

II-1 軟弱地盤対策の選定とその効果に関する国際共同研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 10～平 14

担当チーム：土質チーム

研究担当者：恒岡 伸幸、小橋 秀俊、
古本 一司、大野 真希

【要旨】

東南アジア地域等に広がる軟弱地盤は、高含水比海成粘土やピートから構成されており層厚も大きく、道路土構造物等の建設にあたっては厳しい条件下にあるが、経済力の向上等から軟弱地盤対策を適用しようとするプロジェクトが増えてきている。そこで、本研究では、10年度に調印した協定書にもとづいて、日本、タイ、インドネシア、フランス、スウェーデンの5カ国で、低コストな軟弱地盤対策工法の開発を行うことを目的として、数値解析、模型実験、試験施工などを行った。

これらの結果、

- ・現地試験施工結果、現地資材を活用した木杭併用浅層混合処理工法やPVD工法等の適用性が明らかとなった。
- ・模型実験等の結果、低改良率深層混合処理工法の沈下低減メカニズムが明らかになった。

以上の結果を基に、各軟弱地盤対策工法の設計法を提案した。

キーワード：軟弱地盤対策、国際共同研究、現地適合技術、コスト縮減技術、低改良率深層混合処理工法

1. はじめに

東南アジア地域に広がる軟弱地盤は、高含水比な海成粘土やピートから構成されており、層厚も大きく極めて厳しい自然条件であることが多い。そのため、これまでは財政的にも効果的な対策がとれないことが多かったが、経済力の向上とともに軟弱地盤対策を適用しようとするプロジェクトが増えてきている。そこで、本研究では、10年度に調印した協定書にもとづいて、日本、タイ、インドネシア、フランス、スウェーデンの5カ国の間で、開発途上国でも適用でき、先進国でもコスト縮減につながる低コストな軟弱地盤対策工法の開発を行うことを目的とし、実験的・解析的検討を行った。また、検討にあたっては、現地材料の利用による低コスト化にも配慮した。

本研究では、上記目的のもと、以下の点を中心に検討を進めた。

- 1)タイのバンコク粘土における低改良率深層混合処理工法及びPVD工法（Prefabricated Vertical Drain）の適用性
- 2)インドネシアの海成粘土とピートからなる軟弱地盤における、現地資材を活用した木杭併用浅層混合処理工法の適用性
- 3)深層混合処理工法に関する低コスト化技術（低改

良率深層混合処理工法）の設計法

その結果、各工法の現地における適用性が明らかになった。また、これらを元に各工法の設計法を提案を行った。

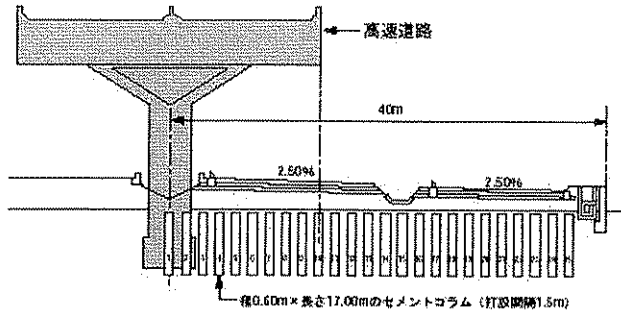
2. 研究方法

2.1 バンコク粘土に対する PVD 工法と低改良率深層混合処理工法の適用性に関する検討

日・タイ間で JICA の研究協力の形で進めてきた PVD 工法に関して、地盤改良を行ったバンコク・チョンブリー高速道路の現場において、沈下量、地盤強度などに関する事後調査を行った。これらをふまえて沈下予測手法や PVD 工法の設計法について検討を行った。

また、地盤改良の低コスト化を図るため、低改良率（面積率で約14%）の杭式深層混合処理工法の適用性についても検討を行った。現場はバンコク南部の高速道路拡幅整備工事で、主に沈下量を抑制することを目的として、直径60cmの改良柱体を1.5m間隔で打設した。ただし、改良柱体は支持層に着底していない。

