

塑性変形を有する SM490Y 鋼材 ・切欠き靱性の方向依存性

森 猛¹・山田 浩二²・田中 雅人³・田中 弘⁴

¹正会員 工博 法政大学教授 工学部土木工学科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2)
mori@k.hosei.ac.jp

² (株)東京鐵骨橋梁 研究所 (〒302-0038 茨城県取手市大字下高井 1020)

³正会員 博(工) (株)東京鐵骨橋梁 研究所 (〒302-0038 茨城県取手市大字下高井 1020)

⁴正会員 法政大学助手 工学部土木工学科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2)

鋼材の靱性が塑性変形を受けることにより低下することはよく知られている。これは、鋼材の圧延方向に塑性変形を与え、圧延直角方向に鋼材側面から切欠きを入れた試験片を用いたシャルピー衝撃試験により得られた結果である。しかし、鋼材が塑性変形を受ける方向は、その圧延方向とは限らず、また脆性破壊の起点となる疲労亀裂の向きも鋼材の圧延直角方向とは限らない。ここでは、塑性変形方向と切欠きの向きが鋼材の切欠き靱性に及ぼす影響を調べる目的で、SM490Y 鋼材の圧延方向あるいは圧延直角方向にそれぞれ 0~10%の塑性ひずみを与え、切欠きを鋼材の圧延直角方向、圧延方向、そしてそれらと 45°の角度をなす方向に鋼材の側面あるいは表面から導入した試験片を作製し、シャルピー衝撃試験を行った。

Key Words : plastic deformation, strain hardening, SM490Y steel, Charpy impact test, notch direction

1. はじめに

冷間加工やプレスを用いたひずみ矯正などにより塑性変形を受けた鋼材の靱性が時間の経過とともに、また塑性ひずみの大きさに伴って低下する現象は、ひずみ時効脆化として知られている¹⁾。このような鋼材の靱性評価には、CTOD などの破壊力学に基づいたパラメータが用いられることも少なくないが、一般にはその簡便さからシャルピー衝撃試験で得られる切欠き靱性(吸収エネルギーあるいは遷移温度)が用いられることが多い。

ひずみ時効脆化を考慮して 1968 年度版の溶接鋼道路橋示方書²⁾で「鋼板の冷間曲げ加工を行う場合は、内側半径が板厚の 15 倍(3%程度のひずみに相当する)以上でなければならない。」と規定された。1970 年代の後半、堀川は上記規定の緩和の可能性を探る目的で、シャルピー衝撃試験を行うことにより 12 種類 28 材にも及ぶ鋼材のひずみ時効脆化を調べている³⁾。その結果に基づき、鋼材の規格、成分系、熱処理の有無によらず、ひずみ時効脆化は小さくない、そして上記規定は妥当と述べている。1990 年代の中頃、本間らは靱性を支配する因子の一つである鋼材中の不純物や炭素量が鋼材製造法の進歩により軽減されていることに注目し、再度上記規定の緩和の可能性について堀川と同様の方法で検討している⁴⁾。その結果に基づき、1996 年度版の道路橋示方書⁵⁾では、所定の温度でシャルピー吸収エネルギーが

200 J (20.4 kgf-m) 以上であれば曲げ半径を板厚 t の 5 倍(10%程度のひずみに対応)、150 J (15.3 kgf-m) 以上であれば曲げ半径 $7t$ (7.5%程度のひずみに対応)までの冷間加工を許容できると改訂された。最近では、阪神淡路大震災による鋼構造物の脆性破壊原因の究明と被災した鋼構造部材の再利用を目的として、繰り返し塑性ひずみあるいは圧縮塑性ひずみを受けた鋼材の靱性についてもシャルピー衝撃試験を利用した検討が進められている^{6)~10)}。

シャルピー衝撃試験片としては、JIS Z 2202¹¹⁾で規定されている 4 号試験片が最も広く用いられている^{5),12),13)}。4 号試験片の切欠きは、板の厚さ方向(鋼板側面からの切欠き)に導入するよう、溶接構造用圧延鋼材の日本工業規格 JIS G3106¹²⁾では規定されている。このような規格のため、先に挙げた研究ではいずれも切欠きを鋼板側面から導入した試験片を用いて実験を行っている。道路橋示方書の冷間加工の曲げ半径 $15t$ (t :板厚)以上という規定の裏づけとなった研究³⁾、また冷間加工の緩和規定の根拠となった研究⁴⁾では、鋼材の圧延方向に引張りの塑性ひずみを与え、側面切欠きを圧延直角方向に導入した試験片を基本として実験を行っている。これは鋼材の圧延方向を主たる応力が作用する方向と一致させて鋼橋部材を製作するのが一般的なためと考えられる。他の研究^{8)~9)}では、特に塑性変形方向と鋼材圧延方向の関係や切欠きの向きに関する記述はないが、塑性変形の導入方向と切欠きの向きは上記の

表-1 供試鋼材の機械的性質と化学成分（ミルシート値）

	機械的性質				化学成分 (mass %)					
	降伏応力	引張強度	伸び	吸収エネルギー	C	Si	Mn	P	S	Mn/C
鋼材 I	424 MPa	554 MPa	25%	158 J (0°C)	0.17	0.44	0.132	0.018	0.007	0.776
鋼材 II	443 MPa	551 MPa	24%	209 J (0°C)	0.16	0.32	0.125	0.018	0.004	0.781

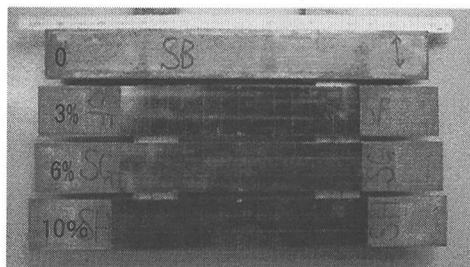
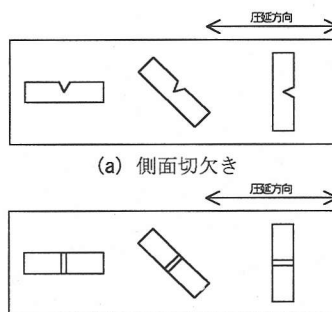


写真-1 塑性変形を与えた帯鋼板の例



(a) 側面切欠き

(b) 表面切欠き

図-1 試験片の採取方向

研究^{3),4)}と同じと予想される。しかし、冷間加工やひずみ矯正によって鋼材に与えられる塑性変形は、必ずしも鋼材の圧延方向とは一致しない。脆性破壊の起点となる疲労亀裂も板側面ではなく、板表面から生じることが多く、また二次応力や局部応力のためにその向きも鋼材の圧延直角方向と一致しない場合も多い。

ここでは、塑性変形方向と切欠きの向きが鋼材の切欠き靱性（シャルピー吸収エネルギー、遷移温度）に及ぼす影響を調べる目的で、鋼橋で最も使用量の多い溶接構造用圧延鋼材 SM490Y を対象とし、その鋼材の圧延方向あるいは圧延直角方向にそれぞれ 0~10%まで 4 段階の塑性変形を与え、切欠きを鋼材の圧延直角方向、圧延方向、そしてそれらと 45° の角度をなす方向に鋼材の側面あるいは表面から導入した試験片を作製し、シャルピー衝撃試験を行った。

