

林道路面の豪雨時簡易排水対策に関する検討

Study on performance evaluation of simple drainage measures for forest road surfaces during heavy rainfall

中澤 博志*、石澤 友浩**、檀上 徹**

Hiroshi NAKAZAWA, Tomohiro ISHIZAWA and Toru DANJO

Abstract: In recent years, heavy rainfall disasters have become more frequent due to global warming and climate change. Heavy rainfall inundation on slopes and sloping terrain can impede vehicular traffic during emergencies, especially on unpaved forest roads and work roads, where rainwater flows over ruts, erodes road surfaces, and washes away crushed stones, making maintenance and repair difficult. In this study, the performance of a simple drainage belt was experimentally evaluated to maintain the functionality of forest roads during rainfall. The bearing capacity of the belt was evaluated based on the characteristics of rainfall infiltration into the ground and surface flow, and was found to be adequate for use even after rainfall.

1. 研究の背景と目的

近年、地球温暖化や気候変動の影響により、豪雨災害が多発してきている^{1),2)}。斜面や傾斜地における豪雨による浸水は、緊急時の車両通行の障害となり、特に、未舗装である林道や作業道では、雨水が轍を流れ路面の侵食や路面碎石を流出させ、維持修繕をも困難にしていくことが懸念される。また、これらの路面材料の流出は、森林の崩壊や荒廃にもつながっていくと推察される。

上述の豪雨に対し、軽快な車両走行や安全性を確保するため、路面に簡易な排水帯を設置することにより、豪雨を分散して林道・作業道を保護する対策工がある³⁾。本工法は、Fig.1 に示す高分子材料による路面の排水機能を高める方向であり、路面への施工方法が確立されている。また、車両の通行による劣化に対する検討もなされており、その有効性も示されている⁴⁾。しかし、降雨時に路面排水帯周りに土砂の堆積や洗堀が生じると、排水機能を損ねる結果となる。また、Fig.2 に示すように、排水機能の低下は、ベルト周辺路面からの降雨浸透によるトラフィカビリティあるいは含水比の増加による斜面地盤のせん断抵抗の低下につながり、地震時の斜面安定問題にも影響することが懸念される。

本研究では、降雨後の路面簡易排水帯の性能維持に焦点を当て、斜面-路面排水帯を対象に降雨実験装置による(a)降雨強度コントロール下での排水機能の評価、(b)路面排水帯周りの地中への降雨浸透特性および(c)動的コーン貫入試験によるトラフィカビリティの確認を行い報告する。

2. 既往の研究

路面簡易排水帯の現地試験が、平成23年度に実施され



Fig.1 簡易路面排水帯の様子 (参考文献3)を引用)

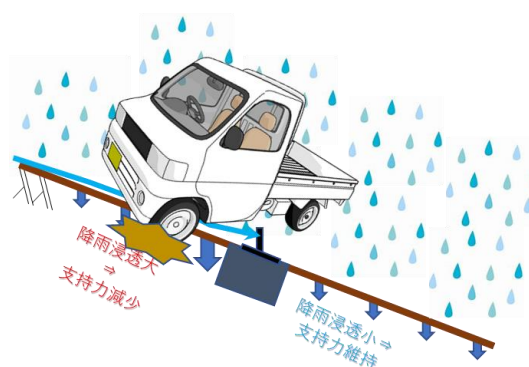


Fig.2 降雨時のトラフィカビリティのイメージ

ている⁴⁾。当該試験は、林道・作業道などの未舗装路面の維持管理に供する路面簡易排水帯の機能・性能に関し、1年間実施されたものである。

林道～作業道などの未舗装路面は流水の侵食力、運搬車の轍などが引き金で路面が損傷されることがあり、その場合、森林の管理や木材の輸送・運搬等に大きな支障を与える。未舗装路面の維持管理に有効な手段は未舗装路面上の流水対策が効果的である。路面簡易排水帯の機能に関し、