施工中、各種計測（沈下量、間隙水圧、土圧など）を実施するとともに、施工後、引き続き、改良柱体間および改良柱体上での地表面沈下の経時変化を測定した。



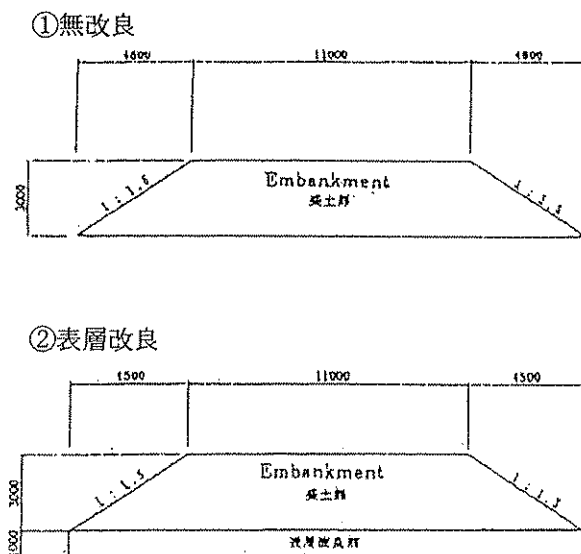
図一 1 低改良率深層混合処理工法の施工概要

2. 2 インドネシアにおける木杭を併用した浅層混合処理工法の適用性に関する試験施工

まず、インドネシアの軟弱地盤特性と対策技術の現状を把握するために、既往の文献調査を中心に整理した。

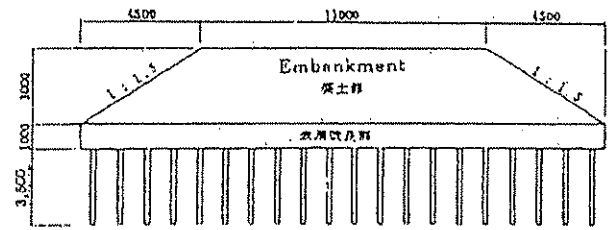
さらに、これらをもとに Prof. Sediarmo Highway (ジャカルタ市内とスカルノハッタ空港を結ぶ国道) の Panjaringan Junction の敷地内で、現地資材である木杭と浅層混合処理を組み合わせ、低コストである地盤改良工法に関する試験盛土を施工し、データの収集を行った。

試験盛土は図-2 に示すような、4パターン(無改良、浅層混合のみ、木杭(2ケース)と浅層混合の併用)のものについて実施し、地表面沈下板、層別沈下板、地中傾斜計などの計測器を設置し、動態観測を行った。

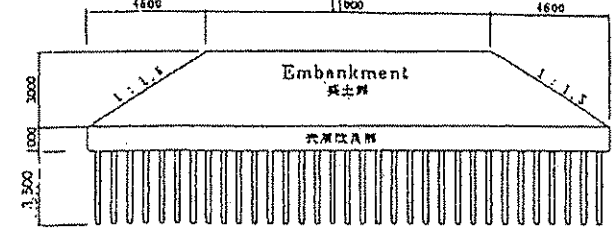


図一 2 (1) 試験盛土概要

③ 表層改良 + 木杭(1m 間隔)



④ 表層改良 + 木杭(60cm 間隔)



図一 2 (2) 試験盛土概要

2. 3 低改良率深層混合処理工法に関する模型実験および数値解析

全面柱状改良型の深層混合処理工法において、コスト縮減を図ることを目的として、改良面積を低減させた場合の、残留沈下低減効果について、実験的検討を行った。

ここでは、改良形式として、改良柱体を支持層に着底させる形式(以下、着底式)と、支持層に着底させない形式(以下、フローティング式)に分けて検討を行った。

1) 着底式

深層混合処理により地盤改良を行った場合、改良柱体と未改良部の間で沈下差が発生することにより図-3 に示すような現象が発生すると考えられる。これにより、改良柱体に多くの荷重が伝達され、未改良部に作用する荷重が小さくなり、沈下が抑制されると考えられる。そこで、模型実験などにより、このメカニズムを解明し、深層混合処理工法における改良率の低減を図ることの可能性について検討した。

