各種ピーニング処理による導入残留応力の計測

岐阜大学大学院　学生会員　○阪野裕樹，岐阜大学　正会員　木下幸治
芝浦工業大学　正会員　穴見健吾，芝浦工業大学大学院　学生会員　日名誠太，関西大学　正会員　石川敏之

1.　はじめに

最近，鋼構造物の溶接部へのピーニング処理として，超音波衝撃処理（Ultrasonic impact treatment：UIT）[1]，母材打撃ハンマーピーニング（HP）[2]，PPP 処理（Portable Pneumatic needle-Peening：PPP）[3]などが挙げられ，各種ピーニング処理の高い疲労強度向上効果が示されてきている．各種ピーニング処理の高い疲労強度向上効果の基となる導入される圧縮残留応力は鋼材強度に依存するため，強度が高くなるに伴い導入残留応力も大きくなることが知られている[4),5]．このため，強度が異なる鋼材に対して各種ピーニング処理により導入される圧縮残留応力を明らかとする必要がある．他方，実橋梁では，塗装のためにグリッドブラスト（GB）が行われるが，ピーニング処理後のブラスト処理が残留応力に及ぼす影響は十分に明らかにされていない．

本研究では，鋼材強度が異なるオンビード平板試験体（SM400，SBHS400，SBHS500，SBHS700）に対して各種ピーニング処理（UIT，HP，PPP）によって溶接部近傍に導入される残留応力，並びに各種ピーニング処理後にブラスト処理を行った上での残留応力の計測を行った．

2.　試験概要

2.1　試験体及び各種処理方法

図-1 に試験体の寸法，**表-1** に平板試験体に用いた鋼材の機械的性質と化学成分をそれぞれ示す．なお，**図-1** 中にはピーニング処理位置と残留応力計測位置も示している．試験体寸法は 200mm×200mm×12mm とした．**表-2** に試験体一覧を示す．試験体には，SM400，SBHS400，SBHS500，SBHS700 を用い，各種ピーニング処理（UIT，母材打撃 HP，PPP）を各種試験体に施した．試験体は，オンビード平板試験体，溶接無しの平板試験体の 2 種類とした．UIT，HP，ならびに PPP は，試験体中央に長さ 100mm にわたり処理を行った．ピーニング処理後に実施したグリッドブラストは試験体の全面に行った．

2.2　計測位置及び計測条件

残留応力の計測には，X 線回析法による残留応力計測を行った．**図-1** に示すように試験体のピーニング処理部から上部を UPPER 側，下部を LOWER 側，並びに図中に示す Y 軸方向にピーニング処理部溝中央を 0 mm とし，試験体中央と中央から左右±30 mm のピーニング処理部溝中央（0 mm），ピーニング処理部端部より 2mm，4mm，6mm，8mm，10mm の位置において溶接線に対して直行する方向の応力成分の残留応力を計測した．一方，従来の残留応力計測では，計測条件，すなわち，前処理によっては正確な残留応力計測ができないことが知られている．そこで，X 線回析により正確な残留応力を計測する方法を明らかとすることとし，ここでは，黒皮まま，グラインダー処理後，電解研磨深さ 150μm または 100μm, 200μm の深さにおいて，残留応力計測を実施した．また，ピーニング処理部溝中央とピーニング処理部端部より 2mm の位置では，板厚方向に 1mm または 2.5mm 程度までの板厚方向の残留応力分布を電解研磨により随時計測した．

3.　計測結果

3.1　前処理条件の影響

図-2 に SM400，SBHS500，SBHS700 にピーニング処理及びピーニング処理後にブラスト処理を行った試験体の残留応力分布を示す．なお，SBHS400 の計測結果は紙面の都合上省略した．図は横軸に処理部からの距離，縦軸に残留応力を示した．また，図中には，既往の研究で行われた平板試験体に対する母材打撃 HP と UIT の残留応力計測結果[5]も併記した．**図-2 (a)** に黒皮ままの計測結果を示す．鋼種によらず計測結果にばらつきが生じていることがわかる．**図-2 (b)** にグラインダー処理後の計測結果を示す．ピーニング処理部溝中央を除き，概ね一応な圧縮残留応力が導入されていることがわかる．これは，グラインダー処理において黒皮を除去する際に導入されたものであると考えられ，グラインダー処理の影響を強く受けていることがわかる．一方，**図-2 (c)～(f)** より，例えば，UIT では研磨深さ 100μm と 200μm 時における残留応力導入量は互いに大きな差はなく，同程度であることがわかる．以上より，残留応力計測において，酸化被膜（黒皮）ままでは計測結果にばらつきがみられること，グラインダー処理後の表面ではグラインダー処理の影響を受けること，一方，電解研磨深さ 100μm と 200μm 時の残留応力計測結果は同等程度であることを明らかとした．よって，100μm 程度以上電解研磨することにより，グラインダー処理の影響が消失し，正確な残留応力計測が可能になるといえる．

