

柱列式原位置土攪拌工法による地下止水壁の施工

Construction of Subterranean Cut-Off Wall by Soil Cement Mixing Method

田中 壮明*
Takenori Tanaka

金子 範彦**
Norihiko Kaneko

北原 進一*
Shinichi Kitahara

仲松 宇大***
Udai Nakamatsu

要 約

本工事は、沖縄県久米島のカンジン地区において、畑地かんがい施設の整備、農業用水の不足の解消を目的とし、新しい水資源の開発の一環として計画される地表湛水型地下ダム建設工事である。この地下ダムは、凝灰角礫岩を基盤とし、その上部に堆積する琉球石灰岩層内に止水壁を築造することにより、地下水の流れを堰き止め地下水の貯留と湛水を行う構造である。止水壁は、原位置土とセメントミルクを攪拌させる原位置土攪拌工法でソイルセメント地中連続壁を構築した。本報告では、ダム堤長1,088mのうち、平成7年度確認工事(延長36m区間)の施工実績(精度、品質)と止水壁施工時の根入れ確認システムの開発について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 止水壁の施工
- § 4. 施工結果
- § 5. 根入れ確認システムの開発
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

沖縄本島から西方へ約150kmの東シナ海上に位置する久米島の西部、具志川村カンジン地区では、さとうきび、

たばこ等の農作物の栽培が盛んに行われている。久米島は、年間降雨量が2,200mm程度であり、島内地盤は、地表から5m程度に島尻マージと呼ばれる粘性土、その下に30m~60mに琉球石灰岩(透水係数 $k=1 \times 10^{-3}$ cm/sec程度)が厚く堆積しており、保水力が小さい地層で形成されている。そのため、島内では農業用水の確保が難しい状況にある。

本工事は、安定的農業用水の確保、畑地かんがい施設および圃場整備を目的とした沖縄県営かんがい排水事業カンジン地区事業計画に基づき、琉球石灰岩内にソイルセメント地中連続壁を構築し、海に流失している地下水を滞水させる地表湛水型地下ダム建設工事である。

本報告は、この地下ダム建設工事の内、原位置土攪拌工法による止水壁構築方法の当該箇所への適用性を確認することを目的とした確認工事について報告する。

* 九州(支)カンジン地下ダム(出)

** 技術研究所土木技術課

*** 土木設計部設計課

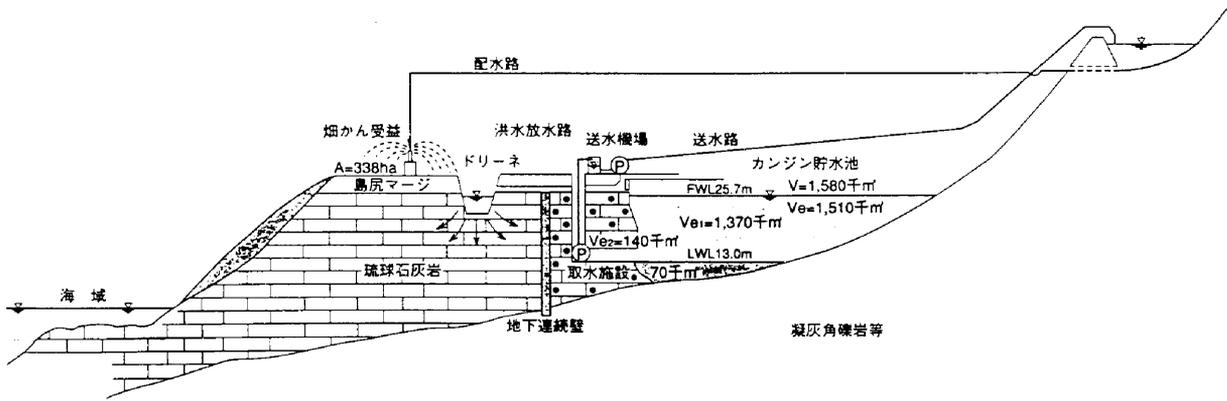


図-1 全体施設計画模式図

§ 2. 工事概要

工 事 名：カンジン地表湛水型地下ダム建設工事

発 注 者：沖縄県

工事場所：沖縄県島尻郡具志川村カンジン地区

工 期：自 平成7年12月27日

至 平成8年8月8日

工事内容：止水壁築造（ソイルセメント地中連続壁）

施工延長 36m（堤長1,088mの内）

止水壁面積 1,345m²

先行削孔工 41本（単軸：φ600mm）

三軸原位置攪拌工 40本（三軸：φ550mm）

作業床 387m²

⑤安定した作業足場の確保

⑥孔壁崩壊の防止

ガイドウォールおよび作業床は、基本的に現場打ちコンクリートにより構築し、軟弱層（粘性土層、風化した琉球石灰岩層）が厚く堆積する箇所は、作業床の安定を確保するために軟弱層を碎石に置き換え、堅固な琉球石灰岩を支持地盤とした作業床を構築した。このとき、ガイドウォールは、転用可能なL型擁壁（二次製品）を用いて構築した。

