

論 文

フラッシュ溶接部のシャルピー衝撃値に
およぼす軟化層の影響鈴木 信一*・征矢 勇夫*²Effect of Soft Interlayer on Charpy Impact Value of Flash
Welded Zone

Nobukazu SUZUKI and Isao SOYA

Synopsis:

The welded zone of a chain link manufactured by flash welding is generally softened due to the reduction of the amount of alloying elements during welding. The simulation test using the specimens which have soft interlayer materials was done to clarify the effect of softening on the mechanical properties of the welded zone. The results are as follows:

1) Though the simulated specimen fractures at the soft layer on tensile tests, the tensile strength is higher than that of the soft materials. With decreasing the thickness of the soft layer the tensile strength increases, but the elongation and the reduction of area considerably reduce.

2) The impact value of the simulated specimens reduces with decreasing the thickness and the hardness of the soft material.

3) The reasons for them are that the plastic deformation of the simulated specimens occurs within the soft layer and the specimens fracture before general yielding.

4) The toughness of the welded zone in a chain link is improved by either making the softened layer of the welded zone thicker or reducing the degree of softening.

1. 緒 言

フラッシュ溶接法は、非常に能率の良い溶接法であつて、広い分野で使用されている。その一つに船舶や石油掘削用リグなどを係留する大型のハイテンチェーンの製造がある。このようなチェーンは、フラッシュ溶接部に高い靱性が要求される¹⁾²⁾。今後、海洋開発が進むにつれて、チェーンの用途も多様になり、チェーンの品質に対する要求も高まってくることが予想される。

しかし、フラッシュ溶接には、根本的な一つの問題がある。それは、古くからよく知られている白色層の生成である³⁾⁴⁾。この部分は、鈴木らによつて、明らかにされた⁵⁾ように、素材中の主要元素が低下している。そのために、白色層の硬さは一般に周りに比較して低い。ハイテンチェーンのように、溶接後、焼入れ焼もどして強靱性を付与するものにおいては、白色層は脱元素のため十分に焼きが入らないので、母材との硬さの差はいつそう大きくなる。このようにチェーンリンクの溶接部全断面にわたつて、局部的に存在する軟化層がチェーンの

使用性能におよぼす影響が問題である。

局部的に存在する軟化層の疲労、引張特性におよぼす影響については、すでに詳細な研究がなされている^{6)~8)}。また、破壊靱性についても、通常の溶接部に生じる不均質部に関する研究は数多く行われている^{9)~12)}。しかし、いま問題とするハイテンチェーンのフラッシュ溶接部のシャルピー衝撃値におよぼす軟化層の影響を議論できるものではない。

本研究は、鋼材の局部に軟化層があり、その軟化層に切欠きをつけた場合のシャルピー衝撃値について検討し、ハイテンチェーンのフラッシュ溶接部のシャルピー衝撃値向上策を考察した。

2. 実 験 方 法

チェーンリンクのフラッシュ溶接部における軟化層の機械的性質におよぼす影響を調べようとするとき、実際のチェーンリンクの溶接部は、しばしば欠陥あるいは微細な酸化物が存在し、Fig. 1 に示すように、衝撃値のばらつきが大きく、溶接部の軟化層の影響を正しく把握す

昭和 61 年 5 月 23 日受付 (Received May 23, 1986)

* 新日本製鉄(株)厚板条鋼研究センター (Plate, Bar, Shape and Wire Rod Lab., Nippon Steel Corp., 5-10-1 Fuchinobe Sagamihara 229)

*² 新日本製鉄(株)厚板条鋼研究センター 工博 (Plate, Bar, Shape and Wire Rod Lab., Nippon Steel Corp.)

