

六甲山系における砂防ソイルセメントの活用について

長渡 祐樹¹

¹近畿地方整備局 六甲砂防事務所 調査課 (〒658-0052兵庫県神戸市東灘区住吉東町3-13-15)

六甲山系の砂防事業は、国立公園内であることや良好な自然環境の保全の観点から索道を主体とした施設整備が行われている箇所が多く、建設される砂防施設は調達の容易なコンクリートが主体である。一方、建設現場で発生する掘削残土は、リサイクル率が低く、その大半は残土処分している。このような事業実施の背景を踏まえ、残土のリサイクル・建設コスト縮減を図るため、六甲山系砂防事業における「ソイルセメントの活用方針」を工事条件と配合特性の両面から検討した。

キーワード 砂防ソイルセメント、流動タイプ、簡易配合試験

1. はじめに

六甲山系の砂防工事は、神戸市を主体とする市街地に面した斜面・渓流や国立公園内で実施する特性から、工事用道路の建設が困難であり、建設車両の運搬や施工開始後の現地発生土砂の移動手段には索道が用いられる場合が多い。したがって、砂防工事の実施にあたり、常に索道を主体とした大掛かりな仮設や建設発生土砂の処分が課題となっている。このような課題を解決するための一つの手法として砂防ソイルセメント工法「INSEM工法 (IN-situ Stabilized Excavation Materials)¹⁾」の有効性について検討を行った。「INSEM」とは現場発生土をその場に固化、定着させるという意味であり、平成10年に住吉川流域西滝ヶ谷で施工された実績を契機に現在、3基の実績がある。本報告では、砂防ソイルセメント工法の更なる活用を目指し、現地特性に応じた工法採用の使い分けや活用する土砂の大半を占める六甲花崗岩（強風化花崗岩）の強度特性について検討した結果を説明する。

各々のタイプに対する使い分けの面も含めて検討した。

INSEM-Cタイプは、混合枺内に材料を投入した後に、バックホウ・クローラ等により小運搬を行い、打設面で振動ローラを用いて締め固める工程となる。したがって、砂防堰堤の施工の場合、振動ローラを砂防堰堤の天端まで搬入・搬出する必要がある。INSEM-Cタイプの活用の課題として、打設面（基礎～袖天端）に振動ローラを搬入・搬出ができるクレーン設備が必要となること、ソイルセメント材の捲き出しのためのバックホウが必要となることが挙げられる。続いて、INSEM-FタイプはINSEM-Cタイプと同様の製造設備を用いて攪拌・混合を行うことができるが、生コンクリートと同様に有スランプの材料であることから、アジテータ車や移動式プラント等の生コンクリートと同様の混合設備を用いてソイルセメント材の製造を行うこともできる。製造後の打設は、生コンクリートと同様にバケット等で打設し、堤体を構築する。また、INSEM-Fタイプの特徴として、INSEM-Cタイプでは活用できない礫のサイズ（80mm以上）も使用でき、更なる残土処分が期待できる。

2. 砂防ソイルセメント工法の適用箇所の検討

(1) ソイルセメント材の使い分け

砂防ソイルセメント工法は、振動ローラ等の締め固めにより堤体を構築する方法である「転圧タイプ」と生コンクリートと同様にスランプを有する領域まで加水・セメントを追加し流動性を持たせた「流動タイプ」の2種類がある（以下「INSEM-Fタイプ」、転圧タイプ（以下「INSEM-Cタイプ」）と称す）。これらの2つの材料の製造方法は、手順・施工機械・仮設方法も異なることから、



