

樹脂含浸による埋蔵遺跡保存法の研究（その1）

——土中へのポリエーテル系樹脂含浸条件と含浸土の物性——

住野正博 黒木泰貴
川地 武

Studies on Preservation Method for Soil Structure Ruins Buried Underground by Application of Resin Impregnation (Part 1)

——Impregnation Conditions of Polyether Group Resins in Soil
and Physical Properties of Soil after Resin Impregnation——

Masahiro Sumino Yasutaka Kuroki
Takeshi Kawachi

Abstract

When soil structure ruins are found buried underground during construction works, excavations are carried out and anything of importance is preserved. A typical preservation method is removal and reconstruction elsewhere. When this relocation method is adopted for preservation, it is required for soil blocks not to be damaged during cutting out from the structure, removing to another place, restoring to the original state and displaying to the public. The most promising prevention method is reinforcing of soil by impregnation with a water-soluble polyether group resin. However, the present situation is that there is no precedent of application of this method to soil, and conditions for impregnation and the physical properties of impregnated soil are not clearly known. Therefore, laboratory impregnation experiments were conducted to investigate these points. As a consequence, it was succeeded in grasping the optimum conditions for impregnation and physical properties of soil, and it was judged that this resin is very useful for reinforcing soils.

概要

我が国には未発掘の大規模な土構築物遺跡が数多く埋蔵している。建設工事中にこれら遺跡が出ると、発掘調査が行われ、重要なものは保存される。その代表的な保存法に移築保存がある。移築保存では土ブロックの切り出し、移動、復元の作業中および展示中のブロックの変状、変形、損壊を防ぐことが求められる。そのための方法として、樹脂含浸による土の補強が有力で、また樹脂としては水溶性のポリエーテル系樹脂が有力視される。しかしながら、土への適用例がなく、含浸条件や含浸土の物性など不明な点の多いのが現状である。

そこで、室内浸漬実験を行い、土中への含浸条件や含浸土の物性を検討した。その結果、常温常圧下での自然含浸に適した土の湿潤程度、樹脂分子量、樹脂液濃度、浸漬方法などが把握でき、含浸土の乾燥、収縮、強度特性などが明らかになった。また、この樹脂は展示のための土の補強用として十分な効果を有していた。

1. はじめに

高松塚古墳の壁画、藤ノ木古墳の金冠、吉野ケ里遺跡の環濠集落跡など、この数年の間に遺跡発掘に関する話題が新聞紙上などをにぎわしているように我が国には未発掘の大規模な遺跡が数多く埋蔵している。

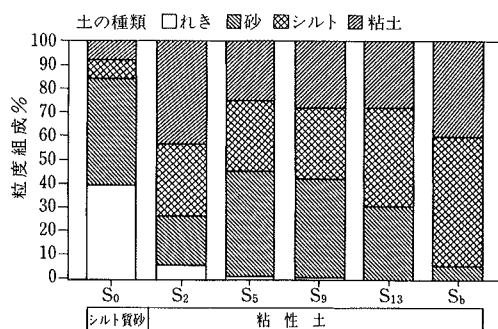
遺跡は、集落跡、水田跡、古墳などのように土地に構築されたもので動かすことのできない遺構と土器、石器、金銅装身具などのように人間の手によって自然物から製作され、出土場所を離れても意味を失わない遺物とで構成され、過去の人間の生活や行動跡を示す一定の空間・物質的資料を持つ場所そのものを指している¹⁾。

遺跡発見は、吉野ケ里遺跡の例で見られるように工場

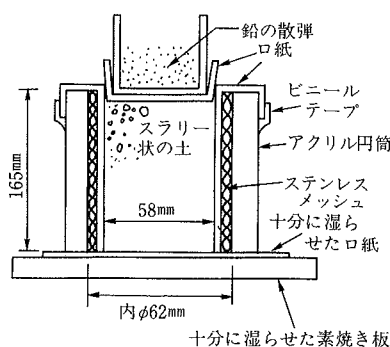
用地造成などの開発行為が端緒になることが多い。

道路などの建設工事中に遺跡が出ると、発掘調査が行われ、重要なものは道路建設ルート等の変更を行って再度、埋め戻されたり、遺跡保護のための覆屋や建屋を建設した上で現地保存や移築保存が行われ、一般に展示、公開されるようになる。最近では遺跡調査結果が積極的に公開されるようになって遺跡に対する一般市民の関心も高まり、また自治体による史跡公園化構想などとも相まって保存される例が徐々に増えてきている。

遺跡や遺構を現地保存あるいは移築保存して一般に展示、公開する場合、当然のことながら変質、収縮、損壊などが長年月に亘って生じないことが求められる。しかしながら、現地保存された過去の事例を見ると、乾燥に



図一 供試土の粒度組成



図二 供試体作製概略図

よる土のひびわれ、土中塩類の析出、こげやかびなどの生育による損傷被害が生じており、その防止技術の開発が望まれているのが現状である。また、移築保存に際しては遺構の切り出し、搬出、復元が伴うため、大きなブロックに切り出す技術、切り出し・運搬時の損壊を防ぐための補強技術・梱包技術、復元技術さらには展示中に損壊を防ぐための環境対策は勿論のこと、復元遺構そのものを損壊させないための処理技術の確立が必要になる。なかでも土構築物の遺構は壊れやすいため、移築保存するためには土ブロックを補強し、工事中のみならず展示中の変状や損壊を防ぐことが特に求められる。

その補強方法として、木遺物に行われている樹脂含浸処理を土ブロックに適用することが有力視されるが、土への適用例がなく、樹脂の種類、含浸条件、含浸速度、補強効果など不明な点の多いのが現状である。

