

周盼, 黄海林, 黄曙. 两对边简支另两对边固支组合肋预制底板混凝土双向叠合板的简化塑性设计方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(1):45-52. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.01.006

ZHOU P, HUANG H L, HUANG S. Simplified Plastic Design Method for Two-way Composite Slab with Precast Combined Ribs Panels with Two Opposite Supported Sides and the Other Two Clamped Edges [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(1):45-52. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.01.006

# 两对边简支另两对边固支组合肋预制底板 混凝土双向叠合板的简化塑性设计方法

周盼<sup>1</sup>, 黄海林<sup>1,2\*</sup>, 黄曙<sup>3</sup>

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南省智慧建造装配式被动房工程技术研究中心, 湖南 湘潭 411201; 3. 长沙市人防工程服务中心, 湖南 长沙 410013)

**摘要:** 目前组合肋预制底板混凝土双向叠合板(双向叠合板)已得到广泛应用. 针对双向叠合板设计计算复杂的特点, 基于塑性铰线法对两对边简支另两对边固支双向叠合板的设计计算进行了研究, 推导出双向叠合板的极限承载力, 确定塑性铰线位置, 求解极限均布荷载和极限弯矩. 采用极限平衡法对双向叠合板的极限弯矩求解公式进行了简化分析, 得到极限弯矩的简化塑性计算公式. 采用简化公式对2个算例进行求解计算, 结果表明: 对于两对边简支另两对边固支双向叠合板可采用文章的简化公式进行计算, 简化后的塑性计算公式计算简便, 有利于在工程设计中推广使用.

**关键词:** 双向叠合板; 组合肋; 塑性设计; 两对边简支; 两对边固支

**中图分类号:** TU313.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2024)01-0045-08

## Simplified Plastic Design Method for Two-way Composite Slab with Precast Combined Ribs Panels and with Two Opposite Supported Sides and the Other Two Clamped Edges

ZHOU Pan<sup>1</sup>, HUANG Hailin<sup>1,2</sup>, HUANG Shu<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Engineering Research Center for Intelligently Prefabricated Passive House,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Changsha Civil Air Defense Engineering Service Center, Changsha 410013, China)

**Abstract:** At present, the two-way composite with precast combined ribs panel sand slab (two-way composite slab) has been widely used. In view of the complex design and calculation of two-way composite slab, the design and calculation of two opposite supported sides and the other two clamped edges two-way composite slabs are studied based on the plastic stranding method. The ultimate bearing capacity of the two-way composite slab is deduced and determined. The position of the plastic strand is determined, and the ultimate uniform load and ultimate bending moment are solved. The limit equilibrium method is used to simplify the analysis of the formula

收稿日期: 2021-03-18

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年项目资助(19B188); 湖南省自然科学基金青年基金资助项目(2018JJ3161); 湖南科技创新计划项目资助(2023SK2014)

\* 通信作者, E-mail: hhlvsgeenius@163.com

for the ultimate bending moment of the two-way composite slab, and the simplified plastic formula for the ultimate bending moment is obtained. A simplified formula is used to solve the two calculation examples, and the results show that the simplified formula of this paper can be used for the calculation of two opposite supported sides and the other two clamped edges two-way composite slab, and the simplified plastic calculation formula is easy to calculate. It is conducive to popularization and use in engineering design.

**Keywords:** two-way composite slab; combined rib; plastic design; two opposite supported sides; two opposite clamped edges

装配式建筑是用预制构件、部品部件在工地装配而成的建筑.装配式建筑具有设计标准化、生产工厂化、施工装配化三大特点,是建筑工业化的一种重要形式,是推动建筑业转型升级的重要抓手.自《绿色建筑行动方案》(国办发〔2013〕1号)发布以来,装配式建筑在我国已得到了广泛的推广应用.楼盖结构是建筑结构的重要组成部分,叠合楼盖在装配式建筑中得到了广泛应用,目前应用最为成熟的叠合楼盖体系包括<sup>[1]</sup>:压型钢板混凝土组合板、钢筋桁架叠合板和预制带肋底板混凝土叠合板.传统的叠合楼板按单向板设计,横向无受力钢筋、计算模型不合理,导致受力性能不好,容易开裂,因而只能在小跨度楼板中使用,且传统预制叠合楼板的整体承载能力较差.因此,国内外学者围绕叠合楼板的双向受力性能及其结构创新做了大量研究.李金华等<sup>[2]</sup>提出考虑正交构造异性特征影响的双向叠合板的简化弹性计算方法,通过引入等效跨度比,查用等效的各向同性板的弹性计算系数表,即可进行弹性设计计算;姜德文等<sup>[3]</sup>通过实验研究双向叠合板的受弯疲劳性能,研究结果表明不同肋板形式的叠合板在同一疲劳荷载作用下具有相同的疲劳性能,叠合面的不同构造不会影响叠合板的整体受力性能;刘文政等<sup>[4]</sup>研究不同类型的桁架对钢管桁架叠合板抗弯性能的影响,对预制底板和叠合板试件进行了静力试验,建立了钢管桁架叠合板上弦失稳的弯矩计算公式.