ガイドウォール標準断面図を図-4に示す。

3-3 先行削孔，三軸原位置攪拌

先行削孔工および三軸原位置攪拌工の削孔パターンを図-5に示す。

§ 3. 止水壁の施工

3-1 施工フロー

止水壁は、換算N値50以上の琉球石灰岩と凝灰角礫岩内に構築すること、確実に止水するために止水壁の施工精度を高める必要があることから、予めケーシング付き単軸オーガを用いてガイド孔の削孔を行い、次に三軸オーガを用いてセメントミルクを注入しながら混合攪拌（三軸原位置攪拌工）を行う方式により施工した。

また、本工事は確認工事であることから、図-2の作業フローに示す各種試験および施工状況の確認を行った。

当工事で施工する止水壁の形状寸法を図-3に示す。

3-2 ガイドウォール，作業床

止水壁施工の準備工として、ガイドウォールおよび作業床を次の目的で施工した。

- ①ダム軸の通りの明示
- ②先行削孔の杭芯位置の明示
- ③多軸オーガのエレメント芯の明示
- ④錐継ぎ・施工時の錐受け台の確保

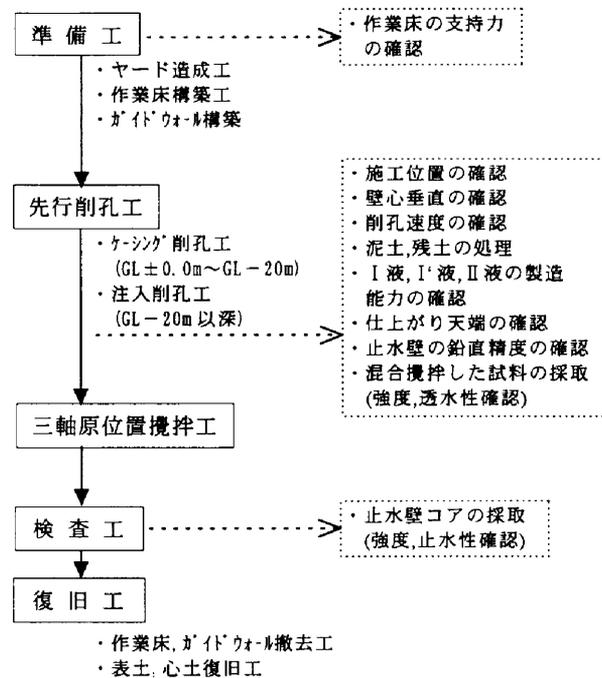


図-2 施工フロー図

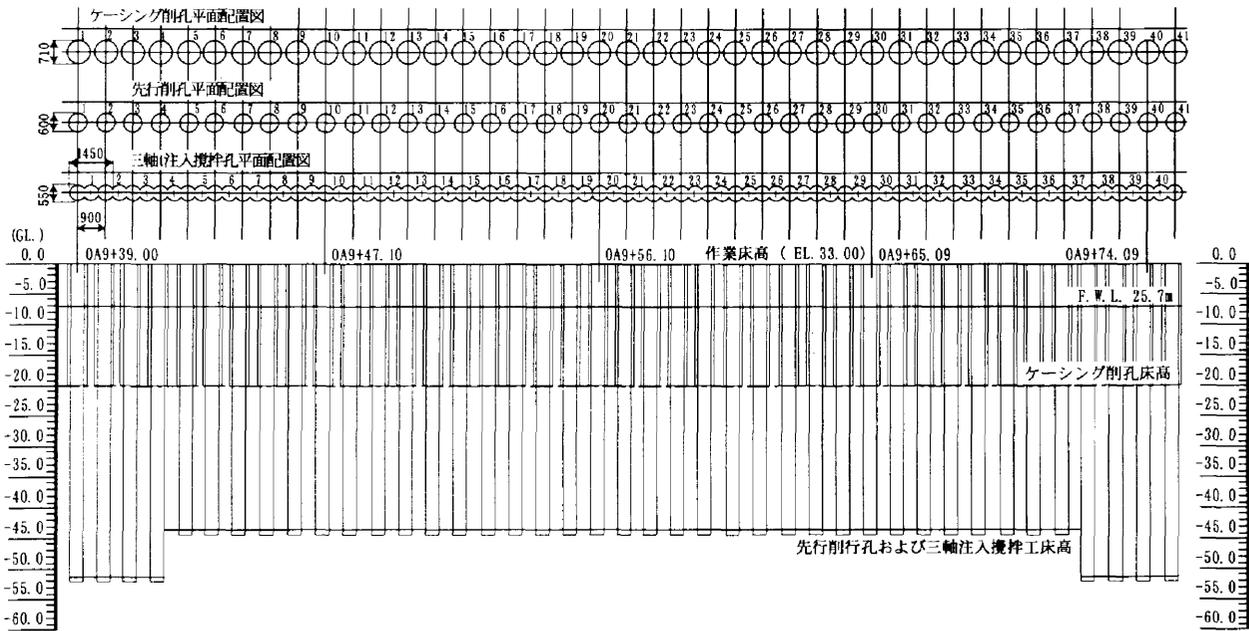
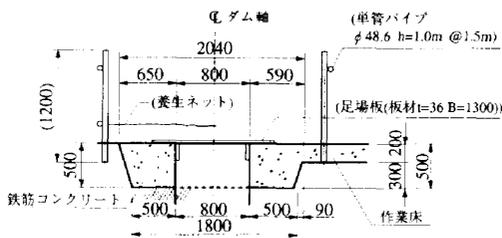


