

洋上風力基地港湾における岸壁地盤改良の品質確保について

富樫 奏¹・篠澤 巧¹・佐藤 栄治¹・中村 俊之¹

¹新潟港湾・空港整備事務所 第二建設管理官室（〒950-3101新潟市北区太郎代381）

地球温暖化対策として再生可能エネルギーの活用が推進されていくなかで、新潟県村上市及び胎内市沖では洋上風力発電の促進地域に指定され施設整備が進められている。当該施設整備の基地港となる新潟港東港区の南ふ頭においては、風車本体を大組し海上へ積み出す岸壁の整備をしており、一般的な岸壁の10倍以上の荷重に耐えうる構造とする大規模な地盤改良を行っている。

本稿では地盤改良の品質を確保するための現場強度や施工方法の検討や工夫を報告することで、今後の基地港湾等の高強度地盤改良の一助とするものである。

キーワード 洋上風力発電，基地港湾，地盤改良，地耐力強化，砂質地盤，孔壁崩壊，ジャミング

1. 基地港湾整備事業の概要

国土交通省では、洋上風力発電設備の設置及び維持管理に利用されている埠頭を有する港湾を基地港湾として指定し、発電事業者に埠頭を長期の貸付を行うものであり、2024年4月時点で、新潟港のほか、青森港、秋田港、能代港、酒田港、鹿島港及び北九州港が基地港湾に指定されている。

新潟県村上市及び胎内市沖での洋上風力発電事業者は、現在、18MW/基の着底式風車を38基設置して約68万kWの発電出力を確保する計画としており、最寄りとなる新潟港東港区の南ふ頭を基地港湾として利用する。

基地港湾では図-1のとおり、百数十メートルものブレード（風車の羽）やタワー（支柱）等を組み立てて海上へ積み出すことから、従来岸壁では取扱困難な大型重量物となる部材の搬入・仮組立・積出しを可能とするため、既設岸壁及び荷捌地を地盤改良により地耐力強化等を図るものである。



図-1 岸壁利用イメージ



写真-1 基地港湾整備箇所

2. 岸壁構造及び工法選定

(1) 岸壁構造

既存岸壁の水深10mを12mに増深し、かつ地耐力を大幅に強化する大規模改良であり、基地港湾整備の事業期間の制約や確実な竣工が求められたことから、既存の控え鋼矢板式岸壁の構造を有効活用し、矢板背後を固化改良する「疑似重力式構造」（表-1、図-2参照）とした。

表-1 岸壁整備仕様

岸壁延長	230m
計画水深	-12m (-10m)
最大上載荷重	350kN/m ² (25kN/m ²)
利用対象船舶	30,000DWT
事業期間	令和5～8年度

※（ ）内は現況岸壁の仕様

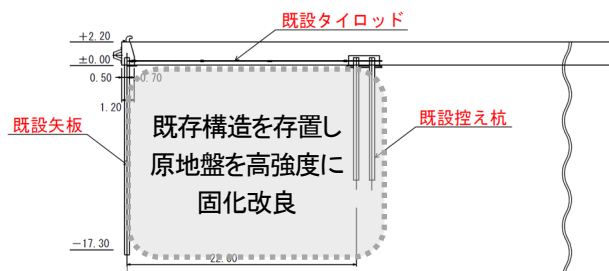


図-2 疑似重力式構造イメージ

(2) 固化改良工法の選定

固化改良工法の選定にあたっては、原地盤が均一な粒径の様な砂地盤でも実績があるセメント系固化材を噴出し混合させる「高圧噴射攪拌工法」を採用した。

このうち既設矢板岸壁の主要構造となる前面部及び控え杭部（図-3、4 青色）は、各部材が地盤中に存置していることから、既設構造物の変位を抑え、上部及び控えコンクリート躯体下部や杭間へも噴射方向を抑制し確実な改良体造成が可能な「FTJ-NA 工法」を選定した。

