

## 展望・総説・総論

# 球状黒鉛鑄鉄における切欠き強度の新たな評価方法（2）

池田 朋弘\*・野田 尚昭†・佐野 義一‡

### 1. シャルピー衝撃試験について

シャルピー衝撃試験は、切欠き付き（一般的にはVノッチ）の角柱状試験片を図1.1に示すように振り子式のハンマーにより高速で衝撃負荷を与えて破壊させる試験である。試験片の破壊に要したエネルギーとして得られる吸収エネルギー値を靱性の尺度として用いる。また、破面における延性破面と脆性破面の割合も評価する。鉄鋼材料などのbcc金属では吸収エネルギー値や破面率が温度低下に伴い遷移するため、その遷移曲線を求める場合もある。試験手順が簡便であることより、実際の事故との対比データや各種材料の豊富なデータがシャルピー衝撃試験により蓄積されており、シャルピー衝撃試験は、材料の比較評価として利用し易い。鋼材同様、一部の球状黒鉛鑄鉄材では、JIS規格や各社独自の製品規格値において、所定の温度でのシャルピー吸収エネルギー値が定められている。例えば、球状黒鉛鑄鉄品のJIS規格では、引張強さが350MPaや400MPa級の低強度材料において、所定の温度でのシャルピー吸収エネルギー値を規定したものが<sup>1)</sup>。脆性破壊を未然に防ぐための一環として、いわゆる材料の品質管理を目的としたシャルピー衝撃試験の利用が各種産業分野で広く行われている。慣習的にシャルピー衝撃試験が用いられる機会は依然として多く、第1回で述べたように、新用途や新材料の実用化において、候補材のシャルピー吸収エネルギー値が従来材と比べて低いことで、設計技術者が

候補材の脆性破壊に対して大きな不安を持ち、材料開発をミスリードしかねない。そのため、シャルピー衝撃試験における吸収エネルギー値や試験方法の力学的意義の曖昧さを工学的に正しく認識することが重要と考える。

シャルピー衝撃試験は、1901年にフランスのG. Charpyによって提案され、その後、1940年代に脆性破壊事故が溶接構造物で顕在化し始めたことで、試験方法の簡便さから工業的に普及し、定着していった。代表的な例は、第二次世界大戦中に相次いで生じた溶接船の脆性破壊事故である。当時、原因究明と対策が進められた際、英国の船級協会(Lloyd's register of shipping)は、図1.2に示すように、破壊した実船から採取した鋼材を破壊時の温度条件でシャルピー衝撃試験した結果よりシャルピー吸収エネルギー値47J以上が脆性破壊発生防止の目安となることを提示した<sup>2)</sup>。その後、諸外国や各協会ですこれを踏襲した形の規格が多く用いられるようになったが、根拠が不明確なものもあり、シャルピー吸収エネルギー値についての規定には、経験的な値を要求しているものが多いと指摘されている<sup>3)</sup>。このように、シャルピー吸収エネルギー値は脆性破壊に対する相対評価には用いることができても、強度設計において、設計

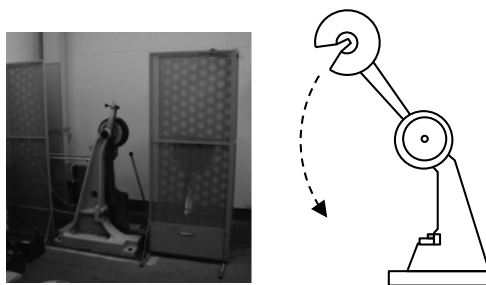
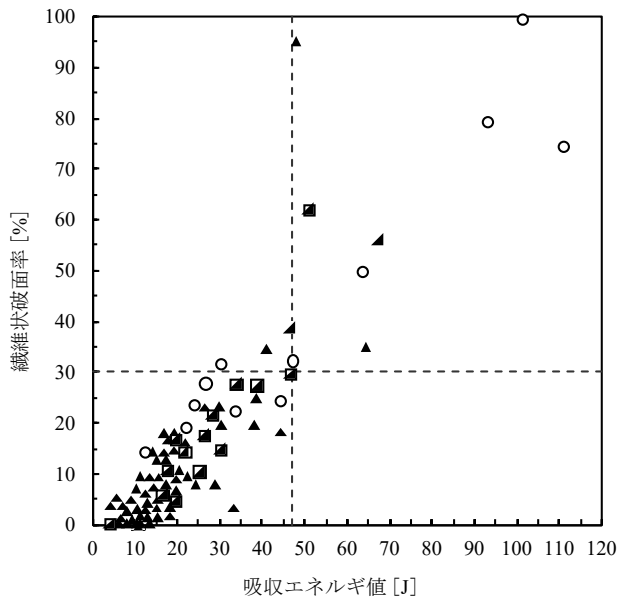
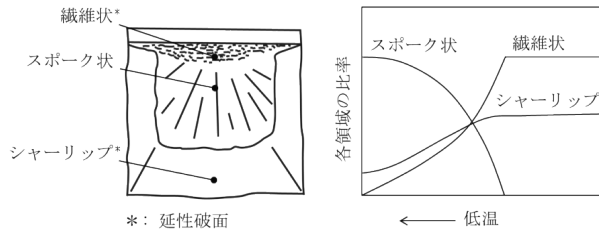


