洋上接合時の溶接変形を考慮した超大型浮体式海洋構造物の形状管理 —超大型浮体式海洋構造物の洋上接合技術（第1報）—*

山下泰生**, 川地俊一***, 木下義隆****, 岡本耕一*****

Geometric Accuracy Control of Very Large Floating Structures Considering Welding Distortion Joining Technology of Very Large Floating Structures (1st Report)

By YAMASHITA Yasuo**, KAWACHI Shunichi***, KINOSHITA Yoshitaka****, OKAMOTO Koichi

Recently, the utility of VLFS (Very Large Floating Structures) attracts great deal of public attention. In order to construct VLFS, however, some technical problems remain. Because it is too large to build at any building dock or other site on the ground, the construction by joining floating units together on the sea is inevitable. Some advanced engineering for constructing operations on the sea are necessary, such as maintaining precise measurement of each unit, joining units in waves, underwater welding techniques.

Demonstration with a large floating model was carried out by Technological Research Association of Mega-Float (TRAM) from 1995 to 2001. During construction of floating model, we found out it is important to estimate the welding distortion precisely, because it causes distortion of VLFS itself and the misalignment among units. Since complete restriction of the distortion at sea is impossible, precise estimation of the distortion become essential for super-sizing VLFS. In order to solve this problem, we had trial estimation by FEM analysis.

In this paper, concerning on welding distortion, comparisons between experimental results and estimation by FEM analysis are shown. As a result, we show it is possible to estimate the welding distortion of VLFS under construction precisely. Moreover, we show FEM analysis can suggest the procedure to make geometrical inaccuracy and misalignment among units minimum by controlling the shapes of units and their placing position.

Key Words: Welding distortion, Floating structure, Mega-Float, Misalignment, Accuracy control, FEM

1. 緒 言

我々の住む日本の人口は約1億2400万人で世界で8番目であるにもかかわらず、国土面積は37.8万km²にすぎず、世界の約60番目である。一方、長い海岸線を有するわが国の200海里経済水域は447万km²もあり、世界の6番目の広さを有している。そこで、以前から埋め立てにより発電所、空港、大規模な工場等の用地を確保してきた。その結果、大都市圏を中心に埋め立てに適した浅瀬の多くはすでに埋

め立てられており、埋め立てによる新たな土地の確保は難しくなってきた。このような状況から、埋め立てに代わる新たな海洋空間の開発利用方法として、巨大な鉄の箱すなわち超大型浮体式海洋構造物（メガフロート）を海に浮かべ、その上に空港等の施設を建設する方法が注目されるようになってきた。そこで、メガフロートの研究開発の推進、実用化を目指して平成7年4月にメガフロート技術研究組合が設立され、平成7年度より平成12年度まで実証実験が横須賀沖で実施された。¹⁾

メガフロートは大型鋼構造物を効率よく安定した品質で建造できる造船所等の工場で作成した多数の浮体ユニットを設置海域まで曳航し洋上で接合する方法であり、超大型鋼構造物を建造する上では効率面及び品質面で優れた方法である。たとえば、平成11年度には長さ1000m、幅120mの空港機能実証実験用浮体モデルを洋上接合期間1月余りで建設している。しかしながら、浮体ユニットを洋上で接合してメガフロートを建設する場合、その施工環境と大きさからして以下の課題がある。

