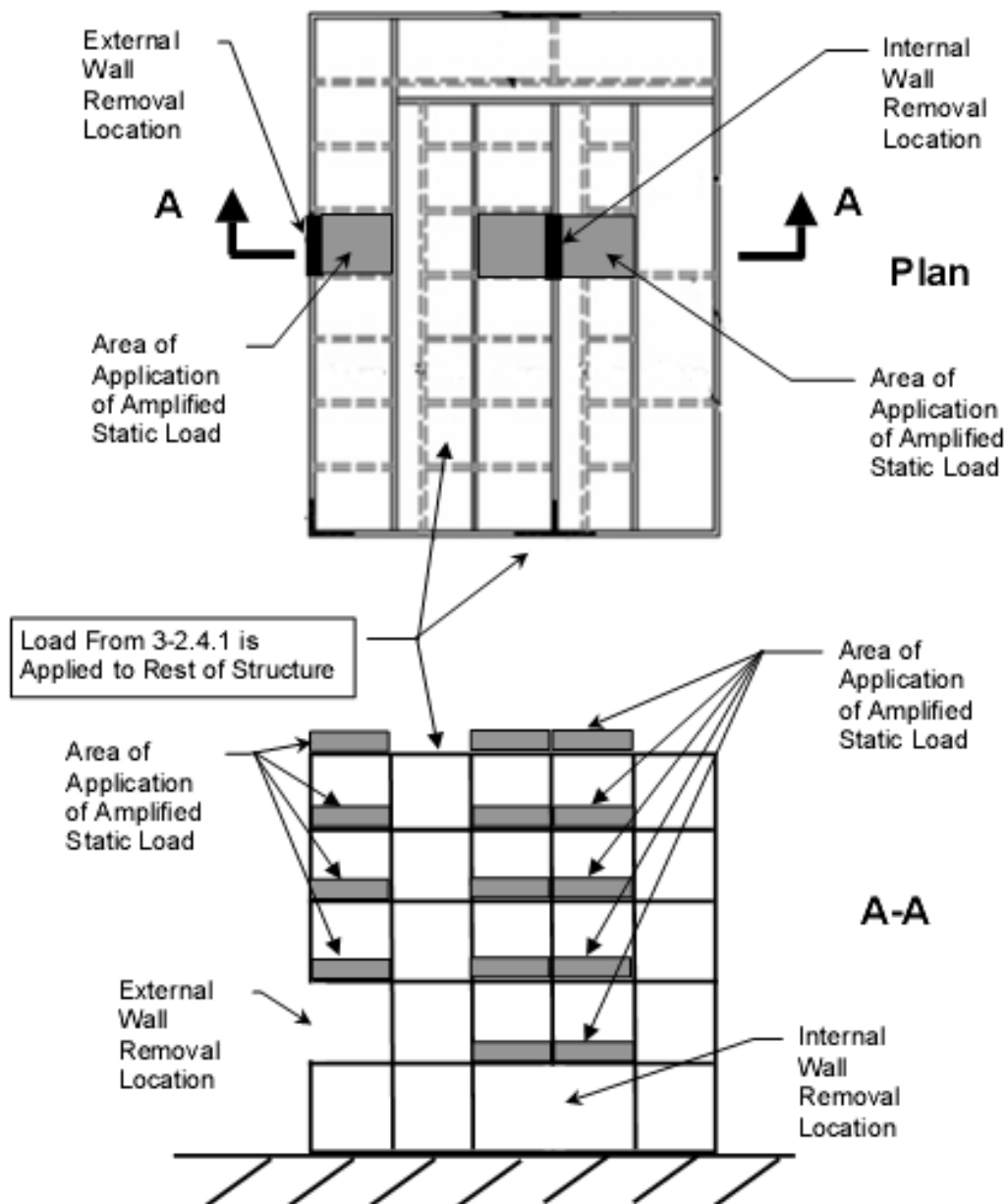


Figure 3-8. Examples of Linear and Nonlinear Static Load Locations for External and Internal Load-Bearing Wall Removal (Left Side Demonstrates External Column Removal; Right Side Shows Internal Column Removal)



3-2.5 材料特性

材料特性，如屈服应力、失效力等，必须符合相关材料规范的规定。对于某些结构类型可考虑材料增强系数 Ω 或者时间影响系数 λ ，各种材料对应的名义强度增强相关系数在第 4 到 8 章中有详细规定。

