

薄鋼板を用いた接合部の釘打ち特性

戸田 正彦

Nailing Properties of Timber Joints with Thin Steel Plates

Masahiko TODA

To develop a timber joint with nails and steel plates, the thickness of the stainless steel plates and the types of nails that could be driven into them without lead holes were studied. The following results were obtained.

- 1) The thickness of the stainless steel plate into which a CN nail can be driven without a lead hole by using a hammer is not affected by the diameter of the nail. The thickness of the side plate type is 0.6mm, and that of the inserted type is 1.0mm. On the other hand, using a nailer, the thickness of the stainless steel plate into which CN nails can be driven for the side plate is 1.0mm.
- 2) Stainless steel nails can be driven into a stainless steel side plate 1.0mm thick.
- 3) The load when the nail penetrates the stainless steel plate changes with the hardness, the form of the tip, and the density of the wood.
- 4) The calculations suggest that the buckling behavior of the nail is plasticity, and the buckling load becomes larger as the diameter of the nail becomes wider.

Key words: thin steel plate, nailed timber joint, nailer, buckling, properties of penetration
薄鋼板, 釘接合, 釘打ち機, 座屈, 貫通性能

従来よりも施工が簡易な鋼板釘打ち接合工法の開発を目的として、先孔を空けずに釘を打ち込める鋼板厚さと釘種類の条件を検討し、以下の結果を得た。

- 1) 先孔を空けずに金づちでCN釘を打ち込めるステンレス鋼板の厚さは釘径に関わらず同じであり、添え板型で0.6mm、挿入型で1.0mmであった。釘打ち機を使用した場合は、添え板型でも1.0mmのステンレス鋼板に打ち込むことが可能であった。
- 2) ステンレス製釘の場合は、添え板型でも1.0mmのステンレス鋼板に打ち込むことが可能であった。
- 3) 釘が貫通する際の荷重は、釘の硬さや先端部の形状および木材の密度によって変化した。
- 4) 計算の結果、釘の座屈性状は塑性的であり、釘径が大きいほど座屈荷重は大きくなることが示された。

1. はじめに

側材を鋼板とする木材の釘打ち接合は、側材が製材や合板の場合に比べて1.25倍の許容耐力が認められている¹⁾。しかし、この許容耐力の割増は側

材の厚さが釘径の0.4倍以上の場合にのみ適用されることとなっている。例えば直径4.11mmのCN90の場合には1.6mm以上の厚さを持つ鋼板が必要となる。このため、通常は鋼板に先孔を空ける必要が

あり、木材同士の接合に比べると材料加工に大きな労力を必要とする。また一般的な釘打ち機では孔の位置に精度よく釘を打つことができないため、金づちで打つか特殊な釘打ち機を用いる必要があり、木材同士の接合に比べると施工性が劣る。

本研究では、鋼板を用いて合板の場合と同様に加工や施工が簡易となるような接合工法の開発を目指して、先孔を空けずに釘打ちが可能となる鋼板厚さと釘種類の条件を検討した。

2. 試験体

試験に供した釘は、枠組壁工法用釘の太め鉄丸釘 CN50 (胴径 2.87mm), CN75 (同 3.76), CN90 (同 4.11), 溶融亜鉛メッキ処理されている ZN65 (同 3.33), ZN90 (同 4.11), ステンレス製釘 (S 釘) S50 (同 2.76), S90 (同 4.11) である。いずれも先端部の形状はほぼ等しい。主材にはトドマツ (*Abies sachalinensis*), SPF 集成材, ミズナラ (*Quercus crispula*) を用いた。鋼板には、耐久性を考慮してステンレス鋼板 (SUS304) を使用した。厚さは CN50 釘の径の 0.4 倍以下である 0.5, 0.6, 0.8, 1.0mm とした。また比較のため、1.2, 1.6, 2.1mm の普通鋼板も使用した。