写真 INSEM-Cタイプの施工状況



写真 INSEM-Fタイプの施工状況

(2) ソイルセメント材の施工条件

砂防ソイルセメント工法の施工で最も重要な事項は、掘削土砂のストックや日々の製造に必要な仮置き場所の確保である。土砂の仮置きは、工事中の一時的な借地等により対応する場合が多く、砂防堰堤の工事用道路沿いや堆砂敷へのストックヤードの一時利用の事例がある。また、起点側の索道基地に広いスペースが存在する場合は、このような場所の利用も可能である。六甲山系の砂防工事では、グリーンベルト整備事業によって取得済の公有地や市有地等、比較的土砂の仮置きが行いやすい場所も存在するため、こうした用地を拠点とすることにより砂防ソイルセメント工法の活用拡大が見込まれる。

ソイルセメント材の製造の面では、砂防工事実施箇所とソイルセメント材の製造場所が離れている場合、硬化が促進し品質低下を招くことから、製造場所の条件が確保できる場合でも、製造から運搬・打設までの時間を考慮する必要がある。ソイルセメント材のタイプと施工方法、更に現場条件を加味した結果、六甲山系の砂防工事では、表1に示す施工場所に応じた活用選定ができるものと考えた。

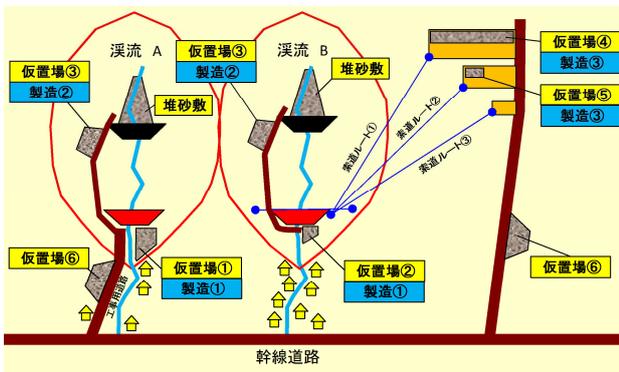


図-1 堰堤施工位置と想定仮置き場のイメージ図

表-1 ソイルセメント材の仮置き場所・製造場所の条件

仮置・製造条件	
仮置き場①	砂防堰堤計画地点に掘削土砂を全量ストックできる。(広い施工ヤードが堰堤計画地点付近に確保できる) 堤体打設量 2,000m³の場合、約800m²以上
仮置き場②	砂防堰堤計画地点に2日分のソイルセメント材をストックできる。(60m ³ /dayの場合、120m ³ /s = フレコン120体 ※1m ³ あたり2,000kg) 土倉3段積程度の面積 約100m²
仮置き場③	砂防堰堤計画地点ではないが、堰堤地点まで建設車両で運搬ができる場所に土砂の仮置きが可能な場合 日打設量の2日分程度 約100m²
仮置き場④	索道基地に堰堤地点で掘削した土砂(もしくはソイルセメント材の製造土砂)を全量ストックできる。 堤体打設量 2,000m³の場合、約800m²以上
仮置き場⑤	索道基地に堰堤地点で掘削した土砂(もしくはソイルセメント材の製造土砂)を2日分ストックできる。 日打設量の2日分程度 約100m²
仮置き場⑥	砂防堰堤の建設箇所から離れた場所に土砂のストックヤードが存在する場合 製造場所へ日々の製造量の土砂を供給できることが条件
製造①②③	砂防堰堤計画地点でソイルセメント材を製造できる (混合コンテナor土質改良機を配置できる) 約200m²以上

(3) 施工条件に応じた施工性の評価

仮置き場所や製造場所の条件によって、INSEM-CタイプやINSEM-Fタイプの施工性の評価を試みた。製造場所が広く、仮置き土砂が近傍である場合は施工性が最も良い評価「◎」と考えた。製造場所と仮置き場所が離れているが支障なく製造できる場合は「○」、施工可能であるが、品質・施工時の安全性で懸念がある場合は「△」とした。