図 1.1 シャルピー衝撃試験機

\* 日之出水道機器株式会社 R&D 総合センター  
(Tomohiro Ikeda)

† 九州工業大学 大学院工学研究院  
機械知能工学研究系 教授  
(Nao-Aki Noda)

‡ 九州工業大学 大学院工学研究院  
機械知能工学研究系  
(Yoshikazu Sano)



- : 破壊様式が延性的あるいは突入してきた脆性破壊が停止した鋼板
- ▲ : 脆性破壊が完全に伝播した鋼板
- : 両者の中間

図 1.2 船体用鋼板について損傷時の温度において実施した V ノッチシャルピー衝撃試験での試験片の繊維状破面率と吸収エネルギー値の関係<sup>3), 4)</sup>

強度尺度としてふさわしいとされる根拠を見出すことができない。

設計条件の中で、製品の用いられる温度と負荷速度は脆性破壊における基本要因である。ところで、シャルピー衝撃試験は振り子式のハンマーにより試験片を破壊させる手法であるため、実際に部材が受ける負荷条件に合わせて試験負荷速度を任意に変えることが困難である。したがって、シャルピー衝撃試験は、往々にして実際とはかけ離れた負荷速度（ひずみ速度）条件下での評価となる場合がある。なお、ここでは、部材の受ける負荷速度についてひずみ速度で表し、説明を進める。表 1.1 に、シャルピー衝撃試験のひずみ速度

を鋼構造部材の中でも厳しい負荷が想定される柱・梁溶接止端部の受けるひずみ速度と比較して示す<sup>5)~8)</sup>。表 1.1 より、シャルピー衝撃試験では、ひずみ速度が構造用材料の安全性を保証するためのひずみ速度の上限値を大きく上回り、構造用材料の強度・靱性面の高速側適用限界を適切に把握できないことが明らかである。近年、高分子材料分野では、従来のアイゾットシャルピー衝撃試験が実際とはかけ離れたひずみ速度条件下での評価となるため、製品の受ける負荷速度を考慮した高速引張試験による材料強度評価が行われている<sup>9)~11)</sup>。このように、過去には実施できなかった手法が、近年では試験装置の高性能化により実施可

表 1.1 シャルピー衝撃試験と実使用環境のひずみ速度<sup>4)~7)</sup>

事例		ひずみ速度 [s <sup>-1</sup> ]
設計	柱・梁溶接止端部	~10 <sup>0</sup> オーダー
試験	シャルピー衝撃試験	10 <sup>2</sup> オーダー~

能となってきた。

シャルピー衝撃試験は、試験の簡便さ、迅速さやこれまでの豊富なデータの蓄積などの点より材料の品質管理として有用であるが、これを設計強度評価法として用いることには、上述のような問題点がある。

## 2. 球状黒鉛鑄鉄の脆性破壊をはじめとする一発破壊に対する強度設計上の課題

溶接品などの潜在的なき裂状の欠陥を有する製品では、製品の脆性破壊を防ぐための破壊靱性を適用した評価やこれに関連付けられた規格値の設定が行われ、欠陥に対し、力学的な合理性に基づいた設計が実施されている<sup>12)</sup>。限定的ではあるが、球状黒鉛鑄鉄においても、原子力用使用済燃料等輸送・貯蔵容器（キャスク）において、脆性破壊に対する破壊力学を用いた設計検討の実績がある<sup>13)</sup>。しかしながら、球状黒鉛鑄鉄品においては、球状黒鉛鑄鉄への破壊力学を用いた設計手法は脆性破壊に対して普及しておらず、現状の設計に用いられる特性値と直結した簡便な強度評価法が新たに必要である。