模型実験は、地盤沈下発生装置(図-4 参照)内に盛土を作製した後、未改良部分に相当する箇所の沈下板を下降させた。(図-5)ケースごとに沈下板の幅、土質試料の特性等を変化させ、応力分担比(改良体と未改良部に作用する鉛直応力の比)や、盛土内に発生した、せん断面(アーチ現象が起こっている部分)の測定を行った。

さらに、ジオテキスタイルや表層固化工法を併用した場合の効果についても検討をおこなった。

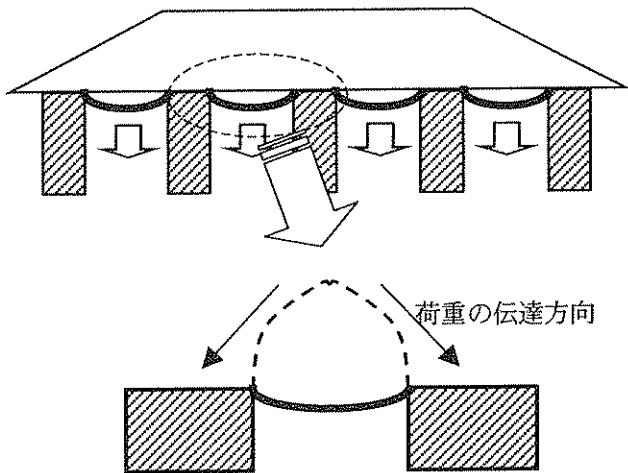


図-3 アーチ現象

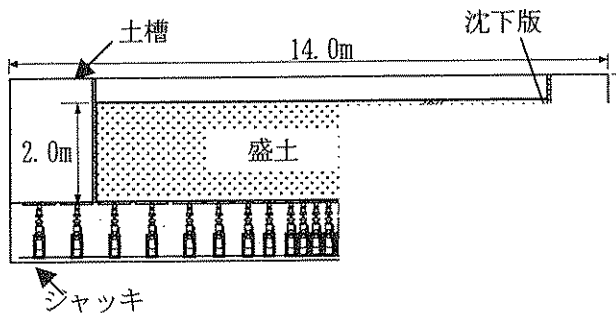


図-4 模型実験

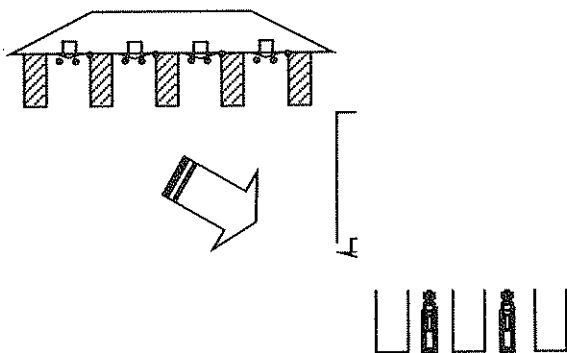


図-5 実験のイメージ

2) フローティング式

軟弱層が厚く、支持層が深い位置にある場合は、着底式で改良することが困難であると考えられる。そこで、改良柱体を支持層に着底しない、フローティング式の沈下抑制効果について模型実験などにより検討を行った。模型実験は、図-6に示すような模型地盤を作製して行った。軟弱地盤の材料には霞ヶ浦浚渫粘土、およびカオリン粘土、盛土材料には

砂鉄(20kN/m³)を用いた。

表層安定処理を想定した固化板と深層混合処理を想定した改良柱体は、霞ヶ浦粘土（もしくはカオリン粘土）にソイルセメントを混合攪拌して作製した。

実験では、含水比を調整した霞ヶ浦粘土（含水比230%）もしくはカオリン粘土（同300%）を土槽に投入し、自重圧密させた後に改良杭と固化板を設置して盛土载荷を行った。模型地盤の排水条件は、上下両面排水とした。