3-2.6 结构破坏限制

在 AP 分析中，无论采用哪种分析方法（线性静力分析、非线性静力分析以及非线性动力分析），设计者均须计算分析过程中集分析结束后的破坏限制。

3-2.6.1 对于外围柱/承重墙拆除的破坏限制

对于外围墙/柱的拆除，破坏范围限制要求为，直接位于拆除构件上部的楼板的坍塌面积不得大于 70m^2 (750ft^2) 和 15% 楼板总面积的较小值，且直接额外位于拆除构件下方的楼板不能倒塌。另外任何与拆除构件无直接相连的结构部分都不应坍塌。

3-2.6.2 对于内部柱/承重墙拆除的破坏限制

对于内部墙/柱的拆除，破坏范围限制要求为，直接位于拆除构件上部的楼板的坍塌面积不得大于 140m^2 (1500ft^2) 和 30% 楼板总面积的较小值，且直接额外位于拆除构件下方的楼板不能倒塌。另外任何与拆除构件无直接相连的结构部分都不应坍塌。

3-2.7 容许准则

AP 法的容许准则包括强度要求和变形限制。由拆除构件法计算得到的构件和节点的弯矩、轴力以及剪力为要求强度，见式 3-2。它们必须与该构件或节点的设计强度进行比较，如表 3-1 所示。另外，模型的挠度和转角也必须满足各种材料的变形限制。如果任何构件或节点违背了容许准则（强度或变形），必须重新进行设计以满足要求。在表 3-1 及后面的子章节中将详细讨论。

3-2.7.1 弯矩

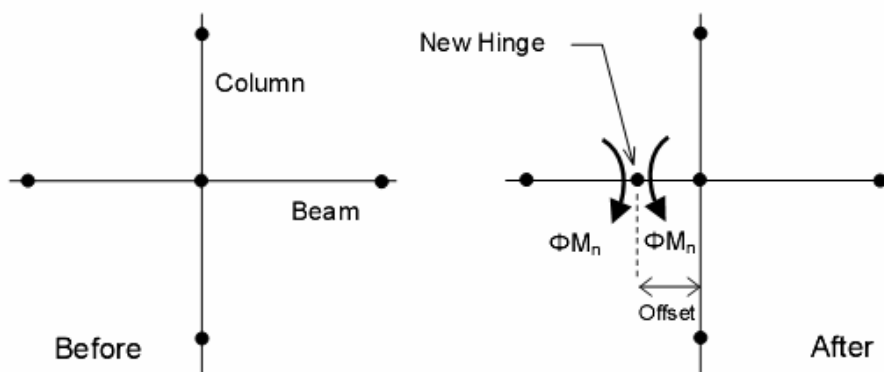
弯矩的容许准则基于结构构件的抗弯强度设计值，包括强度折减系数 Φ 和材料增强系数 Ω 。计算抗弯强度设计值时，须考虑对应于不同材料可能存在的折

减抗弯强度的因素，如钢构件的横向支撑、混凝土中钢筋的用量等。

如果某个构件的弯曲应力（要求的弯曲强度）超过了该构件的设计强度，则必须拆除该构件或者对该构件的受力模型进行修改。对于线性静力模型，如果构件某点屈服后仍能承受一定弯矩并继续发生变形，则需插入塑性铰。在屈服点插入一个不连续的铰和两个恒定弯矩，如图 3-9 所示。通过工程分析和判断或者对应于不同结构类型的指南来确定塑性铰的位置。对于非线性静力及动力分析，所采用的软件必须能提供应力达到屈服强度后构件的非线性受力状态分析。

在模型中（包括线弹性静力模型、非线性静力模型和非线性动力模型），当结构构件达到峰值弯矩而发生破坏，则拆除该构件并按照 3-2.4.3 所述方法重新分布荷载。

Figure 3-9 Inserting Hinge and Moments into Linear Static Alternate Path Model



3-2.7.2 轴力和弯矩组合

受弯矩和轴力共同作用构件的破坏准则基于相关材料的设计规范。若破坏由弯曲应力控制，则构件按照 3-2.7.1 所述进行设计；若破坏由轴力控制，则构件达到屈曲强度后拆除该构件，并按照 3-2.4.3 所述方法重新分布荷载。

3-2.7.3 剪力

对于任何结构类型，若抗剪设计强度不满足要求，则拆除该构件，并按照 3-2.4.3 所述方法重新分布荷载，然后继续分析。

表 3-1 （略）

3-2.7.4 节点

对于任何节点失效模式，若设计荷载被超越，则拆除该节点；若某构件两端节点均失效，则拆除该构件，并按照 3-2.4.3 所述方法重新分布荷载。

在大变形分析中，采用相关材料的设计规范提供的规定或其它参考资料来确定要求强度。在某些设计规范中有抗震设计的规定，包括节点细部设计；在节点设计中可适当参考这些信息。

