

洋上風力発電施設に用いる高強度グラウトの圧縮強度に関する統計的手法による評価

鹿島建設(株) 正会員 ○高橋直樹 橋本 学 六本木日菜子
日本海上工事(株) 正会員 岸田哲哉 久保 亮

1. はじめに

秋田港・能代港洋上風力発電施設では、日本初となるモノパイル式基礎が採用され、国内最大規模の風力発電所として、現在、33基(4.2MW×33基=138.6MW)の建設が進められている。モノパイル式では、圧縮強度120N/mm²程度のセメント系高強度グラウトが用いられる。高強度グラウトは、欧州では多数の実績があるものの国内での実績はなく、品質管理に関する知見が乏しいのが実情である。本報では、欧州から取り寄せた高強度グラウトの圧縮強度について、実施工で得られた品質管理結果を基に、統計的手法を用いることでデータの正規性を確認し、国内の規準類の規定に従い、品質安定性について評価した。

2. 高強度グラウトの特徴

モノパイル式基礎(図-1)は、大口径鋼管杭(モノパイル)と風車との接合部材で構成され、接合部には、圧縮強度120N/mm²程度の高強度グラウトが充填される。グラウトには、強度に加え、流動性や水中不分離性、充填性といった特性が求められる。これらの特性を満足するグラウト材料は、プレミックス材料として国内には存在しないことから、秋田港・能代港洋上風力発電施設では、欧州で施工実績が豊富な材料を採用した。なお、今回採用した材料の製品として保証する圧縮強度は、材齢28日で112N/mm²以上である。

グラウトは、フレコンバックに内封されており、バック1袋(2.0t)に対し水156kg/袋を計量し、作業船上に設置したミキサにて製造した。ミキサは、1.5m³練りパン型ミキサ2台を用い、練混ぜにて7分を要した。練上がり後のフロー値は、ASTMC230による測定で300mm程度(JISのフローコーンで320mm程度)である。

施工では、定置式のグラウトポンプ(最大吐出圧:6.8MPa、圧送能力:4-17.4m³/h)を用い、4吋の圧送管にて圧入した。1基あたりの施工量は30m³程度で、おおよそ1日/基のサイクルにて施工を行った。

3. 統計的手法を用いた圧縮強度の評価

(1) 品質管理結果

グラウトの品質管理の頻度は、1基あたりに使用するフレコンバック36袋のうち、1、5、12、19、26、33袋目の製造時に実施し(計6回)、圧縮強度用の供試体は、1袋目を除く品質管理試験時に1本ずつ計5本採取した。暑中期の対策として、①陸上でのフレコンバックの保管は、作業船へ積み込む直前まで低温倉庫内(15℃以下)としたこと、②作業船内では、フレコンバックを保管するコンテナへの直射日光を避けるとともに、急激な温度上昇を抑制するためにスポットクーラーで冷却したこと、③チラー設備により練混ぜ水を10℃以下に冷却したことによって、7~8月の施工においても、グラウトの練上がり温度は、実績で28.3℃以下(規格値は39.5℃以下)を満足した。

また、グラウトのフロー値の測定結果を図-2に示す。フロー値についても規格値240mm以上320mm以下を満足し、特に暑中期の施工においてもフロー値は安定しており、前述の対策を含めて、適切に管理を行うことができた。

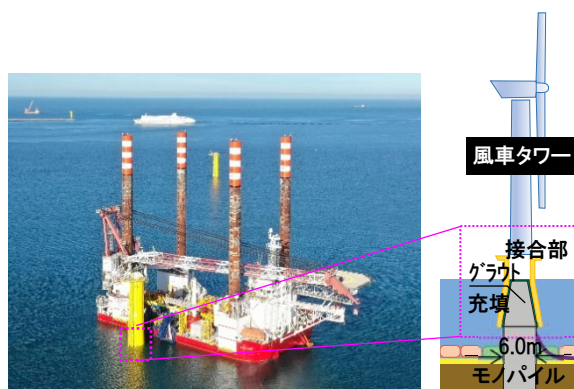


図-1 モノパイル式基礎

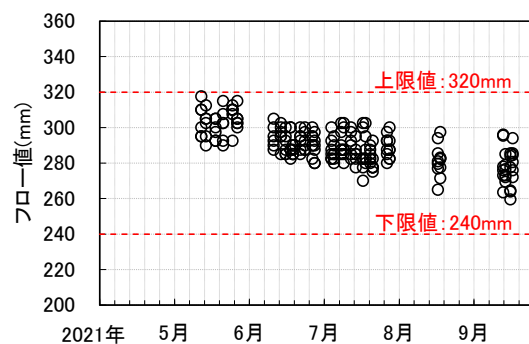


図-2 グラウトのフロー値

キーワード：洋上風力発電、高強度グラウト、圧縮強度、正規分布

連絡先：〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町1-27 鹿島建設(株)東北支店土木部 TEL 022-261-7111

(2) 圧縮強度の度数分布

圧縮強度試験用供試体は、 $\phi 100 \times h200$ mm を用い、基礎 1 基あたり 5 本、計 165 本 (33 基 \times 5 本) を作製した。供試体の養生方法は、材齢 28 日まで標準水中養生とし、圧縮強度は、JIS A 1108 に従い 5 本の平均を試験値とした。図-3 に圧縮強度の度数分布を示す。圧縮強度は、平均 128.6 N/mm²、標準偏差 4.59 N/mm²、変動係数 3.57% であった。

