

ソイルセメントを用いた鋼管矢板根固工の強度特性について

神崎 稔* 生島 俊昭*
中山 晋一* 小笠原 哲也**
澤田 巧**

要 旨

東京電力東通原子力発電所港湾施設における透過防止工の施工においては、先行削孔によって乱された岩盤の強度を復元するため、鋼管矢板の根入れ部分に根固工を施工する構造が採用されている。このため、施工に際しては、設計上必要となる根固め部分の強度を満足する材料を選定する必要がある、かつ、鋼管矢板打設の施工性向上ならびに環境負荷を低減する目的から、削孔時に発生した土砂とセメントミルクの混合材料であるソイルセメントを根固工として適用する方法を提案した。

計画にあたっては、予め、現地発生土を用いた室内試験によって現場での強度と施工性を満足する材料の配合を決定し、さらに、実機を用いた現地試験により、根固工としてソイルセメントを用いた場合の強度特性ならびに施工性について検証した。これにより、岩盤削孔用の汎用ダブルオーガ機を用いた場合でも、セメントミルクの注入や、スクリーによる攪拌方法を工夫することで、所定の強度を有する均一なソイルセメントの混練が可能であることが明らかとなった。また、一定量の遅延剤を添加することで、混練から約一週間、鋼管矢板打設の施工性を確保できることを確認した。

1. はじめに

東京電力東通原子力発電所における港湾外郭施設では、捨石式傾斜堤からなる防波堤の背面に透過防止工を配置する形式となっている。透過防止工は、鋼管矢板を海底面に打設し、その両側に捨石を投入する自立式の鋼管矢板構造であり、捨石式傾斜堤を越流ならびに透過する波浪を低減し港内静穏度を高める目的に加え、浮遊砂や温排水の港内への流入を防ぐなど、特に、発電所港湾に必要とされる機能を満足する構造物である。(図-1、2)

一般に透過防止工などの連続矢板構造物では、波浪などの外力に対する安定のため、支持基盤層に矢板を根入れする構造が採用される。本透過防止工では、大口径岩盤削孔工法によって支持基盤層である岩盤を先行削孔した後に鋼管矢板を打設する工法が用いられており、削孔によって乱された岩盤の強度を復元する必要があることから、根入れ部分にセメントミルクを注入する計画となっている。このため、施工に際しては、自立式矢板の設計から要求される根固め部分の強度を勘案し、予めこれらを満足する材料ならびに施工方法を決定する必要がある。また、現地では岩盤の削孔から矢板の打設までに5日間程度の時間差があり、この期間中は材料が硬化しないことが求められる。

以上のことから本検討では、透過防止工の安全性と施工性を確保するため、削孔時に発生した土砂とセメントミルクの混合材料であるソイルセメントを根固工とする方法を提案し、これらの特性を確認する室内および現地試験を実施した。

