衝撃試験に関する一考察 (第1報)*

大 谷 碧**

Some Considerations on the Notched Bar Impact Test (1st Report)*

By M. Otani**

abstract

Series of double blow impact test were performed on V-notched Charpy specimens at temperatures, -50°C to 70°C . The depths of cracks created by first light blows were detected by dripping etching solution at the notch roots of specimens and then breaking them by the second standard blows, which demonstrated the energy for propagating these cracks. Also, standard single blow Charpy test was carried out at the same testing temperature. Combining these three energy values, the effects of velocity differences were eliminated from the first light blows. Series of tests were made at a settled temperature, with varying amounts of energy by first blow, thus the energy for crack initiation could be determined. The same steps were taken at different test temperatures.

The Fig. 3, 4 and 5 show the experimental results. From those figures, the effects of temperature on the energies for crack initiation (W_i) and propagation (W_p) were determined as in Figs. 6, 7 and 8. Then, the meanings of 15 ft-lbs or 1/2 maximum energy transition temperatures could clearly be understood. Also the percent shear-temperature curves in Fig. 12 were proved to possess close correlations with the W_p -temperature curves. For three kinds of steels investigated, the orders of the locations and the maximum values of W_i -temperature curves coincided well with those of W_p -temperature curves. But there was no correlation between the order of location and the maximum values of W_i or W_p -temperature curves in the three steels. Further, the effects of impact velocities on W_i and W_p at various temperatures were discussed making use of the test results in Figs. 3~5.

I は し が き

鋼材の切欠き脆性を試験するためこれまでに数多くの方法が提案されてきたが、それらの中シャルビ衝撃試験、特にVノッチつき試験片を用いるもの、がもっとも有力な試験法と考えられているようである。国際溶接学会(I.I.W.)の第12委員会(脆性破壊関係)もVノッチ・シャルビ衝撃試験の重要性を認め、鋼材の切欠き脆性を判定する標準試験法として推奨している¹⁾。しかし本試験法の特長に関してはまだ明らかにされていない点が多い。すなわち鋼材のシャルビ衝撃値~温度曲線から遷移温度を定めるに当り、基準値として15 ft-lbs (2.6 kg-m/cm²)をとるか最大吸収エネルギーの50%をとるかによって異った遷移温度値が得られる。また剪断破面率~温度曲線や横収縮率~温度曲線を用いればそれぞれ他の遷移温度値が求まることとなる。しかるにこれら各種遷移温度間の関連性を説明する法則はまだ見出されていない。

更に試験法を異にすれば、各鋼材の遷移温度の順序はまた相当変動するのが常であって、問題は一層混乱してくる。現在のところでは、各種の遷移温度を、切欠き底部に割れが発生するまでの現象に主として関係するもの(Ductility 遷移温度)と割れの伝播に主として関係するもの(Fracture 遷移温度)の2群に大別し²⁾、各群毎にその間の関連性を探究してゆくこと³⁾が、問題解決の有力な手段であると信ぜられている。

この意味で、シャルビ衝撃試験においても、割れの発生と伝播の見地よりその特性を考察することが必要であろう。筆者は本報告に詳述するとき二重衝撃試験法を適用し、全吸収エネルギー(衝撃値)を割れの発生に要する部分とその伝播に要する部分とに近似的にわけ、かつその結果を利用して衝撃試験の諸特性を明らかにすることができた。

II 試験用鋼材

先に各種の切欠き脆性試験を行うに用いた鋼材⁴⁾のうち、板厚13mmのリムド鋼2種(A-13, C-13)と23mmのキルド鋼1種(K-3)を本試験に使用した。その分析成分と機械的性質は第1表および第2表に示す如くである。2種のリムド鋼のうち、A-13は遷移温度が低く、C-13は

* 原稿受付 昭和29年3月(昭和29年度溶接学会春季学術講演会において発表)