図-3 止水壁形状寸法図

現場打ちコンクリート



L型ウォール

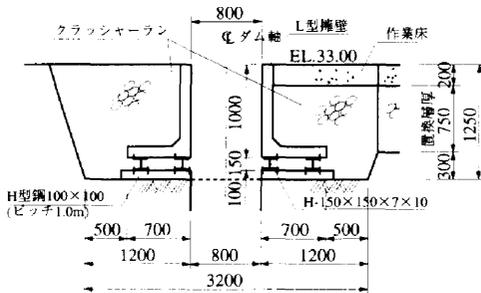


図-4 ガイドウォール標準断面図

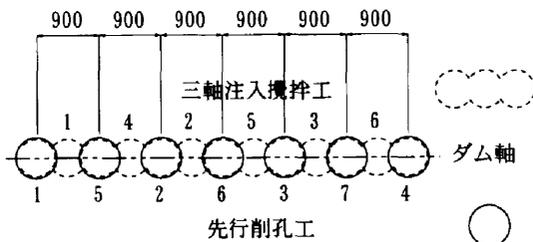


図-5 削孔パターン図

先行削孔工は、図-5の下段番号に示すように900mm間隔でガイド孔の削孔を行った。

GL±0.0m～GL-20mまでは、削孔精度を高め、GL-20m以深の削孔をスムーズに行うために径600mmの単軸オーガと外径710mmのケーシングを用いて削孔を行った。

ケーシング削孔では、削孔時、ケーシング内の土砂の抵抗が大きくなるため5.0m毎にケーシングを引き上げ掘削土砂の排土を行った。この際、先に削孔したガイド孔は三軸原位置攪拌工までに孔壁の自立が期待できないことから、掘削土砂を隣り合うガイド孔に投入し、孔壁の崩壊を防止した。

GL-20m以深は、径600mmの単軸オーガのみを用いて、削孔抵抗の軽減および孔壁の崩壊防止を目的として削孔注入液（I液）をオーガ先端から孔内に注入しながらの削孔を行った。

三軸原位置攪拌工は、先行削孔の位置で杭がラップするように、図-5の上段番号に示す順序で径550mmの三軸オーガを用い削孔・注入攪拌を行った。

三軸原位置攪拌は、まず、削孔注入液（I液）を注入しながらガイド孔の中間に残る土塊を切り崩しながら止水壁先端までオーガを挿入し、次に、固化注入液（II液）をオーガ先端から孔内に注入し、原位置土と混合攪拌を行いながらオーガを引き上げ止水壁を構築した。

この混合攪拌作業において、宮古島などで同じ工法により施工されている地下ダムの施工実績にならって、底部5m区間は、2回のターニングとし、それ以外の箇所は、1回のターニングを行った。

