

回転式破碎混合工法を用いた 事前混合処理工法の実施例

二宮康治¹・赤神元英²・尾山利彦³・宮本光則⁴

¹日本国土開発㈱施工本部 土木部 (〒107-8466 東京都港区赤坂四丁九番九号)

²日本国土開発㈱施工本部 機電センター (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津4036-1番地)

³日本国土開発㈱札幌支店 施工部 (〒060-0002 北海道札幌市中央区北二条西四丁目二番)

⁴日本国土開発㈱札幌支店 羅臼作業所 (〒060-0002 北海道札幌市中央区北二条西四丁目二番)

事前混合処理工法は、土砂に少量の安定材（セメント等）と分離防止剤を事前に添加・混合し新材料にした後、所定の場所に運搬・投入してそのまま安定した地盤を造成する工法である。造成された地盤は、安定材のセメンテーション効果により粘着力が付加されるため、これまで埋立地盤の液状化対策として主に採用されてきた。また同時に土圧低減効果があることから、岸壁背面に適用した場合には構造物のスリム化や基礎地盤改良範囲の減少あるいは耐震性能増加効果も同時に期待できる。本工事では事前混合処理工法の土砂材料としてスレーキング性の軟岩を用いることから、事前処理として土砂材料の細粒化が必要となった。このため、土砂材料の細粒化と安定材の混合を同時に行える回転式破碎混合工法を適用した。

キーワード：事前混合処理工法、液状化防止、スレーキング防止、回転式破碎混合工法

1. 工事概要

漁港用地造成工事においてケーソン岸壁背面の液状化防止および埋め立て後の地盤沈下防止を目的に事前混合処理工法を採用した。用地造成の埋立面積は約20Ha、水深は14mである。埋立総土量約350,000m³の内訳は普通土（トンネル掘削土、礫混じり砂）が約250,000m³、事前混合処理に用いる材料は敷地造成工事から発生する軟岩（泥岩）とその風化土砂約100,000m³である。施工期間は平成13年度および14年度の2年間で計画されている。また、施工場所は流水が漂着することから12月から5月までは海水温度が0℃以下に低下する。

事前混合処理の材料として用いる泥岩はこれまでの調査および室内配合試験結果から、海水中にそのまま埋め立てた場合にはスレーキング現象が発生し、時間の経過とともに細粒化による地盤の沈下や液状化の発生が懸念された。このため、泥岩を細粒化することによりスレーキングが発生しない材料に加工すると同時に安定材（セメント）を混合して処理土とすることにより液状化防止を図る計画とした。

(1) 土砂材料の特性

土砂材料は泥岩および強風化泥岩である。泥岩は粗石分100%のいわゆる岩塊である。その一軸圧縮強さは $qu=6,410\text{kN/m}^2$ と大きいが、スレーキング率は25.1%、またその時の破碎率は35.7%であることから、埋め立て後、特に干潮帯においては確実にスレーキ

ング現象が発生し、細粒化による地盤沈下が生じる材料である。強風化泥岩は既にスレーキングによる細粒化が発生していることから、最大粒径が概ね50mm、砂分以上が79.2%の砂質土と見なせる。

表-1 土砂材料の室内試験結果

試験項目		弱風化岩	強風化岩
土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$		2.624	2.606
自然含水比 $W_n(\%)$		14.9	32.1
粒 度 試 験	最大粒径 $D_{max}(\text{mm})$	300	53.0
	粗石分 75~300mm(%)	100	0
	礫分(%)	0	64.8
	砂分(%)	0	14.4
	シルト分(%)	0	11.1
	粘土分未満(%)	0	9.7
	均等係数 U_c	1.8	1540
	曲率係数 U'_c	1.0	12.8
液性限界 $w_L(\%)$		57.6	63.5
塑性限界 $w_P(\%)$		34.6	39.0
塑性指数 $I_P(\%)$		23.0	24.5
吸水率 (%)		22.7	—
密度 (g/cm^3)	ρ_t	1.950	—
	ρ_d	1.661	—
スレーキング率 (%)		25.1	—
破碎率 (%)		35.7	—
一軸圧縮強さ (kN/m^2)		6,410	—

(2) これまでの試験結果の概要

埋立材料がスレーキング現象により細粒化し、しかも液状化の恐れがあることから、最大粒径を変化させた配合試験を実施した。目標強度は液状化防止が図れる一軸圧縮強さ $q_u=100\text{kN/m}^2$ とした。その結果、最大粒径を5mm以下とすることにより安定材添加量は $96\sim 110\text{kg/m}^3$ となるが、最大粒径が20mmを越すとこの数倍の添加量となることを確認した。

2. 事前混合処理工法¹⁾の概要

事前混合処理工法は土砂に安定材を添加混合後、分離防止剤を噴霧して安定材と土砂の分離を防止し、埋立後に液状化しない安定した地盤を造成する新しい地盤改良工法である。これまで表-2に示すように11件、改良土量約90万 m^3 の実績がある。工法採用の目的は液状化防止が最も多く、耐震補強の事例では地震災害後の既設岸壁背面液状化防止や土圧低減の目的での適用例が増加しつつある。

