

# 洋上風力用グラウト注入材の開発

## － グラウト接合への適用 －

吉田 健治\* 高嶋 展浩\*\* 中島 直樹\*\*\* 新井 義男\*\*\*

洋上風力用のグラウト接合に適用される注入材には、必要な強度特性に加えて充填性、水中不分離性、セルフレベルリング性等の施工性が要求される。また、近年の海外におけるグラウト接合部の疲労破壊事例から耐久性確保も課題となっている。本研究は、グラウト材の引張強度特性および耐久性の向上を目指して短繊維を添加したグラウト材の強度試験を実施したものである。また、疲労強度特性を評価するために新たにグラウト材用の試験治具を開発し、繊維補強の有無による疲労特性の違いを明らかにしている。PVA繊維補強材を添加することで引張強度は上昇する傾向を示し、疲労強度特性が向上することが確認できた。

キーワード：洋上風力発電，モノパイル，グラウト接合，マックスAZ，繊維補強グラウト材，疲労強度

### 1. はじめに

東日本大震災以降、電力供給において自然エネルギーの活用が、従来以上に注目されている。今後主流となると考えられる風力発電については、陸上の建設適地が限定されることから洋上での活用が期待されている。我が国では、最近まで施工上の制約等から外洋に面した大規模風力発電施設は建設されてこなかったが、茨城県神栖市に2000kW級の洋上風力発電所15基(Photo.1)がモノパイル(大口径鋼管杭)形式で建設された。

モノパイル基礎はその施工性の高さや経済性から洋上風力発電における実績が最も多く、今後も主流になる基礎形式と考えられる。モノパイル形式を採用した場合、モノパイルとトランジションピースの接合方法として、グラウト接合が一般に採用される。



Photo.1 ウィンドパワーかみす

- \* 土木事業本部土木設計部 PC・再生エネルギーグループ
- \*\* (株) ファテック
- \*\*\* 秩父コンクリート工業(株) 品質管理グループ
- \*\*\* 秩父コンクリート工業(株) 技術開発部

#### 1.1 研究背景

モノパイル形式の基礎において採用されてきたグラウト接合であるが、現状で国内には明確な規程がなく DNV 基準<sup>2)</sup>等の海外の基準に依存している。そのような背景のもと、ウィンドパワーかしまでは模型実験と解析結果をもとにマックスAZ(水中不分離性グラウト材)を用いたグラウト接合を採用した経緯<sup>1)</sup>がある。

ただし、DNV 基準も毎年のように改定されており、最新の基準<sup>2)</sup>では、グラウト材の引張強度が要求されている。

なお、モノパイルとは大口径鋼管杭(通常φ3m程度以上)のことであり、トランジションピースとはタワーとモノパイルを接続するための鋼構造物を示す。また、グラウト接合とは2つの異なる鋼管を同心に内側と外側に重ね合わせ、間にグラウト材を充填し、グラウト材と鋼材の付着強度とグラウト材のせん断強度で接合する構造的結合である。Fig.1にグラウト接合の模式図を示す。

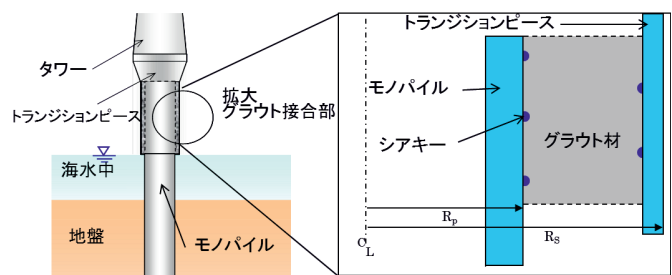


Fig.1 グラウト接合模式図

この接合方式を用いる最大の目的(メリット)はモノパイルの鉛直施工誤差を補正できることにある。

グラウト接合部は風波による振動を受けるためグラウト材の耐久性が問題になる場合があり、グラウト材の疲労破壊による欠落とそれに伴って上部構造がスライドした事故例<sup>4)</sup>が報告されている。