この研究は、埋蔵土構築物の遺構の移築保存を想定し、土ブロック切り出しから復元に至るまでの一連の工事および展示中の変状、損壊を防ぐための樹脂含浸処理技術の確立を目的として着手した。その手始めとして、本報では樹脂の種類、土中への含浸条件および樹脂含浸土の基本物性を室内実験で検討し、土ブロックへの樹脂含浸処理に関する有用な知見が得られたので報告する。

2. 供試材料および供試体の作製

2.1 供試材料

(1) 供試土 図一、表一の6種類をそれぞれ自然乾燥後に粉碎、ふるい分けし、礫分を除去したものを適宜供試した。このうち $S_0 \sim S_{13}$ は某工事現場で深礎を

表一 供試土と供試体の基本的性質

項目	土の種類	粘 性 土					
	シルト質砂	S_0	S_2	S_5	S_9	S_{13}	S_6^*
土粒子の比重		2.676	2.662	2.662	2.638	2.627	2.597
コンシメステ性	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
圧供密成体形	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

* S_6 は不攪乱土、 $S_0 \sim S_{13}$ は攪乱土

表二 供試樹脂液条件

樹脂の種類	PE4				PE6			PE20			
	濃度%	22	38*	50	100	22	33*	50	15	22*	30
樹	粘度cP	10	38	100	—	25	80	400	35	95	400
液	温度**℃	室	室・高	室	高	室					

* メーカーカタログ記載の溶解度相当濃度 ** 室は室温、高は60℃を示す。

掘った際に搬出した攪乱土で、各添え字は深度 (m) を示す。また S_6 は沖積層から採取した不攪乱土である。

(2) 供試樹脂 市販の水溶性樹脂のポリエーテル系樹脂 (以下、PE という) のうち PE4 (平均分子量 3,300)、PE6 (同6,000)、PE20 (同20,000) の3種類を供試した。実験に際しては表二に示す濃度と温度に設定した溶液を適宜用いた。同表の液濃度50%以下は水溶液、100%は熱溶解液である。なお、用いた PE の単体固化体強度は上記の順に 35, 91, 99 kgf/cm^2 である。

2.2 供試体の作製

(1) 各種含浸方法の実験用 表一の塑性限界前後に水分調整した攪乱土をホバートミキサー (容量 4ℓ) で3分間混練し、常圧下での自然含浸用は土質試験法²⁾に準じて突き固めて供試体 ($\phi 50$ mm, h125 mm) を作製後、高さ 95 mm に整形して実験に供した。減圧下の含浸用はふた付きのポリ容器 ($\phi 50$ mm, h150 mm) の底を切り取り、また側面に多数の穴を開けた後、ビニールテープを巻いてモールドとし、同様に土を突き固めて作製した。ふたの部分から土中に減圧用パイプ ($\phi 5$ mm) を挿入した後、テープを取り除いて実験に供した。なお、供試体の湿潤密度は 1.83 ~ 2.21 g/cm^3 の範囲にあった。

(2) 部分浸漬・自然含浸実験用 攪乱土は表一の液性限界を上回る水量を加え、ホバートミキサーで3分間混練後、一晚放置した。図二のようにアクリル円筒に打設し 0.1 kgf/cm^2 の荷重を1日、次いで 0.2 kgf/cm^2 の荷重を2日加えた後に脱型し、 $\phi 58$ mm、高さ 120 mm の円柱供試体を作製した。不攪乱土は後述の供試体の置き方検討用とし、角柱ポリ容器 (70 mm 角, h110 mm) を土中に圧入して採取した後、樹脂液との接触面数に応じて容器の該当面の切り取りなどを行って実験に供した。

(3) PE 含浸土の基本物性試験用 部分浸漬・自然含浸用と同様に作製し、供試した。

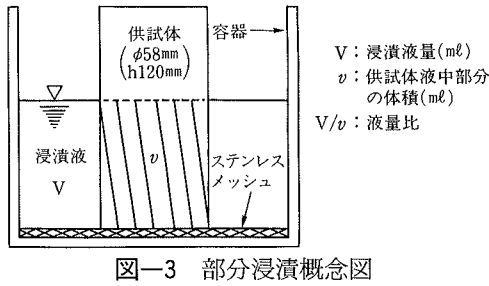


表-3 S₅ 土中への PE4 の含浸速度

浸漬方法		全面浸漬・常圧		部分浸漬・常圧		部分浸漬・減圧	
PE4	濃度%	38	100	38	100	38	100
	温度℃	室温	60	室温	60	室温	60
含浸速度mm/日		3.1	3.6	4.8	2.9	4.2	4.8

3. 実験方法

3.1 土中への樹脂含浸実験

3.1.1 各種含浸方法の実験 PE4 を用い、圧力 (常圧, 減圧), 浸漬程度 (全面浸漬, 部分浸漬), 温度 (60°C, 室温), 濃度 (100%, 38%) の組合わせで 5 日間浸漬実験を行い含浸を検討した。実験は各条件につき一連 (n=1) で行った。浸漬液量は図-3 の V/v 比 (以下, 液量比と言う) で 3.7 に設定した。

全面浸漬では液中に供試体を全て浸漬し, 部分浸漬では供試体高さの半分を空気にさらす形で浸漬した (以下, 空気に一部さらす浸漬方法を部分浸漬と言う)。減圧含浸は卓上型真空ポンプで 500 mmHg の負圧力をかけ供試体中の水分を脱水しながら PE の吸引含浸を行った。

