高強度鋼切欠き材の衝撃強度†

熊 沢 道 夫* 吉 岡 純 夫*
出 水 通 之 輔** 山 崎 真 治***

Impact Strength for Notched High Strength Steel

by

Michio KUMASAWA*, Sumio YOSHIOKA*, Michinosuke DEMIZU**
and Shinji YAMASAKI***

An instrumented impact charpy test was carried out to evaluate the effects of the notch shape, hardness, and carburized depth on the impact bending strength of notched high strength steels (SCM 440 and SCM415 steels).

The principal results were as follows:

(1) The impact bending strength of the notched high strength steel was in near proportion to the tensile strength of the material, having no direct corresponding relationship with the absorbed impact energy.

(2) However, the impact bending strength showed an ultimate value which is determined by the notch shape and the tensile strength of the material, and a proportional relationship existed between the impact bending strength and tensile strength below this ultimate value.

(3) The impact bending strength of the carburized SCM415 steel showed a value of about 10% larger than the static bending strength. On the other hand, the impact bending strength of the SCM440 steel showed a value of about 10% smaller than the static bending strength, and this tendency was contrary to the general trend.

(4) The result of fractographic observation by SEM showed that the width of the DIZ (ductile initiation zone between notch root and unstable fracture area) depended largely upon the notch shape and that only the data at such high strength levels as HRC=53 and 55 were in proportion to the impact bending strength.

キー・ワード：衝撃曲げ強さ，計装化シャルピー衝撃試験，高強度鋼，フラクトグラフィ

1 緒 言

材料を選択する際の一つの基準であるじん性を評価する目的でシャルピー衝撃試験は広く行われている。しかし、衝撃試験で得られる衝撃吸収エネルギーは、直接的に材料の衝撃破断荷重を表す値でないため、衝撃荷重下の瞬時破壊を想定した機器の載荷能力を評価するパラメータとして用いることができない。

一方、計装化シャルピー衝撃試験は、試験中の荷重や試験片の変位が測定できるため、衝撃荷重下の材料の載荷能力を評価する目的で近年盛んに行われるようになってきている。

ところで、機械要素部品として多用される歯車を例にとれば、機械装置の小形化を図るため歯車は小形（高負荷化）、高硬化化（高強度化）される傾向があり、その使用方法によっては、衝撃荷重による瞬時破壊に対する載荷能力の評価が設計上の重要な課題となるこ

とがある。このような場合には、高強度切欠き材としての歯車材の衝撃載荷特性を必要とするが、設計に必要なこの種のデータで公表されているものは、ほとんどないのが実状である。

そこで、高強度切欠き材の衝撃荷重下における瞬時破壊に対する載荷能力の評価方法を検討するために、静的強度（硬度）や切欠き形状を変えた試験片を用いた計装化シャルピー衝撃試験を行い高強度切欠き材の吸収エネルギー、衝撃破断強度を求めることにした。

本報はこれらの試験の結果明らかになった高強度切欠き材の衝撃破断強度におよぼす静的強度、切欠き形状、吸収エネルギーなどの影響や破面様相との対応関係について検討した結果である。

2 供試材と試験片

衝撃試験に用いた材料は、SCM440 鋼および SCM 415 鋼であり、いずれも市販の丸棒材（直径 19 mm）

† 原稿受理 昭和59年8月23日 Received Aug. 23, 1984

* 正 会 員 三菱電機(株)中央研究所 尼崎市塚口本町, Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Co., Tsukaguchiommachi, Amagasaki

** 正 会 員 三菱電機(株)材料研究所 尼崎市塚口本町, Material Engineering Laboratory, Mitsubishi Electric Co., Tsukaguchiommachi, Amagasaki

*** 正 会 員 三菱電機(株)稲沢製作所 稲沢市菱町, Inazawa Works, Mitsubishi Electric Co., Inazawa

である。これらの化学成分を Table I に示す。試験片はこの丸棒材の軸方向から切り出し、衝撃試験片として仕上げ加工した後、Table II, III に示す条件で熱処理し、SCM440 鋼については 4 種類の硬度を、SCM415 鋼については 2 種類の浸炭深さを得た。SCM440 鋼の各硬度ごとの引張特性を Table IV に示す。

Table I. Chemical composition (wt%).

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM 440	0.38	0.23	0.72	0.021	0.012	1.04	0.19
SCM 415	0.15	0.24	0.71	0.015	0.014	0.99	0.18

Table II. Condition of heat treatment for SCM440 specimen.

