

竹杭・竹マット基礎工による防波堤の建設

ジャカルタ漁港における実施例

川村 開保

正会員(株) パシフィック コンサルタンツ インターナショナル 港湾事業部海外担当部長

川端 英資

正会員(株) パシフィック コンサルタンツ インターナショナル 港湾事業部課長

折下 定夫

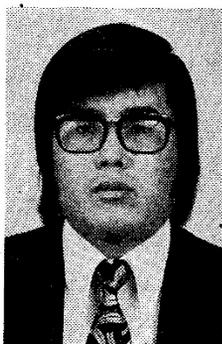
正会員(株) パシフィック コンサルタンツ インターナショナル 港湾事業部



Nobuo KAWAMURA



Eiji KAWABATA



Sadao ORISHIMO

はじめに

筆者らは、1980年4月から1984年6月まで、インドネシア国のジャカルタ漁港の建設に従事してきた。

この漁港プロジェクトは、インドネシアにおける最初の、かつ東南アジアで最大の本格的漁港であるということと、本文主題に述べるように、地元の材料と知恵をもってきわめて安価な工事費で完成したという二つの意味で、画期的なプロジェクトであったと考えている。

新鮮な魚を豊富に食卓に提供するという食習慣がインドネシアで確立しているとはまだ言い難い。その意味では、この漁港プロジェクトの価値が、真に国民生活に浸透していくには時間がかかるかもしれない。しかし、現地で入手可能な材料および豊富な労働力を最大限に利用して、建設費の軽減をはかり、かつ輸入材の輸入に伴う外貨の流出を最小限にとどめたことは、経済の実状と発展意欲との間のアンバランスから、最小の資金での最大の投資効果の追及を厳しく求めざるを得ない途上国の現状に対して、筆者らなりに真剣に対応したものと考えている。

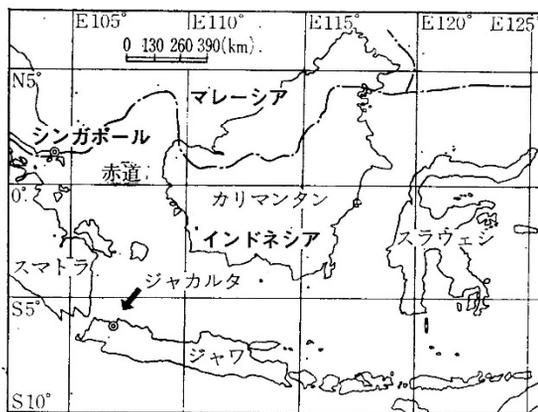


図-1 インドネシア周辺の国々に

以下、プロジェクトの概要と、採用した構造の工学的理論についての——その中にはまだ解明しきれないものがあるが——若干の考察を述べ、ご参考に供したい。

1. ジャカルタ漁港プロジェクトの概要

インドネシアのジャカルタ湾沿岸の地層は、一般に軟弱な沖積層から成り、防波堤・岸壁等単位面積あたりの荷重の大ききなりがちな港湾構造物を築造するには、きわめて不利な条件下にある。しかし、首都ジャカルタへの水産物供給とインドネシア水産業発展の拠点として図-2に示す地点に、日本政府による開発援助プロジェクトの一つとして、新ジャカルタ漁港(図-3)が計画された。

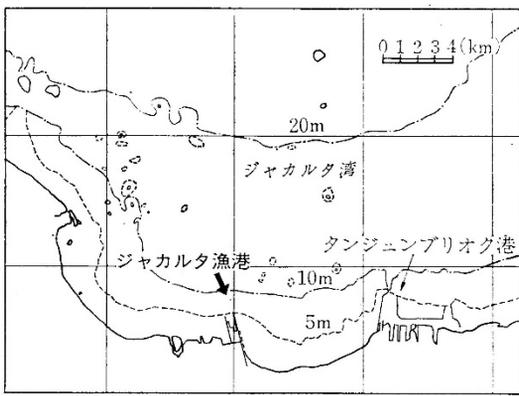


図-2 ジャカルタ漁港の位置

かつ現地の材料が最大限に利用できるという理由で、竹杭・竹マットを基礎工とする捨石式傾斜堤(図-4)が採用された。建設工事(港湾工事分)は、1980年3月に着手され、1982年12月に完成した。港湾施設関係の概要は以下のとおりである。

