

狭山池ダム・堤体の保存事業について*

Preservation of bank by PEG Impregnation

金盛 弥** 古澤 裕*** 木村 昌弘****西園 恵次*****

By Wataru KANAMORI, Yutaka HURUSAWA, Masahiro KIMURA, Keiji NISHIZONO

狭山池は古事記や日本書紀にもその築造が記載されている日本最古のダム形式のため池であり、様々な文献に狭山池の修改築の歴史が記述されている。大阪府の調査の結果、堤体には幾多にわたる過去の修改築の跡が層になって残されていることが明らかになり、また古代の堤には木の葉が10 cm～15 cmのピッチで水平に敷かれた古代の築堤工法（敷葉工法と呼んでいる）も見られることがわかった。

大阪府では狭山池のダム化工事の中で、旧取水施設の撤去のため堤体を一部全断面開削する機会に、この歴史的にも土木工学上も貴重な堤体を一部全断面で保存展示することとした。

本稿は、堤体の保存を実施するための調査検討や現在までの堤体保存工事の実施状況について報告を行うものである。

1. はじめに

狭山池は築造以来長い歴史のなかで、行基（奈良時代）、重源（鎌倉時代）、片桐且元（江戸時代）など歴史上の著名な人々により、国家的な事業として幾たびも修築が行われてきた。大阪府では多数の文献に残されている狭山池の改修史を堤体の中にたどるべく、平成2年に「狭山池堤体保存委員会」（委員長、今本博健京都大学防災研究所教授）を設置し、調査検討を行った結果、各時代の盛立が層になって残されていること、古代に盛立てた層には敷葉工法と呼んでいる10 cm～15 cmのピッチで水平に敷かれた木の葉の層が見られることが確認されたため、委員会の提言を受け、底幅60 m、高さ15 mの堤体を全断面で保存・展示することにした。しかし、このような大規模な土構造物を過去に保存した事例がないため、保存工事の実施にあたり、室内実験や現地実験等を行い、様々な課題について検討を行い、施工方法を決定した。

本稿は、堤体の保存を実施するための調査検討や現在までの堤体保存工事の実施状況について報告を行うものである。

2. 堤体保存のための調査検討

堤体全断面の保存・展示方法については、全断面一括採取、ブロック採取、盛土復元および転写など各種方法（表-1）が考えられ、展示効果、維持管理、施工性などから、当委員会においては、大型ブロック採取と樹脂含浸による方法が最適と考えられ、その可能性を確認するため、大型ブロックによる土塊採取試験、樹脂材料の選定、樹脂含浸試験、樹脂含浸ブロックの物性試験などを行った。

*Keyword: ダム、保存、PEG

正会員 大阪府土木部長 *正会員 大阪府土木部ダム砂防課長

****正会員 大阪府土木部ダム砂防課主幹 *****正会員 大阪府土木部ダム砂防課ダム建設係長

(〒540 大阪府中央区大手前2丁目)

