シャルピー衝撃試験片と実大破壊部材の破面相関

FRACTOGRAPHIC CORRELATION BETWEEN CHARPY SPECIMENS AND FULL-SCALE MEMBERS

桑村 仁*, 伊山 潤**

Hitoshi KUWAMURA and Jun IYAMA

Charpy impact test has been widely used for inspecting fracture toughness of steels in the world since the 1901 invention by French professor Dr. Georges Charpy. However, there has been a doubt and criticism, especially from fracture mechanics, that Charpy properties such as absorbed energy and percent brittle fracture deduced from the impact test may not be correlated with the fracture performance of actual steel members, because of crucial differences between them in terms of loading rate, specimen size, notch configuration, and stress-strain conditions. However, this paper shows that the surfaces as well as processes of the fractures are remarkably correlated between them, which suggests that Charpy test results can be rationally used as good indices for fracture resistance of structural steel members.

Keywords : *structural steel, fracture, fractography, Charpy impact test, full-scale test*
構造用鋼材, 破壊, 破面解析, シャルピー衝撃試験, 実大破壊試験

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震において, わが国の震災史上初めて建築鉄骨に脆性破断の被害が報告された¹⁾。これを契機に, 震災の前年1994年に制定された建築構造用圧延鋼材(SN鋼)のシャルピー値を見直す必要が出てきた²⁾。もちろん, このSN鋼が震災で被害を受けたわけではないが, 建築構造用鋼材に付与すべき破壊靱性のレベルを造船や海洋構造など他分野の仕様のスライド適用ではなく建築構造固有の利用状況に基づいて合理的に決めなければならないという必要に迫られているからである。この中で, シャルピー値というものが建築鉄骨構造の破壊性能評価に対していかなる意味をもつかを明らかにしなければならない状況になっている。

本論では, その手始めとして, 実大構造物の破面形状とシャルピー衝撃試験片の破面形状について分析し, 両者にどのような相関があるかを調べた。もし, 両者の破面形態に相関が無ければシャルピー衝撃試験を実大構造物の破壊問題に結び付ける技術的根拠が失われる。逆に, 良い相関があればシャルピー衝撃試験を鋼構造分野で有効利用する合理性が得られることになる。

2. シャルピー衝撃試験の工業的意義と破壊力学的批判

1901年にフランス人 Charpy によって考案されたシャルピー衝撃試験³⁾は, その簡便性と標準性によって鋼材の切欠き靱性を検査する方法として世界に普及している。しかし, シャルピー衝撃試験から得られる吸収エネルギーや脆性破面率が実大構造物の破壊性能とどのような関係があるかについては未だよく分かっていない。むしろ

ろ両者には, 載荷速度, サイズ, 切欠き形状, 応力一ひずみ状態に大きな隔たりがあるので, シャルピー試験結果から実大構造物の破壊性能を評価することには無理があるという意見が多い。特に, 破壊力学の研究者は, シャルピー試験結果を実大構造物の破壊性能に直接結び付けることに対して否定的である。

船舶や海洋構造物, 橋梁, 压力容器などの分野では, 実大構造物の破壊性能の評価に破壊力学を用いているが, 建築構造の分野ではその習慣がない。破壊力学は, 完全脆性材料の破壊条件を見出した Griffith—1921年⁷⁾以来発展を遂げてきた学問分野である。当初の Griffith 理論は, Irwin—1948年⁸⁾と Orowan—1949年⁹⁾によって破壊面の形成への塑性ひずみエネルギーの寄与分を組み入れて補正され, 実用化への道が開けた。その後, Irwin—1957年¹⁰⁾が Westergaard—1939年¹¹⁾の応力関数に基づいてき裂先端の応力場の解を導いて以来精力的な研究が行われ, 弾性範囲あるいは小規模降伏を伴う領域での破壊を対象とする線形破壊力学が応力拡大係数というパラメータを用いて確立された。さらに近年, 鋼材の切欠き靱性が向上してきたことに伴い, 大きな塑性変形を伴う場合も扱える非線形破壊力学へと発展を遂げている。このような破壊力学の知見に基づいて, 材料の必要靱性が破壊力学パラメータである応力拡大係数 K , き裂先端開口変位 CTOD, J 積分, R カーブなどで規定されるようになっている¹²⁾。

しかし, このような破壊力学パラメータを用いて材料特性を定めるための試験方法は, 米国の ASTM, 英国の BS, 日本の WES などに見られるように, 試験片形状寸法の制約, 疲労予き裂の導入, 荷

本論文は, 参考文献1), 2)に基づいてまとめたものである。

* 東京大学工学部総合試験所 助教授・Ph. D.