実験では、無処理のケース、表層安定処理のみのケース、表層安定処理と深層混合処理工法を併用したケースについて実施した。

さらに深層混合処理部分の改良率（改良ピッチ）、改良柱体の長さ、改良柱体径の影響を把握するために、これらの値を変化させたケースについて実験を行った。実験中は、各位置の地表面沈下、地盤変位、間隙水圧、杭頭荷重および固化盤底面の地盤反力である。

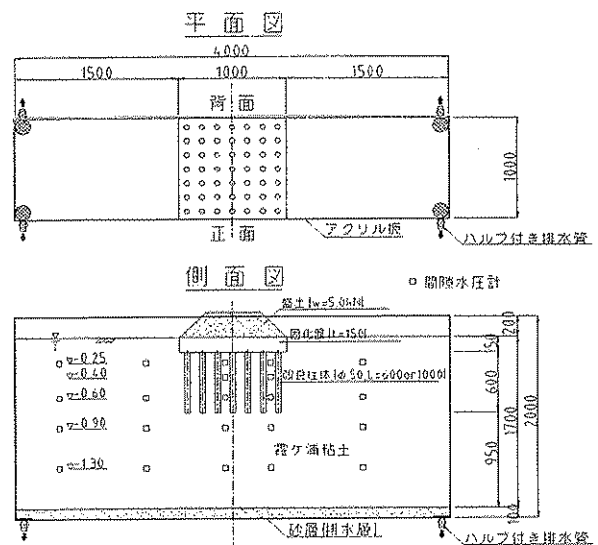


図-5 模型実験の概要

3. 研究結果

3.1 バンコク粘土に対する PVD 工法と低改良率セメントコラム工法の適用性に関する試験施工

PVD 工法に関する事後調査の結果、軟弱地盤がそれほど厚くない箇所では、当初カム・クレイモデル等を用いて予測していた地盤沈下量とほぼ同じ量の沈下が発生しており、これらの予測手法の適用性が高いことが明らかとなった。また、ドレーンによる排水が促進され、沈下が早期に収束するとともに、

地盤の強度が十分に得られていることが確認された。

また、低改良質深層混合処理を実施した箇所においては、図-6に示すような沈下の傾向が得られた。周辺の状況と比較して、低改良率深層混合処理の実施により沈下量の低減が図られることが確認された。

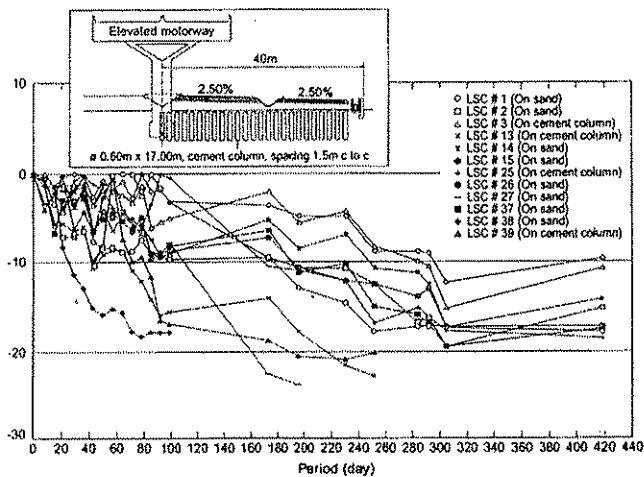


図-6 セメントコラム工法の試験施工結果

3.2 インドネシアにおける木杭を併用した浅層混合処理工法の適用性に関する試験施工

試験盛土施工後の動態観測データ(図-7)より以下の点が明らかとなり、浅層混合処理や木杭群の効果を確認することができた。

(1)パターン1(無対策)とパターン2(浅層固化版のみ)では、施工後の地表面中央部の沈下量は30cm余りあるが、パターン3(浅層固化版+木杭群 1m間隔)とパターン4(浅層固化版+木杭群 0.6m間隔)では、25cm程度に軽減されている。中央部とのり尻部との地表面の不同沈下量もパターン1, 2は12cm程度だが、パターン3, 4は5cm程度である。

