

(解説)

溶接継手疲労強度改善溶接施工法と溶接材料

Welding Process and Consumables Aimed at Improving Fatigue Strength of Joints



宮田 実*¹
Minoru MIYATA



鈴木 励一*¹
Reiichi SUZUKI

The fatigue of steel structures, an important problem, is mainly attributable to stress concentration and tensile residual stress at their weld toes. In order to improve the fatigue resistance of welds, welding consumables, called low-temperature transformation (LTT) consumables, have been developed and their effectiveness demonstrated. Conventional LTT consumables, however, contain large amounts of Ni, posing problems of high cost, poor mechanical properties and low cracking resistance, which has hindered their widespread use. With this in mind, a study was conducted to replace Ni with Mn, which confirmed that Mn can more effectively improve fatigue resistance than Ni. Two newly developed consumables, "TRUSTARC™ MX-4AD" and "TRUSTARC™ LB-3AD", exploit Mn to improve the crack resistance and reduce cost. When used for additional beads, these welding consumables were confirmed to improve the fatigue resistance as well as or better than other methods such as grinding treatment, a standard method for increasing fatigue strength, or peening treatment, which is becoming widespread.

まえがき = 近年、首都高速道路をはじめとする多くの鋼橋で経年疲労によるき裂が大きな問題となっている。溶接部は、溶接止端部の応力集中や残留応力により構造的に耐疲労性を劣化させる箇所であり、溶接部の耐疲労性向上技術への期待は大きい。

現在、溶接部の耐疲労性を向上させるために、応力集中緩和を目的としたグラインダによる止端形状仕上げや、圧縮残留応力の付与を目的としたピーニング処理¹⁾といった手法が採用されている。しかし、これらの方法は施工能率低下や特殊装置の準備が必要となり、大きな負荷となっている。

溶接材料による耐疲労性向上手法としては、低変態温度 (Low Transformation Temperature, 以下LTTという) 溶接材料と呼ばれる特殊な溶接材料を使用する方法が研究開発されている^{2)~4)}。これまでに研究開発されてきたLTT溶接材料は①溶接材料の価格、②機械的性能、③耐欠陥性 (遅れ割れ、高温割れ) の面で一般的な溶接材料に大きく劣るため、本格的な実用化には至っていない。

そこで当社では、これらの課題を解決しつつ耐疲労性向上に有効なLTT溶接材料を開発すべく、従来のLTT溶接材料とは異なる新たな成分系の提案を行った。また、得られた知見をもとに、橋梁 (りょう) 業界での使用量が多いすみ肉溶接用フラックス入りワイヤ (FCW) TRUSTARC™^{注)} MX-4AD (以下、MX-4ADという)、全姿勢溶接性に優れる被覆アーク溶接棒TRUSTARC

LB-3AD (以下、LB-3ADという) の2銘柄を製品化したので、本稿において紹介する。

1. LTT溶接材料による耐疲労性向上メカニズム

LTT溶接材料とは冷却過程における溶接金属の相変態膨張を利用し、溶接後に生じる引張残留応力を緩和する技術である。図1に示すように、一般的な溶接材料を用いた場合、700℃以上の高温域において相変態するため、変態完了後の溶接金属の熱収縮が母材に拘束され、引張残留応力が生じてしまう。それに対し、LTT溶接材料は変態開始温度を500℃以下にまで低下させることで、より室温近くまで溶接金属の変態膨張が持続し、溶接後の残留応力を弱い引張もしくは圧縮とすることができる。鉄鋼材料の変態開始温度 (以下、Ms点という) に関する研究はこれまでに多くの報告があるが、その一例を式(1)⁵⁾に示す。

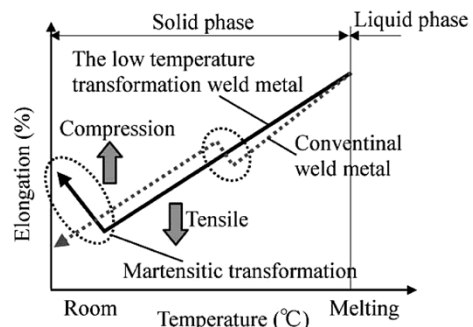


図1 溶接金属の低温変態による圧縮残留応力化機構
Fig. 1 Mechanism of making residual strength compress around weld bead by effect of low temperature transformation

