

応力集中の低減設計と圧縮溶接残留応力の生成によるLTT 伸長ビード溶接継手の疲労寿命延伸



特集
接合科学研究所
産学連携シンポジウム

大阪大学 接合科学研究所 国際産学連携溶接計算科学拠点 教授 麻 寧 緒氏
招へい教授 平 岡 和 雄氏、招へい教授 村 川 英 一氏

1. 溶接部の疲労き裂と疲労寿命の延伸技術

船体、橋梁および他の溶接構造などが使用中で発生する損傷の一つは、疲労き裂である。その中、図1に示される角回し溶接部は最も危険部位となり、その対策が求められ、疲労寿命の延伸が期待されている [1-8]。

鋼板や溶接継手の疲労強度について、昔から多くの試験が実施された [9]。鋼材の静的強度が高くなるに連れ、その疲労強度も上昇する。一方、溶接継手の疲労強度は、鋼材の高強度化により改善されず、溶接継手の種類に強く依存する。溶接継手の疲労寿命を延伸するため、以下3種類の方法が提案された。具体的には、①溶接部の応力集中低減法、②圧縮残留応力生成法および③それらを組合せた方法である。応力集中低減法①のアプローチには、溶接止端部の形状を滑らかにするグランディング仕上げ処理法、TIG（タングステン不活性ガスアーク溶接）溶接による再溶解処理法および追加溶接ビード法がある。溶接部で圧縮残留応力を生成するための方法②としては、各種表面ピーニング法（高周波機械的衝撃処理法、超音波ピーニング、ショットピーニング、レーザーピーニングなど）がある。方法①と②のいずれかは、追加工程が必要で、生産性が高いと言えない。また、方法②で生成された圧縮残留応力が溶接部の浅い領域しか存在せず、その効果は表面腐食により

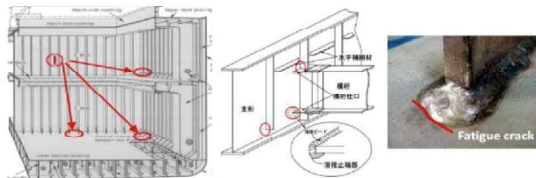


図1 船体と橋梁の角回し溶接部と疲労き裂の発生部位

消滅する可能性がある。著者らが溶接部の応力集中を低減すると共に、比較的深い領域まで圧縮残留応力の生成を目標とし、図2に示す角回し溶接部の上に40mmほど長さの伸長ビードを置く伸長ビード溶接法に低変態温度（LTT: Low Transformation Temperature）の溶接材料を同時適用するLTT伸長ビード技術 [1-6] を本報で解説する。

2. JWRIAN-IGAによる伸長ビードの形状寸法最適化と応力集中の最小化

伸長ビードの応力集中を最小化するため、数値解析の活用は非常に有効である。現在、1960年代で誕生した有限要素法（FEM: Finite Element Method）が応力解析に利用されている。有限要素解析（FEA: Finite Element Analysis）の前に、まず設計した構造形状デジタルデータ（CAD: Computer Aided Design）をFEA用に要素分割しなければならない。その作業時間が長くコストが高い。さらに形状寸法を最適化まで設計計算する場合、要素分割の作業を繰り返す必要があり、実用上では困難である。そこで、図3に示すCADを直接用いる新しい解析技術IGA（Iso-Geometric Analysis）の適用が望まれる。そのため、本研究分野は、構造応力解析のソフトウェアJWRIAN-IGA[10]を開発し、伸長ビードの形状寸法を最適化手法と組合せて決定した。

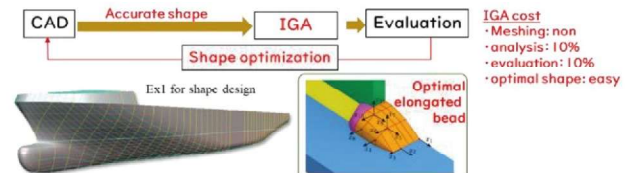


図3 CADを直接用いる応力解析IGAの流れ



図2 溶接伸長ビードと低変態温度溶接材料の併用

JWRIAN-IGAを用いた伸長ビードの形状寸法を図4に示す11個の設計変数で表す。最適化の計算では最大主応力で評価する伸長ビードの応力集中係数を最小にする目的関数を設定した。図5の左右