** 東京大学工学部総合試験所 助手・修(工)

Assoc. Prof., Eng. Res. Inst., School of Eng., the Univ. of Tokyo, Ph. D.
Res. Assoc., Eng. Res. Inst., School of Eng., the Univ. of Tokyo, M. Eng.

重と変形の関係を求める手順などのため、かなり面倒であり工業的試験方法としては適さない。このようなことから、破壊力学の学術的發展にもかかわらず依然としてシャルピー衝撃試験が工業生産の現場で使われている。特に、大量安価に社会に提供されなければならない建築用鋼材については、工業的な観点から今後もシャルピー衝撃試験が破壊靱性の検査方法として用いられることになるであろう¹³⁾。

破壊力学がシャルピー試験を疎んじた最大の原因は、その形状寸法に破壊力学の根拠が無いということよりも、むしろ、シャルピー試験片には切欠きは有ってもき裂が無いということである。切欠き(ノッチ)は先端の曲率が有限で、き裂(クラック)は先端の曲率が無限大であり、両者はその先端で力学的にまったく異なる不連続性を呈する。破壊力学は、き裂が予め存在することがその理論展開の前提であるため、予き裂の無いシャルピー試験片は破壊力学では扱えない¹⁴⁾。しかし、シャルピー試験の実用的価値が高いため、 K やCTODなどの破壊力学パラメータとシャルピー値との相関に関する研究が精力的に行われ、両者には工学的に有意な相関があるとされている¹²⁾。その結果、皮肉にも破壊力学のアプローチそのものの実用的意義が薄れている状況とも言える。

今世紀、鉄骨構造の重要な課題であった座屈現象における耐力や変形能力を簡便な材料引張試験から得られる降伏強さなどの基本特性から定量化することに成功したように、もう一つの課題である破壊現象を簡便なシャルピー試験に基づいて定量化することが鉄骨構造の分野で求められている。

(1) 外観

(2) マクロ破面

写真一 梁フランジのスカラップ底破断¹⁸⁾

(1) 外観

(2) 角部のマクロ破面

(3) 破壊起点の延性-脆性遷移マクロ破面

(4) 破壊起点の延性マイクロ破面
(ディンプル模様) (5) 破壊起点の脆性マイクロ破面
(リバー模様)

(6) 破断部の断面マクロ組織

写真二 角形鋼管の通しダイヤフラム仕口破断¹⁶⁾

3. 建築鉄骨における脆性破断の実態

建築鉄骨の脆性破断のプロセスは次の3段階で構成されている¹⁵⁾。

第1段階：延性き裂の発生

第2段階：延性き裂の成長

第3段階：脆性破壊への転化

このことは、実大の破壊実験における破面観察¹⁵⁾やき裂成長のモニタリング¹⁶⁾、および阪神・淡路大震災で破断した鉄骨の破面調査^{4),17)}によって確認されている。それらのうち代表的な鉄骨破断として、(1)梁フランジのスカラップ底破断¹⁸⁾、(2)角形鋼管の通しダイアフラム仕口破断¹⁹⁾、(3)柱フランジの球根状剥離破断¹⁸⁾、および(4)神戸の被災建物における梁フランジ破断⁴⁾の4種類を写真－1、2、3、4に掲載する。

写真－1は、溶接組立H形梁がその端部仕口でスカラップ底からフランジ破断したものである。スカラップ底に発生した延性き裂が十分成長しフランジ板を貫通してから脆性破壊に転化している。この場合は、延性き裂が脆性破断の原因であることが明瞭である。

写真－2は、冷間成形角形鋼管が通しダイフラムとの溶接仕口で脆性破断したものである。角部の外側表面の溶接止端に発生した延性き裂が1ミリ程度の深さまで成長した後、脆性破壊に転化している。それは、電子顕微鏡によるマイクロ写真(3)、(4)、(5)において、延

