

# 土の造粒化の基礎的研究

## BASIC RESEARCH ON GRANULATE OF SOIL

清水英治\*・渡辺 勉\*\*

By Eiji SHIMIZU and Tsutomu WATANABE

The authors studied for ten years with the research on granular soil which have needed strength and stability due to add fixing agent into the soil. The main purposes of this research are (1) prevent the growth of soil dust, (2) construct the pervious ground, (3) effective utilization for sludge from the filter plant.

The results from basic research were clearly found that there are suitable water content to granulate soils and those granulation of soils are able to be utilized as materials of construction.

### 1. ま え が き

造粒とは文字どおり、ほぼ均一な形状と大きさをもつ粒を造る操作をいい、古くから医薬用や化学分野における薬品・触媒などにおける錠剤・顆粒剤などの形として、独自の発展を遂げてきている。

著者らは、土に安定材を添加して3mm~10mm程度の等粒径の粒をつくる土の造粒化の研究を、ここ10年来行ってきた<sup>1)~4)</sup>。その主たる目的は、①土ぼこりの防止、②透水性地盤の造成、③発生土の再利用化などが挙げられる。

土ぼこりの防止としては次のようなことがいえる。関東地方には、富士・箱根両火山から噴出した火山灰が偏西風に乗って運ばれ堆積した、いわゆる“関東ローム”とよばれる火山灰質粘性土が広い地域に分布している。特に、関東ロームを材料とした造成地や校庭などでは、乾燥時に強風によって“飛砂塵”が発生して、付近住民にとっては、一種の大気汚染現象として注目され、社会的問題となっている。また、自然土のままでは水に弱く、雨天時には地表面に水がたまるので踏み荒らすと泥濘化

し、晴天となっても2~3日は立ち入ることもできない状態になる。特に、関東ロームを主体とした校庭(グラウンド)では、運動場としての機能がストップすることが多い。関東ロームの飛砂塵は、現場で採取された塵には100 $\mu\text{m}$ 以上の大粒径のものは少なく、10~30 $\mu\text{m}$ のものが多く、一方、風洞実験では20 $\mu\text{m}$ 以上の粒径のものは飛散しにくくなることが報告されているので<sup>5)</sup>、数mmの粒径に造粒すれば飛砂塵は防止することができる。さらに、安定材を添加して造粒すれば水浸・凍結融解に対しても崩壊することなく安定で、また数mm径の造粒物であれば、雨水は浸透しやすく水がたまる心配もなくなる。

透水性地盤造成の別の目的としては次のようなことが考えられる。近年、河川流域の都市化開発が急速に進展し、本来流域がもつべき保水・遊水機能が確保されず、都市型水害が発生している。そのために、総合的な治水対策の必要性が提唱されている現状である。すなわち、雨水は本来地中に浸透していたが、都市化が進みコンクリート・アスファルトなどで地表面が覆われると、地中に浸透することができず、表面を流れて流出量が増加して洪水・浸水の被害が生じている。このような場合に、地表面から所定の深さまで土の造粒物を敷きつめれば、間隙の多い透水性地盤が造成され、一時、地下に雨水を

\* 正会員 工博 千葉工業大学教授 工学部土木工学科  
(〒275 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

\*\* 正会員 千葉工業大学講師 工学部土木工学科 (同上)

貯留したり、あるいは地下に浸透させ、大雨による都市の中小河川の氾濫を軽減することができると考えられる。

発生土の再利用化としては、次のようなことがいえる。

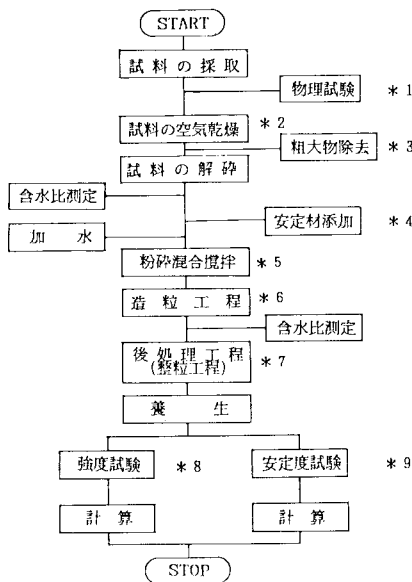
現在、浄水場から発生する汚泥の処理は、ほとんどが埋立て処分されている。処分地の跡地利用を考慮すると、発生土がよほどよい材料である以外は、発生土と砂質系の材料とをサンドイッチ状に敷きならさなければ、長期間にわたって沈下が持続したり、有害物が排出したりするので、安全と安定性が期待できない。また、埋立て処分地の確保が困難となった現状では、発生土を有効に再利用することが急務である。これら粘性土系の廃棄処分される発生土を造粒化することは、土の再利用、しいては資源活用的一端として考える必要がある。

そこで著者らは、土を用いて造粒化するための基礎試験を行った。その結果、土を造粒するときの適切な含水比の範囲が明らかになり、また、土の造粒物が土木材料として有効に利用できる可能性があることがわかった。

## 2. 土の造粒化方法

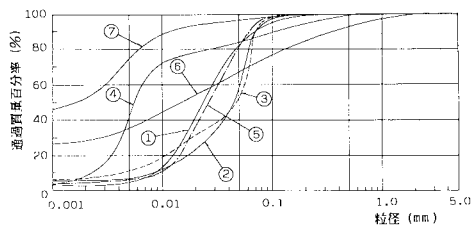
一般的な造粒方法を列挙すると、転動造粒、押し造粒、圧縮造粒、流動層造粒、解砕型造粒、混合型造粒、噴射造粒、噴霧乾燥造粒などがある<sup>6),7)</sup>。著者らは、このうち転動造粒のパン型、ドラム型および押し造粒のスクリー式（前押し形）と圧縮造粒の単発式などを試用し、後処理工程での整粒には回転盤式と縦型スクリー式などを試用した。

