

研究報告

結構用自攻螺絲在木材之垂直引拔抵抗性能評估

葉民權^{1,2)} 林玉麗¹⁾ 宋雲煒¹⁾

摘 要

本研究採用直徑6~12 mm、長度200~302 mm之5種結構用自攻螺絲，探討對柳杉、花旗松、南方松、冰片木四種樹種木材之垂直引拔抵抗之影響。根據自攻螺絲穿透試驗結果顯示，結構用自攻螺絲在冰片木之單位長度垂直引拔強度高於柳杉65.3%，花旗松與南方松兩者條件結果相近且高於柳杉材49.6%。直徑10與12 mm之結構用自攻螺絲在木材的單位長度垂直引拔強度平均高於6 mm直徑條件50.0%，也高於8 mm直徑33.3%。根據螺紋長度全部鎖入木材之試驗結果顯示，單支結構用自攻螺絲在冰片木的垂直引拔容量高於柳杉材28.8%，而花旗松及南方松兩者條件之結果則與柳杉相近。直徑12 mm之單支結構用自攻螺絲在木材的垂直引拔容量為直徑6 mm條件者2.42倍，直徑10 mm結構用自攻螺絲亦為直徑6 mm條件者2倍。在8 mm直徑之結構用自攻螺絲其釘尖具木材切削刃者在木材之垂直引拔容量高於釘尖具金屬切削刃者32.1%。結構用自攻螺絲在木材的垂直引拔抵抗性能主要是受到木材密度、自攻螺絲直徑、有效螺紋長度以及釘尖型式之影響。

關鍵詞：自攻螺絲、集成材、垂直引拔抵抗、柳杉、冰片木。

葉民權、林玉麗、宋雲煒。2018。結構用自攻螺絲在木材之垂直引拔抵抗性能評估。台灣林業科學 33(2):109-23。

¹⁾ 國立屏東科技大學木材科學與設計系，91201屏東縣內埔鄉學府路1號 Department of Wood Science and Design, National Pingtung Univ. of Science and Technology, 1 Shuehfu Rd., Neipu Township, Pingtung 91201, Taiwan.

²⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail:yehmc@mail.npust.edu.tw

2017年9月送審 2018年3月通過 Received September 2017, Accepted March 2018.

Research paper

Evaluation of the Performance of the Vertical Withdrawal Resistance of Structural Self-tapping Screws in Wood

Min-Chyuan Yeh,^{1,2)} Yu-Li Lin,¹⁾ Yun-Wei Sung¹⁾

【 Summary 】

Five structural self-tapping screws with a diameter of 6~12 mm and a length of 200~302 mm were used to investigate the withdrawal resistance performance in wood species of Japanese cedar, Douglas fir, southern pine, and Kapur. Based on results of the penetration-through tests, the withdrawal unit force of a structural self-tapping screw for Kapur was 65.3% higher than that of Japanese cedar. Douglas fir and southern pine showed similar withdrawal resistance values and were 49.6% higher than that of Japanese cedar. The average withdrawal unit force obtained using 10- and 12-mm structural self-tapping screws was 50.0 and 33.3% higher than that using 6- and 8-mm self-tapping screws, respectively. Based on the test results of the screw length fully embedded in wood, the withdrawal capacity of a single structural self-tapping screw in Kapur was 28.8% higher than that in Japanese cedar. The results obtained from both Douglas fir and southern pine were close to that of Japanese cedar. The withdrawal capacities of single 12- and 10-mm structural self-tapping screws were 2.42- and 2-times, respectively, that of 6-mm screws. The withdrawal capacity of single 8-mm structural self-tapping screws with a wood-drilling tip was 32.1% higher than that of screws with a metal-drilling tip. The withdrawal resistance performance of the structural self-tapping screws in wood was mainly influenced by the wood density, screw diameter, effective screw length, and type of screw tip.

Key words: self-tapping screw, glulam, withdrawal resistance, Japanese cedar, Kapur.

Yeh MC, Lin YL, Sung YW. 2018. Evaluation of the performance of the vertical withdrawal resistance of structural self-tapping screws in wood. *Taiwan J For Sci* 33(2):109-23.

緒言

木質結構工程與實務近年來不斷有木質材料創新開發以及工法運用，因此相對應的接合扣件開發以及接合強度性能的評估有其必要。結構用自攻螺絲主要是在歐洲大量的被運用，進而也推動其他如美日等國進行相關之開發。此種扣件在木結構的運用上近似於木螺絲釘 (wood screw) 及大木螺釘 (lag screw, lag bolt)，木螺絲釘之直徑及長度尺寸較小，一般用於小型木器之木工實務，結構用自攻螺絲多應用於集成材 (glulam) (Prat-Vincent et al., Yeh et

al. 2014 2010) 或直交集成板 (cross-laminated timber) (Danzig et al. 2014, Flatscher et al. 2014) 等大型木構造之組立，其直徑及長度尺寸均較大，且在釘尖具切削刃與木螺絲釘區別 (Uibel and Blaß 2010)。大木螺釘之用途與螺栓 (bolt) 相近，在功能上透過螺紋端具有釘尖鎖入木材，用以解決螺栓無法以螺帽及墊片鎖住之結構施工場合 (Hoyle and Woeste 1989)，其直徑與一般螺栓相同而大於結構用自攻螺絲，但釘尖均不具切削刃。目前國內也嘗試在大斷面梁

柱構材之接合引進結構用自攻螺絲作為施工應用，而現行之木構造建築設計與施工規範中亦無自攻螺絲接合性能估算之相關要求(Ministry of the Interior, 2011)對於其相關之接合強度實有必要進一步評估。

在奧地利的闊葉樹蓄積量佔26%，多數是在能源方面應用，其中又以光臘樹(Ash)佔65%，為了提高其實用性，作為異樹種集成材或是闊葉樹集成材等承重構造物之用途，Hübner et al. (2010)針對該樹種進行一系列之木螺絲引拔抵抗容量之評估，也確認光臘樹木材由於為高密度木材而有優越的垂直引拔強度，較之歐洲規範對不同角度鎖入木材，其Hankison模式之建議值可高出45%，該研究亦建議光臘樹的垂直引拔容量行為以雙線性計算模式最為有效率及具有應用潛力。在國內闊葉樹為常見之結構用材，開發國產主要造林木作為結構用途之構材，當在木結構接合場合，對於結構用自攻螺絲之引用效果值得深入探討。

