

疲労ソリューションの 7MW 洋上風車 V 字セミサブ浮体への適用*

Application of fatigue solutions to a V-shaped semi-submersible floating structure for a 7MW offshore wind turbine

萱森 陽一**
Yoichi KAYAMORI

井上 健裕***
Takehiro INOUE

大川 鉄平***
Teppeï OKAWA

西村 誠二***
Seiji NISHIMURA

坪内 宏樹****
Hiroki Tsubouchi

横山 博昭****
Hiroaki YOKOYAMA

中山 伸****
Shin NAKAYAMA

石原 孟*****
Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

浮体式洋上風車においては、風力発電に固有の風荷重やローターの振動等による変動外力に加え、浮体構造が波浪や潮流等により受ける変動外力が重畳するため、応力集中の高い溶接部に対して疲労設計が求められる¹⁾。一方で、風車の大型化に対応するべく使用鋼材をハイテン化しても、溶接部では鋼材強度の上昇に見合った疲労強度の向上は期待できないため、ハイテン化のメリットを最大限に引き出すことは困難である。そこで福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業²⁾では、ハイテン化と共に溶接部の疲労強度向上を狙った疲労対策技術（以下、疲労ソリューションと称す）を浮体式洋上風車に適用するための実証研究を進めている。

前報³⁾では、洋上風車用ハイテン鋼を用いて浮体構造の一部を模擬した大型構造モデル疲労試験体を製作し、疲労ソリューションとして超音波衝撃処理(米国 U.I.T., L.L.C.社が有する Ultrasonic Impact Treatment 技術を略し、以下、UIT と称す)⁴⁾⁵⁾を適用することで、その疲労特性向上効果を検討した。その結果、UIT が風車浮体模擬構造の疲労特性を向上させ、特に低応力範囲かつ長疲労寿命領域で顕著な効果を発揮することを明らかにした。

本研究では前報³⁾の結果を踏まえ、疲労ソリューションの適用先を試験体から実際の大型洋上風車の浮体構造に移すこととした。洋上風車用ハイテン鋼で製作した 7MW 洋上風車 V 字セミサブ浮体⁶⁾に対して UIT を適用し、疲労特性に影響するビード止端処理部の形状と残留応力を実測した。得られた測定結果から、本疲労ソリューションの洋上風車浮体への適用性及び疲労特性向上への有効性を考察した。

*平成 26 年 11 月 28 日第 36 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

** 会員 新日鐵住金(株) 鉄鋼研究所 〒660-0891 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8

*** 非会員 新日鐵住金(株)

**** 非会員 三菱重工業(株)

***** 会員 東京大学 大学院工学研究科 社会基盤学専攻

2. 試験方法

2. 1 対象部位及び供試鋼

疲労ソリューション適用の実証試験は、福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業²⁾を通じて建造中の 7MW 洋上風車 V 字セミサブ浮体⁶⁾を対象とした。福島県いわき市小名浜港での風車搭載・組立に備え、三菱重工業(株)長崎造船所香焼工場で浮体建造中の 2014 年 2 月に本試験を実施した。

本試験で適用する疲労ソリューションは、疲労特性に優れる洋上風車用ハイテン鋼と UIT の 2 つである。V 字セミサブ浮体の高応力想定部の構造用鋼板には洋上風車用ハイテン鋼が使用され、溶接ビード止端部の発生応力が相対的に高くなると思われる部位には UIT を施した。UIT の適用部位は、①連結管と角柱状センターコラムの十字溶接部で、管内面スチフナの裏面にあたる管外面側(図 1 中 No.1~4)と、②V 字状ローハル分岐付け根のブラケット端角回し溶接部(図 1 中 No.5~7)である。

表 1 に UIT 適用部位の鋼板の化学成分と機械的性質を示す。鋼板はいずれも熱加工制御(Thermo-Mechanical Control Process)を略し、TMCP)により製造された洋上風車用ハイテン鋼であり、NK 規則で降伏応力 355MPa