3-2.7.5 变形限制

结构、构件、节点的变形限制以挠度和转角的形式表示。过度的变形表示该构件无法继续承受荷载。结构、构件、节点的转角计算见图 3-10 和图 3-11。

如果某构件或节点的变形已经超过变形限制，则必须拆除它。变形限制的具体取值取决于结构及材料的类型（见 4 到 8 章）。

Figure 3-10 Measurement of Hinge Rotation θ After Formation of Plastic Hinges

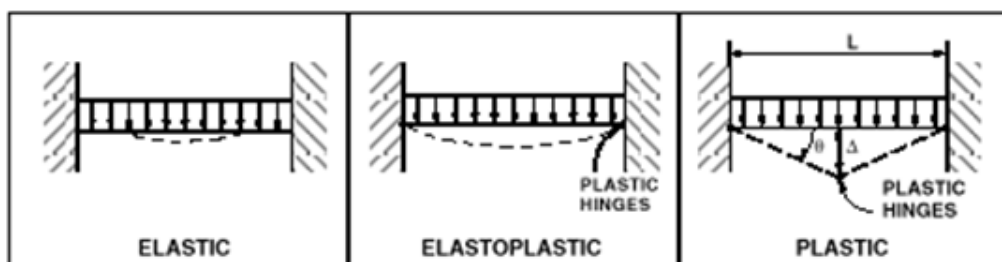
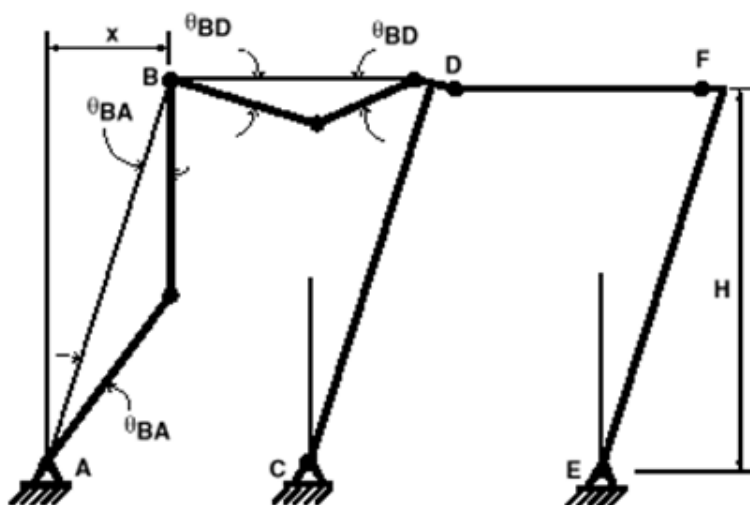


Figure 3-11 Sidesway and Member End Rotations (θ) for Frames



3-2.8 线性静力分析步骤

按照以下步骤进行线性静力分析。注意分析需考虑二阶效应或 $P-\Delta$ 效应。

1. 对于不满足竖向拉结强度要求的结构承重构件,按照 4 到 8 章中相关材料的要求拆除该构件(见 3-2.3.1)。对于 MLOP 和 HLOP 结构,按照 3-2.3.2 和 3-2.3.3 所述方法拆除柱或承重墙。
2. 按照 3-2.4.2 所述方法施加荷载。
3. 分析结束后,将构件和节点的内力和变形与该构件的容许准则进行比较(见表 3-1)。可借助建筑设计软件与容许准则进行比较,确认所有的相关材料规程均得到满足,包括支撑、密实度、弯矩-轴力组合的要求等。
4. 如果所有结构构件和节点均满足容许准则,则分析结束且该结构满足抗连续倒塌设计要求;若有任何构件或节点不满足容许准则,则继续下面的分析步骤:
 - A. 按照表 3-1 修改模型的几何或材料特性(即拆除构件或者设置塑性铰);
 - B. 拆除失效构件并按照 3-2.4.3 所述方法重新分布荷载;
 - C. 从未加载时的初始状态重新分析修改后的模型;
 - D. 重分析结束后,评估结构的破坏状况并与 3-2.6 节的破坏限制进行比较。如果破坏状况超过破坏限制,则需要对结构进行重新设计和分析,并从步骤 1 开始重新分析;如果破坏状况没有超限,则检验结构所有构件和节点的内力和变形是否满足容许准则;
 - E. 若在重分析中存在任何构件违背了容许准则,重复 A~E 步骤,直到破坏不超限而且满足容许准则;若超过了破坏限制,则需要对结构进行重新设计,并从步骤 1 开始重新分析;若同时满足破坏限制和容许准则,则设计是满足要求的。

