

© 1987 ISIJ

圧延鋼板のポロシティの圧着過程とその延性に及ぼす影響

論文

 田川 寿俊*・津山 青史*²・田中 淳一*³

Porosity Annihilation Process and Its Influences on Ductility of Rolled Steel Plates

Hisatoshi TAGAWA, Seishi TSUYAMA and Junichi TANAKA

Synopsis:

The effect of porosities on mechanical properties of plates rolled by heavy reduction and by light reduction per pass was investigated quantitatively in comparison with the effect of non-metallic inclusions.

Compared with the strength and the toughness, the ductility such as the reduction of area in the tensile test and the upper shelf energy in the impact test is much more greatly affected by porosities than by elongated inclusions. It is possible to estimate the annihilating process of porosities from the viewpoint of the ductility as well as the ultrasonic examination.

1. 緒 言

原子力第一種圧力容器，高温高压反応容器，ボイラー，ジャッキアップリグなどの構造用材料としての極厚鋼板に対する需要量は増加の一途をたどっている。このような極厚鋼板の製造のためには，必然的に大型鋼塊が必要となるが，大型鋼塊には通常その軸芯部の頭部から高さ中央部にかけて，ザクきずと称する微細なポロシティが生成する¹⁾。ザクきずの発生程度は，鑄造方法²⁾，鑄造条件³⁾などにより左右されるが，現実的な問題としては，ESR (Electro-slag Remelting)⁴⁾などの特殊な方法を使用しない限り，ザクきずなどのポロシティが皆無の大型鋼塊あるいは鋼片を製造することは極めて困難であると考えられる。このようなポロシティは，外部に開口していないので，比較的薄肉の鋼板では圧延などの加工の段階で圧着してしまい，製品になった段階では影響が残らないのが普通である。しかしながら，板厚が 100 mm を超える極厚鋼板のように鋼塊あるいは鋼片厚さと製品厚さの比，すなわち全圧下比が小さい場合には，ポロシティは必ずしも完全には圧着せず，製品の内部に残留して超音波探傷試験などにより内部欠陥として検出されることがある。このように，加工によりポロシティが完全に圧着されずに鋼板中に残存した場合，その危険性

は漠然とは認められているものの，溶接欠陥⁵⁾などのように機械的性質（とくに延靱性）に及ぼす影響として定量的に調査された研究は少なく³⁾，定性的な報告がほとんどである⁶⁾。これは，ポロシティが鋼板内部に存在しているため，人工的に残存程度を変化させにくいこと，内部欠陥の観点から加工の方法あるいは程度を変えて内部まで調査された研究が少ないこと，および非金属介在物の影響と混在して表れるためポロシティと非金属介在物の影響を分離してとらえることが難しいことなどが原因していると考えられる。

一方，筆者らは既報^{7)~9)}のように，圧延工程のみで健全な極厚鋼板を得ることを目的として，製鋼-造塊条件の改善⁷⁾と併せて圧延法の改善に関する検討を行つた結果，ポロシティの圧着過程が拡散による接合過程である⁷⁾ことに着目し，圧縮応力だけでなく拡散に必要な温度および時間の確保を必要条件とした低速強圧下圧延法⁸⁾⁹⁾，そして，さらにこの考え方を一歩進め，ポロシティの密集域のみに局部的に高圧縮応力を負荷する中心強圧下圧延法を考案し⁹⁾，主に鋼板の健全性に及ぼす圧延条件の影響と健全鋼板を得るための必要圧延条件に関する検討を実施してきた。

本報告では，前報⁷⁾において鋼板の健全性を調査した試験圧延機による強圧下圧延材と軽圧下圧延材を用

昭和 49 年 11 月本会講演大会において一部発表 昭和 60 年 12 月 13 日受付 (Received Dec. 13, 1985)

* 日本鋼管(株)中央研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-Ku Kawasaki 210)

*² 日本鋼管(株)中央研究所福山研究所 (Fukuyama Research Laboratories, Technical Research Center, Nippon Kokan K. K.)