木螺絲釘應用於木構材之接合時，在規範中多建議先施以導引孔(AFPA & AWC 1997, Architectural Institute of Japan 2011)以防止木材劈裂。Uibel and Blaß (2010)即針對運用自攻螺絲接合時，可能造成木材劈裂的問題進行研究，而提出了決定不同直徑的自攻螺絲在組合木材時所需之最小木材厚度。Hübner et al. (2010)亦指出鎖入之螺桿在引拔過程中，其受力沿著軸向之分布是不均且在近材面處受力較大，在鎖入木材處的剖面，則可見鄰近螺紋之木材纖維會沿受力方向彎曲且近材面處的影響區增大，甚至造成木材撕斷裂。Pirnbacher et al. (2009)在探討結構用自攻螺絲應用於歐洲雲杉材之垂直引拔強度，基本參數包括溫度、角度、直徑、含水率、釘尖、承壓埋入深度等因子之影響的研究中，所得之結果亦顯示導引孔之有無對引拔強度並沒有差別，凸顯出結構用自攻螺絲使用上的便利性。

國內木結構建築的設計與施作的集成材主構材主要樹種是花旗松與南方松，而在推動國產造林木利用之目標下，蓄積量及造林面積最高的柳杉是最具發展潛力之材種，另外闊葉樹木材是

國內常利用之木材，其中冰片木則是廣泛應用於木結構梁柱主構材用途。本研究採用主要用於木結構接合之不同結構用自攻螺絲直徑規格，針對上述樹種木材之集成材及所成之集成材進行垂直引拔試驗，用以探討不同直徑與不同樹種對垂直引拔容量之影響。並參考前述日本及美國規範有關木螺絲及大木螺釘接合之估算公式，進一步推導自攻螺絲垂直引拔特徵值，作為木結構接合設計之應用以供業者之參考。

材料與方法

一、樹種

用於結構用自攻螺絲垂直引拔強度評估之木材樹種分別為針葉樹柳杉(*Cryptomeria japonica*)，平均含水率為 $13.0 \pm 1.5\%$ ；花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)，平均含水率為 $12.5 \pm 0.5\%$ ；南方松(*Pinus* spp.)，平均含水率為 $12.0 \pm 0.5\%$ ；以及闊葉樹冰片木(*Dryobalanops* spp.)，平均含水率為 $17.5 \pm 1.0\%$ 。其中柳杉為伐自新竹林區管理處竹東林班之38年生造林木，花旗松及南方松為北美進口之結構級(select structural)，冰片木為東南亞進口原木進行製材及乾燥。本試驗使用框組壁結構用製材之 2×4 規格，再經刨光成 $37 \times 89 \times 1800$ mm作為集成材以及製造集成材。

二、金屬扣件

所採用之結構用自攻螺絲共區分直徑6、8、10、12 mm等規格，如Fig. 1，由舜倡發股份有限公司製造，各型號細部如Table 1，其中8a之結構用自攻螺絲之前端切削刃之釘尖角度為 110° ，作為金屬板及木材兩用，其餘之釘尖角度介於 $45^\circ \sim 55^\circ$ ，螺紋長度不包括中段的加速區螺牙長度。

三、試驗方法

各樹種集成材首先進行打音分等，以打音頻譜分析法進行材料之縱向共振頻率測定，並計算試材之動彈性模數，並依測定數值剔除各樹種木材中動彈性模數值偏高及偏低之集

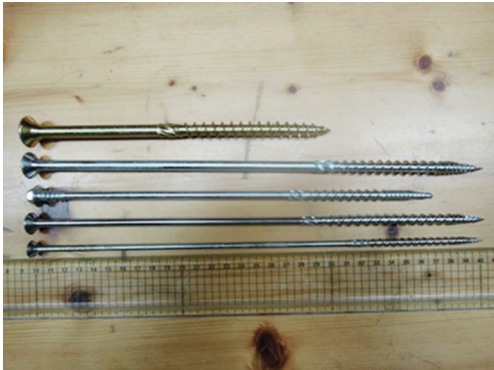


Fig. 1. Structural self-tapping screws designed for wood-frame construction. From top to bottom M12×200 (code: 12), M10×302 (code: 10), HW8×267 (code: 8a), M8×301 (code: 8), M6×302 (code: 6).

成元，其中柳杉取L100~L110集成元，南方松取L100~L160集成元，花旗松取L100~L160集成元，冰片木取L140~L160集成元，並製作三層111×89×1800 mm之集成材，膠合劑主劑採用間苯二酚-酚甲醛樹脂(resorcinol-phenol formaldehyde resin adhesive, RPF)，與粉末狀聚甲醛硬化劑以1：0.15比例之混合佈膠，佈膠量為250 g m⁻²，加壓壓力依針葉樹種為0.98 MPa，冰片木為1.47 MPa，加壓時間為4小時。結構用自攻螺絲之垂直引拔試驗區分為兩種形式如下：

(一)垂直引拔穿透試驗

本試驗為評估單位螺紋長度之抵抗垂直引拔性能，試材取各樹種集成元進行，尺寸為

37×89×400 mm，用釘位置離木材端部之端距8d以上，其中d為結構用自攻螺絲之標稱直徑，垂直釘入試材材面。一支試材可進行3次垂直引拔試驗，其用釘位置及試驗示意如Fig. 2。試驗測定5種結構用自攻螺絲型式及4種木材樹種，其中柳杉採用L110集成元，南方松採用L160集成元，花旗松採用L160集成元，冰片木為L140集成元。每一自攻螺絲鎖入木材後即進行垂直引拔測試，每種條件個重複試驗12次。

(二)垂直引拔容量試驗

本試驗為評估單支結構用自攻螺絲之全部螺紋長度垂直釘入木材材面時之垂直引拔抵抗力。試材取各樹種製造之集成材進行，尺寸為111×89×400 mm，用釘位置與穿透試驗相同，結構用自攻螺絲埋入木材深度為至釘身固定螺紋區與加速螺紋區之界線，亦即包含前端切削刃之全螺紋長。每支集成材試材可進行3次垂直引拔容量試驗，其用釘位置及試驗示意如Fig. 3。試驗條件包括5種釘型式及4種木材樹種，其中依CNS 11031標準(2014)製作之柳杉結構用集成材等級為E95-F270，南方松及花旗松集成材等級為E135-F375，冰片木集成材等級為E120-F330，各組合條件分別重複試驗12次。