组合肋预制底板混凝土双向叠合板采用预制预应力混凝土带肋底板作为模板,根据需要可以将板肋设计成混凝土矩形肋、钢筋桁架或钢管桁架的组合肋形式,在混凝土矩形肋、钢筋桁架或钢管桁架的肋孔内设置横向钢筋,再浇筑混凝土叠合层形成组合肋预制底板混凝土双向叠合板<sup>[5-6]</sup>.预制带肋底板板肋的演变及其组合如图1所示.图1a为传统矩形肋底板,以该矩形肋底板为永久模板,在板肋孔洞设置横向穿孔钢筋和在拼缝处设置折线防裂钢筋,浇筑混凝土叠合层可形成矩形肋底板混凝土叠合板<sup>[7-8]</sup>;图1b为钢筋桁架底板,在底板上设有钢筋桁架,混凝土底板中的钢筋与钢筋桁架相连,以该钢筋桁架底板为永久模板,再浇筑混凝土面层可形成钢筋桁架叠合板<sup>[9]</sup>;图1c为矩形肋与钢筋桁架组合肋底板,将矩形肋与钢筋桁架组合可明显改善叠合板的受力性能<sup>[10]</sup>;图1d为钢管桁架底板,钢管桁架底板叠合板是一种新型混凝土叠合板,可在底板设置预应力筋,叠合板上部桁架钢管内灌注高强度砂浆,可明显提高叠合板施工阶段的刚度<sup>[11]</sup>;图1e为矩形肋与钢管桁架组合肋底板.对比传统的叠合板,组合肋预制底板混凝土叠合板具有以下优点:(1)刚度与承载力高,自重较;(2)底板反拱度小,板底平整;(3)实现了双向配筋<sup>[12-14]</sup>.因此,组合肋预制底板叠合板是叠合楼板体系未来发展的重要方向,对其进行研究具有重要的现实意义.

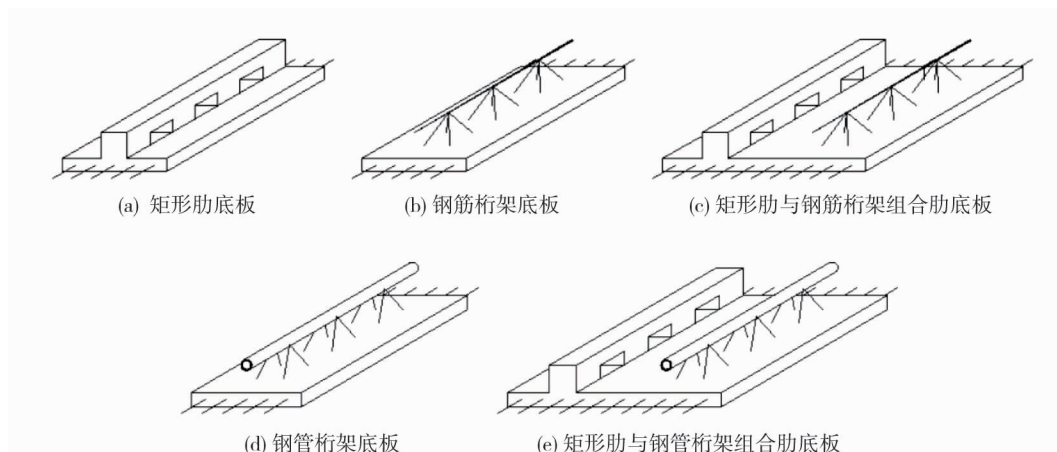


图1 预制带肋底板板肋的演变及其组合

目前,国内组合肋预制底板叠合板已经开始推广应用,有关叠合板的设计计算主要采用弹性薄板理论.塑性铰线理论主要用于现浇板的设计,对于组合肋预制底板混凝土双向叠合板,由于拼缝的存在,正交2个方向上板的有效厚度不同,因此塑性铰线形成位置、极限弯矩与现浇板有较大不同.本文基于塑性铰线法推导得到了对两对边简支另两对边固支的双向叠合板简化塑性设计方法,采用该方法可有效解决正交方向刚度异性导致的双向叠合板塑性设计计算问题,有利于在工程设计中推广使用.