Table 1. Chemical compositions of steels used for chain link and soft layer (wt%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al
Base	0.22	0.25	1.34	0.021	0.005	0.72	0.96	0.48	—	0.028
Soft A	0.07	0.19	1.07	0.012	0.003	0.24	—	—	—	0.025
〃 B	0.13	0.25	1.37	0.015	0.003	—	—	—	—	0.031
〃 C	0.12	0.26	0.76	0.010	0.005	0.82	0.51	0.42	0.04	0.032

Table 2. Mechanical properties of steels after heat treatment. (900°C-60 min W.O.→630°C-60 min)

Steel	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation, G.L.=50 mm (%)	Reduction of area (%)	νE_0 (kgf·m)
Base	92.5	100.6	24.2	71.6	18
Soft A	34.3	47.4	34.8	74.0	29
〃 B	64.5	73.0	25.6	73.5	22
〃 C	82.5	86.0	24.5	72.9	20

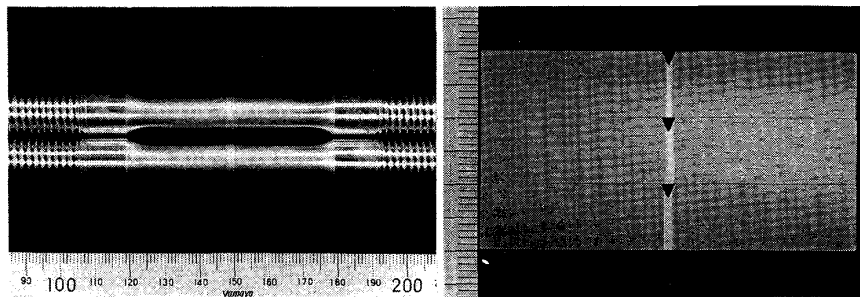
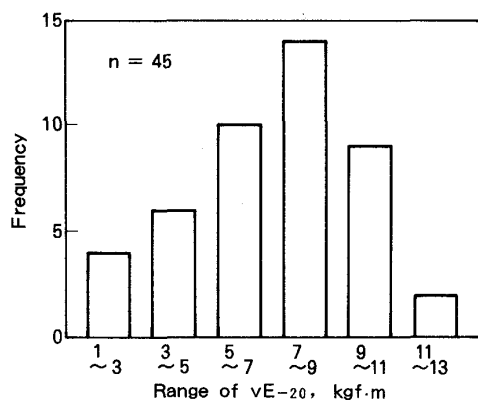


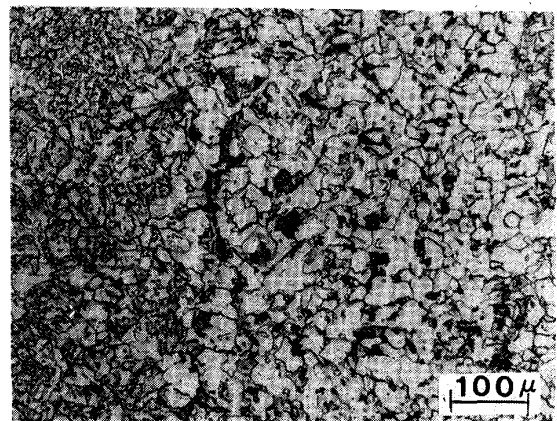
Photo. 1. Examples of tensile test specimens and Charpy test ones with soft layer.

Fig. 1. Scattering of Charpy impact value (-20°C) in flash welded zone of chain links.

ることができない。

そのために、チェーン素材より軟質の鋼材を摩擦溶接によって接合し、熱処理してから採取した試験片を用いてフラッシュ溶接部の軟化層をシミュレートし、引張りおよびシャルピー試験を行った。

Table 1 は、チェーン素材および摩擦溶接で素材に接合した軟質材の化学成分を示す。それらの鋼材を 900°C で焼入れ、 630°C で焼もどしたときの機械的性質を Table 2 に示す。挟みこんだ軟質材の幅は、1, 2, 3, 4 mm に変化させた。引張試験片は、平行部 $8\phi \times 50$ mm のサブサイズで、シャルピー試験片は JIS 4 号を用いた。



Base Steel ← Soft A

Photo. 2. Example of microstructure near boundary between base steel and soft layer.