結果

一、垂直引拔強度

依垂直引拔穿透材面之試驗可以計算不同螺紋規格之單位長度垂直引拔抵抗力 (withdrawal unit force, N mm⁻¹)，亦即為單位

Table 1. Details of structural self-tapping screws

Code	Length (mm)	Outside diameter (mm)	Root diameter (mm)	Thread length (mm)	Shank diameter (mm)	Head diameter (mm)	Pitch (mm)
6	302	6.04	3.72	78	4.14	11.72	4.86
8	301	8.11	5.35	109	5.71	14.82	6.07
8a	267	8.05	5.27	86	5.70	14.70	5.63
10	302	9.95	6.11	101	6.94	17.87	5.78
12	200	12.06	7.30	101	8.19	20.81	5.95

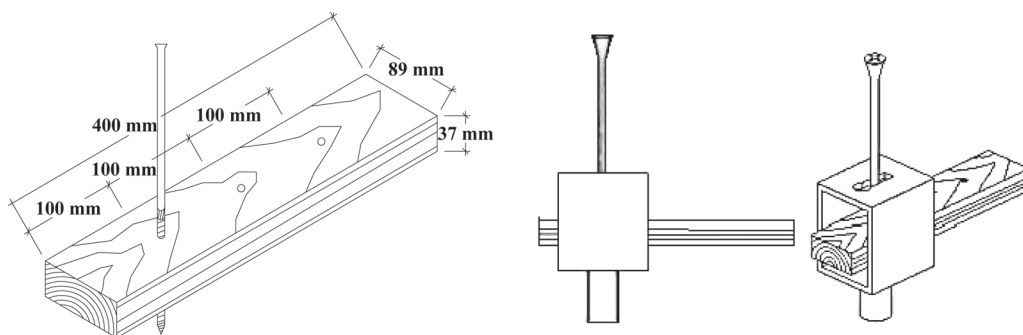


Fig. 2. Direct withdrawal test with a self-tapping screw penetrating laminae.

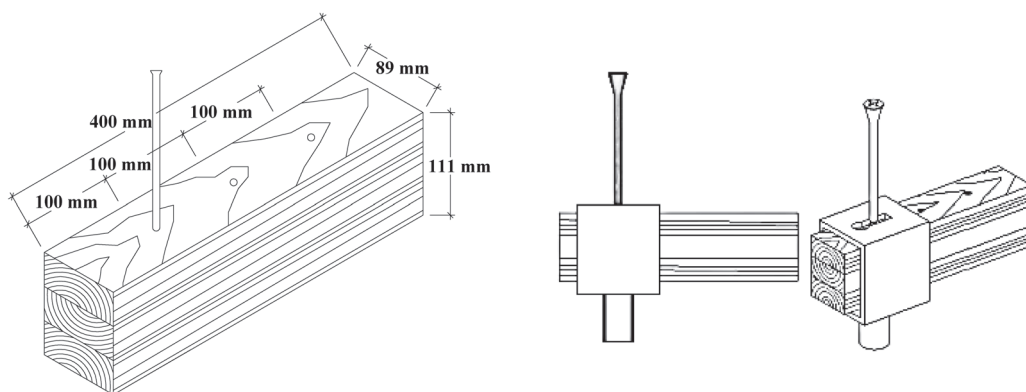


Fig. 3. Withdrawal capacity test with a self-tapping screw penetrated its full screwed length.

木材厚度之引拔載重值。同時參考EN 1382 (2016)以螺絲之螺紋直徑(outer thread diameter)及有效釘入深度用以計算垂直引拔參數(withdrawal parameter, $N\ mm^{-2}$)，亦即螺絲在木材內部單位投影面積之引拔抵抗。以不同結構用自攻螺絲直徑釘入不同木材樹種之垂直引拔強度測定結果如Table 2。

二、垂直引拔容量

將結構用自攻螺絲之螺紋部位全部鎖入集成材進行垂直引拔試驗，可以了解該單支自攻螺絲對木材接合之最大引拔破壞值，亦即垂直引拔容量(withdrawal capacity, N)。在達到最大破壞值後，集成材材面之鎖入處會有纖維輕微突起及劈裂產生，此為部分木材纖維之斷裂以及沿著木理方向之劈裂，在不同樹種及自攻螺絲直徑之條件皆有發生，且隨木材密度提高其

破壞現象加大，同時也隨自攻螺絲直徑加大其木材破壞愈明顯。本試驗以不同結構用自攻螺絲直徑釘入不同木材樹種之垂直引拔容量之測定結果如Table 3。

討論

一、樹種對垂直引拔強度之影響

結構用自攻螺絲鎖入木材之單位螺紋長度垂直引拔抵抗力在各樹種木材之間的比較如Fig. 4。根據統計Turkey法分析顯示，在冰片木的垂直引拔抵抗力明顯高於其他樹種，相較於花旗松與南方松材則高出10%，其中花旗松及南方松兩種木材之垂直引拔抵抗力間差異不大。柳杉材的垂直引拔抵抗力則明顯低於花旗松與南方松材，約為其平均值之66.8%。根據Table 2中冰片木的平均密度為 $0.80\ g\ cm^{-3}$ ，花旗松材

Table 2. Withdrawal unit force and withdrawal parameters of structural self-tapping screws for different diameters and wood species

Nominal diameter (mm)	Wood species	Density (g cm ⁻³)	Withdrawal unit force (N mm ⁻¹)	Withdrawal parameter(N mm ⁻²)
6	JC ¹⁾	0.44±0.01	127.3±7.7 ^{d2)}	21.1±1.3
8		0.43±0.01	140.9±6.1 ^c	17.4±0.8
8a		0.46±0.00	149.0±7.1 ^c	18.5±0.9
10		0.46±0.03	180.1±9.7 ^b	18.1±1.0
12		0.45±0.00	210.4±5.4 ^a	17.4±0.4
6	SP	0.62±0.02	194.2±20.5 ^d	32.2±3.4
8		0.62±0.02	227.8±15.7 ^{cd}	28.1±1.9
8a		0.60±0.01	201.4±12.6 ^c	25.0±1.6
10		0.70±0.03	357.2±47.3 ^a	35.9±4.8
12		0.62±0.03	284.0±19.4 ^b	23.5±1.6
6	DF	0.62±0.03	194.9±14.2 ^d	32.3±2.4
8		0.56±0.04	183.7±19.8 ^{cd}	22.7±2.4
8a		0.67±0.08	228.9±38.0 ^{bc}	28.4±4.7
10		0.71±0.07	253.9±51.0 ^{ab}	25.5±5.1
12		0.61±0.04	290.0±52.5 ^a	24.0±4.4
6	KP	0.77±0.01	212.8±28.5 ^c	35.2±4.7
8		0.80±0.05	252.3±9.6 ^b	31.1±1.2
8a		0.84±0.06	257.6±8.0 ^b	32.0±1.0
10		0.83±0.03	307.0±12.3 ^a	30.9±1.2
12		0.78±0.02	305.0±10.0 ^a	25.3±0.8

¹⁾ JC, Japanese cedar; DF, Douglas fir; SP, southern pine; KP, Kapur.