また、前面部及び控え杭部の中間区域（図-3、4 赤色）は、既設タイロッドを回避しながら所定の改良径を造成しつつ、経済性及び施工性が優位となる「JACSMAN 工法」を選定した。当該工法は図-6 に示すとおり、セメントスラリー噴出を超高圧で交差噴流させ、複合機械攪拌により大きな改良体造成が可能であり、効率的な施工が可能となる。

控え杭部の背面区域（図-3、4 緑色）は、必要強度が少なく改良深度も浅く、施工範囲が広いことから経済性・施工能力の高い「パワーブレンダー工法」を選定した。

当該基地港湾岸壁で採用した固化改良工法のうち、「JACSMAN 工法」の試験施工でジャミングの発生により、改良体の品質確保ができなかったことから、本施工にあたっての検討経緯、対策について以降で述べる。

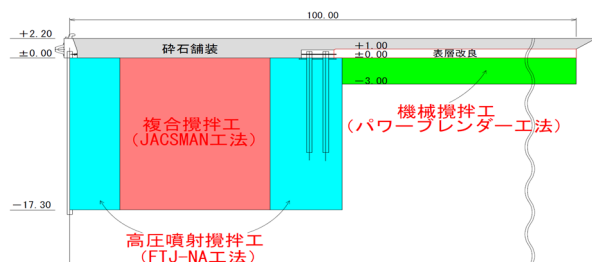


図-3 地盤改良工横断面図

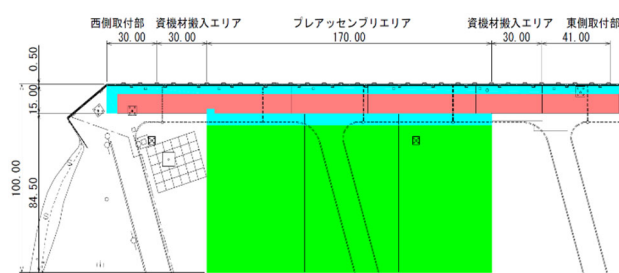


図-4 地盤改良工横断面図

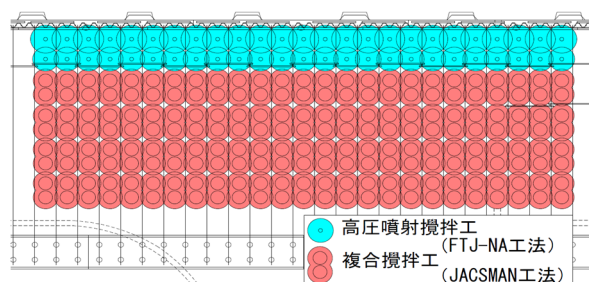


図-5 地盤改良工配置図

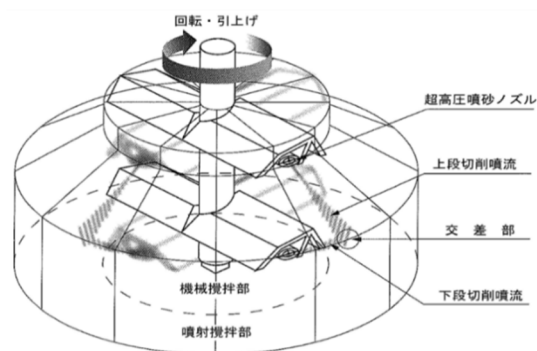


図-6 JACSMAN概念図

3. 配合の設定方法

地盤改良の設計強度に対してのセメント固化材の配合量の設定及び噴出方法を確認するため、施工区域に隣接するエリアに試験工区を設け、JACSMAN 工法及び FTJ-NA 工法の試験施工を行った。配合施工の目的及び設定フローを図-7 に示す。

- I. 改良径・改良長・設計強度の確認
- II. 施工性（施工能力・改良径等）やジャミング（貫入・引抜への弊害）の確認
- III. 現場室内強度比 $\gamma \cdot \lambda$ の確認（本施工の配合設定）