表-1 展示保存方法案

保存・展示方法	①無処理での全断面一括採取による方法	②ブロック採取および樹脂含浸による方法	③現地の土を用いた復元盛土による方法	④乾土による方法
概念図および概要	 堤体断面を切り取り移動 安定のため断面は傾斜	 不攪乱ブロック採取し、樹脂含浸で強化、積み上げる	 堤体から攪乱土を取り、展示場所で盛土する	 堤体断面に布を貼り、樹脂を吹きつけ、引きはがす
採取・移動の課題	土の崩壊防止、水分変化による収縮、変色がある。重量が1万tと大きく、移動距離に制約	1.5m×3m×0.5m程度のブロックで移動は容易、ブロック間の処理が必要	細かな土質変化に応じた採取は困難、移動は問題なし	採取量は約20kg/m ² 程度のため数m ² ずつの分割採取となる。粘性土では採取厚さが薄い
展示方法の課題	大きな展示空間が必要。土塊が含水状態のため、間隙水の補給や地下水処理が必要。カビなどの対策	樹脂含浸ヤード、乾燥ヤードが必要。樹脂含浸土の乾燥収縮の確認	敷土などの細かい遺物の隙間は困難。含水状態の展示のため傾斜させる必要、水分維持の必要	主に土粒子の層層接着保存のため、立体感に乏しい
展示断面の耐久性、色、形状の維持性	大きな土塊を湿潤状態で展示するため形状維持が難しい。経年の酸化による変色が早い	樹脂の耐久性の確認が必要だが、ブロックの補修は容易。水は樹脂で置換するので、色、形状変化が少ない	土塊断面の傾斜により形状維持、攪乱土のため遺物や色、土層の細かな再現は困難	小規模での耐久性実証はある。土層の再現性は良好。変色、形状変化少ない
展示効果	土塊が大きいので迫力があり、展示効果大	ある程度の興行きがあり、土塊の重量感、遺物の保存性がある	堤体の色、土層の表現が不十分で、展示効果不足	土層断面の表現は②と同程度。立体感に欠ける

(1)大型ブロック採取

大型ブロックによる土塊採取については、狭山池底内にて実験工事を行い、施工方法の検討を行った。その結果、幅3m、長さ1.5m、厚さ0.5mの大型ブロックの採取が可能である事が確認され、この大きさでの土ブロックを基本に、樹脂含浸による保存展示の検討を進めた。

(2)樹脂含浸

樹脂含浸については、埋蔵木製品遺物の保存処理で実績の豊富な水溶性樹脂のポリエチレングリコール（PEG）を取り上げ、室内試験および現場試験にてその含浸条件、含浸効果および含浸管理方法等について検討した。以下に、樹脂含浸法で実際行う際に課題となる事項についての検討結果を述べる。

なお、室内における各種含浸方法の実験用には、表-2に示す現場で採取した攪乱土（S₀～S₁₃）および不攪乱土（S₀）を用いた。攪乱土は、突き固めてφ50mm、h120mmの供試体にして実験に供した。また、部分浸漬・自然含浸実験用にはφ58mm、h120mmの円柱供試体を用いた。

a) 樹脂含浸方法

①予備実験により、分子量の小さいものほど含浸速度が大きく、また、含浸速度に対する濃度の増大効果も顕著であることも判明したため、分子量33000

表-2 供試土と供試体の基本的性質

項目		土の種類	シルト質砂					粘 性 土				
		S ₀	S ₂	S ₃	S ₉	S ₁₃	S ₀ *					
土 粒 子 の 比 重		2.676	2.662	2.662	2.638	2.627	2.597					
コン シ ス テ ン ス	液性限界%	32.2	57.8	25.9	25.7	30.0	54.9					
	塑性限界%	14.9	18.5	16.3	15.4	14.4	20.3					
	塑性指数	17.3	39.3	9.6	10.3	15.6	34.6					
圧 密 成 形	含水比%	13.1	24.6	17.0	17.0	19.4	51.2					
	湿潤密度g/cm ³	1.871	1.982	2.043	2.071	2.000	1.794					
	間 隙 比	0.586	0.678	0.507	0.478	0.553	1.014					
	飽 和 度 %	49.8	97.8	85.1	88.3	86.5	100.0					

* S₀は不攪乱土、S₀～S₁₃は攪乱土

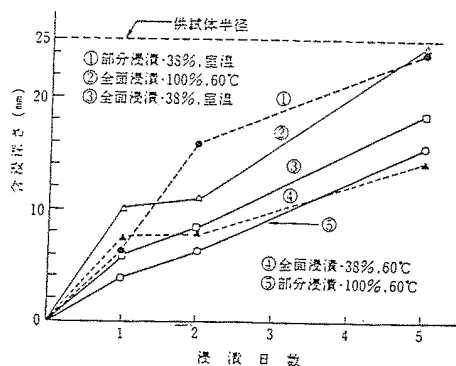


図-1 S₅土中へのPEG4000の常圧自然含浸

のPEG4000を用い、圧力（常圧、減圧）、浸漬程度（全面浸漬、部分浸漬）、温度（60℃、室温）、濃度（100%、38%）の組み合わせで5日間浸漬実験を行った。PEG4000はいずれの浸漬条件の場合にも、土供試体中に自然に含浸し、しかもその含浸深さは供試体の半径方向に経時的に増大した。