3. 試験方法

3.1 金づち, 釘打ち機による打ち込み試験

釘の打ち込みに使用した金づちは鉄工用の一般的なものであり、頭部重量は 450g である。主材はトドマツである。鋼板の配置は、主材の上に載せる添え板型と、主材で鋼板を挟む挿入型の 2 通りとした。釘打ち機は圧縮空気を使用する形式であり、CN50 には MAX 製 CN-565CG (以下釘打ち機 A), CN75・CN90 には同 KN80 / KC90X1 (以下釘打ち機 B) を使用した。空気圧はメーカーの仕様 (0.49 ~ 0.78MPa) に準じて設定し、打ち残りが生じた場合はその長さを測定した。試験に用いた釘の数は 1 条件 5 本とした。試験に使用した工具類を第 1 図に示す。

3.2 試験機による圧入試験

島津製作所製のインストロン型強度試験機 (容量 98kN) を用いてトドマツに釘を静的に圧入し、荷



第 1 図 試験に使用した工具類 (左から) 金づち, 釘打ち機 A, 釘打ち機 B, エアコンプレッサ

Fig.1. Equipment for nail-driving tests. (from left) Hammer, Nail A, Nail B, Air compressor.

重と圧入量を測定した。圧入する際には、釘を鉛直方向に支持するためのガイドを使用した。荷重の計測には容量 4.9kN のロードセルを、圧入量の計測には分解能 1/500mm・最大ストローク 25mm の変位変換器を使用した。圧入速度は毎分 5mm とした。試験に用いた釘の数は 1 条件 10 本 (S50, S90 については各 5 本) とした。

3.3 釘の曲げ試験

試験に使用した釘の強度性能を比較するため、曲げ試験を行った。曲げ試験は釘長さ 90, 75, 65, 50mm に対してスパンをそれぞれ 70, 60, 50, 40mm とし、中央集中荷重方式で行った。使用したロードセルおよび変位変換器は圧入試験と同じであり、加力速度は毎分 1mm とした。試験体数は 6 本ずつである。

4. 結果と考察

4.1 打ち込み可能な鋼板厚さ

金づち, 釘打ち機による打ち込み試験の結果を第 1, 2 表に示す。

金づちを使用した場合、添え板型では CN 釘および ZN 釘は厚さ 0.6mm のステンレス鋼板には打ち込み可能であったが、厚さ 0.8mm の場合は、釘が折れ曲がり貫通しなかった。一方、S 釘の場合は厚さ 1.0mm のステンレス鋼板に打ち込み可能であった。鋼板挿入型では、CN 釘でも厚さ 1.0mm のステ

第1表 打ち込み試験の結果（金づち）

Table 1. Results of nailing tests (using hammer).

釘 Nail	直径 Diameter	鋼板厚さ (mm) Thickness of steel plate			
		添え板型 Side plate type			挿入型 Insert type
		0.6	0.8	1.0	
CN50	2.87	○	×	-	○
ZN65	3.33	○	×	-	○
ZN90	4.11	○	×	-	○
S50	2.68	-	○	○	-
S90	4.11	-	○	○	-

凡例) ○ : 打ち込み可能, × : 打ち込み不可, - : 未試験
Legend) ○ : Possible to drive; × : Impossible to drive; - : Not tested

第2表 打ち込み試験の結果（釘打ち機）

Table 2. Results of nailing tests (using nailer).

