



# 美国工程木在装配式木结构建筑 中的应用 天津/北京研讨会

---

## 新修订规范GB 50005中 工程木结构设计问题探讨

哈尔滨工业大学土木工程学院

祝恩淳



# 1. 新修订规范GB 50005中的工程木

**层板胶合木 (Glued laminated timber, Glulam) :**

**普通层板胶合木, 等同于方木与原木**

**目测分等层板胶合木、机械弹性模量分等层板胶合木 (同等组合层板胶合木、对称异等组合胶合木、非对称异等组合胶合木), 美国胶合木属于此类**

**强度等级:  $TC_T24 \sim TC_T40$ ;  $TC_{YD}24 \sim TC_{YD}40$ ;  $TC_{YF}23 \sim TC_{YF}38$**

**结构复合木材 (SCL) : LVL、PSL、LSL等...**

**木基结构板材 (Wood-based structural panel) : 结构胶合板**

**(Structural plywood)、定向木片板 (OSB)**

**其他: 正交层板胶合木 (CLT)**

# 2. 新修订规范GB 50005中工程木产品的强度设计值



## 2.1 目标可靠度 $\beta_0$

工程木的强度设计值应满足 $\beta_0$ 要求。目标可靠度 $\beta_0$ 由经济技术发展水平决定，各国规定不同，不等价、不宜攀比。

《建筑结构可靠度设计统一标准》 GB 50068-2001规定：

表1结构构件承载力极限状态下的可靠指标

破坏类型	可靠度指标 $\beta_0$		
	安全等级一级	安全等级二级	安全等级三级
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2



## 2.2 可靠度分析与 $\gamma_R$ - $V_f$ 曲线

木材与木产品的强度设计值：

$$f_d = \frac{f_k K_{DOL}}{\gamma_R}$$

$f_d$ -强度设计值（主观的人为规定值）； $f_k$ -强度标准值，或特征值、5分位值（客观指标）； $K_{DOL}$ -荷载持续作用效应系数； $K_{DOL}=0.72$ ； $\gamma_R$ -抗力分项系数，取值应使木材的强度设计值满足 $\beta_0$ 要求，应经可靠度分析确定，取值与木材强度的变异性有关。

美国NDSWC规范中层板胶合木的强度标准值：

美国规范没有给出强度标准值，但可由所规定的允许应力反算出来，即：

$$f_{ck}=(F_c/145) \times 1.9; f_{bk}=(F_b/145) \times 2.1; f_{tk}=(F_t/145) \times 2.1; E_k=1.05E(1-1.645 \times 0.1)/145。$$



## 2.2 可靠度分析与 $\gamma_R-V_f$ 曲线

美国NDSWC规范中层板胶合木的强度标准值：

例如规范NDSWC中的胶合木1 DF L1D,  
 $F_c=1550\text{psi}$ ;  $E=1500000\text{psi}$ , 则  $f_{ck}=(F_c/145) \times 1.9=20.3\text{N/mm}^2$ ;  
 $E_k=1.05E(1-1.645 \times 0.1)/145=9075\text{N/mm}^2$ 。

