

橋梁用厚板製品とその利用技術

Steel Plates for Bridge Use and Their Application Technologies

川端 文丸	KAWABATA Fumimaru	JFE スチール	厚板セクター部	主任部員 (副部長)
松井 和幸	MATSUI Kazuyuki	JFE スチール	厚板セクター部	主任部員 (副部長)
小日向 忠	OBINATA Tadashi	JFE スチール	西日本製鉄所 商品技術部	主任部員 (副部長)
小森 務	KOMORI Tsutomu	JFE スチール	スチール研究所	耐食防食研究部 主任研究員 (課長)
竹村 誠洋	TAKEMURA Masahiro	JFE スチール	スチール研究所	耐食防食研究部 主任研究員 (課長)
久保 高宏	KUBO Takahiro	JFE スチール	スチール研究所	接合強度研究部 主任研究員 (課長)

要旨

JFE スチールの主要な橋梁用厚板商品および関連技術についてその概要を紹介した。理論限界相当冷却能をもつ Super-OLAC により、耐候性鋼を含む TS570 N/mm² 級高張力鋼の非調質化 (納期短縮) と低 P_{CM} 化 (溶接施工性向上) を実現した。また、塩分に強い Ni 系高耐候性鋼を飛来塩分に応じて 2 タイプ準備し、経済的な適用を可能とするとともに、耐候性鋼橋梁の景観性を向上するさび安定化処理も目的に応じて促進型と熟成型を開発した。さらに、溶接箇所減少や鋼材重量低減によるコスト削減ニーズに対して、長手方向に板厚が連続的に変化する LP 鋼板を、橋梁の安全性向上と長寿命化のために溶接継手疲労強度を飛躍的に高める低変態温度溶接材料も合わせて開発・商品化している。

Abstract:

Essential steel plates for bridge use of JFE Steel are reviewed together with relevant key-technologies. Owing to Super-OLAC featured with an ultimate theoretical cooling rate, high performance steels such as a TS 570 N/mm² class ones and weathering steels with a low P_{CM} value are materialized by efficient on-line process, which offers a short delivery time and saving in welding fabrication. As for weathering steel, two kinds of advanced ones of Ni type are lined-up for various airborne salt environments. Also presented herein are new surface treatment technologies to promote protective rust formation for a better appearance of a bridge. Furthermore, longitudinally profiled (LP) steel plates are lined-up for welding labor and dead weight reductions and low transformation-temperature welding consumables are developed for remarkable fatigue strength of welded joints.

1. 緒言

橋梁は社会基盤かつ国家資産であり、その架設経済性とともにライフサイクルコスト (LCC) 低減への関心が年々強くなっている。JFE スチールでは、理論限界相当冷却能を有する Super-OLAC を厚板製造プロセスに導入し、橋梁用鋼材の高強度非調質化と溶接施工性向上を推し進めるとともに、LCC を大きく低減する新耐候性鋼、さらにその性能を最大限に引き出すさび安定化処理技術をそれぞれ開発し、商品化している。さらに、圧延形状制御技術を駆使して長手方向の板厚を変化させた LP 鋼板や溶接継手の疲労強度を飛躍的に向上させる特殊溶接材料およびそ

の利用技術を開発するなど、橋梁分野で利用される鋼材とその周辺技術を総合的に開発し、商品展開している。

本稿では、こうした取り組みのなかで、Super-OLAC の機能を最大限に活用した高施工性 570 N/mm² 級高性能高張力鋼を紹介する。また、従来の JIS 耐候性鋼では無塗装使用できない飛来塩分が 0.05 mdd (mg/dm²/day) を超える海岸・海浜地域での適用を可能とする 2 種類の Ni 系高耐候性鋼とともに、熟成型と促進型の 2 種類のさび安定化処理技術を紹介する。

