

# 地盤改良技術のタイへの技術移転

本城 勇介<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 Ph. D. 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

本研究は、タイの首都バンコクが位置するチャオプラヤ平野における軟弱地盤改良工法の経緯に付いて、技術移転という観点から、調査・研究を行ったものである。タイでは1970年頃から、サンドドレーン工法を中心とする圧密促進工法に関する試験工事が、タイ内外の事業主体により、数多く試みられてきたにもかかわらず、この工法が大規模な公共工事で採用されることはなかった。これに対し、1990年代初頭頃から普及し始めたプラスチックドレーン工法(PVD工法)は、多くの公共工事で非常に勢いで普及しようとする趨勢である。この様な両工法の普及の差異を、文献調査、現地調査(関係者へのインタビュー)に基づいて解明した。

*Key Words: soil improvement method, technology transfer, Thailand, sand drain method, prefabricated vertical drain, PVD, pile foundation, soft ground*

## 1. はじめに

### (1) 本研究の目的

著者は、1989年5月から1993年3月まで日本政府派遣の国際協力事業団専門家として、タイのバンコク郊外にあるアジア工科大学院(Asian Institute of Technology, AIT)の地盤・交通工学科助教授として滞在し、地盤工学の研究・教育に携わった。本研究はこの派遣期間中に感じた問題意識をベースとしている。

すなわち、バンコクの位置するチャオプラヤ平野は、大沖積平野であり、またタイの政治経済活動はこの平野に著しく集中しており、軟弱地盤処理は最も重要な建設活動の課題である。それにもかかわらずタイでは、サンドドレーン工法や深層混合法といった、日本では非常に一般的な軟弱地盤改良工法が、少なくとも大規模な公共工事ではほとんど採用された例がない。これは非常に不思議であった。

一方、近年世界的に開発の盛んなジオテキスタイルを用いた工法は、タイでも非常に勢いで普及する情勢で、既に著者の在タイ中から、試験的に高速道路の高盛土の補強に用いられていた。またプラスチックドレーン工法(以下、Prefabricated Vertical Drainの略としてPVD工法と本論文では記す)も、所々で使用の可能性が検討されているという話を聞いた。

この様な、伝統的な地盤改良工法と、新しい工法との

普及状況の差が、何に起因するのかを調べることは、地盤工学技術上も興味あることであるし、また今後の途上国への地盤改良技術(これはわが国の誇りうる建設技術の一つであることに疑いはない)の技術移転の方法を考える上でも、重要な問題であると考えられる。

この度、バンコクにおけるサンドドレーン工法の歴史と、最近のPVD工法の普及の様子を集中的に調査する機会が与えられたので、この調査結果と、これに基づいた若干の考察をまとめ、ここに発表し、学会員の情報とすると共に、大方の批判を頂きたい次第である。

以下、本章では本研究に関係する一般的な事項について述べる。2章では、サンドドレーン工法のタイにおける導入の歴史を、実施された試験工事を中心にまとめた。3章では、1994年3月に約3週間に亘り実施した現地調査の内容を中心に、タイにおける最近のPVD工法の進展状況を概観する。4章では、これら2つの章の内容をもとに、タイへの地盤改良工法の技術移転の問題について考察する。

### (2) 技術移転と適正技術

本研究の目的の一つは、途上国への技術移転という立場から、地盤改良技術を考察することであるから、一般的な技術移転について、最初にまとめておくことは有益であろう。

技術移転 (technology transfer) とは、「技術格差がある主体間で、より高い技術を有する主体から、より低い主体に技術が移動し、そこで技術が普及・定着すること」である<sup>1)</sup>。ところで、途上国に対する技術移転を考えた場合、先進国の最新技術をそのまま移転しようとしても、途上国の技術水準、資源、市場規模、社会・文化環境等の違いのため、そのような技術が受領者側にとって最もふさわしい技術となるとは限らない。ここに適正技術 (appropriate technology) という概念が登場する。

経済協力開発機構 (OECD) の定義によると、適正技術とは次に挙げる項目の内1つあるいはいくつかの項目により特徴づけられる技術の総称である。(1)対象単位当たりの投資額が少ない、(2)生産物単位当たりの投資額が少ない、(3)生産システムが簡単で地元の人達が制御できる範囲内にある、(4)現地の社会・文化環境に適応している、(5)天然資源を節約したもの、(6)低コストで生産されるか、または高い雇用の創出効果がある。

以上の諸点は、本研究で取り上げている問題を考察するときには有益な視点を提供する。

### (3) タイの経済の発展状況と建設

東南アジア地域の近年の著しい経済成長は、周知の事実である。表-1に1960年から1990年間のタイの人口、GDP、国民一人当たりのGNPの変化を示した<sup>2)</sup>。1980年代後半から10%以上の成長率である。また、一人当たりのGNPも1990年には1430米ドルに達した。この様な大きな経済成長は、建設部門にもはっきりと表れている。表-2(a)には、建設部門総生産の経年変化を示した<sup>2)</sup>。1980年代後半には、毎年20%の成長を記録した。一方建設部門をストックの面から見たのが、表-2(b)である<sup>2)</sup>。民間部門の資本形成はもちろん大きいのが、80年代最後には、政府部門の資本形成も大きく成長している。これら経済統計からも、近年のタイ社会の物質的な急成長と、建設業が極めて活発であることを伺うことができる。

### (4) チャオプラヤ平野の地形・地質

東南アジアでは、バンコク、ジャカルタ、マニラ、ホーチミン・シチーなど多くの主要な都市が沖積平野上に発達しており、軟弱地盤問題はこの地域の地盤工学上最も重要な問題である。

表-1 タイの経済状況の推移<sup>2)</sup>

	1960	1970	1980	1985	1987	1988	1989	1990
総人口(万人)	2,639	3,637	4,650	5,168	5,387	5,447	5,589	5,630
GDP(億ドル)	25.5	65.4	304.5	373.5	476.5	595.8	691.0	801.7
1人当たりGNP(ドル)	96	180	707	710	892	1,100	1,220	1,430
実質経済成長率(%)	7.9 (60-70%)	6.8 (70-80%)	5.8	3.5	9.5	13.2	12.0	10.0

表-2(a) タイ建設部門総生産の推移<sup>2)</sup>

(単位:百万パーツ)

年	合計	政府部門	民間部門
1982	99,532	53,572	46,160
1983	110,209	56,310	53,959
1984	125,729	62,306	63,423
1985	128,923	67,243	61,680
1986	126,505	60,748	65,757
1987	143,177	55,480	87,697
1988	188,934	60,890	128,044
1989	253,039	71,913	181,126
1990	332,997	101,554	231,443

(1パーツ=5円)

表-2(b) タイ建設部門総資本形成額<sup>2)</sup>

年	建設部門総生産			
	時価 (百万パーツ)	GDPに 占める比率 (%)	1972年価格 (百万パーツ)	成長率 (%)
1975	11,594	3.8	7,625	4.0
1976	15,093	4.4	9,354	22.7
1977	19,717	4.9	11,161	19.3
1978	24,393	5.0	13,037	16.8
1979	27,004	4.8	12,855	-1.4
1980	34,764	5.3	13,478	4.9
1981	38,135	5.0	14,298	6.1
1982	41,500	5.1	14,202	-0.7
1983	47,985	5.3	15,787	11.2
1984	56,092	5.8	17,547	11.2
1985	56,824	5.6	16,635	-5.2
1986	56,572	5.2	16,159	-2.9
1987	66,097	5.3	18,307	13.3
1988	84,791	5.6	22,206	21.3
1989	112,283	6.3	26,926	21.2
1990	146,817	7.2	33,032	22.6