① メガフロート全体の形状をいかに確保するか

② 洋上接合部の継手性能をいかに確保するか

ここでは、多数の浮体ユニットを接合する際に生じる溶接変形を考慮したメガフロート全体の形状管理方法について

*受付日 平成18年6月12日 受理日 平成18年11月2日
平成11年度溶接構造シンポジウムで発表

**正 員 住友重機械工業(株)[現：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) Member, Sumitomo Heavy Industries Co., Ltd

**** 元メガフロート技術研究組合(現：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]

***** 元メガフロート技術研究組合 Technological Research Association of Mega-Float

て検討する。

2. 溶接変形の予測

多数個に分割された鋼構造物を溶接接合により製作する場合、溶接收縮によって変形することが知られており、溶接変形を考慮して継手部分の伸ばし量、位置決め等の基本的な工作手順が決められている。たとえば、造船の場合、Fig. 1 (a) に示すように、多数個のブロックを積み重ねる場合には溶接変形を考慮してコッキングダウンという逆ひずみを設けたり、上下のブロックで伸ばし量を変化させて継手で目違いを生じないようにしたりしている。また、Fig. 1 (b) に示すように、溶接変形を防止するために可能な限りブロックは左右対称に接合している。以上のように、溶接構造物を製作する場合には溶接変形を予測することにより最終形状を確保すると同時に接合部での不整合（目違い、ギャップ）を防止する必要がある。通常、このような溶接変形量の予測は長年の経験から行われている。

Fig. 1 Example of estimation of welding distortion

Fig. 2 Example of unit arrangement of VLFS

メガフロートの場合、Fig. 2 に示すように、多数の浮体ユニットを洋上で接合する必要がある。この場合には、通常の陸上での構造物と異なり、以下の課題がある。

- ① 完全に同一の形状の浮体ユニットを接合すると、Fig. 3 (a) に示すように、前に接合したユニットが溶接により収縮しているので接合部に目違いを生じる。この目違いは接合する浮体ユニットの数が多くなるにつれて拡大する。

Fig. 3 Welding distortion of VLFS

- ② メガフロートの接合は係留装置の側から接合する必要があるため、左右対称に接合することができない。したがって、Fig. 3 (b) に示すように、接合にしたがって、浮体全体が弓状に曲る傾向がある。
- ③ 浮いているため、メガフロートと海水の間で摩擦による拘束が働かず、変形が陸上に比較して大きくなる。

一方、目違いが洋上接合部で生じると目違い修正のために陸上に比較して多くの時間と労力を要することになる。また、気象・海象条件の変化を考慮すると早く溶接して浮体ユニットの接合強度を短時間で確保する必要がある。したがって、接合中のメガフロートの溶接変形を予測し、形状を管理することは非常に重要な課題である。

最近、FEM 解析を用いて溶接変形の予測が行われるようになってきたが、メガフロートの場合には陸上構造物に比較して以下の利点があり、精度よく予測できると考えられる。

- ① 浮体ユニットの形状は単純で、ほぼ一定形状。(Fig. 3 の問題は 2 次元モデルで解析可能)
- ② 浮いているので海水とメガフロートの間の摩擦力を無視できる。(平面的には自由に動く)
- ③ 開先内の微小動揺を防止するため、溶接前にストロングバック及び取付ピースで取り付けるため、継手の拘束条件がほぼ一定。(Fig. 4 及び Fig. 5 参照)
- ④ 短時間に接合強度を高める必要があるため、接合部の全線の溶接をほぼ同時スタートするので、回転変形は無視できる。

Fig. 4 Typical sequence of joining floating units

Fig. 5 Fitting using strong-backs and fitting pieces

そこで、メガフロート実証実験モデル建設中の洋上接合時に発生する溶接変形を計測することにより、FEM 解析を利用して浮体ユニットの接合時の変形が予測できることを確認することとした。

3.メガフロート実証実験浮体建設中の溶接収縮と溶接変形

3.1 メガフロート実証実験浮体

メガフロート実証実験（フェーズ 1）として長さ 100m、幅 20m、深さ 2m の浮体ユニット 9 個を Fig. 6 に示す順序で洋上接合した。この工事期間中に洋上接合部の収縮量及び溶接変形を計測することとした。

Fig. 6 Joining sequence of floating units of the large floating model

3.2 溶接変形の予測方法

溶接変形は熱弾塑性現象であり、溶接条件等の条件を与えて FEM 解析することも可能であるが、非常に多くの計算時間を要する。そこで、継手近傍に固有ひずみを与えて二次元 FEM 解析する方法を採用した²⁾。今回はメガフロートの溶接変形のメカニズムから、Fig. 7 のように、継手を挟んで幅 1m の範囲に横方向及び縦方向それぞれに固有ひずみを与えることとした。