図-1はS₂土中へのPEG4000の常圧自然含浸結果を示すものであるが、含浸速度と含浸層形成状況に限れば常圧下での全面浸漬・100%60℃および部分浸漬・38%室温が共に有望であるが、実工事での設備、維持管理、コストを考慮して総合的に判断して、室温、常圧下での部分含浸による自然含浸法を採用した。なお、38%濃度は常温におけるPEGの溶解の上限である。

②浸漬深さ

浸漬深さを変えて常温下で浸漬実験を行った。浸漬4日後において、38%PEG4000水溶液は浸漬深さにかかわらずS₂土およびS₉土供試体の半径方向の中心部まで達し、一方S₉土では浸漬深さ90mm以上でまだ中心部まで達していなかった。これにより、浸漬深さによる含浸進行は土によって若干異なることがわかる。

図-2はPEG4000の高さ方向への含浸を含浸高さ比、浸漬深さおよび供試体の浸漬部/供試体積比との関係で示している。含浸高さ比は当然のことながら、浸漬深さが深くなるほど、言い換えれば浸漬体積比が大きくなるほど大きくなっており、高さ方向への含浸を進めるためには供試体の上端近くまで浸漬する必要があることを示している。このことから、部分含浸としては9割程度の浸漬を行うこととした。

③土ブロックの置き方

多数の比較的大きなブロックを実際部分含浸する場合、縦置きと横置きとでは、浸漬用スペースと浸漬液量に大きな違いが生じるため図-3のように、38%水溶液に4日間置き、含浸速度との関係を検討した。その結果、縦置き5面接触型の含浸速度が最も大きく、縦置き2面接触型および横置き1面接触型の約2倍を示した。また後者の2つの間には含浸速度にはほとんど差異が見られなかった。このことからブロックは縦置きで浸漬することにした。

