

充填型鋼管コンクリート構造用内面リブ付き 鋼管の最適リブ形状と製造技術

松村 弘道*・佐久間 仁*・升田 貞和*²・谷口 勲*³

Rib Shape of Steel Pipe with Inner Ribs for Concrete-filled Structural Section and Its Rolling Method

Hiromichi MATSUMURA, Hitoshi SAKUMA, Sadakazu MASUDA and Isao TANIGUCHI

Synopsis :

This report represents the study on the optimum rib shape for the concrete-filled structural steel pipe, and also the study on the rolling method of the hot-rolled strip. The pipe with inner ribs is developed for the composite foundation pipes consisted of steel pipe and filled-concrete in order to get sure bond stress capacity between pipe and filled-concrete. The bond stress capacity tests indicate that the value of rib height divided by rib space is the most essential parameter and the value of 0.1 gives the optimum rib shape. Next, the characteristics of rolling of the rib-strip are studied by experiments with many longitudinal ribs distributed throughout the strip width. The experimental results show that the rib height depends on not only reduction but also the caliber profiles and entry thickness. Based on the experiments, the hot rolling method of the strip with 3.0 mm height ribs on the average is established.

Key words : longitudinal rib ; composite structure ; bond stress capacity ; hot-strip ; spiral pipe ; concrete.

1. 緒 言

建築物の柱や杭などの軸力と曲げを受ける部材をコンクリート充填鋼管（以下 CFT 構造と言う）とする設計が急速に普及しようとしている。CFT 構造は、コンクリートの脆性的な破壊・鋼管の局部座屈というおのおの弱点をお互いに補い合い、構造耐力・靱性を向上させた合理的な構造である。また、建築物の柱やはりに使用する場合は、コンクリート打設用の型枠が不要となり施工上の大きな長所となる。杭に使用する場合は、鉄筋コンクリートの杭のように、特に、杭頭部での配筋が複雑でコンクリートの充填に対する不安があるものと違い、コンクリートの充填性が良く、また、断面性能もその径を変化させることなく板厚で調整できるという特長をもっている。このように、力学的特長だけでなく、施工の省力化や信頼性の向上が図れるという長所を有する CFT 構造は、今後ますます普及していくものと考えられる。

CFT 構造のような鋼・コンクリート合成構造の構造設計は、一般化累加強度理論¹⁾²⁾にその根拠をおいている。

一般化累加強度理論は、塑性耐力を対象としたもので、「二つ以上の構成要素から成る断面の塑性耐力は、断面での平面保持の仮定が成立すれば、個々の構成要素の塑性耐力を累加して得られる」ことを示している。ここで平面保持の仮定が成立するという事は、各要素の中立軸の位置が一致していることである。CFT 構造の場合は、鋼管とコンクリートの接触面で歪みのずれが生じないことが必要で、実験的にもこのずれの有無で大きな耐力差が生じることが確認されている³⁾。

一般に、CFT 構造の場合は、鋼管内に充填されたコンクリートの収縮等の影響もあり接触面での付着力が非常に小さいことや、付着力の経年劣化等の不安があり、普通鋼管の場合には、上記一般化累加強度成立の条件が満たされない場合が多いと考えられる。

以上の状況から筆者らは鋼管の内面にリブ（突起）を設け、コンクリートとの一体性を確保し、一般化累加強度発揮の条件を満足させようとする試みを行っている。

本報告では、杭や矢板に用いることを前提に開発した内面リブ付きスパイラル鋼管のリブの形状及びリブ付き熱延鋼板の圧延について報告する。

昭和 63 年 4 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 2 月 5 日受付 (Received Feb. 5, 1990)

* NKK 鉄鋼研究所 (Steel Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

*² NKK 鉄鋼研究所 工博 (Steel Research Center, NKK Corporation)

*³ NKK 福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corporation)

鋼管内面のリブは付着性能を向上させるためだけに存在するとすれば、十分な付着性能をもつリブのうちできるだけ小さい体積のものがよく、また、コンクリートとの十分な付着性能を確保するためにはできるだけリブ高さの高いものがよいと思われる。ここではこういう観点から最適リブ形状を検討する。

