

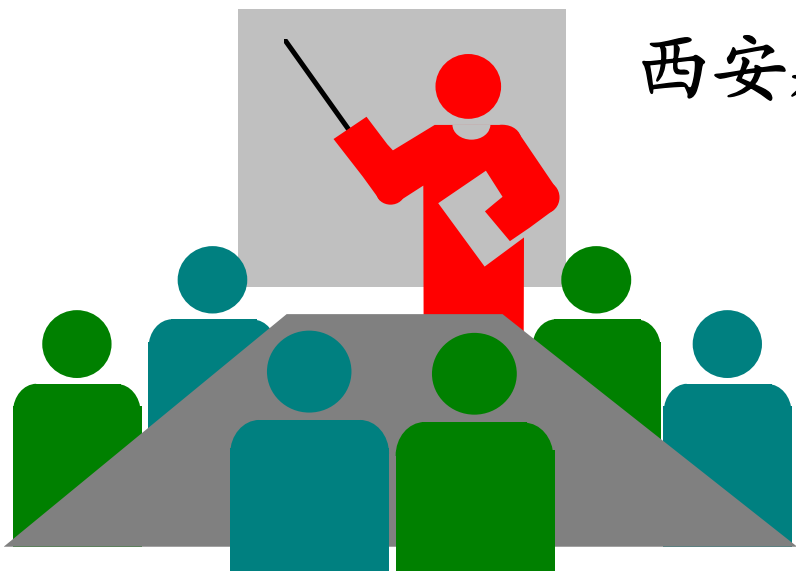


高层建筑结构设计

第6章 剪力墙结构分析与设计

西安建筑科技大学

史庆轩





主要内容:

重点、难点:

- 6.1 结构布置
- ✦ 6.2 剪力墙结构平面协同工作分析
- 6.3 整截面墙的内力和位移计算
- ✦ 6.4 双肢墙的内力和位移计算
- 6.5 多肢墙的内力和位移计算
- 6.6 整体小开口墙的内力和位移计算
- ✦ 6.7 壁式框架的内力和位移计算
- ✦ 6.8 剪力墙分类的判别
- 6.9 剪力墙截面设计和构造要求

结构分类和分析方法

受力特点对比和计算参数判别



6.1 结构布置

6.1.1 墙体承重方案

小开间横墙承重

大开间横墙承重

大间距纵、横墙承重

1) 小开间横墙承重

特点: 每开间设置承重横墙, 间距为2.7~3.9m, 适用于住宅、旅馆等小开间建筑。

优点: 不需要隔墙; 采用短向楼板, 节约钢筋等。

缺点: 横墙数量多, 承载力未充分利用, 建筑平面布置不灵活, 房屋自重及侧向刚度大, 水平地震作用大。



2) 大开间横墙承重

特点: 每两开间设置一道承重横墙, 间距一般6~8m。楼盖多采用混凝土梁式板或无粘结预应力混凝土平板。

优点: 使用空间大, 平面布置灵活; 自重较轻, 基础费用相对较少。

缺点: 楼盖跨度大, 楼盖材料增多。

3) 大间距纵、横墙承重

特点: 每两开间设置一道横墙, 间距为8m左右。楼盖采用混凝土双向板, 或在每两道横墙之间布置一根进深梁, 形成纵、横墙混合承重。

从使用功能、技术经济指标、受力性能等方面来看, 大间距方案较优越。目前趋向于采用大间距、大进深、大模板、无粘结预应力混凝土楼板的剪力墙结构体系。



6.1.2 剪力墙的布置原则

- 1) 宜沿主轴方向双向或多向布置，不同方向的剪力墙宜联结在一起，应尽量拉通、对直；抗震设计时，宜使两个方向侧向刚度接近；剪力墙墙肢截面宜简单、规则。
- 2) 剪力墙布置不宜太密，使结构具有适宜的侧向刚度；若侧向刚度过大，不仅加大自重，还会使地震力增大。
- 3) 剪力墙宜自下到上连续布置，避免刚度突变。
- 4) 剪力墙长度较大时，可通过开设洞口将长墙分成若干均匀的独立墙段。墙段的长度不宜大于8m。
- 5) 剪力墙的门窗洞口宜上下对齐，成列布置。宜避免使用错洞墙和叠合错洞墙。



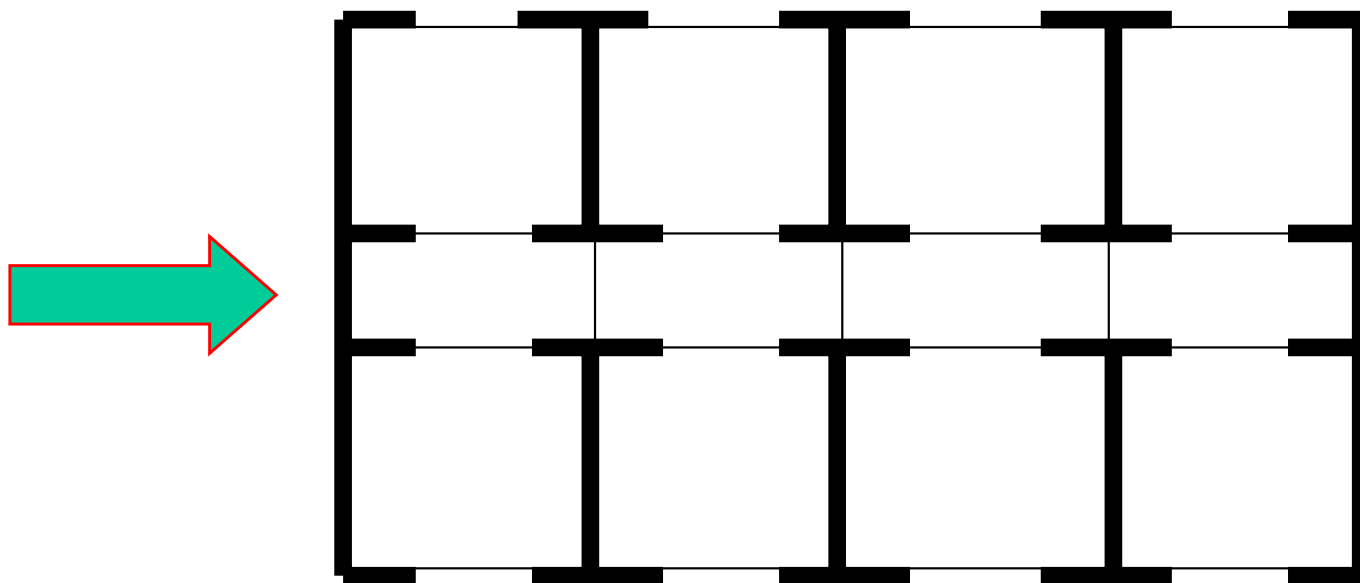
6) 当剪力墙与平面外方向的梁连结时, 可加强剪力墙平面外的抗弯刚度和承载力 (可在墙内设置**扶壁柱**、**暗柱**或与梁相连的**型钢**等措施); 或减小梁端弯矩的措施 (如设计为铰接或半刚接)。

7) 短肢剪力墙是指墙肢截面**长度与厚度之比为5~8的剪力墙**, 高层结构不应采用全部为短肢剪力墙的剪力墙结构。短肢剪力墙结构的最大适用高度应适当降低。



6.2 剪力墙结构平面协同工作分析

- 1) 竖向荷载作用下，各片剪力墙承受的压力可近似按各肢剪力墙负荷面积分配；
- 2) 水平荷载作用下，各片剪力墙承受的水平荷载可按结构平面协同工作分析。即研究水平荷载在各榀剪力墙之间分配问题的一种简化分析方法。

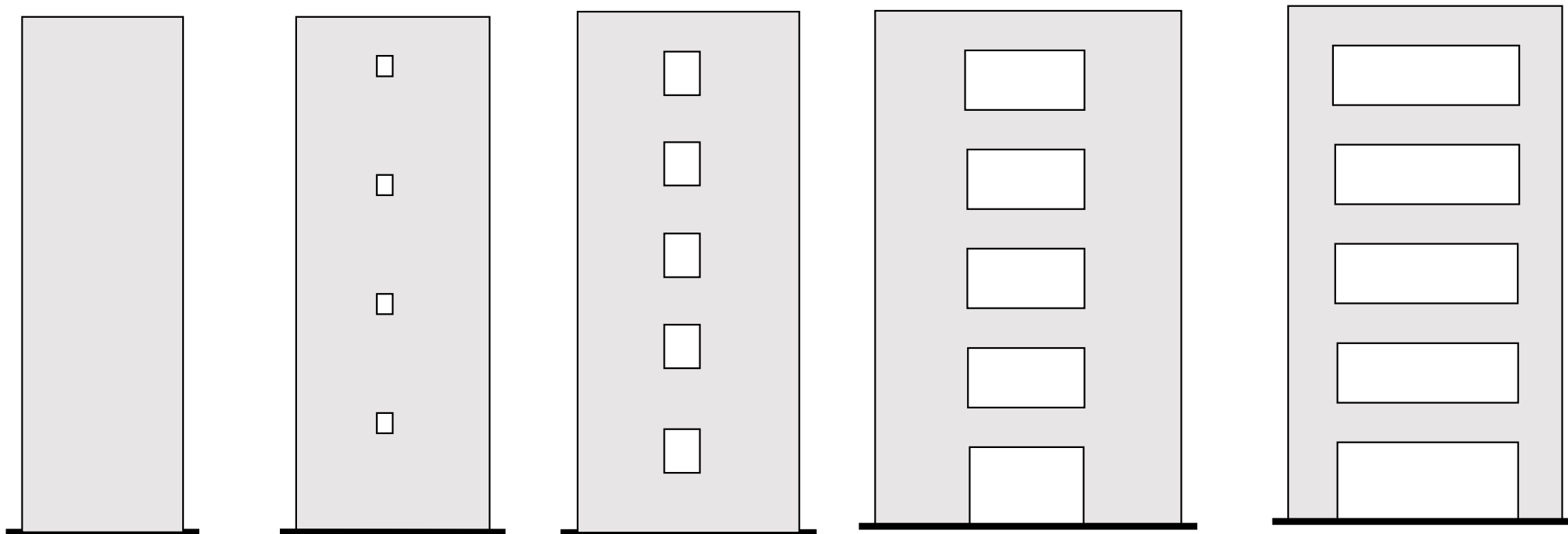


剪力墙结构平面图



6.2.1 剪力墙的分类

1、根据剪力墙洞口的有无、大小、形状和位置等，可将其划分为以下几类：



整截面墙

整体小开口墙

联肢墙

壁式框架

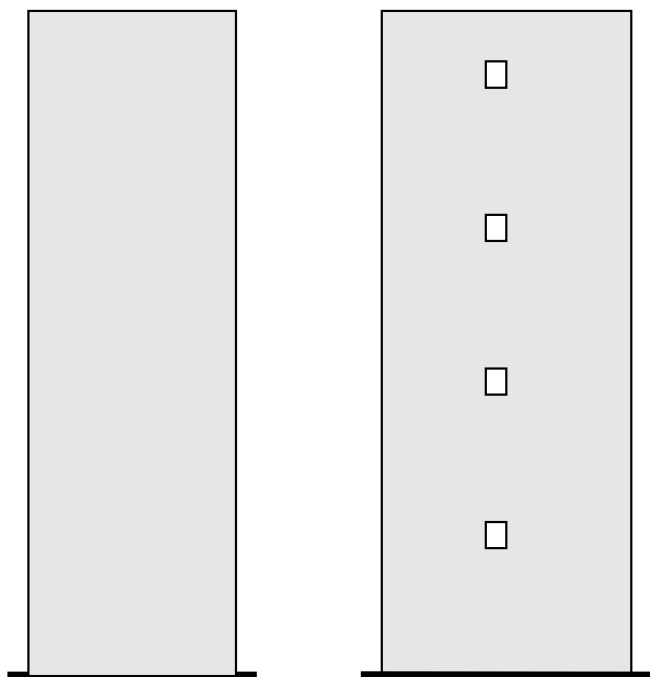


1) 整截面墙

几何判定:

(1) 剪力墙无洞口;

(2) 有洞口, 墙面洞口面积不大于墙面总面积的16%, 且洞口间的净距及洞口至墙边的距离均大于洞口长边尺寸。



整截面墙

受力特点:

可视为上端自由、下端固定的竖向悬臂构件。

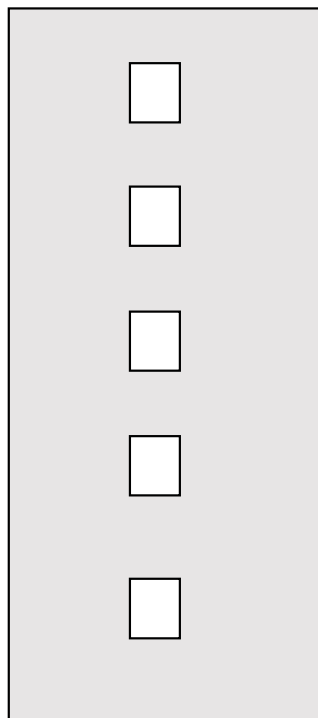


2) 整体小开口墙

几何判定:

(1) 洞口稍大一些, 且沿竖向成列布置;

(2) 洞口面积超过墙面总面积的**16%**, 但洞口对剪力墙的受力影响仍较小。



整体小开口墙

受力特点:

水平荷载下, 由于洞口的存在, 墙肢中已出现**局部弯曲**, 其截面应力可认为由**墙体的整体弯曲和局部弯曲二者叠加组成**, 截面变形仍接近于整截面墙。



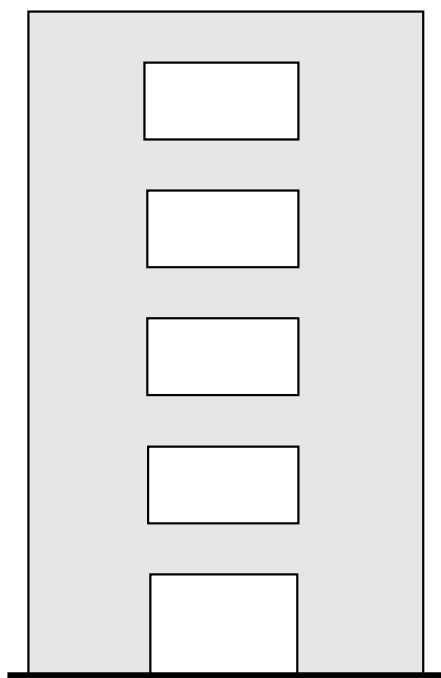
3) 联肢墙

几何判定:

沿竖向开有一列或多列较大的洞口，可以简化为若干个单肢剪力墙或**墙肢**与一系列**连梁**联结起来组成。

受力特点:

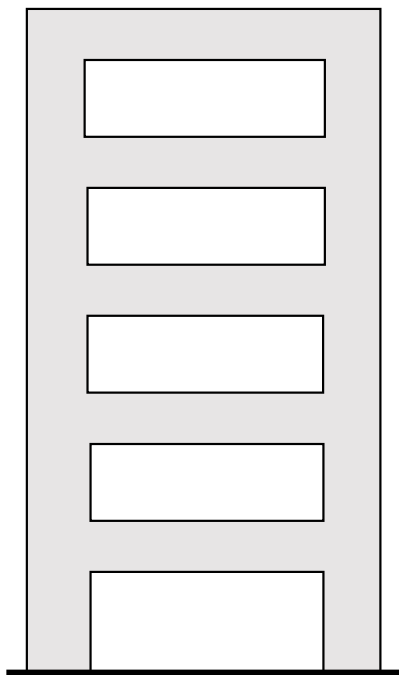
连梁对墙肢有一定的约束作用，墙肢局部弯矩较大，整个截面正应力已不再呈直线分布。



联肢剪力墙



4) 壁式框架



壁式框架

几何判定:

当剪力墙成列布置的洞口很大, 且洞口较宽, 墙肢宽度相对较小, 连梁的刚度接近或大于墙肢的刚度。

受力特点:

与框架结构相类似。



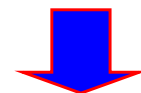
6.2.2 剪力墙的等效刚度

1、定义

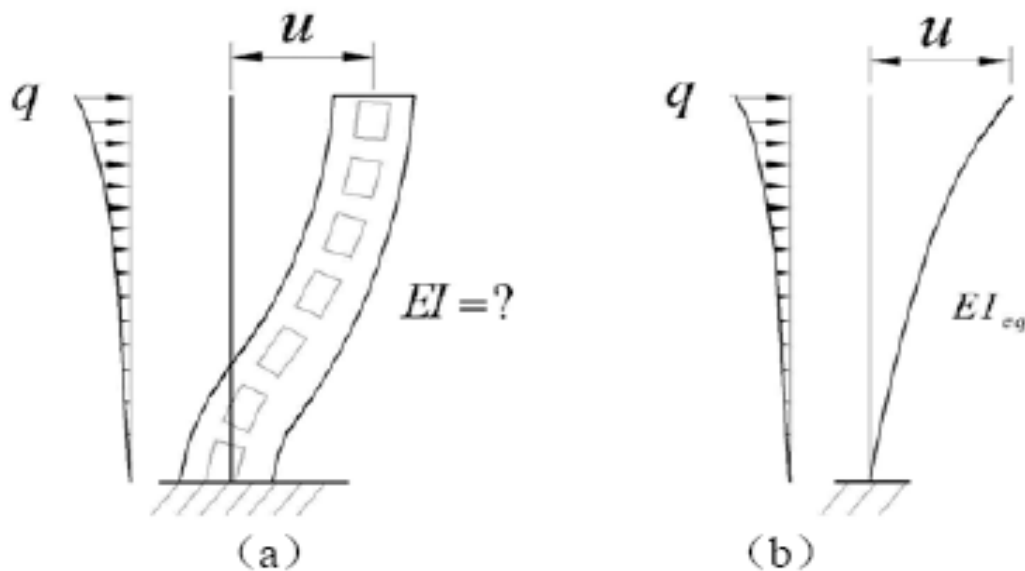
{ 相同水平荷载
相同侧向位移



剪力墙与竖向悬臂受弯构件具有相同的刚度



采用悬臂受弯构件的刚度作为剪力墙的等效刚度



EI_{eq} 综合反映了剪力墙弯曲、剪切和轴向变形的影响。



2、剪力墙等效刚度的计算：

$$EI_{eq} = \begin{cases} \frac{qH^4}{8u_1} & \text{(均布荷载)} \\ \frac{11}{120} \cdot \frac{q_{max}H^4}{u_2} & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{PH^3}{3u_3} & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$

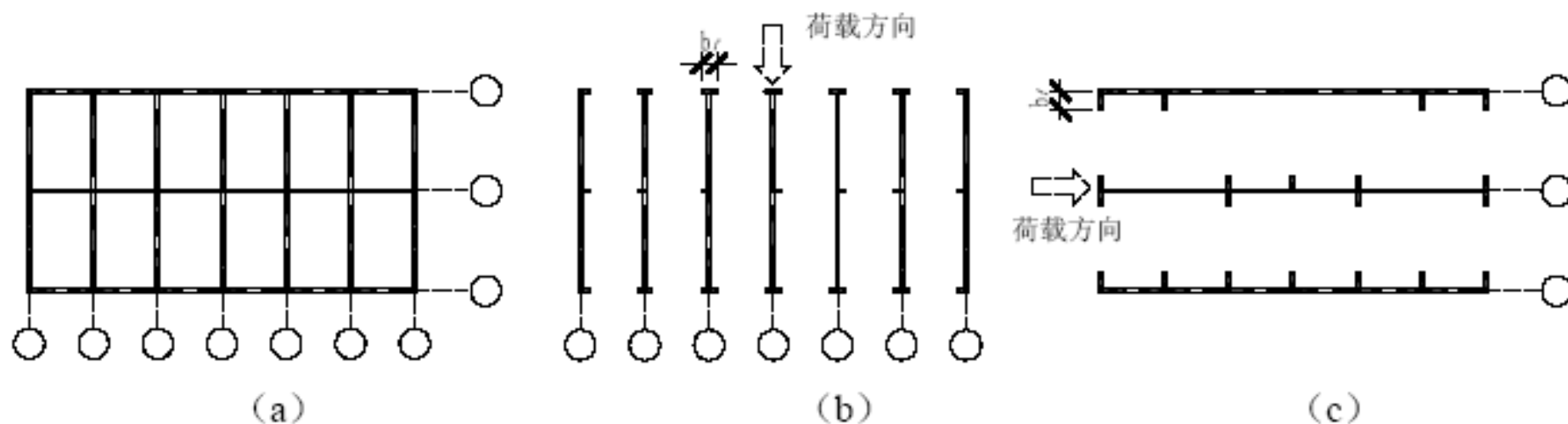
要求等效刚度，需先计算剪力墙顶点的位移。



6.2.3 剪力墙结构平面协同工作分析

1、基本假定

- 1) 楼盖在自身平面内的刚度无限大，平面外刚度很小，可忽略；
- 2) 各片剪力墙在其平面内的刚度较大，忽略其平面外的刚度；
- 3) 水平荷载作用点与结构刚度中心重合，结构不发生扭转。





由假定1)、3)可知, 楼板在其自身平面内不发生相对变形, 只作刚体平动, 水平荷载按各片剪力墙的侧向刚度进行分配。

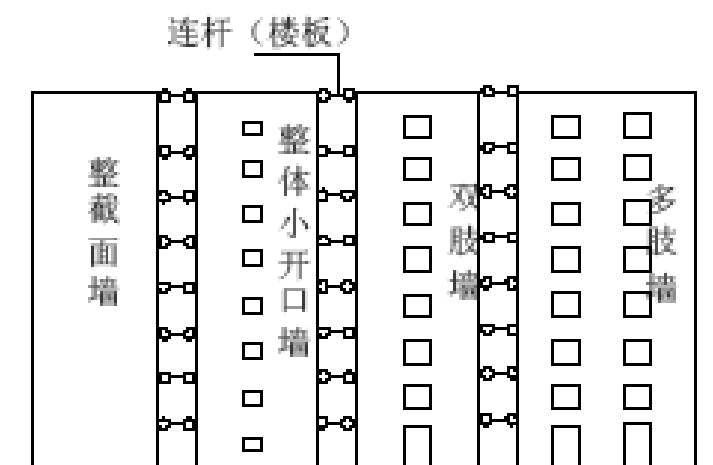
由假定2)可知, 各片剪力墙只承受其自身平面内的水平荷载, 可将纵、横两个方向的剪力墙分开考虑; 同时, 可考虑纵、横向剪力墙的共同工作, 纵墙(横墙)的一部分可以作为横墙(纵墙)的有效翼墙。

实际上, 当房屋的体型比较规则, 结构布置和质量分布基本对称时, 为简化计算, 通常不考虑扭转影响。

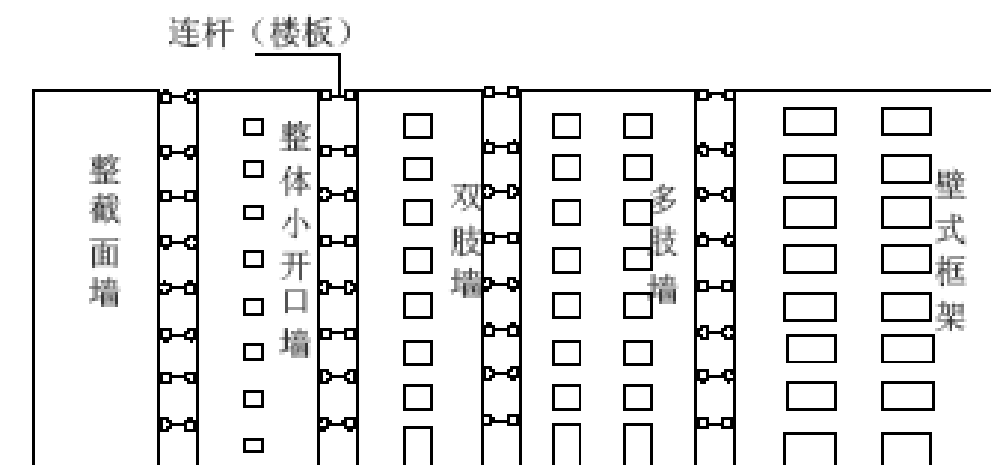


2、剪力墙结构平面协同工作分析

将剪力墙分为两大类：第一类包括整截面墙、整体小开口墙和联肢墙；第二类为壁式框架。



第一类

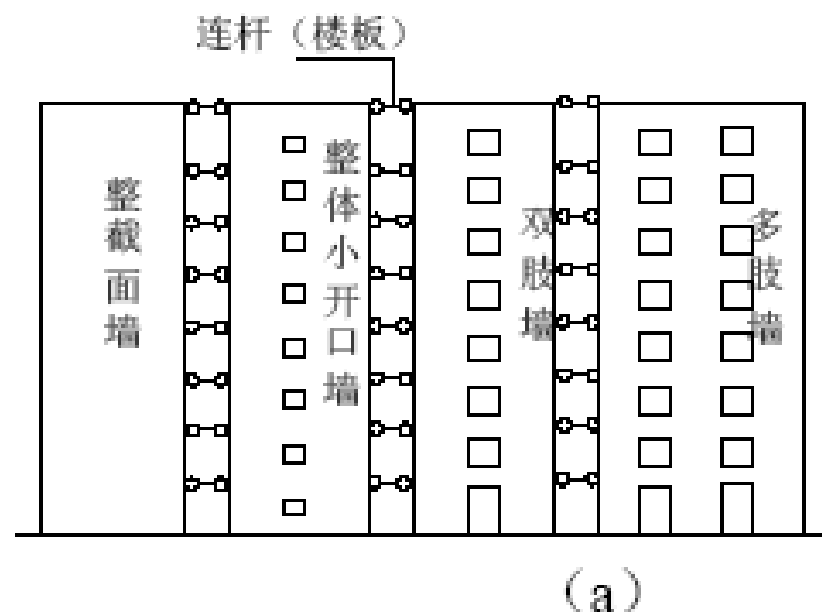


第一类+第二类



(1) 第一类：包括整截面墙、整体小开口墙和联肢墙

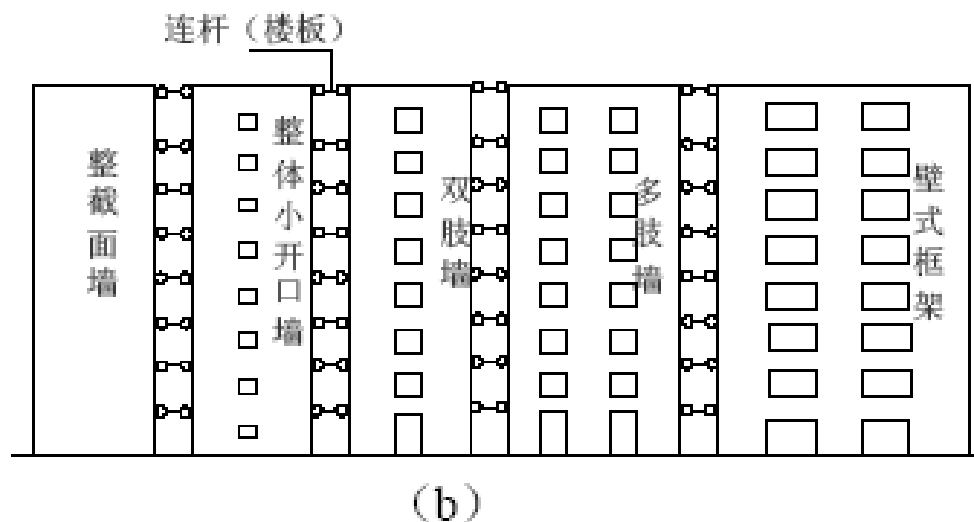
- 1) 将水平荷载划分均布荷载、倒三角形分布荷载或顶点集中荷载，或这三种荷载的某种组合；
- 2) 计算沿水平荷载作用方向的 m 片剪力墙的总等效刚度；
- 3) 根据剪力墙等效刚度，计算每一片剪力墙所承受的水平荷载；
- 4) 再根据每一片剪力墙所承受的水平荷载形式，进行各片剪力墙中连梁和墙肢的内力和位移计算。





