

論文

ハニカム・スパイクによるのり面保護
に関する実験的研究

奥村 武信*
西園 勝憲**
田中 一夫*
滝口 善樹***
谷口 真吾****
永田 章*****

Some Experiments on the Effectiveness of Honeycomb Structured
Unwoven Fabrics as a Slope Protection Measure

Takenobu OKUMURA*
Katsunori NISHIZONO**
Kazuo TANAKA*
Yoshiki TAKIGUCHI***
Shingo TANIGUCHI****
Akira NAGATA*****

Summary

The effectiveness of honeycomb-structured unwoven fabric for slope protection (Fig. 1) is examined through experiments on small model slopes.

-
- * 鳥取大学農学部 農林総合科学科 生存環境科学講座
Dep. of Environmental Sci., Fac. of Agri-culture, Tottori University.
 - ** 鳥取大学農学研究科 林学専攻 (現在西日本新聞社)
Graduate Student at Dept. of Forestry, Newsman of the NishiNippon Shinbun at present.
 - *** 鳥取大学林学科 (現在日本植生株式会社)
Student at Dept. of Forestry, Conservation Engineer in Nihon Vegetation Corp. at present.
 - **** 鳥取大学林学科 (現在兵庫県林業試験場)
Student at Dept. of Forestry, Forestry Researcher of Hyogo Pref. Institute at present.
 - ***** 鳥取大学林学科 (現在兵庫県庁技師)
Student at Dept. of Forestry, Forest Managing Officer of Hyogo Pref. at present.

(1) On the fabric installed slope, the surface runoff was retarded. This influence of the fabric is due more to promotion of infiltration than to seepage through the fabric itself.

(2) The decrease in surface runoff resulted in the falling of tractive force, followed by a decline in erosion rate. By analyzing the data with the rainfall intensity index, it was determined that soil loss depletion by fabric installation was far beyond the decrease in surface runoff. A detailed measurement of the slope configuration confirmed that this is because soil particles are restrained by lateral members.

(3) Lateral members were also obstacles for headward elongation of rills and/or gullies, which were shallower than the depth of the fabric installed. However, the fabric likely concentrates the surface flow along the longitudinal members, causing the gully erosion.

(4) This trouble can be overcome provided that the fabric favors the grasses or brushes seeded contemporaneously with the fabric installation. Detailed examination on the seeded slope confirmed that the fabric is very helpful for settling vegetation.

I はじめに

国土の大半が山地帯で平野も狭く複雑な地形となっているわが国では、生活・生産活動空間拡充のための山地への進入は不可欠である。高速道路網は山間を貫き、都市に集中する人間の生活のために山を削り宅地を造成する。また農林業を発展させるためにも今や農道・林道の基盤整備が先行しなければならず、農地は山へ追いつけられている。このように、人間は人工的に創出された斜面すなわち“のり面”との関わりを益々強めていくのが現状である。

そして、のり面の保護を十分に施さなければ豪雨のある度に侵食や破壊の危険におびえていなければならない。地肌を露出した醜い景観を甘受しなければならない。災害予防・景観対策を要する部分が非常な速度で増加していく現状で、安全性を重視しつつも如何に経済的にこの問題に対処していくかが緊急の課題であろう。

本研究の対象とした「ハニカム・スパイク」は、1978年にフランスにおいて最初に考案され、1982年8月にアメリカ合衆国ラスベガスで開催された第2回ジオテキスタイル（土木用織布、不織布）国際会議において発表された不織布繊維製品である。

繊維布が土木工法に利用された歴史は古く、日本では1959年に伊勢湾台風により破壊された鍋田干拓締切堤の復旧において、沈床に用いる粗朶の緊急入手が困難であったためにビニロン織布を使用した実績をもつ。土木資材としての繊維布の研究は主としてアメリカにおいて進展し、最近15年間に種々の合成材料の使用が可能となり、その有用性が認識されるようになってきた。とくに1976年に2次元メンブレン不織布が製造されてからは、アメリカ合衆国やヨーロッパにおいて合成繊維製品の土木資材としての利用と研究が隆盛し、強靱で耐久性の高い合成繊維を永久土木構造物建設に導入する研究が進められている。¹²⁾

本研究に供した「ハニカム・スパイク」は、ポリエステル繊維素材の不織布（厚さ2mm）を図1のように一辺20cm、深さ10cmのセルからなる蜂の巣構造に接着・縫合した土木用繊維資材で、リル、

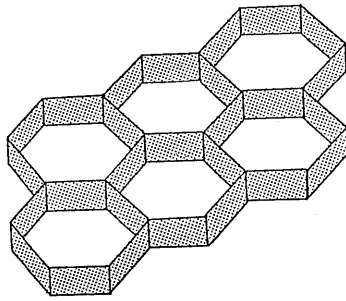


図1 ハニカム・スパイク

ガリ侵食防止といったのり面保護を目的とする資材として開発・製品化されたものであるが、これまでその機能・効果については十分解明されていない。

のり面保護工としてのハニカム・スパイクには、つぎの効果が期待される。

- ① 素材が有する高い透水性が表流水を緩和し、流水の侵食力を減退させる。
- ② のり面の亀甲模様の横断物がのり面の耐食性を高め、土砂流出を抑止する。
- ③ ハニカム形状の埋設物により表層土を補剛し、その匍行・崩壊を抑止する。
- ④ のり面上の横断物の存在が、播種された種子の流出を阻止し、植生の成長を促進する。

本研究は、これらの機能・効果を実験的に明らかにしたものである。すなわち、IIでは、①～③の効果を解明するために行った試験施工のり面における観測・調査および人工降雨下での実験について述べる。①の効果を確認し、その効果はガリ発生状態下でも変わらないことを認めた。

②、③の効果も確認できたが、ハニカム・スパイク沿いに集中する流水が局所洗掘を惹起する現象が見られ、この集中水の侵食力を阻止する方策を考慮しなければならないことが判った。また施工のり面での観測によると、のり面を草生にすることが表面侵食による土砂流出を抑止するのに大きな効果を有しており、その場合倒伏する草葉による降雨遮断の効果は偉大であることが明らかとなった。この働きをハニカム・スパイクには期待できない。そこで、ハニカム・スパイク施工の際に播種も同時に行うことで、敷設されたハニカム・スパイクが撒播種子の流出を防止し生育を促進し、成立した植生根系が不織布周りに集中する表流水の侵食力を減殺する相乗効果に期待する必要があると考えた。

IIIでは、ハニカム・スパイクがのり面に撒播された種子の流出を防止し、定着した植生の成長を促進させる上記の④の効果を明らかにするための実験について述べ、ハニカム・スパイク敷設の種子流出に対する影響と植生の生育に対する効果について考察する。

II のり面侵食防止工としてのハニカム・スパイクの機能に関する研究

ハニカム・スパイクに期待されるのり面侵食防止効果を実際の斜面において検証することを目的とした試験施工のり面での観測調査^{3,7,8)}と、ハニカム・スパイクを構成する素材である不織布の存在とその排列形式が斜面上での水・土砂移動に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした不織布ストリップを使用した実験^{5,6)}、およびガリ侵食発生段階ののり面におけるハニカム・スパイクによる耐食性強化の効果を解明するための実験⁹⁾を行った。

1. 観測・調査および実験の概要

(1) 試験施工のり面⁹⁾

試験施工のり面での観測調査は、1986、1987年の2年間実施した。1986年5月中旬に、表1に示すような4つの地表状態の試験のり面を、岡山県真庭郡川上村に位置する鳥取大学附属蒜山演習林内に設定した。地域の地質は大山火山からの噴山物堆積層から構成されており、この斜面は10年以上前から春先の幹線林道路面整理の際に出る排土が繰り返し捨てられている場所である。

表1 試験のり面の地表状態と草生区当り播種量

のり面番号	地 表 状 態	草 の 種 類 と 播 種 量
No.1	ハニカム・スパイク敷設	ケンタッキー・31・フェスク50g,
No.2	ハニカム・スパイク敷設+草生	ホワイ・クロバー25g, ウィーピン
No.3	草 生	グ・ラブ・グラス25g, オーチャード・
No.4	裸 地	グラス25g, メドハギ100g, エニシダ 100g, イタチハギ50g

試験のり面は幅約2m、のり面長5mであり、勾配は35°~36° (=1/1.4)とした。ハニカム・スパイクの最上辺は各セルごとに、側辺は2~3セルごとに木杭で保持し、セル内には斜面付近の土砂の20mmフルイ通過分を10cm厚で充填した。充填土の仮比重およびJIS A1218-1977に準じて求めた透水係数は、それぞれ1.08g/cm³, 3.38×10⁻³cm/secであった。商品パンフレットによる供試ハニカム・スパイクの透水係数は、2.7×10⁻¹cm/secである。ハニカム・スパイクを敷設しないのり面表層も、厚さ10cmは同様の状態になるように展圧した。草生のり面 (No.2 Plot, No.3 Plot) に播種した草の種類とその量は表1に示す通りで、イタチハギは1987年春期に追い蒔きしたものであり、他はのり面作設時と9月下旬の2回、表に示された量を播種した。1987年ののり面状況を写真1に示す。

試験のり面からの表面流出水及び流下土砂量の計測は、次の方法によった。のり面を流下してくる水と土砂は幅150mm、深さ50mmの鋼製チャンネルに集め、チャンネルを溢出する流下物のあることを考慮して幅55cm、深さ50cm、長さ208cmの鉄筋コンクリート・フリュームでback upした。防虫網で土砂をろ過した水量は500cc計転倒枡で計量し、その転倒回数は転倒マス型雨量計の転倒数とともに6ペン式電接计数器に記録した。チャンネルに落ちた土砂の採取、フリュームに落ちた土砂や水の計量は、できるだけ一雨毎に行うように努めた。