## 1.2 研究目的

グラウト接合に用いるグラウト材について、疲労試験を実施して耐久性状を明らかにするとともに繊維補強等により引張特性・疲労特性を向上させることを目的とする。

なお、グラウト材は、海水中での打設になる場合もあるため、圧縮強度 50MPa 以上の水中不分離性高流動無収縮モルタル「マックス AZ TYPE-A」を使用した。同材料はプレミックス材であり、洋上での使用性が高い。

## 2. グラウト材の物性

### 2.1 試験配合

グラウト材の曲げ疲労強度向上を意図して、PVA 繊維（ビニロン繊維）を添加させた配合とした(Table1)。

PVA 繊維（径 100 $\mu$ ，繊維長 12 mm）を 1.0vol%および 1.5vol%とした時の各種物性値の測定した。

Table1 試験配合

No.	水/粉体 (%)	PVA繊維 (vol%)	試験温度 (°C)	練混ぜ時間
①	22.8	0	20	ハンドミキサー (500rpm 2分)
②	22.8	1.0	20	
③	22.8	1.5	20	

### 2.2 試験項目と試験方法

グラウト材の物性を評価した試験方法と試験項目を Table2 に示す。

コンシステンシーはフローの広がりか 20 cmに到達するまでの時間および 1 分および 5 分経過後のフロー値を測定した。

圧縮強度および弾性係数は円柱供試体（ $\phi 5 \times 10$  cm），曲げ・圧縮強さは角柱供試体（4 $\times$ 4 $\times$ 16 cm）にて試験を実施した。

Table2 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	
コンシステンシー	20cmフロー時間	JASS15 M-103 準拠
	1分フロー値	(測定容器 $\phi 50$ mm高さ100mm)
	5分フロー値	
単位容積質量	JIS A 1171 準拠 (測定容器 500cc)	
圧縮強度	JIS A 1108 準拠	
弾性係数	JIS A 1149 準拠	
曲げ・圧縮強さ	JIS R 5201 準拠	

## 2.3 試験結果

### 2.3.1 フレッシュ性状試験結果

グラウト材のフレッシュ性状試験結果を Table3 およびフロー試験の経時変化を Fig.2 に示す。

またフロー試験の状況を Photo.2 に示す。

Table3 フレッシュ性状試験結果

No.	PVA繊維 (vol%)	練上り温度 (°C)	20cm フロー時間 (秒)	1分後 フロー (mm)	5分後 フロー (mm)	単位容積質量 (kg/l)
①	0	22	26.7	217	245	2.10
②	1.0	22	125.0	185	209	2.04
③	1.5	22	測定不能	141	160	2.05

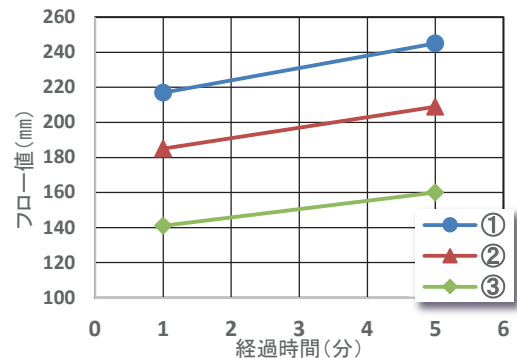


Fig.2 フロー値の経過時間関係

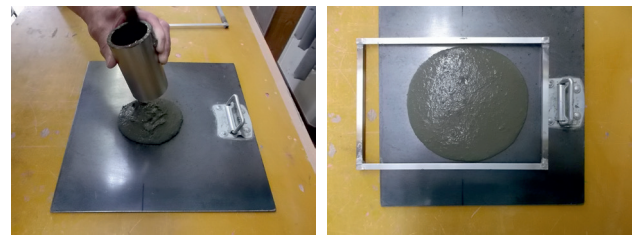


Photo.2 フロー試験状況

PVA 繊維を多く添加するほど流動性が低下する傾向が認められた。作業性を考慮すると、適用可能な PVA 繊維の添加量は 1.5vol%ではフロー値の低下がやや過大であり、1.0vol%程度が限界と考えられる。