²⁾ Tukey's HSD, $\alpha = 0.05$, $a > b > c > d$.

為0.63 g cm⁻³，南方松材為0.63 g cm⁻³，柳杉材為0.45 g cm⁻³，其密度變化趨勢與結構用自攻螺絲在各樹種的垂直引拔抵抗力變化趨勢相近。美國木構造設計規範中木螺絲在木材的垂直引拔設計值計算，即是考慮到該值與木材比重(G)呈平方關係，在大木螺釘的垂直引拔設計值則是依比重的1.5次方關係計算(AFPA & AWC 1997)，足見不同樹種對垂直引拔抵抗的影響與該樹種的密度有關。在垂直引拔參數方面，亦可顯示出不同樹種木材因其密度的差異而有明顯的影響，在冰片木、南方松、花旗松木材之結構用自攻螺絲垂直引拔參數平均值分別較柳杉條件高出67.0、56.2及43.8%。

二、自攻螺絲直徑對垂直引拔強度之影響

將不同直徑的結構用自攻螺絲鎖入木材，

其單位螺紋長度垂直引拔抵抗力比較如Fig. 5。根據統計Turkey法分析顯示，直徑6與8 mm自攻螺絲的單位垂直引拔力平均值相差12.6%並不顯著，直徑10與12 mm自攻螺絲之間的垂直引拔力相差亦不顯著，但明顯高於前述6與8 mm直徑之條件，10與12 mm自攻螺絲兩者之平均值較6 mm直徑自攻螺絲高出50.0%，也較8 mm直徑條件高出33.3%，顯示隨著結構用自攻螺絲之直徑加大，對木材的單位垂直引拔抵抗力會提升。根據Wood Handbook (2010)有關金屬扣件接合強度之說明，亦指出木螺絲與大木螺釘的直徑變化對在木材的垂直引拔強度呈線性關係。另外本試驗中直徑8(具木材切削刃)及8a(具金屬切削刃)之結構用自攻螺絲間，兩者對木材的單位垂直引拔底抵抗力並無明顯差別。個別樹種的自攻螺絲直徑對垂直引拔強度的影響統計

Table 3. Withdrawal capacity of structural self-tapping screws for different diameters and wood species

Nominal diameter	Wood species	Density (g cm ⁻³)	Withdrawal capacity (N)	Withdrawal unit force (N/mm)	Effective withdrawal unit force (N/mm)
6	JC ¹⁾	0.53 ± 0.04	11129.3 ± 1405.7 ^{c2)}	142.7 ± 18.0	154.7
8		0.51 ± 0.01	19578.6 ± 2843.3 ^b	179.6 ± 26.1	194.1
8a		0.49 ± 0.02	12127.4 ± 2160.6 ^c	141.0 ± 25.1	155.6
10		0.53 ± 0.03	21967.2 ± 2336.2 ^{ab}	217.5 ± 23.1	241.3
12		0.52 ± 0.03	24372.7 ± 2462.5 ^a	241.3 ± 24.4	274.0
6	SP	0.58 ± 0.01	12135.9 ± 185.3 ^d	155.6 ± 2.4	168.6
8		0.57 ± 0.02	22304.1 ± 1412.3 ^b	204.6 ± 13.0	221.1
8a		0.61 ± 0.01	14843.1 ± 518.6 ^c	172.5 ± 6.0	190.4
10		0.57 ± 0.02	21940.9 ± 803.7 ^b	217.2 ± 8.0	241.0
12		0.56 ± 0.02	26178.5 ± 1668.8 ^a	259.1 ± 16.5	294.3
6	DF	0.58 ± 0.02	10331.6 ± 1010.5 ^c	132.5 ± 13.0	143.6
8		0.56 ± 0.01	17628.0 ± 1017.8 ^c	161.7 ± 9.3	174.7
8a		0.54 ± 0.01	12693.9 ± 829.5 ^d	147.6 ± 9.6	162.8
10		0.59 ± 0.05	20030.2 ± 1576.8 ^b	198.3 ± 15.6	220.0
12		0.67 ± 0.02	28001.8 ± 812.4 ^a	277.2 ± 8.0	314.8
6	KP	0.78 ± 0.00	12082.0 ± 258.3 ^c	154.9 ± 3.3	167.9
8		0.77 ± 0.01	25361.9 ± 953.6 ^c	232.7 ± 8.7	251.4
8a		0.76 ± 0.01	17974.8 ± 928.9 ^d	209.0 ± 10.8	230.6
10		0.78 ± 0.00	27793.3 ± 1720.6 ^b	275.2 ± 17.0	305.3
12		0.78 ± 0.01	31660.4 ± 754.3 ^a	313.5 ± 7.5	355.0

¹⁾ JC, Japanese cedar; DF, Douglas fir; SP, southern pine; KP, Kapur.

²⁾ Tukey's HSD, $\alpha = 0.05$, $a > b > c > d > e$.

比較如Table 2所示。

三、樹種對垂直引拔容量之影響

結構用自攻螺絲之螺紋部分全部鎖入木材後，經引拔試驗後其平均每支之垂直引拔容量在各樹種間之比較如Fig. 6。根據統計Turkey分析顯示，柳杉與花旗松及南方松樹種間並無明顯差異，而冰片木之垂直引拔容量則高出柳杉28.8%。各樹種間之差異趨勢與Fig. 4略有不同，其原因主要為各條件之木材密度仍有差異。自Table 3可見柳杉材之密度平均在0.52 g cm⁻³，與花旗松0.59 g cm⁻³及南方松0.58 g cm⁻³相近，冰片木之平均密度則在0.77 g cm⁻³，有較高之差異，此密度變化之趨勢與垂直引拔容量之趨勢一致。在歐洲木結構設計規範Eurocode 5 (EN 1995

2004)中亦採用 $3.6 \times 10^{-3} \rho_k^{1.5}$ (ρ_k : 密度)計算螺絲的垂直引拔強度，故木材之密度值是影響類似此種扣件之垂直引拔容量的重要指標。