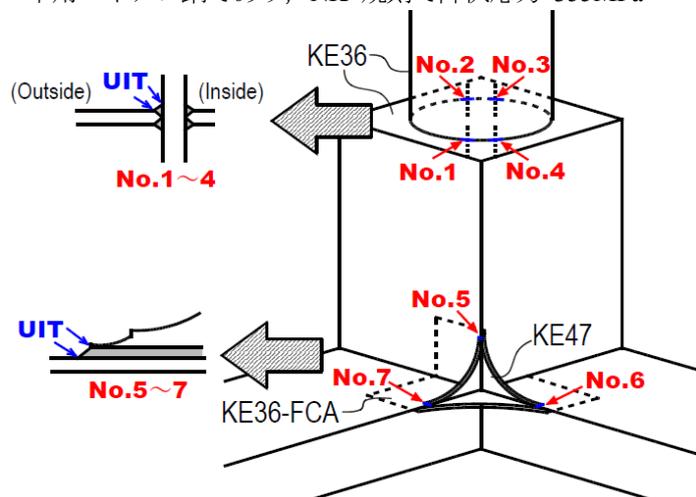


図 1 7MW 洋上風車 V 字セミサブ浮体における UIT 適用部位 (図中 No.1~7)

表1 UIT 適用部位の鋼板の化学成分と機械的性質

鋼板記号	板厚 (mm)	化学成分(%)					機械的性質		
		C	Si	Mn	P	S	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
KE36	80	0.09	0.28	1.52~ 1.53	0.010	0.003	397~413	517~539	29~35
KE36	50	0.12~ 0.13	0.20~ 0.21	1.21~ 1.23	0.011~ 0.013	0.004	390~411	524~543	24~29
KE36-FCA	50	0.04	0.44	1.42	0.009	0.002	412	564	30
KE47	70	0.09	0.40	1.54	0.008	0.002	480	586	30

(36kgf/mm²)級のKE36と、降伏応力460MPa(47kgf/mm²)級のKE47の2鋼種である。KE36は連結管、センターコラムトップ及びブラケットと接するローハルに、KE47はブラケットにそれぞれ用いた。ブラケットと接するローハル材のKE36には、耐疲労鋼(Fatigue Crack Arrester を略し、FCA 鋼⁷⁾)を適用した。なお前報³⁾では、洋上風車用ハイテン鋼の切断加工部(プラズマ切断面)の疲労特性が劣化しないことも示したが、本報で検討対象とする浮体構造の疲労対象部位はいずれも溶接ビード止端部であり、切断面は疲労評価の対象外である。溶接はフラックス入りワイヤーを用いたガスシールドアーク溶接(フラックスコアードアーク溶接)で、シールドガスはCO₂、ワイヤーは溶接金属のオーバーマッチが保たれる高張力鋼用とした。

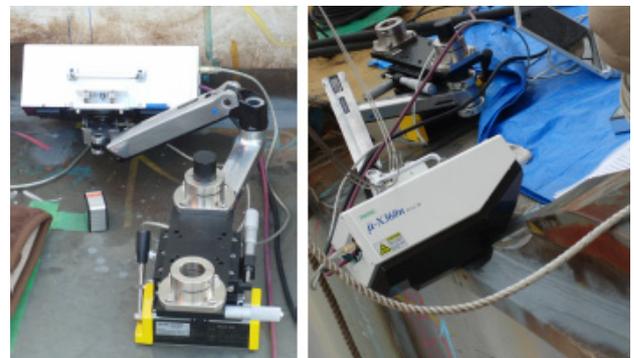


(a) 連結管と角柱状センターコラムの十字溶接部 (図1中のNo.1)
(b) ブラケット端角回し溶接部 (図1中のNo.7)