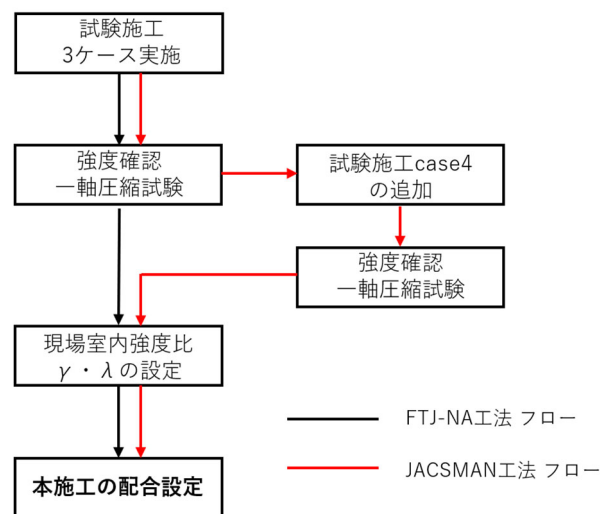


図-7 配合設定フロー

4. JACSMAN工法の品質及び施工課題

(1) 試験施工ケース

JACSMAN 工法の試験施工は、固化材は引抜吐出とし、添加量の違いによる表-2の3ケースを実施した。

表-2 試験改良方法

case	1	2	3
スラリー吐出方式	引抜吐出	引抜吐出	引抜吐出
固化材添加量	205kg/m ³	250kg/m ³	300kg/m ³

(2) 試験施工結果

試験施工3ケースの結果を以下に示す。

I. case1 (添加量205kg/m³)

- ・貫入時間77分（設計時間：37.6分）・施工完了117分
- 【貫入時】
 - ・GL-10m 以浅でモーターの電流が大きく貫入が困難となる
 - 引抜と貫入を繰り返し対応
- 【引抜時】
 - ・施工時は改良体下部と上部では排泥が上がるが、中間では排泥が上がってこない
- 【試料】
 - ・GL-4.5～9.0mまでの改良体コアに砂が混入

II. case2 (添加量250kg/m³)

- ・貫入時間71分（設計時間：37.6分）・施工完了133分
- 【貫入時】
 - ・GL-10m 以浅でモーターの電流が大きく貫入が困難となる
 - 引抜と貫入を繰り返し対応
- 【引抜時】
 - ・GL-15mで排泥及びエアの上りが悪いため、一度引抜後、再貫入して造成を実施
 - その後、エアが抜け連続的に排泥が上がってきた
- 【試料】
 - ・高圧噴射部で改良体コアに砂が混入

III. case3 (添加量300kg/m³)

- ・貫入時間76分（設計時間：37.6分）・施工完了155分
- 【貫入時】
 - ・GL-10m 以浅でモーターの電流が大きく貫入が困難となる
 - 引抜と貫入を繰り返し対応
- 【引抜時】
 - ・GL-14m付近でモーター電流値が大きく安全装置が働き回転停止が発生
 - ・連続的に排泥が上がってきた
- 【試料】
 - ・改良長分の連続した改良体コアが確認された

(3) ジャミングによる影響

試験施工ではジャミングの影響を受けたことにより、孔壁崩壊が発生し、貫入に計画の倍以上の時間を要した。ジャミングとは、粒径が均質な砂質地盤の施工時に、攪拌された改良体中の水分が改良範囲の外に逸脱し（水締め現象）、砂粒子が縮小するために、杭や掘削装置が締め付けられる現象であり、case3では引抜時に軸の回転停止が発生した。また、case1（205kg/m³の機械攪拌部）、case2（250kg/m³の高圧噴射部）（図-8参照）においては、蛇腹状に未改良部が確認され、改良体品質に求められる連続性を確保することができなかった。