浸漬終了後, 直ちに供試体を縦方向に二分して自然乾燥させた。切断面の PE 含浸部と未含浸部の色の違いから含浸層を目視で判断し, 精度 0.5 mm のメジャーを用いて供試体半径方向への含浸深さを供試体長辺部で一辺あたり 3 箇所, 計 6 箇所測定した。結果は平均含浸深さ (mm), 平均含浸速度 (mm/日) で表示した。

3.1.2 部分浸漬・自然含浸実験 同様に常温下で浸漬実験を 4 日行い, 各種条件下で土中への PE 含浸の速度, 土の乾燥程度と浸漬中の変状の関係を確認した。

(1) 含浸速度の実験 浸漬深さ (30, 60, 90, 110 mm), PE の種類と濃度 (表-2 参照), PE の液量 (液量比で 0.9, 2.3, 3.7, 6.2, 8.0) の条件を組合わせて実験した。結果は同様に含浸深さ, 含浸速度のほか, 液面位置からの PE 上昇高さを測定して含浸高さ/供試体高さ比 (以下, 含浸高さ比と言う) で示した。

(2) 液中での置き方の実験 角柱供試体で縦置き (高さ方向で浸漬), 横置き (厚み方向で浸漬) について, 液量比 3.7, 38% PE4, 空中への露出高さ 10 mm の条件で実験した (図-7 参照)。結果は同様に表示した。

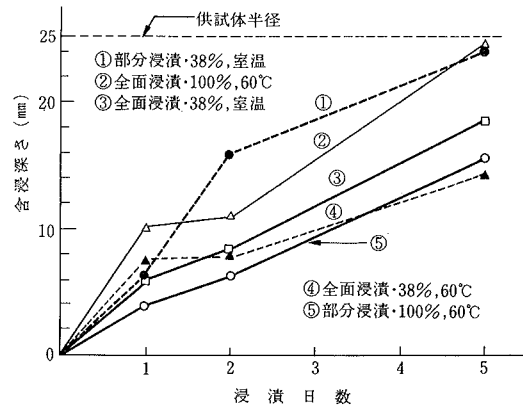


図-4 S₅ 土中への PE4 の常圧自然含浸

(3) 浸漬中の変状確認実験 各土の供試体につき脱型直後の湿潤状態を最大含水比, 105°C 乾燥後を最小含水比とし, その間の含水比を 3 段階に設定したものを浸漬深さ 110 mm, 液量比 3.7 で浸漬して変状を観察した。

3.2 含浸土の基本物性試験

ノギスと化学天秤 (精度 10 mg) で高さと重量を測定した供試体を用い, PE の種類, 液濃度, 液温度および浸漬方法 (全面浸漬, 部分浸漬 110 mm) を組合わせ, 液量比 3.7, 常圧条件で浸漬実験を 10 日および 30 日行った。浸漬終了後, 供試体表面の PE をふき取り, 高さと重量を測定後, 素焼板の上に置いて養生室内 (20°C, 60~65% RH) に静置し, 自然乾燥させながら次の項目を経時測定した。また, 比較のために PE 未含浸土についても同様に測定した。

(1) 表面変状 ひびわれ発生などの目視観察。

(2) 蒸発水分量 乾燥に伴う重量減少を求め, 乾燥開始時の重量に対する重量減少率 (%) で示した。

(3) 長さ変化 乾燥収縮に伴う高さ変化量を求め, 乾燥開始時の高さに対する変化量の割合を長さ変化率 (%) で表示した。

(4) 一軸圧縮強度 土質工学会法で測定した²⁾。

(5) 含水比 圧縮強度測定後の供試体の一部を 60°C に養生した時の含水比がほぼ一定になる 3 日後に 60°C 含水比を求めた。この温度および後述の強熱温度 440°C は PE 含浸土と未含浸土について行った示差熱分析装置による熱分析結果を基に暫定的に設定した。

(6) 含浸 PE 量 強度測定後の PE 含浸土, 未含浸土供試体の一部をそれぞれ 60°C 乾燥 3 日, 次いで 440°C 強熱を 3 日行い, 強熱減量を求めた。両試料のそれぞれについて 60°C 乾燥後重量に対する 440°C 強熱減量の割合を求め, 両者の差を含浸 PE 量 (%) として表示した。

(7) 吸脱湿量 養生室内で 90 日以上乾燥し, ほぼ平衡重量に達した PE 含浸土, 未含浸土供試体をそれぞれ高湿度条件 (約 90%, 25°C) に 60 日間養生後, 低湿度条件 (60~65%, 20°C) に 60 日間養生し, 各湿度下における重量を継続的に測定した。この間の吸湿による重量増, 脱湿による重量減を単位面積あたりの吸脱湿量 (gf/m²) で表示し, また吸脱湿速度 (gf/m²日) で表示した。

表一4 各種含浸方法の総合評価

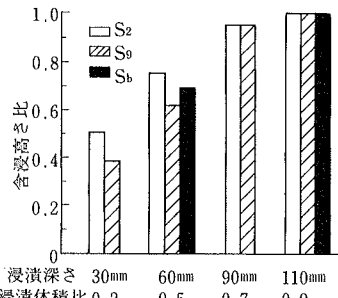
項目	全面浸漬・常圧		部分浸漬・常圧		部分浸漬・減圧		
	38%		100%		38%		
	室温	60°C	室温	60°C	室温	60°C	
含浸速度	△	△	◎	◎	×	○	◎
含浸層の形成状況	○	○	○	○	○	△	△
設備の簡易さ	○	×	×	○	×	×	×
維持管理の容易さ	○	×	×	○	×	△	×
維持コスト	○	×	×	○	×	△	×
総合評価	△	×	×	○	×	×	×