2. 試験方法

(1) 供試鋼材と塑性ひずみの導入

供試鋼材は板厚 19mm と 17mm の溶接構造用圧延鋼材 SM490YB の 2 材である。板厚 19mm の鋼材（鋼材 I）と板厚 17mm の鋼材（鋼材 II）のミルシートに記された機械的性質と化学成分を表-1 に示す。いずれの鋼材とも市販のものであり、ミルシートに記載されていた記号から判断して、TMCP 鋼ではないと考えられる。SM490YB に要求される切欠き靱性は、0°C でシャルピー吸収エネルギーが 27J であるが、ミルシートに示された値は鋼材 I で 158J、鋼材 II で 209J である。鋼材 I については 800mm × 116mm、鋼材 II については 910mm × 120mm の帯鋼板を、その長手方向が鋼材の圧延方向（L 方向）あるいは圧延直角方向（C 方向）と一致するように切り出した。鋼材 I と鋼材 II に対し、L 方向と C 方向で切り出した帯鋼板の数は、それぞれ 8 枚ずつ計 32

枚である。

これらの帯鋼板の表面中央にゲージ長 5mm の塑性ひずみゲージを板長手方向に貼付した後、万能試験機を用いて所定の引張塑性ひずみ（3、6、10%）を与えた。L 方向に 3% の塑性ひずみを与えたものを L3（6% : L6、10% : L10）、C 方向に 3% の塑性ひずみを与えたものを C3（6% : C6、10% : C10）と呼ぶ。32 枚の帯鋼板の内、4 枚（鋼材 I : 2 枚、鋼材 II : 2 枚）は切断のままである。写真-1 は塑性ひずみを与えた帯鋼板の例を示している。

帯鋼板に 3%、6%、10% の塑性ひずみを与えた後、それらにひずみ時効を与えるために、1 時間 250°C の条件で熱処理を行った。この熱処理（時効処理）は、半年ないしそれ以上の自然放置に相当するとされている³⁾。また、塑性ひずみを与えずに切断のまま置かれている 4 枚の帯鋼板の内、2 枚（鋼材 I と II、各 1 枚）については熱処理を行わず、残りの 2 枚に前記の条件で熱処理を施した。以後、塑性ひずみを与えずに熱処理を行った鋼板を A0、塑性ひずみを与えずに熱処理も行っていない鋼板を N0 と呼ぶ。

これらの鋼材の代表的なマイクロ組織を写真-2 に示す。N0 鋼材の表面に平行な面（写真-2 中の断面①）で測定した平均粒径は鋼材 I で 30 μm 程度、鋼材 II では 20 μm 程度であった。このように、鋼材 II の組織の方が緻密であり、また表-1 に示したように鋼材の靱性を低下させる要因とされている炭素 C や硫黄 S の量も若干少なくなっている。写真-2 には、L 方向と C 方向に 10% の塑性ひずみを与えた鋼材のマイクロ組織も示したが、この程度のひずみでは顕著な組織の変形は判断しにくい。

(2) シャルピー衝撃試験片の作製

先述のように準備した 32 枚の鋼材から、図-1 に示すように V ノッチシャルピー試験片を採取した。

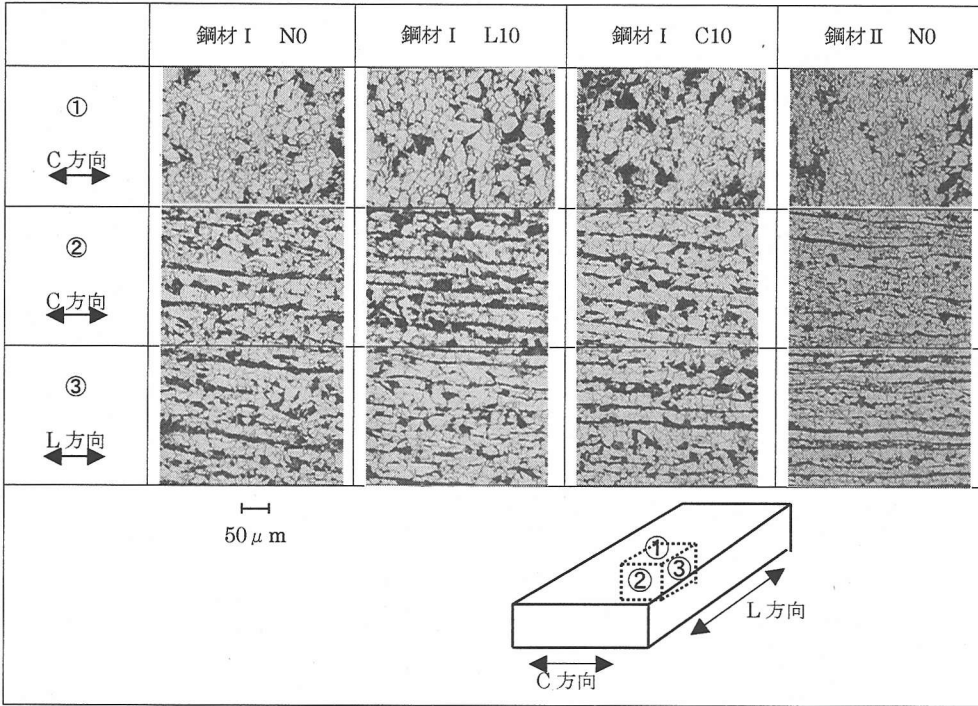


写真-2 鋼材のマイクロ写真

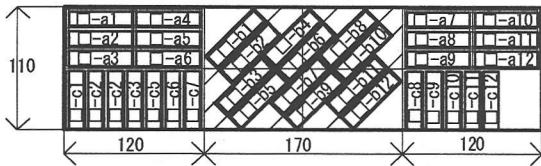


図-2 試験片の採取位置

切欠きは、鋼材の圧延直角方向 (00)、それと 45° の角度をなす方向 (45)、圧延方向 (90) となるように導入した。以後、この角度を切欠き角度と呼ぶ。

図-1(a) は板の側面から切欠きを入れた側面切欠き (S) 試験片、図-1(b) では板表面から切欠きを入れた表面切欠き (H) 試験片の採取方向を示している。以後、側面切欠きと表面切欠きの違いを表すために切欠き方向という用語を用いる。シャルピー衝撃試験片の形状・寸法は、JIS Z2202 の 4 号試験片に従った。各鋼材からの具体的な試験片の採取位置を図-2 に示す。これらの領域で、ほぼ様なひずみが導入されていることは、写真-1 に示すように試験体表面に付けた罫書き線の間隔を測定することにより確かめている。なお、試験片はその中心が鋼材の板厚中心と一致するように加工している。

前節で示した記号と本節で示した記号を組み合わせ、試験片を表すこととした。例えば、鋼材 I の圧延方向に 6% のひずみ (L6) を与え、表面切欠き (H) を圧延直角方向に対して 45 度の方向に施した試験片を I-L6-H45 と呼ぶ。以上の鋼材の種類や塑性変形の方向と量、切欠きの方向と角度、熱処理の

有無を組み合わせ、ここでは 96 種類の試験片を製作した。

(3) シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験は、JIS Z2242¹⁴⁾に従って行った。試験温度は、-40℃、-20℃、0℃、20℃の 4 レベルとし、1 温度につき 3 体の試験片の衝撃試験を行った。試験片の温度を -40℃、-20℃ とする場合は、恒温容器内にエチルアルコールとドライアイスを入れて温度調整を行った。0℃、20℃ の場合は、水道水と氷あるいは湯を使うことにより調整した。試験前に試験片全体が所定の温度になるように、試験片を恒温容器内に入れて少なくとも 10 分間は所定の温度で保持した。

