

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 3日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656342

研究課題名（和文） 鋼材の表面強化による脆性破断防止手法の可能性

研究課題名（英文） Availability of brittle fracture prevention
by reinforcement on steel surface

研究代表者

崎野 良比呂 (SAKINO YOSHIHIRO)

大阪大学・接合科学研究所・講師

研究者番号：80273712

研究成果の概要（和文）：

レーザーパルスを鋼材表面に当てて強化することにより、ガラスのような脆い破壊を防止できるか否かを基礎的実験により検討した。その結果、研究で用いた鋼材、試験片形状およびパラメータの範囲では、破壊までの変形を大きくする効果期待できる場合もあるが、材料が脆く温度も低いという非常に厳しい条件では逆に脆い破壊を早期に生じさせてしまう場合もあることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

Basic experiments were conducted to make clear a possibility of brittle fracture prevention by reinforcement on steel surface. Laser peening was performed as reinforcement method in this study. As a result, it was clarify that reinforcement on steel surface by laser peening can make deformation capacity until brittle fracture larger under stated conditions for steel, specimen shape and parameter used in this study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築構造・材料

キーワード：脆性破断，表面強化，レーザーピーニング

1. 研究開始当初の背景

阪神大震災での鋼構造物被害において、柱梁接合部のスカラップ底を起点とした脆性破壊が多く見られた。また、新潟県中越沖地震でも、柏崎羽原発電所の天井クレーンガータにおいて脆性破壊が発生した。これらは、応力集中部において平均応力の何倍もの応力がかかったことが主因である脆性破壊であると考えられる。阪神大震災後、脆性破壊の防止を目的として高価な元素を添加した高靱性鋼が開発されているが、本当に高靱性が必要な部分は応力集中部他のほんの一部である。よって、応力集中部のみ何らかの強化を行えば安価に脆性破壊が防止できる。さらに、スカラップ底からの脆性破壊を防止するため

に建築工事標準仕様書が改正され、これまで用いられてきた“従来型スカラップ”（スカラップ底が直角にフランジと接する）が推奨されないディテールとされ、“改良型スカラップ”やノンスカラップが推奨されるようになった。これらの推奨スカラップは、阪神大震災から10年以上経過した今日、製作に高度な技術とコストがかかるものの、ようやく広く用いられるようになってきた。しかしながら、阪神大震災以前の鉄骨建築物のほぼすべてと、以後の数十%の鉄骨建築物は従来型スカラップのまま何の対応もとられていない。

2. 研究の目的

表1 供試鋼材の引張試験結果

σ_Y (MPa)	σ_U (MPa)	ϵ (%)	YR (%)
281	456	31	62

表2 供試鋼材の成分分析結果

C	Si	Mn	P	S	Cu	N	Cr	V	Mo	Ni
$\times 10^{-2}$			$\times 10^{-3}$				$\times 10^{-2}$			
24	1	39	20	3	2	9	3	0	1	2

$$Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$$

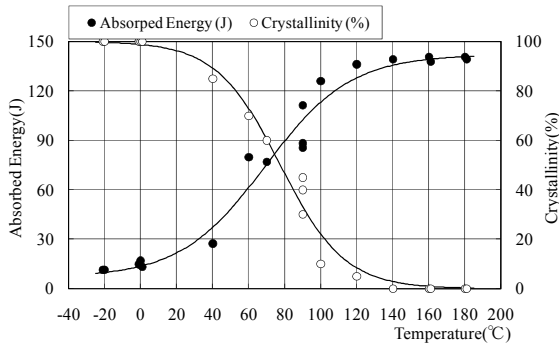


図-1 低靱性鋼材シャルピー衝撃試験結果

本究では、これら応力集中部からの脆性破壊を防止するための手法の一例として、応力集中部の表面のみを強化する手法を考えた。その表面強化手法としてレーザーピーニングに注目した。本研究の目的は、表面材質の強化によりこれら応力集中部からの脆性破壊が防止できる可能性を基礎的実験により検討することである。