(1パーツ=5円)

バンコクの位置するチャオプラヤ平野は、東西約80km、南北約200kmの大沖積平野である。この平野の地質構造は複雑で、第三紀終わりから第四紀にいろいろな形で堆積した地層が複雑に互層を成している。一番上にある軟弱粘性土はバンコク粘土として知られる。完新世(約1万年前より現在までの期間)に堆積した粘土である<sup>3)</sup>。

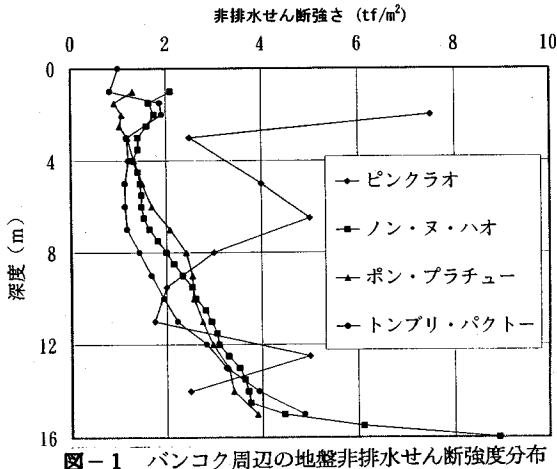


図-1 バンコク周辺の地盤非排水せん断強度分布

図-1には、この論文で紹介するバンコク周辺の主なプロジェクト・サイトで得られた原位置ベーン試験による非排水せん断強度の深度分布を示した。バンコク粘土の性質は、全般に若干過圧密であることを除けば特に日本の粘土と異なるものではない。典型的な地盤では、含水比が100-120%の粘性土が10メートル近くも堆積しており、自然含水比はほとんど液性限界と一致している。塑性指数は60-70程度で、過圧密比は1.2-2.0程度である。原位置ベーン試験により得られた非排水せん断強度も1から4tf/m<sup>2</sup>と弱い。なお、せん断強度が地表面に近い2m程度の厚さに亘り上昇しているのは、乾期に地表面が乾燥しその結果サクシオンがこの付近に生じ、結果的に過圧密状態となっているためである。これは、風化皮殻 (weathered crust) と呼ばれる。

## 2. サンドドレーン工法

### (1) はじめに

タイで本格的なインフラストラクチャーの整備が始まったのは1960年代の後半からだと考えられる<sup>4)</sup>。この頃の代表的な工事として、1969年に完成したバンナーバンパコン高速道路の建設を挙げることができる。この道路は(図-2)、バンコクと、パタヤに代表される東部臨海地帯を結ぶ重要な道路である。

図-3(a)にバンナーバンパコン高速道路の断面図を示した<sup>5)</sup>。この地域はチャオプラヤ平野の最も海に近い地域に当たり、地盤の非排水せん断強度は深度5mのところでも0.7tf/m<sup>2</sup>程度であるにもかかわらず、基礎地盤は全く無処理のまま盛土が建設された。路面を洪水から守るため、標高2.0から2.6mを確保するために1.0から2.0mの盛土高さが必要であった。当時のタイの経済発展の状況を考えると、このような無処理の工法が経済上やむを得ない選択だったと推測される。建設後相当程度の沈下が生じ、補修も行われたようであるが、建設10年後における沈下量は、総沈下量が大いところでは2.5m近くに達し、この時期には、雨期にしばしば路面

表-3 バンコクで施工された主な試験盛土工事

工事名	実施年	概要
AIT 試験盛土	1969- 1970	AITの敷地造成のための試験工事。3.5m高さの盛土が建設され、挙動観測実施。地盤改良なし。
ナコン・サワソ高速 道路	1968頃	詳細不明。サンドドレーンの試験が行われ、効果を否定。
ピョクサ橋	1971	橋の77°ローに関して行われた試験工事。一般にバンコクで最初の、サンドドレーン工事と考えられている。
ノヌ・ハオ盛土 (ノスロップ社)	1972-74	バンコク新国際空港に関する試験工事。大規模盛土。しかし地盤改良は考慮されなかった。
ポソ・プラチ盛土	1976-77	海軍の施設建設のための試験工事。サンドドレーンの効果確認が主目的。
ノヌ・ハオ盛土 (タイ空港公団)	1983	バンコク新国際空港に関する試験工事。せん孔方式のサンドドレーンの効果確認が主目的

が水没する事態となった。このため1980年頃から調査が開始され、1983年に、路面を標高2.4から2.9mに嵩上げするための大幅な改修が行われた。このとき、道路の交通容量を増すためと、工事中の交通を迂回させる目的で、道路両脇に、上下2車線の側道も一部建設された。

この様に、地盤処理が全く行われなまま建設されたため、バンナーバンパコン高速道路は建設後、現在に至るまで維持・補修が繰り返されている。今日でもこの高速道路を走ると、それぞれ2車線ずつの4つの盛土が、それぞれ異なる高さを持っていることが歴然と分かる。補修の新しい順に、高い標高にあるのである。しかもこの道路は、近年益々経済発展の著しい東部臨海工業地帯(ラムチャバン港、マタブット港)と、バンコクそして他のタイの諸地域とを結ぶ、重要な幹線道路である。

図-3(b)と(c)に、それぞれ1990年前後に建設されたトンブリーパクトー高速道路<sup>22)</sup>と、現在建設中のニュー・チョンブリー高速道路の断面<sup>23)</sup>を示した。前者はプレキャスト杭を、後者はPVD工法を採用している。

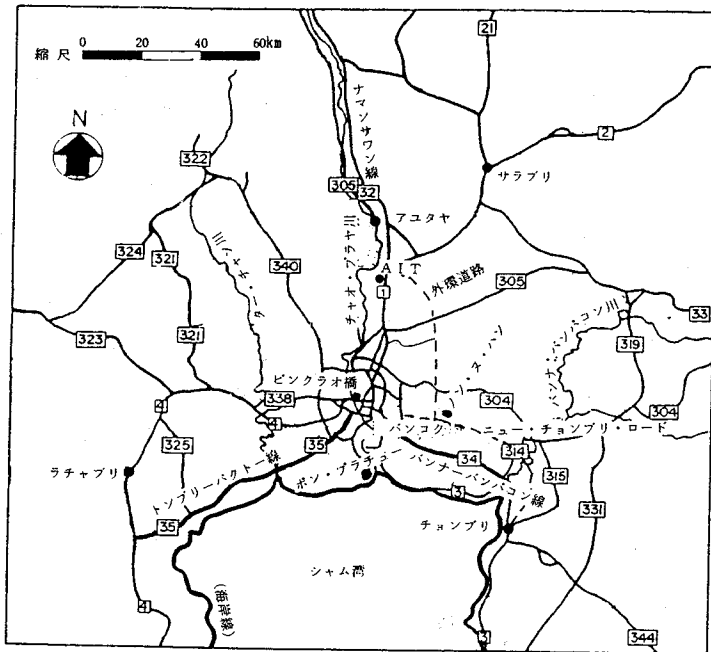


図-2 バンコク周辺図

本研究で明らかにしたいことの一つは、タイではなぜ日本では軟弱地盤改良の標準的な工法であるサンドドレーン工法が採用されることなく、杭基礎やさらにPVD工法に移行してしまったのか、その経緯を技術移転と言う観点から考察することにある。