性破面から脆性破面への遷移が見られ、延性破面側にはそれを示すディンプル模様がみられ、その前方にある脆性破面側にはそれを示すリバー模様が観察されることから明らかである。なお、写真(6)の非破断側を見るとわかるように、溶接止端は丁寧に仕上げられており予き裂は存在しない。塑性ひずみの負荷によって延性き裂が生まれ、成長し、それが脆性破壊の引き金になるのである。予き裂という欠陥の存在を前提とする破壊力学では建築鉄骨の脆性破断の問題を解くことはできない。

写真－3は、溶接組立箱形断面柱のフランジが、突合せ溶接された梁フランジから作用する板厚方向引張力によって剥離破断したものである。写真(2)の破面の目視観察だけでは全断面脆性破面のように見える。しかし、破壊の起点となっている裏当て金への初層溶接ビードのルート部をSEMで観察するとやはり、写真(4)に示すように破壊起点には延性き裂が先行発生したことを示すディンプル模様が認められる。

写真－4は、兵庫県南部地震で実際に被災した建物から採取した破面である。これは圧延H形鋼梁が端部仕口でスカラップ底からフランジ破断したものであり、兵庫県南部地震でたくさん報告された被害である。目視観察によると、全断面脆性破面のように見えるが、SEMで調べると、この場合もやはり写真(3)にあるように破壊起点のウェブフレット部に延性き裂を示すディンプルがある。

写真－3 柱フランジの球根状剥離破断¹⁸⁾

写真-4 神戸の被災建物における梁フランジ破断⁴⁾

図-1 破壊試験から得られた荷重と変形の関係

以上のように、鉄骨の破断は場所によって様々な外観を呈するが、破壊起点をSEMで詳細に調べると、必ず、脆性破面に先行して延性き裂を示すディンプルが確認できる。つまり、建築鉄骨に脆性破断が起きるときには、延性き裂がサイズの大小は別にして必ず先行発生し、それが脆性破断の引き金になる。

以上のうち、実験室で静的加力により再現された最初の3ケースについて、破断するまでの荷重と変形の関係を図-1(1), (2), (3)に示す。これらの図から分かるように、脆性破断に至るまでかなりの塑性変形を経ており、ひずみ集中域にある破壊起点においては相当大きな塑性ひずみが発生し、材料の延性限界を突破して、延性き裂の発生と成長を促すことが容易に想像される。

4. シャルピー衝撃試験における破面

試験温度を変化させて得られるシャルピー遷移線図の一例を図-2に示す。これは文献¹⁹⁾から引用した冷間成形角形鋼管角部のデータである。遷移曲線の下部棚、遷移域の下部と上部、および上部棚の4カ所のポイント、それぞれ-40、-20、±0、+20℃にお

けるシャルピー衝撃試験片のマクロ破面を写真-5の左列に示す。-40℃における脆性破面率は100%と判定され、ノッチ底における延性き裂は肉眼では確認できない。-20℃になるとノッチ底に深さが十分の数ミリ程度の延性き裂が目視観察される。さらに温度が

図-2 シャルピー遷移線図

上昇すると、脆性破面率は低下し、+20℃では100%延性破面になっている。

次に、これらの破面のノッチ底直下を SEM で観察したものが写真-5 の右列に示されている。写真はマクロ破面と同じ向きになっており、破壊が各写真の右から左に進行している。ここで注目すべき重要なことは、目視では全断面脆性破面と見られた-40℃試験片においてさえ、ノッチ底に延性き裂を示すディンプルが深さ数十ミクロンの範囲に認められることである。これは、前章で述べた実際の鉄骨破断で、全断面脆性破面と見られた破面の破壊起点に延性き裂の先行発生を示すディンプルが存在していたことと対応している。

このようにシャルピー衝撃試験片の破面は、下部棚の全断面脆性破面の温度域にあっても、ノッチ底に発生し成長した延性き裂が引き金となって脆性破壊が伝播するという形態になっており、これは前章で示した実大構造物の破面と全く同じである。また、温度の低下に伴い材料の破壊靱性が低下すると、ノッチ底に先行発生する延性き裂が極めて浅い成長段階で脆性破壊に転化することがシャルピー試験片の破面分析から分かる。この傾向は実大構造物においても観察されている¹⁶⁾。