Fig. 7 Simplified model to evaluate welding distortion of VLFS

固有ひずみ法で FEM 解析を行うためには実際の洋上接合継手の固有ひずみを推定する必要がある。ここでは以下の方法で推定した。

3.3 洋上接合部の固有ひずみ

3.3.1 横方向の固有ひずみ

溶接線と直角方向である横方向に対しては拘束力は非常に小さいので、固有ひずみは横収縮量を計測することにより推定できると考えた。ここで求めるべき横収縮量は単に洋上継手の溶接だけでなく、ストロングバック等の取付・取り外し、補修溶接、ひずみ取り等の作業も含む必要がある。そこで、Fig. 8 のように、浮体ユニットを位置決めしてからデッキ板とボトム板について、継手を挟んで 1m の計測距離での横収縮量を計測した。計測した結果を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 からわかるように、計測した横収縮量は広い範囲に分布している。この理由は以下のように考えられる。

Fig. 8 Measuring method of welding shrinkage

Fig. 9 Distribution of the value of transverse shrinkage caused by welding of experimental floating units

①計測ポイントの約半分はボトム板であるが、今回の実証実験浮体モデルでは Fig. 8 に示すようにボトム板には止水のために 2 本の溶接線がある。したがって、ボトムの横収縮量はデッキ板に比較して大きくなる傾向がある。

②デッキとボトムには工事のために多くの治具や工事孔があるが、計測点の近くにこれらがある場合には通常の溶接以外にガス切断やガスガウジング等により入熱量が大きくなるため、他の場所に比較して収縮量が大きくなる。

ここでは横収縮量の平均値を洋上接合部の横方向の固有ひずみと考え、4mm/m を FEM 解析での固有ひずみとした。

3.3.2 縦方向の固有ひずみ

縦方向の固有ひずみは浮体ユニットの幅に比較して洋上接合部の幅が狭いので、今回対象としている溶接変形に与える影響は横方向の固有ひずみに比較すると小さいと考えられる。しかしながら、無視はできないので、継手の状況から次のように推定した。

Fig. 10 Heat input sources influenced longitudinal inherent strain

Fig. 10 を見てわかるように、縦方向の固有ひずみに影響する因子は通常の溶接以外にも多々ある。ここではボトムの 300mm 幅のインサートプレート同士の突合せ溶接による収縮を 4mm 等各溶接の固有収縮量を過去の経験から推定し、これらを集計して 1m 幅の接合範囲で 0.6mm/m (接合長) と推定した。

3.4 実証実験浮体での溶接変形

実証実験モデルでの溶接変形を 3 次元計測器で計測した。

この 3 次元計測器は計測精度「0.8mm+1ppm×計測距離」を有している。計測結果及び解析結果を Fig. 11 に示す。この図からわかるように、FEM 解析は洋上接合による溶接変形を精度よく再現していることがわかる。このことから FEM 解析を用いてメガフロート洋上接合に伴う変形を予測することが可能であることがわかった。そこで、次に FEM 解析を利用したメガフロートの形状管理について検討した。

(a) Distortion caused by welding of B-8 unit

(b) Distortion caused by welding of B-5×B-6 unit

Fig. 11 Welding distortions of the large floating model (Measurement results and FEM analysis)

4. FEM 解析を用いたメガフロートの形状管理

4.1 形状管理の考え方

メガフロートのように係留装置側から接合する場合、すなわち、一方向から接合せざるを得ない場合には、メガフロートを構成する各浮体ユニットにはくさび状に伸ばし量を設け、位置決めの際には逆ひずみを設ける必要があると考えられる。たとえば、4 個の浮体ユニットで構成される場合には Fig. 12(a) のように位置決めを行い、溶接後狙いの形状になるようにする。この場合、各ユニットの形状は Fig. 12(b) のように台形状になるはずである。