*³ 日本鋼管(株)中央研究所 (現: ILMC) (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., Now ILMC)

Table 1. Chemical composition of steel used for laboratory rolling practices (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B
0.12	0.26	0.91	0.014	0.008	0.24	1.34	0.72	0.40	0.04	0.002

い、鋼板の機械的性質に及ぼすポロシティの影響について、非金属介在物の影響との比較をも含めて定量的な検討を行うことにより、機械的性質の点からみたポロシティ圧着の必要性について論ずる。

2. 実験方法

供試材は、Table 1 に示す化学成分を有する焼入れ-焼もどし型の 80 kgf/mm² 級 (HT80) 鋼で、40 t 級の大型偏平鋳型に造塊後、ザクきず密集域から採取した 150 mm t × 200 mm w × 450 mm l の試片により試験を実施した。圧延はロール径 476 mm の試験圧延機を使用して、Fig. 1 に示す強圧下パススケジュールと軽圧下パススケジュールにより（以下、それぞれを強圧下圧延、軽圧下圧延と記す）、圧下比を 1（加熱のみ、圧下率 0%）～4.4 まで変化させた。強圧下圧延は、圧下比 3 の時点において板厚中心部 (1/2 t) の最大圧縮応力と純粋変形抵抗の比 $\sigma_{tc\ max}/k_0$ が 1.6 となっており、軽圧下圧延のそれが 1.0 であるのに比べて、1/2 t まで大きな圧縮応力の加わる圧延法であることがわかる。なお、 $\sigma_{tc\ max}$ はプラスチックを用いたモデル実験により求めた⁷⁾。圧延の均熱温度は 1280°C とし、仕上温度はどの圧延材も板厚中心部で 950～1000°C となるように調整

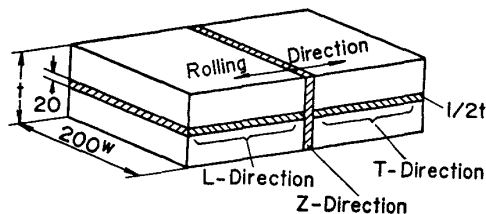


Fig. 2. Sampling position for mechanical test.

した。

本報告では、ポロシティの残存状態と機械的性質との関係を明らかにすることを主眼としており、実際の圧延材の場合の板厚による冷却速度の違いおよび偏析による組織の不均一性などの因子を除去するために、Fig. 2 に示すように圧延後、板厚 20 mm の鋼板を切り出し、同一の焼入れ-焼もどし処理を施して試験に供した。機械試験は、L 方向（圧延方向）、T 方向（圧延と直角方向）および Z 方向（板厚方向）について、ASTM 12.5 ϕ 丸棒試験片による引張試験および 2 mmV ノッチフルサイズシャルピー試験片による衝撃試験を実施した。

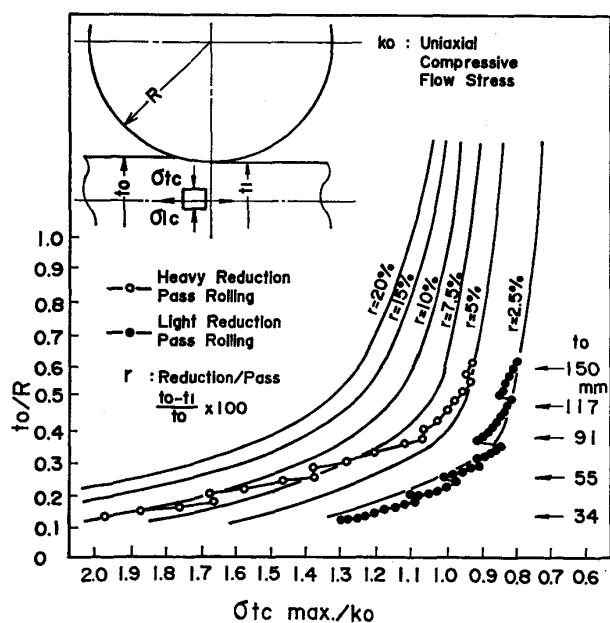


Fig. 1. Relation between rolling pass schedules and compressive stress at the center of material.