熱間圧延の段階では、圧延方向に連続したリブを板幅方向に多数有する縦縞リブ付き熱延鋼板の開発を目指した。本縦縞リブ付き鋼板は、ロール胴長方向に多数のカリバを有するロールとフラットロールを用いて、1パス圧延にてリブを付けるもので、過去には熱放散特性や耐すべり特性を利用した使用例が見られた⁴⁾。しかし、均一かつ高いリブを得ることはかなり困難であり、また、圧延時の変形及び負荷特性に関する報告は全く見られない。よって、鉛モデル圧延により、リブ高さに及ぼすカリバ形状や圧延条件の影響および圧延負荷特性の検討を行った。その結果、リブ高さに、カリバ形状や入側板厚等が大いに影響することを明らかにするとともに、リブ高さの板幅方向の不均一を再度確認した。

これらの知見をもとに熱延工場での製造条件の最適化、および、胴長方向にカリバ幅を変化させたロールを用いる板幅方向リブ高さの均一化を行い、均一かつ平均リブ高さ 3.0 mm 以上の縦縞リブ付き熱延鋼板の製造が可能となった。

2. 最適リブ形状

2.1 内面リブ付き鋼管の付着性能実験

最適リブ形状を設定するための付着性能実験は、Fig. 1 に示す押抜き試験法により行った。CFT 構造部材における付着力の発生メカニズムとその性能把握の方法については種々議論のあるところであるが⁵⁾、鋼とコンク

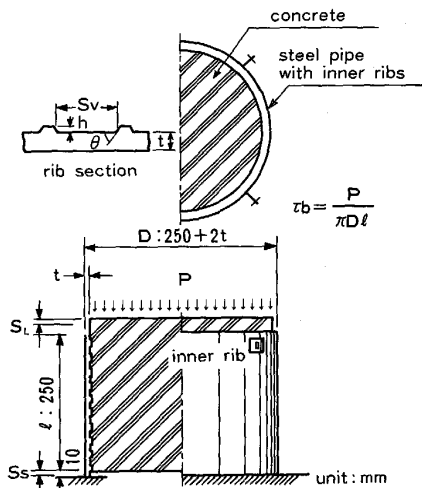


Fig. 1. Bond stress capacity test.

リートのポアソン比の関係より押抜き法は引抜き法に比べて付着耐力を安全側に評価すると考えられることから、ここでは押抜き実験とした。試験体のパラメーターとしてリブの高さ (h)、リブの立ち上がり角度 (θ)、板厚 (t) すなわち径厚比 (D/t)、及びリブ間隔 (S_v) を採り、Table 1, Photo. 1 に示す 20 体の試験体について付着性能実験を行った。

鋼管と充填コンクリートとの相対すべり量は、載荷端、

Table 1. Bond stress capacity tests specimens.

Specimen No.	d (mm)	h (mm)	θ	t (mm)	D/t	S_v (mm)	h/S_v		
①	250	1.5	45°	6	43.7	28.5	0.053		
②		80				0.031			
③		50				0.05			
④		44				0.057			
⑤		38				0.066			
⑥		33				0.066			
⑦		20°	45°	6	43.7	28.5	0.088		
⑧		3						85.3	
⑨		4.5						57.5	
⑩		6						43.7	
⑪		75°	6	43.7	29.8	28.5	0.088		
⑫								9	
⑬								25	0.1
⑭								20	0.125
⑮		45°	6	43.7	28.5	28.5	0.088		
⑯								15	0.167
⑰								10	0.25
⑱								3.5	0.088
⑳		4.5	0.088						

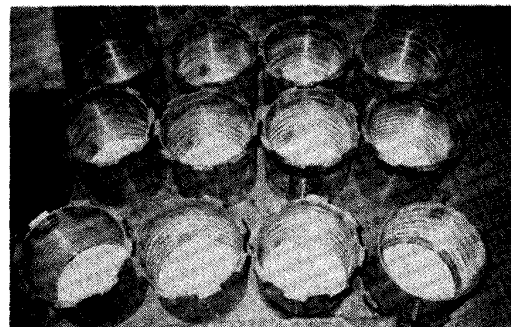
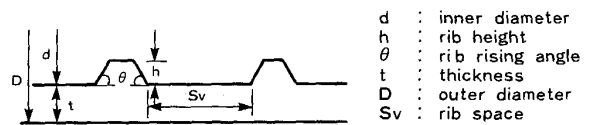


Photo. 1. Ribs of the specimens.

Table 2. Mechanical properties of the concrete.