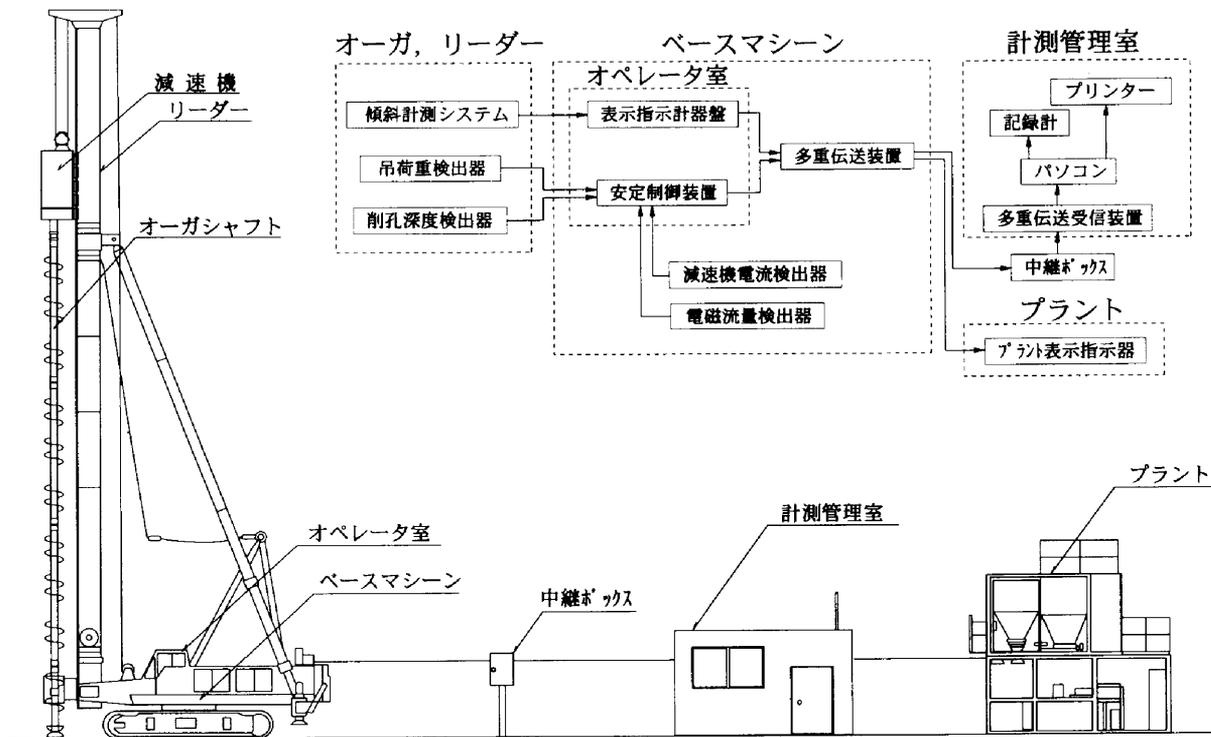


図-6 施工管理システム

3-4 施工管理システム

孔曲がりを早期に把握し、大きな孔曲がりを防止するために施工時の止水壁の鉛直性をリアルタイムに確認できる傾斜計測システムを用いて施工を行った。

この傾斜計測システムは、先行削孔、三軸原位置攪拌に用いるオーガスクリュウ先端部の内管（三軸は中央錐の先端部）に固定式傾斜計を設置し、5m毎にオーガを静止させ、ダム軸方向およびダム軸直角方向の傾斜計測を行うものである。

計測データは、オーガ内に設置されたデータ伝送システム、減速機の頭部に設置されたスリップリングを介し、オペレーター室および管理室へ送られる。

さらに、削孔時にオーガ先端に過剰な負荷が作用することによる孔曲がりを防止するために、減速機の降下速度を一定に制御する定速制御システムおよび削孔速度、削孔深度、減速機の電流抵抗値、オーガ作用する荷重などをリアルタイムに把握できる総合管理システムを用いて施工を行った。

本工事で用いた施工管理システムの概念図を図-6に示す。

§ 4. 施工結果

4-1 注入量・削孔時間

先行削孔工および三軸原位置攪拌工の標準削孔速度、引き上げ速度一覧表を表-1、また、各削孔工、攪拌工に用いる注入液の配合を表-2、標準注入量を表-3に示す。

先行削孔時の削孔時間と注入液（I液）の注入量の実績を表-4に示す。実施工における削孔速度は、場所によってかなりのばらつきが見られ、各深度毎の平均削孔速度は、GL-20～GL-40m区間で4.8分/m、GL-40m以深で15.7分/mであった。この削孔速度のばらつき、および所定の深度までの削孔に標準以上の時間を要した原因としては、場所によってGL-38～GL-40m付近の地層が硬いことによる。

注入液の使用量に関しても削孔時間と同様に、硬い地層がある場所では、表-3に示す標準注入量よりも多く使用する結果となった。

三軸原位置攪拌工については、先行削孔工により先掘されている孔の再削孔であることから、オーガ挿入時の削孔速度およびI液の注入量は、計画どおり施工でき、引上げ時（注入攪拌）の引上げ速度およびII液の注入量についても注入液の流出もなく計画どおりの施工が行えた。

三軸原位置攪拌時の注入液（II液）の注入量の実績を

表-1 標準削孔速度、引き上げ速度一覧表

工種		標準速度		
		削孔速度 (min/m)	引き上げ速度 (min/m)	
先行削孔工	ケーシング削孔	4.0	0.25	
	注入削孔	GL-40m まで	3.3	0.8
		GL-40m 以深	4.1	
三軸原位置攪拌工	GL-40m まで	2.4	0.5 (混合攪拌工)	
	GL-40m 以深	3.4		

表-3 標準注入量一覧表

工種		使用液	単位注入量 (ℓ/m)
先行削孔 (注入削孔)	削孔時	I 液	150
	引上時		55
三軸注入攪拌 (混合攪拌)	削孔時 (挿入時)		I 液 532
	引上時	底部 5m 区間	II 液 396
		底部 5m 以浅	

