



ミニ特集*4

高度溶接技術

変形シミュレーション

Simulation of Welding Distortion

村川英一
Hidekazu Murakawa

大阪大学 接合科学研究所
機能評価研究部門数理解析学分野 教授

1 緒言

モノ造りの多くは部品をつなぎ合わせて一つのモノを造り上げる営みと考えることができる。したがって、部品が精度良く造られていており、理想的な接合が出来れば、必然の結果として図面どおりの製品を造ることができる。しかし、現実には、部品を切り出す切断にしても、接合のための溶接にしても、熱加工であり、加工による収縮を避けることは出来ない。このような収縮が累積すると、部材間に過大なギャップが発生し工作上の問題となるのみならず、製品の寸法精度維持の障害になる。従来は、熟練技能者が技と経験を使って手直しあるいは調整という形で問題を解決していたので滞りない生産が可能であった。しかし、熟練技能者の減少や高齢化は急速に進んでおり、今後は、熟練技能者に対する依存度が小さい、新しいモノ造りを考えて行く必要がある。

従来の生産技術を支えてきた経験と勘に置き換わるものは、理論に基づく予測である。こう言ってしまうと、今までは理論も予測も無くモノが造られていたかのような感じが決してそうではない。やはりそれなりの理屈に基づいた予測が行われていた。ただそれが熟練技術者や熟練技能者個人の頭脳の中で行われていたという点と、予測の精度が悪く、誤差は技でカバーされていた点が少し異なる。これに対し、現在では、溶接変形や残留応力を解析するための基本的理論はほぼ完成の域にあり、しかも膨大な計算であってもパソコンが瞬時に処理してしまうので、予測の精度と速さは、飛躍的に向上していると考えるのが自然である。このような精度の高い予測が実構造物について可能になれば、モノ造りはずいぶん変わると予想される。そこで、本プロジェクトの溶接変形シミュレーション分科会では、溶接変形を高い精度で効率良く予測するための解析法の開発を目標とし、小規模構造物の詳細な溶接変形予測を対象とする熱弾塑性理論に基づく非線形解析法と、大型構造物の大局的な溶接変形予測のための弾性解析

法を開発している。以下に、その概要を紹介する。

2 高精度・高効率非線形解析法の開発

2.1 溶接現象のFEM解析

溶接変形を詳細に解析するためには、図1に示されるように溶接入熱の投与により形成される温度場、温度変化により生じる材料の組織、熱膨張・収縮により生じる応力・ひずみ場の三つの問題を互いに、潜熱や変態膨張等を介して連成した問題として取扱う必要がある。また問題が、非線形で過渡問題であることから、時間経過を微小時間に分割して逐次的に計算を進める増分法が用いられるが、増分の数が数千ステップに及ぶ場合もあり、単純な突合せ継手の解析にも24時間オーダーの計算時間を要する。

この問題を解決するためには、これまでの解析理論および解析アルゴリズムを改善し、精度を保持あるいは向上させた上で計算時間を少なくとも数倍程度短縮する必要がある。そのために、本プロジェクトでは、新しい増分反復計算法の開発による高速化、および、溶接現象の特殊性を考慮したモデル化による解析精度向上を一つの目標とした。また、溶接材料や溶接条件が適正でない場合には、溶接部に割れが生じる場合があり、溶接割れの予測を目的とした非線形解析法の開