には、初期設計と最適化設計の形状寸法ならびに最大主応力の分布をそれぞれ示す。最適化した伸長ビードの長さが約40mmで最大応力集中係数が1.73に低減できた。最適化した伸長ビードの形状寸法をベースに製作した試験体（記号AE）の疲労寿命は、従来と比較して図6に示した2.8倍程度となる。

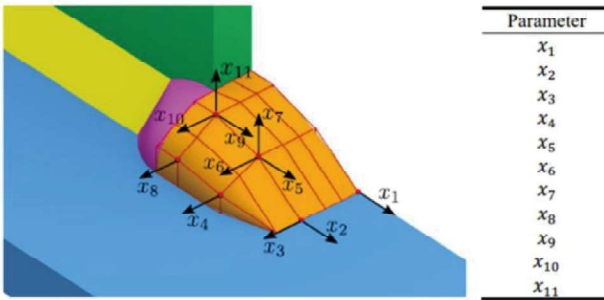


図4 伸長ビードの形状寸法の最適化設計変数 [10]

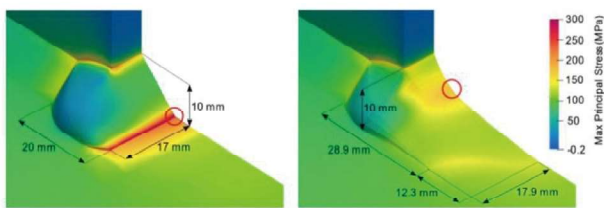


図5 伸長ビードの初期設計と最適化設計による応力集中の比較 [10]

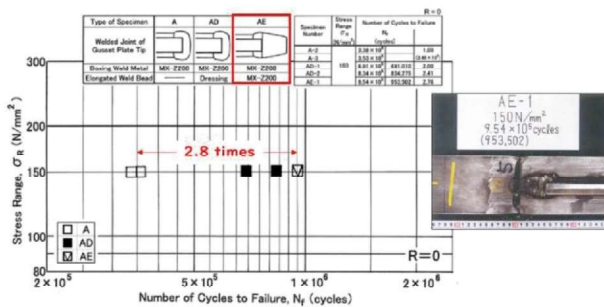


図6 伸長ビードの形状寸法の最適化設計による疲労寿命の2.8倍延伸 [6]

3. 全姿勢溶接用の新LTT溶接材料の設計と圧縮残留応力の生成

3.1 全姿勢溶接用の新LTT溶接材料の設計

これまでの研究は下向姿勢用のLTT溶接材料10%Cr-10%Niソリッドワイヤを使用して80%Ar-20%CO₂混合シールドガスのMAG溶接でLTT伸長ビード試験体を作製し、圧縮残留生成や疲労寿命の延伸効果を確認した[1]。

しかし、船体構造など既設構造物の補修や補強を

目的とする場合、下向溶接姿勢だけではなく、横向、立向、上向を含む全溶接姿勢で伸長ビード溶接可能なLTT溶接材料を新たに開発する必要がある。さらに高価なArシールドガスを使用しない100%CO₂シールドガスが要求されている。これらの産業界のニーズに満たすため、新LTT溶接材料の設計要件を以下のように決定した。

- (1) 全溶接姿勢で伸長ビード施工ができること
- (2) 100%CO₂シールドガスが使用できること
- (3) 十分な圧縮残留応力が生成できること
- (4) 凝固割れ抑止できること

設計要件(1)、(2)に対しては、まず市販全溶接姿勢対応のCO₂用ステンレス系フラックス入り溶接材料を用いて、全溶接姿勢での伸長ビード溶接の施工条件を探索した。その結果、溶融池金属が垂れ落ちる前に一瞬アークを休止し、その後、アーク溶接を再開する断続的な溶接施工が現実的と判断された。設計要件(3)に対しては、溶接金属において大きな圧縮残留応力を生成することである。従って、溶接材料の成分設計においては、希釈率が極めて重要である。そこで、伸長ビード溶接金属の希釈率を測定した。測定結果を図7に示し、希釈率が10%~30%の範囲にあることを明らかにした。

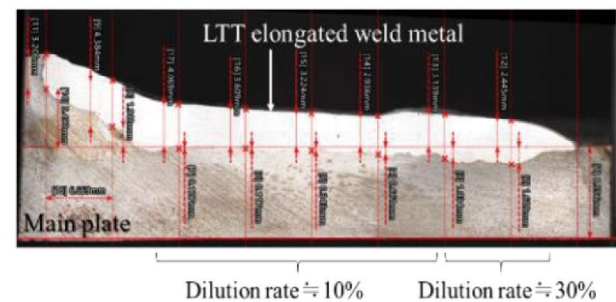


図7 LTT伸長ビード溶接金属の希釈率測定結果 [2, 6, 11]