球状黒鉛鑄鉄品の設計においては、鋼材と同様、耐力や引張強さなどの引張特性に関連する値が必要とされる。また、球状黒鉛鑄鉄品には図 2.1 に示すようにリブや肉厚変化部、コーナー部を有するものが多く存在し<sup>14)</sup>、高負荷を受ける部位に応力集中部を含む場合があるため、切欠き材の強度を把握することが重要である。切欠き材は、平滑材に比べて強くなる場合と弱くなる場合がある<sup>15)~17)</sup>。図 2.2 に球状黒鉛鑄鉄の切欠き材と平滑材の強度を引張試験により比較した結果を示す。図 2.2 に示した試験片形状は、平滑部と切欠き底部において同じ断面積を有する丸棒試験片である。図 2.2 の試験片について、疲労試験においては応力集中により切欠き部で破壊することが容易に想

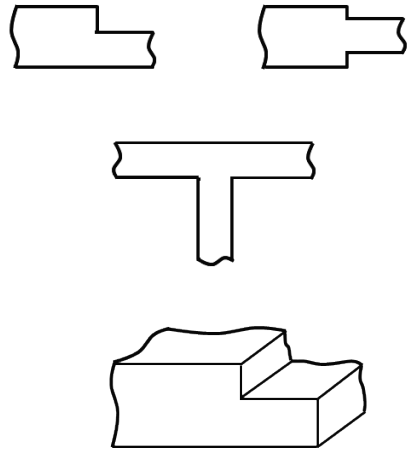


図 2.1 鑄造品の応力集中部<sup>13)</sup>

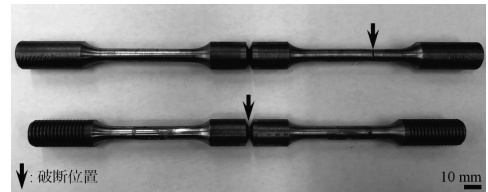


図 2.2 切欠き材と平滑材の強度比較の例

定されるが、通常の引張試験（常温、静的）においては、球状黒鉛鑄鉄などの延性材料では切欠き強化により平滑部よりも切欠き部の方が破断荷重が高くなり、平滑部で破断する。このことはあまり広く知られていない。しかしながら、温度低下やひずみ速度上昇に伴い材料が脆性的破壊を示すようになると、切欠き部で破断ようになる。したがって、ひずみ速度や温度の変化に伴う切欠き材の強度を把握することは、応力集中部における一発破壊を評価する場合、設計上重要である。鋼では、温度のみではなく、ひずみ速度の影響も考慮した設計検討が行われているが、球状黒鉛鑄鉄では構造体としての設計基準が一般化されていない。例えば、近年新材料として構造部材への適用が期待されている高 Si 球状黒鉛鑄鉄においても、切欠き材強度や平滑材強度に及ぼすひずみ速度と温度の影響に関する知見は少なく、もとより球状黒鉛鑄鉄全般で見てもほとんど調査されていない。したがって、高 Si 球状黒鉛鑄鉄のこれら強度特性に及ぼすひずみ速度と温度の影響を明ら

かにすることは、同材料の適用範囲を正しく判断する上で重要な知見となる。また、得られた知見は、一般的な球状黒鉛鋳鉄の実用上での評価を行う上でも有用と考える。

### 3. シャルピー衝撃試験に代わる合理的強度評価法の検討

これまでに、一発破壊（中でも脆性破壊）に対す材料の品質管理の一環としてシャルピー衝撃試験が普及していることを述べ、これが近年の球状黒鉛鋳鉄における新用途や新材料および代替材料の実用化において大きな妨げになっていることを述べた。あわせて、このシャルピー衝撃試験を設計強度評価法として用いることは、合理的ではないことも述べてきた。したがって、球状黒鉛鋳鉄の一発破壊に対し、温度条件だけではなくひずみ速度条件にも着目し、切欠き影響を考慮した設計強度評価法に基づき、対象材の構造材料としての安全性と適用範囲を明示することが必要とされている。そこで著者らは、近年、この課題に対するひとつの解決策として、球状黒鉛鋳鉄の一発破壊に対し、平滑材と切欠き材の強度を温度とひずみ速度の条件を変えて比較し考察している。

