日照による熱変形と熱応力を考慮した洋上接合技術 —超大型浮体式海洋構造物の洋上接合技術（第2報）*—

山下泰生**, 岡田真三***, 島宗誠****, 米澤雅之*****, 大野則彦*****, 木下義隆*****

Joining Technology of Very Large Floating Structures Considering Thermal Distortion and Thermal Stress
Caused by Sunshine *

Joining Technology of Very Large Floating Structures(2nd Report)

By YAMASHITA Yasuo**, OKADA Shinzoh***, SHIMAMUNE Seiichi ****, YONEZAWA Masayuki *****,

OHNO Norihiko ***** and KINOSHITA Yoshitaka*****

This paper deals with the thermal distortion and thermal stress of very large floating structures caused by sunshine during joining floating structures each other. In case of constructing very large floating structures, we have to join many floating units each other. The floating structure on the sea is deformed easily by thermal distribution in the structure. At daytime, the deck plate of the floating structure is heated by sunshine and the temperature of the deck plate rises about 30 degrees higher than that of the bottom plate. This thermal distribution causes thermal distortion and induces thermal stress in the floating structure. This thermal distortion causes not only geometrical inaccuracy of the floating structure but also results in wide opening between the bottom plates of the floating units. Therefore, precise estimation of this thermal distortion is very important for joining operation. In case of construction of the floating airport model, we estimated this thermal distortion and thermal stress by 3D FEM analysis and we decide the joining procedure by using analyzed results.

Key Words: Thermal distortion, Thermal stress, Sunshine, Floating structure, Underwater welding, Mega-Float

1. 結 言

前報¹⁾で述べたように、浮体ユニットを洋上接合することにより超大型浮体式海洋構造物（メガフロート）を建設する場合、全体形状の確保と洋上接合部の継手性能の確保が重要な課題となる。ここで述べる太陽の輻射熱（日照）

による熱変形と熱応力は全体形状の確保の意味でも継手性能の確保の意味でも大きな課題となる。

太陽の輻射熱で構造物の表面温度が上昇することによる熱変形については多くの構造物で問題となる。一般的にはこの熱変形の大きさは構造物の温度分布、剛性及び拘束状態の影響を受けると考えられる。メガフロートは海面に浮いているので構造物の一部は海水に接しており、内部の温度分布は大きくなりやすい。また、柔構造で剛性は低く、浮上状態にあるため自重による拘束は陸上構造物に比較して小さくなる。したがって、日照による熱変形の影響は陸上構造物に比較して大きくなる傾向にあると考えられる。そこで、ここではメガフロートを建設する途中、特に浮体ユニットを洋上で接合する際の日照による熱変形と熱応力の影響について検討する。

2. 洋上接合中の日照影響

前述したように、メガフロートは通常の陸上構造物に比較して日照による熱変形と熱応力の影響は大きくなる傾向にあると考えられるため、完成したメガフロートの機能面からの日照による熱変形の研究はなされている²⁾³⁾⁴⁾。たと

*受付日 平成18年6月12日 受理日 平成18年11月2日
平成12年度秋季全国大会で発表

**正 員 住友重機械工業(株) [現在：住友重機械マリンエンジニアリング(株)] Member, Sumitomo Heavy Industries ,Co., Ltd [Present Address: Sumitomo Heavy Industries Marine & Engineering, Co.Ltd]

*** 住友重機械工業(株)Sumitomo Heavy Industries ,Co., Ltd
**** 三菱重工業(株) [現：(財)日本造船技術センター] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. [Present Address: Shipbuilding Research Centre of Japan]

***** 日本鋼管(株) [現：JFE 環境] NKK Corporation[Present Address:JFE KANKYO]

***** 石川島播磨重工業(株) [現：(株)アイ・エッチ・アイマリンユナイテッド] Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.,Ltd.[Present Address: IHI Marine United Inc.]