前述の試用した装置を種々検討した結果、本研究における造粒工程では押し式造粒機、さらに、整粒工程では水平回転盤整粒機および縦型スクリー整粒機を使用した。円柱造粒から整粒に至る各工程間の最適な含水比が若干異なるので、連続的に造粒する場合には、整粒機の回転数・回転時間（あるいは繰返し回数）を調節して、丸い粒にする。一般には後処理工程の含水比に合わせて、含水量を調節した方が連続的に容易に作製することがで



- \*1 比重試験・粒度試験・液性限界・塑性限界試験を行う。
- \*2 安定材の種類によって乾燥程度が変化するが、ほぼ塑性限界まで乾燥する。
- \*3 粒径より大きい石・木・鉄・プラスチック等を除去する。
- \*4 安定材の種類はアクリルエマルジョン系、セメント系が主である。
- \*5 ローラー付ミキサーによって粉砕・混合・攪拌する。
- \*6 扇式の押し式造粒機による。造粒品の形状は円柱形。
- \*7 縦型スクリー式整粒機による。造粒品の形状は球形。
- \*8 木原式硬塊計による耐圧試験。
- \*9 水浸による安定度を試験した後、凍結融解による安定度を試験する。

図一 土の造粒方法



図二 使用試料の粒径加積曲線

表一 試料の物理試験結果

試料名	番号	採取地	採取時含水比 W %	比重 G <sub>s</sub>	粒 度 特 性					コンシステンシー特性		
					砂 %	シルト %	粘土 %	均等係数 U <sub>c</sub>	曲率係数 U <sub>c</sub>	液性限界 W <sub>L</sub> %	塑性限界 W <sub>p</sub> %	塑性指数 I <sub>p</sub>
亀戸粘質土 *	①	東京都江東区	59.64	2.703	8.0	87.0	5.0	3.4	0.9	43.3	20.0	23.4
工業用水発生汚泥	②	千葉県印旛郡	114.3	2.322	8.0	84.0	8.0	6.5	1.6	184.0	100.5	83.5
	③	千葉県佐倉市	106.6	2.419	8.0	80.0	12.0	12.4	1.4	183.3	98.8	84.5
	④	千葉県習志野市	119.7	2.750	13.0	46.0	41.0	2.8	1.2	107.1	82.6	24.5
関東ローム	⑤	千葉県成田市	120.3	2.801	5.0	88.0	7.0	3.4	1.1	103.0	79.0	24.0
	⑥	神奈川県横浜市	76.2	2.709	28.0	37.0	35.0	—	—	90.8	55.2	35.6
浄水場発生汚泥	⑦	神奈川県川崎市	383.0	2.528	1.8	24.2	74.0	—	—	148.0	68.5	79.5

\* 空気乾燥して用いたことや、採取地付近で安定処理が行われていたことなどで、普通の粘性土とやや異なる。

きる。

土の造粒方法を図-1のフローチャートに示す。

### 3. 造粒化に影響する諸要因

#### (1) 土質材料について

造粒するために使用した土の試料は、関東ロームを主体に粘土、工業用浄水場から発生する汚泥、水道用浄水場から発生する汚泥などである。それぞれの物理的な土質特性を表-1に、粒径加積曲線を図-2に示す。試料番号②、③、⑦は濃縮槽から脱水機に入る処理フローにおいて、石灰や硫酸バン土、水ガラス、ポリマーなど各種の凝集剤が添加されているので、粒度試験では分散が十分行われずに凝集化しているため、実際の粒度より、粒径が大きい方へ片寄って出ていると考えられる。試料番号⑥のロームは、表層土を含んでいるので、一般的なロームの粒径分布より粒度がよくなっている。日本統一土質分類によればすべて細粒土であり、試料番号①は粘質土(CL)、試料番号②~⑦は火山灰質粘性土(VH<sub>2</sub>)に属している。しかし、試料番号②、③、⑦は採取月別により土の物理特性が変動しており、また、凝集剤処理などが施されているので、自然土として考えるわけにはいかない。造粒時に影響する諸要因の中では、土の粒度が重要で、粘土分が多いほど造粒が容易であり、整粒した造粒物の外観がよい。また、粘土分の多い材料は、造粒可能な含水量の範囲が広く、砂質土系ほどその範囲は狭く造粒が難しい。

#### (2) 含水比の範囲

造粒操作のほとんどは、種々の造粒方法によって土粒子を団粒化して、使用条件に合致した強度と安定性のある造粒物にすることである。それには、土を構成する固体粒子間の水分による凝集現象を利用することが必要である。そのためには、含水量を適度に制御して塑性体に変化させ、造粒物となるようにしなければならない。

##### a) 造粒可能な含水比

粘性土を練り返すとき、水分を人為的に変化させると、コンシステンシーは水分の多少に応じて、広範囲に変化する。適当な含水量の状態で作成した場合に、形状の整った球形の造粒物を造りだすことができる。しかし、使用する造粒機構の種類により、同一の土でもかなり違った含水比を示す。図-3に、表-1に挙げてある7種類の試料の造粒可能な含水比の範囲を示す。図-3より無添加の試料の理論的に造粒可能な含水比の範囲は、液性限界と塑性限界の間にあるが、普通ポルトランドセメントを5%、10%添加した場合には、枠外にはずれるものが多くみられる。

##### b) 整粒に最適な含水比

本研究では、湿式押し式造粒機によって円柱形の造

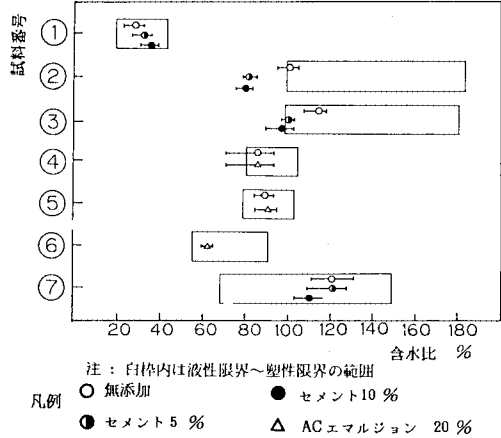


図-3 造粒可能な含水比の範囲 (造粒径: 5 mm)