脚注) TRUSTARC (TRUSTARC™) は当社の商標である。

*¹ 溶接事業部門 技術センター 溶接開発部

変態開始温度 (°C)

$$=529 - 382 \times (\%C) - 31 \times (\%Mn) - 18 \times (\%Ni) - 9 \times (\%Mo) - 5 \times (\%V) - 33 \times (\%C) \times (\%Cr) \dots\dots\dots (1)$$

変態開始温度の低下にはC, Mn, Ni, Crといった元素の添加が効果的であることがわかる。これまでに研究開発されてきたLTT溶接材料は主要元素としてNiを10%程度添加しており、変態開始温度を200°C以下にまで低下させている⁶⁾。しかし、Niは変態開始温度の低下に有効である一方、耐高温割れ性の劣化や過度の溶接金属強度上昇、溶接材料コストの増加をもたらし、LTT溶接材料普及の障壁となっていた。今回当社では、Niに代わるLTT効果元素として、Niと同様に変態開始温度の低下に効果のあるMnを積極的に活用したLTT溶接材料の開発を行った。

2. 付加溶接施工法

LTT溶接材料は、成分系にかかわらず溶接金属の強度が高く、かつ低靱（じん）性となる性質がある。この特性から、継手の疲労特性向上には寄与するが、溶接部の脆（ぜい）性破壊や耐遅れ割れ性劣化の懸念がある。したがって、LTT溶接材料を従来溶接材料から単に置き換えるだけでは短所の改善はできない。このため、LTT溶接材料の適用に際しては施工法も考えた開発が必要である。

道路橋示方書⁷⁾によると、十字溶接継手やガセット溶接継手のようなすみ肉溶接止端部は応力集中しやすく、とくに破壊の起点になりやすい箇所であるとされている。このような部位にLTT溶接材料を適用することは疲労特性向上に効果的である。しかし、図2(a)に示すように、横板と縦板（リブ）が交差する箇所を、すみ肉溶接のような部分溶込み溶接（以下、主溶接という）した場合、溶接止端部に加えてルート部においても大きな応力集中が生じる。そのため、LTT溶接材料の主溶接適用は、ルート割れの発生、さらに構造物の脆性の崩壊の危険性増加が懸念される（図2(b)）。これらの問題を回避するために、主溶接用としては、健全な溶接継手の作成を目的に従来の490MPa級鋼用溶接材料を適用し、LTT溶接材料は溶接ビード止端部の引張残留応力

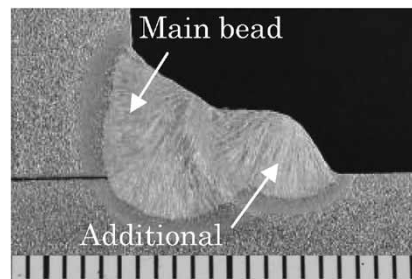


図3 付加溶接部の断面形状
Fig. 3 Cross section of additional welding process

緩和を目的に主溶接ビード止端部に肉盛溶接する、いわゆる付加溶接用として適用する施工法を試みた（図2(c)、図3）。

付加溶接施工法を行うことにより、溶接部ののど厚および脚長増加によるマクロ的な応力集中の緩和効果も期待できる。

3. 溶接材料へのMn添加による耐疲労性向上効果の検討

3.1 供試溶接材料の組成

試験に用いたフラックス入りワイヤを表1に示す。主溶接用および比較用として当社490MPa級鋼用のすみ肉溶接材料の中で最も一般的なFAMILIARCTM MX-200（以下、MX-200という）を使用した。そして、MnおよびNiによる耐疲労性向上効果を検証すべく、MX-200をベースにMn, Ni量を変化させた試作FCW（B～E）を用いて試験を行った。

これらの供試材料に対し、フォーマスター試験機を用いた変態点測定を行ったところ、これまでの知見どおり、MnもNiと同様に変態点を低下させる効果を有することが確認された。また、図4のように、Mn, Niそれぞれの添加量を5%とした場合、Mnの室温における溶

表1 全溶着金属中のMnおよびNi量と変態開始温度
Table 1 Mn and Ni content (%) in all deposited metal and Ms point

Wire	Mn	Ni	Ms point (°C)	Purpose
MX-200	1.7	0	670	Base
FCW B	2.1	3.1	490	Increasing Ni from MX-200
FCW C	2.0	5.2	390	Increasing Ni from MX-200 and FCW B
FCW D	3.6	0	490	Increasing Mn from MX-200
FCW E	5.5	0	310	Increasing Mn from MX-200 and FCW D