(2) 不織布ストリップを使用したモデル実験

ハニカム・スパイクを構成する素材である不織布の存在とその排列形式が水・土砂移動に及ぼす影響を明らかにするための実験⁵⁾は、厚さ1.4mmの東レ・マントルD515を5cm幅のストリップにしたものを図2の左上に示す断面をもつ長さ100cmの小さなモデルのり面に排列し、降雨面積2m×1mの雨滴発生装置 (大起理化工業KK製) の下に置いて行った。

不織布のもつ流水伝達能力を個別に明らかにするためモルタルを充填材とした実験と土層実験を行った。

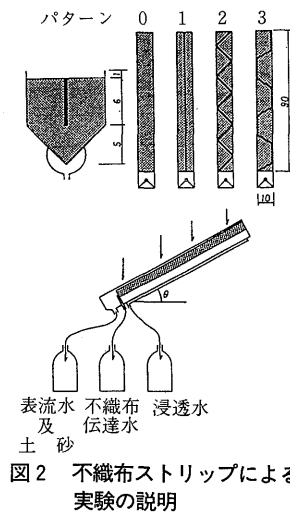


図2 不織布ストリップによる実験の説明

不織布の排列パターンは図2に示す3種類とした。パターン1は最大傾斜に平行な排列であり、パターン2は一辺約14cmの格子を斜切した形とし、パターン3はハニカム・スパイクを半切した形に模した。土層実験の場合は、この3つの排列の外に不織布を入れないのり面を作りこれをパターン0とした。

不織布天端は、土層実験の場合は土層面と同一としたが、モルタル層の場合はモルタル面から1cm出すことによって不織布が表面流を捉え易くした。のり面にハニカム・スパイクを敷設した場合、降雨にさらされると土層が締めり、この程度は自然と露出するので不自然な設定とは考えない。

土層実験の場合、土は試験施工のり面と同じ仮比重、硬度となるよう、山中式土壌硬度計でチェックしながら充填した。

表流水と不織布を伝わってのり尻に到達する水（以後これを「不織布伝達水」と呼ぶ）は、モルタル層を使った実験の場合それぞれ転倒桁型雨量計で測定し自記記録した。土層実験の場合、表流水及び流出土砂は図2の下に示すようにのり面下端のピットに集め、不織布伝達水はビニールチューブで外部に取り出し、土層底に達した浸透水は底に等間隔にあけた孔から副トイに落として下端で集め、10分毎に計量した。また、設定雨量強度が実験中維持されていることは、0.5mm計転倒桁型雨量計でモニターした。

実験の状況を写真2に示す。

(3) ガリ侵食段階でのハニカム・スパイクの効果に関する実験

ガリ侵食発生段階でのり面におけるハニカム・スパイクの影響・効果を明らかにする実験の概要は、次のとおりである。⁹⁾

のり面土層は、底部約5cmに破碎コンクリートを敷き詰め、のり先部壁面に浸透水排出のための穴を多数打ち抜いた。内寸が長さ180cm×幅90cm×深さ45cmの鋼製枠に、2.5mmフルイを通過した比重2.6のマサ土を、一層の厚さ10cmで最適含水比17%、土壌硬度指数約15mmになるよう4層に分けて充填して作製した。ハニカム・スパイク敷設は最上層土層の充填時に行い、各セル内の土層が他ののり面と同様の硬度になるよう締め固め度を山中式土壌硬度計でこまめにチェックしながら中詰め土を充填した。

このように調整された土層を、前記の雨滴発生装置の下に35°の勾配で置き、40mm/hrの降雨に3時間さらした。のり面から流下する表流水と土砂は、のり先に取設したトイに受け、ビニールチューブでタンクに集め10分毎に秤量し、水分を蒸発させて土砂量を計量した。降雨中の侵食状況はビデオカメラでテープに収録し、降雨停止後にのり面の侵食形状を計測した。

2. 水の挙動に対する不織布及びハニカム・スパイクの影響

ハニカム・スパイクがのり面侵食防止に効果を有するための第一の根拠は、ハニカム・スパイク

がのり面上の表流水を緩和することである。この面での影響・効果を考察する。

(1) 表流水量の緩和

ハニカム・スパイクの表流水量緩和効果について、試験施工のり面における観測結果を考察する。

1986年には1～7降雨を含む3日～16日の17期間⁶⁾の、また1987年には1～7降雨を含む2日～18日の25期間⁷⁾の流出土砂及び表面流量に関するデータを得た。しかし、1986年には草生状態も芳しくなく観測に種々のトラブルがあったためうまく整理がつかないので、1987年の観測結果を考察する。

1987年の25観測期間における雨量及び各のり面からの表流水量に関するデータを整理したものが、表2である。4時間以上の無降雨時間をはさむ降雨は別個の雨とし、ひと雨雨量が5mm以下で最大時間雨量が1mm以下の降雨は除外した。

さて、斜面侵食量を支配する降雨特性は単に総雨量でなく、1時間雨量強度や更に短時間の雨量

表2 降雨状況と各のり面からの表面流出水量 (1987年)

No.	観測期間	降 雨 特 性 値				表 流 水 量			
		降雨数	期 間	1時間	10分間	No.1	No.2	No.3	No.4
			雨 量	最 大	最 大				
				降雨量	降雨量				
mm	mm/h	mm/10min.	ℓ	ℓ	ℓ	ℓ			
1	4/22～4/27	1	25.8	3.2	1.1	4	8	4	10
2	4/27～5/4	2	25.2	4.3	1.2	6	4	7	10
3	5/4～5/14	3	59.4	12.9	3.9	27	40	37	32
4	5/14～5/24	2	27.1	3.6	1.0	12	11	11	10
5	5/24～5/28	1	12.4	4.2	1.2	6	5	5	5
6	5/28～6/3	1	29.9	19.9	5.2	28	59	67	61
7	6/3～6/10	1	119.6	12.2	2.8	43	52	65	227
8	6/10～6/16	1	11.8	3.8	1.1	6	4	5	5
9	6/16～6/20	1	39.2	13.2	4.4	57	26	22	70
10	6/20～7/8	4	88.2	7.2	3.1	72	61	60	55
11	7/8～7/13	2	9.0	3.1	1.1	4	12	16	5
12	7/13～7/15	1	52.5	36.7	8.9	114	121	129	306
13	7/15～7/22	3	126.2	38.1	7.5	151	278	308	286
14	7/22～7/29	1	19.0	11.5	3.6	22	38	42	47
15	7/29～8/6	1	49.0	24.2	5.4	87	100	110	160
16	8/6～8/18	7	221.5	36.7	18.2	412	253	495	517
17	8/18～8/22	2	12.3	2.0	0.9	11	6	30	12
18	8/22～8/28	4	90.0	32.7	8.2	172	121	202	261
19	8/28～9/1	1	8.9	5.7	1.7	4	12	16	6
20	9/1～9/14	2	58.6	12.8	1.9	59	97	122	61
21	9/14～9/26	2	84.2	7.7	1.6	48	128	161	53
22	9/26～10/14	1	16.4	3.1	1.1	9	23	28	8
23	10/14～10/19	2	304.0	23.5	4.1	692	537	644	1,918
24	10/19～10/28	1	22.0	3.0	0.6	25	25	48	13
25	10/28～11/6	5	102.6	13.3	3.8	209	197	217	269
198days		52	1,614.8			2,280	218	815	4,407

強度も関係することは既に多くの研究者により指摘され、種々の関係式が示されている。たとえば、土壌侵食防止のための被覆工の問題に関連して斜面侵食量を研究した綱本らは¹¹⁾、期間降雨量 P (mm)、期間内最大時間雨量 I (mm/hr) 及び最大10分間雨量 i (mm/10min.) の3因子の積 $P \cdot I \cdot i$ を降雨加速指数と呼び、期間内の侵食量 E (g) は

$$E = a (P \cdot I \cdot i)^b$$

で表せるとした。この降雨加速指数の定義は、降雨の性質は降雨強度で決められ、降雨強度はさらに瞬間降雨強度によって加速特徴付けられるという考え方に立脚している。

この式は土砂流出量と降雨特性との関係式であるが、期間内表流量量についてこの降雨加速指数との関係を検討すると上式でうまく整理できた。そこで、この降雨加速指数の概念を用いて、のり面状況による流量量の差異を考察する。なお、綱本らは1週間という一定期間のデータ整理から上式を提案しているが、期間日数が一定でなくても降雨加速指数のもつ意味は変わらないはずだと考える。

表3に、各のり面からの期間表流量量と降雨加速指数の関係式 $a (P \cdot I \cdot i)^b$ で表すときの係数 a 、指数 b 、及び相関係数をまとめた。各のり面とも、後述する流出土砂量におけるよりも高い相関が、降雨加速指数との間に認められる。そこで、この指数・係数を使って、のり面状況による表流量量の差異を示したものが図3である。

図3によると、裸地のり面と比較してハニカム・スパイク敷設のり面で表流量量が明らかに減少する。そしてその差は、降雨加速指数の高い降雨になるほど拡大する。また、草生のり面ではハニカム・スパイクが施工されていることによる表流水の差はなく、ハニカム・スパイク敷設だけののり面と草生のり面では表流量量にあまり差がない。

表3 各のり面からの表流量量と降雨加速指数の相関

のり面番号	a	b	相関係数
No.1	0.89540	0.52345	0.907509
No.2	1.39909	0.48310	0.884688
No.3	2.02063	0.46151	0.832233
No.4	0.67110	0.61508	0.939916

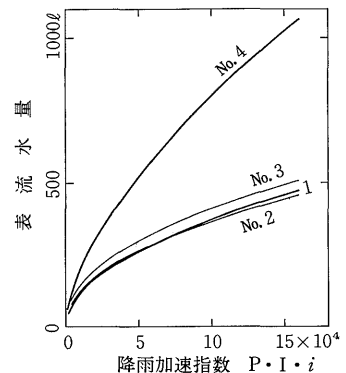


図3 表3の係数、指数による各のり面からの表流量量の比較

(2) 表流水流出パターンの変化

のり面状態の違いが表流水の流出パターンに与える影響について考察するため、試験施工のり面での表流水の観測記録から得た各のり面でのハイドログラフの幾つかを図4に示す。