このため、次節ではタイで1980年代前半頃までに実施された、主な軟弱地盤上の試験盛土工事を紹介し、この問題点を整理する。特にこれらの工事で用いられたサンドドレーン工法の効果の評価は、その後のタイにおけるこの工法の発展に、多大な影響を与えたと思われる。さらに、(3)節では、タイにおける盛土への杭基礎の導入の経緯を述べる。さらに次章では、PVD工法について考察する。

## (2) 試験盛土工事：サンドドレーン工法の適用

バンコクで、1980年代の前半頃までに実施された主な盛土工事は、表-3にまとめられている。これ以後、特に1990年前後からは建設工事の著しい活発化に伴い、このほかにも多くの試験盛土工事が実施されたが、本研究のサンドドレーン工法導入の経緯を明らかにするという目的のためには、1980年代前半までの工事例が重要であると考えられる。

### a) AIT敷地造成試験盛土

学術論文に表れる試験盛土で、バンコクで最初に実施されたのは、アジア工科大学院の郊外への移転のとき実施された盛土であろう<sup>6), 7)</sup>。計器を多数入れた3.5m高の盛土が建設され、その挙動が観測された。しかし、この盛土では、地盤改良は考慮されていない。

### b) ナコンサワン高速道路盛土

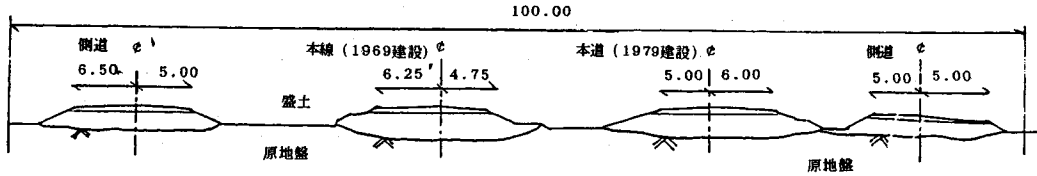
これと同時期に、バンコクと北部及び東北部タイを結

ぶ幹線道路の一部、ナコン・サワン高速道路の建設に際し、ノルウェイ地盤研究所(NGI)の技術者によって、レポートが書かれた<sup>8)</sup>。この中で非常に簡単に(一段落の記述に過ぎない)、橋のアプローチ部分の沈下を促進させるためにサンドドレーンを使用した<sup>9)</sup>が、工事期間中に沈下を十分に促進させることは出来ず、バンコク粘土の低い透水性と、大きな2次圧縮のため、サンドドレーン工法はあまり効果的でなかったと記述されている。ここで、「低い透水係数」や「二次圧密」が、具体的に何を意味するのかが説明されていない。この文献は、このほか橋のアプローチ部分の盛土基礎に杭基礎を推薦した。これ以後の文献がほとんど必ずこの文献を引用していることから見ても、この文献はNGIというこの分野のビッグネームの権威もあいて、その後のこの地域でのサンドドレーンの効果の評価に関しある程度の影響を与えたと考えられる。

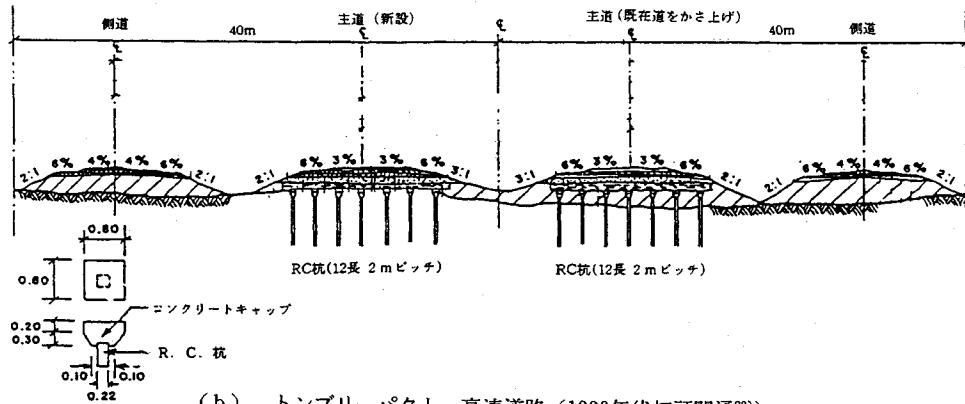
### c) ピンクラオ橋試験盛土

はっきりとした記録が残っているサンドドレーン工法に関する試験工事が実施されたのは、1971年ピンクラオ橋のアプローチに関するものである<sup>9)</sup>。この工事では約13メートルの層厚の非排水強度 $2t/m^2$ の軟弱粘性土に、マンドリルを用い排除方式で直径0.35mのサンドドレーンが、千鳥配置で中心間隔1.3m、長さ13mで施工された。載荷は6m x 6mの木枠を用いて、この中に土を盛ることにより実施された。総トン数は約 $5.8t/m^2$ である。また、この木枠は全部で4つあり、2つはサンドドレーンの施工された範囲に、他の2つはその範囲外に施工され、その差異が観測された。

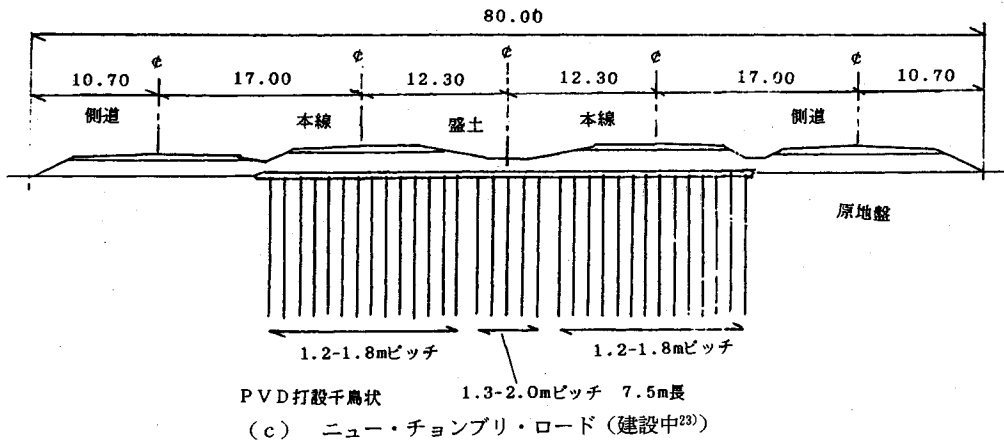
過剰間隙水圧の測定結果を見ると、サンドドレーンを打設した部分では、約1カ月後には測定値は静水圧に戻