b) 樹脂含浸ブロックの物性

①乾燥特性

養生室内（20℃、60～65RH）に供試体（φ58mm、h120mm）を静置し、その乾燥進行による重量減少率の経時変化を図-4に示す。

S₂土において未含浸土供試体の乾燥は1週間程度で急速に進み、その後はほとんど進行していない。

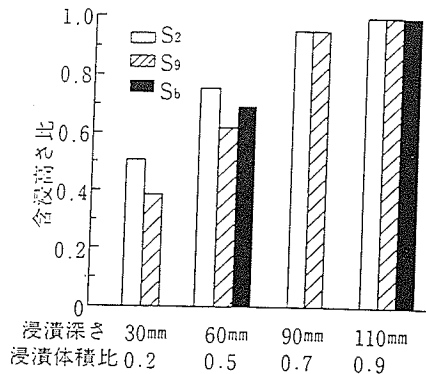


図-2 浸漬深さと38%PEG4000の含浸高さ比

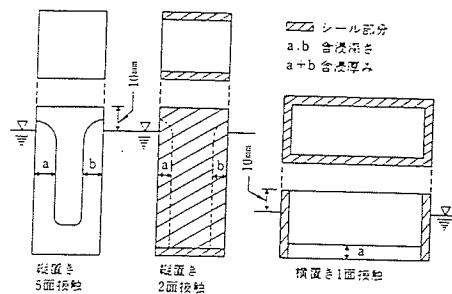


図-3 土ブロックの置き方概念図

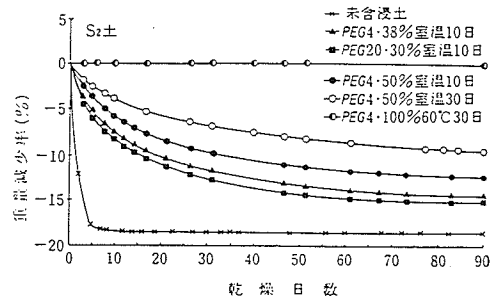


図-4 PEG含浸土の乾燥進行

一方、含浸土の乾燥はPEG 4000・100%60℃30日供試体を例外として、いずれも未含浸土よりも緩やかではあるが継続的に進み、また特にPEG 4000・50%室温30日供試体では90日乾燥後においても、なお乾燥進行を予想させる傾向にあることから、PEG含浸土は乾燥に長時間を要すると判断される。例外としたPEG 4000・100%60℃30日供試体では、乾燥開始後の水分蒸発がほとんど認められない。これは、浸漬液が水をまったく含まない熱溶融樹脂液であること、また60℃の温度によって全面浸漬中に土の乾燥、土中水分とPEG液との置換が同時並行的に進行しながら土中の水分が大部分消失したことによると推察される。

また、同図のPEG 4000含浸土でみられるように、同じ液濃度であれば浸漬期間の長いほど、また同じ浸漬期間であれば高濃度液に浸漬したものほど、重量減少率が小さくなる傾向にある。そしてこの重量減少率の大小は含浸PEG量の多少と一致している。

②乾燥収縮特性

上記のようにPEGを含浸させないで常温で乾燥させれば、数日ではほぼ平衡状態にいたり、この過程で円柱土は収縮し、一部にクラックも発生する。一方、PEG含浸土では乾燥が大幅に遅れるとともに収縮量はかなり減少する。この様子を含水比と収縮率との関係で示すと図-5のようである。

未含浸土では含水比の低下とともに収縮する領域（塑性域）と収縮がほとんど見られない固体域とに明瞭に分けられる。PEG含浸土でも曲線のタイプは類似しているが、収縮率が大幅に減少し、PEG含浸の効果が認められる。

③強度特性

PEG含浸土と未含浸土の強度と含水比との関係を示したのが図-6である。PEG含浸土供試体と未含浸土供試体の強度は、含水比が2~3%まで低下した時点の約20 kgf/cm²を境として逆転し、それよりも高含水比側ではPEG含浸土の方が未含浸土よりもかなり小さく、逆にそれよりも低含水比側では前者のほうが後者よりもはるかに大きくなっている。そして、この低含水比側における強度の伸びはPEG含浸土の方が未含浸土よりも急激であり、わずかな含水比の低下が前者の強度増大に大きく寄与している。

c) 含浸管理方法

①比電導度

PEG液に浸漬した土ブロック中へのPEG含浸状況を含浸位置、含浸量の両面からの確に把握し、浸漬終了時期を判断することが必要になる。この含浸状況を把握するための指標として、PEG含浸に伴う土の電導性の変化すなわち、電極を打ち込んだ土ブロックをPEG水溶液中に部分浸漬すると、時間経過とともに非電導体のPEGを含む液が土中に自然含浸し、土の電導性が経時的に低下し、最終的には電気伝導度や比電導度が一定値を示す性質の利用可能性について検討した。

S₀土の圧密円柱供試体の上端から電極を差し込み、3.8%PEG 4000水溶液に部分浸漬した時の比電導度は含浸PEG量の増大とともに低下し、PEG含有率が8%以上に至ると15 μS/cm前後ではほぼ横