Compressive strength (kgf/cm ²)	Young's modulus (kgf/cm ²)	Poisson's ratio	Tensile strength (kgf/cm ²)
276	2.5×10 ⁵	0.20	21.9

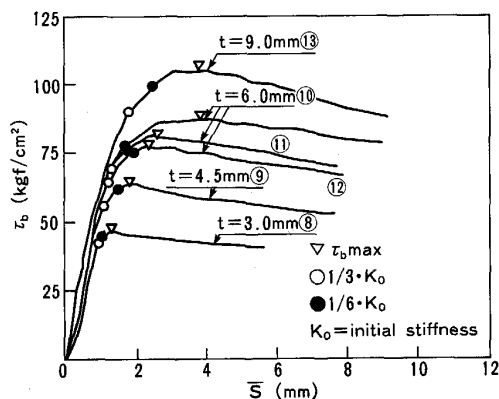


Fig. 2. Average bond stress (τ_b) - slip (\bar{S}) relations with respect to thickness of the pipe (t).

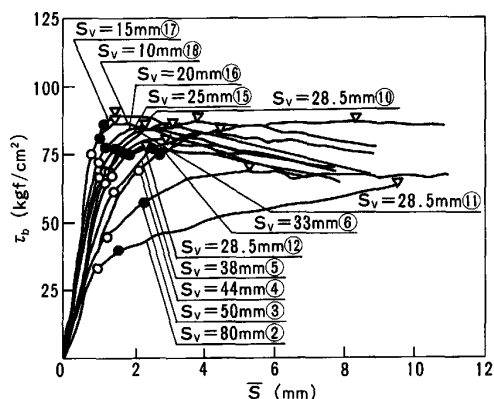


Fig. 3. τ_b - \bar{S} relations with respect to space (S_v).

支持端とも4か所で計測し、その平均値をそれぞれ載荷端すべり量 (S_L), 支持端すべり量 (S_s) とした。鉄筋の標準引抜き試験と異なり、 S_L と S_s で力学的な条件の違いは小さい。従って、ここでは S_L と S_s の平均値を本実験での平均すべり量 \bar{S} とした。Table 2 に充填コンクリートの機械的性質を示す。

Fig. 2~Fig. 5 に各試験体の平均付着応力度 (τ_b) と平均すべり量 (\bar{S}) の関係を示す。図中のマークはそれぞれ

- ∇ : 付着強度 (最大付着応力度)
- \bullet : τ_b - \bar{S} 関係で、接線勾配が初期勾配 K_0 (初期剛性) の $1/6$ となる点
- \circ : τ_b - \bar{S} 関係で、接線勾配が初期勾配の $1/3$ となる

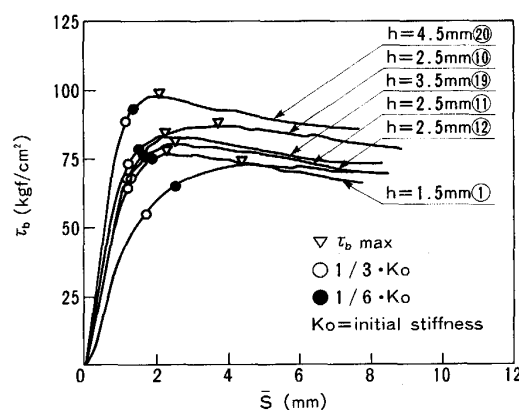


Fig. 4. τ_b - \bar{S} relations with respect to rib height (h).

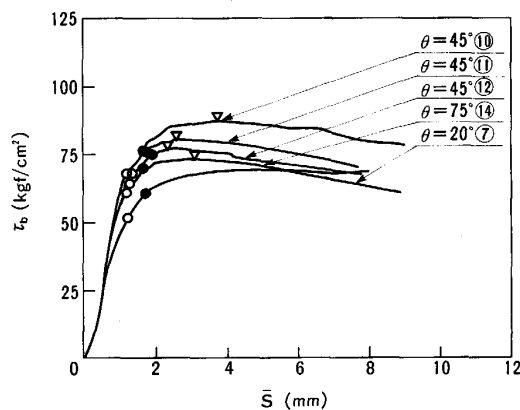


Fig. 5. τ_b - \bar{S} relations with respect to rib rising angle (θ).

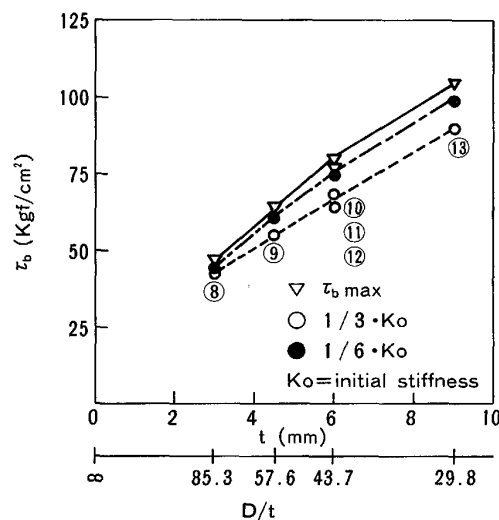


Fig. 6. τ_b - D/t relation.

