砂質土壌の土質改良

新田 伸三・小橋 澄治*

Shinzo NITTA*, Sumiji KOBASHI*: Fundamental Studies on the Rapid Stabilizing method by Seeding for Cut and Filled Slopes. II

はじめに

法面急速緑化工法を施工する場合その発芽及び初期生長の成績を左右する大きい要因は水分関係である。土壌水分の多少はその成績に非常な影響をもたらす、ひいては法面をグリーンでおおいつくすることができるかどうか、またその遅速を決定することとなる。そのため施工後法面の土壌水分（特に種子を含む表層部の）をいかにして保持するかが重要な問題となる。

法面から失われる水分のうち蒸発についてはアスファルト乳剤による養生法の採用により飛躍的にその抑制効果を高めることが出来るようになったが、しかしなお不成績地が特に砂質土壌地に起ることが多い。この不成績の最大の原因は砂質土壌の土粒が粗であるため容水量、保水力が共に少ないこと、施工後法面表層の崩壊がいはゆるしいことにもとづいている。

関西一円に広がる花崗岩の風化した真砂土地帯、あるいは今後増大するであろう干拓地の緑化を考えると砂質土壌地に急速緑化工を施工することが要求される度合も多くなることと考えられるので、先にのべた欠点を何らかの方法で補う研究をしておかななくてはならぬ。

法面という悪条件下で土質改良を行なうのは容易ではないが、しかし水分不足にもとづく失敗が特に施工直後の発芽と初期生長に多いから少なくともその時期に要する水分を保持しうる方策を考える必要がある。その期間に無事に生長を進めることが出来れば、根系の発達につれ水分不足による枯死の危険性はずつと少なくなり、管理を慎重にするなら砂質土壌地の緑化工は安全性の高いものになるだろう。

1. 芝草の発芽、初期生長と水分

まづ芝草の発芽、初期生長と水分の関係の知識を得ようとした。この関係を考えるとき発芽にどれだけの水分を要するかということより水分が土壌に保持されている力、水分張力がどれだけのとき発芽が可能かを知る必要がある。すなわち種子発芽における拡散圧差による吸水と土壌水分張力の関係を明らかにすることである。又土壌含有水分は水分含量と水分張力の関係で理解してはじめて土壌の種類にかかわらず統一的考察をえることが出

来る。ここではサツカロゼ溶液を用い土壌水分張力の代りに溶液の浸透圧によつて発芽、初期生長との関係をみた。（図-1, 2, 3）

この結果をまとめて考察する。

a. 発芽の第1段階の吸水は高浸透圧溶液下でもみられる（図-1）。0.8モル（約20気圧）でも30%の吸水は可能であつた。これは明らかに第1段階の吸水が単なる物理的現象としての浸透圧差による水の侵入であることを意味する。

b. ある程度の浸透圧による吸水が始まると種子細胞の膨圧が高まり拡散圧差は減少する。したがつて吸水量の増加に伴つて高濃度溶液下での吸水が困難となる。そして図-1のように経過時間が長くなるにつれて吸水曲線の勾配は大きくなる。

c. しかし単なる発芽現象（芽を切ること）には完全な飽水量までの水分を要しない。ある一定の水分量があれば発芽しうる（図-2）。発芽曲線は吸水曲線ほど敏感に現れない。発芽に要する水分張力の限界を正常発芽率の $\frac{1}{2}$ の発芽率のあたりと考えると0.3~0.4モルのあたり

*京都大学農学部：Facul. of Agr., Kyoto Univ.