表-2 事前混合処理工法の実績

工事名称	目的	数量 (千 m^3)	時期
東京湾横断道路	人工島 耐震補強	433	H4.4~ 5.3
石狩湾新港	岸壁背面 液状化防止	56	H5.6~ 6.3
新潟空港	滑走路 液状化防止	115	H5.7~ 6.3
神戸港災害復旧 (3件)	岸壁 耐震補強	230	H7.3~ 8.9
東通原子力 発電所	岸壁背面 液状化防止	31	H11.6~ 11.8
伏木富山港 (2件)	岸壁背面 液状化防止	21	H11.12 ~12.2
境港災害復旧 (2件)	岸壁背面 液状化防止	13	H13.11 ~14.1
合計		899	

(1) 混合設備

事前混合処理工法の混合設備は、表-3に示すように施工能力から2種類の設備がある。設備規模の選定は、混合処理量や工期および経済性を総合的に判断して決定する。設備の構成は図-1に示すように土砂の貯蔵・定量供給設備、安定材の貯蔵・定量供給設備、材料の搬送・混合設備、分離防止剤製造・添加設備および製造量・安定材添加率を管理する施工管理システムから成る。

この工法は土砂と安定材の混合にベルトコンベヤの速度とその接続部に設置したダンパーを用いている。このため、施工能力が大きく経済性に優れるが、混合可能な材料は、礫質土や砂質土など土粒子が容易に分離することが必要である。また、ダンパーによる混合方式を採用していることから、土砂の含水

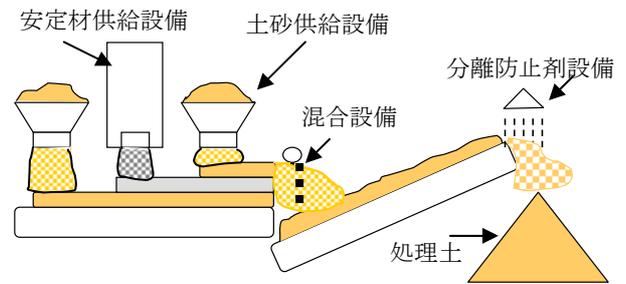


図-1 事前混合処理設備

比が大きくなると混合時のばらつきが大きくなる。このため、施工可能な含水比は概ね $\omega=15\%$ 程度である。

表-3 事前混合処理工法設備の概要

規格	B500	B900
混合処理能力	125 m^3/h	250 m^3/h
適用可能な材料	砂礫・砂質土：砂分以上85%	
土砂最大粒径	100mm	50mm
含水比	$\omega=15\%$ 以下	
適用工事規模	小規模 1~3万 m^3	大規模 3万 m^3 以上

(2) 処理土の工学的特性

処理土は礫・砂質材料に安定材を混合して製造されるため、材料土砂が当初から持っているせん断抵抗角 ϕ と安定材により付加された粘着力 c をもつ特有なせん断強さを保有する新材料である。

この粘着力の効果により液状化防止や土圧低減が可能となる。液状化防止に必要な強度は、今までの研究から一軸圧縮強さ $q_u \geq 100\text{kN/m}^2$ である。また、土圧を算定する時の粘着力 c は次式で算定する。

$$C_d = \frac{q_{ud}}{2 \tan \left(45^\circ + \frac{\phi_{d0}}{2} \right)}$$

ここに、 C_d ：処理土の粘着力 (kN/m^2)

q_{ud} ：処理土の一軸圧縮強さ (kN/m^2)

ϕ_{d0} ：未処理土のせん断抵抗角 ($^\circ$)

また、処理土の透水係数は未処理土に比較して1オーダー低下して概ね $10^{-2}\sim 10^{-4}\text{cm/s}$ となるが粘性土のような不透水性材料とはならない。したがって処理土のせん断強度を求めるためには三軸圧縮試験においてはCD試験を適用する。

(3) 一軸圧縮強さと乾燥密度

処理土の一軸圧縮強さは図-2に示すように乾燥密度と密接な関係がある。すなわち、乾燥密度が大きくなると一軸圧縮強さが指数関数的に大きくなる。したがって、施工時の埋め立てた処理土の密度増加が品質確保を図るために重要である。

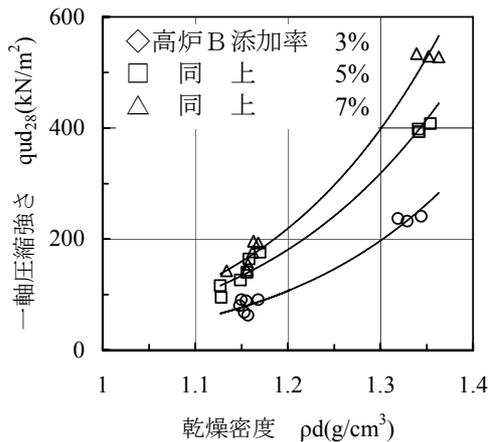


図-2 処理土の一軸圧縮強さと乾燥密度の例

(4) 安定材の種類と添加率

これまでの研究と実績から、安定材は高炉セメントB種を用いている。高炉セメントB種を用いる理由は、耐海水性（強度発現）が最も重要なファクターである。この結果、必要な強度を確保するための安定材添加率が小さくなり、さらに沖縄県を除く地域では、高炉セメントB種が普通ポルトランドセメントに比較して安価なことから経済性も同時に実現している。および高炉Bセメントは、セメント処理土に要求される六価クロム溶出抑制にも効果があることが確認されている。

