

サブマージーク溶接時の溶接変形に及ぼす拘束治具の影響

大阪府立大学大学院 ○芦田 峻, 生島 一樹
大阪大学大学院 前田 新太郎
高田機工株式会社 尾寄 健人, 永木 勇人
大前 暢
大阪府立大学大学院 柴原 正和

Study on Influence of Jig Constraint on Welding Deformation Under Submerged Arc Welding

By Ryo ASHIDA, Kazuki IKUSHIMA, Shintaro MAEDA, Kento OZAKI,
Hayato NAGAKI, Toru OMAE and Masakazu SHIBAHARA

1. 緒言

船舶や橋梁, 建設機械などの大型鋼構造物の建造における接合方法として主に溶接が用いられている。Fig. 1のような大規模な鋼構造物である橋梁において Fig. 2のようなサブマージーク溶接が用いられることが一般的であり, 溶接長が長いことから施工効率の向上が求められている。しかし, 溶接を行うと溶接部近傍に大きな熱ひずみが発生することにより溶接変形が問題となる場合がある。

鋼橋の現場溶接時には, 溶接変形の低減および開先形状の保持を目的として拘束治具を使用し, 溶接を施工する場合が多い。拘束治具を用いる場合, 拘束治具の取り外し時に鋼板が変形するスプリングバックという現象が知られている。拘束治具を用いることで溶接変形を低減することはできるが, 拘束治具取り外し時の変形は施工上の精度に影響を及ぼし問題となっている。

拘束治具を用いた際に生じる溶接変形に関する先行研究として, 多層溶接時や板継溶接時における溶接変形に関する検討^{1,2)}など, 数値解析的に検討された事例が報告されているものの溶接後の拘束治具の取り外し時の変形について検討された事例は少ない。そのため, 高精度な継手管理のためには, 拘束治具が変形に及ぼす影響について正確に把握することが必要と考えられる。

そこで本研究では, 溶接後の拘束を外した際のスプリングバック変形に影響を及ぼす因子について詳細に把握するために, 鋼橋の鋼床板デッキを模擬した試験体における一連の工程, すなわち,

① 拘束板取り付け溶接 → ② サブマージーク溶接 → ③ 拘束板取り外し切断
についての実験を行い, 面外変形の発生原因について検討した。また, 柴原, 生島らが開発した理想化陽解法 FEM^{3,4)}による3次元熱弾塑性解析を各工程に適用し, 詳細な検討を行った。



Fig. 1 Photo of a steel Bridge.

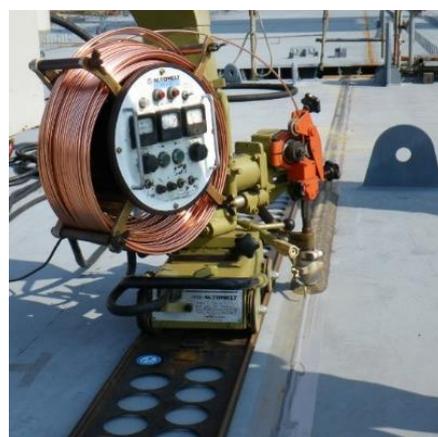


Fig. 2 Equipment of submerged arc welding.

2. 拘束冶具が溶接変形に及ぼす影響についての検討

2.1 鋼床版デッキを対象とした試験体の寸法および実験条件

ここでは、鋼橋の鋼床版デッキを模擬した試験体を作成し、その試験体を対象に拘束冶具を用いた際の各工程における実験を行い、サブマージアーク溶接時の溶接変形に及ぼす拘束冶具の影響について検討する。

Fig. 3 に試験体の形状および寸法を示す。本試験体は鋼橋の鋼床版デッキを模擬した試験体である。接合される2枚の母材寸法は、板厚が12mm、長さが1000mm、幅が300mmであり、それに取り付けられる3枚の拘束板の寸法は、板厚が22mm、幅が600mm、高さが300mmである。拘束板は、 $x=50, 500, 950$ mmの位置にそれぞれ取り付けた。またサブマージアーク溶接の始端部と終端部となる部分には、長さ150mm、幅100mmのタブ板を用いた。母材と拘束板の材料としてはSM490を用い、サブマージアーク溶接時の溶接ワイヤとしては、JIS Z 3351 YS-S6を用いた。