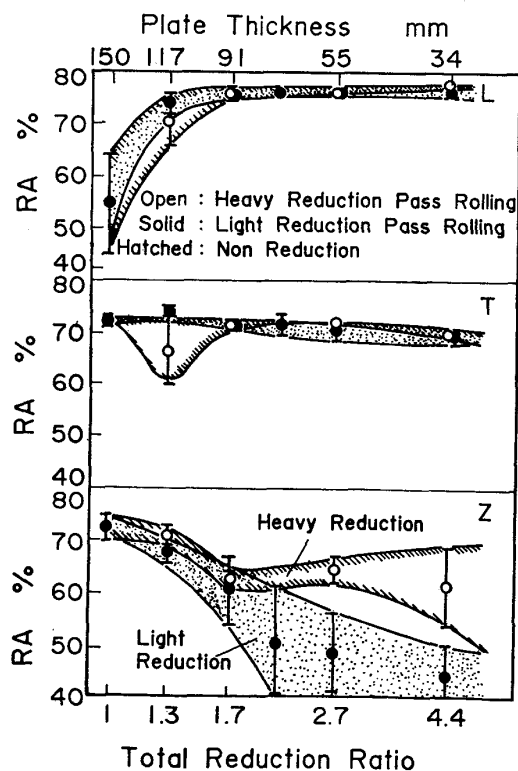


Fig. 3. Influence of total reduction ratio on reduction of area (RA) at mid-thickness in heavy and light reduction rolled plates.

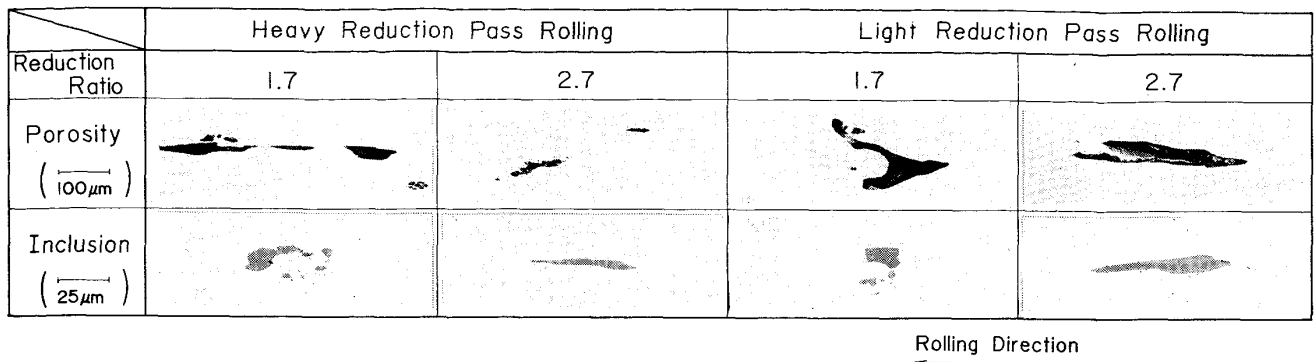


Photo. 1. Optical micrographs of porosities and inclusions in heavy and light reduction rolled plates (LZ section).

3. 実験結果および考察

3.1 引張特性に及ぼす圧延法および全圧下比の影響

引張特性に関して延性を表す因子である $1/2t$ の RA (破断絞り) に及ぼす圧延法および全圧下比の影響を Fig. 3 に示す。引張試験片の変形過程を考えた場合、最大荷重に達するまでは試験片平行部全体の一様変形であり、その後欠陥部に変形が集中すなわち局部変形して破断に至る過程をとるため、欠陥の影響は局部変形の程度を最も良く示す RA に現れると考えられる。図から、 L 方向では圧延法による差はあまり顕著ではなく、どちらも圧下比が大きくなるにつれて上昇していき、圧下比 1.7 ではほぼ飽和値に達していることがわかる。 T 方向においては、一部ややばらつきがあるものの、圧延法および圧下比による大きな差は認められない。 Z 方向では、強圧下圧延の場合、圧下比 1.7 で若干低下し 2.7 では再び上昇する。しかし、それ以上圧下比が大きくなると再度悪化し始めばらつきも大きくなる。圧下比 1.7 の時点で低下するのは、超音波探傷試験結果および Photo. 1 に示す顕微鏡観察結果から、ポロシティの個数は減少しているものの、未圧着のポロシティが圧延方向に長く伸ばされているためであり、2.7 で良くなるのは圧着が進んだためである。さらに圧下比が大きくなると劣化するのは、非金属介在物の伸長による悪影響であると考えられる。これに対し、軽圧下圧延の場合は、強圧下圧延と違って圧下比が大きくなるにつれて、 RA は急激に低下している。これは圧下比 4.4 においても未圧着ポロシティがかなり残っており、それらの形状により特にその影響が Z 方向に顕著に現れるためである。さらに圧下比 3 以上では、後述するように介在物による悪影響も大きく効いてくるものと思われる。しかし、Fig. 3 からわかるように、 Z 方向の RA は欠陥が圧着されないで残ると顕著に低下するが、その残存状況に