試験結果の例を図-3(a)、(b) に示す。図の縦軸は吸収エネルギーあるいは脆性破面率、横軸は試験温度である。このように、ここでは 1 温度につき 3 体の試験片を用いて試験を行っているが、以後吸収エネルギーについては、その平均値のみを示す。脆性破面率が 50% となる温度 (破面遷移温度) が試験温度範囲内にはない場合には、図-3(b) に示すように外挿して求めた。なお、鋼材 II では、写真-3 に示すように破面上にセパレーションあるいはラミネーションによる段差が見られ、脆性破面率を求めることが困難であったため、破面遷移温度については検討しない。

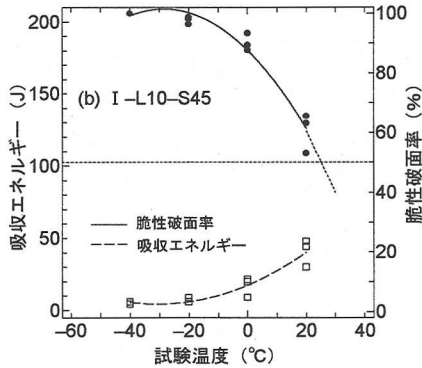
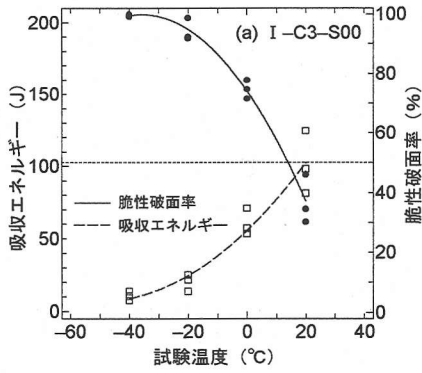


図-3 シャルピー衝撃試験結果の例

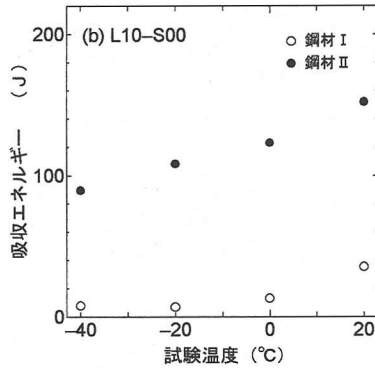
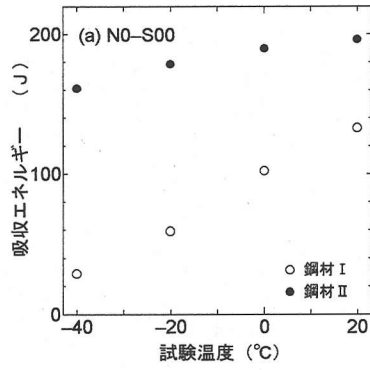


図-4 鋼材 I と鋼材 II の吸収エネルギー

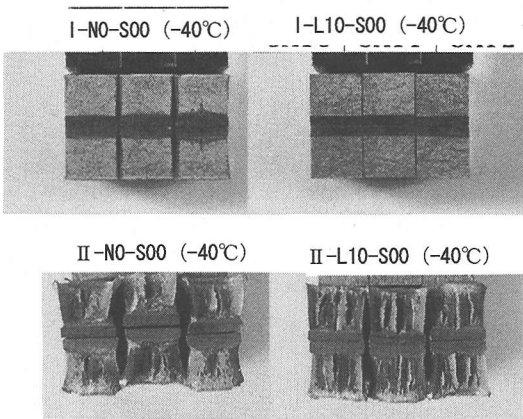


写真-3 破面の状況

表面から厚さの 1/4 の位置とし、かつ、幅の縁から 1/4 の位置とする。」ように試験片の採取位置を規定しているが、先述のようにここでは板厚中心より採取している。そのためか、ここで得られた 0°Cでのシャルピー吸収エネルギーは、鋼材 I で 100J 程度、鋼材 II で 190J 程度とミルシートに記された値よりも低くなっている。しかし、0°Cで 27J という規格は、両鋼材とも十分に満たしている。図-4 (b) では鋼材圧延方向に 10%の塑性ひずみ (L10) を与えて、表面 (S) から鋼材圧延直角方向 (00) に切欠きを入れた試験片より得られた結果を示している。

図-4 (a), (b) のいずれの場合も鋼材 I に比べて鋼材 II で吸収エネルギーが高くなっている。これは、いずれの切欠きの角度と方向、塑性変形の量と方向においても同じであった。このように鋼材 II で吸収エネルギーが高いのは、前章で示したように鋼材 I に比べて鋼材 II の結晶粒径が小さく、また破壊靱性の支配因子の一つとされる Mn/C の値が高いことに起因しているものと考えられる。図-4 (a), (b) に示した結果の内、-40°Cで試験を行った試験片の破面を写真-3 に示す。鋼材 I ではフラットな脆性破面が認められるのに対し、鋼材 II では破面に著しいセパレーションが認められる。鋼材 II で吸収エネルギーが高かった原因は、このセパレーションにもあると考えられる¹⁵⁾。

3. 吸収エネルギー

(1) 鋼材 I と鋼材 II

鋼材 I と鋼材 II の吸収エネルギーと試験温度の関係を比較した例を図-4 (a), (b) に示す。図-4 (a) では、塑性変形・熱処理なし (N0) で側面 (S) から鋼材圧延直角方向 (00) に切欠きを入れた試験片、すなわち JIS G3106 で規定された試験片の結果を示している。ただし、JIS G3106 では「試験片の中心は、

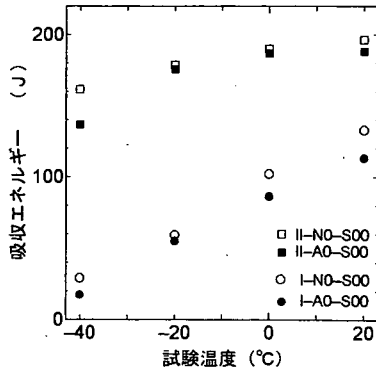


図-5 吸収エネルギーに対する熱処理の影響

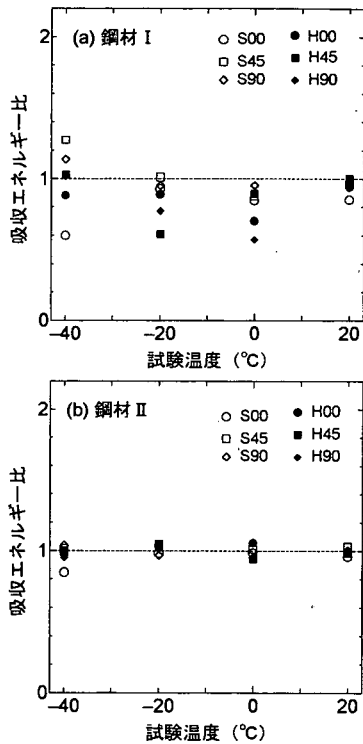


図-6 熱処理の影響

(2) 熱処理の影響

塑性変形なしで熱処理を行った A0 試験片と熱処理を行っていない NO 試験片の吸収エネルギーと温度の関係を比較した2つの例を図-5に示す。鋼材 I、鋼材 II ともに、熱処理により若干吸収エネルギーが低くなっているものの、その差は小さい。すべての鋼材、切欠き角度、切欠き方向で熱処理の影響を明らかにする目的で、A0 で得た吸収エネルギーを NO で得た吸収エネルギーで無次元化した。その結果を図-6(a)、(b)に示す。図-6(a)に示す鋼材 I では吸収エネルギー比が 1 よりも低く、熱処理により吸収エネルギーが低下する傾向が認められる。しかし、吸収エネルギー比の平均値は 0.90 であり、熱処理によ

