

31. 中国における防風防砂工法の特性と新防止工法の提案

A Brief Examination of Prevention Works for Sand and Dust Storm in the Mainland China and Proposition of a New Prevention Work

竹澤 三雄*・張 哲**・堀田 新太郎***

Mituo TAKEZAWA*・Zhe ZHANG**・Shintaro HOTTA***

ABSTRACT : Prevention works for sand storm and dust storm commonly employed in the mainland China are briefly examined focusing on the function of controlling the moving sediments. Then, a new work controlling the moving sediments which is composed of several sloped artificial embankment is proposed. Artificial embankments will be placed with a certain angle to the prevailing wind direction. A suitable combination of a foreslope angle of embankment and an angle of embankment to be placed to the prevailing wind direction can pass the moving sediments through the downwind side.

KEYWORDS : sand storm, dust storm, wind erosion, new prevention work, China

1. はじめに

中国における人口爆発は膨大な食糧増産を要求し、食糧増産のための耕地開作による森林破壊へ、既耕地においては過耕作による土壌劣化をきたし、いわゆる地球環境問題としての砂漠化が広大な面積において発生している。砂漠化の進行に伴い砂嵐 (Sand Storm) や砂塵嵐 (Dust Storm) が多発している。

砂嵐とは風によって移動している土砂粒子の大部分は粒径が比較的大きく、転動・匍匐 (Surface Creep) あるいは跳躍 (Saltation) と呼ばれている運動形式で移動しており、風が止むと土砂の移動も直ちに停止する現象である。砂塵嵐とは風によって移動している土砂のなかで、比較的小さい粒径の土粒子がかなりの量を占め、浮遊 (Suspension) と呼ばれている運動形式で移動している土粒子が、風が止んでも土粒子は空中にとどまり、大気の流れに乗って長距離間を移動する現象である。春先に話題になる黄砂がその例である。砂塵嵐は発生地あるいは隣接する地域で太陽光を遮り生態系に悪影響を及ぼしたり、人や動物の呼吸器系に侵入し健康上の問題を生じたりする環境破壊を惹き起こす。環境問題としての観点から砂嵐、砂塵嵐の抑制は必要であり、砂嵐や砂塵嵐から防御を必要とする地物、地区も多い。防御を必要とする地物、地区は鉄道、道路、畑作地、森林、居住区などである。砂嵐、砂塵嵐の発生を抑止し、砂嵐から地物、地区を防御するために現在中国で使用されている防風工、防砂工の種類は多い。

本稿の目的は現在中国で使用されている防風工防砂工の特性を勘案し、現在使用されている防風防砂工を補う工法として、「砂漠化防止工あるいは緑化補助工は現地で取得出来る資材を用いて、現地の人々が管理維持できる防止工であるべきである」、との考えに拠って、現地の岩塊を用いた広い減風域の創出と効果的な土砂流の方向転換ができる防風防砂工法「人工傾斜堤群工法」を提案することにある。

* 日本大学理工学部, The College of Science and Technology, Nihon University

** 日本大学大学院理工学研究科, Graduate School of Science and Technology, Nihon University

*** 日本大学国際関係学部, The College of International Relations, Nihon University

2. 中国の防風防砂工

真木（1996）は中国科学院蘭州砂漠研究所（1979）、および河野（1988）その他の文献から、中国で砂漠化防止・緑化のために使用されている防風防砂工を以下のように纏め、分類している。

生物・生態的防砂法（植物被覆防砂法、植栽による砂防法）

- ①草生法（封砂育草、草で覆って砂を封じる植生被覆法）
- ②灌木・草生固砂法（砂丘表面の草本・灌木による固砂法）
- ③砂丘間防砂林帯（丘間片林、砂丘間低地の植栽林）
- ④基幹防砂林帯（幹線防風・防砂・固砂林）
- ⑤耕地防風林帯（耕地防護林網）

物理的防砂法（工学的被覆防砂法）

- ⑥高防砂垣・壁（高立式防砂壁・砂障）
- ⑦防砂堤防（人工砂丘）
- ⑧低砂防垣・壁（半隠蔽式・隠蔽式砂壁・砂障）
- ⑨石礫粘土被覆法（石・礫・土による砂丘の被覆法）