(2) 第一类和第二类：包括整截面墙、整体小开口墙、联肢墙和壁式框架。

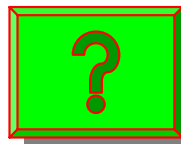
- 1) 将第一类剪力墙合并为总剪力墙，将壁式框架合并为总框架，按照**框架-剪力墙铰接体系分析方法**，计算总剪力墙的内力和位移；
- 2) 剪力墙结构计算转化为**框-剪结构**的计算。



则剪力墙结构在水平荷载作用下的计算问题就转变为单片剪力墙的计算。



6.2 整截面墙的内力和位移计算



问题：整截面墙与竖向悬臂梁的主要区别？

- ✦ 整截面墙应考虑剪切变形+弯曲变形；
- ✦ 悬臂梁仅考虑弯曲变形。



6.3.1 墙体截面内力

水平荷载作用下，整截面墙可视为上端自由、下端固定的竖向悬臂梁，其弯矩和剪力可按照材料力学方法进行计算。

如：水平均布荷载下，剪力墙底部弯矩和剪力。

$$M_0 = \frac{qH^2}{2}$$

$$V_0 = qH$$

特点：截面正应力保持直线分布；
墙体无反弯点。

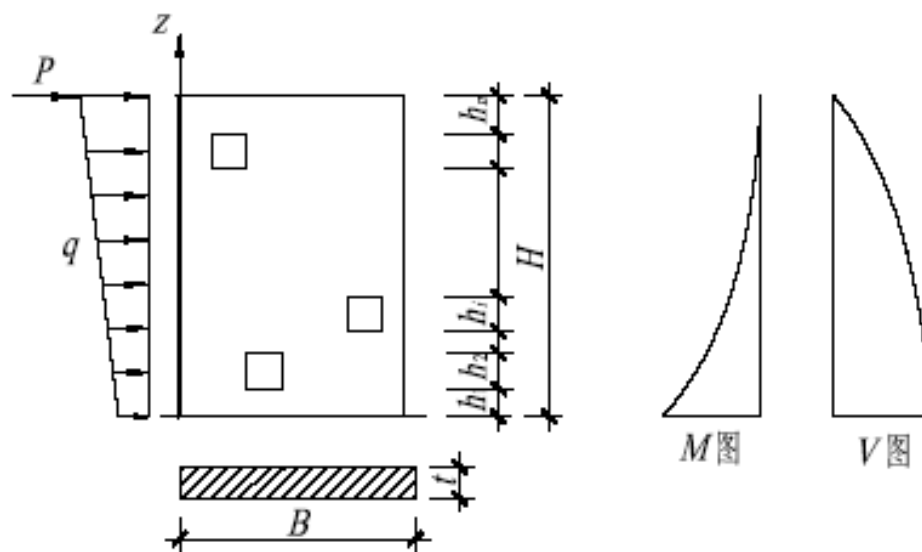


图 6.3.1 整截面墙计算简图



6.3.2 位移和等效刚度

由于剪力墙的截面高度较大，位移计算应考虑剪切变形的影响。当墙面开有洞口时，应考虑洞口对位移增大的影响。

1、水平荷载下，考虑弯曲和剪切变形的顶点位移计算公式：

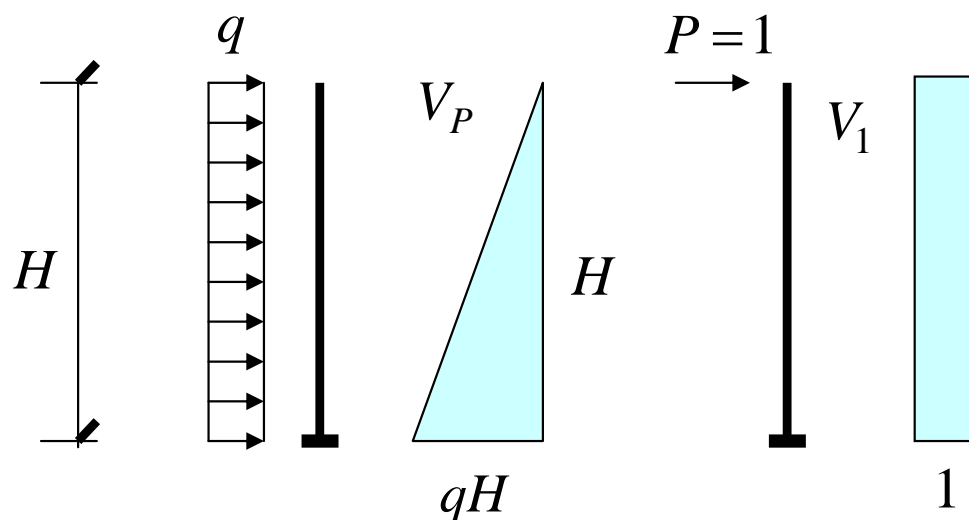
$$u = \begin{cases} \frac{V_0 H^3}{8EI_w} \left(1 + \frac{4\mu EI_w}{GA_w H^2} \right) & \text{(均布荷载)} \\ \frac{11}{60} \cdot \frac{V_0 H^3}{EI_w} \left(1 + \frac{3.64\mu EI_w}{GA_w H^2} \right) & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{V_0 H^3}{3EI_w} \left(1 + \frac{3\mu EI_w}{GA_w H^2} \right) & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$

注：考虑剪切变形的位移：

$$u = \int \frac{M_P M_1}{EI} ds + \int \frac{\mu V_P V_1}{GA} ds$$



例：水平均布荷载下，整截面墙考虑弯曲和剪切变形的顶点位移及等效刚度：



$$u_M = \frac{V_0 H^2}{8EI}$$

$$u_V = \int \frac{\mu V_p V_1}{GA} ds = \frac{\mu}{GA} \times \frac{qH^2}{2} \times 1 = \frac{\mu V_0 H}{2GA}$$

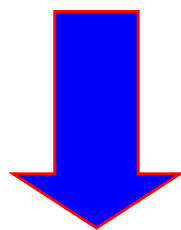
$$u = \frac{V_0 H^3}{8EI} + \frac{\mu V_0 H}{2GA} = \frac{V_0 H^2}{8EI} \left(1 + \frac{4\mu}{H^2 GA} \right) = \frac{V_0 H^2}{8EI / (1 + 4\mu EI / H^2 GA)} = \frac{V_0 H^2}{8EI_{eq}}$$

$$EI_{eq} = \frac{EI}{(1 + 4\mu EI / H^2 GA)}$$



2、则可得到整截面墙的等效刚度计算公式为

$$EI_{eq} = \begin{cases} EI_w / \left(1 + \frac{4\mu EI_w}{GA_w H^2} \right) & \text{(均布荷载)} \\ EI_w / \left(1 + \frac{3.64\mu EI_w}{GA_w H^2} \right) & \text{(倒三角形荷载)} \\ EI_w / \left(1 + \frac{3\mu EI_w}{GA_w H^2} \right) & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$



$$EI_{eq} = EI_w / \left(1 + \frac{9\mu I_w}{A_w H^2} \right)$$



3、引入等效刚度 EI_{eq} ，可把剪切与弯曲变形综合成弯曲变形的表达形式，则

$$u = \begin{cases} \frac{V_0 H^3}{8EI_{eq}} & \text{(均布荷载)} \\ \frac{11}{60} \cdot \frac{V_0 H^3}{EI_{eq}} & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{V_0 H^3}{3EI_{eq}} & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$



6.4 双肢墙的内力和位移计算

双肢墙由连梁将两墙肢联结在一起，且墙肢的刚度一般比连梁的刚度大较多，相当于柱梁刚度比较大的一种框架，属于高次超静定结构，可采用**连梁连续化的分析法**。



问题：连梁连续化法的基本思路？

双肢墙连梁连续化分析法

● 计算模型的简化

基本假定

● 按力法求解超静定结构

两个未知力的超静定结构

● 微分方程的建立

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0$$

补充条件

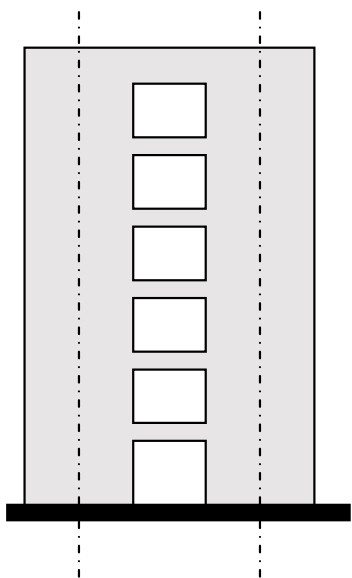
$$EI \frac{d^2 y}{dz^2} = M$$

● 微分方程的求解

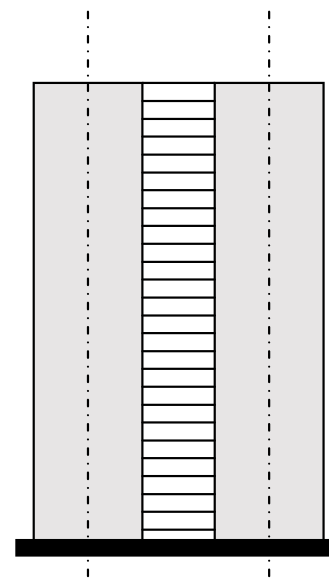
求解二阶常系数非齐次线性微分方程

● 求解内力

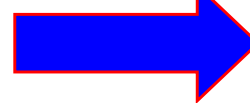
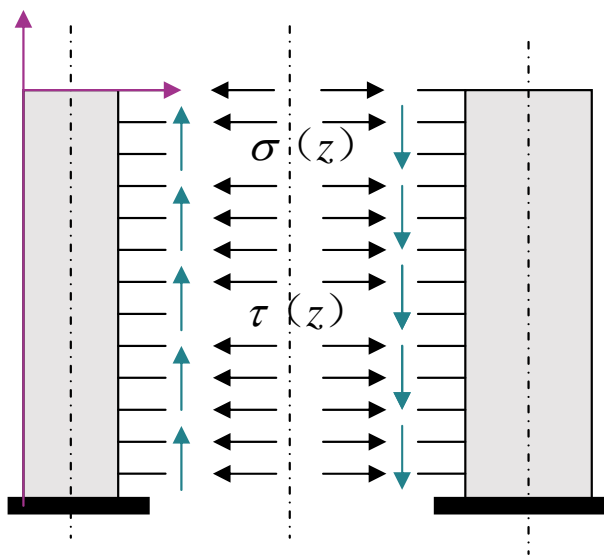
微分关系求解内力



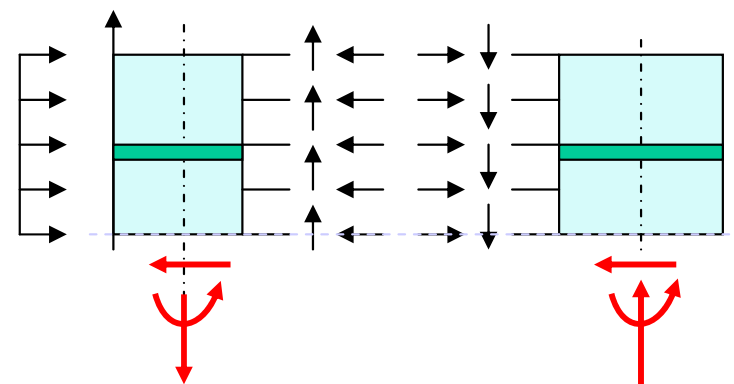
将连杆离散化，均匀分布



求解两个未知力的超静定结构



受力平衡方程求解内力

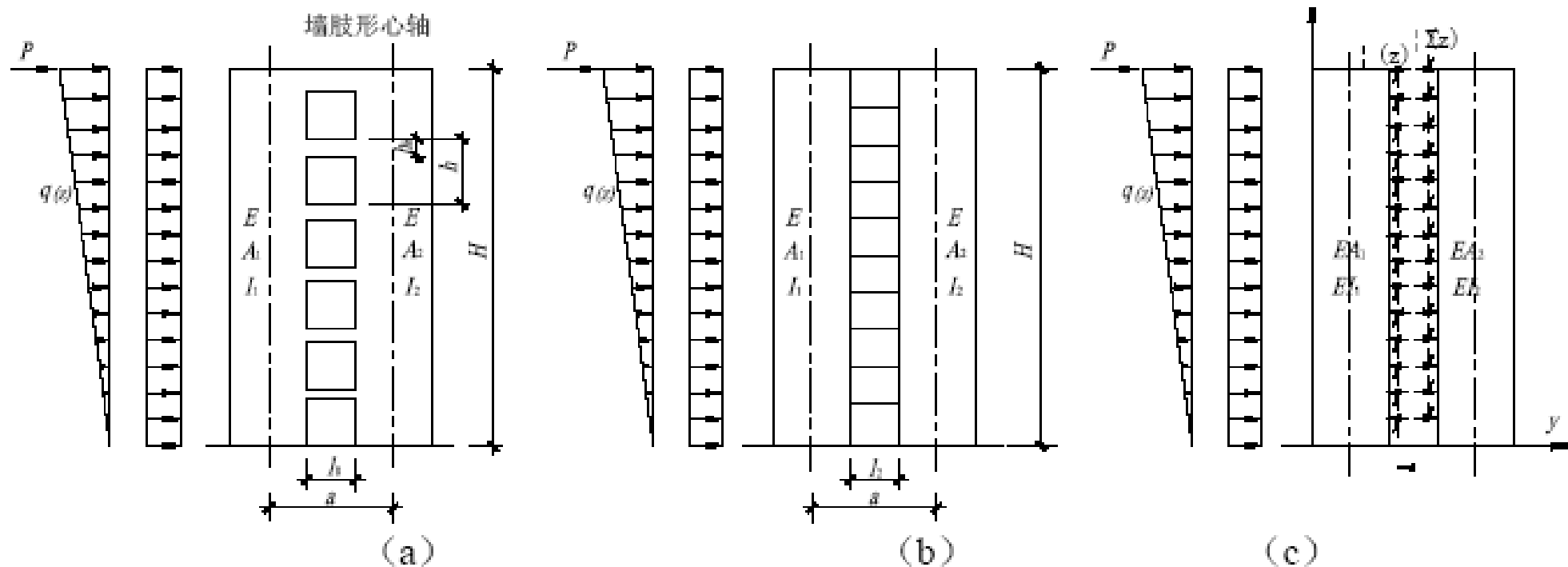


$\tau(z)$ 多余未知力



6.4.1 基本假定

- 1) 每一楼层处的连梁简化为沿该楼层均匀连续分布的连杆。
- 2) 忽略连梁轴向变形，墙肢同一标高处侧移相等，转角和曲率亦相同。
- 3) 每层连梁的反弯点在梁的跨度中央。
- 4) 沿竖向墙肢和连梁的刚度及层高均不变。有变化时，取几何平均值。



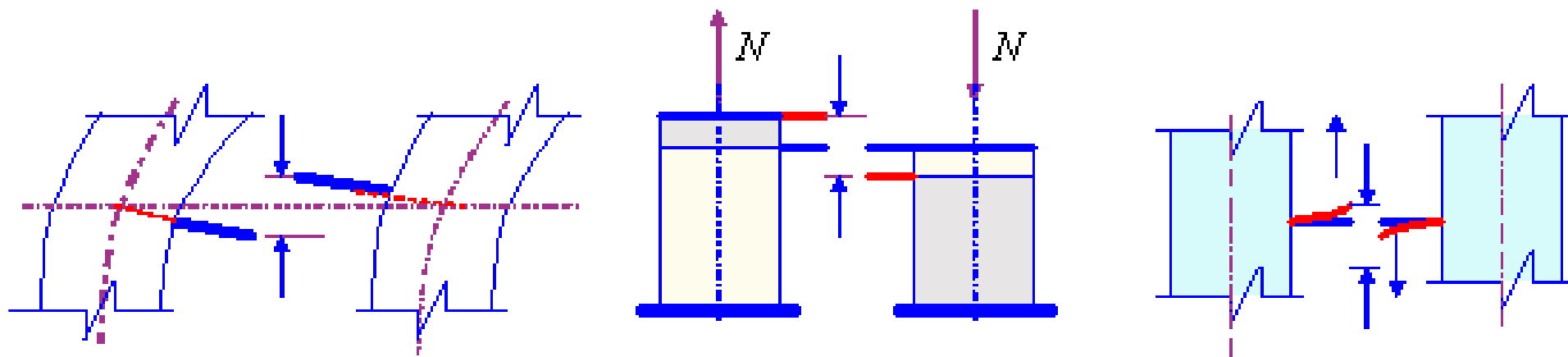


6.4.2 微分方程的建立

1、第一步：根据基本体系在连梁切口处的变形连续条件，建立微分方程：

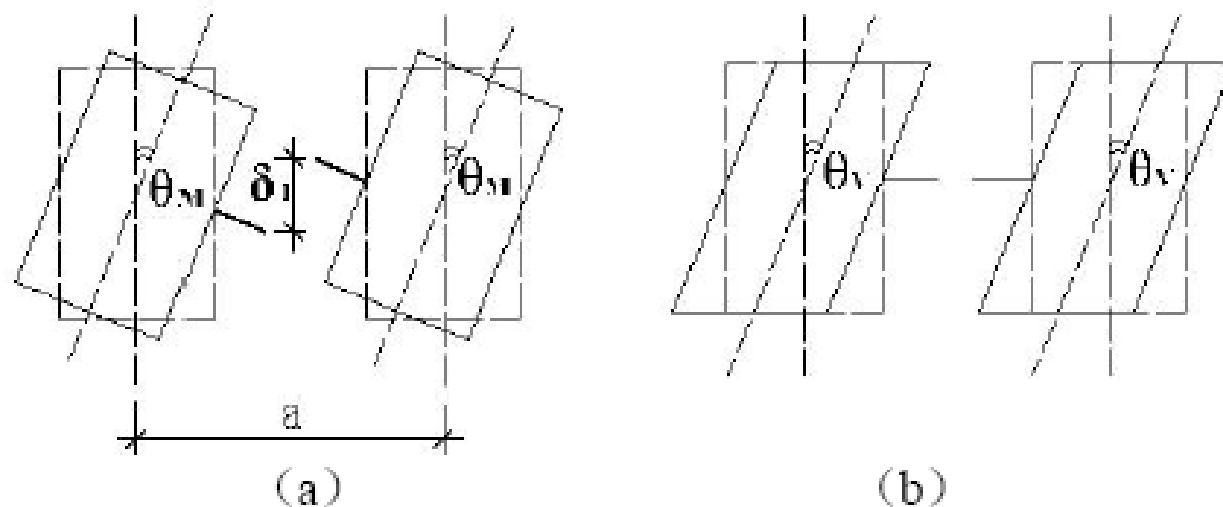
- 将连续化后的连梁沿反弯点处切开，可得力法求解时的基本体系。
- 切开后的截面上有剪力 $\tau(z)$ 和轴力 $\sigma(z)$ ，取 $\tau(z)$ 为多余未知力。
- 根据变形连续条件，切口处沿未知力 $\tau(z)$ 方向上的相对位移应为零，即

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0$$





(1) 由于墙肢弯曲变形所产生的相对位移： δ_1



$$\delta_1 = -a\theta_M$$

负号表示相对位移与假设的未知剪力 $\tau(z)$ 方向相反。

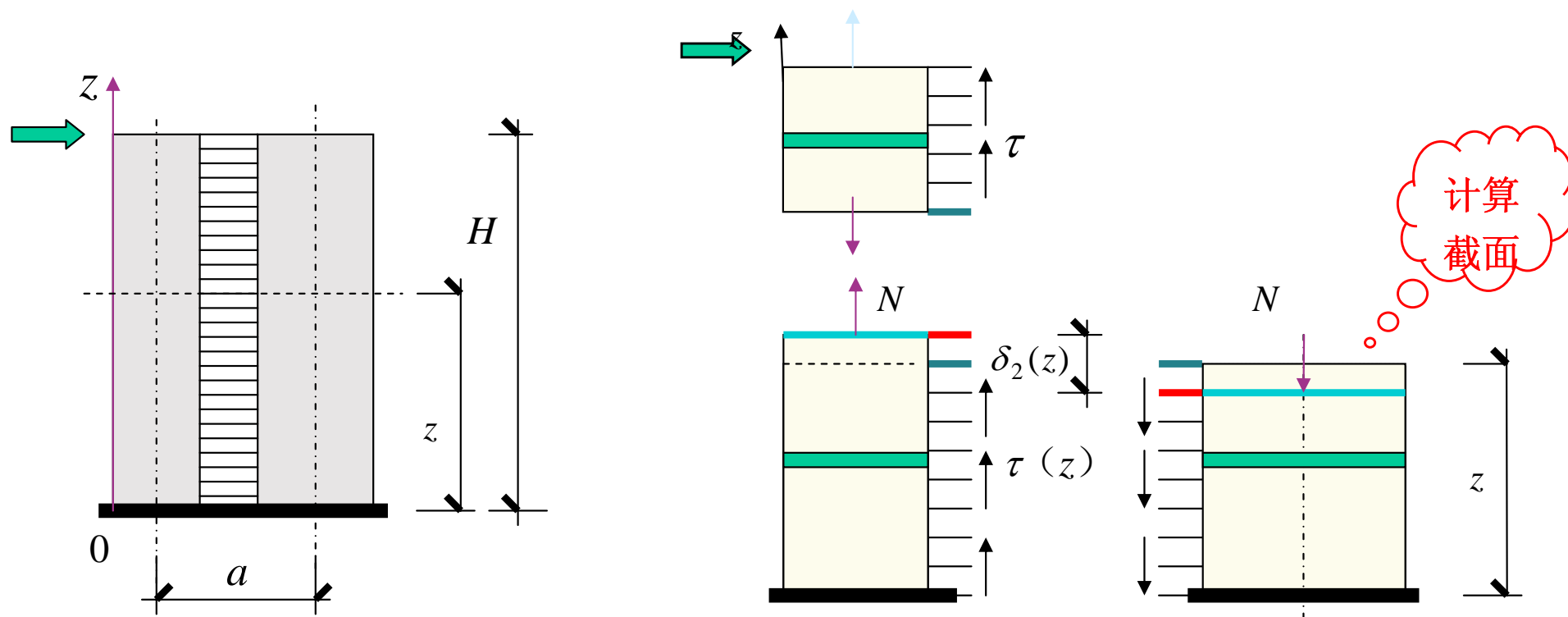
当墙肢发生剪切变形时，只在墙肢的上、下截面产生相对水平错动，此错动不会使连梁切口处产生相对竖向位移，即由墙肢剪切变形所产生的相对位移为零。