粒物を作製した後、整粒工程での整粒機 (回転盤と縦型スクリーンの2種類がある) によって整粒する場合の可能な含水量について述べる。

写真-1に、試料⑦ (浄水場発生汚泥) の含水比を5段階に変化させ、図-5の水平回転盤整粒機を用いて、整粒したときの形状の変化を示す。また、写真-2には、試料④ (関東ローム) にアクリル系エマルジョン①の安定材を10%添加し、含水比を6段階変化させ図-6の縦型スクリー整合粒機を5回通して整粒したときの形状の変化を示す。写真-1では、造粒するのに適当な含水比は122%、写真-2では85%のときに形状のよい造

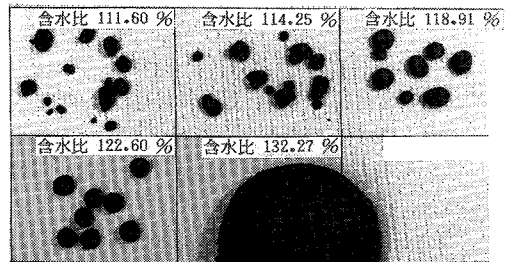


写真-1 含水比の変化による整粒物の形状 (水平回転盤整粒機・試料⑦)

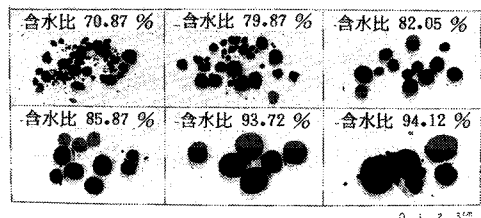


写真-2 含水比の変化による整粒物の形状 (縦型スクリー整合粒機・試料④)

粒物ができる。いずれの場合も、含水量が少ないと、遠心力で側壁にぶつかり砕けて小さい造粒物が多くなる。また、逆に含水量が多いと互いに付着して、大粒径の造粒物となるのがわかる。形状としては、試料⑦の造粒物が丸く外観もよい。これは整粒機の種類の違いもあるが、土質材料が大きく影響している。すなわち、砂粒土(S)に比べて細粒土(F)は造粒しやすく形状も整いやすい。

(3) 安定材・結合材

湿潤土である関東ローム、粘土、浄水場発生土はいずれも土中にある適量の水分だけでも、造粒によって若干の強さが発生するが、土粒子間をつなぐ安定材(土粒子間を接着させて粒をつくるものを安定材、その後で造粒物どうしの粒を結合させるものを結合材という)を添加せずに造粒物を作製すると、取扱い中あるいは施工中に破碎したり、水浸した場合には崩壊することがある。しかるに、安定材の入った造粒物はなんらかの理由で破壊したとしても、単粒子に戻らず団粒化構造を保ち、風などによって舞い上がることが防止できる。ゆえに、安定材を造粒材料である土に添加して、強度と安定度を増す必要がある。

安定材としては、一般に接着材と称されるものはすべて利用できるが、水に対して安定であり、かつ強度が乾燥・湿潤状態および温度変化などによってあまり変動しないものを選ばなければならない。安定材を大別すると無機質系安定材と有機質系安定材に分類できる。本研究では、セメント系の無機質系安定材と、アクリル系エマルジョンの有機質系安定材とを用いた。

結合材は、造粒物を結合させるために用いるもので、特に弾性・耐候性に優れたものでなければならない。数種類の給合材を試験した結果、耐水性・ベタつきなどを改良した弾力性を有する結合材であるアクリル系またはアスファルト系のエマルジョンを用いた。使用した安定材・結合材の物性を表-2に示す。アクリル系エマルジョン①と②の異なる点は、②には超微粒子エマルジョンが添加されており、①よりさらに耐水性に優れていることである。

(4) 造粒機の機種選定

表-2 安定材・結合材の物性

安定材	無機質系	主成分	Ig	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
	安定材	普通ポルトランドセメント		2.0	20.0	6.0	3.0	63.0	1.5
	土質改良材		1.2	19.8	5.0	3.1	61.6	1.2	7.6
結合材	有機質系	物性	固型分(%)	粘度(CPS/25℃)	PH(25℃)				
	安定材	酢酸ビニルエマルジョン	45.0	主材7000~9000	---				
		アクリルエマルジョン①	55.0	50~200	7~9				
	アクリルエマルジョン②	50.8	250	7.1					
安定材	アスファルトエマルジョン	57.0	2~30	---					

多種ある造粒方式のなかで、最も望ましい粒の形状、大きさ、強度、安定度が得られる造粒方法を選定しなければならない。また、造粒機の選定にあたっては、原料の湿潤状態と粒度とをめぐり、選定するのが一般的である。造粒方式と機種を選定は下記に示す理由で行った。

①転動造粒は、原料を微粉末に、また含水量を少なく調整する必要があるため、有機質系のよほど効果的な安定材を用いなければ、造粒物の強度は期待できない。しかるに、原材料は、表-1に示したとおりかなりの高含水比であるから、転動造粒のような乾式の造粒方法では、大仕掛けな乾燥工程が必要となり、経済的に土質材料を造粒するには適さない。②圧縮造粒では、強度の高い円柱形造粒物が得られるが、量産性に欠ける。③空気乾燥した程度の含水量(3~2で述べた塑性限界程度の含水比)で造粒可能な機種としては、図-4に示す前押し形スクリー造粒機がよい。