化学的防砂法（化学式被覆防砂法）

- ⑩化学的固化剤の吹付け（地表面凝固法）
- ⑪流砂改良化学薬剤の混用（地表面改良法）

その他の防砂法

- ⑫灌漑・沈砂法（洪水灌漑）
- ⑬飛砂捕捉水路・溝防砂法

この分類は理化学的観点に、使用される場所、使用される材料、構造物の形状をも考慮して分類しているので、工法の機能、構造物の特性をあいまいにしているきらいがある。①は背たけの低い草、②は灌木を植栽し、地表面の風の抵抗力の増強を目的とする工法である。③、④、⑤は防風林の育成である。造林する場所が相違するだけである。⑥、⑦、⑧は人工砂丘、土塁、柵、垣、フェンス、壁などの人工構造物のことで、その高さが⑥高、⑦中位、⑧低の差違を示すものである。⑨は地表面の被覆、⑩、⑪地表面の抵抗力を増強して表土の移動を阻止しようとする工法である。⑫は人工的に沼、湖など広い水面に砂塵を⑬は水路、空堀に砂塵を取り込む工法である。①、②、⑨、⑩、⑪は土砂移動の発生を抑止する。③、④、⑤、⑥、⑦、⑧、⑫、⑬は減風による土砂移動発生を抑止および移動している土砂を捕捉、静止化する機能を持っている。

3. 使用例

3. 1 典型的な道路・鉄道工法例（参考文献）

大砂漠地帯を縦横断する道路・鉄道はない。もっとも問題になるのは半砂漠地帯の鉄道・道路である。図-1は典型的な半砂漠化地区の鉄道・道路防護システム、沙坡頭の鉄道防護の例である。

（ ）は防護施設の名称、○は真木（1996）の分類を示す。

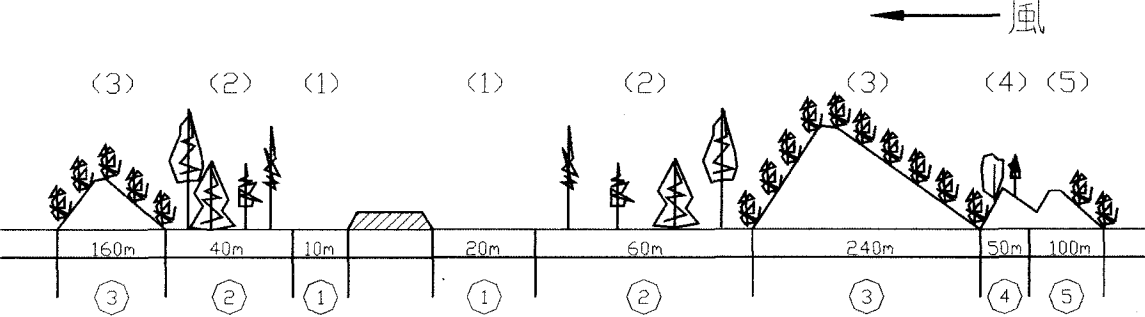
- (1) 固砂防火層：路盤の風上側に幅20m、風下側には幅10m設置する。固砂防火ため、草を除去して、地表面に10～15cmの厚さで石と黄土を敷設する。（分類⑨に相当）
- (2) 灌漑造林層：固砂防火層の風上側斜面では60m、風下側斜面では40m範囲で梯田と灌漑渠を造る。水は近くの河川から固砂防火層の外側に導水する。（分類②に相当）
- (3) 草障害植物層：灌漑造林層の外側に造られている。風上では240m程度に、風下では160m程

度にする。流砂前面に1 m x 1 mの半隠蔽式の麦草方格を設置する。2行を一層にして、行間距離は1 m x 1 mにする。生物措置と工程措置は等しく重要なのである。本保護層は防護システムの核心部分である。(分類①に相当)

(4) 前線砂阻止層：草障害植物層の周辺部の安全を護るために地上高度1mで、地下埋め30cmの枝を使って砂丘の上部あるいは高い位置に設置して、砂積みと風砂を阻止する役割をさせる。(分類⑧に相当)

(5) 封砂育草層：砂阻止層の風向きの100m範囲以内で封砂し、障害物を設置して灌木を植える。管理のための専門機構を設置して、人為破壊を禁じている。(分類①に相当)

何処にでもこの例のように5つの防護層全部が造られているわけではない。各地区の条件が違いため防護層のいくつかは適宜は省かれているが、草障害植物層は必要不可欠の核心部分で必ず構築されている。