必要な部分のみを表面改質で強化できれば、部材全体を高品質な鋼材で作る必要が無く、Ni, Nb, Ti 等の高価な添加元素の使用を減らすことができる。レーザーピーニングによる表面強化によって脆性破壊防止の可能性が示されれば、鋼材の部分的な強化による大型鋼構造物の補強というほとんど検討されていなかった分野の研究が注目され、さらに研究が広がると考える。

3. 研究の方法

実験に供した鋼材は、SS400 圧延 H 形鋼 (RH-612×202×13×23) である。表-1, 2 にミルシートによる供試鋼材の引張試験結果と

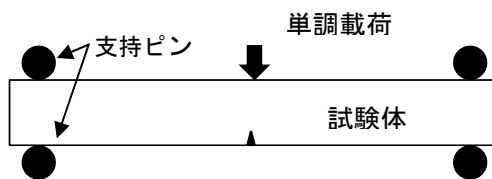


図-2 試験体と試験の概要

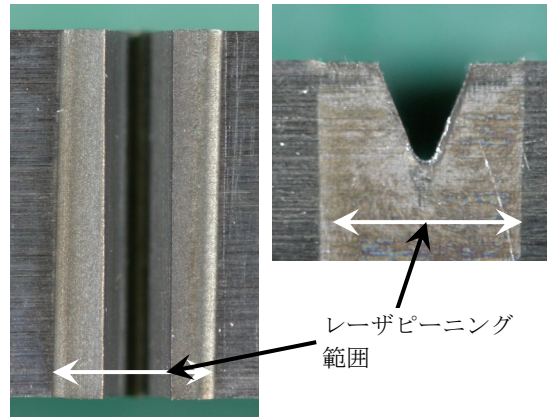


図-3 試験体と試験の概要

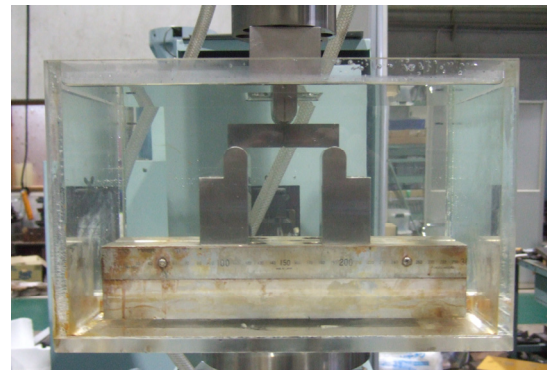


図-4 試験体と試験の概要

成分分析結果を示す。この供試鋼材のシャルピー衝撃試験による遷移曲線を図-1 に示す。供試鋼材は 0°Cでのシャルピー吸収エネルギーが 15J 程度と非常に低い。また、エネルギー遷移温度・破面遷移温度も共に 70°C程度と非常に高い。切り欠き付き三点曲げ試験片を用いた CTOD 試験も行われており、0°Cでの限界 CTOD 値 δ_c が 0.0444mm と非常に小さい。この様に供試鋼材は非常に靱性の低い鋼材であるといえる。靱性が低い鋼材の方が効果が明確に現れると思われるため、あえてこの様な材料を用いた。

試験体として、図-2 に示す 20×95×10mm の角形棒鋼の中央部にシャルピー衝撃試験体用いられている V ノッチを加工した、応力集中部曲げ試験体を用いた。試験体数は計 36 体とし、このうち 24 体に 2 つの照射条件でノッチ部を含む図-3 に示す範囲にレーザーピーニングを施した。残り 12 体はレーザーピーニングを施さない試験体(以下 NP と称す)とした。

試験体に、2 つの照射条件、ピークエネルギー 200mJ-スポット径 0.8mm-照射密度 36Pulse/mm²(以下 NP200 と称す)と 20mJ-0.3mm-360Pulse/mm²(以下 NP20 と称す)でレーザーピーニングを施した。