また、PVA 繊維を多く添加するほど巻き込みエアが多くなり単位容積質量が小さくなる傾向が認められた。

### 2.3.2 硬化性状試験結果

以下にグラウト材の硬化性状試験結果を示す。養生方法は 20°C封かん養生とし、所定材齢での強度発現性を確認した。

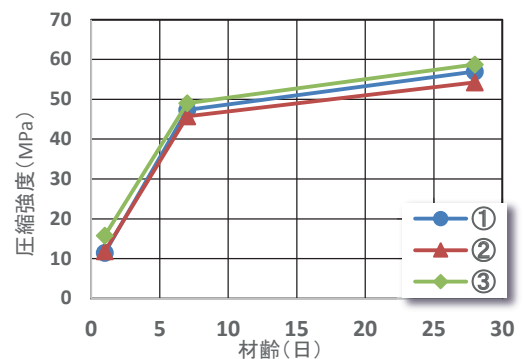


Fig.3 圧縮強度（円柱供試体）と材齢の関係

円柱供試体 (φ5×10 cm) の圧縮強度試験 (JIS A 1108) および弾性係数 (JIS A 1149) の結果を Fig. 3 および Table4 に示す。

**(1) 圧縮強さ (円柱供試体)**

PVA 繊維添加量ごとの円柱供試体の圧縮強度は同程度の値を示した。このことから PVA 繊維は圧縮強度には大きな影響を与えないと考えられる。一般的に PVA 繊維量が増加することで単位容積質量が減少すると圧縮強度は低下する傾向を示すが、補強材の添加が多少とも圧縮強度の維持に寄与している可能性が考えられる。

**(2) 弾性係数**

Table4 弾性係数 (円柱供試体) と材齢関係

No.	PVA繊維 (vol%)	弾性係数 (Gpa)	
		材齢7日	材齢28日
①	0	17.5	20.9
②	1.0	17.1	19.7
③	1.5	19.0	20.8

材齢28日における弾性係数はPVA 繊維の添加量に依らずほぼ同程度の値を示している。PVA 繊維は弾性係数には大きな影響を与えないことが明確となった。

**(3) 曲げ強さ (角形供試体)**

角柱供試体 (4×4×16 cm) の曲げ強さ試験 (JIS R 5201) の結果を Table5 に、材齢28日における供試体の荷重-変位関係を Fig. 4 に、曲げ試験後の状態を Photo. 3 に示す。

Table5 曲げ強さ (角柱供試体) と材齢関係

No.	PVA繊維 (vol%)	曲げ強度 (Mpa)			
		材齢7日		材齢28日	
		破断時 応力	破断後 最大応力	破断時 応力	破断後 最大応力
①	0	4.74	-	6.34	-
②	1.0	6.17	4.34	7.02	4.92
③	1.5	7.00	7.50	7.57	5.43