図－1 沙坡頭鉄道防護施設の模式図

3. 2 典型的な集落・オアシス防御工法例

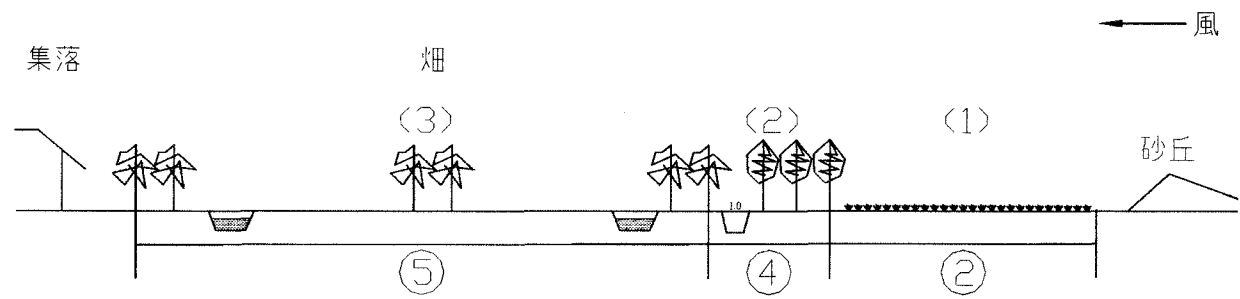
図－2は新疆省の典型的な集落・オアシス防護システムの例である。

オアシス防護システムは(1) オアシス圏外の草固砂帯、(2) オアシス周辺の防砂林帯、(3) オアシス内部の畑防護林ネット、など三つの部分で構成されている。

(1) 固砂帯：草固砂帯はオアシス周囲の砂を固定するために作られている。方法として自然成長と人工植栽がある。その幅は広ければ広いほど効果を得られるが、少なくとも200mは確保するようにしている。(分類②に相当)

(2) 防砂林帯：草固砂帯と耕地の間に作られている。防砂林帯は水資源の制限を受けるため、幅は20m程度にする。(分類④に相当)

(3) 畑防護林ネット：耕地防護林は防風と土壌の風食を防ぐためにつくられる。主風方向に垂直する主林帯と主林帯に垂直する副林帯で耕地防護林ネットをつくる。主林帯間の距離は200～300m、副林帯間の距離は500～600mにする。防護林は基本的に2～3行になっている。(分類⑤に相当)



図－2 集落・オアシス防護施設例

4. 人工傾斜堤群工法の提案

真木(1996)は最適な砂漠化防止対策は植生によって地表面を被覆することとしている。植栽による地表面の被覆が砂漠化防止の最適工法としても、植栽による地表面の被覆には長い時間を必要とし、かつ困難を伴う。直ちに防風防砂の効果があり、植栽による地表面の被覆の完成を補助促進する工法が物理的防砂法、工学的被覆防砂法の、⑥高防砂垣・壁(高立式防砂壁・砂障)、⑦防砂堤防(人工砂丘)である。垣、人工砂丘は風向きに直角に配置するのが効果的であるので、通常は風向きに直角に配置する。しかし、防御を必要とする地区、地物の沿って配置する場合もある。中国の砂漠化が進行している乾燥地あるいは半乾燥地は広く、防砂防風構造物の配置において、構造物の占める面積の広さ、配置の空間的広がり配慮する必要性は低い。従って防風防砂構造物の配置に面積的な十分な広がりを利用できるなら、次のような工法の利用が考えられる。

もし、傾斜堤が土砂流に直角に設置されているならば(図3(a))、土砂流が堤体に衝突したとき、土砂は堤体風上側に形成されている減風域に堆積する。しかし、堤体風上側の減風域に土砂がある程度堆積した後は強風時に土砂の一部は堤体を越えて背後に侵入する。しかし、図3(b)に示すように、堤体が土砂流の方向にある角度を取って位置している場合に、堤体に衝突した土砂流が堤体斜面上で、その流れの方向を転じて、堤体斜面上を堤体に沿って流れるようにできれば、土砂は堤体を越えて背後に侵入しないことになる。従って、図3(c)に示すように堤体群の風下に位置する堤体配置の角度を次第に大きくし、土砂流が風下に流れ易い状況にすれば、この堤体群の背後に減風された土砂の侵入のない領域が形成される。傾斜堤群背後の緑化を容易にしたり、あるいは集落・畑の埋没を防ぐことができることになる。つまり、主風に対する堤体配置の角度と堤体の斜面勾配との組み合わせを適切にすれば堤体斜面上を流すことができることになる。

人工傾斜堤は現地の地山、あるいは地下の岩石をダイナマイトで破碎して、岩石塊を造り、岩石塊を積み上げて傾斜堤を造る。傾斜面には凹凸と空隙が残るが、何回の砂嵐を経ると飛来する土砂によって充填され、傾斜面はためらかになると考えられる。