2023年3月24日受理

* 理工学部 土木工学科

** 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

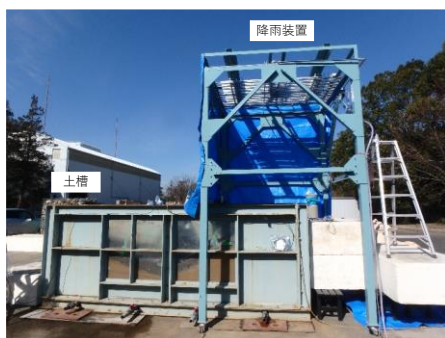


Fig.3 簡易路面排水帯の様子

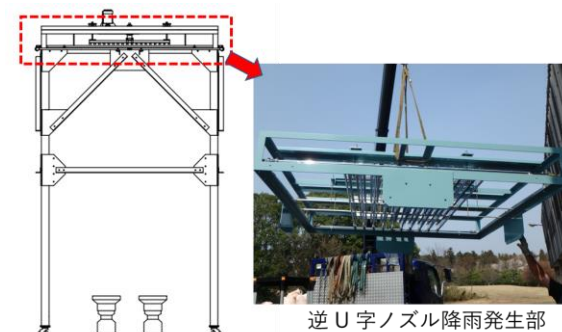


Fig.5 降雨装置の概要

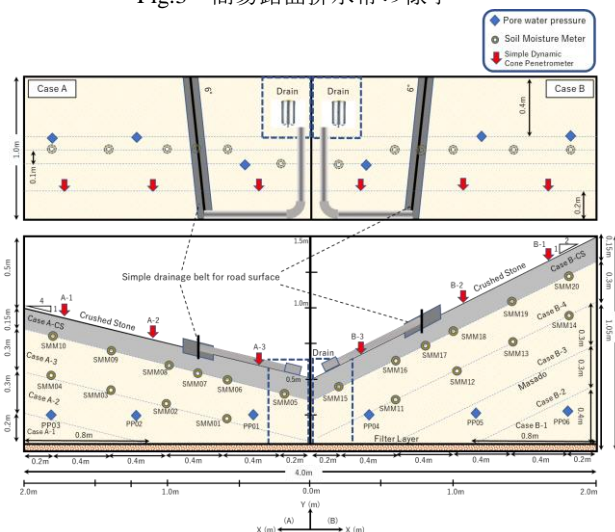


Fig.4 降雨実験平面・断面図

Table 1 地盤材料の物性値一覧

土質		まさ土	細粒分混じり砂質礫 (GS-F)
土粒子の密度 ρ_d	g/cm ³	2.634	2.709
粒度組成	礫分 %	40.2	73.8
	砂分 %	53.8	17.3
	シルト分 %	3.8	8.9
粘土分	mm	2.2	
最大粒径 D_{max}	mm	19.0	37.5
均等係数 U_c		14.726	114.110
50%粒径 D_{50}	mm	1.299	8.627
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	g/cm ³	1.884	-
最適含水比 w_{opt}	%	11.60	-
塑性指数 I_p		NP~4.5	-
最大密度 ρ_{max}	g/cm ³	1.884	2.278
最小密度 ρ_{min}	g/cm ³	1.309	1.669
三軸CD試験	c	kN/m ²	20.5
	ϕ	°	38.0

1年間の暴露による耐久性の確認試験が複数箇所にて行われた。試験期間中の降水量は高知県の平均降水量 2547.5 mm/year を超過する 2,895 mm~3,649 mm であり、未舗装路面の維持管理に支障をもたらす降水量であると考えられた。試験地の未舗装林道路路面勾配は 3度前後から 10度前後の緩急勾配を有しており、降雨強度の強弱にもよるが、施工後、10度の急勾配の未舗装路面上に運搬車両の轍の形成は確認されず、路肩上の掃流力による侵食・堆積の現象が確認された。一方、3度の緩急勾配では、轍も侵食・堆積も確認されなかった。試験時には、路面との馴染み（接触）を良好に維持するために、間伐材の板材を設置し耐久性を高め、試験期間中 3000 回前後の通行回数に対し、ベルトの老朽化は確認されておらず、未舗装林道路路面の維持管理に資する機能を有していると評価されている。

3. 実験方法

降雨実験の様子と実験断面を Fig.3, Fig.4 にそれぞれ示す。実験実施にあたり、実験装置、実験材料、計測を含めた実験計画について、以下に順を追って説明する。

3.1 実験装置

Fig.3, 4 に示されている降雨実験に供した土槽の内寸は、長さ 4.0m×幅 1.0m×深さ 1.5m で中仕切り版 1 枚が設置されている。底板には排水溝が設置されており、模型地盤への給排水が可能な構造となっている。また、土槽側面中央

部は、アクリル板となっており、限定的ではあるが内部の様子が確認可能な構造である。

Fig.5 に示す装置は降雨装置であり、実験で使用した土槽の外形（外寸：幅 1.3 m、長さ 4.3 m、高さ 1.7 m）を跨ぐ構造を有し、降雨範囲内（1 m×1.8 m）に均一な降雨が実現可能な構造である。散水機構は逆 U 字ノズル式+降雨針であり、降雨針 500 本をモーターで同時に振動させることにより均一な降雨を発生させることが可能で、土槽上 2.0m の高さから降雨を発生させることが出来る。また、雨滴径を f 1.7~3.0 mm の範囲で可変とし、かつ降雨強度は 10~80mm/h までの制御が可能となっている。