(a) バンナーバンパコン高速道路 (1960年代後半開通<sup>5)</sup>)



(b) トンブリーパクター高速道路 (1990年代初頭開通<sup>22)</sup>)



(c) ニュー・チョンブリ・ロード (建設中<sup>23)</sup>)

図-3 高速道路盛土基礎の変遷

り、さらにその後これより下がり続けている。一方、無処理地盤では3カ月を経過しても完全に水圧が逸散するには至らなかった。間隙水圧が静水圧より下がり続けた理由は、この地域での深部での地下水の過剰揚水により地表面に近い帯水層の水頭も既に低下しており、サンドドレーンは軟弱地盤部とこの帯水槽の排水距離を近づける結果になったためと解釈されている。この後の試験工事でも、水頭低下した下部帯水層は、バンコクで行われたサンドドレーンの効果の解釈を複雑にした<sup>10)</sup>。

一方沈下についての測定結果を見ると、処理部と未処

理部に有意な差は見られず、単純にドレーンの沈下促進効果を説得力を持って立証するものでは無かった。

この様な結果となった理由は、

- 1) 載荷範囲、強度ともサンドドレーンの効果を発揮させるのに十分なものではなかった。
  - 2) サンドドレーンは排除方式で施工されており、十分な品質を持っていたか疑わしい。
  - 3) 下部の水頭低下している帯水層の存在が、解釈を困難にしている。
- 等が考えられる。

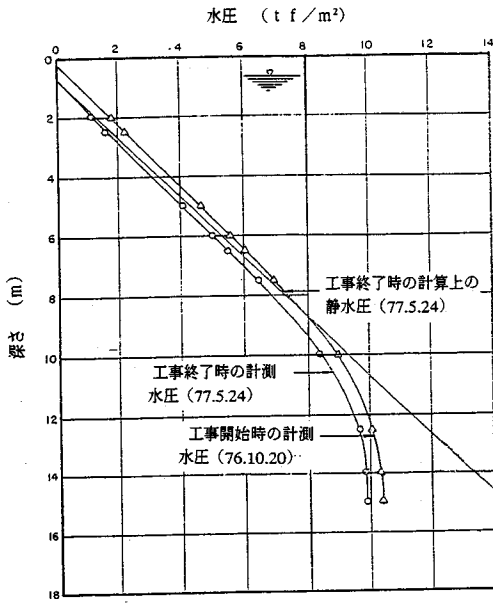


図-4 ポン・プラチャー試験盛土水頭分布<sup>12)</sup>

d) ノン・ヌ・ハオ盛土 (ノースロップ 空港開発会社)

バンコクの第2国際空港の予定地であるノン・ヌ・ハオ(図-1)で、アメリカのノースロップ空港開発会社が、空港建設計画作成の一環として行った大規模な試験盛土工事である。200x40m, 100x40mで高さが2.9mの長期沈下観測用盛土2つ、破壊試験用盛土(高さ3.4mで破壊)、100x40mで深度4mまでの掘削の行われたピット等、かなり大規模な試験工事であった<sup>11)</sup>。地盤改良工法は試験されなかった。1972-74年にかけて行われたこのプロジェクトも、ノースロップ社の撤退により、中止された<sup>4)</sup>。

e) ポン・プラチャー試験盛土

海軍の施設の建設のためチャオプラヤ川の河口に位置するポン・プラチャーで1976-77年に実施された、大規模なサンドドレーンの効果を試験するための試験盛土工事である<sup>12)</sup>。

幅34m, 長さ90mの試験盛土が、一段目1.1m, 二段目0.9mの2段階載荷で建設された。盛土施工域は、3つのゾーンに分割され、無処理部分、それぞれ千鳥状2.5m及び1.5mピッチでサンドドレーンが打設されたゾーンより成っていた。サンドドレーンは、排除方式で袋詰めした砂(径5cm)をマンドリルを用いて17mの深度まで打設された。この試験サイトにおいても、地域的な地下水の過剰揚水のため、下部の帯水層では水頭が低下しており、盛土が建設された軟弱地盤内の水頭もこの影響により下部では低下を始めていた。この様子を図-4に示した。

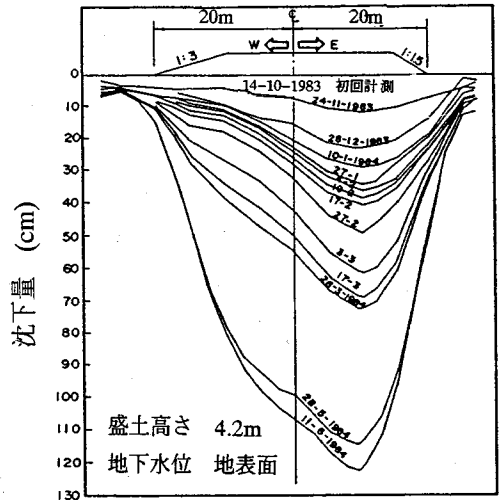


図-5 ノン・ヌ・ハオ試験盛土沈下量断面図<sup>14)</sup>

工事終了時に計測された水頭分布は、通常予想される静水圧分布をかなり下回り、下部帯水層の水頭低下の影響を明白に受けていた。

地表面沈下量の進行は、1.5m間隔でサンドドレーンが打設された部分で第一及び第二段階載荷とともに早くなっているが、2.5m間隔のサンドドレーン打設ゾーンと、無処理ゾーンの沈下挙動には余り差が見られないばかりか、第一段階載荷時にはむしろ無処理区間の方が沈下が早く進んだ。さらに間隙水圧の測定結果もサンドドレーンの効果を明確に示すものではなかった。結局、全般的にはサンドドレーンの沈下促進効果は、予期されたほどではないと判断された<sup>13)</sup>。

初期の報告書<sup>12)</sup>においては、サンドドレーンの効果が余り無かった理由を、下部帯水層の水頭低下に帰そうとしたりしたが、結局のところは径5cmの排除方式で施工されたサンドドレーンの不連続等による、施工上の問題による不成功ではなかったかと考えられる<sup>4)</sup>。

f) ノン・ヌ・ハオ試験盛土 (タイ空港公団)

1983-84年にバンコク新国際空港の建設予定地であるノン・ヌ・ハオで行われた、せん孔方式のサンドドレーンの性能を試すための試験盛土工事である<sup>14)</sup>。約40m四方、高さ4.2mの盛土が建設された。サンドドレーンは、ウォータージェットを用いたせん孔方式で行われ、直径26cmのサンドドレーンを、千鳥状に2.0m間隔で、14.5mの深度まで打設した。敷き砂は、0.8m厚で施工した。

このサイトの地盤状態は、14-15m付近までは軟弱な粘性土地盤であり、その下に砂分の多い層を挟み、下部は硬質粘性土層である。非排水せん断強度は深度方向に

1-4tf/m<sup>2</sup>の間に分布している(図-1)。

盛土は、2.5m高、4.2m高までに二段階で行われ、第一及び第二段階載荷後、いずれも大きな沈下が速やかに発生している。また間隙水圧の発生と消散の様子も載荷段階と対応している。