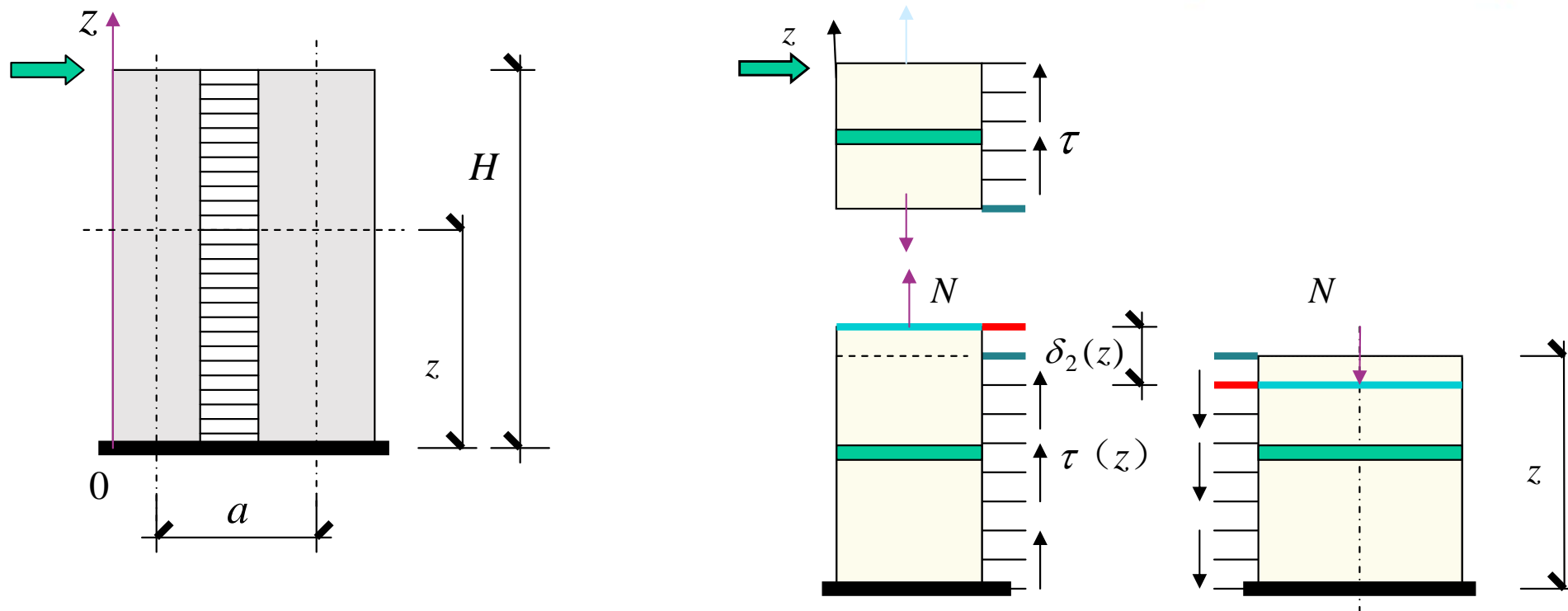


2) 墙肢轴向变形所产生的相对位移 δ_2

基本体系在切口处剪力作用下，自两墙肢底至 z 截面处的轴向变形差为切口所产生的相对位移。

$$\delta_2 = \int_0^z \frac{N(z)}{EA_1} dz + \int_0^z \frac{N(z)}{EA_2} dz = \frac{I}{E} \left(\frac{I}{A_1} + \frac{I}{A_2} \right) \int_0^z N(z) dz$$





z 截面处的轴力等于（ $H-z$ 高度范围）内切口处的剪力之和：

$$N(z) = \int_z^H \tau(z) dz$$

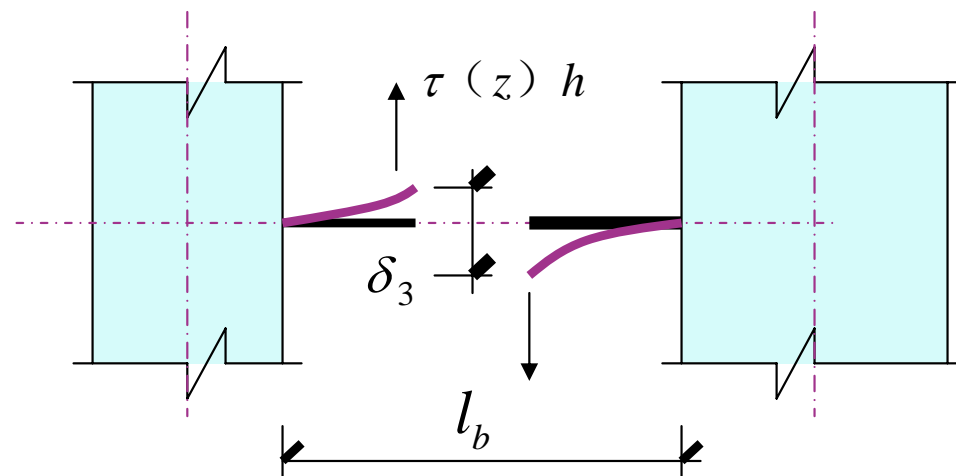
墙肢轴向变形所产生的相对位移为

$$\delta_2 = \frac{I}{E} \left(\frac{I}{A_1} + \frac{I}{A_2} \right) \int_0^z \int_z^H \tau(z) dz dz$$



3) 连梁弯曲和剪切变形所产生的相对位移 δ_3

由于连梁切口处剪力 $\tau(z)$ 作用，使连梁产生弯曲和剪切变形，在切口处所产生的相对位移为



$$\delta_3 = \delta_{3M} + \delta_{3V} = \frac{\tau(z)hl_b^3}{12EI_{b0}} + \frac{\mu\tau(z)hl_b}{GA_b} = \frac{\tau(z)hl_b^3}{12EI_{b0}} \left(1 + \frac{12\mu EI_{b0}}{GA_b l_b^2}\right)$$

$$\delta_3 = \frac{hl_b^3}{12EI_b} \tau(z)$$

I_b ——连梁的折算惯性矩，当取 $G = 0.4E$ 时，可按下式计算

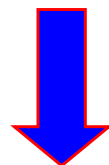
$$I_b = I_{b0} / \left(1 + \frac{30\mu I_{b0}}{A_b l_b^2}\right)$$

μ ——截面剪应力分布不均匀系数，矩形截面取 $\mu = 1.2$ 。

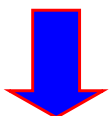


(连梁切口处的变形连续条件)

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0$$

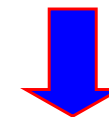


$$a\theta_M - \frac{l}{E} \left(\frac{l}{A_1} + \frac{l}{A_2} \right) \int_0^z \int_z^H \tau(z) dz dz - \frac{hl_b^3}{12EI_b} \tau(z) = 0$$



对上式求一次导数有

$$a \frac{d\theta_M}{dz} - \frac{l}{E} \left(\frac{l}{A_1} + \frac{l}{A_2} \right) \int_z^H \tau(z) dz - \frac{hl_b^3}{12EI_b} \frac{d\tau(z)}{dz} = 0$$

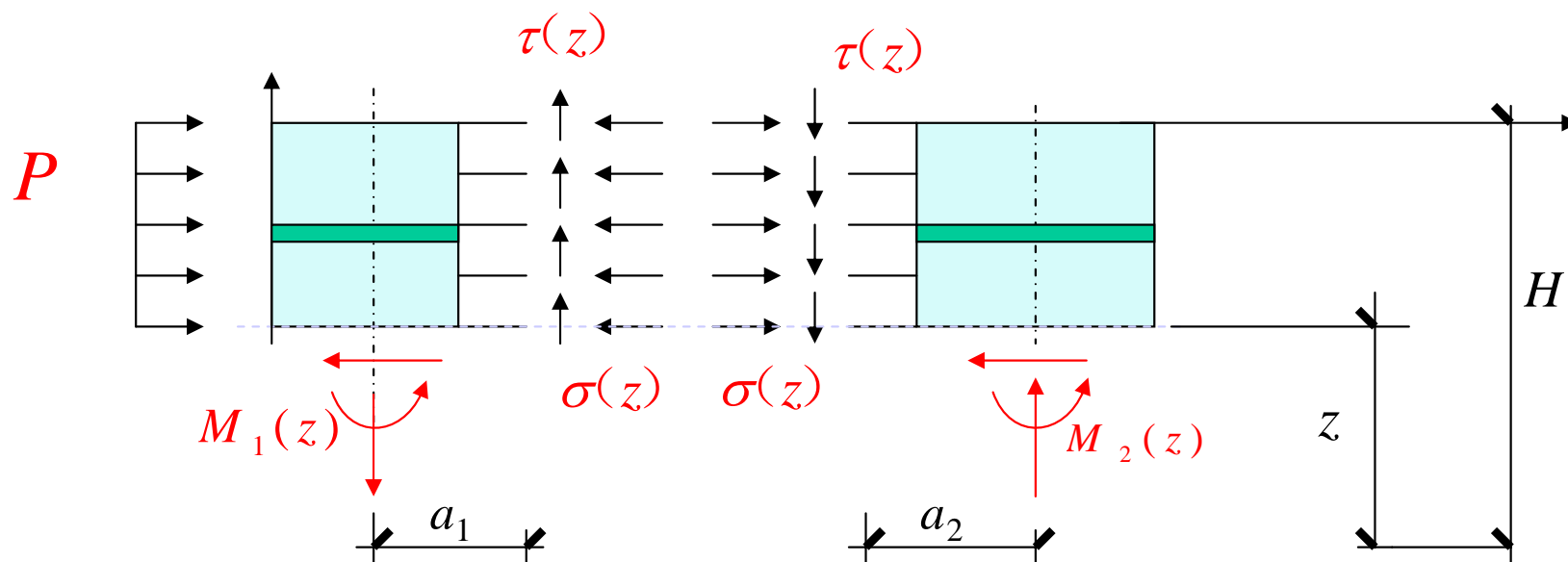


再求一次导数有

$$a \frac{d^2\theta_M}{dz^2} + \frac{l}{E} \left(\frac{l}{A_1} + \frac{l}{A_2} \right) \tau(z) - \frac{hl_b^3}{12EI_b} \frac{d^2\tau(z)}{dz^2} = 0$$



2、第二步：引入补充条件，求 $d^2\theta_M/dz^2$



由图 6.4.1 (c) 所示的基本体系，可分别写出两墙肢的弯矩与其曲率的关系为

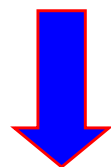
$$EI_1 \frac{d^2 y_M}{dz^2} = M_1 = M_p(z) - a_1 \int_z^H \tau(z) dz - M_\sigma(z)$$

$$EI_2 \frac{d^2 y_M}{dz^2} = M_2 = -a_2 \int_z^H \tau(z) dz + M_\sigma(z)$$



将式(6.4.8)和式(6.4.9)相加, 可得

$$E(I_1 + I_2) \frac{d^2 y_M}{dz^2} = M_1 + M_2 = M_p(z) - a \int_z^H \tau(z) dz$$

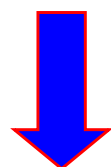


对上式微分一次得

$$E(I_1 + I_2) \frac{d^2 \theta_M}{dz^2} = V_p(z) + a \cdot \tau(z)$$

或写成下述形式

$$\frac{d^2 \theta_M}{dz^2} = \frac{1}{E(I_1 + I_2)} [V_p(z) + a \cdot \tau(z)]$$



式中 $V_p(z)$ 为外荷载在计算截面 z 处所产生的剪力, 按下式计算

$$V_p(z) = \begin{cases} -(1 - \frac{z}{H})V_0 & \text{(均布荷载)} \\ -[1 - (\frac{z}{H})^2]V_0 & \text{(倒三角形荷载)} \\ -V_0 & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$



3、第三步：微分方程的简化

改为 a^2

将式(6.4.12)代入式(6.4.7)，并整理后可得

$$\frac{d^2 \tau(z)}{dz^2} - \frac{12I_b}{hl_b^3} \left[\frac{a_2}{(I_1 + I_2)} + \frac{A_1 + A_2}{A_1 A_2} \right] \tau(z) = \frac{12aI_b}{hl_b^3 (I_1 + I_2)} V_p(z)$$

令：

$$D = \frac{2a^2 I_b}{l_b^3}$$

$$S = \frac{aA_1 A_2}{A_1 + A_2}$$

$$\alpha_1^2 = \frac{6H^2 D}{h(I_1 + I_2)}$$

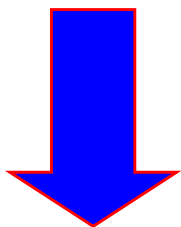
$$\alpha^2 = \alpha_1^2 + \frac{6H^2 D}{hSa}$$

D 为连梁的刚度

S 为双肢墙中一个墙肢对组合截面形心轴的面积矩
(反映洞口大小)

α_1 为连梁与墙肢刚度比

α 为剪力墙的整体工作系数

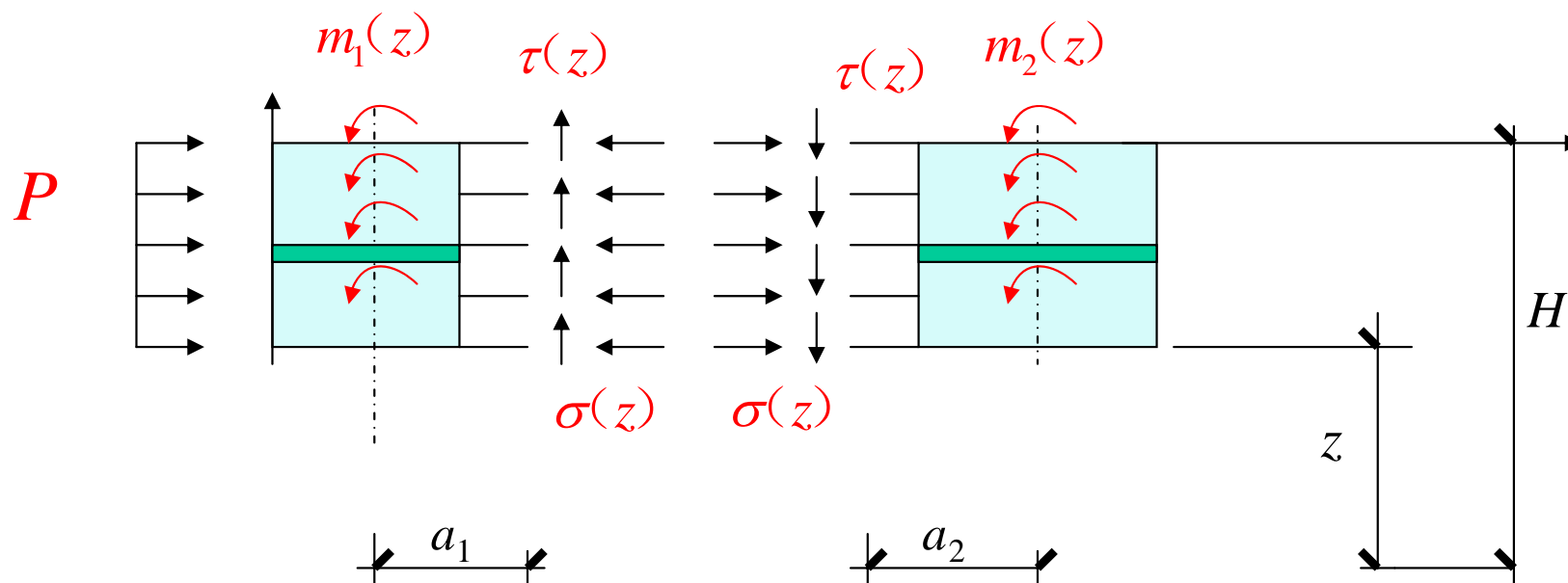


双肢墙的基本微分方程：

$$\frac{d^2 \tau(z)}{dz^2} - \frac{\alpha^2}{H^2} \tau(z) = \frac{\alpha_1^2}{H^2 a} V_p(z)$$



4、第四步：引入约束弯矩表述的微分方程



$$m(z) = m_1(z) + m_2(z) = a \cdot \tau(z)$$



则双肢墙的微分方程亦可表达为

$$\frac{d^2 m(z)}{dz^2} - \frac{\alpha^2}{H^2} m(z) = \frac{\alpha_1^2}{H^2} V_p(z)$$



$$\frac{d^2 m(z)}{dz^2} - \frac{\alpha^2}{H^2} m(z) = \begin{cases} -\frac{\alpha_1^2}{H^2} \left(1 - \frac{z}{H}\right) V_0 & \text{(均布荷载)} \\ -\frac{\alpha_1^2}{H^2} \left[1 - \left(\frac{z}{H}\right)^2\right] V_0 & \text{(倒三角形荷载)} \\ -\frac{\alpha_1^2}{H^2} V_0 & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases} \quad (6.4.20)$$

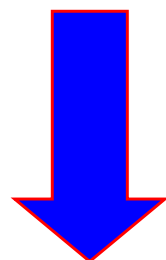


6.4.3 微分方程的求解

1、二阶常系数非齐次线性微分方程求解

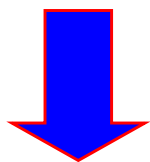
为简化微分方程，便于求解，引入变量 $\xi = \frac{z}{H}$ ，并令

$$\Phi(\xi) = m(\xi) \frac{\alpha^2}{\alpha_1^2} \cdot \frac{1}{V_0}$$



则式 (6.4.20) 可简化为如下形式

$$\frac{d^2 \Phi(\xi)}{d\xi^2} - \alpha^2 \Phi(\xi) = \begin{cases} -\alpha^2(1-\xi) & \text{(均布荷载)} \\ -\alpha^2(1-\xi^2) & \text{(倒三角形荷载)} \\ -\alpha^2 & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$

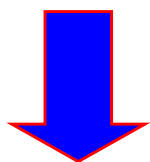


上述微分方程为二阶常系数非齐次线性微分方程，方程的解由齐次方程的通解

$$\Phi(\xi) = C_1 ch(\alpha\xi) + C_2 sh(\alpha\xi)$$

和特解

$$\Phi_2(\xi) = \begin{cases} 1 - \xi & \text{(均布荷载)} \\ 1 - \xi^2 - \frac{2}{\alpha^2} & \text{(倒三角形荷载)} \\ 1 & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$



两部分相加组成，即

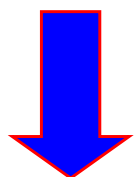
$$\Phi(\xi) = C_1 ch(\alpha\xi) + C_2 sh(\alpha\xi) + \begin{cases} 1 - \xi & \text{(均布荷载)} \\ 1 - \xi^2 - \frac{2}{\alpha^2} & \text{(倒三角形荷载)} \\ 1 & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$



2、根据边界条件、弯矩和曲率的关系计算

(1) 当 $z=0$ ，即 $\xi=0$ 时，墙底弯曲转角 θ_M 为零。 $\longrightarrow C_1$

(2) 当 $z=H$ ，即 $\xi=1$ 时，墙顶弯矩为零。 $\longrightarrow C_2$



$$\Phi(\xi) = \begin{cases} -\frac{ch\alpha(1-\xi)}{\alpha} + \frac{sh\alpha\xi}{\alpha} + (1-\xi) & \text{(均布荷载)} \\ \left(\frac{2}{\alpha^2} - 1\right) \left[\frac{ch\alpha(1-\xi)}{ch\alpha} - 1 \right] + \frac{2}{\alpha} \frac{sh\alpha\xi}{ch\alpha} - \xi^2 & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{sh\alpha}{ch\alpha} \cdot sh\alpha\xi - ch\alpha\xi + 1 & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases} \quad (6.4.24)$$

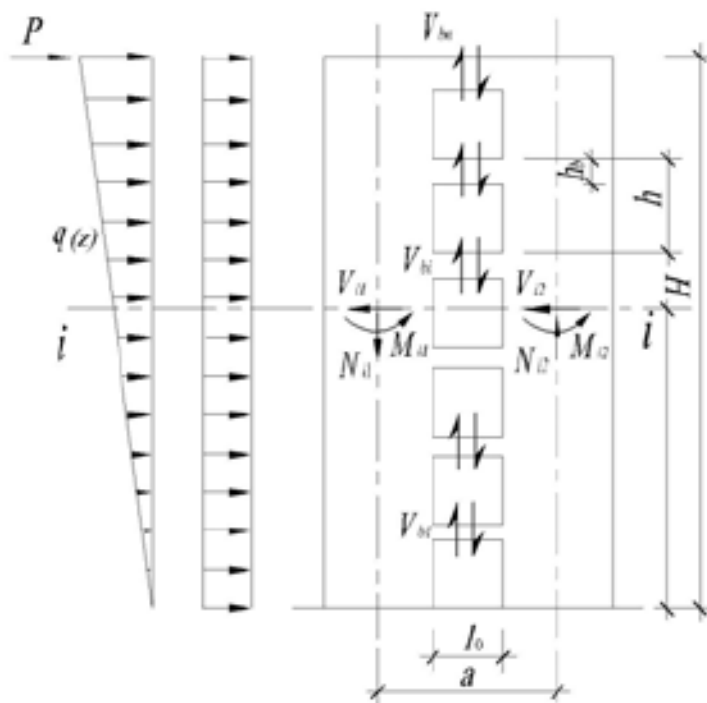
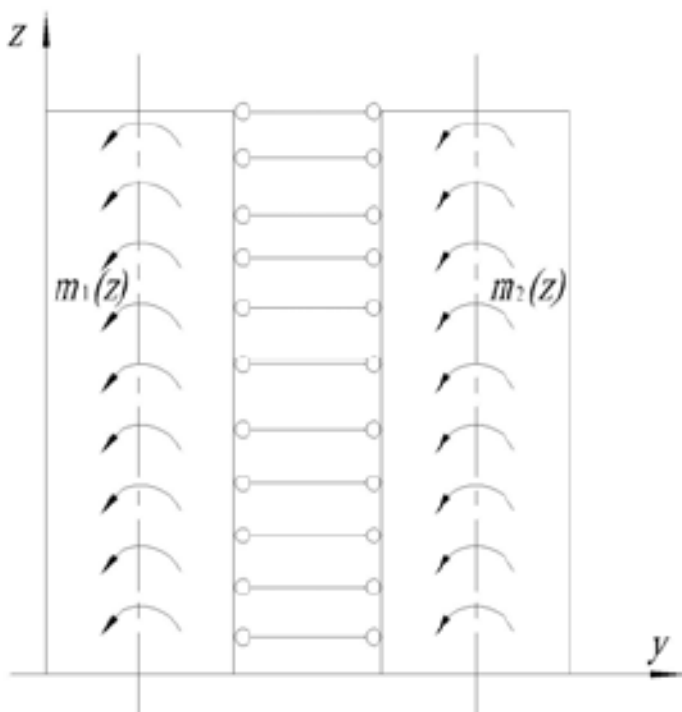
注：是否可以采用切口水平相对位移为零，进行求解？



6.4.4 内力计算

如将线约束弯矩 $m_1(\xi)$ 、 $m_2(\xi)$ 分别施加在两墙肢上，则刚结连杆可变换成铰结连杆（此处忽略了 $\tau(\xi)$ 对墙肢轴力的影响）。