このようにメガフロートを構成する各浮体ユニットに対して位置決め要領と伸ばし量を求めることはメガフロートの形状管理 (精度管理) を行う上でもっとも重要な課題で

ある。そこで、FEM 解析を利用してこれらの情報を得る方法を検討した。

Fig. 12 Primary procedure for geometric accuracy control

4.2 解析方法

Fig. 12 のような浮体ユニットの位置決め要領や伸ばし量を含めたユニット形状を求めるために、以下のような手順で FEM 解析を行った。(Fig. 13 参照)

- ① 最初、狙いの形状で要素を分割する。(伸ばし 0)
- ② 各要素のヤング率を 0 にする。(解析上は非常に小さな値)
- ③ 接合したユニットのヤング率を所定の値 (200GPa) とする。
- ④ 接合部に固有ひずみを与える。
- ⑤ ③と④を接合手順に従って繰り返す。
- ⑥ すべてのユニットが接合された形状から最初のモデル形状を見直す。(⑤で求めた変形後の各節点の位置を所定の形状の逆側に移動する)
- ⑦ ⑥で求めた新たなモデルで②～⑤を繰り返す。

以上の手順で解析することにより全ユニット接合完了後、狙いの形状になることが確認された。したがって、この解析の途中で、各ユニットの接合位置 (位置決め要領) とユニット形状が得られる。

Fig. 13 FEM analysis method for providing 'placing procedure' and 'dimensional size plan' of the units

次に、実サイズでのメガフロートでの溶接変形を考慮した形状管理方法を FEM 解析で検討した。

4.3 解析条件

解析したモデルは Fig. 14 に示すように、300m×60m の浮体ユニット 35 個より構成され、その大きさは長さ 1500m, 幅 420m とした。また、接合順序としては Fig. 14 に示すように CASE-A と CASE-B の 2 種類で解析を行った。実際の接合順序は係留装置の工程を考慮するとこの 2 つの接合順序の中間的な接合順序になると思われる。

<CASE-A>

15	10	6	3	1
20	14	9	5	2
25	19	13	8	4
29	24	18	12	7
32	28	23	17	11
34	31	27	22	16
35	33	30	26	21

1500m (300m×5)

420m (60m×7)

<CASE-B>

29	22	15	8	1
30	23	16	9	2
31	24	17	10	3
32	25	18	11	4
33	26	19	12	5
34	27	20	13	6
35	28	21	14	7

1500m (300m×5)

420m (60m×7)

Fig. 14 Joining sequence of units for FEM analysis

4.4 FEM 解析結果

解析結果の一例を Fig. 15 に示す。この図より、浮体ユニットを接合する位置 (座標) 及び伸ばし量を考慮した浮体ユニットの初期形状がわかる。

Fig. 15 Results of FEM analysis

しかしながら、浮体ユニットに伸ばしを設ける場合にはどの方向にいくらの量の伸ばしを設けるかの基準となる浮

体ユニットの基準線（座標軸）を設定する必要がある。この基準線は一般的に内部構造材の位置を考慮して設定され、隣り合う浮体ユニット間で連続する必要がある。もし、連続しなければ、継手部でロンジ材やトランス材等の内部構造材が目違いを生じることになる。FEM 解析では節点を結ぶ線は常に連続していることから、今回はこの線を内部構造材の位置とみなし、これから基準線を設定することとした。今回の解析ではユニットのセンターを基準線にするために、各ユニットは縦、横両方向とも偶数個の要素に分割し、図 16 に示すように基準線を設定した。

Fig. 16 Definition of the base line of the analyzed unit

FEM 解析で求めたユニット形状の一例を Fig. 17 に示すが、その外形は直線ではない。しかしながら、角を結ぶ直線と解析で求めた形状との差は実施工上問題にならない値であるので、直線で結んだ形状をユニット形状とした。

Fig. 17 Analyzed shape and actual shape of unit

このようにして求めたユニット形状（伸ばし量）の一例を Fig. 18 に示す。ユニットを接合する位置は Fig. 15 に示したように接合順序により異なっているが、Fig. 18 からわかるように、CASE-A と CASE-B でユニット形状（伸ばし量）の差が小さいことから、接合順序の影響は実施工上は無視できると考えられる。

