

混合補強土工法、軟弱地盤対策工法の現地適合化技術の開発に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 15～平 19

担当チーム：材料地盤研究グループ（土質）

研究担当者：小橋秀俊、加藤俊二、榊谷有吾

【要旨】

本研究は、タイ・インドネシア・ラオスとの4カ国研究協力協定のもとで、土工技術の開発を行うものである。タイ、インドネシアとの間では、造成材や良質な客土の入手が困難な地域において、気泡混合土を用いて土地造成をする技術の開発を検討した。また、タイにおいては低改良率深層混合処理工法の検討も行い、その結果は設計法の確立に寄与した。ラオスにおいては、国際建設技術協会で開催したプロジェクトの成果を踏まえ、降雨や表面水に対する道路のり面保護を目的に、種子混合土を用いた低コストなり面保護工の適用性について検討した。

キーワード：国際共同研究、軟弱地盤、気泡混合土工法、低改良率深層混合処理工法、のり面保護工法

1. はじめに

本研究は、我が国の社会資本の更新需要に備え、新規投資期にある東南アジア諸国の現場を活用して、社会的要請に応えられる土工技術の開発を行ったもので、タイ・インドネシア・ラオスとの4カ国研究協力協定のもとで実施したものである。

タイ、インドネシアとの間では、現地発生土を用いて気泡混合土の現地適合化技術の開発を行った。本技術を開発することにより、良質な客土が入手困難な軟弱地盤地帯において土地造成を行うことができる。

また、タイにおいては信頼性が高く、かつ経済的な軟弱地盤対策技術の開発についても検討を行い、低改良率深層混合処理工法の設計法を開発した。

ラオスにおいては、国際建設技術協会で開催したプロジェクト成果を踏まえ、降雨や表面水に対する道路のり面保護のための、種子混合土を用いた低コストな道路のり面保護技術について検討した。

2. 検討内容

2.1 低改良率深層混合処理工法の検討

従来から用いられている深層混合処理工法による軟弱地盤対策は、盛土の両サイドののり面下を集中的に改良する形式(改良率50%以上)が主体であった(図-1)。これは、円弧すべりによる安定計算結果に基づく「盛土の安定を図る上でもっとも効果的なのは、のり面下の改良である」という考えによるものであった。また、盛土周辺への側方変形の抑制という観点からも、長い間この

改良形式による対策が主流となっていた。しかしながら、盛土の荷重に伴って、地盤改良の行われていない盛土下中央で大きな圧密沈下が生じ、これによりのり面下の改良柱体が外側に押され、盛土周辺部に側方変形が生じる場合があった。また、不同沈下によって改良部分と無処理部分で段差が発生し、盛土内の亀裂発生なども無視できないこともあった。

低改良率セメントコラム工法は、軟弱地盤の圧密沈下軽減、盛土の安定確保を図るために、従来の深層混合処理工法に比べ低い改良率となるように、深層混合処理等により盛土下に全面的にくまなくセメント系の改良柱体を造成することを特徴とする工法である(図-2)。