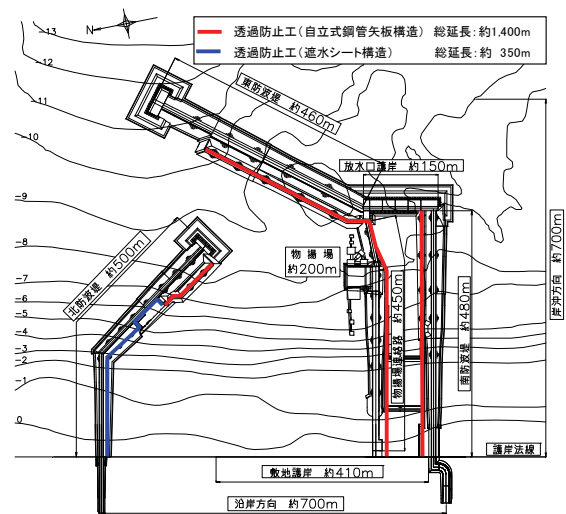


図-1 港湾施設平面位置図

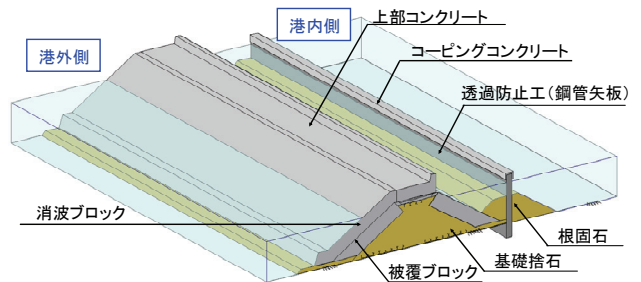


図-2 防波堤標準構造図

*東北支店 東電東通原子力工事事務所

**本社 技術研究所 耐震構造チーム

2. 試験条件

2.1 地盤条件

当該工事範囲の地質は、主に新第三系中新統の泊層およびこれを覆う第四系の海浜堆積物等からなる。泊層は主に火山砕屑岩からなり、礫の含有率に基づき、凝灰岩(粒径4mm以上 5%未満)、礫質凝灰岩(同4mm以上 5~25%)、火山礫凝灰岩(同4mm~32mm 25%以上)、凝灰角礫岩(同32mm以上 25%以上)、軟岩質火山礫凝灰岩(同4mm~32mm 25%以上)に5区分され、透過防止工の施工区域は主に凝灰角礫岩の分布域である。

図-3に施工区域の近傍にて二軸同軸式アースオーガ機にて岩盤部分を削孔した際に発生した土砂の粒径加積曲線を示す。発生土には粒径10mmを超える小石・礫分が含まれ、削孔時に岩盤が破碎したことで生じたと思われる粒径0~75 μ mの細粒分についても約15%含まれることが分かる。

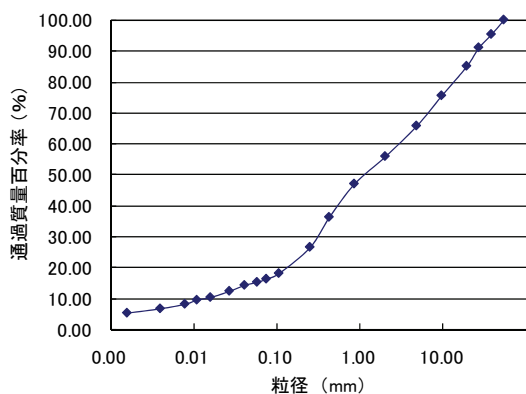


図-3 発生土の粒径加積曲線図

また、表-1に発生土と掘削前の岩の単位体積重量について示す。締固め状態の発生土の単位体積重量は、ほぐしたゆるい状態の重量と、削孔前の岩重量の平均的な値となっており、さらに、実施工での根固め部は締固め状態に近いと想定されるので、以降の実験ではこの値を発生土の単位体積重量の代表値として取り扱った。

表-1 発生土の単位体積重量

項目	単位	単位体積重量
現地発生土(ゆるい状態)	kg/m ³	1408
現地発生土(締固め状態)	kg/m ³	1643
削孔前の岩	kg/m ³	1967

2.2 必要強度

透過防止工の設計検討では、鋼管矢板を周辺の岩盤の变形係数から算定されるバネにて支持された連続壁としてモデル化し、数値解析により応力度や必要根入れ長さを算定

することで、鋼管矢板の仕様が決定されている(図-4)。ただし、その根入れ長については $2/\beta$ を採用するなど比較的小さい値となっているため、根固工については外力作用時に反力が最大となる根入基部において破壊されないことが不可欠となる。このため、設計計算によって算出された地盤反力度の最大値(2.7N/mm²)を必要強度とした。