铰结连杆只能保证两墙肢位移相等并传递轴力，即两墙肢独立工作，可按独立悬臂梁分析；其整体工作通过约束弯矩考虑。





1、连梁内力

连续连杆的线约束弯矩为

$$m(\xi) = \Phi(\xi) \frac{\alpha_1^2}{\alpha^2} V_0$$

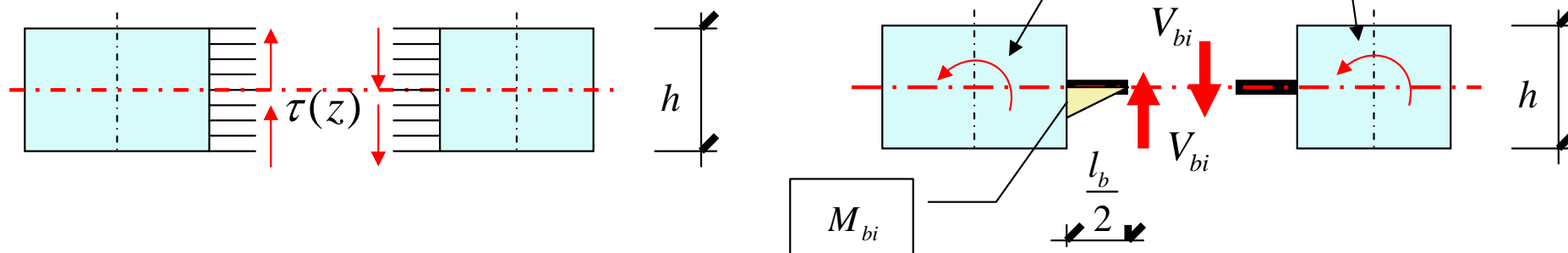
第*i*层连梁的约束弯矩为

$$m_i = m(\xi)h = \Phi(\xi) \frac{\alpha_1^2}{\alpha^2} V_0 h$$

第*i*层连梁的剪力和梁端弯矩为

$$V_{bi} = \frac{m_i}{a}$$

$$M_{bi} = V_{bi} \frac{l_b}{\gamma}$$



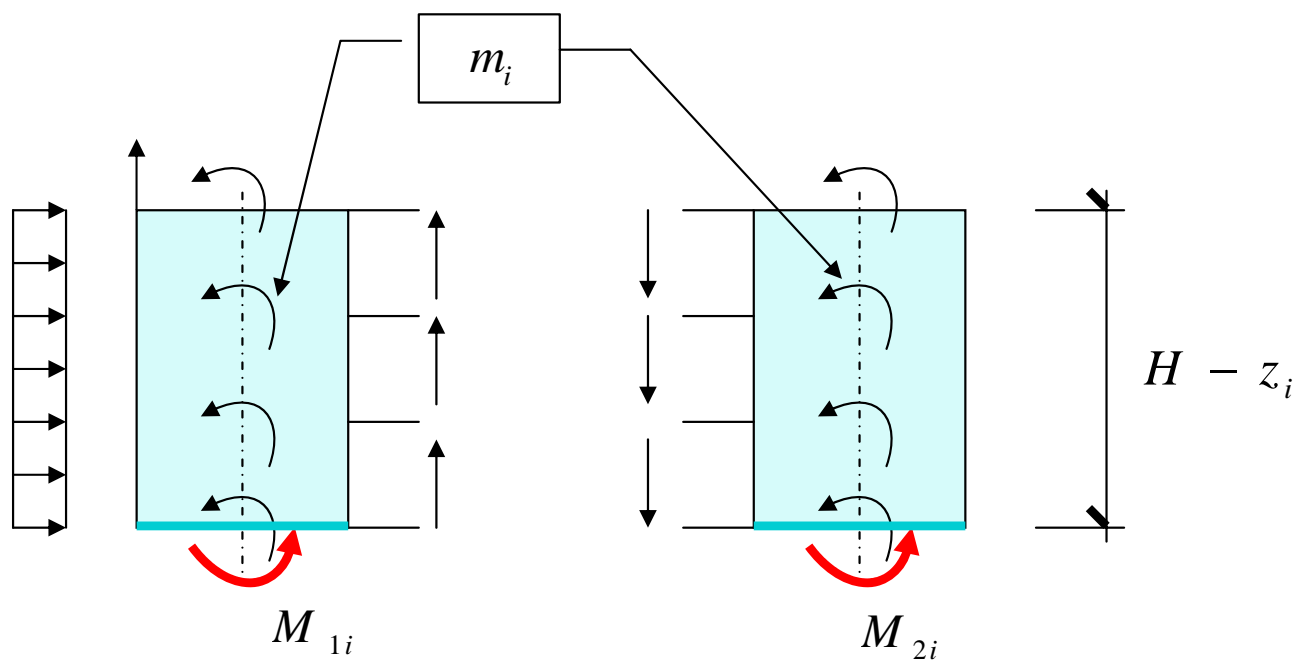


2、墙肢内力

第*i*层两墙肢的弯矩分别为

$$M_{1i} = \frac{I_1}{I_1 + I_2} \left[M_p(\xi) - \sum_i^n m_i \right]$$

$$M_{2i} = \frac{I_2}{I_1 + I_2} \left[M_p(\xi) - \sum_i^n m_i \right]$$

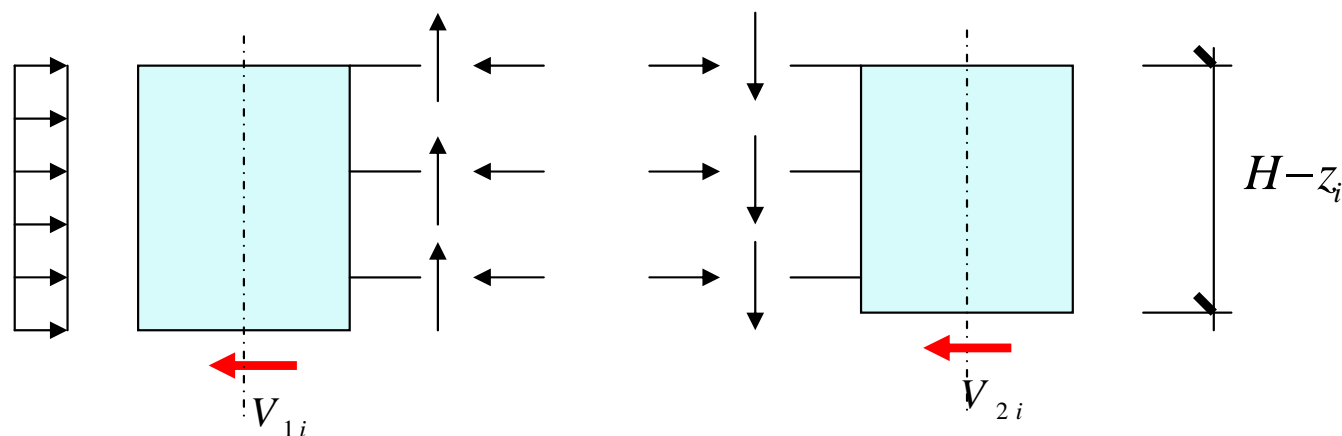




第*i*层两墙肢的剪力近似为

$$V_{i1} = \frac{I'_1}{I'_1 + I'_2} V_p(\xi)$$

$$V_{i2} = \frac{I'_2}{I'_1 + I'_2} V_p(\xi)$$



I'_1 , I'_2 ——分别为两墙肢的折算惯性矩, 当取 $G=0.4E$ 时, 可按下式计算

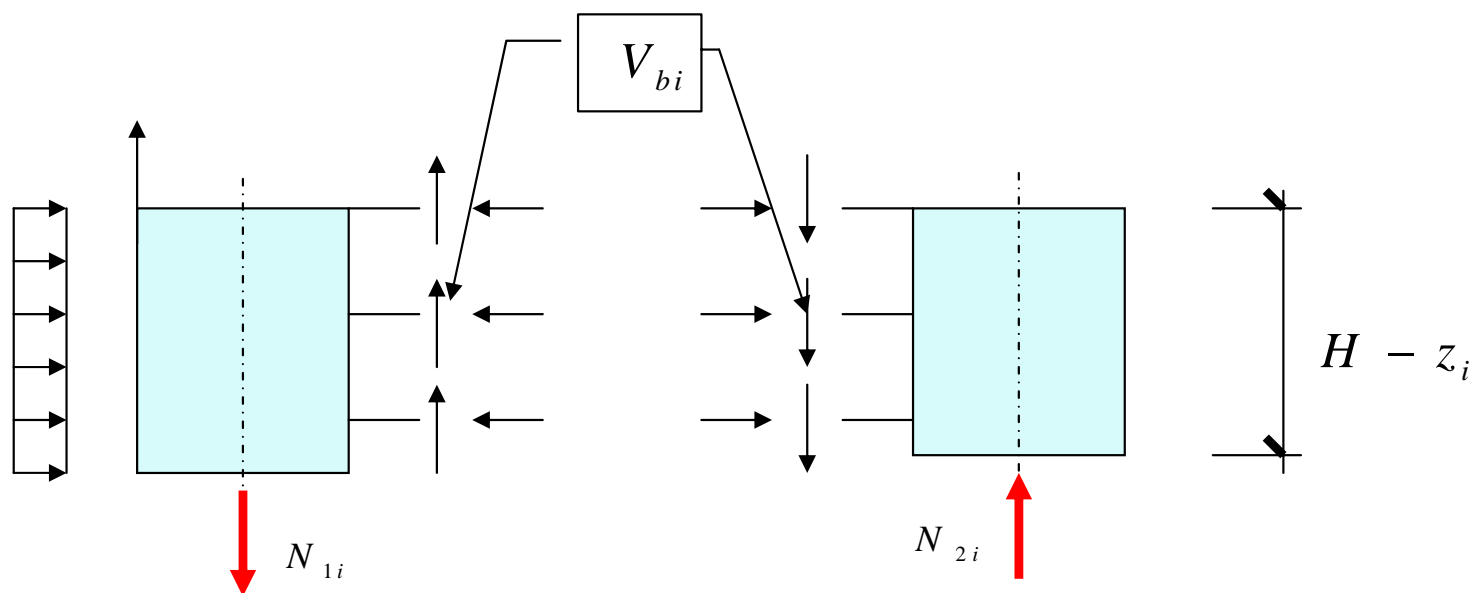
$$I'_j = \frac{I_j}{1 + \frac{30\mu I_j}{A_j h^2}} \quad (j=1, 2)$$



第*i*层第*j*墙肢的轴力为

$$N_{ij} = \sum_i^n V_{bi} \quad (j=1, 2)$$

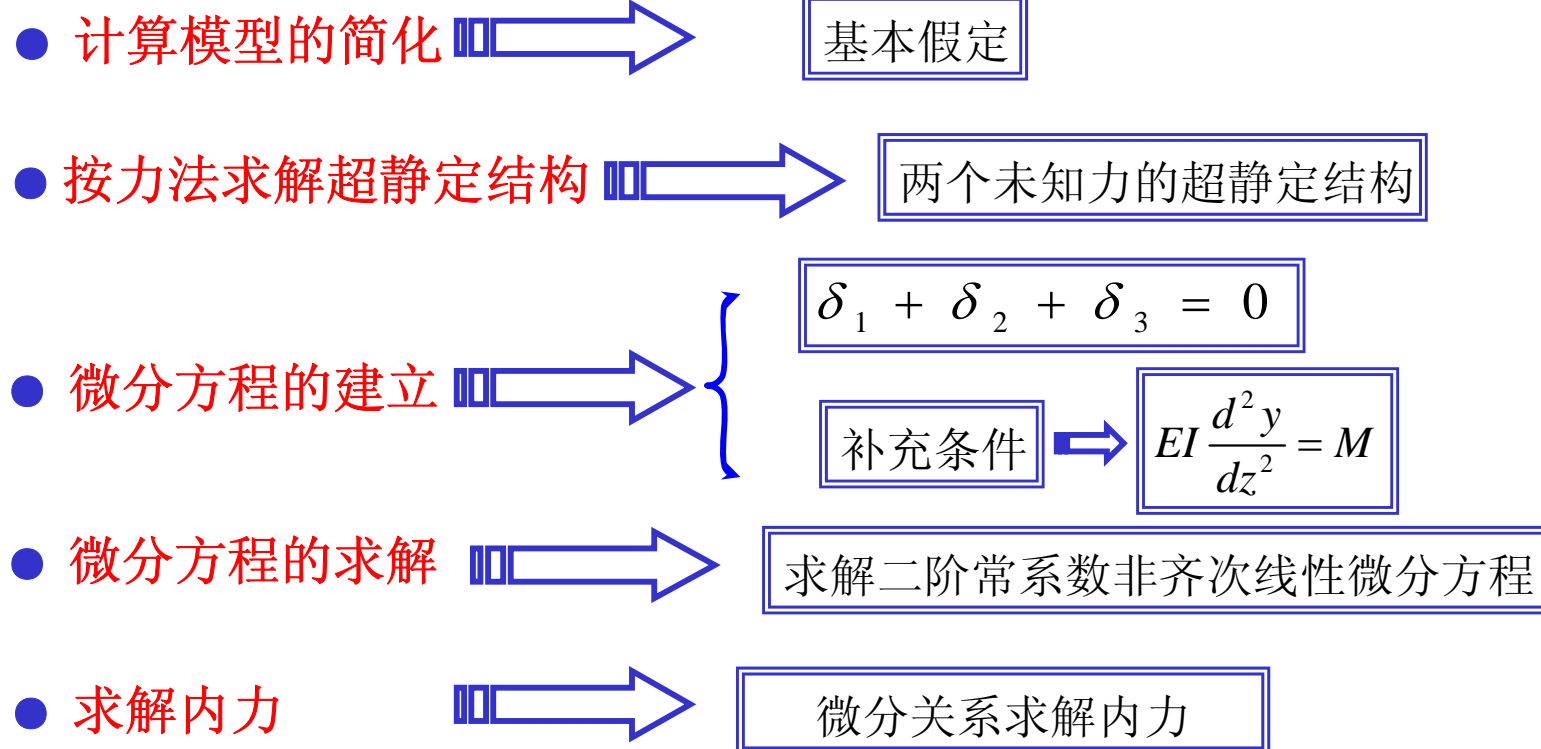
$$N_{i1} = -N_{i2}$$





问题：连梁连续化法的基本思路？

双肢墙连梁连续化分析法





6.4.5 位移和等效刚度

1、位移（考虑墙肢弯曲变形和剪切变形的影响）

$$y = y_M + y_V$$

$$y_M = \frac{l}{E(I_1 + I_2)} \left[\int_0^z \int_0^z M_p(z) dz dz - \int_0^z \int_0^z \int_z^H a \tau(z) dz dz dz \right]$$

根据墙肢剪力与剪切变形的关系

$$G(A_1 + A_2) \frac{dy_V}{dz} = \mu V_p(z)$$
$$y_V = \frac{\mu}{G(A_1 + A_2)} \int_0^z V_p(z) dz$$



$$y = \begin{cases} \frac{V_0 H^3}{2E(I_1 + I_2)} \xi^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \xi + \frac{1}{12} \xi^2 \right) - \frac{\tau V_0 H^3}{E(I_1 + I_2)} \left[\frac{\xi(\xi - 2)}{2\alpha^2} - \frac{ch\alpha\xi - 1}{\alpha^4 ch\alpha} \right. \\ \left. + \frac{sh\alpha - sh\alpha(-\xi)}{\alpha^3 ch\alpha} + \xi^2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6} \xi + \frac{1}{24} \xi^2 \right) \right] + \frac{\mu V_0 H}{G(A_1 + A_2)} \left(\xi - \frac{1}{2} \xi^2 \right) & \text{(均布荷载)} \\ \frac{V_0 H^3}{3E(I_1 + I_2)} \xi^2 \left(1 - \frac{1}{2} \xi + \frac{1}{20} \xi^3 \right) - \frac{\tau V_0 H^3}{E(I_1 + I_2)} \left\{ \left(1 - \frac{2}{\alpha^2} \right) \left[\frac{1}{2} \xi^2 - \frac{1}{6} \xi^5 - \frac{1}{\alpha^2} \xi + \frac{sh\alpha - sh\alpha(-\xi)}{\alpha^3 ch\alpha} \right] \right. \\ \left. - \frac{2}{\alpha^4} \frac{ch\alpha\xi - 1}{ch\alpha} + \frac{1}{\alpha^2} \xi^2 - \frac{1}{6} \xi^3 + \frac{1}{60} \xi^5 \right\} + \frac{\mu V_0 H}{G(A_1 + A_2)} \left(\xi - \frac{1}{3} \xi^3 \right) & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{V_0 H^3}{3E(I_1 + I_2)} \left\{ \frac{1}{2} (1 - \tau) (3\xi^2 - \xi^3) - \frac{\tau}{\alpha^3} \cdot \frac{3}{ch\alpha} [sh\alpha(1 - \xi) + \xi\alpha ch\alpha - sh\alpha] \right\} \\ + \frac{\mu V_0 H}{G(A_1 + A_2)} & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$

当 $\xi = 1$ 时, 由式 (6.4.35) 可求得双肢墙的顶点位移为

$$u = \begin{cases} \frac{V_0 H^3}{8E(I_1 + I_2)} [1 + \tau(\psi_a - 1) + 4\gamma^2] & \text{(均布荷载)} \\ \frac{11}{60} \cdot \frac{V_0 H^3}{E(I_1 + I_2)} [1 + \tau(\psi_a - 1) + 3.64\gamma^2] & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{V_0 H^3}{3E(I_1 + I_2)} [1 + \tau(\psi_a - 1) + 3\gamma^2] & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases} \quad (6.4.36)$$



2、等效刚度

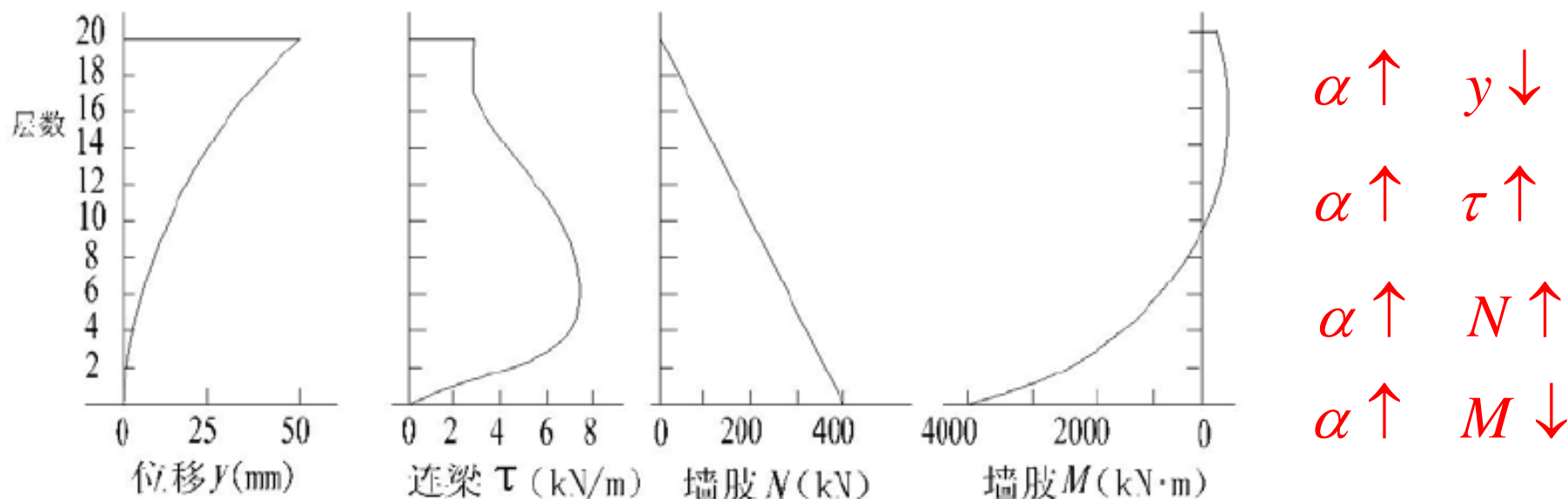
将式 (6.4.36) 代入式 (6.2.1) 可得双肢墙的等效刚度表达式为

$$EI_{eq} = \begin{cases} \frac{E(I_1 + I_2)}{1 + \tau(\psi_a - 1) + 4\gamma^2} & \text{(均布荷载)} \\ \frac{E(I_1 + I_2)}{1 + \tau(\psi_a - 1) + 3.64\gamma^2} & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{E(I_1 + I_2)}{1 + \tau(\psi_a - 1) + 3\gamma^2} & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$



6.4.6 双肢墙内力和位移分布特点:

双肢墙内力和位移分布具有下述特点:



(1) 双肢墙的侧移曲线呈弯曲线型。 α 值越大，墙的刚度越大，位移越小。

(2) 连梁的剪力分布具有明显的特点。剪力最大（也是弯矩最大）的连梁不在底层，其位置和大小将随 α 值而改变。当 α 值较大时，连梁剪力加大，剪力最大的连梁位置向下移。

(3) 墙肢的轴力与 α 值有关。当 α 值增大时，连梁剪力增大，则墙肢轴力也加大。

(4) 墙肢弯矩也与 α 值有关。因为 $M_{i1} + M_{i2} + N_{ij} \cdot a = M_p(z)$ ， α 值增大，墙肢轴力增大，则墙肢弯矩减小。

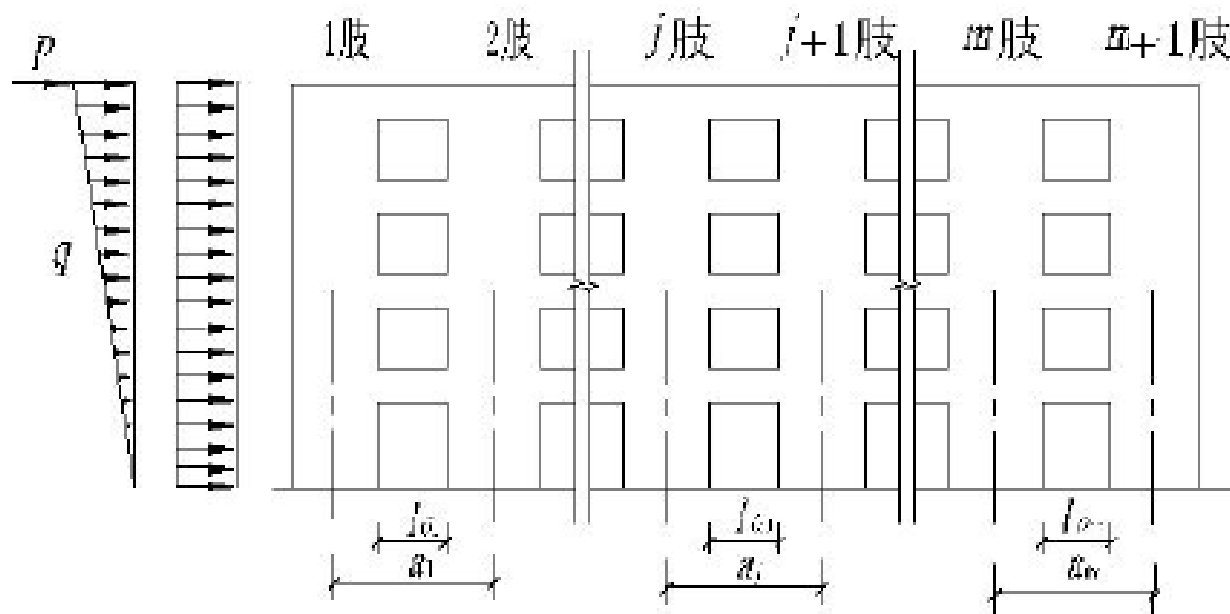


6.5 多肢墙的内力和位移计算



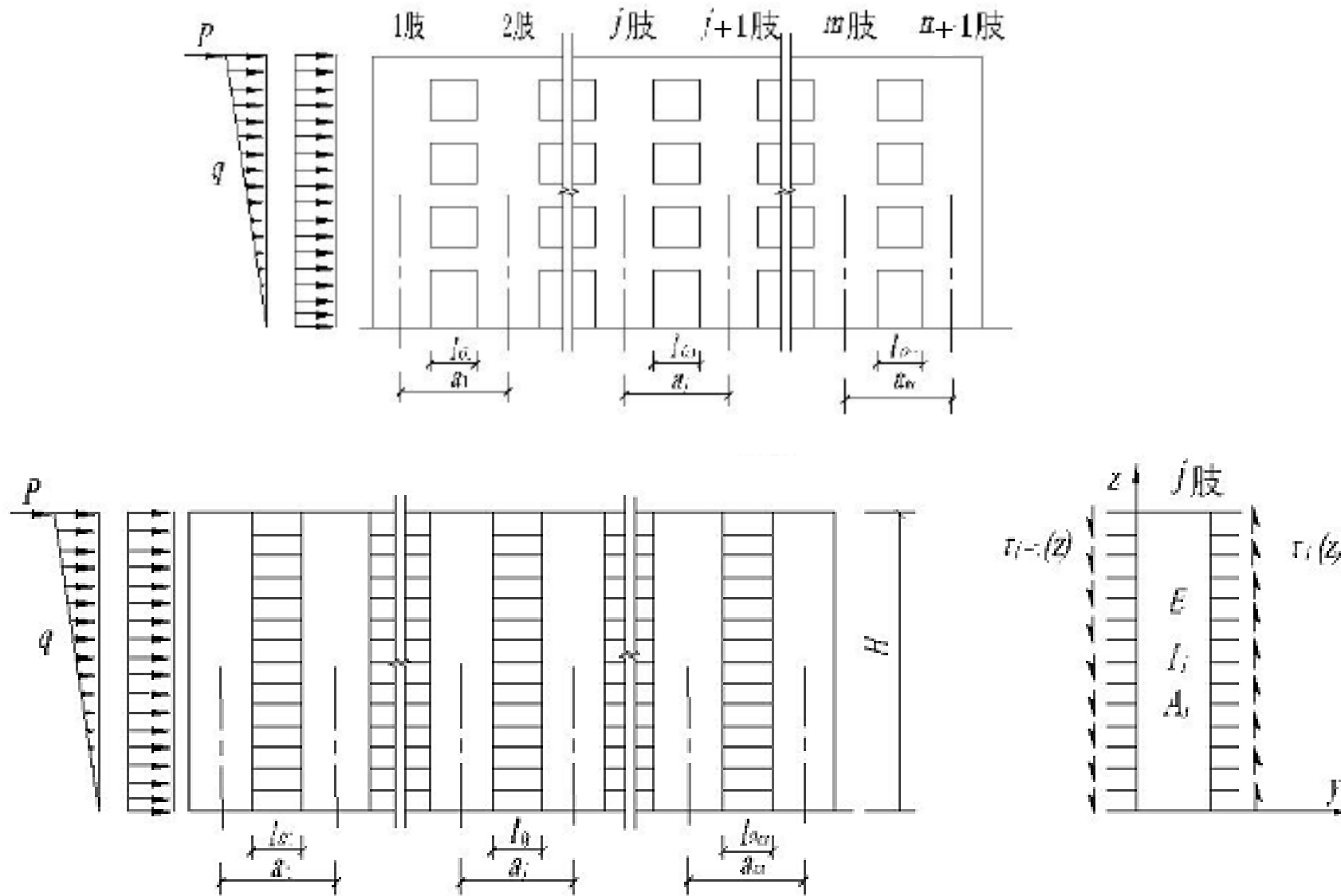
问题：多肢墙与双肢墙分析方法的异同？

多肢墙分析方法的基本假定和基本体系的取法均与双肢墙类似；其微分方程表达式与双肢墙相同，其解与双肢墙的表达式完全一样，只是式中有关参数应按多肢墙计算。





6.5.1 微分方程的建立和求解





计算步骤:

- 1) m 排连梁, $m+1$ 肢墙;
- 2) 未知量 m 个 $+1$ (墙肢曲率): 各列连梁中点切口处的剪力 (或约束弯矩);
- 3) 变形协调条件: 各组连梁中点切口处的相对位移为零;
- 4) 建立 m 组协调方程, 考虑墙肢弯矩与曲率之间的关系, 可联立微分方程组求解。
- 5) 为简化计算, 可将多肢墙合并在一起近似求解, 即将为微分方程相叠加后可建立与双肢墙完全相同的微分方程, 其解与双肢墙的表达式完全一样, 只是式中有关参数应按多肢墙计算;
- 5) 根据上述计算可求得总约束弯矩, 再将总约束弯矩在各墙肢间进行分配, 就可求得多肢墙的内力和位移。
- 6) 总约束弯矩的分配。



注：多肢墙的计算参数

$$D_j = \frac{2I_{bj}a_j^2}{l_{bj}^3}$$

$$S_j = \frac{a_j A_j A_{j+1}}{A_j + A_{j+1}}$$

$$\alpha_1^2 = \frac{6H^2}{m+1} \sum_{j=1}^m D_j$$
$$h \sum_{j=1}^m I_j$$

$$\alpha^2 = \alpha_1^2 + \frac{6H^2}{h} \sum_{j=1}^m \left[\frac{D_j}{a_j} \left(\frac{l}{S_j} \eta_j - \frac{l}{A_j a_{j-1}} \eta_{j-1} - \frac{l}{A_{j+1} a_{j+1}} \eta_{j+1} \right) \right]$$