◎特に優れている ○優れている △普通 ×劣る

表一5 浸漬深さと38% PE4の含浸深さ

浸漬深さ mm	S ₂		S ₉	S _b
	30	29 ^{mm}	29 ^{mm}	—mm
60	29	29	29	—
90	29	22	—	—
110	29	21	29	—

注) 含浸深さ29mmは供試体中心部まで含浸したことを示す。



図一5 浸漬深さと38% PE4の含浸高さ

4. 樹脂含浸実験の結果と検討

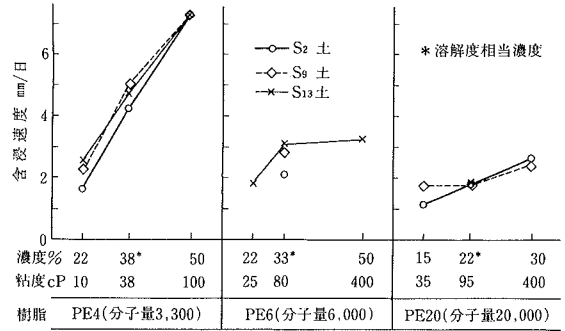
4.1 各種含浸方法の検討

4.1.1 半径方向への含浸 図一4において、PE4はいずれの浸漬条件の場合にも湿潤S₉土供試体中(表一1の含水比参照)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ている。

含浸状況を浸漬5日後で比較すると、PE4は部分浸漬・38%室温および全面浸漬・100%60°C条件下で供試体(φ58 mm)のほぼ中心部まで含浸し、一方、全面浸漬・38%室温、部分浸漬・100%60°C条件下では上記2条件の場合の約半分の含浸にとどまっていることから、含浸の進行が浸漬条件で異なることが明らかである。

浸漬条件の影響は含浸速度にも顕著に表れ、浸漬5日後に求めた含浸速度は表一3のように4.8~2.9 mm/日を示し、浸漬条件による差異がかなり生じている。また浸漬条件の影響は土中内部の含浸層形成状況にも認められた。自然含浸では液温にかかわらず、供試体の半径方向に比較的均一な厚みの含浸層が形成され、減圧含浸では供試体中心部までに含浸している部分と含浸していない部分が混在し、含浸程度にバラツキが生じていた。

同様にS₂土供試体で常圧下で実験したところ、5日経過後において含浸深さはいずれも上記S₉土よりも2~11 mm大きく、また含浸速度が0.4~2.2 mm/日大きかった。S₂土、S₉土はいずれも粘性土(表一1、図一1参照)であるが、砂分と粘土分の割合および含水比の違いがPEの含浸進行に影響したものと考えられる。



図一6 PEの種類、液濃度と含浸速度

4.1.2 高さ方向への含浸 部分浸漬5日後の供試体で見たところ、室温38%および60°C100%条件のいずれの場合にもPEは供試体上端まで到達していなかったが、液面位置からの上昇が前者で後者よりも大きかったことから、高さ方向への含浸に関しては前者の方が有利であると判断された。

4.1.3 各種含浸法の検討結果 上記した結果を総合評価して表一4に示す。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°Cおよび部分浸漬・38%室温の条件が共に有望である。しかしながら実工事での設備、維持管理、コストを考慮して総合的に判断すると、室温、常圧下での部分浸漬による自然含浸法(以下、部分浸漬・自然含浸法と言う)が最も有力と判定されるので、これについて以下に詳細検討を進める。

4.2 部分浸漬・自然含浸法の検討

4.2.1 含浸速度におよぼす各種要因の検討 含浸速度に作用する要因として、浸漬深さ、PEの分子量、液濃度、液量および浸漬する際の土ブロックの置き方を取り上げ、それらの影響を検討した。

(1) 浸漬深さの影響 表一5に示す浸漬4日後において、38% PE4水溶液は浸漬深さにかかわらずS₂土およびS₉土供試体(φ58 mm, h120 mm)半径方向の中心部まで達し、一方S₉土では浸漬深さ90 mm以上でまだ中心部まで達していないように、浸漬深さによる含浸進行は土によって若干、異なるようである。

液面位置からの上昇高さはS₂土で20~29 mm、S₉土で12~20 mm、S_b土で20 mmであった。図一5はPE4の高さ方向への含浸を浸漬高さ比、浸漬深さおよび供試体の浸漬部/供試体体積比(以下、浸漬体積比と言う)との関係で示している。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。このことから以後の部分浸漬・自然含浸法の実験では浸漬深さ110 mmを採用することにする。

(2) PEの分子量と液濃度の影響 図一6において溶解度相当濃度での含浸速度をPE分子量で比較すると、含浸速度は分子量3,300のPE4で4.2~5 mm/日、同

表-6 PE4の液量と含浸速度 (mm/日)

土の種類	PE4液濃度%	液量比				
		0.9	2.3	3.7*	6.2	8.0
S ₂	38	3.7	3.4	6.6	3.5	3.8
S ₉		4.4	4.0	4.6	4.0	4.4

*これまでの実験で採用してきた比

表-7 供試体の置き方と38% PE4の含浸速度

浸漬方法		含浸速度	含浸層の合計厚み
縦置	5面接触型*	5.4mm/日	43mm (図-7参照)
	2面接触型	2.9	23 (同上)
横置	1面接触型	2.4	10 (同上)

*円柱供試体を用いた従来の浸漬方法を想定

表-8 土の乾燥日数と38% PE4液中での変状

土の種類	乾燥条件	室内での自然乾燥日数				105℃乾燥
		脱型直後	1日	2日	7日	
S ₀	×	×	×	×	×	
S ₂	○	○	×	×	×	
S ₅	○	○	×	×	×	
S ₉	○	○	×	×	△	
S ₁₃	○	○	△	△	○	