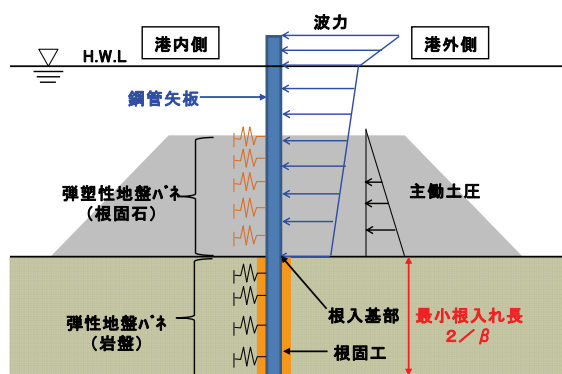


図-4 透過防止工根入れ基部の設計モデル

2.3 目標凝結時間

透過防止工の施工では、セメントミルクを発生土と攪拌させながら注入した後に、鋼管矢板を打設する手順になっている。また、先行削孔と鋼管矢板の打設を行う重機の作業時保安距離など現場での施工性を考慮すると、セメントミルク注入から鋼管矢板を打設するまでの時間的余裕が必要である。よって凝結の終結強度(プロクター貫入による抵抗値28.0N/mm²)を発現するまでに5日間以上を目標値とした。

3. 室内試験

3.1 試験概要

室内試験では試験箇所にて採取した発生土を用いてソイルセメントを作製し、根固工に必要な強度と凝結までの時間を確認することで、前述の仕様ならびに施工条件を満足する材料の配合を決定することを目的とした。

3.2 試験条件

①試験場所

配合条件の相違による強度や凝結時間の差を比較するため、標準的な環境条件に統一する必要がある。このため、試験は技術研究所の可変恒温恒湿室内にて、気温20℃、湿度60%に統一した室内環境のもと実施した。

②使用材料

セメントなどの材料については現地での調達を勘案し、表-2に示す材料を用いた。

表-2 使用材料

項目	種類	備考
セメント	高炉B種	三菱マテリアル社製
ペントナイト	津軽2号	青森県黒石産
凝結遅延剤	ポリリスNo.89	BASFポリリス社製
	ジオリター-20	フローリック社製

③使用機械

各種試験は、表-3に示す試験機を用いて行った。

表-3 使用機械

項目	機器名称	備考
圧縮強度試験	万能試験機(UH200-A)	島津製作所社製
凝結試験	ブロクター貫入試験機	丸東製作所社製

④ 試験配合および打設方法

試験はソイルセメントの強度性状について確認するため、水セメント比を中心に变化させるケース1~10と、凝結遅延性について確認するため、遅延剤の添加量ならびに遅延剤の種類について変更するケース11~14について実施した。表-4に試験配合の一覧表を示す。

表-4 室内試験配合

ケース	現場発生土 kg	セメント kg	水 kg	ペントナイト kg	W/C %	遅延剤(%)					
						No.89	ジオリター-20				
1	1408	300	300	10	100	2	0				
2						4	0				
3						2	0				
4						4	0				
5	1408	300	450	10	150	4	0				
6						6	0				
7						4	0				
8						6	0				
9	1408	300	600	10	200	4	0				
10	1967					4	0				
11	1643					300	450	10	150	10	0
12										15	0
13		0	3								
14		0	6								

なお、現場でのソイルセメントは海水中に残置された発生土にセメントミルクを注入し削孔機にて混練することとなる。一般に、海水などの塩分はコンクリートの凝結固化を促進することが知られており、試験では施工条件を勘案し、凝結時間が早くなることに対する安全側の評価となることを目的として、練混水に海水を用いることとした。同様に、削孔箇所には海水が満たされていることを想定し、型枠中に海水を充填した後、トレミー管にてソイルセメントを打設する方法を採用した。図-5にソイルセメント打設の模式図を示す。

3.3 試験結果

表-5に強度試験の結果一覧を示す。

表より、ケース1と3など水セメント比と遅延剤添加量の等しいケースでは、現地発生土の量が少ないケースについて凝結時間が遅くなる傾向にある。これは、発生土に含まれる細粒分に遅延剤の成分が吸着されることでその効果が薄れることによるものと考えられる。また、一軸圧縮強度については相対的なセメント量とのバランスの関係から発生土が少ないケースについて強度が大きくなる傾向にある。よって、簡便のために同様のケースについてはそれらの平均値を取りデータを整理することとした。(表-6)

なお、遅延剤の種類を変更したケースについてはジオリター-20を6%としたケース14がポリリスNo.89を10%としたケース11と凝結時間、一軸圧縮強度ともに似通った傾向となっており、半分程度の添加量で同等の効果が得られることが明らかとなった。