それら試験片の例を Photo. 1 に示す。また、Photo. 2 に、リンク素材と軟質材 A との境界部の熱処理後の組織写真の一例を示す。この場合、摩擦溶接後の熱処理によって、若干の炭素の拡散がみられ、十分に接合されていることがわかる。

これらの実験を考察するために、有限要素法により、切欠部に軟化層が存在するシャルピー試験片の変形挙動を解析した。

3. 実 験 結 果

リンク素材に強度の異なる軟質材 A, B, C を、それぞれ幅を変えて、挟みこんだ引張試験片による試験結果を Table 3 に示す。引張破断させた試験片の例を Photo. 3 に示す。破断位置は、すべて軟質部であるにもかかわらず、引張強さは軟質材単独のそれより大きい。そして、軟質材の幅が広がるにしたがって、引張強さは低下し、軟質材単独の値に近づく。一方、伸び、絞りも、軟質材の強度が低く、幅が狭いほど、低い値になる。軟質材の強度が、リンク素材の強度に近くなると、引張性質におよぼす軟質材の影響は小さくなる。例えば、軟質材の幅が 1 mm の場合、引張強さは、軟質材 A でリンク素材の 91%、軟質材 B が 93%、軟質材 C が 99% で、軟質材が軟らかいほど、引張強さのおよぼす軟質材の影響は大きい。一方、伸びは、軟質材 A の場合、リンク素材の 10%、軟質材 B が 24%、軟質材 C が 50% で、伸びにおよぼす軟質材の影響は引張強さにおよぼす場合よりも大きい。

軟質材を挟みこんだシャルピー試験片の切欠き近傍の硬さ分布を測定した。その一例を Fig. 2 に示す。このような試験片におけるエネルギー遷移曲線を Fig. 3~5 に示す。これらの図をみると、衝撃値におよぼす軟質材

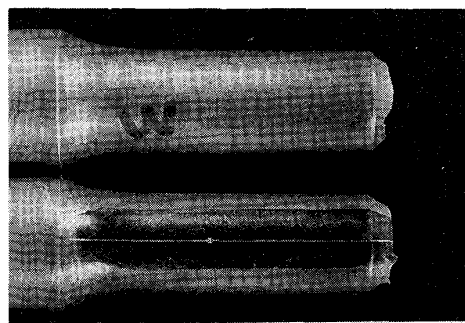


Photo. 3. Appearances of fractured tensile specimens with 2 mm width of "Soft A".

の幅の影響が、大きいことがわかる。そこで、0°C における吸収エネルギー E_0 と軟質材の幅との関係を Fig. 6 に示す。この図からわかるように、軟質材の強度が低いほど、幅の影響が大きい。しかし、軟質材の幅が 4 mm にもなると、いずれの軟質材の場合でも、軟質材単独の値に近づく。また、軟質材の強度をリンク素材との

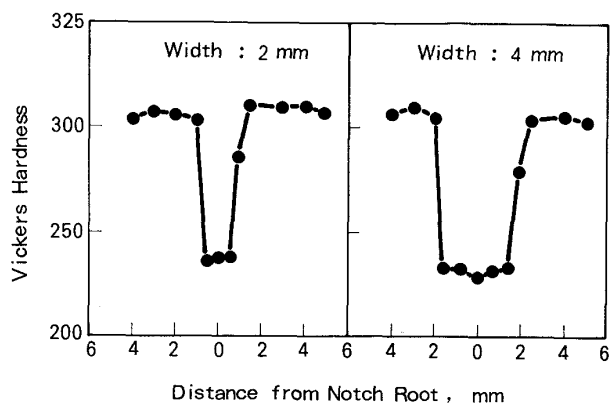


Fig. 2. Hardness distribution in Charpy test specimens with soft layer of "Soft B".