さらに LP 鋼板について、主としてその効果的な適用の提案と低変態温度を有する溶接材料を用いた溶接継手疲労強度向上技術について概説する。

2. 厚板

2.1 高性能高張力鋼

溶接構造物の大型化や製作の高効率化の要望が高まるなかで、高強度かつ高靱性で溶接性と経済性にすぐれた高性能高張力鋼が強く求められてきている。ことに溶接部の低温割れを防止するための予熱作業は負荷が大きく、その省略や軽減は、高強度厚肉化に付随する課題となっていた。このジレンマを解消した「使いやすい高張力鋼」の実現が強く望まれていた。このような要望に応えるため、当社はこれまで他社に先駆けて制御圧延と加速冷却を組み合わせさせた TMCP (thermo-mechanical control process) 技術を駆使し、制御圧延をベースとした高性能化と炭素当量の増大を極限に抑えた高張力化を推進してきたが、さらに 1998 年以降、理論限界相当冷却能を有する画期的な Super-OLAC を導入し、制御圧延と理想的な加速冷却の組み合わせを実現し、一層の TMCP 技術の高度化を図り、低炭素当量で高降伏強度と優れた溶接性を兼ね備えた高張力鋼板を開発・商品化した。

予熱温度の低減には、化学組成で規定される溶接割れ感受性 (P_{CM}) の低減が有効である。Fig. 1 は一例として、

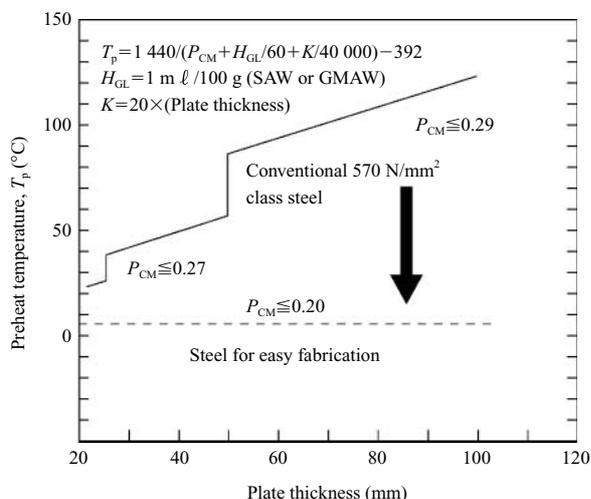


Fig. 1 Relation between plate thickness and preheat temperature for 570 N/mm² class steel

570 N/mm² 級鋼の溶接予熱温度と板厚の関係を示したものである。上部の階段状の実線は、道路橋示方書にある標準 P_{CM} 値を有する鋼板の予熱温度を示す。図中破線で示すように、低 P_{CM} 鋼材 ($P_{CM} \leq 0.20$) の適用により厚肉材においても鋼材温度が 10 以上では、予熱の省略が可能となる。

Table 1 に TMCP 技術を最大限に活用し、また合金元素の微量添加により焼入れ性を制御し、強度・靱性バランスの最適化を図って商品化した 570 N/mm² 級鋼の特性例を紹介する。鋼 B はさらに耐候性に配慮した鋼である。いずれも P_{CM} は 0.18 と 0.20 以下の低い値であり、優れた溶接性を有するとともに、降伏強度は 500 N/mm² 以上の値が得られている。また母材、溶接部ともに高いシャルピー吸収エネルギー値を示し、米国で実用化されている高性能鋼 HPS485¹⁾ を上回る優れた特性が得られている。

さらに当社では、炭素含有量を約 0.02 mass% 未満とした極低炭素鋼のベイナイト組織の特徴的な変態挙動を利用し、マイクロ組織・材質の冷却速度依存性が非常に小さく、かつ極低炭素化により高強度で溶接硬化性が低いことを特徴とする、圧延ままでより迅速に提供可能な 570 N/mm² 級 TMCP 型極低炭素ベイナイト厚肉高張力鋼板²⁾ とともに 780 N/mm² 級鋼の商品化 (C 鋼) を完了している。

2.2 Ni 系高耐候性鋼

JIS SMA (溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材) などの従来型耐候性鋼を無塗装使用してよい地域の飛来塩分量は 0.05 mdd 以下とされ³⁾、海岸海浜地帯などのさびが安定化しにくい 0.05 mdd を超える高飛来塩分環境では適用できない。当社はこうした高飛来塩分環境においても無塗装使用可能な Ni 系高耐候性鋼を開発・商品化している。

