

(技術資料)

建築用予熱フリー型KCLA440鋼の性能

安岡佑樹*¹

Performance of Preheating-free Type KCLA440 Steel for Construction

Yuki YASUOKA

要旨

新たに開発した予熱フリー型KCLA440鋼について、母材と溶接継手の特性の観点から、その性能を紹介した。TMCP技術を活用することにより、母材の強度を確保しながら成分添加量を低減することが可能となり、予熱フリーが実現できた。また、溶接継手については、Ti添加によるHAZ部の結晶粒微細化、成分調整によるHAZ部のMA分率低減により、90 kJ/mmの大入熱溶接でも良好な特性を確保できた。

Abstract

This paper presents the performance of newly developed preheat-free KCLA440 steel in terms of base metal and weld joint properties. The thermo-mechanical control process (TMCP) technology has enabled the reduction of additional elements while maintaining the strength of the base material, thus realizing a preheating-free process. As for the welded joints, excellent properties have been secured even in high-heat-input welding of 90 kJ/mm, thanks to the grain refinement achieved in the heat affected zone (HAZ) by the addition of Ti and to the reduction of the martensite/austenite (MA) fraction in the HAZ by composition adjustment.

検索用キーワード

建築用厚鋼板, 予熱フリー, 大入熱溶接, 継手靱性, HAZ, MA, 旧 γ , TMCP, P_{CM} , ESW

まえがき=近年、建築構造物は高層化が進んでおり、必要とされる鋼板は高強度化している。引張強度590 MPa以上の高強度を達成するためには、合金元素の添加量を増加することが一般的である。しかし、合金元素の添加量増加は溶接割れ感受性組成（以下、 P_{CM} という）の増加を招き、溶接施工時の予熱が必要となる。同時に、焼入れ性が上昇することにより、エレクトロスラグ溶接（以下、ESWという）等の大入熱溶接時の熱影響部（以下、HAZという）組織が粗大な上部ベイナイトと島状マルテンサイト（以下、MAという）の混合組織となり、HAZ靱性が著しく劣化する^{1), 2)}。このように、予熱フリーおよび大入熱溶接継手靱性の確保が高強度鋼の課題であった。

当社では、TMCP (Thermo Mechanical Control Process, 以下TMCPという) 技術の活用と成分調整を実施することにより、予熱フリーおよび大入熱溶接継手靱性に優れた引張強度590 MPa鋼板KCLA440を開発した。本稿では、この開発内容を紹介する。

1. 開発のコンセプト

1.1 予熱フリーおよび溶接継手靱性確保のコンセプト

一般に、合金元素の添加量増加にともなって P_{CM} が増加するため、予熱が必要となる。 P_{CM} を0.22以下にする

と予熱フリーが確保できる³⁾。大入熱溶接継手靱性に関しては、HAZ部における(1)ベイナイト組織微細化、および(2)MA分率低減により改善を図った。(1)に対しては、HAZ部の旧 γ 粒径の粗大化を抑制することが有効であり、TiNによるピン止め効果の活用を手段として採用した。(2)に対しては、C添加量の低減が効果的であるが、Siを低減させてもMA分率が低減することが知られている⁴⁾ため、C添加量の低減およびSiレス化を手段として採用した。

1.2 母材特性確保のコンセプト

従来型590 MPa鋼では、合金元素の添加量増加に加え、オフラインでの焼入れを含む複雑な熱処理の実施により母材特性、とくに590 MPaクラスの引張強度を確保している。いっぽう、本開発鋼はHAZ部のMA分率を低減させるために、従来型590 MPa鋼に比べてCを低減させ、またSiレスとしている。さらに、予熱フリー確保のために P_{CM} を低減させており、合金元素の添加量も従来型590 MPa鋼から低減させる必要がある。このような低 P_{CM} 成分系において母材特性を満足させるために、TMCP技術による変態強化を活用した。これにより、低 P_{CM} 成分系においても590 MPaの引張強度を確保することができた。

*¹ 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 鋼板開発部 (現 鉄鋼アルミ事業部門 加古川製鉄所 鋼板技術部)

2. KCLA440の主要特性

2.1 開発鋼の成分

開発鋼の成分を表1に示す。開発鋼の成分は、従来鋼に比べてCを低減させ、またSiレスとしている点に特徴がある。これはHAZ部のMA分率低減を狙ったものである。さらに、HAZ部旧 γ 粒径の微細化を狙い、Tiを添加している。