この盛土で発生した沈下は、著しく非対称であった。その結果を、図-5に示した。東側では西側に比べ大きな沈下が発生している。Mohら<sup>14)</sup>は、これを次のように説明している。このサイトでは、他のバンコク周辺地域と同様に下部の帯水層は、過剰な揚水により水頭が低下している。盛土の東側では、サンドドレーンが所定の深度よりやや深く打ち込まれたと考えられ、この結果この部分では、ドレーンが下部の低水頭土層と直接つながる結果になり、過度の排水が粘性土層から行われる結果となった。教訓としてMohら<sup>14)</sup>は、水頭低下による付加的な沈下を防ぐためには、サンドドレーンを深度11m付近で打ち止めることを提案している。

いずれにせよ、この結果は過去の無処理地盤で行われた試験盛土工事と比較され、サンドドレーンの沈下促進効果は明白であると広く認められた。

### (3) 杭基礎を用いた盛土

バンコク周辺では、盛土の基礎に杭を用いることが多い<sup>15)</sup>。なぜこの様になったかは定かではないが、橋のアプローチ部分での沈下量の制御のため杭基礎を用いることがかなり早い時期から北欧系の技術者により推奨されたのは事実である<sup>8)、16)</sup>。Broms<sup>17)、18)</sup>によれば、北欧では盛土の基礎に杭を用いることは非常に頻繁に行われていると言うことであり、この様な影響が大きかったと推察される。杭は適当な大きさのパイルキャップを付けて使用するが、ほとんどの場合杭頭をつなぐようなことはしない。

先に図-3(b)に示したトンブリーパクター高速道路の基礎はコンクリート杭で設計され、建設された。ここで採用されたのは22cm角の正方形断面、12m長の鉄筋コンクリート杭であるが、この様な杭はタイでは現場でも安価に生産される。また、次節で述べるバンコク新国際空港の滑走路基礎も、PVD工法と杭基礎が最後まで有力な代替案として検討された。

杭基礎がタイでなぜこのように広く用いられるのか著者には理解できない面もあるが、地元の技術者の杭に対する信頼は相当に高い。杭の施工の確実性、盛土が最大でも2m程度とそれほど高くなく水平力が小さいこと等技術的な点の他、セメントはタイでは大手資本により大量

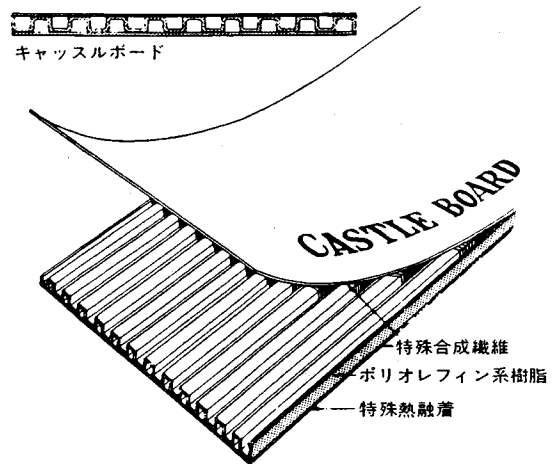


図-6 PVD概念図の一例

に生産されているので、このような生産者からの使用に対する圧力も存在するらしい。杭の使用がサンドドレーン等の地盤改良工法の、適用を阻害してきたことは疑いなく事実である。

## 3. プラスチック・ドレーン工法

### (1) 工法の概要

プラスチック・ドレーン工法は、石油製品として工場で安価かつ大量に生産できるため、近年ヨーロッパや北米で急速に普及して来ている工法であり、一般にPVD (Prefabricated Vertical Drain) として、知られている。

Rixnerら<sup>19)</sup>によれば、PVDは1920年代普及し始めていたサンドドレーン工法の代替的な工法として、スウェーデン地盤工学研究所(SGI)の所長であったWalter Kjellmanが1930年代に提案したカードボードの核とこれを包むペーパーフィルターによりなる、ペーパードレーンより始まったと考えられる。この工法は1940年代にヨーロッパではかなり普及した。戦後、プラスチックの大幅な普及により、材料はほとんどプラスチックに置き換えられ、現在では世界中で50種類以上のPVDが出回っていると言われている。PVDの長所は、経済性、施工の容易さ、粘土地盤への攪乱が比較的小さいこと、さらに環境に与える影響が少ないこと等が挙げられる。Rixnerら<sup>19)</sup>が挙げている世界の主なPVDの生産元は、オランダ、フランス、アメリカ、カナダ、日本に分布している。図-6に日本で生産されているPVDの一つの形状概念図を示す。

PVDが他の工法と異なる大きな点は、PVDが工業製品であり、そのために営業の方法が従来の地盤改良工法のセールスとは全く異なることである。すなわち、PVDのセールスではその生産者や代理店が直接PVDのセールスを行っている。彼らはPVDそのものを販売することが目的であり、工事そのものを行うことは目的ではない。この販売方法は少なからずその早い普及に影響を与えている。著者のAIT赴任中も、91年頃から特にヨーロッパ系のPVDの生産者やその代理店が頻繁にセールスのため大学を訪れるようになった。これから考えてもコンサルタントなどにはその設計にPVDを取り入れるよう相当な営業努力が成されたと思う。また、AITでは直接ヨーロッパのPVD生産者から委託研究を受け、PVDの実物大での試験盛土を実施したりしていた(Bergadoら<sup>20)</sup>)。

先にも述べたように、タイではサンドドレーン等の伝統的な圧密促進タイプの地盤改良工法は全くと言ってよいほど大規模な公共工事に使用された例がなかったにも拘わらず、1990年代に突然PVDが急速な普及を見ようとしている情勢である。本節はこの間の事情を著者が調査した範囲で述べ、その急速な普及の理由を究明しようとするものである。

## (2) PVD導入の経緯

PVD工法のタイへの導入については、それがごく最近始まったばかりであるため、学術的な文献はほとんど存在しない。ここでは、1994年3月に行った、現地調査での関係各部署へのインタビュー調査によってこの経緯を明らかにしようと試みている。インタビューを行った個人とその所属は、論文の末尾に記した。

### a) ラムチャバン造船所プロジェクト

この工事は、東部臨海工業地帯の中核プロジェクトの一つであるラムチャバン港の建設に関係するもので、この港の建設時に浚渫された軟弱土の土捨て場となっていた一角に造船所のための土地を造成することになり、約40ヘクタールの土地に2から10m堆積した、含水比が100%以上の粘性土の圧密を促進するためにPVDが使用されたものである。施工は1990年から1992年にかけて行われた。

この工事そのものは、以下で述べる大規模な公共工事での大幅なPVDの導入に直接関係はないものと考えられるが、この工事の以前はタイで大規模にPVDが使用された例は全くなかったと思われる。その意味で、記憶されてよい工事例であるといえる。