1987年7月17日のハイドログラフから次のことが言える。

- ① ハニカム・スパイク敷設のり面でのピーク流量は、裸地のり面でのその1/4近くまで低減する。また、草生のり面でのピーク流量はハニカム・スパイク敷設のり面と変わりはない。
- ② 裸地のり面からの表流水は、突発的に発生し短期に集中流出する傾向がみられる。ハニカム・スパイク敷設のり面での表流水の発生は裸地のり面より早い、その量は少なく、裸地のり面に比

較して約1.5倍の時間をかけて流出する。

③ 草生のり面からの流出パターンには、ハニカム・スパイクの有無の影響はみられない。これは、次のように考えられる。ウィーピング・ラブ・グラスやケンタッキー・31・フェスクを主とした植

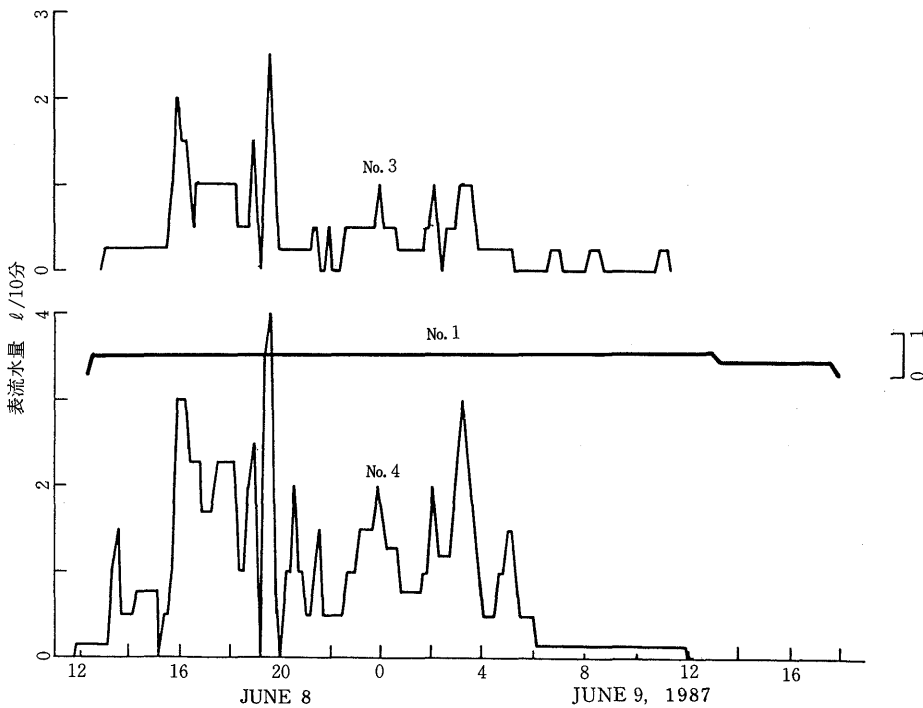
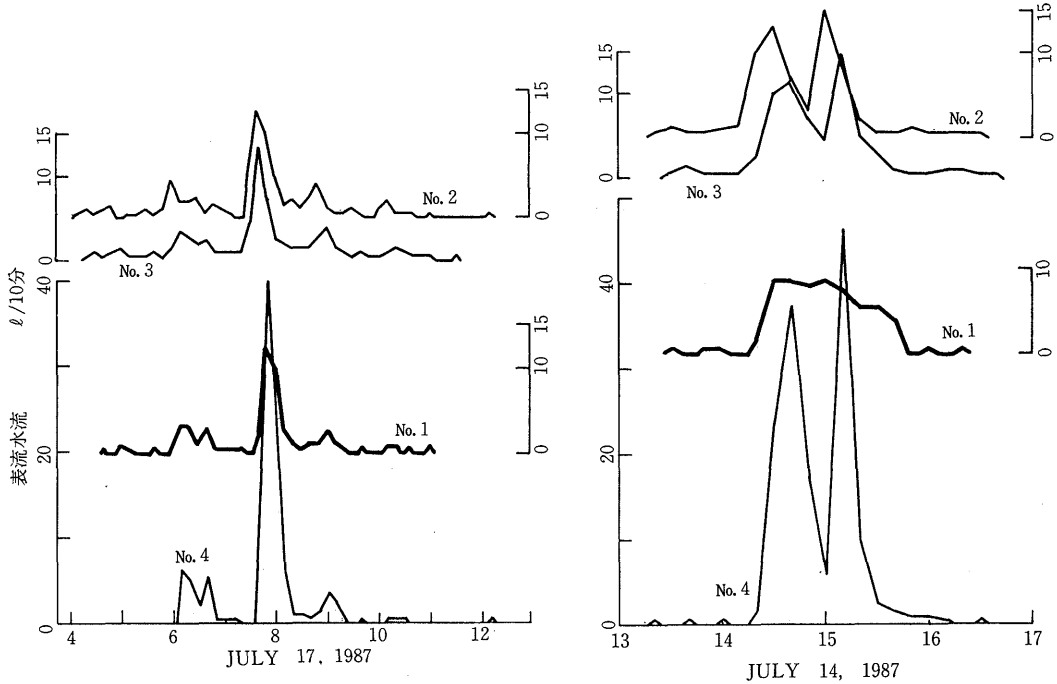


図4 試験施工のり面における表流水ハイドログラフ

生がのり面を完全に被覆するほどに繁茂し、表流水を集水するチャンネル内部にまで達するほど成長した。そのために、試験区に落ちた雨水が地面に到達する以前に倒伏した草茎葉の上を流下する。この倒伏する草茎葉群のもつ「藁葺き効果」あるいは「蓑の効果」のために、観測された流水の大半は植生間を伝達流出したもので、土表面に存在するハニカム・スパイクの影響はほとんど表れてこない。

ひと雨期間に降雨ピークが2回あった7月14日の各のり面のハイドログラフから、次のことが言える。

- ① 裸地のり面、両草生のり面からの流出は2度のピークをもつ降雨状態に対応した流出となるが、ハニカム・スパイク敷設のり面からの流出は平坦化しピークをもたず流出量も低減する。
- ② ハニカム・スパイクのみの面からの流出は、他の3のり面に比較してピーク流量からの低減が緩慢である。

そして、少雨が長時間にかけて発生した6月8日～9日のハイドログラフから、時間雨量が1mm未満の少雨が長時間続くような時には、ハニカム・スパイク敷設のり面からの流出時間は延伸し、少量の表流水が平均化して流出する傾向をもつといえる。

(3) 表土層における水挙動に対する不織布の影響

つぎに、ハニカム・スパイクを構成する不織布の存在がのり面での水の挙動に与える影響を詳細に検討した、不織布ストリップを使用したモデル実験の結果を考察する。

モルタル層を使った実験で、表流量及び不織布伝達水量が定常になった後における不織布伝達水量の全流出量に占める割合（以後「不織布伝達率」と呼ぶ）をまとめたものが図5である。

不織布伝達率は、降雨強度が同一であれば、不織布排列パターンの相違にかかわらず、のり面の傾斜が増加するのに伴って最初は減少傾向を示すが、一定の傾斜角度からは増加傾向に移行する。初めの減少は、傾斜の増加に伴い表流水が不織布に浸透する機会が少なくなったことによると考える。すなわち、この実験の場合不織布上端はモルタル面から1cm突出しているが、不織布が表流水を捕捉する機会の大きさはその突出部の上流側で表流水が停滞する規模と回数に支配される。のり面勾配が増加すると表流水が停滞する規模（プールの広さと深さ）の小さくなることから、この減少の原因であると考えられる。不織布を最大傾斜に平行に排列したパターン1ではこの機会がほとんどないので、この減少傾向はほとんどない。

不織布の浸透機会を支配するもうひとつの要因である停滞回数の影響は、不織布伝達率の同一の降雨強度・傾斜角度における排列パターン間の差として現れるはずである。パターン2とパターン3の図を比較すると、パターン2がいくぶん高い不織布伝達率を示しているのは、不織布がのり面を横断する回数と横行する長さにおいて前者が大きいからであると考えられる。しか

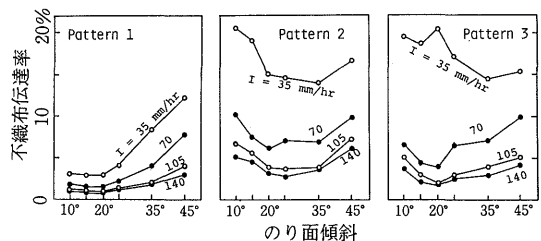


図5 モルタル充填のり面における不織布伝達率

し、2つの排列パターンにおける不織布伝達率の比は、のり面の横断の回数と総延長の違いをそのまま反映していない。これは、一定動水勾配のもとで一定断面積の不織布中を透過できる浸透水量に限界があるからである。不織布伝達率の比は、のり面上部では横行する不織布の長さや停滞の回数をそのまま反映するが、のり尻に至るほど不織布のもつ透水能力を反映したものになるだろう。

図5は降雨強度をパラメータにしてのり面の傾斜角度と不織布伝達率の関係を示しているが、降雨強度が増加するに従って不織布伝達率が減少するのは、35mm/hr程度の雨が30分も継続すれば、既に不織布の伝達能力が満たされていることを示していると考えられる。実際に起こりやすい雨量強度とハニカム・スパイクを構成する不織布の断面積を考えると、このような状態に至ることはまれであろう。

パターン2, 3, 雨量強度35mm/hrの場合を除くと、傾斜角度が20°~30°より大きくなると不織布伝達率は増加傾向に移る。これは、不織布伝達量が動水勾配の増大に伴い増加したことを示すに過ぎない。その増加割合が強度の小さい降雨ほど大きいのは動水勾配が増大することに伴う不織布の透水能力の増加分の降雨量に占める割合が、降雨強度の小さいほど大きいことによる。