Ni 系高耐候性鋼 (JFE-ACL シリーズ) は、Ni とともに添加元素として Mo を利用している。Ni は、(1) さび層の緻密化により透過を抑制する物理的作用と、(2) さび層の pH を高めて塩化物イオンの侵入を抑制する電気化学的作用をもつ⁴⁾。Mo も (2) の作用を発揮するが、Ni と Mo の複合添加によって経済的に耐塩性を得ることが可能である。暴露試験と乾湿繰り返し試験の結果、さらに機械的性

Table 1 Examples of chemical composition and mechanical properties of steel plate produced by TMCP

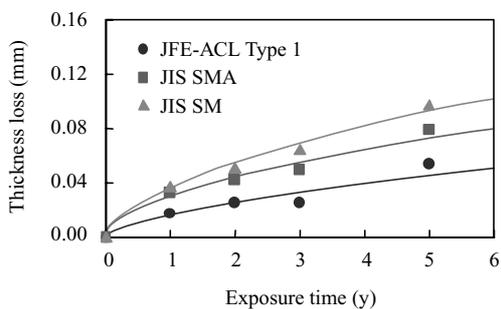
Steel	Thick-ness (mm)	Chemical composition (mass%)									Mechanical properties						
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	P_{CM} ^{*2)}	Base plate			Welded joint			
											YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	vE-5 (J)	Welding method	Heat input (kJ/cm)	TS (N/mm ²)	vE-5 FL ^{*3)} (J)
A	75	0.08	0.25	1.42	0.007	0.002	-	-	-	0.18	534	626	312	SAW	46	632	141
B ^{*1)}	50	0.08	0.20	0.88	0.008	0.002	0.34	0.16	0.55	0.18	521	620	308	SAW	67	626	151
C	50	0.02	0.23	1.97	0.009	0.002	0.41	0.42	0.49	0.21	710	845	234 ^{*4)}	GMAW	22	832	185 ^{*5)}

^{*1)}Weathering steel, ^{*2)} $P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$, ^{*3)}FL: Fusion line, ^{*4)}E-40, ^{*5)}E-15

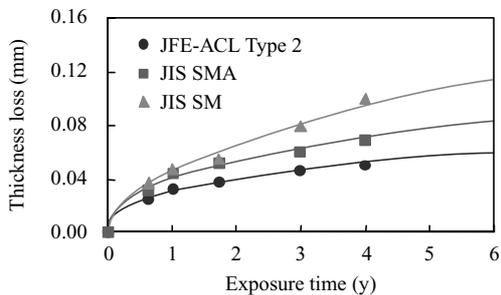
Table 2 Examples of chemical composition and mechanical properties of nickel added weathering steel

Steel	Thick-ness (mm)	Chemical composition (mass%)										Mechanical properties				
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	C_{eq}^{*1}	P_{CM}^{*2}	YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	vE_0^{*3}, vE^{-5} (J)	vTs (°C)
JFE-ACL400 Type 1	12	0.04	0.30	0.57	0.032	0.003	-	1.42	0.30	0.27	0.13	291	460	34	373	-59
JFE-ACL490 Type 1	50	0.07	0.32	0.71	0.033	0.002	-	1.45	0.32	0.33	0.16	358	515	38	281	-43
JFE-ACL570 Type 1	75	0.07	0.26	0.74	0.029	0.004	-	1.48	0.31	0.32	0.16	532	625	32	270	-50
JFE-ACL400 Type 2	50	0.02	0.27	0.32	0.011	0.003	0.37	2.60	-	0.15	0.10	355	460	40	355	-35
JFE-ACL490 Type 2	50	0.02	0.29	0.92	0.006	0.005	0.37	2.68	-	0.26	0.14	445	528	39	388	≤ -80
JFE-ACL570 Type 2	50	0.02	0.34	0.98	0.013	0.002	0.39	2.61	-	0.27	0.14	523	637	32	390	≤ -80

^{*1} $C_{eq} = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$, ^{*2} $P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + 60/Ni + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$,
^{*3}ACL400 Type 1, ACL490 Type 1, ACL400 Type 2, ACL490 Type 2, ^{*4}ACL570 Type 1, ACL570 Type 2



(a) Type 1 (Site : Choshi, Chiba, 0.23 mdd)



(b) Type 2 (Site : Gushikawa, Okinawa, 0.80 mdd)