安定材添加率は材料土砂の種類と改良目的により差異がある。現在までの実績添加率は表-4に示すように概ね3~7.5%の範囲にある。液状化防止に限定すればその範囲は3~5.6%である。

表-4 安定添加率と処理目的

目的	土砂の種類	安定材添加率 (%)
液状化防止	浚渫砂	3.0, 4.0
	裏埋め砂	5.6
液状化防止 支持力増強	購入山砂	7.5
土圧低減	まさ土	7.5

(5) 本工事に適用する場合の課題

本工法の標準的な混合処理設備は、従来、浚渫砂や購入山砂など混合が容易な材料の大量・急速施工に最適なシステム構成である。したがって、本工事の材料のように泥岩や風化泥岩など固結した材料を破碎混合する機能は備えていない。このため、この工法を本工事の材料に適用するためには、事前処理として泥岩の破碎工程が別途必要となる。

また、施工時期が冬季になることから海水中に埋立て後の処理土の養生温度が約0℃と極めて低い。さらに、このような極低温での施工実績が無いことから、その強度発現を阻害されることが懸念された。

3. 回転式破碎混合工法の概要²⁾

回転式破碎混合工法は、礫材や粘性土塊材料の破碎とセメントやベントナイトなどの添加材との混合が同時に行える新しい工法である。破碎混合は高速回転する複数本・数段のチェーンの衝撃力・せん断力により、装置内部を落下する材料の破碎と混合を同時に行う。

このような特長から、従来再生利用が困難であった礫混じり土やアスファルト殻あるいはコンクリート混じり土砂などの建設発生土の破碎混合処理に最適な工法である。

(1) 破碎混合原理

破碎混合原理は、土砂・石炭灰および添加材などの混合材料をベルトコンベアによって混合装置の上部に定量供給し、その落下エネルギーを有効利用している。破碎混合原理、構造および特徴を表-5に示す。

表-5 回転式破碎混合工法の原理・構造および特徴

名称	ツイスター工法
混合原理	高速回転する多段チェーンによる衝撃・せん断+重力
構造	リンクチェーン：土質に応じた本数・段数 破碎室：φ1,000~1,500 全高：3.4~5.0m 回転数：0~1,000rpm
特徴	破碎・混合
適用土質	粘性土、砂質土、礫質土、軟岩 脱水ケーキ、コンクリート殻
施工能力	30~100m ³ /h

(2) 構造

本工法の破碎混合機は、水平方向に高速回転（500~1,000rpm）するリンクチェーン（土質に応じた本数・段数に変更可）により破碎混合する機構である。チェーンによる衝撃・せん断を行うため、材料中の大礫や小枝等の異物による故障が生じにくく、多様な土質材料への適用が可能である。図-3に破碎混合機の構造を示す。

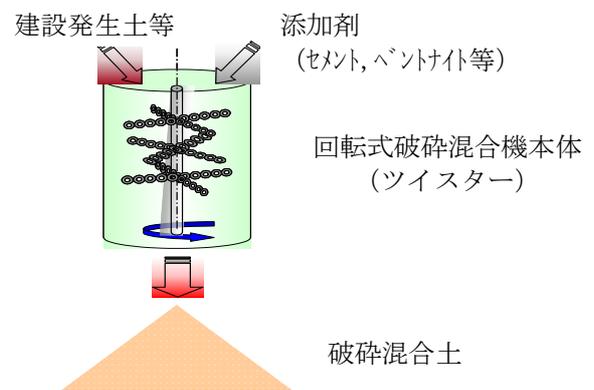


図-3 回転式破碎混合機

(3) 他工法との比較

回転式破碎混合工法は、既存の工法と異なり一台の機械で破碎機（クラッシャ）の機能と混合機（ミキサ）の機能を併せ持つ。この工法が適用可能な材料は、礫質土・軟岩・粘性土塊およびコンクリート・アスファルト殻など、従来は事前処理として一次破碎や除去が必要な材料についても可能である。さらに混合された材料の粒度構成が大幅に改善されるため、原材料に比較して施工性や取り扱いが向上し締固めが容易となる。その結果、強度や遮水性などの性能が向上する。また、破碎が可能であることから今後はリサイクル分野での利用や適用範囲の拡大が期待される。本工法と従来から採用されている既存機械の組み合わせを考慮した破碎混合工法の比較例を表-6に示す。

表-6 破碎混合工法比較

工法名	回転式 破碎混合工法	自走式破碎機 および混合機
破碎混合方式	リンクチェーン 高速回転	破碎：ジョークラッシャ 混合：インパクトクラッシャ・2軸ミキサ
適用材料	粘性土～礫質土 最大粒径 $\leq 300\text{mm}$ 砂礫、軟岩、コンクリート・アスファルト殻	粘性土～礫質土 最大粒径 $\leq 500\text{mm}$ 砂礫、軟岩、コンクリート・アスファルト殻
混合品質	優	良
特徴	破碎混合	破碎+混合
施工能力	150～500 m^3 /日	500 m^3 /日
経済性	○	△
用途	遮水土、路盤・路床・埋戻、リサイクル	遮水土、路盤・路床・路体・裏込・埋戻