表-1　鋼材の機械的性質と化学成分

鋼種	降伏応力 (N/mm²)	引張強さ (N/mm²)	伸び (%)	化学成分（%） C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N
SM400A	288	429	31	0.17	0.19	0.51	0.019	0.005	-	-	-	-	-	-	-
SBHS400	522	578	22	0.12	0.31	1.36	0.009	0.002	0.01	0.01	0.02	0.000	0.000	0.002	0.050
	560	622	15	0.12	0.3	1.37	0.008	0.002	0.01	0.01	0.02	0.000	0.001	0.018	0.005
SBHS500	568	658	28	0.09	0.34	1.54	0.004	0.001	0.01	0.01	0.02	0.001	0.008	0.003	0.003
	534	668	33	0.05	0.3	1.96	0.008	0.001	0.37	0.37	0.03	0.001	0.003	0.0038	0.005
SBHS700	871	876	27	0.06	0.26	13.35	0.004	0.001	0.98	0.97	0.49	0.003	0.004	0.001	0.037

各鋼材下段の鋼材はUIT試験体に使用

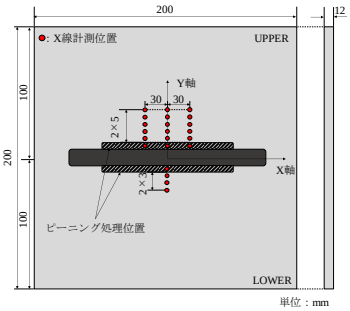


図-1　残留応力計測試験体の寸法と残留応力計測位置

表-2　試験体一覧

試験体	処理方法	鋼種 SM400	SBHS400	SBHS500	SBHS700
オンビード平板	As-weld	1	-	1	1
	As-weld+GB	1	-	1	1
	PPP	1	1	1	1
	PPP+GB	1	1	1	1
	HP	1	-	1	1
	HP+GB	1	-	1	1
	UIT	1	-	1	1
	UIT+GB	1	-	1	1
溶接無し	PPP	1	1	-	1
		1	1	-	1

キーワード：　ピーニング処理，残留応力，X 線回析
連絡先：〒501-1193　岐阜県岐阜市柳戸 1-1　岐阜大学工学部社会基盤工学科　TEL：058-293-2424

3.2　各種ピーニング処理による導入残留応力

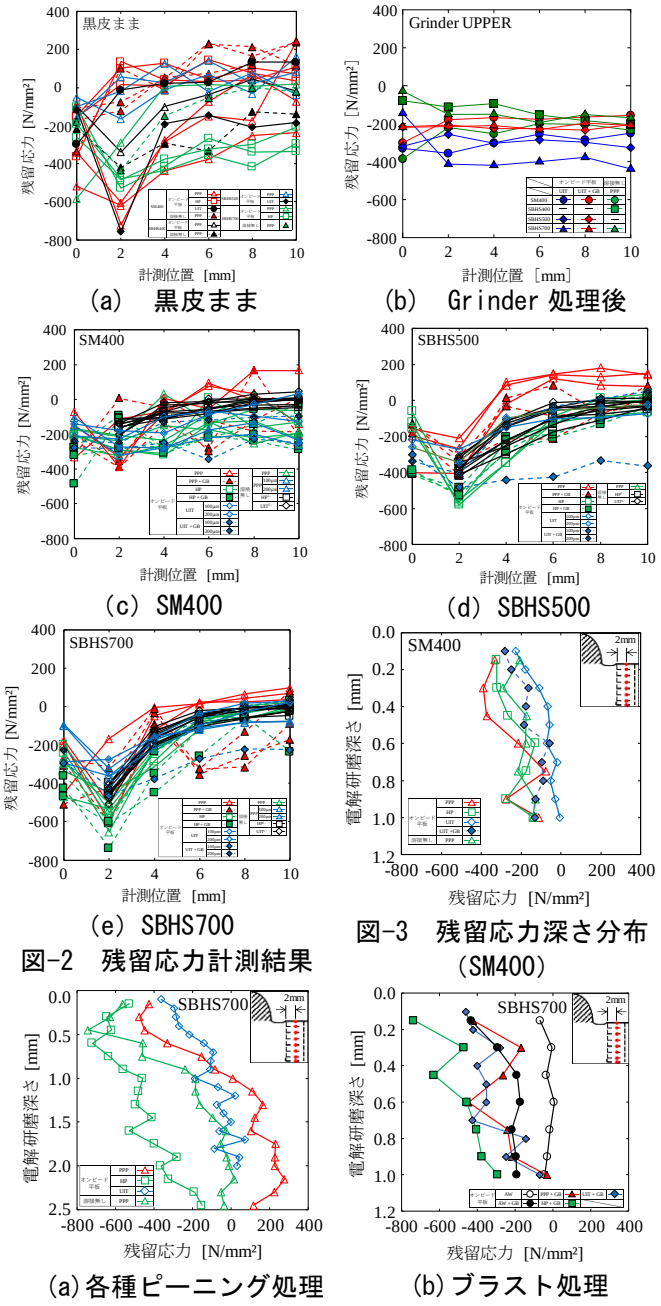
図-2(c)に SM400 の計測結果を示す．図より，各種ピーニング処理によってピーニング処理部溝中央，処理部端部より 2mm の位置で圧縮残留応力が-200N/mm²程度導入されていることが確認できた．図-2（d）に SBHS500 の計測結果を示す．図より，既往の平板試験体の結果 [5]と溶接部に対して行った結果は同様の傾向を示していることが確認でき，処理部端部より 2mm の位置で圧縮残留応力導入量が最大となった．HP では処理部端部より 2mm の位置で-500N/mm²程度の高い圧縮残留応力導入量が確認され，以後処理部から離れていくにつれ徐々に残留応力が減少していくことがわかる．UIT では，PPP と同様の残留応力導入量となり，残留応力分布の傾向も良く似ていると言える．図-2（e）に SBHS700 の計測結果を示す．各種ピーニング処理により処理部端部より 2mm の位置で高い圧縮残留応力の導入が確認できた．以上より，各種ピーニング処理端部より 2mm 離れた位置の残留応力は，最大で各鋼種の降伏強度の約 6~7 割程度の圧縮残留応力であった．なお，この結果は，平板試験体に対してピーニング処理を実施した既往の残留応力計測結果 [5]と同様であったことから，導入可能な圧縮残留応力は溶接部の有無に依らないといえる．