(3) 正規性の検定

ここでは、今回得られた圧縮強度の試験値の度数分布が、正規分布へ適合するか否かについて確認することを目的として、 χ^2 (カイ二乗) 検定を行った。 χ^2 は、以下の (式 1) および (式 2) によって計算することで算出した。

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(f_i - F_i)^2}{F_i} \quad F_i \geq 5 \text{ の場合} \quad (\text{式 1}) \\ \chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(|f_i - F_i| - 0.5)^2}{F_i} \quad F_i < 5 \text{ の場合} \quad (\text{式 2}) \end{array} \right.$$

ここに、 f_i : 得られた度数、 F_i : 正規分布に従うと仮定した場合に期待できる理論度数

χ^2 の計算結果を表-1 に示す。度数分布の階級数は 10 であることから、自由度 $\nu = \text{階級数} - 3 = 10 - 3 = 7$ となる。よって、超過確率 $P(\chi^2 \leq 3.735, \nu = 7) = 0.8097$ と計算できる。有意水準を 5% とした場合、 $0.8097 > 0.05 (= 5.0\%)$ であることから、得られた度数分布は正規分布に従うと判断された。なお、ここで示す理論確率の算出方法や自由度 ν 、超過確率 P などの χ^2 検定に関する詳細は、参考文献¹⁾によった。

(4) 不良率の算定

前述の (2) より、試験値の度数分布 (ばらつき) が正規分布に従うことが確認されたため、次に、不良率の算定を行った。今回得られた試験値より求めた確率分布を図-4 に示す。この確率分布において、確保すべき強度 $S_L = 112$ N/mm² の正規偏差 ($= (S_L - \text{平均値}) / \text{標準偏差}$, $(112 - 128.6) / 4.59 = -3.617$) である。よって、図に示すように、 S_L を下回る確率、いわゆる不良率は、標準正規分布 $-\infty \sim -3.617$ の累積確率密度として示されることから、不良率は 0.015% として計算される。この値は、JIS A 5308 の品質規定で示される許容不良率 4.2%²⁾ と、コンクリート標準示方書の 5%³⁾ よりも十分に小さく、品質の安定した材料であることが確認された。

4. まとめ

高強度グラウトの圧縮強度に関して、今回得られた試験値は正規分布に従うこと、許容不良率は JIS A 5308 およびコンクリート標準示方書で示す規定よりも小さくなることが確認された。

参考文献

- 1) 三宅淳一：コンクリートの配合設計と品質管理，コンクリート新聞社，pp96-99，2013.2.
- 2) 全国生コンクリート工業組合連合会：生コン工場品質管理ガイドブック，第 6 次改訂版，p.155，2019.
- 3) 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，pp79-80，2018.

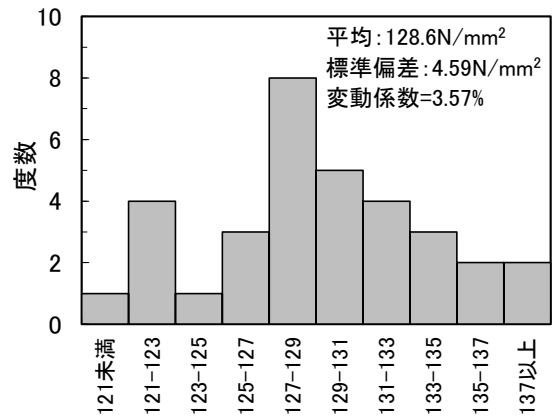


図-3 圧縮強度の度数分布 (材齢 28 日)

表-1 理論度数および χ^2 の計算

階級	階級範囲	度数 f_i	理論確率 ^{*1}	理論度数 F_i ^{*2}	計算値 ^{*3}
①	121 未満	1	0.04888	0.66	0.008
②	121-123	4	0.06234	0.97	1.007
③	123-125	1	0.10521	1.87	1.118
④	125-127	3	0.14727	3.07	0.381
⑤	127-129	8	0.17102	4.29	0.988
⑥	129-131	5	0.16475	5.11	0.036
⑦	131-133	4	0.13165	5.20	0.006
⑧	133-135	3	0.08727	4.50	0.050
⑨	135-137	2	0.04799	3.32	0.004
⑩	137 以上	2	0.03362	2.09	0.137
合計 (χ^2)					3.735

*1: 階級のそれぞれの境界値を標準正規分布で規格化したときの領域の面積

*2: 理論度数 (F_i) = データ個数 (33) \times 理論確率

*3: $(f_i - F_i)^2 / F_i$ ($F_i \geq 5$), $(|f_i - F_i| - 0.5)^2 / F_i$ ($F_i < 5$) により算出

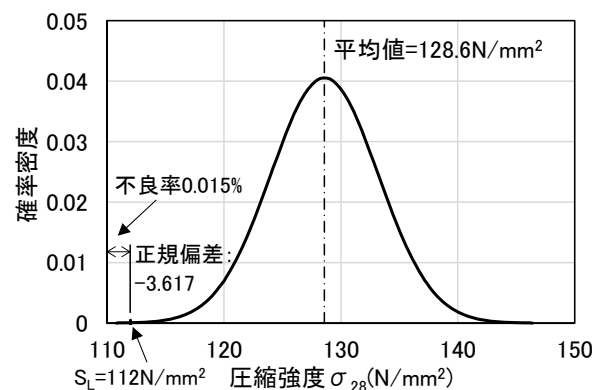


図-4 圧縮強度の確率分布