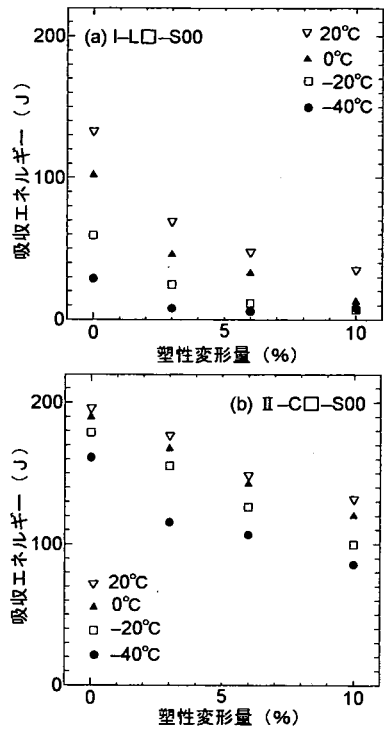


図-7 吸収エネルギーと塑性変形量の関係

る吸収エネルギーの差は小さい。また、熱処理による吸収エネルギーの低下に対する温度、切欠き角度、切欠き方向の影響は認められない。図-6(b)に示す鋼材 II では、いずれの試験温度、切欠き角度、切欠き方向においても、吸収エネルギー比はほぼ 1 である。したがって、塑性変形を受けていない鋼材では、切欠き靱性に対する熱処理の影響はほとんどないと判断される。

(3) 塑性変形量の影響

図-7(a)、(b)に本実験で求めた吸収エネルギーと塑性変形量の関係の例を示す。図-7(a)では、鋼材 I の圧延方向に塑性ひずみを導入し、側面切欠きを鋼材圧延直角方向に入れた試験片、図-7(b)では鋼材 II の圧延直角方向に塑性ひずみを導入し、側面切欠きを鋼材圧延直角方向に入れた試験片の結果を示している。なお、塑性変形量 0 のデータは、熱処理を行っていない NO 試験片の結果を用いている。いずれの場合も塑性変形量が大きくなるほど吸収エネルギーが低下しており、その低下は図-7(b)に示す鋼材 II に比べて図-7(a)に示す鋼材 I で顕著である。

吸収エネルギーが塑性変形の増加に伴ってどの程度低下しているかを示すために塑性変形量 0 のシャルピー吸収エネルギーに対する各塑性変形量でのシャルピー吸収エネルギーの比 (吸収エネルギー比) を 0°C の試験結果を用いて求めた。その結果を図-8(a)~(d)に示す。いずれの図においても、塑性変

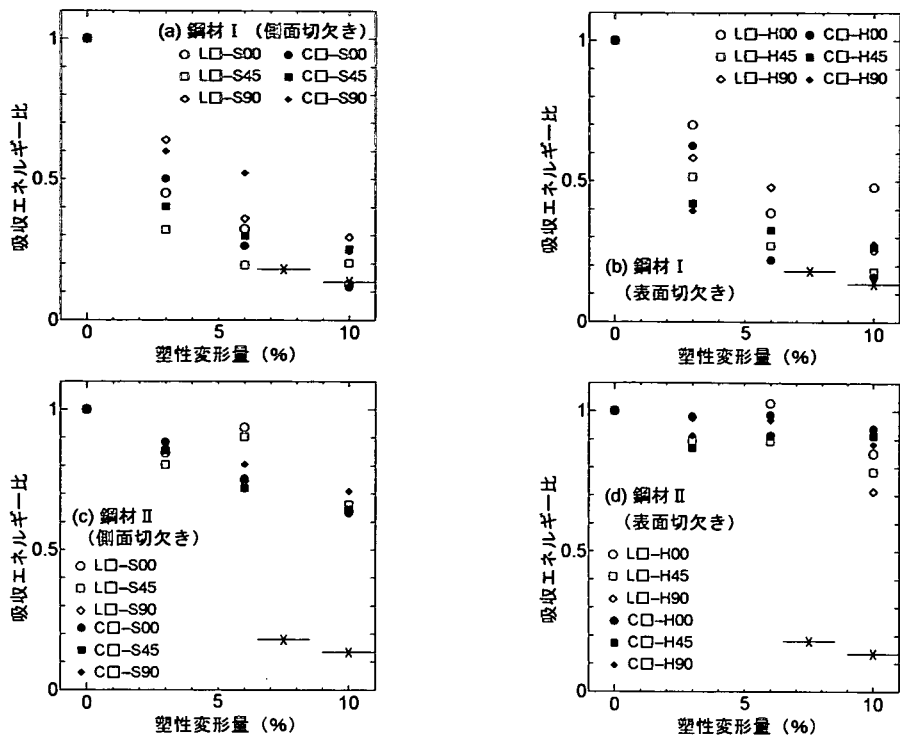


図-8 塑性変形量の影響

形量が増加するに従って吸収エネルギーが低下する傾向は認められるが、その程度に対する塑性変形方向、切欠きの向きの影響は認められない。また、鋼材Ⅱに比べて、鋼材Ⅰで塑性変形に伴う吸収エネルギーの低下の程度が大きくなっている。さらに、若干ではあるが、表面切欠きに比べて側面切欠きで吸収エネルギーの低下が著しくなっている。以上の結果は、他の試験温度でも同じであった。

先述のように、道路橋示方書では 0°Cにおける吸収エネルギーが 200J 以上の鋼材 (SM490YB) については 5 t (10%の塑性ひずみ)、150J 以上の鋼材については 7 t (7.5%の塑性ひずみ) までの冷間曲げ加工が許容されている。これは、塑性変形を受けた鋼材の 0°Cにおける吸収エネルギーが時効後においても 27J を満たすことを条件として定められたものである³⁾。塑性ひずみ 0 で 150J、7.5%で 27J とすれば、7.5%での吸収エネルギーは塑性ひずみ 0 の 0.18 までの低下を見込んでいることになる。同様に塑性ひずみ 10%の吸収エネルギーは 0.135 までの低下を見込んでいることになる。図-8 中の×印は、それらの位置を示している。図-8(a), (b)に示す鋼材Ⅰでは、試験データの下限と×印で示す道路橋示方書の規定がほぼ一致している。図-8(c), (d)に示す鋼材Ⅱでは、かなりの余裕をもって、道路橋示方書の規定を満足している。鋼材Ⅰの 0°Cにおける吸収エネルギーが 100J 程度と低く、一般に吸収エネルギーが低い鋼材ほど塑性変形による切欠き靱性の低下が著