この試験体を図-2 に模式的に示す、単調三点曲げ試験に供した。試験には 50kN 型疲労

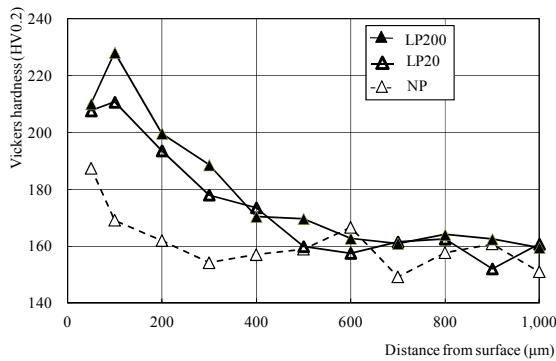


図-5 試験体と試験の概要

表-3 表面粗さの計測結果

	Ra (μm)						Mean
	1	2	3	4	5	6	
LP200	1.979	2.306	1.529	1.45	1.582	1.752	1.766
LP20	1.274	1.441	1.415	1.575	1.288	1.231	1.371
NP	0.348	0.369	0.367	0.465	0.457	0.368	0.396

Ra: Arithmetic mean deviation of the profile

表-4 凹みの計測結果

	Difference in level on border (μm)						Mean
	1	2	3	4	5	6	
LP200	3.07	1.97	5.73	2.69	1.08	1.01	2.59
LP20	13.05	12.86	10.66	15.32	12.71	11.22	12.64

試験機を用いた。脆性破壊は試験温度により大きな影響を受けるため、試験温度(+40, +10, -20, -50°C)もパラメータとした。試験温度を一定にするため、実験はアルコールもしくはお湯を満たした水槽内で行った。温度の管理は、試験体近傍に置いたシャルピー衝撃試験片に取り付けた熱電対で行い、試験温度±2°Cで試験を行った。試験中の様子を図-4に示す。

また、レーザピーニングによる鋼材表面付近の変化を明らかにするため、ビッカース硬さ、表面粗さ、境界段差および残留応力の計測も行った。

4. 研究成果

(1) ビッカース硬さ

試験荷重は1.96N、载荷時間は15秒とした。試験結果を図-5に示す。図中のデータは試験体2体の測定結果の平均値である。また、横軸は試験体のVノッチ先端からの距離である。NPも表面付近の値が大きくなっているが、これは試験体を機械加工したときの影響であると考えられる。

レーザピーニング施した試験体(以下LPと

称す)の方が500μm程度の深さまで硬くなっており、その差は20~60HV0.2程度であった。LP同士を比較すると、LP200の方が若干硬化している傾向が見られるが、その差は、10HV0.2程度であり、硬化深さも同じ程度であった。

(2) 表面粗さ

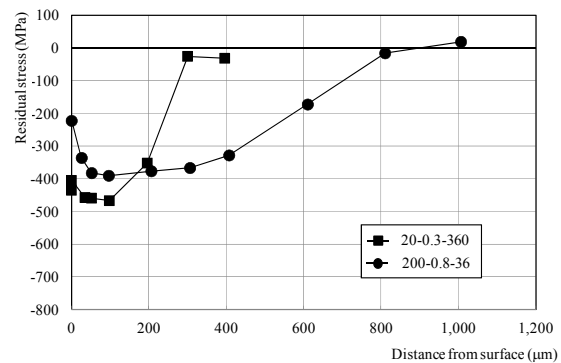
計測は触針先端半径2μmの接触式粗さ計を用い、カットオフ値および基準長さ2.5mmで表面粗さ(算術平均粗さ:Ra)を計測した。計測は試験体3体から各2ヶ所合計6ヶ所で行った。