***** メメガフロート技術研究組合 [現在：住友重機械マリンエンジニアリング(株)] Technological Research Association of Mega-Float [Present Address: Sumitomo Heavy Industries Marine & Engineering ,Co.Ltd]

えば、セミサブ型のメガフロートでは剛性が小さいため、デッキの高さで 1 m を越す変形が発生する可能性も指摘されている²⁾。しかしながら、浮体ユニットを洋上接合する場合の日照による熱変形及び熱応力が施工に及ぼす影響についての研究はなされていないようである。

今回対象とするポンツーン型メガフロートの洋上接合工事では接合する浮体ユニットのデッキ面は日照により温度が上昇し、海水面に接している底板と大きな温度差を生じることになる。この場合、浮体ユニットは接合時に Fig. 1 のような変形を生じると考えられる。

Fig. 1 Thermal distortion caused by sun shine during joining floating units each other

この図からわかるように、日照による熱変形と熱応力によって施工上以下のような問題が生じることが予想される。

- 洋上接合では溶接前に治具を用いて機械的に動揺を拘束する必要があるが、日照による熱変形に治具が対応できるようにしておく必要がある。

Fig. 2 The floating airport model (Phase-II model)

- 日照を受ける日中は底板の開先にギャップが生じ、溶接が難しい。
- 接合後の浮体構造物の形状が確保し難い。
- 接合状態によっては熱応力により浮体構造物部材を破損する可能性がある。

このように日照による熱変形が大型鋼構造物の施工上の課題となる例については橋梁の現地工事で紹介されている⁵⁾⁶⁾。

日照による熱変形については構造物の大きさが大きくなるほど変形の絶対値が大きくなる。したがって、巨大な浮体ユニットを接合する超大型浮体式海洋構造物では非常に重要な課題となり、メガフロート本体の熱応力による損傷を避けるため、これを考慮した施工手順が不可欠となる。

そこで、実際の洋上接合途中で発生する日照による熱変形及び熱応力を FEM 解析より推定し、それを考慮した施

工方法について検討した。

3. 洋上接合中の日照による熱変形と熱応力

3.1 解析対象

日照による熱変形及び熱応力は温度分布のほか、浮体構造物の剛性の影響を受ける。したがって、実際の構造物のモデルを用いてシミュレーションする必要がある。そこで、解析対象としては、Fig. 2 に示すメガフロート実証実験浮体（フェーズⅡモデル）の洋上接合工事⁷⁾を対象として解析を行った。

3.2 解析方法

(1) 構造モデル

メガフロート実証実験浮体（フェーズⅡモデル）の各部材の強度計算は汎用 FEM ソフト (NASTRAN) を用いて行っている。そこで、構造モデルは Fig. 3 に示すように、メガフロート実証実験浮体（フェーズⅡモデル）の構造計算用 3 次元モデル（板要素）をユニット A, B, C, D×E×F の 4 つに分割できるように継手部分を修正したモデルを使用した。ユニット D と E の接合およびユニット D と F の接

合はその他のユニットの接合に比べて影響が少ないので分割を省略した。

(2) 温度モデル

① 温度条件

浮体構造物内部の温度分布は Fig. 4 に示すように、過去の経験から温度差を 30℃ として底板からデッキまで直線勾配とした。（高さ 3,000～3,300mm のキャンバー部分は 30 度で一定とした）実際の温度変化の例を Fig. 5 に示す。