注：多肢墙的约束弯矩分配系数

$$m(z) = \sum_{j=1}^m m_j(z)$$

$$\eta_j = \frac{m_j(z)}{m(z)}$$



6.5.2 约束弯矩分配系数

1、约束弯矩分配系数

第*i*层（对应于标高*z*或相对高度*ξ*）的总约束弯矩为

$$m_i(\xi) = \Phi(\xi) \frac{\alpha_1^2}{\alpha^2} V_0 h$$

或改写为

τ

$$m_i(\xi) = \Phi(\xi) \tau V_0 h$$

τ 为墙肢轴向变形影响系数，其表达式为

$$\tau = \frac{\alpha_1^2}{\alpha^2} = l / \left\{ l + \frac{\sum_{j=1}^{m+1} I_j}{\sum_{j=1}^m D_j} \sum_{j=1}^m \left[\frac{D_j}{a_j} \left(\frac{l}{S_j} \eta_j - \frac{l}{A_j a_{j-1}} \eta_{j-1} - \frac{l}{A_{j+1} a_{j+1}} \eta_{j+1} \right) \right] \right\}$$

轴向变形影响较大时， τ 较小；不考虑墙轴向变形时， $\tau = 1$ 。多肢墙轴向变形影响一般较小。为简化计算，一般规定为，当为3~4肢时取0.8；5~7肢时取0.85；8肢以上取0.9。



每层总约束弯矩按一定的比例分配到各列连梁，则第*i*层*j*列连梁的约束弯矩为

$$m_{ij}(\xi) = \eta_j m_i(\xi)$$

关键是确定约束弯矩分配系数

2、影响因素

1) 各列连梁的刚度系数 D_j

连梁的刚度系数表示连梁两端各产生转角时，两端所需施加的力矩之和，故 D_j 值越大的连梁分配到的弯矩也越大，亦即约束弯矩分配系数 η_j 也越大。



2) 多肢墙的整体工作系数 α

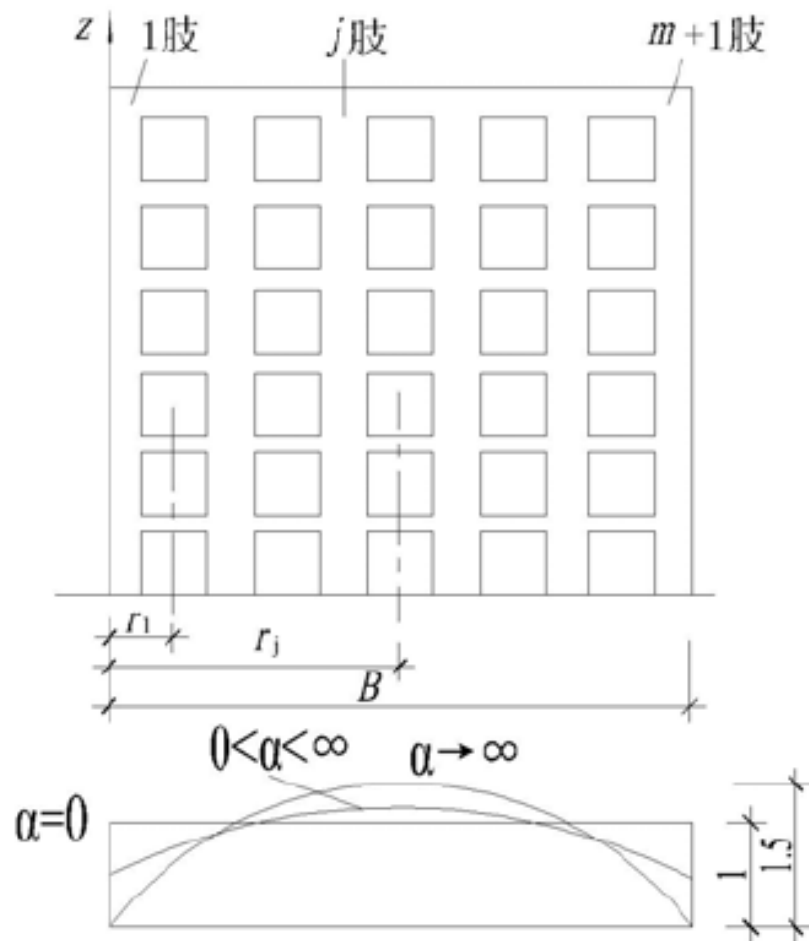


图 6.5.2 多肢墙墙肢剪应力分布图

对整体性很好的墙，即 $\alpha \rightarrow \infty$ ，剪力墙截面的剪应力呈抛物线分布，两边缘为零，中间部位约为平均剪应力的1.5倍；

对整体性很差的墙，即 $\alpha \rightarrow 0$ ，截面的剪应力近似均匀分布；

当整体性介于两者之间时，即 $0 < \alpha < \infty$ ，剪力墙截面剪应力与其平均值之比，两边缘处为1与0之间，中间处为1与1.5之间。



由剪应力互等定律，各列连梁跨中剪应力也符合上述分布，则各列连梁的约束弯矩与其跨中剪应力成正比，剪应力较大的连梁分配到的约束弯矩也大， η_j 相应较大。

由上述分析可知， α 值越小，各列连梁约束弯矩分布越平缓； α 值越大，整体性越强，各列连梁约束弯矩分布呈现两边小中央大的趋势越明显。

3) 连梁的位置

水平方向上，由前述可知，靠近中央部位的连梁跨中剪应力较大，而两侧连梁跨中剪应力较小。

竖直方向上，底部连梁跨中剪应力沿水平方向变化较平缓，上部连梁跨中剪应力呈中央大两侧小的趋势较明显。



3、分配系数的计算

约束弯矩分配系数是连梁刚度系数 D_j 、连梁位置及剪力墙整体工作系数 α 的函数，可按下列经验公式计算

$$\eta_j = \frac{D_j \varphi_j}{\sum_{j=1}^m D_j \varphi_j}$$

φ_j ——为第 j 列连梁跨中剪应力与剪力墙截面平均剪应力的比值，

$$\varphi_j = \frac{1}{1 + \frac{\alpha \xi}{2}} \left[1 + 3\alpha \xi \frac{r_j}{B} \left(1 - \frac{r_j}{B} \right) \right]$$



6.5.3 内力计算

1、 连梁内力

第 i 层第 j 列连梁的剪力和梁端弯矩分别为

$$V_{bij} = m_{ij}(\xi) / a_j$$

$$M_{bij} = V_{bij} \frac{l_{bj}}{2}$$



2、墙肢内力

第*i*层第*j*墙肢的弯矩为

$$M_{wij} = \frac{I_j}{\sum I_j} \left[M_p(\xi) - \sum_i^n m_i(\xi) \right]$$

第*i*层第*j*墙肢的剪力近似为

$$V_{wij} = \frac{I'_j}{\sum I'_j} V_p(\xi)$$

第*i*层第 1、*j*、*m* + 1 墙肢的轴力分别为

$$N_{wi1} = \sum_i^n V_{bi1}$$

$$N_{wij} = \sum_i^n \left[V_{bij} - V_{bi(j-1)} \right]$$

$$N_{wi(m+1)} = \sum_{i-1}^n V_{bim}$$



6.5.4 位移和等效刚度

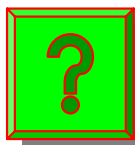
多肢墙须考虑弯矩和剪切变形的影响，计算同双肢墙，则顶点侧移为。

$$u = \begin{cases} \frac{V_0 H^3}{8E \sum I_j} [1 + \tau(\psi_a - 1) + 4\gamma^2] & \text{(均布荷载)} \\ \frac{11}{60} \cdot \frac{V_0 H^3}{E \sum I_j} [1 + \tau(\psi_a - 1) + 3.64\gamma^2] & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{V_0 H^3}{3E \sum I_j} [1 + \tau(\psi_a - 1) + 3\gamma^2] & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$

$$E_c I_{eq} = \begin{cases} E_c \sum I_j / [1 + \tau(\psi_a - 1) + 4\gamma^2] & \text{(均布荷载)} \\ E_c \sum I_j / [1 + \tau(\psi_a - 1) + 3.64\gamma^2] & \text{(倒三角形分布荷载)} \\ E_c \sum I_j / [1 + \tau(\psi_a - 1) + 3\gamma^2] & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$

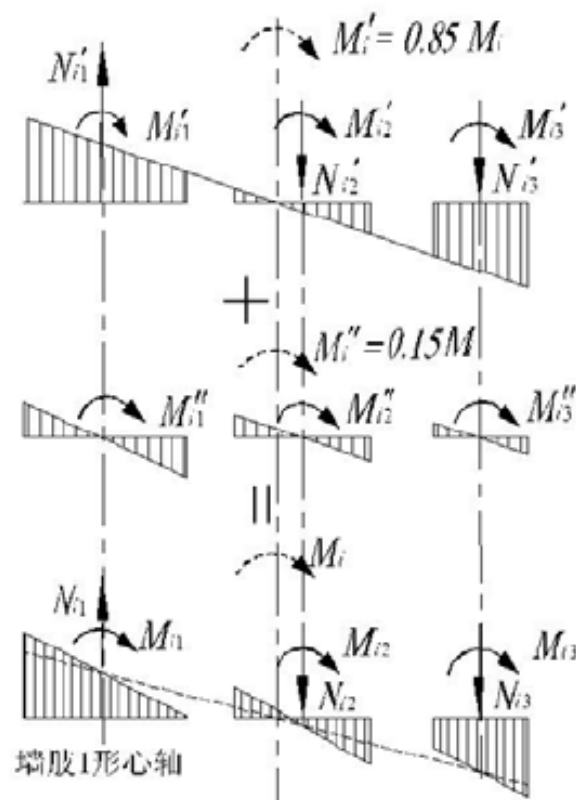
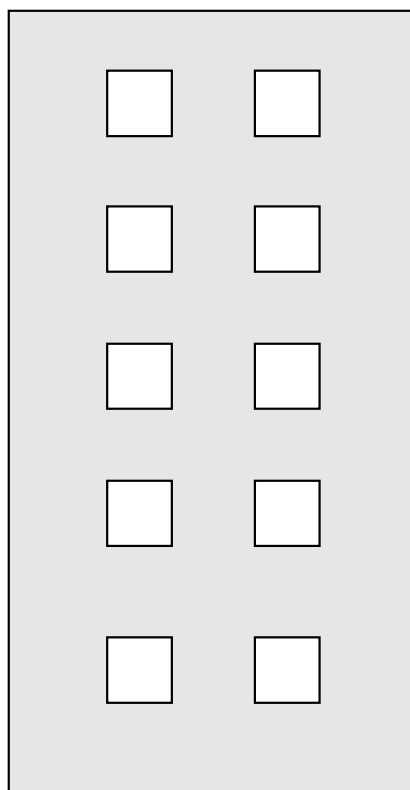


6.6 整体小开口墙的内力和位移计算



问题：整体小开口墙的内力如何计算？

水平荷载下，整体小开口墙同整截面墙一样，仍可按材料力学的有关公式进行内力和位移计算，但其值要进行一定的修正。



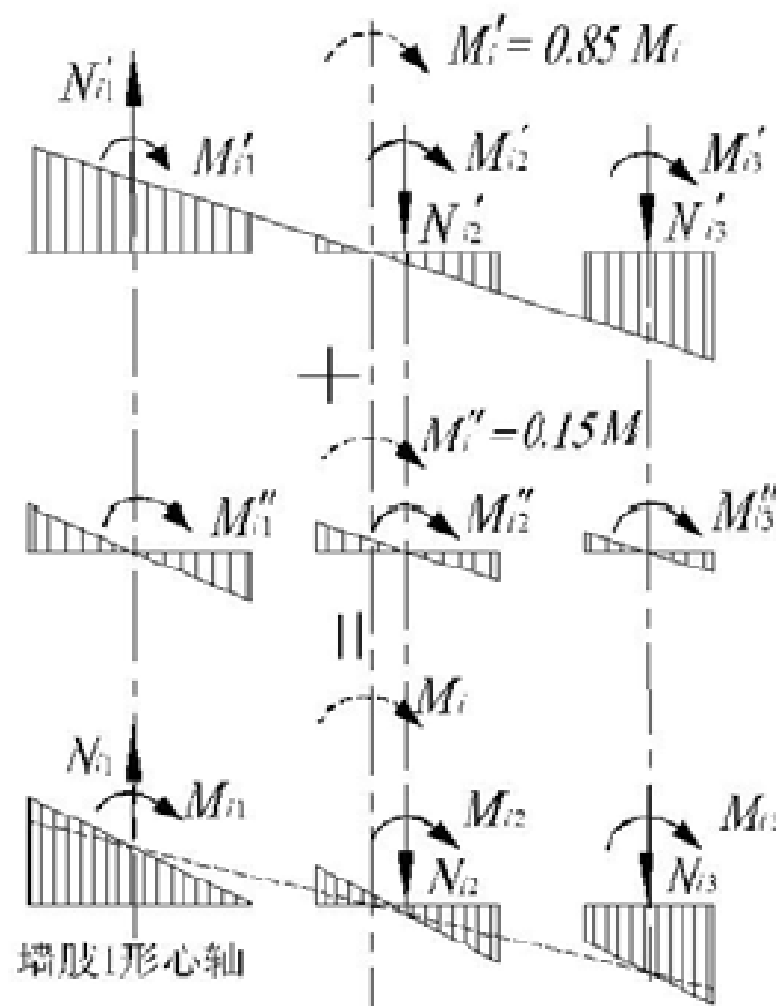
6.6.1 整体弯曲和局部弯曲分析

1、墙肢的弯矩

墙肢截面上的正应力可看作由整体弯曲应力和局部弯曲应力组成。

若整体弯曲应力的弯矩占总弯矩 $M_p(\xi)$ 的百分比为 k ，局部弯曲应力的弯矩占总弯矩 $M_p(\xi)$ 的百分比为 $(1-k)$ ，则可将墙肢的弯矩写为如下形式：

$$M_{ij} = kM_p(\xi) \frac{I_j}{I} + (1-k)M_p(\xi) \frac{I_j}{\sum I_j}$$





2、整体弯曲系数 k

由联肢墙墙肢弯矩计算可得

$$kM_p(\xi)\frac{I_j}{I} + (1-k)M_p(\xi)\frac{I_j}{\sum I_j} = \frac{I_j}{\sum I_j} \left[M_p(\xi) - \sum_i^n m_i(\xi) \right]$$



$$k = \frac{V_0 H}{M_p(\xi)} \int_{\xi}^1 \phi(\xi) d\xi$$

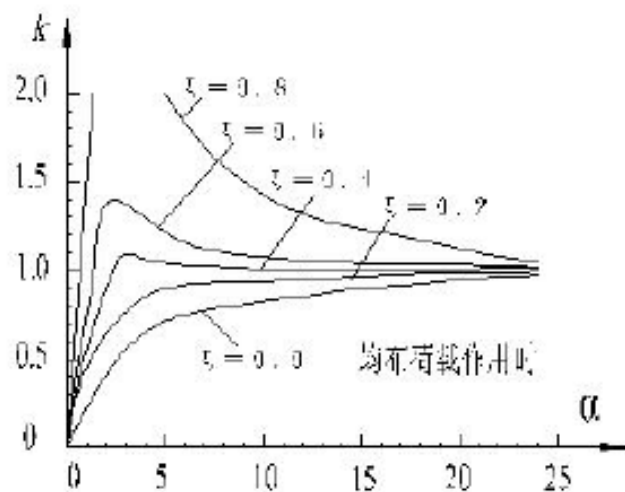


$$k = \begin{cases} \frac{2}{(1-\xi)^2} \left[\frac{1}{\alpha^2} + \frac{1}{2}(1-\xi)^2 - \frac{sh\alpha(1-\xi)}{\alpha ch\alpha} - \frac{ch\alpha\xi}{\alpha^2 ch\alpha} \right] & \text{(均布荷载)} \\ \frac{3}{(1-\xi)^2(2+\xi)} \left\{ \left(\frac{2}{\alpha^2} - 1 \right) \left[\frac{sh\alpha(1-\xi)}{\alpha ch\alpha} + \xi \right] - \frac{2ch\alpha\xi}{\alpha^2 ch\alpha} + \frac{1}{3}\xi^3 + \frac{2}{3} \right\} & \text{(倒三角形荷载)} \\ \frac{1}{(1-\xi)} \left[1 - \xi - \frac{sh\alpha(1-\xi)}{\alpha ch\alpha} \right] & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$

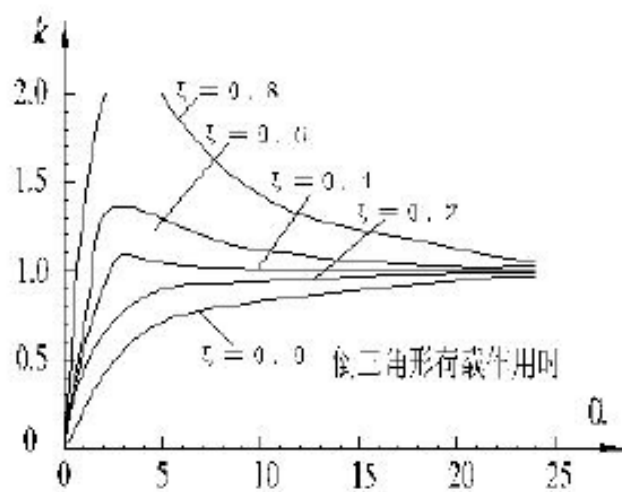


影响k值的主要因素为整体工作系数 α ：

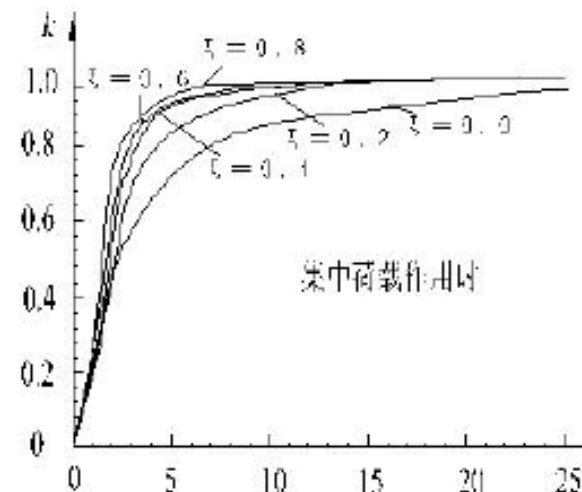
- 1) α 较小时，k值很小，说明墙肢的局部弯曲应力较大。因 α 小，表示连梁刚度小，整体性较差，墙肢弯矩大而轴力小。
- 2) α 增大时，k值也增大，说明连梁刚度增大，对墙肢的约束弯矩也增大，墙肢中弯矩减小而轴力加大。
- 3) $\alpha > 10$ 时，k趋近于1，表示墙肢弯矩以整体弯曲成分为主。



(a)



(b)



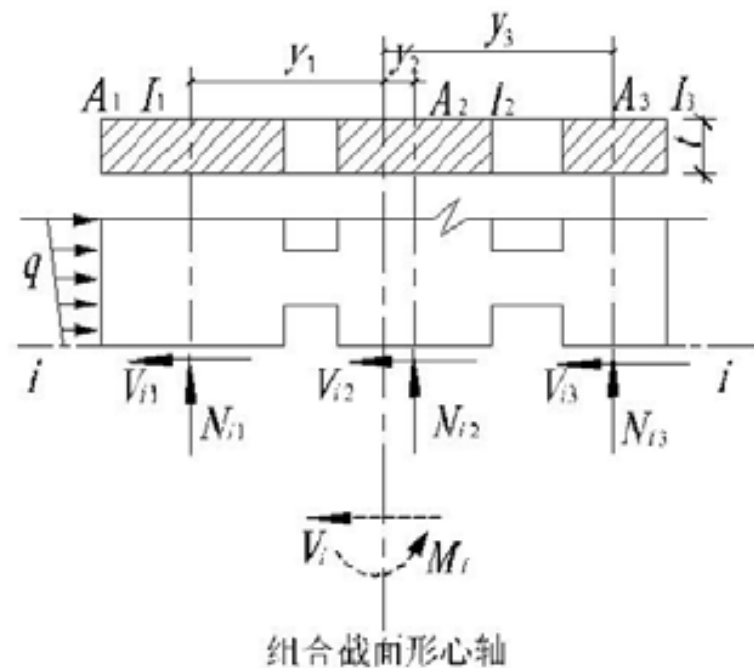
(c)



6.6.2 整体小开口墙内力和位移的实用计算

1、内力

先将整体小开口墙视为上端自由、下端固定的竖向悬臂构件，计算出标高 z 处（第 i 楼层）的总弯矩 M_i 和总剪力 V_i ，再计算各墙肢的内力。



1) 墙肢的弯矩

$$k = 0.85$$

$$M_{ij} = M'_i + M''_i = \left(0.85 \frac{I_j}{I} + 0.15 \frac{I_j}{\sum I_j} \right) M_i$$



2) 墙肢的剪力

$$V_{ij} = \frac{V_{wi}}{2} \left(\frac{A_j}{\sum A_j} + \frac{I_j}{\sum I_j} \right)$$

3) 墙肢的轴力

局部弯曲并不在各墙肢中产生轴力，墙肢的轴力等于整体弯曲在各墙肢中所产生正应力的合力，即

$$N_{ij} = \bar{\sigma}_{ij} A_j$$

$\bar{\sigma}_{ij}$ 为第 j 墙肢截面上正应力的平均值，等于该墙肢截面形心处的正应力，按下式计算

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{M'_i}{I} y_j = 0.85 \frac{M_i}{I} y_j$$

j 墙肢的轴力为

$$N_{ij} = 0.85 \frac{M_i}{I} y_j A_j$$

y_j 为第 j 墙肢形心轴至组合截面形心轴的距离。



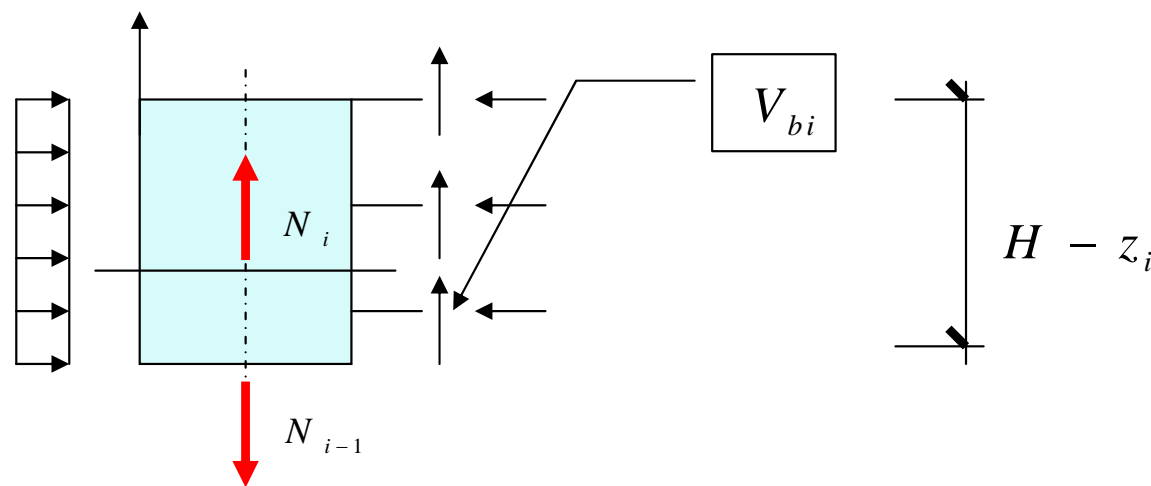
4) 连梁内力

墙肢内力求得后，可按下式计算连梁的弯矩和剪力

$$V_{bij} = N_{ij} - N_{(i-1)j}$$

$$M_{bij} = \frac{1}{2} l_{bj0} V_{bij}$$

式中 l_{bj0} 为连梁的净跨，即洞口的宽度。





2、位移和等效刚度

分析表明，由于洞口的削弱，整体小开口墙的位移比按材料力学计算的组合截面构件的位移增大20%，则顶点位移

$$u = \begin{cases} 1.2 \times \frac{V_0 H^3}{8EI} \left(1 + \frac{4\mu EI}{GAH^2} \right) & \text{(均布荷载)} \\ 1.2 \times \frac{11}{60} \cdot \frac{V_0 H^3}{EI} \left(1 + \frac{3.64\mu EI}{GAH^2} \right) & \text{(倒三角形荷载)} \\ 1.2 \times \frac{V_0 H^3}{3EI} \left(1 + \frac{3\mu EI}{GAH^2} \right) & \text{(顶点集中荷载)} \end{cases}$$