(4) 回転式破碎混合設備の構成

回転式破碎混合設備は、表-7に示すように施工能力から2種類の設備がある。設備規模の選定は、混合処理量や工期および経済性を総合的に判断して決定する。設備の構成は図-4に示すように土砂の貯蔵・定量供給設備、安定材の貯蔵・定量供給設備、材料の搬送・破碎混合設備および製造量・安定材添

加率を管理する施工管理システムから成る。さらに、必要に応じて加水設備を設けることにより、含水比調整が可能な設備構成とすることが出来る。

この工法と事前混合処理工法の大きな違いは、破碎混合設備にある。前者は破碎混合に回転式破碎混合設備（ツイスター）を用いるが、後者は混合をベルトコンベヤの乗り継ぎ部に設置したダンパーで行う。これらのことから回転式破碎混合工法とは、事前混合の処理設備に回転式破碎混合機（ツイスター）追加したことになる。この破碎混合設備の追加により利点としては破碎機能が付加されたことが挙げられるが、一方この追加により処理能力の低下という短所が発生する。

表-7 回転式破碎混合設備の概要

規格	D1000	D1500*
混合処理能力	30 m^3 /h	50 m^3 /h
適用可能な材料	砂礫、砂質土、粘性土 軟岩、コンクリート・アスファルト殻、スラッジなど	
土砂最大粒径	100mm	200mm
含水比	$\omega=50\sim 60\%$ 以下	
適用工事規模	小規模 1～3 km^3	中規模 3千～2万 m^3

*2万 m^3 以上の大規模工事ではD1500×2台とした100 m^3 /h級を用いる。

(6) 処理土の工学的性質

回転式破碎混合工法は、従来の設備と異なり破碎・混合を同時に行い、その時に土砂材料の細粒化と空気が混合した不飽和土となる。この結果、原材料が粘性土であっても締固め等の施工性が大幅に向上する。

また、添加剤としてはセメントおよびベントナイトなど任意の材料を加えることが可能なため、元の材料の工学的性能と大幅に異なる材料を製造することが出来る。表-8にその一例を示す。同表では強度が必要な場合と遮水性能が必要な場合の2例を示している。いずれの材料土砂においても建設発生土を場内で有効利用するには、前処理として一次篩い後の破碎が必要な材料であったが、回転式破碎混合