(5) 整粒機の機種選定

押し出し式造粒機によって成形される造粒物は、ダイスを通してのために、含水量によって変化するが、径7mmのとき長さ20mm程度の円柱形となるので、後処理工程で球形に整粒する必要がある。それは、充填材や基層などの土木材料として使用するのであれば、形状はそれほど問題とされないが、円柱形の造粒物では校庭に敷きならしたとき、転圧等の際に端部が欠けて細粒化され、飛砂塵の原因となり、透水性地盤においては目づまりの原因となる。また、円柱形では流動性が悪く、締まりが悪い、粒の強度が弱いなどの不都合も生ずると考えられる。

著者らは、基礎実験を行うために、図-5に示す水平回転盤整粒機を最初に用いた。この機械は回転数70~

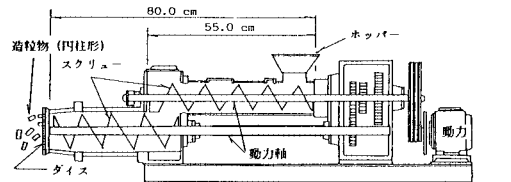


図-4 前押し形スクリー造粒機

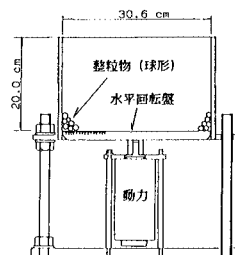


図-5 水平回転盤整粒機

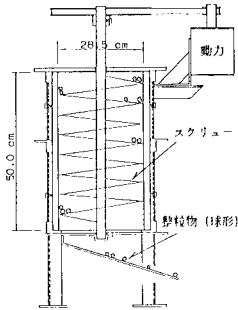


図-6 縦型スクリュー式整粒機

1700 rpm まで連続可変できる機構をもっている。整粒工程は、押出し式造粒機より排出される円柱形の造粒物を、湿潤状態のままこの整粒機に投入すると、回転している水平回転盤上に落下して、遠心力と水平板に同心円状に刻まれた溝の摩擦とによって、粒は側壁をロープのようにねじれながら回転するうちに、塑性変形して球形に整粒される。

球形造粒物を土木材料として使用するとすれば、大量に生産する必要がある。造粒工程では押出し式造粒機によって連続して円柱形の造粒物が作られるので、後処理工程の整粒機も連続生産の可能な機種が必要となる。しかし、この水平回転盤整粒機では、バッチ方式であるので連続的に整粒するためには多段式に組み合わせ、粒をオーバーフローさせる必要がある。そのために、大量生産を行う場合には不向きと考えられる。そこで、著者らは、図-6 に示す連続生産可能な縦型スクリュー式整粒機を考案した。

(6) 整粒効果

整粒機の整粒効果は、含水比と回転数によって大きく左右される。図-7 に、回転数を一定にして含水比を変化させ整粒した場合の、造粒物の粒径分布を示す。この図より、一定回転数 230 rpm のとき含水比 91% 前後で、ダイス径 7 mm と同じ粒径の整粒物が多く得られることから、整粒に最適な含水比が存在することがわかる。最適な含水比より少なくなると、7 mm 径より細かい粒が増えてくる。整粒に最適な含水比は、造粒に最適な含水比より数%高い。

図-8 に含水比を一定して、回転数を変化させて整粒した場合の造粒物の粒径分布を示す。この図より、一定含水比 94% では回転数 230 rpm のときが、ダイス径 7 mm と同じ粒径の整粒物が多く得られ、回転数がこれより多くなるに従って、粒が破壊され粒径の小さいものが増えてくる。このように、造粒土の含水比に対して、整粒に最適な回転数が存在することがわかった。以上のごとく、回転数と含水比によって、整粒された粒径分布が大きく変化する。したがって、実用機で所定の粒径の造

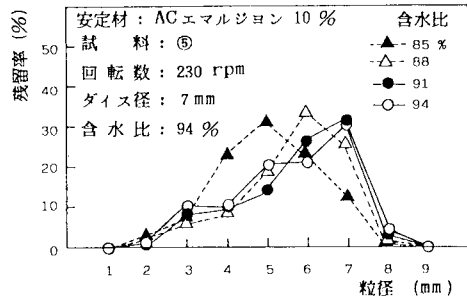


図-7 含水比と造粒物の粒径との関係 (縦型スクリュー整粒機 5 回通し)

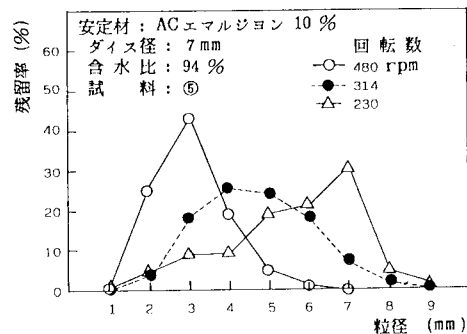


図-8 含水比と造粒物の粒径との関係 (縦型スクリュー整粒機 5 回通し)

粒物(整粒物)を作製するには、含水比・回転数など予備試験によってあらかじめ、整粒機の機種に最適な値を決めておく必要がある。

4. 造粒物の諸性質

(1) 造粒物に要求される一般的性質

造粒方法を古くから採用している医薬・食品・肥料・飼料・農業・触媒工業などの分野では、造粒の目的が流動性、貯蔵、ふるい分け、成分の均一性、溶解性、定量化などの向上にある。強度的には輸送または使用の過程で破損が生じない程度であればよいことになっているが、磨耗試験、衝撃試験、圧縮試験なども行われている。また、医薬・食品・飼料工業分野では、口に入るまでは物理的、化学的に安定で、1個の粒の形態を保持していなければならないが、いったん、口に入ると体内で崩壊し溶解するようにしている。肥料工業では、親水性バインダーで造粒し、水中崩壊速度を早めるために、わざわざ崩壊助剤を添加しているものもある<sup>9)</sup>。崩壊試験法などは、本研究と大体似かよった方法で行っている。