C添加量の低減およびSiレス化によるHAZ部のMA分率の変化を図1に示す。成分添加量の低減により、MA分率が低下していることが確認できる。Ti添加によるHAZ部の旧 γ 粒径の変化を図2に示す。Ti添加により、旧 γ 粒径が微細化していることが確認できる。また、開発鋼では、予熱フリー確保のために合金元素の添加量も低減させており、低 P_{CM} (≤ 0.22) 化を実現している。

表1 開発鋼の化学成分
Table 1 Chemical compositions of steels

Steel	Chemical compositions (mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Others	P_{CM}
Developed	0.09	<0.01	1.50	0.005	0.002	0.012	Mo, V, Nb	0.19
Conventional	0.12	0.24	1.47	0.007	0.001	<0.001	Cu, Ni, Mo, V, Nb	0.23

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

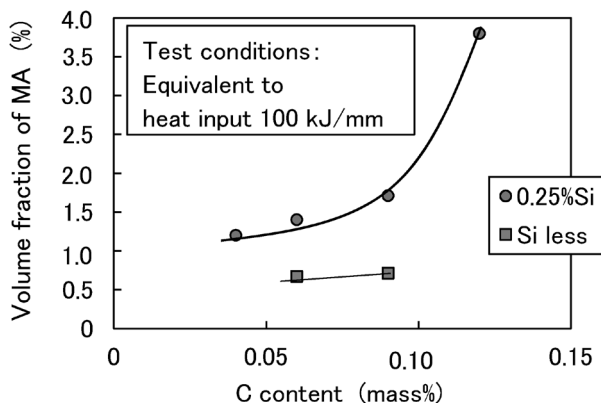


図1 C, Si添加量とMA分率の関係

Fig.1 Relationship between C, Si addition amount and MA fraction

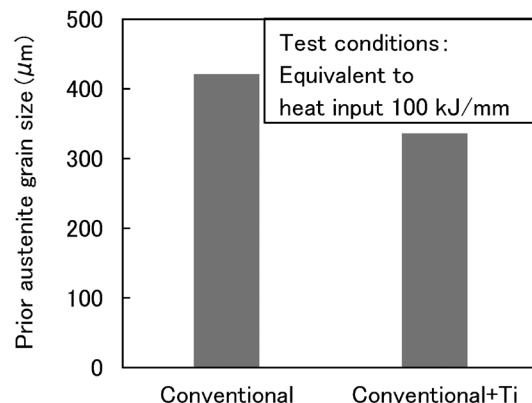


図2 Ti添加による旧 γ 粒径微細化

Fig.2 Refinement of prior austenite diameter by Ti addition

表2 引張試験結果
Table 2 Results of tensile tests

Thickness (mm)	Specimen shape	Position	Direction	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	YR (%)
19	JIS No.5	Full-thickness	C	474	656	39	72
32	JIS No.4	1/4t	C	507	697	30	73
40	JIS No.4	1/4t	C	518	657	28	79
65	JIS No.4	1/4t	C	494	648	25	76
100	JIS No.4	1/4t	C	503	669	27	75
KCLA440 spec.	JIS No.5	Full-thickness	C	440~540	590~740	29 \leq	≤ 80
	JIS No.4	1/4t				20 \leq	

C: Transverse to rolling direction

表3 シャルピー衝撃試験結果
Table 3 Results of Charpy impact tests

Thickness (mm)	Position	Direction	$vE_{0.ave}$ (J)
19	1/4t	L	284
32	1/4t	L	274
40	1/4t	L	281
65	1/4t	L	303
100	1/4t	L	231
KCLA440 spec.	1/4t	L	70 \leq

L: Parallel to rolling direction

Specimen shape: JIS Z 2242 V notch

2.2 母材特性

開発鋼に対して引張試験, シャルピー衝撃試験を実施した(表2および表3)。表1に示したように, 開発鋼は従来型590 MPa鋼に比べて低 P_{CM} 成分系ではあるものの, TMCP技術の活用により, 引張試験, シャルピー試験ともにKCLA440の規格値を十分満足している。