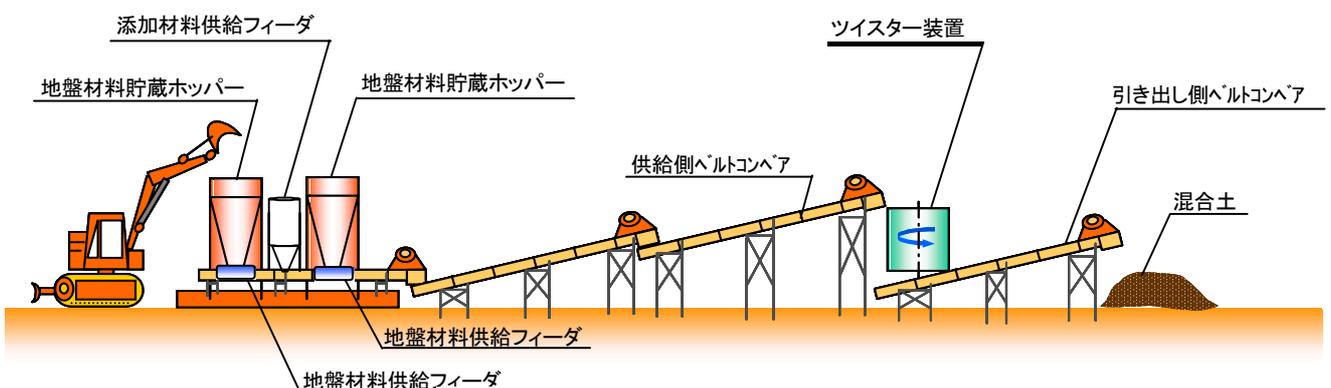


図-4 回転式破碎混合設備

表-8 破碎混合土実績および品質例

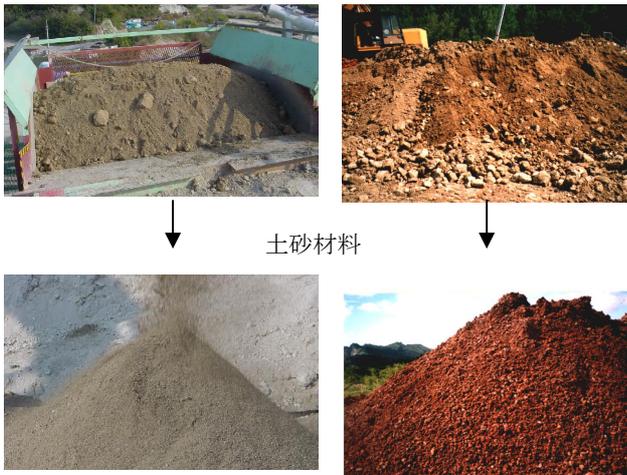
	目的	調整地法面保護	処分場遮水土 ³⁾
土砂材料	種類	風化花崗岩 マサ土	凝灰質角礫岩 粘性土
	最大粒径	300mm	200mm
	含水比	10~13%	礫岩 25~30% 粘性土 50~70%
添加剤	種類	高炉Bセメント	ペントナイト
	添加率	5.0%	5.0%
	変動係数	5~10%	—
処理土品質	含水比	12~14%	32.2~36.7%
	最大粒径	26.5mm	37.5mm
	一軸圧縮強	1,000kN/m ²	—
	締固め度	95%以上	96%以上
	透水係数	—	4~7×10 ⁻⁶ cm/sec

工法を採用することにより所要の品質の確保と経済性を両立することが可能となった。

表-8の実施例での土砂材料と破碎混合後の処理土の状況を写真-1に示す。写真のように、回転式破碎混合機での処理土は大きな礫を破碎することから粒度分布の改善と均質な材料製造が可能となる。

調整池法面保護

処分場遮水土



破碎混合土

写真-1 破碎混合処理土の例

4. 実施工状況

(1) 回転式破碎混合工法採用までの経緯

工事発注後事前混合処理設備を用いた混合処理が可能で、かつ 10mm 以下に破碎可能な工法を種々選択し、試験施工を行った。最初に自走式クラッシャ（ジョークラッシャ）を用い破碎実験を行った。その結果、ジョークラッシャではその破碎機構から固い岩石やコンクリート殻などの脆性材料には適しているが、泥岩など練り返しによる強度低下が著しい材料においては破碎が行えず、泥岩が粘性土となる

状況が発生した。また、更にバックホウによる掘削後、その掘削土砂を振動篩を用い 10mm 以下に選別する方法を試行した。試行の結果、この方法では事前混合処理に必要な材料供給 V=1,000m³/日に比較して約 1/100 の材料製造が限界であることが判明した。このため新たな泥岩の破碎工法を選択し、回転式破碎混合工法がその候補となった。

(2) 事前破碎実験

回転式破碎混合工法の泥岩への適用性を確認するために破碎実験を 2 回実施した。1 回目は破碎可能性と破碎能力の確認実験である。この実験により概ね所要の粒径の材料が製造可能であることから、2 回目の実験では粒径 10mm 以下の製造率を向上する対策を実施した。なお、実験装置の規格は D1000 型（混合処理能力 30m³/h）の実機を用いた。

実験の結果を表-9、図-5に示す。図-5には破碎前の弱風化岩、強風化岩の粒度分布と実際に施工する弱風化岩と強風化岩の混合材（4:1）について破碎した結果を示す。実規模実験の結果、混合材料については最大粒径 300mm の材料が Dmax=26.5mm となり、しかも粒径 10mm の通過率が 92%を超えることを確認した。

表-9 試験結果

試験項目		弱風化岩：強風化岩 4:1（乾燥質量比）	
土粒子の密度試験 ρs(g/cm ³)		2.620（合成密度）	
自然含水比 wn(%)		16.8	
粒度	最大粒径 Dmax(mm)	26.5	
	粗石分(%) 75mm~300mm	0	
	礫分(%)2~75mm	49.0	
	砂分(%)75 μm~2mm	51.0	
シルト分(%)5~75 μm			
試験	粘土分(%)5 μm 未満	4.6	
	均等係数 Uc		
	曲率係数 U'c		0.3
	5mm 以下(%)		71.2
	10mm 以下(%)	92.2	

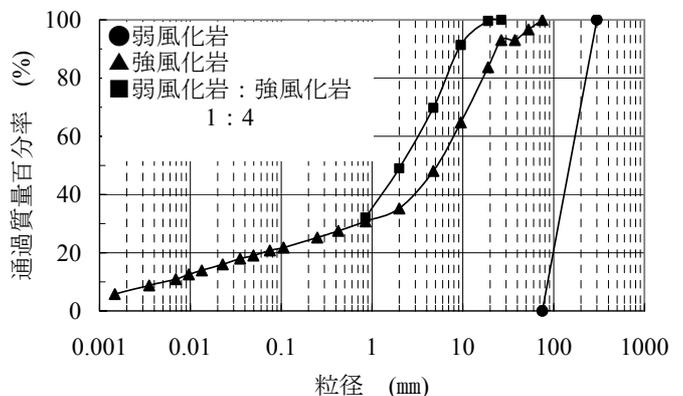


図-5 事前破碎試験結果

これらのことから、本工事での適用性を確認して工法の採用を決定した。

(3) 設計・施工条件および課題

工事の目的は前述のように岸壁背面の裏込め土の液状化防止とスレーキング防止である。液状化防止対策は事前混合処理土とすることから一軸圧縮強さ $qu=100\text{kN/m}^2$ を設計強度とした。また、スレーキング防止は破碎後の泥岩の最大粒径を 10mm 以下とすることにより対処した。