- 埋立工事(海砂): 140万 m³ (29 ha)
- 埋立工事(港内浚渫土砂): 83万 m³ (31 ha)
- 6m 水揚岸壁(矢板式): 150 m
- 4.5m 水揚岸壁(RC 杭横棧橋式): 599 m
- 4.5m 休憩岸壁(同上): 775 m
- 防波堤(竹杭基礎捨石式): 1040 m
- 護岸(同上): 3040 m

埋立地完成に引き続き、漁港機能施設(冷凍・冷蔵庫、マーケット等)が建設され、1984年7月に東南アジアで最大の漁港として開港された。当港は、ジャカルタ市および西部ジャワ地域の水産物流通の拠点として、今後も整備が進められていくこととなっている。

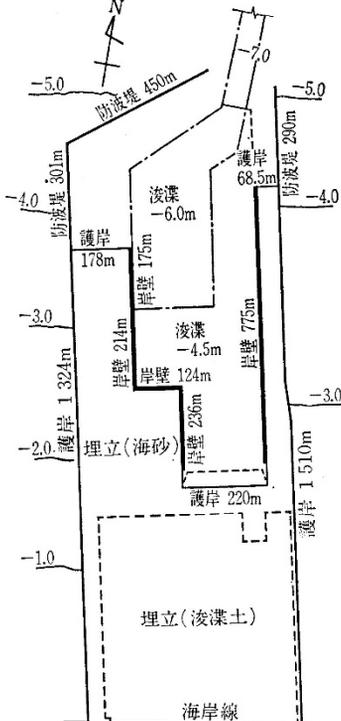


図-3 ジャカルタ漁港の平面(港湾工事分)

この計画では、港内静穏度を高めるとともに、港内への土砂の埋没を防ぐための防波堤の建設が大きな比重を占めている。なお、プロジェクトは日本政府(海外経済協力基金 OECF)の援助を受けてインドネシア政府・農業省・水産総局が実施した。

建設予定地には、粘着力が 1.0 t/m² を下回る軟弱粘土層が海底面から 10m 程度存在する。そこで、防波堤の構造物の型式の選定にあたってはいくつかの案が検討されたが、建設費が格段に安く、

2. 防波堤の設計の経緯

(1) 土質

工事開始までにボーリング 19 本、オランダ式コーン貫入試験 39 本を実施した。プロジェクト全域では、ほぼ類似した地層であった。防波堤付近の土質調査結果は図-5 および 図-6 に示すとおりである。海底面から約 10m は含水比が約 130% で粘着力 $C=0.3+0.06Z$ (t/m²) の軟弱な上層粘土層が存在し、その下には $C=3\sim 10$ (t/m²) の下層粘土層がある。-20m 付近に N 値 50 を越える砂層が存在し、岸壁工の基礎杭の支持層となっている。このような軟弱地盤の処理について、発注者であるインドネシア国水産総局の技術アドバイザーのインドネシア

シア大学ルセノ博士から「近隣のタンジュンプリオク港(ジャカルタ商業港)において、1960年ころ、図-7 に示すような竹杭を用いた防波堤を構築したことがあるので、ぜひ漁港の防波堤構造選定にあたっては、検討対象の一案に加えてもらいたい」と要望された。

(2) 竹杭・竹マットの考え方

軟弱地盤中の竹杭および竹マットの挙動については、実例があるとはいいながらも系統的に整理・報告されたものはなかった。そこで、タンジュンプリオク港における考え方を聴取して計算上の仮定を次の点に置いた。

- ① 堤体の荷重(最大 $p=6.4$ t/m²) は、② 下層の粘土層 ($C>3.0$ t/m²) に貫入された竹杭の支持力および摩擦力(Q)により支持さ

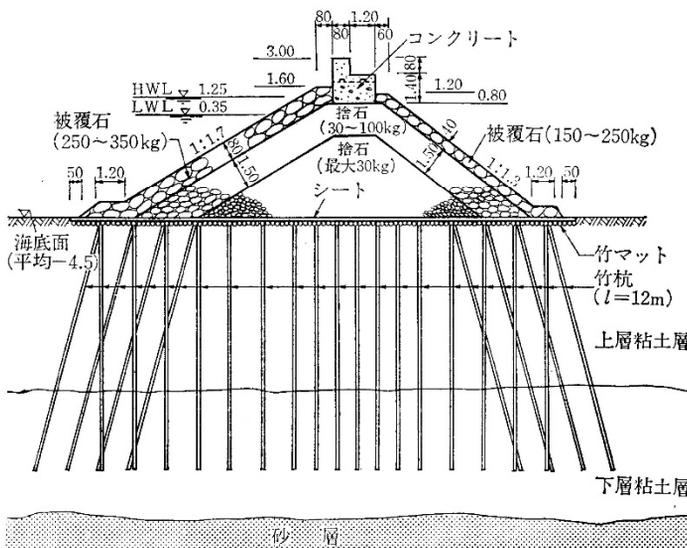
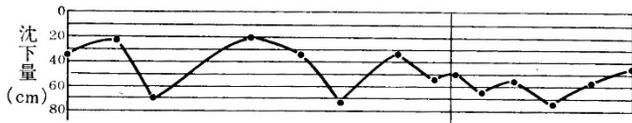