(2)ベーンせん断強度の施工前と施工後の強度増加についても、パターン1(無対策)では15→45kPa、パターン2(浅層固化版のみ)では15→40kPaに対して、パターン4(浅層固化版+木杭群 0.6mピッチ)では15→25kPaと、圧密による木杭領域内の強度増加率が少なくなっている。

(3)のり尻付近に設置した地中傾斜計では、パターン1~4すべてで最大水平変位量が8~12mmであるが、変形量のピーク深度はパターン1:1.5m→パターン2:2.5m→パターン3:3.5m→パターン4:4mと対策レベルが向上するにしたがって、深い部分へ移行している。

また、浅層混合を実施するにあたっては、セメント

もしくは、セメント系固化材の使用が必要であるが、インドネシアの軟弱土5種類(ジャカルタの非有機質土、東ジャワの非有機質土、カリマンタンの有機質土、スマトラの泥炭2種類)について、所用の一軸圧縮試験圧縮強度(200kPa)が得られるかどうかの検討を行った結果、有機質土および泥炭については、石灰もしくはラテライト等による事前処理の必要があることが確認された。

これらの結果を数値解析により再現した。その結果を図-8に示す。図に示すように、良好な再現結果を得ることが出来た。これらの結果から、本ケースで実施したような地盤条件においては、表層安定処理と木杭を1.0mピッチで打設するケースが最も合理的であることが確認され、設計方法を提案した。

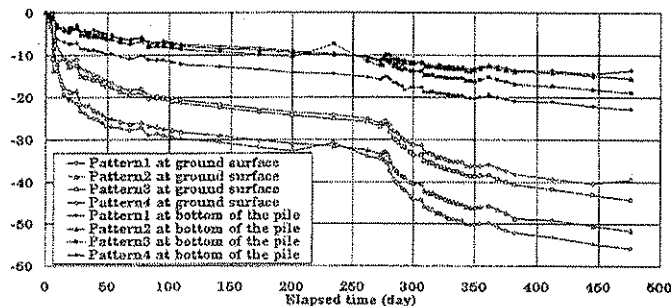


図-7 試験施工結果(沈下量)

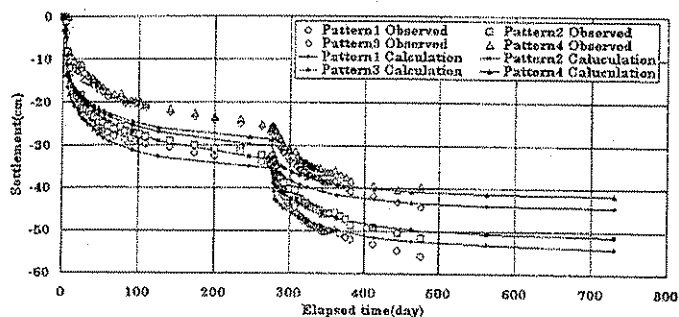


図-8 試験施工結果と解析結果の比較

3.3 低改良率深層混合処理工法に関する模型実験

1) 着底式

模型実験の結果、未改良部の沈下に伴い、図-9のような、せん断面が発生し、未改良部上にアーチが形成されることが確認できた。

また、実験で得られた応力分担比は、アーチ現象の発達に伴い、大きくなるが、ある程度になると一定の値となる。(図-10)これは、ある沈下量のところ、アーチが完全に形成されているためと考えられる。またその値は、盛土材の材質などの影響を

受けるが、実験再現モデル（図-11参照）による計算結果と一致した。このモデルによれば、盛土が高いほど応力分担比は大きくなる。

さらに、実験モデルを元にした現場換算モデルを作成した。（図-11）これを用いると、10~30%程度の低改良率の場合でも現在設計で用いられている値に比べ、より大きな値が期待でき、現場条件によっては、経済的な軟弱地盤対策が可能である。

また、ジオグリッドなどを併用することにより、応力分担比はさらに増加することが確認されたことから、これらを併用することにより、深層混合処理部分の低改良率化を図ることができる。