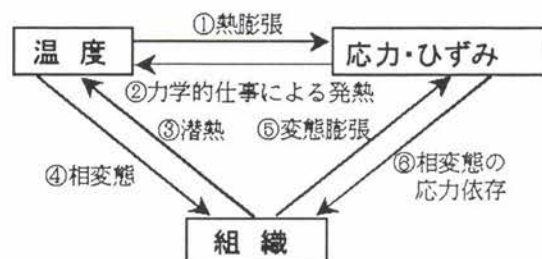


図1 溶接問題に含まれる温度、組織、応力／ひずみの連成関係

発も平行して行った。ここでは、溶接高温割れの解析を中心に、詳細解析の例を紹介する。

2.2 溶接高温割れのシミュレーション

溶接割れは、その発生時期により、高温割れ、低温割れ、再熱割れに分類される。いずれの割れの場合も、材料の割れに対する性能を上回る力学的負荷が作用する時に発生すると考えられ、対策としては、割れ感受性が低い材料の採用と、力学的負荷を低減する構造設計、継手様式、溶接法、施工条件の採用が考えられる。従来は、各種の溶接割れ試験法を用いて、材料や施工条件の選定が行われ、実構造物との対応付けは、拘束応力、拘束度、冷却速度、硬さなどを相対的な指標として行われていた。

本プロジェクトでは、温度依存型界面要素を用いた溶接高温割れ解析法を開発し、シミュレーションにより、割れの発生を直接に予測するという試みを、Trans Vareststraint試験、Houldcroft試験、突合せ溶接における始・終端割れ、梨型ビード割れ、再熱割れなどを対象に行なっている¹⁻⁴⁾。ここでは代表例として、溶接高温割れ試験のひとつであるHouldcroft試験片とこれに対応した解析例を、図2に示す。また、狭開先溶接時における梨形ビード割れおよび多層溶接における延性低下割れの発生予測の例についてはその概要を以下に紹介する。

2.3 温度依存型界面要素の概要

提案手法は、次の二つの考え方あるいは仮定に基づいている。

- (1) 割れは表面の生成であり、表面生成メカニズムの力学的モデル化が必要である。
- (2) 割れは、材料の降伏応力 σ_Y より結合強度 σ_{cr} が低い時に生じる可能性がある。

まず、表面生成過程のモデル化については、割れが生じる

可能性がある界面間の相互作用を、界面要素によって表現する。界面要素は図3に示されるように、荷重が作用すると開口変位を生じ、界面上の各位置での開口変位 δ と応力 σ の関係は次式で表されるポテンシャル ϕ により定められる。

$$\phi(\delta, T) = 2\gamma(T) \left\{ \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^{2n} - 2 \left(\frac{r_0}{r_0 + \delta} \right)^n \right\},$$

$$\sigma = \partial \phi / \partial \delta$$

..... (1)

なお、 γ は表面エネルギーを表し、 r_0 および n はそれぞれ寸法パラメータ、形状パラメータである。

また、ポテンシャルの微分は、結合応力 σ を与える(図4)。特に、高温割れの解析では、 γ が温度依存性を示し、図5に示されるように、割れが発生する可能性がある温度域であるBTR(脆化温度範囲)の1200～1450℃では、降伏応力 σ_Y が、結合強度 σ_{cr} より大きいと仮定する。このような界面要素を、図3に示されるように、割れの発生および進展が予想される