蛇腹上の改良体が確認されたcase1及びcase2の改良体コアの状況を写真-2、3に示す。

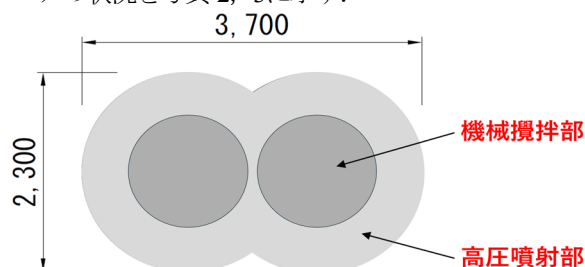


図-8 改良体詳細図



写真-2 case1コア

写真-3 case2コア

※赤枠が未改良部分

(4) 改良体の一軸圧縮試験結果

各ケースの現場強度を出すため、改良体の一軸圧縮試験を行った。なお、試験の供試体については、上層、中層、下層の中から連続性が確保されている箇所を選定し、試験を実施した。試験結果は表-3に示すとおり、case1:平均4,584.8kN/m²、case2:平均8,083.3kN/m²（赤枠）、case3:平均5,149.1kN/m²（青枠）の強度が出現しており設計基準強度 $q_{uck}=1,600\text{kN/m}^2$ 以上が確認された。ただし、引抜吐出で施工したcase1～3の各深度で比較すると強度にばらつきが多く、ブリーディングの影響を受けた結果となった。

表-3 試験施工結果

JACSMAN工法 試験結果									
材齢28日									
添加量 (kg/m ³)	W/C (%)	CASE	深度	標高 CDL (m)	一軸圧縮強さ σ _u (kN/m ²)	CASE	深度	標高 CDL (m)	一軸圧縮強さ σ _u (kN/m ²)
205	100	CASE1 機械攪拌部	上	-1.78~-1.93m	3,268.3	-	-	-	-
				-2.00~-2.21m	2,656.4				
				-2.21~-2.41m	4,732.5				
			中	-3.25~-3.45m	5,622.2		-	-	-
				-3.45~-3.65m	4,893.8				
				-3.65~-3.85m	6,297.5				
			下	-4.00~-4.20m	3,724.6		-	-	-
				-4.20~-4.40m	5,257.1				
				-4.40~-4.60m	4,810.7				
			CASE2-1 機械攪拌部	-1.80~-2.00m	4,655.8		CASE2-2 高圧噴射部	-1.80~-2.00m	5,537.8
				-2.00~-2.20m	4,088.5			-2.00~-2.20m	6,054.3
				-2.20~-2.40m	4,197.7			-2.20~-2.40m	5,727.7
				-2.40~-2.60m	4,757.6			-2.40~-2.60m	8,492.8
				-2.60~-2.80m	5,152.8			-2.60~-2.80m	3,224.6
				-2.80~-3.00m	5,412.5			-2.80~-3.00m	5,904.9
250	100	CASE2-1 機械攪拌部	上	-1.80~-2.00m	18,001.1	CASE2-2 高圧噴射部	中	-1.80~-2.00m	9,264.6
				-2.00~-2.20m	18,007.6			-2.00~-2.20m	9,393.0
				-2.20~-2.40m	17,509.6			-2.20~-2.40m	10,038.6
			中	-3.00~-3.20m	17,839.4		下	-3.00~-3.20m	9,565.4
				-3.20~-3.40m	17,839.4			-3.20~-3.40m	9,565.4
				-3.40~-3.60m	17,839.4			-3.40~-3.60m	9,565.4
			下	-4.00~-4.20m	17,839.4		下	-4.00~-4.20m	17,839.4
				-4.20~-4.40m	17,839.4			-4.20~-4.40m	17,839.4
				-4.40~-4.60m	17,839.4			-4.40~-4.60m	17,839.4
			CASE3-1 機械攪拌部	-1.80~-2.00m	3,293.8		CASE3-2 高圧噴射部	-1.80~-2.00m	3,970.5
				-2.00~-2.20m	4,342.4			-2.00~-2.20m	3,548.9
				-2.20~-2.40m	3,882.7			-2.20~-2.40m	4,716.8
				-2.40~-2.60m	4,679.5			-2.40~-2.60m	5,361.7
				-2.60~-2.80m	4,936.6			-2.60~-2.80m	5,160.7
				-2.80~-3.00m	4,566.0			-2.80~-3.00m	5,252.2
300	100	CASE3-1 機械攪拌部	上	-1.80~-2.00m	7,430.3	CASE3-2 高圧噴射部	中	-1.80~-2.00m	1,851.0
				-2.00~-2.20m	4,021.9			-2.00~-2.20m	2,450.7
				-2.20~-2.40m	10,947.8			-2.20~-2.40m	12,471.5
			中	-3.00~-3.20m	7,466.7		下	-3.00~-3.20m	7,466.7
				-3.20~-3.40m	7,466.7			-3.20~-3.40m	7,466.7
				-3.40~-3.60m	7,466.7			-3.40~-3.60m	7,466.7
			下	-4.00~-4.20m	7,466.7		下	-4.00~-4.20m	7,466.7
				-4.20~-4.40m	7,466.7			-4.20~-4.40m	7,466.7
				-4.40~-4.60m	7,466.7			-4.40~-4.60m	7,466.7
			CASE3-3 高圧噴射部	-1.80~-2.00m	3,293.8		CASE3-4 高圧噴射部	-1.80~-2.00m	3,970.5
				-2.00~-2.20m	4,342.4			-2.00~-2.20m	3,548.9
				-2.20~-2.40m	3,882.7			-2.20~-2.40m	4,716.8
				-2.40~-2.60m	4,679.5			-2.40~-2.60m	5,361.7
				-2.60~-2.80m	4,936.6			-2.60~-2.80m	5,160.7
				-2.80~-3.00m	4,566.0			-2.80~-3.00m	5,252.2

