コンシストレイヤー法テンパービード溶接熱影響部の靭性予測

Prediction of Toughness in HAZ produced by Temper Bead Welding of Consistent Layer Technique

大阪大学	于 麗娜	Lina YU	
大阪大学	才田一幸	Kazuyoshi SAIDA	
大阪大学	望月正人	Masahito MOCHIZUKI	Member
大阪大学	西本和俊	Kazutoshi NISHIMOTO	
原子力安全推進協会	亀山雅司	Masashi KAMEYAMA	Member
関西電力株式会社	平野伸朗	Shinro HIRANO	Member
関西電力株式会社	瀬良健彦	Takehiko SERA	Member

Abstract: Temper bead welding (TBW) is one effective repair welding method for the large-scale nuclear power plants instead of post weld heat treatment (PWHT). Consistent Layer (CSL) technique is the theoretically most authoritative method among the five temper bead welding techniques. For TBW, toughness is the key criteria to evaluate the tempering effect. A neural network-based method for toughness prediction in heat affected zone (HAZ) of low-alloy steel has been investigated to evaluate the tempering effect in TBW. On the basis of experimentally obtained database, the new toughness prediction system was constructed by using Radial basis function-neural network. With it, the toughness distribution in HAZ of TBW was calculated based on the thermal cycles numerically obtained by finite element method (FEM). The predicted toughness was in good accordance with the experimental results. It follows that our new prediction system is effective for estimating the tempering effect during TBW and hence enables us to assess the effectiveness of TBW before the actual repair welding.

Keywords: Toughness, Neural network, Temper bead technique, Consistent Layer technique, Heat affected zone

1. 緒言

原子力発電プラントの低合金鋼製圧力容器の予防保全•補修を目的とした溶接において、適用箇所によっては溶接後熱処理(PWHT)の代替手法としてテンパービード法の採用が認められている[1,2]．テンパービード法では多層の溶接パスの熱履歴を利用し、溶接まま状態で溶接部の組織改善を可能としている．しかしながら、実機にテンパービード法を適用した場合の効果の確認方法が確立していないこともあり、その適用実績はあまり多いとはいえない．今後、テンパービード法の有効性をさらに詳細に明確化することにより、この手法による溶接補修がより広範な対象に適用可能となることが考えられる．コンシストレイヤー法(CSL) [3]はテンパービード溶接中で原理的に最も正当と思われる方法である．既報においてニューラルネットワークを用いてコ

連絡先：于　麗娜、〒565-0871　大阪府吹田市山田丘 2 丁目 1 番、大阪大学工学研究科
E-mail: yulina@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

ンシストレイヤー法テンパービード溶接パラメータと硬さの関係を示した[4]．本研究ではテンパービード溶接パラメータと靭性の関係を明らかにする．

2. 供試材料および実験方法

本研究では原子炉圧力容器鋼の溶接熱影響部の組織および靭性を評価するため Mn-Mo-Ni 系低合金鋼 A533B を用いた．また、TIG 溶加材として組成が A533B 相当の MG-S56X を使用した．それらの化学組成を Table 1 に示す．

再現熱サイクル付与試験片の作製には Gleeble1500 を使用した．試験片に付与した 4 種類の熱サイクルのパターンを Fig. 1 に示す．最高到達温度(Peak temperature：以下 Tp)の範囲は 400～1350℃、冷却速度(Cooling rate：以下 CR)は 3℃/s～100℃/s とした．試験片は Φ15×60mm とし（Fig. 2)、Gleeble を用いて所定の温度まで加熱後、種々の速度により冷却することにより再現熱サイクル材を作成した．靭性を測定するためにサイドグルーブをつけたシャルピー衝撃試験を行った．Fig. 3 に示すノッチは V 型、ノッチ深さを 2mm、サイドノッチ深さを 1mm とし、試験温度は-12℃とした．

靭性予測システムの有効性を検証するため、7 層 88 パスの多層盛溶接試験を実施した．溶接条件として各層におけるパス数と使用溶接条件を Table 2 に示す．多層溶接熱影響部の靭性を測定するため，多層溶接実験にて作製した試験片よりサイドグルーブ付シャルピー衝撃試験片を採取した．その手順を Fig. 4 に示す．多層盛溶接を行った後，溶接金属の上に母材と同じ A533B 鋼を電子ビーム溶接（EBW）にて溶接した後，サイドグルーブ付きシャルピー試験片を切り出した．

