

地下单层无梁楼盖结构设计探讨

70816 修

徐珂, 田立强

(清华城市规划设计研究院建筑分院, 北京 100083)

[摘要] 无梁楼盖是地下建筑中常见结构形式, 目前多采用经验系数法或等代框架法进行计算, 两种计算模型与地下单层无梁楼盖结构存在假设差异。以实际工程尺寸, 建立力学计算模型, 根据弯矩分配法推导实际内力分布情况, 通过数据对比提出设计建议。

[关键词] 无梁楼盖; 经验系数法; 等代框架法; 弯矩分配法; 柱帽; 刚域

Discussion on structural design of beamless floor of underground buildings

Xu Ke, Tian Liqiang

(Beijing Tsinghua Urban Planning & Design Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: The structure of beamless floor is a common structure used in the underground buildings. We usually adopt the experiential coefficient method and the equivalent frame method in calculation at present. But the assumption of the two calculation methods mentioned above is different from the practice of only beamless floor. So the writer established the calculating model based on the actual size. In accordance with calculating result, the practical distribution of internal force is derived by moment distribution method. The design recommendations are presented by comparative analysis on the data.

Keyword: beamless floor; the experiential coefficient method; the equivalent frame method; moment distribution method; timber cap; rigid zone

作者简介: 徐珂, 本科, 工程师, Email: arch100@126.com。

1 前言

无梁楼盖结构具有节省使用空间、板下平整、利于设备安装、施工简单等特点, 是地下工程经常采用的一种结构形式。综合目前我国已有的设计参考文献^[1-3], 无梁楼盖有两种简化计算模式: 经验系数法(或称直接设计法)和等代框架法, 这两种方法的共同点是柱上板带承担 65%~67%的跨间总弯矩设计值, 跨中板带承担 33%~35%的跨间总弯矩设计值; 区别在于等代框架法的适用范围更广, 经验系数法计算模式简单, 但限制条件较多。单层地下工程一般柱网较为规则, 可以满足经验系数法的假定要求, 是设计中常用的方法。笔者在参考上述文献进行设计时, 遇到以下几点困惑:

1) 经验系数法计算模式主要是针对升板结构, 边跨弯矩系数为端支座没有外侧悬挑板的经验值, 如果有外侧悬挑板且负弯矩大于边支座截面负弯矩时, 才考虑悬臂弯矩对无梁楼盖的影响^[1]。按照这个建议, 采用经验系数法就可以不考虑支座线刚度和支座弯矩分配影响, 这应用到单层地下无梁楼盖设计是否稳妥? 在直接设计法中, 关于端支座约束影响提供三种模式分配系数: 无约束、完全约束和边梁约束^[2], 其中的边梁约束模式经过板带分配后与经验系数法的分配系数接近, 文中未提供边梁刚度及楼盖跨度相关数据, 参考设计时如何考虑边梁假定与地下室外墙刚度差异, 进而影响端跨内力分配系数调整。【这段话读着别扭, 请再理顺一

下意思】

2) 对于顶板和底板全部采用无梁楼盖结构形式的单层地下工程, 这时的计算模型是个上下对称的受力模型, 设计中需要考虑两者以及外墙之间的相互影响, 地下室外墙与顶、底板形成封闭体系, 与无梁楼盖板共同工作, 弯矩在无梁楼盖和外墙间互相传递平衡, 实际受力情况与简化计算方法有差异, 这种差异是否会影响经验系数的使用? 【此段原有蓝色字体需要修改部分, 我们考虑内容不太重要, 予以取消, 相关内容在第 2 部分有说明】

3) 在竖向荷载作用下, 柱的设计主要是针对轴压力和梁的不平衡弯矩。文献建议板柱节点处上柱和下柱弯矩设计值之和 $M_c=0.25M$ (中柱) 或 $M_c=0.40M$ (边柱)^[1], 或者对计算方向的端柱由节点受剪承担的不平衡弯矩可取 $0.3M$ ^[2], 上述 M 均为跨间总弯矩设计值。地下工程一般由永久荷载起控制作用, 永久荷载变化较小, 梁的不平衡弯矩多由可变荷载不利布置造成, 如果要按照上述标准设计单层地下无梁楼盖框架柱, 每个节点处只有上柱或下柱, 对于柱的设计要求较高。