Fig. 4(a)に①拘束板取り付け溶接、(b)に②サブマージアーク溶接、(c)に③拘束板取り外し切断の各工程の詳細図を示す。各工程についても実施工を模擬した形で実験を行った。図中の断面マクロは試験結果として得られたものである。同断面マクロより、各工程における溶け込み形状が確認できる。また、Fig. 4(b)より裏面（裏波）および表面（ビード）における余盛り量は良好であることが確認できる。Fig. 5に本溶接であるサブマージアーク溶接時の様子を示す。また、Fig. 6に拘束板切断時の様子を示す。

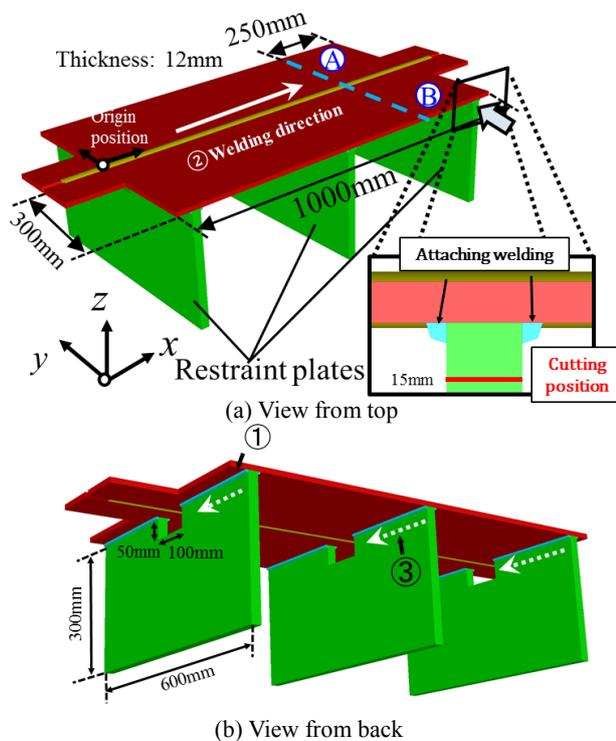


Fig. 3 Shape and dimension of specimen.

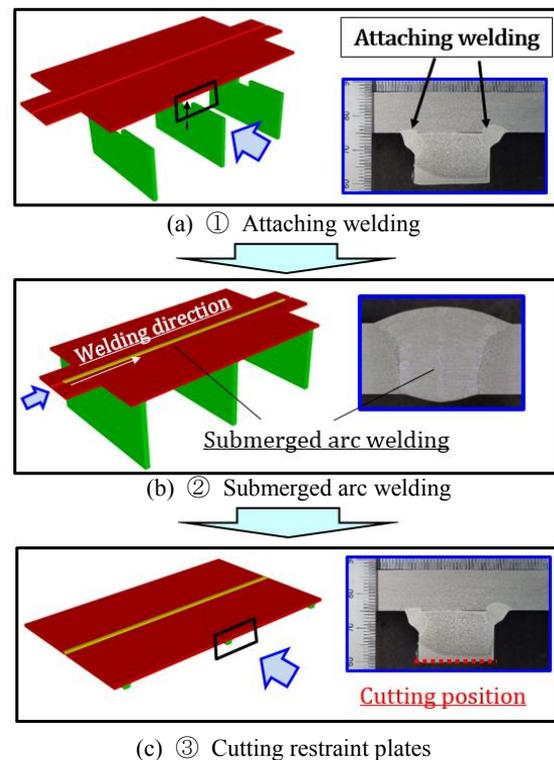


Fig. 4 Making procedure of test specimen.