表-2 ソイルセメント材の仮置き場所・製造場所の条件

施工パターン	製造場所	仮置き場所	INSEM-Cタイプ	INSEM-Fタイプ	
	製造① (堰堤位置)	仮置き場①			◎
		仮置き場②+③			○
		堆砂敷土砂活用			○
	製造② (堰堤施工流域内)	仮置き場③			△
		堆砂敷土砂活用			△
製造③ (索道ルート①)	仮置き場④		△	○	
		製造③ (索道ルート②)	仮置き場⑤+⑥	△	○

表2に示す製造場所と仮置き場所の組み合わせによって、施工条件からみた砂防ソイルセメント工法の活用の適否を判断するものとした。その他の施工条件として重要な事項は、砂防工事現場で土砂の賦存量が確保できるか判断することである。砂防堰堤の掘削量のみでは堤体等での賦存量が確保できない場合、他現場からの土砂の流用、同流域や近傍流域の堆砂敷土砂の活用、購入骨材等を用いたブレンドによる配合などを考える必要があり、これらの選択肢として、ソイルセメント材の適否を選択する必要がある。なお、設計段階での賦存量の把握は、現地踏査の時点で地表面の状況しか確認できないことから、地中部の礫の堆積状況や岩盤線が推定できないため、歩留まりを考慮した評価としなければならない。地中部の土砂の堆積量や礫の混入率は、調査ボーリングのコア観察・柱状図などから推定することも可能である。これらの条件を勘案し、六甲山系砂防事業における砂防ソイルセメント工法の適否選定フローを作成した。(図-2)