Table 1 Chemical composition of materials

Material	Chemical composition (mass %)												
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo	Ti	Al	Fe	Co
A533B (Base metal)	0.12	0.26	1.43	0.006	0.002	0.53	0.02	0.01	0.51	-	0.038	Bal.	-
MG-S56X (Filler metal)	0.06	0.43	1.51	0.06	0.005	0.89	0.03	0.04	0.35	0.09	0.01	Bal.	<0.01

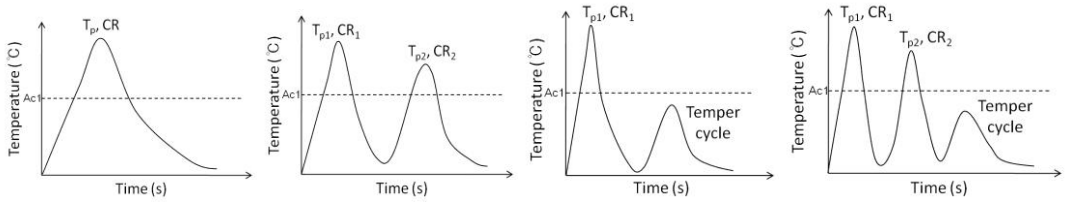

Fig. 1 Four types of thermal cycles in temper bead welding produced by CSL technique: (a) 1-cycle, (b) 2-cycle, (c) 1-cycle+temper and (d) 2-cycle+temper.

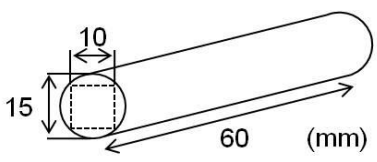

Fig. 2 Sample of Gleeble test (Φ15×60mm)

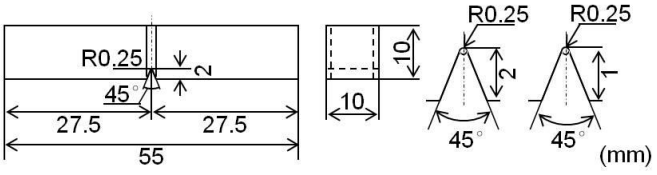

Fig. 3 Specimen of side-notched Charpy impact test

Table 2 Welding conditions of temper bead welding

Layer	Current [A]	Voltage [V]	Wire feeding speed [cm/min]	Welding speed [cm/min]	Heat input [J/cm]	Number of passes
1st	250	16.7	200	10	25050	8
2nd	140	13.2	110	30	3696	21
3rd	140	13.2	110	30	3696	21
4th	180	14.7	130	30	5292	13
5th	200	15.7	150	20	9420	9
6th	200	15.7	150	20	9420	9
7th	250	16.7	220	20	12525	7

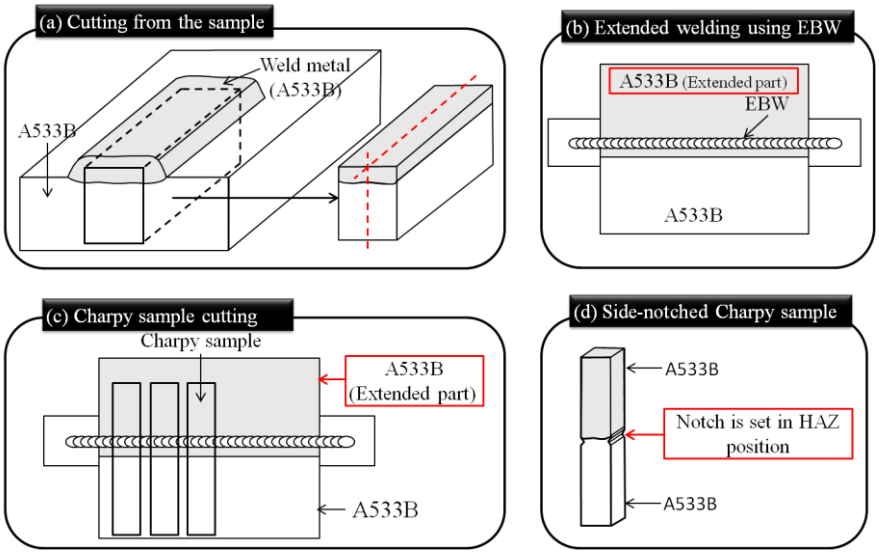

Fig. 4 Procedure of preparing the Charpy impact test specimens of TBW: (a) Cutting the welded part, (b) Extension by EBW (Electronic Beam Welding), (c) Charpy impact sample cutting from the extended sample and (d) Final side-notched Charpy sample