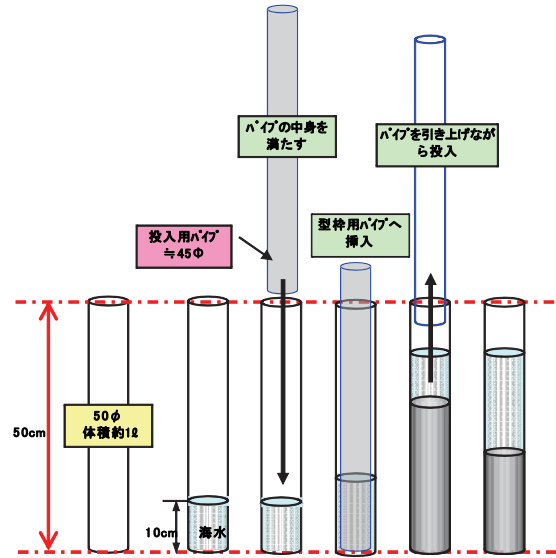


図-5 ソイルセメント打設の模式図

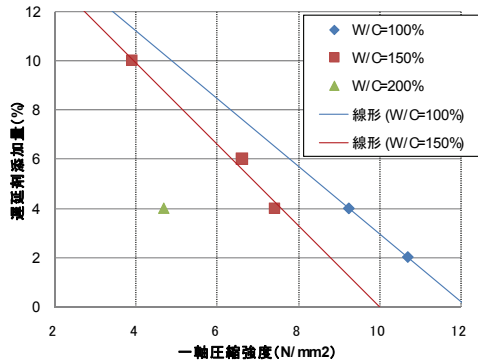
表-5 強度試験結果一覧

ケース	現場発生土 kg	W/C %	遅延剤(%)		凝結試験(時間)		一軸圧縮強度(N/mm ²)				
			No.89	ジオリター-20	始発	終結	7日	28日	91日		
1	1408	100	2	0	16	34	5.2	10.9			
2			4		36	62	5.2	10.5			
3			2		7	30	5.7	10.5			
4			4		15	43	4.8	8.0			
5	1408	150	4	0	40	79	3.6	8.4			
6			6		46	104	2.5	6.8			
7			4		23	67	3.0	6.4			
8			6		40	92	2.5	6.4			
9	1408	200	4	0	46	142	2.1	5.3			
10	1967		4		31	123	1.7	4.1			
11	1643		150		10	0	84	154			3.9
12					15		414	636			1.4
13		3		16	62			3.7			
14		6		78	159			3.0			

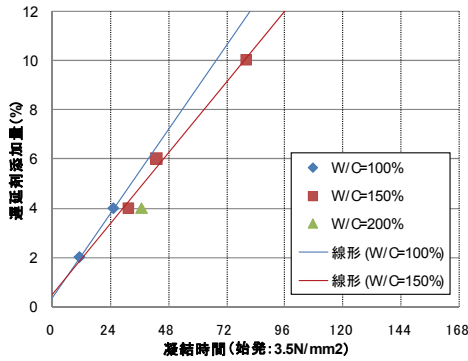
表一六 強度試験結果一覧(各ケースの平均値)

ケース	現場発生土		遅延剤 (%)		凝結試験(時間)		一軸圧縮強度(N/mm ²)			
	kg	%	No.89	ジオリター-20	始発	終結	7日	28日	91日	
1. 3	1688	100	2	/	11.5	32.0	5.5	10.7		
2. 4					25.5	52.5	5.0	9.3		
5. 7					31.5	73.0	3.3	7.4		
6. 8		150	6	/	43.0	98.0	2.5	6.6		
9. 10					38.5	132.5	1.9	4.7		