NPが0.4μm程度であるのに対し、LPは1μm以上となっておりレーザピーニングにより表面は粗くなっていることが分かる。LP同士を比較すると、LP200の方が若干大きな値となっているが、その差は小さいと言える。

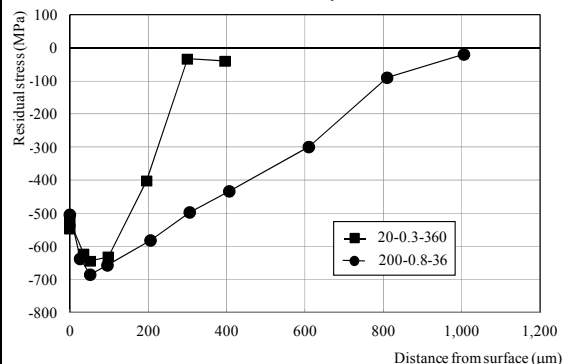
(3) 境界段差

レーザピーニングを施された部分と施されていない部分の段差量を、レーザデジタル顕微鏡により計測された境界面の高さデータを、500×500μmの範囲のレーザピーニングを施した部分と施していない部分でそれぞれ平均し、その差を取ることで求めた。計測は表面粗さ同様、試験体3体から各2ヶ所合計6ヶ所で行った。

LP200が3μm程度であるのに対し、LP20は12μm以上と4倍以上の段差がついていた。小さな照射径で照射密度も大きかった影響



(a) σ_{ξ}



(b) σ_{η}

図-6 残留応力の板厚方向分布

であると考えられるが、今後さらなる検討が必要である。

この様に、硬さや表面粗さとは異なり、境界段差は LP 施工条件により大きな差が生じた。

(4) 残留応力

残留応力の測定には、X線源に Cr-K α (17kV, 2.0mA) を使用した X線回折法 ($\sin^2\phi$ 法) を用いた。板厚方向分布は、電解研磨と残留応力の計測を繰返すことにより推定した。本推定法では、被測定面を局部的に (ϕ 10mm 程度) 電解研磨し、研磨されて凹んだ底面で応力測定し、それを未研磨状態の深さ位置での残留応力と近似的にみなしている。この方法では、研磨することにより測定部から表面までの剛性が取り除かれているため、厳密な残留応力分布は得られない。しかし、電解研磨が今回のように最大 1mm 程度と浅い場合、表面研磨による誤差が小さいことは、放射光によって非破壊的に計測された残留応力との比較で示されている。なお、本測定に用いた試験片は、高張力鋼 HT780 に LP 施工したものを用いており、三点曲げ試験に用いた SS400 とは異なる。

試験結果を図-6 に示す。 σ_{ξ} がレーザ照射部を移動させるためのステージの移動方向の残留応力成分、 σ_{η} がそれと直角方向の残留応力成分である。いずれの条件で LP により圧縮の残留応力が生成されている。また、照射条件によらず σ_{ξ} よりも σ_{η} の圧縮残留応力の方が大きい傾向にあった。これは他の材料でも見られている LP 特有の現象であり、別途検討を行っている。

表面残留応力および最大残留応力は、 σ_{ξ} で LP20 の方が LP200 よりも大きな傾向が見られているが、 σ_{η} では表面が -500MPa 程度最大が -700MPa 程度とほぼ同等であった。

これに対し、圧縮残留応力の生成深さは、残留応力の方向にかかわらず、LP20 が 300 μ m 程度であるのに対し、LP200 が 800 μ m 程度と 2 倍以上深くなっていた。硬さ分布が同等で、残留応力の生成深さに差異が生じたことに対し、鋼材種の影響を含め、今後検討していく予定である。

(5) 三点曲げ試験

レーザピーニングの有無および施工条件にかかわらず、-40 $^{\circ}$ C で延性破壊、+10 $^{\circ}$ C および -20 $^{\circ}$ C で延性き裂進展からの脆性破壊、-50 $^{\circ}$ C で脆性破面率 100% の脆性破壊が発生した。