傾斜30°,降雨強度60mm/hrの条件での土層による実験における、表流水・浸透水及び不織布伝達水の各流量の時間累加曲線を図6に示す。

3時間の降雨時間内の総浸透流出量は、不織布がないのり面(パターン0)の場合でも全流出量の40%近くあるが、排列パターンにかかわらず不織布をのり面に入れることでその量は3~4ℓ,総降水量の20%も増加する。一方、不織布伝達水量は3時間で約40ccであり総降水量の1%にも満たない。土層の透水係数が、この不織布の透水係数(1.5mm/sec)に比較して2桁も小さいものであったにもかかわらず浸透水量が増加することは、不織布の敷設が表流水の土中への浸透を促進するうえで非常に大きな効果をもっていることを示す。

ところで、傾斜角度35°,降雨強度70mm/hrの条件でのモルタル層実験における不織布伝達率が7~8%であったのに比較すると、この1%にも満たない不織布伝達率は小さいようであるが、前の値が定常状態でのそれであったことと、モルタル層の実験では不織布の上端がモルタル面より1cm突出していたのに土層実験ではそれほど目立った突出でないことを考えると、異常に低い値とはいえない。

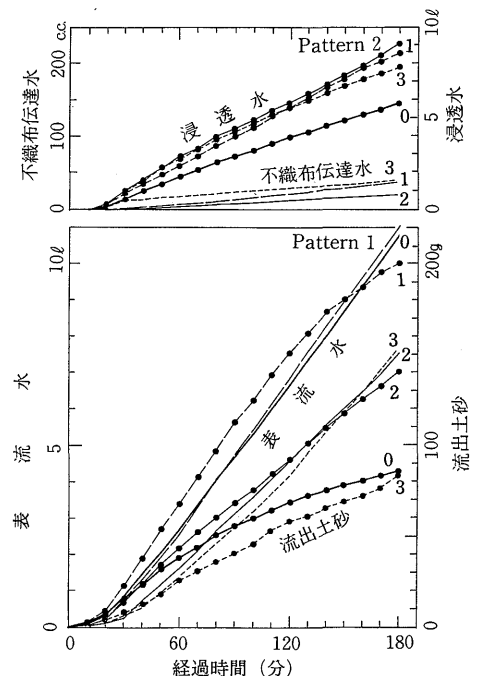


図6 土層のり面における各流出成分の推移 ($\theta=30^\circ$, $I=60\text{mm/hr}$)

3. ハニカム・スパイクの侵食防止効果に関する検討

(1) 土砂流出量の軽減

ハニカム・スパイク敷設が表流水の緩和に大きな効果を有していることが明らかになった。表流水量緩和が流水の侵食力の減退につながり侵食及び土砂流出抑止の効果を発揮することになるかを、試験施工のり面でのデータを用いて考察する。

1987年に得た各のり面からの流出土砂量に関するデータ⁷⁾を表4に示す。

表4 各のり面からの流出土砂量と各期の降雨加速指数(1987年)

No.	観測期間	降雨加速指数	流 出 土 砂 量			
			No.1 (g)	No.2 (g)	No.3 (g)	No.4 (g)
1	4/22~4/27	91	92	2	2	452
2	4/27~5/4	130	107	3	5	540
3	5/4~5/14	2,988	168	15	35	392
4	5/14~5/24	98	117	2	6	114
5	5/24~5/28	63	13	1	0	10
6	5/28~6/3	3,094	250	4	21	364
7	6/3~6/10	4,086	151	4	6	141
8	6/10~6/16	49	11	0	1	13
9	6/16~6/20	2,277	43	1	10	76
10	6/20~7/8	1,969	63	0	5	59
11	7/8~7/13	31	5	1	2	6
12	7/13~7/15	17,148	436	0	1	2,563
13	7/15~7/22	36,062	174	0	0	809
14	7/22~7/29	787	67	0	1	175
15	7/29~8/6	6,403	211	1	0	523
16	8/6~8/18	147,949	1,531	1	5	9,782
17	8/18~8/22	22	28	0	1	72
18	8/22~8/28	25,166	246	0	3	361
19	8/28~9/1	86	29	0	0	15
20	9/1~9/14	1,425	56	0	13	40
21	9/14~9/26	1,037	71	7	2	14
22	9/26~10/14	56	164	0	2	5
23	10/14~10/19	29,290	533	0	0	411
24	10/19~10/28	40	43	0	0	13
25	10/28~11/6	5,185	111	0	0	87
198days			4,720	32	121	17,037

まず、流出土砂量と降雨加速指数、表2、4に示した種々の降雨特性値及び綱本ら¹¹⁾が「降雨強度」と呼んだ積P・Iとの関係を、1986年の観測値⁸⁾についても検討した結果を述べる。

① ハニカム・スパイクを敷設したNo.1のり面における1986年の流出土砂量は、夏期乾燥期に降雨によらない土砂粒子の自然剝落があった⁸⁾ために、降雨特性値に対して弱い負の相関になった。しかし、乾燥期の自然剝落が認められなかった1987年の流出土砂量は、降雨に関するいずれの特性値と

も他の3のり面に比べて高い正の相関がみられた。なかでも、降雨加速指数と降雨強度 $P \cdot I$ に対して強い対応が認められた。

② 草生のり面No.2およびNo.3における土砂流出量は、いずれの降雨因子との間にも取り立てて相関があるとは言えない。のり面が繁茂した植生に被覆されれば、土砂流出量は降雨強度あるいは降雨加速指数といった雨滴のインパクトに支配されるのではなく、被曝した降雨量に支配されることを示すと考える。

ところで、1986年の観測結果には、降雨特性値との比較的高い相関が認められた。特にNo.3のり面で $E \propto i^{1.98262}$ と10分間最大雨量 (i) の約2乗に比例する関係があった。これは、裸地のり面からの流出土砂量が10分間最大雨量の約2乗に比例するとの江崎らの指摘りに合致するものであり、生育密度が貧弱で草丈が劣り十分な叢生状況にならなかったNo.3のり面の1986年の状況は、裸地状態に近かったことを示す。草生にしたのり面においては、植生の生育状況で流出土砂量は大きく変動する。植生導入した斜面における降雨と流出土砂量の関係を検討する際には、植生生育段階に見合った期間を設定し各期間内での両者の関係を考察する必要がある。

③ 1986年には裸地のり面No.4においても、ハニカム・スパイク敷設のNo.1のり面ほどではないが夏期乾燥期に降雨によらない土砂粒子の剝落があったため降雨特性値と流出土砂量の相関は良くなかった。1987年には10分間最大雨量との間に最も高い相関が認められた。表4の観測期間No.12で、裸地のり面における流出土砂が飛躍的に増加した。他にもこの期間と同様の総雨量があったにもか

表5 各のり面からの流出土砂量と降雨加速指数の相関

のり面番号	a	b	相関係数
No.1	6.56758	0.38289	0.784787
No.2	1.79792	0.03536	0.097834
No.3	1.33378	0.15378	0.359199
No.4	2.57255	0.55186	0.741338

かわらず流出土砂量がそれに対応しなかったのは、10分間最大雨量の影響が強いからである。けれども、 $E \propto i^{1.67628}$ と江崎らの言う2からかなり外れていた。

このように、雨滴及び流水によるのり面からの流出土砂量に関係する降雨の特性値は、のり面状態により若干異なるが、綱本らが指摘した降雨加速指数との関係において、ハニカム・スパイク敷設、草生のもつ土砂流出抑制の効果を検討する。

1987年の観測から得られた各のり面からの期間流出土砂量と降雨加速指数の関係を前出の式 $E = a (P \cdot I \cdot i)^b$ で表すときの係数 a 、指数 b 及び相関係数を表5にまとめ、これらの係数・指数により計算される各のり面からの流出土砂量を図7に示す。草生のり面No.2、No.3での両者の相関はかなり弱いものであるが一応の計算結果を示す。

ハニカム・スパイク敷設のり面No.1では、極く小さい降雨加

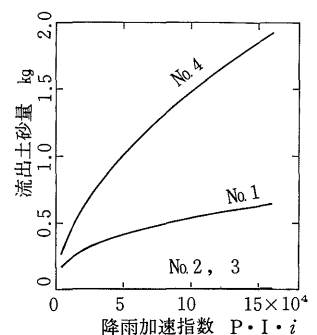


図7 表5の係数、指数による各のり面からの流出土砂量の比較

速指数の場合を除き、裸地のり面No.4に比較して流出土砂量は明らかに減少する。両者の比(E_1/E_4)は、降雨加速指数が大きくなるほど小さくなる。

表面流出量と降雨加速指数の関係を表した図3によると、草生のり面でもハニカム・スパイク敷設のり面に劣らない表流量となったにもかかわらず、この図では草生のり面からの流出土砂は無いに等しい。これは、植生根系のもつ土壤緊縛効果と、前述した倒伏する草群のもつ「藁葺き効果」あるいは「蓑の効果」によるものと考えられる。すなわち、観測表流量全てが実際に斜面を洗っていないことによる。観察によると、後者の影響の方が格段に大きいようだ。そして、この「藁葺き効果」は強度の大きい降雨程大きく現れると思われる。