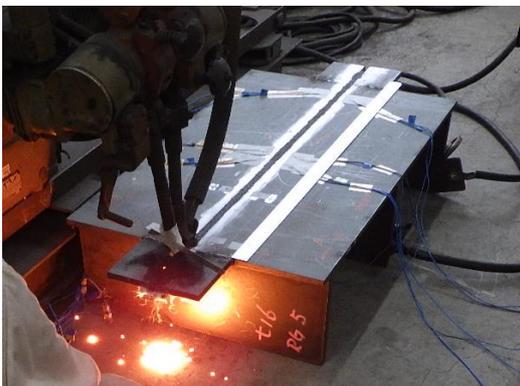


Fig. 5 Specimen during submerged arc welding.



Fig. 6 Cutting restraint plates.

Fig. 4 (a) に示す拘束板取り付け溶接においては、3枚の拘束板の接続部両端に隅肉溶接を12箇所行い、(b)に示すサブマージアーク溶接は1パスで行った。また、(c)に示す拘束板取り外し切断は、タブ板を2箇所取り外し、その後拘束板の切断を6箇所行った。以後、Fig. 4(a), (b), (c)に対応する工程を、それぞれ①取り付け溶接、②本溶接、③切断と定義する。今回の実験では、開先形状が40度、ルートギャップ (RG) が5 mm となるように拘束板の取り付け溶接を行った。②本溶接の溶接条件は、電流820 A、電圧34 V、溶接速度220 mm/min である。③切断はガスによる切断を母材下面から15 mm の位置において速度3.57 mm/sec 一定のもとで行った。②本溶接と③切断においては、熱電対による温度履歴の計測を行い、また各工程においては母材表面部における面外方向変位の計測を行った。

2.2 各工程における変形傾向についての検討

Fig. 7 に実験における各工程後の母材表面 $x=250$ mm での幅方向の面外変形分布を示す。同図は、三次元スキャン装置(ATOS CORE 300)を用いて、各工程後における面外変位分布について計測した結果である。図中の点線は、①取り付け溶接後、破線は②本溶接後、実線は③切断後の面外変位分布をそれぞれ示す。図中の中心付近の大きな面外変形は、サブマージアーク溶接によって発生した母材表面の余盛りである。実験結果から、①取り付け溶接後はほとんどフラットな面外変形が確認でき、②本溶接により一般的な溶接変形であるV字型の面外変形(角変形)が発生していることが確認できる。しかしながら、③切断によりV字型から逆V字型へ変形がシフトする傾向がみられた。これらの傾向は、Fig. 7 に示した $x=250$ mm の位置においても確認される。

一般的に、本溶接後のV字型の角変形が発生したのち、拘束治具を取り外した際に、スプリングバック、すなわち弾性ひずみが解放されることによる影響により、V字型の変形量が大きくなることが予想される。しかしながら、今回の実験結果では逆V字型の変形となった。この形状をよく観察すると、幅方向への曲がり(曲率)が拘束板が接続されていた位置全面において大きくなっていることから、②本溶接以外の工程である①取り付け溶接あるいは、③切断が逆V字型の変形に大きく寄与していると考えられた。

そこで次章においては、理想化陽解法 FEM を用いて、①取り付け溶接・②本溶接・③切断の全熱工程のモデル化を行い、実験によって発生した逆V字型変形の発生要因について、各工程ごとに詳細に検討する。

3. 理想化陽解法 FEM を用いた逆V字型変形発生要因についての検討

3.1 解析モデルおよび各工程の溶接条件

Fig. 8 に試験体と同寸法の解析モデルを示す。解

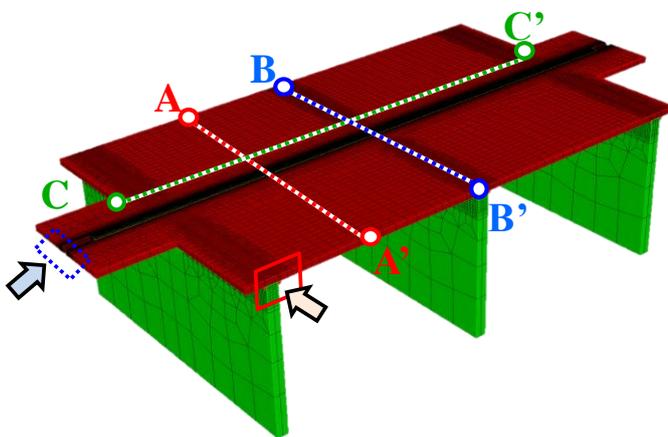


Fig. 8 Analysis model.