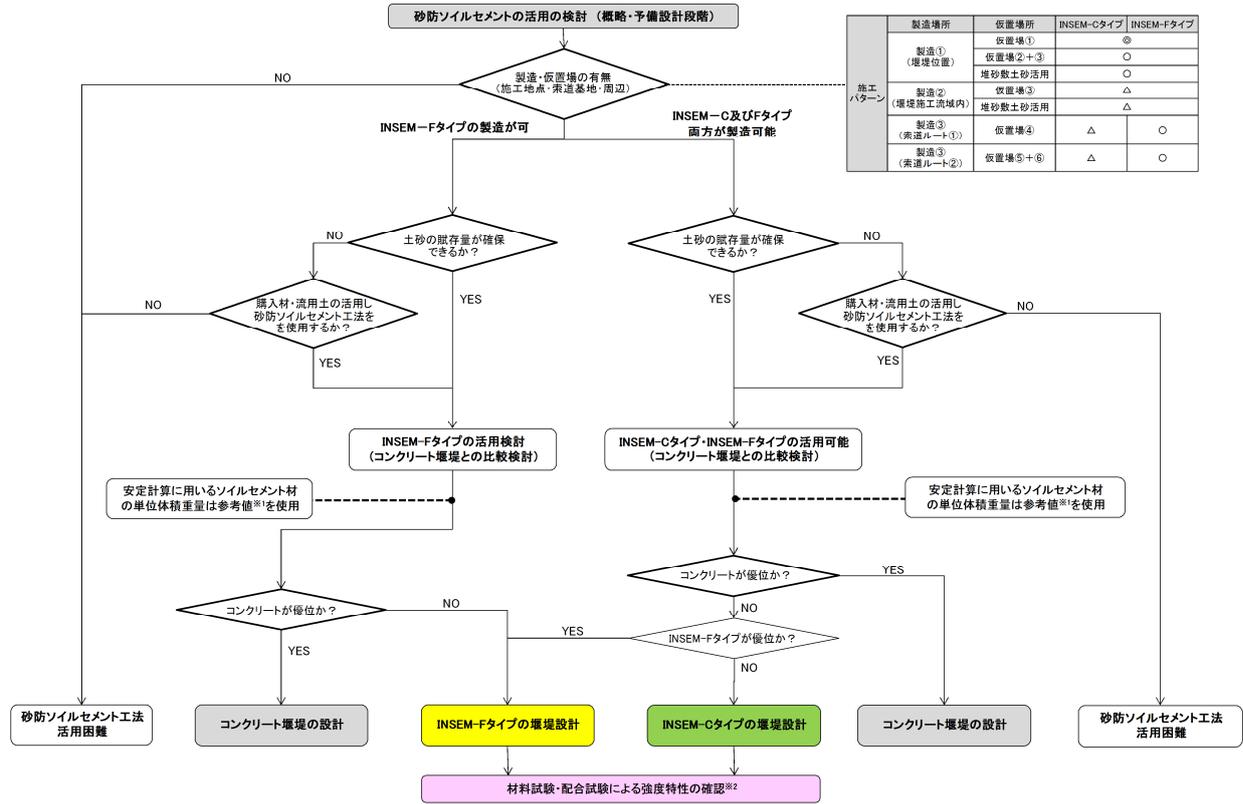


図-2 砂防ソイルセメント工法の適用選定フロー

3. ソイルセメント材の強度特性

(1) 六甲山系の現地発生土砂の特徴

六甲山系は、表層はマサ化した風化花崗岩で構成されている溪流が多く、砂防工事で発生する掘削残土の多くはこの風化花崗岩である。六甲山系の山林の特徴は人工林がほとんどなく、アラカシなどの常緑広葉樹に覆われた極相林の溪流が多い。このため、林床は暗く土壌には草本が侵入しにくい条件であり、多くの溪流では表層の風化が発達している。一方、工事現場で実際に施工時に堤体材料として活用される土砂は、地表面から3m以深であり、表層土砂に比べると樹木や雨水等の浸透の影響を受けにくい条件である。これらの採取位置の違いは、土砂に含まれる有機成分の含有量にも影響しており表層土砂では多く、深部の土砂では有機成分が少ない結果が得られている。表層と深部の土砂の粒度については、ふるい分け試験の結果、採取場所7箇所のうち、0.075mm以下の細粒分含有量で見ると多いところで50%程度、少ないところで10%未満とややバラツキがあった。礫分は全体的に少なく、全体的に粒度に片よりのことがわかった。採取段階の自然含水比は、採取条件によりバラツキがあるが3%から30%程度の範囲であった。表層の含水比よりも深部の含水比の方が小さく、有機成分の含有量も深部の方が少ない傾向であることが確認された。

以下に六甲山系の稼働中の工事実施箇所から採取した

深部の土砂（概ね表層3m以深）と表層からの採取土砂（表層の有機物層を除く深度0.5m程度）のふるい分け試験結果を示す。（図-3）

現地発生土砂のほとんどは花崗岩質（マサ土）であるが、採取場所の条件によって粒度分布には違いがある。一般的に0.075mm以下の細粒分土砂が多い場合、強度低下を引き起こす可能性があるとして示されているが、本検討に用いた採取土砂についても細粒分の割合が多い土砂が存在する。よって、15kg程度の採取土砂で実施できる簡易配合試験により各タイプの強度特性を確認した。

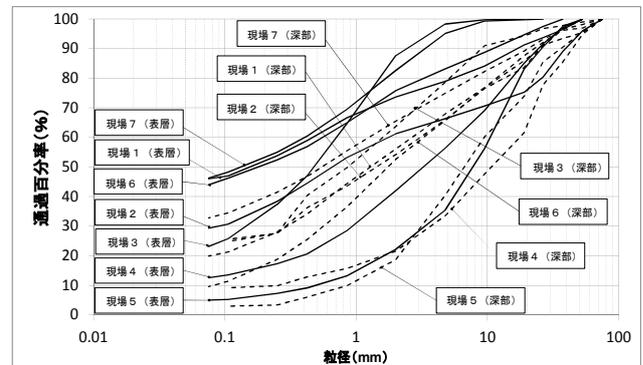


図3 ふるい分け試験結果

(2) 簡易配合試験

表層や深部から採取した土砂の物理特性を把握した後、直径5.0cm×高さ10.0cmの小径供試体（以下、「簡易配

合試験供試体」)を用いてINSEM-FタイプとINSEM-Cタイプの圧縮強度試験を実施した。表層は深部に比べて有機物が多い傾向があるため、一般的な高炉セメントB種に加えて有機物対応のセメント系固化材を使用し、発現強度の傾向を確認した。本検討では、管内の土石流危険渓流の土砂に対して、どの程度の強度発現が得られるか目安を確認するため、単位セメント量はINSEM-CタイプはC=150kg/m³、INSEM-FタイプはC=250kg/m³とした。図4にINSEM-Cタイプの圧縮強度試験結果を示す。