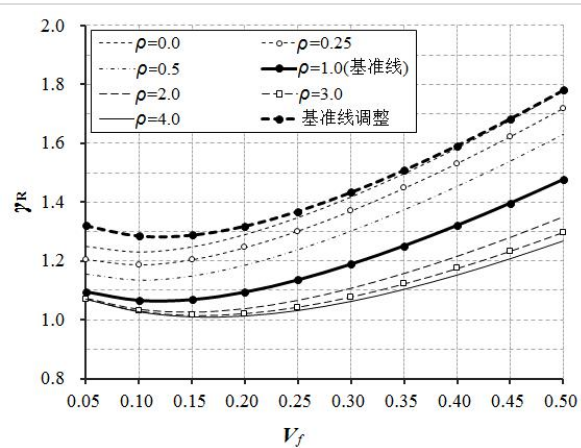
可靠度分析：

功能函数：  $Z=R-S$   $Z>0$ , 安全;  $Z=0$ , 极限状态;  $Z<0$ , 失效

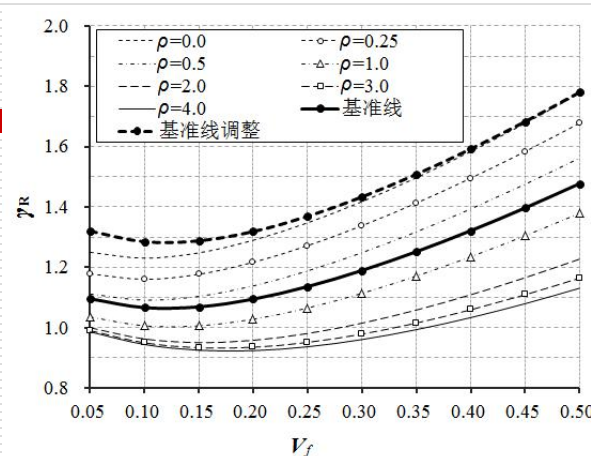
工程木产品构件功能函数进一步表示为：

$$Z = K_A K_P K_{Q3} f - \frac{f_k K_{DOL} (g + q\rho) K_B}{\gamma_R (\gamma_G + \psi_c \gamma_Q \rho)}$$

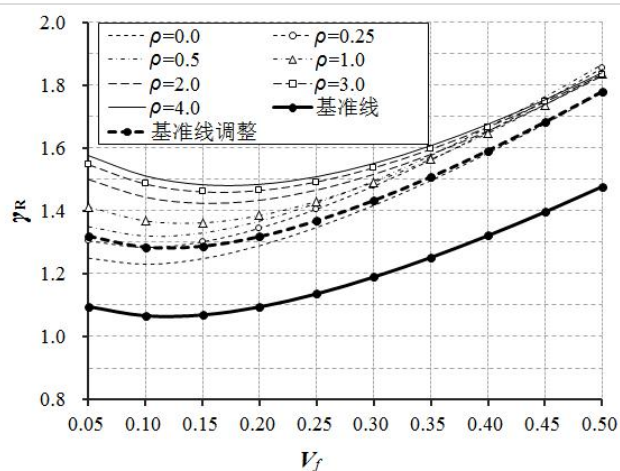
## 2.2 可靠度分析与 $\gamma_R-V_f$ 曲线



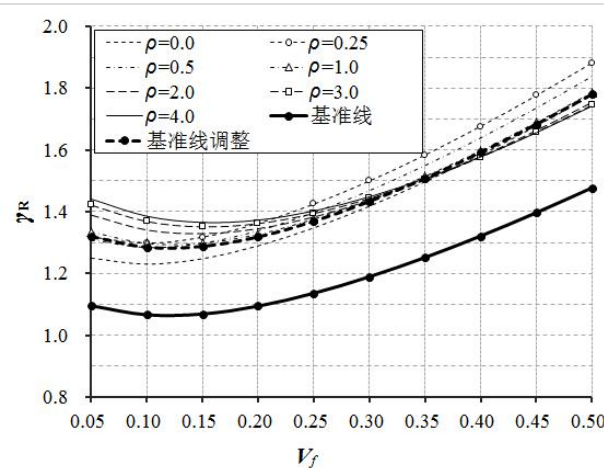
(a) 恒载+住宅楼面活荷载



(b) 恒载+办公楼面活荷载



(c) 恒载+雪荷载



(d) 恒载+风荷载

图1受弯构件 $\gamma_R-V_f$ 曲线 ( $\beta_0=3.2$ )



## 2.3 基准 $\gamma_R-V_f$ 曲线及强度设计值确定方法

确定强度设计值的基准  $\gamma_R-V_f$  曲线：恒载+住宅楼面活荷载， $\rho=1.0$

强度设计值调整措施：

- 1) 恒载与风荷载及恒载与雪荷载组合，将按基准线确定的强度设计值乘以0.83的调整系数。
- 2) 恒载与住宅楼面活荷载及恒载与办公楼面活荷载组合，对于 $\rho < 1.0$ 时，即恒载产生的内力大于活荷载产生的内力时（ $C_G G_k / C_Q Q_k \geq 1.0$ ），将按基准线确定的强度设计值乘以调整系数 $K_D$ ，其表达式为