よりばらつきが大きく表れる。

なお、強度に関しては圧延方法、圧下比および試験方向による差はほとんど認められなかった。これは、引張試験片がすべて最大荷重を示した後破断していること、および荷重負荷面内に占めるポロシティの面積分率が高高 0.3% と小さいためであり、本実験のザクきずのような欠陥の程度ではほとんど影響ないものと考えられる。

3.2 衝撃特性に及ぼす圧延法および全圧下比の影響

衝撃特性に関して、延性を表す因子である vE_s (シャルピー衝撃試験における上部棚エネルギー) の平均値に及ぼす圧延法および全圧下比の影響を Fig. 4 に示す。 L 方向では、強圧下圧延の場合、 vE_s は圧下比とと

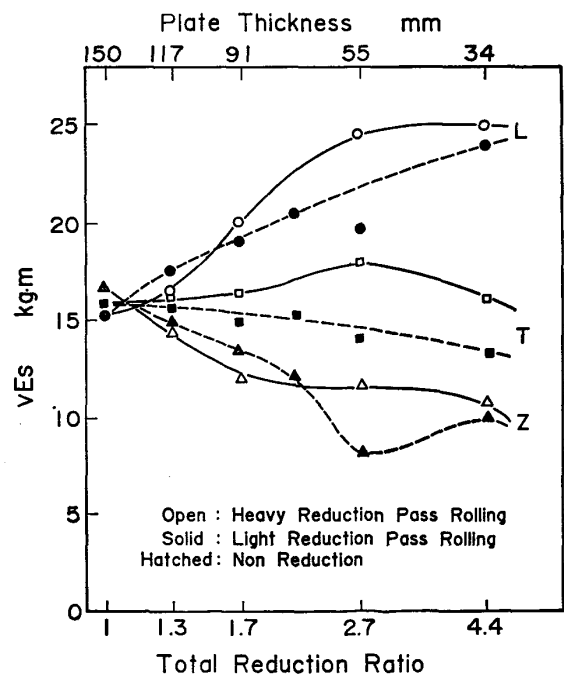


Fig. 4. Influence of total reduction ratio on Charpy upper shelf energy (vE_s) at mid-thickness in heavy and light reduction rolled plates.

もに上昇していき、圧下比 2.7 ですでに飽和値に達している。軽圧下圧延の場合は圧下比とともに vE_s が上昇するものの、強圧下圧延の場合に比べて飽和値に達するのが遅く、圧下比 4.4 においてもまだ上昇中である。T 方向では、強圧下圧延の場合、 vE_s は圧下比 1.7 まではほぼ一定であるが、ポロシティの圧着が進んだ圧下比 2.7 において少し高くなり、それ以上圧下比が大きくなると、後述するように介在物の伸長により再び低下する。これに対し、軽圧下圧延の場合には、圧下比の増大とともに一様に低下していることがわかる。Z 方向では、強圧下圧延の場合、圧下比 1.7 までは vE_s は急激に低下するが、圧下比 2.7 前後で未圧着ポロシティの減少により、いつたん定常値を示す。しかし、圧下比 4.4 になると介在物による悪影響が大きく現れて低下する。軽圧下圧延の場合、圧下比 2.1 までは強圧下圧延の場合よりも緩やかに低下するが、圧下比 2.7 になると急に低い値を示す。これは Photo. 1 に示すように圧着しないまま伸長したポロシティが鋭い切欠きとして Z

方向の vE_s ($vE_s[z]$) に最も敏感に効くためである。また、ポロシティ圧着までの $vE_s[z]$ の傾きはポロシティの変形過程を知る上で有効である。すなわち、傾きが急であるほどその変形が著しく、圧着もより低圧下比で起こるものと思われる。

また、Fig. 5 に示すように、靱性を表す因子であるシャルピー破面遷移温度 (vT_{rs}) に関しても vE_s に近い傾向が得られたが、欠陥の影響は脆性温度域よりも延性温度域において現れるため、 vE_s ほど明確ではなかった。