### b) 高速道路工事

タイ国の運輸通信省道路局(以下DOH)は、バンコクを初めタイ全国の主要道路に責任を持つ役所であるが、その第7次道路計画(92-96年)の中にバンコク外環状道路(バンブリーバンパイン間62km, 2車線。以下外環状道路と呼ぶ)、およびニュー・チョンブリ道路(バンコク-チョンブリ間83KM, 4車線。以下NCRと呼ぶ)の建設がある<sup>21)</sup>。これらの道路位置は図-2に示した。この二つの路線は、ほとんどがチャオプラヤ平野の軟弱地盤上を走るため、軟弱地盤対策は最も重要な設計・施工上の問題点の一つであるが、ここで大規模なPVDの導入が既に決定している。工事は現在詳細設計をほぼ終了し、工事にとりかかろうとしている状態である。

これらの工事へのPVDの導入の経緯については、NCRのフィージビリティ・スタディー(FS)の時点で、タイ側から出された杭を用いた道路の基礎工事の費用が割高であることを、この工事にローンを提供する国際機関から指摘され、これに代わるより低廉な工法としてPVDがコンサルタントより提案されたと言うことである。先に述べたように、タイでは伝統的に軟弱地盤上の盛土を補強する場合には杭を用いてきているが、これがこのNCRのプロジェクトのときはじめて国際機関からFSの時点でコスト高を指摘され、検討を余儀なくされたことは興味深い。

コンサルタントが1991年夏頃に行った検討では、2.7mの盛土高さを想定し、次の2つの場合のコスト比較を行っている。

1) 幅約50mの盛土の基礎地盤にPVDを13m, 10mの深さに、それぞれ四角形状に1.1, 1.2および1.3mピッチに打設し、0.4mのサンドマットを建設し、さらに一層のジオテキスタイルあるいはジオグリッド補強を行った場合。

2) 同様の幅に、12mあるいは14mの長さの0.22 x 0.22m角のプレキャスト杭を、四角形状2m間隔に打設し、この上に応力を分散させるための0.6m厚のソイルセメント層をつくった場合について、パイルキャップをつけた場合と付けない場合。さらにソイルセメント層の代わりに、ジオテキスタイルやジオグリッドを用いた場合。

前者は後者より当然沈下量は大きくなるが、これによる盛土の増加量もコスト比較では考慮されている。コスト比較の結果ではどのケースを比べても、後者のコストが前者のその2倍以上になり、前者の優位は動かしがたかった。これを機にPVDの採用が決まったと言うことである。詳細設計の結果提案されているNCRの典型



的な断面を図-3(c)に示した。

道路の総延長の内軟弱地盤が基礎となる部分は相当程度に達すると考えられるので、PVDの施工量は膨大なものとなるはずである。従来から用いられてきた杭基礎の代替工法としてPVD以外の工法が、比較の対象とならなかった。

#### c) バンコク新国際空港の建設

現在のバンコクの国際空港であるドンムアン空港は、2000年頃に満杯となる予測で、このためタイ政府は1991年5月にバンコクの東約25kmにあるノン・ヌ・ハオに第2国際空港を建設することを閣議決定している。これは、敷地約3千ヘクタールに3千から4km滑走路4本、4つの国際ターミナルビルと1つの国内ターミナルビルを持つ規模になる予定である<sup>2)</sup>。

この特に滑走路部分の軟弱地盤改良工法として、当初杭基礎が考えられていたが、1992年秋に地元コンサルタントがノルウェー地盤工學研究所(NGI)の協力の下にまとめた報告書でPVDが推薦され、それ以来PVDが採用されることがほぼ決定したと聞いた。現在何種類かのPVDを使用した試験盛土工事が実施されている。この工事も規模が大きく、PVDが全面的に採用されれば非常に大規模なものになることは想像にかたくない。

#### d) 鉄道建設プロジェクト

タイはその道路の発達に比較し、鉄道の発達は極めて遅れており、鉄道への依存率も小さい。しかし最近鉄道の効用を見直す動きもある。1992年より、東部臨海工業地帯と北線や北東線を短絡するクロン・シップガオーグエンコイ間85kmの建設工事が着手され、その中で軟弱地盤対策としてPVDが採用され、既に93年夏頃から工事で用いられている。著者の入手した情報では、厚さ12-14mの軟弱地盤上に6m高の盛土を急速に行うためにPVDが採用されたと言うことであるが、施工管理の不行き届きや、施工者がPVDの施工に慣れていない等の理由で、一部に盛土破壊が発生しているらしい。

PVDが採用された経緯は、はっきりしないが、施工はタイで最大の施工会社が行い、使用しているPVDは、オランダ製である。

## 4. 考察

本章では、先の2つの章で述べたようなサンドドレーン工法とPVD工法のタイにおける伸展の経緯を基に、なぜ前者はほとんど普及せず、後者が著しい速度で普及しようとしているのかを考察する。

### (1) タイ社会の変化

まづタイの経済が著しい成長を開始したのは、80年代

後半であったことを指摘しておきたい。表-1にも示したように、タイの一人当たりのGNPがはじめて1000米ドルを越えたのは1988年であった。このような社会の経済的な高度化に伴い、高速道路などインフラ構造物に対する社会の要求も、高度化したことは当然であろう。

例えば、図-3(a)に示した、無処理地盤の上に盛土し建設された、バンナーバンパコン高速道路のような低価格低品質な工法は、採用できなくなったと考えられる。

### (2) 杭基礎による盛土の建設

このような時代の要請に対し、高速道路局が選択した工法は、1990年代初頭に完成したトンブリーパクト高速道路(図-3(b))で採用された杭基礎を中心とした工法であった。ここで、杭工法が採用された理由は、以下のようなものではなかったかと著者は推測する。

1) 杭は既に橋へのアプローチ部分などで高速道路の盛土基礎として実績があった。杭とパイルキャップを組み合わせた構造など設計の方法もある程度確立していた。(これは遡れば、先に2章(3)節で述べたような、北欧の技術者達の努力もあったわけである。)

2) 杭基礎は東南アジアでは、盛土基礎としてかなりの実績を持つ<sup>18)</sup>。

この他、セメントはタイ国内で大手資本により大量生産されており、そのような材料を大量に使用する杭工法は、歓迎されたのではないかという意見を、インタビュー中に聞いた。

### (3) サンドドレーン工法の問題点

一方この時点で、サンドドレーン工法が採用されなかった理由は、この工法が社会的に十分に効果を認知された工法となっていなかったと言うことが大きい。先に2章で述べた試験工事例から考察されるサンドドレーンの低い効果に関する地盤工学的な問題点としては、次のようなものが挙げられる。

1) ノン・ヌ・ハオの例を除いては、排除方式の施工法が採用されたため、ドレーンの連続性、地盤の攪乱による井戸抵抗の増加等の問題点があった<sup>4)</sup>。

2) タイでは道路盛土は、道路を高架にして交通を立体化するという目的のためではなく、洪水時に路面の水没を避けるという目的のため盛土が行われる。このため盛土高さは2.5m前後で、それほど大きな荷重を軟弱地盤に与えるわけではない。また、バンコク粘土は若干過圧密になっている場合が多い。従って、試験工事でも大きな過剰間隙水圧が発生し、これをドレーンが効果的に排水するほど大きな荷重が掛けられたかは疑問である。図-7にLeroueilら<sup>21)</sup>が提唱している、盛土下の鉛直応力