図-4 防波堤の標準断面



注：沈下量は、防波堤完成後13か月後の値。ケース①および②の沈下曲線は 図-12 参照。

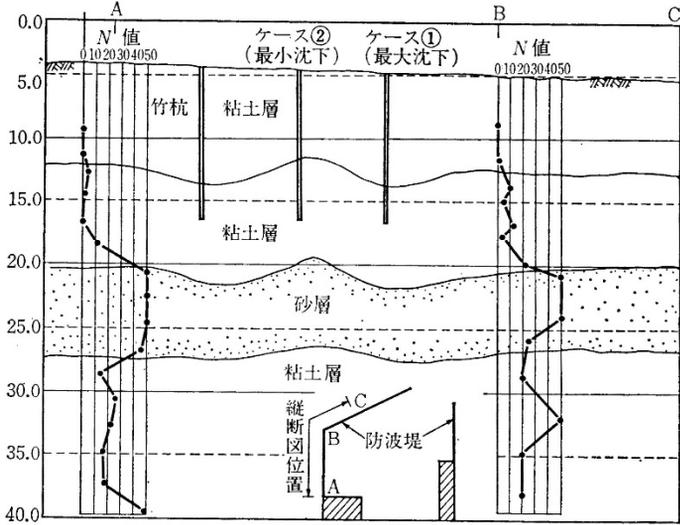


図-5 防波堤付近の地層縦断面図および沈下量

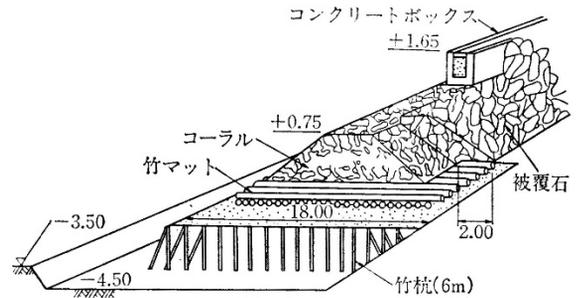


図-7 タンジュンプリオク港の防波堤

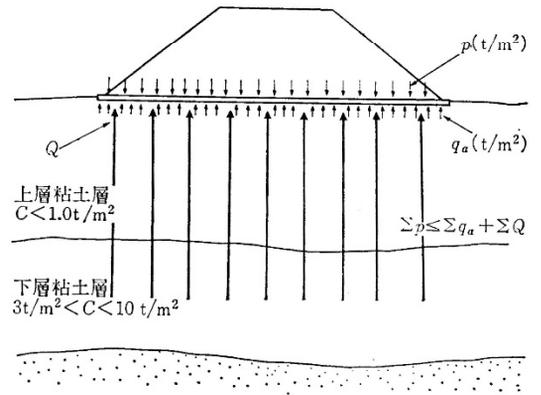


図-8 荷重分布

標高 (m)	土質	柱状図	N値		q_c (kg/cm ²)		G_s	ω (%)	γ_t (t/m ³)		e	$q_{u/2}$ Cu (kg/cm ²)		C_c		P_g (kg/cm ²)	
			20	40	20	40	2.6	2.7	50	100		1.4	1.6	2	3	0.2	0.4
-5	海底面																
-10	CH																
-15																	
-20	SM																
-25																	
-30	MH/CH																
-35																	
	SC																

図-6 地質調査の結果

れる部分と、⊕竹マットによって面荷重 (qa) として、直接、表面地盤に伝えられる部分とに分割される (図-8 参照)。したがって、円形すべりを起こそうとする荷重は、⊕のみと軽減される。この場合、竹杭頭において、竹マットと竹杭が独自の働きをしないということ、竹マットは竹杭の杭頭軸力に対応する十分なせん断力をもっていることが条件でもある。