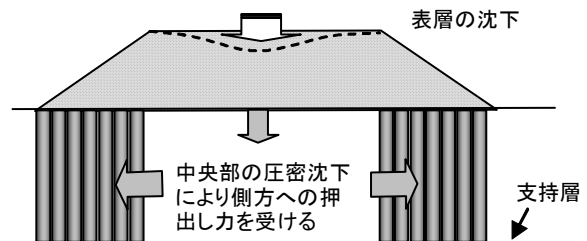


図-1 従来の深層混合処理工法と問題点

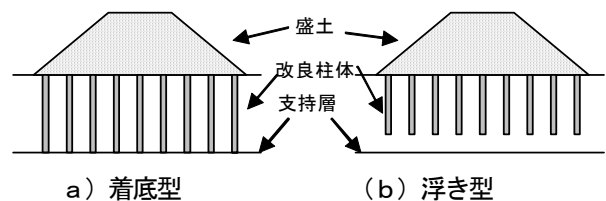


図-2 改良形式のイメージ

なお、改良率とは、改良対象区域全体の面積に対する、改良柱体の杭頭部分の面積の割合をいう。低い改良率とはこの場合、10%～30%を想定している。

本研究では、これまでに実施した室内実験^{1),2)}や国内現場や、海外(タイ)での適用の結果³⁾等を踏まえ、調査、設計、施工における考え方をとりまとめた。

2.2 気泡混合土の現地適合理化技術の開発

2.2.1 タイにおける気泡混合土適用性の検討

タイの首都バンコクで、気泡混合土⁴⁾により軟弱地盤上に高速道路を建設する計画がなされた。気泡混合土工法の利点は鉛直ドレーンと盛土の併用工法に比べ、ドレーン材が不要であり、山土を大幅に縮小することができるのと同時に、沈下を大きく低減できることである。

しかしながら、気泡混合土のバンコクでの適用は初めてであり、気泡混合土の密度、強度、耐久性、沈下対策としての効果などの課題を解明する目的で盛土試験を実施し、タイにおける気泡混合土の適用性を検討した。

2.2.2 インドネシアにおける気泡混合土適用性の検討

インドネシアにおいて、気泡混合土による現地適用性を検討するため、試験盛土を作製した。また、気泡混合土は、一般的な盛土材と比較して単位体積重量が小さく、軟弱層の沈下量の低減が期待され、さらに構造物に働く土圧低減効果も有し、構造物取付盛土での盛土材として一般に広く普及しており使用実績も数多く有する。

しかしながら、気泡混合土と盛土との接続部において不同沈下が発生する可能性があり、その検討はほとんどなされていない。そこで、気泡混合土と盛土との接続部の基礎地盤に強制的に不同沈下を発生させ、気泡混合土と盛土の挙動について検討した。

2.3 低コストなのみり面保護の技術の開発

ラオスにおいては、表層崩壊防止を目的とした低コストなのみり面保護技術として、種子混合土を用いたのみり面保護工の適用性検討を行った。

設定条件としては、導入する種子の発芽率が良好かつラオス国内で容易に資材暢達な可能であること、雨期と乾期といった気候条件の厳しい環境で永続的にのみり面保護ができること、スチール製の材料は高価であることからできるだけ低コストで入手できる材料が使用できること、である。そこで、1:1.0 勾配でのり面直高3mの斜面において、播種工、筋工、植生袋工等について種子の発芽状況に関する予備試験を行い、種子の発芽率が高い「掘込筋播種工+ストーンマルチ工」(図-3)および「溝切客土筋工+グラスマット筋工+ストーンマルチ工」(図-