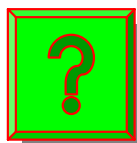
式中 A 为截面总面积，即 $A = \sum A_j$ 。

$$E_c I_{eq} = \frac{0.8 E_c I}{1 + \frac{9\mu I}{AH^2}}$$



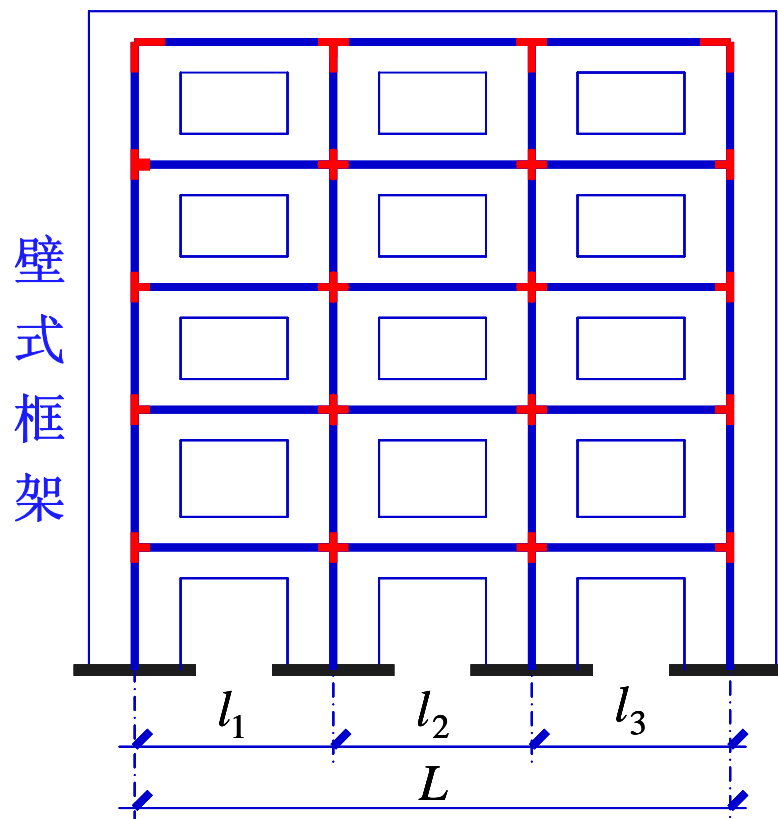
6.7 壁式框架的内力和位移计算

由于墙肢和连梁的截面高度较大，节点区也较大，计算时应将节点视为墙肢和连梁的刚域，按带刚域的框架进行分析。



问题：壁式框架与框架结构的主要区别？

- ✦ 梁柱杆端均有刚域，从而使杆件的刚度增大；
- ✦ 梁柱截面高度较大，需考虑杆件剪切变形的影响。





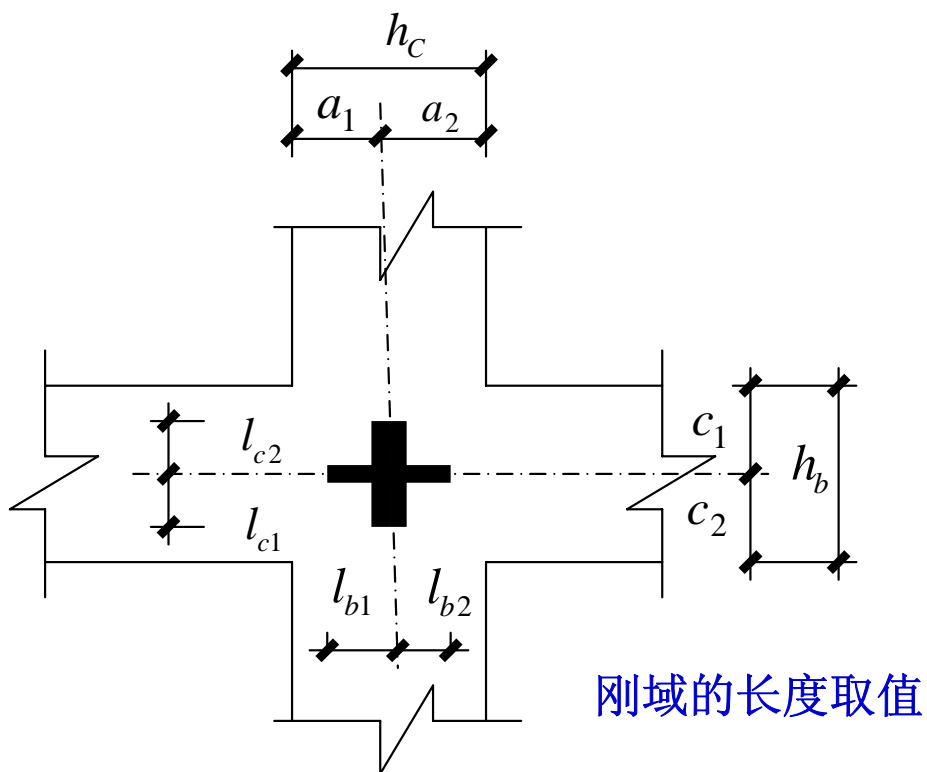
6.7.1 计算简图

$$l_{b1} = a_1 - 0.25h_b$$

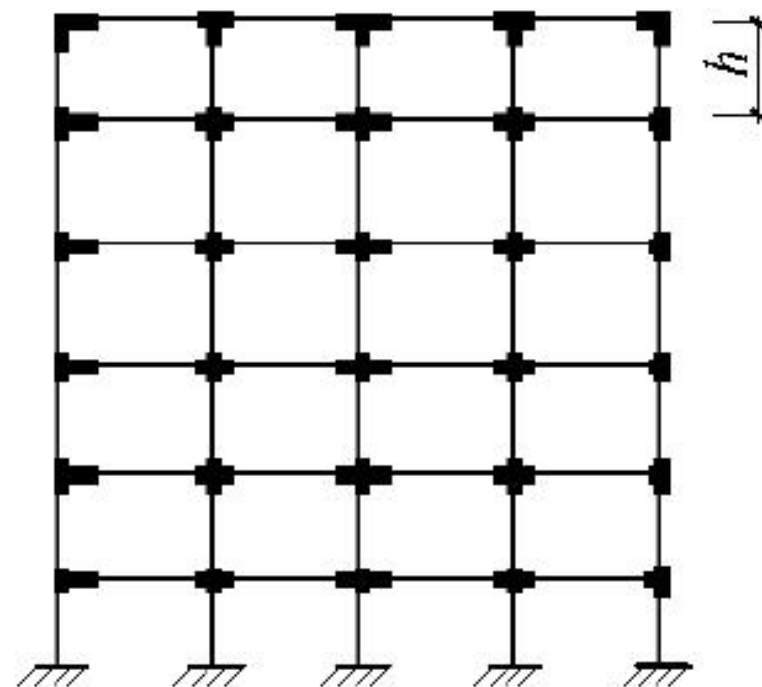
$$l_{c1} = c_1 - 0.25h_c$$

$$l_{b2} = a_2 - 0.25h_b$$

$$l_{c2} = c_2 - 0.25h_c$$



刚域的长度取值





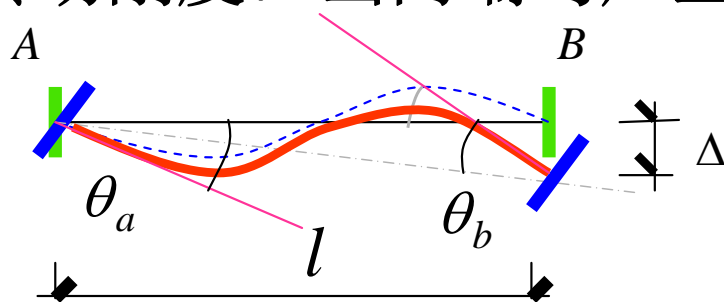
6.7.2 带刚域杆件的等效刚度

壁式框架与一般框架的区别:

- 1) 梁柱杆端均有刚域, 从而使杆件的刚度增大;
- 2) 梁柱截面高度较大, 需考虑杆件剪切变形的影响。

1、无刚域杆件且不考虑剪切变形的转动刚度

转动刚度: 当两端均产生单位转角 $\theta = 1$ 时, 所需的杆端弯矩。



$$\theta_a = \theta_b = 1$$

$$\Delta = 0$$

$$M_a = M_b = 4i\theta_a + 2i\theta_b - \frac{6i\Delta}{l} = 6i$$

转角位移方程

$$M_a = 4i\theta_a + 2i\theta_b - \frac{6i\Delta}{l}$$

$$M_b = 4i\theta_b + 2i\theta_a - \frac{6i\Delta}{l}$$

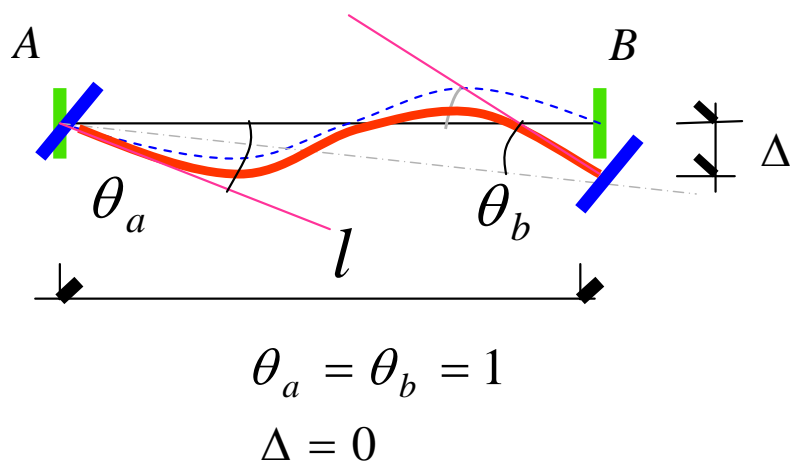
$$V = -\frac{6i\theta_a}{l} - \frac{6i\theta_b}{l} + \frac{12i\Delta}{l^2}$$

$$i = \frac{EI}{l}$$



2、无刚域杆件但考虑剪切变形的刚度

转动刚度：当两端均产生单位转角 $\theta = 1$ 时，所需的杆端弯矩。



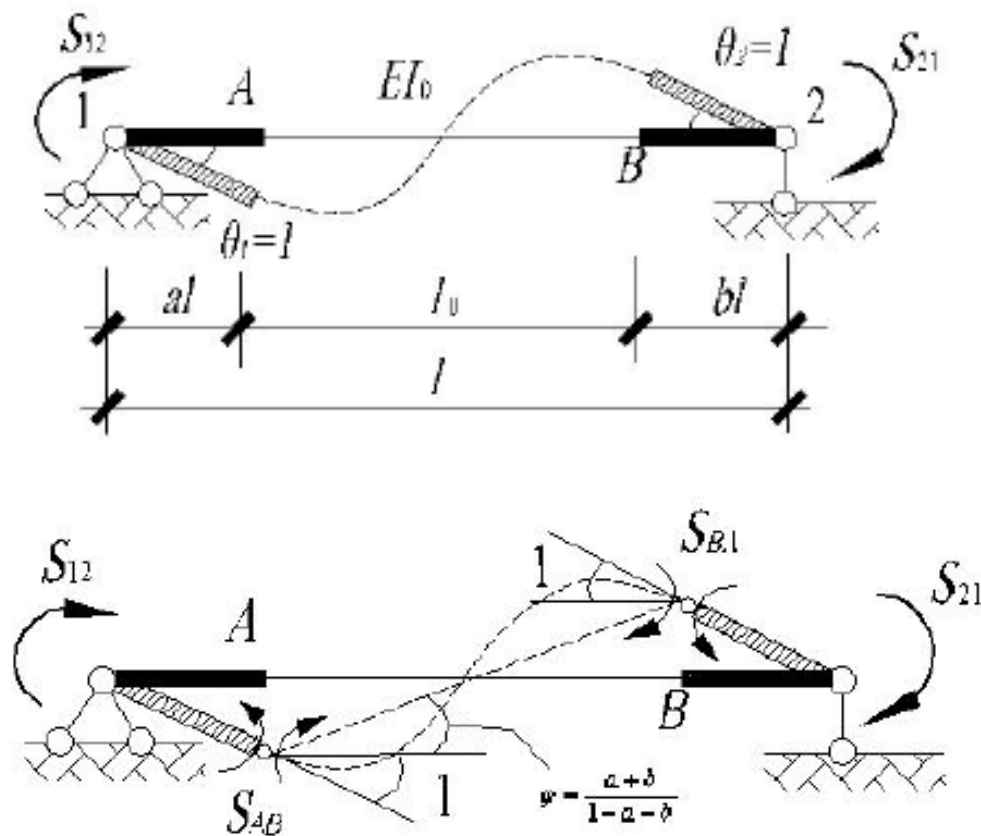
$$M_a = M_b = \frac{6i}{1 + \beta}$$

$$\beta = \frac{30\mu I_0}{Al^2}$$



3、带刚域杆件且考虑剪切变形的刚度

转动刚度：带刚域杆件，当两端均产生单位转角 $\theta = 1$ 时所需的杆端弯矩。



当杆端发生单位转角时，由于刚域作刚体转动，A、B两点除产生单位转角外，还产生线位移 al 和 bl ，使AB杆发生弦转角：

$$\varphi = \frac{al + bl}{l_0} = \frac{a + b}{1 - a - b}$$

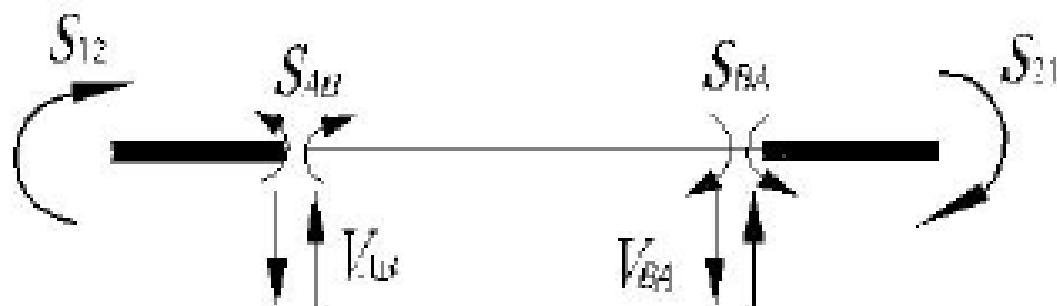


由结构力学可知，当AB杆件两端发生转角 $1+\varphi$ 时，考虑杆件剪切变形后的杆端弯矩为：

$$S_{AB} = (1 + \varphi) \frac{6i}{1 + \beta} \quad \longrightarrow \quad S_{AB} = S_{BA} = \frac{6EI_0}{l} \cdot \frac{1}{(1 - a - b)^2 (1 + \beta)}$$

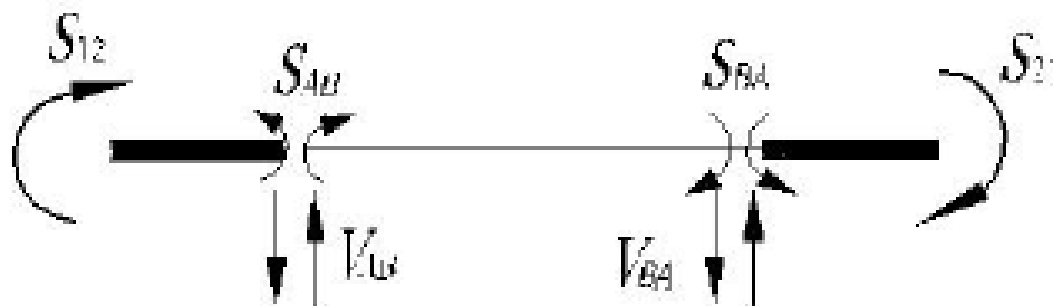
AB杆件相应的杆端剪力为

$$V_{AB} = V_{BA} = \frac{12EI_0}{l^2} \frac{1}{(1 - a - b)^3 (1 + \beta)}$$





根据刚域段的平衡条件，可得杆端1、2的弯矩，即杆端的转动刚度系数：



$$S_{12} = S_{AB} + V_{AB} \cdot al$$



$$S_{12} = \frac{6EI_0}{l} \frac{1+a-b}{(1-a-b)^3(1+\beta)}$$

$$S_{21} = \frac{6EI_0}{l} \frac{1-a+b}{(1-a-b)^3(1+\beta)}$$

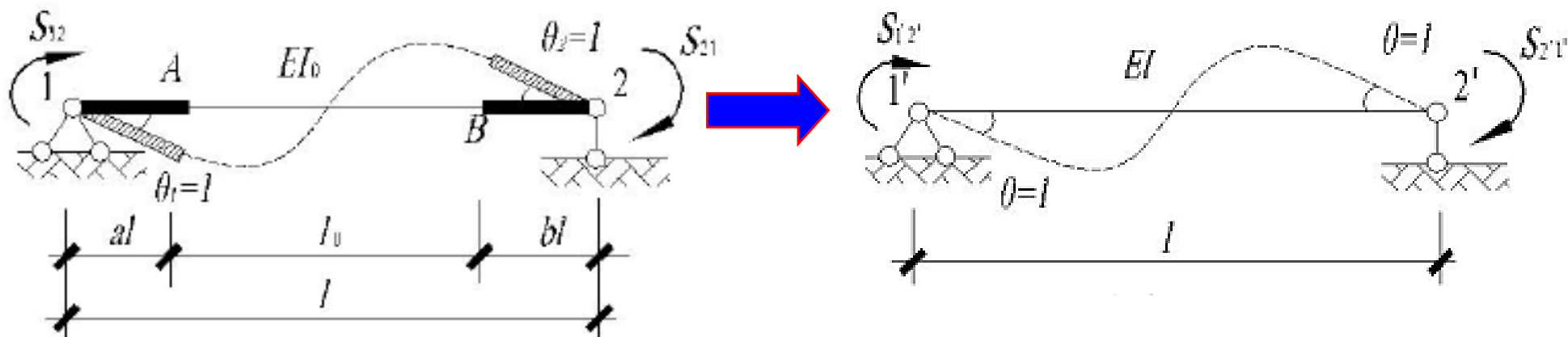
杆端的约束弯矩或转动刚度：

$$S = S_{12} + S_{21} = \frac{12EI_0}{l} \frac{1}{(1-a-b)^3(1+\beta)}$$



4、带刚域杆件的等效刚度

为简化计算，可将带刚域杆件用一个具有相同长度 l 的等截面受弯构件来代替，使两者具有相同的转动刚度，即



$$\frac{12EI}{l} = \frac{12EI_0}{l} \frac{1}{(1-a-b)^3(1+\beta)}$$

整理后可求得带刚域杆件的等效刚度为

$$EI = EI_0 \eta_v \left(\frac{l}{l_0}\right)^3$$

$\left(\frac{l}{l_0}\right)^3$ ——考虑刚域影响对杆件刚度的提高系数；

η_v ——考虑剪切变形的刚度折减系数，取 $\eta_v = \frac{1}{(1+\beta)}$



6.7.3 内力和位移计算

将带刚域杆件转换为具有等效刚度的等截面杆件后，可采用D值法进行壁式框架的内力和位移计算。

1、带刚域柱的侧移刚度D值

$$D = \alpha_c \frac{12K_c}{h^2}$$

式中 K_c ——考虑刚域和剪切变形影响后的柱线刚度，取 $K_c = \frac{EI}{h}$ ；

EI ——带刚域柱的等效刚度，按式（6.7.7）计算；

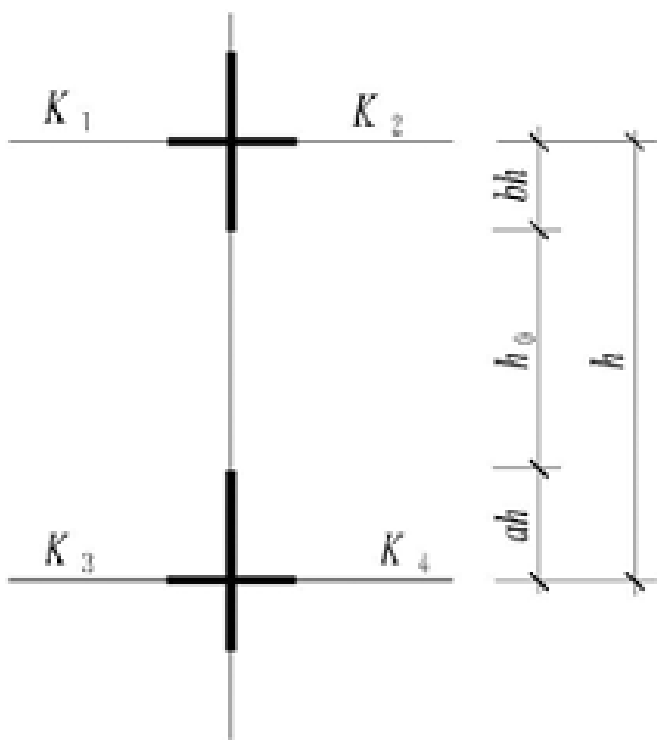
α_c ——柱侧移刚度的修正系数，由梁柱刚度比按表 5.4.1 中的规定计算。计算时梁柱均取其等效刚度，即将表 5.4.1 中 i_1 、 i_2 、 i_3 和 i_4 用 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 来代替；

K_1, K_2, K_3, K_4 ——分别为上、下层带刚域梁按等效刚度计算的线刚度。



2、带刚域柱反弯点高度比的修正

带刚域柱应考虑柱下端刚域长度 ah ，其反弯点高度比应按下列各式确定：



$$y = a + \frac{h_0}{h} y_n + y_1 + y_2 + y_3$$

h_0 ——柱中段的高度；

$\frac{h_0}{h}$ ——柱端刚域长度的影响系数；

y_n ——标准反弯点高度比

y_1 ——上、下层梁刚度变化时，反弯点高度比的修正值

y_2, y_3 ——上、下层层高变化时，反弯点高度比的修正值

壁式框架在水平荷载作用下内力和位移计算的步骤与一般框架结构完全相同。



6.8 剪力墙分类的判别

6.8.1 剪力墙的受力特点

由于各类剪力墙洞口大小、位置的不同，水平荷载下其受力特点也不同。主要表现为两点：一是各墙肢截面上的正应力分布；二是沿墙肢高度方向上弯矩的变化规律。

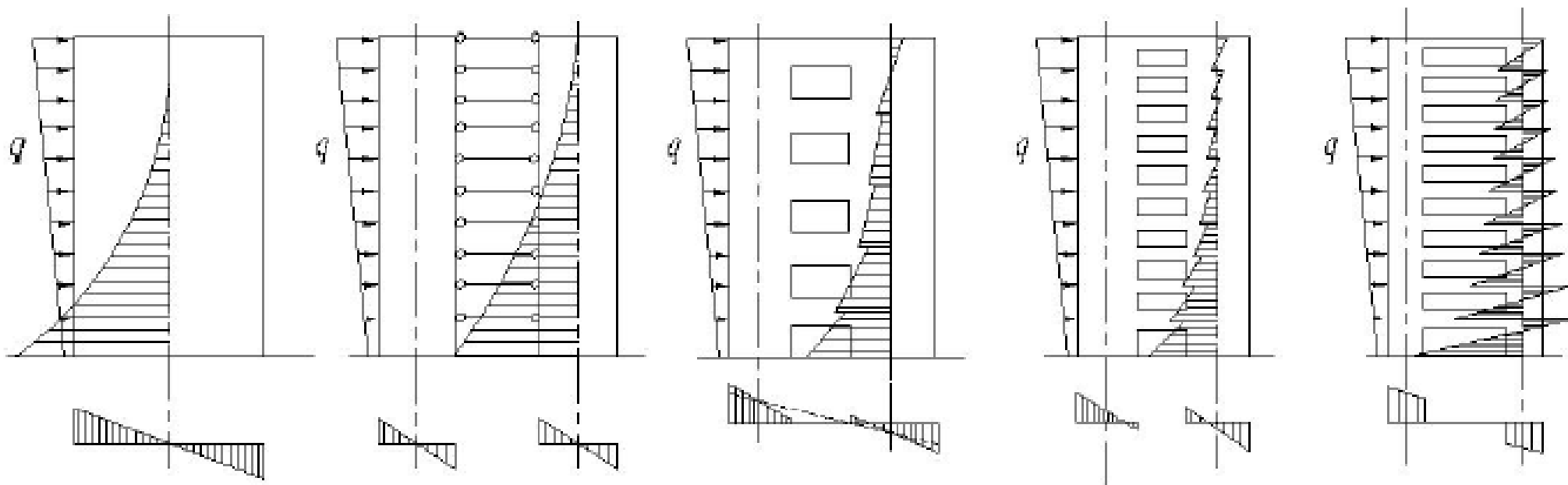
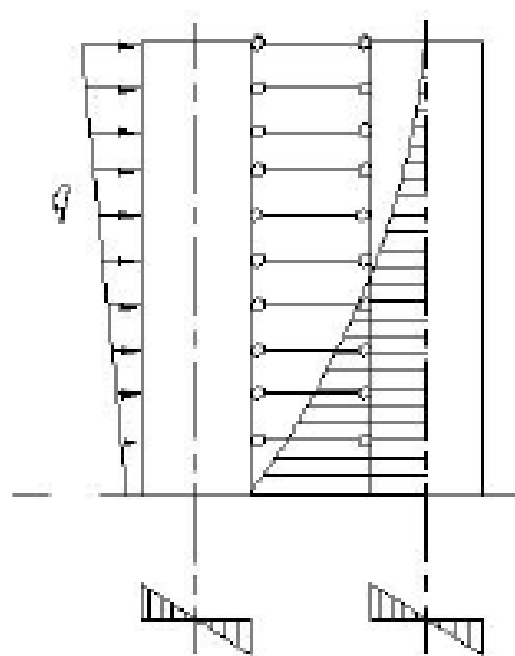
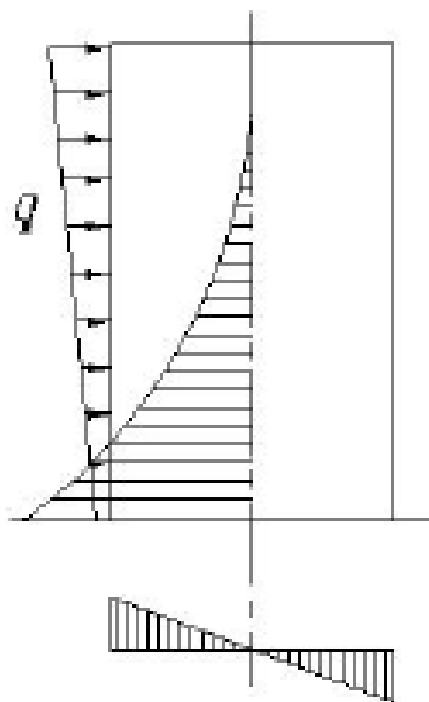