点を示す。

Fig. 6 に付着耐力と鋼管の板厚との関係を示す。後述のコンクリートの破壊状況から推察されるように、付着

強度 ($\tau_b \max$) は拘束応力下でのコンクリートのせん断破壊で決まっている。拘束応力下でのコンクリートの圧縮耐力に関する RICHART の仮説⁶⁾ がせん断強度についても成立すると仮定すると、 $\tau_b \max$ を線型式で表現できる。

$$\tau_b \max = \tau_{b0} + k \cdot \sigma_n \dots\dots\dots(1)$$

ここで k : 拘束係数

τ_{b0} : コンクリートの単純せん断強度

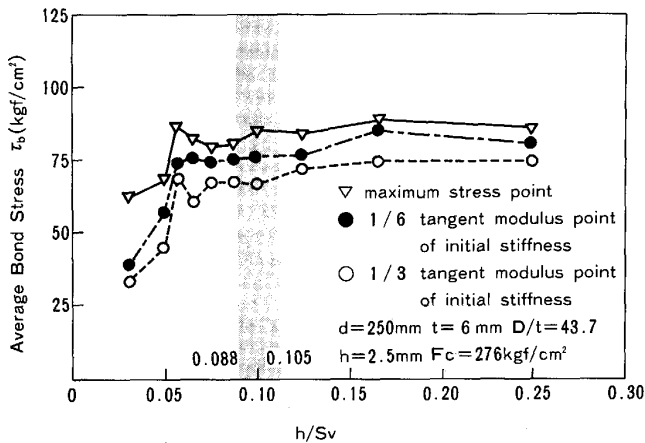


Fig. 7. τ_b - h/Sv relations.

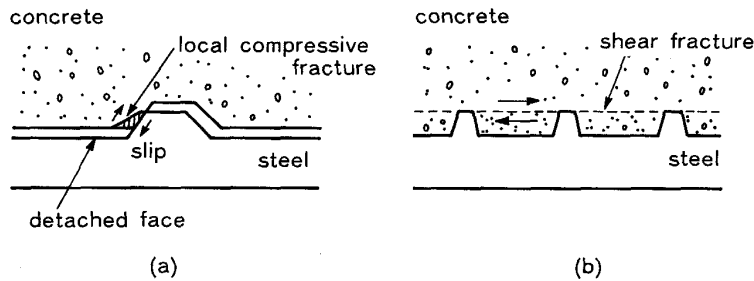


Fig. 8. Fracture pattern of concrete.

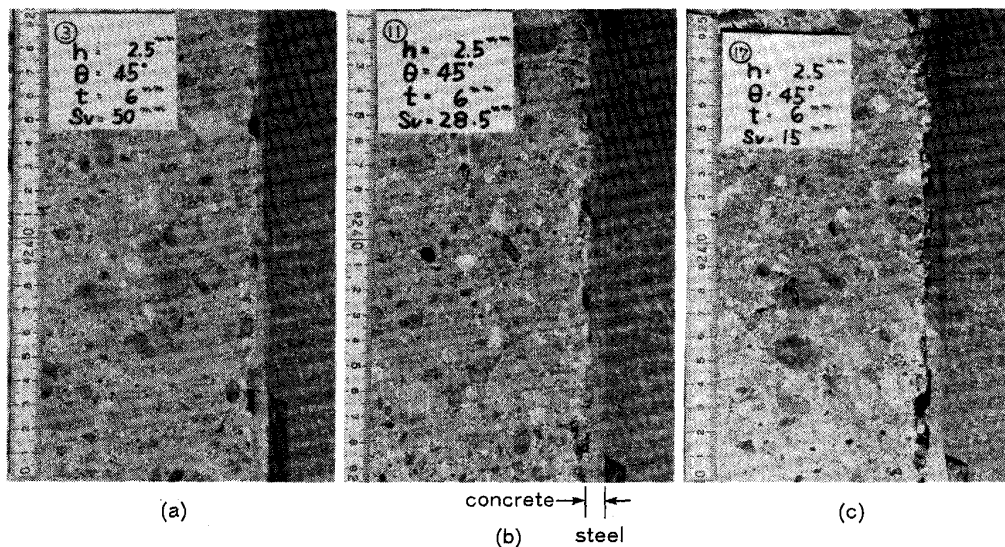


Photo. 2. Concrete fracture face.