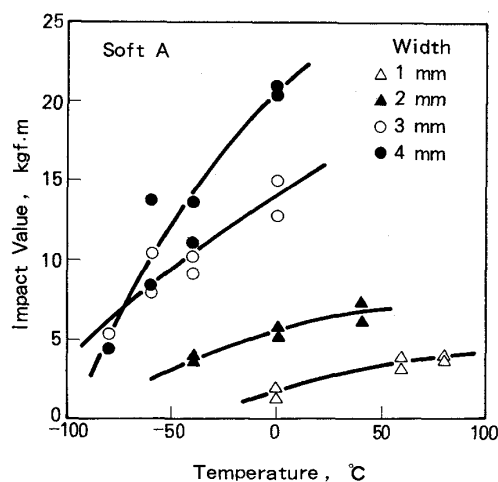


Fig. 3. Charpy impact value of specimens with various widths of "Soft A".

Table 3. Tensile properties of specimens with soft layer.

Soft layer steel	Width of soft layer	0.2% proof strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation, G.L.=50 mm (%)	Reduction of area (%)
Soft A	1 mm	77.5	91.3	2.4	17.4
	2 "	62.9	78.4	4.5	39.7
	3 "	40.6	62.5	8.4	58.1
	4 "	36.7	54.5	14.7	76.9
Soft B	1 "	86.5	94.0	5.9	26.7
	2 "	83.6	91.4	6.4	30.5
	3 "	78.9	87.3	7.3	34.6
	4 "	76.0	85.3	8.9	44.2
Soft C	1 "	95.8	99.8	9.9	35.2
	2 "	93.5	97.8	10.3	35.8
	3 "	90.8	95.5	10.0	40.2
	4 "	89.2	93.8	13.7	55.3

硬さの差 ΔH_v で表し、軟質材の幅が 1 mm と 2 mm のときの vE_0 と ΔH_v との関係を Fig. 7 に示す. ΔH_v が

大きいほど、 vE_0 は小さいが、 ΔH_v が 80 以下になると、 vE_0 におよぼす軟質材の影響はかなり緩和してくる. この傾向は、軟質材の幅が 1 mm でも 2 mm でも変わらない.

軟質材の幅が 1 mm のときの、 0°C でシャルピー試験

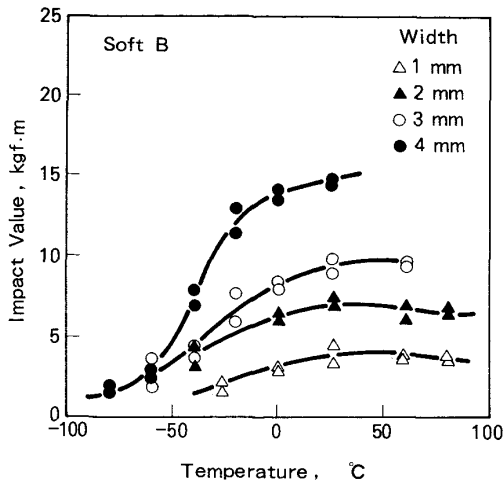


Fig. 4. Charpy impact value of specimens with various widths of "Soft B".

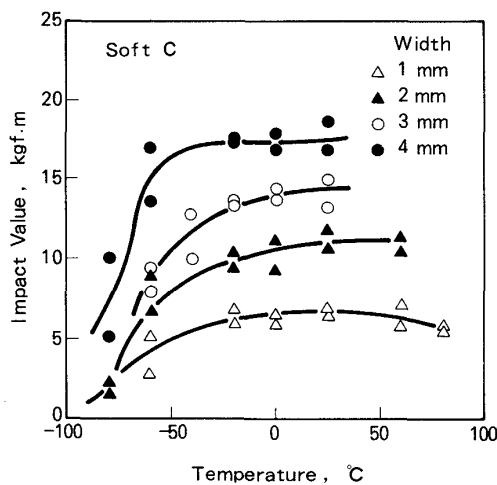


Fig. 5. Charpy impact value of specimens with various widths of "Soft C".

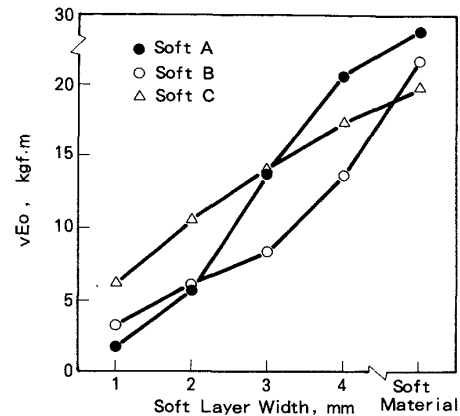


Fig. 6. Influence of soft layer width on Charpy impact value at 0°C .