图 6.8.1 各类剪力墙的受力特点



(1) 整截面墙如同竖向悬臂构件，截面正应力呈直线分布，沿高度方向弯矩图既不发生突变也不出现反弯点，变形曲线呈弯曲型。

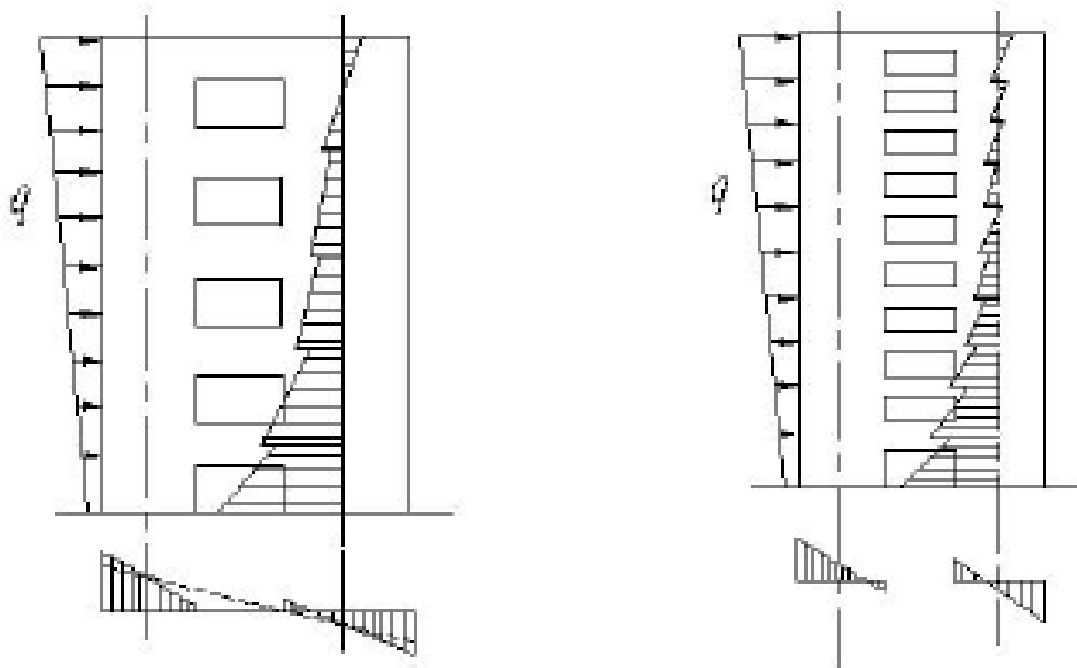
(2) 独立悬臂墙是指墙面洞口很大，连梁刚度很小，即 α 值很小 ($\alpha \leq 1$) 的剪力墙。每个墙肢相当于一个悬臂墙，墙肢轴力为零，各墙肢截面正应力呈直线分布。弯矩图既不发生突变也无反弯点，变形曲线以弯曲型为主。





(3) 整体小开口墙 α 值很大，墙的整体性很好。水平荷载下的弯矩主要为墙肢的轴力，墙肢弯矩较小，弯矩图有突变，基本上无反弯点，截面正应力接近于直线分布，变形曲线仍以弯曲型为主。

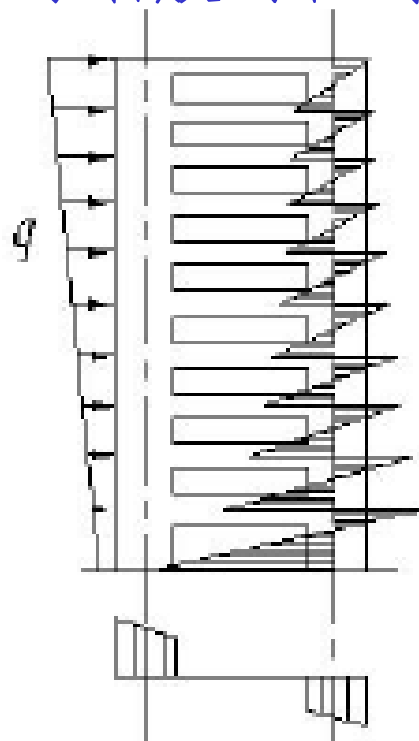
(4) 双肢墙(联肢墙)介于整体小开口墙和独立悬臂墙之间，连梁对墙肢有一定的约束作用，仅在一些楼层，墙肢局部弯矩较大，整个截面正应力已不再呈直线分布，变形曲线为弯曲型。





(5) 壁式框架连梁与墙肢的截面弯曲刚度接近，墙肢中弯矩与框架柱相似，其弯矩图不仅在楼层处有突变，而且大多数楼层中都出现反弯点，变形曲线呈整体剪切型。

注：由于连梁对墙肢的约束作用，使墙肢弯矩产生突变，突变值的大小主要取决于连梁与墙肢的相对刚度比。





6.8.2 剪力墙分类的判别

一个是剪力墙的整体性，由整体工作系数 α 来反映；

一个是沿高度方向是否会出现反弯点，出现反弯点的层数越多，其受力性能越接近于壁式框架。

1、剪力墙的整体性 α

α 大小反映了连梁对墙肢约束作用的程度，对剪力墙的受力特点影响很大，故可利用 α 作为剪力墙分类的判别准则之一。

对双肢墙，

$$D = \frac{2a^2 I_b}{l_b^3}$$

D 为连梁的刚度

$$S = \frac{aA_1 A_2}{A_1 + A_2}$$

S 为双肢墙中一个墙肢对组合截面形心轴的面积矩（反映洞口大小）

$$\alpha_1^2 = \frac{6H^2 D}{h(I_1 + I_2)}$$

α_1 为连梁与墙肢刚度比

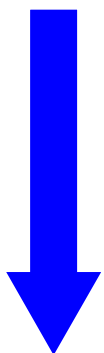
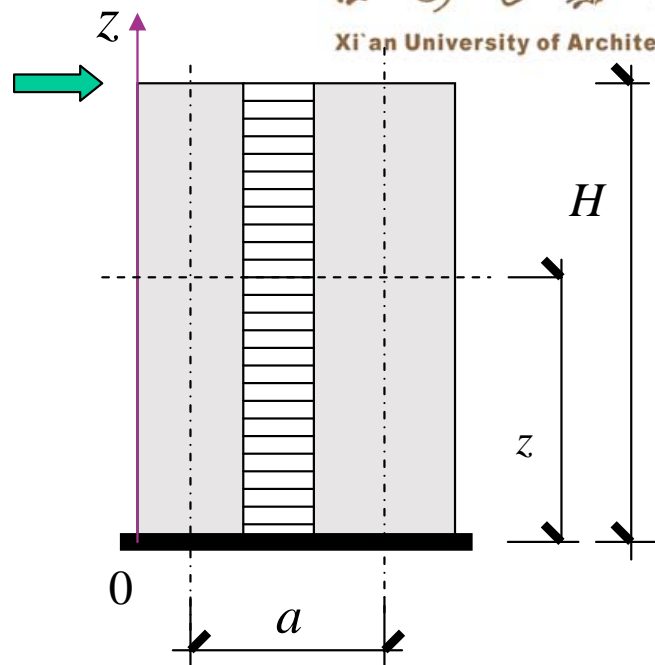
$$\alpha^2 = \alpha_1^2 + \frac{6H^2 D}{hSa}$$

α 为剪力墙的整体工作系数



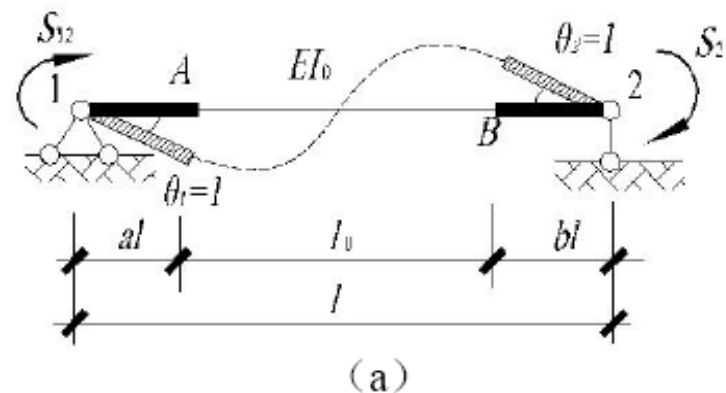
D 为连梁的刚度

$$D = \frac{2a^2 I_b}{l_b^3} = \frac{2a^3 I_b}{al_b^3} = \frac{2I_b}{a} \cdot \frac{a^3}{l_b^3}$$



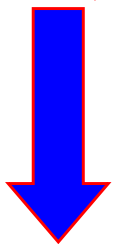
$$S = S_{12} + S_{21} = \frac{12EI_0}{l} \frac{1}{(1-a-b)^3(1+\beta)}$$

$S = 6ED$





S 为双肢墙中一个墙肢对组合截面形心轴的面积矩(反映洞口大小)



$$S = \frac{aA_1A_2}{A_1 + A_2}$$

如图 6.8.2 所示, 双肢墙组合截面的惯性矩为

$$I = I_1 + I_2 + A_1a_1^2 + A_2a_2^2 = I_1 + I_2 + I_n$$

因为

$$A_1a_1 = A_2a_2, \quad a = a_1 + a_2$$

则

$$a_1 = \frac{A_2}{A_1 + A_2} a$$

$$a_2 = \frac{A_1}{A_1 + A_2} a$$

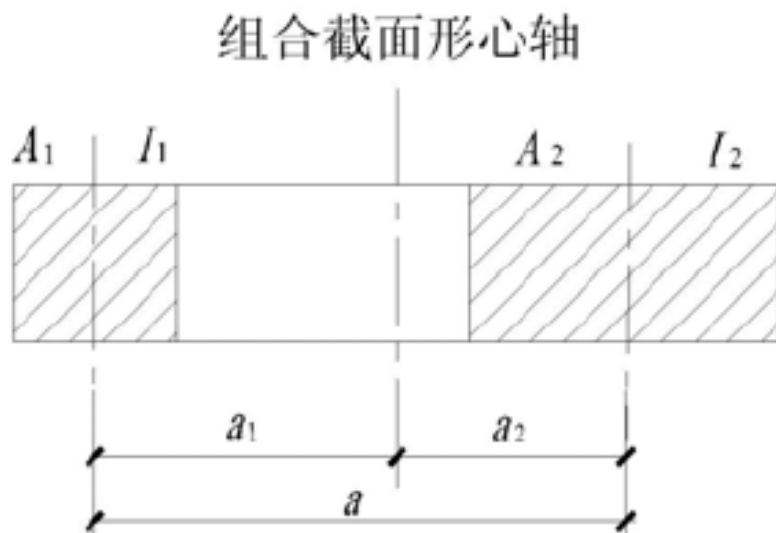
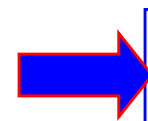


图 6.8.2 双肢墙截面图



$$S = A_1a_1 = A_2a_2 = \frac{aA_1A_2}{A_1 + A_2}$$

$$I_n = A_1a_1^2 + A_2a_2^2 = A_1 \left(\frac{A_2}{A_1 + A_2} a \right)^2 + A_2 \left(\frac{A_1}{A_1 + A_2} a \right)^2 = \frac{A_1A_2a}{A_1 + A_2} \cdot a = Sa$$

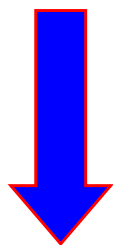


$$Sa = I_n = I - I_1 - I_2$$



α_1 为连梁与墙肢刚度比

$$\alpha_1^2 = \frac{6H^2 D}{h(I_1 + I_2)}$$



α 为剪力墙的整体工作系数

$$\alpha^2 = \alpha_1^2 + \frac{6H^2 D}{hSa}$$

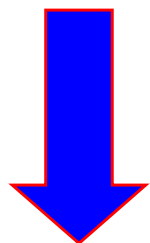
$$\alpha^2 = \alpha_1^2 + \frac{6H^2 D}{hSa} = \alpha_1^2 \left(\frac{Sa + I_1 + I_2}{Sa} \right) = \frac{\alpha_1^2}{\tau}$$

$$\tau = \frac{Sa}{Sa + I_1 + I_2}$$

当不考虑墙肢轴向变形时, $\tau = 1$, $\alpha_2 = \alpha_1^2$; 当考虑墙肢轴向变形时, $\tau < 1$, 连梁与墙肢的刚度比将增大为 α , 相当于墙肢刚度变小。因此, α 既反映连梁与墙肢的刚度比, 同时又考虑墙肢轴向变形的影响。



α_1 、 D 也代入式(6.8.1)可得



$$\alpha^2 = \alpha_1^2 \frac{I}{I - I_1 - I_2} = \frac{12H^2 I_b a^2}{hl_b^3 (I_1 + I_2)} \frac{I}{I - I_1 - I_2}$$
$$\alpha = H \sqrt{\frac{12I_b a^2}{hl_b^3 (I_1 + I_2)} \frac{I}{I - I_1 - I_2}}$$

$I_b / (I_1 + I_2)$ 反映连梁与墙肢刚度比影响，即洞口大小的影响；

$I / (I - I_1 - I_2)$ 反映了洞口宽窄的影响，即洞口形状的影响。

α 越大，表明连梁的刚度越大，连梁对墙肢的约束作用也较大，墙的整体工作性能好，接近于整截面墙或整体小开口墙。



2、墙肢惯性矩比 I_n/I

1) 壁式框架与整截面墙或整体小开口墙 α 都很大，但二者受力特点完全不同。所以，除根据 α 值进行剪力墙分类判别外，还应判别沿高度方向墙肢弯矩图是否会出现反弯点。

2) I_n/I 值反映剪力墙截面削弱的程度。 I_n/I 值大，说明截面削弱较多，洞口较宽，墙肢相对较弱。故当 I_n/I 增大到某一值时，墙肢表现出框架柱的受力特点，即沿高度方向出现反弯点。

因此，通常将 I_n/I 值作为剪力墙分类的第二个判别准则。

判别墙肢出现反弯点时 I_n/I 的界限值用 ζ 表示， ζ 值与 α 和层数 n 有关。



3、剪力墙分类判别式

根据整体工作系数 α 和墙肢惯性矩比 I_n / I ，剪力墙分类的判别如下：

- (1) 当剪力墙无洞口，或有洞口但洞口面积与墙面面积之比不大于0.16，且孔洞口净距及孔洞边至墙边距离大于孔洞长边尺寸时，按整截面墙计算；
- (2) 当 $\alpha < 1$ 时，可不考虑连梁的约束作用，各墙肢分别按独立的悬臂墙计算；
- (3) 当 $1 \leq \alpha < 10$ 时，按联肢墙计算；
- (4) 当 $\alpha \geq 10$ ，且 $I_n / I \leq \zeta$ 时，按整体小开口墙计算；
- (5) 当 $\alpha \geq 10$ ，且 $I_n / I > \zeta$ 时，按壁式框架计算。



6.9 剪力墙截面设计和构造要求

剪力墙可分为墙肢和连梁两类构件，设计时应分别计算出水平荷载和竖向荷载下的内力，经内力组合后，可进行截面的配筋计算。

6.9.1 剪力墙的厚度和混凝土强度等级

1、剪力墙的厚度

《高规》规定了剪力墙截面的最小厚度，其目的是保证剪力墙出平面的刚度和稳定性能。

无支长度是指沿剪力墙长度方向没有平面外横向支承墙的长度。



表 6.9.1 剪力墙截面最小厚度

抗震等级	剪力墙部位	最小厚度 (二者中取较大值)			
		有端柱或翼墙		无端柱或无翼墙	
一、二级	底部加强部位	$H/16$	200mm	$h/12$	200mm
	其他部位	$H/20$	160mm	$h/15$	180mm
三、四级	底部加强部位	$H/20$	160mm	同左	同左
	其他部位	$H/25$	160mm	同左	同左
非抗震设计		$H/25$	160mm	同左	同左

注：表内符号 H 为层高或无支长度，二者中取较小值； h 为层高。

2、混凝土强度等级

混凝土强度等级不应低于 C20，带有筒体和短肢剪力墙的剪力墙结构，混凝土强度等级不应低于C25，为保证剪力墙的承载能力及变形性能，混凝土强度等级不宜太低。



6.9.2 剪力墙的加强部位

剪力墙的底部截面弯矩最大，可能出现塑性铰。抗震设计时，为保证塑性铰出现后具有足够的延性和抗剪承载力，该范围内应当加强构造措施，称为剪力墙的加强部位。

《高规》规定：底部加强部位的高度取墙肢总高度的 $1/8$ 和底部两层二者的较大值；当高度超过 150m 时，为避免加强区太高，底部加强部位的高度可取墙肢总高度的 $1/10$ ；部分框支剪力墙结构底部加强部位的高度可取为框支层加其上两层的高度及墙肢总高度 $1/8$ 二者的较大值。



6.9.3 剪力墙内力设计值的调整

为加强一级抗震等级的剪力墙的抗震能力，保证在墙底部出现塑性铰，故各截面的弯矩设计值应符合下列规定：

(1) 底部加强部位及其上一层应按墙底截面组合弯矩计算值采用；

(2) 其他部位可按墙肢组合弯矩计算值的1.2倍采用。

对双肢墙，不宜出现小偏心受拉。因若有一个墙肢出现小偏心受拉，该墙肢可能会出现水平通缝而失去受剪承载力，导致其受剪承载力不足。



当出现大偏心受拉时，墙肢会出现裂缝，刚度降低，剪力将在两墙肢中进行重分配，因此，可将另一墙肢按弹性计算的弯矩设计值和剪力设计值乘以增大系数1.25，以提高其承载力。

剪力墙很长时，边墙肢拉(压)力很大，可人为加大洞口或人为开洞，减小连梁高度而成为对墙肢约束弯矩很小的连梁，地震时，该连梁两端比较容易屈服形成塑性铰，而将长墙分成长度较小的墙。在工程中，一般宜使墙的长度不超过8m。此外，减小连梁高度也可减小墙肢轴力。



抗震设计时，为体现强剪弱弯的原则，底部加强部位的剪力设计值要乘以增大系数。一、二、三级抗震等级时按下式调整，四级抗震等级及无地震作用组合时可不调整。

$$V_w = \eta_{vw} V_w'$$

设防烈度为9度时，底部加强部位应符合

$$V_w = 1.1 \frac{M_{wua}}{M_w} V_w'$$

η_{vw} 剪力增大系数，一级为1.6，二级为1.4，三级为1.2；

M_w, V_w' 考虑地震作用组合的墙肢底部加强部位截面的弯矩设计值、剪力设计值；

M_{wua} - 按实配钢筋计算、考虑承载力抗震调整系数的正截面受弯承载力值。



6.9.4 剪力墙截面设计

主要验算平面内的承载力，当平面外弯矩较大时，应验算平面外的受弯承载力。

1、正截面偏心受压承载力计算

墙肢在轴力和弯矩作用下的承载力计算与柱相似，区别在于墙肢除在端部配置竖向抗弯钢筋外，还配置竖向和横向分布钢筋，竖向分布钢筋参与抵抗弯矩，横向分布钢筋抵抗剪力，计算承载力时应包括分布钢筋的作用。

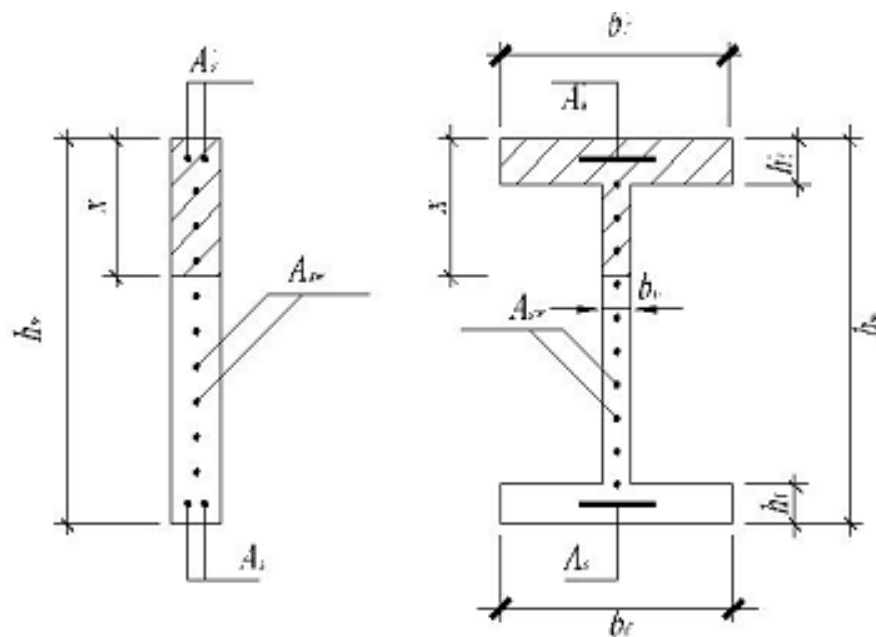
分布钢筋一般比较细，容易压曲，为简化计算，计算压弯承载力时不考虑竖向分布钢筋的受压作用。



1、正截面偏心受压承载力计算

矩形、T形、工形截面偏心受压剪力墙的正截面承载力可按《混凝土结构设计规范》规定计算。

剪力墙的配筋方式：分布钢筋(竖向、水平)、集中配筋



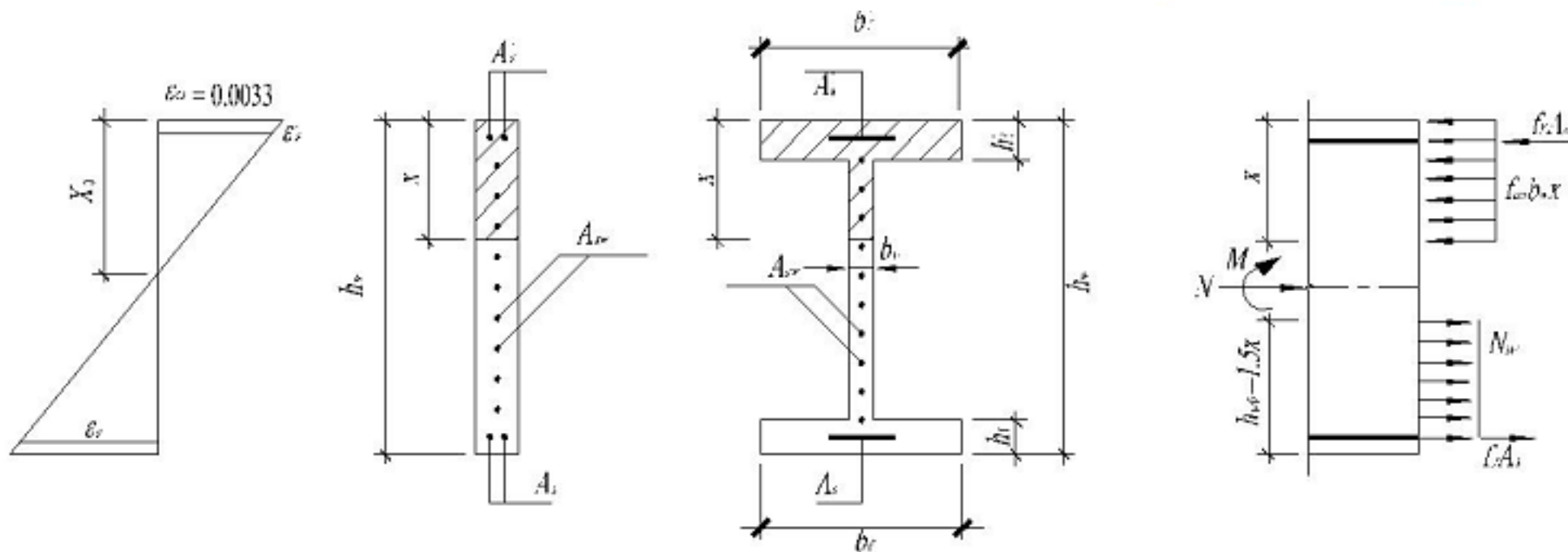


矩形、T形、工形截面偏心受压剪力墙的正截面承载力也可按下列公式计算：

基本假定：

- ① 截面变形符合平截面假定；
- ② 不考虑受拉混凝土的作用；
- ③ 受压区混凝土的应力图用等效矩形应力图替换；
- ④ 墙肢端部的纵向受拉、受压钢筋屈服；
- ⑤ 从受压区边缘算起 $1.5x$ (x 为等效矩形应力图受压区高度) 范围以外的受拉竖向分布钢筋全部屈服，并参与受力计算， $1.5x$ 范围以内的竖向分布钢筋未受拉屈服或为受压，不参与受力计算。

由上述假定，可建立平衡方程：



无地震作用效应组合时

$$N \leq A_s' f_y' - A_s \sigma_s - N_{sw} + N_c$$

$$N(e_0 + h_{w0} - h_w / 2) \leq A_s' f_y' (h_{w0} - a_s') - M_{sw} + M_c$$

有地震作用效应组合时，式中右端均应除以承载力抗震调整系数，0.85。



当 $x > h'_f$ 时

$$N_c = \alpha_1 f_c [b_w x + (b'_f - b_w) h'_f]$$

$$M_c = \alpha_1 f_c [b_w x (h_{w0} - \frac{x}{2}) + (b'_f - b_w) h'_f (h_{w0} - \frac{h'_f}{2})]$$