2 力学模型

为考察上述问题, 建立四个计算模型。均按照地下室顶板上覆土 3.0m, 地面活荷载 10kN/m^2 考虑; 支座墙体和框架柱计算高度 3.7m, 柱高 8.1m, 双向四跨连续分布, 框架柱截面为 700 外墙承受侧向土压力, 墙体厚度 300mm, 无

板厚 500mm。工程中经常采用圆锥形或方锥形柱帽，其形状复杂不利建量计算，模型中以方托板形式予以简化，托板平面尺寸为 2.8mX2.8m，居中布置，托板高度 400mm；墙梁柱板混凝土强度等级相同。这样的建筑物常用于单层地下停车库，满足上部土层全部作为建筑绿地设计要求。

模型一为刚性基础计算模型，只有地下室顶板采用无梁楼盖，框架柱及外墙刚接于基础上，基础刚度较大，内跨和外墙处均设置框架柱和柱帽，外墙承担侧向土压力。

模型二与模型一相同，但外墙不承受土压力，用来对比考察经验系数法在地下室结构中的可用性以及侧向土压力对地下无梁楼盖结构的影响。

模型三为上下对称计算模型，即顶板和底板均采用无梁楼盖，上下荷载、刚度对称，内支座和外墙处均设置框架柱和柱帽，外墙承担侧向土压力，图 1 为该模型局部剖面。

模型四与模型三基本相同，为上下对称计算模型，但端支座外墙处只有地下室外墙，不设端柱和柱帽，这是边支座线刚度最弱的一种情况，结合模型一、模型三可以考察边支座约束影响差异。

土体自重为 20 kN/m³，侧向土压力系数取 0.5，计算宽度取一个柱距宽度 8.1m，经简化计算，在土压力作用下墙体承担侧压总弯矩为 1080kN·m，约 133 kN·m/m。

竖向荷载中不考虑平托板和柱体引起的顶、底板荷载差异，以及回填土、底板有利因素，假定顶板、底板荷载效应相同。

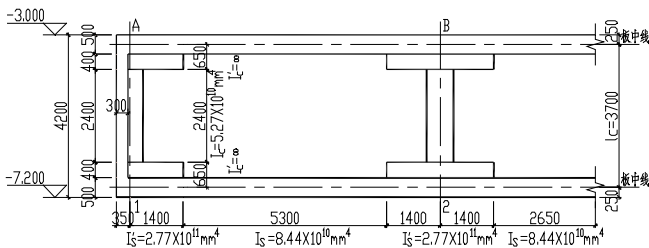


图 1 无梁楼盖地下室剖面示意图（模型三）【请提供所有插图的 DWG 源文件】

5 节点抗弯刚度及弯矩传递系数的计算

文^[4]附录 A 给出的压柱比拟法，适用于单层单跨的闭合结构，通过该方法计算出构件转角抗弯刚度及构件传递弯矩系数，然后通过力矩分配法获得结构整体弯矩情况。抗弯刚度 S 为在杆端进行单位转角变形时作用在杆端的弯矩，也可理解为杆端弯矩与杆端转角的比值。

2.1 无梁楼盖（没有平托板）

当 A 端转角 $\theta = 1$ 时，杆件两端弯矩分别为：

$$M_A^0 = \frac{4EI}{l} = \frac{4 \cdot 8.44 \cdot 10^{10} E}{8.1} = 4.168 \cdot 10^{10} E$$

$$M_B^0 = \frac{2EI}{l} = \frac{2 \cdot 8.44 \cdot 10^{10} E}{8.1} = 2.084 \cdot 10^{10} E$$

即板带杆件抗弯刚度 $S_A^0 = 4.168 \cdot 10^{10} E$ ，板带杆件的传递弯矩系数： $C_{AB}^0 = M_B / M_A = 0.50$ 。