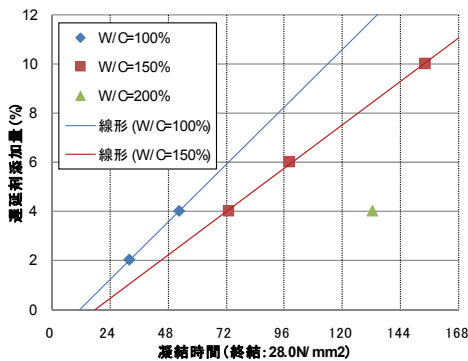
図一六に以上の試験結果について取りまとめる。一軸圧縮強度の試験結果について比較したところ、水セメント比ならびに遅延剤の添加量が少なくなるに従い、ソイルセメントの強度が大きくなること、また、貫入抵抗値による凝結時間(始発: 3.5N/mm²、終結: 28.0N/mm²)については早くなる傾向が示されている。



図一六. 1 一軸圧縮強度(σ28)の比較



図一六. 2 凝結時間の比較(始発)



図一六. 3 凝結時間の比較(終結)

以上の結果より、室内試験の配合においては、水セメント比 200%以下とすることで必要強度(2.7N/mm²)を満足し、また、凝結遅延効果は、W/C=150%のケースにおいて 6%以上の遅延剤を添加することで必要遅延効果(5 日目:96 時間以上)の性能が得られることが明らかとなった。

4. 現地試験

4.1 試験概要

室内試験によって得られた配合を基に現地試験を実施し、ソイルセメントの強度を確認することで現場での実際の施工方法ならびにセメントミルクの配合の妥当性を検証した。

試験では、現地での施工を再現するため、始めに3点式ダブルオーガ機(DH808:φ1300)を用いて施工個所近傍に先行削孔した後に、オーガの先端からセメントミルクを注入し、スクリューにて発生土と攪拌・混練することでソイルセメント柱を造成した(図一七. 1)。さらに、凝結遅延効果を確認するための標準貫入試験を行い、所定の期間養生した後にコア材をサンプリングし(図一七. 2)、一軸圧縮強度試験を行った。



図一七. 1 現地試験状況(先行削孔)



図一七. 2 コアサンプリング状況(ボーリング)

4.2 試験条件

①試験場所

図-8に示す試験位置に標準貫入試験に適用する3孔と一軸圧縮強度試験の5孔を含む全8孔を削孔し、ソイルセメント柱を造成した。なお、一軸圧縮強度試験については室内試験と同様に技術研究所にて行った。

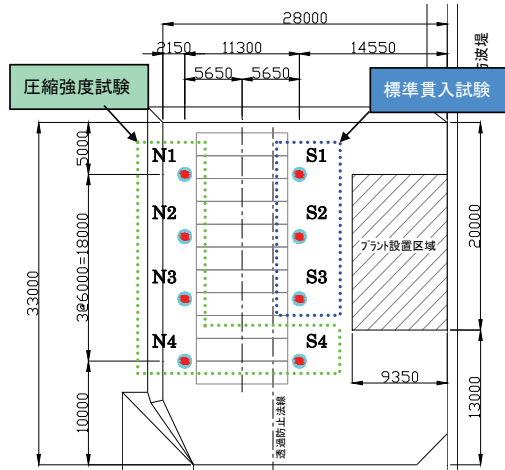


図-8 現地試験平面図

②試験配合

現場では室内に比べてソイルセメントの強度発現ならびに遅延剤の効果が低下することを想定し、上述した室内試験結果(水セメント比200%以下、遅延剤添加量6%以上)を踏まえ、水セメント比を150%、遅延剤添加量を10%の配合とした。

表-7 現地試験配合

項目	単位	セメント	水	ペントナイト	遅延剤	合計
密度	kg/l	3.04	1.00	2.40	1.11	—
質量	kg	300.00	420.00	10.00	30.00	760.00
容積	l	98.68	420.00	4.17	27.03	549.88

③打設方法

試験のケースは、セメントミルクの吐出方法ならびにソイルセメントの混練方法の差異によって設定した(表-8)。具体的には、スクューの回転の方向と上下移動速度を規定化し、材料の混練度合いを管理することとしている。図-9にセメントミルクの吐出・混練時のスクュー動作の概念を示す。

4.3 試験結果

①標準貫入試験

試験削孔内に生成されたソイルセメント柱に対して標準貫入試験を実施し、材齢1日～7日目までのソイルセメントのN値を測定することで、現場におけるソイルセメントの凝結性状を確認した。なお、試験は高さ方向に各ケースとも3箇所として