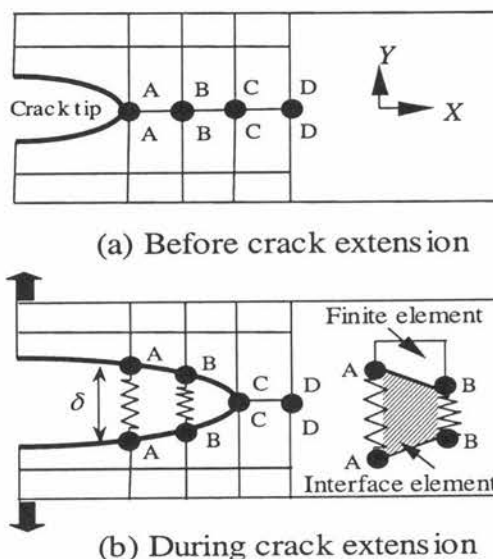


図3 界面要素を用いた割れ進展のモデル化

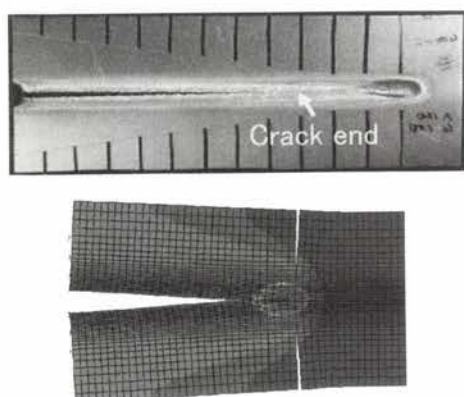


図2 Houldcroft割れ試験片とこれに対応した解析例

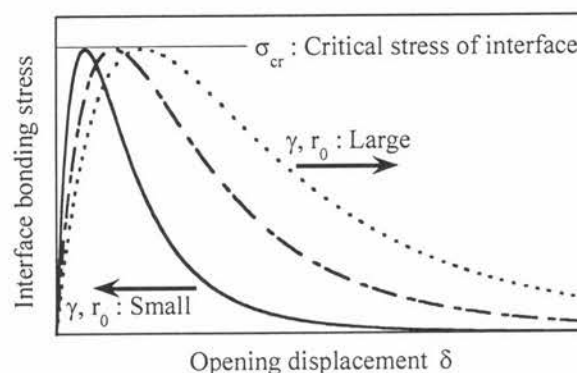


図4 界面要素における開口変位—結合応力関係

経路に配置することにより、過渡的な熱変形や応力の下で発生する割れを予測することができる。

2.4 梨型ビード割れの解析

狭開先溶接は、I形の狭い開先を用いて厚板の突合せ溶接を行う溶接法であり、通常の開先を用いる溶接と比べ、総入熱量を小さく抑えることが可能で、なおかつ溶接パス数も少なくすることができるため、高効率な溶接方法であると考えられている。また、小入熱ゆえに溶接変形を低減することも可能であり、今後、期待される溶接法の一つであるが、溶け込み形状のアスペクト比 (P/W) すなわち溶け込み深さと溶け込み幅の比が大きい時に、図6に示されるようにビード断面の中心線に沿って割れが発生する場合があります、梨型ビード割れと呼ばれる。このような割れの発生を防止し、溶接効率および品質のさらなる向上を実現するためには、理論的予測に基づいた、溶接条件の精密な制御が必要である。

狭開先溶接における梨型ビード割れは、熱弾塑性FEMモデルの中で、割れが発生する可能性のあるビードの中心線上に前述の温度依存型界面要素を配置することにより解析することができる。一般に、梨型ビード割れの発生は、溶け込み形状のアスペクト比のみならず、溶接入熱にも依存すると予想される。そこで、温度依存型界面要素を用いたシリーズ計算を、開先幅 W_G が5 mmの場合について実施し、結果を整

理したものが図7である。図中の▲印のプロットが示すように、入熱が大きいほど、また、アスペクト比が大きいほど、割れが発生しやすい。なお図8は、割れが生じた場合の解析結果の一例である。また、開先が非常に狭く、2.5 mmで入熱が比較的大きい場合には、図9に示されるような表面に達する割れが生じる。このような割れは、図8に示された内部に留まる割れと同様、実験においても観察されている。