さらに、埋立の最大水深が 14m であることから安定材の分離防止方法の選択や冬季には海水温度が氷点下になることからその強度発現の確実性が課題となった。

表-10 設計・施工条件および施工方法

工事名称	羅臼漁港用地造成工事
目的	岸壁背面液状化・スレーキング防止
設計強度	一軸圧縮強さ $qu=100\text{kN/m}^2$
安定材	高炉セメント B 種 添加率 $C=15.5\%$
分離防止剤	事前混合処理土用 90mg/kg
施工条件	埋立水深 $D=14\text{m}$
埋立方法	ブルドーザ埋立 $D \leq 5\text{m}$ クラムシェル埋立 $D \geq 5\text{m}$
課題	安定材分離防止 低温養生時の強度発現

(4) 施工結果

a) 施工方法

埋立材料の最大粒径は、回転式破碎混合工法設備の材料定量供給設備の制限から 200mm 以下にする必要があった。このため、埋立材料の採取はバックホウ 0.6m^3 級で掘削後、自走式クラッシャーで一次破碎後ダンプトラック 10t で処理設備に運搬した。処理設備への材料投入はバックホウ 0.6m^3 級で行い、処理土の積込・運搬はトラクタショベル 2.8m^3 級を使用した。処理土の埋立は安定材の分離防止と密度増加を図るため、埋立深さ 5m 以深はクラムシェル 0.6m^3 級で埋立・水中転圧を行い、5m より浅い部分はトラクタショベル 2.8m^3 級で撒きだし後、バックホウ 0.6m^3 で仕上げを行った。なお、造成地内には処理土と普通土を同時に埋め立てるため、海中での

埋立材の混合を防止する目的で予め水中に大型土嚢製の堰堤を設置した。

b) 施工設備

施工設備は工期短縮を図り、厳寒期の施工を避けるため、 $30\text{m}^3/\text{h}$ 級×1セットと $50\text{m}^3/\text{h}$ 級×1の合計2セット設備して昼夜施工を行った。図-6に $50\text{m}^3/\text{h}$ 級設備の概要を示す。破碎混合処理設備は、左方から材料供給設備（土砂ホッパ 4m^3 土砂フィーダ付）、安定材供給設備（セメントサイロ 30t サービスタンクフィーダ付）、材料搬送設備（ベルトコンベヤ B500）、破碎混合設備（D1500 $50\text{m}^3/\text{h}$ 級）、および分離防止剤設備（スプレー噴射）からなる。

c) 処理土の製造

処理土の製造は最大粒径 200mm 以下に粒度調整した材料土砂（風化泥岩）を土砂ホッパに投入し、その下部に設置したベルトフィーダから定量供給した土砂に安定材を所定量添加した後、破碎混合機までベルトコンベヤで搬送する。土砂と安定材の混合材料は、装置内をベルトコンベヤの搬送速度で自由落下する間に高速回転するリンクチェーン（800rpm, 4段×4本 最上部には高張力鋼のブレード設置）により破碎混合する。破碎混合した材料は、ベルトコンベヤで土工機械による積み込みが容易となる高さまで搬送する。この最後尾に設置したベルトコンベヤの端部から分離防止剤を溶解した液体をスプレーノズルを用い所定量噴霧添加する。

d) 安定材添加率

安定材添加率は、事前混合処理工法技術マニュアル¹⁾にしたがって決定した。安定材の種類は、これまでの実績から耐海水性に優れる高炉セメント B 種を選定した。事前混合処理土の室内配合試験は埋立施工を考慮した試験方法を採用している。このため、通常のセメント安定処理土に比較して極めて小さい密度になる。このことから安定材添加率に比較して強度が小さいのが一般的である。試験は回転式破碎混合機で製造後 5mm 以下に粒度調整した材料を 2 密度、3 添加率について行った。さらに、粒径の差が強度発現に及ぼす影響を把握するため最大粒径を 10mm としたケースについても行った。

図-7に室内配合試験結果（材齢28日）を示す。乾燥密度の増加とともに強度が指数関数的に増加しており、この傾向は安定材添加率に関わらず同様である。また、添加率20%について材料粒径5mmと