2.2 无梁楼盖（有平托板）

板的截面刚度 $EI_s = 8.44 \cdot 10^{10} E$ ，取相对截面刚度 = 1.0。板刚域（柱帽影响区域）的截面刚度 $EI_s' = 2.77 \cdot 10^{11} E$ ，相对截面刚度

$$= \frac{2.77 \cdot 10^{11} E}{8.44 \cdot 10^{10} E} = 3.282$$

比拟柱截面宽度等于相对截面刚度的倒数。

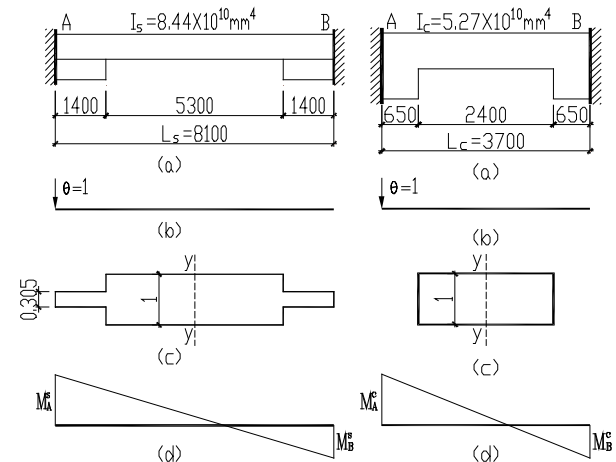


图 2 带平托板情况板带按比拟柱法计算示意图 图 3 框架柱按比拟柱法计算示意图

比拟柱截面面积：

$$A = 8.1 \cdot 0.305 + 5.3 \cdot (1.000 - 0.305) = 6.154$$

比拟柱截面绕重心轴 y 的惯性矩：

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot 0.305 \cdot 8.1^3 + \frac{1}{12} \cdot (1 - 0.305) \cdot 5.3^3 = 22.130$$

当 A 端转角 $\theta = 1$ 时，也有

$$S_A^s = \frac{L_s \cdot L_s}{A + \frac{2 \cdot L_s}{I_y} \cdot EI_s} = \frac{1}{6.154} + \frac{1 \cdot 4.05 \cdot 4.05}{22.130} \cdot EI_s$$

$$= 0.904 \cdot 8.44 \cdot 10^{10} E = 7.627 \cdot 10^{10} E$$

$$M_B^s = \frac{L_s \cdot L_s}{A + \frac{2 \cdot L_s}{I_y} \cdot EI_s} = \frac{1}{6.154} \cdot \frac{1 \cdot 4.05 \cdot 4.05}{22.130}$$

$$= 0.579 \cdot 8.44 \cdot 10^{10} E = 4.887 \cdot 10^{10} E$$

板带传递弯矩系数为 $C_{AB}^s = M_B / M_A = 0.641$ 。

与无柱帽板带比较，柱帽的存在使带柱帽板带的抗弯刚度 S_A^s 比 S_A^0 增大 82.99%。

2.3 带柱帽框架柱

柱的截面刚度 $EI_c = 5.27 \times 10^{10} E$ ，取相对截面刚度=1.0。柱刚域的截面刚度为相对无穷大，截面刚度=。

比拟柱截面见图 3 (C)。比拟柱截面面积 $A = 2.4 \times 1 = 2.4$ 。比拟柱截面绕重心轴 y 的惯性矩 $I_y = \frac{1}{12} \times 1 \times 2.4^3 = 1.152$ 。同理得

$S_A^c = -M_A^c = \frac{1}{2.4} + \frac{1 \times 1.85 \times 1.85}{1.152} EI_c = 17.855 \times 10^{10} E$

$M_A^c = 2.554 \times 5.27 \times 10^{10} E = 13.460 \times 10^{10} E$

柱传递弯矩系数： $C_{AB}^c = 0.754$ 。

4 柱帽对板带弯矩分配的影响分析

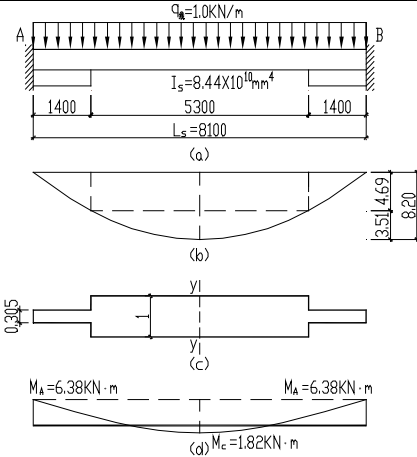
假设作用在板带上的均布线荷载 $q_{线} = 1.0 \text{ kN/m}$ 。按静定杆件算，跨中总弯矩

$= q_{线} l_s^2 / 8 = 1.0 \times 8.1^2 / 8 = 8.201 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，变截面处弯矩

$= q_{线} l_s x (1 - x / l_s) / 2 = 4.69 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，静力弯矩图面积