Fig. 4 Distribution of temperature in the floating units

Fig. 5 Relationship between time and temperature of deck and bottom

② 線膨張係数

線膨張係数は $10.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ とした。

3.3 解析方法の検証

今回使用する F E M 解析手法が妥当であるかどうかを検証するため、B ユニット進水後の係留期間を利用して温度状態と日照による熱変形を計測した。

(1) 計測位置

Fig. 6 に示すように、長辺方向と短辺方向について日照による熱変形を計測した。

Fig. 6 Location of measuring points

(2) 計測方法

計測方法としては Fig. 7 のように、透明パイプを浮体ユニットの周囲に取り付け、ホースで連結して水位計測で日照影響による上下への変位量を計測した。

Fig. 7 Method for measuring distortion of the floating unit

(3) 計測結果

真夏の 1 週間でデッキ温度と水温（底板温度）の差を計測した結果、その最大値は 32°C であり、ほぼ予想通りであった。温度差が 30°C に近い状態での日照による熱変形の計測値と温度差 30°C のときの F E M 解析結果を Fig. 8（長辺方向）及び Fig. 9（短辺方向）に示す。これらの図からわかるように、デッキ温度と水温の差が 30°C の場合、約 200mm 変形し、洋上接合工事に大きな影響を与えることがわかる。ここで、計測値は日照影響のほとんどない雨天時の計測値（初期形状）からの変化量として示している。

また、デッキと底板（水温）の温度差と変形量（高低差）

の関係を Fig. 10, 11 に示す。

Fig. 8~11 からわかるように、計測値と解析値はよく一致しており、この解析手法により、実施工で生じる日照による熱変形を精度よく予測できることがわかった。

Fig. 8 Thermal distortion of the floating unit in afloat condition (Longitudinal direction)

Fig. 9 Thermal distortion of the floating unit in afloat condition (Transverse direction)

Fig. 10 Relationship between thermal distribution and thermal distortion (Longitudinal direction)

Fig. 11 Relationship between thermal distribution and thermal distortion (Transverse direction)

3.4 実際の接合順序に従った日照影響の予測

日照による変形が洋上接合工事に大きな影響を与えることがわかったので、洋上接合途中の状態をモデル化して日照による変形を FEM 解析により予測した。解析する接合モデルについては以下の目的を考慮した。

- ① 浮体単体での変形を考慮して洋上接合治具の寸法を決める。
- ② 上甲板のみ接合された状態での変形状態、底板のギャップを把握し、昼間溶接可能かどうか判断する。
- ③ 上甲板のみ接合された状態でのせん断荷重を求め、接合治具の強度、使用方法を決める。
- ④ 底板の一部が溶接された状態での浮体の変形状態底板のギャップを把握し、浮体形状を確保するために夜間溶接する範囲を決める。
- ⑤ 底板の一部が溶接された状態での浮体が日照から受ける荷重を把握し、浮体が昼間破損しないようにするために必要とする溶接する範囲を決める。

解析した接合モデルを以下に示す。

接合モデル		解析結果
対象ユニット	接合状態	
A、B、Cユニット単体（代表としてA）	—	Fig.12
D×E×F 単体	—	Fig.13
Bの接合（長辺接合）	デッキ板のみ接合	Fig.14
デッキ板+底板3箇所（10m×3箇所）接合	Fig.15
Aの接合（L字型接合）	デッキ板のみ接合	Fig.16
Cの接合（短辺接合）	デッキ板のみ接合	Fig.17
	デッキ板+底板2箇所（10m×2箇所）	Fig.18
	デッキ板+底板3箇所（トータル 20m）	Fig.19

日照による変形の解析結果を Fig. 12～Fig. 19 に示す。

Fig. 12 Estimation of thermal distortion for A-unit in afloat condition

Fig. 13 Estimation of thermal distortion for D×E×F-unit in afloat condition

Fig. 14 Estimation of thermal distortion in case of joining B-unit [Join only deck plate]

Fig. 15 Estimation of thermal distortion in case of joining B-unit [Join deck plate and 3points (30m) of bottom plate]

Fig. 16 Estimation of thermal distortion in case of joining A-unit [Join only deck plate]

Fig. 17 Estimation of thermal distortion in case of joining narrow side of the floating unit [Join only deck plate]

Fig. 18 Estimation of thermal distortion in case of joining narrow side of the floating units [Join deck plate and both end of the bottom joint]