図2 UIT 作業の様子

2.2 UIT

UIT 適用対象となる前述及び図1の溶接ビード止端部には、事前にグラインダー研削が施されていたため、この研削溝に沿ってUITを施した。作業の様子を図2に示す。UITには米国 Applied Ultrasonics 社製 ESONIX[®] 27 UIS を用いた。共振周波数は27kHzで、打撃ピンの直径を3mm、先端曲率半径を3mmとし、打撃跡が連続するようにUITのハンドツールを移動させることで、滑らかな処理溝(浅い凹み)を形成した。なお、UITの工法は国土交通省が整理する新技術情報提供システム(New Technology Information System を略し、NETIS)に登録されており⁸⁾、主な作業要領はそれに従うものとした。



(a) 連結管と角柱状センターコラムの十字溶接部 (図1中のNo.2)
(b) ブラケット端角回し溶接部 (図1中のNo.7)

図3 残留応力測定の様子

2.3 形状・残留応力の測定

UITの前後におけるビード止端処理部の形状を把握するために、No.1, 2及び7の3部位を歯科用印象材(Coltene/Whaledent 社製 Coltoflax[®])で型取り、さらに型取り試料の断面形状を高精度2次元レーザ変位計(キーエンス社製 LJ-G030)で計測した。

同じくNo.1, 2及び7の3部位に対して、UITの前後における残留応力の変化を測定した。測定法はX線回折法とし、可搬式X線残留応力測定装置であるパルスタック工業製μ-X360を用いた。測定の様子を図3に示す。コリメーターは1mmとし、止端処理線から垂直方向に離れた複数の測定点で、止端処理線と垂直方向に鋼板表面の残留応力分布を得た。

3. 結果

図4にNo.1, 2及び7の断面形状の測定結果を示す。なお、本測定値はUIT前のグラインダー処理部とUIT後の同部位を同一断面で測定したものであり、水平方向にx座標、垂直方向にy座標をとっているが、見やすいように一方を水平方向に10~20mm程度ずらして表示している。同図中で矢印部分がグラインダー処理部もしくはUIT部であり、いずれのUIT部もグラインダー研削で得た浅い研削溝から過度に深く凹むこと無く、曲率半径3mmの滑らかな打撃ピン先端形状を転写するものとなった。