図7と図3を対比しながら、土砂流出に対するハニカム・スパイクの効果について考察する。

図3によると、ハニカム・スパイク敷設のり面における表流量と裸地のり面からの表流量の

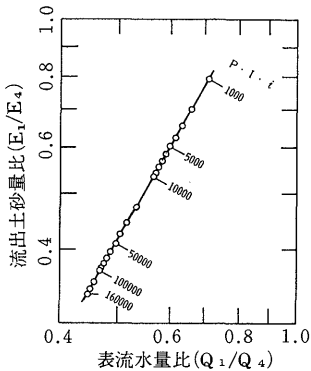


図8 ハニカム・スパイク敷設のり面と裸地のり面における表流量比と流出土砂量比の関係

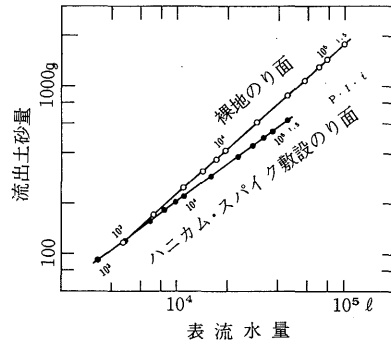


図9 ハニカム・スパイク敷設による流出土砂量の軽減

比 (Q_1/Q_4) は、降雨加速指数が大きくなると若干低下する。図7によると流出土砂量の比 (E_1/E_4) も降雨加速指数の増大に伴って低下する。両比の関係を降雨加速指数 $P \cdot I \cdot i$ をパラメータにして示したのが、図8である。この図から両比の関係は、 $E_1/E_4 = 1.50 (Q_1/Q_4)^{1.844}$ と表せるが、降雨加速指数が小さい場合流出土砂量の比の方が大きかったものが、 $P \cdot I \cdot i = 5,000$ を境にして両比の大小関係が逆転する。 $P \cdot I \cdot i = 60,000$ にもなると、 $Q_1/Q_4 = 0.5$ になるのに対して $E_1/E_4 = 0.4$ となる。のり面に働いた掃流力の比を表流水総量の比で示すことができないが、降雨加速指数の大きい降雨にさらされた期間ほどハニカム・スパイクを敷設したことが表流量に対してよりも流出土砂量に対して大きく影響していることは、ハニカム・スパイクが単に表流水を捕捉・浸透させて水量を緩和する以上の効果を有していることを示す。裸地のり面及びハニカム・スパイク敷設のり面での表面水量と流出土砂量の関係を、図8と同様に降雨加速指数をパラメータに示したものが図9である。裸地のり面の場合、流出土砂量は表流量のほぼ1乗に比例して増加するのに対して、ハニカム・スパイク敷設のり面ではかなり緩い傾きになる。ハニカム・スパイクが単に表流水を捕捉・浸透させて水量を緩和する以上の効果を有していることは、この図によってより明確になる。

それは、不織布のハニカム形状が、土砂流出の抑止に効果をもっていることによると考えられる。

(2) ハニカム形状による土砂の抑留

そこで、試験施工のり面での2年間の侵食量に関する観測終了後に、ハニカム・セル内の侵食・堆積状態を測定した。すべてのセルについてハニカム・スパイク上端面からの侵食深（セル下端 D_a 、セル上端 D_b ）とセルのポケット部に堆積した土砂の堆砂角 θ を測定し、横断方向の平均で示したものが図10である。

この図から次のことがわかる。

セル上端部でののり面低下は認められる。しかし、最も深いところでもハニカム・スパイク・フレームの深さ（10cm）の $\frac{1}{2}$ であり、平均的にはスパイク・フレームの深さの $\frac{1}{4}$ 程度に留まっている。

最も深い低下はのり肩からのり長の約 $\frac{1}{3}$ 付近にあり、それからのり尻に至るほど低下量は小さくなる。のり尻ほど流水が増加するから、のり尻ほど侵食が顕在化すると考えたが、そうではない。

セル上部で剝奪される土砂はセル下部のポケットで抑留されていることが、 D_b 曲線に読める。の

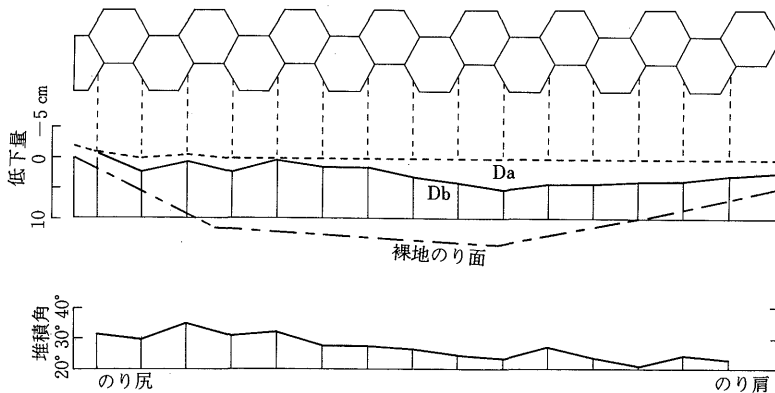


図10 のり面の低下とハニカム・スパイクによる土砂抑留

り肩からのり尻に至るまでセル下部のポケットでのり面低下はみられず、ハニカム・スパイクの上端面まで、時には端面以上に土砂を堆積している。

ポケット部の堆砂角をみると、のり尻近くでは施工時の傾斜角 35° に及ぶ部分もある。これはセルが殆ど土砂に埋まってしまっていることを示すもので、この部分では上方セルから貯留限界を越えて流れ込む土砂をも抑留している。

(3) ガリ侵食段階での耐食性の強化

試験施工のり面での観測・調査及び不織布ストリップを使用したモデル実験はハニカム・スパイク敷設のり面に顕著なガリの発生しない段階に止まった。雨水の集中でのり面にガリを発生する状態でハニカム・スパイクのもつ効果を実験結果から考察する。土砂と流水と一緒に記述する方がハニカム・スパイクの効果を評価し易いので、水の挙動についても若干触れる。

1. (3)に述べた実験で10分毎に採取した表流量量、流出土砂量および後述するように深さ5mmでのり面に一様に埋設しておいた種子の流出量の変動を図11に、その累加値の相互関係を図12に示す。流出種子量については、のり面で配置種子数が異なるので配置数に対する比率で表現した。

一定強度の連続降雨下でのハニカム・スパイクを敷設したのり面からの表流水の発生は、ハニカ

ム・スパイクを構成する不織布の流水捕捉・浸透促進効果で、裸地のり面に比べかなり遅れる。定常状態に至るまでの表流水の増加割合も小さく、定常状態に到達する時間も明らかに遅れる。

裸地のり面での表流水の初期の増加は激しく、実験開始60分後に大きなピークが現れ、その後変動を繰り返しながら定常値になっていく。表流水の初期の増加の過程で激しい土砂流出がみられ、表流水のピーク時には土砂流出は既に大きく減少し、その後変動を繰り返しつつ減少傾向に移る。観察とビデオ記録によると、30分から50分の間は、薄層流による面状侵食から集中水によるガリ侵食への移行、ガリの横侵食・縦侵食の進行時期に相当していた。比較的短期間に深く洗掘された土層に保たれていた土中水やガリの発達にともないガリ間での地下水位が低下したために排出された土中水が、ガリへ集中しこの表流水のピークを形成したものと理解できる。180分間の表流水量は、ハニカム・スパイクを敷設することにより裸地の場合の80%以下に低下している。

裸地のり面からの流下土砂量は、上述のガリ発達過程における激しい流出が終わった後は、間欠的なガリ壁の崩壊に伴う変動を繰り返しながら経過する。

図12をみると、ハニカム・スパイク敷設のり面と裸地のり面の種子流亡量の比は流出土砂量のそれに比較して小さい。流出土砂に含まれる種子数の割合がハニカム・スパイク敷設のり面の方で大きいことを示している。これは、ハニカム・スパイク敷設のり面からの流出土砂が表層のものを多く含んでいる、すなわちハニカム・スパイクのり面での侵食が比較的浅い侵食である現れである。また、流出土砂量に対する種子量の比は図12の第1象限の曲線の傾きに表われるが、ハニカム・スパイク敷設の場合実験終了までこの曲線の勾配が大きいままで推移することは、実験終了まで浅い侵食が支配的であったことを示す。けれども、ある時から間欠的に裸地のり面からの土砂量をもしのぐ多さになる。裸地のり面に比較してずいぶん遅れたが、この時刻からガリが発達し始める。

180分間の流下土砂量は、ハニカム・スパイクを敷設することにより、裸地の場合の約1/4に激減している。しかし、図12の曲線の傾きで示される表流水の含砂率を見ると、ハニカム・スパイク敷設のり面では裸地のり面に比較して含砂率はずいぶん小さいけれども、ガリ侵食が始まってから実験

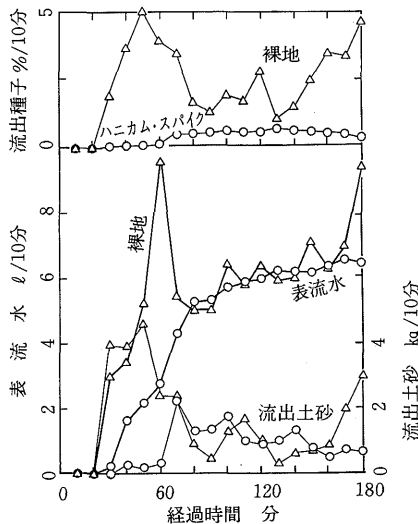


図11 流出水量、土砂量及び種子数の推移

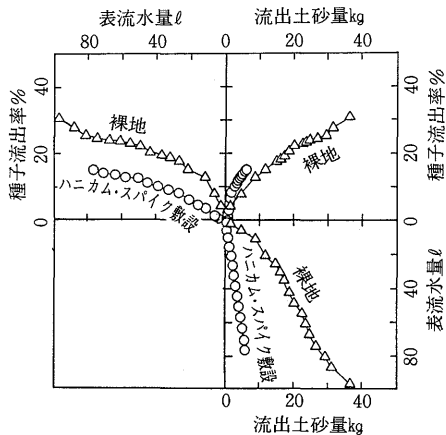


図12 流出水量、土砂量及び種子数の累加値の対応

終了時までほとんど低下しない。

実験終了後ののり面の一部を写真3, 4に示し, ガリの輪郭を図13に示す。ハニカム・スパイクを敷設しない場合, のり尻はほとんど初期のり面を見せないまでに侵食され, 深いガリが発達している。谷頭は120cmまで伸び深いガリは29cmにも及んでいた。ハニカム・スパイクを敷設した場合, 横行するフレームでガリは寸断され, 深くなれない。ガリの見られるのは, 下部60cmに過ぎない。