図一 溶液濃度と種子吸水率

図二 図一での発芽曲線

イタリアンライグラス (種子重 $2.5 \pm 0.3 \text{ mg}$) 35°C 定温、径 9cm のシャーレに口紙 3 枚しいて、各溶液温度の液 5cc ずつ加え、100 粒置床、有光。発芽率は 70~80 %。

図三 溶液濃度と伸長量 (地上部)

径 3cm 高さ 10cm のガラス容器に各濃度溶液の液を 15cc 入れ、イタリアンライグラスを各 20 粒播種し、日数別に第 1 本葉の伸長をみた。温度は室温 (8 月 26 日~9 月 4 日) である。室内光。

図 - 3

で、この点は吸水曲線で見ると単なる物理的浸透現象しか起らぬ点と一致する。それは又水分恒数という萎凋点の少し手前で有効水分の限界と一致する。これは当然であろう。

d. 芽を切つてから伸長するには水分張力はずっと低いことを要する (図一 3)。又水分張力の変動に敏感である。水のみで伸長せしめた正常な生長量の $\frac{1}{2}$ の伸長量を得るには 5.2 気圧あたりで、萎凋点よりずっと前であるだから充分な幼植物期生長をするための有効水分の巾はずっとせまいと考えなくてはならぬ。具体的には上限を水分当量とするなら 0.48~5.2 気圧 (pF 2.7~3.3) と考えられ、これだけの水分張力になるよう土壤含水分を保つ必要がある。

2. 土質改良のための材料

芝草の発芽期の生長に対して砂質土壤は次の欠点を持つている。

a. 容水量が少ないため土壤の持ち得る水分の絶対量が少ないこと。

b. 有効水分の巾がきわめてせまいため必要な有効水分量は更に少ないこと。

c. 表層崩壊がはなはだしいこと。砂は粘着力がないために施工直後大雨を受けると吹付けた土壤の下から崩壊する。

これらの欠点の原因は結局土壤構成土粒が粗であることにもとづいている。したがつてこの欠点を補うための基本的な考え方は砂の粗粒子に何らかの細粒子を混入するか接着材によつて粗粒子間の間かくをせばめ接着を密にすることによつて容水量、保水力を高め、それによつて砂の持たぬ粘性を加え表層崩壊を防ぐことである。

この考え方から材料をみると、粘土、ベントナイトなど主として細粒子のもの、ソイラック、C.M.C. (カルボキシ・メチル・セルローズ) など接着性のものがある。

これらの材料の適用条件として次の事項が考えられる。

a. 植物の生長に害のないこと。

b. 施工上の問題としてその懸濁液が砂質土壤によく浸

透すること。

- c. それによつて保水力、容水量が高まること。
- d. 砂に粘着性を持たし、崩壊に耐えられるようになること。
- e. 均質な材料が大量かつ安価に入手しうること。

試用した材料でaに直接的に不適格なものはない。しかしeの理由によつてベントナイトを主力としてb,c,d.に対する適性を調べた。使用したベントナイトは300メッシュのものである。

(註；C.M.C.は製品名セロゲンowを使用。)

3. 水分当量の向上

水分当量は植物生育上有効水分の巾を決定する上に大きい意味を持つ。その値は又土質工學上遠心含水当量として土壤の保水力のパロメーターとしても重要である。砂質土壤の水分当量は3~5%にあるとされ、この値を向上せしめることは重要である。砂質土壤に改良材を混入して遠心分離機によつて水分当量の変化をみた。

表一 各種材料による水分当量の変化

真砂土のみ	6.7	ベントナイト混入	ベントナイト混入
		2.5% 10.0	C.M.C.附加0.5%)
ソイラック混入		5% 12.0	1.25% 15.4
1% 7.0		7.5% 13.5	2.5% 18.4
2% 7.5		10% 22.1	5% 22.0
5% 10.4			10% 33.1
C.M.C.混入	粘土混入(1)		
0.5% 10.3	2% 8.1		
1% 15.3	6% 9.8		
2% 30.0	10% 12.4		

(1) 粘土は羽曳野産10μ以下のもの。

図一4 ベントナイト混合による水分当量の変化
八郎ガタ産砂径粒分布 (重量比)
0.4~0.25mm 54.7%
0.25~0.075mm 44.8%
0.075mm以下 0.5%

まず真砂土 (白川砂、径粒分布0.5~0.2mm 93.3%、0.2mm 以下0.7%)を用い混入材料、割合を変え水分当量をみた (表一)。いずれも測定は混入、飽水直後で混入率は真砂土風乾重比である。