次に、大きな圧縮残留応力を生成するためには、LTT溶接金属において、十分な変態膨張を確保することも必要である。マルテンサイト変態開始温度(Ms)が100℃以上250℃以下の範囲で、変態膨張量0.4%以上が得られることがわかっている(後述の図9参照)。従って、Ms温度が上記範囲を満足するように成分設計する必要がある。

また、LTT溶接金属のような高合金金属においては、凝固割れ感受性が高まる。そこで、設計要件

(4)として、この感受性を低減するために、凝固モードを、FAモード（初晶 $\alpha + (\alpha + \gamma)$ 2相凝固モード）となる成分を設計する必要がある。

図8に示すシェフラー図に、上述の設計要件を全て満足する溶接金属成分の領域を黄色で示した。なお、青線間が、FA凝固モードとなる成分領域である。

図8の結果から、クロム当量 Cr_{eq} とニッケル当量 Ni_{eq} をそれぞれ16.6%と9.0%となる溶接材料（赤丸●）が設計できる。 Cr_{eq} と Ni_{eq} の当量式(1)と(2)を用いて、表1に示す16%Cr-8%Ni溶接材料の化学成分を決定した。

$$Cr_{eq} = 1.0\%Cr + 1.0\%Mo + 1.5\%Si \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = 1.0\%Ni + 30.0\%C + 0.5\%Mn \quad (2)$$

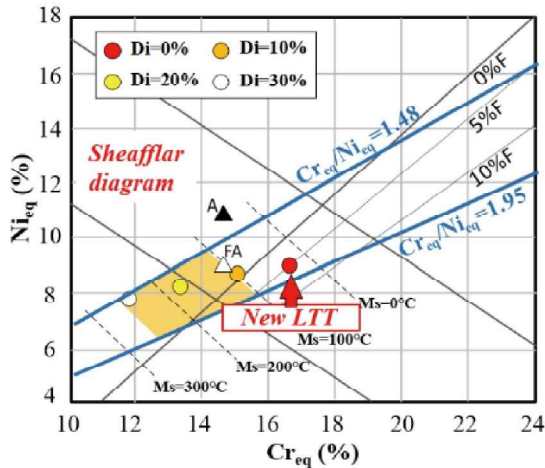


図8 シェフラー図に基づく新LTT溶接材料の化学成分設計 [2, 6, 11]

表1 新LTT溶着金属の化学成分と機械的特性

Wire type	Chemical composition (%)					Ni _{eq}	Cr _{eq}	*1 Ms (°C)	Mechanical properties			
	C	Si	Mn	Ni	Cr				0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	vE _{0°C} (J)
FCW	0.02	0.34	0.44	8.2	16.1	9.02	16.61	33	321	845	19	31

3.2 新LTT溶接材料と溶接金属の変態特性

図8と表1に示される新LTT溶接材料を用いたときの溶接金属の変態特性を変態点測定試験（フォーマスター試験）から検証した。種々の希釈率のLTT溶接金属からフォーマスター試験片に加工して、変態温度 M_s と変態膨張量を測定した。その結果を図10に赤丸●で示す。設計通り0.4%以上の大きな変態膨張が確保できることがわかる。なお、図中の黒丸●は、これまで蓄積したデータである [12-14]。