$$K_D = 0.83 + 0.17\rho \leq 1.0$$



## 2.3 基准 $\gamma_R-V_f$ 曲线及强度设计值确定方法

上述关于木产品强度设计值的取值方法应取代

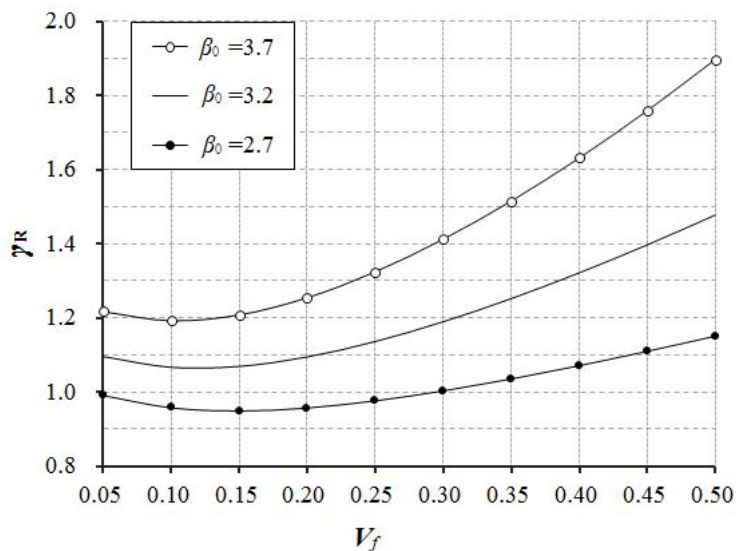
《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012中的相关规定。

表2 各类木材构件抗力分项系数  $\gamma_R$  (设计年限50年)

木材种类		北美方木	欧洲锯材			胶合木		
		压	拉	弯	压	拉	弯	压
变异系数 $V_R$		<b>0.20</b>	<b>0.35</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>
$\gamma_R$	一级 $\gamma_{R,1}$	<b>1.24</b>	<b>1.82</b>	<b>1.25</b>	<b>1.24</b>	<b>1.35</b>	<b>1.21</b>	<b>1.20</b>
	二级 $\gamma_{R,2}$	<b>1.09</b>	<b>1.50</b>	<b>1.10</b>	<b>1.09</b>	<b>1.20</b>	<b>1.07</b>	<b>1.06</b>
	三级 $\gamma_{R,3}$	<b>0.95</b>	<b>1.24</b>	<b>0.96</b>	<b>0.95</b>	<b>1.06</b>	<b>0.95</b>	<b>0.94</b>
延性	$\gamma_{R,1}/\gamma_{R,2}$	<b>1.14</b>	--	<b>1.14</b>	<b>1.14</b>	--	<b>1.13</b>	<b>1.13</b>
	$\gamma_{R,3}/\gamma_{R,2}$	<b>0.87</b>	--	<b>0.87</b>	<b>0.87</b>	--	<b>0.89</b>	<b>0.89</b>
脆性	$\gamma_{R,1}/\gamma_{R,2}$	--	<b>1.21</b>	--	--	<b>1.13</b>	--	--
	$\gamma_{R,3}/\gamma_{R,2}$	--	<b>0.83</b>	--	--	<b>0.88</b>	--	--



## 2.4 结构重要性系数 $\gamma_0$



设计方程:

$$\gamma_0 S \leq R$$

$\gamma_0 = 1.0$  (安全等级二级)

$\gamma_0 = 1.1$  (安全等级一级)

$\gamma_0 = 0.9$  (安全等级三级)

图2 不同安全等级条件下受弯木构件的 $\gamma_R$ - $V_f$ 曲线:  
恒载+居住楼面活荷载,  $\rho=1.0$

由图2:  $\gamma_0 = \gamma_{R,1} / \gamma_{R,2} = 1.19$  (平均);  $\gamma_0 = \gamma_{R,3} / \gamma_{R,2} = 0.84$  (平均)