疲労試験機のロードセルおよび変位計による荷重-変位関係の一例を図-7 に示す。40 $^{\circ}$ C の場合のみ最大荷重を示した後に荷重低下を伴って破壊したが、他の温度ではすべて最大荷重時に破壊した。

すべての試験結果から得られた最大荷重の値を表-5 に、最大変位の値を表-6 に示す。また、それぞれを温度毎に比較したものを図-8, 9 に示す。(a) はそれぞれの絶対値の値を比較したもの、(b) は LP の値を NP の値で無次元化したもので、LP の効果により最大荷重および最大変位がそれぞれ何倍になったか

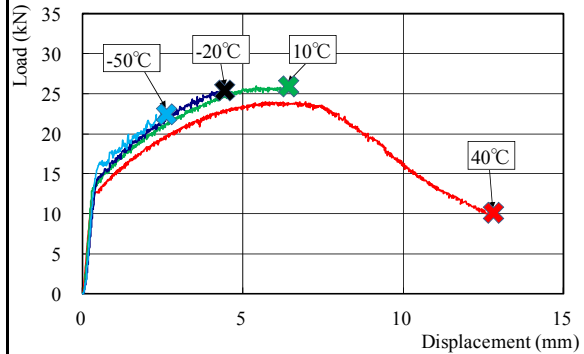


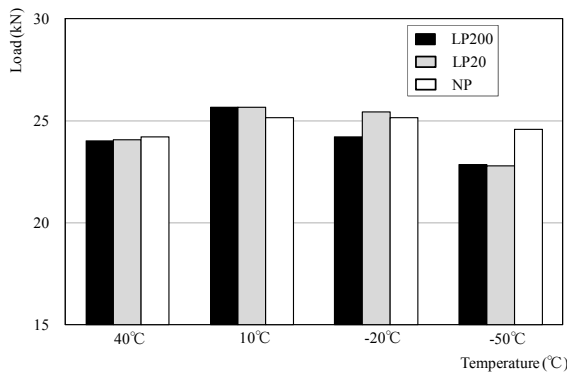
図-7 荷重-変位関係の一例 (LP20)

表-5 実験結果(最大荷重 kN)

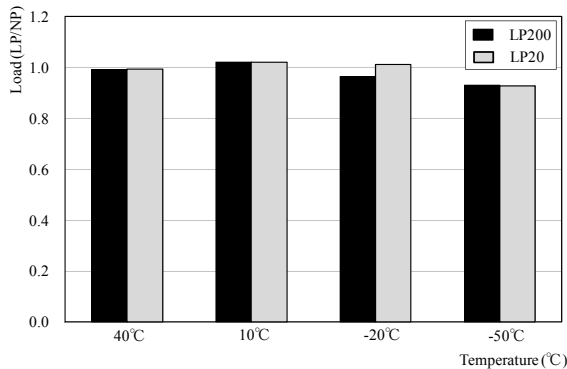
Temp. ($^{\circ}$ C)		40	10	-20	-50
LP200	No.1	23.8	25.6	24.6	22.3
	No.2	24.2	25.7	23.8	23.4
	No.3	24.2	25.1	25.6	22.1
	Means	24.1	25.5	24.7	22.6
LP20	No.1	24.0	25.5	25.7	23.0
	No.2	24.0	25.9	25.3	22.4
	No.3	24.2	25.6	25.3	23.0
	Means	24.1	25.7	25.4	22.8
NP	No.1	24.2	24.6	24.9	24.8
	No.2	24.3	24.6	25.0	24.7
	No.3	24.1	26.3	25.5	24.2
	Means	24.2	25.2	25.1	24.6

表-6 実験結果(最大変位 mm)