2.3 溶接性

開発鋼に対して γ 形溶接割れ試験を実施した。溶接条件および試験結果をそれぞれ表4および表5に示す。本開発鋼の成分は低 P_{CM} (≤ 0.22) であるため, 予熱0 $^{\circ}$ Cでも割れは発生せず, 予熱フリーを確保できている。

2.4 溶接継手靱性

2.4.1 ESW継手性能評価にあたっての事前検討

ESWは建築構造物用施工に使用される種々の溶接法の中で最も入熱が大きく, とくに継手靱性確保が課題と

表4 Y形溶接割れ試験溶接条件
Table 4 Welding conditions for Y-groove weld cracking test

Thickness (mm)	Welding method	Welding material	Welding conditions				
			Pre-heating temperature (°C)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Heat input (kJ/mm)
100	GMAW (CO ₂)	JIS Z 3312 G 59J A 1 U C 3M1T	0	280	30	30	1.68

表5 Y形溶接割れ試験結果
Table 5 Results of Y-groove weld cracking test

Thickness (mm)	Pre-heating temperature (°C)	Cracking ratio (%)		
		Surface	Section	Root
100	0	0	0	0
		0	0	0
		0	0	0

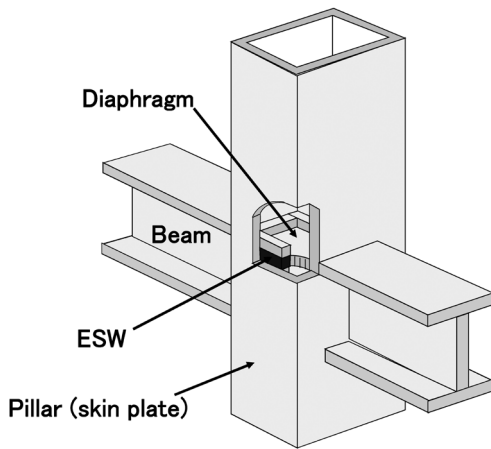


図3 ボックス柱におけるESW継手部
Fig.3 ESW joint in BOX column

なる。ESWは図3に示すような溶接組立箱形断面柱(ボックス柱)におけるスキンプレートとダイアフラムの接合に使用されることが多い。そこで、継手靱性確保が高難度となるスキンプレートとダイアフラムの板厚組み合わせ条件について事前検討を行った。

一般に、590 MPa鋼のHAZ組織は上部ベイナイトとMAの混合組織であり、本開発鋼も同様である。溶接後(冷却中)の未変態オーステナイトにCが濃縮することにより、MAは熱力学的に安定化したオーステナイトから生成される。したがって、Cの拡散時間が長いほど、すなわち800°C→500°Cの冷却時間(Tc)が長いほど、MA分率は大きくなる。いっぽう、ベイナイト組織サイズもTcが長いほど粗大になる。以上の理由から、Tcが長いほど継手靱性は低値になると考えられる。

ここで、スキンプレートが薄いほど溶接入熱の抜熱が小さく、Tcは長くなる。いっぽう、ダイアフラムが厚いほど溶接入熱が大きくなり、Tcは長くなる。したがって、スキンプレート厚が薄いほど、かつダイアフラム厚が厚いほどTcは長くなる。一般的な溶接施工においては、スキンプレート厚に対してダイアフラム厚が最大で4サイズアップまでの板厚組み合わせが使用され、ダイアフラムは最大で70 mm厚までが適用される。そこで、ダ

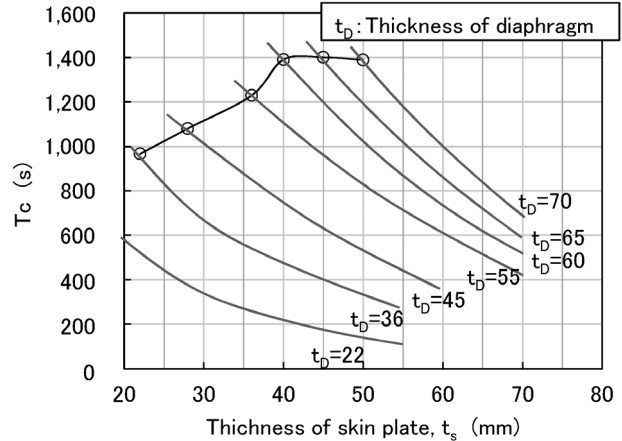


図4 種々のスキンプレートとダイアフラムにおけるTc計算結果
Fig.4 Tc calculation results for various skin plates and diaphragms