3.2 実験材料および造成方法

本研究では Fig.4 に示す様に、緩急勾配（ケース A）および急勾配（ケース B）の 2 ケースの試験体を作製している。なお、ケース B で安定計算（Fellenius 法）を行ったところ、円弧すべり安全率は 4.1 を示し、十分に安定していることを確認した。降雨実験では、上述の通り、2 ケースを同時に実施できるように、土槽は、中央部に仕切り板を設置し、1 段面を L2.0m として使用した。なお、この仕切りによって、模型斜面法面は対面として造成している。ケース A の斜面勾配は 1:4、ケース B は 1:2 として、表層路面は層厚 30cm の碎石（C-40）、下層地盤はまさ土を使用した。これらの地盤材料の物理的性質と粒径加積曲線を Table 1 および Fig.6 にそれぞれ示す。

模型斜面の造成に関し、まさ土は 1 層 30cm 撒き出し転圧した。締固め度 D_c はケース A で 91.6%、ケース B で

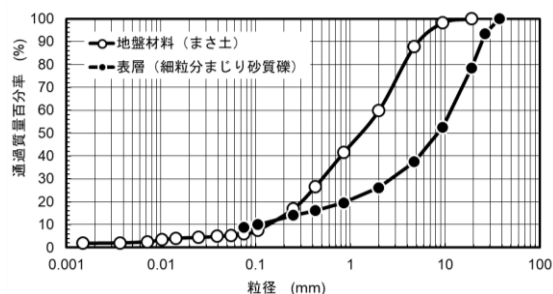


Fig.6 粒径加積曲線

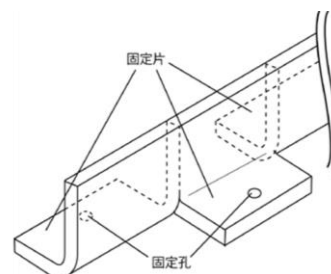


Fig.9 仕上がり図 (参考文献3)を引用)



Fig.7 路面簡易排水帯



Fig.8 モルタル塗布とベルトの設置の様子

91.5%とほぼ同等であった。造成過程において、降雨時の浸透量等を確認するための土壌水分計、間隙水圧計を設置した。

路面排水帯は、Fig.7 に示す切り込みのある実際のものを使用した。模型斜面造成後、Fig.8 に示すように模型帯部を設置し、モルタルの塗布し路面との馴染みを確保し、Fig.9 に示す様に仕上げた。

3.3 実験ケースおよび散水方法

実験ケースおよび実験条件について、Table1 に示す。実験は、2分割した土槽の片方ずつのケースを対象に降雨散水を実施しており、ケース A, B ともに降雨強度を漸増させ、Phase01~06 の条件で実験が行われた。降雨実験では、間隙水圧、土壌水分量の変化に加え、表面流と地中への浸透量も計測した。なお、表面流強度は、模型斜面下流部における流量を計測したデータであり、表面流量が安定した期間のみをピックアップし強度に変換したものを安定表面流強度として算定した。

4. 実験結果

目視による降雨侵食、各種計測結果に基づく浸透特性および動的コーン貫入試験によるベルト回りの地盤の支持力確認結果について、順を追って説明する。

Table 2 実験条件

ケース	時刻	概要	降雨強度(mm/hr)
Case A (1日目)	14:25	散水開始 (Phase01)	15.6
	14:50	雨量を変更 (Phase02)	28.8
	15:15	散水終了	
	15:55	散水開始 (Phase03)	57.6
	16:20	散水終了	
Case B (3日目)	11:10	散水開始 (Phase01)	20.4
	11:35	雨量を変更 (Phase02)	39.6
	12:00	散水終了	
	12:40	散水開始 (Phase03)	66.0
	13:05	散水終了	
	13:31	散水開始 (Phase04)	189.0
	13:41	雨量を変更 (Phase05)	219.0
13:51	雨量を変更 (Phase06)	252.0	
13:56	散水終了		
Case A (3日目)	14:31	散水開始 (Phase04)	108.0
	14:41	雨量を変更 (Phase05)	138.0
	14:51	雨量を変更 (Phase06)	168.0
	14:56	散水終了	

Table 3 表面流計測結果

実験 ケース	Phase	降雨時間	総表面流量	表面流強度	安定表面流強度	降雨強度
		min	cc	mm/h	mm/h	mm/h
A	Phase01	25	0	0.0	0.0	15.6
	Phase02	25	1000	2.0	2.0	28.8
	Phase03	25	1500	3.0	11.5	57.6
	Phase04	10	6250	31.3	34.7	108.0
	Phase05	10	9400	47.0	47.0	138.0
	Phase06	5	5600	56.0	56.0	168.0
B	Phase01	25	0	0.0	0.0	20.4
	Phase02	25	50	0.1	1.3	39.6
	Phase03	25	5500	11.0	13.8	66.0
	Phase04	10	16400	82.0	82.0	189.0
	Phase05	10	17400	87.0	87.0	219.0
	Phase06	5	9150	91.5	91.5	252.0