表-2 注入液配合表

工種		水 (ℓ)	調整スラグ (kgf)	フライアッシュ (kgf)	ペントナイト (kgf)
先行削孔	I 液	905	172	55	27
三軸原位置攪拌	I 液	900	217	40	15

工種		水 (ℓ)	セメント (kgf)	膨張剤 (kgf)	増粘材 (kgf)	ペントナイト (kgf)
三軸原位置攪拌	II 液	751	692	58	23	2.3

表-5 三軸原位置攪拌時のII液の注入量の実績一覧表

杭番号	施工長 (m)	注入量(引上げ時) 単位: ℓ (リットル)				
		配合 W/C %	実施量 GL-7.0m ~39m	実施量 GL-39m ~底部	累計	計画量
2	52.0	100	5,975	7,644	13,619	12,694
11	44.0	100	5,810	2,116	7,926	7,364
20	44.0	100	6,203	2,035	8,238	7,364
29	44.0	100	5,743	2,187	7,930	7,364
39	52.1	100	6,105	6,628	12,733	11,673

表-4 先行削孔時の削孔時間および注入液 (I 液) の注入量の実績一覧表

杭番号	施工長 (m)	基盤岩根入れ (m)	削孔時間 単位: min			注 入 量 単位: ℓ (リットル)				
			ケーシング削孔 0~20m	先行削孔 (削孔時)		先行削孔 (削孔時)			実施量計	計画量
				20~40m	40m~設計深度	20~40m	40~50m	50m~設計深度		
2	52.6	9.0	86	123	100	4,204	2,555	1,093	7,852	4,890
11	44.6	1.0	75	68	40	2,396	1,544	-	3,940	3,690
20	44.6	1.0	91	188	65	4,497	4,457	-	8,954	3,690
29	44.6	1.0	52	90	62	3,161	721	-	3,882	3,690
39	52.7	9.0	48	98	144	3,105	890	904	4,899	4,905

表-5に示す。

4-2 品質管理試験

品質管理試験としては、以下に示す2つの試験を実施した。

- ①現場室内試験
- ②サンプリング試験

(1) 現場室内試験

現場室内試験は、三軸原位置攪拌工において、原位置土と固化注入液 (II 液) を混合攪拌して作られたソイルモルタルを三軸原位置攪拌工終了後のGL-20mの孔内から専用の試料採取器を用いて、泥土状の状態にて採取し、現場にて室内試験を実施した。

室内試験は、材令7日、28日、91日について、簡易試

験器を用いて一軸圧縮強度と透水係数を調べた。現場室内試験の試験結果を表-6に示す。

試験の結果、止水壁の一軸圧縮試験では、1週強度が $q_{u7}=6\sim7 \text{ kgf/cm}^2$ ($59\times 10^4\sim 69\times 10^4 \text{ Pa}$) 程度であったが、4週強度は $q_{u28}=20.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($196\times 10^4 \text{ Pa}$) 前後となり、目標値である $q_{ua}=10.0 \text{ kgf/cm}^2$ ($98\times 10^4 \text{ Pa}$) 以上を満足する結果が得られた。さらに、材令91日の一軸圧縮強度は、目標値の3~4倍の強度が発現していることが確認された。ここで、杭NO.2、NO.39の一軸圧縮強度の増加が他の杭よりも顕著である。これは、試験的に注入量を各々40%、20%増加させたことによる結果であると考えられる。

止水壁の透水試験では、材令7日の透水係数の平均値が

表-6 現場室内試験結果

杭番号	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)			透水係数 (cm/sec)		
	材令7日	材令28日	材令91日	材令7日	材令28日	材令91日
2	6.4	22.7	40.7	1.25E-05	2.79E-06	3.68E-07
11	6.8	19.8	39.0	2.50E-05	1.18E-06	1.95E-07
20	6.1	17.4	28.1	1.98E-05	1.54E-06	2.40E-07
29	6.4	17.9	29.7	2.16E-05	3.30E-06	3.61E-07
39	6.3	21.7	35.0	2.63E-05	2.02E-06	2.79E-07

$k_v=2.1 \times 10^{-6}$ cm/secであった。しかし、材令28日の透水係数の平均値は、 $k_{28}=2.2 \times 10^{-7}$ cm/secとなり、目標値 (1.0×10^{-6} cm/sec) を満足する結果が得られた。

さらに、材令91日では、透水係数の平均値が $k_{91}=2.9 \times 10^{-8}$ cm/secとなり、ほとんど不透水性を示している。

(2) サンプル試験

サンプル試験は、原位置土と固化注入液 (II液) の混合攪拌によって作られた止水壁に対して、混合攪拌から28日目以降に、ボーリングを行い、φ86mmのコアを採取し、一軸圧縮試験、透水試験などを実施した。