解决办法: (1) 针对木结构修改关于结构重要性系数的规定; (2) 强度变异系数小于20%的木材或木产品 (工程木) 方可用于安全等级为一级的木结构。

# 3. 新修订规范GB 50005中 销连接的承载力



## 3.1 现行规范GB 50005-2003的计算方法

假设被连接的木构件材质等级相同，采用销槽承压、销承弯都达到极限状态（充分利用材料），并形成一个或两个塑性铰的失效模式，即：

$$R_d = k_v d^2 \sqrt{f_c}$$

- (1) 以顺纹抗压强度 $f_c$ 替代 $f_h$ ，分别取 $f_h=f_c$ ； $f_h=0.7f_c$ ； $f_h=0.9f_c$ 。
- (2) 考虑塑性并不充分发展，取 $k_w \approx 1.4$ （新近的试验研究再次证明了其适用性）。
- (3) 按Q235， $f_y=215\text{N/mm}^2$ 。
- (4) 取 $f_c=12\text{N/mm}^2$ 。

## 3.2 新修订规范GB 50005 采用的计算方法



采用欧洲屈服模式 (EYM) :

屈服模式	单剪连接	双剪连接
$I_m$		
$I_s$		
II		--
$III_m$		--
$III_s$		
IV		

$m$ -单剪连接中的较厚构件或双剪连接中的中部构件;

$s$ -单剪连接中的较薄构件或双剪连接中的边部构件;

$I_m$ -较厚或中部构件屈服;

$I_s$ -较薄或边部构件屈服;

II-销刚体转动, 较厚、较薄构件均屈服;

$III_m$ -销在较薄构件中形成塑性铰;

$III_s$ -销在较厚或中部构件中形成塑性铰;

IV-销在较薄和较厚构件或在边部和中部构件中皆形成塑性铰。

图3 销连接的屈服模式



## 3.2 新修订规范GB 50005-2017采用的计算方法

螺栓连接承载力标准值:

$$R_k = K_{a,\min} a d f_{ha}$$

$$K_{a,\min} = \min \{ K_{aI}, K_{aII}, K_{aIIIs}, K_{aIIIIm}, K_{aIV} \}$$

$$f_h = 77G$$

$$f_{h\perp} = 212G^{1.45} / \sqrt{d}$$

$K_{a,\min}$ -较薄构件（单剪连接）或边部构件（双剪连接）的销槽承压最小有效长度系数； $d$ -销直径； $a$ -较薄或边部构件的厚度； $f_{ha}$ -较薄或边部构件的销槽承压强度； $K_{aI}$ 、 $K_{aII}$ 、 $K_{aIIIs}$ 、 $K_{aIIIIm}$ 、 $K_{aIV}$ -对应各种屈服模式的较薄或边部构件的销槽承压有效长度系数。



## 3.2 新修订规范GB 50005采用的计算方法

各屈服模式对应的销槽承压有效长度系数:

$$K_{aI} = \alpha\beta \leq 1.0 \quad (\text{单剪连接})$$

$$K_{aI} = \alpha\beta/2 \leq 1.0 \quad (\text{双剪连接})$$

$$K_{aII} = \frac{\sqrt{\beta + 2\beta^2(1 + \alpha + \alpha^2) + \alpha^2\beta^3} - \beta(1 + \alpha)}{1 + \beta} \quad (\text{仅用于单剪连接})$$

$$K_{aIII} = \frac{\alpha\beta}{1 + 2\beta} \left[ \sqrt{2(1 + \beta) + \frac{1.647(1 + 2\beta)k_{ep}f_{yk}}{3\beta f_{ha}\alpha^2\eta^2}} - 1 \right] \quad (\text{仅用于单剪连接})$$

$$K_{aIIIs} = \frac{\beta}{2 + \beta} \left[ \sqrt{\frac{2(1 + \beta)}{\beta} + \frac{1.647(2 + \beta)k_{ep}f_{yk}}{3\beta f_{ha}\eta^2}} - 1 \right]$$

$$K_{aIV} = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{1.647\beta k_{ep}f_{yk}}{3(1 + \beta)f_{ha}}}$$

$\alpha = c/a$ -木构件的厚度比;

$\beta = f_{hc}/f_{ha}$ -木构件的销槽承压强度比;