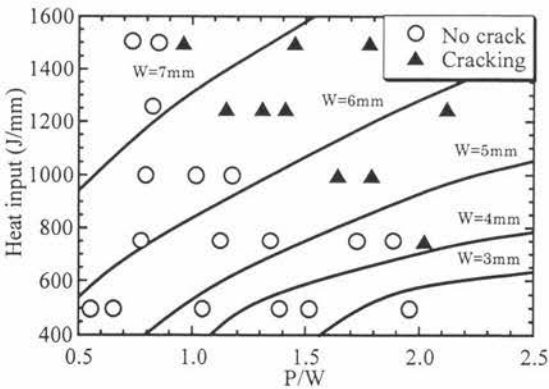


図7 割れ発生に対する入熱および溶込のアスペクト比 P/W の影響

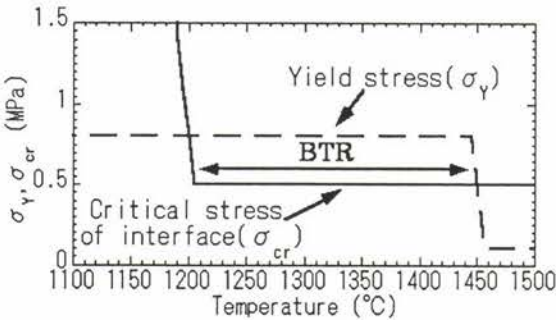


図5 脆化温度範囲のモデル化

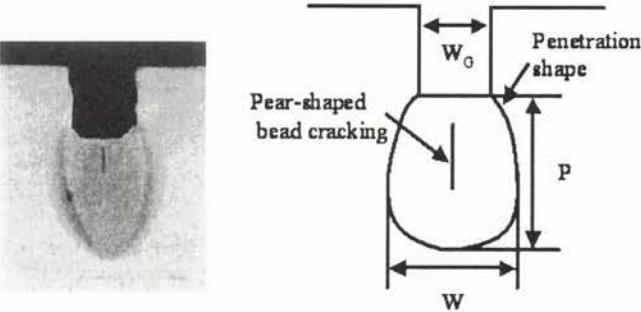


図6 梨型ビード割れの例と溶込形状パラメータ

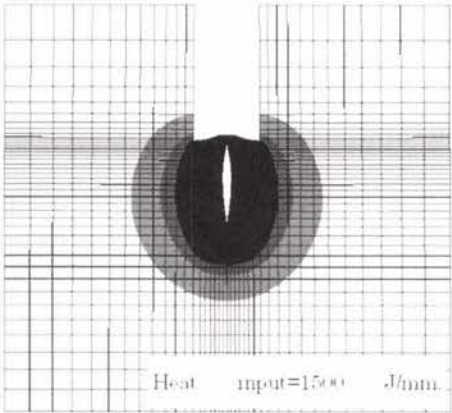


図8 表面に到達しない割れ ($W_G=5\text{mm}$)

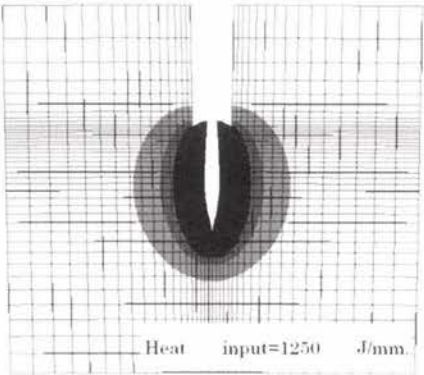


図9 表面に到達する割れ ($W_G=2.5\text{mm}$)

2.5 延性低下割れの解析

同じ解析法は、図10に示されるように、多層溶接時のビード下に発生する延性低下割れの予測にも応用が可能である。この場合も、温度依存型界面要素は中心線に沿って配置されているが、解析の結果割れが生じる位置は、実験において観察されるのと同様、ビード下となる。

3 大型構造物の溶接変形予測

先に述べた熱弾塑性解析は、研究あるいは開発を目的に、小規模な構造物の溶接変形や割れの発生過程を詳細に把握するためのものであるのに対し、日常業務としての工作精度管理を目的とする場合は、大型で複雑な構造物の溶接変形が推定できる簡便な手法が求められる。そのような手法の一つが、固有ひずみあるいは固有変形の考え方を利用した弾性解析である。この方法は、溶接継手の形式、材料、板厚、溶接入熱が同じであれば、溶接部に生じる横収縮、角変形などの局部変形すなわち固有変形はほぼ同じであるという考えに基づいており、大型あるいは複雑な構造物の溶接変形は、これに含まれる全ての溶接継手部に固有変形を初期ひずみとして与え弾性解析することにより計算される。なお、この方法では、事前に固有変形が既知である必要があり、固有変形を求める方法として、前述の熱弾塑性FEMを用いる方法と、実測した変形から弾性逆解析により求める方法がある。