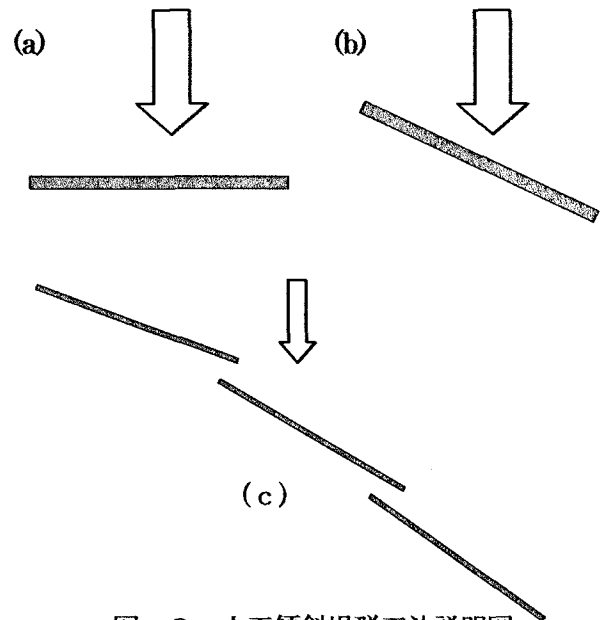


図-3 人工傾斜堤群工法説明図

5. 主風に対する堤体の配置角度と堤体斜面勾配の組合せ

5. 1 堤体斜面上における風の振舞い

座標を図-4に示すように x 軸を堤体に直行方向、 y 軸を堤脚に沿う方向、 z 軸を鉛直上向きに取る。堤体風上側斜面の傾斜角は α とする。風は z 軸方向一様($V_z = \text{constant}$)、 x 軸に β ($0 < \beta < 90^\circ$)の角度をもって吹き当たり y 軸方向には変化がないものとする。便宜上、風上側斜面点 P にて風速ベクトル V を考える。図-5(a)のように P を通る x - y 平面上で V を x 軸、 y 軸成分に分けると式(1)、(2)を得る。

$$V_x = V \cos \beta \quad (1)$$

$$V_y = V \sin \beta \quad (2)$$

ここに、 V_y は P 点において斜面上水平に沿う成分であり、 V_x は水平に P 点に作用する成分である。

次に P 点を通る x - z 平面を考え、面に平行な成分と直角方向への成分に分けると(図-5(b))、式(3)、(4)を得る。

$$V_s = V_x \cos \alpha = V \cos \beta \cos \alpha \quad (3)$$

$$V_y = V_x \sin \alpha = V \cos \beta \sin \alpha \quad (4)$$

つまり、風速ベクトル V は V_y 、 V_s 、 V_v の3成分に分解されたことになる。

斜面に沿う風 V_θ は V_s と V_v とが合成された方向 θ に進むことになる (図-6)。人工砂丘に直角な方向と V_θ の成す角 θ について式(5)を得る。

$$\tan \theta = \frac{V_y}{V_s} = \frac{V \sin \beta}{V \cos \beta \cos \alpha} = \frac{\tan \beta}{\cos \alpha} \quad (5)$$

$\cos \alpha < 1$ であることから $\theta > \beta$ である。式(5)から、風は斜面に沿って風下方向に角度を大きくする (屈折することになる)。

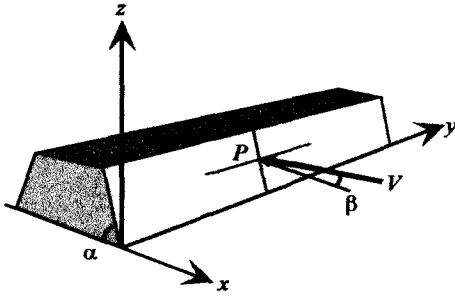


図-4 座標系

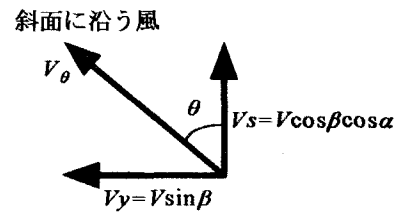
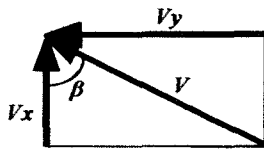
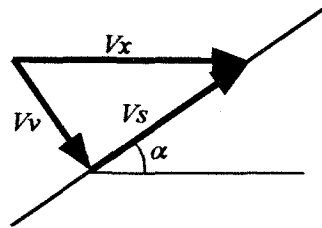