4)を選定した。これら2つの工法について、1:1.0 勾配でのり面直高10~15m斜面において試験施工を行い、植物の生育状況の追跡調査により適用性を検討した。

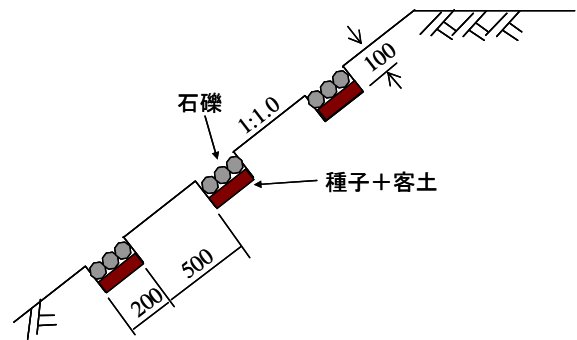


図-3 掘込筋播種工+ストーンマルチ工の概要図

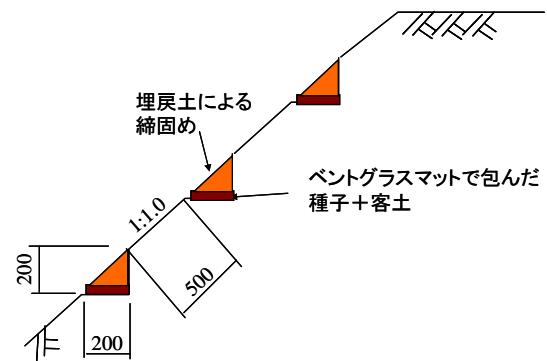


図-4 溝切客土筋工+グラスマット筋工+ストーンマルチ工の概要図

3. 研究結果

3.1 低改良率深層混合処理工法の検討結果

3.1.1 アーチ効果に関する模型実験

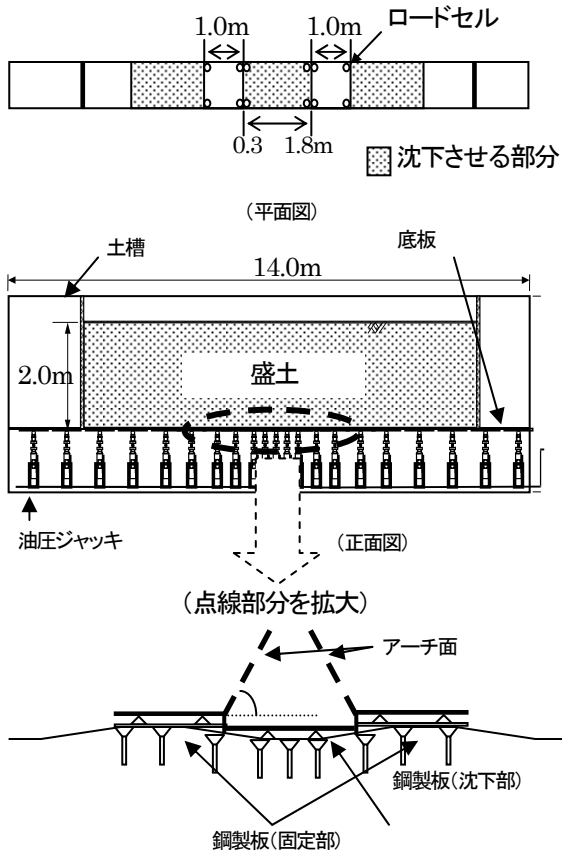
(1) 模型実験の概要

本工法は、アーチ効果を的確に把握することが重要となる工法である。そこで、アーチの大きさを求めるために行った模型実験の概要を以下に示す。

図-5に示すような地盤沈下発生装置内に、表-1に示す材料を用いて盛土模型を作製した。地盤沈下発生装置は、長さ14m×高さ4m×幅1mの大型土槽と、21個の油圧ジャッキに支持された鋼製板から構成される。これらの鋼製板は土槽の底板を構成している。油圧ジャッキと鋼製板はヒンジ結合され、油圧ジャッキを上下させることにより、地盤沈下を再現することができる。

まず土槽内に、密度が締固め度90%以上の盛土を作製するため、1層の厚さ20cmとし10層に分けて材料を敷き均し、転圧を行った。その後鋼製板を速度10mm/hで50mmまで下降させることにより不同沈下を発生させた。