ところで, 縦行するハニカム・スパイク・フレーム沿いには激しい侵食・洗掘が起こっている。最深部はハニカム・スパイクの高さにほぼ等しい9cmにもなっていた。縦行するフレーム沿いは, それでなくとも流水を, 従って侵食力を集める部分となる上に, ジグザグにのり面を横行するスパイクの谷状部分に集中した流水の流下場所になる。この流水の集中あるいはその侵食力の発現をいかに抑制するかが, のり面侵食防止にハニカム・スパイクを施工する際の大きな問題である。

III ハニカム・スパイクによる緑化種子の定着及び生育に対する効果に関する研究

IIでは, のり面にハニカム・スパイクを敷設することにより, それを構成する不織布の高い透水性が表流水を緩和し流水の侵食力を減退させることを確認し, その効果はガリ侵食発生条件下でも変わらないことを認めた。しかし, のり面にガリが発生した場合, 最大傾斜方向に走る不織布沿いに集中する流水による局所洗掘が見られた。また試験施工のり面での観測から, のり面を草生にすることは表面侵食による流出土砂を抑止するのに大きな効果を有しており, その場合ハニカム・スパイクには期待できない降雨遮断の効果が偉大であることが明らかとなった。

ハニカム・スパイク敷設のみに終らずハニカム・スパイク施工の際に播種も同時に行うことにより, ハニカム・スパイクが表流水を減少させる機能を発揮するとともに撒播された種子の流出を抑止し, 生育した植生の根系が不織布の周りに集中する表流水の侵食力を減殺する相乗効果を発揮することが, 集中する表流水の侵食力発現を阻止する最良の方策と考え, いくつかの実験による検討を行った。

1. 実験及び調査方法

ハニカム・スパイクがのり面に播種された種子の流亡を抑止し, 定着した植生の成長を促進させる効果を検討するため, 人工降雨による実験^{9,10}と模型のり面での植生成長測定および掘り取り調査⁴)を実施した。

(1) 種子流亡抑止に関する人工降雨による実験

II 1.(3)で述べたガリ侵食段階でのハニカム・スパイクの機能を検討する実験と併せて, 種子流亡抑止効果に関する実験を実施した。II 1.(3)で触れなかった部分についてだけ述べる。

侵食実験のために作製した土層表層部深さ5mmに, 代表的なりのり面緑化用種子であるケンタッキー・31・フェスク (*Festuca elatior* var. *arundinacea* 以下K31Fと記す) を均等に配置し, 降雨中の流出種子数及び降雨停止後にのり面各部位毎に残留する種子を計数し, ハニカム・スパイクの種子流亡抑止を確かめることにした。

すなわち、裸地のり面は傾斜方向に5cm、幅15cmに区画し、各区画に40粒の種子を等間隔に配置した。ハニカム・スパイクを敷設する場合は、図14に見られるようにのり面を約5cm×約4cmの区画に分割し、各区画に10粒の種子を均等に配置した。全配置全種子数は、それぞれ8,400粒、7,920粒である。これは、倉田²⁾がK31Fをのり面に播種する場合の最低必要とする粒数に近い。種子配置後、厚さ5mmの覆土を行い、締め固めは行わなかった。

ところで、実験の手順上播種から降雨まで2日必要であったが、予備実験によるとこの養生期間にK31Fは発根することがわかった。種子流出抑止を図る上でK31Fのこの早い発根は好都合であるが、実験の都合上は好ましくない。そこで、種子は110°Cで4時間炉乾燥し発根を抑制した。この処理で種子の大きさと比重は変化することはなかった。

このように調整された土層を、35°の勾配に置き、40mm/hrの降雨に3時間さらし、10分毎に表流水を土砂とともに採取し数日間静置後の沈殿中から種子を計数した。また降雨停止後、深さ2cmまでの層の土砂を前述した区画毎に740 μ mフルイに掘り取り、水洗して残留種子を計数した。顕著な侵食がみられる部分では、ガリ内外で別々に計数した。

(2) 模型のり面における植生の成立及び成長に関する観察

小規模な模型のり面を作り、代表的なりのり面緑化用種子であるケンタッキー・31・フェスク (K31F)、ウィーピング・ラブ・グラス (*Eragrostis curvula*)、ホワイト・クローバー (*Trifolium repens* L.)、ヨモギ (*Artemisia princeps* PAMP) の4種子を播種し、その成長観測と掘り取り調査を行い、ハニカム・スパイクの影響を検討することにした。

模型のり面は、浸透水の停滞が起こらず土粒子も逃散しない程度に壁・底面に孔を多数うがった長さ90cm、幅70cm、深さ30cmの木箱にマサ土の5.0mmフルイ通過分を硬度13mm~17mmで均質に充填したものである。使用したハニカム・スパイクは、II 1. (2)の実験に用いた不織布(東レマントルD515)を高さ5cm、一辺約10cmのハニカム状に縫製したもので、模型のり面に敷設すると縦方向5個、横方向4個のハニカム・セルが形成される。ハニカム・スパイク上端面は播種、覆土後に土層表面に合致する高さにした。

播種量は、のり面緑化工で一般的に必要とされる各草種のm²当り播種量の最大値²⁾を根拠に、表6のように計算した。裸地とハニカム・スパイク敷設のり面に定着・成立した植生数を定量的に対比する調査の目的上、のり面上に均等に播種する必要がある。そこで、のり面を横方向に4分割、傾斜方向に8分割し、区画ごとに表6に示した播種量の1/32量を丁寧に均等に配置し、播種後5mmの

表6 試験草種と播種量および成立本数

草 種	播種量 (g)	成 立 本 数	
		ハニカム・スパイク敷設	裸 地
ケンタッキー・31・フェスク	13.0	1,075	705
ウィーピング・ラブ・グラス	10.0	19,634	20,432
ホワイト・クローバー	10.0	388	454
ヨモギ	10.0	457	151

覆土を行い、化学肥料（くみあい化成 I B-4 号）の400倍液肥を各試験区に1 l 施した。

この模型のり面は、建造物や樹木などによる光遮断、降雨遮断を受けない空地に、南向き、約35°の勾配で設置し、定期的に傾斜方向の各分画でそれぞれ10本のサンプルをとって草丈を測定した。

10月中旬まで草丈調査を行った後、刈り取り・掘り取り調査を実施した。成立本数の計数は、裸地のり面では播種時の区画内で、ハニカム・スパイク敷設のり面ではセル内を図17に示すように区画して行った。ウイーピング・ラブ・グラスの成立数が多かったので、掘り取りはハニカム・スパイク敷設法面ではり面上部から下部までジグザグに1セルずつについて行い、裸地のり面では前記の区画について行った。その他の草種については、全数調査した。なお、ハニカム・スパイク敷設のり面では、いずれも根系がスパイク・フレームに絡み付いていたため、スパイク・フレームと共に掘り上げた。

2. 種子の流亡・植生固定に対するハニカム・スパイクの影響

(1) 人工降雨による実験結果の考察

表層深さ5 mmに一樣に配置したのり面が強度40mm/hrの人工降雨を3時間受けた後に、のり面に残留した種子を約5 cm間隔に計数した結果を、のり面に発生したガリ縁辺の形状と併せて示したのが図13である。

この図から、次のことがわかる。

- ① のり面全体からみると、残留種子が目立って少ないのはガリの発達した部分である。

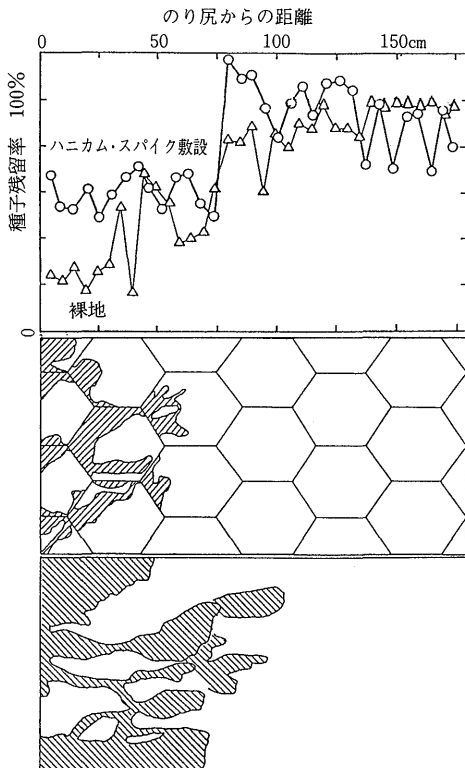


図13 ガリの輪郭とのり面残留種子数の縦断分布

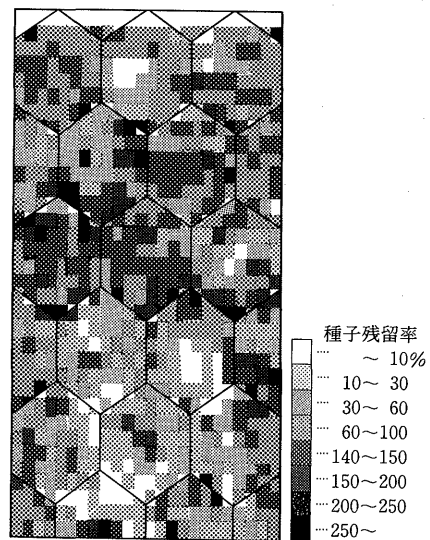


図14 ハニカム・スパイク敷設のり面における種子残留の平面的パターン

② ハニカム・スパイク敷設のり面の最上部では、裸地のり面以上に減少した部分が現れた。この残留種子の周期的な減少の原因はうまく説明できないが、実験終了後ののり面はこの部分でかなり短周期の波状を呈しており、雨滴発生装置からの落下雨滴に偏在性があり雨滴侵食によるわずかな移動に周期性があったのではないかと考えられる。

③ ハニカム・スパイク敷設のり面の中流部のガリが現れていない部分では、周期的に配置種子数より多い部分がある。これをハニカム・スパイク・セルの配列と対照すると、のり面を横行するハニカム・スパイクのポケット部が流下する種子を捕捉していることがわかる。