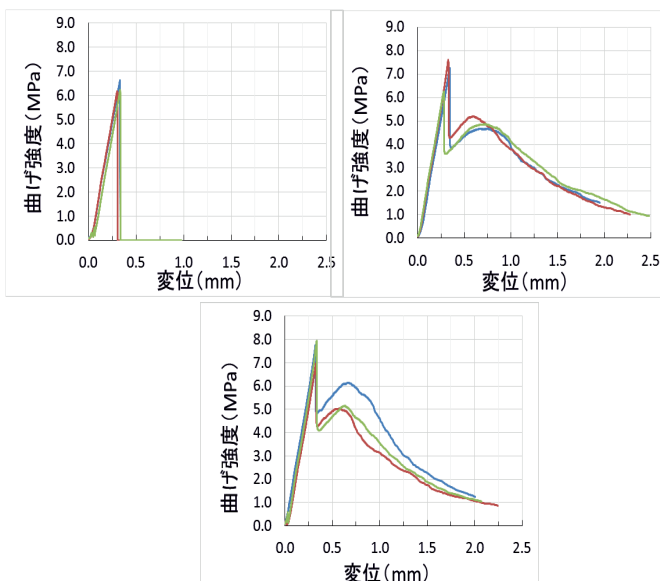


Fig. 4 曲げ強さ (角柱供試体) の荷重-変位関係

角柱供試体の曲げ強さは、PVA 繊維量が多くなるにつれて大きくなる傾向を示した。PVA 繊維を添加すると破断後も応力が持続し、なだらかに応力が低下していくのが Fig. 4 よりわかる。

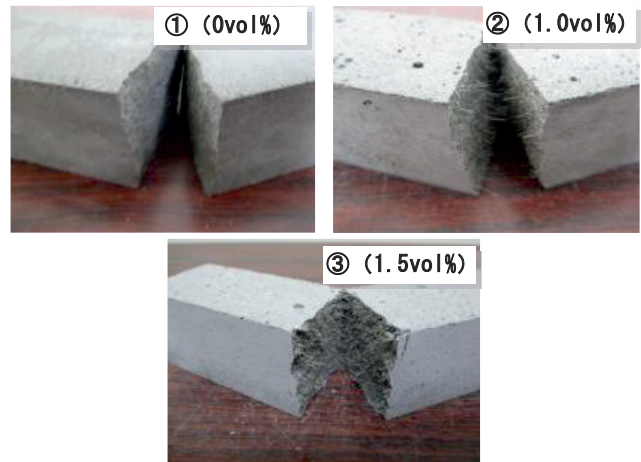


Photo. 3 曲げ試験後の状況

PVA 繊維を添加した供試体の破断面には無数の繊維が認められ、破断後 PVA 繊維により応力を維持させていることがわかる。

**(4) 圧縮強さ (角形供試体)**

角柱供試体 (4×4×16 cm) の圧縮強さ試験 (JIS R 5201) の結果を Fig. 5 に示す。

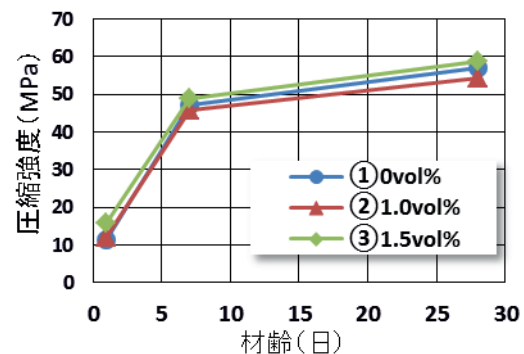


Fig. 5 圧縮強さ (角柱供試体) と材齢関係

PVA 繊維添加量ごとの角柱供試体の圧縮強さは同程度の値を示しており、円柱供試体の試験結果と同様の結果となった。

**3. グラウト材曲げ疲労試験方法の検討**

**3.1 曲げ疲労試験の概要**

洋上風力設備は繰返し応力を受けるため使用部材の耐久性を評価する必要がある。コンクリートの疲労耐久性の評価手法は多種類存在するが、モルタルの疲労耐久性



評価方法はほとんど無いのが現状である。

そこで（社）日本道路協会の「舗装調査・試験方法便覧」に記載されているコンクリートの曲げ疲労試験方法（B070T）<sup>3)</sup>を参考にし、モルタルでの評価方法の検討を行った。

曲げ疲労に用いた試験機の概要

- ・引張圧縮／ねじり疲労試験機
- ・島津製作所
- ・動的最大試験力 軸力：±100 kN，トルク：1.0 kN・m
- ・静的最大試験力 軸力：±150 kN，トルク：1.5 kN・m
- ・軸方向ピストンストローク  
両振り±25mm，片振り0～50mm
- ・ねじり方向ピストン角度  
両振り±45deg，片振り0～90°