5. 実大構造物とシャルピー試験片の破面比較

実大破壊試験の破面とそれと同一の鋼材から製作したシャルピー試験片の破面を比較してみる。実大破壊試験のデータは文献20)から引用したものである。

まず、実大破壊試験における脆性破断の様子を写真-6 に示す。このうち写真(1)に示すように、破壊は幅に段差の付いたフランジのアール止端に設けた切欠きから発生している。この切欠きは深さが1mm、角度が30°で、先端半径はシャルピー試験片と同じ0.25mm である。破壊は起点と反対側の縁に伝播し40mm 厚のフランジが完全に破断している。破壊起点の温度は0℃であった。写真(2)と(3)のシェブロン模様を源をたどると、破壊の起点は板厚中央のノッチ底であることがわかる。肉眼では全断面脆性破面のように見えるが、SEM によると写真(4)にあるようにノッチ底から0.1mm オーダーの深さの延性き裂が確認できる。この部分は写真(5)のディンプル破面であり、その左前方は写真(6)のリバー破面である。

この試験体が破断に至るまでの荷重と変形を図-3 に示す。一方向の静的載荷で破断しているが、破断までかなりの塑性変形を示している。破断時の変形を全塑性変形で除した塑性率は5%である。

次に、図-4 に示すように、この実大破壊試験体と同じ鋼材から、実大試験で破壊の起点となった同じ位置(板厚中央)かつ同じ方向にシャルピー試験片を採取して、同じ温度(0℃)で衝撃試験を実施した。その破面の様子を写真-7 に示す。実大破壊試験の破面と同様、肉眼では脆性破面率が100%と判定されるが、SEM によると切欠き底に脆性破面に先行する延性破面がノッチ底から0.1mm 程度の深さの範囲に観察される。このシャルピー破面を前出写真-6 の実大試験体の破面と比較すると、延性破面から脆性破面への遷移状態がそっくりである。

次に、レーザー顕微鏡を用いて上記の実大試験体破面とシャルピー破面の凹凸形状を測定した。各々の試料のディンプル部分とリ

(1) -40℃ (下部棚)

(2) -20℃ (遷移域の下部)

(3) ±0℃ (遷移域の上部)

(4) +20℃ (上部棚)

写真-5 シャルピー衝撃試験片のマクロおよびミクロ破面
(左:マクロ破面, 右:ノッチ底ミクロ破面)

バー部分が写真-8(1)~(4)に掲載されている。各写真において、左右の▷と◁を結ぶライン上で表面起伏が測定されており、2本の縦線の間が測定区間(間隔 $x=20$ ミクロン)、2本の横線が最高および最低の高さレベルを指しており、その間隔 Δ が高低差となる。これ

写真-6 実大破壊試験体の破面

写真-7 実大破壊試験体から採取したシャルピー試験片の破面

図-3 実大破壊試験の荷重と変形の関係

図-4 シャルピー試験片の採取位置と方向

を見ると、ディンプル破面には数ミクロンの高低差をもった起伏があるが、リバー破面は平坦で起伏は十分の数ミクロンである。この起伏の状態は実大試験体破面とシャルピー破面ではほぼ同じである。

6. 結論

シャルピー衝撃試験片と実大鉄骨部材の破面を比較したところ、両者は寸法や載荷速度、破壊起点のノッチ形状が異なるにもかかわらず、極めて類似した破面形態を呈することが破面解析により判明した。つまり、両者ともに破壊のプロセスがひずみ集中部における延性き裂の発生、成長、脆性破壊への転化という3段階の共通の現象から構成されている。しかも、同じ鋼材の場合には、延性ディンプル破面と脆性リバー破面それぞれについてシャルピー試験片と実大部材はほぼ同じ起伏形状になっていることが確認された。このような破面形成のプロセスと破面形態に関するシャルピー試験片と実大部材の類似性は、シャルピー試験結果が実構造物の破壊性能の評価に直接利用できる合理的な根拠を与えるものと考えられる。