4.5 浮体ユニットの位置決め要領

伸ばし量を考慮した浮体ユニットの形状が接合順序の影響をあまり受けないことがわかったが、実際の接合順序は CASE-A と CASE-B の中間で施工され则认为られる。この場合においても浮体ユニットの形状は Fig. 18 に示した形状と大きな差は生じないと考えられる。このことは各浮体ユニットの接合位置を Fig. 15 で示したような絶対座標ではなく、Fig. 19 に示すように、隣接ユニットとの相対位置で位置決

めできることを意味している。これは以下の理由によりメガフロートの浮体ユニットの位置を絶対座標で位置決めすることは現実的に難しく隣接する浮体ユニットとの相対位置で位置決めせざるを得ないと考えられるので実施工上、有利である。

Fig. 18 Initial unit shapes provided by FEM analysis

Fig. 19 Positioning of newly joining unit (UNIT-13)

- ①GPS (Global Positioning System) を用いて Fig. 15 に示したような浮体ユニットの位置を絶対座標で計測することも可能であるが、その精度は 10mm 程度であり、開先精度を考慮すると不十分である。また、メガフロートの大きさは温度により変化しているため、各浮体ユニットの接合位置は温度変化に応じて移動する。
- ②接合するユニットから離れた位置での溶接によってもメガフロート全体が変形する。

そこで、FEM 解析で求めたユニット形状から作成した浮体ユニットの位置決め要領を Fig. 19 に示す。この図から、基準線を連続させ、基準線の間隔を所定の値になるように位置決めすることにより浮体ユニットを目違いなく接合できることがわかる。

5. 解析で求めた浮体ユニット形状と接合位置の妥当性

5.1 継手での目違い

FEM 解析で求めたユニット形状は Fig. 17 に示したように多少曲った形状になっているため、その基準線を Fig. 16 のように設定している。この基準線は長手方向を優先しているため、Fig. 16 で基準線は A, A' を通るが、A-A' に垂直な横方向の基準線は必ずしも B, B' を通るとは限らない。したがって、今回の基準線の設定方法から Fig. 20 で示す T1 と T2 は等しいが、L1 と L2 では若干の差を生じることになる。この差がユニット間の内部構造材の目違いになると考えられるが、この値は Fig. 18 でもわかるように非常に小さい。今回求めた全ユニットでも最大 0.7mm であり、実施工上は問題のない値である。

Fig. 20 Alignment between units

5.2 外板を有するユニット形状

FEM 解析では外板を有するユニットについても外板側で伸ばしを有する形状として解は求まるが、実施工上は Fig. 21 のように外板側には伸ばしを設けないのが普通である。FEM 解析で求めたユニット形状と外板に伸ばしを持たない形状を比較して全ユニット溶接完了後の全体形状を予測すると Fig. 22 のようになると考えられるが、メガフロートの大きさを考慮するとまったく問題ない。このときの外板

側でのユニット間の目違いは Fig. 20 から理解できるように発生しない。仮に Fig. 20 の B, C の左側が外板と考えると L1 と L2 が同じ値（設計値）となっている。

Fig. 21 Margin for welding shrinkage of the unit with side shell

Fig. 22 Outline of VLFS without margin at side shell

5.3 浮体ユニットの伸ばし量

今回、4.2 で述べた手順で FEM 解析を実施し、すべての浮体ユニットの溶接完了後に狙いの形状となるユニット形状及び位置決め要領を求めたが、解析の境界条件により解は無限に存在するはずである。たとえば、もっとも単純な例として Fig. 23 に示すように、2 個のユニットを接合する場合を考えてみる。ここで、この接合部での溶接収縮が 4mm の場合、継手位置を a や c のようにして片方のユニットに 4mm の伸ばしを設定しても良いし、b のようにして 2mm ずつ設定しても良いし、またその中間でも良いはずである。今回採用した手順では b が解となるが、これらの解の中で、実施工が容易になるものが妥当な解と考えられる。