以上のごとく、他分野での強度・安定度の試験法の規格はまだ確立されていない現状であり、社内規格と称する独自のもので行っているのが普通である。

本研究のように、造粒物を使用する目的が飛砂塵防止、

透水性地盤の造成となれば、強度・安定度が要求される。すなわち、施工中に造粒物が破碎しない程度の耐圧強度をもち、水浸した場合に崩壊することなく、凍結融解などの自然環境下でも安定でなければならない。また、施工する場所が小・中学校の校庭（グラウンド）のような場合には、前述の強度・安定度のほかに適度な弾性をもたせなければならない。耐圧強度試験結果および水浸・凍結融解に対する安定度試験結果を表一3に示す。

(2) 粒の耐圧強度について

造粒物の強度試験は、造粒分野で一般的に使われている写真一3に示す木屋式硬度計を用いた。セメント系安定材を添加した造粒物は、28日間湿潤養生し、また、エマルジョン系安定材を添加した造粒物は、7日間空中養生した。所定の期間養生した造粒物一粒一粒に、徐々に圧力をかけてつぶれたときの荷重を数十粒平均して、耐圧強度として求めた。図一9に各種試料の造粒可能な含水比と、その含水比で造粒した造粒物の耐圧強度の関係を示す。耐圧強度を測定する木屋式硬度計は接触面積を補正することなく、最大荷重を指示するので、造粒物の粒径によって接触面積が異なると、同じ条件で作製さ

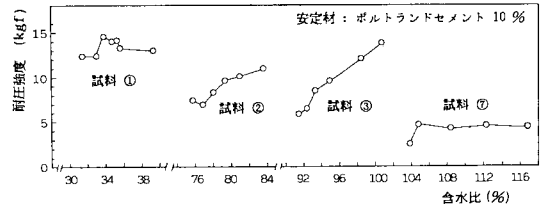
表一3 造粒物の耐圧強度・水浸および凍結融解試験結果一覧表

試料番号	安定材の種類と添加割合(乾土重に対して) %	耐圧強度(木屋式硬度) kgf	水浸安定度 72 h	凍結融解に対する安定度 サイクル数
①	無添加	4.0	×	
	セメント 5	4.3 (3.8)	○	5
	セメント 10	14.5 (8.0)	○	10
	酢ビ系エマ 5	2.5 (0.5)	△	
②	酢ビ系エマ 10	1.8 (0.5)	△	
	無添加	10.5 (1.8)	○	3
	セメント 5	16.8 (1.8)	○	2
	セメント 10	11.0 (1.8)	○	2
③	セメント系 5	15.0 (2.0)	○	3
	セメント系 10	11.6 (2.2)	○	3
	無添加	11.5 (1.7)	○	2
	セメント 5	14.1 (1.9)	○	2
④	セメント 10	14.0 (2.3)	○	3
	セメント系 5	13.6 (1.4)	○	2
	セメント系 10	11.8 (1.7)	○	2
	無添加	1.7	×	
⑤	AC系エマ 5	2.2	○	10
	AC系エマ 10	2.5	○	10
⑥	AC系エマ 20	3.7 (1.8)	○	10
	AC系エマ 10	3.5 (0.9)	○	10
⑦	AC系エマ 20	2.3 (0.4)	○	10
	無添加	1.1	○	3
	セメント 5	1.0	○	4
	セメント 10	5.1	○	4
⑧	石膏 5	1.2	○	2
	石膏 10	2.1	○	5
	石英混合焼結	16.5	○	10

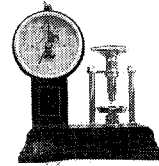
セメント＝普通ポルトランドセメント，セメント系＝セメント系硬化材，酢ビ系エマ＝酢酸ビニル系エマルジョン，AC系エマ＝アクリル系エマルジョン，○：安定，△：部崩壊，×：崩壊

\* ( )内はいずれも水浸時の耐圧強度である。

\* 意図は、⑧の試料以外は7時である。



図一9 造粒可能な含水比と耐圧強度の関係



写真一3 耐圧強度試験に用いた木屋式硬度計

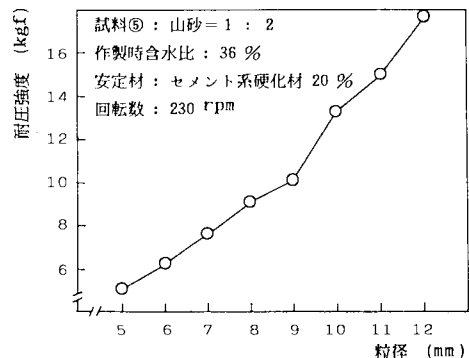
れた造粒物でも粒径が大きいくほど、接触面積が大きくなり、耐圧強度は大きい値に計測される。この現象を確かめるために、プレスケール（圧力判定フィルム）を用いて木屋式硬度試験を行った結果、接触面積が粒径によって変化することが判明した。たとえば、ダイス径10 mmで作製された粒の粒径別による耐圧強度の関係を図一10に示す。同一の試料でも、この図から粒径の大きい粒が小さい粒より、耐圧強度が大きくなる傾向がわかる。

室内試験において、円柱形の粒を縦型スクリー整粒機（長さ0.5 m）に通過させて、繰返し回数と耐圧強度との関係を求めた結果を図一11に示す。繰返し回数5回のときに耐圧強度が最大になり、6回の場合には下がる傾向がいずれの粒径でも認められた。これより実用機では、縦型スクリーの長さが2.5 m必要であることがわかった。