** 正員、鉄道技術研究所
Member, Railway Technical Research Institute

逆に高いものである。また K-3 は 3 者のうち遷移温度が最も低い標準的キルド鋼である。

Table 1. Chemical Compositions of Steels Used

Components	A-13	C-13	K-3
C (%)	0.18	0.194	0.21
Si	0.019	0.009	0.16
Mn	0.45	0.48	0.66
P	0.016	0.023	0.014
S	0.020	0.014	0.017
Cu	0.254	0.22	0.21

Table 2. Mechanical Properties of Steels Used

Items	A-13	C-13	K-3
Plate Thickness (mm)	13	13	23
Yield Point (kg/mm ²)	25.6	25.8	31.8
Tensile Strength (kg/mm ²)	41.8	42.6	48.1
Elongation (%)	31.6	26.3	28.0

III 試 験 片

標準型 V ノッチ・シャルピ 衝撃試験片 (切欠きの角度 45°, 深さ 2 mm, 先端半径 0.25 mm) を鋼板のロール方向に採取した。切欠きは板厚方向に附した。各鋼材ごとに約 70 本の試験片を準備した。

IV 試 験 方 法

シャルピ衝撃試験の示す衝撃値は、これを下記の 4 部分に分けることができる。

- 試験片が変形して、切欠き底部に割れが発生するまでに吸収されるエネルギー
- この割れが伝播して遂に試験片が破断するまでに吸収されるエネルギー
- 試験片を通じて試験機中に伝わるエネルギー
- 破断した試験片に与えられる運動エネルギー

後 2 者は前 2 者にくらべて非常に小さいので、これを無視するのが一般である。本報告においても、エネルギー (a) および (b) が温度と共にいかに変化するかを検討されている。

二重衝撃試験法を用いて、全吸収エネルギーを割れの発生と伝播に要する 2 部分に分離するには、次の要領で実験を行う。

まず標準の衝撃試験を各温度で実施して、全吸収エネルギー (W_c) ~ 温度曲線を求めておく。次にある所定の温度 (T) で、数本の試験片を用い二重衝撃試験を行う。第 1 回の打撃では、試験片はまだ破断してないが切欠きの先端には割れが発生する如き小エネルギー (W_1) を与えるよう、試験

機のハンマの位置を低くして試験片を軽く打つ*。従ってこの場合は打撃速度が正規の場合にくらべて小さくなる。すなわち正規の速度が 5.3 m/sec であるのに対して、たとえば W_1 が 3 kg-m のときは 1.8 m/sec, 8 kg-m のときは 2.9 m/sec であった。

第 2 回目の衝撃試験では正規の位置までハンマをあげて、再び所定の試験温度 (T) で標準の打撃を与え、そのときの吸収エネルギー (W_2) を計測する。

第 1 回の打撃で生じた割れの深さは、試験片の切欠き底部に腐蝕液 (10% 硝酸アルコール溶液) をたらし約 10 分間放置した後、腐蝕液を十分洗い落し第 2 回の打撃でこれを破断すれば、破面を観察して容易に測定できる。写真 A は腐蝕された破断面の状態である。 W_1 を変えれば種々な深

Photo. A Fracture surface of specimen (C-13 steel, 10°C, V-notch)

Fig. 1 Crack created by first light blow

さの割れが発達することが示されている。割れの最大深さを d_c とする (第 1 図)。

第 2 図におき縦軸に d_c を、横軸に吸

Fig. 2 Analysis of test result

収エネルギーをとる。各 W_1 に対する d_c 値を結ぶと、第 1 回の打撃について図中の実線が得られる。この曲線は、低速度の衝撃によって割れが発生・伝播し試験片が破断するまでに、エネルギーが吸収されてゆく経過をあらわしている。

所定の温度 (T) での標準試験による吸収エネルギーは、正規の衝撃値 (W_c) を $d_c=8$ mm の高さの位置で横座標にとり、図中の黒丸で示されることとなる。第 2 回の衝撃

* このように試験機にとって無理な打撃を与えるので、堅牢な旧式試験機を用いて試験片に第 1 回の打撃を加えた。

試験における衝撃値 (W_0) を W_c から引いた値を横座標に、 σ 1 回の打撃により生じたその試験片の d_c を縦座標にとって図上の位置を定めた点を結ぶと、 σ 2 図の破線が得られる。この曲線は正規速度の衝撃によって割れが発生・伝播し試験片が破断するまでに、エネルギーが吸収される経過を示すこととなる。本曲線は当然標準試験による衝撃値をあらわす点 (黒丸) を通る。また実線・破線両曲線の差が衝撃速度の影響を示すものであることはいうまでもない。