釘 Nail	直径 Diameter	空気圧 Air pressure	鋼板厚さ (mm) Thickness of steel plate			
			添え板型 Side plate type			挿入型 Insert type
			0.8	1.0	1.2*	
CN50	2.87	0.49	15	20	25	3
		0.59	1	5	5	○
		0.69	○	1	1	-
		0.78	-	○	○	-
CN75	3.76	0.49	○	○	1	○
		0.59	○	○	○	○
CN90	4.11	0.49	5	15	25	5
		0.59	○	○	○	○

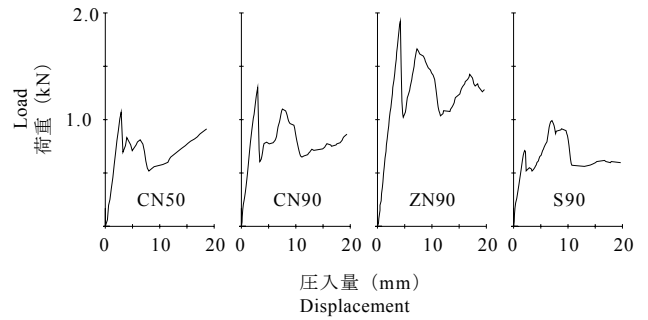
凡例) ○, - : 第1表参照
Legend) ○, - : See Table 1.
注) 数字は打ち残り長さ (mm) を示す。* : 普通鋼板
Note : The value shows the distance of the nail remaining to be driven (mm).
* : Steel plate

ンレス鋼板に打ち込み可能であった。これは主材に打ち込まれることによって釘が安定し、座屈が抑制されたためと考えられる。

釘打ち機を使用した場合は、金づちの場合よりも厚い鋼板に打ち込みが可能であった。CN50では空気圧を使用範囲の最大である0.78MPaとした場合に、添え板型で厚さ1.0mmのステンレス鋼板および厚さ1.2mmの普通鋼板に打ち込み可能であった。CN75, CN90では空気圧を0.59MPaとすれば厚さ1.2mmに十分打ち込みが可能であった。また、挿入型のほうが添え板型よりも小さい空気圧で打ち込むことが可能であった。

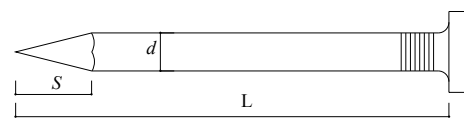
4.2 荷重と圧入量との関係

釘を静的に圧入したときの荷重と圧入量の関係曲線のうち、厚さ0.5mmのステンレス鋼板の場合の代表的なものを第2図に示す。



第2図 荷重と圧入量の関係

Fig. 2. Relationships between load and displacement.



$$* 2d > S > d$$

第3図 釘の形状（CN釘）

凡例) d : 胴部径 (mm), S : 先端部の長さ (mm),
 L : 長さ (mm)

Fig. 3. Shape of the nail (Common Nail).

Legend) d : Diameter; S : Length of tip; L : Length of nail

釘はJIS²⁾によって種類や形状が定められており、第3図に示すように、釘先端部の長さ S は胴部径を d とすると $2d > S > d$ とされている。本試験で使用した釘を測定した結果、 S は $1.7 \sim 2.0d$ であった。したがって荷重-圧入量曲線において、鋼板を貫通し一定の勾配となるのは、鋼板を突き破った極大点からおおむね $2d$ だけ圧入量が進んだのちとなる。荷重-圧入量曲線を見ると、CN釘、ZN釘では釘の先端部が鋼板を突き破る最初の極大点以降は一定の勾配になるまでその極大荷重を上回ることはないが、S釘では一定の勾配になる前にこれを上回る第2の極大点が発現している。本報告では、第1の極大点を貫通点とみなし、その荷重を $P_{1stPeak}$ 、変位を $\delta_{P_{1stPeak}}$ として、以下の性能値を算出した。

$$P_p = P_{1stPeak}$$

$$\delta_p = \delta_{P_{1stPeak}}$$

$$k_p = P_p / \delta_p$$

$$W_p = P_p \delta_p / 2$$

ここで、 P_p : 貫通荷重, δ_p : 貫通変位, k_p : 貫通剛性, W_p : 貫通エネルギー

鋼板厚さごとの各貫通性能値を第3表に示す。

第3表 貫通性能値

Table 3. Properties of penetration.