## 1 塑性铰线法原理

塑性铰线法是由苏联学者 Ingerslev 和丹麦学者 Johansen<sup>[15]</sup> 提出及推广,瑞典和丹麦最先采用塑性铰线法对建筑楼盖结构进行设计,此后塑性铰线法在楼盖结构设计中得到了广泛的应用.板在极限荷载作用下开裂,所有塑性转动都沿着屈服线展开,屈服线的形成与屈服线的极限弯矩相适应,此时,板的塑性变形要远大于弹性变形.因而可以假设屈服线之间的板块都是一个平面,双向叠合板塑性铰线位置可以通过下面3条基本原则进行确定<sup>[15-17]</sup>:

1) 板沿着屈服线进行破坏,屈服线是一条直线,在破坏机构中起着铰接作用,将破坏的板进行连接,而被屈服线分割的板块可以沿着屈服线进行竖向微小的位移.

2) 破坏机构中各板块可以沿着支座轴线转动,如果板的边界条件是固支,则会沿着固支边界形成一条屈服线.

3) 当破坏机构发生位移时,其屈服线通过相邻板块轴线之间的交点.

## 2 两短对边简支另两长对边固支双向叠合板

若叠合板的支座采取对称配筋时,两长对边简支另两短对边固支边界条件下双向叠合板承受均布荷载,产生的破坏机构如图2所示.双向叠合板2个方向(短跨和长跨)的长度分别是  $l_x$  和  $l_y$ ,令  $l_y = nl_x$ ,则  $n \geq 1$ .塑性铰线在单位长度上的极限弯矩分别为  $m_x, m_y, m_x', m_x'', m_y', m_y''$ ,且  $m_y = \alpha m_x, \alpha \leq 1$ .由于支座配筋对称,所以  $m_x' = m_x'', m_y' = m_y''$ .

两长对边简支另两短对边固支双向叠合板承受均布荷载,叠合板的固支边长度为  $l_x$ ,令短跨、长跨方向支座极限弯矩与跨中极限弯矩关系为  $m_x' = m_x'' = \beta_x m_x, m_y' = m_y'' = \beta_y m_y$ ,则两长对边简支另两短对边固支双向叠合板短跨、长跨方向支座极限弯矩与跨中极限弯矩关系为  $m_y' = m_y'' = 0, \beta_y = 0$ .

### 2.1 推导极限均布荷载计算公式

假定板在极限荷载作用下发生破坏时,在板底或板面的裂缝处形成如图2所示的塑性铰线,引入  $x = sl_x, l_x/2$  可确定塑性铰线的位置,其中  $\theta$  为一塑性铰线与短边  $l_x$  的夹角.被屈服线分割的各板块处于平衡状态,同塑性变形相比,各板块的弹性变形非常微小,可以忽略不计,假定各板块为刚性,在板的屈服线附近有足够的塑性转动,所有塑性转动都沿着屈服线出现,塑性变形主要集中在塑性铰线附近的位置.

由虚功原理可知:在均布荷载作用下叠合板处于平衡状态,如果发生任意微小变形,则均布荷载所做的功  $\delta W$  (力 $\times$ 位移)总和等于楼板内部的变形势能  $\delta U$ .当叠合板达到极限荷载时而破坏时,取叠合板中点在荷载作用方向上的虚位移为1,而塑性铰线上任意一点的虚位移为  $\omega(x, y)$ ,叠合板中屈服线上内力所做的功和极限均布荷载所做的功大小相等,屈服线上内力所做的功只由弯矩产生.