各單支自攻螺絲之垂直引拔容量依其鎖入木材之實際螺紋長度亦可計算各樹種之單位長度引拔強度，Table 3所顯示之各樹種單位長度引拔抵抗力與Table 2依集成元穿透試驗所得之數值不同，主要差異係來自於試驗之各條件木材密度不同所致。Uibel and Blaß (2010)在模擬自攻螺絲鎖入木材造成木材纖維劈裂面積時，建議以 $(G_0/G_{ref})^2$ 調整木材密度的影響，其中 G_{ref} 為木材之基準密度， G_0 為不同條件試驗試材之密度。本研究中以各樹種在結構用自攻螺絲穿透引拔試驗之木材作為基準密度 G_{ref} ，自攻螺絲螺紋全部鎖入材面之垂直引拔容量試驗時的各樹種木材密度

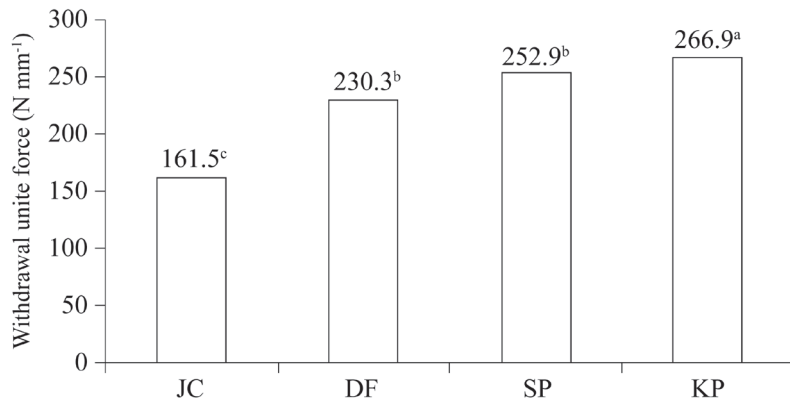


Fig. 4. Comparison of withdrawal unit forces of structural self-tapping screws among wood species. (JC, Japanese cedar; DF, Douglas fir; SP, southern pine; KP, Kapur). (Values shown are averages of all various diameter groups.)

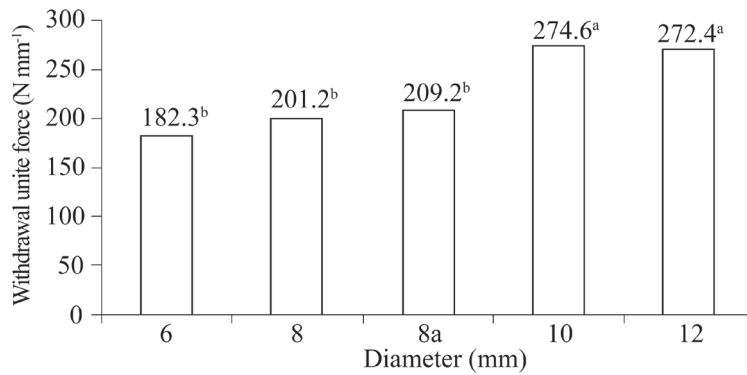


Fig. 5. Comparison of withdrawal unit forces of structural self-tapping screws among various diameters. (Values shown are averages of 4 wood species groups.)

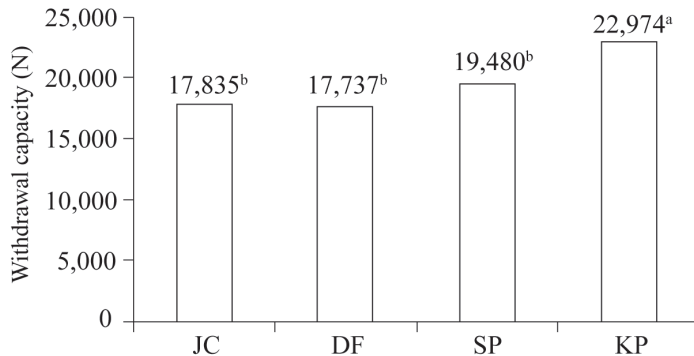


Fig. 6. Comparison of withdrawal capacities of structural self-tapping screws among wood species. (JC, Japanese cedar; DF, Douglas fir; SP, southern pine; KP, Kapur) (Values shown are averages of all various diameter groups.)

為 G_0 ，將後者試驗結果計算所得之單位引拔抵抗力(A_0)依上述關係調整成為調整後之單位引拔抵抗力(A_1)進行比較如Table 4所示。在未經密度調整前之 A_0 與穿透引拔試驗結果平均值(Fig. 4)相比，各樹種的平均單位長度引拔抵抗力相差0.797~0.142倍，而經過木材密度調整後，所得各樹種之 A_1 為Fig. 4之基準值之0.861~0.958倍，平均為0.925倍，且其差異大幅縮小但數值偏低。在歐洲規範中有關針葉木螺絲之垂直引拔容量計算中，建議採用的有效長度應不考慮釘尖的長度部位，亦即是將埋入之螺紋深度減去1支螺絲的釘直徑(1 d) (EN 1995 2004)。其他研究亦有建議減去1.11 d (Uibel and Blaß 2010)或是1.15 d (Pirnbacher et al. 2009)之建議。本研究參考歐洲規範之建議，首先使用有效長度計算之調整後單位引拔抵抗力 A_2 如Table 4所示，其與各樹種之基準值相差在0.882~1.263倍，但各樹種平均則相差1.002倍，十分接近。 A_2 之數值再經密度調整之值為單位引拔力 A_3 ，各樹種之單位引拔抵抗力與相對應之基準值相差0.952~1.060倍，十分接近，因此在評估單位引拔抵抗力時，應注意木材密度以及結構用自攻螺絲釘尖之影響。