いる。図-10に標準貫入試験結果を示す。

表-8 打設方法の差異によるケース設定

項目	S1	S2	S3
試験内容	貫入抵抗		
ミルク吐出時スクュー回転方向	逆転		
ミルク吐出時間(スクュー移動速度)	300l/分(1m/3分)		
混練時スクュー回転方向	逆転		
混練時スクュー上下速度	1m/分		
混練回数(スクュー上下反復)	1	2	4

項目	N1	N2	N3	N4	S4
試験内容	圧縮強度				
ミルク吐出時スクュー回転方向	逆転			正転	
ミルク吐出時間(スクュー移動速度)	300l/分(1m/3分)				
混練時スクュー回転方向	逆転				
混練時スクュー上下速度	1m/分				
混練回数(スクュー上下反復)	1	2	4	3	1

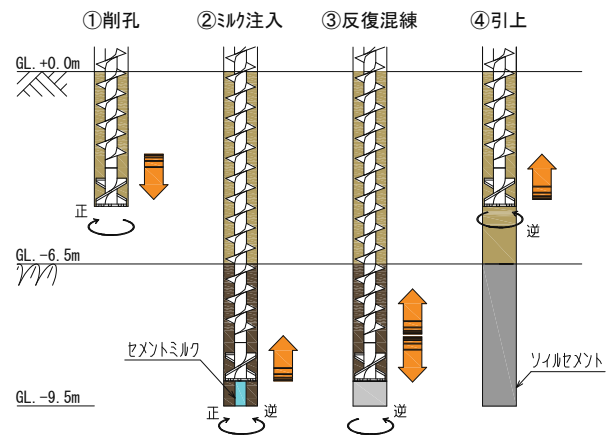


図-9 セメントミルクの吐出・混練時のスクュー動作の概念

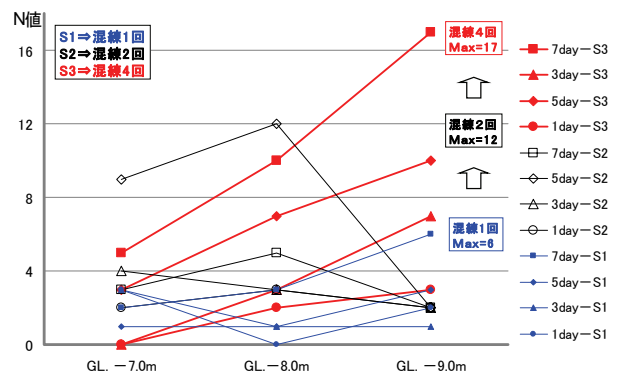


図-10 標準貫入試験結果

図より、ソイルセメントのN値は混練回数が多くなるに従い、最大値において6→12→17と次第に上昇している様子が判る。このことから、ソイルセメントの強度には、現場での混練度が大きく関係していることが明らかとなった。また、混練回数4回のケースS3では試験初日から日を追ってN値が増加する傾向にあり、このことからセメントの水和が進行して強度増加するセメント混合物が生成されたと判断できる。なお、鋼管矢板打設時の限界N値は一般的に20程度であり、適用したソイルセメントの配合ならびに混練度であれば、打設後7日目においても十分に鋼管矢板打設できると考えられるため、当該試験により先行削孔から矢板打設に至るまでの施工性を確保可能であることが示されたと言える。

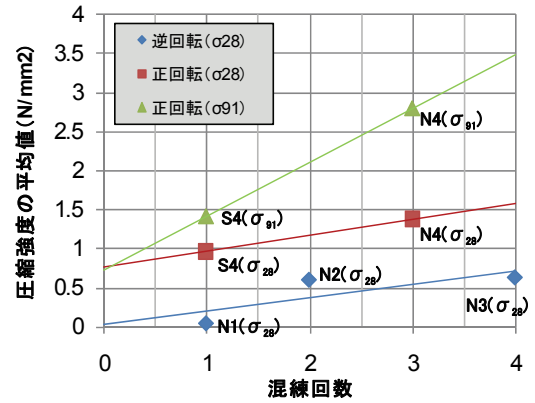


図-11 圧縮強度の平均値

②圧縮強度試験

試験ソイルセメント柱から供試体を採取し、圧縮強度試験を実施することで、現場試験におけるソイルセメントの強度特性について確認した。なお、圧縮強度試験はオールコア(φ55)で採取した3mのソイルセメント柱を1m毎に分割し、その中の任意の位置における供試体を対象に行っている。