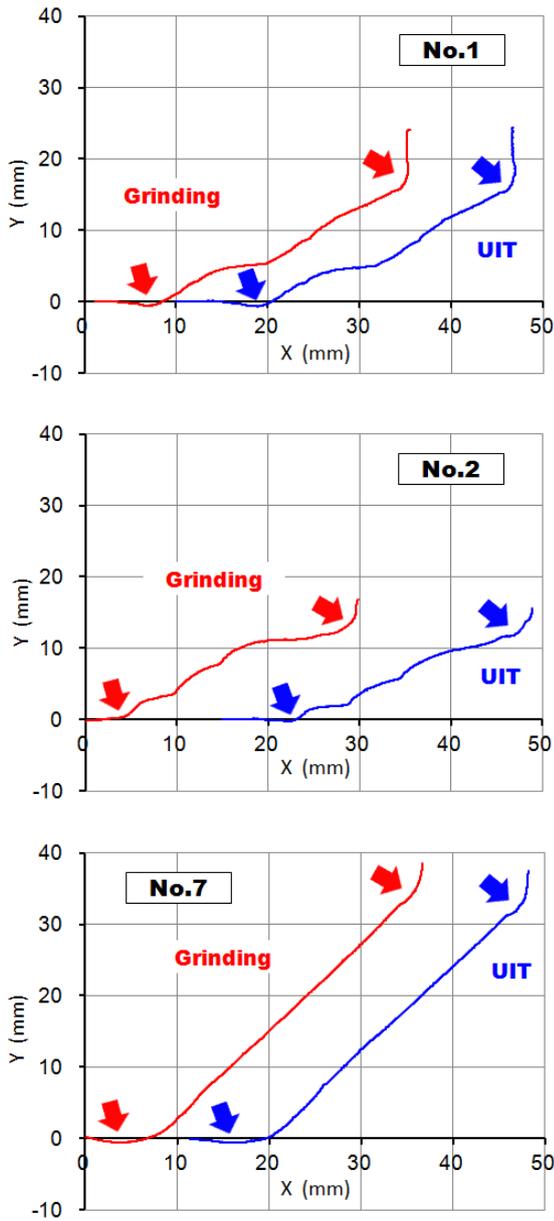


図4 溶接部断面形状の測定結果

図5にNo.1, 2及び7の残留応力測定結果を示す。グラインダー処理ではビード止端部のみならずその周囲も浅く削られており、研削部は溶接による引張残留応力と研削加工による小さな圧縮残留応力が重畳する形となった。研削深さの大きいビード止端部付近で圧縮残留応力が大きくなる傾向があり、その程度はNo.1及び2よりもNo.7で大きかった。UITでは圧縮残留応力の程度がさらに大きくなり、また圧縮残留応力が及ぶ範囲も広がった。

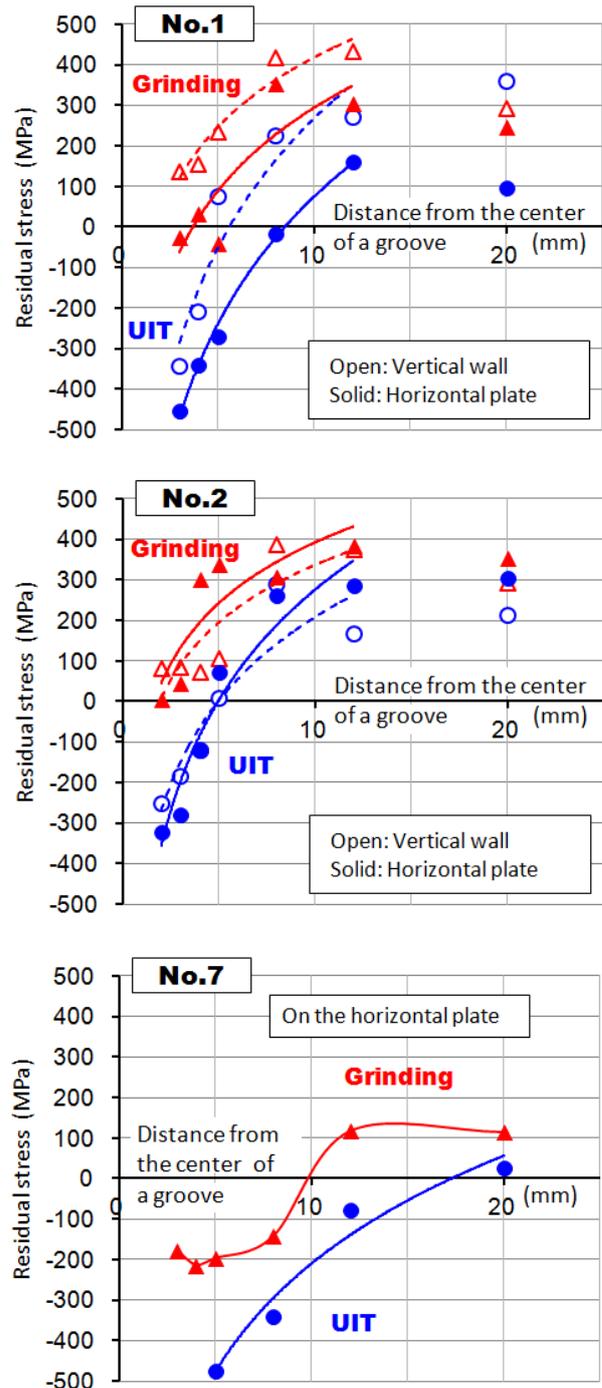


図5 残留応力の測定結果

4. 考察

建造中の7MW洋上風車V字セミサブ浮体へのUIT作業は、NETIS登録された通常のUIT作業の範疇で行われ、その結果、図4及び5に示した通り、滑らかな打撃処理形状と大きな圧縮残留応力の導入を得た。すなわち、対象が風車浮体であっても、従来のUIT工法を適用することが出来ると考えられる。