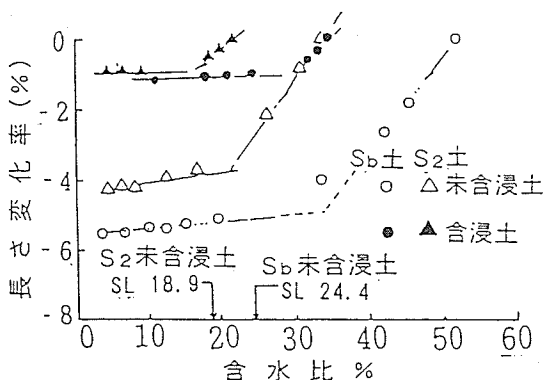


図-5 PEG含浸土の乾燥過程

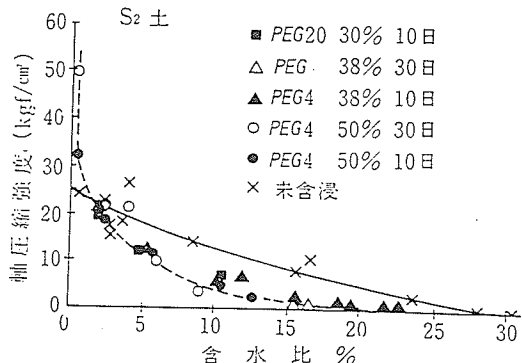


図-6 PEG含浸土の乾燥程度と強度

ばい傾向を示す。大型ブロックでの適応性について実験した結果、大型ブロックにおいても、比電導度はPEG含浸の進行とともに低下して、最終的に $15 \sim 35 \mu S/cm$ に収束すること、また比電導度による予測値とコア採取による実測値がかなりよく対応することから、比電導度は土中へのPEG含浸進行の把握に有効であることが確認された。

②液中重量

全面浸漬時の液中重量は土中へのPEG含浸を重量増加量としてはほぼ正確に示すので、全面浸漬時の含浸時の含浸管理指標として利用できるが、実施工における部分浸漬時には、PEG液面からの水分蒸発や土中へのPEG含浸、さらには液補充などによって、液比重や液面位置が変動し、浮力に差異を生じることによって、液中重量が日々かなり上下する。

したがって、測定値そのままでは、PEG含浸による重量増加を把握できないため、液中重量を再計算することが必要になる。この補正を行い部分浸漬時の液中重量を把握すれば、PEG含浸管理指標として利用することができる。