実験は、改良率（改良柱体間の距離）によるアーチ効果の違いを把握するため、表一に示すように鋼製板（沈下部）の長さを変化させて実施した。



図一 実験の概要

一 土の性質

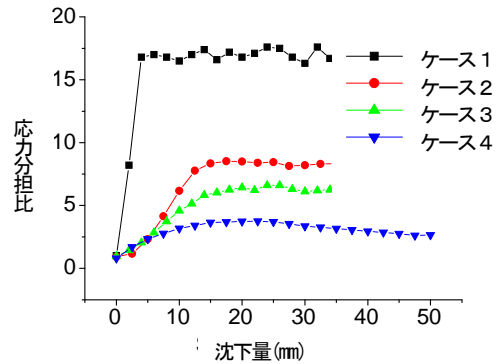
土の		m
比		
分	分	
シルト分	土分	
適比		m
着力		m

二 実験ケース

	沈下の	(m)
1	0.3	
2	0.8	
3	1.3	
4	1.8	

(2) 実験結果

どの実験ケースにおいても、沈下部分と固定部分の間の盛土にアーチ面が発生しており、実験により得られた応力分担比の変化を図一に、アーチ面の角度 θ を表一に示す。

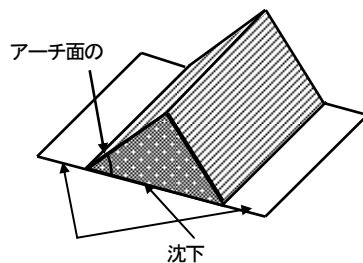


図一 応力分担比の化
一 アーチ面の と応力分担比

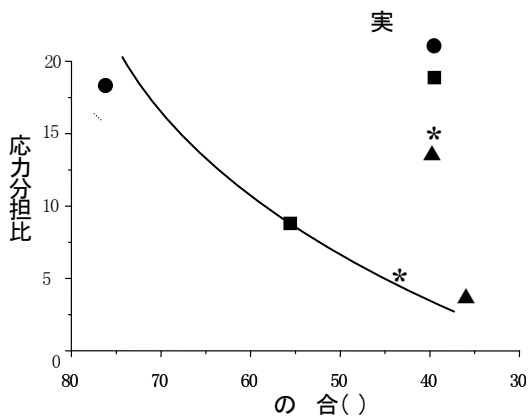
ケース	()	応力分担比
1	66	17.2
2	71	8.2
3	62	6.8
4	71	3.6

各ケースとも、沈下量がある一定値になるまでは応力分担比は急激に増加し、その後一定値に収束した。これは、沈下によりアーチ面が発達し、アーチ作用が大きくなるにつれて、アーチ面に沿って沈下上部の盛土荷重の一部が固定部に伝達され、沈下部に作用する鉛直荷重が軽減されたためと考えられる。

この結果から、図一に示すような荷重分散モデルを想定し、本モデルに基づき応力分担比を計算した（図一）。図に示すように、計算結果と実測値は概ね一致したことから、盛土材のアーチ効果を期待できることが確認された。



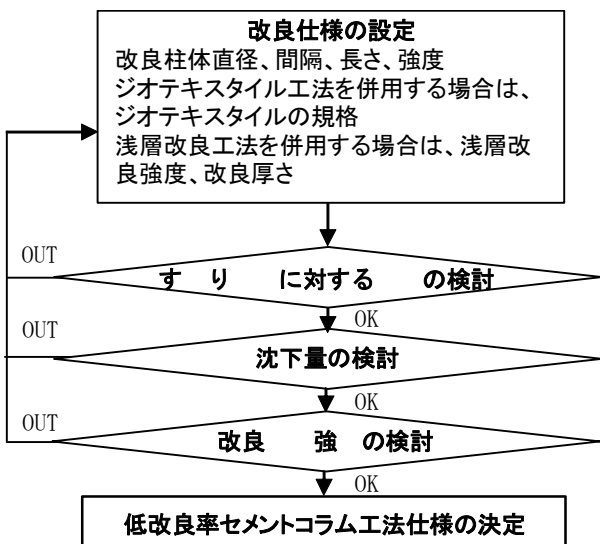
図一 分散モデル (実験の現)



図一 分ル(実験の現)と実の比

3. 1. 2 の概要

以上の成果を踏まえ、次のような設計の手順を提案した(図-9)。



図一 の

始めに、すべり破壊に対する所要の安全率を確保するよう改良率、改良強度、改良柱体長さを設定する。安定の検討にあたっては、改良する領域を、改良柱体と無処理地盤との複合地盤(平均強度)として評価する。