3.1 固有変形と溶接入熱の関係

溶接すると冷却時に溶接部が収縮し、その結果構造物全体が変形する。現実の構造物は複数の部材が互いに拘束し合っているため、溶接部の収縮が全て変形になるのではなく、その一部は残留応力となる。このような局所的な変形は、角変形、横収縮、縦収縮に分類される。もし、溶接長が船や橋梁のように十分長い場合には、溶接により生じる局所的な変形は、溶接線に沿ってほぼ一様である。このような固有変形の中で横収縮と角変形は、拘束の無い試験片の変形として直接実験により求めることができる。図11および図12は、佐藤、

寺崎⁵⁾らの実験結果であり、角変形 θ および横収縮 S の大きさが入熱パラメータ Q/h^2 で整理できることを示している。ここで、 Q は単位長さ当りの入熱量、 h は板厚を表す。一方、縦収縮は、そのほとんどが残留応力に姿を変えるため、変形として直接計測することはできない。また、同じ理由から縦収縮は、縦収縮を拘束した時に生じる拘束力(Tendon force) F_T の形で整理される。White⁶⁾の報告によれば F_T は、入熱に比例し、比例定数がほぼ0.2である。すなわち、

$$F_T = 0.2Q \dots\dots\dots (2)$$

3.2 溶接固有変形の逆解析法

溶接長さが十分長い溶接の場合、固有変形は溶接線方向に一定とみなすことができ、その値は、入熱パラメータ Q/h^2 の値によって定められる。しかし、薄板の組立においては、変形が生じやすいので、溶接長さが20～200 mm程度の短い部分溶接が多く用いられており、このような短い溶接では、固有変形が入熱パラメータ Q/h^2 のみならず、溶接長さの影響も受ける。そこで、少数の計測点における3次元座標を溶接前後において計測し、これを入力データとして簡便に固有変形を同定する弾性逆解析法を開発した。