d) 乾燥管理方法

乾燥の管理には気中重量の測定が最も効果的であり、また双曲線法によって乾燥進行および乾燥の終極段階での土中水量、含水比の予測がある程度可能である。

3. 堤体保存の施工手順

各種検討の結果、図-8に示す施工手順で堤体保存を行うことにした。

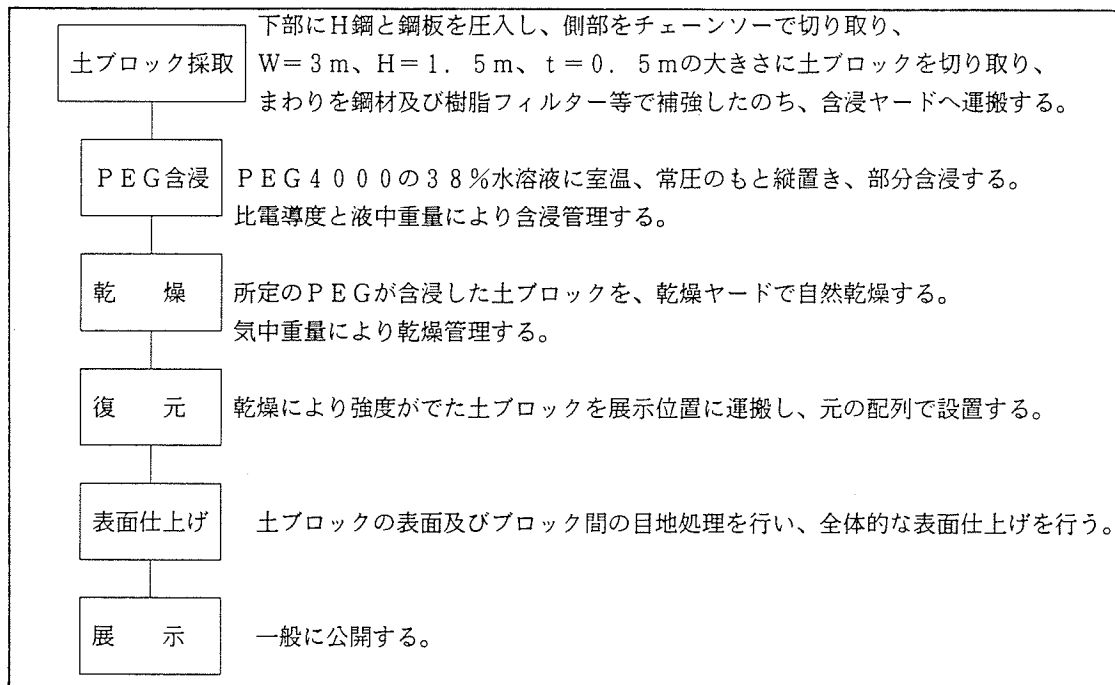


図-8 堤体保存施工手順

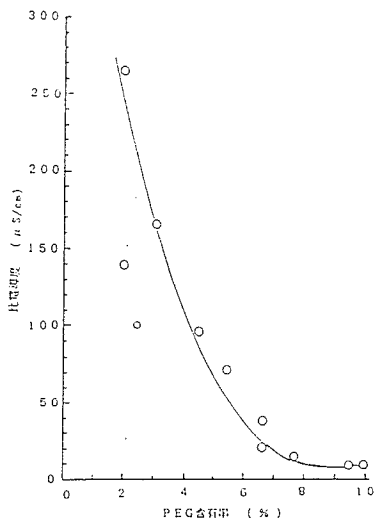


図-7 比電導度と含浸PEG量の関係

平成6年9月より仮設工事に着手し、含浸・乾燥のためのヤードを、府道をはさんで狭山池の南側に確保し、整備するとともに、そこへの進入路を設置した。含浸のために、周囲に鋼矢板を打設し、底をコンクリート張りした幅7.2m、長さ50m、深さ2mの水槽を設置し、風雨を防ぐため、ビニールハウスで覆った(写真-1)。また、含浸等の管理を行うため、各種観測設備を備えた管理室を設置した。