これによると接着性薬剤では C. M. C. の効果が大きい。又一般の粘土よりベントナイトの方がはるかに効果がある。更にベントナイトと C.M.C.の混合による効果はきわめて大きい。

次に実験をベントナイトにしぼり、よりくわしい値を求めた (図一4)。八郎ガタ産砂は真砂土より細粒でベントナイト混入の効果が大きい。八郎ガタ産砂は曲線はS字型をえがく。ベントナイト混合後飽水せしめ一度乾燥し、再び飽水して水分当量をみると混合比1%以上では明らかな効果増大がみとめられる。又ベントナイト混合後に湿潤状態のままでおくとう水分当量の増加がみられた。これはベントナイトの膨潤性にもとづくと考えられる。

4. 浸透抑制作用

ベントナイト混入による最大の効果は水の浸透量を抑制することにある。

ベントナイトがこの効果を持つのはその吸水による膨潤性にもとづく所が大きい。これについていくつかの実験結果を表一2,3, 図一5に示す。表一2,3, はベントナイトの浸透抑制効果、図一5はそれと共に混入したベントナイトの流亡割合をも調べたものである。

図一5 径1cmの底有孔のガラス管に5cmまでベントナイト混入砂を入れ毛管現象で吸水せしめたのち、3ccずつ加水し、2ccの水の浸透速度をみた。これをくり返し、混入されているベントナイトの流亡状況をみた。吸水直後と24時間後で行っている。2%混入24時間後は浸透速度ほとんど0に近く測定不能であつた。砂は八郎ガタ産である。

表-2

ベントナイト 混 合 比	乾 燥 砂 浸透時間 sec	湿 潤 砂 浸透時間 sec
0	27	70
1	40	145
2	58	欠測
3	83	594
4	396	∞
6	∞	∞

径1cmの底に有孔のガラス管に八郎ガタ産砂にベントナイトを各%混入して10g入れ充分詰め、たのち水を3ccずつ入れその内の2ccの浸透速度をみた。

表-3

混 入 材 料	15分	30分	60分	120分
青 粒 土	0.1	0.3	0.5	0.8
シルト	0.3	0.7	1.4	3.2
砂 (コントロール)	3.3	—	—	—
ベントナイト1%混合砂 直後	0.7	1.0	1.3	1.6
24時間後	0	0.1	0.1	0.3
ベントナイト2%混合砂 直後	0	0	0.1	0.2
24時間後	0	0	0	0.1

径0.5cmのガラス管の底に口紙を1.5cmの厚さでつま、ベントナイトの混合比を変えた八郎ガタ産砂につめ毛管現象によつて吸水せしめたのち1ccずつの水を加え、その浸透速度をみた。参考として青粘土及びシルト(0.01mm以下、コロイドなし。)を同じ処理でみた。ベントナイト混合砂については吸水直後と吸水24時間後をみて膨潤によるえいきょうをしらべた。青粘土は深草産17 μ 以下、シルトは羽曳野産。

この結果から判断出来ることは次の通りである。

- ベントナイト混入による浸透抑制作用は非常に大きく、しかも少量(1%)でも顕著な効果がある(表-2)。
- 特にベントナイト混入砂が湿潤となりベントナイトが充分に膨潤しうる時間が与えられるとこの実験法では粘土をもしのぐ効果がみられる(表-3)。
- 混入されたベントナイトの流亡は混合直後では高濃度ほどはげしいが1%区ではきわめて遅い。湿潤後充分な時間が与えられベントナイトが膨潤してしまうと浸透速度そのものが非常に遅くなるので流亡速度もきわめて遅くなる。

5. 毛管現象

毛管現象への効果は図-6の通りである。

- ベントナイト1%混入はシルトに、2%混入は青粘土の曲線に近づく。
- しかし吸水時間が長くなると吸水した部分が膨潤するため毛管現象はきまたげられてくる。
- ベントナイト混入層が20cmまでならベントナイト1%混入で最も毛管現象は良好である。