$\frac{2}{3} \times \frac{3.51 \times 5.3 + 4.69 \times 5.3}{1} + \frac{2}{3} \times \frac{4.69 \times 1.4}{3.282} = 39.260$

比拟柱截面见图 4。比拟柱截面面积： $A = 8.1 \times 0.305 + 5.3 \times 0.695 = 6.154$ ；板带的固端弯矩： $M_A = M_B = \frac{39.260}{6.154} = 6.38 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ；叠加法求得板带跨中弯矩： $M_c = 1.82 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。



(a) 简图 (b) 比拟荷载 (c) 比拟柱截面 (d) 最终计算结果

图 4 板带弯矩计算

而对于不变截面杆，固端弯矩：

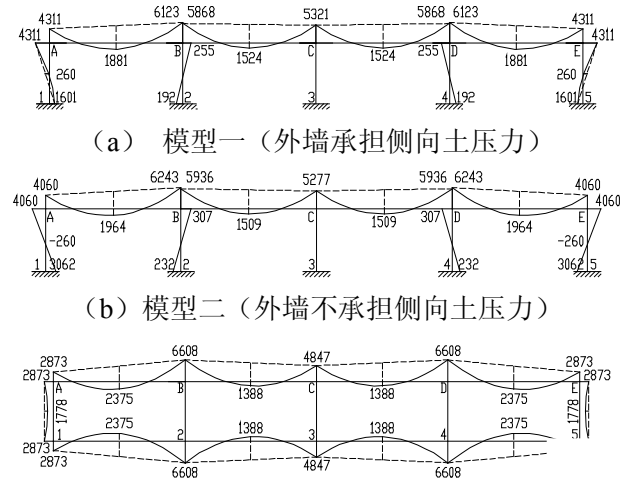
$M_A' = M_B' = \frac{1}{12} q_{线} l_s^2 = 5.468 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ；跨中弯矩：

$M_c' = \frac{1}{24} q_{线} l_s^2 = 2.734 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

对比可见，由于柱帽的存在，固端弯矩增加了 16.68%，跨中弯矩减少了 33.43%。

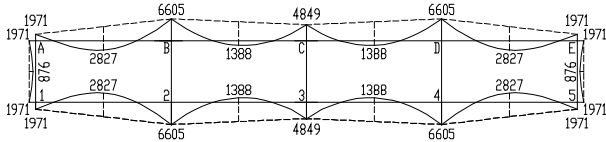
6 模型计算弯矩对比分析

根据力矩分配法，得到四个模型的内力分布情况，见图 5。由图可见：1) 侧向土压力存在，对端跨板带弯矩有平衡作用，减少弯矩峰值；2) 边墙参考经验系数法提供的 $M_c = 0.40M_0$ 计算不能满足使用要求；内墙按照 $M_c = 0.25M_0$ 计算结果又偏于安全；3) 对称模型第一跨弯矩峰值比基础为刚性模型要大，而内跨弯矩值要小；4) 加强边支座刚度，可以有效减少第一跨跨中弯矩，其对内跨影响很小；5) 外墙随计算模型变化而表现出不同的内力分布情况，与普通挡土外墙受力情况有差异。



(a) 模型一（外墙承担侧向土压力）
(b) 模型二（外墙不承担侧向土压力）
(c) 模型三（端支座设框架柱和柱帽）

位置	第一跨	第二跨
计算模型		
模型一	4939	5035
模型二	4956	5047
模型三	5038	4957
模型四	5963	4956
经验系数法	4939	4939



(d) 模型四（端支座不设框架柱和柱帽）

图 5 内力图/kN·m

各模型同一截面处弯矩值对比分析见表 1~4

【所有的表改为可编辑的状态，不要做成图片】。

表 1 中模型四的外墙端支座没有柱帽和框架柱设置，因此没有“支座削峰处弯矩”，支座削峰位置为框架柱、平托板形成的刚域边缘，计算取沿柱边向板 45 度扩散角与无梁楼板中线相交位置，不是平托板边缘处，具体位置距离柱中心距离= $(0.5X \text{ 柱宽} + \text{平托板厚} + 0.5X \text{ 楼板厚}) = 0.35 + 0.4 + 0.25 = 1.0$ 米。**【解释该名词意义？是指柱帽边缘处的弯矩吗】**