② 竹杭は砂層支持層まで到達していないので、短期圧密沈下に合わせて長期圧密沈下が発生する。

③ 円形すべりに対して、竹杭・竹マットとも、その材料自身のもつせん断力が円形すべり

表-1 基礎工構造形式の比較

工法	方法および特徴	材料および建設機械	施工上の問題点	工費	評価
① 床掘置換工法	軟弱な粘性土を掘削除去し、構造物の基礎として良好な砂質土などに置き換える。短期間で確実な改良地盤が得られる。	・浚渫船 ・ホッパーバージ ・引き船 ・砂	・大量のシルトの浚渫および砂が必要 ・置換砂に適した砂が入手しにくい ・埋立工事と競合する	100	・埋立工事と競合し工程に支障が生じる。コストが高い。
② サンドコンパクションパイル工法	鋼管に砂を充填し、振動によって砂杭を造成し地盤の強度を図る。軟弱地盤を床掘りすることなく強制的に砂と置き換えることができる。	・サンドコンパクションパイル打設船 ・台船 ・引き船 ・砂	・サンドパイルに適した砂が入手しにくい ・サンドコンパクションパイル打設船を日本から回航する必要がある。 ・インドネシアにおける実績がほとんどない。	180	・インドネシアにおける実績がなく、コストが格段に高い。
③ 竹杭・竹マット工法	軟弱地盤に竹杭を打設し、その摩擦抵抗と竹マットによるせん断力で上載荷重を支持する。	・竹杭打設船 ・竹材	・竹材が大量に必要 ・海上での施工の実績が少ない。	35	工費が安く現地材料および労働力が利用できる。また、施工機械も現地調達できる。

注：工費は、一般的な工法である床掘置換工法を 100 として比率で示した。

に対する抵抗となることが期待される。

④ 海底面下に打設された竹杭は、その材料特性から、環境による材質変化をほとんど受けることなく、腐りにくく耐久性がある。また、圧密が進行すれば地盤粘着力も増加し、円形すべりの安全率も向上する。

(3) 構造形式の比較

軟弱地盤における防波堤の構造形式は、表-1 に示す3案について比較検討を行った。その結果、竹杭・竹マットの基礎工を採用することが、格段に工費が安いので最適案と判断された。圧密による将来の沈下については一応の計算によってあらかじめ天端高を高くしておく一方、将来沈下が落着いた段階で天端の補正調整を行うことで、防波堤の機能を維持していくこととした。

一方、わが国では、軟弱地盤上に、そだまたはシートを敷設し、盛土によって地盤に生ずる側方流動を拘束してすべり破壊を防ぐ拘束工法や、木杭等により構造物を支持する工法が採用された例もあるが、本プロジェクトのように両者を併用している例は少ない。

3. 施 工

(1) 製作および施工方法

竹杭の製作は、図-9 のように陸上で人力により製作し、図-10 の現場において製作した竹杭打設ドライバーで、ラム (約 700 kg) の自由落下 (約 5 m) により打設した。竹杭が下層粘土層に到達すると、1 打あたりの貫入量は 10~15 cm となり、エンジニアリングニュース公式を用いると、極限支持力約 14~10 t と計算される。竹マットは図-9 に示すように二重になっていて、防波堤の延長方向 50 m を 1 ユニットとして製作し、4 m のジョイント用マットで結合した。竹杭・竹マットの施工手

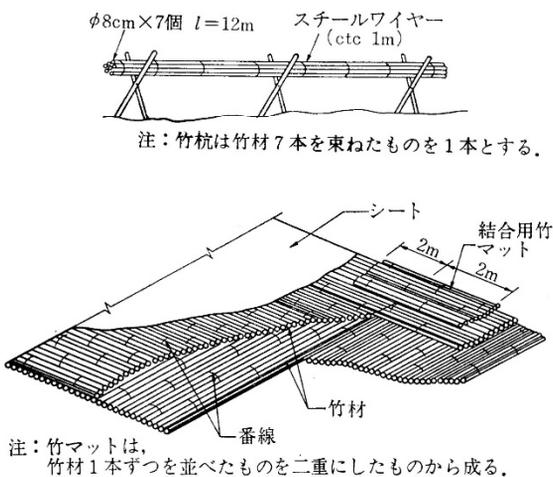
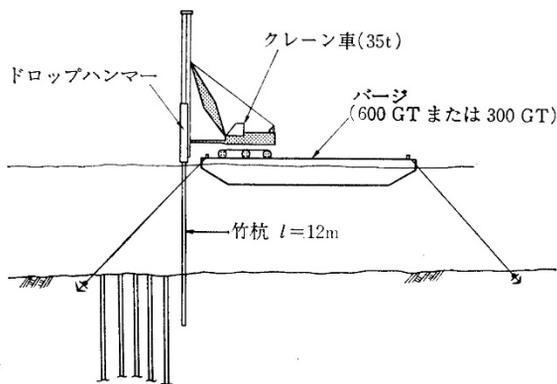
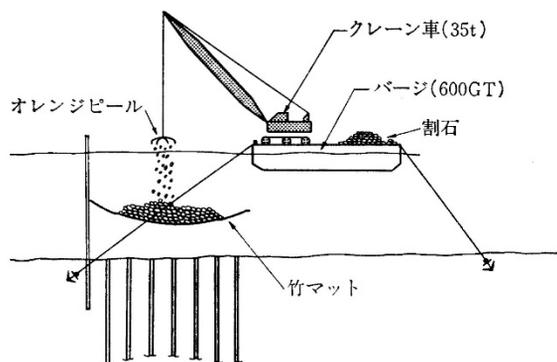