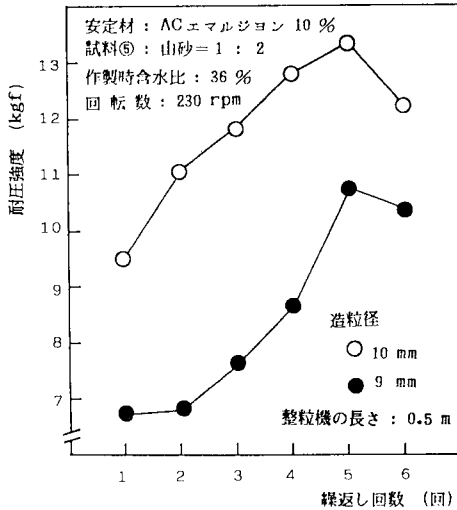
(3) 粒の安定度（水浸・凍結融解試験）について

a) 水浸試験

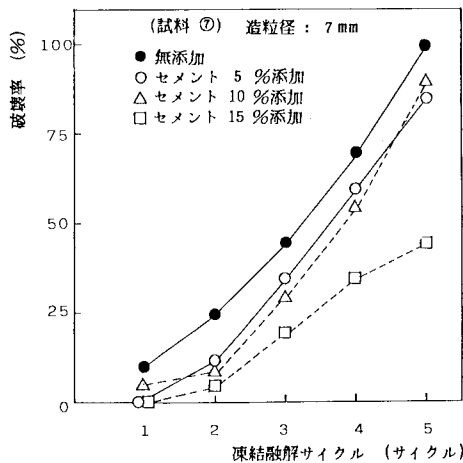
水浸に対しての安定度は、数十粒の造粒物をシャーレ



図一10 造粒物の粒径と耐圧強度の関係



図一十一 縦型スクリュウ造粒機の繰返し回数と耐圧強度の関係



図一十二 凍結融解試験における破壊率

に入れ、造粒物が浸るように注水し、72時間水浸した後、スレーキングで崩壊するかを観察する。もし、形状に変化がみられない場合には、水浸後の耐圧強度を測定して、水浸・非水浸の強度変化を試験する。強度の差が少ないほど、よい造粒物といえるが、安定材の種類によって、その差は著しい。

b) 凍結融解試験

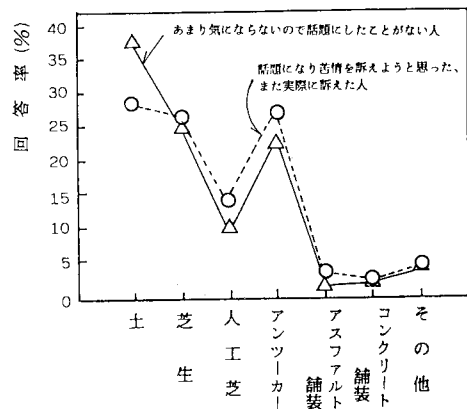
凍結融解試験は、水浸試験と同様にシャーレに入れた造粒物を、最初の24時間は15°Cの水に水浸、次に-23°Cの凍結槽に24時間入れ、これを1サイクルとして10サイクルまで連続して行う。途中の崩壊の程度を観察して凍結融解に対する安定度をみようとするものである。試験結果は、表一3に示してあるように亀戸粘質土(試料番号①)および関東ローム(試料番号④)においては、安定材を添加していない造粒物は水浸すると、ス

レーキングによって崩壊する。しかし、浄水場より発生した試料は、72時間程度では崩壊が認められない。試料番号②③にセメント系の安定材を添加すると、著しく耐圧強度は高くなるが、凍結融解においては2~3サイクルで崩壊する。さらに正確な凍結融解に対する安定度を調べるために、シャーレに30個の造粒物を入れて水浸・凍結の試験を行い、崩壊あるいは破壊した造粒物の数を全体の数で割って破壊率を求めた一例を図一12に示す。図一12は、試料⑦にセメントの添加割合を変えて作製した造粒物の、凍結融解試験時のサイクル数に対する破壊率の変化を示している。やはり、無添加の粒は5サイクルで全部が破壊しており、セメント15%添加した粒は5サイクルでは半分以上が安定である結果を得ている。なお、表一3に記入してある安定度のサイクル数は破壊率50%を基準にしている。酢酸ビニル系エマルジョンを添加した造粒物は耐水性に問題がある。アクリル系エマルジョン①を添加した造粒物は水浸・凍結融解に対して安定であり、しかも、耐圧試験の結果、粒は破壊することなく弾力性もあることがわかった。

5. 造粒物を表層材へ利用するための基礎試験

小・中・高等学校近隣の人々を対象にした土ぼこりの実地調査によると、土ぼこりの発生源の順序は、隣地、空地、校庭、道路の順で多く発生している。また、校庭の表層材として、どのような種類の材料を希望するかをアンケートした<sup>8)</sup>。その結果、857名の回答を得、おのおの表層材に対する回答率を図一13に示す。図より、屋外運動場の表層材としては、校庭からの土ぼこりの苦情が多いにもかかわらず、土、芝生、アンツーカーの順に希望している。これは、土に対する親しみ、生徒の身体への影響および経済性を考慮したものと考えられる。

そこで著者らは、土の感触があり、しかも土ぼこりの



図一十三 校庭の希望表層材のアンケート結果 (清水・川崎ほか 1981)<sup>8)</sup>

たない透水性のよい校庭の表層材として、土の造粒物を利用することを考え、そのための基礎試験を行った。その試験内容は、造粒物を結合材で円柱形に結合して供試体を作製した後、間隙率、透水係数、一軸圧縮試験、耐候性試験などを行って透水性・安定性に関する基礎データを得た。

(1) 供試体作製方法

所定の日数養生された造粒物を、表—4に示すアスファルト系エマルジョン、アクリル系エマルジョン②の結合材に浸し、直径5 cm、高さ10 cmのモールドに詰める。24時間後モールドから取り出し乾燥養生する。この養生方法は、結合材がエマルジョン系統であるので、水分が蒸発することによって粒子間に被覆ができて固まるので、セメント系のような養生は行わずに、数日放置した後、乾燥させた。