今後は、シャルピー衝撃試験から得られる吸収エネルギーや脆性破面率が実大構造物の破壊性能とどのような関係があるかについて定量化する課題に取り組む必要がある。

謝辞

SEM解析において東京大学総合試験所技官高橋ツタ氏の協力を得た。レーザー形状測定において(株)キーエンス吉岡伸幸氏の協力を得た。本論で用いた実大破壊試験データの一部は、破断総プロ「材料・溶接と破断」分科会(主査:桑村 仁)の成果²⁰⁾から引用したものである。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 東京大学工学部総合試験所建築方面研究室:『シャルピー試験の鉄骨破断現象への適用に関する調査研究報告書』, 1997.10
- 2) 伊山 潤, 桑村 仁:シャルピー衝撃試験片の破面特性, 1997年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.93-96, 1998.2
- 3) 日本建築学会:『1995年兵庫県南部地震災害調査速報』, 1995.3
- 4) 東京大学工学部建築学科桑村研究室:『1995年兵庫県南部地震被害調査報告 一構造物の被害一』, 1995.5
- 5) Kuwamura, H.: Steel Properties Governing Structural Behaviors, in *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, Stessa '97 Kyoto, pp. 119-129, 1997.8
- 6) Charpy, M.G.: On Testing Metals by the Bending of Notched Bars (translated from Charpy's French paper by Towers, O.L. and McSweeney, S.), *International Journal of Fracture*, Vol. 25, No. 4, pp. 287-305, 1984.8
- 7) Griffith, A.A.: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, *Philosophical Trans. of the Royal Society of London*, Series A, Vol. 221, pp.163-198, 1921.3
- 8) Irwin, G.R.: Fracture Dynamics, in *Fracturing of Metals*, American Society of Metals, Cleveland, pp.147-166, 1948
- 9) Orowan, E.: Fracture and Strength of Solids, *Reports on Progress in Physics*, The Physical Society, London, Vol. 12, pp.185-232, 1949

(1) 実大破壊試験体のディンプル破面 ($z=4.36\mu\text{m}$)

(2) シャルピー試験片のディンプル破面 ($z=5.12\mu\text{m}$)

(3) 実大破壊試験体のリバー破面 ($z=0.66\mu\text{m}$)

(4) シャルピー試験片のリバー破面 ($z=0.28\mu\text{m}$)

写真-8 レーザーによる破面の起伏測定 (測定長 $x=20\mu\text{m}$)

- 10) Irwin, G.R.: Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp. 361-364, 1957.9
- 11) Westergaard, H.M.: Bearing Pressures and Cracks, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 6, pp.A49-A53, 1939.6
- 12) Barsom, J.M., and Rolfe, S.T.: *Fracture and Fatigue Control in Structures*, 2nd Ed., Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1987
- 13) 桑村 仁:鉄骨破断のとらえ方, 日本建築構造技術者協会 structure, No. 65, pp.27-30, 1998.1
- 14) Kuwamura, H. and Yamamoto, K.: Ductile Crack as Trigger of Brittle Fracture in Steel, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp.729-735, 1997.6
- 15) 桑村 仁:地震時における鋼構造骨組の破壊現象 一材料的側面からの破壊原因と対策一, 日本建築学会大会 PD 講演資料, pp.33-46, 1995.8
- 16) 東京大学工学部総合試験所建築方面研究室:『SN 鋼箱形断面部材の構造性能に関する研究 その3. 通しダイアフラム形式の破壊特性』, 1996.10
- 17) 日本建築学会:『阪神・淡路大震災調査報告 建築-3』鉄骨造建築物-第4章個別事例, 1997.10
- 18) 桑村 仁, 伊山 潤, 横山幸夫:高層建築における柱-梁溶接仕口の脆性破壊, 日本鋼構造協会鋼構造論文集, Vol. 4, pp.1-16, 1997.12
- 19) 稲葉雄一郎, 伊山 潤, 桑村 仁:熱間成形及び冷間成形角形鋼管の局部座屈後破断に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), No. 22257, pp.513-514, 1997.9
- 20) 松井康治, 伊山 潤, 桑村 仁:建築構造用鋼材の脆性破壊に及ぼす寸法効果に関する実験的研究, 1997年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 97-100, 1998.2

(1997年12月8日原稿受理, 1998年1月30日採用決定)