4.1 降雨侵食に関する目視確認

Table 3に各フェーズの表面流強度、Fig.10に各試験フェーズ直後の斜面の状況をそれぞれ示す。後述するが、各フェーズにおいて、降雨強度の増加に伴い表面流強度も増加していることがわかるが、Fig.10を確認すると、すべての実験終了時に表面流によって、地表面の細粒分が流出しベルト周辺部に溜まっていることがわかる。これは、他の実験⁵⁾とも同様な傾向を示すものであり、両ケース共に同様であった。

4.2 表面流に関する検討

Fig.11に雨量と表面流に関する時刻歴を示す。なお、ケースAに関しては、実験開始から終了まで、Table 2に示す様に中一日要したため、Phase01~03と04~06に分けて表

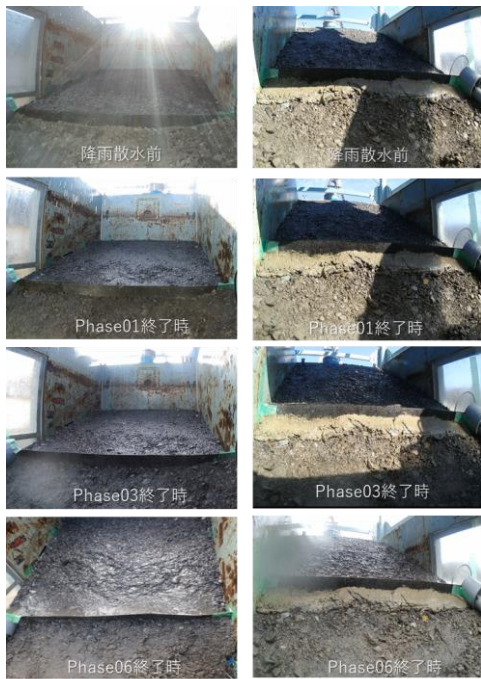


Fig.10 各フェーズ終了後の模型斜面の様子

示した。同図より、ケースに拘わらず、雨量の増加に応じ表面流が生じる定性的な傾向が読み取れる。また、表面流の発生傾向として、Phase03以降に顕著となっており、それまでは、雨量が少ないこともあり、地表面への浸透が生じていたものと判断される。

次に、降雨強度と表面流の関係について、Fig.12に示す。プロットは、グラフ原点から順に、Phase01から06までのデータを示している。同図は 表面流強度および安定表面流強度を示しており、両者の傾向に相違はない。降雨強度が100 mm/h、あるいはPhase03までは、両ケースの表面流は同様な傾向を示すが、更に降雨強度は大きな場合には、ケースBの表面流が増える傾向にある。また、降雨強度150 mm/hを超えてくると、表面流が頭打ちの傾向を示していることがわかる。これは、地中の飽和度がある程度上がってきた段階で地中への浸透が減少すること、ケースBの斜面勾配が急であることから、表面を流下する成分がより顕著になるためであると考えられる。

4.3 地中内への浸透特性

Fig.13, 14 にケースA, Bにおける土壌水分計および間隙水圧系による計測結果を時刻歴でそれぞれ示す。同図は、時刻を拡大し、Phase01~03 とPhase04~06 に分けて示した。なお、Phase01~03 は、比較的同様な散水条件が確保されていたが、Phase04~06 は異なる散水強度となっていること、更に、両ケースにおいて、Phase03 とPhase04 との無降雨期間が異なっていることに留意が必要である。

ケースAの土壌水分計による計測結果に着目すると、GL-0.15 mのPhase01~03 の結果より、ベルト直下のSW07 が反応し、次にベルト上流のSW08 が反応している。その次に最下流のSW05 の反応が確認できるが、ベルト下流の