3.3 ポロシティの圧着による延性の向上に関する考察

強度に関しては、本実験材程度のポロシティ含有率ではその影響が認められなかったものの、延靱性とくに延性値は圧延法、全圧下比、試験方向によるポロシティの存在程度および状態により著しく影響を受けることがわかった。これは、Fig. 6 に示すように延性温度域での破壊試験において、ポロシティが存在していると最大荷重をわずかに過ぎた時点で各ポロシティ間にくびれを生じ、変形がこの部分に集中して破断が早くなるため延性値が低下するのに対して (Fig. 6a), 介在物のみが存在する場合、介在物とマトリックスの界面が剝離し、そこにできたボイド同士が合体して破断するまでに十分変形が進むためと考えられる (Fig. 6b)。

介在物が存在する場合については同様な考察がこれまで種々論じられてきたが⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾, ポロシティが共存する場合には介在物のみの場合に比べてより著しい延性値の変化を示すものと思われる。

さらに、この観点から方向による延性の差を考えると、その現れ方は MnS 系介在物についてこれまでに得られた以下の知見とほぼ同様の結果になると思われる。すなわち介在物に関する模式図を Fig. 7⁽¹²⁾, 8⁽¹³⁾ に示すと、ポロシティが介在物のように未圧着のまま伸長して残った場合、延性低下は L 方向よりも T 方向、T 方向よりも Z 方向に顕著に現れるであろう。これはまず Z 方向の場合、主として未圧着ポロシティによる鋭い切欠

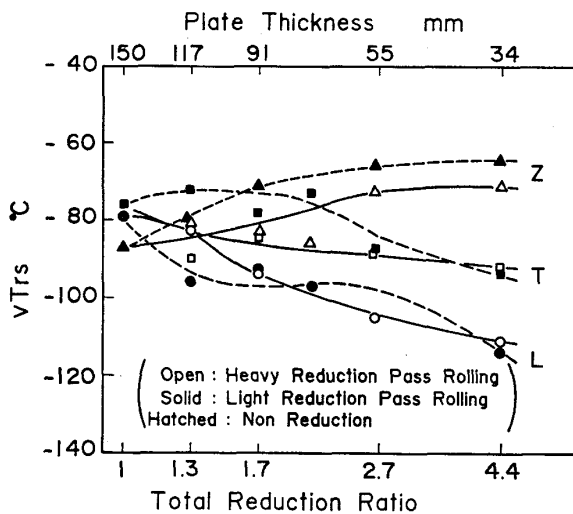


Fig. 5. Influence of total reduction ratio on Charpy fracture appearance transition temperature (vT_{rs}) at mid-thickness in heavy and light reduction rolled plates.

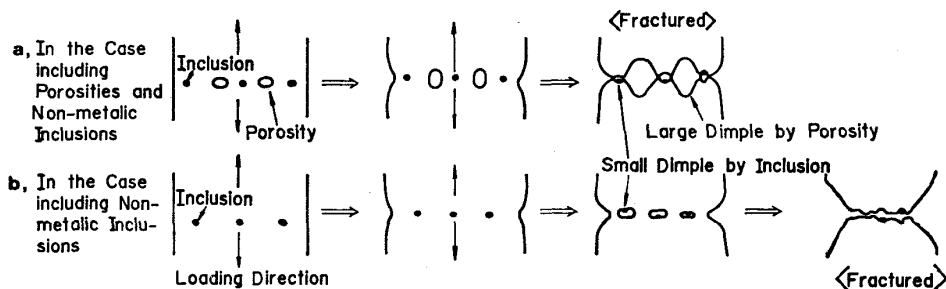


Fig. 6. Ductile fracture model by porosities and non-metallic inclusions (schematic figure).

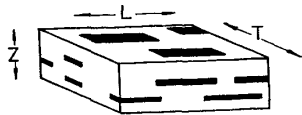


Fig. 7. Schematic presentation of elongated inclusions¹²⁾.

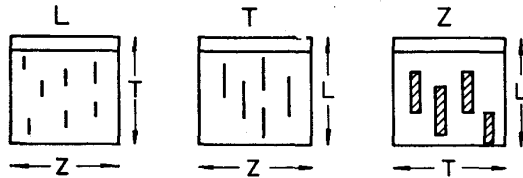


Fig. 8. Schematic presentation of elongated inclusions on tested section¹³⁾.