次に沈下量の検討を行う。着底型の場合、複合地盤として全沈下量の検討を行い、許容沈下量以下となるよう改良率、改良強度、改良柱体長さを設定する。

浮き型の場合は、改良する領域の沈下量は複合地盤として、下部の無処理地盤の沈下量は盛土荷重を改良柱体下方に分散させて計算する。

改良柱体と無処理地盤との不同沈下量は、前述のアーチ効果を考慮して、沈下量の検討を行う。その際、まず

無処理地盤の沈下量を求める必要があるが、アーチ効果により無処理地盤に作用する盛土形状が、図-10に示すような山型となり、この部分以外の盛土荷重は改良柱体が負担すると考え沈下量を計算する。

この盛土の体積は以下の式により計算される。

$$V = \left\{ \frac{\lambda - d}{2} \cdot \lambda^2 - \frac{\pi(\lambda^3 - d^3)}{24} + \frac{(4 - \pi) \cdot (\sqrt{2} - 1)}{24} \cdot \lambda^3 \right\} \tan \theta$$

λ : 改良柱体中心間距離

d : 改良柱体直径

θ : アーチ面の角度

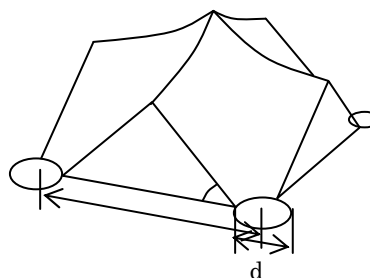


図-10 改良 柱に

改良柱体の沈下量は、図-10に示される部分以外の盛土荷重が全て作用するものとして、改良柱体を弾性体とみなし算出する。これらの結果を基に不同沈下量を算出する。

改良柱体強度は、盛土材のアーチ効果による応力分散の考え方に基づいて改良柱体にかかる応力を計算し、安全性を照査する。

以上の検討を行い、低改良率セメントコラム工法の仕様の決定を行うこととした。

3. 2 気泡混合土の現地適合化技術の検討結果

3. 2. 1 タイ の 検 討 結 果

(1) 試験盛土の概要と計測項目

地盤は表層1mに乾燥した粘土があり、GL-1mから16.5mの厚さで軟弱な粘土がある。自然含水比は70~140%と幅があり、GL-5mの140%をピークに、GL-17.5mの70%まで深度方向に減少している。また、液性限界も自然含水比と同様に、深度方向に減少する傾向がある。この粘土の非排水せん断強度(現場ベーン試験結果)は $C_u=5 \sim 30 \text{ kN/m}^2$ である。粘土はGL-17.5m以深にも確認されているが、N値は10~40程度である。

盛土は原地盤を1m掘削し、密度1.0、0.8および0.6

g/cm³の気泡混合土をそれぞれ1mの厚さで製作し、その上部に乾燥防止の目的で0.5m厚さの覆土を施工した。盛土底面の荷重増分は粘土を1m掘削していることから、16.8kN/m²程度である。

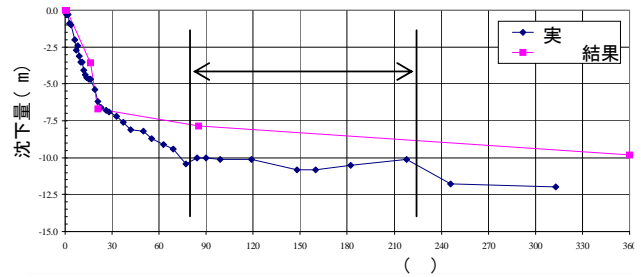
計測項目は、沈下量、水平変位量、土圧、間隙水圧である。盛土の中央部に土圧計、層別沈下計、間隙水圧計を設置し、盛土の端部に傾斜計を2箇所設置した。また、地表面には沈下板、変位杭を設置した。また、現地にて試料のサンプリングを行い、気泡混合土の性状の確認を行った。完成した試験盛土を写真-1に示す。