UITによる疲労強度の変化は、ピン打撃部の形状変化に伴う応力集中の変化と圧縮残留応力付与に伴う局部平均応力の変化を修正グッドマン線図に反映することにより、ある程度説明できることが野瀬⁹⁾によって示されている。本試験でUITを適用する部位には事前にグラインダー処理が施されており、溶接ビード止端部には浅く滑らかな研削溝が存在した。その溝に沿ってUITを適用したところ、研削溝の深さを著しく増加させることなく、滑らかな打撃ピン先端形状を転写する打撃溝となった。この溝の深さは鋼板の厚さに比べると著しく小さく、また溝の曲率半径は打撃ピン先端と同様に約3mmと大きいため、UITによる処理部の応力集中係数の増加は極めて小さいものと推察される。つまり、疲労強度に及ぼす処理部形状の影響は、グラインダー研削部とUIT部で大きく変わらないものと考えられる。一方、グラインダー研削により導入される圧縮残留応力は、No.1・2とNo.7を比較してわかる通り、部位によって異なるものであった。これはグラインダーによる研削条件の差異が影響したためと思われる。しかしながら、UITで導入した圧縮残留応力は、No.1・2及び7のいずれにおいても、グラインダー研削部よりも大きく広範囲となった。この著しい圧縮残留応力は、疲労き裂発生部における局部変動応力の平均応力を下げ、疲労強度向上に大きく寄与するものと考えられる。すなわち、UITは洋上風車浮体の疲労強度向上に有効であることを示唆している。

5. おわりに

本研究では、7MW洋上風車V字セミサブ浮体へ洋上風車用ハイテン鋼とUITを適用し、疲労特性に影響するビード止端処理部の形状と残留応力を実測した。風車浮体の溶接部において、UITは滑らかで浅い処理形状と大きく広い圧縮残留応力を与えており、疲労強度向上に有効であることが示唆された。

謝辞

本研究は経済産業省委託業務「福島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業」で行われたことをここに記し、関係者の皆様に感意を表します。

参考文献

- 1) 日本海事協会：浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン<初版>，2012
- 2) 石原孟：福島沖浮体式洋上ウインドファーム実証研究の現状と将来展望，日本風力エネルギー学会誌，Vol. 36, No. 4, pp. 553-556, 2013
- 3) 萱森陽一，井上健裕，大川鉄平，西村誠二，石原孟：浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業における疲労特性向上研究，第35回風力エネルギー利用シンポジウム，pp. 490-493, 2013
- 4) E. S. Statnikov: Comparison of post weld deformation methods for increase in fatigue strength of welded joints, IIW Doc., XII-1668-97, 1997
- 5) P. J. Haagensen, E. S. Statnikov and L. Lopez-Martinez: Introductory fatigue tests on welded joints in high strength steel and aluminium improved by various methods including ultrasonic impact treatment (UIT), IIW Doc., XIII 1748-98, 1998
- 6) 太田真，小松正夫，池末俊一，石井秀和：7MW洋上風車のためのV字型セミサブ浮体の開発，第35回風力エネルギー利用シンポジウム，pp. 209-212, 2013
- 7) 菅田登，有持和茂，稲見彰則，大西一志，勝元弘：溶接鋼構造物の疲労強度向上を可能にした耐疲労鋼の開発，日本鉄鋼協会会報（ふえらむ），Vol. 16, No. 6, pp. 364- 368, 2011
- 8) 国土交通省：超音波ピーニング処理(UIT)工法，新技術情報提供システム(NETIS)，登録No. KTK-070004-A, 2007
- 9) 野瀬哲郎：疲労強度向上向け超音波ピーニング法，溶接学会誌，第77巻，第3号，pp. 210-213, 2008