Fig. 23 Optimum unit shape including margin for welding shrinkage

メガフロートの浮体ユニットの場合には実施工上、以下のような項目が妥当な解の条件として考えられる。

- ① 伸ばしを含めた浮体ユニットの形状が所定の形状 (300m×60m) より大きく逸脱しない。
- ② 伸ばしが共通化できるユニットが多数ある。

③ ユニット間の目違いの量が最小となる。

ここで、②の条件を検討すると、Fig. 24 に示す中央部分については長さ方向に隣接するユニット同士の伸ばし量の差は 1mm 未満の差であり、共通化できると考えられる。したがって、今回解析した 35 個のユニットからなるメガフロートの場合は実施工上 Fig. 24 に示す A から U までの 21 種類のユニット形状に整理できると考えられる。今回求めた解は比較的上記の条件を満足しており、妥当な解と考えられる。

O	← H →	A
P	← I →	B
Q	← J →	C
R	← K →	D
S	← L →	E
T	← M →	F
U	← N →	G

Fig. 24 Kinds of floating unit shape

6. 結 言

超大型浮体構造物（メガフロート）を洋上接合して建設する場合、多数の浮体ユニットを非対称に接合する必要がある。この場合、浮体ユニットの接合による溶収縮により面内変形が生じるとともに接合部に目違いが生じることが予想される。メガフロートを建設する場合、気象海象の変化を考慮すると短時間で洋上接合部の継手強度を上げる必要があり、洋上で修正作業を行うことは難しい。そこで、溶収縮によって発生する目違いやメガフロート全体形状の変形を考慮した形状管理が必要になる。今回、FEM 解析がこの課題を解決するのに非常に有効な手段であることがわかった。得られた主な結果を以下に記す。

- (1) 実際の浮体ユニットの洋上接合で生じる継手での収縮量と浮体全体の変形を計測し、実際のメガフロート建設の際には溶接変形が大きな問題になることを示した。
- (2) このような変形を予測するためには FEM 解析が有効であると考え、洋上接合部の固有ひずみを推定して変形を予測することとした。そして、実際の浮体ユニットの洋上接合で生じる溶接変形は FEM で精度よく推

定できることを示した。

- (3) 溶接による収縮量を考慮した浮体ユニット形状と浮体ユニットの接合する位置を FEM で求めることを検討し、すべての浮体ユニットを溶接で接合した後に所定の形状、寸法になる解析方法を提案した。そして、実際に 300m×60m の浮体ユニットを 35 個接合して 1500m×420m のメガフロートを建設する解析において接合後、所定の形状になることを示した。
- (4) 上記の解析結果より、メガフロート建設途中で浮体ユニット間に目違いを生じない伸ばしを考慮した浮体ユニットの初期形状と浮体ユニットの接合位置を求めることができることを示した。
- (5) また、浮体ユニットの接合位置は隣接する浮体間の相対位置で決めることができることを示した。このことは温度変化で大きさが常に変化するメガフロートの計測では絶対位置の計測が難しいことから施工上非常に有利である。
- (6) FEM 解析でもとめた浮体ユニットの初期形状は隣接する浮体ユニット間で目違いが小さいことや同じ形状を持つ浮体ユニットが多数あること等から妥当な解と考えられる。

謝 辞

最後に、本研究を進めるに当たり、ご指導を頂いた大阪大学大学院豊田政男教授、大阪大学接合科学研究所村川英一教授、及び有意義なご討議を頂いたメガフロート技術研究組合製作施工分科会の委員の方々に深く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Technological Research Association of Mega-Float, Annual Report, 1995-2000(in Jananese)
- 2) H.Murakawa, Y.Luo and Y.Ueda ; Inherent Strain as An Interface between Computational Welding Mechanics and Its Industrial Application , Mathematical Modelling of Weld Phenomena 4, Material Modelling Series(1998), 597-619