Hardness HRC	Condition
55	850°C×15 min (solt bath), WQ 150°C×1 hr, AC
53	870°C×15 min, OQ 150°C×2 hr, OT
44	870°C×15 min, OQ 150°C×2 hr, OT
31	860°C×15 min, OQ 600°C×2 hr, OT

WQ: water quenching AC: air cooling
OQ: oil quenching OT: oil tempering

Table III. Conditions of carburizing treatment for SCM415 specimen.

Effective carburized depth	Conditions
0.8 mm	1 930°C×2.7 hr, 0.35% CO ₂ 2 850°C×30 min, 1% CO ₂ , OQ 3 150°C×1.5 hr, AC
0.4 mm	1 900°C×1.2 hr, 0.40% CO ₂ 2 850°C×30 min, 1% CO ₂ , OQ 3 150°C×1.7 hr, AC

OQ: oil quenching AC: air cooling

Table IV. Mechanical properties of SCM440.

Hardness HRC	Yield* strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
55	—	212.1	17	53
53	137.9	199.4	12	41
44	137.5	149.4	14	46
31	70.2	91.5	18	58

* 0.2% proof stress

Fig. 1. Configuration and dimensions of test specimens.

衝撃試験片の切欠き形状は、Fig. 1 に示す V 切欠き (応力集中係数 $\alpha=3.45$)、U 切欠き ($\alpha=2.10$)、半径 5 mm、深さ 2 mm の切欠き ($\alpha=1.39$ 、以下、C 切欠きと略記する) の 3 種類とし、吸収エネルギー、衝撃破断強度におよぼす切欠きの影響を求めるために用いた。

計装化シャルピー衝撃試験は、東京衡機製 ICA-50I 型 50 kgf・m 計装化シャルピー衝撃試験機を用いて室温 (25°C) で行った。また、別途 -30~180°C の温度範囲で吸収エネルギー、ぜい性破面率の温度依存性を非計装化シャルピー衝撃試験機 (30 kgf・m) で求めた。

3 衝撃試験結果

V, U, C 切欠きを有し、硬度が異なる SCM440 焼入れ、焼もどし材の温度範囲 -30~180°C で行ったシャルピー衝撃試験の結果の一部を Fig. 2 に示す。各硬度とも V, U 切欠き材の吸収エネルギーのレベルは低く、室温、-30°C ではぜい性破面が支配的である。C 切欠き材は吸収エネルギーのレベルが高く、延性破面が支配的である。また、吸収エネルギーの温度依存性は各切欠きとも試験の範囲内では顕著でないが、ぜい性破面率の温度依存性はやや認められる。

Fig. 2. Charpy impact test results for SCM440.

計装化衝撃試験で得られた SCM440 鋼の室温での各切欠き材の衝撃曲げ強さ、吸収エネルギーを Fig. 3 に示す。衝撃曲げ強さは、試験で得られた荷重-変位線図の最大荷重から、三点曲げを受けるはりの切欠き底の公称応力として求めたものである。Fig. 3 から明らかなように、衝撃曲げ強さは材料の硬度 (強度) に依存し、硬度が高くなる程大きくなる傾向を示している。

Fig. 3. Instrumented charpy impact test results for SCM440.

また、硬度が高い HRC=55, 53 の材料では、切欠き形状すなわち、切欠きの応力集中係数にもやや顕著に依存している。一方、吸収エネルギーについては、硬度の依存性はほとんど認められず、各切欠き形状に対応する応力集中係数の大きさに対する依存性を強く示している。

4 破面観察結果

吸収エネルギーの温度依存性を求めた SCM440 鋼試験片のマクロな破面写真の代表例 (HRC=44) を Fig. 4 に示す。マクロな破面の様相は切欠き形状、硬度、温度の影響を強く受け、硬度が高く、応力集中係数が高い程、また、温度が低い程、平坦でぜい性的な破面が支配的である。

走査型電子顕微鏡 (SEM) による破面観察の代表例

を Fig. 5 に示す。切欠き底と不安定破壊領域との間に Fig. 5 (b) に示すような細かいディンプルが存在し、破面が傾斜している Ductile initiation zone²⁾ (以下、DIZ と略記する。) と呼ばれる領域が存在する。切欠き底からやや離れた領域あるいは破面中央部での不安定破壊領域では、Fig. 5 (c), (d) に示すようなディンプル、粒界割れパターンが混在している。この領域では試験片によっては擬へき開パターンが現れることもあり、硬度、切欠き形状、温度によって破面様相が変化し、その破面率も変化しているようである。最終破断部は Fig. 5 (e) に示すようにせん断破壊によるディンプルパターンとなっている。