Fig. 19 Estimation of thermal distortion in case of joining only narrow side of the floating units [Join deck plate and 3 points of the bottom plate]

Fig. 12～19 からわかるように、日照により、浮体ユニットの端部は約 200mm 程度垂れ下がる。したがって、デッキ板のみ接合した状態では底板のギャップが 20～30mm 開くとともに、浮体構造物としての形状が確保できないことがわかった。そこで、次に日照影響を考慮した施工方法を検討した。

4. 日照影響を考慮した洋上接合方法

4.1 引き寄せ

浮体ユニット引き寄せ時には、浮体ユニットが日照による熱変形で浮体端部が垂れ下がっているため、浮体端部で隣接する浮体ユニットと大きな上下方向の目違いを生じる可能性がある。

Fig. 20 Arrangement of joining units

Bユニット引き寄せ時にはD×E×Fユニット単体で Fig. 12 に示すように、端部で 214mm 沈むことから、Fig. 20 に示す尾端部 (FR144) でBユニットと約 214mm の上下方向の目違いが発生すると予想される。また、首端部 (FR96) では、Bユニット単体では Fig. 8 に示すように、175mm 沈むことからFR96で約175mmの上下方向の目違いを生じると予想される。Aユニット引き寄せ時にも同様に、FR22 とFR95 同様の高低差が生じると考えられる。

引き寄せの際にはこれらを考慮して Fig. 21 に示すように、引き寄せ固着治具（上下動揺抑止治具）の形状と配置を決める必要がある。

Fig. 21 Typical shape of the device for controlling vertical relative motion between floating units

4.2 固着（上下方向の拘束）

Fig. 22 で示す DxExF ユニットにBユニットを接合する場合及びさらにAユニットを接合する場合、底板を溶接するには接合部の海水を排水するための止水が必要となる。この止水のためには、継手の端部の高低差を解消する必要がある。この場合、デッキ板をフレーム位置でストロングバック等により上下方向を拘束するのが一般的な方法である。そこで、Bユニット及びAユニットについて各フレ

ムごとに日照による熱変形による高低差を拘束するために必要な拘束力を求めた。これを Fig. 22, Fig. 23 に示す。これらの図からわかるように、各ユニットの先端部には大きな上下方向の拘束力が必要となる。

Fig. 22 Estimation of shear force in case of joining B-unit

Fig. 23 Estimation of shear force in case of joining A-unit

これらの拘束力を考慮すると洋上接合手順として、以下の2つの方法が考えられる。

- (a) 端部を含めてジャッキで強引に合わせる。
- (b) 昼間の仮固着は変形量の小さな範囲で実施し、端部の固着は日没後行う。

Fig. 24 Example of joining sequence considering shear force between joining units

止水工程を早めるためには(a)の方法も考えられたが、必要とする補強も大きくなるため、実際の工事では(b)の方

法を採用した。ただし、端部では接合後も昼間は大きなせん断力が働いたため、Fig. 25 のような補強を実施した。

Fig. 25 Reinforce member for joining operation

4.3 止水

底板の取付と溶接を行うためには、作業区画の海水を排水する必要がある、このための止水が必要となる。今回採用した止水ダクト方式(Fig. 26)及び圧気排水方式(Fig. 27)とも以下のように、日照による熱変形を考慮しておく必要がある。

① 止水ダクト方式の場合

- 上下方向に大きく動く端部においてダクトが外れたり周囲の部材と干渉して破損したりする可能性がある。
- 止水ダクトのシール部（パッキンのあたり面）が熱変形により移動するので、シールが確保できない可能性がある。