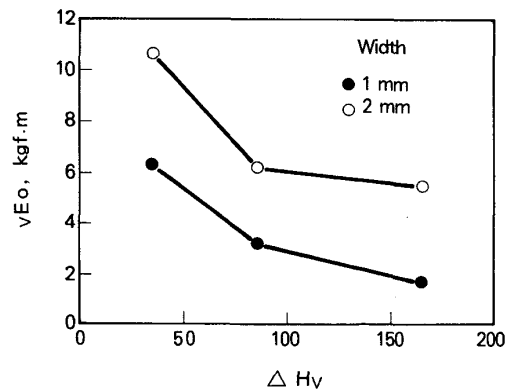


Fig. 7. Effect of ΔH_v on Charpy impact value at 0°C . ΔH_v is hardness difference between base steel and soft layer.

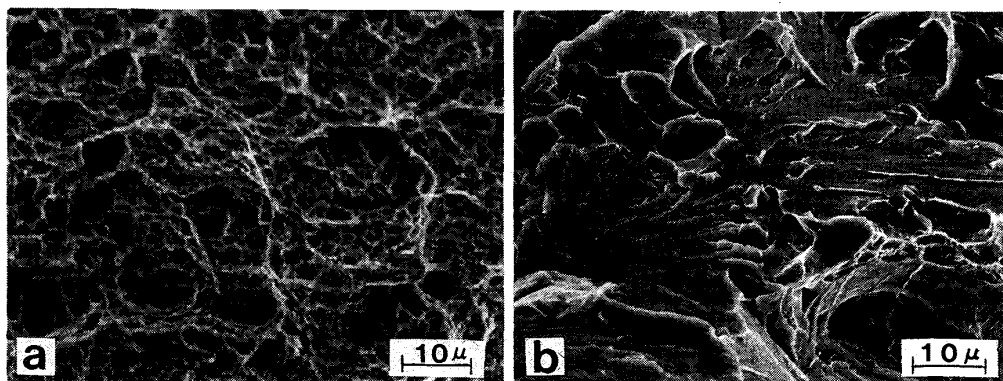


Photo. 4. Scanning electron fractographs of Charpy tested specimens with 1 mm width of "Soft C" (a) and "Soft A" (b).

した破面の走査型電子顕微鏡像を Photo. 4 に示す。(a)は軟質材Cの場合であつて、衝撃値は低いけれども、延性破面である。(b)は衝撃値のもつとも低い軟質材Aの場合で、へき開破面である。軟質材Aは、Table 2 に示したように、 0°C のシャルピー試験で、へき開破壊するような鋼ではないが、このように拘束が強くなると、 0°C でもへき開破壊するようになる。

4. 考 察

チェーンリンクのフラッシュ溶接部をシミュレートした実験結果から、軟化層が溶接部の引張試験における伸び、絞りおよびシャルピー衝撃値に大きな影響をおよぼすことがあきらかになった。

フラッシュ溶接部のように、局部的に軟質材を含むものの引張性質については、佐藤らによつて、すでに解析が行われている⁷⁾。その結果によると、試験片の直径と軟質材の幅との比が 0.2 以下であれば、引張強度におよぼす軟質材の影響は小さい。実際のチェーンリンクの軟化層は、約 2 mm の幅で、チェーンリンクの直径に比較して十分小さく、チェーンの引張性質には何ら影響をおよぼさない。チェーンを引張破断させても、溶接部に異状な欠陥がないかぎり、溶接部で破断することはない。しかし、各種のチェーンの規格¹⁾には、フラッシュ溶接部から切り出した試験片による引張試験が規定されており、伸びあるいは絞りが規格を満たさないことがある。これは、先の実験結果から明らかなように、軟化の程度を小さくすることにより解消できる。