各模型同截面处弯矩值对比 表 1

计算模型	位置	外墙端	第一跨	第一内	第二跨	中间
		支座	跨中	支座	跨中	支座
模型一	截面弯矩值	4311	1881	6123	1524	5321
	支座削峰处弯矩	2302		3814		3207
模型二	截面弯矩值	4060	1964	6243	1509	5277
	支座削峰处弯矩	2082		3903		3173
模型三	截面弯矩值	2873	2375	6608	1388	4847
	支座削峰处弯矩	1023		4303		2834
模型四	截面弯矩值	1971	2827	6605	1388	4849
	支座削峰处弯矩			4301		2835

从表 2 可以看出，经验系数法总弯矩值与各模型削峰后跨间总弯矩计算值基本契合，削峰后跨间总弯矩值= $0.5X$ （左、右支座削峰处弯矩值之和）+ 跨中弯矩值。**【表 2 和表 1 有什么区别？把表 2 数据填入表 1 不行吗？表 2 主要是对比总弯矩值差异，原表格是 EXCEL 表格，最后一行提供过经验系数法数值，可能博士在批改时提了一格看不到了，现改成 WORD 可见表格。表 1 中各截面总弯矩值，经验系数法并没有对应的计算值。】**模型四第一跨总弯矩值较大是因为边支座未设框架柱和柱帽，已经与经验系数法计算假定不符。

计算模型削峰后跨间总弯矩值对比【所谓的跨间总弯矩是什么意思？已在上图给出相关说明】 表 2

从表 3 可以看出，基础为刚性时截面第一跨弯矩与经验系数法基本契合，但第二跨差距较大，考虑经验系数法“允许将柱上板带负弯矩的 10% 分配给跨中板带”^[1] 计算原则，调整后的弯矩与力学计算相符合。上下对称计算模型计算结果变异较大，特别是第一跨正负弯矩均相差甚远，直接采用经验系数是不安全的。

柱上板带截面弯矩值对比（按 67% 分配截面弯矩值）表 3

位置	外墙端	第一跨	第一内	第二跨	中间
计算模型	支座	跨中	支座	跨中	支座
模型一	1542	1260	2555	1021	2149
模型二	1395	1316	2615	1011	2126
模型三	685	1591	2883	930	1899
模型四	1321	1894	2882	930	1899
经验系数法	1630	1284	2470	889	2470

从表 4 可以看出，各模型外墙端支座和第一内支座弯矩值也高于经验系数法。

跨中板带截面弯矩值对比（按 33% 分配截面弯矩值）表 4

位置	外墙端	第一跨	第一内	第二跨	中间
计算模型	支座	跨中	支座	跨中	支座
模型一	760	621	1259	503	1058
模型二	687	648	1288	498	1047
模型三	338	784	1420	458	935
模型四	650	933	1419	458	936
经验系数法	198	1087	840	741	840

7 设计建议

6.1 端跨是地下无梁楼盖设计的重点

以上计算表明，无论采用何种无梁楼盖形式，第一跨中弯矩和第一内支座弯矩都是最大值。经验系数法假定楼层板只承受竖向荷载作用，较为理想的状态是端跨外有悬挑板并能平衡端支座弯矩。地下单层无梁楼盖的力学模型中没有外悬挑板，相反有地下室外墙存在并承担侧向土压力，造成端跨板带、外墙和基础间可以传递弯矩，互相影响，这是地下无梁楼盖结构与普通无梁楼层设计的区别。

6.2 应注重基础刚度、地下室外墙对无梁楼盖影响

基础刚度越大对端跨越为有利，反之则加大端跨板带弯矩，完全假定基础刚性是偏于不安全的。侧向土压力可能对板带有利也可能加剧板带弯矩，这取决于地下无梁楼盖结构整体模型设计。用经验系数法设计时，直接按经验系数设计板带会与实际受力状况有差别；采用等代框架设计时，不考虑基础刚度的影响是不全面的。应