Fig.2 Exposure test results of various steels at coastal areas

質、溶接性などの確保も考慮して、有効添加量の範囲を Ni : 1.0 ~ 3 mass% , Mo : 0.2 ~ 0.6 mass% としている。

Ni系高耐候性鋼の化学組成および機械的性質の例を Table 2 に示す。Type 1 (1.5% Ni-0.3% Mo系) では Mo を有効量上限の 0.3% まで添加し、合わせて Ni を添加した。Type 2 (極低 C-2.5% Ni系) では Ni を有効量上限近くまで添加し、Type 1 より高飛来塩分量に対応できるようにした。Type 1, Type 2 ともに 400 N/mm², 490 N/mm², 570 N/mm² 鋼が開発され、機械的性質、溶接性ともに JIS SMA と同等以上の性能を有している。

JFE-ACL490 Type 1 と Type 2 鋼の海岸地帯における暴露試験結果を Fig. 2 (a), (b) にそれぞれ示す。暴露環境は、Type 1 は年間平均飛来塩分量 0.23 mdd の千葉県銚子、また Type 2 は 0.80 mdd の沖縄県具志川岸壁であるが、Type

1, Type 2 ともに JIS SMA, JIS SM に比べて腐食減量が小さく、優れた耐候性を示すことがわかる。

適用環境については、「100 年の推定腐食量が 0.5 mm 以下」を無塗装使用の判断の目安としている⁵⁾ が、全国各地における橋梁環境模擬暴露試験の結果に基づいた推定によれば⁶⁾、乾湿が適切に繰り返される環境において、当社の Ni 系高耐候性鋼は 0.4 ~ 0.6 mdd までは無塗装使用可能と考えており、環境調査を要するが場合によってはこれを超える地域での適用も可能である。

2.3 新さび安定化処理

当社では、新さび安定化処理剤として保護性さびの形成熟成型の「カプテンコート M」⁷⁾ と促進型の「イーラス[®]」⁸⁾ の 2 種の処理剤を開発・製品化している。

カプテンコート M は、600 件以上の実績を有するカプテンコート (2 層型) の知見を基に開発された、作業性に優れた「熟成型」の単層処理剤である。処理膜に鉄イオンと選択的に反応する物質を添加することにより「流れさびを防止」し、処理膜の水・酸素の透過性を高めることで「処理膜下での適度な乾湿繰り返し」を実現し、「保護性さびを熟成」する。さらに、アニオン性樹脂による電気的な反発作用により、「塩素イオン透過抑制機能」を有する (Fig. 3)。

イーラスは、さび形成の際にあらかじめ存在するさびと同質のさびが形成されやすい現象を利用して、水・酸

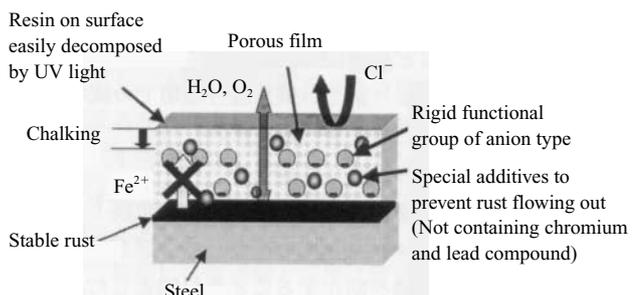


Fig.3 Function of CUPTEN COAT M on weathering steel

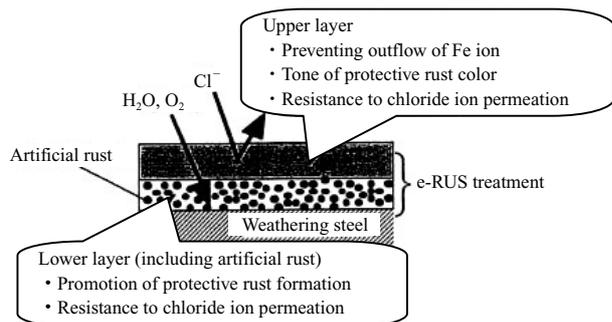


Fig. 4 Function of e-RUS on weathering steel

素の透過性が高いブチラル系樹脂を基層とする処理膜に、保護性さびの核となる人工微細さびを添加することにより、確実かつ早期に保護性さびを形成する「促進型」の2層処理剤である。さらに、処理膜中に添加したモリブデン酸塩は、処理膜および形成した保護性さび中で電気的な反発作用により「塩素イオン透過抑制機能」を発揮する (Fig. 4)。