而极限均布荷载  $q$  在机构中所做的外功可通过式(1)计算.

$$W_e = q \sum_n \iint_{A_n} \omega(x, y) dA_n = q \left( \frac{l_x}{2} \times l_y \times 1 - 2 \times \frac{1}{3} \times \frac{l_x}{2} \times sl_x \times 1 \right) = \frac{ql_x}{6} (3l_y - 2sl_x) = \frac{ql_x^2}{6} (3n - 2s). \quad (1)$$

双向叠合板的内力功可以通过塑性铰线法进行计算,屈服线上内力所做的功将只由弯矩产生,即为极限弯矩在屈服线上的相对转角做出的总功,虚功方程为

$$W_i = - \sum m_i l_i \gamma_i = - \left( m_x l_y \frac{4}{l_x} + m_x' l_y \frac{4}{l_x} + m_y l_x \frac{2}{x} + m_y' l_x \frac{2}{x} \right) = - 2 \left[ 2n(1 + \beta_x) + \frac{\alpha}{s}(1 + \beta_y) \right] m_x; \quad (2)$$

$$W_e + W_i = 0. \quad (3)$$

可解得双向叠合板极限均布荷载  $q$  的基本公式为

$$q = \frac{12m_x}{l_x^2} \frac{2n(1 + \beta_x) + \frac{\alpha}{s}(1 + \beta_y)}{3n - 2s}. \quad (4)$$

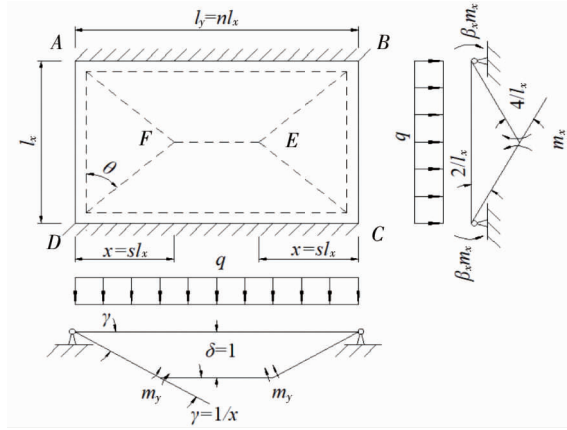


图2 两短对边简支另两长对边固支双向叠合板在均布荷载作用下的破坏机构

## 2.2 确定塑性铰线位置

叠合板在极限均布荷载  $q$  作用下,可根据塑性铰线上限求解方法,求得危险情况下塑性铰线的位置.

由  $\frac{dq}{ds} = 0$ , 对式(3)进行简化:

$$s^2 + \frac{\alpha(1 + \beta_y)}{n(1 + \beta_x)}s - \frac{3\alpha(1 + \beta_y)}{4(1 + \beta_x)} = 0. \quad (5)$$

令  $\lambda = \frac{1 + \beta_y}{1 + \beta_x}$ , 代入式(5)得

$$s^2 + \frac{\alpha\lambda}{n}s - \frac{3\alpha\lambda}{4} = 0. \quad (6)$$

解式(6),取大于零的根为  $s$  的可能解,得

$$s = \frac{\alpha\lambda}{2n} \left( \sqrt{1 + \frac{3n^2}{\alpha\lambda}} - 1 \right); \quad (7)$$

$$\theta = \arctan 2s \quad (8)$$

可见,叠合板塑性铰线的形成位置由  $s$  和  $\theta$  求出.

则

$$x = \frac{\alpha\lambda l_x}{2n} \left( \sqrt{1 + \frac{3n^2}{\alpha\lambda}} - 1 \right). \quad (9)$$

## 2.3 求解极限均布荷载和极限弯矩

由已知条件知:  $\beta_y = 0$ ,  $\lambda = \frac{1}{1 + \beta_x}$ , 令

$$\alpha_q = 12 \left[ \frac{2n(1 + \beta_x) + \frac{\alpha}{s}}{3n - 2s} \right]. \quad (10)$$

将式(10)代入式(4),整理得到极限均布荷载求解公式如式(11)所示.

$$q = \alpha_q \frac{m_x}{l_x^2}. \quad (11)$$

式中: $\alpha_q$ 为双向叠合板的极限均布荷载系数.令 $\alpha_m = \frac{1}{\alpha_q}$ ,代入式(11)得到极限弯矩的求解公式:

$$m_x = \alpha_m q l_x^2. \quad (12)$$

式中: $\alpha_m$ 为双向叠合板的极限弯矩系数.从以上推导公式可知:双向叠合板跨中极限弯矩系数 $\alpha_m$ 与双向叠合板的边长比 $n$ 的大小,取决于2个方向配筋比值 $\alpha$ 以及支座配筋因素<sup>[3]</sup>.