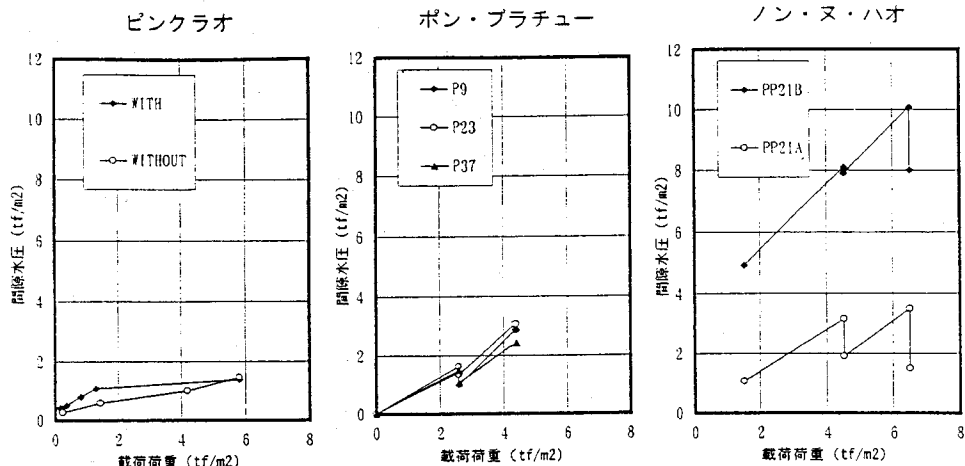


図-7 盛土工事における鉛直増分応力と過剰間隙水圧の関係

増分と発生過剰間隙水圧の関係をプロットすることにより、地盤の状態を判断する図を示した。彼らは、このプロットで勾配が1.0に近い状態、すなわち発生する過剰間隙水圧増分が、鉛直荷重増分とほぼ等しくなるほど地盤が降伏に近付かなければ、サンドドレーン等の圧密促進工法は十分効果的でないとしている。プロットされたピンクラオ橋とポン・プロチュー試験盛土の過剰間隙水圧は、Leroueilら<sup>21)</sup>が指摘している限界的な勾配(約1.0)からはかなり低いことが分かる。このように試験盛土における荷重増分が比較的lowであったことも、バンコクではサンドドレーンが余り効果的でないという評価になった一因であると考えられる。

このほか、非技術的な理由としては次のようなことが考えられる。

3)バンコク地域における過剰揚水に伴う下部帯水層の水頭低下の影響が、サンドドレーンの効果の判定を混乱させた面がある。また、ドレーンを深く打ちすぎると、かえって盛土荷重により生じる沈下量以上の、過度の沈下を引き起こすと考えられた。

4)バンコクでは、きれいな砂は山地から運搬する必要があり、100km近い輸送を必要とするため、それほど低廉ではない。

以上のような複合的な理由のため、サンドドレーン工法は、タイでは普及しなかったのではないかと考えている。

#### (4) PVD工法の急速な普及

PVDの大幅な採用のきっかけとなった事実が、ローンを提供する国際機関のニュー・チョンブリ・ロードの

フィージビリティ・スタディーで、杭基礎で設計された盛土工事が高価すぎると指摘されたことに始まっているというのは興味深い。

経済・社会的な伸展の結果、より高品質のインフラ構造物が求められていたのであるが、このようなとき杭基礎の代替工法として、PVD工法が採用されたこと背景には、PVDという材料の、サンドドレーン等他の地盤改良工法で用いられる砂等の天然の材料とは、かなり異なった点があったと著者は考えている。

先に3章でも述べたように、PVDは工業製品であり、この製品をセールスするのは、その生産者(石油化学関連)もしくはその代理店である。世界的なジオテキスタイルの普及にも類似した背景があると思うのであるが、これらのセールス主体は、製品を販売することを当然のことながらその第一目標としており、建設プロジェクトを入札・落札することが第一義的な目的ではない。従来の地盤改良工法は、事業主体、設計者または施工業者が、建設プロジェクトを効率的に行うための手段として考え、メリットがあれば採用するという方式であったのと比べると、かなり異なる。特に欧州系のPVD生産者は、東南アジアを将来性のあるマーケットと考え、相当程度の営業努力が既に行われていたことは、このPVDの早い普及に大きく寄与したことに、疑いの余地はない。

すなわち、タイでのPVDの急速な普及の理由として、上記2点を要約すると、

1)インフラ構造物の高品質化と、これに合う最も低廉で効果的な工法として、PVD工法が選ばれた。このとき国際機関の行ったFSが一つのきっかけとなった。

2)PVDに関する非常に積極的なセールス活動が、主

に欧州の製造者やその代理店により行われていた。

この他の副次的な理由として、

3) PVDは、石油産業の副産物であり、生産設備もそれほど大がかりなものではないので、国内生産が容易に可能になる。すなわち輸入品とはならない。

4) 工業製品であり、杭の施工に親しんできたタイの事業主体、設計者、施工者にとっては、違和感の少ない工法である。(これは、インタビューのとき聞いた意見である。)

しかし、PVD工法の採用に関しては問題点も多い。技術的な問題点としては、施工者が圧密の進行に伴い盛土高さを管理するといった、圧密促進工法にほとんど経験がないため、特に導入段階で適切な施工管理が行われるかは、十分に注意する必要があると思われる。事実クロン・シップガオの鉄道盛土の建設工事では、施工者の管理能力の不足により、盛土を急速に施工しすぎて、一部崩壊を生じてしまったという話も聞いた。

また、PVDについて本格的な試験盛土工事はタイではまだ実施された例はなく、(AITで小規模な盛土試験は行われている<sup>20)</sup>)、バンコク粘土を対象としたこのような試験工事を行い、PVD工法の効果を周知させておく必要があると思われる。

## 5. むすび

本研究では、タイにおけるサンドドレーン工法とプラスチックドレーン工法(PVD工法)の導入の経過を調査し、その差異を明らかにすることにより、途上国への地盤改良技術の技術移転問題を考えた。

両工法はともに軟弱粘性土地盤の圧密を促進することを狙った工法であり、地盤工学的な原理に違いはない。またバンコク粘土が圧密促進工法に特に適さない粘性土であるという事実はない。

ところで前者の導入過程では、試験工事などでいくつかの技術的な不手際(排除方式の施工、低い荷重程度等)があり、その効果を明確な形で示すことが出来なかったことが、普及しなかった一つの原因と考えられる。また、導入のタイミングが、タイの経済発展の状況にマッチしたものでなかった。タイの社会・経済の伸展に伴い、高品質のインフラ構造物が要求される時代となったが、サンドドレーン工法は結局タイでは普及せずに終わると考えられる。

一方PVD工法は、タイで社会的なニーズが生じたとき、ちょうど世界的なマーケティング活動がPVDの

製造者やその代理店により盛んに行われている時期に当たり、そのターゲットの一つとなったと考えられる。

しかし、PVD工法については、次の2点を今後の問題点として指摘しておきたい。

1) タイの建設工事では圧密促進工法はそれほどポピュラーな工法ではなく、施工業者なども経験が少ない工法なので、今後施工管理法等について注意深い導入が成されないと、その効果を十分に発揮することが出来ないとと思われる。