○変状なし △部分的変状発生 ×崩壊 ××短時間で崩壊

6,000のPE6で2~3mm/日, 同20,000のPE20で約1.8mm/日を示し, 分子量の小さい順に大きくなっている。しかもその速度にはPE4とPE6およびPE20との間かなりの差異が見られる。同様にほぼ同じ粘度範囲にある10~35cpの間, 80~100cpの間で比較すると, やはり分子量が小さいほど含浸速度は大きくなっている。

次に液濃度で比較すると, 分子量の大小にかかわらず, 含浸速度はいずれも液濃度が高くなるほど大きく, しかも, この濃度増大効果は分子量3,300のPE4において, 他の2種類のPEよりも顕著である。

このように土中へのPE含浸はPEの分子量および液濃度に影響され, また低分子量のPE4をできるだけ高濃度の水溶液で用いることによってPEは土中に自然含浸しやすくなると判断される。ただ溶解度の関係から50%水溶液作製にかなりの手間を要するため, 以後の含浸実験では38%水溶液を採用する。

(3) 浸漬液量の影響 表-6に示す3日浸漬後の結果において, S₂土における液量比3.7の含浸速度が突出して大きいのを例外として, S₂土およびS₉土でのそれぞれの含浸速度は液量比にかかわらず大差ない値を示している。例外としたS₂土の同比3.7の含浸速度が大きかったのは, 今回の実験を一連(n=1)で行ったこと, S₉土における同比3.7の含浸速度が他の液量比の場合と大差ないことを考え合わせると, 浸漬液量に起因するの

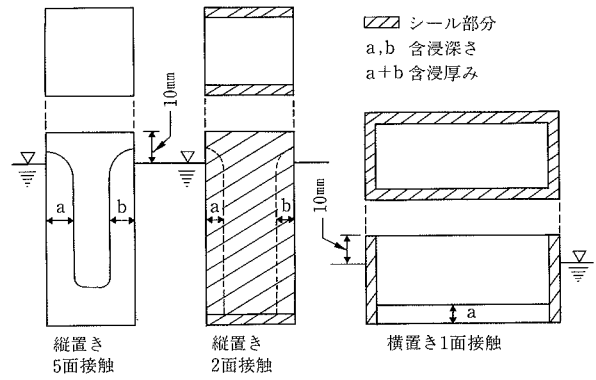


図-7 土ブロックの置き方概念図

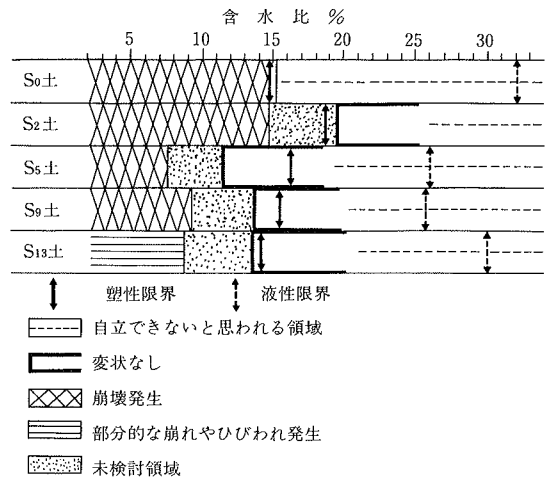


図-8 土中含水比と浸漬中の変状

ではなく, 用いた供試体が他に比べてたまたまPE液を浸透させやすかったためと考えられる。このことはPE液濃度, 浸漬深さが同じであれば, 土中へのPE液の含浸速度は浸漬液量に影響されないことを示しており, 液濃度管理を適切に行うことによって浸漬液量は減らせることを示唆している。

(4) 土ブロックの置き方の影響 ある程度の厚み, 幅, 高さを有する比較的大きな土ブロックの多数個を実際に部分浸漬する場合, 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。

S₀土円柱供試体(70mm角, 高さ120mm)を図-7のように38%PE4液中に4日間置き, 含浸速度との関係を検討した。その結果は表-7に示すように, 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倍を示している。また後者の2つの間には含浸速度にほとんど差異が見られない。

含浸層の合計厚みは同様に縦置き5面接触型が最も大きく, 縦置き2面接触型の約2倍, 横置き1面接触型の約4倍を示している。縦置き2面接触型と横置き1面接触型の含浸速度が上記のようにほぼ同じであったにもかかわらず, 前者で後者の約2倍の合計厚みを示しているのは図-7に示すように液との接触面数の違いによる。

このことからブロックは縦置きで浸漬し, かつ液との接触面数をできるだけ多くする方が良いと判断される。

表-9 土中の含浸 PE 量

土	S ₂ 土				S ₉ 土			
	PE4				PE20		PE4	
	%日 38・10	%日 50・10	%日 50・30	%日 100・30	%日 30・10	%日 50・10	%日 50・30	%日 100・30
含浸量%	6.8	8.7	11.6	19.6	5.5	7.7	10.6	15.8