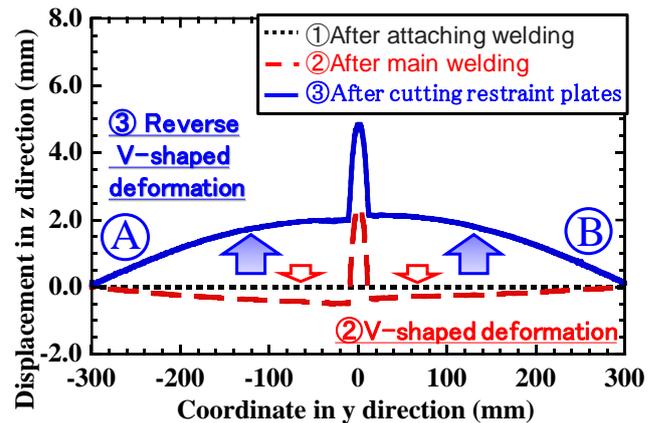


Fig. 7 Comparison of distribution of displacement in z direction in each process.

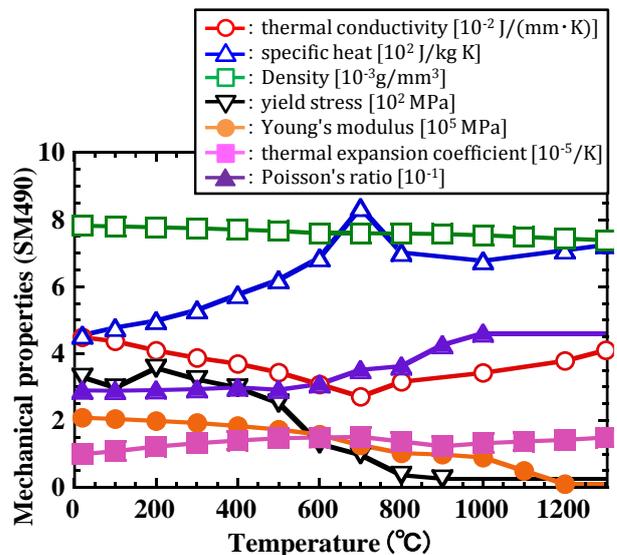


Fig. 9 Material constants of SM490.

析モデルにおける節点数および要素数は 416,467 および 390,228 である。解析に用いた SM490 の物性値データの温度依存性を Fig. 9 に示す。入熱量については第二章で示した溶け込み形状および施工条件を基に、①取り付け溶接では、入熱量 1200J/mm、溶接速度 240 mm/min の隅肉溶接（12 パス）とし、②本溶接では、入熱量 4125 J/mm、溶接速度 220 mm/min とした。①取り付け溶接と②本溶接においては、エレメントバース法により溶接金属の溶着をモデル化した。次に、③切断をモデル化するために、はじめに取り除く拘束板の要素の剛性を小さくすることで無効化したのち、切断部へ入熱した。また、切断時には、切断部周辺の温度履歴計測を 3 点行い、その結果として得られる断面マクロとを基に入熱量 1800 J/mm、切断速度 215 mm/min に設定した。各工程における熱効率率は 0.8 とした。

3. 2 各工程の解析結果

各工程の解析時間は①取り付け溶接で 5 時間 18 分、②本溶接で 19 時間 45 分、③切断で 5 時間 12 分であった。Fig. 10 に各工程における溶接・切断方向を法線方向とする断面における最高到達温度を示す。同図より、①、②、③の各工程における溶け込み形状が実験と解析で良好に一致していることが確認できる。