括无梁楼盖、地下室外墙、基础形式三位一体的计算模型，综合分析侧向土压力、端支座和基础对端跨板带的影响。

6.3 边支座设置端柱帽是保证端跨安全的重点

在一些设计中，设计人在边跨未设置端柱帽，这种情况应在合理分析后方可采用。设置柱帽可以有效地提高边跨外支座板带的抗弯刚度，相比不变截面板带，柱帽将板带负弯矩提高，由柱帽形成的刚域来承担，图 5 (b)、(c) 两个内力图对比很明显【? 此处取消后面这句话：板带配筋计算控制点位于刚域边缘处】。如果采用经验系数法设计，取消该柱帽还会造成实际结构模型与计算假定不相符。经验系数法中很重要一点是，利用柱帽形成的节点刚域减少板带计算跨度，柱上板带负弯矩是柱帽刚域边缘的削峰值，没有边支座柱帽就等于增加端跨板带计算跨度，计算时就不能利用柱帽形成的有效宽度 b_{ce} [1]。

笔者认为边跨跨度小于内跨，墙内边到第一内支座刚域处的长度小于 $(l-2b_{ce}/3)$ 时，才可以考虑取消设置边支座柱帽。

6.4 建议上下对称模型的外墙应分带设计

外墙既是端支座又是顶板、基础间内力传递构件，同时要承担侧向土压力，从力学计算可以看到，该构件受板带影响较大，与普通地下室的挡土外墙内力分布有很大不同。等代框架法中，端跨柱上板带分配 90% 的弯矩，是因为其计算模型中边支座间设框架梁，该梁的抗扭能力不足，在跨中板带部位不能有效平衡板带传来的弯矩。根据文 [2]、[5] 介绍，当支座由墙组成且墙的长度不小于 $3b/4$ 时 (b 为计算板带的宽度)，可认为负弯矩在 b 范围内均匀分布。地下室外墙设计也要根据工程特点，选择不同的设计方案，当基础刚度较大时，可以遵循文献的建议均匀分布墙体弯矩；当计算模型为上下对称模型时，就要考虑柱帽、边框架柱对墙体刚度影响，可以遵循柱上 67%、跨中 33% 的分配原则，与无梁楼盖板带划分相对应，这种模型中墙体外侧为整体受拉区域，此侧竖向钢筋就要设计成连续不中断钢筋，上下锚固于楼板中。

6.5 冲切设计

平托板处设置抗冲切钢筋形式见图 6 轴线左侧示意。其中冲切面的设计可能会与计算有些差别，计算中的抗冲切箍筋面积是指“与呈 45° 冲切破坏锥体斜截面相交的全部箍筋截面面积” [6]。以图 6 左侧说明，如计算只需要 3 个箍筋套，这份图纸设计满足计算要求的；计算需要 6 个箍筋套，图纸中

实际只有 3 个箍筋套参与工作，不能满足设计要求的。解决的办法是将箍筋套在平托板范围内全高设置，即图 6 轴线右侧所示。

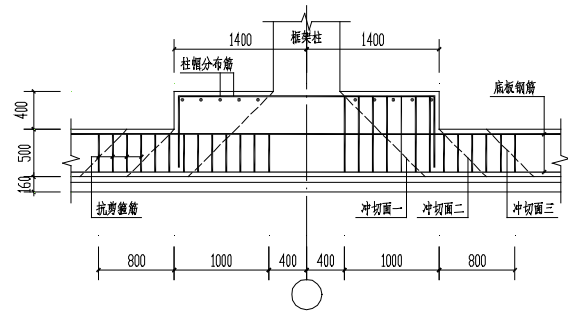


图 6 冲切设计示意图

7 结语

现有文献对无梁楼盖设计是有针对性和限制要求的，如适用于升板结构、空心楼盖结构等，地下无梁楼盖工程在应用上需考虑计算模型与文献推荐方法之间的不同，讨论的内容基于这些差异进行分析，可供地下工程以及低抗震等级工程中无梁楼盖设计参考。

参考文献

- [1] GBJ130-1990 钢筋混凝土升板结构技术规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，1991.
 - [2] CECS175:2004 现浇混凝土空心楼盖结构技术规程[S]. 北京：中国计划出版社，2005.
 - [3] 全国民用建筑工程设计技术措施（结构分册）[M]. 北京：中国计划出版社，2003.
 - [4] 朱聘儒. 双向板无梁楼盖[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1999.
 - [5] American Concrete Institute. Building Code Requirements For Structural Concrete (ACI 318-05). 2005
 - [6] GB50010-2002 混凝土结构设计规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.
- 100083 北京市海淀区中关村东路 8 号东升大厦 A 座 901 室
Tel: 15601060166 / 82526161-105