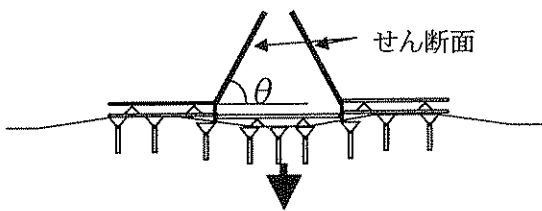


図-9 アーチの形成

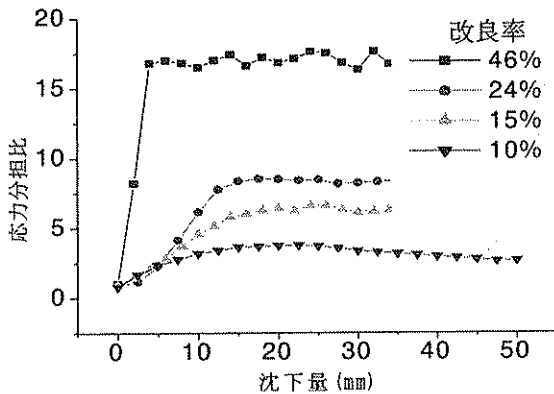
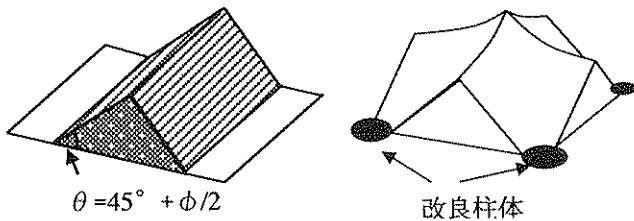


図-10 実験結果例（材料：砂の場合）



(a) 実験再現モデル (b) 現場換算モデル

図-11 計算モデル

2) フローティング式

模型実験の結果、以下のことが明らかになった。

① 盛土沈下量

図-12に盛土沈下量の経時変化例を示す。この図から、改良率を高くするに従って沈下量が抑制されていることがわかる。また、同じ10%の改良率でも改良柱体長を長くすることにより沈下量が減少することも確認された。さらに、即時沈下量と圧密沈下量に注目すると、改良率を高くするほど改良部の一体化効果が発揮され、即時沈下量を抑制していることがわかった。そして、改良率がおよそ30%を超えると100%の場合とほぼ同程度の効果となった。しかし、圧密沈下量に関しては、改良率の変化による違いが確認できなかった。これは、圧密対象層の厚さが変わらなかったためと考えられる。

② 応力分担比

改良柱体長が長い場合の応力分担比が多くのケースの2倍以上となっている。これは、改良柱体長を長くすることによって、より支持力が強い深部の地盤に盛土荷重が伝達したことや、改良柱体の周面摩擦が大きくなること等から、改良柱体一本あたりに作用する荷重がより大きくなったためと考えられる。

③ 過剰間隙水圧

盛土荷重直後の過剰間隙水圧分布を図-13に示す。固化板のみの場合は、その直下に過剰間隙水圧のピークがあるのに対し、深層混合処理を行った場合は、ピークが固化板直下から改良柱体先端部に移行しているのが確認できる。これは、改良杭を設置することにより、固化板直下の地盤に盛土荷重が作用せず、杭を通して盛土荷重の一部が深部へ伝達され、杭先端部を中心に過剰間隙水圧が発生したためと考えられる。

また、盛土中心直下の間隙水圧の経時変化に着目すると、改良柱体に囲まれている区域では変化が無く、消散しない傾向であるのに対し、それ以深の間隙水圧は消散する傾向が見られる。これは、改良柱体の設置により、改良域内に荷重が伝わらず、間隙水圧の変化が小さくなっていることから、改良域が一体化していることを示している。ただし、この結果は短期的なものであるため、長期的に調査する必要がある。