当 $x \leq h'_f$ 时

$$N_c = \alpha_1 f_c b'_f x$$

$$M_c = \alpha_1 f_c b'_f x (h_{w0} - \frac{x}{2})$$

当 $x \leq \xi_b h_{w0}$ 时

$$\sigma_s = f_y$$

$$N_{sw} = (h_{w0} - 1.5x) b_w f_{yw} \rho_w$$

$$M_{sw} = \frac{1}{2} (h_{w0} - 1.5x)^2 b_w f_{yw} \rho_w$$

当 $x > \xi_b h_{w0}$ 时

$$\sigma_s = \frac{f_y}{\xi_b - 0.8} \left(\frac{x}{h_{w0}} - \beta_1 \right)$$

$$N_{sw} = 0, \quad M_{sw} = 0$$

$$\xi_b = \frac{\beta_1}{1 + \frac{f_y}{0.0033E_s}}$$



2. 正截面偏心受拉承载力计算

无地震作用效应组合时

$$N \leq \frac{l}{\frac{l}{N_{ou}} + \frac{e_0}{M_{wu}}}$$

有地震作用效应组合时

$$N \leq \frac{l}{\gamma_{RE}} \left(\frac{l}{\frac{l}{N_{ou}} + \frac{e_0}{M_{wu}}} \right)$$

$$N_{ou} = 2A_s f_y + A_{sw} f_{yw}$$

$$M_{wu} = A_s f_y (h_{w0} - a'_s) + A_{sw} f_{yw} \frac{h_{w0} - a'_s}{2}$$



3. 斜截面受剪承载力计算

(1) 偏心受压剪力墙斜截面受剪承载力计算

通过构造措施防止发生剪拉破坏和斜压破坏，通过计算确定墙中的水平分布钢筋，防止发生剪切破坏。

对偏心受压构件，轴向压力可提高受剪承载力，当压力增大到一定程度后，对抗剪是不利的。

无地震作用效应组合时

$$V_w \leq \frac{1}{\lambda - 0.5} (0.5 f_t b_w h_{w0} + 0.13 N \frac{A_w}{A}) + f_{yv} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0}$$

有地震作用效应组合时

$$V_w \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[\frac{1}{\lambda - 0.5} (0.4 f_t b_w h_{w0} + 0.1 N \frac{A_w}{A}) + 0.8 f_{yv} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} \right]$$



(2) 偏心受拉剪力墙斜截面受剪承载力计算

墙肢的斜截面剪切破坏可归纳为三种破坏形态：

(1) 剪拉破坏。剪跨比较大、无横向钢筋或横向钢筋很少的墙肢，可能发生剪拉破坏。斜裂缝出现后即形成一条主要的斜裂缝，并延伸至受压区边缘，使墙肢劈裂为两部分而破坏。

(2) 斜压破坏。截面尺寸小、剪压比过大的墙肢可能发生斜压破坏。斜裂缝将墙肢分割为许多斜的受压柱体，混凝土被压碎而破坏。为防止斜压破坏，墙肢截面尺寸不应过小，应限制截面的剪压比。

(3) 剪压破坏。先出现水平裂缝或细小斜裂缝，随水平力增加，出现一条主斜裂缝，并延伸扩展，混凝土受压区减小，最后斜裂缝尽端的受压区混凝土破坏，水平钢筋屈服。



墙肢斜截面受剪承载力计算主要建立在剪压破坏的基础上。受剪承载力由两部分组成：横向钢筋的受剪承载力和混凝土的受剪承载力。轴向压力加大了截面的受压区，提高受剪承载力；轴向拉力对抗剪不利，降低受剪承载力。

偏心受拉构件中，考虑了轴向拉力的不利影响，轴力项取负值。

无地震作用效应组合时

$$V_w \leq \frac{1}{\lambda - 0.5} (0.5 f_t b_w h_{w0} - 0.13 N \frac{A_w}{A}) + f_{yv} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0}$$

有地震作用效应组合时

$$V_w \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[\frac{1}{\lambda - 0.5} (0.4 f_t b_w h_{w0} - 0.1 N \frac{A_w}{A}) + 0.8 f_{yv} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} \right]$$



4、施工缝的抗滑移计算

按一级抗震等级设计的剪力墙，要防止水平施工缝处发生滑移。考虑了摩擦力的有利影响后，验算水平施工缝处的竖向钢筋是否足以抵抗水平剪力。

$$V_w \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.6 f_y A_s + 0.8 N)$$



6.9.5 剪力墙轴压比限值和边缘构件

1. 轴压比限值

轴压比是影响墙肢抗震性能的主要因素之一。为保证地震下剪力墙具有足够的延性，《高规》规定：一、二级抗震等级剪力墙的底部加强部位，其轴压比不宜超过下表的限值。

为简化计算，规程采用重力荷载代表值(不考虑地震效应组合)，计算剪力墙的名义轴压比。由于加强部位范围内，墙肢厚度、强度等级不变，故只需验算墙肢底截面的轴压比。

表 6.9.2 剪力墙轴压比限值 $N / (f_c A)$

抗震等级	一级 (9 度)	一级 (7、8 度)	二级
轴压比限值	0.4	0.5	0.6

对一字形截面剪力墙墙肢应从严掌握其轴压比。



2. 边缘构件

边缘构件是指用箍筋约束的暗柱、端柱和翼墙等，剪力墙两端设置边缘构件是提高墙肢端部混凝土极限压应变、改善延性的重要措施。

边缘构件 { 约束边缘构件
构造边缘构件

约束边缘构件是指箍筋配置较多，对混凝土的约束较强，混凝土有较大的变形能力；构造边缘构件的箍筋较少，对混凝土约束程度较差。



约束边缘构件：一、二级抗震等级剪力墙底部加强部位及其上一层的墙肢端部；

构造边缘构件：一、二级抗震设计剪力墙的其他部位以及三、四级抗震设计的剪力墙墙肢端部。

约束边缘构件的截面尺寸及配筋都比构造边缘构件要求高，其长度及箍筋配置需要通过计算确定。

(1) 约束边缘构件的设计应符合下列要求：

1) 加大边缘构件的长度 l_c 及其体积配箍率 ρ_v ，体积配箍率 ρ_v 由配箍特征值 λ_v 计算；

$$\rho_v \geq \lambda_v \frac{f_c}{f_{yv}}$$



2) 约束边缘构件沿墙肢的长度 l_c 和配箍特征值 λ_v 应符合下表的要求，且一、二级抗震时箍筋直径均不应小于8mm，箍筋间距分别不应大于100mm和150mm。箍筋的配筋范围如图中的阴影部分所示；

表 6.9.3 约束边缘构件范围 l_c 及其配箍特征值 λ_v

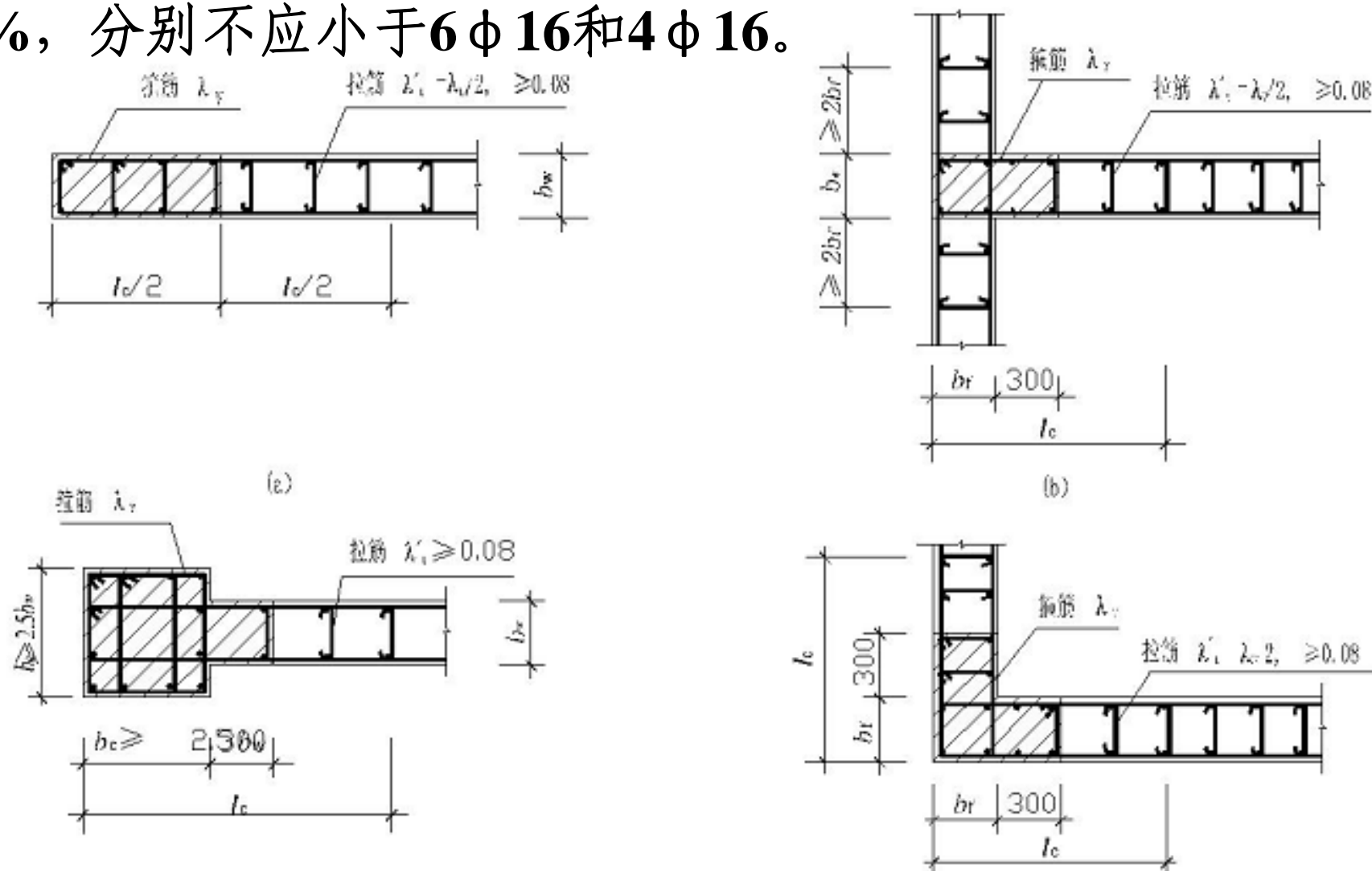
项 目	一级 (9 度)	一级 (8 度)	二级
λ_v	0.2	0.2	0.2
l_c (暗柱)	$0.25h_w$	$0.20h_w$	$0.20h_w$
l_c (有翼墙或端柱)	$0.20h_w$	$0.15h_w$	$0.15h_w$

3) 对十字形截面剪力墙，可按两片墙分别在墙端部设置约束边缘构件，交叉部位只按构造要求配置暗柱。

4) 纵向钢筋宜采用HRB335或HRB400钢筋。



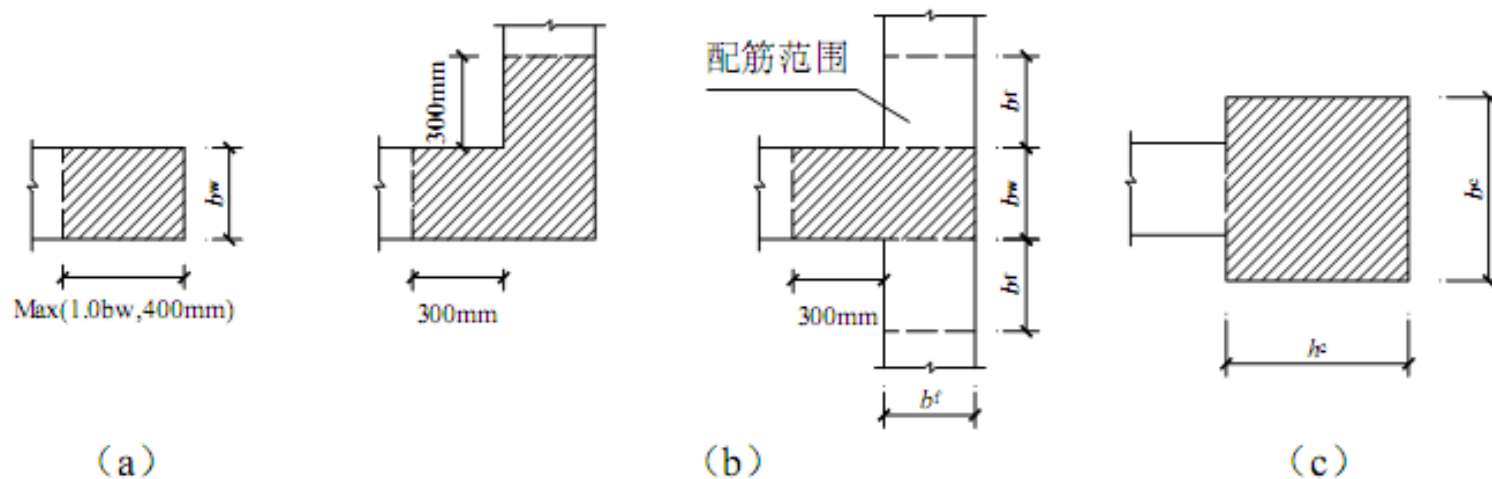
5) 纵向钢筋的配筋范围不应小于图中的阴影面积，纵筋最小截面面积，一、二级抗震时分别不应小于阴影面积的1.2%和1.0%，分别不应小于6φ16和4φ16。





(2) 构造边缘构件的设计应符合下列要求:

1) 构造边缘构件的范围和计算纵向钢筋用量的截面面积 A_c 宜取图中的阴影部分, 纵向钢筋应满足受弯承载力的要求。



2) 按构造要求设置纵向钢筋及箍筋(或拉筋), 其中箍筋的无支长度不应大于300mm, 拉筋的水平间距不应大于纵向钢筋间距的2倍。剪力墙端部为端柱时, 端柱中纵向钢筋及箍筋宜按框架柱的构造要求配置。



表 6.9.4 剪力墙构造边缘构件的配筋要求

抗震等级	底部加强区			其他部位		
	纵向钢筋最小量 (取较大值)	箍 筋		纵向钢筋最小量 (取较大值)	拉 筋	
		最小直径 (mm)	最大间距 (mm)		最小直径 (mm)	最大间距 (mm)
一级	—	—	100	$0.008A_c$, 6 ϕ 14	8	150
二级	—	—	150	$0.006A_c$, 6 ϕ 12	8	200
三级	$0.005A_c$, 4 ϕ 12	6	150	$0.004A_c$, 4 ϕ 12	6	200
四级	$0.005A_c$, 4 ϕ 12	6	200	$0.004A_c$, 4 ϕ 12	6	250

3) 对复杂高层结构、混合结构、框架-剪力墙结构、筒体结构以及B级高度的剪力墙结构，由于剪力墙(筒体)比较重要或房屋高度较高，故其构造边缘构件的最小配筋率应适当加强，纵向钢筋最小配筋应将下表中的 $0.008A_c$ 、 $0.006A_c$ 、 $0.004A_c$ 分别用 $0.010A_c$ 、 $0.008A_c$ 、 $0.005A_c$ 来代替。箍筋的配箍范围如图中的阴影部分，配箍特征值 λ_v 不宜小于0.1。

4) 纵向钢筋宜采用HRB335或HRB400钢筋。



6.9.6 剪力墙截面的构造要求

1. 一般要求

剪力墙的剪应力过高，会在早期出现斜裂缝，抗剪钢筋不能充分发挥作用，即使配置很多的抗剪钢筋，也会过早发生剪切破坏。为限制剪力墙截面的最大剪应力值，剪力墙的截面应符合下列要求：

无地震作用效应组合时

$$V_w \leq 0.25 \beta_c f_c b_w h_w$$

有地震作用效应组合时

剪跨比大于 2.5 时

$$V_w \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.20 \beta_c f_c b_w h_w)$$

剪跨比不大于 2.5 时

$$V_w \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.15 \beta_c f_c b_w h_w)$$



2. 剪力墙分布钢筋的配筋方式

为保证剪力墙有效抵抗平面外的作用，防止剪力墙厚度较大致使混凝土表面出现收缩裂缝，竖向和水平分布钢筋，不应采用单排配筋。

剪力墙分布钢筋方式见下表。当剪力墙厚度 $b_w > 400\text{mm}$ 时，如仅配双排筋，形成中间大面积的素混凝土，使截面应力分布不均匀，宜采用三排或四排配筋，受力钢筋可均匀分布成数排，或靠墙面的配筋略大。

各排分布钢筋之间的拉结筋间距不应大于 600mm ，直径不宜小于 6mm ；在底部加强部位应适当加密。

表 6.9.5 分布钢筋的配筋方式

截面厚度	配筋方式
$b_w \leq 400\text{mm}$	双排配筋
$400\text{mm} < b_w \leq 700\text{mm}$	三排配筋
$b_w > 700\text{mm}$	四排配筋



3. 剪力墙分布钢筋的最小配筋率

剪力墙分布钢筋的配筋率:

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w s}$$

为防止斜裂缝出现后发生脆性破坏，竖向和水平分布钢筋应满足下表的要求。

为保证分布钢筋的混凝土握裹力，竖向、水平分布钢筋的直径不宜大于墙肢截面厚度的1/10。

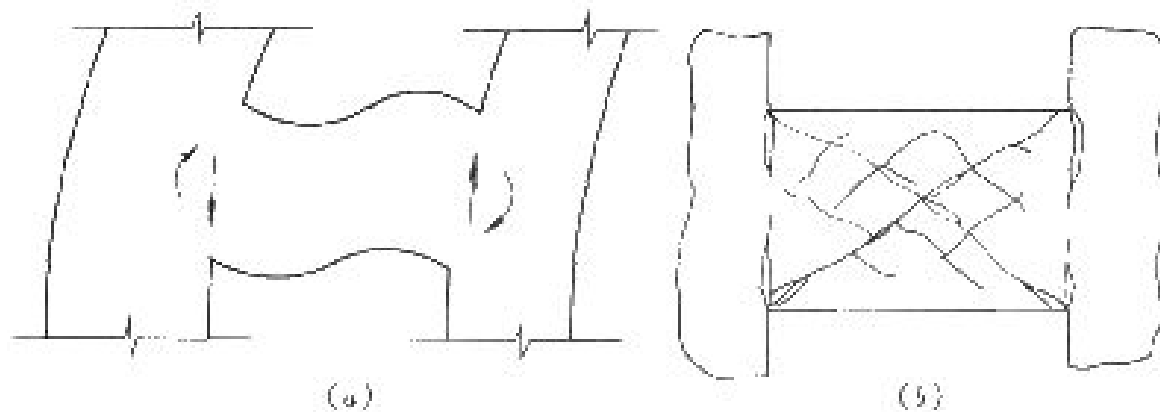
表 6.9.6 剪力墙分布钢筋最小配筋率

类型	抗震等级	最小配筋率	最大间距	最小直径
一般剪力墙	一、二、三级	0.25%	300mm	8mm
	四级、非抗震	0.20%	300mm	8mm
B级高度剪力墙	特一级	0.35% 0.40% (加强部位)	同上	同上
1. 房屋顶层 2. 长矩形平面房屋的楼电梯间 3. 纵向剪力墙端开间 4. 端山墙	抗震与非抗震	0.25%	200mm	--



6.9.7 连梁截面设计

连梁的跨高比较小，竖向荷载下的弯矩较小，水平荷载下对剪切变形十分敏感，容易出现剪切裂缝。



对延性要求高的核心筒连梁和框筒裙梁，可采用特殊措施，如配置交叉斜筋或交叉暗撑，改善连梁受力性能。

《高规》规定：对跨高比小于5的连梁，按以下方法，否则，按框架梁设计。



1. 连梁截面尺寸

连梁对结构抗震性能有较大的影响。若连梁平均剪应力过大，箍筋就不能充分发挥作用，发生剪切破坏。应限制连梁截面的平均剪应力。连梁截面尺寸应符合：

无地震作用效应组合时

$$V_b \leq 0.25 \beta_c f_c b_b h_{b0}$$

有地震作用效应组合时

跨高比大于 2.5 时 $V_b \leq (0.20 \beta_c f_c b_b h_{b0}) / \gamma_{RE}$

跨高比不大于 2.5 时 $V_b \leq (0.15 \beta_c f_c b_b h_{b0}) / \gamma_{RE}$



2. 连梁截面承载力计算

(1) 连梁正截面受弯承载力计算

正截面受弯承载力可按一般受弯构件的要求计算。由于通常采用对称配筋，故无地震作用效应组合时，正截面受弯承载力按下式计算。

$$M \leq f_y A_s (h_{b0} - a_s')$$

有地震作用效应组合时，将上式右端除以承载力抗震调整系数 γ_{RE} 。



(2) 连梁斜截面受剪承载力计算

无地震作用效应组合时

$$V_b \leq 0.7 f_t b_b h_{b0} + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_{b0}$$

有地震作用效应组合时

跨高比大于 2.5 时

$$V_b \leq (0.42 f_t b_b h_{b0} + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_{b0}) / \gamma_{RE}$$

跨高比不大于 2.5 时

$$V_b \leq (0.38 f_t b_b h_{b0} + 0.9 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_{b0}) / \gamma_{RE}$$

当不满足上式要求时，可作如下处理：减小连梁截面高度；对连梁的弯矩设计值进行调幅，以降低其剪力设计值；采用斜向交叉配筋方式配筋。



3. 连梁剪力设计值

为实现强剪弱弯，应将连梁的剪力设计值进行调整，即将连梁的剪力设计值乘以增大系数。

无地震作用效应组合，以及四级抗震等级时，剪力设计值不调整；

一、二、三级抗震等级时，剪力设计值按下式调整：

$$V_b = \eta_{vb} \frac{M_b^l + M_b^r}{l_n} + V_{Gb}$$

9度设防时，按连梁实际抗弯配筋反算该增大系数，即

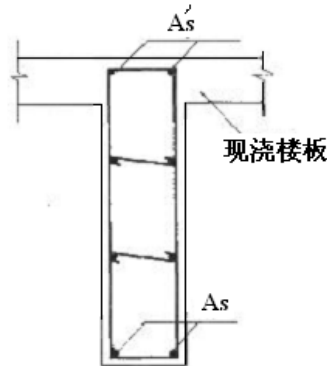
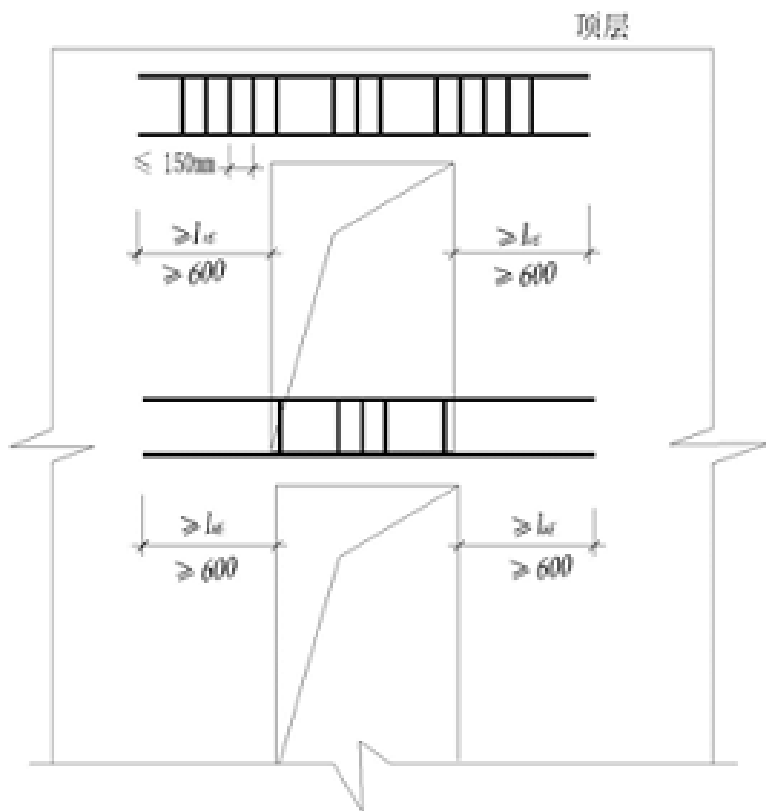
$$V_b = 1.1 \left(M_{bua}^l + M_{bua}^r \right) / l_n + V_{Gb}$$

η_{vb} —剪力增大系数，一级为1.3，二级为1.2，三级为1.1。

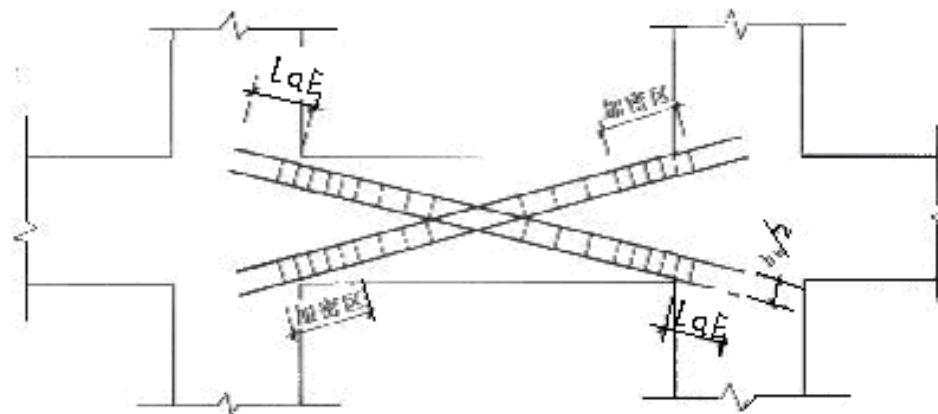


4. 连梁的构造要求

为防止斜裂缝出现后的脆性破坏，除减小剪应力、加大箍筋配置外，还可采取一些特殊的构造，如钢筋锚固、交叉配筋、交叉斜撑、箍筋加密区范围、腰筋配置等。



腰筋配置



交叉斜撑



- 一、二级抗震等级，当跨高比小于2，且墙厚大于200mm的连梁，除普通箍筋外宜另设斜向交叉构造钢筋。
- 沿全长箍筋的构造要求按框架梁梁端加密区箍筋构造要求采用。
- 顶层连梁纵向钢筋伸入墙体的长度范围内，应配置间距不大于 150mm的构造箍筋。
- 墙体水平分布钢筋应作为连梁的腰筋拉通配置；当截面高度大于 700mm时，两侧面腰筋的直径不小于10mm，间距不大于200mm；跨高比小于2.5时，腰筋配筋率不低于0.30%。