Fig. 11 に②本溶接後および③切断後における面外方向の変位分布を示す。同様にして、Fig. 12 に②本溶接後および③切断後における残留応力分布を示す。Fig. 11 より、(a)本溶接後から(b)切断後において、z 方向すなわち面外変位分布は大きく変化していることが確認できる。また、(a)本溶接後は、幅方向において下に凸の変形、すなわち V 字型の角変形が発生しており、(b)切断後では母材表面の中央の

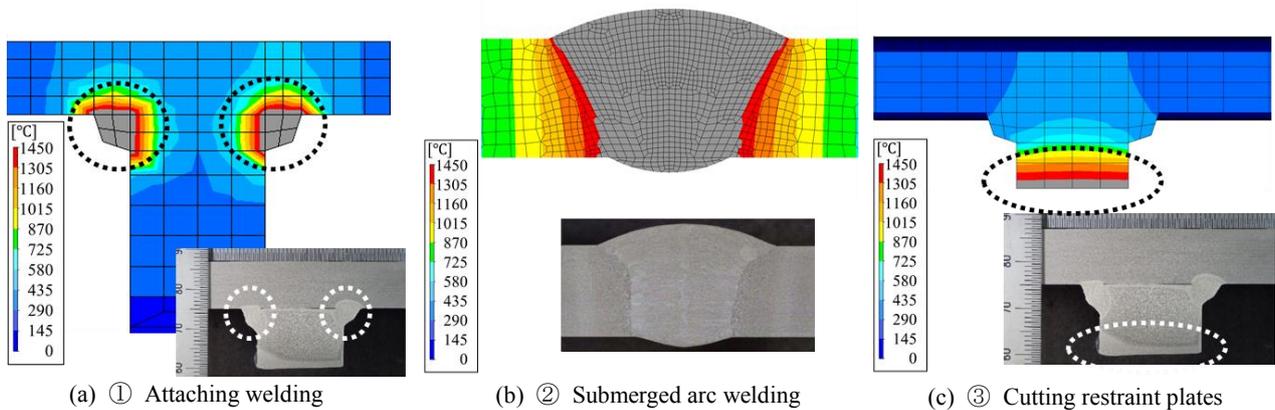


Fig. 10 Distribution of maximum temperature in each process.

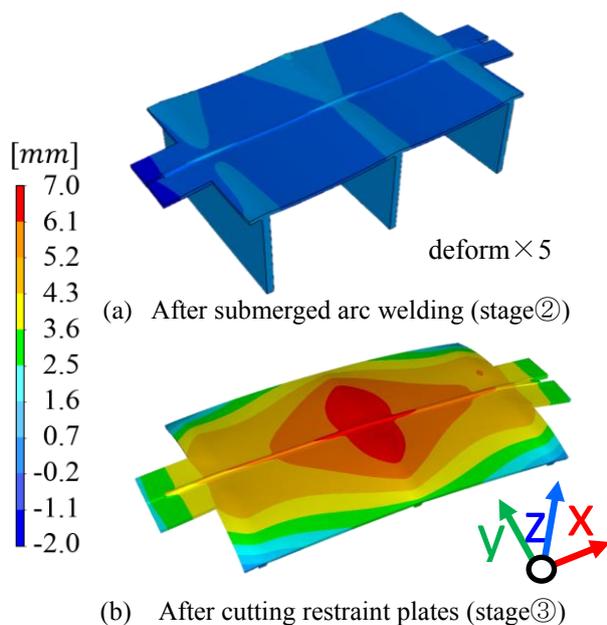


Fig. 11 Distribution of displacement in z direction after submerged arc welding and cutting restraint jigs.