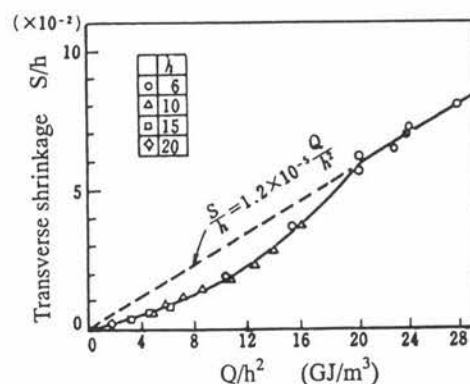


図11 横収縮に及ぼす溶接入熱の影響

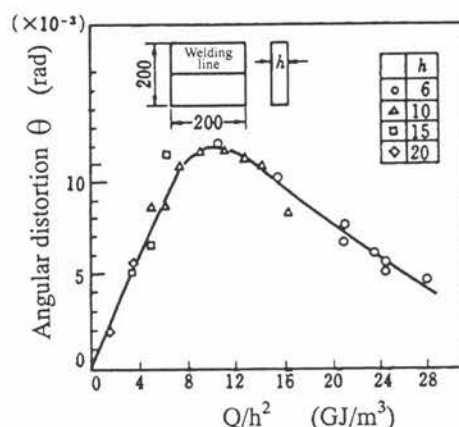


図12 角変形に及ぼす溶接入熱の影響

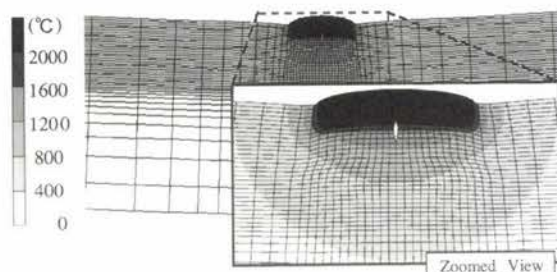


図10 多層溶接時におけるビード下割れの解析例

この逆解析法は、次の仮定のもとに組立てられている。

- (1) 固有変形成分として、縦収縮、横収縮、縦曲り、横曲りの4成分を考える。
- (2) 各固有変形の分布関数は、n個のパラメータで表されたとすれば、全パラメータ数は4n個となる。
- (3) 固有ひずみの分布幅、分布長さは、熱弾塑性解析を参考に定め、既知とする。
- (4) m個の点の3次元座標を、溶接前後で計測する。m個の点で計測された座標は、剛体変位を含むので、これを差し引いた(3m-6)個の一次独立な関係が得られる。従って、固有変位が同定できるための必要条件は(3m-6)>4nとなる。

上述の考えに基づき定められた計測点の配置をビード溶接を例として図13に示す。さらに、m個の点で計測された溶接前後における3次元座標から、固有変形を次の手順に従い同定する。

- (1) 剛体変位を除去するために、基準三角形(①、②、③)を定める。
- (2) 溶接前後における基準三角形の3辺の長さの変化より、3条件が得られる。
- (3) その他の7点での計測に関しては、基準三角形の2点からの距離の変化より、2(m-3)条件が得られる。基準三角形が作る面からの垂直距離の変化より、(m-3)条件が得られる。
- (4) (2)と(3)より、合計(3m-6)条件が得られる。
- (5) 固有変形のパラメータを a_i ($i=1, \dots, 4n$)とし、(2)、(3)の条件式が次式で表されるとする。

$$F_j(a_i) = F_j^m \dots\dots\dots (3)$$

ここで $F_j(a_i)$ は、固有変形が a_i である時の変形量をFEMを用いて計算した値であり、 F_j^m は、計測により求めた変形量である。

- (6) 薄板の溶接変形の場合は、式(3)の関係は非線形であるので、 Δa_i を修正量と考え、次式のテーラー展開に基づき、 a_i を反復計算により求める。即ち、

$$[\partial F_j / \partial a_i] \{ \Delta a_i \} = \{ F_j^m - F_j(a_i) \} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 Δa_i は固有ひずみの修正値であり、 $F_j(a_i)$ および $(\partial F_j / \partial a_i)$ は、FEM順解析により求める。

このようにして、板厚が3 mmの軟鋼板のビード溶接における固有変形を逆解析し、溶接長さおよび入熱パラメータと横収縮との関係を整理した図が図14である。図から明らかなように、溶接長が20 mmと短い場合は、横収縮の値は小さいが、溶接長が50 mm以上になると、横収縮の値は、溶接長の影響はほとんど受けないことが明らかとなった。

3.3 大型溶接構造の溶接変形予測

大型構造物の溶接変形を予測する方法として、上述の固有変形を用いた弾性FEM解析の有効性を検証するために、図15に示される3本の縦骨と2本の横骨で補強された板骨構造物を製作し、溶接変形を計測するとともに、FEM解析を行った。この構造物は、縦骨と底板、横骨と底板、縦骨と横骨の間の3種類の隅肉溶接により組立てられており、これらの溶接部での固有変形を前述の熱弾塑性FEMおよび逆解析により同定した。図16は、逆解析のための小型継手試験片を

