

ジオシンセティックスを用いたキャッピングによる 廃棄物埋立地の雨水浸透制御に関する基礎的研究

九州大学工学部 学生会員 ○齊藤 雅裕
九州大学大学院工学研究院 正会員 小宮 哲平
九州大学大学院工学研究院 フェロー会員 島岡 隆行

1. 背景及び目的

最終処分場の埋立地では、埋立完了後、最終覆土（キャッピング）が施工される。キャッピング材には従来土質材が用いられてきたが、その代替材として、キャッピングの層厚を大幅に削減し、その分より多くの廃棄物を埋立処分することができるジオシンセティックス材（エンボス型排水材及び通気防水シート）（以下、GS材と呼ぶ。）¹⁾が注目されている。キャッピングの設計においては、浸出水処理量に直結する浸透率（降雨量に対する廃棄物層へ浸透する水量の割合）が重要である。石橋ら^{2),3)}はGS材を用いたキャッピングの浸透率と降雨強度の関係をGS材の施工条件（勾配、長さ）別に明らかにした。しかし、石橋らの関係式は定常状態におけるもので、「侵食防止層内の雨水浸透強度＝降雨強度」と仮定されており、浸透率が過剰に高く見積もられることが指摘されている。現実的な降水パターンと侵食防止層から排水層に流入する雨水の浸透強度（以下、排水層到達浸透強度）の関係を明らかにし、その関係と石橋らの関係式において降雨強度を排水層到達浸透強度と読み替えた浸透率-排水層到達浸透強度の関係式の組合せにより、現実的な浸透率の設計が可能になると考えられる。本研究では、現実的な降水パターンと排水層到達浸透強度の関係を明らかにすることを目的に、侵食防止層における不飽和浸透流解析を行った。

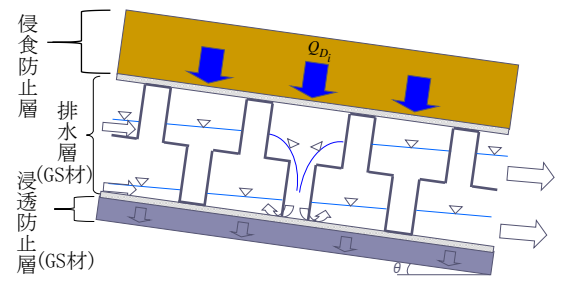


図1 GS材を用いたキャッピング

2. 研究方法

図1にGS材を用いた処分場の二次元断面の模式図を示す。侵食防止層の層厚を100 cmとし、鉛直一次元の不飽和浸透流の非定常解析を行った。表1にモデル式を示す。表面の境界条件として降水強度を、底面の境界条件として大気開放条件（ $\psi_m=0$ ）を与えた。初期条件として自然条件下における代表的な体積含水率分布として年間の平均的な体積含水率分布を与えた。具体的には、年間降水量から年間蒸発量を引いて求めた年間浸透量（1000 mm/年）を降水強度として与えた時の体積含水率分布の定常解である。降水強度は10、20、30、40 mm/hの4パターンとし、各降水強度の降水継続時間は、キャッピングが施工される埋立完了後から埋立地が廃止に至るまでの期間を30年程度と想定し、次式(1)の福岡県福岡地方の30年確率の長時間降雨強度式を用い、それぞれ25.70、9.06、4.64、2.74時間とした。

表1 モデル式

項目	式
水収支式	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial z}$
断面平均流速	$v = -K_{(\theta)} \frac{\partial \Phi}{\partial z}$
各層間の不飽和透水係数	$K_{(\theta)} = K_s S_e^{\frac{1}{2}} [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})]^2$
全ポテンシャル	$\Phi = \psi_m + z'$
位置水頭	$z' = z'_0 - z$
マトリックスポテンシャル	$\psi_m = \frac{1}{\alpha} [[Se]^{-1/m} - 1]^{1/n}$
有効飽和度	$Se = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)$