5. 追加試験施工 (case4) の概要と結果

(1) 追加試験施工 (case4) の概要

試験施工は3ケース実施したが、case1 (205kg/m³の機械攪拌部) 及びcase2 (250kg/m³の高圧噴射部) において、蛇腹状に未改良部が確認され、改良体の連続性を確保することができなかったことから、図-7の赤線のフローにより表-4のcase4を追加することとした。

表-4 追加試験改良方法

case	1	2	3	4
スラリー 吐出方式	引抜吐出	引抜吐出	引抜吐出	機械攪拌部 →貫入吐出 高圧噴射部 →引抜吐出
固化材添加量	205kg/m ³	250kg/m ³	300kg/m ³	205kg/m ³

施工方法を引抜吐出から機械攪拌部を貫入吐出・高圧噴射部を引抜吐出に変更することにより、砂に粘性を持たせることで、孔壁崩壊や周囲への逸水を防ぐことができ、貫入引抜・施工障害の改善が期待できる。また、孔壁の崩壊を防ぐことで、引抜造成時の排泥・エアの上りが良くなり、品質不良の改善や施工能力の向上が見込まれた。

(2) case4の試験施工結果

施工方法を機械攪拌部貫入吐出に変更したことにより、改良材により孔壁崩壊を防ぐことができ、ジャミングは発生しなかった。そのため、貫入速度に影響が出ることはなく、排泥も連続して排出されていた。また、改良体コアの状態は写真-4のとおり、未改良部分の箇所はなく良好なコアが造成されているのが確認された。