— 1 験 土 の

(2) 計測結果

盛土中央部における時間～沈下曲線を図-11に示す。図-11には、事前の予測解析結果およびモニタリング結果を示している。気泡混合土は弾性体と仮定し、弾性係数Eは1,500 kN/m² (E=210Cu)、ポアソン比は0.1、透水係数は1×10⁻⁶cm/sとした。図-11によると、約1年後の実測沈下は約12cmであり、沈下は事前解析のほうが実測値よりやや遅れる傾向があったが、通常材料で盛土した場合に約2.0m沈下するのに比べると、気泡混合土の持つ軽量性が十分に発揮されていると考えられる。事前解析がやや遅れる傾向については透水係数に着目し、表層に分布する腐植土層の透水性を再検討したところ、想定よりも透水係数が高いと予想されたことから、透水係数を補正したところ両者が比較的良好に一致する結果となった。また、現地は雨期(5月～10月)になると、GL+1m程度に設置した仮設通路も水没してしまうほどの低湿地帯であるが、雨季において沈下量がやや減少する傾向が見られた。また、盛土周辺部の盛り上がりに関しては、実測と解析とであまり一致せず、事前に予測した程、地盤の隆起は発生しなかった。これは、表層付近に分布する薄い比較固い層の特性を、解析では表現できなかったことが原因と考えられる。



図一 沈下量 結果

また、密度の異なる各層毎に5本サンプリングを行い、密度試験および強度試験を行った。サンプリングは、これまでの実績から泥水を用いると試料の密度に影響を与える可能性が高いことが判明しているため、無水ボーリングによって行った。また、無水ボーリングであるため、短尺のサンプリングしかできないこと、円柱供試体の他、ブロック供試体としてもサンプリングし易いこと等を考慮して、各層のコーナー部をサンプリング場所として設定した。密度・一軸圧縮試験結果を表-4に示す。強度については、各層共にほぼ設計強度の200kN/m²を満足しており、下部層ほど大きな強度となる傾向となっていることが確認された。一方密度については、第2層が設計値(0.8g/cm³)よりも若干大きくなっていることがわかった。サンプリング位置が端部であったこともあり水浸の影響などがその原因として考えられる。

今回良好な結果を得られたことから、橋台取付け部における地盤の残留沈下による段差対策として、雨が多い地域や乾燥が激しい地域においても気泡混合土盛土を適用することができると考えられる。

— 4 験 験結果

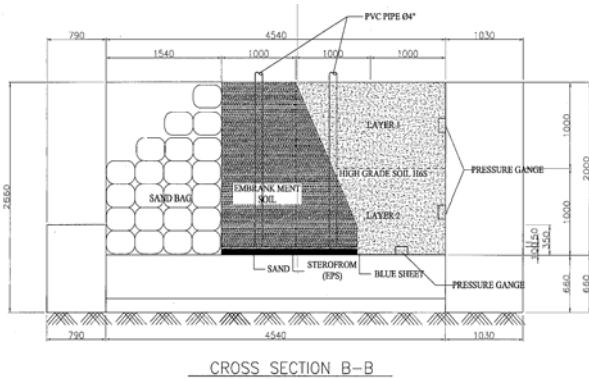
		1層目	2層目	3層目
密度 (g/cm ³)	設計	0.6	0.8	1.0
	平均	0.57	0.97	1.04
	範囲	0.55~0.60	0.90~1.06	1.02~1.06
一軸圧縮強さ (kN/m ²)	設計	2.00×10 ²	2.00×10 ²	2.00×10 ²
	平均	2.43×10 ²	5.41×10 ²	7.19×10 ²
	範囲	1.96~2.74×10 ²	4.63~6.57×10 ²	5.82~10.50×10 ²

3. 2. 2 インドネシア の検討結果

(1) 実験の概要

軟弱地盤上に気泡混合土を施工し、施工後に気泡混合土の背面の地山が圧密等で沈下した場合を想定し、気泡混合土が受ける影響について調査した。背面地山下部に

発泡スチロール(t=100mm)を設置した。発泡スチロールはリモネン（柑橘類からの抽出油）やガソリン等の燃料により溶解することが知られている。気泡混合土の固化後、その発泡スチロールを溶剤（軽油）にて溶解し、模擬的に背面地山を沈下させた。沈下後、気泡混合土に対する影響を調べた。溶剤の注入孔としてφ100mmの塩ビ管を四カ所設定した。図-12にモデル施工の断面図を示す。