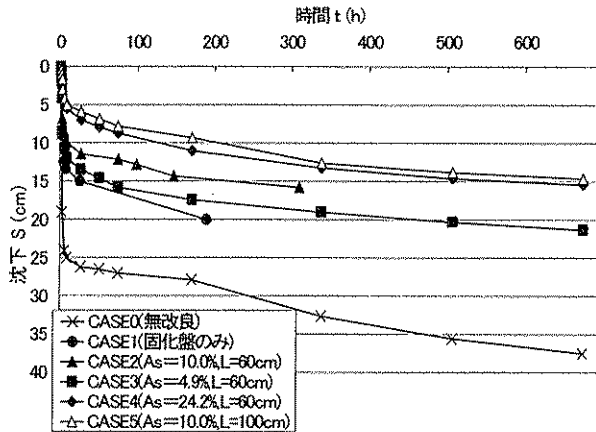
③ 地盤の圧密特性の影響

模型実験の結果、地盤の圧密特性が変化しても、改良率の増加に伴う沈下量の減少の割合は変わらない。また、10%程度の低改良率の範囲においては、改良率と改良効果は比例するが、ある改良率以上になると100%改良した場合とほぼ同等の効果が得られる。

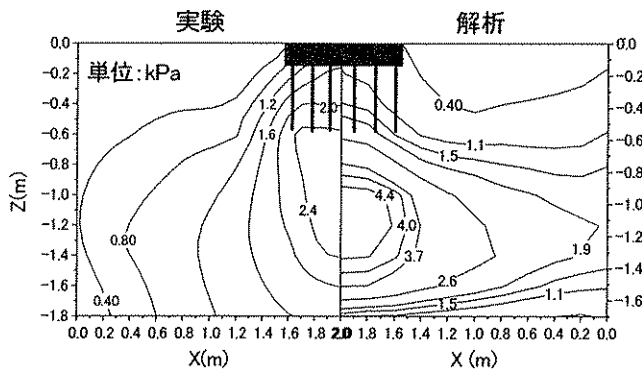
④改良径の影響

改良柱体の直径の大きさを変化させた場合、同じ改良率で比較すると、直径の小さい方が、沈下抑制効果が大きかった。これは、柱体の表面積が増加したため、地盤との周面摩擦力が増加したためであると推察された。

これらの結果を基に低改良率深層混合処理工法の設計法を提案した。



図一 1 2 盛土の沈下量の経時変化例



図一 1 3 過剰間隙水圧分布

4. まとめ

本研究では、各国の実状に即した軟弱地盤対策の選定について検討を行った。その結果、

- 1) タイ・バンコク粘土に対する PVD 工法や低改良率深層混合処理工法の適用性が明らかになった。これらの結果を基に設計法の提案を行った。
- 2) インドネシアの海成粘土・PEAT に対する木杭併用浅層混合処理工法の適用性が明らかになった。これらの結果を基に設計法の提案を行った。
- 3) 模型実験の結果、着底式およびフローティング式深層混合処理工法の沈下抑制メカニズムが明らかになり、改良率、改良柱体の長さ、改良柱体の径の影響

を考慮した設計法について提案を行った。

また、これらの成果については、合計 4 回のセミナーを開催し、東南アジアの技術者への普及を図ることができた。

今後は、さらに成果の普及を図り、実現場への適用が促進されることが期待される。

参考文献

- 1) K.Furumoto, H.Miki Author : "Model Test about The Deep Mixing Soil Stabilization Method with Low Improvement Ratio", An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering (Geo-Eng 2000), 2000.11
- 2) 三木、恒岡、古本、大野：「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 Vol.44, No.5, pp.32~37, 平成 14 年 5 月
- 3) 三木博史：タイにおける軟弱地盤対策に関する研究協力 土木技術資料 Vol.41-10, 1999 年 10 月
- 4) 三木他：「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講演集
- 5) 三木他：「深層混合処理工法の応力分担比に関する大型模型実験」土木学会第 53 回年次学術講演会講演資料集
- 6) 恒岡、大野、古本：「カオリン粘土を用いたフローティング式深層混合処理工法模型実験」、第 37 回地盤工学研究発表会発表講演集、DISK1-557, pp.1107~1108, 平成 14 年 7 月