サンプル試験の試験結果を図-7に示す。

試験の結果、止水壁の深度が深くなるにつれて一軸圧縮強度 (qu)、単位体積重量 (γ) が大きくなる傾向を示した。これは、採取したコアを観察した結果判ったこと

であるが、止水壁下部のコアには止水壁上部に比べ、削孔によって破碎された現地盤のφ30mm程度の礫が多く含まれていること、止水壁底部の5m区間では、II液 (固化液) を注入しながらの混合攪拌を2回行ったことにより、止水壁上部に比べてセメント混入率が多くなったことが要因として考えられる。

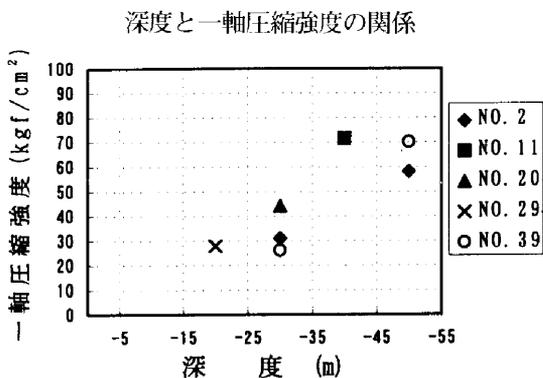
また、透水試験では、GL-20m位置の透水係数の平均値が $k_{20m}=1.40 \times 10^{-8}$ cm/sec、GL-50m位置の透水係数の平均値が $k_{50m}=5.21 \times 10^{-9}$ cm/secと大変小さな値を示し、止水壁がほとんど不透水性であるとの結果が得られた。

4-3 止水壁の連続性 (孔曲がり測定)

三軸原位置攪拌工の際に傾斜測定器によって計測した孔曲がり測定結果を図-8に示す。

本工事の止水壁の施工においては、連続したソイルモルタル地中壁を構築することが肝要である。

孔曲がり測定結果では、深度が深くなるにつれ、杭芯のズレが大きくなる傾向を示し、杭芯間離で最大40cmのズレが生じている。しかし、隣り合う孔の最小ラップ幅が150mmであり、計画最小ラップ幅 (100mm) を確保でき、当工事においては、連続したソイルモルタル地中壁を構築することができた。