図一 実験ル 面図

(2) 実験結果

四カ所の溶剤注入工から軽油 200 リットルを注入し、一昼夜経過後に背面地山および気泡混合土の沈下量を測定し、地盤沈下状況等を観察した。沈下量測定は気泡混合土部分で2カ所、背面地山部分で1箇所実施した。沈下量は型枠の天端を基準として水平に糸を張り、それからの距離を測定することにより求めた。軽油流入の1日経過後の地盤沈下量を調べた結果、気泡混合土には沈下は認められなかった。また、気泡混合土の上面にクラックの発生は認められなかった。一方、地山背面部分は気泡混合土のとの接合部で段差を生じ、39mmの沈下が認められた。側面からの沈下状況の観察では、気泡混合土には亀裂等は発生せず、背面地山部に沈下に伴う亀裂が観察された。亀裂発生は角度は地山の安息角程度であった。そのため、気泡混合土を設置する際は、すりつけ勾配についても十分検討した上で設計する必要がある。

一 沈下量 結果

単位 ; mm

計測日	測定箇所		
	①	②	③
12月4日	15	23	36
12月5日	15	24	75
差	±0	-1	-39

図一 沈下量

3. 3 低コストな のり面保護の技術の検討結果

試験施工は、成形後ののり面に人力で堀込みおよび溝切り作業を行い(写真-2)、堀込み部および溝切り部に種子と客土を混合したもの(写真-3)を敷きならした。また、のり面表面の乾燥および雨水による侵食を防止するため、埋戻し部の表面を覆うようにストンマルチ工を施した(写真-4)。また、「堀込筋播種工+ストンマルチ工」(以下、タイプ1と呼ぶ)および「溝切客土筋工+グラスマット筋工+ストンマルチ工」(以下、タイプ2と呼ぶ)のそれぞれの一部を比較用としてワイヤーネット張工(編目50mm×50mm, ワイヤー径φ2mm)により被覆した。

施工性については、タイプ1では堀込み、タイプ2で



一2 溝切りと混合土のめ



一3 種 土 土 改良 () の混合



一4 ストンマルチ工の

は溝切りを行っており、斜面での作業性の点からは種子混合土を導入する部分が水平である溝切りの方が優れている。ただし、全体を通じて考えるとそれ以外ほとんど差はなかった。

写真-5に試験施工完了直後の状況、写真-6に試験施工後の雨期の植生状況、写真-7に乾期の植生状況を示す。ラオスは、雨期と乾期が存在するため、雨期の集中豪雨による植生導入のための種子混合土の流出や、乾期における導入植物の枯死が懸念される。しかしながら、写真-6、写真-7の状況からわかるように、タイプ1、タイプ2のいずれの箇所においても植生が繁茂し、雨期の種子混合補強土の流出はほとんど無く、また補強の持続性の観点から乾燥に強い在来の多年性植物の種子を選定して混合したため、乾期においても植物が繁茂しており、根茎によるのり面補強が持続して行われている。一方、植生不導入部分においても、自然遷移による植生は確認されるが、雨期においてはのり面の侵食が大きく、乾期の初期段階でほとんどの植物が枯死しており、自然遷移での植物の根茎によるのり面補強は期待できないことも確認された。