カプテンコートMとイーラスは、ともに工場塗装や現場塗装に加えて、出荷前に厚板工場において処理する「プレコート」に対応していることが大きな特徴である。既存のショッププライマー同様に、薄膜でさび安定化処理がなされた「プレコート」耐候性鋼材は、保管中の一次防錆作用により簡易な素地調整での最終塗装が可能となり、工数負荷の高い製品プラスト工程の簡略化を可能とするため、総施工コストを削減する効果がある。

カプテンコートMまたはイーラス処理は、前節の耐塩分特性に優れるNi系高耐候性鋼に施工することにより海浜環境にも適用できる。さらに、処理膜中にクロム化合物などを含有しないなど、環境負荷軽減にも配慮している特長をもっている。

2.4 橋梁用 LP 鋼板

LP (longitudinally profiled) 鋼板⁹⁾は、圧延工程においてロール開度を連続的に変化させて、長手方向に連続的に板厚を変化させた厚板であり、構造物の溶接箇所の減少や鋼材重量の低減によるコスト削減を可能とした高性能鋼である。

LP 鋼板の形状としては、長手方向一方向に板厚が変化する LP1 型を原型として、LP3 型 (凸型)、LP5 型 (凹型)、2 段階板厚変化の LP7 型など 8 種あり、それぞれ先尾端に等厚部を設けることが可能である。これにより、(1) 必要断面二次モーメントに応じた合理的な板厚構成 (重量低減)、(2) 等フランジ幅設計などの合理化設計、(3) ボルト接合部のフィラープレート省略、(4) 溶接継手部での板厚調整作業省略などの効果が期待できる。LP 鋼板は、調質鋼や TMCP 鋼を始め、道路橋示方書で指定されているすべての JIS 鋼材規格に対応している。

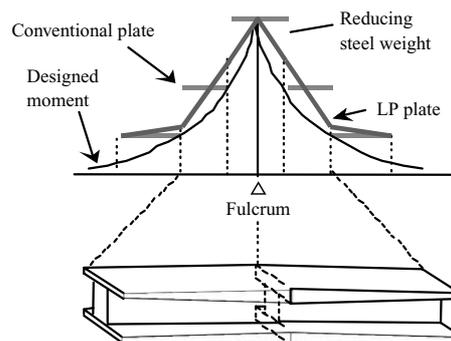


Fig. 5 Comparison between an LP plate moment and an isometric plate moment against a designed moment in a girder of bridge

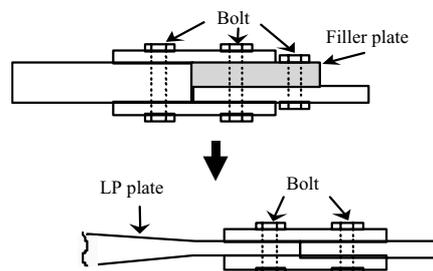


Fig. 6 Example of omission of filler plate in connected parts

LP 鋼板の橋梁への効果的適用例¹⁰⁾を2例、Fig. 5, 6に示す。Fig. 5は、中間支点上の桁フランジにLP鋼板を適用した例である。LP鋼板の適用により必要断面力に応じた合理的な板厚変化が可能で、等厚鋼板を適用した場合に比べ鋼材重量および溶接箇所の削減を図ることができる。Fig. 6はLP鋼板を適用したボルト接合部の例で、等厚鋼板の板厚差解消に必要とされたフィラープレートを省略でき、同時にボルト数も削減できている。

LP 鋼板の製造は、根幹となる高精度ダイナミック板厚制御と制御冷却技術に加え、高度の矯正技術や寸法検査方法などの独自開発技術によっている。たとえば、TMCP 鋼において発生する板厚変化による冷却条件の変化は、冷却中の移送制御により解消している。

3. 溶接継手疲労強度の向上技術

溶接部の疲労強度は、溶接残留応力の影響によって、通常母材のそれを下回り、母材強度にほとんど依存しない。長年のこの問題は、Fig. 7に示すように、マルテンサイト変態開始温度を通常の溶接材料より低下させた10% Cr-10% Ni-Fe系の低変態温度溶接材料「EXWEL」の開発により、溶接部に圧縮残留応力を発生させることで解決された。