3. 結果および考察

3. 1　再現熱サイクル付与材の靭性データベースと定式化結果

種々の熱サイクルを加えた再現熱サイクル付与材をシャルピー衝撃試験に供し、ニューラルネットワークに入力する教示データを得た．コンシステントレイヤー法では、第 2 層以降のビードの熱サイクルにおいて Ac_1 変態点を超えず、テンパー効果のみを受ける．そして、コンシステントレイヤー法には Fig.1 に示すような 4 種類の熱サイクルがある[4]．これらの熱サイクルに対する靭性データベースを作成した．例として、1-cycle と 1-cycle+temper の熱サイクルを与えたサンプルの靭性測定結果を Fig. 5、Fig. 6 に示す．これらの結果に基づき、ニューラルネットワークにより定式化した結果の例を Fig.7 に示す．

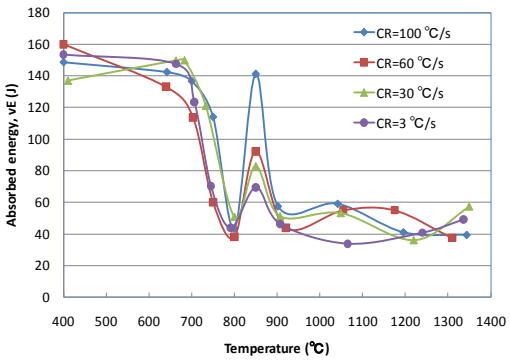

Fig. 5 Absorbed energy of 1-cycle by experimental measurement

作成したデータベースの妥当性を検証するため，任意条件の再現熱サイクル付与材の靭性予測を行った．付与した熱サイクルの靭性予測結果と測定値の関係を Fig. 8 に示す．相関係数 R は 0.90 となった．再現熱サイクル付与材の靭性と予測値はよく一致していることから，再現熱サイクル付与材に対して靭性データベースの妥当性が示唆された．