図14は、種子配置の各区画での残留種子数を配置数で除した値を使って、ハニカム・スパイク敷設のり面における種子残留パターンを示したものである。のり面上部3列のセルにおいて横行する不織布が作るポケット部分に多くの種子を捕捉していることがわかる。しかし、この効果もガリが見られない部分で現れるだけで、ガリが表われた第4列からはポケット部分で逆に種子数は少ない。前述したように、ここは流水の集中するところであるから、特に軽量のK31Fの種子は流されてしまう。第4列以下のセルでは、表流水が流下する機会の少ないセル中央部で高い残留率になることを、図14は示している。

図15に、裸地のり面におけるガリ幅およびガリ内外における面積当りの残留種子数を示す。裸地のり面下部でも、ガリ間高地には最初に配置した種子数(0.53粒/cm²)あるいはそれより多い種子が残留している。のり先から10~40cmでガリ外の残留種子数が大きく減少しているが、この部分はガリ外といってものり面の初期状態を残すものでなく覆土厚以上は侵食されていた。裸地のり面下部での種子残留率が小さいのは、ガリの幅が広がったことによる。のり尻から30~40cmのガリ内で高い残留率になっているが、この部分には写真3に見られるように高いガリ側壁からの崩落土砂が流水を堰止める形態を呈し、流下種子がこの崩土中に埋積していたことによる。5cm掘っても種子が発見された。

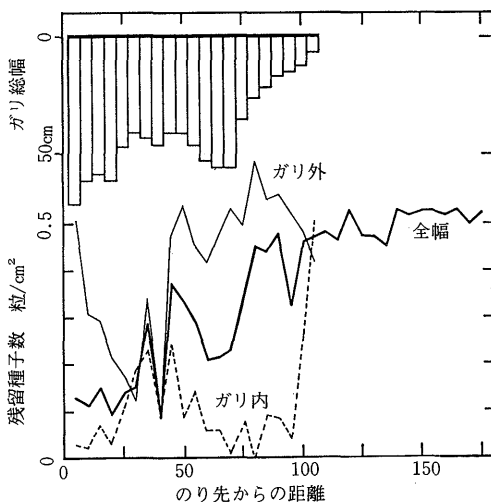


図15 裸地のり面におけるガリ幅とガリ内外における種子残留

これらのこと及び上記①は、種子ののり面での残留を支配するのはガリが発生するか否かであり、ハニカム・スパイク敷設がガリの発生を抑止しその副次的効果として種子流亡が減少することはあっても、ハニカム・スパイク敷設に種子捕捉効果を独自に期待することは難しいことを示す。

もっとも、この実験では種子は枯殺されていた。そうしなければならないほど、K31Fの種子は強い発芽力をもっていたからである。ガリを発生させるほどの強雨に遭遇するまでに、種子が発根していれば問題は違つてこよう。また、ハニカム・スパイクがその周りの土中水のあり方を変化させ、種子発芽により好都合な条件を作り出すかも知れない。

(2) 自然降雨下における調査結果の考察

播種後約5ヵ月野外に放置された各模型のり面に定着した植生の成立状況を、刈取・掘取調査から得た成立密度とのり先からの距離との関係で示したのが図16である。

これらの図から次のことが読める。

- ① 裸地のり面では、ホワイト・クローバーを除いて尻から肩に向かって成立密度が減少する。
 - ② K31Fのハニカム・スパイク敷設のり面では、①の成立密度曲線の上に、周期的に倍以上の成立密度となる部分が現れる。ハニカム・スパイクの配置と対照すると、この高密度の部分がスパイク・フレームの横行部分に相当する。
 - ③ ウイーピング・ラブ・グラスのハニカム・スパイク敷設のり面では、のり尻部では裸地区に勝る成立密度にはならないけれども、肩から尻まで平均的に成立する上に、スパイク・フレームの横行部分に対応する高密度部分が周期的に認められる。のり面全体的には、表6に示したように成立密度に差はない。
 - ④ ヨモギ、ホワイト・クローバーを播種したハニカム・スパイク敷設のり面では、のり面中部で最大の成立密度となり、スパイク・フレーム横行部に必ずしも一致しないけれども、不明瞭な周期性がある。
 - ⑤ いずれにしても、ハニカム・スパイク敷設のり面での成立本数は、裸地のり面に比較して多い。
- ②、③に述べた周期的な高成立密度部分の出現は、のり面をジグザグに横行する不織布のポケットに種子が捕捉されるためであると推察できる。

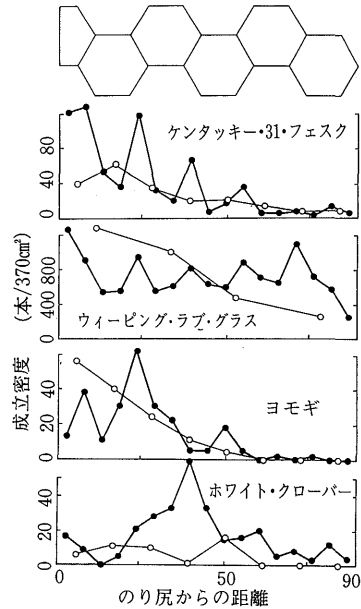


図16 模型のり面における成立植生密度の縦断的変動

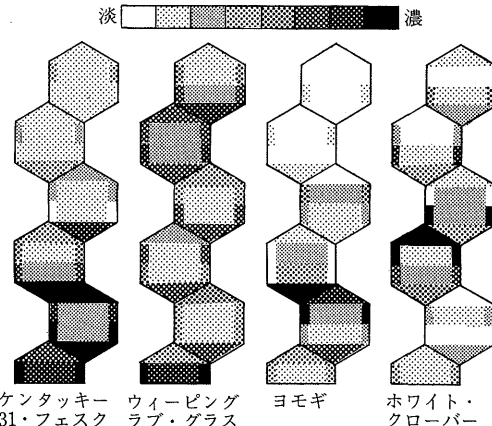


図17 ハニカム・スパイク敷設のり面における植生成立密度の平面的パターン

しかし、この図ではポケットとセルの上縁部が含まれている。そこで、不織布との位置関係を考慮した区画ごとの成立本数を、横断方向に平均して8段階に区分して示したものが図17である。この図から、次のことが読める。

- ① 各のり面ともハニカム・スパイクのポケット部分において成立数が多い。
- ② 傾斜方向に走る不織布沿いは、ポケット部分の成立本数には劣るがセル中央に比して顕著に多い。
- ③ 土層面が見えないほど繁茂していたウイーピング・ラブ・グラスでも、ポケット部と傾斜方向に走る不織布の周りに偏って成立するパターンを示した。

枯殺した種子を使った人工降雨による実験では、ポケット部分がのり面を流下する種子を抑留するとは断定できなかったが、生きた種子を使ったこの観察で、ハニカム・スパイクはポケット部に種子を抑留し多く成立させることが明かになった。前述のように傾斜方向に走る不織布沿いに流水を集中させ局所侵食を惹起する欠点は不織布沿いに多く草を成立させることで補えればとの期待に応えてくれる結果である。

(3) 植生生育に対するハニカム・スパイクの影響

ハニカム・スパイク敷設のり面の植生は、いずれも不織布沿いに成立する傾向が認められた。図17に示したヨモギ区の図をみると、土壤含水比が慢性的に比較的低くなるのり肩から2セルまでの部分では、草は不織布沿いに選択的に成立する。これは各草種共通の傾向であり、ポケット部に成立した植生はハニカム形状による種子の流亡抑止の効果の影響の現れといえるが、傾斜方向に走る不織布沿いに植生が強く成立したのは、ハニカム・スパイクの土壤水分への影響を現したものと考える。成立初期の植生も、写真5に見るようにハニカム・セルに倣っている。

そこで、III 1. (2)で述べた模型のり面と全く同様に作製したハニカム・スパイク敷設のり面においてハニカム・スパイク層（深さ5cm）での土壤水分を測定した。セル内の傾斜方向の短い距離において、のり尻に向かって土壤水分は高くなることが認められた。ハニカム・スパイクのこのポケット部分に土中水分が若干でも多く保たれることが、ポケット形状の効果で抑留された種子の発芽・発育に良好な環境をつくっていると考える。しかし横断方向には、無降雨が続く場合総観的に不織布フレーム沿いで含水比のわずかな低下となる。これは、セルの中詰め土の透水能力よりも高い透水性を有するハニカム・スパイクが周りの土壤水分を奪取するためであると考えられる。

写真6は、ハニカム・スパイク敷設のり面から掘り取った植生あるいは根系を示すが、いずれの草種も根系が不織布に絡み合うように根付いている。中には、セル中央に成立した植生の根系までも不織布まで伸長している。このことは、不織布周辺に植生の生育に必要な水分が多く存在しており、植生がそれを要求していることを明らかに示す。上記の土壤含水比の分布がハニカム・スパイク沿いで若干低いことに優る水補給源があることになる。不織布沿いに成立した植生は、土壤水分ではなく不織布そのものが保有する水分を求めて吸収根を発達させ、必要な水分を補給していると考えられる。それに、ハニカム・スパイク・フレームが通気性の良好な部分となっていることも効果があるだろう。

このように、傾斜方向に走る不織布沿いに植生が高密度で成立し根系も集中することから、この部分に流水が集中しガリを発生させる欠点を補償し得る。

なお、4草種のハニカム・スパイク敷設のり面と裸地のり面における草丈成長を比較したものが図18である。概略的には差がない。ハニカム・スパイク敷設は成立する植生密度を高め、特にフレーム沿いに濃密な植生を発達させる効果があるが、生育を促進する効果まではもたないと言える。

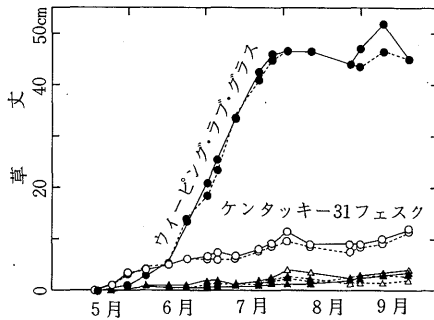


図18 模型のり面における各草種の成長曲線
 実線；ハニカム・スパイク敷設のり面、
 破線；無敷設のり面
 △；ホワイト・クローバー、▲；ヨモギ

IV 結論

不織布を立体加工したのり面保護資材ハニカム・スパイクに期待される侵食防止効果について、試験施工のり面での観測・調査，模型のり面・人工降雨による実験，野外の模型のり面による植生の定着・成長の観察ならびに土壤水分の測定など多くの実験的研究を行い，次のことが明らかにされた。