図-6

図-6 毛管現象

径0.8mmのガラス管による。青粘土、シルト、砂については表-3と同じである。

6. 崩壊防止の効果

今までの効果は直接芝草種子発芽生育上プラスになるものであるが、ここでは間接的な害である施工後の崩壊防止について考えた。施工後の崩壊は大雨によつて砂が水で飽和し土粒子間の接着を失い流れ出すことによる。この防止対策としては水分浸透を抑制し飽水状態になるのを避けることと砂が持たぬ粘性性を加えることである。この実験では水中崩壊試験と直接剪断試験でその効果をみた(表-4,5)その結果を以下にまとめる。

表-4 直接剪断試験結果

処 理	含水率	ϕ	C kg/cm ²
な し (コントロール)	30%	33°	0.24
	20	33	0.46
ベントナイト 3%混入	30	22	0.64
	20	22	0.68
ベントナイト 1%混入	20	29	0.48
	30	28	0.64

ベントナイト混入はいずれも混入吸水後24時間。

表-5

処 理	崩壊所要時間 sec	径2cm、高さ2cm(砂 乾重5g)の円柱型土 柱を作り、充分に吸 水せしめたのち水中 に完全に沈め、それ が崩壊静止するまで の時間をみた。 ベントナイト混合 直後で、砂は八郎ガ タ産である。
なし(コントロール)	2	
ベントナイト混入		
1%	20	
2%	135	
3%	1230	
セロゲン混入		
0.3%	150	
0.15%	435	

a. 水中崩壊試験は無限に水を与えられたときの土粒子間の接着力と共に吸水速度の影響も現れ、現実の崩壊に近い結果が期待出来る。ベントナイト混入量増加にもとづく崩壊所要時間のいちじるしい増加は先の浸透抑制効果に似る。このことから水中崩壊に対して吸水速度の影響が非常に大きいことがわかる。したがってベントナイト混入後十分に膨潤する時間が与えられるなら崩壊所要時間は大巾にふえるだろう。

b. 土の剪断強さは $T = C + \tan \phi$ で示され (C ; 粘着力 ϕ ; 内部摩擦角)、砂にベントナイトその他の粘着物を加えると C が増す (表-4)。 C の値が増すのは有利で、なぜなら吹付法面では垂直応力が非常に少なくそういう条件では C の値が大きいほど剪断強さは大きいからである。

c. 含水率の変動は C に影響する。含水率が20%から30%になると砂のみでは水による粘着性は著しく減じる。ベントナイト混入の場合は20~30%の変動で粘着性の減じ方はずつと少ない。この範囲内での含水分の増加に対してベントナイト混入によつて安定性が高くなる。

d. 直接剪断試験では水が過飽和状態で砂が流れ出す時の場合についてはわからない。しかし容水量いつばいまででは明らかに強くなる。これと水中崩壊テスト、浸透抑制作用の結果などでベントナイト混入が崩壊にかなり効果があるといえる。

7. ベントナイト懸濁液の砂質土壌への浸透。

ベントナイト混入によつて以上にのべた効果がみられるとしても、急斜面の法面にベントナイトをすき込むことが困難であるから懸濁液に砂質土壌に浸透せしめる方法しかない。一般に浸透速度は $S = \frac{k}{\mu} p$ (S ; 浸透速度 k ; 土壌によつて決る常数、 p ; 液に加えられる圧力、 μ ; 液の粘性) によつて与えられる。この S が法面において地表面を流下する速度より大きければむだなく懸濁液は浸透する。この場合 k は大体砂質土壌の粒度によつて決る。 p は溶液を散布するわけであるからほとんど懸濁液の比重によつて定まりみかけ上 μ の中に含まれる。したがって問題になるのは粘度 μ である。即ちベントナイト懸濁液濃度は濃いほど望ましいが斜面の流下速度以上の浸透速度を得られる粘度におさえないと浸透困難である。

ベントナイト懸濁液は粘度を濃度、懸濁液分散後の経過時間によつて変化し、その傾向は高濃度ほどいちじるしい。(図-7)