Temp. ($^{\circ}$ C)		40	10	-20	-50
LP200	No.1	13.45	5.50	3.92	2.55
	No.2	13.01	5.97	3.96	3.13
	No.3	14.09	7.20	4.77	2.40
	Means	13.52	6.22	4.22	2.69
LP20	No.1	12.72	5.47	4.36	2.88
	No.2	13.48	6.42	4.39	2.54
	No.3	12.91	7.23	4.61	2.77
	Means	13.04	6.37	4.45	2.73
NP	No.1	13.27	4.34	4.11	3.55
	No.2	13.99	4.66	4.85	3.41
	No.3	15.36	5.44	4.53	3.28
	Means	14.21	4.81	4.50	3.41



(a) 絶対値の比較



(b) NPの最大荷重で無次元化した値の比較

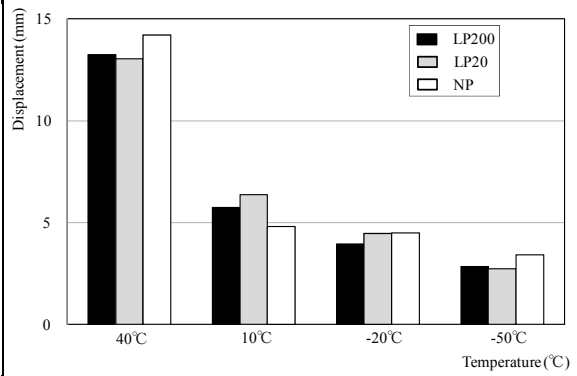
図-8 最大荷重の比較

を表している。

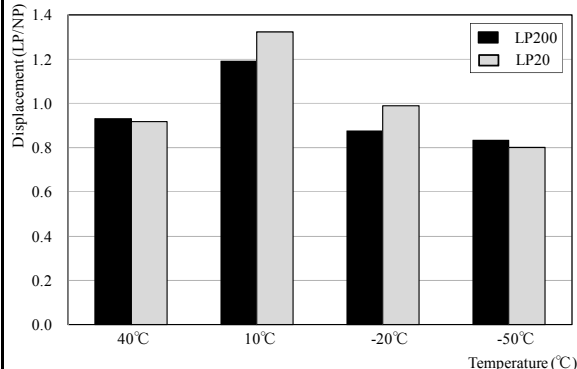
最大荷重は、40°Cに比べて10°Cと-20°Cが大きくなっているが、これはLPの有無によらない傾向である。しかし、-50°Cで破面が100%脆性破面であった場合にはLPの施工条件によらず、最大荷重が10%程度低下している。

最大変位は、40°CでLPがNPに比べ10%程度小さな値となっているが、大きく荷重が低下し、延性き裂が断面の2/3程度まで進展した後の破断変位であるので、同等と考えて良い。10°Cで延性き裂の進展から脆性破断が発生した場合には、LPの施工条件によらず最大変位が20%以上増加しており、LPの効果が伺える。しかしながら、-50°C脆性破面率100%の脆性破壊が発生した場合には、LPの施工条件によらず、最大変位も20%程度減少している。

この様にレーザーピーニングはLPの施工条件によらず、延性き裂の進展から脆性破断が発生する場合には変形能力向上効果が期待できると考えられる。しかし、脆性破面率100%の脆性破壊が発生する場合には、逆に最大荷重も変形能力も低下させてしまう。



(a) 絶対値の比較



(b) NPの最大変位で無次元化した値の比較

図-9 最大変位の比較

以上、本研究で用いた鋼材、試験片形状およびパラメータの範囲において、レーザーピーニングによる変形能力向上効果が期待できる可能性が示されたが、逆に材料が脆く温度も低いという非常に厳しい条件では、脆性破断を早期に生じさせてしまう可能性もあることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

崎野 良比呂 (SAKINO YOSHIHIRO)
 大阪大学・接合科学研究所・講師
 研究者番号：80273712

(2) 研究協力者

佐野 雄二 (SANO YUJI)
 東芝・電力・社会システム技術開発センター・技監