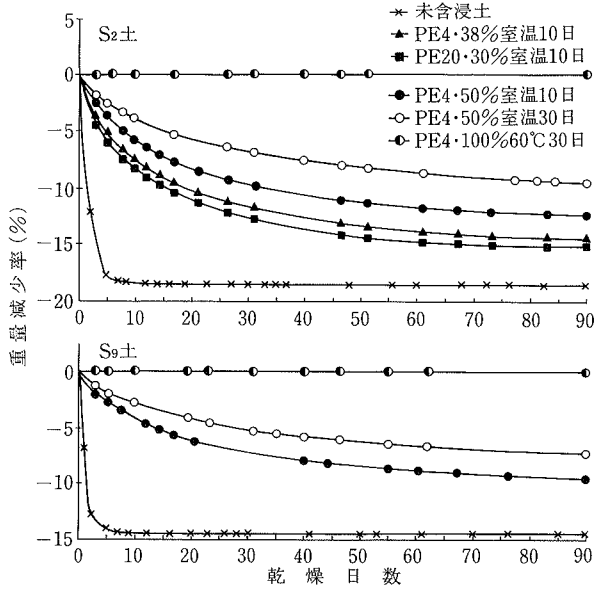


図-9 PE 含浸土の乾燥進行

4.2.2 土の乾燥程度と浸漬中の変状 表-8 は供試体(φ58 mm, h120 mm)の乾燥程度を変え、浸漬深さ 110 mm で 4 日間浸漬した時の変状とその程度を示している。変状のうち部分的な変状は浸漬中に発生したひびわれや供試体下面の角欠けを指す。崩壊とは浸漬 2~4 日の間に崩れだし、最終的に半分以上崩れたことを示す。短時間で崩壊とは浸漬直後から急速に崩れだし、2 時間程度で液中に没し、翌朝までに全壊に至ったことを示す。

同表において S₀ 土は乾燥程度に関係なく、全て崩壊している。S₂ 土~S₁₃ 土では自然乾燥 1 日以前のものに変状の発生が見られず、2 日以上乾燥で部分的なものから崩壊までの変状が発生している。S₀ 土が崩壊しやすかったのは表-1 に示したように、土質がシルト質砂であったことによると判断される。

この乾燥程度を含水比で表し、変状との関係を図-8 に示す。S₀ 土を例外とするが、塑性限界含水比前後から自立できる程度までの含水比では変状を生じていないことから、湿潤状態で浸漬すれば変状は防止できると判断される。一方 S₀ 土のようなシルト質砂については変状防止のための含浸条件の検討がさらに必要である。

なお、以上に示した部分浸漬・自然含浸条件は小さな供試体(φ58 mm, h120 mm)を用いた室内実験から得られたものである。したがって、この条件が実工事の大きなブロックに妥当であるかどうかについては今後、大きなブロックで実験を進め、さらに検討する必要がある。

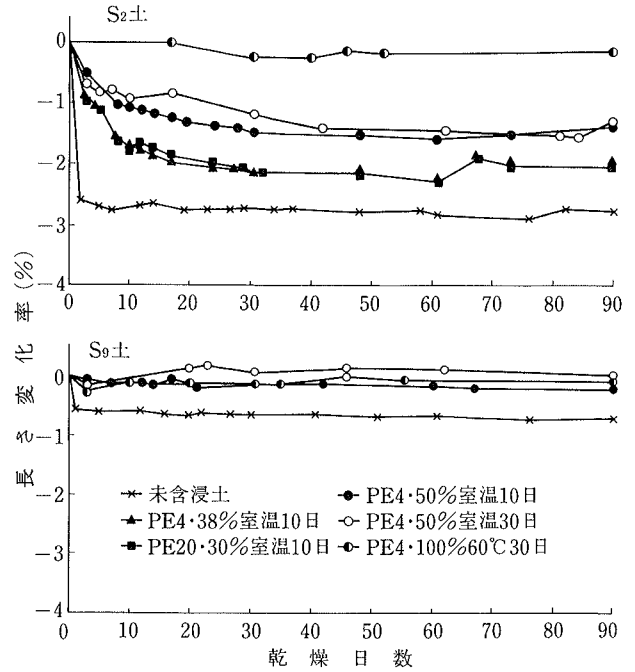


図-10 PE 含浸土の長さ変化率の経時変化

5. 含浸土の基本物性試験結果と検討

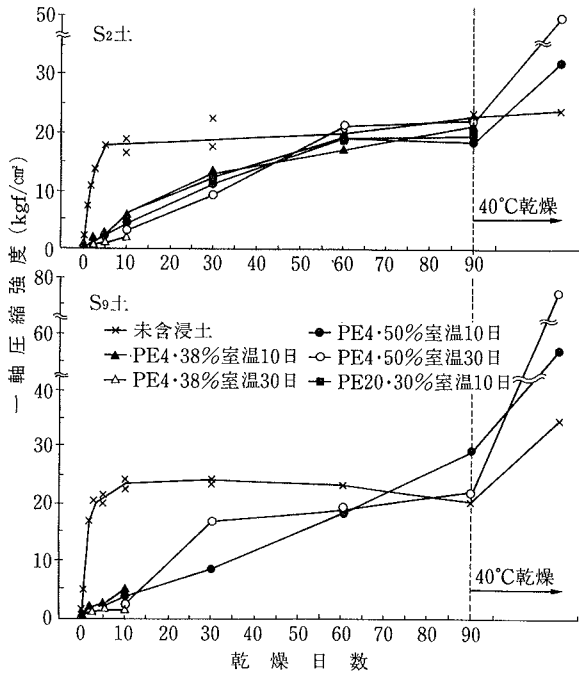
5.1 乾燥特性

養生室内 (20°C, 60~65% RH) に供試体 (φ58 mm, h120 mm) を静置し、その乾燥進行を重量減少率の経時変化として図-9 に示す。

S₂ 土, S₉ 土共に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。一方、含浸土の乾燥は PE 4・100%60°C30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 PE4・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、PE 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 PE4・100%60°C30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、浸漬液が水を全く含まない熱溶融樹脂液であること、また 60°Cの温度によって全面浸漬中に土の乾燥、土中水分と PE 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。

ところで同図の PE4 含浸土で見られるように、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表-9 に示す含浸 PE 量の多少と一致している。