σ_n : 鋼管の円周方向応力

Fig. 6 で付着強度と板厚がほぼ線型の関係にあることから、この実験の範囲では(1)式が成立していると言える。

Fig. 7 に付着耐力と h/Sv の関係を示す。これは、 h を一定 (2.5 mm) とし Sv を変化させて行った実験の結果である。 h/Sv 値が大きくなると、すなわち、リブ間隔を小さく密にすると、リブ部分の体積が増すことになる。従って、できるだけ小さい h/Sv 値で、十分かつ安定した付着強度を示すリブ形状が最適なものである。図より、 h/Sv 値で 0.08 以上で 0.1 程度のものが最適であり、これよりリブの間隔を小さくしても付着性能の改善は見込めない。ちなみに、現在 NKK では $h/Sv = 0.088 \sim 0.105$ の範囲のものを製造している。

リブ高さ (h) については、付着強度・付着剛性の大小・製造の難易度等より設定すべきであるが、Fig. 4 から $h = 1.5$ mm のものは付着性能に不満があり、 $h = 4.5$ mm のものは製造が難しそうのため $h = 2.5 \sim 3.5$ mm のものが妥当であると言えよう。リブの立ち上がり角度 (θ) については、試験体の D/t 値で 43.7 という拘束圧が比較的大きい範囲での実験のため明解にその影響がでていたとは言い難いが、Fig. 5 より $\theta = 45^\circ \sim 75^\circ$ の範囲

Table 3. Specification of inner rib shape for spiral pipe.

Rib height h	Average 3.0 mm
	Min 2.5 mm
h/S_v	0.088~0.105
Rib rising angle θ	45°~75°
Rib width W_b	6.5~11 mm
Plate thickness t	6 mm over

ではその付着性状に大差はないと言える。

2.2 コンクリートの破壊メカニズムと最適突起形状

実験終了後、試験体をダイヤモンドカッターで切断し、コンクリートの破壊面を観察した。試験体①②③では Fig. 8(a) に模式的に、また、Photo. 2(a) に示すように、鋼板とコンクリート間でのすべり及び一部の局部圧壊のモードで付着強度が決まっており Fig. 2~Fig. 5 に示す $\tau_b-\bar{S}$ 関係からも付着強度・剛性が小さいことが理解できる。

リブを密に配置した試験体⑭⑮では、Fig. 8(b), Photo. 2(c) に示すようにすべり・圧壊よりもリブ頂部の位置でのコンクリートのせん断破壊が先行している。この破壊パターンのものは付着強度は大きいもののその後の付着耐力の劣化が著しい。

一方、 S_v, h, θ がほぼ最適値の領域にある試験体⑩⑪⑫では、Photo. 2(b) に示されるようにリブ周辺のコンクリートが「すべり→局部圧壊→せん断破壊」の順序で劣化していると考えられる。この場合は $\tau_b-\bar{S}$ 関係の耐力・靱性上も最も好ましいものである。

以上述べてきた付着性能実験の結果として、内面リブ付きスパイラル鋼管用の最適リブ形状として、Table 3 に示す仕様が設定できる。

3. 熱延縦縞リブ付き鋼板の圧延

3.1 モデル実験による圧延基本特性の検討

(1) 実験条件

- モデル比：1/3 (全幅に対するモデル比は除く)
- ロール寸法：φ 220 mm × 100 mm
- 圧延材：硬質鉛 (Pb-4 wt% Sb) 板厚 (3.0~12.0 mm)

Fig. 9 に、実験に用いたカリバロール形状を示す。

(2) 変形特性

Fig. 10 にカリバ形状およびリブ付き鋼板の各部寸法

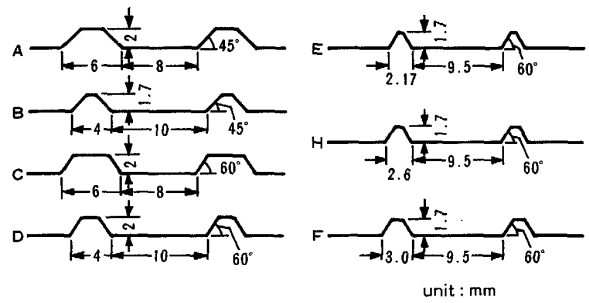


Fig. 9. Caliber roll profiles in model rolling.