Photo. 4 に示すように引張および圧縮試験を行う機器にモルタルの曲げ疲労試験が行えるように専用治具を製作した。専用治具は4×4×16cmの角柱供試体を左右2点の支点で保持し，中央1点で載荷する構造（3点曲げ疲労載荷試験）となっている。

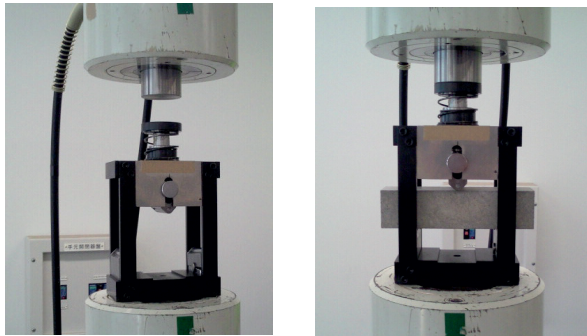


Photo. 4 曲げ疲労試験

### 3.2 曲げ疲労試験方法

曲げ疲労試験は，材齢や供試体の含水状態の変化によって値が大きく変動することが知られている。そのため，曲げ疲労試験方法（B070T）に倣い，標準養生後に保管期間を設けた。

4×4×16 cmで作製した供試体を材齢28日標準養生後，保管期間を温度20±1℃，湿度60±5%の恒温湿室内で4週間以上保管し試験を実施した。

疲労破壊繰返し回数200万回を超える応力比（静的な破壊強度を基準）を確認することを目標とし，結果を確認しながら応力比で0.5～0.7程度の範囲内において4～5段階で測定を実施することとした。

繰返し周波数は20Hzとした。また，引張強度の5%程度を目安として曲げ応力換算で0.47MPaに相当する最小軸力を与えて繰返し載荷を実施した。

## 4. グラウト材曲げ疲労試験

### 4.1 曲げ強さ試験（静的強度試験）結果

曲げ疲労試験に先立ち静的な曲げ強さ試験を実施した。試験方法は曲げ疲労試験と同じ治具を用いて単調載荷にて実施した。試験結果をTable6に示す。

なお，疲労試験の試験体も含め繊維入り試験体のPVA添加量は1.0vol%とした。

繊維添加の有無にかかわらず曲げ引張強度は同程度の値を示した。これは前節に示した曲げ強さ試験とは異なる傾向となっているが，養生期間をおくことによって繊維無し試験体の強度の伸びが大きかった可能性が考えられる。

Table 6 曲げ強さ試験結果 (MPa)

試験体	繊維無し	繊維あり
No. 1	8.242	8.150
No. 2	8.544	9.020
No. 3	9.295	8.608
平均値	8.694	8.593