### 3 两长对边简支另两短对边固支双向叠合板

由上文可知:当叠合板的边界条件发生改变,即边界条件改为两长对边简支另两短对边固支,对均布荷载作用下双向叠合板的极限均布荷载和极限弯矩求解(叠合板固支边的长度 $l_x$ ,见图3),可令 $m_x' = m_x'' = 0$ ,  $\beta_x = 0$ ,  $\lambda = 1 + \beta_y > 1$ .代入式(7)~式(10)即可得 $s, \theta, x, \alpha_q$ ,通过式(11)和式(12)求得极限均布荷载 $q$ 和极限弯矩 $m_x$ .

$$s = \frac{\alpha\lambda}{2n} \left( \sqrt{1 + \frac{3n^2}{\alpha\lambda}} - 1 \right); \quad (13)$$

$$\theta = \arctan 2s; \quad (14)$$

$$x = \frac{\alpha\lambda l_x}{2n} \left( \sqrt{1 + \frac{3n^2}{\alpha\lambda}} - 1 \right); \quad (15)$$

$$\alpha_q = 12 \left[ \frac{2n + \frac{\alpha}{s}(1 + \beta_y)}{3n - 2s} \right]. \quad (16)$$

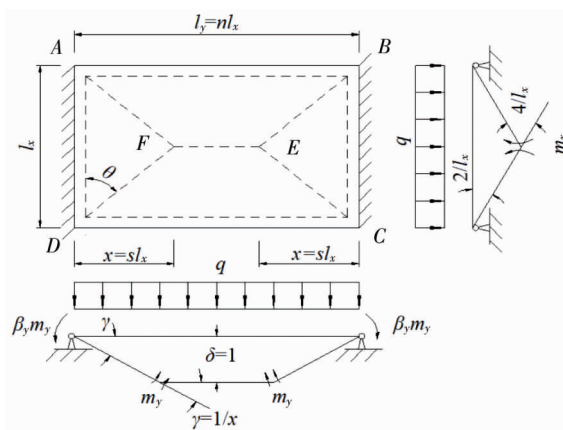


图3 两长对边简支另两短对边固支双向叠合板在均布荷载作用下的破坏机构

### 4 双向叠合板简化塑性计算公式

假设双向叠合板承受荷载达到极限状态,在 $x, y$ 方向上的受力钢筋达到屈服,由极限平衡法可得到式(17).

$$\begin{cases} m_x = A_{sx} f_{sx} \gamma_{sx} h_{ox}; \\ m_y = A_{sy} f_{sy} \gamma_{sy} h_{oy}; \\ m_x' = A_{sx}' f_{sx}' \gamma_{sx}' h_{ox}'; \\ m_y' = A_{sy}' f_{sy}' \gamma_{sy}' h_{oy}'. \end{cases} \quad (17)$$

式中: $A_{sx}, A_{sy}, A_{sx}', A_{sy}'$ 为叠合板跨内与支座截面在 $x$ 轴与 $y$ 轴2个方向单位宽度内的纵向受力钢筋的截面面积; $f_{sx}, f_{sy}$ 为叠合板跨内与支座截面在 $x$ 轴与 $y$ 轴2个方向钢筋的抗拉强度设计值; $\gamma_{sx}, \gamma_{sy}, \gamma_{sx}', \gamma_{sy}'$ 为叠合板跨与支座的内力臂系数; $\gamma_{sx} h_{ox}, \gamma_{sy} h_{oy}, \gamma_{sx}' h_{ox}', \gamma_{sy}' h_{oy}'$ 为叠合板跨内与支座截面在 $x$ 轴与 $y$ 轴2个方向单位宽度内的内力偶臂,内力臂系数通常可取 $\gamma_{sx} = \gamma_{sy} = \gamma_{sx}' = \gamma_{sy}' = 0.9 \sim 0.95$ ,推导可以得出:

$$\alpha = \frac{m_y}{m_x} = \frac{A_{sy} f_{sy} h_{oy}}{A_{sx} f_{sx} h_{ox}} \quad (18)$$