また、フォーマスター実験結果から、新LTT溶接材料を用いる場合の溶接金属の M_s 温度は次式で推定できる。

$$M_s (\text{°C}) \doteq 901.0 - 35.1Cr_{eq} - 31.6Ni_{eq} \quad (3)$$

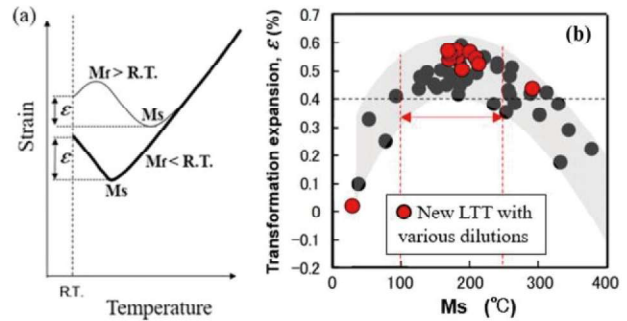


図9 希釈率が0%と10%~30%の新LTT溶接金属（赤●）における変態膨張特性の測定結果

3.3 新LTT溶接材料と溶接金属の耐割れ性と耐腐食性および耐破壊特性

Spring8によるその場測定から新LTT溶接金属の凝固モードを検証した。その結果、凝固の初相として δ フェライトが同定され、FA凝固モードであることが確認できた [15]。またJIS Z 3115に準じたC型ジグ拘束突合せ溶接割れ試験で耐高温割れ性があることを確認している。さらに、NK鋼船規則検査要領M編 M4 M4.3.3記載のすみ肉試験にて低温割れ試験を実施し、耐低温割れ性があることも確認している。

造船用高張力鋼にLTT溶接材料で溶接した継手にて、人工海水乾湿繰り返し試験の腐食試験を実施した結果、溶接金属はほとんど腐食せず、また溶接金属と鋼材境界にも異常腐食は認められず、優れた耐腐食性能を有することが確認できた。

次いで大型破壊靱性試験を実施した。その結果、新LTT溶接金属は、通常の溶接金属より、高い低温靱性を示すことも確認した [2]。

3.4 新LTT溶接ワイヤの全姿勢溶接安定性評価

新LTT溶接金属の成分系をベースに、神戸製鋼所(株)と連携してフラックス入りワイヤ（FCW：Flux Cored Wire）として製造した。新LTT溶接ワイヤを用いて、(株)三和ドックの造船ヤードで、伸長ビードを断続溶接できる安定な条件を5溶接姿勢毎に探索した。図10に5溶接姿勢毎で溶接された伸長ビードを示す。同図には溶接条件と溶接方向

(赤↓↑←) も記載している。全溶接姿勢で安定に施工できることを確認した。

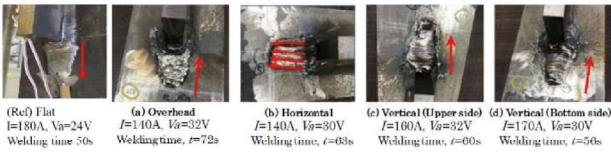


図10 全溶接姿勢による伸長ビード外観 [2]

4. JWRIAN-FEA による新LTT伸長ビードの残留応力解析と疲労寿命延伸試験の結果

全溶接姿勢による新LTT伸長ビード部における圧縮残留応力の分布と大きさを明らかにするため、本研究分野が開発した熱弾塑性有限要素解析ソフトウェア JWRIAN-FEA を用いた。溶接残留応力解析では、図10に示した全姿勢溶接条件（電流、電圧、溶接時間）と図11に示す伸長ビードの形状寸法をベースに、等価熱源モデルと有限要素モデルを開発した。数値解析に用いた材料物性（密度、比熱、熱伝導率、表面熱伝達率、熱膨張係数、ヤング率、ポアソン比、降伏応力、加工硬化係数）とそれらの温度依存性については、別途計測した値を用いた [2, 3, 15]。

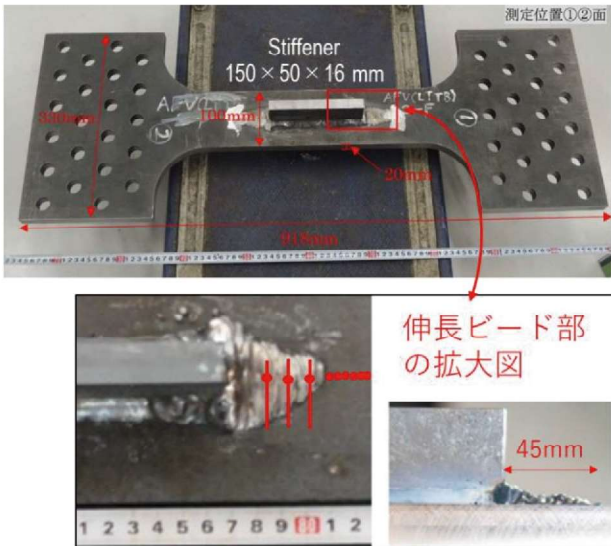


図11 新LTT伸長ビード溶接試験体の形状寸法 [3]