イアフラム厚70 mm以下の板厚範囲のもと、種々のスキンプレート厚に対してダイアフラム厚が4サイズアップの条件下で、Tcが最も長くなる板厚範囲をFEM解析により算出した。その結果を図4に示す。図4では、ダイアフラム厚を固定してスキンプレート厚を変化させたときのTcの変化をダイアフラム厚ごとに実線で示している。また、ダイアフラム厚がスキンプレート厚の4サイズアップのデータを白抜きのプロットで示している。スキンプレート厚が40~50 mmの範囲(すなわちダイアフラム厚が60~70 mmの範囲)において、Tcが極大になることが確認できる。

2.4.2 ESW継手靱性

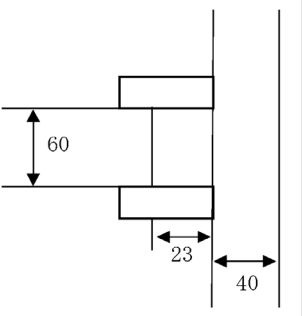
前節で明らかにした、Tcが極大値となるスキンプレート厚が40~60 mmの範囲において、スキンプレート40 mm、ダイアフラム60 mmを組み合わせた場合の継手靱性値を一例として評価した。溶接条件および開先形状を表6、断面マクロ観察結果を図5に示す。図5より、継手部は健全な溶け込み状態になっていることが確認できる。シャルピー試験片採取位置を図6、シャルピー試験結果を表7に示す。入熱90 kJ/mmの大入熱溶接においても、建築鉄骨溶接部の機械的性質の標準試験マニュアル⁵⁾にて規定されている標準性能である平均値27 J以上を十分満足することが確認できた。

2.4.3 SAW, CO₂溶接継手靱性

ボックス柱のスキンプレートとダイアフラム部にはESWが適用されるが、図7に示すように、角部においてはサブマージアーク溶接(SAW)、柱-柱部においてはCO₂溶接が適用される。そこで、開発鋼に対してSAW継手靱性、CO₂溶接継手靱性を評価した。

SAWにおける溶接条件および開先形状を表8、断面

表6 溶接条件および開先形状 (ESW)
Table 6 Welding conditions and groove shape (ESW)

Thickness (mm)	Pre-heat	Groove shape (mm)	Welding materials Welding conditions	Heat input (kJ/mm)
SP: 40 DIA: 60	None		【Welding materials】 JIS Z 3353 YES-602-M JIS Z 3353 FES-CS 【Welding conditions】 380A-50V 12.6mm/min	90.2

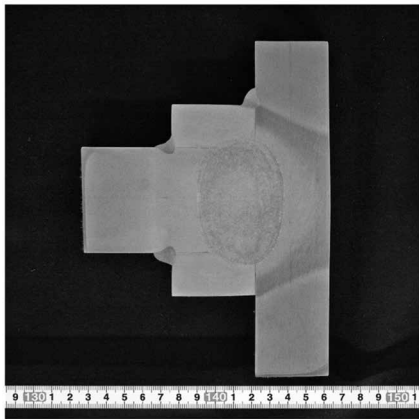


図5 断面マクロ観察結果 (ESW)

Fig.5 Result of cross-sectional macro observation (ESW)

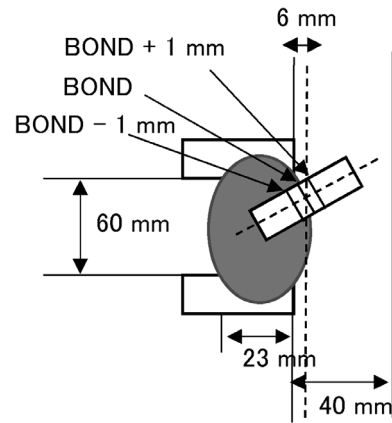


図6 シャルピー試験片採取位置 (ESW)

Fig.6 Notch positions for Charpy impact tests (ESW)

表7 シャルピー衝撃試験結果 (ESW)
Table 7 Results of Charpy impact tests (ESW)