由于双向叠合板在水平和垂直2个方向刚度不同,且叠合板的构造特征成正交异性,通过对比可以知道在正交两个方向上双向叠合板的弯矩比值 $\alpha$ 要比现浇板小,一般情况下 $\alpha \leq 1$ .而且双向叠合板是一种以钢筋桁架底板作为模板在其上浇筑混凝土的构件,为二次受力构件,因此在对叠合板进行设计时,在负弯矩区域的受力分析只考虑可变荷载和二次浇筑区域叠合板的自重所产生的弯矩设计值,和传统楼盖结构相比,组合肋预制底板混凝土双向叠合板的配筋要少,能节约钢材,且能够减少楼板厚度和自重.叠合板的 $\beta_x, \beta_y$ 值可以通过下面2个公式进行计算:

$$\beta_x = \frac{m_x'}{m_x} = \frac{A_{sx}' f_{sx}' h_{ox}'}{A_{sx} f_{sx} h_{ox}}; \quad (19)$$

$$\beta_y = \frac{m_y'}{m_y} = \frac{A_{sy}' f_{sy}' h_{oy}'}{A_{sy} f_{sy} h_{oy}}. \quad (20)$$

吴方伯等对不同边界条件下预制带肋底板混凝土双向叠合板的极限承载力进行了研究,提出了预制带肋底板混凝土双向叠合板极限弯矩的简化计算公式,并用试验结果与简化后的计算结果进行了对比,结果吻合较好<sup>[7]</sup>.本文在前人研究的基础上,对双向叠合板简化塑性公式进行了推导,得出了双向叠合板的简化塑性计算公式.

## 5 算例

### 5.1 两短对边简支另两长对边固支双向叠合板

已知:叠合板的长度3 910 mm,宽度5 080 mm,厚度120 mm,叠合板由10块强度为C50的预制混凝土带肋薄板组成(见图4),钢管桁架薄板尺寸为底板宽度500 mm,底板厚度35 mm,而钢管桁架宽度80 mm,高度95 mm,长度为3 910 mm,钢管规格为A28×1.0,焊管内注砂浆抗压强度 $\geq 50$  MPa.钢管桁架底板等距离设置5根高强预应力筋,规格为1 570级A<sup>H</sup>4.6,通过桁架孔洞的横向穿孔钢筋采用HPB300级,按A8@200布置,叠合板支座处负弯矩钢筋采用HPB300级,按A6@200布置,最后浇筑C20混凝土面层.对该模型的极限承载力和塑性铰线位置进行探讨.

解:令 $x$ 方向为强方向,由以上条件可知:

$l_x = 3\,910$  mm,  $l_y = 5\,080$  mm,  $A_{sx} = 252.46$  mm<sup>2</sup>,  $A_{sy} = 251.20$  mm<sup>2</sup>,  $A_{sx}' = A_{sy}' = 141.30$  mm<sup>2</sup>,  $h_{ox} = 100.1$  mm,  $h_{oy} = 85.0$  mm,  $h_{ox}' = h_{oy}' = 104.9$  mm,  $f_{sx} = 1\,110$  N/mm<sup>2</sup>,  $f_{sy} = f_{sy}' = f_{sx}' = 270$  N/mm<sup>2</sup>,  $\gamma_{sx} = \gamma_{sy} = \gamma_{sx}' = \gamma_{sy}' = 0.95$ .

1) 确定楼板的计算参数 $n, \alpha, \beta_x, \beta_y, \lambda_1$

$$n = l_y / l_x = 1.30;$$

$$m_x = A_{sx} f_{sx} \gamma_{sx} h_{ox} = 26.649 \text{ kN/m};$$

$$m_y = A_{sy} f_{sy} \gamma_{sy} h_{oy} = 5.477 \text{ kN/m};$$

$$m_x' = A_{sx}' f_{sx}' \gamma_{sx}' h_{ox}' = 3.802 \text{ kN/m};$$

$$m_y' = A_{sy}' f_{sy}' \gamma_{sy}' h_{oy}' = 3.802 \text{ kN/m};$$

$$\alpha = m_y / m_x = 0.206, \beta_x = m_x' / m_x = 0.143, \lambda_1 = \frac{1}{1 + \beta_x} = 0.875.$$

2) 对塑性铰线的位置进行确定

叠合板塑性铰线的位置可通过 $s$ 或 $\theta$ 确定,计算结果:

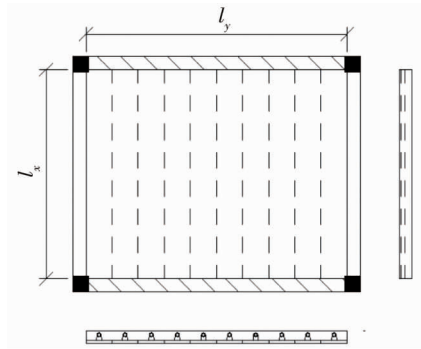


图4 两短对边简支另两长对边固支双向叠合板

$$s = \frac{\alpha\lambda_1}{2n} \left( \sqrt{1 + \frac{3n^2}{\alpha\lambda_1^2}} - 1 \right) = 0.330;$$

$$\theta = \arctan 2s = 33.42^\circ.$$

3) 预应力双向叠合板极限承载力的计算

$$\alpha_q = 12 \left[ \frac{2n(1 + \beta_x) + \frac{\alpha}{s}}{3n - 2s} \right] = 13.319;$$

$$q = \alpha_q (m_x / l_x^2) = 23.217 \text{ kN/m}^2.$$

通过求解可以得出两短对边简支另两长对边固支双向叠合板的极限荷载计算结果为  $23.217 \text{ kN/m}^2$ .

## 5.2 两长对边简支另两短对边固支双向叠合板

已知:叠合板的长度  $2\,720 \text{ mm}$ ,宽度  $3\,000 \text{ mm}$ ,厚度  $120 \text{ mm}$ ,叠合板由6块强度为C50的预制混凝土带肋薄板组成(见图5),带肋薄板尺寸为底板宽度  $500 \text{ mm}$ ,底板厚度  $35 \text{ mm}$ ,钢管桁架薄板尺寸为底板宽度  $500 \text{ mm}$ ,底板厚度  $35 \text{ mm}$ ,而钢管桁架宽度  $80 \text{ mm}$ ,高度  $95 \text{ mm}$ ,长度为  $3\,720 \text{ mm}$ ,钢管规格为  $A28 \times 1.0$ ,焊管内注砂浆抗压强度  $\geq 50 \text{ Mpa}$ .钢管桁架底板等距离设置4根高强预应力筋,规格为1570级  $A^H4.6$ ,通过桁架孔洞的横向穿孔钢筋采用HPB300级,按  $A8@200$  布置,叠合板支座处负弯矩钢筋采用HPB300级,按  $A6@200$  布置,最后浇筑C20混凝土.对该模型的极限承载力和塑性铰线位置进行探讨.

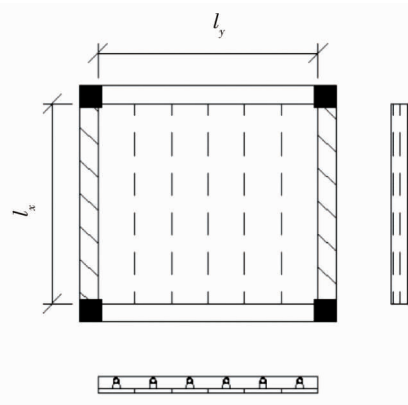


图5 两长对边简支另两短对边固支双向叠合板

解:令  $x$  方向为强方向,由以上条件可知:

$$l_x = 2\,720 \text{ mm}, l_y = 3\,000 \text{ mm}, A_{sx} = 219.23 \text{ mm}^2, A_{sy} = 251.20 \text{ mm}^2, A_{sy}' = 141.30 \text{ mm}^2, h_{ox} = 100.1 \text{ mm},$$

$$h_{oy} = 85.0 \text{ mm}, h_{oy}' = 104.9 \text{ mm}, f_{sx} = 1\,110 \text{ N/mm}^2, f_{sy} = f_{sy}' = 270 \text{ N/mm}^2, \gamma_{sx} = \gamma_{sy} = 0.95.$$

1) 确定楼板的计算参数  $n, \alpha, \beta_x, \beta_y, \lambda_1$

$$n = l_y / l_x = 1.10;$$

$$m_x = A_{sx} f_{sx} \gamma_{sx} h_{ox} = 23.141 \text{ kN/m};$$

$$m_y = A_{sy} f_{sy} \gamma_{sy} h_{oy} = 5.477 \text{ kN/m};$$

$$m_y' = A_{sy}' f_{sy}' \gamma_{sy}' h_{oy}' = 3.802 \text{ kN/m};$$

$$\alpha = m_y / m_x = 0.237, \beta_y = m_y' / m_y = 0.694, \lambda_1 = 1 + \beta_y = 1.694.$$