上述の手続きの試験を各種温度で行えば、割れの発生に要するエネルギーおよびその伝播に要するエネルギーと温度の関係を知り、衝撃値～温度曲線の特性を明らかにすることができるのである。

二重衝撃試験は -50°C ないし $+70^{\circ}\text{C}$ の範囲で 10°C ごとに行った。湯またはアルコール・ドライアイス溶液中で、所定の温度に試験片を約 15 分間保持した後、衝撃荷重を加えた。所期の試験温度と実際のものの差は最大約 2°C (平均約 1°C) 以内に保つことができた。また σ 1 回打撃時の温度を以て試験温度とした。なお試験片と試験機受台の間には乾いたボール紙の薄片をおき熱の伝導を防ぎ、かつ試験片を恒温槽中よりとり出してから約 5 秒でこれに打撃を与えた。

Fig. 3 Test results (A-13 steel, V-notch)

V 試験成績

各種の温度における測定値を σ 2 図の要領で解析した結果は、 σ 3 図 (A-13), σ 4 図 (C-13) および σ 5 図 (K-3) に示す通りである。

いま試験片の破面を詳細に観察すると、 σ 1 回の衝撃荷重が小さいうちは試験片はやや曲るのみで、切欠き先端部に割れは全然発生しないが、荷重を漸次増してゆくと、まず σ 1 図 (a) の如き割れが発生するに至る。すなわちある程度互に独立した感じの小さな割れが切欠き先端部の数ヶ所から発生する。 σ 1 回の打撃が増大するにつれて小さな割れは成長して連結し、その先端がやがて (b) のようにほぼ滑らかな曲線を形成するに至る。しかる後 σ 1 回の打撃が更に増すと、(c) の如く割れは試験片内部に向って進展する。(a) の状態から (b) の状態までの間はいわば小さい割れが各個に発生し勢揃いする期間で、(b) の状態まで生長した割れが始めて内部に伝播し始めるものと考えられよう。割れが (b) の状態になるのは d_c が平均約 1 mm になるときに相当するので、この意味で $d_c=1\text{ mm}$ の割れが

Fig. 4 Test results (C-13 steel, V-notch)

Fig. 5 Test results (K-3 steel, V-notch)

進展して試験片が破断するまでに吸収される仕事エネルギーを以て“割れ伝播のエネルギー (W_p)”とした。また本実験では ($W_c - W_p$) を以て“割れ発生エネルギー (W_i)”とした。従って厳密に言えば W_i 中には、小さな独立した割れが生長して (b) の状態に達するまでに吸収される仕事エネルギーが含まれることとなる。このように定義すれば、Fig. 2 において $d_c = 1\text{ mm}$ となる破線上の点の横座標から、全衝撃値 (W_c) を割れの発生に要する部分 (W_i) とその伝播に要する部分 (W_p) とに容易に分けることができる。

Fig. 6～8 の曲線は、3種の鋼材につき両エネルギーと温度の関係を示すものである。

また Fig. 9 は標準試験の衝撃値 (W_c) と二重衝撃試験における衝撃値の和 ($W_1 + W_2$) を比較したもの1例である。同じく Fig. 10 は切欠き底部での横収縮率 (ϕ_N)、Fig. 11 は

剪断破面率 (s) について、標準試験と二重衝撃試験を比較したもの1例である。また標準試験による各鋼材の剪断破面率 (s) 曲線を Fig. 12 に比較しておいた。

VI 考 察

1. 試験成績から明らかなごとく、本実験に適用された二重衝撃試験法は、全吸収エネルギーを割れの発生までとその伝播に要する部分に分け、かつ衝撃速度が吸収エネルギーに及ぼす影響を示すことができるなど、衝撃試験の特性を知るのに適したものであることが判明した。