写真-1 含浸水槽およびハウス

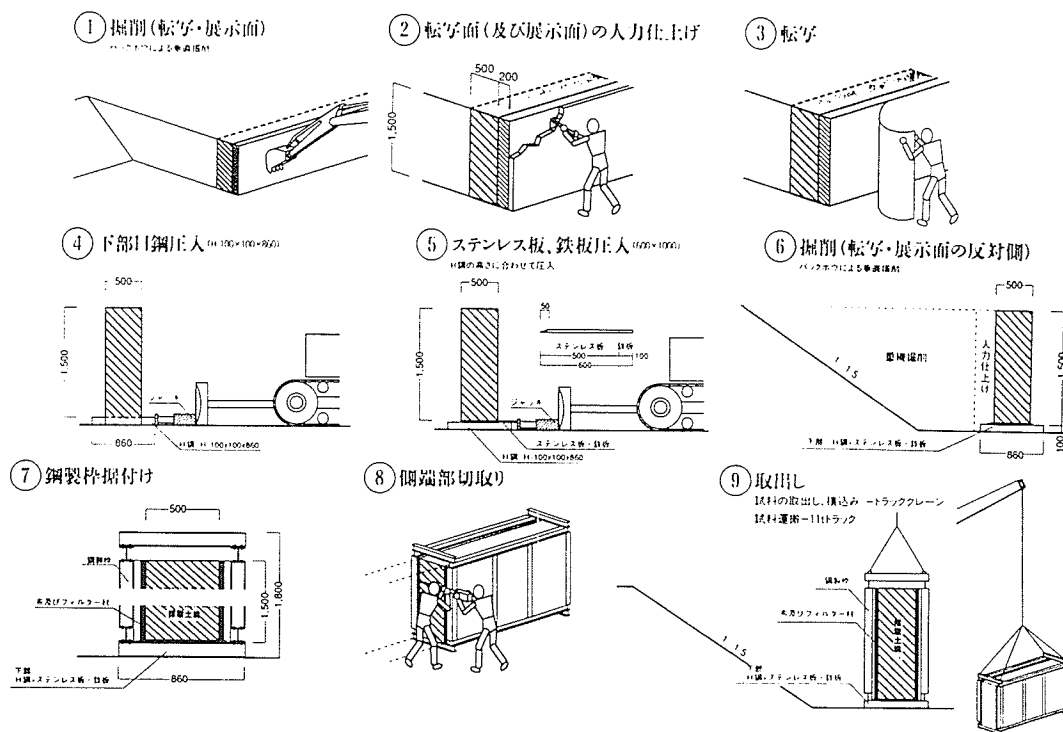
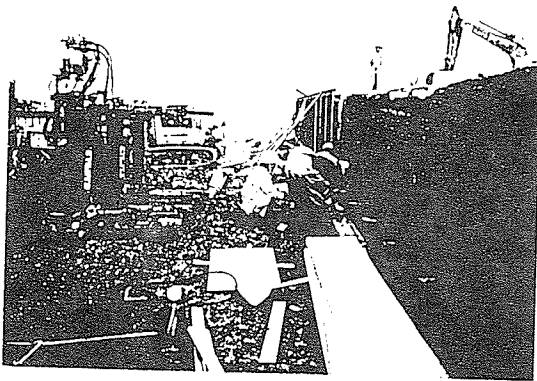
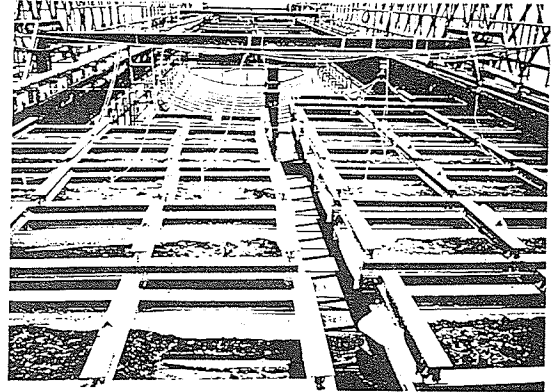


図-9 土ブロックの採取

写真-2の手前側は展示面の仕上げ掘削を終了し、下部にH鋼を圧入したところであり、向こう側は運搬等の補強のための鋼製枠を据付けたところである。土ブロックを採取する毎に含浸・乾燥のためのヤードに運搬し、PEG水溶液に浸漬した。なお、含浸管理用に数ブロックに1個の割合で、土ブロックの電導度を計測するためのセンサーを、また水中重量の自動観測を行うためロードセルを設置した。このような作業を繰り返し、平成7年3月に無事総数102個の土ブロックを採取し、全数の含浸水槽への浸漬を終えた（写真-3）。



写真－２ 土ブロック採取状況



写真－３ 含浸状況

５．おわりに

平成６年１１月より採取を開始し、平成７年３月に採取を完了した１０２ブロックの土塊は、現在含浸水槽で浸漬中である。今後、含浸、乾燥をそれぞれ約１年間ほど行い、狭山池ダム資料館（仮称）に展示する予定である。歴史的にも土木工学上も貴重な狭山池ダムの堤体が無事展示され、人々に公開されることを念じている次第である。

今後、ますます歴史的なものへの取り組みが重要視され、大型土構造物の保存の機会も増えていくことが予想される。今回の試みがその一助になれば幸いである。

最後に、堤体保存事業について、多大なご助言を頂きました狭山池堤体保存委員会の方々、とりわけ、奈良国立文化財研究所の沢田、工楽両先生には深く感謝いたしますとともに、引き続きご指導をお願い申しあげる次第である。

参考資料

- １）天野・木村・若林：狭山池ダム堤体保存について、ダム技術、No. 75、pp64～75(1992)
- ２）沢田 正昭：『発掘を科学する』（田中琢・佐原真編）岩波書店、第１３章 文化財保存のための科学