深度と一軸圧縮強度の関係

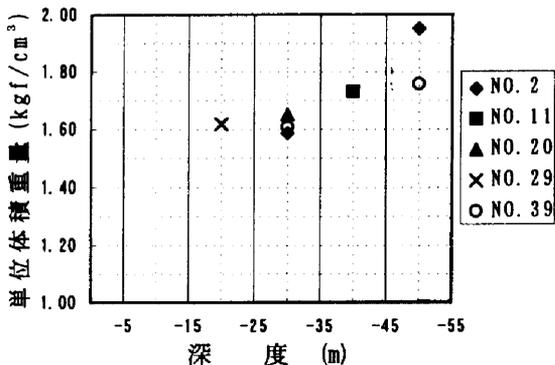


図-7 サンプル試験結果

§ 5. 根入れ確認システムの開発

5-1 システム開発の目的

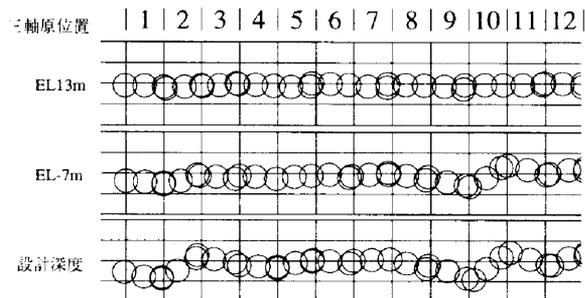


図-8 孔曲がり測定結果

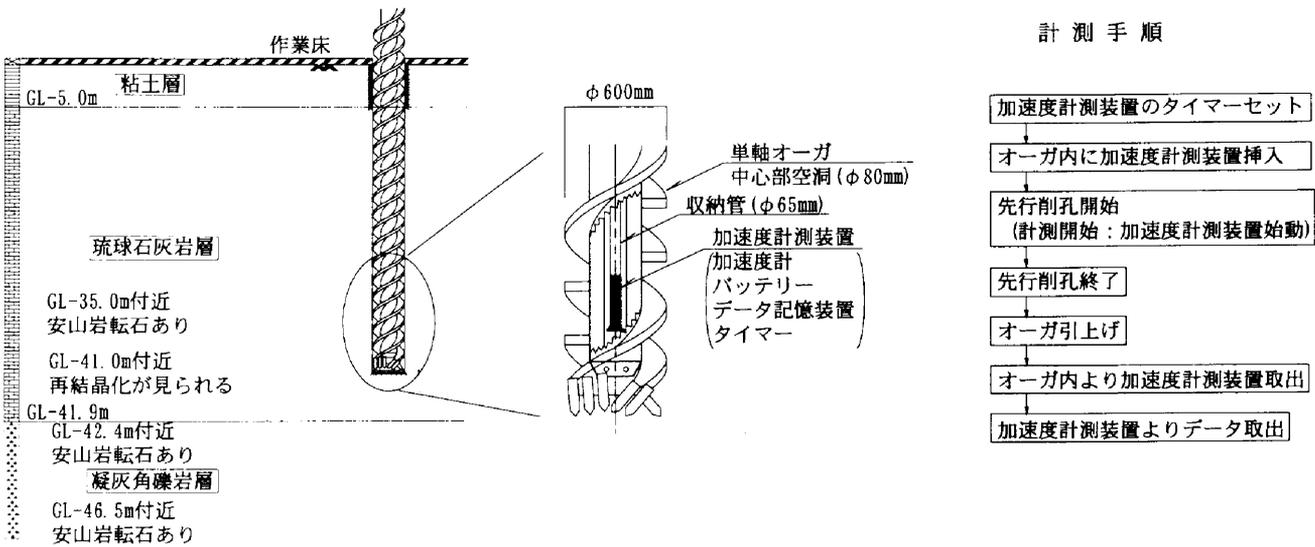


図-9 加速度振動計測概要図

今後の施工において、一部の区間では、地層の起伏が激しく基盤層の層境界が明確でない箇所がある。

そこで、その箇所を含め、先行削孔時に基盤層の層境界を把握し、止水壁の基盤層への根入れを確認できるシステムを開発する必要があると考えた。琉球石灰岩層と凝灰角礫岩層（基盤）の層境界を把握する方法としては、削孔する地層の違いによってオーガの振動が変化することに着目し、オーガの加速度振動を計測し解析処理する方法が考えられた。今回の確認工事では、この方法の有効性を確認する目的で先行削孔時のオーガ先端付近の加速度振動の計測を実施した。

5-2 試験概要

(1) 計測箇所

計測は、ボーリング調査を行い明確に地層が把握されている箇所で行った。計測箇所の地層構成としては、地表からGL-5.0mまで粘土層、GL-5m～-41.9mまで琉球石灰岩層、GL-41.9m以深に凝灰角礫岩層が堆積しており、所々（GL-35.4m～-47.0m付近）に、厚さ1.0m程度の安山岩があることが把握されている。そこで、計測は、GL-35.4m～-50.0mの約15m間について実施した。

(2) 計測方法

加速度振動計測は、削孔による振動の発生源に近いオーガ先端付近に新たに開発した小型の加速度振動計測装置（φ50mm×300mm）を設置しオーガの振動加速度の計測を行った。

加速度振動計測装置の概要図を図-9に示す。

5-3 計測結果

各層削孔時のオーガの振動加速度波形を図-10、各層

削孔時のオーガ振動加速度波形の1分間当たりの標準偏差の経時変化を図-11に示す。

計測したオーガの振動加速度波形の特徴としては、次のことがあげられる。

- ①琉球石灰岩、安山岩部の波形は他の箇所と明確な違いが見られる。
- ②琉球石灰岩再結晶部（再結晶部）と凝灰角礫岩部の波形には明確な違いが見られない。
- ③琉球石灰岩部は、全体的に小さく平均加速度は、0.3G（2.94m/s²）程度である。
- ④再結晶部は、4秒程度の間隔で大きな加速度値を示すが、平均加速度は1.2G（11.8m/s²）と小さい。
- ⑤凝灰角礫岩部においても所々、大きな加速度を示す箇所があり、平均加速度は2.2G（21.6 m/s²）程度である。
- ⑥安山岩部は、全体的に大きく、平均加速度は、5.3G（51.9m/s²）程度である。

各層削孔時の標準偏差の平均値としては、琉球石灰岩層2.3、再結晶部4.3、安山岩20.0、凝灰角礫岩層7.7であった。

5-4 考察

今回の計測により、以下のことが明らかになった。

- ①削孔時に錐先付近では、最大20～30G（196～294m/s²）程度の振動加速度が発生している。
- ②削孔時のオーガの振動加速度波形は、層毎に異なった形状を示す。
- ③オーガ振動加速度を統計処理することで、削孔箇所の地質の判別できる可能性がある。