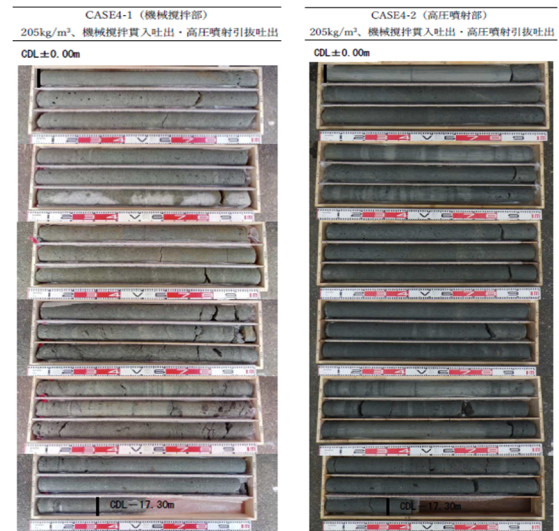


写真-4 case4コア

(3) 試験施工結果による考察

case1とcase2で蛇腹状の未改良体が発生した原因は、当該地区の地盤は粒径が均一な砂質地盤で掘削時に崩壊しやすい土質であったことや攪拌域内の水締めにより攪拌翼及び攪拌軸が拘束され、貫入や引抜、回転の障害となった。また、引抜吐出では貫入時に孔壁崩壊が発生して軸周りが閉塞し排泥を回収できないことにより、高圧噴射部の対流による攪拌混合が不十分だったと考えられる。Case3も引抜吐出だが、固化材の添加量が多いため全体に固化材が行きわたり連続性が確保されたと考えられる。Case4は貫入吐出によって孔壁が保たれるため、高圧噴射部の対流による攪拌混合の効果が十分に得られ、連続性が確保された。

以上のことから、ジャミングが発生したことにより貫入速度に影響し、排泥が排出されにくいことから改良体コアの品質に影響していることが考えられる。

6. JACSMAN工法の現場配合の設定

(1) 現場室内強度比 $\gamma \cdot \lambda$ の設定

試験施工と室内配合試験の結果より、当該砂質地盤に対するJACSMAN工法の現場室内強度比 $\gamma \cdot \lambda$ を設定した。現場室内強度比 $\gamma \cdot \lambda$ とは、試験施工の現場強度と室内配合試験結果より算出された強度の比率を示すものであり、 γ は試験施工結果からばらつきを考慮した係数、 λ は現場強度の平均値と室内強度の平均値の比を考慮した値である。この値を用いて、土質条件・施工精度等のバラつきを考慮した目標現場平均強度を設定する。

試験施工では4ケースを実施しているが、引抜吐出で施工したcase1～3と機械攪拌部貫入吐出・高圧噴射部引抜吐出で施工したcase4とでは、施工方法の違いにより強度のばらつきが異なる結果が得られている。

現場室内強度比の設定には強度のばらつきも考慮する必要があるため、ジャミングの影響を受けることなく正

常な施工ができたcase4の施工方法が採用になる事を考慮して、case4の結果を用いて、現場室内強度比を設定した。

以下に一軸圧縮試験結果及び現場室内強度比の設定結果を示す。

a) 試験施工結果 (σ28)

表-5 一軸圧縮試験結果

	一軸圧縮強度 q_{uf} (kN/m ²)					
	CASE4-1 (機械攪拌部)			CASE4-2 (高圧噴射部)		
	添加量205kg/m ³			添加量205kg/m ³		
	標高	各供試体	平均値	標高	各供試体	平均値
上	-1.78~-1.98m	2,933.5	3,203.0	-1.75~-1.95m	2,235.0	2,512.5
	-2.08~-2.28m	2,982.3		-2.00~-2.20m	2,218.8	
	-2.28~-2.48m	3,693.1		-2.20~-2.40m	3,083.7	
中	-7.28~-7.48m	3,627.7	3,379.2	-7.80~-8.00m	3,011.7	3,566.3
	-8.13~-8.33m	3,928.8		-8.00~-8.20m	3,799.6	
	-8.43~-8.63m	2,581.0		-8.20~-8.40m	3,887.7	
下	-14.13~-14.33m	4,765.2	4,734.7	-14.25~-14.45m	4,384.2	4,165.0
	-15.33~-15.58m	4,814.4		-14.45~-14.65m	4,431.1	
	-15.58~-15.78m	4,624.6		-14.65~-14.85m	3,679.8	
平均		3,772			3,415	

b) 同添加量での現場強度 q_{uf} の平均値と室内配合強度 q_{ul} の平均値との比 $\lambda = q_{uf}/q_{ul}$ を算定。

表-6 λ の算定

	添加量205kg/m ³	
	現場強度 q_{uf} (kN/m ²)	室内配合強度 q_{ul} (kN/m ²)
平均値	3,593.5	2,507.9
λ	1.43	

c) 試験施工結果から標準偏差 σ を算出し、a) で求めた現場平均強度 q_{uf} を用いて、変動係数 $V (= \sigma/q_{uf})$ を算出。現場強度係数 $\gamma = 1-V$ より、 γ を設定。