t	釘 Nail	d	P_p	δ_p	k_p	W_p
0.5	CN50	2.87	1.25	3.74	0.333	2.34
	CN65	3.33	1.43	3.74	0.381	2.67
	CN75	3.76	1.60	4.03	0.397	3.21
	CN90	4.11	1.29	3.12	0.413	2.02
	ZN90	4.11	1.86	3.97	0.467	3.69
	S50	2.68	0.70	2.17	0.320	0.76
0.6	S90	4.11	0.72	2.20	0.325	0.79
	CN50	2.87	2.04	3.95	0.517	4.03
	ZN90	4.11	2.94	5.49	0.535	8.08
0.8	S90	4.11	1.51	2.85	0.530	2.15
	S90	4.11	2.05	3.91	0.525	4.01

凡例) t : 鋼板厚さ (mm), d : 釘径 (mm), P_p : 貫通荷重 (kN),
 δ_p : 貫通変位 (mm), k_p : 貫通剛性 (kN/mm), W_p : 貫通
エネルギー (kN・mm)

Legend) t : Thickness of steel plate; d : Diameter of nail;
 P_p : Penetration load; δ_p : Penetration displacement;
 k_p : Penetration stiffness; W_p : Penetration energy

4.3 釘種による貫通性能の比較

鋼板厚さが0.5mmの場合, CN90, ZN90, S90とを比較するとS釘の貫通荷重は他の半分程度, エネルギーは1/3程度であり, 釘の材質によって大きな差が認められた。また, CN50とCN90およびS50とS90とをそれぞれ比較した結果, 釘径による差は材質によるものよりも小さかった。本研究では釘に関わる指標のうち「座屈性状」「材質」「先端部の形状」に着目し, 貫通性能について検討した。

4.3.1 釘の座屈性状

これまでの試験で, 打ち込めなかった釘はすべて中央付近で座屈し折れ曲がっていた。そこで試験に使用した釘の座屈性状について検討した。座屈の発生しやすさを示す細長比および座屈荷重は以下の式で計算される。

$$\begin{aligned}\lambda &= l_k / k \\ k &= \sqrt{I / A} \\ &= d / 4 \\ W_k &= \alpha A \\ \alpha &= \sigma_0 / (1 + \alpha \lambda^2)\end{aligned}$$

ここで, λ : 細長比, l_k : 座屈長さ (mm), k : 座屈方向の断面二次半径 (mm), I : 全断面積に対する座屈方向の断面二次モーメント (mm⁴), d : 円形断面の直径 (mm), W_k : 座屈荷重 (N), σ_0 : ランキンの

第4表 釘の細長比と座屈荷重

Table 4. Slenderness ratios and buckling loads of the nails.

釘 Nail	L	d	λ	W_k
CN50	50	2.87	69.7	1.31
CN65	65	3.33	78.1	1.60
CN75	75	3.76	79.8	2.00
CN90	90	4.11	87.6	2.19

凡例) L : 釘長さ (mm), d : 釘径 (mm), λ : 細長比, W_k : 座屈荷重 (kN)

Legend) L : Length of nail; d : Diameter of nail;
 λ : Slenderness ratio; W_k : Buckling load

の式による座屈応力 (N/mm²), A : 断面積 (mm²), σ_0 , α : 実験から求めた定数³⁾で, 軟鋼の場合 $\sigma_0 = 333$ (N/mm²) (=3400 (kgf/cm²)), $\alpha = 1/7500$
打ち込まれる釘を両端ピン支持の柱とみなし, 座屈長さを釘長さに等しいものとして計算したCN釘の細長比と座屈荷重を第4表に示す。