表-9に圧縮強度試験結果の一覧を示す。結果は平均値と設計用値として用いる特性値について整理した。なお、特性値は“地盤工学会基準 JGS4001 性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則”に準拠して算出している。

図-11に検討ケースごとに取りまとめた圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度試験においても貫入抵抗試験と同様にソイルセメントの混練回数が強度の発現に大きく関与していることが分かる。

また、施工方法としてはセメントミルク注入時のスクリー回転方向が正回転の場合に強度が大きくなる傾向にあり、混練

回数3回のケースN4では、室内試験強度の約3割程度であるもののその値は均一で、かつ、σ91の平均値では必要強度である2.7N/mm²を上回る結果が得られた。よって、専用の練り混ぜ機能を持たない汎用のダブルオーガ機であっても、セメントミルクの注入や混練方法を調整することで十分な強度を有するソイルセメントが生成可能であると言える。

なお、竹内ら(1999)¹⁾では、遅延剤を添加したコンクリートの強度はセメントの水和反応が継続する限り増加し、最終的には無添加の場合と同等以上になるとの結論であるが、ケースN4ではσ91日がσ28の2倍以上となっており、同様の傾向を示す結果となっている。また、ソイルセメントの最終的な強度については、一般的な高炉B種コンクリートの特性²⁾からσ91に対して1割程度の強度増進が期待されるため、特性値においても目標強度を上回るものと判断される。

5. まとめ

以上の試験により、岩盤削孔用の汎用ダブルオーガ機を用いた場合でも、セメントミルクの注入や、スクリーによる混練方法を工夫することで、必要強度を有する均一なソイルセメントの生成が可能であることが明らかとなった。また、本工法は先行削孔による現地発生土をソイルセメントの主材料として用いるため、環境負荷を低減する効果が期待できる。

【謝辞】

本検討の実施に際し、多方面のご協力を頂いた東京電力株式会社東通原子力建設準備事務所港湾土木グループ各位に、あらためて深謝する次第です。

【参考文献】

- 1) 竹内 徹、長瀧 重義：遅延剤を用いたコンクリートの特性、コンクリート工学論文集 Vol. 37, No. 11, 1999. 11
- 2) 日本建築学会 編：構造体コンクリートの品質に関する研究の動向と問題点、2008. 02

表-9 圧縮強度試験結果一覧

位置	N1	N2	N3	N4		S4	
	σ28 N/mm²	σ28 N/mm²	σ28 N/mm²	σ28 N/mm²	σ91 N/mm²	σ28 N/mm²	σ91 N/mm²
上	0.060	0.060	0.050	1.930	3.440	0.420	1.110
	0.080	0.030	0.350	1.830	3.680	0.830	1.740
	0.100	0.210	0.850	1.500	2.880	0.840	1.270
	0.030	0.260	-	1.200	2.550	1.000	2.430
中	0.060	0.030	1.300	1.480	2.770	1.390	1.430
	0.020	0.220	0.180	1.700	2.660	0.540	0.850
	0.020	0.840	0.780	1.290	3.080	1.490	0.950
	-	0.900	0.910	1.180	2.690	0.820	2.020
下	0.060	1.340	1.080	0.960	2.470	0.330	1.510
	0.040	0.710	0.050	1.240	1.780	1.800	0.890
	0.040	1.100	0.800	1.110	-	1.040	-
	0.020	1.550	-	1.190	-	1.130	-
平均値	0.048	0.604	0.635	1.384	2.800	0.969	1.420
標準偏差	0.026	0.540	0.445	0.304	0.528	0.439	0.520
変動係数	0.548	0.895	0.701	0.220	0.189	0.453	0.366
特性値	0.036	-	-	1.246	2.520	0.727	1.207