き作用に起因すると考えられる。これに対し、T, L方向の場合、切欠きとしての作用はほとんどなく、欠陥の存在によるボイドの合体のしやすさによるところが大きいものと考えられる。この点からL, T差を考えると、未圧着ポロシティがあればL方向よりも破面上の欠陥長さが長いT方向特性により大きく影響するであろう。

本実験の強圧下圧延の場合、例えば Fig. 3 のT方向、Z方向では圧下比がそれぞれ 1.7, 2.7 になると延性値が高くなっており、この時点でポロシティがほぼ圧着したと推定される。これと同様の現象が LORIA¹⁴⁾、成田ら⁶⁾により横方向の絞りに関して定性的に述べられており、図示すると Fig. 9 のようになる。ここで成田らは、ポロシティと偏析部（含介在物）を含む場合は図中太い実線のようになるとしているが、これはポロシティあるいは偏析部のうちどちらか影響の大きい方が完全に支配的要因になる場合である。どちらかの影響が非常に小さい場合においてはこれは成立するかも知れないが、少なくとも両方の影響がかけ離れていない限り、どちら

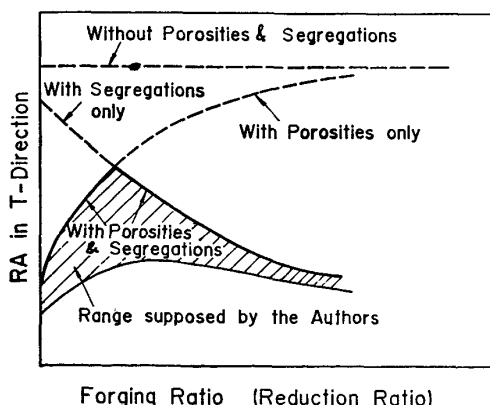


Fig. 9. Schematic presentation of the influence of forging ratio (reduction ratio), porosities and segregations on RA in T direction⁶⁾.

か一方だけが支配するとは考えられない。この場合、それらの影響が総和で効くとは限らないが、両方の影響を考慮しなければならないと思われる。そこで、図中に両方の影響の総和を考えた場合の変化を細い実線で表し、成田らの太い実線とで囲まれた領域にハッチングを施した。すなわち、実際にはこのハッチングを施した領域の値になると考えられる。

いずれにしても、圧下比が大きくなると伸長した介在物が大きく影響するものと思われる。そこで、介在物の影響のみを抽出し、定量的に評価するため McClin-Tock¹⁵⁾により提案された Inclusion Factor (I) 式を本実験の強圧下圧延材と軽圧下圧延材について測定した。

$$1/\bar{l}i\sqrt{ni} = \text{Inclusion Factor}$$

$$ni = \frac{Ni}{(Ym/Xm)^2 \cdot Zm} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\bar{l}i$ ：平均介在物長さ (mm)

ni ：単位面積当たり介在物個数 (/mm²)

Xm ：測定倍率 (=320)

Ym ：測定視野一辺の長さ (=200 mm)

Zm ：測定視野数 (=30)

Ni ：全介在物個数

さらに、HT80 鋼（マイクロ組織：マルテンサイト+下部ベイナイト）における σ_{Es} と Inclusion factor の関係として、著者の一人ら¹⁶⁾¹⁷⁾により求められたデータを引用すると Fig. 10 のようになる。すなわち、Inclusion factor が 50 以上では介在物による σ_{Es} への悪影響はほとんどなく、欠陥を含まないときの材料固有の値（本実験の焼入れ-焼もどし マルテンサイト+下部ベイナイト組織では 25 kg·m）とほぼ等しくなる。さらに本実験のLおよびT方向の σ_{Es} を Fig. 10 にプロットしてみた。図から、Inclusion factor は圧延方法によりそれほど大きな差がないことがわかる。また、介在物による悪影響が現れ始めるのはT方向の圧下比 2.7 以上で、他は $1/\bar{l}i\sqrt{ni} > 50$ となり介在物による悪影響はほとんどないことになる。そのため、本実験値と図中太い実線との差は未圧着ポロシティによる悪影響であると考えてよい。すなわち、実験値が曲線に一致した時点においてポロシティが完全に圧着したものと解釈できる。そこで、本実験で得られた σ_{Es} と圧下比の関係 (Fig. 4) から介在物による悪影響分を除去すると、Fig. 11 のようになる。図から、強圧下圧延材では圧下比 4.4 で L, T 方向とも 25 kg·m となり、ポロシティが完全に圧着したことを示している。軽圧下圧延材では圧下比 4.4 に至っても依然として未圧着ポロシティが残っていることになる。また、同図では σ_{Es} は圧延方法および試験方向