表-9 は上記した条件で浸漬後、90日間乾燥した後の供試体の含浸 PE 量を示す。用いた供試体はいずれもその断面の変色から判断して、PE が供試体中心部まで含浸していた。PE4 で見られるように、同じ濃度の場合には浸漬期間の長い供試体ほど、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含浸 PE 量は明らかに多くなっている。このことは、土中の水と PE 液の置換が進むほど土中に残存する水分量の減少、PE 量の増大が起



図一11 PE含浸土の乾燥日数と強度

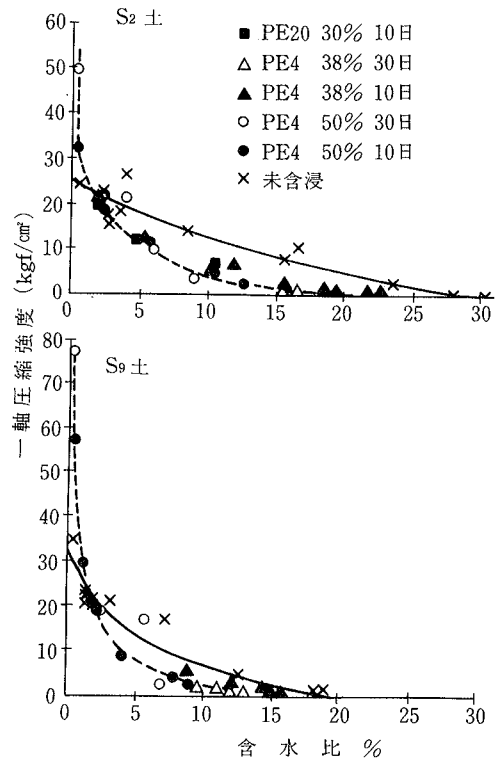
こり、その結果として蒸発水分量が少なくなることを示しており、図一9の結果を裏付けている。

5.2 乾燥収縮特性と表面変状

(1) 長さ変化 養生室内で自然乾燥中の供試体の高さ変化を長さ変化率で図一10に示す。ノギスで測定した関係上、データにバラツキがあるものの、S₂土およびS₉土共に長さ変化率とその経時変化にはPE含浸土と未含浸土で差異が見られる。

S₂土の未含浸土供試体では乾燥開始後、短時間で長さ変化率が最大に達した後、ほぼ平衡状態で推移し、PE含浸土供試体では液濃度、浸漬期間によって日数に長短があるものの、いずれも未含浸土よりもかなり遅れて長さ変化率が最大となり、それ以後、平衡状態に移行する傾向を示している。またPE4含浸供試体で明らかのように、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長さ変化率は小さくなり、乾燥による収縮が低減されている。この傾向は上記した含浸PE量と一致しており乾燥収縮と含浸PE量の関係が密接であることを示している。一方、含浸PEの分子量と乾燥収縮とはあまり関係がないように思われ、分子量の大きいPE20を含浸した供試体の長さ変化率は、ほぼ同じ濃度で同じ日数を浸漬した分子量の小さいPE4含浸供試体と同程度を示している。同様の傾向はS₉土においても見られる。

次にPE含浸による収縮低減効果を室温下でのPE4・50%30日浸漬時で見ると、S₂土の長さ変化率は未含浸土供試体で2.8%、含浸土供試体で1.3%を示し、PE含浸によって乾燥収縮が未含浸土の半分以下に低減されている。S₉土では未含浸土供試体の長さ変化率が最大で0.8%と小さいこともあって、含浸土供試体の乾燥収縮はほぼ防止できている。



図一12 PE含浸土の乾燥程度と強度

(2) 表面変状 PE含浸は乾燥中の土の表面変状の防止にも効果的で、S₂土未含浸土供試体の乾燥ひびわれがPE含浸によって防止できた。S₉土はもともと乾燥収縮が小さいことから、未含浸土および含浸土供試体のいずれにも変状は発生しなかった。

これらのことからPE含浸によって土の乾燥収縮が抑制され、乾燥収縮で生じるひびわれなどの変状はかなり防止できると判断される。また、その効果は土中への含浸PE量が多いほど大きくなると判断される。

5.3 強度特性

5.3.1 乾燥程度と強度 図一11に20°C、60~65% RHで90日間乾燥した供試体とそれ以後も引き続き40°Cで乾燥した供試体の強度変化を示す。この40°C乾燥は、図一9においてPE含浸土の乾燥が90日以後も引き続き起こると予想されたので、乾燥促進の意味で行った。

図示するように、未含浸土供試体では室温乾燥時の強度の伸びが急激に起こるために、乾燥開始後1週間前後で強度は最大の21~23 kgf/cm²に達した後、ほぼ平衡状態で推移している。PE含浸土供試体では室温乾燥時の強度の伸びが未含浸土よりもかなり小さいために、強度は比較的緩やかに継続的に増大し、60~90日を経過してから未含浸土の最大強度と同レベルに達している。そして、それ以後も引き続き40°Cで乾燥を継続したPE含浸土供試体は室温乾燥時とは逆に未含浸土供試体に比べて非常に大きな強度の伸びを示している。