5 検 討

5・1 衝撃曲げ強さ、吸収エネルギーと引張強さの関係

SCM440 鋼の衝撃曲げ強さ、吸収エネルギーと試験片材料の引張強さの関係を Fig. 6 に示す。衝撃曲げ強さは各切欠き材とも引張強さの増加とともに大きくなる。特に、C 切欠き材では、試験の範囲で衝撃曲げ強さは引張強さの増加とともに直線的に上昇している。一方、V, U 切欠き材では、引張強さの増加とともに衝撃曲げ強さが増加するが、V 切欠き材では、引張強さが 140 kgf/mm² 以上で、U 切欠き材では、200 kgf/mm² 以上で衝撃曲げ強さが飽和する傾向を示している。また、同様な現象は軸受鋼 (SUJ2) の U 切欠き材を用いた計装化衝撃試験でも得られており、この場合は引張強さが 210 kgf/mm² 以上で衝撃曲げ強さが低下している³⁾。

これらの結果から、切欠き材の衝撃曲げ強さには、切欠きの応力集中係数と引張強さで決まる限界値が存在すると考えられ、この限界値以下の範囲では、低い吸収エネルギーを示す鋭い切欠き材でも、その衝撃曲げ強さは材料の引張強さにほぼ比例した大きさを示すと言える。

Fig. 4. Macroscopic feature of fracture surface. (HRC=44)

Fig. 5. Fractographs of impact fractured specimen. (U-notch, HRC=44, 25°C)

Fig. 6. Relation among ultimate impact (bending) stress, absorbed energy and tensile strength for SCM440.

一般に、鋼材の硬度は、耐摩耗性、耐疲労性などの観点から決定されるが、衝撃荷重による瞬時破壊に対しては、上記検討に基づく最適硬度（最適引張強さ）がその強度評価の一つの基準になると考えられる。

一方、吸収エネルギーについては、引張強さに依存せず、切欠き形状に対応してほぼ一定の大きさと見なせる。なお、HRC=44, 31 では、切欠き形状に関係なく衝撃曲げ強さは、ほぼ一定の値を示しているのに対

Fig. 7. Relation between ultimate impact (bending) stress and ultimate static (bending) stress for SCM440 and SCM415.

し、吸収エネルギーが大きく異なるのは、切欠き形状によって衝撃破断時の塑性変形量が大きく異なるためである。特に、塑性変形をほとんど示さず最大荷重点で破断するV切欠き材と最大荷重点までにも塑性変形を生じ、それ以後も大きな変形を示すU, C切欠き材との変形挙動の違いを考えると吸収エネルギーが載荷能力の指標となる衝撃曲げ強さに対応しないことは容易に理解できる。

5・2 衝撃曲げ強さと静的曲げ強さの関係

SCM440 鋼焼入れ、焼もどし材、SCM415 鋼浸炭材の各切欠き材の衝撃曲げ強さと静的曲げ強さの関係を Fig. 7 に示す。

SCM440 鋼では、衝撃曲げ強さは硬度、応力集中係数の各レベルとも静的曲げ強さより小さく、本実験の範囲では、試験値の平均値を採れば衝撃曲げ強さは、静的曲げ強さの約90%となっている。一方、SCM415

鋼浸炭材の衝撃曲げ強さは浸炭深さ、応力集中の各レベルとも静的曲げ強さよりも大きく SCM440 鋼とは対照的な挙動を示している。

さて、SCM440 鋼の衝撃曲げ強さが静的曲げ強さより小さくなる現象は、衝撃強度が静的強度より大きいという一般的な現象⁴⁾とは逆の結果である。しかし、このような結果は S45C 焼なまし材を用いた -196°C から 40°C での衝撃試験⁵⁾でも得られており、この場合は、室温近傍で両曲げ強さの大小関係が逆転している。したがって、この衝撃強度が静的強度より小さくなる現象は限られた条件下で現れるものと思われ、機器の実用設計に際して留意すべき現象と考えられる。

一方、SCM415 鋼浸炭材については、衝撃曲げ強さと静的曲げ強さの大小関係は、上記した一般的な現象と一致するものである。しかし、浸炭材の曲げ試験では、全体的な破壊の前に浸炭層で、き裂が先行して発生するため、その効果を考慮すると、浸炭材でのこの両曲げ強さの大小関係は、本質的には、一般的な現象のそれとは異質なものと考えられる。