開発した溶接材料を用いた荷重非伝達型十字継手の疲労強度は、Fig. 8に示すように母材強度の上昇に比例して

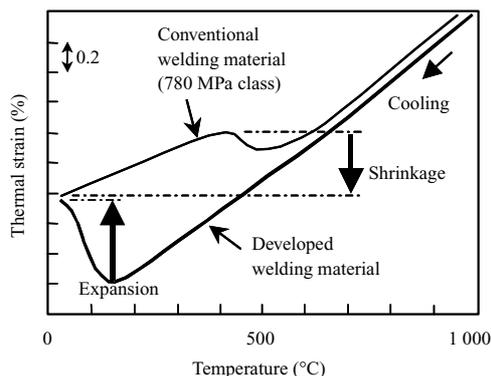


Fig. 7 Relation between thermal strain and temperature of welding material

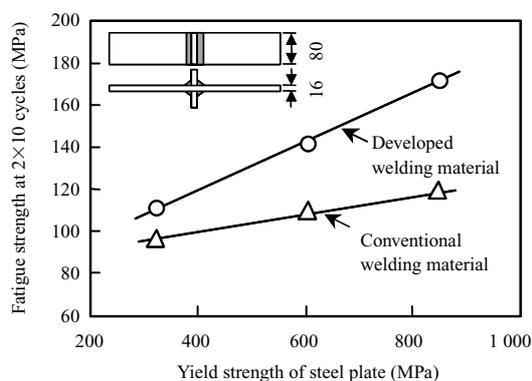


Fig. 8 Relation between fatigue strength of welded joint and yield strength of steel plate

飛躍的に向上する¹¹⁾。今後の高強度鋼の適用拡大や構造物の疲労安全性の向上などが期待され、本技術の実用化に向けた検討を急いでいる。

4. 結言

JFE スチールの橋梁用厚板の開発・商品化の現状について述べた。Super-OLAC を適用した高性能高張力鋼、0.05 mdd を超える飛来塩分環境に対応した Ni 系高耐候性鋼および新さび安定化処理、さらには LP 鋼板により、資産価値の高い鋼製橋梁架設に貢献できると確信している。加えて、低変態温度溶接材料による継手疲労強度向上など

の次世代技術により、鋼製橋梁の安全性を飛躍的に高めることが可能と考えている。

参考文献

- 1) High Performance Steel Designers' Guide. 2nd ed. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2002-4.
- 2) 岡津光浩, 林透, 天野虎一. 川崎製鉄技報, vol.30, no.3, 1998, p.131-136.
- 3) 建設省土木研究所ほか. 耐候性鋼材の橋梁への適用に関する研究報告書 (XX). 1993.
- 4) 塩谷和彦ほか. 鋼材さび層に及ぼす環境 Cl 量と鋼中 Ni 量の影響. 材料と環境 2002. 東京, 腐食防食協会, 2002-05, p.281-282.
- 5) 加納勇, 渡辺祐一. 橋梁用新耐候性鋼. 土木学会誌. vol.87, 2002-4, p.5-8.
- 6) 国等による環境物質等の調達の推進等に関する法律 (平成 12 年法律第 100 号).
- 7) 宮田志郎, 竹村誠洋, 古田彰彦, 森田健治, 松井和幸. NKK 技報. no.171, 2000-9, p.14-20.
- 8) 小森務, 京野一章, 加藤千昭. 川崎製鉄技報. vol.35, no.3, 2003, p.38-43.
- 9) 弓削佳徳, 堀紀文, 西田俊一. 川崎製鉄技報. vol.30, no.3, 1998, p.137-141.
- 10) 工藤純一ほか. 橋梁と基礎. 2000-4, p.11-14.
- 11) 森影康ほか. 低変態温度溶接材料を用いた溶接継手の疲労強度に及ぼす鋼板強度の影響. 溶接学会全国大会講演概要. vol.68, 2001, p.144-145.



川端 文丸



松井 和幸



小日向 忠



小森 務



竹村 誠洋



久保 高宏