Fig. 26 Influence of thermal distortion for sealing

② 圧気排水の場合、日中は端部が沈むことにより海水が流入し、作業できない可能性がある。（日照による熱変形の影響の少ない時間帯に作業しておく必要がある。）

Fig. 27 Infalling seawater at the end of joint

4.4 底板の取付及び溶接

デッキを溶接した状態でも底板の継手は日中 30℃の温度差が付いた場合、長辺接合（シーム）では Fig. 13(a)に

示すように20mm, 短辺接合ではFig. 16に示したように33mmのギャップが開く. 実際の施工でも温度差が約30℃生じることによりシーム方向で約20mm, パット方向で約30mm底版のギャップが広がり, ほぼ計算通りとなっていることを確認した. そこで, 底版の取付と溶接作業は日没後実施することとした. また, 底版の取付と溶接作業を行う際には以下の点に注意しておく必要がある.

- ① 溶接後, 形状が確保されていること. (Fig. 28のように継手で折れ曲がった形状にならないこと)

- ② 翌日の昼間の日照による熱応力に対して十分な強度を保っていること.

今回の工事ではFig. 14, Fig. 17, 18の解析結果を参考として, シーム, パットとも少なくとも継手両端および中央部の3ヶ所について10m/カ所の取付/溶接を夜間実施することとした. (実際には継手の半分以上を一夜で溶接した) また, この範囲を溶接した場合の翌日の昼間30℃の温度差が生じたときの最大応力をFEMで求め, 十分な強度を確保できることを確認した.

5. 考察及び今後の課題

5.1 浮体内部の温度分布

今回の解析は浮体内部の温度分布を線形と仮定しているが, 実際にはFig. 29のような分布となっている. (計測結果をFig. 30に示す)

Fig. 29 Variation of the temperature distribution in the floating units

従って, Bユニットの単体の変形計測でも, 午前デッキと水温の温度差が大きい割に変形は小さく, 午後は逆に温度差の割に変形は大きくなっている.

夜間はデッキ温度と水温はほぼ等しくなるが, 浮体構造物の内部の換気が十分に行われていない場合には昼間の熱気が残り, 浮体構造物の内部はデッキ, 底版に比較して温度は少し高い状態にある. この温度分布は今回取り上げて

いる面外変形には影響を及ぼさないが, 浮体構造物の形状計測の上では影響を受けることになる. 今回の工事では, 工事途中の形状計測を夜間実施したが, 夜間計測でも, 昼間の日照の影響を受けることが確認されている. (温度補正しても, 基準点間の寸法が一致しない) したがって, 計測精度を上げるためには浮体全体の換気等, 温度分布を小さくする工夫が必要であることがわかった.

Fig. 30 Actual variation of temperature distribution in a day

5.2 日照による熱変形と熱応力の軽減策

日照による温度上昇に起因する熱変形と熱応力を軽減するには温度上昇を極力少なくする必要がある. このような方法としては, デッキに散水するとか日よけを作る等が考えられるが, 長さ数キロメートルにも及ぶメガフロートではこのような対策はあまり現実的とは考えられない. そこで, 塗装色の影響について考察する.

今回の実証実験モデルではデッキの塗装色はFig. 31に示すように大半が灰色 (マンセル記号: TN-55), 一部クリーム色 (マンセル記号: T19-80L) となっている. そこで, 同じ時刻に灰色の部分とクリーム色の部分の温度を計測した. その結果をFig. 32に示す. この図からわかるように, 灰色のほうが熱を吸収するため, クリーム色の部分に比較して温度が高くなり, 同じ時刻でも最大で10℃程度灰色の部分の温度がクリーム色の部分よりも高くなっている.

Fig. 31 Color of the coating on the deck

以上のようにデッキの温度上昇に対して塗装色の影響が大きいことから, なるべく温度上昇を低く抑えるような塗装色を選ぶことにより日照による熱影響を軽減することが可能と考えられる. 塗装により, 日照による温度上昇を抑制する方法は省エネルギーの観点から建物の屋根の塗装でも研究されている⁸⁾. そこで, 浮体ユニットの塗装については日照による熱変形防止の観点から温度上昇を抑制することを検討する必要があると考えられる.