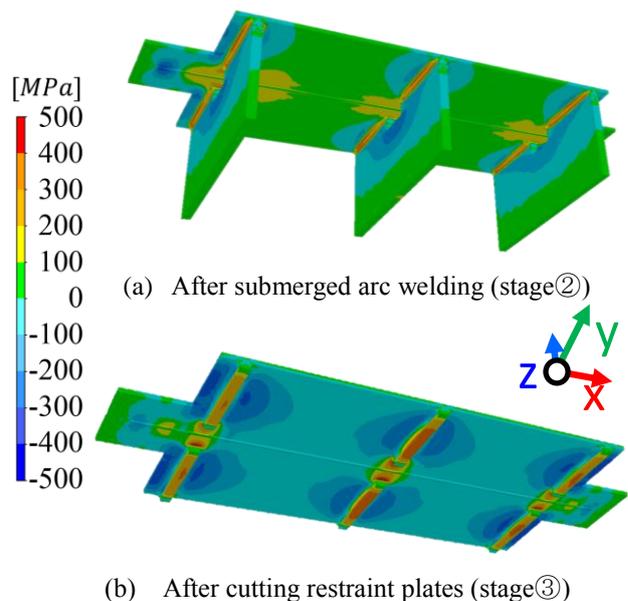


Fig. 12 Distribution of stress in y direction after submerged arc welding and cutting restraint jigs.

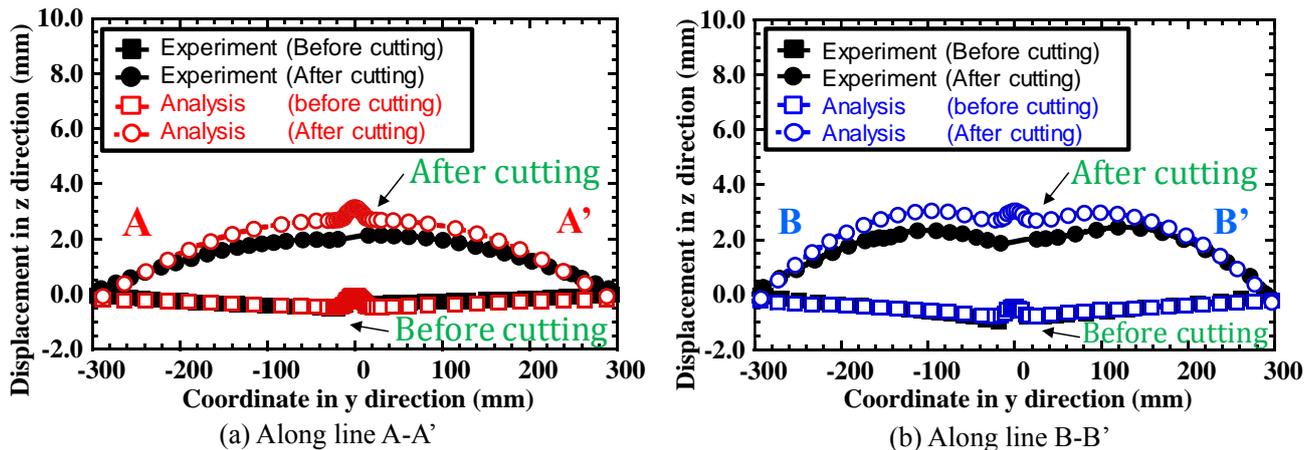


Fig. 13 Comparison of distribution of displacement in z direction between experiment and analysis.

サブマージーク溶接部が上に凸になるような、逆V字型の変形が確認できる。Fig. 12に示す残留応力分布から①取り付け溶接部にY方向の引張り残留応力が分布していることが確認できる。

Fig. 13に、実験と解析における切断前後の幅方向における面外変位分布を示す。Fig. 13における■印および●印は実験結果、□印および○印は解析結果を示し、また図中の■印および□印は②本溶接後の変形、●印および○印は③切断後の変形を示す。Fig. 13(a)はFig.9に示すx=250 mm位置におけるA-A'線上の面外変形を示し、Fig. 13(b)はFig.9に示すx=500 mm位置におけるB-B'線上の面外変形を示す。同図(a), (b)より、実験結果および解析結果として得られた試験体表面の幅方向面外変位分布が良好に一致していることが分かる。同図に、実験と解析における切断前後のC-C'線上の面外変位分布を示す。図中の▲印は③切断後の実験結果、△印は③切断後の解析結果を示す。Fig.14より、実験結果および解析結果として得られた溶接方向の面外変位分布が良好に一致していることが確認できる。