図-9 竹杭・竹マットの製作



(a) 竹杭の打込み



(b) 竹マットの敷設と割石の投下

図-10 竹杭・竹マットの施工

順は 図-10 のとおり、① 竹杭製作、② 竹杭打設、③ 竹マット設置、④ 捨石とマットの敷設の順である。

(2) 竹の品質管理

竹材については、製作されたものについて、仕様の形状を満足しているかどうかを現場において検査し、適時試験片を取り、せん断力の試験 (図-11) を実施し、材質の確認を行った。ちなみに、わが国の竹材の平均強度

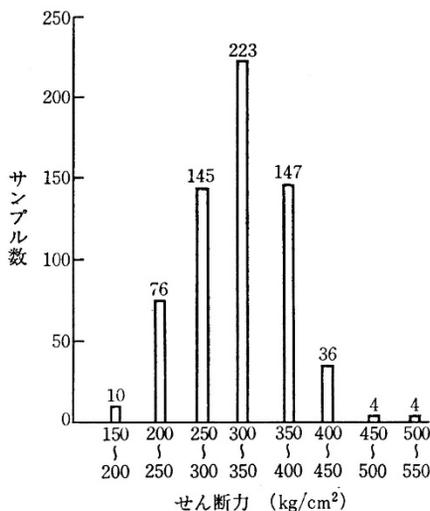


図-11 竹材のせん断試験結果

は 170 kgf/cm^2 (モウソウチク、マダケとも)¹⁾とされている。

(3) 施工中の沈下

堤体の捨石工が完了する時点(捨石開始から約1年間)までに、断面中央部で、即時沈下および初期圧密沈下により最大 2.4 m 程度の沈下が発生した場所があった(捨石工完了後のボーリングで確認)。これは、場所によっては上層軟弱粘土層が予想以上に厚く、12 m の竹杭が下層粘土層の摩擦力が期待できるところまで十分貫入されていなかったため、すなわち、2. (2) ① で述べた ① の支持力が不足したため捨石投入とともに沈下したものと判断される。また、防波堤先端部では、支持層が -35 m 以深と深く、打設した竹杭が下層粘土層にも到達しておらずすべり破壊が発生し、他の工法を採用せざるを得なかった箇所もある。

(4) 完成後の沈下

捨石堤体が完成した後の約1年間の沈下量は、最大で 70 cm、最小 20 cm 程度であった(図-5 および 図-12 参照)。最大沈下量が発生している部分は、捨石投入時にも沈下が大きく捨石投入量も多くなっており、杭の摩擦力が不足していることに加えて、堤体の荷重も大きくなったことから、沈下量も大きくなったものと判断される。このようなことから、防波堤全体では、図-5 に示されるような不同沈下が生じた。不同沈下によって生じた堤体表面の天端の不整合は、漁港開港直前に、天端コンクリートの調整および被覆石の追加投入により復旧させた。

4. 竹杭の効果

防波堤の標準断面について、竹杭・竹マットを無視して円形すべりの計算をすると、安全率は 0.6 程度である。それにもかかわらず、堤体が安定している事実から

して竹杭・竹マットは、堤体の構造強度を向上させる基礎工としての効果もっていることは明らかであるが、その理論については不明確なところが多い。

モデル構造を考えてみると、羊羹^{ようかん}の上に豆腐を重ねた基礎の中に妻揚子をさして、その上に水を入れたビニール底の升を乗せたものとなる。

現在のところ、摩擦杭によって支えられた構造物の長期沈下量の推定計算は、貫入杭長の下から 1/3 の面に、杭に伝えられている荷重が等分布しているという仮定のもとに、その面から下の圧密量を計算することとなっている²⁾。マットと杭の荷重分担を考慮して、杭が分担する分についてこの考え方を適用し、図-5、6、12 に示される土質プロフィル、堤体沈下状況を重ねながら考えてみると、以下ようになる。