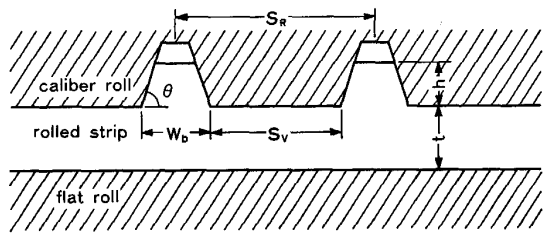


Fig. 10. Definition of caliber roll profile and rib-strip.

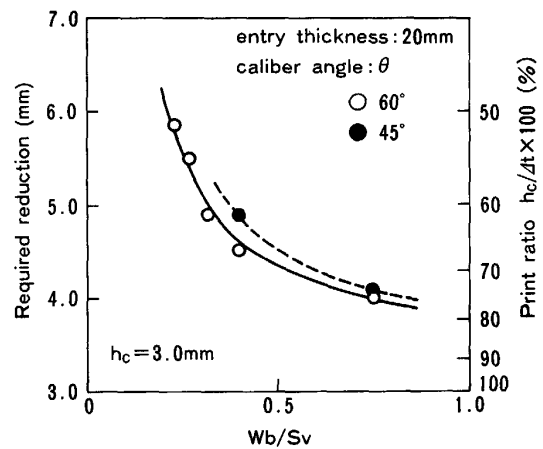


Fig. 11. Effects of caliber profile factors on delivered rib height at center of width.

定義を示す。以後の数値はすべて実機換算値で示す。

• カリバ形状の影響

Fig. 11 に板幅センター部でリブ高さ 3.0 mm を得るのに必要な圧下量あるいはプリント率 (リブ高さ/圧下量 × 100) に及ぼすカリバ形状の影響を示す。本カリバ条件では、非圧延部面積の圧延部面積に対する比が大きいほど、すなわちカリバ幅 W_b が大きいほど、またはカリバ間距離 S_v が小さいほどリブ高さは高くなる。これは、リブ部の塑性流動の起こりやすさに起因しているもので、カリバ幅と板厚の比などの影響も受けると考えられる。また、カリバ角度 θ が大きいほどリブ高さは

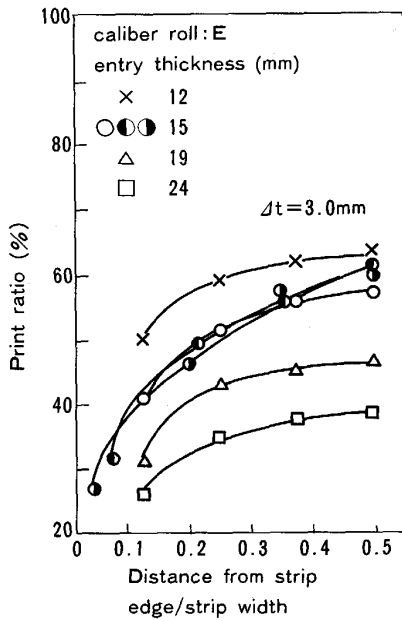


Fig. 12. Print ratio distribution through the strip width.

高くなる。

• 板幅方向リブ高さ分布及び入側板厚の影響

Fig. 12 に、プリント率の板幅方向分布を入側板厚をパラメータとして示す。プリント率は板幅端に近づくほど急激に減少し、エッジ付近ではセンター部に比べ 20~30% プリント率は小さい。これは板幅端に近づくほど材料の塑性流動が幅方向に起こりやすくなることによる。また入側板厚が厚いほどプリント率は小さくなり、あるリブ高さを得るのに必要な圧下量は大きくなる。

(3) 圧延負荷特性

縦縞リブ付き鋼板圧延荷重の同一幅フラット板圧延荷重に対する比は、カリバ A や C のような圧延部幅の狭いカリバでは 1.0 より小さい値を示すが、 Wb/S_v が 0.4 以下のカリバ E, H, F ではほぼ 1.0 の値を示す。これは、実質圧延幅は狭いものの、部分圧延による非圧延部の拘束により、圧延部の荷重増加が起こるためである。圧延トルクにおいても、圧延荷重と同様な結果を得ている。これらの結果より、縦縞リブ付き鋼板の圧延負荷予測には、同一幅フラット板圧延として計算することとした。

3.2 実機製造条件の最適化

(1) 最適熱延条件の検討

Table 3 に示すリブ仕様を満足した鋼板を実機熱延タンデムミルにて製造するには、最終圧下スタンドでの高圧下が必要となる。そこで、福山第一熱延仕上げミル(7 スタンドタンデムミル)での圧下量限界を、熱延温度