Thickness (mm)	Collection site	Collecting position	Test temperature (°C)	Notch position	Absorbed energy (J)	
					Each	Average
SP:40 DIA:60	Skin plate side	6mm below the surface	0	BOND	77	76
					48	
					102	
				BOND + 1 mm	28	67
					131	
					43	

マクロ観察結果を図8に示す。継手部は健全な溶け込み状態になっていることが確認できる。シャルピー試験片採取位置を図9、シャルピー試験結果を表9に示す。同マニュアルの標準性能である平均値27 J以上を十分満足することが確認できた。

CO₂溶接における溶接条件および開先形状を表10、断面マクロ観察結果を図10に示す。継手部は健全な溶け込み状態になっていることが確認できる。シャルピー試験片採取位置を図11、シャルピー試験結果を表11に示す。同マニュアルの標準性能である平均値27 J以上を十分満足することが確認できた。

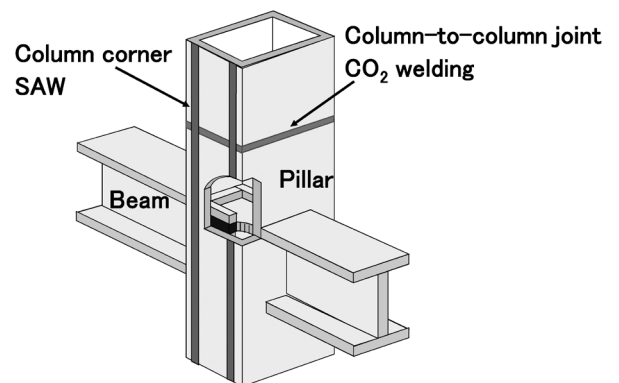
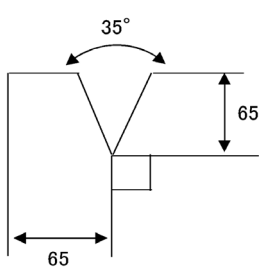


図7 ボックス柱におけるSAW, CO₂溶接継手部

Fig.7 SAW, CO₂ welded joints in BOX column

表8 溶接条件および開先形状 (SAW)
Table 8 Welding conditions and groove shape (SAW)

Thickness (mm)	Pre-heat	Groove shape (mm)	Welding materials Welding conditions	Heat input (kJ/mm)
65	None		【Welding materials】 JIS Z 3351 YS-M1 JIS Z 3352 SACG-I1 【Welding conditions】 L:2150A-45V T:1800A-48V 170mm/min	64.6

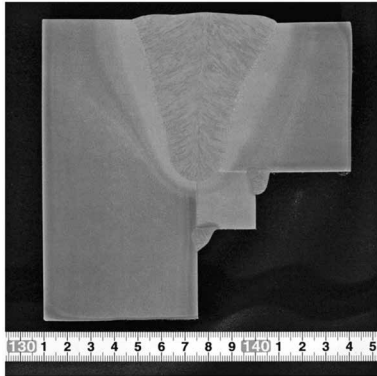


図8 断面マクロ観察結果 (SAW)

Fig.8 Result of cross-sectional macro observation (SAW)

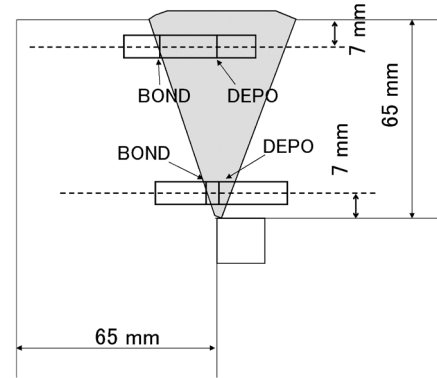


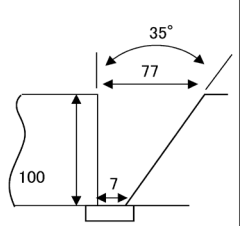
図9 シャルピー試験片採取位置 (SAW)

Fig.9 Notch positions for Charpy impact tests (SAW)

表9 シャルピー衝撃試験結果 (SAW)
Table 9 Results of Charpy impact tests (SAW)

Thickness (mm)	Collection site	Collecting position	Test temperature (°C)	Notch position	Absorbed energy (J)	
					Each	Average
65	Flange side	7mm below the surface	0	Central DEPO	133	128
					130	
					121	
				BOND	78	70
					63	
					68	
	Flange side	7mm above the back surface		Central DEPO	90	99
					100	
					108	
				BOND	48	78
					110	
					77	