$\eta = a/d$ -销径比。



## 3.2 新修订规范GB 50005采用的计算方法

螺栓连接承载力设计值： $R_d = K_{ad, \min} a d f_{ha}$

$$K_{ad, \min} = \min \left\{ \frac{K_{aI}}{\gamma_I}, \frac{K_{aII}}{\gamma_{II}}, \frac{K_{aIII_s}}{\gamma_{III}}, \frac{K_{aIII_m}}{\gamma_{III}}, \frac{K_{aIV}}{\gamma_{IV}} \right\}$$

$\gamma_i$ -抗力分项系数。

经校准：

螺栓连接  $\gamma_I=4.38$ ， $\gamma_{II}=3.63$ ， $\gamma_{III}=2.22$ ， $\gamma_{IV}=1.88$ 。

钉连接  $\gamma_I=3.42$ ， $\gamma_{II}=2.83$ ， $\gamma_{III}=2.22$ ， $\gamma_{IV}=1.88$ 。

上述关于销连接的计算方法应取代《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012中的相关规定。



# 4. 新修订规范GB 50005中 轴心受压木构件的稳定问题

## 4.1 什么是稳定系数?

规范GB 50005-2003计算式 (TC17、TC15、TB20) :

$$\lambda > 75 \quad \varphi = \frac{3000}{\lambda^2} \quad \lambda \leq 75 \quad \varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda}{80}\right)^2}$$

源自前苏联规范, 取 $E/f \approx 312$ :  $\varphi = \frac{3100}{\lambda^2}$

美国规范NDSWC计算式:

$$\varphi = \frac{1 + f_{cE} / f_c}{2c} - \sqrt{\left(\frac{1 + f_{cE} / f_c}{2c}\right)^2 - \frac{f_{cE} / f_c}{c}}$$

$$f_{cE} = \frac{\pi^2 E_{min}}{\lambda^2}$$



## 4.1 什么是稳定系数?

简单算例对比:

采用规范NDSWC中的胶合木(1 DF L1D), 制作轴心受压构件,  
 $F_c=1550\text{psi}$ ;  $E=1500000\text{psi}$ ;  $E_{\min}=780000\text{psi}$ , 设 $\lambda=100$ 。

按GB 50005: 
$$\varphi = \frac{3000}{\lambda^2} = \frac{3000}{10000} = 0.3$$

按NDSWC: 
$$f_{cE} = \frac{3.14^2 \times 780000}{10000} = 769.05 \text{ psi}$$

$$\varphi = \frac{1 + 769.05 / 1550}{2 \times 0.9} - \sqrt{\left( \frac{1 + 769.05 / 1550}{2 \times 0.9} \right)^2 - \frac{769.05 / 1550}{0.9}} = 0.457$$

结果对比:  $\varphi_{\text{NDS}} \approx 1.5 \varphi_{\text{GB5}}$ , 差别显著, 为什么?



## 4.1 什么是稳定系数?

受压木构件稳定承载力的设计值应为 
$$N_{cr,R} = f_{cr,d} A = \frac{f_{cr,k} K_{cr,DOL}}{\gamma_{cr,R}} A$$

$f_{cr,d}$ -符合考虑稳定问题的受压木构件可靠度要求的木材强度设计值，或称为临界应力设计值； $f_{cr,k}$ -临界应力标准值； $K_{cr,DOL}$ -稳定承载力的荷载持续作用效应系数； $\gamma_{cr,R}$ -满足可靠性要求的稳定承载力的抗力分项系数。

各国设计规范中稳定承载力均表示为 
$$N_{cr,R} = \varphi f_c A = \frac{\varphi f_{ck} K_{DOL}}{\gamma_R} A$$

$f_c$ -木材或木产品的抗压强度设计值； $f_{ck}$ -木材或木产品的抗压强度标准值； $K_{DOL}$ -木材或木产品强度的荷载持续作用效应系数； $\gamma_R$ -满足可靠性要求的抗力分项系数。