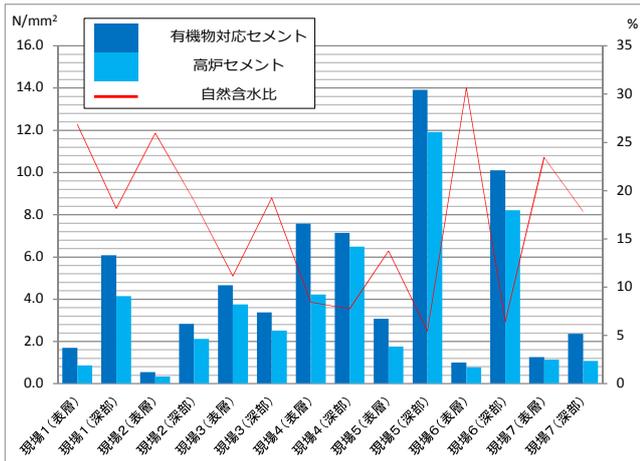


図4 圧縮強度と自然含水比の関係 (INSEM-Cタイプ)

INSEM-Cタイプの圧縮強度は、自然含水比が20%を超える高い土砂ほど水和反応が進行せず、圧縮強度が小さい傾向となり、また、同一箇所でも表層よりも深部の方が高い強度が得られる傾向となった。全箇所でも高炉B種よりも有機物対応セメントの方が圧縮強度は大きくなりセメント系固化材の有効性が示された。

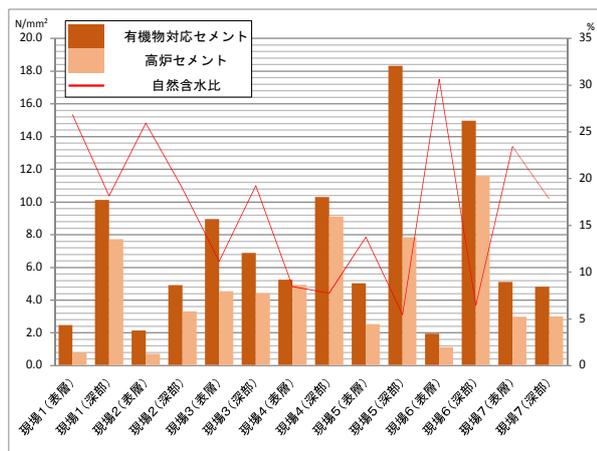


図5 圧縮強度と自然含水比の関係 (INSEM-Fタイプ)

続いて図5にINSEM-Fタイプの圧縮強度試験結果を示す。INSEM-Cタイプと同様に圧縮強度は表層よりも深部で採取した土砂の方が高く、また有機物対応セメントの方が高炉B種よりも高い発現強度が得られる結果となった。

製造方法の違いによる圧縮強度と湿潤密度の違いについて、図6に各タイプの圧縮強度試験結果、図7に湿潤密度の計測結果を示す。両工法はセメント量や製造方法に違いがあるが、同一現場の土砂を用いる場合、圧縮強度はINSEM-Fタイプの方が大きくなる。また、湿潤密度は六甲管内の風化花崗岩は礫分が少なく密度が小さい傾向から水分の多いINSEM-Fタイプの方が湿潤密度は小さくなる傾向が確認された。