2) バンコクの盛土工事では、盛土高さはそれほど高くはない(2.5m前後)。さらに、バンコク粘土は若干過圧密状態にある場合が多い。この荷重荷重程度では、圧密促進工法が十分効果的に働くほど高い荷重程度を与え、過剰間隙水圧を發揮させているか疑わしい。プレローディング工法の併用等も検討される必要がある。

地盤改良工法の技術移転においても、その社会の経済発展の状況に合わせたタイミングの良い移転は、成功のための不可欠の条件である。サンドドレーン工法の導入は、その意味で若干時機尚早であったと思われる。しかし、同時にサンドドレーン工法の導入では、排除方式の採用、荷重が低かった等、技術的に稚拙な点もあり、これがサンドドレーンはバンコク粘土には効果が少ないという間違った印象を、地元技術者に与えてしまったのも事実であると思われる。このような点は技術移転に当たっての土木技術者の責任であり、PVD工法の導入で、この轍を踏まないようにしなければならない。

**謝辞:** 本研究は、(財)前田記念工学振興財団の研究助成を受けて実施された研究、「土木工学技術の途上国への技術移転に関する問題点と対策」であることをお断りし、研究助成に対し深謝の意を表す次第である。

また、本文中でも述べた通り、本論文で述べた多くのことは、1994年3月に実施した現地研究調査によって得られた情報に基づいている。ここに調査に御協力頂いた方々の名前を挙げ、深謝の意を表したい。

A. S. Balasubramaniam, D. T. Bergado, N. Phien-wej, T. H. Sear (以上AIT), Yongyuth T., Teerachart R. (以上タイ高速道路局), Nopporn P. (EGAT) Thanu H. (王立灌漑局) Warakorn M. (カセサート大学) Sura-chat S. (チュラロンコン大学), K. Petchgate (キングモンクット大学) V. Charumas (General Engineering Public Co. Ltd.) 久保寛治 (JICA専門家), 臼井安雄 (タイ・テックス), 坂内憲之 (タイ日本コンクリート), S. F. Chan (Pilecon Engineering BHD), E. H. C. Chan (Nylex

(Malaysia) Berhad), S.K.T. Law (L&M Geotechnic SDN. BHD.), Z.C. Moh, C.T. Chin (以上Moh and Associates Inc.)

### 参考文献

- 1) 海外経済協力基金 開発援助研究会: 経済協力用語辞典, p. 247, 1993.
- 2) 水谷四郎編集: 1992から1993年版 タイ国経済概況, バンコク日本人商工会議所, pp. 78-87, pp. 273-278, 1993.
- 3) ESCAP (Economic and Social Commission for Asia and Pacific): Geological Information for Planning in Bangkok, Thailand, in 'Atlas of Urban Geology', Vol. 1, pp. 24-60, United Nations ESCAP, 1988.
- 4) Moh, Z.C.: Geotechnical engineering in Southeast Asia, past, present and future, *Geotechnical Engineering*, Vol. 19, pp. 1-72, 1987.
- 5) Parnpoy, U.: Deformation analysis and settlement prediction of Bangna-Bangpakong highway (section 1), AIT M. Eng. thesis, 1985.
- 6) Kangsasiatam, M.: A comparison between oedometer and stress path methods for settlement analysis under undrained loading conditions, AIT M. Eng. thesis, 1970.
- 7) Moh, Z.C., Brand, E.W. and Nelson, J.D.: Pore pressure under a embankment on soft fissured clay, Proc. Conf. on Performance of Earth and Earth-supported structures, Purdue Univ., W. Lafayette, Vol. 1, pp. 243-272, 1972.
- 8) Eide, O.: Geotechnical problems with soft Bangkok clay on the Nakhon Sawan highway project, NGI publication No. 78, 1968.
- 9) Ciridon, W.A.: Performance of sand drain at the Chang bridge, AIT M. Eng. thesis, 1972.
- 10) 本城勇介: 東南アジア地域における地下水の過剰揚水による地盤沈下の現状と対策, (財)産業地質科学研究所 研究年報第5号, pp. 177-187, 1994.
- 11) Boonsinsuk, P.: Stability analysis of a test embankment on Nong Ngoo Hao clay, AIT M. Eng. thesis, 1974.
- 12) Mallawaarachy, G.U.: Performance of sand drains in soft clays, AIT M. Eng. thesis, 1978.
- 13) Balasubramaniam, A.S.B. and Bergado, D.T.: Geotechnical problems related to construction activities in soft Bangkok clay, ISSMFE-NUS-AIT Seminar on soil improvement and construction technique in soft ground, Singapore, pp. 174-185, 1984.
- 14) Moh, Z.C. and Woo, S.M.: Preconsolidation of soft Bangkok clay by non-displacement sand drains and surcharge, Proc. 9th SEA Geotechnical Conference, Vol. 2, pp. 8/171-184, Bangkok, 1987.
- 15) Balasubramaniam, A.S., Y. Honjo, L. K. Hong, N. Phien-wej and D.T. Bergado: Ground improvement techniques in Bangkok subsoils, Proc. Engineering for coastal development, Kouzai Club, pp. 65-104, Bangkok, 1989.
- 16) Holmberg, S.: Bridge approaches on soft clay supported by embankment piles, *Geotechnical Engineering*, Vol. 10, pp. 77-89, 1978.
- 17) Broms, B.B.: Problems and solutions to constructions in soft clay, Proc. 6th Asian Regional Conference SMFE, Singapore, Vol. 2, pp. 3-38, 1979.
- 18) Broms, B.B.: Soil improvement methods in South east Asia for soft clay, Guest lecture, Proc. of 8th ARC SMFE, Kyoto, 1987.
- 19) Rixner, J.J., S.R. Kraemer and A.D. Smith: Prefabricated Vertical Drains, Vol. 1, Engineering Guidelines, U.S. Department of Transportation, Report No. FHWA/RD-86/168, 1986.
- 20) Bergado, D.T., J.C. Chai, M.C. Alfaro and A.S. Balasubramaniam: Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment, Asian Institute of Technology, 1992.
- 21) Leroueil, S., Magnan, J.P. and Tavenas, F.: *Embankments on Soft Clay*, Ellis Horwood Limited, 1990.
- 22) Balasubramaniam, A.S., D.T. Bergado, N. Logathan, T.H. Sear, N. Phien-wej and Y. Honjo: Geotechnical consideration in infrastructure aspects of coastal development in Thailand, 1993.

(1995. 5. 15受付)

## TRANSFER OF GROUND IMPROVEMENT TECHNOLOGY TO THAILAND

Yusuke HONJO

A study is made to investigate on the development of soft ground improvement technologies in Chao Phraya Plain where Bangkok is located. In Thailand, quite number of test constructions on sand drain method have been carried out by many domestic and foreign agencies, since early 1970th; however, this method has never been applied to any large scale government projects. On the other hand, prefabricated vertical drain(PVD) method, only started to be introduced to this country in early 1990th, is now quickly popularized, and adopted in the large scale government projects such as the highway constructions and the new international airport land reclamation work. This study focuses on finding out the reasons why the considerable differences have been made in the development of these two ground improvement technologies from the stand point of technology transfer based on interviews to the concerned personnel and literature review.