### 4.2 曲げ疲労試験結果

繊維無し及び繊維入りの曲げ疲労試験の結果をそれぞれFig.6, 7に示す。

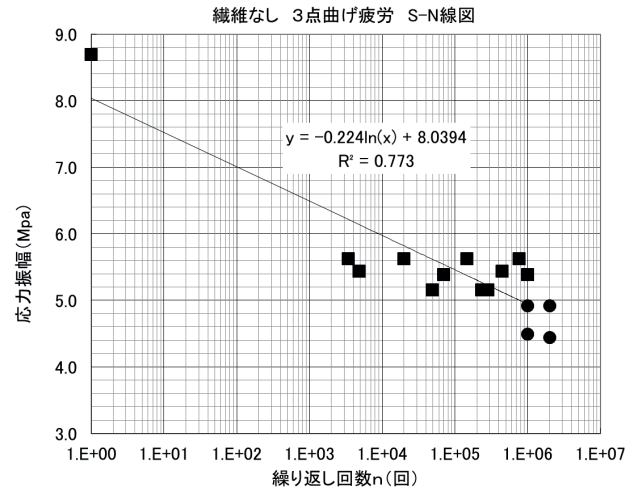


Fig. 6 曲げ疲労試験結果（繊維無し）

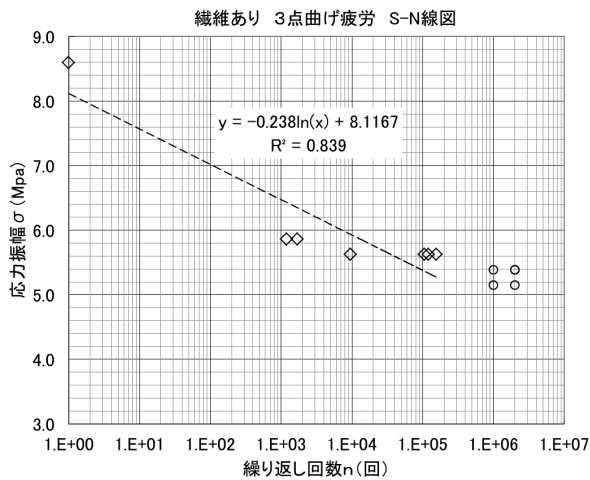


Fig. 7 曲げ疲労試験結果 (繊維入り)

図中、静的曲げ強さ試験結果の平均値を繰返し回数 1 回に相当する値としてプロットしている。

また、破壊したポイントについては■, ◇で表示し、非破壊の結果については●, ○で表示している。図中に示した直線は破壊したデータの対数近似曲線である。

繊維無しの試験体はバラツキが繊維入りのものと比較してやや大きく 100~200 万回レベルで非破壊となる応力振幅は 4.92Mpa となった。

それに対し繊維入りの試験体は 100~200 万回レベルで非破壊となる応力振幅が 5.39Mpa であり、約 1 割の疲労限応力の増加が認められる。

それぞれの結果を比較するため、Fig. 8 に各応力値を静的強度で除して応力比表示したものを示す。

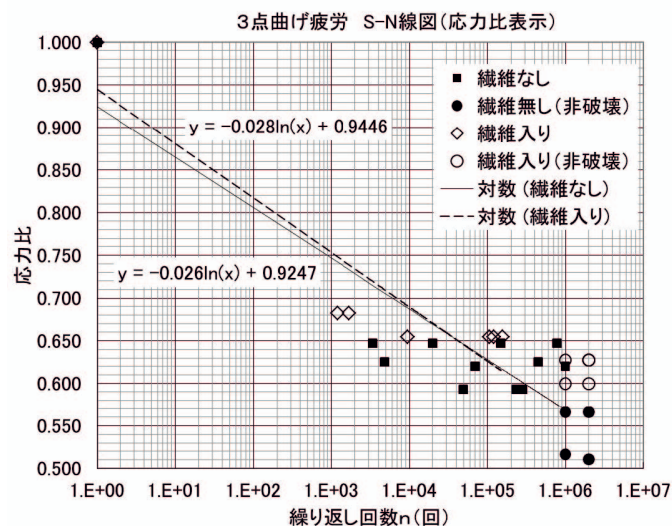


Fig. 8 疲労試験結果 (応力比表示)

Fig. 8 において対数近似曲線は 1~10 万回レベルではほとんど重なっているが、これは繊維入り試験体の高応力比レベルの結果が小さくなっていることの影響と考えられる。

応力比 0.6~0.63 のレベルで両者を比較すると繊維無

しの試験体は全て破壊し、繊維入り試験体は全て非破壊であったことから、明確に繊維入りの疲労強度増加の効果が確認できる。200 万回繰返し载荷における疲労限強度の増加は応力比レベルで 0.1 程度となっている。

## 5. まとめと考察

### 5.1 試験結果のまとめ

洋上風力で用いられるグラウト接合用材料として従来のマックスAZにPVA 繊維(繊維長 12 mm)を添加したグラウト材の材料試験及び強度試験を行った。また、グラウト材の曲げ疲労試験用の治具を製作し、角形供試体(4×4×16cm)の曲げ疲労試験を実施した。試験結果から得られた知見を以下に示す。