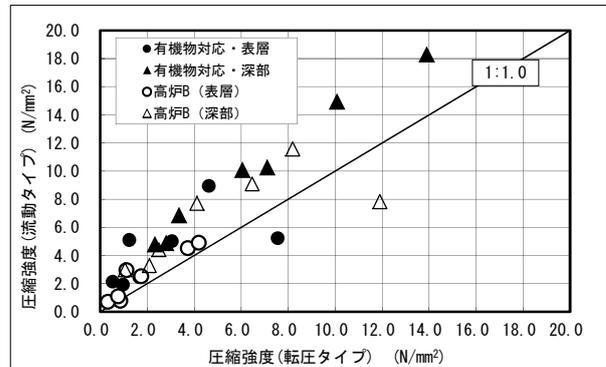


図6 INSEM-CタイプとFタイプの圧縮強度の比較

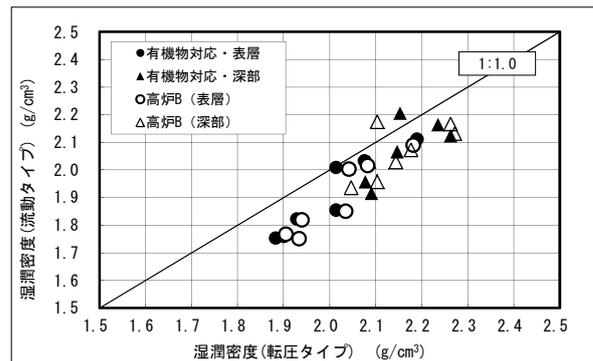


図7 INSEM-CタイプとFタイプの湿潤密度の比較

4. 砂防ソイルセメント工法の活用に関する課題

これまでに、砂防ソイルセメント工法の施工条件から見た適用選定フローや強度特性から一定の有効性を確認できた。

一方で、六甲山系の砂防工事は、密集した市街地に面する土砂災害危険箇所が大半であり、既に開発が進んでいる住宅地内を建設車両が通行することが多い。砂防ソイルセメント工法は、現地発生土砂とセメント粉体又はセメントミルクを攪拌し、堤体材料として使用することから、住宅地に近接する位置ではセメントの飛散や攪拌時の騒音等、環境に関する課題が生じる。また、砂防堰堤の建設箇所や施工箇所近傍に十分な施工ヤードが確保できない場合は、本工法の活用が困難である。このような砂防工事対象箇所の現地特性の把握が重要であるが、

近年、設計段階で砂防ソイルセメント工法を採用したものの、工事段階でソイルセメント材の「攪拌スペースが確保できない、仮置き土砂の場所がない、活用工砂が不足する」などの課題も生じている。

5. 六甲砂防管内のソイルセメント材の活用の展望

本報告では、設計段階でソイルセメント材の強度のみならず現地条件を重視して活用の適否を選定するフローを作成した。また、六甲管内の大半を占めるマサ土の強度発現については、締固めによる施工のINSEM-Cタイプと有スランプ材としての活用を期待したINSEM-Fタイプの圧縮強度・湿潤密度の発現傾向や相違点を明らかにし

た。これらの2種類のソイルセメントは製造方法が異なっても概ね $2\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の圧縮強度が確認され、湿潤密度もコンクリートに比べると大きくはないものの一定の傾向が示された。六甲山系は住宅密集地での砂防工事が多く、堰堤計画位置付近にソイルセメント材の仮置場を計画することにより、掘削残土の有効活用に加えて、掘削残土の運搬が不要となることから運搬時に発生していた騒音・振動が低減される効果もある。

砂防ソイルセメント工法を活用するためには、ソイルセメント材の保管場所の確保が重要であるため、グリーンベルト整備事業によって取得済の公有地や市有地等も活用し、本工法のメリットが最大限に発揮できるように設計や施工計画を考えていく必要がある。

参考文献

1) 砂防ソイルセメント施工便覧 平成28年版