3-2.9 非线性静力分析步骤

按照以下步骤进行非线性静力分析。

1. 对于不满足竖向拉结强度要求的结构承重构件,按照 4 到 8 章中相关材料的要求拆除该构件(见 3-2.3.1)。对于 MLOP 和 HLOP 结构,按照 3-2.3.2 和 3-2.3.3 所述方法拆除柱或承重墙。
2. 对结构输入荷载时程,荷载从零开始,渐增至 3-2.4.2 所述最终值,至

少分十步加载至最大值；分析所用软件必须能够施加渐增荷载，并且在施加下一阶段荷载前能够迭代计算达到收敛。

3. 在每一步荷载状态下，将构件和节点的内力和变形与该构件的容许准则进行比较（见表 3-1）。可借助建筑设计软件与容许准则进行比较，确认所有的相关材料规程均得到满足，包括支撑、密实度、弯矩-轴力组合的要求等。
4. 如果在整个加载过程中所有结构构件和节点均满足容许准则，则该结构满足抗连续倒塌设计要求；若有任何构件或节点不满足容许准则，则继续下面的分析步骤：
 - A. 在加载过程中如果结构构件和节点不满足容许准则，停止分析并按照表 3-1 拆除该构件或节点；
 - B. 拆除失效构件并按照 3-2.4.3 所述方法重新分布荷载；
 - C. 模型修改后，从分析停止处开始继续进行计算，逐步加载直至达到最终值或另一构件或节点违背容许准则；
 - D. 在每个计算停止的点检查结构的破坏状况，与 3-2.6 中的破坏限制进行比较，如果破坏超限，则对结构进行重新设计，并从步骤 1 开始重新分析；
 - E. 若加载结束后破坏限制和容许准则均得到满足，则设计是满足要求的。如果满足破坏限制要求，但在重分析过程中存在任何构件违背了容许准则，重复 A~E 步骤，直至加载至最终值或者超过破坏限制。

3-2.10 非线性动力分析步骤

按照以下步骤进行非线性动力分析。

1. 按理想方式在整个模型中分布结构质量，除存在大型机械设备、泵或其他类似的因素，不允许集中质量存在。对于梁和柱，质量沿长度均匀分布；对于楼板，质量按单位面积均匀分布；如果结构的某部分为实体单元，则结构质量按单位体积均匀分布。
2. 拆除承重构件前使结构在荷载作用下达到静力平衡状态，荷载施加方法如 3-2.4.1 所述。在重力荷载下达到平衡的途径因分析技术而异。
3. 模型建立后，迅速拆除承重构件。对于不满足竖向拉结强度要求的结构承重构件，按照 4 到 8 章中相关材料的要求拆除该构件（见 3-2.3.1）。对于 MLOP 和 HLOP 结构，按照 3-2.3.2 和 3-2.3.3 所述方法拆除柱或承重墙。

4. 进行动力分析直至结构达到一个稳定状态（即结构模型的位移时程接近稳定值，只有微小的振动并且所有材料和几何非线性过程均停止）。
5. 在分析计算过程中或结束后，将构件和节点的内力和变形与该构件的容许准则进行比较（见表 3-1）。可借助建筑设计软件与容许准则进行比较，确认所有的相关材料规程均得到满足，包括支撑、密实度、弯矩-轴力组合的要求等。
6. 如果在结构的动力分析中所有结构构件和节点均满足容许准则，则分析结束且该结构满足抗连续倒塌设计要求；若有任何构件或节点不满足容许准则，则继续下面的分析步骤：
 - A. 如果在某个荷载时程点某构件或节点不满足容许准则，停止计算并迅速拆除该构件，参照表 3-1；
 - B. 拆除失效构件后按照 3-2.4.3 所述方法重新分布荷载；
 - C. 模型修改后，从停止计算的荷载时程点开始继续进行计算，直至结构达到稳定状态或另一构件违背容许准则；
 - D. 在每个因为违反容许准则而停止计算的点检查结构的破坏状况，如果破坏超限，则对结构进行重新设计，并从步骤 1 开始重新分析；
 - E. 若破坏限制和容许准则均得到满足并且结构模型保持稳定，则设计是满足要求的。若在重分析过程中破坏没有超限但存在任何构件违背了容许准则，重复 A~E 步骤，直至结构达到稳定状态或者破坏超限。