図-6 斜面における速度成分の合成



(a) $x-y$ における分解



(b) $x-z$ 平面における分解

図-5 速度成分の分解

5. 2 斜面上を移動する砂粒子に作用する力

堤体風上側斜面上で「転動・匍匐」あるいは「跳躍」形式で移動している砂粒子に作用する力を考える (図-7)。

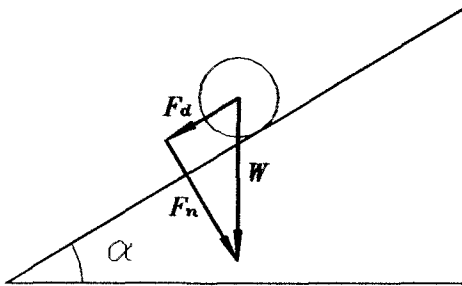


図-7 斜面上の砂粒子自重の分解

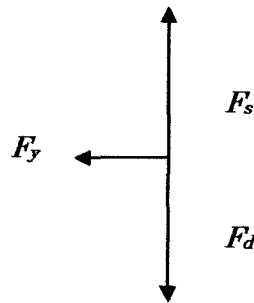


図-8 斜面上の砂粒子に作用する力の釣合

砂粒子は重力による鉛直方向に W なる力が作用している。 W を斜面に平行な力 F_d と斜面に直角な方向 F_n に分解する。

$$F_d = W \sin \alpha \quad (6)$$

$$F_n = W \cos \alpha \quad (7)$$

風が砂粒子に作用する力は、風の 3 成分によって斜面の Y 軸に平行な成分 V_y による力 F_y 、斜面に沿う上向きの成分 V_s による力 F_s 、斜面に直角な成分 V_n による力 F_n となる。

次に斜面に平行な面における力の釣合を考える (図-8)

風は十分に強く砂粒子は跳躍、あるいは転動、匍匐によって運動の状態にあると仮定する。

$$F_s = F_d \quad (8)$$

$$F_y > 0 \quad (9)$$

の条件を満たせば砂粒子は斜面に沿って風下側に移動する事になる。 $F_y > 0$ であるから (8) 式のみを考えればよい。

風が砂粒子に作用する力は次式で与えられると仮定する。

$$F = C_d \cdot \frac{\rho_a}{2} \cdot V^2 \cdot \frac{\pi}{4} d^2$$

ここに C_d は抗力係数、 ρ_a は空気の密度、 d は砂粒子の直径である。

$$F_s = C_d \cdot \frac{\rho_a}{2} \cdot V_s^2 \cos^2 \beta \cos^2 \alpha = C_d \frac{\rho_a}{2} \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot V^2 \cos^2 \beta \cos^2 \alpha \quad (10)$$

$$W = \rho_s \frac{\pi}{6} d^3 \cdot g$$

$$F_d = W \sin \alpha = \rho_s \frac{\pi}{6} d^3 \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (11)$$

式 (8) から

$$C_d \frac{\rho_s}{2} \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot V^2 \cos^2 \beta \cos^2 \alpha = \rho_s \frac{\pi}{6} d^3 \cdot g \cdot \sin \alpha$$

$$\frac{3}{4} \cdot C_d \cdot \frac{\rho_a}{\rho_s} \frac{V^2}{gd} \cos^2 \beta = \frac{\tan \alpha}{\cos \alpha} \quad (12)$$

C_d はレイノルズ数によって定まる実験係数でレイノルズ数が 10^3 以上になると $0.4 \sim 0.1$ 程度の値になる。粒径 d が分かれば C_d の値は定まる。結局、代表径 d および代表的な砂嵐時の風速が与えられれば、 α と β の組合せが計算することができる。

謝辞

本研究は平成 13 年度日本大学学術助成金、国際総合研究 01-003 「国土侵食防止についての研究」によるものである。記して著者らは関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 漆建忠 (1998) : 中国飛播治沙, 科学出版社, 北京市, 216p.
 王周京 (2001) : 草炭緑化荒漠化的实践与机理, 科学出版社, 北京市, 167p.
 景愛 (1996) : 中国北方沙漠化的原因与对策, 山東科学技術出版社, 山東省済南市, 183p.
 孫保平 (2000) : 荒漠化防治工程学, 中国林業出版社, 北京市, pp. 100-104.
 吳正 (1995) : 中国的沙漠, 商務印書館出版, 河北省三河市, 105p.
 申元村 (2000) : 荒漠化, 中国環境科学出版社, 北京市, pp. 111-114.
 朱士光 (1999) : 黄土高原地区環境変遷及其治理, 黄河水利出版社, 河南省郑州市, 312p.
 真木太一 (1996) : 中国の砂漠化・緑化と食料危機, 信山社, 日本, pp. 149-153.