図12には、熱弾塑性有限要素解析で得られた全溶接姿勢の新LTT伸長ビード表面における残留応力分布を示す。比較のため、従来角回し溶接 (Boxing joint by conv. wire) と従来の軟鋼溶接ワイヤによる伸長ビード (Elongated bead by conv.

wire) の残留応力分布もプロットしている。さらに、検証のため、新LTT伸長ビード表面部の3点および止端近傍の10数点における残留応力をX線回折法で測定した。図から分かるように、全姿勢溶接による新LTT伸長ビード部で-200MPa~-800MPa程の大きい圧縮残留応力が生成された。X線回折法の測定結果でも同程度の圧縮残留応力を示しており、数値解析結果の妥当性を検証した。一方、従来軟鋼溶接ワイヤによる伸長ビード部や従来角回し溶接部における残留応力は共に引張であり、特に溶接止端部では+300MPa~+500MPa程の引張残留応力が予測された。これらの結果からは、新LTTを用いた伸長ビードにより大きな圧縮残留応力が生成され、疲労寿命を大幅に延伸することが期待できる。

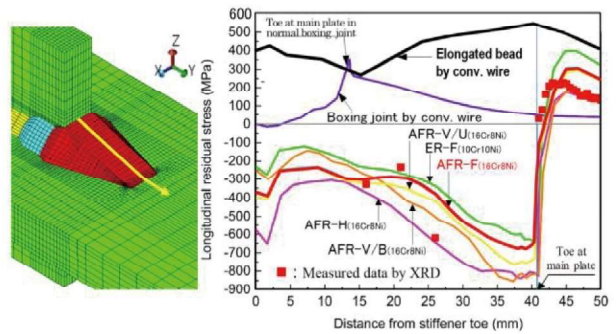


図12 全姿勢溶接による新LTT伸長ビード表面と止端部近傍の残留応力分布 [3, 11, 15]

新LTT伸長ビードによる疲労寿命の延伸効果を検証するため、長さ800mm、幅100mm、高さ120mmの大型疲労試験体を全溶接姿勢で32本作製した。その内、スラグ巻込みまたは溶込み不良等の溶接欠陥が無い試験体が19本であった。これら19本の試験体による疲労試験結果を図13に示す [3]。

疲労試験条件として、最小負荷が0で、最大負荷応力をそれぞれ120MPa、150MPa、200MPaに設定した。同図に従来角回し溶接継手のSN結果と実験データが黒実線と黒マーク・で示される。新LTT伸長ビード法による疲労寿命が大幅に延伸されたため、疲労試験の打ち切り負荷サイクル数を従来SN線図の6倍に設定した。図中の記号“→”や“4P”、“1P”は、疲労寿命が6倍以上延伸した結果と試験片の数を示している。

すなわち19本全ての試験片は疲労試験打ち切り限界値まで破断しない結果となり、少なくとも6倍以上に寿命延伸することが確認できた。

さらに国際溶接学会 IIW の設計基準 FAT71 を紫線で追記した。FAT71 ベースで評価すると、疲労寿命は非常に大きな倍率で延伸できている。

以上、簡単な溶接補修補強で疲労寿命を大幅に延伸することができることを示した。

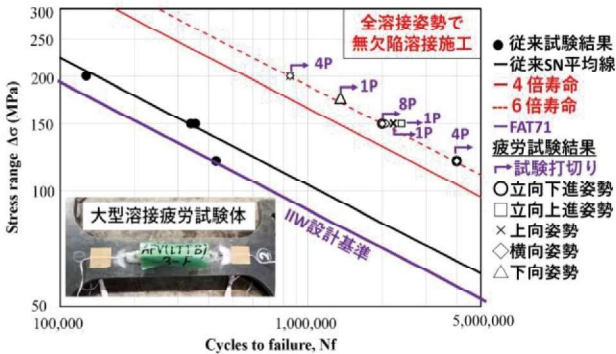


図 13 全溶接姿勢で製作した無欠陥 LTT 伸長ビード補強補修試験体の疲労試験結果 [3]

5. まとめ

- (1) 炭素鋼との希釈率を考慮した新 LTT 溶接材料の化学成分 16%Cr-8%Ni を設計した。
- (2) フラックス入りワイヤの新 LTT 溶接ワイヤを開発し、全姿勢 CO₂ 溶接性が優れることが実験で確認できた。
- (3) CAD を直接用いる応力解析ソフトウェア JWRIAN-IGA を開発し、伸長ビードの形状寸法を設計し、負荷応力集中を大幅低減した。
- (4) 熱弾塑性有限要素解析ソフトウェア JWRIAN-FEA を用いて、新 LTT 伸長ビードによる圧縮残留応力の生成を明らかにした。
- (5) 新 LTT 伸長ビードによる補修補強の大型試験体を用いて、従来角回し溶接継手の疲労寿命を 6 倍以上に延伸した。