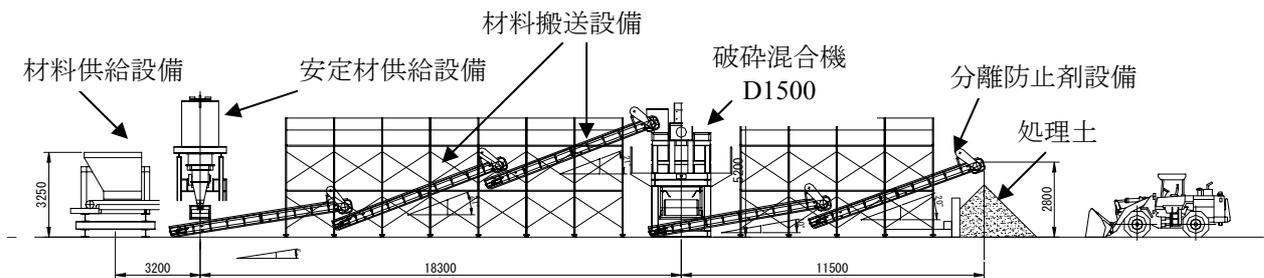


図-6 回転式破碎混合設備（ $50\text{m}^3/\text{h}$ 級）

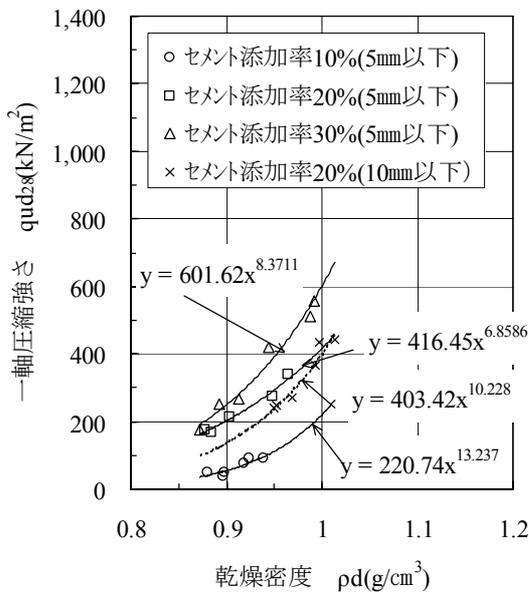


図-7 室内配合試験結果

10mmの比較を行った結果、乾燥密度が $\rho_d=0.95\text{g/cm}^3$ 近傍では顕著な強度差が認められないことから最大粒径10mmの材料を使用しても品質に差異が生じないと判断した。

図-7の結果を整理し、現場での埋立後の処理土乾燥密度を $\rho_d=0.95\text{g/cm}^3$ とした場合のセメント添加率と一軸圧縮強さの関係を図-8に示す。ここで、設計強度が一軸圧縮強さ $qu=100\text{kN/m}^2$ であることから強度の割増係数を $\alpha=2.0$ とし、材齢28日の配合強度が $qud=200\text{kN/m}^2$ となる安定材添加率 $C=15.5\%$ を決定した。

さらに、低温養生時のセメント安定処理土の強度発現は標準養生に比較して遅れるが、養生日数の増加に伴い標準養生と同等の強度が期待できる⁴⁾ことから、養生温度による割増係数の変更は考慮しないこととした。

また、セメント処理土に必要とされる六価クロムの溶出量は材齢7日での溶出試験の結果、土壌環境基準値を満足した。

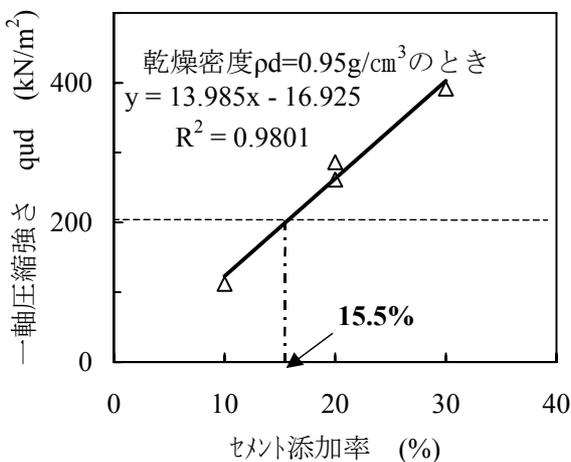


図-8 セメント添加率と一軸圧縮強さ

e) 破碎状況

本施工に先立ち、必要な粒径の材料を製造するために破碎混合機の運転条件選定実験を行った。その結果を図-9に示す。運転条件はリンクチェーンの段数およびその回転数である。各ケースの運転条件は、①は3段、750rpm②は4段、750rpm③は4段、900rpmである。ヒストグラムはそれぞれの運転条件での破碎前の材料の10mm以下および5mm以下の通過率を示している。

この結果から、運転条件をケース③4段、900rpmとすると破碎材料の10mm以下の通過率は94.5%、5mm以下の通過率は77.1%とほぼ目的とする破碎効果が得られることを確認し、この条件で設備の運転を行った。

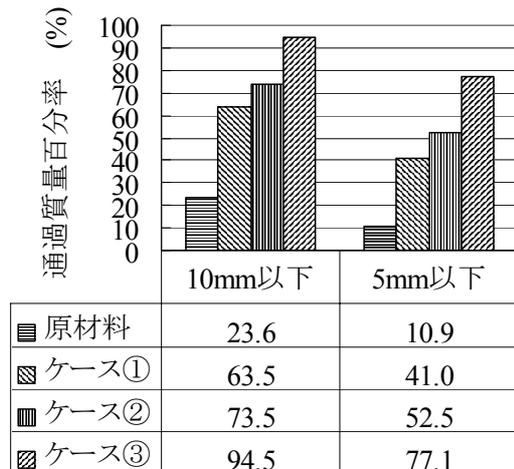


図-9 現地破碎試験結果

f) 施工管理方法および結果

日常の施工管理は表-11に示す項目について行った。含水比の測定値は最小 $\omega=29.0\%$ 、最大で $\omega=37.5\%$ 、平均値で $\omega=33.8\%$ と泥岩の地山を掘削していることから大幅な含水比の変動は見受けられなかった。また、破碎混合設備で製造直後の処理土をサンプリングし強度試験を行った結果、一軸圧縮強さの平均値で $\sigma_{28}=453\text{kN/m}^2$ が得られた。この破碎混合材料は海水中に埋立前の材料であることから安定材の分離が生じていないこと、および供試体の密度が $\rho_d=1.02\text{g/cm}^3$ と想定値と比較して大きなことなどから室内配合強度 $qud=200\text{kN/m}^2$ を上回る値となったと考えられる。