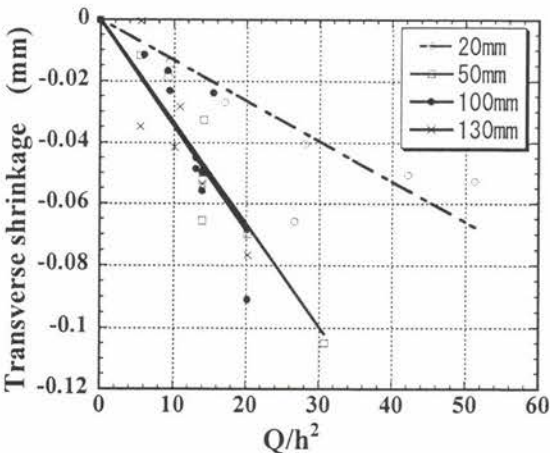


図14 ビード溶接における横収縮に及ぼす溶接長と入熱量の影響

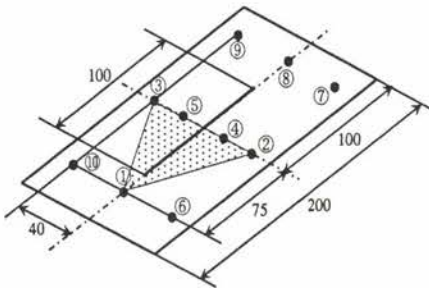


図13 ビード溶接における座標計測位置



図15 大型板骨構造モデル

横骨と底板の隅肉溶接を例に示したものであり、白く見える点は、座標計測点である。

図17は、同定された固有変形を用いた弾性FEMにより予測された大型板骨構造物の溶接変形を、図に示されたLine-1に注目し、計測値と比較したものである。1700 mmの位置で予測値が実測値と比較して約2 mm小さいが、両者は、一般的に良い一致を示している。

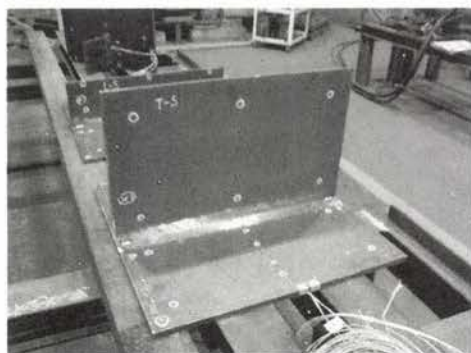


図16 横骨一底板隅肉溶接継手モデル

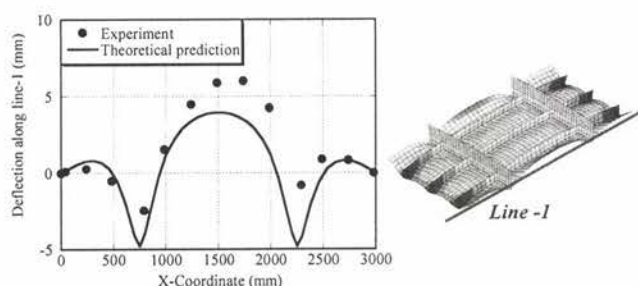


図17 弾性FEMを用いたたわみの予測値と実験の比較

4 結言

ここで紹介した事例は、本研究プロジェクトの成果の一部であり、プロジェクトの最終年度にあたる平成16年度においても、車両やモーターサイクルなどの実構造物を対象とした実証実験を進めており、最終報告書では、研究開発の成果を総括するとともに産業界における溶接変形予測技術の展開について提言を行う予定である。

参考文献

- 1) 柴原正和, 芹澤久, 村川英一: 温度依存型界面要素を用いた溶接高温割れのモデル化とFish Bone型高温割れ試験への応用, 溶接学会論文集, 19 (2001) 2, 365.
- 2) 柴原正和, 芹澤久, 村川英一: 温度依存型界面要素を用いた高温割れのモデル化と割れ発生予測, 軽金属溶接, 41 (2003) 8, 363.
- 3) 柴原正和, 芹澤久, 村川英一: 温度依存型界面要素を用いた溶接横断面内における高温割れ解析と提案手法に含まれる緒パラメータの定量化, 溶接学会論文集, 22 (2004) 1, 94.
- 4) 柴原正和, 曾根慎二, 芹澤久, 村川英一, 西本和俊, 才田一幸, 亀山雅司: 多層溶接時に発生する延性低下割れのFEM解析, 関西造船協会論文集, 241 (2004), 177.
- 5) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫: 構造用材料の溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響, 溶接学会誌, 45 (1976) 4, 302.
- 6) J.D. White, R.H. Leggatt and J.B. Dwight: Weld Shrinkage Prediction, Welding and Metal Fabrication, (November 1980), 567.

(2004年11月22日受付)