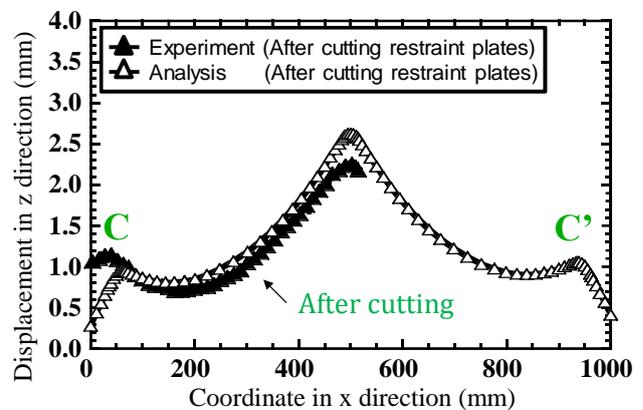


Fig. 14 Comparison of distribution of displacement in z direction between experiment and analysis.

以上の結果より、本溶接後にV字型の変形が発生した後、取り外し切断後に逆V字型の変形が発生することが解析上においても確認できる。さらに、Fig.13(a)に示すA-A'よりも、Fig. 13(b)に示す拘束板上B-B'の方が逆V字型変形が大きくなっていることが分かる。この理由としては、B-B'の方が、①取り付け溶接および③切断を行った拘束板に隣接する位置であることが挙げられる。そこで、この逆V字変形の発生原因を明らかにするため、次節では各工程の溶接および切断が、逆V字変形に及ぼす影響について検討を行った。

3.3 各工程における溶接および切断が逆V字変形に及ぼす影響についての検討
 本解析では、③切断を拘束板の削除と入熱によりモデル化しているが、本節ではその入熱の有無によって変形量がどのように変化するかについて検討した。Fig. 15に解析結果におけるx=250mm位置における切断前後の面外変位分布を示す。

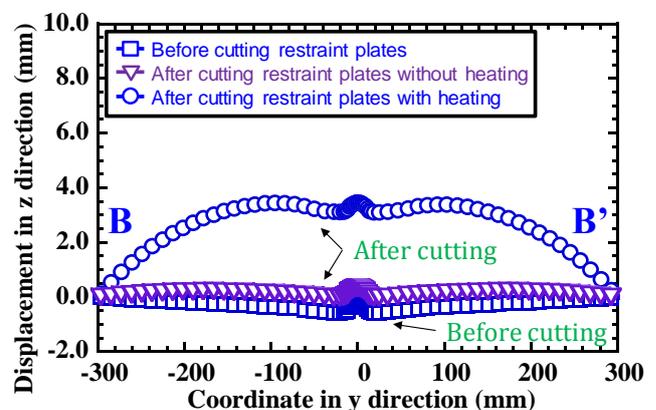


Fig. 15 Influence of cutting heat on displacement in z direction.

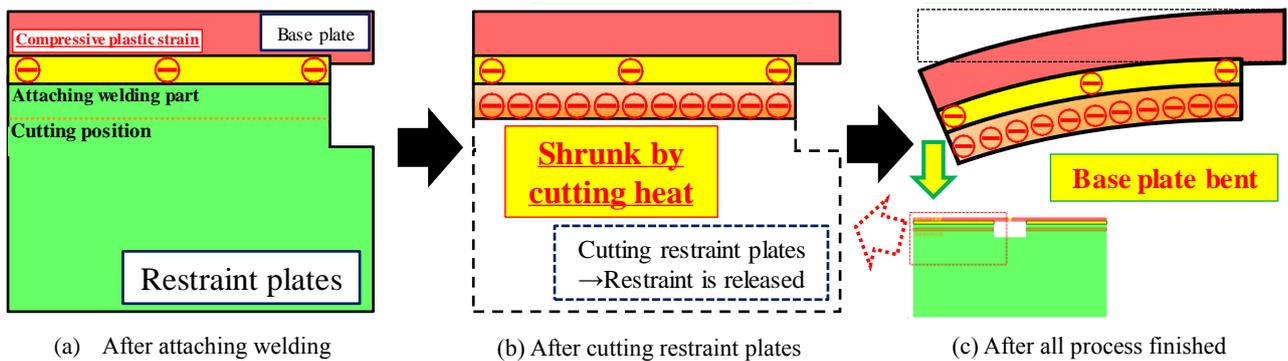


Fig. 16 Influence of cutting heat on displacement in z direction.