しいことを考慮すれば、道路橋示方書の規定はかなり安全側と言える。

(4) 塑性変形方向の影響

同じ塑性変形量を鋼材の圧延方向 (L 方向) と圧延直角方向 (C 方向) に与えた場合の吸収エネルギーを比較した 2 つの例を図-9 に示す。当然ではあるが、比較する試験片は同じ鋼材から作製しており、同じ切欠きの方向と角度を有している。ここでは、鋼材Ⅰに 3%の塑性ひずみを与えた側面切欠き・切欠き角度 0 の試験片と、鋼材Ⅱに 10%の塑性ひずみを与えた表面切欠き・切欠き角度 90 度の試験片で得られた結果を示している。前者では、切欠き直角方向に 3%の引張塑性ひずみを受けた試験片と切欠き直角方向に 3%の引張塑性ひずみに伴う圧縮塑性ひずみを受けた試験片の結果を比較していることになる。同様に、後者では切欠き直角方向に 10%の引張塑性ひずみを受けた試験片と切欠き直角方向に 10%の引張塑性ひずみに伴う圧縮塑性変形を受けた試験片の結果を比較していることになる。いずれの場合も、L 方向に塑性変形を与えた試験片の吸収エネルギーの方が低くなっているものの、その差は小さい。側面切欠き・切欠き角度 0 については、堀川によっても塑性変形方向が吸収エネルギーに及ぼす影響について検討されているが、ここでの結果と同様に非常に小さいという結果が示されている³⁾。

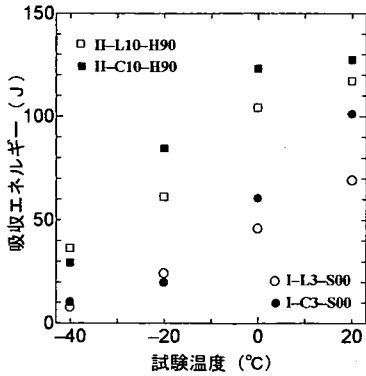


図-9 吸収エネルギーに対する塑性変形方向の影響

塑性変形方向の影響をより明らかとする目的で、L方向に塑性変形を与えた試験片の吸収エネルギーでC方向に塑性変形を与えた試験片の吸収エネルギーを無次元化した。この吸収エネルギー比と試験温度の関係を図-10(a)～(d)に示す。図-10(a)に示す鋼材I・側面切欠きでは、吸収エネルギー比が0.8～1.8と大きくばらついているものの、試験温度や塑性変形量に吸収エネルギー比が依存しているような傾向は認められない。切欠き角度45度ではL方向とC方向のいずれの方向に塑性変形を与えても切欠きの向きと塑性変形方向の関係は同じであり、切欠き角度0あるいは90度では先述のように両者の関係は異なる。しかし、吸収エネルギー比が切欠き角度に依存しているような傾向は認められない。ここで得られた吸収エネルギー比の平均値は1.17であり、この値から判断すれば塑性変形方向の影響は小さいと言える。図-10(b)に示す鋼材I・表面切欠きでは、図-10(a)に比べてさらにばらつきが大きくなっているものの、結果の傾向は同じであり、吸収エネルギー比の平均値は1.28であった。

図-10(c), (d)は、鋼材IIについての結果を示しているが、鋼材Iに比べて吸収エネルギー比のばらつきは小さく、吸収エネルギー比が試験温度や切欠き角度、塑性変形量に依存しているような傾向も認められない。吸収エネルギー比の平均値は、側面切欠きで0.98、表面切欠きで1.05と、ほぼ1となっている。

以上より、吸収エネルギーに対する塑性変形方向の影響は小さいと判断される。このことは、鋼材が引張塑性変形を受けても、引張変形に伴う圧縮塑性変形を受けても吸収エネルギーにさほど差はないことを意味している。

(5) 切欠き角度の影響

図-11(a)に鋼材I・N0鋼板・側面切欠きで、切欠き角度を0, 45, 90度とした場合の吸収エネルギーを比較した結果を示す。図-11(b)では、鋼材II・C10

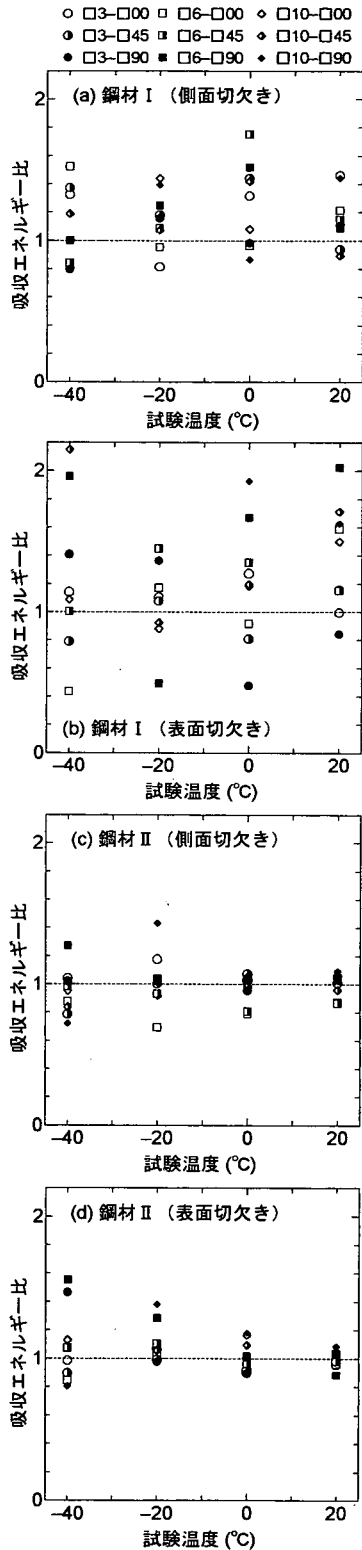


図-10 塑性変形方向の影響

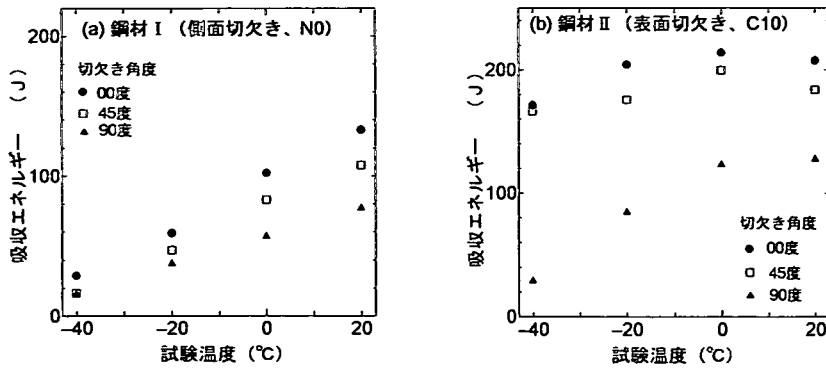


図-11 吸収エネルギーに対する切欠き角度の影響

表-2 切欠き角度0で無次元化した吸収エネルギー

鋼材	切欠き角度	側面切欠き	表面切欠き
I	45度	0.87	0.74
	90度	0.79	0.53
II	45度	0.78	0.86
	90度	0.50	0.50

鋼板・表面切欠きを対象として、吸収エネルギーに対する切欠き角度の影響を示している。いずれの場合も、通常用いられる切欠き角度0の試験片に比べて、45度と90度の試験片の吸収エネルギーは低くなっている。特に切欠き角度90度で、その低下は顕著である。