フラッシュ溶接部の軟化層が 0°C 付近の衝撃値を下げるのは、シャルピー試験片の変形が、塑性拘束によつて、切欠き近傍の軟化部に集中するためであり、軟化層の幅、軟化の程度が影響することは、すでに明らかにした。これらの影響を有限要素法により、平面歪み条件で解析した。しかし、本実験で得た衝撃値の低い場合でも、試験片の変形が大きく、本実験の結果を解析により、定量的にフォローすることは容易ではない。また、解析に

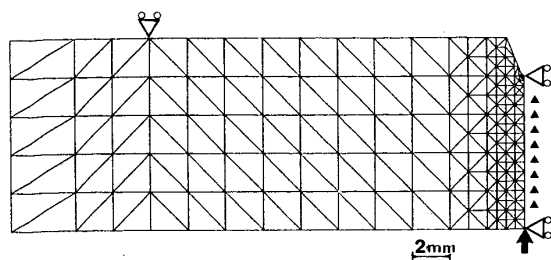


Fig. 8. Finite element subdivision for Charpy test specimen.

用いた各素材の塑性曲線は高速試験によるものでない。そこで、本実験で得た軟化層の影響を静的な解析結果をもとに定性的に考察した。

ここで用いた要素分割を Fig. 8 に示す。軟化層の幅は、切欠きを中心に 1, 2, 3, 4 mm の 4 通りとし、軟質材は Table 1 に示した A, B, C とした。

解析結果の一例として、同一荷重下における軟質材Bの場合の軟質材の幅による塑性域の広がりを Fig. 9 に示す。軟質材の幅が狭いほど、塑性域が小さく、塑性拘束の強いことがわかる。しかし、幅が 4 mm になると、軟質材単独の変形挙動に近づく。

次に、実験結果と解析結果とを対応させるために、負荷荷重と荷重点の変位との関係を Fig. 10~12 に示す。これらに示す曲線下の面積が、シャルピー試験における

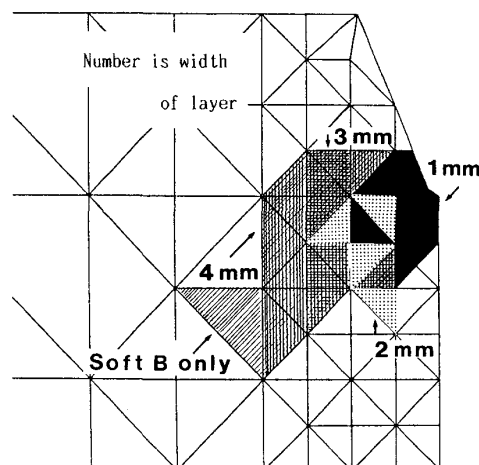


Fig. 9. Plastic zones around notch of Charpy test specimens with various widths of "Soft B" (Load : 700 kgf).

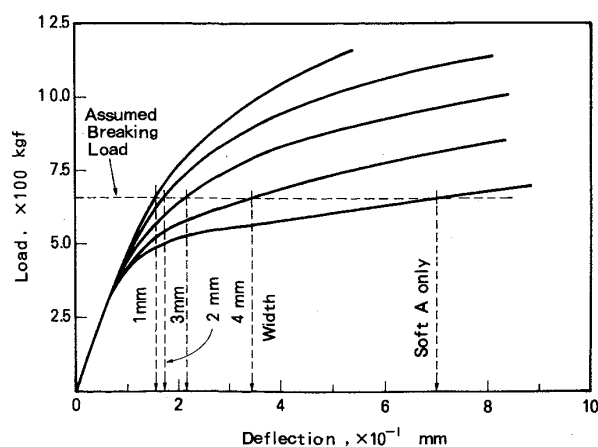


Fig. 10. Calculated load-deflection curves for Charpy test specimens with various widths of "Soft A". An arrow shows critical deflection of each specimen corresponding to assumed breaking load.