- (1) ハニカム・スパイクはその素材としての不織布の高い透水性により，表流水を軽減することができる。
- (2) ハニカム・スパイク敷設のり面からの表流水の流出は，裸地のり面や繁茂した草生のり面のそれに比較してピーク流量が低減し流出時間が遅滞・延伸する。
- (3) その場合，不織布自身が媒体となって水をのり戻まで排水させる機能よりも，表流水を浸透水に変換させることに大きな機能を有している。
- (4) ハニカム・スパイクを敷設すると，表流水削減に起因する掃流力減退により，表面侵食による土砂流下は低下する。
- (5) のり面からの期間表流量・期間流出土砂量は，共に降雨加速指数に対して高い相関があった。ハニカム・スパイク敷設による流出土砂の減少割合と表流量の減少割合を比較すると，降雨加速指数の大きい降雨にさらされた期間ほど流出土砂量に対する影響が強くなる。すなわち，ハニカム・スパイクは単に表流水を緩和する以上に，侵食防止に働く。
- (6) それは，のり面を横行する不織布のハニカム形状がのり面を剝落・流下する土砂を抑留することによる。
- (7) しかし，傾斜方向に走る不織布に沿った流れが発生し，ここにガリを発生させる欠点をもつ。

ハニカム・スパイクをのり面に敷設するだけに終らず播種工の併用により，不織布周りに集中する表流水の侵食力発揮を阻止するとともに，ハニカム・スパイクが撒かれた種子の流出を抑止しそ

の生育を促進するといった相乗効果への期待がかかる。

(8) 播種工をとまなうハニカム・スパイクの敷設は、のり面における植生の成立密度を高める効果がある。しかし、成長量については若干優勢となる程度である。

(9) 不織布がのり面をジグザグに横行しポケットを形成する部分において、植生の成立密度が優勢する。

(10) 傾斜方向に走る不織布沿いにも植生の定着は良好である。成立した草根によってこの部分に集中する流水の侵食力を減退させる効果は十分期待できる。

(11) 草根が選択的に不織布に向かって伸長しているけれども、好天時この部分の含水比は必ずしも高くなく、不織布自身の保持水と通気性が植生成立に好影響を与えていると判断できる。

(12) そして、不織布の素材は根の伸長を阻害しない。

以上のことから、冒頭で述べたのり面保護工としてのハニカム・スパイク工法に期待される4つの効果：

- 1) 素材の高い透水性が表流水を緩和し、流水の侵食力を減退させる。
- 2) のり面のハニカム模様（亀甲模様）の横断物が、のり面の耐食性を高め土砂の流亡を抑止する。
- 3) ハニカム形状の埋設物により表層土を補剛し、その匍行・崩落を抑止する。
- 4) のり面上の横断物が、播種された種子の流亡を阻止し、植生の成長を促進する。

を実験的に解明することができた。

ところで、1987年に試験施工のり面での観測でハニカム・スパイクの効果を議論できるデータを収集できたのは、冬期間に雪圧で中埋め土が締め固まり、ハニカム・スパイクの天端が土層面より若干高くなったことによると考えている。また、植生の成立促進効果が表れたのも、ハニカム・スパイクの天端を少し残して播種作業を行ったことにもよる。これらの事実から、ハニカム・スパイク敷設に当たっては、天端を土層表面より高くすることが望ましい。もっとも、機械施工の場合ハニカム・スパイクの細かなセルを考慮した施工は不可能であるから、中埋め土に対して余り強度の土羽打ちは行わず、降雨による水締めを期待した施工規準を考案するのが良策であろう。

謝 辞

本研究は、昭和61年、62年度に実施された鳥取大学工学部道上正規教授を代表者とする「民間等との共同研究：雨水及び流水による法面の侵食機構とその保護工に関する研究」の一貫として始められたものであり、その大部分は既に「昭和61年度民間等との共同研究成果」、「昭和62年度民間等との共同研究成果」として報告書が出されている。その後、II 2. (2)、II 3. (2)に記したデータ整理と調査を実施し、III 1. (2)に述べた模型のり面での植生成長観察を行った。

本研究の機会を与えて下さった道上教授、株式会社三協商会民野芳之助氏、資材提供を頂いた泉産業株式会社植田俊夫氏、株式会社東レ新見健一、加藤鉄一氏、サンファイブ株式会社民野小二郎氏に謝意を表します。また、蒜山演習林施工のり面での施工・観測にあたっては、付属演習林の福富章・福富正昭氏をはじめ職員の方々に、物心ともにお世話になった。蒜山演習林試験施工のり面は、当時の大学院生水中進一氏（現陸上自衛隊）、専攻生武田保君（現岡山県庁）の汗と泥にま

みれた協力で作設できたものであり、専攻生川戸健司君（現森林開発公団）にも模型のり面の作製と観測に熱心な協力を得た。さらに、試験施工のり面の侵食調査等に関して、川戸君、砂防工学研究室研究生の石塚忠範氏（現広島県）にお世話になった。最後になったが、記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 江崎次男, 伏見知道: 日本産雑草類ののり面保護工に対する利用方法に関する研究 (II), 愛媛大演報 13 161~174 (1976)
- 2) 倉田益二郎: 緑化工技術, 森北出版 (1979)
- 3) 西園勝憲, 奥村武信: ハニカム・スパイクによる法面侵食の抑止について, 昭和63年度砂防学会研究発表会概要集 181~184 (1988)
- 4) 奥村武信, 西園勝憲, 永田章: ハニカム形状の不織布による法面緑化の促進に関する試験, 平成元年度砂防学会研究発表会概要集 271~272 (1989)
- 5) 奥村武信, 滝口善樹, 西園勝憲: 不織布の法面侵食防止機能に関する実験的研究, 昭和61年度民間等との共同研究成果「雨水及び流水による法面の侵食機構とその保護工に関する研究 (第1報)」 71~78 (1987)
- 6) 奥村武信, 滝口善樹, 西園勝憲: ハニカム・スパイクの法面侵食防止機能に関する実験的研究, 日林関西支講 38 389~392 (1987)
- 7) 奥村武信, 田中一夫, 西園勝憲, 谷口真吾: 試験施工法面の侵食量に関する観測調査, 昭和62年度民間等との共同研究成果「雨水及び流水による法面の侵食機構とその保護工に関する研究 (第2報)」 57~70 (1988)
- 8) 奥村武信, 田中一夫, 滝口善樹, 西園勝憲: 試験施工法面の侵食量に関する観測調査, 昭和61年度民間等との共同研究成果「雨水及び流水による法面の侵食機構とその保護工に関する研究 (第1報)」 61~70 (1987)
- 9) 奥村武信, 谷口真吾, 西園勝憲: ハニカム・スパイクの種子流亡防止機能に関する実験, 昭和62年度民間等との共同研究成果「雨水及び流水による法面の侵食機構とその保護工に関する研究 (第2報)」 73~87 (1988)
- 10) 奥村武信, 谷口真吾, 西園勝憲: 法面侵食防止材ハニカム・スパイクの種子流亡防止機能に関する実験, 日林関西支講 39 411~414 (1988)
- 11) 大味新学, 綱本皓二: 山腹工法面の侵食に関する研究 —降雨加速指数と土砂流出との関係について—, 日林誌 49 286~292 (1967)
- 12) 山岡一三: ジオテクスタイル (Geotextile) —土木用合成繊維布の利用—, 関西大学工業技術研究所技苑 35 52~59 (1983)

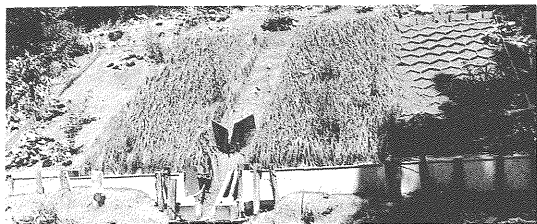


写真1 試験施工のり面の状況 (1987年)



写真3 裸地のり面のガリ

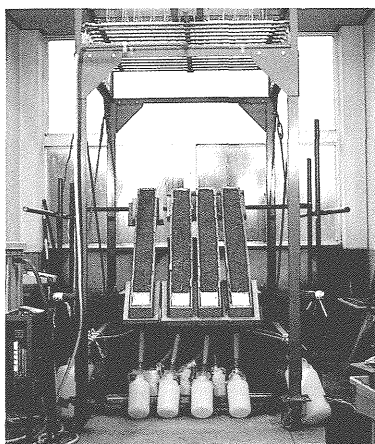


写真2 不織布ストリップを使用した実験

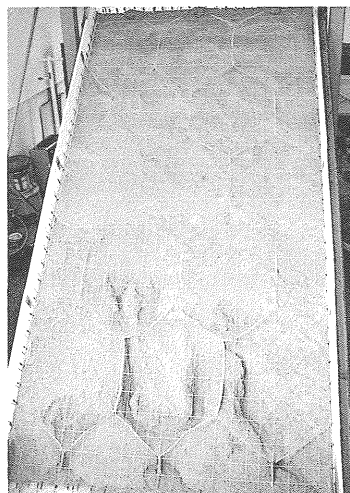


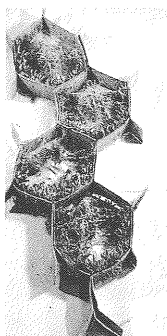
写真4 降雨停止後のハニカム・スパイク敷設のり面



写真5 ハニカム・スパイク沿いに発生したケ
ンタッキー・31・フェスク



a) ケンタッキー・31・フェスク



b) ウィーピング・ラブ・グラス



c) ヨモギ

写真6 掘り上げたハニカム・スパイクと草根系の状態