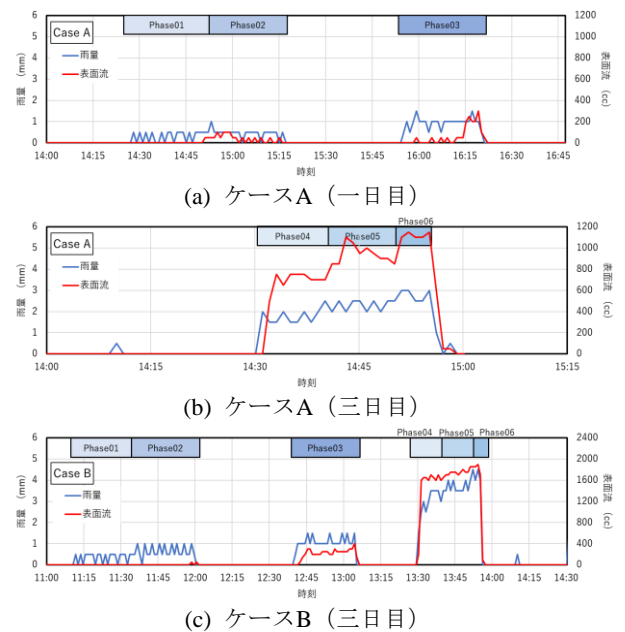
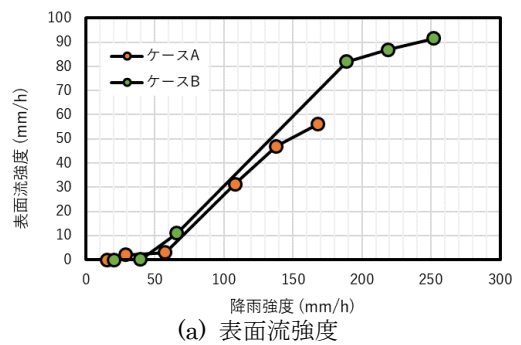
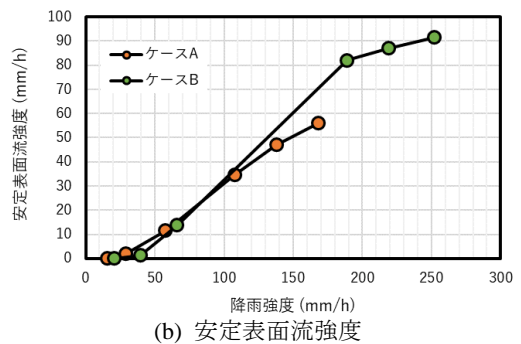


Fig.11 雨量と表面流に関する時刻歴



(a) 表面流強度

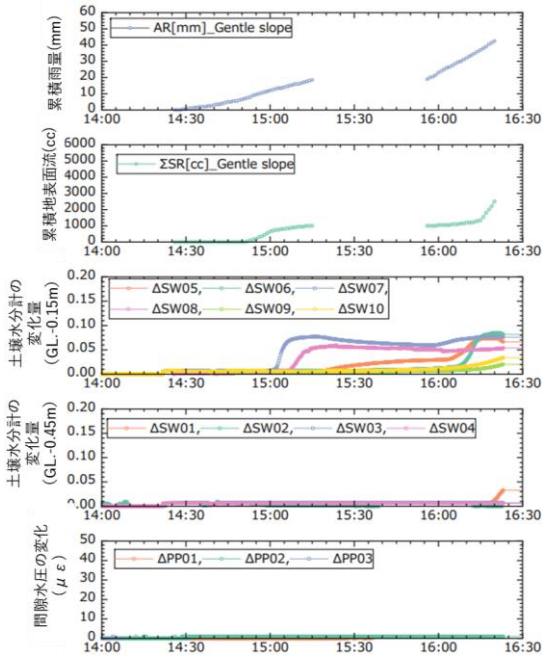


(b) 安定表面流強度

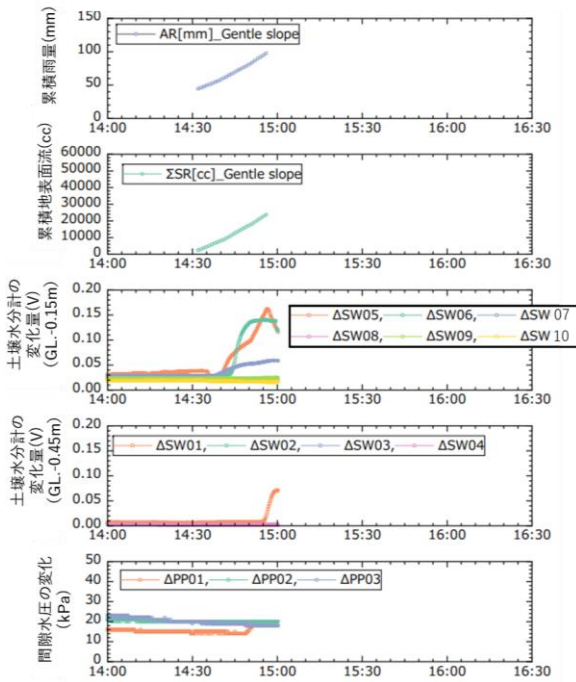
Fig.12 降雨強度と表面流の関係

SW06 より最下流のSW05 が早く反応した理由は不明である。一方、ケースBの計測結果については、GL-0.15 mのPhase01~03 の結果より、ベルト直下のSW17 が反応し、次いで下流のSW16 が反応した。その次にベルト上流のSW18 の反応が見られた。GL-0.15mの境界層（砕石-マサ土間）に、浸透流が流れたことが推測される

