

超高強度 TRIP 型マルテンサイト鋼板のスポット溶接引張せん断強さに及ぼす水素の影響

Effect of hydrogen on tensile shear strength of spot-welded ultrahigh strength TRIP-aided martensitic steel sheet

長野工業高等専門学校・工学科・機械ロボティクス系 長坂 明彦
東北大学金属材料研究所 北條 智彦

1. 緒言

近年、自動車の車体軽量化と衝突安全性の向上を目的として、超高強度部材が求められている。しかしながら、超高強度を有するTRIP型マルテンサイト鋼(TM鋼)¹⁾板の耐水素脆化特性に関する研究は十分に行われていない¹⁾。

そこで、本研究ではTM鋼板のスポット溶接継手の引張せん断強さに及ぼす水素の影響を明らかにすることを目的として、TM鋼板のスポット溶接引張特性の検討を行った。

2. 実験方法

表1に供試鋼の化学組成を示す。表2にスポット溶接条件を示す。図1にスポット溶接継手試験片を示す。図2にスポット溶接継手試験片の水素チャージを示す。TM鋼には、0.22C-1.51Si-1.51Mn-0.003B, mass%を有する冷延鋼板(板厚1.4 mm)を用いた(表1)。TM鋼は、900 °C, 1200 sのオーステナイト化後、250 °C, 200 sの等温変態処理を施した。比較として、0.22C-1.21Mn-0.004B, mass%を有する冷延鋼板を用いた。900 °C, 240 s加熱、金型保持15 sのダイクエンチをしたホットスタンプ鋼(HS1鋼)とその後、700°C, 1 h空冷の焼戻しを施した鋼(HS7鋼)の2種類を作製した¹⁾。

引張せん断試験には、引張せん断試験片(100×30 mm)を30 mm重ねて、スポット溶接(溶接電流6.5 kA)¹⁾後、インストロン型万能試験機によりクロスヘッド速度v=0.5 mm/min～100 mm/minで引張試験を行った(図1、表2)。

水素チャージ試験には、陰極チャージ法により、電流密度10 A/m²で48 h行い、引き続き引張せん断試験を行った(図2)。

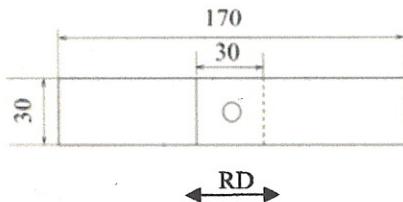


Fig. 1. Geometry of spot-welded joint specimen.

3. 実験結果および考察

図3にTM鋼のミクロ組織SEM写真を示す。表3に供試鋼の母材試験片の機械的特性および炭素当量C_{eq}を示す¹⁾。図4にせん断荷重P-変位S線図を示す。図5にせん断応力τ_f(せん断面の直径6 mm)の比較を示す。TM鋼はマルテンサイトと残留オーステナイトγ_R(γ_Rの体積率f_γ=1.52 vol%, γ_R中の炭素濃度C_γ=0.79 mass%), HS1鋼はマルテンサイト、HS7鋼は焼戻しマルテンサイトの組織からそれぞれなる¹⁾。

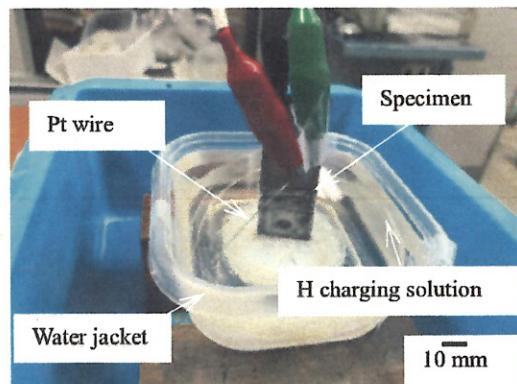


Fig. 2. Appearance of hydrogen charging.