3.3　ブラスト処理の影響

図-2（c）よりブラスト処理後もばらつきはあるものの-100N/mm²から-200N/mm²程度の圧縮残留応力が導入されていることが確認できた．図-2（d）より，ブラスト処理を行うことによって，処理部端部より 2mm 以降の位置で-100N/mm²程度以上の圧縮残留応力が導入されていることが確認できた．母材打撃 HP 後のブラスト処理は，特に処理部溝中央で-200N/mm²程度以上の導入量が確認され，それ以外では残留応力の導入が確認できなかった．図-2（e）より，ブラスト処理後では各種ピーニング処理においてピーニング処理部溝中央及び，処理部端部より 2mm の位置で-100N/mm²から-200N/mm²の圧縮残留応力導入が確認された．ブラスト処理を施した試験体の残留応力計測結果より，降伏強度が高い鋼材では，ピーニング処理後にブラスト処理を行うことによって，若干ではあるが付加的な残留応力が導入される可能性があると言える．

3.4　板厚深さ方向導入残留応力

図-3, 図-4 に SM400 および SBHS700 の処理部端部より 2mm の位置における板厚方向の残留応力深さ分布を示す．図は横軸に残留応力，縦軸に電解研磨深さをそれぞれ示す．図-3 より処理部端部より 2mm の位置では，深さ 1.0mm 程度まで-200N/mm²程度の圧縮残留応力が保持されていることが確認できた．図-4(a)より HP では，深さ 2.5mm まで-200N/mm²程度と高い圧縮残留応力が導入されていることがわかる．PPP では深さ 1.0mm で圧縮残留応力が消失し，以降引張残留応力が分布していることがわかる．UIT は PPP と同様に深さ 1.0mm 程度で圧縮残留応力が消失していることがわかる．図-4（b）より研磨深さ 300μm 程度で圧縮残留応力が減少する傾向が確認され，それ以降ではピーニング処理による残留応力分布と同様の傾向を示した．以上より，処理部端部より 2mm の位置で板厚深さ方向の残留応力を計測した結果，PPP 処理，UIT では深さ 1.0mm 程度まで，HP では深さ 2.5mm 程度まで高い圧縮残留応力が導入されていることがわかった．また，ブラスト処理後も深さ 300μm 以上ではピーニング処理による残留応力計測結果と同様の傾向を示した．



(a)　黒皮まま　(b)　Grinder 処理後
(c) SM400　(d) SBHS500
(e) SBHS700

図-2　残留応力計測結果

図-3　残留応力深さ分布（SM400）

(a)各種ピーニング処理　(b)ブラスト処理

図-4　残留応力深さ分布（SBHS700）

謝辞：本研究は日本鉄鋼連盟鋼構造研究・教育助成事業として日本鋼構造協会に委託している「鋼橋の強靭化・長寿命化研究委員会」（委員長　舘石和雄　名古屋大学教授）の「疲労強度研究部会」（部会長　穴見健吾）における活動の一部として実施したものである．関係各位に深くお礼申し上げる．

＜**参考文献**＞

1）森ら：面外ガセット溶接継手の UIT 疲労強度改善効果に対する鋼材静的強度の影響，土木学会論文集，Vol.70，No.2，pp. 210-220，2014. 2）中野ら：母材打撃ピーニングによる溶接継手疲労強度向上策と機械化施工法の開発，JFE 技報，No.34，2014.8. 3）井上ら：エアー式ニードルピーニングによる面外ガセット溶接継手の疲労強度向上対策，東京鐵骨橋梁技術報，No.57，pp.38-45，2016. 4）日本鋼構造協会：鋼橋溶接継手部の疲労強度とその向上技術，JSSC テクニカルレポート，No.106，2015.11. 5）判治ら：止端処理による溶接継手の疲労強度改善効果とその鋼材強度依存性，構造工学論文集，Vol.63A，2007.9.