なお、タイプ1、タイプ2とも植生が繁茂するまえに雨期に入っており、部分的にはあるが若干表土の流出が確認されている。一方、ワイヤーネット張工を施したところでは、表土の押さえ込み作用が働いており、ほとんど表土の流出は見られなかった。このため、施工直後の植生が繁茂して根茎による補強効果が発現されるまでの間は、表土の安定化を図る必要があり、ワイヤーネット張工のように植物の発芽の邪魔にならないネット状の保護工を併用するのが望ましいと考える。しかしながら、ラオスにおいて、金属製品であるワイヤーネットは高価であるため多くのり面で用いることは困難であり、低コストな代替材料が必要である。ラオスでは竹が多くとれるため、網かご等の竹編み製品が産業として存在している。竹は腐りにくく丈夫であることから、竹編み工としてのり面保護工に用いることができる自然材料でもある。ラオスにおいては、ワイヤーネットの代替材として、地場産業を活用して製造が可能である竹編みのネットを竹串で固定することで、低コストで植生が繁茂するまでの初期段階の



タイプ1:
掘込筋播種工
+ストンマルチ工

タイプ2:
溝切客土筋工
+グラスマット筋工+
ストンマルチ工

— 験 工 の

雨期(6~9月)の状況<9月撮影>



タイ 1

タイ 2

— () の

乾期(10~5月)の状況<12月撮影>



タイ 1

タイ 2

— (10) の

表土流出を防ぐための保護工を行うことができると考える。

4. とめ

4.1 低改良率深層混合処理工法の とめ

軟弱地盤対策工法のコスト削減を目的として、低改良率セメントコラム工法に着目し、模型実験ならびに試験施工等を実施し、その結果、改良柱体間に発生するアーチ効果の存在を把握することができた。さらにこれらの結果を元に設計法の提案を行った。この成果を反映して「地盤改良のためのALiCC工法マニュアル」を作成した。

4.2 気泡混合土の現地適合化技術の開発の とめ

4.2.1 タイにおける気泡混合土適用性のまとめ

気泡混合土の密度、強度、耐久性、および沈下対策としての効果などの課題を解明する目的で、試験盛土を製作した。その結果、各試験において良好な結果を得られ、

タイにおいて橋台取付け部における地盤の残留沈下による段差対策とし気泡混合土が適用できることを確認した。

この成果を踏まえて、ラマⅡ世橋の橋台取付け盛土の工事を行うこととなった。

4. 2. 2 インドネシアにおける気泡混合土適用性の とめ

気泡混合土の試験体を作製し、背面の地山を沈下させることにより気泡混合土に対する影響を調べた。気泡混合土部分は沈下、回転、亀裂等の変状は認められなかった。しかし、地山部分には沈下に伴う亀裂が生じ、長期的な安定性を求めるならば載荷盛土等による沈下抑制対策または補修等が必要となると考えられる。

また、気泡混合土を設置する際は、地山の安息角を考慮してすりつけ勾配についても十分検討した上で設計する必要がある。

4. 3 低コストなのり面保護の技術の開発の とめ

表層崩壊の防止を目的とした低コストなのり面保護工として、種子混合土を用いた「掘込筋播種工+ストーンマルチ工」および「溝切客土筋工+グラスマット筋工+ス

トンマルチ工」の適用性検討を行った結果、双方とも良好な結果が得られ、豪雨地域でも種子混合土を用いたのり面保護が可能であることを確認した。ただし、植生が繁茂するまでの間は、表土の流出を防止するための簡易な保護工の併用が望ましいことも確認した。

- 1) 三木博史、山田哲也、芳賀直：深層混合処理工法の改良率と応力分担比に関する実験的考察、第32回地盤工学研究発表会、pp.2401-2402、1997
- 2) 大野真希、三木博史、恒岡伸幸、古本一司：表層安定処理を併用したフローティング式深層混合処理工法に関する実験的検討、土木技術資料、pp.44-45、2002
- 3) 三木博史、野津光夫、竹内秀克：低改良率深層混合処理工法の設計概念と実現場挙動への適用、第35回地盤工学研究発表会、pp.1399-1400、2000
- 4) 共同研究報告書第170号：混合補強土の技術開発に関する共同研究報告書—気泡混合土利用技術マニュアル—、平成9年3月