このような吸収エネルギーに対する切欠き角度の影響をすべての条件について示したのが図-12(a)~(h)である。これらの図の縦軸は、切欠き角度45度あるいは90度とした試験片で得られた吸収エネルギーを、通常のシャルピー衝撃試験で用いられている切欠き角度0(圧延直角方向の切欠き)の試験片で得られた吸収エネルギーで無次元化した、吸収エネルギー比である。図-12(a),(b)に示す鋼材I・側面切欠きでは、切欠き角度45度で吸収エネルギー比が0.4~1.7程度、また90度では0.4~1.4と広い範囲に分布している。それらの平均値を表-2に示す。切欠き角度45度の吸収エネルギー比の平均値は0.87、切欠き角度90度では0.79と、図-11(a),(b)でみられたように、吸収エネルギーは切欠き角度0,45度,90度の順となっている。このような切欠き角度による吸収エネルギーの相違は、図-12(c),(d)に示す鋼材I・表面切欠きでさらに顕著に認められる。さらに、図-12(e)~(h)に示す鋼材IIでは、吸収エネルギー比のばらつきも小さく、吸収エネルギーに対する切欠き角度の影響が鋼材I・表面切欠きよりもさらに顕著に認められる。

以上のように、吸収エネルギーは、切欠き角度0,45度,90度の順となっており、切欠き角度90度の吸収エネルギーは切欠き角度0の半分以下となることもある。また、この傾向に対する熱処理、切欠き方向、塑性変形方向と量、そして試験温度による

影響は認められない。

(6) 表面切欠きと側面表面切欠き

図-13に、鋼材I・N0で切欠き角度を0した表面切欠き試験片と側面切欠き試験片の吸収エネルギーを比較した結果を示す。同図には、鋼材II・L3で切欠き角度を0とした試験片の比較結果も示している。いずれの場合も側面切欠きに比べて表面切欠き試験片の吸収エネルギーが高くなっている。

このような切欠きの方向による吸収エネルギーの相違を明らかにする目的で、表面切欠き試験片で得た吸収エネルギーを側面切欠き試験片の吸収エネルギーで除し、吸収エネルギー比を求めた。その結果を図-14(a)~(f)に示す。いずれの鋼材、切欠き角度においても吸収エネルギー比の大半が1以上となっている。

図-14(a)~(c)に示す鋼材Iの吸収エネルギー比は、ほぼ1.0~4.0の範囲にばらついており、その平均値は切欠き角度0で2.5、45度で2.0、90度で1.5であり、切欠き角度が0,45度,90度の順に表面切欠きと側面切欠きの吸収エネルギーの違いが著しい傾向が認められる。しかし、その程度に対する試験温度、塑性変形量方向、切欠きの向きの影響は認められない。

図-14(d)~(f)に示す鋼材IIでは、それぞれの切欠き角度における吸収エネルギー比が1.0~2.5程度の範囲に位置しており、鋼材Iに比べてばらつきが小さい。吸収エネルギー比の平均値は切欠き角度0で1.5、45度で1.6、90度で1.5であり、鋼材Iで見られたような切欠き角度による切欠き方向の影響の相違は認められない。

以上のように、シャルピー衝撃試験に通常用いら

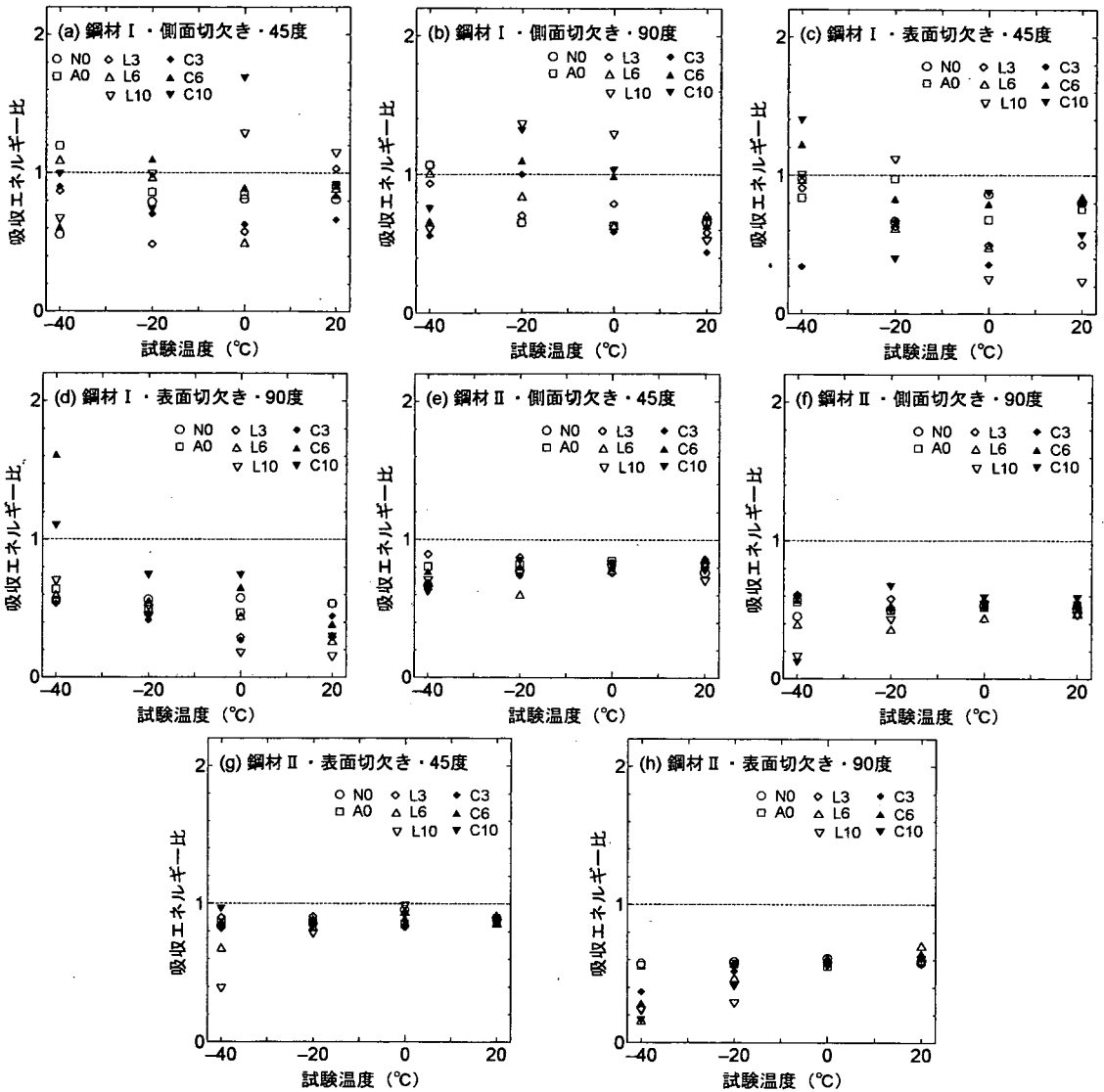


図-12 切欠き角度の影響

れている板側面に切欠きを有する試験片に比べて、板表面に切欠きを有する試験片の切欠き靱性は高いと言える。

4. 破面遷移温度

2章で述べたように、鋼材 II では破面上に多くのセパレーションが生じ、脆性破面と延性破面の区別が難しく、破面遷移温度を求めることはできなかった。本章では、鋼材 I を対象とし、破面遷移温度に対する熱処理、塑性変形の量と方向、切欠きの角度と方向の影響について検討する。