故：

$$\varphi = \frac{f_{cr,k} K_{cr,DOL} \gamma_R}{\gamma_{cr,R} f_{ck} K_{DOL}}$$



## 4.1 什么是稳定系数?

$$\varphi = \frac{f_{cr,k} K_{cr,DOL} \gamma_R}{\gamma_{cr,R} f_{ck} K_{DOL}}$$

表3 各国规范轴心受压木构件稳定问题相关参数的处理

规范国别	$K_{cr,DOL}$	$\gamma_{cr,R}$	$E/f_c$	计算式的形式
中国	$K_{cr,DOL} = K_{DOL}$	$\gamma_{cr,R} = \gamma_R$	定值	分段
日本	$K_{cr,DOL} = K_{DOL}$	$\gamma_{cr,R} = \gamma_R$	定值	分段
俄罗斯	$K_{cr,DOL} = K_{DOL}$	$\gamma_{cr,R} = \gamma_R$	定值	分段
欧洲	$K_{cr,DOL} = K_{DOL}$	$\gamma_{cr,R} = \gamma_R$	变量	连续
美国	$K_{cr,DOL} = 1.0$	$\gamma_{cr,R} \neq \gamma_R$	变量	连续
加拿大	$K_{cr,DOL} = 1.0$	$\gamma_{cr,R} \neq \gamma_R$	变量	连续
澳大利亚	$K_{cr,DOL} = K_{DOL}$	$\gamma_{cr,R} \neq \gamma_R$	变量	分段

中国等:

$$\varphi = \frac{f_{cr \cdot k}}{f_{ck}}$$

美国等:

$$\varphi = \frac{f_{cE}}{f_c}$$



## 4.2 新修订规范GB 50005采用的计算方法

各国规范中对稳定问题的认识和处理方法不同，稳定系数是无法直接比较的。但如果能统一认识，所有各国规范将给出基本相同的稳定系数值。此次修订，有关参数沿用既有的处理方法，但将 $E/f_c$ 处理为变量，以反映现代木产品应力分级的特点：

$$\lambda > \lambda_p$$

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$\lambda_p = c_c \sqrt{E_k / f_{ck}}$$

$$\varphi = \frac{a_c \pi^2 E_k}{\lambda^2 f_{ck}}$$

$$\varphi = \left( 1 + \frac{\lambda^2 f_{ck}}{b_c \pi^2 E_k} \right)^{-1}$$

$$c_c = \pi \sqrt{a_c b_c / (b_c - a_c)}$$



## 4.2 新修订规范GB 50005采用的计算方法

表4 受压木构件稳定系数算式中常数 $a_c$ 、 $b_c$ 、 $c_c$ 的值

常数	$a_c$	$b_c$	$c_c$
方木与原木 1组	0.92	1.96	4.13
方木与原木 2组	0.95	1.43	5.28
进口锯材	0.88	2.44	3.68
层板胶合木	0.91	3.69	3.45