この強度と乾燥進行の関係を含水比との関係で示したのが図一12である。PE含浸土供試体と未含浸土供試体の強度は、S₂土およびS₉土共に含水比が2~3%まで

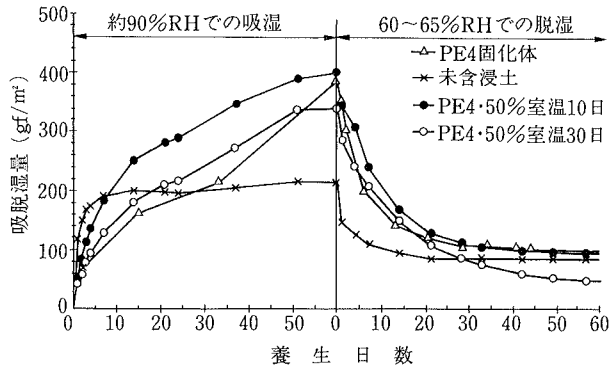


図-13 吸脱湿量の経時変化

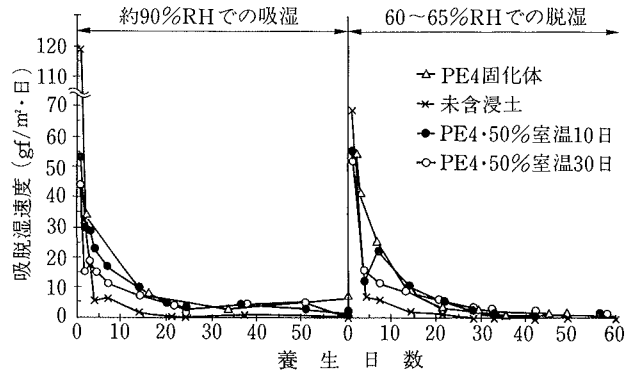


図-14 吸脱湿速度の経時変化

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 PE 含浸土の方が未含浸土よりかなり小さく、逆にそれよりも低含水比側では前者の方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 PE 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。また、高含水比側で PE 含浸土の強度を比較すると、同じ含水比であれば強度に差異が見られず、PE の種類、濃度および浸漬日数の長短は PE 含浸土の強度にあまり影響していない。

このように PE 含浸土の強度発現には未含浸土の場合以上に乾燥が不可欠であることから、乾燥の進行状況を的確に把握し、また管理する必要があると判断される。

5.3.2 圧縮ひずみ 90日乾燥後の供試体で例示すれば、一軸圧縮試験時の破壊ひずみは S₂ 土の未含浸土供試体で 0.8%、含浸土供試体で 1.4~2.5%、S₃ 土ではそれぞれ 1.4%、2~2.6% であり、PE 含浸は土のもろさを改善する効果を有していると判断される。

5.4 含浸乾燥土の吸脱湿特性

PE は水溶性樹脂であるため、高湿度環境下では PE 含浸土の表面から始まった吸湿が内部まで拡大し、土中内部の PE までもが再度、軟化することが懸念される。この現象が実際に起こりうるかどうかを調べるため、上記養生室内で 90 日以上乾燥させた S₃ 土供試体について 90% RH で 60 日間吸湿させた後、60~65% RH で 60 日間脱湿させる実験を行い、その間の吸脱湿の変化を調べた。

図-13の吸湿過程において、未含浸土の吸湿は養生開始後 10 日前後までに急速に進んだ後、極端に緩やかとなり、一方 PE4 含浸土および PE4 固化体の吸湿は継続的に進行して 10~30 日で未含浸土の吸湿量を超え、60 日後には未含浸土の 1.5~2 倍に達している。その間の PE 含浸土の吸湿量は浸漬期間の長い供試体の方が少なく、また PE4 固化体の吸湿量が PE 含浸土よりも多くないことから、土中の PE 含有量が多くなっても吸湿は加速されることはないと考えられる。また 60 日吸湿後の PE 含浸土と PE 固化体の表面にベトツキが感じられず、60 日後の最大吸湿量 400 gf/m² から試算した吸湿保持層の厚みがわずか 400 μ であることから、吸湿によって土中の PE が軟化、再溶解しているとは思えなかった。

脱湿過程では未含浸土、PE 含浸土、PE 固化体はどれも速やかに脱湿した後、吸湿量との差し引きで 100 gf/m² 以下の水分を保持する形でいずれも定常状態に至っている。特に未含浸土の 1.5~2 倍の吸湿量に達した PE 含浸土が未含浸土と同レベルまで 60~65% の湿度条件下で急速に脱湿されることは注目される。

図-14は任意の間隔で求めた吸脱湿速度 (gf/m² 日) をプロットしている。未含浸土、PE 含浸土および PE 固化体の吸脱湿はいずれもそれぞれの湿度環境下で短時間に急速に進んだ後、目に見えて少なくなることが分かる。これらは吸脱湿が PE 含浸土のごく表層で起こっていることを示唆していることから、土中内部の PE が当該湿度環境下で再度、軟化するような現象は生じないものと考えられる。

6. まとめ

土構築物遺跡を移築保存する場合、土ブロックの切り出し、移動、復元の作業中は勿論のこと、展示中に変状、変形、損壊が生じないことが求められる。その対策の一つとして、樹脂含浸による土そのものの補強が有力視される。しかし、適用事例がなく、含浸条件や含浸土の物性など不明な点の多いのが現状である。そこで、室内実験を行って土中への水溶性ポリエーテル系樹脂の含浸条件および含浸土の基本物性を検討し、また土への樹脂含浸処理の適用可能性を検討した。

その結果、限られた種類の土での実験ではあるが、粘性土は室温、常圧下での自然含浸に適していること、含浸に適した土の湿潤程度、樹脂分子量、液濃度、浸漬方法などの条件や含浸土の乾燥進行、強度特性、収縮特性、吸脱湿特性が把握できた。そして、この樹脂は展示のための土の補強用として十分な効果を有していることが判明した。ただし、展示中の耐久性に影響すると思われる乾湿繰り返し、不均質な土や今回、不向きとされたシルト質砂への対応などが今後の課題として残っている。

参考文献

- 1) 文化財保存全国協議会：遺跡保存の事典，三省堂，p. 10~16，(1990. 6)
- 2) 土質工学会：土質試験の方法と解説，p. 201~212，p. 320~330，(1990)