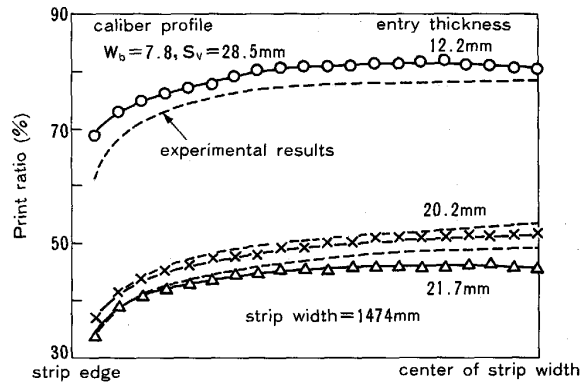


Fig. 13. Print ratio distribution in actual rolling.

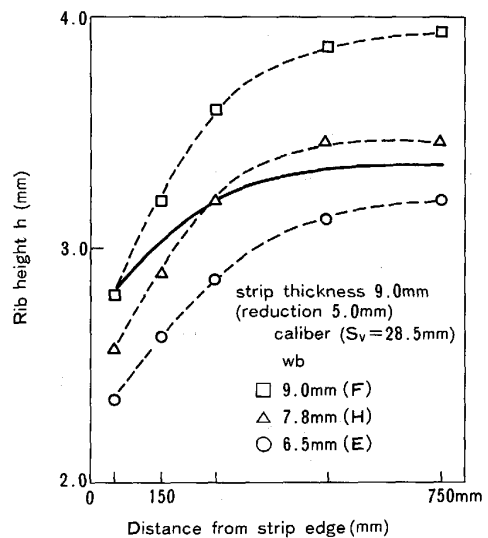


Fig. 14. Predicted rib height distribution.

降下圧延負荷シミュレーション計算モデルにより検討した。前段仕上げほど限界圧下量は大きくなる。しかし、F2 仕上げでは仕上げ厚 9.0 mm 以下は圧延不可となるので、広範囲の仕上げ厚を満足するには、F3 仕上げが最適と考えられる。

(2) 板幅方向リブ高さの均一化

Fig. 13 に、板幅方向に均一なカリバ ($Wb = 7.8$ mm, $S_v = 28.5$ mm) を用いた時の、実機圧延材プリント率の板幅方向分布を示す。実測値は Fig. 12 に示したモデル実験値と良く一致しており、実機圧延材においても板幅端に近づくにつれて、プリント率の低下が認められる。

Fig. 14 に、各カリバを用いた時のプリント率と圧下量より求まる板幅方向リブ高さ分布予測値を示す。前述したように、 Wb の大きな F カリバを用いれば高い突起高さを得ることができるが、板幅方向でのリブ高さ偏差が大きくなる。一方、 Wb の小さな E カリバを用いると、センター部リブ高さは十分な値を示すが、エッジ部リブ

高さが小さな値となってしまう。そこで、板幅方向にカリバ形状 (Wb) を変化させることが、板幅方向リブ高さの均一化に有効と考えられる。図中の実線はカリバ間距離 Sv を 28.5 mm と一定とし、 Wb をエッジ 50 mm 部で 9.0 mm, エッジより 270 mm 付近で 7.8 mm, センター部で 7.2 mm となるように、徐々にカリバ幅を板幅エッジ部よりセンター部に向けて狭くした時の突起高さ分布予測を示す。本手法により、板幅方向突起高さ分布の均一化が可能と考えられる。

Fig. 15 に本手法の実機における効果を示す。比較材のカリバ形状は $Sv=28.5$ mm, $Wb=7.8$ mm の均一カリバであり、本試験材のカリバ形状は Fig. 16 に示す。カリバ幅を変化させたことによるリブ高さの均一化の効果が認められる。また全体にリブ高さが高くなっている

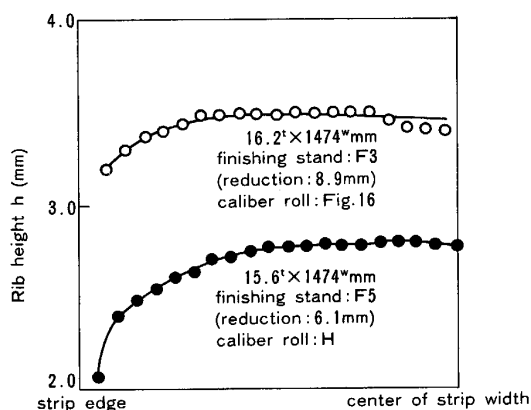


Fig. 15. Equalization of rib height through the strip width by advanced caliber roll.