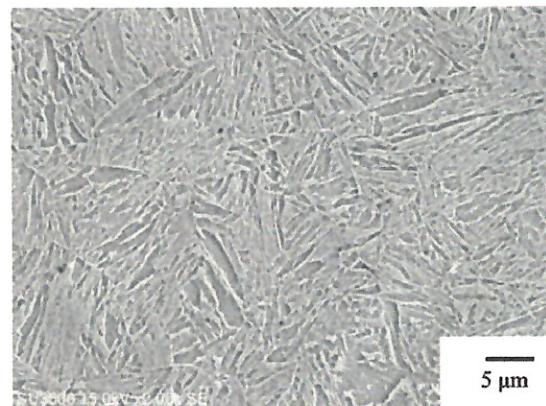


Fig. 3. Scanning electron micrograph of TM steel¹⁾.

Table 1. Chemical compositions of steels used (mass%).

steel	C	Si	Mn	Ti	Cr	B
TM	0.22	1.51	1.51	0.020	0.21	0.003
HS1, HS7	0.22	-	1.21	0.038	0.25	0.004

Table 2. Conditions of spot welding.

Electrode cap	Electrode force	Welding time	Welding current (I)
Cu-Cr DR16×60, 40R	3.0 kN (0.25 MPa)	333 ms (20 cycles/60 Hz)	6.5 kA

表3より、TM鋼は優れた強度・延性バランス $TS \times TEI = 14.4$ GPa%を有する。炭素当量 C_{eq} は次式より求め、0.47~0.58 mass%の範囲である。ここで、[C], [Si], [Mn]および[Cr]は含有量 (mass%) を示す。

$$C_{eq} = [C] + \frac{[Si]}{24} + \frac{[Mn]}{6} + \frac{[Cr]}{5} \quad (1)$$

図4, 5より、水素チャージ無し (without H) のTM鋼は、HS1鋼と比較して、高いせん断応力 τ_f を有する。また、水素チャージ有り (with H) のTM鋼もHS1鋼と比較して、せん断応力 τ_f が高いことがわかる。これは、TM鋼では残留オーステナイト γ_R のTRIP効果が発現したことが一因と考えられる。一方、水素脆化の影響は、TM鋼の方がHS1鋼よりも強度レベルが高いにもかかわらず同程度の低下であると考えられる。

図6にTM鋼のスポット溶接部断面を示す。また、図7にTM鋼の溶接部断面のビッカース硬さHV分布を示す。図7のスポット溶接部の硬さ分布より、TM鋼の母材は、500HV~600HV、HS1鋼の母材は400HV~500HVを有し、溶融部の硬さも母材の硬さとほとんど変わらなかった¹⁾。また、TM鋼、HS1鋼とも溶接熱影響部 (HAZ部) の硬さは、母材よりも低下した¹⁾。水素チャージ有り (with H) のTM鋼およびHS1鋼のせん断応力 τ_f は、HAZ部に高い静水圧応力が作用することで、鋼中の水素は静水圧応力の高い領域に拡散 (水素誘起拡散) する。HAZ部は静水圧応力が高く、水素濃度も高くなることから、き裂の発生を促進し、せん断応力 τ_f が低下したと考えられる。

せん断応力 τ_f の低下は引張速度が低下するにしたがって、水素脆化の影響が大きくなつた。これは、応力に誘起され、水素がき裂発生サイトに拡散する時間が十分にあるためであると考えられる。

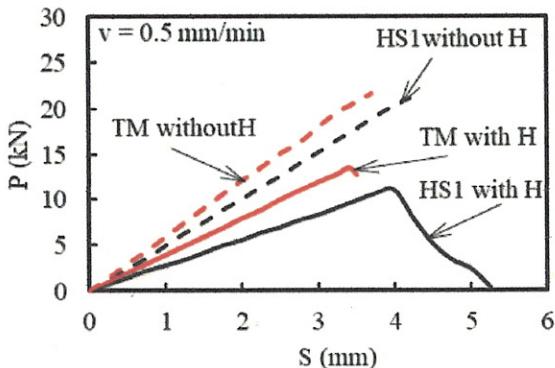


Fig. 4. Tensile shear load (P) - displacement (S) curves for TM and HS1 steels without and with hydrogen.