(2) 間隙率測定について

雨水を一時グラウンド等の下の貯溜層に貯水させようとする場合には、上層面から溢流することなく、雨水を透水させる機能を持ち、下層地盤の浸透能に応じた貯溜層の厚さがなければならない。すなわち、雨水を貯溜するだけの間隙をもった厚さに設計する必要がある。その基礎資料を得るために、粒径5、10 mmの2種類の造粒物を用いて、結合材を使わずそのまま詰めた場合と、結合材で接着した場合のそれぞれについて間隙率を測定した。

この試験に用いた造粒物は、試料⑤にアクリル系エマルジョン①を20%添加したものである。測定の種類は、測定する前にあらかじめ水浸した状態と絶乾状態にした場合について行った。結合材を使用しない場合の測定方法は、200 mlのピーカーに造粒物を入れた後、200 mlの刻線まで加水した水量から間隙率を求めた。ピーカーに造粒物を入れる際、軽く入れた場合を疎とし、造粒物を入れながらピーカーに振動を与えた場合を密とした。

結合材を使用する場合の測定方法は、造粒物を結合材（アスファルト系エマルジョンあるいはアクリル系エマルジョン②）に含浸させた後、φ5 cm×10 cmのモールドに詰め、フローテーブルで2層30回振動を与えて供

試体を作製した。間隙率は供試体を乾燥後、前述と同様にモールドを満たす加水量より求めた。いずれの測定方法においても吸引脱気はしなかった。測定結果の一覧表を表—4に示す。

造粒物が等粒径とすれば、等大球が立体的に積み重ねられるときの模型的な粒子の配列は、Gratonらが理論的に研究され“Graton-Fraser 模型”として知られている。それによると、最密充填の配列では、29.95%の最小間隙率をとり、最緩充填では47.6%の最大間隙率を示している。表—4から、造粒物を絶乾状態で容器に詰めて注水し、脱気せずに測定したときの間隙率は、一度水浸した粒を詰めた場合に比較して、減少する傾向を示している。これは、粒を絶乾にすると造粒物中の毛管間隙と水とのなじみが悪くなるので、吸水量が減少すると考えられる。しかし、長時間吸引脱気して測定したときは、両者の間隙率の測定値は、ほぼ同程度になった。現場施工を考えると、土の造粒物を結合せずに使用したときの間隙率は37~43%程度と考えられる。

(3) 透水係数について

試料④にアクリル系エマルジョン20%添加した造粒物を、アクリル系エマルジョン②に含浸させてから、φ5 cm×10 cmのモールドに詰め、フローテーブルで2層30回振動を与えて円柱形の供試体(写真—4)を作製した。透水係数の測定にあたっては、供試体側面より水が漏れないように油粘土でシールした後、定水位透水試験を行った。その測定結果は、 $k=(1.1\sim 1.5)\times 10\text{ cm/s}$ を得た。結合材溶液の希釈率の高いものほど(濃度が薄いもの)、透水係数は大きい値になるが、大差なく十分に透水性がよい材料といえる。

(4) 一軸圧縮試験

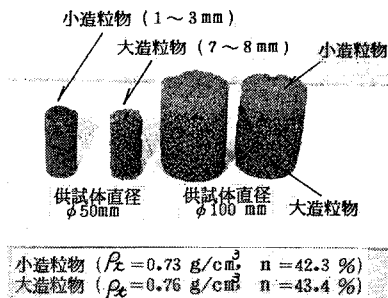
試料④が存在するグラウンドの表面より乱さない試料を採取して(含水比111%、湿潤密度 $1.21\text{ g/cm}^3$ )、一軸圧縮試験を行った結果、一軸圧縮強さは $q_u=1.4\text{ kgf/cm}^2$ 、応力~ひずみ曲線の初期接線部分より求めた静的弾性係数は $E_s=(5.0\sim 6.4)\times 10\text{ kgf/cm}^2$ を得た。

この無処理のグラウンドは、雨天時はぬかるみ乾燥時

表—4 造粒物の間隙率

	造粒物の種類	粒径 mm	間隙率 (%)		備 考
			Loose	Dense	
造粒バ	AC系エマルジョン①	5	44.6	42.6	造粒物は水浸状態
	②	5	45.1	39.9	造粒物は絶乾状態
物ラ	AC系エマルジョン①	10	48.6	42.5	造粒物は水浸状態
	②	10	45.2	36.8	造粒物は絶乾状態
結	AS系エマルジョン②	10	38.64		フローテーブル
	AS系エマルジョン②	5	28.79		
合供	AC系エマルジョン②	10	43.44		で2層30回つめる
	AC系エマルジョン②	5	43.29		

\*AC系：アクリル系、AS系：アスファルト系



写真—4 造粒物の円柱形供試体



には土ぼこりがひどいが、通常の状態では人体に対して接地感がよい運動場として使用されている。

そこで著者らは前述の数値を目標に、造粒物を結合材で接着して作製し、供試体の一軸圧縮試験を行った。その結果、 $q_u=(1.3\sim 2.5)$  kgf/cm<sup>2</sup>,  $E_s=(1.3\sim 2.4)\times 10$  kgf/cm<sup>2</sup>を得、水浸後に一軸圧縮試験を行うと、 $q_u=(0.5\sim 1.1)$  kgf/cm<sup>2</sup>,  $E_s=(2.0\sim 9.1)\times 10$  kgf/cm<sup>2</sup>を得た。自然土と比較すると、乾燥状態では硬いような感じはするが、水浸した場合、ほぼ同程度の静的弾性係数が得られる。これらの試験結果から、 $q_u$ ,  $E_s$ の値は結合材の強さに支配され、供試体に使用された造粒物の強さを変えても、ほとんど変化はみられなかった。結合材の濃度を濃くすると、 $q_u$ ,  $E_s$ の値はともに増加する傾向があるが、混合・施工・コストなどを考えると、結合材：水=1：1の希釈割合が適当である。

学校屋外運動場の“かたさ”に関する評価指数を求める方法としては、小野式弾力性測定装置で測定したものが報告<sup>14)</sup>されており、試験施工した場合には、この方法の利用を考えている。