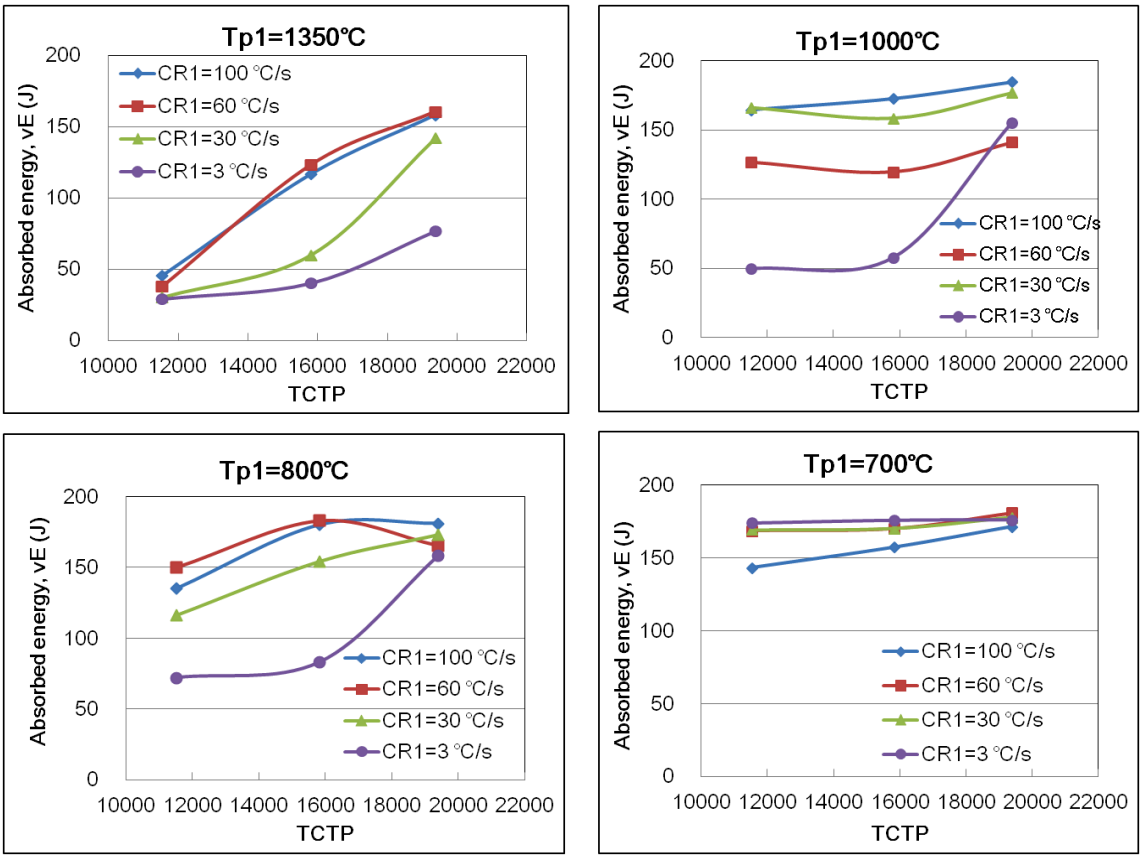

Fig. 6 Relationship between the absorbed energy and TCTP after 1-cycle+temper

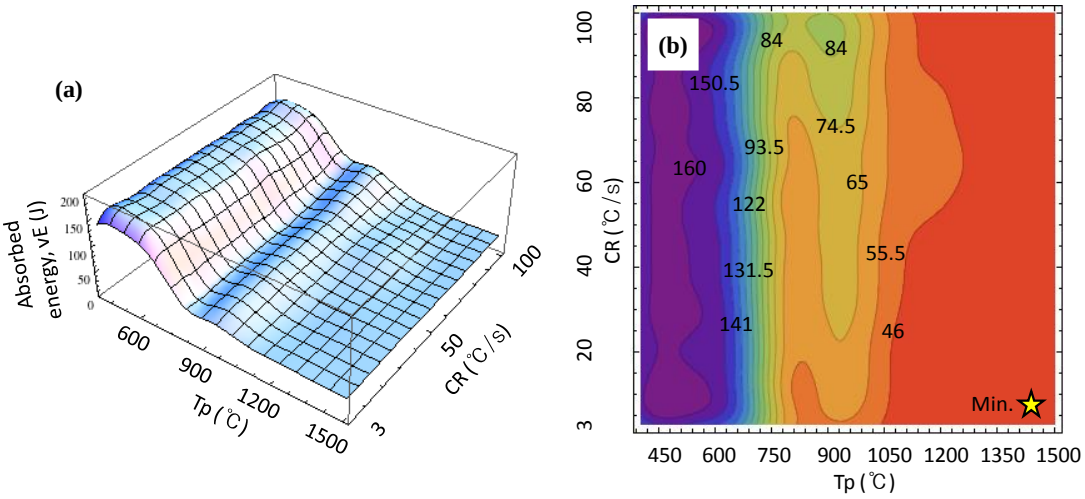

Fig. 7 Absorbed energy prediction system of 1-cycle:

(a)3D-figure and (b)2D-counter figure

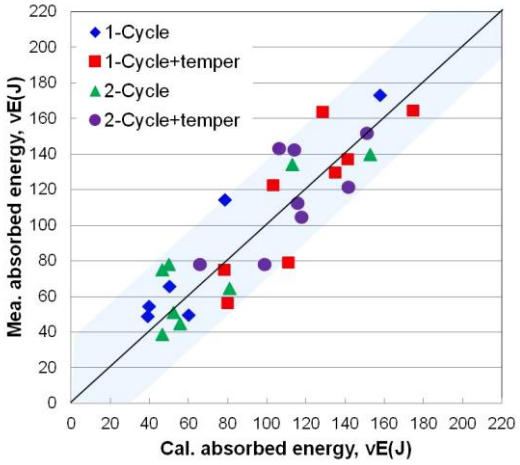

Fig. 8 Comparison between measured and calculated toughness of arbitrary thermal cycles

3.2　コンシステントレイヤー法テンパービード溶接熱影響部の特性予測システムの妥当性検証

コンシステントレイヤー法での靭性分布予測を行うために多層溶接を施工した試験片の熱伝導解析を JWRIAN [5]により行った．熱履歴解析による 7 層 88 パス溶接後最高到達温度の分布を Fig. 9 に示す．溶接金属から母材に行くに従って温度が連続的に変化している．

解析した熱履歴をニューラルネットワークに入力し，靭性予測を行った．計算した吸収エネルギー値の分布の結果をFig. 10に示す．溶接金属を赤色としている．熱影響部の靭性分布は色分けて示す．7層溶接後では吸収エネルギーは40J以上となった．これは，確性試験で要求される基準値（標準シャルピー試験片は68J以上，サイドグルーブ付シャルピー衝撃試験片は40J 以上，$vE_{SN} \approx 0.6 \cdot vE_{STD}$ [6]）を満たす．