これらの粘度を持つ各濃度のベントナイト懸濁液が砂質土壌にどのように浸透するかをみた (図-8,9)。

いずれも浸透が深ければ又高濃度のものほど速度は遅くなる。砂が乾燥している場合は粘度のわずかな変化にきわめて敏感に浸透速度に影響する。砂が充分湿潤な場

図-7 ベントナイト水溶液の濃度と粘度。

粘度はストーマー粘度計による。

$$\mu = \frac{T \cdot g}{A}$$

μ ; 粘度、 A ; 器械常数

T ; 一定回転数に要する時間

g ; オモリ重量

で示される。ここでは $g = 118.7g$ を用い100回転するに要する時間で示した。以下の実験での粘度測定も同様である。

合容水量だけの水を与えてある。) 高粘度になるとその差は明らかではなくなる。

実験の範囲内の粘度なら第1回の浸透速度は乾燥砂の方が早い。しかし高濃度であれば又深くまで浸透せしめようとする(第2回の浸透)ときは湿潤である方がはるかに浸透速度は大きくなる。

必要な浸透速度を与えるベントナイト濃度は当然砂質土壌の透水係数、改良すべき深さ、法面の勾配などによつて各現場で決定されるべきものである。しかし常識的に考えて深さ5cm内外まで浸透しうるのは乾燥砂として6%が限度であろう。

砂の容水量を30%とすれば5%のベントナイトで満すと重量比で(砂の容積重を1.2とすれば)1.4%のベントナイトを混入した結果となる。今5%のベントナイト懸濁液を使用するとしてこれに要するベントナイト量は改

ベントナイト水溶液の砂質土壌への浸透性。図-8 砂が乾燥している場合。図-9 砂が十分にぬれている場合。直径1cmの底に有孔のガラス管に八郎ガタ産砂(仮比重1.14)を10g入れ、十分に詰めたのちベントナイト水溶液の各濃度のものを1ccずつ入れその浸透速度をみた。1ccで約3.2cmの深さまで浸透する。図中カッコ内数字は粘度を示す。(sec/100n)

良土壌深さが単位当り次のようになる。

$$1 \times 0.3 \times 0.05 \div 0.5 = 0.03 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{d(cm)} \\ = 0.3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d(cm)}$$

↓ ↓ ↓ ↓ ↓
改の 改の ペン ベン 仮
良深 良容 ン濁 ン比
土さ 土水 ト液 ト重
壤 壤率 ナ濃 ナイ
ト ト

おわりに

以上砂質土壌の土質改良について主としてベントナイトについての実験結果をまとめた。ベントナイトが有力な改良剤であることはたしかであるが、その粘性の高さが大きな欠点である。したがって浸透速度はどうしてもかぎり、主として盛土面の比較的緩傾斜地に使用すべきであろう。切土面の急斜面については今後更に実験を進める必要がある。(濃コロイド溶液の発芽障害につい

ては改めて報告する)

要 約

1. 芝草発芽期の生長には土壤水分張力が pF 2.7~3.3 になるよう土壤含水を保つ必要がある。
2. ベントナイトによる砂質土壌改良の効果として次のことが明らかになった。
 - a. 水分当量の向上。
 - b. 浸透抑制作用がいちじるしい。
 - c. 毛管現象がよくなる。
 - d. 砂に粘着力を与え崩壊防止に役立つ。
3. ベントナイト懸濁液が砂質土壌へ浸透しうるには深さ 5cm として 6% が限度である。

(77頁につづく)

くめたものが即ち美しさとして感じとられた。自然風景の中におけると同じようなとりあつかいを受けた花ではあつたが、庭中の花には絵画的要素とか構成的要素というものが巧みにとらえられた。つまり花一般ではなく、選択と批判とを経た花がとらえられるように変つてきた。

2) 常緑樹と造園空間の構造化

造園計画的立場から見れば、常緑植物は主として背景としての機能的力をもつていたものであるが、松とか橘はそれに価値としての支配力にも強い影響を及ぼしていたことがうかがい知られるのである。