		(a) Conventional welding joint	(b) Welding joint using LTT welding consumables as main bead	(c) Welding joint using LTT welding consumables as additional bead
		Geometric stress concentration Conventional welding consumable	 LTT welding consumable	Conventional Welding consumable LTT welding consumable
R o t T o c	Crack resistance and Toughness	Good	Poor	Good
	Residual stress	Tensile	Compression	Compression
	Fatigue strength	Low	Improve	Improve

図2 すみ肉溶接における①疲労性能と②耐割れ性および靱性の相反性とそれらの両立

Fig. 2 Process to balance ①fatigue strength with ②crack resistance and toughness

脚注) FAMILIARC (FAMILIARCTM) は(株)神戸製鋼所の商標である。

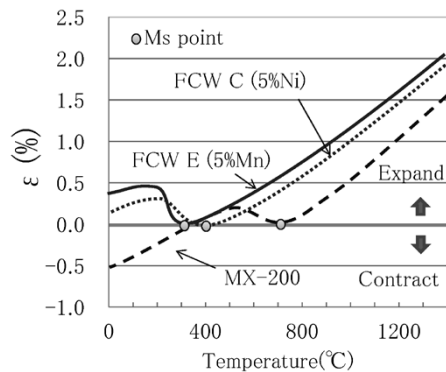


図4 従来溶接材料と5%MnおよびNi添加溶接材料の伸び-温度特性
Fig. 4 Relationship between temperature and elongation of conventional welding consumable, FCW C and FCW E

着金属の膨張量はNiに比べ、より大きなものとなっており、Mnの積極添加による圧縮残留応力付与および耐疲労性改善効果が期待できることがわかる。

3.2 残留応力測定および疲労試験方法

母材としてSM490YA（板厚12mm）を用い、図5に示す両側すみ肉溶接継手を作製し、溶接止端部の残留応力測定および三点曲げ疲労試験を実施した。なお、表2のように、主溶接部には全ての試験体においてMX-200を、付加溶接部へはそれぞれMX-200, FCW B~Eを用いて試験体を作製した。溶接条件は、溶接電流：280A, 溶接速度：450mm/min, シールドガス：100%CO₂とした。

試験体作製後、溶接線方向中央における溶接ビード止端部の表面残留応力をX線残留応力測定法により測定した。測定点は溶接止端部から0.5mm位置とした（図6）。

疲労試験は図7に示す試験片に加工し、応力比0.1として三点曲げ疲労試験を実施した。公称応力は式（2）

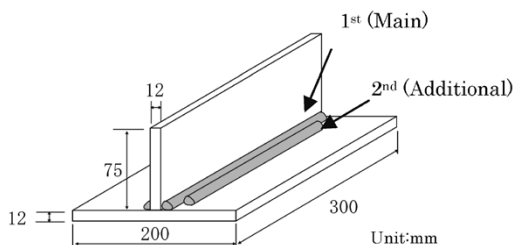


図5 試験体概要
Fig. 5 Schematic and size of the test joint

表2 溶接ワイヤの組み合わせ
Table 2 Combination of welding wires

Main (1 st)	Additional (2 nd)
MX-200	MX-200
	FCW B
	FCW C
	FCW D
	FCW E

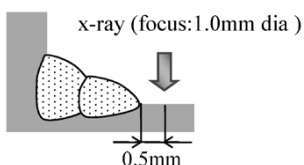


図6 残留応力測定位置
Fig. 6 Schematic of residual stress measured point

として計算した。

$$\text{公称応力 } \sigma \text{ (MPa)} = 3PL / 2wb^2 \dots \dots \dots (2)$$

P : 試験荷重 (N), L : 支点間距離 (mm),
 w : 板幅 (mm), b : 板厚 (mm)

3.3 Mn添加による引張残留応力の緩和および耐疲労性改善効果

図8にT形すみ肉継手止端部の残留応力測定結果を示す。全溶着金属中のNi量が2%増加するにつき止端部の圧縮残留応力が20MPa程度高くなっている。これに対してMnは、2%増加するにつき50MPa程度高くなっており、Niよりも圧縮残留応力付与効果が高いことがわかる。