2) 对塑性铰线的位置进行确定

叠合板塑性铰线的位置可通过  $s$  或  $\theta$  确定,计算结果:

$$s = \frac{\alpha\lambda_1}{2n} \left( \sqrt{1 + \frac{3n^2}{\alpha\lambda_1^2}} - 1 \right) = 0.259;$$

$$\theta = \arctan 2s = 27.38^\circ.$$

3) 预应力双向叠合板极限承载力的计算

$$\alpha_q = 12 \left[ \frac{2n + \frac{\alpha}{s}(1 + \beta_y)}{3n - 2s} \right] = 16.176;$$

$$q = \alpha_q (m_x / l_x^2) = 50.596 \text{ kN/m}^2.$$

通过求解可以得出两短对边简支另两长对边固支双向叠合板的极限荷载计算结果为  $50.596 \text{ kN/m}^2$ .

本节采用简化后的计算公式对 2 个算例进行了计算,但目前尚未开展对比试验研究,对于 2 个算例的计算结果与实际受力的吻合程度,需要通过对比试验进行验证.

## 6 结论

1) 利用塑性铰线法原理对混凝土双向叠合板在 2 种不同的边界条件下(两短对边简支另两长对边固支、两长对边简支另两短对边固支)的塑性铰线位置进行推导,并对极限均布荷载和极限弯矩进行求解,

2) 提出双向叠合板的简化塑性计算公式,对双向叠合板的极限承载力计算方法进行简化.利用双向叠合板的简化塑性计算公式对 2 个算例进行计算,简化后的塑性计算公式计算简便,可以迅速求出双向叠合板的极限承载力,可为双向叠合板的设计提供参考.

3) 加速双向叠合板在工程中的应用,进一步降低建筑工程成本,实现节能减排、绿色环保的目标.

## 参考文献:

- [1] 黄海林. 预制带肋板混凝土叠合楼板受力性能及设计方法[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [2] 黄海林, 李金华, 曾垂军, 等. 预制带肋板混凝土双向叠合板等效各向同性板的弹性计算方法[J]. 应用力学学报, 2018, 35(3): 624-630.
- [3] 姜德文, 黄海林, 祝明桥, 等. 预制预应力带肋板混凝土叠合板的受弯疲劳性能试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(3): 76-83.
- [4] 刘文政, 崔士起, 刘传卿, 等. 预应力混凝土钢桁架叠合板受弯性能试验与理论研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(8): 95-106.
- [5] HUANG H L, LI J H, ZENG C J, et al. Simplified elastic design method using equivalent span ratio for two-way concrete composite slabs with precast ribbed panels[J]. Structural Concrete, 2019, 20(1): 213-224.
- [6] 黄海林, 张明亮, 杨凡. 预制带肋板混凝土双向叠合板的受力性能及设计方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [7] 吴方伯, 黄海林, 陈伟, 等. 预制带肋板混凝土双向叠合板极限承载力[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5): 34-40.
- [8] ZHANG J S, YAO Y, ZHOU X H, et al. Failure mode and ultimate bearing capacity of precast ribbed panels used for concrete composite slabs[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(12): 2005-2017.
- [9] 吴方伯, 黄海林, 陈伟, 等. 肋上开孔对预制预应力混凝土带肋薄板施工阶段挠度计算方法的影响研究[J]. 工程力学, 2011, 28(11): 64-71.
- [10] ZHANG J S, WANG Y Z, YAO Y, et al. Influence of reinforcement on in-plane mechanical behaviors of CSPRP under cyclic reversed load[J]. Materials and Structures, 2016, 49(1): 101-116.
- [11] 周广强, 张鑫, 王顺, 等. 预应力混凝土钢管桁架叠合板施工阶段短期刚度研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(6): 21-24.
- [12] 李金华, 黄海林, 曾垂军, 等. 四边固支预制带肋板混凝土双向叠合板的简化弹性计算方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(2): 33-43.
- [13] SALARI M R, SPACONE E. Analysis of steel-concrete composite frames with bond-slip[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(11): 1243-1250.
- [14] 刘成才, 宋荣芳. 预应力混凝土连续叠合空心板结构性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(6): 38-40.
- [15] PARK R, GAMBER W L. 钢筋混凝土板[M]. 上海: 同济大学出版社, 1991.
- [16] K W Johansen. Yield-line formulae for slabs[M]. London: Cement and Concrete Association, 1972.
- [17] 沈聚敏. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.