(5) 耐候性試験

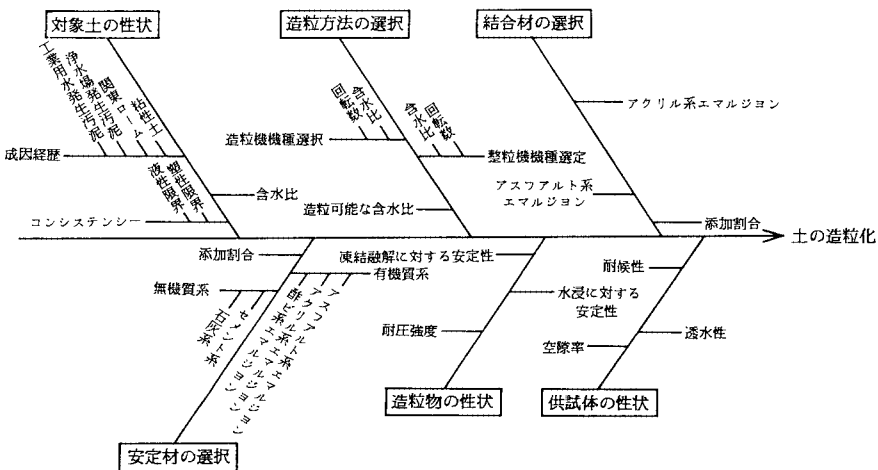
アクリル系エマルジョンの結合材を用いて、供試体(10×20×3 cm)を作製し、JIS B 7752に規定する紫外線カーボンアーク灯促進耐候試験機で200時間継続して耐候性の試験をした。その結果は、造粒物を結合した結合材の表面に、変色・しわ・ふくれ・われ・はがれなどの現象は見当たらなかった。自然の耐候試験と同じ効果の判定を期待することはできないが、4～5年程度は安定であると判断できる。

6. あとがき

現場で土を造粒する場合には、使用する材料土の状態

や土の種類・含水量・コンシステンシーなどが一定でないのが普通である。また、造粒機・整粒機の機種によって造粒可能な含水比が異なることから、土の造粒化を困難にしている。造粒化するにあたっての要因を、とりまとめたものを図—14に示す。土の造粒化の基礎試験結果より考察すると、下記のような結論となる。

- (1) 造粒方式・機種によっても異なるが、造粒可能な含水比は、理論的には造粒に用いる土の塑性限界～液性限界の範囲が目安になるが、一般に塑性限界付近である。
- (2) 含水比の高い材料の造粒には、湿式の押し出し式造粒機が適している。
- (3) 連続的に丸めて造粒物を生産するには、試作した縦型スクリー式整粒機が良好である。
- (4) 整粒に最適な含水比は、造粒時の含水比より数%高い含水比である。
- (5) アクリル系エマルジョンの安定材を使用することによって、適度な弾力性を保持し、水浸・凍結融解に対して安定な粒を作ることができる。
- (6) 造粒物をアクリル系エマルジョンの結合材で結合しながら作製した供試体は、間隙率43%程度とポーラスな状態になり、透水係数は10 cm/sのオーダーの値で非常に透水しやすい。
- (7) 粒径3 mm以上に造粒したものは、強風時でも土ぼこりの発生原因とはならない。
- (8) 造粒物の耐圧強度からみても、運動場や歩道として十分使用に耐える材料と考えられる。
- (9) セメント系の安定材を使用した造粒物は安価で耐圧強度はあるが、安定性があまりよくなく、しかも、運動場の材料としては硬すぎる。有機系の安定材を用いた造粒物は、土質にもよるが、耐圧強度はセメント系に



図—14 土の造粒化の要因

比較して1/3程度である。しかし、安定性は非常によく、弾力性があるので、運動場の表層材として適する。経済性や耐圧強度・耐久性などを考えると、有機系安定材は乾土重量に対して20%程度添加する必要がある。

今後さらに強度・安定度のよい土の造粒物を大量に経済的に生産することに重点をおき、また、造粒物を土木材料として利用するために、実際の現場で試験施工を行うなどの研究を進めている。

#### 参 考 文 献

- 1) 清水・渡辺・片瀬：土の造粒化に関する研究（第1報），第10回土質工学研究発表会講演集，pp.985～986，1976.
- 2) 清水・渡辺：土の造粒化に関する研究（第2報），第30回土木学会年講，pp.423～424，1975.
- 3) 清水・渡辺・地蔵・花島：土の造粒化に関する研究（第3報），第12回土質工学研究発表会講演集，pp.513～516，1977.
- 4) 清水・渡辺：土の造粒化に関する基礎的研究，昭和56年度農業土木学会大会講演要旨集，pp.309～310，1981.
- 5) 川崎・早川ほか：屋外運動場の飛砂じんの実態調査およびその軽減法に関する基礎的研究，横浜市教育委員会施設部校地整備課の委託研究報告書，pp.11，1978.
- 6) 日本機械学会：造粒と造粒装置，pp.1～6，1967.
- 7) 橋本：産業廃棄物の造粒・成形と固化，産業技術センター，pp.151～156，1976.
- 8) 清水・川崎ほか：屋外運動場の土ぼこり制御法およびかたさに関する実験的研究，横浜市教育委員会施設部校地整備課の委託研究報告書，pp.19，1981.
- 9) 日本粉体工業協会：造粒便覧，pp.432～434，1975.
- 10) 川北・小石・種谷：粉体工学（基礎編），槇書店，pp.86～93，1979.
- 11) 三上ほか：学校屋外運動場のかたさに関する研究（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.321～322，1981.
- 12) 三上ほか：学校屋外運動場のかたさに関する研究（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.323～324，1981.
- 13) 川崎ほか：学校屋外運動場のかたさに関する研究（その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.513～514，1982.
- 14) 小野・三上ほか：屋外スポーツサーフェスのかたさの評価方法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.281～282，1984.

(1985.6.21・受付)