す。図中の□印は切断前の変形を示し、▽印は切断後の変形（切断熱：無）、○印は切断後の変形（切断熱：有）の結果を示す。同図において、□印から○印への変形は、取り付け溶接および拘束板切断時に発生する固有ひずみに起因する変形であり、□印から▽印への変形は、取り付け溶接時の固有ひずみに起因する変形であるといえる。同図より、取り付け溶接時に発生する固有ひずみと拘束板切断による固有ひずみは、どちらも逆V字型変形の発生要因となっているが、その大きさに着目すると、切断時による固有ひずみの方が逆V字型変形に対し大きく寄与していることが確認できる。

これらの解析結果をまとめ、Fig. 16に各工程における逆V字型への変形発生メカニズムを示す。同図(a)に示すように、①取り付け溶接時において、溶接部に圧縮の固有ひずみが発生する。加えて、同図(b)に示すように、③切断工程により切断位置にさらに大きな圧縮固有ひずみが発生する。これらに起因し、同図(c)に示すように、上に凸の曲げ変形すなわち逆V字型の変形が発生すると考えられる。

4. 結 言

本研究では、鋼橋の鋼床板デッキを模擬した試験体における、①取り付け溶接→②本溶接→③切断の一連の工程において実験および理想化陽解法 FEM による 3 次元熱弾塑性解析を行い、逆 V 字型の変形発生原因について検討を行った。さらに、切断位置が逆 V 字型変形に及ぼす影響について検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 鋼橋の鋼床板デッキを模擬した試験体における 3 つの工程を考慮した実験を行った結果、②本溶接後に V 字型の変形が発生し、③切断後には逆 V 字型変形が発生した。特に、拘束板が取り付けられていた位置における曲がり大きいことを確認した。
- 2) ①拘束板取り付け溶接、②本溶接、③拘束板切断の各工程をモデル化し、各工程において発生する変形について検討した。その結果、実験と解析において溶け込み形状が良好に一致した。また実験と解析において各工程後の母材表面に発生する面外変形についても良好に一致することを確認した。
- 3) ①拘束板取り付け溶接と③拘束板切断の入熱が逆 V 字型変形に影響していることが分かった。特に、③拘束板切断時の入熱の影響が大きいことが分かった。

参考文献

- 1) 河尻義貴, 生島一樹, 永木勇人, 大前暢, 柴原正和: 多層溶接時における溶接変形に及ぼす拘束治具の影響に関する検討, 2016 年春季溶接学会全国大会概要 2016, p214,215
- 2) 河尻義貴, 生島一樹, 永木勇人, 大前暢, 柴原正和: 板継溶接時における溶接変形に及ぼす拘束治具の影響に関する検討, 2016 年秋季溶接学会全国大会概要 2016, p340,341
- 3) 小川孝行, 吉田総二: 高張力鋼板の U 曲げスプリングバックの抑制に及ぼす決め押し効果, Journal of the JSTP, 2012, vol. 53, no.612
- 4) 飯塚高志: 型曲げにおける板鍛造援用による曲げ角度およびスプリングバック制御メカニズムの解明, 平成 27 年, 天田財団助成研究成果報告書, 2018, vol31, p233-238

- 5) M. Shibahara, H. Serizawa and H. Murakawa: Finite element method for hot cracking using interface element (3rd report) - development of static-dynamic hybrid method, Journal of Kansai Society of naval Architects Japan, No.235 (2001), pp.161-169.
- 6) K. Ikushima and M. Shibahara: Prediction of residual stresses in multi-pass welded joint using Idealized Explicit FEM accelerated by a GPU, Computational Materials Science, Vol.93 (2014), pp.62-67.