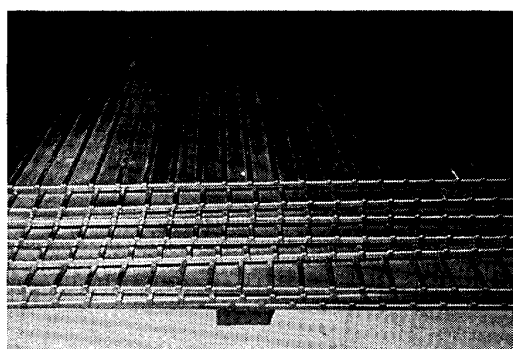


Photo. 3. View of rib-strip.

のは、従来の F5 仕上げより F3 仕上げに変更したことによる圧下量の増大のためである。Photo. 3 に実機で製造した縦縞リブ付き鋼板を示す。

以上より、仕上げ厚 6.0~22.0 mm において、板幅 1500 mm で平均リブ高さ 3.0 mm 以上および最小リブ高さ 2.5 mm 以上の、内面リブ付きスパイラル鋼管用縦縞リブ付き熱延鋼板が製造可能となった。実機圧延における圧延材の通板性、板反り、形状などにおいても問題なく、安定した圧延ができた。

4. 結 論

信頼性の高いコンクリート充填鋼管構造を実現させるため内面リブ付き鋼管を考案した。また、最適な内面リブ形状を得るため円形鋼管内面に設置したリブ形状をパラメーターにして付着性能実験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) リブ形状については、 h/Sv が最も有意なパラメーターであり、 $h/Sv=0.1$ 程度のリブが最適なものである。
- (2) 円形鋼管の場合、付着強度と板厚は線型関係にある。
- (3) 最適なリブ形状の試験体では、リブ周辺のコンクリートが「すべり→局部圧壊→せん断破壊」の順序で劣化し付着強度に達する。

また、これらの結果に基づき、最適な内面リブ付き鋼管用原板となる縦縞リブ付き熱延鋼板の圧延特性として、カリバ形状 (リブ形状) や圧延条件の変形・負荷特性におよぼす影響について、モデル圧延による検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (4) カリバ幅が大きいほど、カリバ間隔が小さいほどプリント率 (=リブ高さ/圧下量 × 100) は大きくなる。
- (5) 入側板厚が薄いほど、プリント率は大きくなる。
- (6) プリント率は板幅端に近づくほど急激に減少し、板幅端付近ではセンター部に比べ 20~30% 小さい。

以上の実験結果をもとに、胴長方向にカリバ幅を変化させたロールを用い、均一かつ平均 3.0 mm 以上のリブ高さを有する板厚 6~22 mm の内面リブ付き鋼管用縦縞リブ付き鋼板が製造可能となった。

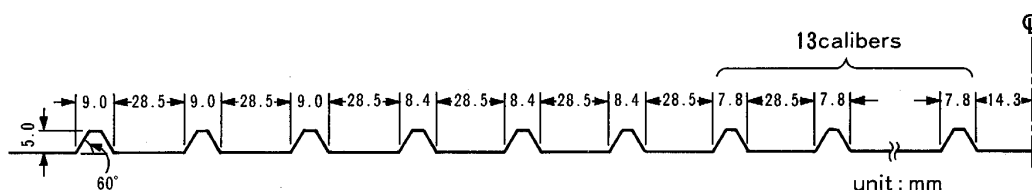


Fig. 16. Advanced caliber roll profile in actual rolling.

文 献

- 1) 田中 尚: 日本建築学会論文報告集 (1957) 57, p. 261
- 2) 平野道勝: 日本建築学会論文報告集 (1959) 63, p. 397
- 3) 松村弘道, 佐久間仁: 構造工学論文集, **33B** (1987), p. 201
- 4) 五弓勇雄: 日本金属学会会報, **23** (1984), p. 339
- 5) 富井政英, 崎野健治, 森下陽一: カラム (1979) 73, p. 91
- 6) *F. E. RICHART, A. BRANDTZAEG and R. I. BROWN: Bulletin No. 190, Univ. of Illinois Engineering Experiment (1929)*
- 7) 岡戸 克, 中内一郎, 藤田文夫, 神尾 寛: 鉄と鋼, **63** (1977), A29