方木与原木 1组：TC17、TC15、TB20级木材；

方木与原木 2组：TC13、TC11、TB17、TB15、TB13、TB11级木材。

层板胶合木适用于美国的层板胶合木。

上述关于稳定系数的计算方法应取代《胶合木结构技术规范》GB/T 50708-2012中的相关规定。



## 4.3 稳定系数计算的效果

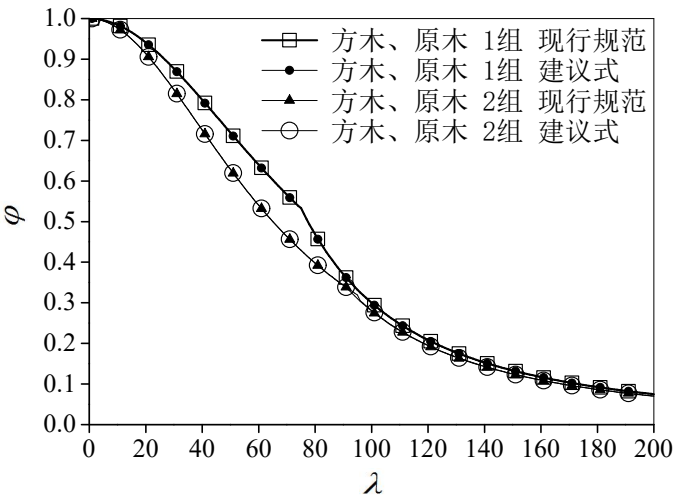


图4方木与原木构件

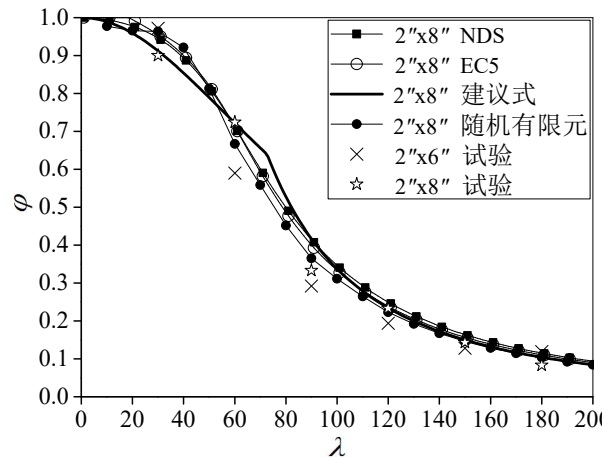


图5北美锯材构件

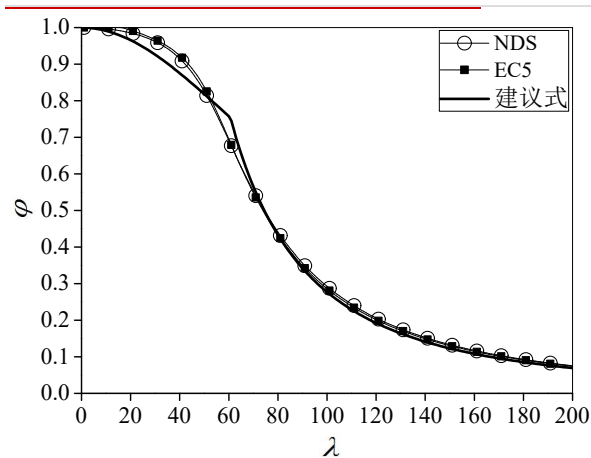


图6层板胶合木构件 (TC<sub>T</sub>32)

图5北美锯材构件 (S-P-F No.2 2"×8") : NDSWC-2005和EC 5计算结果的最大偏差为4.4% ( $\lambda=132$ ) , 平均偏差为2.8%。建议计算式结果与NDSWC的计算结果相比, 最大偏差为11.3% ( $\lambda=73$ ) , 平均偏差为5.6%。随机有限元分析结果与NDSWC计算结果的最大偏差为11.9% ( $\lambda=90$ ) , 平均偏差为8.0%。试验结果与NDSWC计算结果的最大偏差为28.1% ( $\lambda=180$ ) , 平均偏差为12.3%。



# 5. 新修订规范GB 50005中 受弯木构件的侧向稳定问题

采用与轴心受压构件相同的方法和形式：

$$\lambda_B > \lambda_{Bp} \quad \varphi_l = \frac{a_b \pi^2 E_k}{\lambda_B^2 f_{bk}} \quad \lambda_B = \sqrt{\frac{l_{ef} h}{b^2}}$$

$$\lambda_B \leq \lambda_{Bp} \quad \varphi_l = \left( 1 + \frac{\lambda_B^2 f_{bk}}{b_b E_k} \right)^{-1} \quad \lambda_{Bp} = c_b \sqrt{\frac{E_k}{f_{bk}}}$$

$$c_b = \pi \sqrt{a_b b_b / (b_b - a_b)}$$

表5 各类受弯木构件稳定系数算式中常数 $a_b$ 、 $b_b$ 、 $c_b$ 的值

常数	$a_b$	$b_b$	$c_b$
各类木产品平均值	0.701	4.896	0.905
建议取值 (含工程木)	0.70	4.90	0.90



## 6. 结束语

---

木结构设计中还有很多问题值得探讨：

可靠度问题、连接承载力的设计计算问题、受压、受弯构件的稳定问题值得继续探讨。

还有木结构的抗风、抗震问题、正常使用极限状态的验算问题等...  
需要学习国际先进经验与技术，更需要继承发展我国木结构的设计理论与方法...

**谢谢您！**