表10 溶接条件および開先形状 (CO₂溶接)
Table 10 Welding conditions and groove shape (CO₂ welding)

Thickness (mm)	Pre-heat	Groove shape (mm)	Welding materials Welding conditions	Heat input (kJ/mm)	Welding position
100	None		【Welding materials】 JIS Z 3312 G 59J A 1 U C 3M1T 【Welding conditions】 280 A-35 V 300 mm/min Interpass temperature: ≤250°C Number of passes: 101	≤3.0	Flat

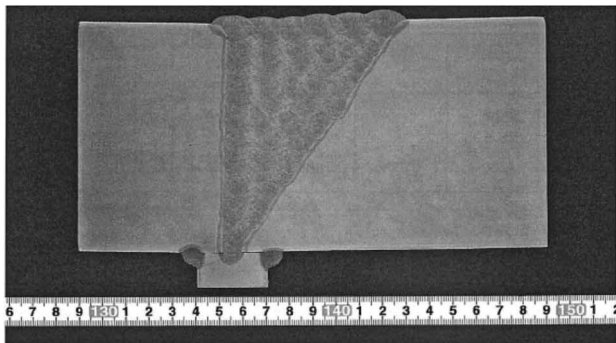


図10 断面マクロ観察結果 (CO₂溶接)
Fig.10 Result of cross-sectional macro observation (CO₂ welding)

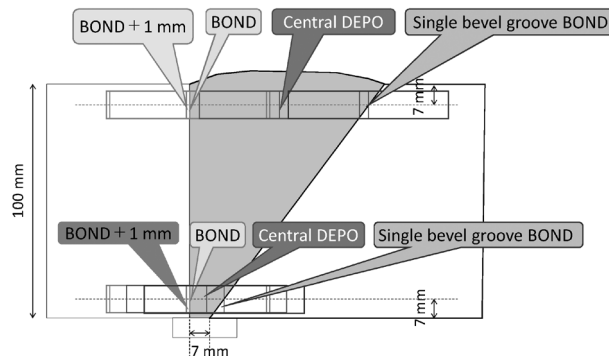


図11 シャルピー試験片採取位置 (CO₂溶接)
Fig.11 Notch positions for Charpy impact tests CO₂ welding

表11 シャルピー衝撃試験結果 (CO₂溶接)
Table 11 Results of Charpy impact tests (CO₂ welding)

Thickness (mm)	Collection site	Collecting position	Test temperature (°C)	Notch position	Absorbed energy (J)	
					Each	Average
100	Vertical side	7mm below the surface	0	Central DEPO	107	116
					115	
					126	
				BOND	77	73
					76	
					65	
	BOND + 1 mm	214		226		
		257				
		208				
	BOND	135		134		
		119				
		149				
	Vertical side	7mm above the back surface		Central DEPO	107	119
					138	
					115	
	BOND	118		112		
80						
139						
BOND + 1 mm	272	253				
	239					
	249					
Inclined side		BOND	109	110		
			110			
			110			

むすび=新たに開発した予熱フリー型KCLA440鋼の性能について、母材および溶接継手の特性面から紹介した。TMCP技術の活用により、母材強度を確保した上で低P_{CM}化が可能となり、予熱フリー化が実現できた。また、継手靱性に関しては、C低減およびSiレス化によるMA低減、Ti添加による組織微細化効果により、入熱90 kJ/mmの大入熱溶接時においても良好な性能を確保可能となった。

建設分野では、構造物の高層化、大空間化とともに、さらなる安全性向上が求められている。そのため、優れた材料特性への要望が一段と高まっている。当社は、こ

れからも需要家のニーズに対応した商品を開発・提供することにより、建設分野の発展に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 笠松 裕ほか. 鉄と鋼. 1979, Vol.65, No.8, p.92-101.
- 2) 山戸一成ほか. 溶接学会誌. 1981, Vol.50, No.1, p.11-19.
- 3) 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説Ⅱ, 鋼橋編. 2017.
- 4) 寺田好男ほか. まてりあ. 1999, Vol.38, No.3, P.236-238.
- 5) 一般社団法人日本鋼構造協会規格. JSSIV-13. 2016.