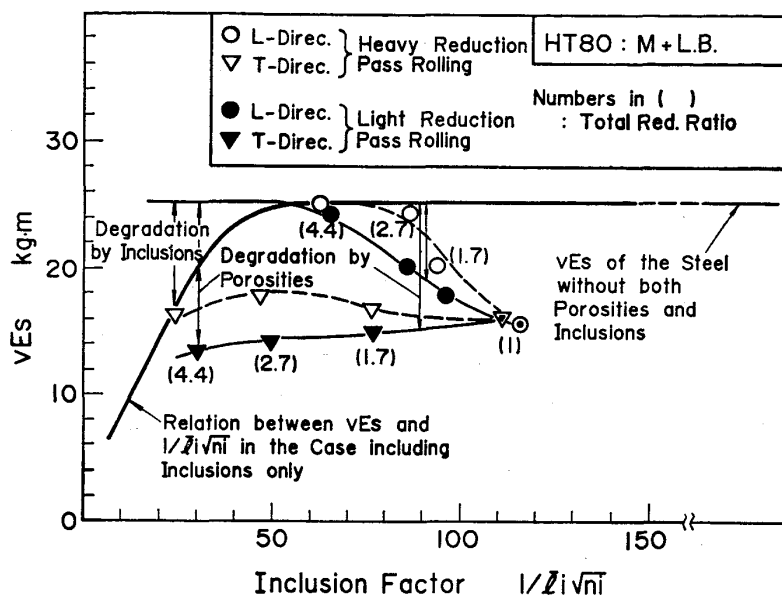


Fig. 10. Influence of porosities and inclusions on the relation between vE_s and $1/\sqrt{n_i}$ (16) (17).

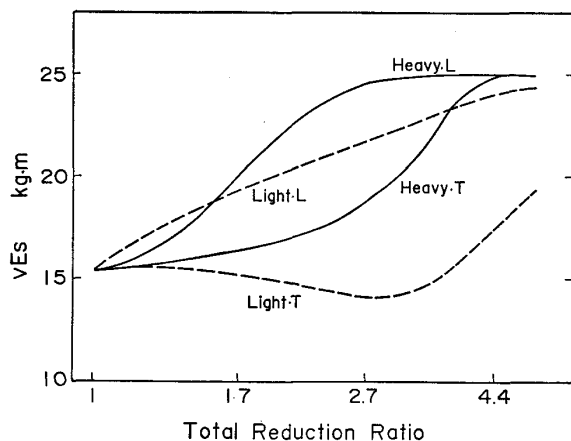


Fig. 11. Influence of porosities on vE_s after elimination of influence of inclusions.

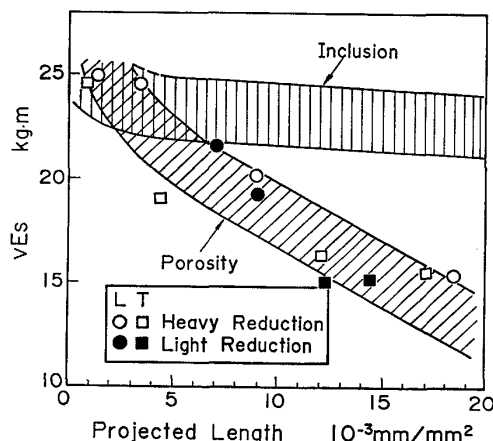


Fig. 12. Influences of porosities and inclusions projected length on vE_s in L and T direction.