次号以降で、本提案に関する筆者らの研究実績を中心に紹介する。まず、近年将来性が注目されながら脆性破壊に対して不安視されている高 Si 球状黒鉛鋳鉄を題材に、同材料の切欠き強度・靱性に及ぼすひずみ速度と温度の影響について報告する。そして、球状黒鉛鋳鉄の脆性破壊に対する設計強度評価法について検討する。さらに、本評価手法の一般球状黒鉛鋳鉄への展開を試みる。

#### 参考文献

- 1) 日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼 I JIS G 5502 (2001) 球状黒鉛鋳鉄品 (2013) p.1880.
- 2) J. Hodgson and G. M. Boyd: "Brittle Fracture in Welded Ships", Transactions of the Institution of Naval Architects, 100, 3 (1958) p.141.
- 3) 金沢 武：「鋼材の破壊靱性値評価法と溶接構造物の欠陥評価」, 鉄と鋼, 64, 7 (1978) p.990.
- 4) 吉田 亨：金属破面の見方, 日刊工業新聞社 (1990) p.51.
- 5) 大畑 充・澤 靖典・高嶋康人・南二三吉：「シャルピー衝撃試験と破壊力学靱性試験の延性・脆性破壊遷移温度相関に及ぼす鋼材特性の影響の評価モデルの提案」, 日本船舶海洋工学論文集, 4 (2006) p.277.
- 6) 杉浦伸康・小林俊郎・山本 勇・西戸誠志・林 勝三：「AC4CH-T6 アルミニウム合金鋳物の衝撃引張り及び三点曲げ特性」, 軽金属, 45, 11 (1995) p.638.
- 7) 豊田政男：「材料・溶接施工からみた阪神・淡路大震災における建築鉄骨損傷：被害から何を学ぶか」, あたりあ, 35, 4 (1996), p.370.
- 8) 岡下勝彦・大南亮一・道場康二・山本晃久・富松実・丹治康行・三木千壽：「兵庫県南部地震による神戸港湾幹線道路 p75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討」, 土木学会論文集, 591 (1998) p.243.
- 9) 野田尚昭・大塚 駿・安藤誠人・佐野義一・高瀬康, 篠崎貴宏, 菅 文海：「高速引張試験における切欠き試験片の動的応力集中とひずみ速度集中の解析」, 日本機械学会論文集 A 編, 79, 804 (2013) p.1182.
- 10) 安藤誠人・野田尚昭・黒島義人・石川康弘・竹田英俊：「ポリジメチルシロキサンを共重合したポリカーボネートの衝撃特性と時間-温度換算則の適用」, 日本機械学会論文集, 80, 814 (2014) DOI: 10.1299/transjsmc.2014smm0149.
- 11) N.-A. Noda, H. Ohtsuka, H. Zheng, Y. Sano, M. Ando, T. Shinozaki and W. Guan: "Strain rate concentration and dynamic stress concentration for double-edge-notched specimens subjected to high-speed tensile loads", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 38 (2015) p.125.
- 12) 日本溶接協会：WES 2805-2011 溶接接手のぜい性破壊及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法 (2011) p.1.
- 13) 電力中央研究所鋳鉄キャスク品質保証研究会：鋳鉄キャスクの品質保証に関する研究 (その 1) 昭和 61 年度成果報告書 (1987) p.372.
- 14) 日本規格協会：鋳造品の丸み JIS B 0703 (1987) p.2.
- 15) 村上敬宜：応力集中の考え方, 養賢堂 (2005) p.136.
- 16) 野田尚昭・高瀬 康：設計に活かす切欠き・段付き部の材料強度, 日刊工業新聞社 (2010) p.4.
- 17) X. Lei, C. Li, X. Shi, X. Xu and Y. Wei: "Notch strengthening or weakening governed by transition of shear failure to normal mode fracture", Scientific Reports, 5 (2015) doi: 10.1038/srep10537.