二重衝撃試験に類似の方法としては、先に W. Harris 氏が提案した Multi-blow 法⁵⁾がある。これはある所定の試験温度では1本の試験片を用い、15 ft·lbs 程度の小打撃を試験片が破断するまで繰返し与える方法である。従って Multi-blow 法では、割れの発生を外部から観察してその状態を推測し得るにとまる。両試験方法を比較すると、Multi-blow 法は標準の試験法で衝撃値～温度曲線を求めるのと同じ程度の少い試験片数で足りる利点を持つが、衝撃試験の諸特性を定量的に知るためには二重衝撃試験法の方が遙かに優れていると考えられる。

2. 全吸収エネルギーを割れの発生とその伝播に要するエネルギーに分けるのに、本試験では Fig. 1 打撃による割れの最大深さ (d_c) が 1 mm となるときを以て基準とした。その理由は先に詳述した如く、 d_c が約 1 mm に達するまでは、切欠き先端の各所から発生した小さな割れはまだ試験片内部に向って伝播する体勢ではなく、 d_c が約 1 mm となって始めてこれらは連合し勢揃いして内部に進展すると考えられるからである。この意味で $d_c = 1\text{ mm}$ 以後の吸収エネルギーを割れの伝播エネルギー (W_p) ととなえたのである。標準の衝撃値 (W_c) から W_p を差引いたものを割れの発生に要するエネルギー (W_i) としたので、 W_i 中には個々の小さな割れが $d_c = 1\text{ mm}$ にまで発達するに要する

Fig. 6 Energy-temperature curves (A-13 steel, V-notch)

Fig. 7 Energy-temperature curves (C-13 steel, V-notch)

Fig. 8 Energy-temperature curves (K-3 steel, V-notch)

Fig. 9 Energy-temperature curve (K-3 steel, V-notch)

エネルギー、すなわち“割れ生長のエネルギー”を含むことになる。オ6～5図に示すように、室温以下の試験温度においてはこの割れ生長のエネルギーは小さく、 W_i に比して無視しても差支えないのであるが、高温部においては相等な量に達することがある。鋼材 A-13 は特にこの傾向を示し

ている。一方鋼材 C-13 では高温部でも割れ生長のエネルギーが小さい。鋼材 K-3 は両者の中間的な性質を示している。衝撃試験以外の場合、たとえば切欠き曲げ試験⁶⁾ や引裂き試験⁷⁾ 等でも、試験片が最大荷重に達し脆性破断する相当前から、切欠き先端部に微小な割れが発生していることは既に指摘された通りである。かかる事実は鋼材の切欠き脆性を論ずるに当り、脆性破壊現象を(1)微小な割れの発生(2)微小な割れの生長(3)割れの伝播の3段階に分けて考察しなければならぬことを暗示するものかも知れない。この点は将来の研究を要する問題であろう。しかし差当り本実験では、破壊を割れの発生と伝播の2段階にわけて考察を進めることとした。

3. すべての鋼材について、 W_i ～温度曲線は W_p ～温度曲線より遙かに低温側にある。これは機械削りしたVノッチより自然に発生した割れの方が鋭い切欠き効果を示すと考えられることから当然予期される所である³⁾。かかる事実が衝撃試験について実験的に確認されたわけである。

4. 試験に用いた3種の鋼材のうちキルド鋼 K-3 はもっとも良質で 15 ft.-lbs 遷移温度 (T_{15}) が低く、リムド鋼 A-13 がこれに次ぎ、リムド鋼 C-13 はもっとも高いものであった。オ6～8図により3種鋼材の W_i および W_p 曲線を比較すると、両曲線はいずれも K-3・A-13・C-13 の順に低温側にあることがわかる。一方割れ発生エネルギー曲線の最高値が高いものは割れ伝播エネルギー曲線の最高値も高く、高さの順序は A-13・K-3・C-13 の順である。このように低温側から高温側にならぶ順序と、最高値の順序は必ずしも一致していない。3種の鋼材のうちでは、C-13 が両曲線とも特に吸収エネルギーの低いことが目立っている。