コンシステントレイヤー法によって作製した7層88パス溶接熱影響部の靭性実測値と予測値の比較結果をFig. 11に示す．実際にはシャルピー衝撃片は幅を持つため、ノッチ部にあたるメッシュ点の値を混合則[7,8]により平均化して吸収エネルギーの予測値とした．これより、両者には概ね対応関係が見られ、コンシステントレイヤー法でのテンパービード溶接熱影響部の靭性予測が可能であることが検証された．

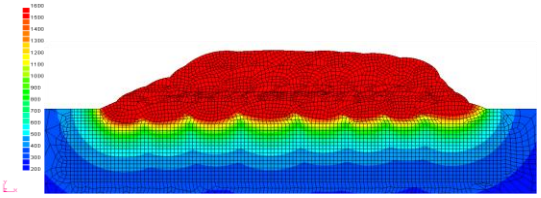

Fig. 9 Simulated peak temperature distribution of 7layer-88pass welding

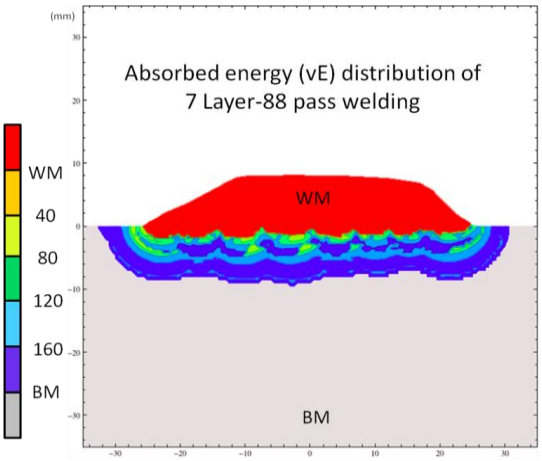

Fig. 10 Calculated toughness distribution in HAZ of 7layer-88pass welding based on FEM analysis

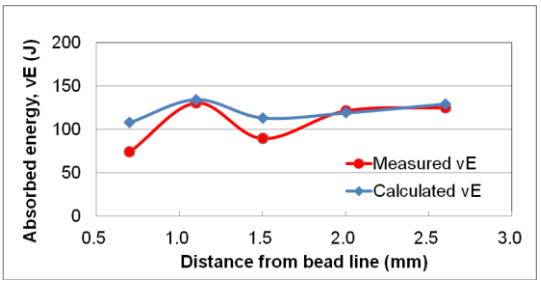

Fig. 11 Relationship between measured and calculated absorbed energy according to the distance from bond line

参考文献

[1] N. Yurioka and Y. Horii, “Recent developments in repair welding technologies in Japan”, Science and Technology of Welding & Joining, 2006, **11**, pp. 255-264.

[2] Y. Nakao, H. Oshige, S. Noi and Y. Nishi, "Distribution of Toughness in HAZ of Multi-Pass Welded High Strength Steel." Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1985, **3**, pp. 773–781.

[3] R. Viswanathan, D. W. Gandy and S. J. Findlan, "Temper bead Welding of P-Nos. 4 and 5 Materials." EPRI TR-111757, December 1998.

[4] L. Yu, Y. Nakabayashi, M. SaSa, S. Itoh, M. Kameyama, S. Hirano, N. Chigusa, K. Saida, M. Mochizuki and K. Nishimoto, "Neural network prediction of hardness in HAZ of temper bead welding using the proposed thermal cycle tempering parameter (TCTP)", ISIJ Int., 2011, **51**, pp. 1506–1515.

[5] D. Deng, H. Murakawa and M. Shibahara, "Investigations on welding distortion in an asymmetrical curved block by means of numerical simulation technology and experimental method", Comput. Mater. Sci., 2010, **48**, pp. 187–194.

[6] L. Yu, M. SaSa, K. Ohnishi, M. Kameyama, S. Hirano, N. Chigusa, T. Sera, K. Saida, M. Mochizuki and K. Nishimoto, "Neural network based toughness prediction in HAZ of low alloy steel produced by temper bead welding repair technology", Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18, pp. 120-134.

[7] M. Solorzano-Zavala, F. Barragan-Aroche and E.R. Bazua, "Comparative study of mixing rules for cubic equations of state in the prediction of multicomponent vapor-liquid equilibria", Fluid Phase Equilibria, 1996, **122**, pp. 99-116.

[8] J. O. Valderrama and V. H. Alvarez, "Temperature independent mixing rules to correlate the solubility of solids in supercritical carbon dioxide", J. of Supercritical Fluids, 2004, **32**, pp. 37–46.