θ :体積含水率(-)、 t :時間(sec)、 v :流速(cm/s)、 z :侵食防止層表面からの高さ(cm)、 $K_{(\theta)}$:不飽和浸透係数(cm/s)、 Φ :全ポテンシャル(-)、 K_s :飽和透水係数(cm/s)、 S_e :有効飽和度(-)、 ψ_m :マトリックスポテンシャル(cm)、 z' :位置水頭(cm)、 z'_0 : $z=0$ における位置水頭(cm)、 $\alpha(1/cm), m(-), n(-)$:水分特性曲線パラメータ($m = 1 - 1/n$)
 θ_r :残留水分率(-)、 θ_s :飽和体積含水率(-)

表2 土質材料のパラメータ

名前	$\theta_r(-)$	$\theta_s(-)$	$\alpha(1/cm)$	$n(-)$	$K_s(cm/s)$
Loam	0.078	0.43	0.036	1.56	0.000288
Sandy Loam	0.065	0.41	0.075	1.89	0.00122
Loamy Sand	0.057	0.41	0.124	2.28	0.00405
Sand	0.045	0.43	0.145	2.68	0.00825

$$I = \frac{2669.8}{t^{0.75+20.87}} \dots (1)$$

ここで、Iは降水強度（mm/h）、tは降水継続時間（分）である。侵食防止層の土質材として4パターンを検討した。表2に各土質材の水分特性パラメータを示す。モデル式の

解法は差分法とし、 Δz を 5 cm、 Δt を 30 秒とした。

3. 結果及び考察

図 2 に侵食防止層が Loam、降水強度が 10 および 30 mm/h の場合の降水パターン、侵食防止層浸入強度（以下、浸入強度）、侵食防止層到達浸透強度（以下、浸出強度）の経時変化を示す。降水強度 10 mm/h では、降水強度と同程度の浸入強度で雨水は侵食防止層に浸入し、降水開始約 9.5 時間後から降水停止までの間は浸入強度と同程度の浸出強度で雨水は侵食防止層から排水層に浸出した。降水強度 30 mm/h では、降水強度が飽和透水係数（10.4 mm/h）よりも大きいため、侵食防止層が水分飽和状態になった時の浸入強度は飽和透水係数と同程度となり、浸入しなかった雨水は侵食防止層の表面上を勾配に沿って流出し、排除されたと考えられた。また、浸出強度は降水強度及び浸入強度に比べ、非常に小さな値を示した。

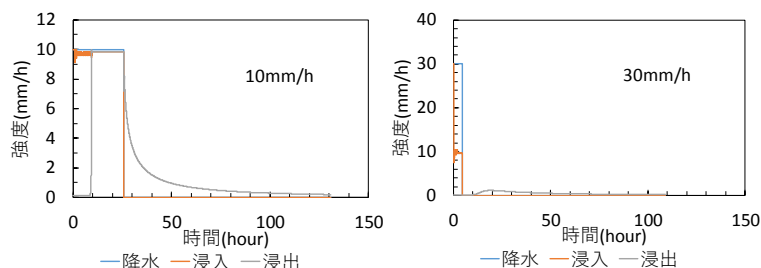


図 2 降水パターンと浸入強度および浸出強度の関係

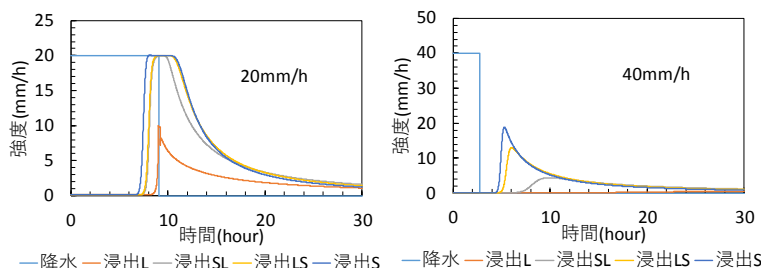


図 3 土質材による浸出強度の相違

図 3 に降水強度 20 および 40 mm/h の場合の侵食防止層の土質材による浸出強度の相違を示す。Loam、Sandy Loam、Loamy Sand、Sand の浸出強度をそれぞれ、浸出 L、浸出 SL、浸出 LS、浸出 S と表した。飽和透水係数の小さな土質材ほど流出応答が遅く、浸出強度のピーク値が低くなった。Loam の場合の浸出強度のピーク値が低く抑えられており、排水層に到達した水分の浸透継続時間も長くなる傾向がうかがえる。