また、図9に示すように、継手の耐疲労性もMn, Ni

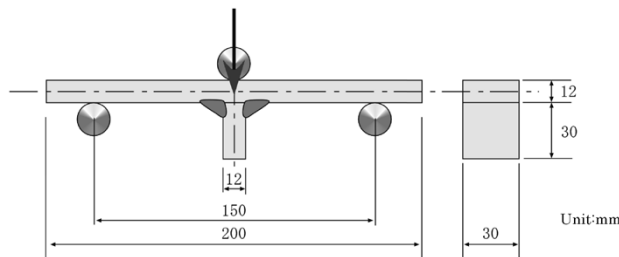


図7 曲げ疲労試験体の概要
Fig. 7 Schematic diagram of specimen for bending fatigue test

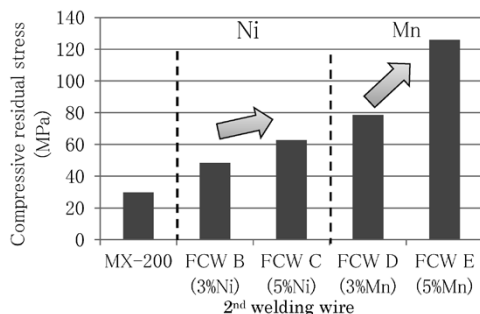


図8 NiおよびMn添加によるビード止端部の表面圧縮残留応力変化
Fig. 8 Effect of Ni and Mn content on residual stress at surface of base metal nearby weld toe

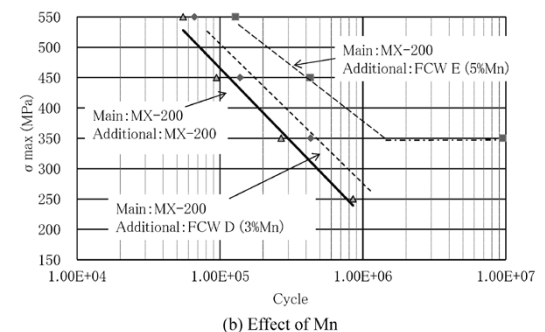
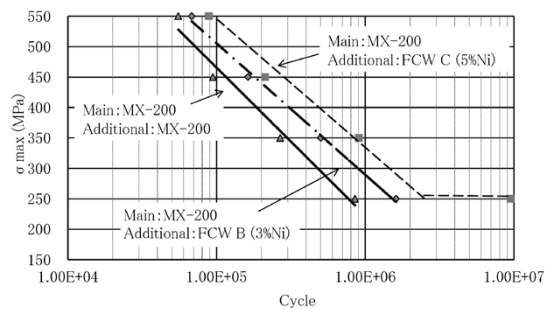


図9 NiおよびMn添加による耐疲労性向上効果
Fig. 9 Effect to improve bending fatigue strength by increasing Ni and Mn content

添加量の増加に伴って向上している。便宜的にこれらの 10^5 回強度について回帰分析を実施したところ式(3)が得られ、MnはNiの2倍程度の耐疲労性向上効果があることが示唆された。

$$10^5 \text{回強度 (MPa)} = 390 + 32 \times (\% \text{Mn}) + 18 \times (\% \text{Ni}) \dots (3)$$

(Mn: 1.7-5.5wt%, Ni: 0.5wt%, N=5, R=0.99, R²=0.98, 標準誤差=6.7)

4. 耐疲労性向上溶接材料MX-4AD, LB-3AD

4.1 MX-4ADおよびLB-3ADの諸性能

LTT溶接材料の実用化を考える場合、必要十分な靱性(0℃47J)の確保、実用的条件下で良好な耐高温割れ性を有することが必要となってくる。今回開発した、MX-4ADおよびLB-3ADはMnおよびNiの添加量を調整し、上記要求を満足する成分設計とした(表3)。

炭素鋼系のFCWは一般的に、ワイヤに内包されるスラグ源(氧化物)が溶接金属中に介在物として残存しやすく、低靱性溶接金属となる。そのため、MX-4ADのMn添加量は靱性と疲労強度改善効果のバランスを考慮して、溶着金属で4%程度とした。一方、低水素系被覆アーク溶接棒は塗布フラックス中の強力な脱酸材が作用し、低酸素で介在物が少なく、FCWよりも高靱性な溶接金属を得ることができる。したがって、Mn+Niの添加量限界上限は高い。LB-3ADについては溶着金属で3%Mn-3%Niとしても十分な靱性と良好な耐高温割れ性を確保することができた。なお、耐高温割れ性の評価はJIS Z 3155に基づきC形ジグ拘束割れ試験(フィスコ割れ試験)を行い、スタートおよびクレータを除く定常部において割れの有無について評価を行った。