四、自攻螺絲直徑對垂直引拔容量之影響

不同直徑之結構用自攻螺絲，其螺紋部位完全埋入材面條件下之垂直引拔容量比較，顯示直徑8 mm自攻螺絲較6 mm自攻螺絲高出

86.5%，但與直徑10 mm自攻螺絲之垂直引拔容量平均值間則無明顯差別(Fig. 7)。另外，直徑12 mm自攻螺絲之垂直引拔容量平均值，亦明顯高出10 mm自攻螺絲條件21.0%。一般而言，隨著結構用自攻螺絲直徑之提高，其木材之垂直引拔容量有提高之趨勢。但是結果亦顯示，木材及金屬兩用之釘頭(8a自攻螺絲)的垂直引拔容量則較8 mm自攻螺絲降低了32.1%，應是該種規格之自攻螺絲長度較短所致，同時，該種切削刃在鎖進木材的過程中，木材纖維有較大的破壞作用。各直徑間之差異趨勢與Fig. 5略有不同，其原因主要為各直徑自攻螺絲之具螺紋長度不同，亦即埋入木材之深度不一致所致。Uibel and Blaß (2010)在探討結構用自攻螺絲之適適用釘間距及端距之試驗中，也強調不同的釘尖種類也會造成不同的引拔容量，各種型式間彼此相差在7~46%之間。個別樹種的自攻螺絲直徑對垂直引拔容量的影響統計比較如Table 3所示。

五、垂直引拔容量之容許設計值關係式

依據上述之垂直引拔試驗測定結果，可以用以評估不同結構用自攻螺絲直徑在木結構接合時之容許設計值。本研究參考日本木質構造設計規範(Architectural Institute of Japan 2011)及美國木結構設計規範NDS (AFPA & AWC 1997)有關木螺絲釘及大木螺釘之容許垂直引

Table 4. Adjusted withdrawal unit force of structural self-tapping screws based on wood density and length of the screw tip

Species	Original	Withdrawal	Adjusted withdrawal unit force (N mm ⁻¹)		
	density G_0 (g cm ⁻³)	unit force A_0 (N mm ⁻¹)	A_1	A_2	A_3
JC	0.516	184.4 (1.142)	139.0 (0.861)	203.9 (1.263)	153.7 (0.952)
SP	0.578	201.8 (0.798)	241.4 (0.955)	223.1 (0.882)	266.8 (1.055)
DF	0.588	183.5 (0.797)	213.3 (0.926)	203.2 (0.882)	236.3 (1.026)
KP	0.774	237.1 (0.888)	255.7 (0.958)	262.2 (0.982)	282.9 (1.060)
Average		(0.906)	(0.925)	(1.002)	(1.023)

¹⁾ A_0 , withdrawal capacity/penetration depth; A_1 , A_0 adjusted for density; A_2 , A_0 without the length of the screw tip; A_3 , A_2 adjusted for density.

²⁾ Values in parentheses are indexed based on reference values tested from the penetration through the specimens in Fig. 4.

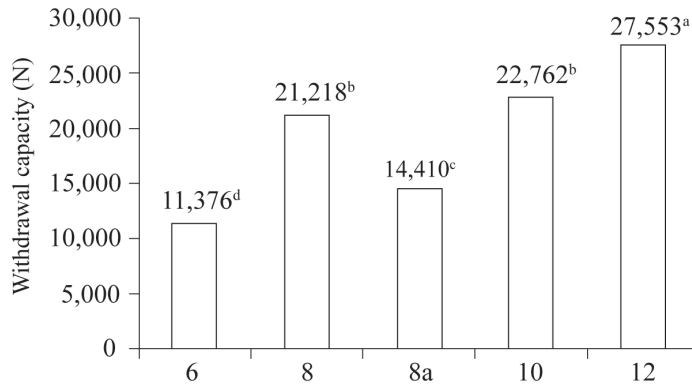


Fig. 7. Comparison of withdrawal capacities of structural self-tapping screws among various diameters. (Values shown are averages of 4 wood species groups.)

拔耐力或垂直引拔強度設計值計算方法進行分析。上述兩種扣件在木材接合之力學行為是透過木材密度、扣件、直徑以及鎖入木材之螺紋長度等參數進行評估，所得結果討論如下：

(一)單位長度垂直引拔抵抗力

試驗結果首先採用日本住宅—木材技術中心(2002)之分析軟體分析其垂直引拔載重一位移關係，依彈塑性理論求得極限載重亦即終局耐力(ultimate load)，其終局耐力即為等效能量散逸之彈塑性曲線的最大值。各條件求得平均值(P_u)後依 $P_{uk} = P_u - Ks$ 計算在信賴水準75%下的95%容許值下限值，作為各條件之垂直引拔抵抗力特徵值(P_{uk})，其中常數K取2.048，s為各條件平均值之標準偏差。各條件之單位長度垂直引拔抵抗力特徵值(P_{uk})及相對應之木材密度特徵值(G_k)計算結果如Table 5所示，各樹種木材的密度特徵值(G_k)是指在信賴水準75%下的95%容許值的木材密度下限值， G_k 的計算與 P_{uk} 之程序相同。

所得之各條件單位長度引拔抵抗力特徵值，配合相對應之密度特徵值及結構用自攻螺絲直徑(d)參數，依木螺絲釘及大木螺釘評估方式，以SPSS統計軟體進行非線性統計分析，所得之迴歸式如Table 6，其基本關係式參考日本及美國之規範所建議之公式，直徑及密度參數之數據值與原方程式相同，經非線性分析後可獲得不同之斜率。在日本木質構造設計規範中

係採用極限引拔強度之特徵值計算。Fig. 8表示本試驗及日本規範分別採用直徑8 mm之木螺絲釘及大木螺釘，所估算之單位長度極限引拔強度特徵值進行比較。結構用自攻螺絲之特徵值如依據木螺絲釘的關係式評估，為日本規範者的1.33倍；如依據大木螺釘的關係式評估，則為規範公式計算值的2.22倍，顯示結構用自攻螺絲之接合性能有其優越之處。

依據日本規範之建議單位長度之極限引拔強度特徵值作為設計容許值時(P_a)，必須考慮到接合部位之安全係數，依其強度特性通常是以2/3作為調整，同時亦考慮到基準化係數，用以考慮在持續對接合部位潛變破壞的影響，通常是以1/2作為調整。依此兩種係數調整後可將特徵值推算出設計容許值，亦即 $P_a = (2/3) \times (1/2) \times P_{uk}$ 。

Figure 9是以本試驗以8 mm結構用自攻螺絲依統計迴歸關係式估算之特徵值，再參考前述之安全係數及基準化係數算出設計容許值，並與美國規範NDS中有關木螺絲釘及大木螺釘公式計算之設計值比較。結構用自攻螺絲之設計值如依據木螺絲釘的關係式評估則較該規範公式計算值略低5.4%，如依據大木螺釘的關係式評估，則較該規範公式計算值略高1.0%，顯示兩種扣件之參數關係均能有效的評估結構用自攻螺絲的垂直引拔性能。

根據上述所得之迴歸式的參數關係，自攻螺絲的垂直引拔性能與其直徑(d)主要呈線性關

Table 5. Characteristic values of withdrawal unit forces from the penetration test

Nominal diameter (mm)	Wood species	G_k (g cm ⁻³)	P_{uk} (N mm ⁻¹)
6	JC	0.42	88.43
8		0.42	107.32
8a		0.46	102.41
10		0.40	124.85
12		0.44	160.61
6		SP	0.57
8	0.58		481.55
8a	0.58		292.83
10	0.64		403.40
12	0.56		546.94
6	DF		0.56
8		0.49	118.18
8a		0.51	120.46
10		0.57	117.38
12		0.53	219.61
6		KP	0.76
8	0.70		179.68
8a	0.72		184.53
10	0.76		221.05
12	0.74		241.77

¹⁾ JC, Japanese cedar; DF, Douglas fir; SP, southern pine; KP, Kapur.