次に 間隙水圧計の計測結果について述べる。基本的に、降雨時あるいは後に浸潤線等の水位は発生していないため、間隙水圧計の反応は殆ど無いものと判断される。もともとは、浸潤状態でなく、センサーのフィルター部が飽和していないことから、地表面からの降雨浸透に伴う大気圧

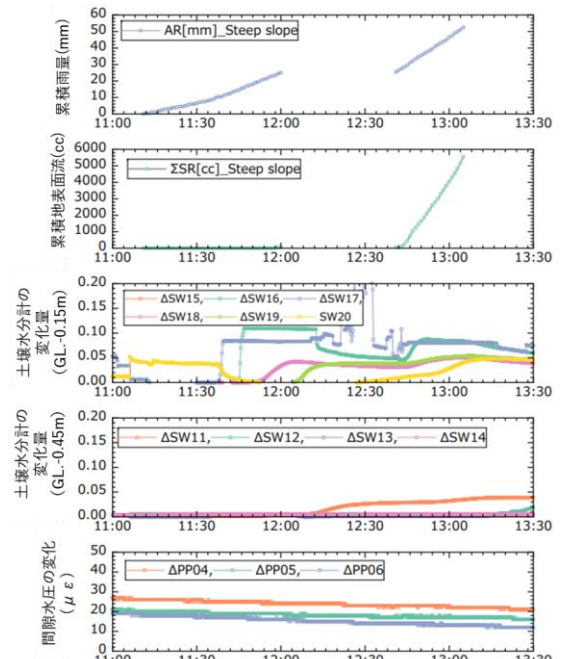


(a) Phase01~03

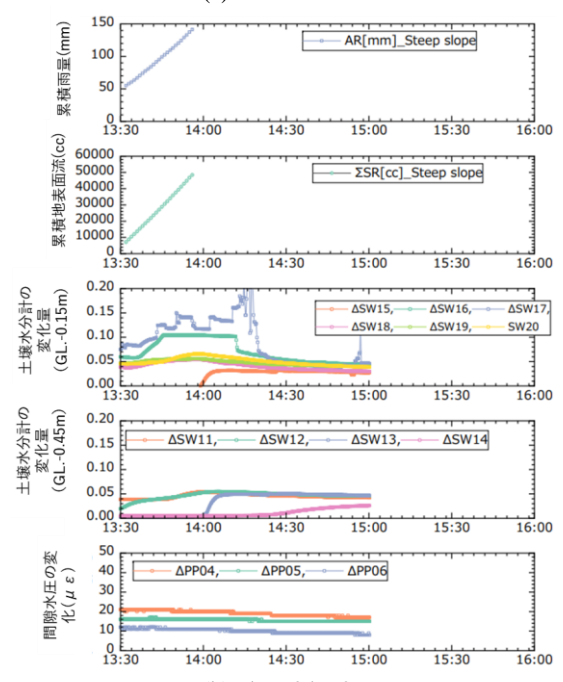


(b) Phase04~06

Fig.13 地盤内の計測結果 (ケースA)



(a) Phase01~03



(b) Phase04~06

Fig.14 地盤内の計測結果 (ケースB)

の変化を捉えていると考えられる。

4.4 法面の変形

急勾配であるケースBに対し、デプスカメラを用いた地表の変状計測を実施した。デプスカメラとは、Fig.15に示す左カメラと右カメラのように、平行に並んだ2台のカメラで対象物を撮影することで、ステレオ写真測定の原理を用いてカメラからの水平方向距離(深度距離)を計測することができるものである。デプスカメラのキャリブレーション後に計測を試み、極力、計測値の誤差が小さくなるように調整し、降雨時の法面の形状変化の計測を試みた。計測は、ケースBのPhase04~Phase06を対象とした。時