一般に, 細長比 λ が十分に大きい場合の座屈は弾性的となるため, 材料のヤング係数によって座屈荷重が決定されるが, そうでない場合は塑性的な座屈となり, ランキンの式を用いて座屈荷重が決定される。その境界値となる λ の値は軟鋼の場合90程度である³⁾ため, 今回使用したCN釘はすべてランキンの式を用いて計算した。その結果, CN釘の場合は釘径が大きいほど座屈荷重は大きくなった。また同様の傾向が在来構法用のN釘でも確認された。しかし第3表に示した貫通荷重の実験値は, 計算による座屈荷重を上回っている場合もあるため, 実際の釘端部の支持条件は完全なピンではないと考えられる。いずれにせよ, 今回の試験では確認できなかったが, 釘径によって打ち込み可能な鋼板厚さに差がある可能性が示唆された。

4.3.2 釘の材質

これまでの試験で打ち込んだ釘を抜いて観察したところ, CN釘, ZN釘は先端が変形してつぶれていたのに対し, S釘はほとんど変形していなかった。したがって, 貫通性能には釘自体の強度性能が大きく影響を及ぼすと考えられる。釘の材質はJIS^{2,4)}に規定されており, CN釘はくぎ用鉄線SWM-N, S釘はステンレス鋼線SUS304を用いている。またZN釘はCN釘に溶融亜鉛メッキ処理したものである。これらのJISには, それぞれ

第5表 釘の強度性能

Table 5. Strength properties of the nails.

釘 Nail	E_b	M_y	$F_t^{4)}$	$H_v^{6)}$
CN50	197.7	7.90	690~1130	150*
CN65	189.3	6.56	590~1030	〃
CN75	187.3	7.18	〃	〃
CN90	199.9	7.50	540~930	〃
ZN90	200.2	8.70	〃	〃
S90	178.2	10.31	520~1420	200**

凡例) E_b : 曲げヤング係数 (kN/mm²), M_y : 曲げ降伏モーメント (kN・mm), F_t : 引張強度 (N/mm²), H_v : ビッカース硬さ (HV)
注) *: 軟鋼 (SWRM6~12), **: ステンレス (SUS304)

Legend) E_b : Modulus of elasticity; M_y : Bending yield moment; F_t : Tensile strength; H_v : Vickers hardness

Note) *: Mild steel (SWRM6 ~ 12); **: Stainless (SUS304)

の強度性能値として引張強度が示されているものの、使用する線の径によって強度値が異なっている。本研究では、使用した釘の曲げ試験を行い、曲げヤング係数および曲げ降伏モーメントを求めた。曲げ降伏モーメントは、中央たわみが釘径と等しくなったときを降伏状態とみなして計算した⁵⁾。さらに、金属材料の強度性能値としてビッカース硬さを資料⁶⁾より抜粋した。各釘の強度性能を第5表に示す。

S釘はCN釘よりも曲げヤング係数は1割程度小さく、逆に降伏モーメントは3割程度大きい値であった。またビッカース硬さはステンレスのほうが軟鋼よりも3割以上大きい値となっていた。したがって、釘の先端部がつぶれる度合いはヤング係数よりも硬さや降伏耐力の影響が大きいと考えられる。また、ZN釘はCN釘よりもわずかながら曲げ性能が大きい結果であったが、貫通荷重はCN釘よりも大きくなっている。これは、鋼板に圧入する際にメッキ部分がつぶれて付加的な抵抗要素となるためと考えられる。

4.3.3 釘の先端部の形状

釘の先端部の形状が貫通性能に与える影響を調べるため、CN50釘の先端を削り尖らせたもの、逆に削り落として先端の断面が1mm角および2mm角となるよう加工したものについて、厚さ0.5mmのステンレス鋼板を添え板として、試験機による圧入試験を行った。試験結果を第6表に示す。先端形状が鋭角なほど貫通荷重および剛性は小さくなったが、貫通変位やエネルギーについては一定の傾

第6表 先端形状と貫通性能との関係

Table 6. Relationship between nail sharpness and penetration properties.