²⁾ G_k , characteristic density; P_{uk} , characteristic withdrawal unit force.

Table 6. Regression of characteristic withdrawal unit forces of structural self-tapping screws based on the wood screw and lag screw estimations

Fastener type	Regression estimation	Original model basis
Wood screw	Eq-1: $P_{uk} = 50.51 \times G^{1.5} \times d$ $R^2 = 0.520$	Japanese standard ¹⁾
Wood screw	Eq-2: $P_{uk} = 55.89 \times G^2 \times d$ $R^2 = 0.587$	American NDS ²⁾
Lag screw	Eq-3: $P_{uk} = 39.38 \times G^{0.8} \times d$ $R^2 = 0.775$	Japanese standard
Lag screw	Eq-4: $P_{uk} = 84.22 \times G^{1.5} \times d^{0.75}$ $R^2 = 0.630$	American NDS

¹⁾ Japanese standard: wood screw, $P_{uk} = 38.1 \times G^{1.5} \times d$; lag screw, $P_{uk} = 17.7 \times G^{0.8} \times d$.

²⁾ American National Design Specification (NDS): wood screw, $P_{uk} = 19.7 \times G^2 \times d$; lag screw, $P_{uk} = 27.8 \times G^{1.5} \times d^{0.75}$.

係，針對國產柳杉材因低密度造成低垂直引拔性能的結果，可以採用較大直徑之自攻螺絲以予改善，依前述試驗結果，以直徑10或12 mm自攻螺絲取代6或8 mm直徑時，效果顯著。

(二)單支自攻螺絲垂直引拔容量特徵值

不同直徑之結構用自攻螺絲的螺紋部位全

長鎖入至集成材試體，依各樹種的垂直引拔抵抗結果，所求得之極限載重計算可推導各單支結構用自攻螺絲引拔抵抗之特徵容量(P_k)，以及各組樹種之木材密度特徵值(G_k)如Table 7所示。根據前述所得之單位長度統計迴歸關係式 (Table 6)，再分別依Table 7之直徑及各樹種密度特徵值，可以估算在各規格自攻螺絲的螺紋

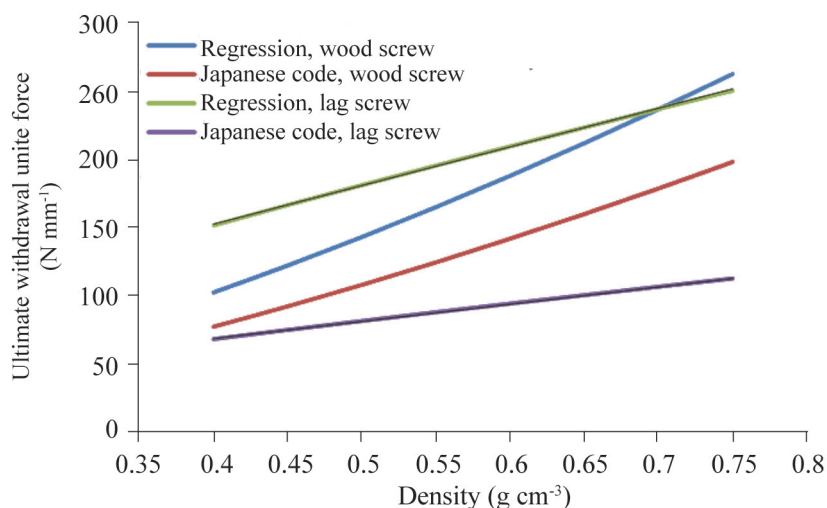


Fig. 8. Comparison of experimental and calculated characteristic ultimate withdrawal unit forces for 8-mm self-tapping screws using Japanese code equations for wood screws and lag screws.

Table 7. Characteristic values of the withdrawal capacity based on a fully embedded screw length of self-tapping screws

Nominal diameter (mm)	Wood species	G_k (g cm ⁻³)	P_k (N)
6	JC	0.45	7183
8		0.49	11951
8a		0.45	7630
10		0.46	13835
12		0.46	16058
6	SP	0.56	9302
8		0.54	19807
8a		0.59	12102
10		0.53	16703
12		0.53	22497
6	DF	0.54	8260
8		0.53	9686
8a		0.53	9656
10		0.47	16206
12		0.64	23986
6	KP	0.78	9816
8		0.76	21073
8a		0.74	14942
10		0.77	19151
12		0.76	25627

¹⁾ JC, Japanese cedar; DF, Douglas fir; SP, southern pine; KP, Kapur.

²⁾ G_k , characteristic density; P_k , characteristic withdrawal capacity.

全長(Table 1)條件下之特徵值，並與Table 7之各試驗條件之結果比較如Table 8。

比較結果顯示與源自木螺絲釘規範所得的迴歸關係式1及2的估算值與實驗所得特徵值之比分別為1.298及1.101，較大木螺釘迴歸關係式3及4之比值相近，其中又以迴歸關係式2，亦即源自美國NDS規範者的估算值相差在10.1%最為相近。當自攻螺絲鎖入木材有效螺紋長度有考慮釘尖長度之扣除後，以迴歸關係式估算之值與實驗所得特徵值相比較，可以獲得更為相近

的結果，其中又比源自美國NDS規範者的估算值相差在0.1%。上述結果顯示結構用自攻螺絲在木材接合之垂直引拔性能較接近木螺絲釘之力學行為。

當各規格的結構用自攻螺絲直接以日本所建議的公式計算，所得之各單支自攻螺絲垂直引拔容量特徵值與本試驗數據相較，則顯示木螺絲釘及大木螺釘的公式分別為0.979及0.671，亦即木螺絲釘的垂直引拔公式是適用於結構用自攻螺絲的場合。美國NDS之建議公式是直接