SCM440 鋼での衝撃曲げ強さと静的曲げ強さの大小関係逆転のメカニズム、SCM415 鋼浸炭材での浸炭層のき裂の発生を考慮した両曲げ強さの大小関係の現れ方については本実験の範囲では明らかでなく、今後の検討課題と考える。

5・3 DIZ 幅と温度、硬度、衝撃曲げ強さの関係

機械的な特性と破面との相関を求めるために、ここでは SCM440 鋼の DIZ の幅について温度、硬度、衝撃曲げ強さとの関係を検討してみた。

DIZ 幅の温度依存性を、HRC=44 について Fig. 8 に示す。DIZ 幅の大きさは切欠き形状に依存するが、同一形状では温度依存性は顕著に認められず、他の硬度でも同様の傾向を示している。DIZ 幅と試験片の硬度との関係を Fig. 9 に示す。V 切欠き材では、硬度に関係なく DIZ 幅はほぼ一定の値を示すが、U、V 切欠き材では、硬度が低くなるに従い DIZ 幅は大きくなり、C 切欠き材でこの傾向が著しい。

DIZ 幅と衝撃曲げ強さの関係を Fig. 10 に示す。

Fig. 8. Relation between DIZ and test temperature for SCM440.

Fig. 9. Relation between DIZ and hardness of specimen for SCM440.

Fig. 10. Relation between DIZ and ultimate impact (bending) stress for SCM440. (25°C)

HRC=55, 53 では DIZ 幅と衝撃曲げ強さは比例関係を示し、HRC=44, 31 ではこれが認められない。これは、衝撃曲げ強さが HRC=44, 31 では切欠き形状の影響を受けず、HRC=55, 53 では切欠き形状の影響を受けるという Fig. 6 に示す結果が反映されたためである。

これらの結果より、DIZ 幅は切欠き形状に支配され、中硬度 (HRC=41) 以下では、衝撃曲げ強さとの対応はないが、HRC=55, 53 の高硬度では、衝撃曲げ強さと比例関係があると言える。

6 結 言

切欠きを有する高強度材料の衝撃荷重下における載荷能力を評価する方法を検討するため、切欠き形状、硬度、浸炭深さを変えた SCM440 鋼、SCM415 鋼を用いて計装化シャルピー衝撃試験を行い、吸収エネルギー、衝撃曲げ強さを求めた。以下、その結果をまとめて示す。

(1) 載荷能力の指標と考えた衝撃曲げ強さは、材料の引張強さにほぼ比例した大きさを示し、吸収エネルギーは、衝撃曲げ強さと直接的な関係がない。(SCM440 鋼)

(2) しかし、この衝撃曲げ強さには、切欠き形状と材料の引張強さで決まる限界値が存在し、上記比例関係はこの限界値以下で成り立つ。そして、耐摩耗性、耐疲労性などの観点から決定される鋼材の硬度に対して、耐衝撃載荷能力としての最適硬度(最適引張強さ)が存在する。この考え方は、耐摩耗性と耐衝撃性を同時に必要とする歯車のような機械要素では重要となる。

(3) SCM415 鋼浸炭材の衝撃曲げ強さは、静的曲げ強さより大きく、SCM440 鋼焼入れ、焼もどし材の衝撃曲げ強さは約10%静的曲げ強さより小さい結果が得られた。SCM440 の衝撃および静的曲げ強さの大小関係は一般的な傾向とは逆のものであり、この挙動は機器の設計に際して留意すべき事項と考えられた。

(4) SEM による破面観察の結果、DIZ の幅は切欠

き形状に依存し、HRC=55, 53 の高強度レベルで衝撃曲げ強さと比例関係がある。

最後に、本研究の計装化衝撃試験にご便宜を図って頂いた住友金属(株)中央技術研究所鋼材研究室関係者に謝意を表します。

(昭和59年6月28日 第4回フラクトグラフィシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば, T.S. DeSisto, "Instrumented Impact Testing", ASTM STP 563 (1973).
- 2) D.M. Fegredo, ASTM STP 453, 60 (1969).
- 3) 猿木勝司, 山田 明, 青山威恒, 日本材料学会第30期学術講演会前刷集, p.79 (1981).
- 4) 茶谷明義, 衝撃と破壊調査研究分科会成果報告書, p.15 (1981) 日本機械学会.
- 5) 加賀瓜俊秀, 田中吉之助, 第23回構造強度に関する講演会前刷集, p.98 (1981) 日本航空宇宙学会, 日本機械学会.