釘 Nail	先端形状 Form of the tip	P_p	δ_p	k_p	W_p
CN50	鋭角 Sharp	1.08	3.21	0.333	1.74
	原形 Original	1.25	3.74	0.338	2.34
	1mm角 1mm square	1.21	2.46	0.491	1.48
	2mm角 2mm square	1.79	2.92	0.612	2.62

凡例) P_p , δ_p , k_p , W_p : 第3表参照

Legend) P_p , δ_p , k_p , W_p : See Table 3.

向は認められなかった。貫通後の先端形状の変形を調べるため、打ち込んだ釘を抜いて観察した結果、通常の釘および削り尖らせた釘は先端がつぶれていたのに対し、削り落とした釘はほとんど変形していなかった。今回の測定では、釘先端のつぶれも含めて圧入変位としているため、その分貫通変位は大きくなったと考えられる。

4.4 主材の密度による影響

主材の密度によって貫通性能がどのように変化するかを調べるため、主材をトドマツ、SPF集成材、ナラの3種類、釘をCN50として、試験機による圧入試験を行った。試験は添え板を厚さ0.5mmのステンレス鋼板とした場合および添え板なしの状態で行った。各主材ごとの貫通性能を第7表に示す。なお添え板なしの場合は変位が $2d$ ($=5.74\text{mm}$)のときの荷重を性能値とした。主材の密度が大きいほど圧入荷重は大きく、特に添え板がある場合は貫通剛性や貫通荷重との間に高い正の相関が認められた。したがって、主材の密度が大きいほど釘が座屈する可能性が高くなり、打ち込み可能な鋼板厚さは主材密度によっても変化すると考えられる。

5. おわりに

従来の鋼板添え板釘打ち接合は、許容耐力の割り増しが認められているにも関わらず、加工・施工性が優れているとは言えないため、国内では採用事例が少ないのが実情である。

本研究では施工性の改善を目標として、先孔が不要となる鋼板釘打ち条件を検討した。その結果、

第7表 主材密度と貫通性能の関係

Table 7. Relationship between density of wood and penetration properties.

樹種 Species	密度 Density (g/cm ³)	添え板 0.5mm Side plate 0.5mm thick				添え板なし Without side plate
		P_p	δ_p	k_p	W_p	P_{2d}
トドマツ Sakhalin Fir (<i>Abies sachalinensis</i>)	0.36	1.25	3.74	0.333	2.34	0.31
SPF 集成材 SPF Glued laminated lumber	0.47	1.38	3.69	0.374	2.56	0.32
ミズナラ Japanese Oak (<i>Quercus crispula</i>)	0.65	1.70	3.59	0.473	3.06	0.62

凡例) P_p , δ_p , k_p , W_p : 第3表参照, P_{2d} : 圧入量が2d時の荷重 (kN)

Legend) P_p , δ_p , k_p , W_p : See Table 3., P_{2d} : Load at displacement of 2d (kN)

釘種や釘打ち方法などによっては、厚さ1mmのステンレス鋼板に釘打ちが可能であることが明らかとなった。厚さ0.6mmのステンレス鋼板を使用した接合金物が認定を受けていることを考慮すると、厚さ1mmであれば実用化が十分可能であると考えられる。

本研究の結果をもとに、今後は薄鋼板を用いた接合部の強度性能についての研究を進め、従来の接合方法との性能比較を行う予定である。

- 2) 日本工業規格：JIS A 5508「くぎ」(1992).
- 3) 斉藤渥，平井憲雄：“詳解材料力学演習”(下)，共立出版，430(1983).
- 4) 日本工業規格：JIS G 3532「鉄線」(2000).
- 5) 日本ツーバイフォー建築協会：“2002年枠組壁工法建築物構造計算指針”，枠組壁工法建築物設計の手引・構造計算指針編集委員会編，235-236(2002).
- 6) 北海道立工業試験場提供資料(未公表).

文 献

- 1) 日本建築学会：“木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—”，日本建築学会編，31(2002).

一性能部 構造性能科一

(原稿受理:04.5.18)