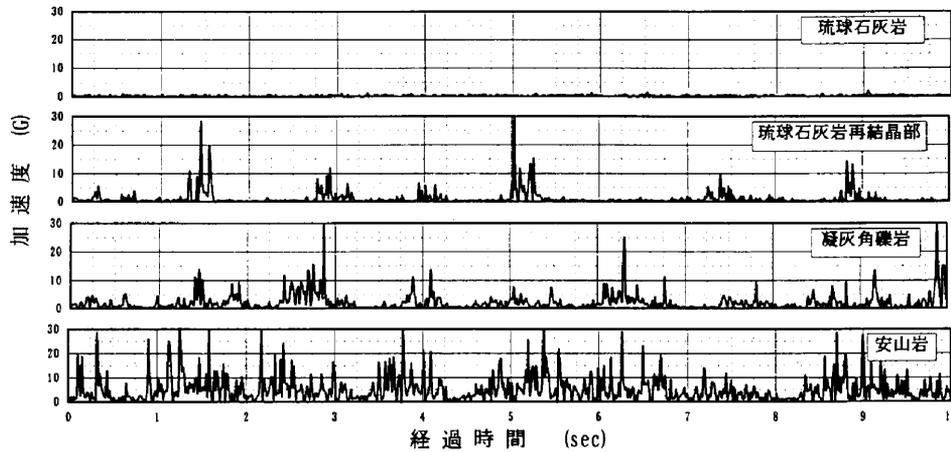


図-10 各層削孔時のオーガの加速度振動波形

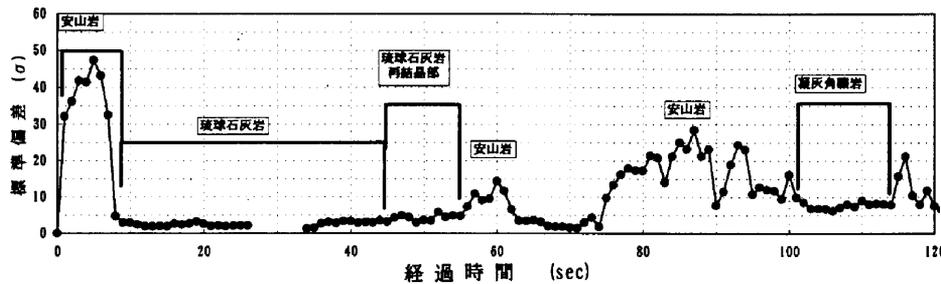


図-11 オーガ振動加速度の標準偏差分布図

§ 6. まとめ

止水壁の施工は、削孔時に一部の箇所では計画以上の時間を要したことを除けば、ほぼ計画どおりの施工が行えた。また、品質管理試験および施工時の孔曲がり測定結果などから、原位置土攪拌工法により施工した止水壁の

圧縮強度、不透水性および止水壁の連続性は、計画値を満足する値が得られた。

このことから、削孔時および注入攪拌時に使用した注入液の使用材料(表-7)が適切であったこと、さらに、止水壁構築方法として採用した原位置土攪拌工法の当該地盤への適用性については、問題ないことが確認できた。

今後の課題としては、今回の確認施工において、基盤層付近に堅い層を削孔する際、ベースマシンが大きく振動し、削孔精度に大きな影響は無かったものの、作業床にクラックが発生し、最大15mm程度の沈下がみられた。今後施工する箇所には、軟弱層(粘性土、琉球石灰岩風化層)が厚く堆積する箇所があり、削孔時に作業床およびガイドウォールの大きな沈下および変形が懸念される。そこで、高い削孔精度を確保し、安定した削孔作業を行うために、堅固な地盤の上に安定した作業床およびガイドウォールを構築および、振動を抑制する方法について検討していく必要があると考える。

根入れ確認システムについては、削孔する地盤によって、オーガの加速度振動に変化が若干見られたことから、今後、より多くのデータを収集し、データ処理方法の確立を行うとともに、リアルタイムにデータを地上に転送する方法の確立を含め、実際に施工に反映することが可能なシステムの開発を進めていきたいと考える。

表-7 注入液使用材料一覧表

種類	目的	使用材料	選定理由
I液 および I'液	逸水防止	調整スラグ	単独では水硬性は示さないが、セメントと混合し、水を混ぜると石灰分の刺激を受けて固化する。
	削孔抵抗の軽減	フライアッシュ	単独では水硬性はないが、セメントとの混合に対し、流動性を増し、減水作用・水密性が向上する。
	ブリージング防止	ベントナイト	水を混合すると吸水膨張し、材料分離を防止し、削孔に対しては滑りを良くするため削孔時の孔壁安定材として欠かせない。
II液	水和反応の補助	ベントナイト	水を混合すると水和反応し、強度を発揮する。
	孔壁安定	普通セメント	水を混合すると水和反応し、強度を発揮する。
	水和反応の促進(強度確保)	膨張材	石灰、石膏、アルミナなどを成分とし、セメントの水和反応に対して乾燥収縮、ひびわれ防止に効果。
	水密性の確保	増粘材(SK-20)	保水性が優れているため、セメントミルクの脱水現象を防止し、材料分離を抑制して攪拌時の抵抗を軽減。
耐久性の確保	ベントナイト	材料分離防止、孔壁安定。	