5. オ6～8図を観察すると、15 ft.-lbs 遷移温度 (T_{15}) の付近では、各鋼材とも W_p は非常に小さい値を示し、衝撃値の大部分は W_i である。従って従来から予想されてきたように³⁾、 T_{15} は割れの発生に要するエネルギーが温度降下とともに減少してある基準値となる温度、すなわち

Fig. 10 Notch contraction-temperature curve
(K-3 steel, V-notch)

Fig. 11 Percent shear-temperature curve
(K-3 steel, V-notch)

Fig. 12 Percent shear-temperature curves
(Standard blow, V-notch)

一種の Ductility 遷移温度であることが実証された。

6. 衝撃値～温度曲線より求めた $\frac{1}{2}$ エネルギー遷移温度 (T_{rH}), すなわち W_e が最大値の50%となる温度, を以て鋼材の切欠き脆性を比較することがある。 T_{rH} では W_e の大半は W_i が占めるが, T_{r15} の時よりは W_p もかなり多くなっている。従って T_{rH} の高低は, 本実験におけるが如く, W_i および W_p 曲線が低温側から高温側にならぶ順序が一致し, かつ W_i の最高値が W_p の最高値にほぼ比例している鋼材を比較する場合に限り, T_{r15} の高

低とはほぼ一致して有意であるといえよう。性質の大きい異った鋼材間ではかかる条件が満たされないことも当然あり得る筈で, その時は温度 T_{rH} における W_e 中の W_i と W_p の占める割合が異ってくるから, T_{rH} を以て切欠き脆性を比較することは余り意味がない。要するに T_{rH} は類似の鋼材間に用うればその切欠き脆性を比較する尺度となり得る便利な量であるが, 本質的なものとは考えられない。

7. W_e ～温度曲線の低温側, たとえば T_{rH} 附近では, 前述のごとく衝撃値の大部分を W_i が占めているが, この部分では W_i ～温度曲線の傾斜には余り甚しい差がないので, 各種の低温側衝撃値 (0°C または -20°C での衝撃値がよく用いられる)と T_{r15} の間にかなり良好な関連性がある⁹⁾¹⁰⁾のは当然であろう。

8. 才12図の剪断破面率(S)曲線と才6～8図の結果を比較検討すると, S は W_p と密接な関係のあることがわかる。すなわち S 曲線は K-3・A-13・C-13 の順で低温側にあり W_p 曲線の順序と一致しているのみならず, 各鋼材とも S が増加して約50%となると, W_p 曲線の傾斜は急となりその値は顕著に増加し始める。そして S が約100%のとき W_p 曲線は最大値を示す。

従って衝撃試験より鋼材の Fracture 遷移温度を求めんとするときは, W_p 曲線と最も関連性のある S 曲線を利用するのが賢明な簡便法であることがわかる。

9. 才1回の打撃速度には正規のもの (5.3 m/sec) より相当遅いから, 試験片の吸収するエネルギーが打撃速度の影響をうけて, 才3～5図に示す如き差異を生ずる。破線は正規衝撃の場合, 実線は低速度の場合である。各鋼材とも最低試験温度附近では, 両曲線は平行であり, かつ破線は低エネルギー側に位置している。換言すれば割れの発生までは吸収されるエネルギーは明らかに打撃速度の影響を受けるか, その伝播エネルギーは打撃速度に影響されない。

一方最高試験温度附近では両曲線が一致している。すなわち割れの発生および伝播とも, 打撃速度の影響をうけない。

中間の温度においては, 試験温度の上昇とともに, 破線の曲線は実線側に移動し遂に両者は交叉する。 $d_c=1\text{mm}$ の位置で考えると, 正規速度の衝撃による W_i は温度の上昇とともに漸次低速度衝撃の W_i に近寄り, C-13 鋼を除き, ある温度範囲では速い打撃速度は吸収エネルギーをむしろやや増加せしめる現象を示す。一般に破線の傾斜は実線の傾斜より急で, W_p は打撃速度が速くなると減少するこ