- PVA 繊維添加量を 1.0vol%, 1.5vol%と増加すると繊維無しのグラウト材に比較して流動性が低下することを確認した。添加量の増加に伴い単位容積質量は低下する。
- 円柱供試体の圧縮試験を行った結果、繊維入りグラウト材の圧縮強度・弾性係数は繊維無しのものとほぼ同一の値となった。
- 角形供試体の曲げ強さ試験を実施した結果、PVA 繊維添加量が増えると引張強度が増加する傾向があることを確認した。ただし、十分な養生期間をおいた後では繊維無しと繊維入り(1.0vol%)の引張強度レベルはほぼ同一となった。なお、繊維入りグラウト材はピーク応力後も破断後も応力を維持し、第二のピーク応力を示した。第二ピークの応力レベルはピーク応力の 7 割程度である。
- 曲げ疲労試験の結果、繊維入りグラウト材の疲労限が応力比レベルで 0.1 程度、繊維無しグラウト材に比較して向上することを確認した。

### 5.2 考察と今後の課題

繊維入りグラウト材が繊維補強材を添加しない材料に比較して、引張強度特性・疲労強度特性・靱性の点で向上することが確認できた。ただし、添加量を多くすると流動性が低下することから今回の試験結果からは 1.0vol%程度の添加率が適当と考えられる。今後、実打設を想定した施工実験を実施して施工性能を確認する必要がある。

今回新たに製作した治具を使ってグラウト材の疲労強度試験を実施した。試験結果は従来のコンクリートの疲労試験の傾向と一致しており、これまで殆ど報告例の無いグラウト材の疲労強度特性を明らかにすることが可能となった。今回採用した試験体サイズも含め新たな試験方法として今後グラウト材の標準的な試験方法となり得るものと考えられる。

ただし、全体的に見て本試験結果の疲労破壊回数のバ

ラツキは大きく、評価の難しい結果となっている。今後、試験体の本数を増やす他に疲労破壊の再現性を確保する対策が無いか検討の余地がある。

新しい DNV 基準では、グラウト材の引張強度が要求されており、グラウト接合を設計する上でグラウト材に高い強度が必要とされる場合も生じる。今後はグラウト材そのものの高強度化を図っていくことも課題である。

## 謝辞

疲労試験の実施方法、専用治具の製作に関しては群馬産業技術センターの荻野氏にご指導、ご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 鋼管のグラウト接合の支持性能向上に関する研究, 中村滋, 大越靖広, 吉田健治, 熊谷組技術研究報告 No. 70, 2011
- 2) Offshore Standard DNV-OS-J101 "Design of Offshore Wind Turbine Structures" May 2014
- 3) 舗装調査・試験法便覧(第3分冊) 第III章試験編, 公益社団法人 日本道路協会, 平成19年6月, B070T
- 4) "Grouted Connections - Offshore Standards Driven By the Wind Industry" Marcus Klose, Marc Mittelstaedt, Amol Mulve, The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, 17-22 June, Rhodes, Greece
- 5) コンクリートの試験方法, 笠井芳夫, 池田尚治編著, 技術書院

---

# Development of the grout material for offshore wind power facilities - Application to the grout connection -

Kenji YOSHIDA, Nobuhiro TAKASHIMA, Naoki NAKAJIMA and Yoshio ARAI

## Abstract

Construction characteristics such as filling characteristics, underwater non-separableness and self-leveling characteristics are required for the materials applied to the grout connection of offshore wind power facility in addition to strength properties. And securing the durability of the material becomes a major issue due to actual fatigue fractures of the grout connection overseas in these days. In this study, the strength examination of the grout materials which contained short fibers was carried out to improve the pulling strength properties and the durability of the grout materials.

In addition, a new examination device was developed to evaluate fatigue strength properties of the grout materials, and the difference of the strength characteristic by the presence of the fiber became clear using this device.

The pulling strength showed a tendency to improve by adding a PVA fiber and it was able to confirm that fatigue strength properties improved.

Key words: Offshore wind power, Monopile, Grout connection, Max AZ, Fiber reinforced grout, fatigue strength

---