表 3 に全ケースにおける水収支及び浸出強度を整理したものを示す。飽和透水係数の小さな Loam と Sandy Loam においては表面排除がみられ、降水強度が大きいほどその割合が大きいことが見て取れる。さらに、飽和透水係数の大きな土質材ほど最大浸出強度および平均浸出強度が大きくなり、浸出継続時間が短くなる傾向がみられる。降水継続時間の短い 30、40mm/h では最大浸出強度が降水強度を大幅に下回っている土質材が多いが、これは土質による保水力が働いているためだと考えられる。

表 3 に全ケースにおける水収支及び浸出強度を整理したものを示す。飽和透水係数の小さな Loam と Sandy Loam においては表面排除がみられ、降水強度が大きいほどその割合が大きいことが見て取れる。さらに、飽和透水係数の大きな土質材ほど最大浸出強度および平均浸出強度が大きくなり、浸出継続時間が短くなる傾向がみられる。降水継続時間の短い 30、40mm/h では最大浸出強度が降水強度を大幅に下回っている土質材が多いが、これは土質による保水力が働いているためだと考えられる。

4. まとめ

現実的な降雨パターン下における侵食防止層から排水層に浸出する浸透強度は、侵食防止層の土質材により異なり、降水強度よりも大幅に低くなる場合があることが示された。今後、実験により本研究で用いたモデルの精度の検証を行うとともに、侵食防止層の層厚が浸出強度に及ぼす影響についても検討し、最終的には石橋らの浸透率-降雨強度の関係式等を併用し、現実的な降雨パターン下における浸透率を求めていく予定である。

[参考文献] 1) 通気・防水シートキャッピング工法研究会パンフレット, <http://cp-kai.jp/data/pamphlet201112.pdf> (最終閲覧日: 2020 年 1 月 13 日). 2) 石橋俊将, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行: ジオシンセティックによる廃棄物埋立地キャッピングの雨水浸透抑制効果, 廃棄物学会論文誌, Vol.19, No.2, pp.101-109, 2008. 3) 通気・防水シートキャッピング工法研究会: 最終覆土代替材技術資料 (2018 年 5 月 14 日改訂), http://cp-kai.jp/data/t-data_fainal.pdf (最終閲覧日: 2020 年 1 月 13 日).

表 3 降雨強度と土質材におけるデータ

土質材	降水強度 (mm/h)	降水継続時間 (hour)	積算降水量 (mm)	表面排除率 (%)	排水層到達率 (%)	最大浸出強度 (mm/h)	平均浸出強度 (mm/h)	浸出継続時間 (hour)
Loam	10	25.7	257	2.22	97.8	9.83	1.93	124
	20	9.06	181	49.8	50.3	10.0	0.805	104
	30	4.63	139	64.8	35.4	1.15	0.457	99.1
	40	2.73	109	71.7	28.6	0.522	0.307	93.4
Sandy Loam	10	25.7	257	0	100	10.0	2.07	116
	20	9.06	181	0	18.2	20.0	1.71	101
	30	4.63	139	0.27	99.9	15.8	1.37	97.1
	40	2.73	109	18.5	81.8	4.42	0.902	95.2
Loamy Sand	10	25.7	257	0	100	10.0	2.57	91.2
	20	9.06	181	0	100	20.0	2.20	76.5
	30	4.63	139	0	100	23.5	1.80	72.9
	40	2.73	109	0	100	13.0	1.45	71.9
Sand	10	25.7	257	0	100	10.0	2.96	78.6
	20	9.06	181	0	100	20.0	2.62	63.8
	30	4.63	139	0	100	28.8	2.16	60.2
	40	2.73	109	0	100	18.8	1.76	58.7