図-15 は、塑性変形なしで熱処理を行った A0 試験片と熱処理を行っていない N0 試験片の破面遷移温

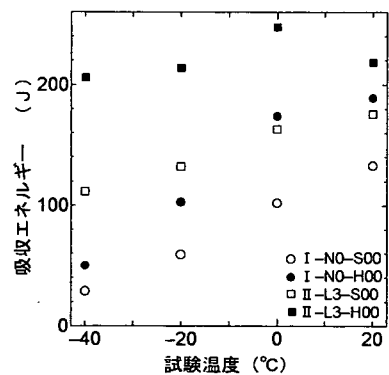


図-13 吸収エネルギーに対する切欠き方向の影響

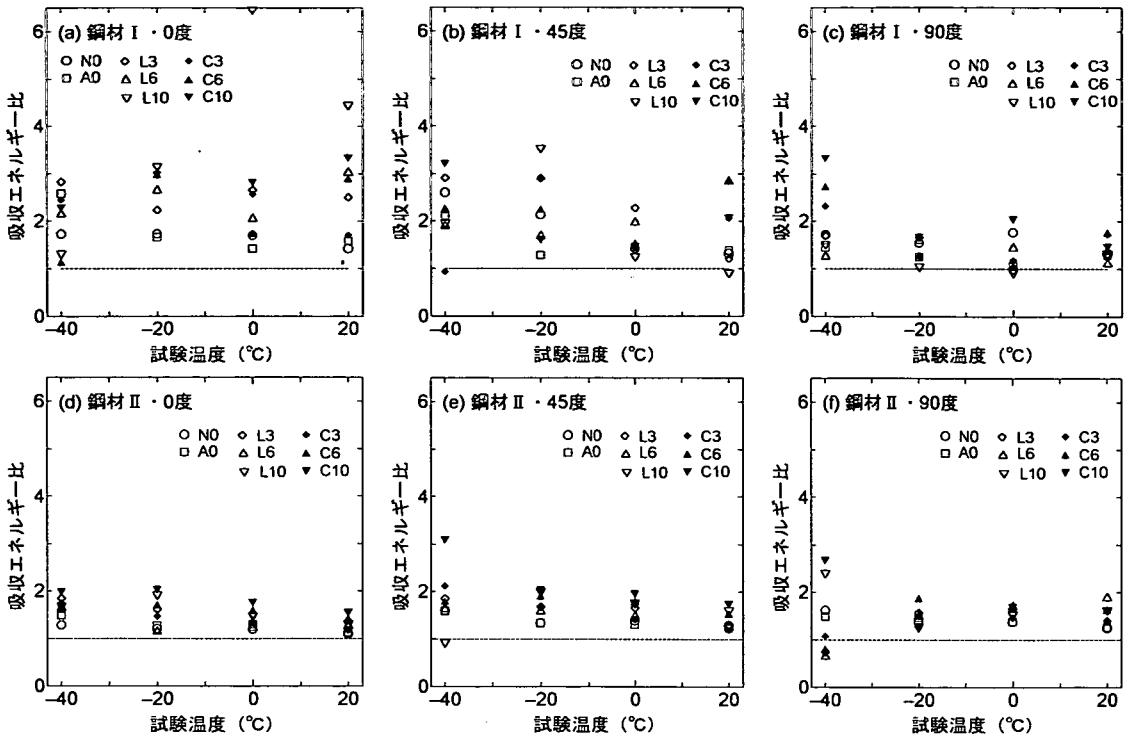


図-14 切欠き方向の影響（表面切欠きと側面切欠き）

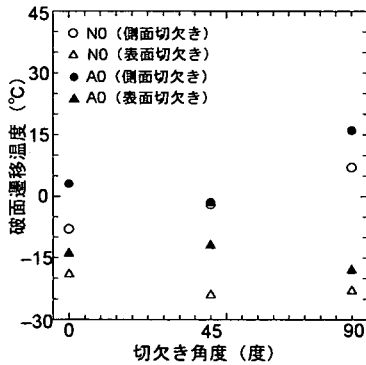


図-15 破面遷移温度に対する熱処理の影響

度を切欠き角度ごとに比較したものである。いずれの場合も、熱処理を行った AO 試験片の破面遷移温度が熱処理を行っていない NO 試験よりも高くなっている。しかし、その差は大きくても 10 度程度に過ぎない。

切欠き角度ごとに塑性変形方向と量、そして切欠きの方向（側面切欠きと表面切欠き）が破面遷移温度に及ぼす影響を整理するために作成したのが、図-16(a)～(c)である。図の横軸の塑性変形量が 0 のデータは、熱処理を行っていない NO 試験片の結果を用いている。いずれの切欠き角度においても、塑性変形量が大きくなるにしたがって破面遷移温度は高くなっており、吸収エネルギーで整理した場合と

同様に、塑性変形量に伴う切欠き靱性の低下が認められる。

図-16(c)に示す切欠き角度 90 度では、鋼材圧延直角方向 (C 方向) に塑性変形を与えた場合に比べて鋼材圧延方向 (L 方向) に塑性変形を与えた場合に破面遷移温度が高い傾向が認められる。しかし、図-16(a)に示す切欠き角度 0、また図-16(b)に示す切欠き角度 45 度では、塑性変形方向による破面遷移温度の規則的な変化は認められず、その差も小さい。図-16(a)～(c)に四角印で示す表面切欠き試験片の破面遷移温度は丸印で示す側面切欠き試験片よりも低く、表面切欠き試験片で切欠き靱性が高くなっている。

図-17(a)～(d)に破面遷移温度に対する切欠き角度の影響について整理した結果を示す。吸収エネルギーを用いた検討では、切欠き角度 45 度の試験片の吸収エネルギーは通常切欠き角度 0 の試験に比べて、15～25%、切欠き角度 90 度では 20～50%程度低下するという結果が得られた。ここでの結果も、破面遷移温度は切欠き角度 0 で低く、切欠き角度 90 度で高いような傾向が認められる。

以上のように、破面遷移温度を用いた切欠き靱性の検討（切欠き靱性に対する熱処理、塑性変形量、塑性変形方向、切欠き角度と切欠き方向の影響）の結果は、吸収エネルギーを用いた検討から導いたものと同様であった。