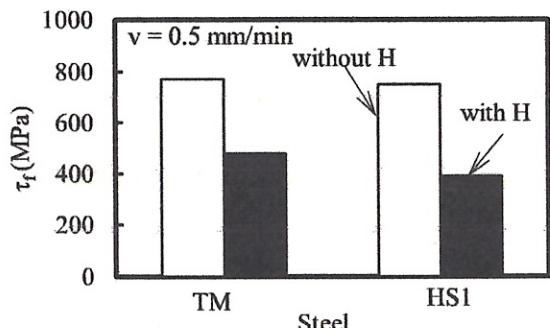


Fig. 5. Tensile shear strength (τ_f) of TM and HS1 steels without and with hydrogen.

4. 結言

(1) TM鋼は、HS1鋼と比較して、高い最大せん断荷重 P_{max} とせん断応力 τ_f を示した。

(2) TM鋼は、水素チャージ無し (without H) と水素チャージ有り (with H) とともにHS1鋼と比較して、せん断応力 τ_f が高いことがわかった。これは、TM鋼が残留オーステナイト γ_R を含む (γ_R 体積率1.52 vol%)ことで、TRIP効果が発現したことが一因と考えられた。一方、水素脆化の影響は、HAZ軟化における応力集中により、HAZ部に水素が拡散しやすいことから、TM鋼とHS1鋼で同程度の低下であったと考えられた。

(3) 引張速度が低下するにしたがって、水素脆化の影響は大きくなつた。これは、応力に誘起され、水素が拡散する時間が十分にあるためであると考えられた。引張速度によらず、TRIP効果が発現し、水素脆化の影響を緩和したと考えられた。

謝辞

最後に、本研究に際しご協力をいただきました（株）神戸製鋼所・自動車ソリューションセンターの内藤純也氏、長野工業高等専門学校の三尾敦氏、高橋一輝氏、荒井琢己氏および細萱幸暉氏にお礼申し上げ、ここに、深謝いたします。

参考文献

- 1) A. Nagasaka et al.: ISIJ Int., 61 (2021), 2644.

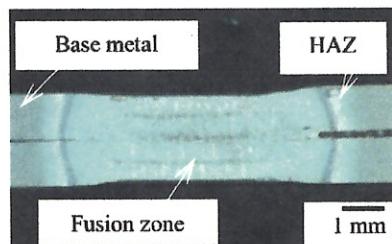


Fig. 6. Cross-sectional image of spot-welded TM steel¹⁾.

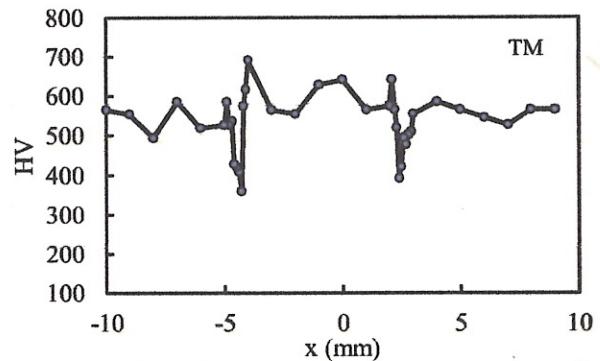


Fig. 7. Vickers hardness (HV) distribution for TM steel¹⁾.

Table 3. Mechanical properties of steel sheets used.

steel	YS (MPa)	TS (MPa)	UEL (%)	TEL (%)	TS × TEL (GPa %)	C_{eq} (mass%)
TM	1180	1532	5.6	9.4	14.4	0.58
HS1	1095	1469	6.5	7.7	11.3	0.47
HS7	521	559	13.7	22.4	12.5	0.47

YS: yield stress or 0.2% offset proof stress, TS: tensile strength,

UEL: uniform elongation, TEL: total elongation,

TS × TEL: strength-ductility balance and C_{eq} : carbon equivalent.