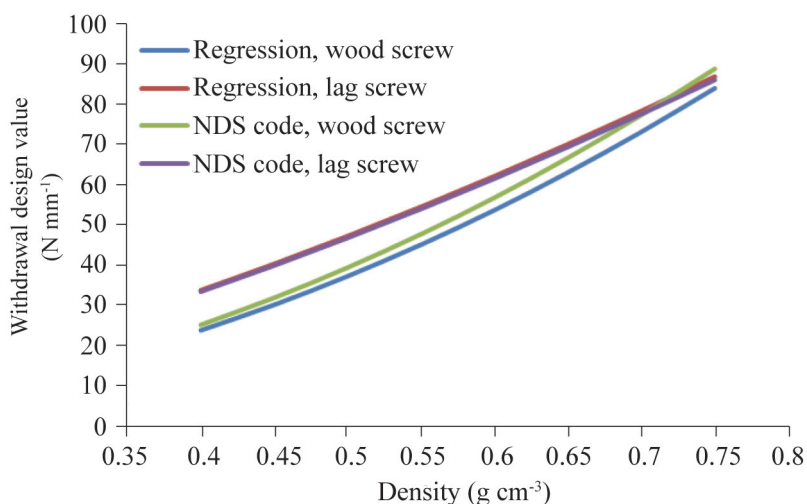


Fig. 9. Comparison of withdrawal design values of 8-mm self-tapping screws derived from regressions and calculated from National Design Specification (NDS) code equations for wood screw and lag screws.

Table 8. Comparison of characteristic withdrawal capacities between estimated values from equations and full-penetration test results

Equation ¹⁾	Effective screw length ²⁾	Ratio ³⁾			
		Eq-1/P _K ⁴⁾	Eq-3/P _K	Eq-2/P _K	Eq-4/P _K
Regression equation	With tip	1.298	1.492	1.101	1.266
	Without tip	1.178	1.354	0.999	1.150
Code equation	With tip	0.979	0.671	1.164	1.254
	Without tip	0.889	0.608	1.057	1.139

¹⁾ Regression equations 1, 2, 3, and 4 from Table 6; Code equations are suggested formulas used in Japanese and the U S code also shown in Table 6.

²⁾ Actual embedded screw length in wood with/without considering the length of the screw tip, which is accounted for in the 1-screw-diameter length

³⁾ Ratio, values calculated from each regression equation / P_K.

⁴⁾ P_K, characteristic withdrawal capacity values from Table 7.

計算扣件之設計值，如依前述有關特徵值推導過程以三倍回推計算，則木螺絲釘及大木螺釘的特徵值與本試驗數據相較，分別為1.164及1.254而偏高，如考慮自攻螺絲釘尖長度之有效螺紋長度時，則為1.057及1.139，其中又以木螺絲釘的估算方法最為接近。

結論

本研究針對結構用自攻螺絲以不同直徑規格在不同樹種結構用集成材之接合場合，探討其對垂直引拔性能的影響。在單位長度之垂直引拔強度方面，花旗松及南方松之引拔抵抗力相近，且優於柳杉木材49.6%，而冰片木則優於上述樹種集成材。直徑6與8 mm之結構用自攻螺絲之對木材單位長度垂直引拔強度相近，10與12 mm直徑者亦相近但優於前者41.7%。影響結構用自攻螺絲鎖入集成材之垂直引拔容量主要因子是木材密度、自攻螺絲直徑、及有效螺紋長度，透過單位長度垂直引拔強度特徵值所推導的迴歸關係式中，以基於現行美日規範中之木螺絲釘方程式比大木螺釘方程式的模式有較為適當的估算結果。針對國產柳杉材的低垂直引拔抵抗性能，建議可以採用較大直徑之自攻螺絲以予改善。

致謝

本研究承科技部計畫(MOST 103-2313-B-020-002-MY3)經費補助，特此致謝。

引用文獻

AFPA & AWC. 1997. National design specification for wood construction. Washington, DC: American Forest & Paper Association (AFPA), American Wood Council (AWC). p. 75-101

Architectural Institute of Japan. 2011. Standard for structural design of timber structures. Tokyo, Japan. p 210-321

CNS 11031. 2014. Structural glued-laminated

timber. Taipei, Taiwan: Bureau of Standard Metrology & Inspection, Ministry of Economic Affairs. 45 p.

Danzig H, Closen M, Tannert T. 2014. High performance cross-laminated-timber shear connection with self-tapping screw assemblies. 2014 World Conference on Timber Engineering, Quebec City, Canada. 6 p.

European Standard EN1382. 2016. Timber structure - Test methods - Withdrawal capacity of timber fasteners. Brussel, Belgium: European Committee for Standardization. 9 p.

European Standard EN1995. 2004. Euro-code 5: Design of timber structures part 1-1: General-Common rules and rules for buildings. Brussel, Belgium: European Committee for Standardization. p 59-88.

Flatscher G, Bratulic K, Schickhofer G. 2014. Screwed joints in cross laminated timber structures. 2014 World Conference on Timber Engineering, Quebec City, Canada. 8 p.

Hoyle RJ, Woeste FE. 1989. Wood technology in the design of structures. Ames, IA: Iowa State University Press. p 227-33.

Hübner U, Rasser M, Schickhofer G. 2010. Withdrawal capacity of screw in European ash (*Fraxinus excelsior* L.). 2010 World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Trento, Italy. ID481, 9 p.

Ministry of the Interior. 2011. Specification of wood-framed structure design and construction techniques. Taipei, Taiwan: Construction Magazine. p 5-1~24.

Pirnbacher G, Brandner R, Schickhofer G. 2009. Base parameters of self-tapping screws. CIB-W18 42-7-1, Dubendorf, Switzerland: Publisher 16 p.

Prat-Vincent F, Rogers C, Salenikovitch A. 2010. Evaluation of the performance of joint-to-header self tapping screw connections. 2010 World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Trento, Italy. ID256, 9 p.

Uibel T, Blaß HJ. 2010. Determining suitable spacings and distances for self-tapping screws by experimental and numerical studies. 2010 World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Trento, Italy. ID108, 9 p.

Wood Handbook 2010. Wood as an engineer-

ing material. Madison, WI: Forest Products Society. USA. p 8-1~28.

Yeh MC, Lin YL, Huang GP. 2014. Investigation of the structural performance of glulam beam connections using self-tapping screws. *J Wood Sci* 60(1): 39-48.