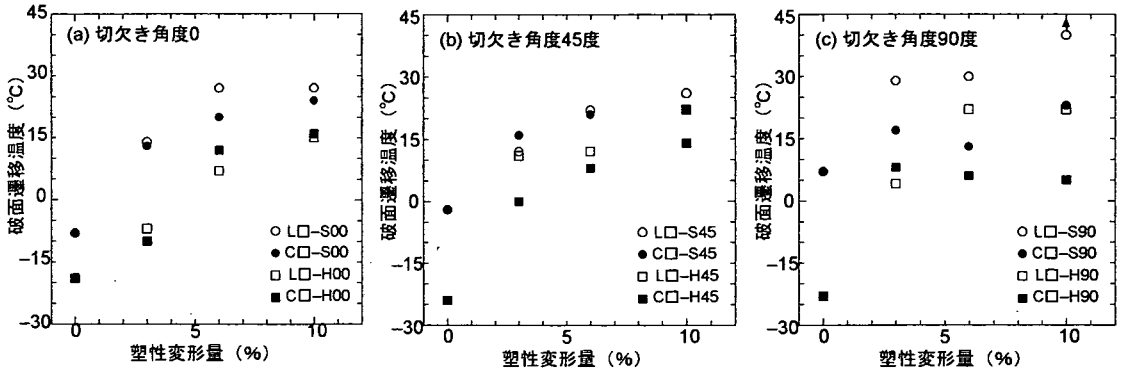


図-16 破面遷移温度に対する塑性変形の量と方向，切欠き方向の影響

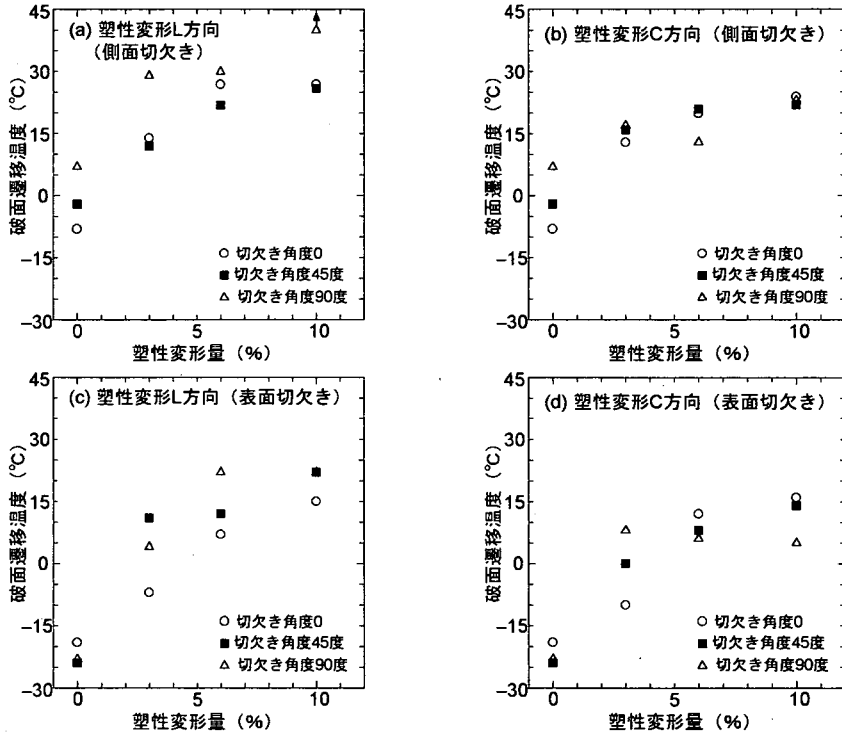


図-17 破面遷移温度に対する切欠き角度の影響

5. まとめ

塑性変形の方向と切欠きの向きが鋼材の切欠き靱性に及ぼす影響を調べる目的で，鋼橋で最も使用量の多い溶接構造用圧延鋼材 SM490Y を対象とし，鋼材の圧延方向あるいは圧延直角方向にそれぞれ 0～10% まで 4 段階の塑性変形を与え，切欠きを鋼材の圧延直角方向，圧延方向，そしてそれらと 45° の角度をなす方向に鋼材の側面あるいは表面から導入した試験片を作製し，試験温度 -40～20°C の範囲でシャルピー衝撃試験を行った．ここで得られた主な結果は以下の通りである．

- (1) 塑性変形を受けていない鋼材に熱処理を行っても，その吸収エネルギーは変化しない．この結果は，温度や切欠きの方向・角度に依存しない．
- (2) 鋼材に塑性変形を与えることにより，その吸収エネルギーは塑性変形量に伴って低下する．この結果は，塑性変形の方向や温度，切欠きの方向・角度に依存しない．
- (3) 鋼材に与える塑性変形の方向を変えても，その吸収エネルギーの変化はさほど変化しない．このことは，鋼材が引張塑性変形を受けても，引張変形に伴う圧縮塑性変形を受けても吸収エネルギーにさほど差がないことを意味している．

- (4) 圧延方向に切欠きを有する鋼材の吸収エネルギーは、圧延直角方向に切欠きを有する鋼材の0.5~0.8程度まで低下する。圧延直角方向と45°に切欠きを有する鋼材の吸収エネルギーはそれらの間にある。この結果は、塑性変形の方向や量に依存しない。
- (5) 板表面に切欠きを有する鋼材の吸収エネルギーは、板側面に切欠きを有する鋼材に比べて高い。
- (6) 破面遷移温度の検討からも切欠き靱性について(1)~(5)と同様の結果を得た。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A)(1)(11305034 代表者：三木千壽教授 東京工業大学)の補助を受けて実施したものである。この研究に際しては、法政大学および大学院の学生であった山田 祐三、石崎 猛夫の両氏に多大な協力をいただいた。ここに記して、深謝する。

参考文献

- 1) A.S.テレルマン, A.S.マッケヴィリー, 宮本博=訳：構造材料の強度と破壊2, 培風館, pp.158-160, 1977.
- 2) 日本道路協会：溶接鋼道路橋示方書解説 1968年追補, 1968.
- 3) 堀川浩甫：冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化, 土木学会論文報告集, No.300, pp.13-20, 1980.
- 4) 本間宏二, 三木千壽, 征矢勇夫, 笹尾英弥, 奥村健人, 原修一：冷間加工を受けた構造用鋼材のひずみ時効と

- 冷間曲げ加工の許容値に関する研究, 土木学会論文集, No.570, pp.153-162, 1997.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 鋼橋編, 1996.
 - 6) 大倉一郎, 田原潤, 西岡敬治, 安田修：繰返し塑性ひずみが鋼材の破壊靱性, 鋼構造論文集, 第3巻第11号, pp.1-11, 1996.
 - 7) 三木千壽, 休場裕子, 沖中知雄：阪神大震災により円形断面鋼製橋脚に生じた脆性破壊の材料特性からの検討, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.45-53, 1999.
 - 8) 三木千壽, 佐々木栄一, 休場裕子, 竹之井勇：引張および圧縮の塑性ひずみ履歴による鋼材の破壊靱性劣化, 土木学会論文集, No.640/I-50, pp.165-174, 1999.
 - 9) 大倉一郎, 大野勝, 山田靖則：繰返し塑性ひずみと鋼材の破壊靱性低下の関係, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.279-288, 1999.
 - 10) 日本溶接協会鉄鋼部会 APD 委員会：繰返し大変形を受ける建築鉄骨溶接接合部の強度と破壊靱性(中間報告書Ⅲ), 1996.
 - 11) 日本規格協会：日本工業規格 JIS Z2202 金属材料衝撃試験片, 1980.
 - 12) 日本規格協会：日本工業規格 JIS G3106 溶接構造用圧延鋼材, 1995.
 - 13) 日本溶接協会：低温用圧延鋼板判定基準 WES 3003-1995, 1995.
 - 14) 日本規格協会：日本工業規格 JIS Z2242 金属材料衝撃試験方法, 1998.
 - 15) 勝田順一：セパレーションを発生する鋼板の鋼構造物への適用に関する基礎研究, 九州大学学位論文, 1991.

(2002. 1. 9 受付)

DIRECTIONAL DEPENDENCE OF NOTCH TOUGHNESS OF SM490Y STEEL WITH PLASTIC DEFORMATION

Takeshi MORI, Kouji YAMADA, Masato TANAKA and Hiroshi TANAKA

It is well known that the notch toughness of steel becomes low when it suffers plastic deformation. This fact has been obtained by many Charpy impact tests in which the specimens have plastic deformation in rolling direction of steel plate and the side notches are introduced in the direction perpendicular to the rolling direction. In this study, the influences of following factors on the notch toughness of structural steel SM490Y with plastic deformation of 0 to 10% are examined though the Charpy impact tests. These factors are direction of plastic deformation, notch direction and notch angle.