とを表している。また C-13 を除き、両曲線が交叉する温度範囲において W_i 曲線は極大値を示す傾向が認められる。

かかる衝撃速度の諸影響について明確な理論的説明を下すことは現在のところ困難であるが、最低試験温度附近で W_p が打撃速度の影響を受けないことや、ある温度範囲では打撃速度の増加がむしろ W_i の増大傾向を示すことなどは、特に注目をひく点であろう。

10. 二重打撃による衝撃値の和 ($W_1 + W_2$) はオ 9 図の 1 例に見られるようにややばらついているが、標準の衝撃値 (W_c) 曲線とくらべると高温側ではほぼこれと一致し、低温側ではやや大きな値を示す傾向が認められる。これはオ 3～5 図を検討して得られた衝撃速度の影響と一致した結果を示すものである。またかかる傾向は先に W. Harris 氏が Multi-blow 試験で報告した結果⁵⁾とも一致している。

オ 10 図の横収縮率 (ϕ_N) も衝撃値の場合とほぼ同様な傾向を示すようである。 ϕ_N 曲線と W_c 曲線が温度の降下とともに低下する状態は、ほとんど同様であることがわかる。

オ 11 図の剪断破面率 (S) 曲線では、中間の温度において二重打撃法がやや低い S の値を示している。

VII 結 論

本論文においては、鋼材の切欠き脆性の判定に広く使用されている V ノッチ・シャルビ衝撃試験の特性を明らかにするため、二重衝撃法を適用して実験を行いその結果を報告した。すなわち全吸収エネルギーを割れの発生に要するエネルギー (W_i) とその伝播に要するエネルギー (W_p) において、両エネルギー値の温度による変化の状況を求めた。実験の範囲では、

1. W_i が急に減少する温度 (Ductility 遷移温度) は W_p が急に減少する温度 (Fracture 遷移温度) より遙かに低温側にあることが衝撃試験について直接確認された。

2. W_i ～ 温度曲線の最高値が高いものは W_p ～ 温度曲線の最高値も高い。また一方の曲線が低温側に位置している程他方の曲線も低温側に位置する。しかしこの順序

と、最高値との間には関連性がない。

3. 15 ft-lbs 遷移温度 (T_{r15}) は Ductility 遷移温度の一種であることが確認された。 $\frac{1}{2}$ エネルギー遷移温度 (T_{rn}) は Fracture 遷移温度と Ductility 遷移温度の中間的なもので、明確な意義を有していない。

4. 剪断破面率 (S) 曲線は W_p 曲線と密接な関連性のあることを実証し、その詳細を明らかにした。従って S 曲線を用いて Fracture 遷移温度を正確に定めることができる。

5. 打撃速度が衝撃値に与える影響は W_i と W_p では異なり、かつ影響の仕方も試験温度により非常に異なるものであることを明示した。

このように V ノッチ・シャルビ衝撃試験の諸特性を定量的に知り、従来習慣的に使用されてきた各種の遷移温度の意義を明確にすることができた。

終りに、本研究を行うに際し御指導と御助言を賜った吉識・木原両先生ならびに造船協会電気溶接研究委員会の委員諸賢に深く感謝の意を表するものである。

文 献

- 1) Resolution (XII-119-53) of the I. I. W.-Commission 12 (July, 1953).
- 2) R. D. Stout & L. J. McGeady, Weld. J., Jan. 1949, p. 1-s~9-s.
- 3) C. J. Osborn et al., Weld. J., Jan. 1950, p. 24-s~34-s.
- 4) 大谷, 太田, 溶接学会誌 Aug. 1948, p. 12~20.
- 5) W. J. Harris, et al., Weld. J., Sept. 1951, p. 417-s~422-s.
- 6) R. D. Stout & L. J. McGeady, Weld. J., Nov. 1947, p. 682-s~692-s.
- 7) 大谷, カーボン引裂試験について (未発表)
- 8) R. W. Vanderbeck and M. Gensamer, Weld. J., Jan. 1950, p. 37-s~48-s.
- 9) 秋田, Brittle Fracture in Mild Steels and their Welded Joint (造船協会, 電気溶接研究委員会編, Oct. 1953) p. 1~8.
- 10) 鈴木, 渡辺, 金沢, Do., p. 9~19.