3) 動物と造園空間の構造化

庭内或は苑内の動物は紀に記された放獣放禽のことが次第に花鳥月的な位置を占めるように変つてきた。

4) 建物を中心した造園空間の構造化

建物の構造一般に関しては二つの相対立する好みがある。一つは左大臣長尾王の佐保宅、一つは大陸から入つた技術による寺院堂塔に丹塗られた新しさにあふれるものである。建物の形に対しては極めて強い視覚的要求をもつた反面、仮簷の歌例に見られるようにそこに営まれ、そこに流れる力動的な関係に関心をひきつけられた。それは後世の所謂栄枯盛衰の無常感とまではいかないにしても、自然物としての人間およびその造園空間を感じ出していたことを物語っている。造園計画における時間次元の分化の増大への認識はこうした経験をへて形成されつゝあつたのである。

5) 門垣とその造園計画的な位置

門や垣に対する造園計画的な力は次第に増大しつゝあつたことが認められる。ただし、竹垣、葦垣、小金門など形や構造を示す歌例は少ない。

6) 池島を中心した造園空間の構造化

山齊にめぐらす池、農業に理由をもつ池などに取材する歌の多いのはそこに構造化された造園空間の諸々の特

徴を物語っている。造園計画的力を左右する価値としては、恵ら物語の要素が重んじられていた。庭内の池についても時代を降るに従つて歌例が増す。少なくとも高度の公家生活に関する限り、単なる価値支配力としてではなく最早十分に池島は造園計画的力としての作用をもち得るような変化のあとがうかがわれる。

7) 苑中の石を中心した造園空間の構造化

庭石についての歌例は少ない。それが造園計画上価値とか支配力としてその立場を得るまでには、まだ時間と経験と生活の仕方と社会的雰囲気などが変化する必要があつたように思われる。

8) 水流を中心した造園空間の構造化

庭に池を求める要求が急に増大したのにくらべると、流れのことはやゝ軽い比重を示したのではないかと考えられる。

9) 造園空間の構造化における人間生活水準の分化の増大

庭は特殊な場合を除いては、日常の使用機能以外では文芸と最も深いつながりがあつた。自然水準に近い造園空間の構造化における分化の増大は種々の相に見られたが、季節感とか時の流れに対する感情は造園計画的にその時間次元の分化の度において、或は時間的展望において深い意義をもつていた。これが生活の文化的側面に大きな影響力をもつて、いろいろな花鳥風月の景物的な営みを人間生活の中につかみとつたのであつた。その造園空間の構造化における特徴は、自然一人間生活の次元について見れば、その分化が人間生活水準において著しくなつてきたという点にある。これが庭的空間と建物内の生活との物理的および心理的距離を短縮させる。公家生活的要素の次第に変化してきたことから芽生えつゝある「機能的力」の特殊性は、その後の発達の基盤なのである。

(83頁よりつづく)

(107頁よりつづく)

Summary

1. The moisture tension of soil must be kept between pF 2.7 and 3.3 in order to obtain the best germinating results.
2. Effects of soil conditioning by bentonite for sandy soil are as follow : a. Elevation of moisture equivalent, b. Control of seepage water, c. Improvement of capillarity, d. prevention against rupture on the face of slopes.
3. The concentration of bentonite suspension must be kept within 6% in order to penetrate 5cm into the sandy soil.

参考文献

1. Borthwick, H. A., S. B. Hendricks, M. W. Parker, E. H. Toole, and V. K. Toole, Proc. Natl. Sci. U. S., 38, 662-666, 1952.
2. Borthwick, H. A., S. B. Hendricks, E. H. Toole, and V. K. Toole, Botan. Gaz., 115, 205-25, 1954.
3. 石川茂雄, 植維, 65, 771-772, 1952.
4. 兼松満造, 牧草の栽培, 東京, 71-72, 1957.
5. 北村文雄・小沢知雄, 造維, 24(1), 1-4, 1960.
6. 国見純夫・水沢政雄, 造維, 24(2), 1960.
7. 丹羽鼎三, 日本の芝と芝生, 東京, 119-122, 1958.