講師 麻 率緒 氏

謝辞

本研究は、JST (国立研究開発法人 科学技術振興機構) の A-STEP 機能検証フェーズ-実証研究タイプ「VP30318088710:2018.12~2019.12」および産学共同 (本格型)「JPMJTR202D:2020.12~2022.3」の支援により実施したものである。

本研究の実施体制として、大阪大学工学研究科大沢氏、武内氏、(株)三和ドック 松崎氏、長崎総合科学大学 岡田氏、矢島材料強度研究所 矢島氏、志賀強度・接合研究所 志賀氏、(株)神戸製鋼所 加納氏、永見氏、笹倉氏、日本郵船(株) 菅野氏、樺山氏、海老原氏、(財)日本海事協会 松本氏、村田氏、浅子氏、外池氏に参画頂いた。ここで、研究チーム各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Shiga C., Murakawa H., Hiraoka K., Osawa N., Yajima H., Tanino T., Tsutsumi S., Fukui T., Sawato H., Kamita K., Matsuzaki T., Sugimura T., Asoda T., Hirota K., *Welding in the World*, Vol.61, No.4 (2017), pp 769-788.
- [2] Ninshu Ma, Takuya Matsuzaki, Koichi Okada, *JST A-STEP report* (2020.2.22).
- [3] Takuya Matsuzaki, Ninshu Ma, Koichi Okada, *JST A-STEP report* (2022.5.31).
- [4] Takuya Matsuzaki, Hidekazu Murakawa, Ninshu Ma, Seicichiro Tsutsumi, Kazuo Hiraoka, Naoki Osawa, Koichi Okada, Tadakazu Tanino, Chiaki Shiga, Hiroshi Yajima, *Journal of High Pressure Institute*, 58-1 (2020) p22-38.
<https://doi.org/10.11181/hpi.58.22>
- [5] Takuya Matsuzaki, Ninshu Ma, Hidekazu Murakawa, Kazuo Hiraoka, Zhongyuan Feng, Koichi Okada, Shunsuke Kimura, Chiaki Shiga, Hiroshi Yajima, *High Pressure Institute of Japan*, 58-6 (2020), 315-328.
<https://doi.org/10.11181/hpi.58.315>
- [6] Takuya Matsuzaki, Kazuo Hiraoka, Feng Zhongyuan, Ninshu Ma, Hidekazu Murakawa, Satoru Kano, Koichi Okada, Shunsuke Kimura, Chiaki Shiga, Hiroshi Yajima, *Journal of Marine Science and Technology (JMST, JASNAOE)*, 32-365 (2020.12) 153-161.

- <https://doi.org/10.2534/jjasnaoe.32.153>
- [7] http://www-it.jwes.or.jp/we-com/bm/vol_25/sec_3/3-2.pdf
- [8] https://www.kawada.co.jp/technology/gihou/pdf/vol40/4001_04_05.pdf
- [9] O. Watanabe, S. Matsumoto, *Fatigue strength properties in high strength steels joints*, *Quart. J. Weld. Soc.*, 113-3(1995) 438-443.
- [10] Thein Lin Aung, Ninshu Ma, *Computer-Aided Design*, 139 (2021) 103073, 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2021.103074>
- [11] Ninshu Ma, *Journal of The Japan Welding Society*, 91-2 (2022)115-120.
<https://doi.org/10.2207/jjws.91.115>
- [12] C. Shiga, H.Y. Yasuda, K. Hiraoka, H. Suzuki, *Welding in the World*, 54-3/4(2010)71-79.
- [13] Zhongyuan Feng, Ninshu Ma, Seiichiro Tsutsumi, & Xinjie Di. *Marine Structures*, 78 (2021)103001.
<https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103001>
- [14] Zhongyuan Feng, Xinjie Di, Shipin Wu, & Ninshu Ma, *Science and Technology of Welding and Joining*, 26-2(2021)144-152.
<https://doi.org/10.1080/13621718.2020.1863045>
- [15] FENG ZHONGYUAN, *Doctor thesis of Osaka University*, September, 2021.