① 竹杭が下層粘土層に到達していない場合(すなわち、粘着力が 3.0 t/m^2 以上あって、杭の摩擦力が期待できる層に到達していない場合)は、竹杭の効果はほとんど期待されず、すべり破壊が生じる。この場合、図-8 の荷重分布図のうち、 Q はほとんどゼロである。

② 竹杭が下層粘土層に到達していても、十分な摩擦力が期待できるほどの貫入量がない場合は、すべり破壊は発生しないが、施工中の沈下量が多い。施工後も竹マットが負担する荷重が大きく、堤体全体の沈下量が多い(図-12 のケース①の場合は、計算値で杭とマットの荷重の分担を 3:7 とすると実測値に比較的合致する)。

③ 竹杭が下層粘土層に十分貫入されていれば、施工中の沈下も施工後の沈下も比較的小さい。上載荷重のほとんどが杭に伝達され、下層粘土層の摩擦力により支持されていると考えられる。この場合であっても長期的な杭の沈下、もしくは杭先端より 1/3 の面から下層の粘土層を圧密層とする圧密沈下などの沈下が発生する(図-12 のケース②の場合は、計算値で杭の荷重分担を 100% とした場合、実測値に比較的合致する)。

これを、工学的見地から包括的に述べるならば

- a) 杭とマットの荷重分担率の問題
- b) 摩擦杭の長期的挙動(塑性的考え方による摩擦力の時間的低下)

が組み合わせられた問題であると考えて、長期観測結果に基づいた経験的理論解が必要であると考えている。

あとがき

竹杭および竹マットの製作のために、約 100 万本の竹材が西部ジャワ・南スマトラから採取された。竹杭・竹マットの製作はすべて人力により、無限の労働力が工事に生かされた。建設現場は、雨季の 1~2 か月を除けば大した波もなく、竹杭打設の稼働率はかなりよく、約 3

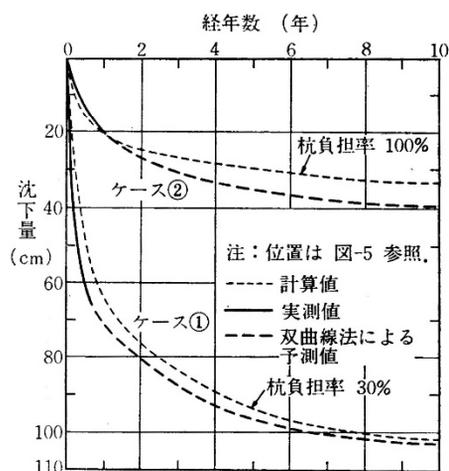


図-12 沈下量の実測値と計算値

万本の竹杭打設もほぼ工程どおり施工された。

インドネシアでは、護岸の基礎、道路の路床、建築物の基礎に、いまでも多くの竹材が使用されているが、一つのプロジェクトでこれだけ多量の竹材が使用されたケースは、インドネシアでも初めてであったと思う。防波堤の挙動については、現在もジャカルタ漁港職員によって観測が定期的に継続されており、竹杭も同じ条件で海底粘土中に埋め込まれ、定期的に強度の経年変化を調査することになっている。

インドネシアに限らず多くの発展途上国において漁港整備が望まれているが、本例のように、大規模でしかも大都市に立地しているものばかりでなく、比較的小規模なものを地方に建設することが要望される場合も多い。このような場所では、木、竹、石等地元の産品と土着の技術を利用することが、施設の維持管理の点からも望ま

しい場合がある。現在のわが国の土木技術は、鉄、コンクリート等均質度の高い工業製品の使用を前提とした体系となっているが、各国固有の資材と伝統的技術の活用についても関係者の関心が注がれることを期待したい。

なお、本文をまとめるにあたり、水産庁漁港部の三橋宏次氏から貴重な助言を頂きました。さらに、本プロジェクトの計画・設計にあたってご指導を頂いた当時の原貞純 OECF 調査開発部次長および木村茂雄水産庁漁港部建設課長にも併せて誌面を借りて厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 木材工業ハンドブック, 丸善, pp. 188~189.
- 2) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 5~37.

(1985.10.4・受付)