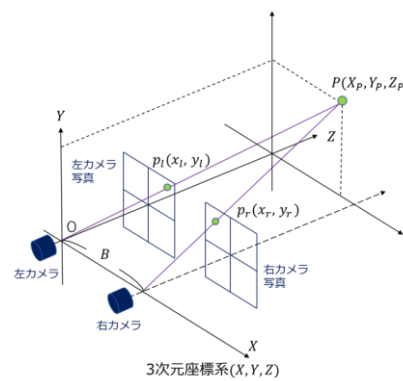


Fig.15 対象物Pとデプスカメラの幾何学関係

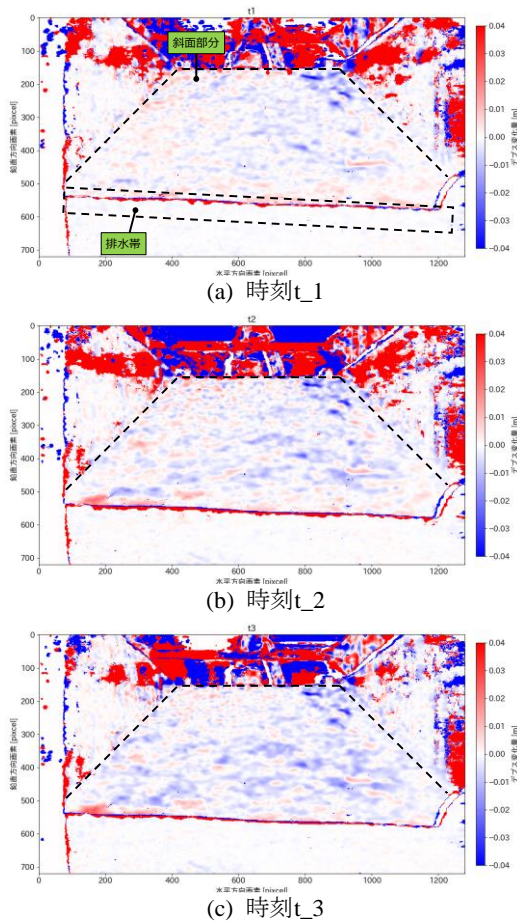


Fig.16 デプス変化量

刻はPhase04 開始前(13:30)を t_0 とし、各Phase終了後の時刻をそれぞれ、 t_1 、 t_2 、および t_3 として各時刻の変位を示した。

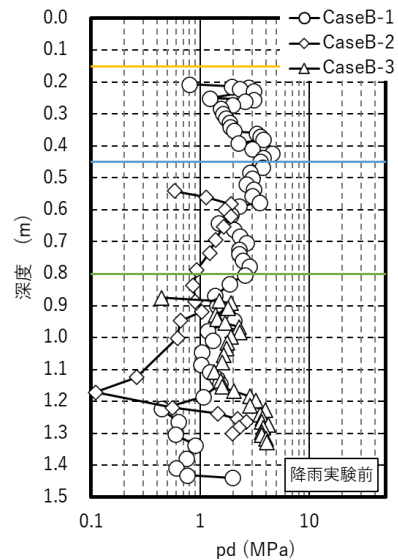
Fig.16 にPhase04 開始時の t_0 を基準とした各時刻のデプス変化量を示す。デプスの見方として、ケースB法面を正面から撮影しており、手前に近づくときの変動量として赤、離れるとき負の方向への動きを捉え青色を示す。法面の下部側に注目すると、降雨履歴が進むにつれてデプスが青色への変化が顕著となり、水平方向の変化として見るかぎり、法面が後退している結果と解釈できる。また、路面排水帯付近の法面部分に注目すると、正の方向である赤色に変化している部分もみられ、該当部分は法面が孕み出していることから、降雨に伴う若干の変状があったことが認められる。最も降雨強度の激しい期間 (Phase04~06) におけるデプス画像の変化を捉えることはできたが、降雨による計測値への影響等については、今後の課題である。

5. 路面排水帯周りの支持力確認

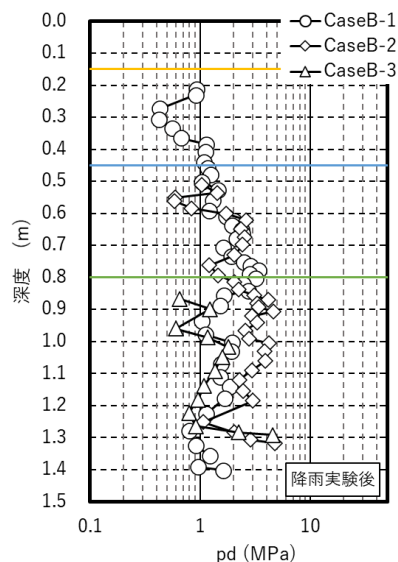
降雨実験時、路面排水帯周辺地盤の降雨浸透の変化に伴うトラフィカビリティの確認のため、動的コーン貫入を実施し、林道の機能維持についての検討を行った。

5.1 試験方法

支持力やトラフィカビリティの確認にあたり、Fig.17に



(a) 降雨散水前



(b) Phase03終了時

Fig.17 コーン貫入試験結果

示す軽量簡易動的コーン貫入試験⁶⁾(以下、PANDAと称す)を行いコーン先端抵抗 q_a を求めた。PANDAは、ハンマーによる打撃でロッドとその先端に接続したコーンを地盤に打ち込み、そのときの1打撃毎に得られることから、空間分解能の高いデータとなる。

本試験の実施にあたり、Fig.4に示す位置で各ケース3箇所ずつ実施した。本報では、ケースBで実施された降雨散水前、Phase02およびPhase03後の結果を以下に示す。