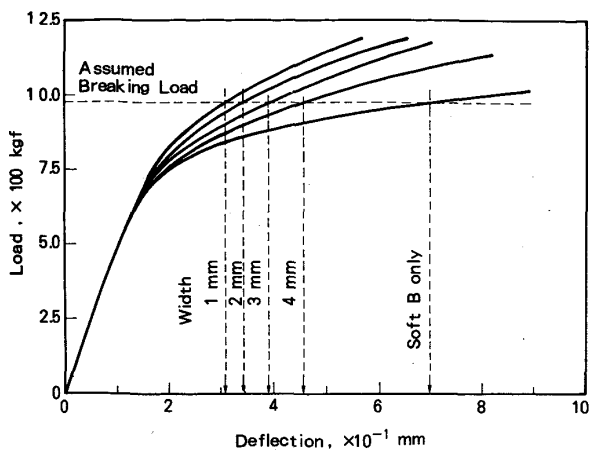


Fig. 11. Calculated load-deflection curves for Charpy test specimens with various widths of "Soft B". An arrow shows critical deflection of each specimen corresponding to assumed breaking load.

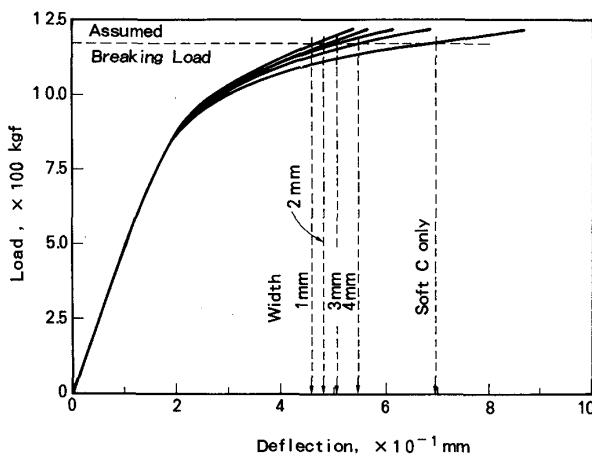


Fig. 12. Calculated load-deflection curves for Charpy test specimens with various widths of "Soft C". An arrow shows critical deflection of each specimen corresponding to assumed breaking load.

吸収エネルギーに対応する。ここで、軟質材をはさみ込んだシャルピー試験片は、低温で試験片の変形が比較的小さくて破壊する場合、軟質材および試験温度が同じであれば、軟質材の幅に関係なく同じ荷重で破壊すると仮定する。そこで、各軟質材ごとに、それらの強度に応じた破壊荷重を仮定し、Fig. 10~12 にそれぞれ破線で示した。Fig. 11 を例に、破線で示した破壊荷重、980 kgf においてノッチ下に生じる最大引張応力を計算すると、はさみ込んだ軟質材 B の幅に関係なく、その値は約 220 kgf/mm^2 となる。これは軟質材の幅に関係なく、同一荷重で破壊するとした上記の仮定が、事実と大きく異なるものでないことを意味している。各軟質材別に、仮定した破壊荷重に至るまでのエネルギーは、軟質材の強度

によつて、軟質材の幅の影響の異なることがわかる。すなわち、強度の低い軟質材 A の場合は、幅の影響が大きくなり、軟質材 B, C になると、幅の影響が順に小さくなる。これらは定性的に Fig. 6 とよく一致している。

以上の結果は、 0°C 付近のシャルピー試験を対象に、切欠き先端にかなり大きな塑性域をとめない、塑性拘束が作用する場合のものである。したがって、大きな塑性域をとめない低温の場合は、Fig. 3~5 でわかるように、軟化層の影響がなくなる。また、COD (Crack Opening Displacement) 試験の場合を考えてみると、COD 試験は切欠きが疲労クラックなので、その先端半径はシャルピー試験片の切欠先端半径とは比較にならないほど小さく、軟質材の幅が 1 mm であつても、はさみ込んだ軟質材に起因する塑性拘束の度合いが小さく、COD 値はシャルピー衝撃値ほど軟質材に影響されないとと思われる。しかし、現実の問題は、延性破壊と脆性破壊との遷移領域にあるので、実際の破壊は必ず相当大きな塑性変形をとまう。したがって、局部的に軟化層があり、その部分に切欠きがあれば、塑性拘束が作用し、Photo. 4 に示したように、延性破壊であつても低いエネルギーで破壊するし、もつと拘束が強まれば、延性破壊から脆性破壊に移行するようになる。