変態開始温度(Ms点)は、図10に示すように、MX-4AD, LB-3ADともに490MPa級溶接材料であるMX-200

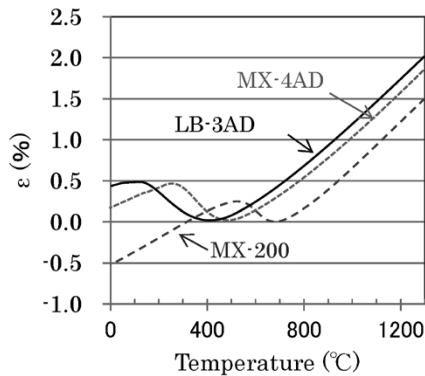


図10 開発溶接材料の伸び-温度特性

Fig.10 Relationship between temperature and elongation of developed welding consumables

表3 開発溶接材料の全溶着金属化学成分, 変態開始温度, 機械的性能および高温割れ試験*結果

Table 3 Chemical compositions, Ms points, and mechanical properties of all deposited metal and results of hot crack test* of developed welding consumables

	Chemical compositions (wt%)						Ms point (°C)	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	absorbed energy at 0°C (J)	Result of hot crack test*
	C	Si	Mn	Ni	Cr	O						
MX-4AD	0.029	0.38	4.3	-	-	0.069	472	727	820	23	53	No crack
LB-3AD	0.034	0.41	3.3	3.3	-	0.019	408	895	973	20	72	No crack

*According to JIS Z 3155 FISCO test

※MX-4AD: Welding current 280A-Welding speed 300 and 600 mm/min

LB-3AD: Welding current 140A-Welding speed 150 and 300 mm/min

に比べて大きく低下させることができている。とくに、合金元素添加量の多いLB-3ADは室温での変態膨張量がより大きくなっており、高い耐疲労性向上効果が期待できる。

4.2 MX-4ADおよびLB-3ADによる継手耐疲労性向上効果

MX-4ADおよびLB-3ADによる耐疲労性向上効果を検討するために、前章と同様にMX-200を主溶接部に、開発LTT溶接材料を付加溶接部に用いて図4に示したT形すみ肉溶接継手を作製し、溶接止端部の残留応力測定および三点曲げ疲労試験を実施した。また、MX-200を用いてT形すみ肉継手を作製後、溶接止端部にピーニング処理を施した試験体およびグラインダによる溶接止端部の平滑化処理を施した試験体を比較用として作製した。なお、ピーニング用のピン先端径は2.5mm, グラインダによる仕上げ止端半径は4.5mmとした。止端部の外観を図11に示す。

図12に残留応力測定結果を示す。溶接ビード止端部の残留応力を比較すると、MX-200を用いた主溶接部の

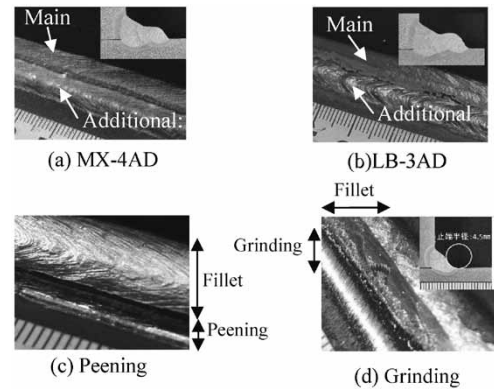


図11 各処理後のビード外観

Fig.11 Bead appearance after each treatment

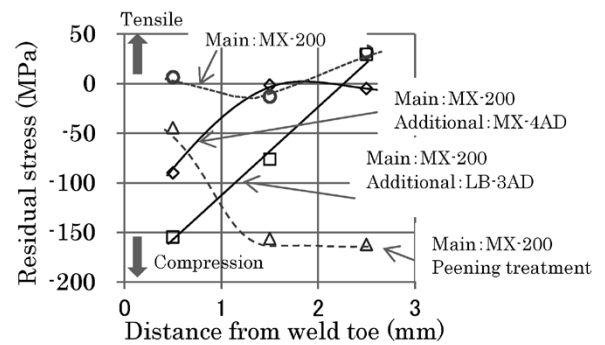


図12 開発溶接材料のビード止端部の表面残留応力の比較

Fig.12 Comparison of residual stress at surface of base metal neighbor weld toe of developed welding consumables