5.2 試験結果

Fig.17に、ケースBにおける試験結果を示す。降雨散水前後でいずれもばらつきは大きく、 q_a の深度分布のままだと変化を捉えるのが困難である。そこで、Fig.18に表層の碎石層の q_a の平均値、また、碎石層の下位に造成したまさ土層上位30cmの層厚部分の q_a の平均値を求め、降雨散水前後で比較を行った。路面排水帯の設置個所近くは、模型

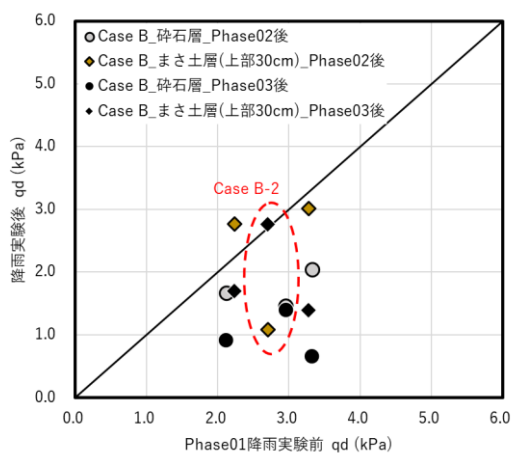


Fig.18 降雨前後の平均動的コーン貫入指数の比較

斜面中央部付近のB-2の調査箇所である。したがって、同図においてB-2に着目すると、降雨浸透後に表層の砕石層ではばらつきがあり、降雨前から q_d が1 MPa程度減じている様子がわかる。一方、まさ土についてはばらつきが認められる。直接、車両等を支持する砕石層については、B-1おとびB-3の結果と比較すると、やや小さな q_d を示している。大型普通ブルドーザの走行が可能なコーン指数は700 kPa、ダンプトラックでも1200 kPaであり⁷⁾、慎重な解釈を要するが、造成直後かつ路面排水帯の施工直後であることも考慮すると、支持力的に大きな問題となり得ない結果ではないかと推察される。

6. まとめ

既往の検討結果⁴⁾から、急勾配の未舗装路面上に運搬車両の轍の形成は確認されていないが、路肩上の掃流力による侵食・堆積の現象は確認された。一方、緩勾配では、轍も侵食・堆積も確認されていない。また、弱点となり得るベルト上・下の曲げの耐久性についても、3000回前後の通行回数に対し、ベルトの老朽化は確認されなかったことがわかっている。これに加え、本検討において実施した一連の結果を以下にまとめる。

降雨に伴い、表層の砕石層の細粒分が流れ出し、ベルト部での若干の堆積が認められた。これは、既往の研究で観察された事象⁵⁾と同様である。また、降雨に伴う表面流については、法面勾配の違いがそれほど明確ではなかったが、降雨強度150 mm/hを超えてくると、頭打ちの傾向を示していることから、路面排水帯の性能が重要となってくる。今回の場合は十分機能していた一方で、地中への降雨浸透による支持力への影響が懸念された。浸透特性としては、土壌水分計の計測結果から、ベルト直下から浸透しやすい傾向が確認された。すなわち、ベルト周辺の支持力への影響を検討する必要があるため、簡易動的コーン貫入試験による支持力確認を実施した。

支持力については、簡易動的コーン貫入試験を実施した。降雨後に、コーン指数が低下したものの、一般的なト

ラフィカビリティは確保されていると判断されるため、供用性への影響は少ないものと判断できる。

謝辞

本実験研究を進めるにあたり、有限会社宮地建材店の宮地宏卓代表取締役より、簡易路面排水帯の提供と施工に拘わるアドバイスを受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (気象庁訳)，“気候変動 2013 自然科学的根拠” 気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書第1作業部会報告書(2013), 63p.
- 2) 環境省，“日本国内における気候変動予測の不確実性を考慮した結果について (お知らせ)”，気象庁報道発表資料(2014).
- 3) 有限会社宮地建材，“新路面簡易排水帯ブンサンベルト”，<https://joho-kochi.or.jp/mono/market/catalog8/pdf/171.pdf>, 2023.03.20 閲覧.
- 4) 細田豊，“ブンサンベルト工現地試験報告書”(2013), 15p.
- 5) 中澤博志, 澤田豊, 石澤友浩, 檀上徹, “竹を用いたため池堤体の侵食対策に関する模型実験”，土木学会第76回年次学術講演会(2021)III-136.
- 6) Langton, D. D., “The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction”, *Ground Engineering*, September(1999), 33-34.
- 7) 佐藤厚子, “不良土対策マニュアル”，土研新技術ショーケース 2017 in 名古屋資料(2017).