Fig. 32 Temperature variation influenced by color

6. 結 言

浮体空港実証実験モデル（メガフロートフェーズⅡ）の洋上接合工事は真夏に実施するため、日照による熱変形が引き寄せ・固着、没水部の止水・溶接等の各工程で大きな課題となることが予想された。そこで、洋上接合中に発生する日照影響をFEM解析により推定し、これに基づいて工作法を検討した。主な結果を以下に示す。

- ① 浮体ユニット単体での日照による熱変形計測結果より、3次元FEMで日照による熱変形が精度よく予測できることが確認された。実工事でも解析通りの日照影響を受けた。
- ② 日照による熱変形を考慮して、形状を確保すると共に、熱応力によって浮体を損傷しない施工方法（夜間に接合する底板の最小溶接長等）を検討した。
- ③ 昼夜の浮体構造物の形状変化を工事関係者が理解していたため、無用の混乱を生じることなく、予定通り工事を進めることができた。
- ④ 日照による熱応力、熱変形を抑制する方法としては浮体ユニットのデッキの塗装色等の塗装仕様に工夫することが有効と考えられる。

日照による熱変形、熱応力は洋上接合手順を決定する上で重要な影響因子である。洋上接合工事では気象・海象条件の観点からも短時間に接合強度を上げる必要があるが、

日照による熱荷重は夜間に接合しても数時間後には負荷される大きな荷重である。したがって、浮体構造物を建設するには浮体ユニットの接合部の構造や浮体ユニットの大きさ等の初期計画から洋上接合時の日照による熱変形及び熱応力による影響を考慮しておく必要がある。

謝 辞

本研究は、メガフロート技術研究組合による実証実験モデル建設時の洋上接合工事の一環として行われたものである。ここにメガフロート技術研究組合製作施工分科会の委員及び洋上接合工事共同企業体の方々に深甚の謝意を表します。また、研究を行うのに有意義なご討議を頂いた大阪大学大学院豊田政男教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) YAMASHITA Yasuo, KAWACHI Shunichi, KINOSHITA Yoshitaka, OKAMOTO Koichi: Geometric Accuracy Control of Very Large Floating Structures-Joining Technology of Very Large Floating Structures (1st Report)-, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2006 (in printing).
- 2) HOSHINO Kunihiro: At Sea Experiment of a Floating Structure, Deformation and Stress of Experimental Structure due to the Uniformity of the Temperature distribution, Papers of Ship Research Institute AD-Vol.16 (1994), pp.85-108 (in Japanese).
- 3) TAKARADA Naonosuke: Example of Technology Assessments for Very Large Floating Structures (Part.5), Bulletin of The Society of Naval Architects of Japan Vol.642 (1982), pp.702-719 (in Japanese).
- 4) HOSHINO Kunihiro, IWAI Masami, SATO Hiroshi: At-sea Experiment of a Floating Structure Part6. Deformation and Stress of Experimental Structure due to the Uniformity of the Temperature distribution, Journal of Marine Science and Technology Vol.171 (1992), pp.535-544 (in Japanese).
- 5) SHIBATA Nobuyuki: Prevention and Estimation of Welding deformation (2) Thick Plate Steel Structure (Steel Bridge, Journal of the Japan Welding Society Vol.60 (1991) No.6, pp.472-477. (in Japanese).
- 6) EGUSA Taku: Accuracy Control on Site-Weld of Long Span Bridges, Journal of the Japan Welding Society Vol.72 (2003) No.4, pp.247-250. (in Japanese).
- 7) Technological Research Association of Mega-Float, Annual Report, 2000 (in Japanese).
- 8) HIROSE Tetsuya, NAGASHIMA Seiji: Development of Heat Shutting, Heat-insulating Coating System of Roof, Research on Coating No.142 (2004), pp.55-59 (in Japanese).