表-7 γ の算定

	添加量205kg/m ³
標準偏差 σ	806
現場平均強度 q_{uf} (kN/m ²)	3,593.5
変動係数 V	0.22
現場強度係数 γ	0.78

d) b), c) の結果より、当該地盤における $\gamma \cdot \lambda$ を設定。

表-8 $\gamma \cdot \lambda$ の設定

現場室内強度比 $\gamma \cdot \lambda$	1.11
--------------------------------	------

(2) 室内目標強度の設定

設定した現場室内強度比 $\gamma \cdot \lambda$ を用いて室内目標強度を設定する。

表-9 室内目標強度の設定

設計基準強度 (kN/m ²)	1,600
現場室内強度比 $\gamma \cdot \lambda$	1.11
室内目標強度 (kN/m ²)	1,441

(3) 配合設定及び固化材噴射方法

室内配合試験による改良体添加量と一軸圧縮強度の関係図 (図-9) を用いて、室内目標強度相当の改良材添加量を最適な配合として設定した。ただし、室内目標強度 q_{ul} 相当の添加量が最低添加量205kN/m³以下となる場合は、造成時間によっては噴射したスラリーが改良径端部まで届かず、所定の改良径が困難となり技術知見があることから、最低添加量を205kN/m³とした。

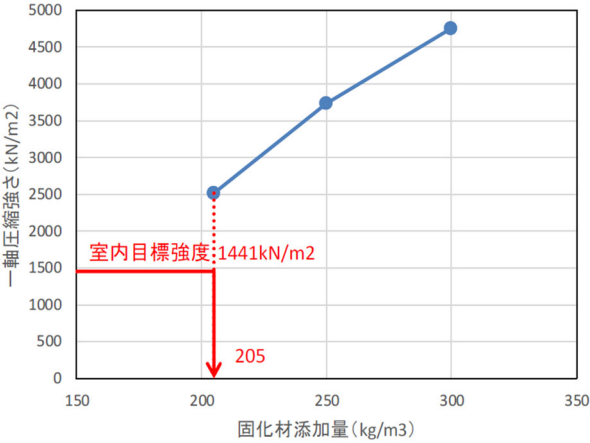


図-9 配合設定

以上より、施工性、連続性の観点から確実に品質を確保できる施工方法及び配合を、「機械攪拌貫入吐出・高圧噴射引抜吐出：205kg/m³」に決定した。

7. おわりに

今回、JACSMAN 工法の固化材配合量の設定にあたり、複数ケースの配合量により強度を確認したところ、いずれのケースも所定の強度は得られたが、改良体としての連続性や施工性が懸念された。このため地盤改良体の品質を確保しつつ最適となる配合と施工方法を見いだすために、工事請負者と品質確保調整会議を重ね、固化材の吐出方法について原地盤の性質を踏まえた工法を選定し、かつ必要最小限の配合量で施工することができた。

また、試験施工を通じて当現場特有の砂質地盤という条件下での施工、ジャミングの課題に対応した技術的検証が行われたことで、同様の施工条件 (砂質地盤) だけでなく、粘性土や礫混じり土等多様な地盤条件に柔軟に対応することが可能となり、工法の適用範囲が広がり、今後の工事に活用可能な知見が得られた。

洋上風力発電事業における基地港湾整備は、再生可能エネルギーの利用促進に資するものであり、公募で選ばれた発電事業者が計画する事業費及び事業期間にも影響するため、要請される期限での整備はもとより、計画される整備費に抑える必要がある。この基地港湾整備が地球温暖化対策の一助になることを期待する。