によりそれぞれ異なった変化を示しているが、 vE_s が未圧着ポロシティにより影響されているとすると、ポロシティの残存程度と何らかの相関があるものと考えられる。そこで、Inclusion factor を測定したと同じ倍率、視野面積および視野数で未圧着ポロシティの Projected length (単位面積当たりの総投影長さ) を測定し Fig. 11 からの vE_s との関係をとつたのが Fig. 12 である。図から、試験面中のポロシティの総投影長さは、L、T 方向にかかわらず vE_s と一定の関係を持っており、ポロシティの総投影長が増加すると、 vE_s は急激に低下することがわかる。同図には、前述の介在物に関するデータを再整理した結果¹⁸⁾も載せた。これから、 vE_s に及ぼすポロシティの影響は介在物に比べて非常に大きいことがわかる。この差の原因として、未圧着ポロシティの一個当たりの長さは介在物に比べてはるかに大きく、個数は少なくとも破壊が容易に進行すること、および介在

物の場合、鋼の母地(マトリックス)と介在物の間の剥離にエネルギーを要するのに対し、ポロシティの場合、これがそのまま破壊に結びつくことが原因として考えられる。

なお、 RA および vE_s に及ぼす圧下比の影響は概略同様の傾向を示すものの、 vE_s に比べ RA の方が飽和値に達する圧下比が小さくなっている。これは、引張試験に比べ衝撃試験の方がひずみ速度が大きく、ポロシティに対する感受性が大きいためと考えられる。

4. 結 論

鋼板中に未圧着ポロシティが残存した場合、鋼板の機械的性質がどのような影響を受けるかについて、実験室における強圧下圧延材と軽圧下圧延材を使用し、引張試験および衝撃試験により調査した。さらに、機械的性質の中でも特に延性に及ぼすポロシティの影響を、非金属

介在物との比較をも含めて定量的な検討を行つた。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 強度に関しては、本実験材程度のポロシティ含有率ではその影響はほとんど認められない。

(2) 引張試験における破断絞り RA およびシャルピー衝撃試験における上部棚エネルギー E_s などの延性は、未圧着ポロシティの存在により大きく影響を受け、その程度は伸長した介在物よりもはるかに大きい。

(3) 靱性を表す因子である衝撃試験の破面遷移温度もポロシティにより影響を受けるが、その程度は延性ほど明確ではない。

(4) 超音波探傷試験結果などの健全性を示す特性と同様、鋼板の延性値の観点からもポロシティの圧着過程を論ずることができる。

文 献

- 1) E. MARBURG: J. Met., 5 (1953), p. 157
- 2) 山口哲夫, 川和高穂, 石黒守幸, 岩崎宣博, 菅原功夫, 下田達也: 日本鋼管技報 (1976) 69, p. 1
- 3) 川和高穂, 細田義郎, 坂田直起, 伊藤雅治, 三好俊吉: 日本鋼管技報 (1976) 62, p. 1668
- 4) 宮脇哲彦, 三浦正淑, 松本重喜: 神戸製鋼所技報,

- 21 (1971) 3, p. 10
- 5) O. A. KUDRYAVTSEV and K. A. YUSHCKENKO: WRC Report (1980), p. 34
- 6) 成田貴一, 伊藤孝道: 神戸製鋼所技報, 16 (1966) 4, p. 226
- 7) 田川寿俊, 田中淳一, 平沢猛志, 角南英八郎: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 1720
- 8) 田川寿俊, 岩崎宣博, 武重賢治, 山田 真, 田中淳一, 山口哲夫: 日本鋼管技報, 86 (1980), p. 265
- 9) 津川青史, 升田貞和, 田川寿俊, 平沢猛志, 鈴木治雄: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 712
- 10) 小指軍夫, 清水輝彦, 久保田広行: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 2029
- 11) 寺崎富久長: 住友金属, 25 (1973), p. 211
- 12) I. KOZASU and H. KUBOTA: Trans. ISIJ, 11 (1971), p. 321
- 13) W. DAHL, H. HENGSTENBERG and C. DUREN: Stahl Eisen, 88 (1968), p. 364
- 14) E. A. LORIA: Trans. ASM, 42 (1950), p. 486
- 15) F. A. McCLINTOCK: J. Appl. Mech., 35 (1968), p. 363
- 16) 天明玄之輔, 田中淳一, 谷 三郎, 小指軍夫: 鉄と鋼, 59 (1973), S 570
- 17) 田中淳一, 谷 三郎, 小指軍夫: 鉄と鋼, 60 (1974), S 301
- 18) 田中淳一, 田川寿俊, 平沢猛志, 角南英八郎: 鉄と鋼, 60 (1974), S 671