ハイトチェーンの溶接部の靱性を高めるには、フラッシュ溶接の宿命ともいえる溶接部の軟化層の幅を広くするか、軟化の程度を小さくしなければならない。実際には、溶接部の引張性質も考慮し、後者の対策が必要である。

5. 結 言

フラッシュ溶接によつて製造されているチェーンリンクは、一般に溶接部が軟化している。本研究は、この軟化層がチェーンの性能、特にシャルピー衝撃値におよぼす影響を明らかにすることを目的とした。しかし、現実のチェーンリンクの溶接部は、概して欠陥あるいは微細な酸化物が存在するので、衝撃値におよぼす軟化層の影響を正しく把握することができない。そこで、リンク素材に、各種の軟質材を摩擦溶接で接合して作った試験片を用い、シミュレート実験を行つた。得られた結果の要点を以下に述べる。

1) 軟質材を含む試験片を引張破断すると、軟質材で破断するが、その幅が狭いと、引張強さはリンク素材単独の値に近づき、軟質材の影響をほとんどうけない。しかし、伸び、絞りに対する影響は大きく、リンク素材と軟質材との強度差 ΔH_u が大きく、軟質材の幅が狭いほど、それらの値は低下する。

2) 軟質材を含み, その軟質材に切欠きを付けた試験片についてシャルピー試験を行うと, ΔH_v および軟質材の幅が衝撃値に非常に影響する. ΔH_v が大きく, 軟質材の幅が狭いほど, 衝撃値は低くなる.

3) 衝撃値におよぼす ΔH_v および軟質材の幅の影響について, 有限要素法により解析した. その結果によつて, 実験結果をよく説明することができた. すなわち, 局部的に軟化層が存在すると, 塑性拘束が作用し, 軟化層に変形が集中して破断するために, 破断までの吸収エネルギーが小さくなる.

4) チェーンリンクの溶接部の靱性を高めるには, 軟化層の幅を広くするか, 軟化の程度を小さくしなければならない. 現実的には, 溶接部の引張性質も考慮し, 後者の対策が必要である.

本研究を進めるにあたって, 浜中製鎖工業(株)浜中社長, 新日本製鉄(株)厚板条鋼研究センター伊藤所長, 条鋼技術部石井部長代理に御協力いただいたことに感謝いたします.

文 献

- 1) 鋼船規則集 (日本海事協会編) (1979), その他船級協会の鋼船規則
- 2) Spec. for Mooring Chain, Third Edition (American Petroleum Institute 編) (1981)
- 3) J. C. BARRETT: Welding Journal, **24** (1945), p. 25
- 4) 岡田 実, 木原 博, 鬼丸貞幸, 若林良一: 溶接学会誌, **19** (1950), p. 90
- 5) 鈴木征治, 高村登志博: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 1467
- 6) P. I. KUDRYAVTSEV and A. S. GEL'MAN: Svar. Poriz., (1964) 11, p. 1
- 7) 佐藤邦彦, 土井 勉, 豊田政男: 溶接学会誌, **37** (1968), p. 1214
- 8) 浜崎正信, 松岡 敏: 溶接学会誌, **43** (1974), p. 1088
- 9) 瀬尾健二, 正木順一: 溶接学会誌, **51** (1982), p. 291
- 10) 佐藤邦彦, 豊田政男, 野原和宏, 武田俊一, 名山理介: 溶接学会誌, **51** (1982), p. 679
- 11) 有持和茂, 中西睦夫, 佐藤 進, 南二三吉, 豊田政男, 佐藤邦彦: 溶接学会誌, **52** (1983), p. 148
- 12) 佐藤邦彦, 豊田政男, 南二三吉, 佐藤 進, 中西睦夫, 有持和茂: 溶接学会誌, **52** (1983), p. 154