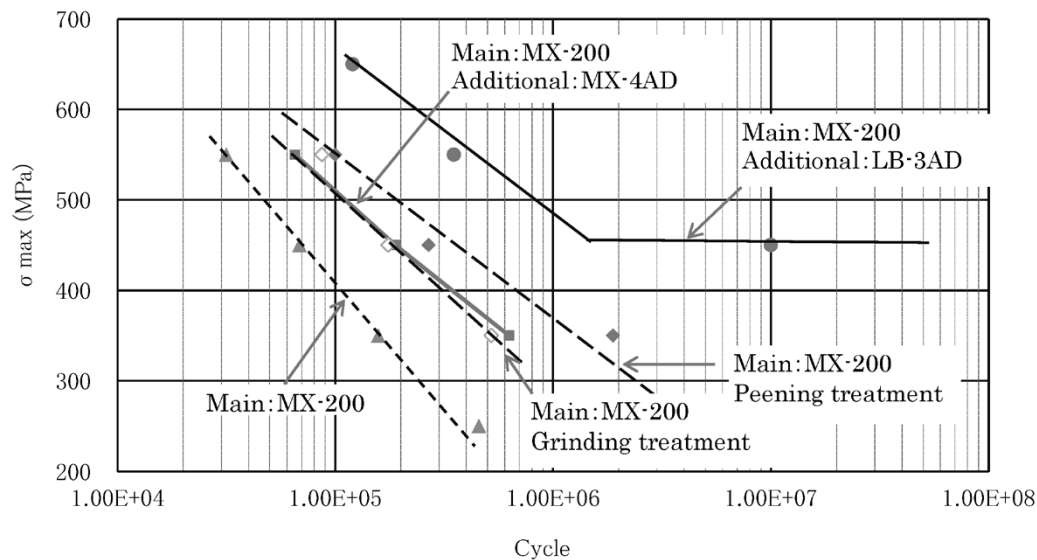


図13 各処理における曲げ疲労強度比較
Fig.13 Comparison of bending fatigue strength of each treatment

みのT形すみ肉継手では引張残留応力が生じているのに対し、開発LTT溶接材料を用いて付加溶接を施した試験体には大きな圧縮残留応力が付与されていることがわかる。さらに、LB-3ADにおいては溶接止端部ごく近傍での圧縮残留応力がピーニング処理より強くなっていることがわかる。

図13に各処理による耐疲労性改善効果をまとめる。MX-4ADを用いた場合は、グラインダ処理と同等の改善効果を有しており、施工能率の非常に低いグラインダ処理からMX-4ADを用いた付加溶接処理への切り替えにより作業時間の短縮が期待できる。また、LB-3ADについてはピーニング処理の倍程度の長寿命化効果を有しており、作業時間の短縮のみならず、現状の施工法よりも大きな耐疲労性向上効果が期待される。

むすび = 本稿では新しいLTT溶接材料としてMn積極添加の検討を実施し、その効果を確認した。そして付加溶接施工法用の耐疲労性向上溶接材料としてMX-4ADお

よびLB-3ADの2銘柄を製品化した。これらを用いて付加溶接を行うことにより、MX-4ADはグラインダ処理からの置換による作業時間の短縮が、一方、LB-3ADについては優れた耐疲労性向上効果により、従来処理以上の構造物長寿命化が期待できる。

今後はこれらの溶接材料の実用化を進めるとともに、当社溶接材料、溶接システムを活用し、安全・安心な社会インフラの提供に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 野瀬哲郎. 溶接学会誌. 2008, 第77巻, 第3号, p.6-9.
- 2) 西尾 大ほか. 土木学会第68回年次学術講演会概要集2013-9-4/6. 2013, p.1109-1110.
- 3) 三木千壽ほか. 土木学会論文集. 2002, No.710/I-60, p.311-319.
- 4) 富永知徳ほか. 土木学会論文集. 2010, Vol.66, No.4, p.653-662.
- 5) 一本木優佳理ほか. 九州工業大学研究報告. 工学 53, 93-98, 1986-09.
- 6) 糟谷 正. 溶接技術. 2014, 10月号, p.45-49.
- 7) 日本道路協会. 道路橋示方書 同解説. 2012, p.200-206.