破碎混合機で破碎前後の泥岩の状況を写真-2に示す。上段が破碎前、下段が破碎後である。写真から明確に分かるように、破碎混合後の材料は大きな礫が破碎され、概ね90%以上が10mm以下の材料となっている。

表-11 施工管理項目および頻度

項目	頻度	結果(平均値)
含水比 ω (%)	2回/日	33.8
一軸圧縮強さ qu (kN/m^2)	1回/2,000 m^3	σ_7 229 σ_{28} 453



破砕前泥岩（最大粒径 200mm）



破砕後泥岩（最大粒径26mm）

写真-2 泥岩の破砕状況

g) 施工実績

本工事は秋から厳冬期の施工となることから、施工期間が限られ昼夜施工を実施した。この結果、稼働日数 47 日に対して埋立実績（出来高） $V=372\text{m}^3/\text{日}$ （昼夜）、本年度の出来高数量は $V=17,513\text{m}^3$ であった。また、破砕混合機の作業能力は $30\text{m}^3/\text{h}$ 級と $50\text{m}^3/\text{h}$ 級を合計した平均値で1時間当たり製造能力（扱い数量）は $V=43\text{m}^3/\text{h}$ であった。この実績から作業効率 λ を算定すると $\lambda=0.54$ となり、当初想定した $\lambda=0.75$ と比較して小さな効率となった。この原因は破砕後の最大粒径が制限されたため、機械の回転数を大きくしたことによる破砕・混合効率が低下したものと考えられる。

さらに、破砕混合設備での製造量が扱い数量となることから、埋立完了後に実測して求めた出来高数量との比（陸上土工での土量換算率）を求めると、

表-12 施工実績

使用設備	$30\text{m}^3/\text{h}$ 級×1 $50\text{m}^3/\text{h}$ 級×1
出来高数量（ m^3 ）	17,513
稼働日数（日）	47
埋立実績（ $\text{m}^3/\text{日}$ ）	372
製造数量（扱い m^3 ）	22,400
製造能力（扱い m^3/h ）	43
作業効率	0.54
土量変化率	1.28

$C/L=1.28$ が得た。この値は港湾工事で採用されている裏込め材料の割増率 25%に近似した値となった。

h) 処理土の品質

処理土の品質については埋立完了後ボーリングによりコアを採取し、一軸圧縮試験により確認する予定である。なお、一軸圧縮強さが $q_u=100\text{kN}/\text{m}^2$ と小さいため、コアの採取はトリプルコアチューブサンプラーを使用する。

また、同時に埋め立て後の養生温度が強度に及ぼす影響についても、現在室内試験中である。その途中経過では、事前混合処理土についても養生温度が低いことに関わらず強度発現と積算温度に密接な関係があることを確認済みである。このことから、埋立地盤の品質は設計強度を満足すると考えられる。

4. まとめ

この論文では事前混合処理工法に回転式破砕混合工法を採用した最初の実績を紹介した。従来、事前混合処理工法においては礫質土や砂質土などが適用可能な材料であったが、今回の実績により泥岩などより広い範囲の材料が適用できることを示した。さらに、第三紀層の泥岩や頁岩類など、施工後のスレーキングが課題となる材料についても、細粒化することによりその現象を抑止出来ることから、これまで土構造物として用いるには課題のあった部分へ適用が可能なことを示した。

今後は、今回実施した軟岩類以外にもコンクリート・アスファルト殻と建設発生土の破砕混合など従来の破砕・混合設備では施工的あるいは経済的に困難な材料についても回転式破砕混合工法の適用を図る予定である。土木工事の現場で発生する建設発生土の有効利用を通じて土木材料のリサイクル促進を図ることは建設産業にとって重要な課題である。今回紹介した回転式破砕混合工法は、有効利用範囲をさらに拡大できることからリサイクル促進の有効な手段と考えている。

最後に、本工法を採用するに当たり、ご指導ご指摘を頂いた北海道開発局釧路開発建設部羅臼漁港建設事業所の中内前所長、伊東前技術主任および所員の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター：事前混合処理工法技術マニュアル、1999。
- 2) 二宮康治、徳田順司、芳澤秀明：新しい混合技術の実施例、最新の施工技術・14、土木学会 土木施工委員会、pp.51-60、2001。
- 3) 二宮康治、佐藤 泰：回転式破砕混合（ツイスター）工法による遮水土層の造成、電力土木、No.298、pp.99-102、2002。
- 4) 大住明夫、三島信雄：セメント・石灰による土の安定処理、試験所報告、日本道路公団試験所、pp.1-13、1976。